



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

# Σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτροκινητήρων τύπου SRM

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**

**Επιβλέπων:** Χριστοφόρου Ευάγγελος  
Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

# Σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτροκινητήρων τύπου SRM

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**

Επιβλέπων: Χριστοφόρου Ευάγγελος  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις **21/03/2013**

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Τσετσέκου Αθηνά, Αναπλ. Καθηγητής .....(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

*Copyright © Κωνσταντόπουλος Χρήστος, 2013*

*Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.*

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Με αφορμή την ολοκλήρωση της, εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες στον κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη συνεχή καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και για τη συμβολή του στην κατανόηση πολλών επιμέρους θεμάτων.

Στην κα. Βώσσου Κλείω, Μηχανολόγο Μηχανικό, Διδάκτορα του ΕΜΠ, η οποία συνέβαλε στην μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική και στην βοήθεια κατανόησης του καινούριου, για εμένα, λογισμικού COMSOL Multiphysics.

Στην διδα. Βουρνά Ξένια, Διπλωματούχο Φυσικό και Υποψήφια Διδάκτορα του ΕΜΠ, η οποία συνέβαλε καταλυτικά στην αποπεράτωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία **LANDIS + GYR A.E.** που μας παραχώρησε χωρίς κανένα δισταγμό το υλικό το οποίο μελετήσαμε και με το οποίο θα κατασκευαστεί ο ηλεκτροκινητήρας μας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ηλεκτροκινητήρα με ταυτόχρονη μελέτη του υλικού από το οποίο απαρτίζονται τα σημαντικότερα τμήματα του ίδιου του ηλεκτροκινητήρα, δηλαδή, τον στάτη και τον δρομέα.

Για τον σκοπό αυτό, η διπλωματική έπρεπε να χωριστεί σε μέρη. Αρχικά μελετήθηκε ο τρόπος διαστασιολόγησης του υλικού μας. Αφού παραλάβαμε το υλικό (ταινία πυριτιούχου χάλυβα) από την εταιρεία, παρατηρήσαμε ότι η ταινία χαρακτηριζόταν από πλάτος (0,074m) οπότε με αρχική αυτή τη διάσταση σχεδιάστηκε και ο υπόλοιπος κινητήρας. Στη συνέχεια το σχέδιο εισήχθη στο πρόγραμμα του COMSOL Multiphysics όπου και πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των πεπερασμένων στοιχείων σύμφωνα με τον ηλεκτροκινητήρα που υπήρχε στη βάση δεδομένων του ίδιου του προγράμματος.

Ταυτόχρονα με τη μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιήθηκε μικροδομικός χαρακτηρισμός και μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού τόσο στην κατάσταση στην οποία παραλήφθηκε (as received δοκίμιο) όσο και μετά από ισοθερμοκρασιακή ανόπτηση (400°C, 750°C, 950°C) για διάφορους χρόνους παραμονής. (30min, 1h, 2h). Τα δοκίμια αυτά στη συνέχεια μελετήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο, XRD, και SEM. Ως προς την ποιοτική μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού, δημιουργήθηκαν κατάλληλα πηνία στις διαστάσεις των δοκιμίων για τη μέτρηση των βρόχων υστέρησης.

Λέξεις κλειδιά: Κινητήρας μεταβλητής μαγνήτισης, ηλεκτρικός χάλυβας, βρόγχος υστέρησης.

# ABSTRACT

The goal of this dissertation was to develop a program to calculate the optimal components combination for an electric motor (stator and rotor). Initially, the main motor performance and efficiency specifications are prescribed. Subsequently, the design study is performed in order to enable all motor components to meet the specified technical standards.

The design procedure which has been adopted in the present study is described.. It is a complex procedure which involves the initial design of the motor dimensions by means of corresponding theoretical equations and the utilization of computation tools for detailed field analysis such as finite elements methods.

Finally, detailed metallurgical characterization of the material was undertaken to correlate with its mechanical and magnetic properties. The specimens were examined by light microscopy, XRD, and SEM

key words: switched reluctance motors, SRMs, silicon steel, COMSOL Multiphysics, hysteresis loop.

# Περιεχόμενα

## 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Μηχανές Μεταβλητής Μαγνήτισης - SRMs

1	Ιστορική Αναδρομή .....	12
2	Περιγραφή και λειτουργία των SRMs .....	13
3	Περιγραφή της δομής των SRMs.....	14
3.1	ΔΥΝΑΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ SRMs.....	16
4	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΑΣ SRM .....	19
5	Βιβλιογραφία.....	23

## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Σχεδίαση μίας 6-4 SRM

1	Εισαγωγή .....	25
2	ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ .....	26
3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ .....	31
3.1	Διάμετρος και μήκος .....	31
3.2	Αριθμός ελιγμάτων .....	32
3.3	Υπολογισμός απωλειών Μηχανής Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης .....	33
3.4	Απώλειες Χαλκού .....	33
3.5	Εκτίμηση απωλειών πυρήνα .....	37
3.6	Επιλογή τόξων πόλων.....	38
3.7	Ελάχιστη τιμή τόξου στάτη για δυνατότητα εκκίνησης .....	38
3.8	Άνω όριο για το τόξο πόλου του δρομέα.....	40
3.9	Πάχος σώματος στάτη.....	44
3.10	Διαστάσεις πηνίων στάτη.....	45
3.11	Ύψος πόλου στάτη.....	45
3.12	Εξωτερική διάμετρος στάτη .....	46
3.13	Πάχος σώματος δρομέα .....	46
3.14	Ύψος σώματος δρομέα.....	46
4	Αποτελέσματα.....	47
5	Βιβλιογραφία.....	48



### 3° Κεφάλαιο

#### Μοντελοποίηση της SRM στο COMSOL Multiphysics

1	Εισαγωγή .....	50
2	Μοντελοποίηση στο COMSOL Multiphysics .....	51
2.1	Μερική διαφορική εξίσωση .....	51
2.2	Γεωμετρικός διαχωρισμός .....	51
2.3	Επιλογή υλικού .....	52
2.4	Παραγόμενη τάση .....	53
3	Σχεδιασμός του 6/4 SRM στο COMSOL.....	54
3.1	Τμηματοποίηση του σχεδίουγια .....	55
3.2	Materials (Υλικά) .....	58
3.2.1	Air(αέρας).....	58
3.2.2	Soft Iron(without losses) (μαλακός σίδηρος χωρίς απώλειες) .....	59
3.3	Rotating Machinery, Magnetic(rmm).....	59
3.3.1	Ampere's Law 1 .....	60
3.3.2	Electric Field Transformation 1 (Μετασχηματισμός του ηλεκτρικού πεδίου) 60	
3.3.3	Magnetic Insulation 1 (Μαγνητική θωράκιση) .....	61
3.3.4	Initial Values 1 .....	61
3.3.5	Prescribed rotational velocity.....	62
3.3.6	Magnets Outwards .....	62
3.3.7	Magnets Inwards .....	63
3.3.8	Iron .....	63
3.3.9	Continuity 1 .....	64
3.3.10	Mesh (πλέγμα).....	64
3.4	Μελέτη του μοντέλου .....	65
4	Βιβλιογραφία.....	70

### 4° Κεφάλαιο

#### Χαρακτηρισμός του υλικού

1	Χάλυβας.....	72
1.1	Γενικά.....	72

1.2	Ηλεκτρικός Χάλυβας.....	73
1.2.1	Εισαγωγή .....	73
1.2.2	Μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες .....	75
1.2.3	Ταξινόμηση.....	75
1.2.4	Κύρια κραματικά στοιχεία του ηλεκτρικού χάλυβα .....	76
2	ταξινόμηση μαγνητικών υλικών.....	77
2.1	Εισαγωγή.....	77
2.2	Διαμαγνητικά υλικά .....	78
2.3	Παραμαγνητικά υλικά .....	78
2.4	Φερρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	79
2.5	Αντιφερρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	80
2.6	Φερριμαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	80
2.7	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ .....	80
2.7.1	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	80
2.7.2	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ .....	81
2.7.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ.....	81
2.7.4	ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ .....	83
2.7.5	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.....	83
2.7.6	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE .....	83
2.8	ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ .....	83
3	Μαγνητικές περιοχές και Μαγνητικά τοιχώματα.....	85
3.1	Μαγνητικές περιοχές .....	85
3.2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ .....	86
3.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ .....	87
3.4	ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ.....	88
3.5	ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ .....	89
4	Μικροδομικός χαρακτηρισμός του υπο εξέταση υλικού.....	91
4.1	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	91
4.2	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	92
4.2.1	Κοπή δοκιμίων.....	92
4.2.2	Εγκιβωτισμός.....	92
4.2.3	Λείανση .....	92
4.2.4	Στίλβωση.....	93
4.2.5	Χημική προσβολή.....	93

4.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ .....	93
4.3.1	Οπτικό Μικροσκόπιο (ΟΜ) .....	93
4.3.2	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) .....	93
4.3.3	Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy).....	94
4.3.4	Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD) .....	94
4.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	94
4.4.1	Δοκιμές μάκρο σκληρομέτρησεις .....	94
4.5	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ.....	95
4.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	98
4.6.1	ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ (ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ) .....	98
4.6.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ (ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ).....	101
4.6.3	XRD ΑΚΤΙΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΜΑΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ .....	103
4.6.4	ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΜΕΣΩ EDS ΑΝΑΛΥΣΗΣ).....	106
4.6.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ .....	108
4.7	ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD-ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD) .....	110
4.8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD.....	112
4.8.1	Δομικός χαρακτηρισμός μέσω τεχνικής EBSD .....	112
4.9	ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	114
4.9.1	Συσχέτιση μαγνητικής διαπερατότητας με σκληρότητα και μέγεθος κόκκου .....	115
5	Βιβλιογραφία.....	116

# 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

## Μηχανές μεταβλητής Μαγνήτισης- SRMs

# 1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιδέα των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Motors- SRMs), είναι πολύ παλιά και χρονολογείται γύρω στα 1838 όταν μία ατμομηχανή κινήθηκε από αυτό τον κινητήρα στη Σκωτία. Ο "βηματικός" κινητήρας που περιλαμβάνει μερικούς από τους μελλοντικούς SRM εφευρέθηκαν και έλαβε πιστοποιητικό ευρεσιτεχνίας την δεκαετία του 1920 στην Aberdeen από τον C.L.Walter. Το 1969, η Nasar S.A. εισήγαγε τη βασική ιδέα του SRM που χρησιμοποιούμε σήμερα. Την περίοδο από τα τέλη της δεκαετίας του 70 ήταν μια εποχή ανάπτυξης των εννοιών των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης που βοήθησε στην ανάπτυξη των μεταβλητών μηχανών [1,2]. Από τότε έχει πραγματοποιηθεί μία τεράστια ανάπτυξη γύρω από το σχεδιασμό και τον έλεγχο των μηχανών αυτών. Η ίδια η φύση των μηχανών αυτών επέβαλλε την ανάπτυξη τους, με ταυτόχρονη ανάπτυξη του σχεδίου και του ελέγχου της μηχανής κάτι το οποίο δεν είχε γίνει για καμία άλλη μηχανή. Ενώ ο [2] ξεχώρισε στην ανάπτυξη της ιδέας της μηχανής, καθώς επίσης και στη θεμελίωση του ελέγχου της, η δημοσίευση του Krishnan [3], περιγράφει τη διαδικασία σχεδιασμού μιας μηχανής εξισώνοντας τον σχεδιασμό της με τον σχεδιασμό άλλων μηχανών με βάση τις διαστάσεις τους. Υπάρχει μία πληθώρα δημοσιεύσεων οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία του σχεδίου, το οποίο έχει βασιστεί στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, αυτή την αλληλεξάρτηση θέλει να καταδείξει, δηλαδή ότι το σχέδιο της μηχανής βασίζεται στην αλληλένδετη σχέση που κυριαρχεί μεταξύ της μηχανής και την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία γίνεται ένα εργαλείο επαλήθευσης. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης περιγράφονται λεπτομερώς [4] και στη συνέχεια σ'ένα πλήθος από διαφορετικές δημοσιεύσεις. Ο σχεδιασμός της μηχανής όπως περιγράφεται παρακάτω, είναι διαδικασία σχεδιασμού βήμα προς βήμα με εφαρμογή των βασικών αρχών ηλεκτρομαγνητισμού.

## 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ SRMS

Ως μηχανή μεταβλητής αντίστασης (Reluctance Machine-RM) ορίζουμε εκείνη την ηλεκτρική μηχανή, στην οποία η ροπή αναπτύσσεται από την εγγενή τάση του κινητού μέρους (δρομέα) να περιγράψει προς εκείνη τη θέση, στην οποία η επαγωγή του τυλίγματος που έχει διεγερθεί μεγιστοποιείται. Αυτός ο ορισμός περιλαμβάνει τόσο τις switched όσο και τις synchronous μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (reluctance machines). Οι synchronous reluctance machines διαθέτουν κυλινδρικό δρομέα με κατάλληλη κατασκευαστική διάταξη και διαμόρφωση των φύλλων της μαγνητικής λαμαρίνας, ώστε να μην παρουσιάζει την ίδια μαγνητική αντίσταση προς όλες τις κατευθύνσεις, και τροφοδοτούνται γενικά από συμμετρικό σύστημα ημιτονοειδών τάσεων. Οι μηχανές μεταβλητής μαγνήτισης (switched reluctance machines) διαθέτουν στάτη και δρομέα με έκτυπους πόλους και η ονομασία switched προκύπτει από την ανάγκη να εφαρμόζονται και να διακόπτονται ρεύματα με συγχρονισμό σε διαδοχικά τυλίγματα, ώστε να επιτευχθεί συνεχόμενη περιστροφή. Και οι δύο παραπάνω τύποι ηλεκτρικών μηχανών εμπίπτουν στις σύγχρονες μηχανές και η παραπάνω διάκριση γίνεται με σκοπό να προσδιοριστεί το είδος της εκτύπωσης, δηλαδή αν είναι οιονεί ή φυσική. Σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας θα μας απασχολήσουν μόνο οι switched μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και εφεξής αυτές θα εννοούνται παντού με το αρκτικόλεξο SRM[6].

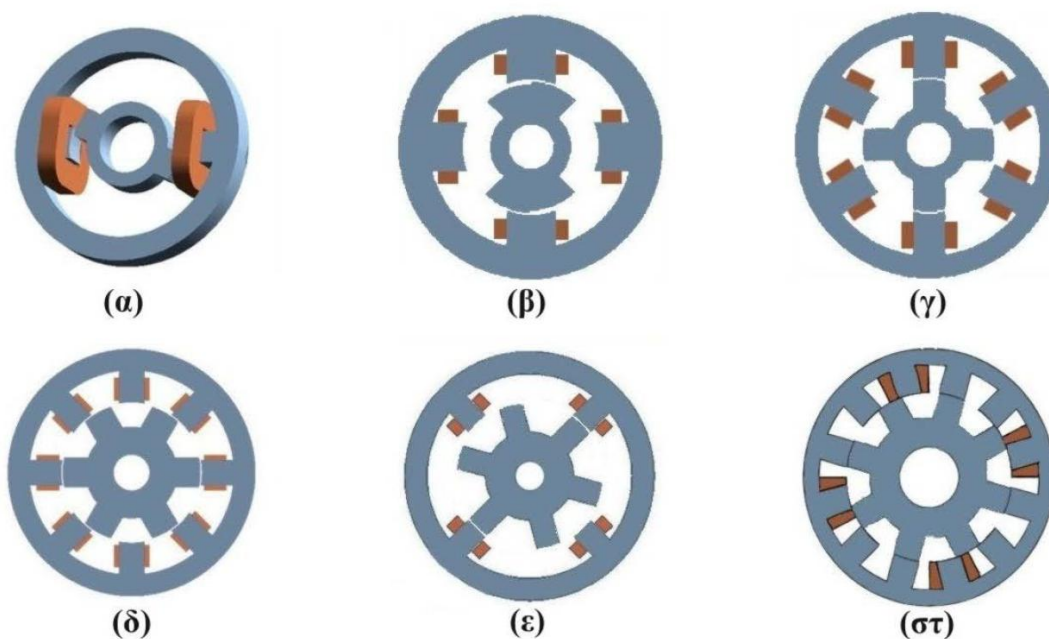
### 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΩΝ SRMS

Η δομή μιας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι αρκετά απλή. Ειδικότερα αποτελείται από ένα στάτη με έκτυπους πόλους ( από φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας) και ένα δρομέα με έκτυπους πόλους, ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευάζεται από φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας. Ωστόσο στις εφαρμογές υψηλής απόδοσης τα φύλλα του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι λεπτότερα από εκείνα που χρησιμοποιούνται συνήθως για AC μηχανές και είναι φτιαγμένα για παράδειγμα από πυριτιούχο λαμαρίνα, ώστε να μειώνονται οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Ο λόγος είναι ότι σε μία SRM η διακοπτική συχνότητα είναι υψηλότερη από εκείνη για μία μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος συγκρίσιμης διαστασιολογίας και ταχύτητας.

Ο δρομέας δεν απαιτεί τυλίγματα από μόνιμους μαγνήτες. Ο αριθμός των πόλων του στάτη και του δρομέα είναι γενικά διαφορετικός ( $N_s \neq N_r$ ), αλλά εξαρτάται πάντα από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Οι συνηθέστεροι συνδυασμοί που συναντώνται είναι :  $N_s = 6$  και  $N_r = 4$ ,  $N_s = 8$  και  $N_r = 6$ ,  $N_s = 12$  και  $N_r = 10$  κλπ. Γενικά λοιπόν ισχύει ότι  $N_s - N_r = 2$ . Ο λόγος είναι ότι επιλέγοντας ένα παραπάνω ζευγάρι πόλων στον στάτη από τον δρομέα, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη υψηλή μέση τιμή ροπής και χαμηλή διακοπτική συχνότητα στο μετατροπέα. Ακόμα επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι ο δρομέας δε θα βρίσκεται ποτέ σε θέση όπου η ηλεκτρομαγνητική ροπή από όλες τις εν δυνάμει τροφοδοτούμενες φάσεις του στάτη είναι ταυτόχρονα μηδενική. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των πόλων του στάτη και δρομέα τόσο μικρότερες θα είναι και οι προκύπτουσες διακυμάνσεις στη ροπή. Επίσης είναι δυνατόν να επιλεγεί ο αριθμός των πόλων έτσι ώστε να ισχύει η παρακάτω σχέση  $N_s - N_r = -2$ . Για τον ίδιο αριθμό πόλων στάτη, το πλεονέκτημα που προσφέρει ο μεγαλύτερος αριθμός πόλων δρομέα είναι η μικρότερη γωνία βήματος και πιθανόν, μικρότερες κυματώσεις στη ροπή. Σε ένα τέτοιο σχεδιασμό υπάρχει το μειονέκτημα ότι το εύρος του πόλου του στάτη μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου της αυτεπαγωγής στην ευθυγραμμισμένη θέση προς την αυτεπαγωγή στη μη ευθυγραμμισμένη θέση του τυλίγματος του στάτη, που αντιστοιχεί στον πόλο αυτό. Θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφεύγεται επιλογή περιττού αριθμού πόλων δρομέα, καθώς αυτό διαταράσσει την ισορροπία των δυνάμεων που δρουν στην κατασκευή. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να έχουμε διατάξεις, όπου

υπάρχουν δύο οδοντές σε κάθε πόλο στάτη. Αυτό θα οδηγήσει σε μία αύξηση της ροπής ανά μονάδα ρεύματος, αλλά θα αυξήσουν επίσης και οι απώλειες μαγνήτισης. Γι' αυτό το λόγο τέτοιες διατάξεις είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων.

Τα τυλίγματα του στάτη σε διαμετρικά αντίθετους πόλους (δόντια) συνδέονται σε σειρά για να σχηματίσουν μια φάση στάτη. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξηγηθεί ότι μία μηχανή με 6 πόλους στάτη και 4 πόλους δρομέα, τότε γίνεται αντιληπτό ότι είναι μια τριφασική μηχανή. Η μηχανή με  $N_s = 12$  και  $N_r = 8$  είναι επίσης μια τριφασική μηχανή, αλλά υπάρχουν 4 πόλοι στάτη συνδεδεμένοι σε σειρά σε κάθε φάση στάτη. Εάν ισχύει  $N_s = 2$  και  $N_r = 2$ , τότε προκύπτει για μία μονοφασική μηχανή, αλλά η μηχανή αυτή μπορεί να τεθεί σε περιστροφή από οποιαδήποτε θέση δρομέα μόνο χρησιμοποιώντας ειδικές ρυθμίσεις εκκίνησης. Εάν ισχύει  $N_s = 4$  και  $N_r = 2$ , τότε έχουμε τη γενικευμένες διφασική μηχανή, η οποία μπορεί να επίσης να τεθεί σε περιστροφή από οποιαδήποτε θέση δρομέα μόνο χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές εκκίνησης. Εάν  $N_s = 8$  και  $N_r = 6$ , τότε η μηχανή είναι τεσσάρων φάσεων, μπορεί να εκκινήσει από οποιαδήποτε θέση του δρομέα και δίνει ομαλότερη ροπή από την αντίστοιχη της τριφασικής μηχανής. Ορισμένες από τις προαναφερθείσες διατάξεις παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 1.1:** Διάφοροι τύποι SRM: (α) Μονοφασική διπολική SRM, (β) Διφασικοί 4/2 SRM, (γ) Τριφασική 6/4 SRM, (δ) Τετραφασική 8/6 SRM, (ε) Διφασική 6/4 SRM, (στ) Τριφασική 12/8 SRM

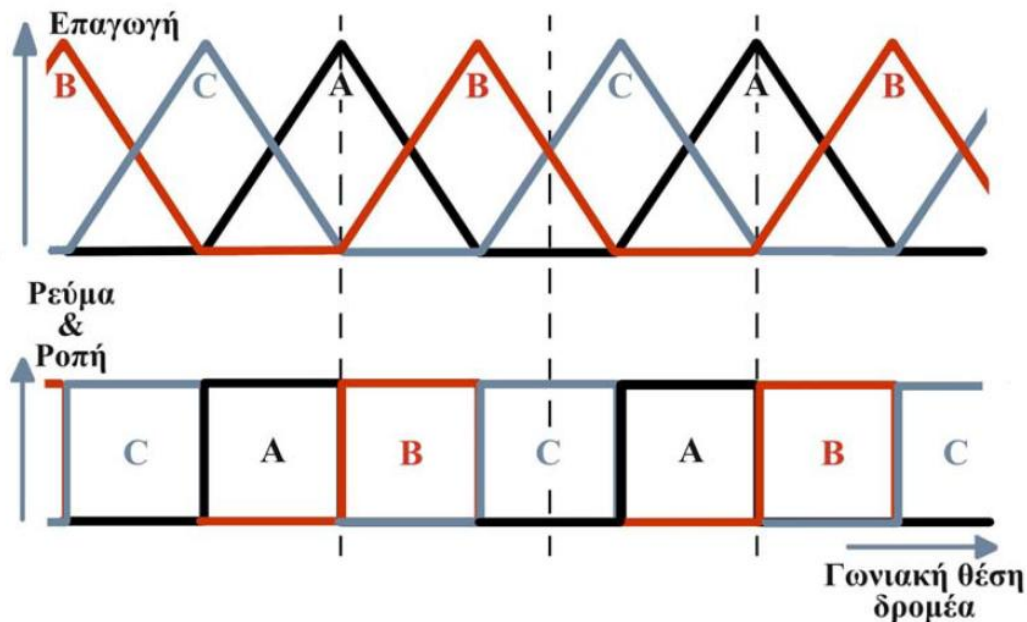


### 3.1 ΔΥΝΑΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ SRMs

Αρχικά θα παρουσιάσουμε ορισμένες χαρακτηριστικές ποσότητες που θα μας βοηθήσουν στην επιλογή των κατάλληλων σχεδιασμών για τις πολυφασικές SRMs. Ο αριθμός πλήγμάτων ανά περιστροφή  $S$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S = NP_r \quad (1)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των φάσεων της μηχανής και  $P_r$  είναι ο αριθμός των πόλων του δρομέα. Για παράδειγμα, για την τριφασική 6/4 SRM του παραπάνω σχήματος ( $\gamma$ ) έχουμε 12 πλήγματα ανά περιστροφή. Για το εν λόγω παράδειγμα οι ιδανικές κυματομορφές λειτουργίας, φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Ιδανικές κυματομορφές λειτουργίας μίας τριφασικής 6/4 SRM [6].

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι παραπάνω κυματομορφές παρουσιάζουν την ιδανική λειτουργία μίας τριφασικής 6/4 SRM που απέχει αρκετά από την πραγματική. Παρατίθενται όμως στο σημείο αυτό ώστε να καταδείξουν ότι με τη χρησιμοποίηση μεγαλύτερου αριθμού φάσεων και κατάλληλο σχεδιασμό είναι εφικτό να έχουμε συνολικά ομαλή κυματομορφή ροπής, παρότι οι επιμέρους φάσεις εξακολουθούν να παράγουν ροπή υπό μορφή πλήγμάτων. Η θεμελιώδης συχνότητα  $f_1$  του ρεύματος σε κάθε φάση είναι προφανώς η συχνότητα με την οποία επαναλαμβάνεται η κίνηση των πόλων του δρομέα μεταξύ θέσης αντίθεσης και της θέσης ευθυγράμμισης σε κάθε φάση, δηλαδή:

$$f_1 = \frac{\omega_m}{60} P_r \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

Επομένως, ο αριθμός των πηγμάτων ανά δευτερόλεπτο δίνεται από τη σχέση:

$$f = N f_1 \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

Αυτή η συχνότητα και όλες οι ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται στις κυματομορφές της μαγνητικής ροής σε διάφορα σημεία του μαγνητικού κυκλώματος.

Θεωρητικά οι δυνατές διατάξεις των περιστροφικών SRMs είναι αναρίθμητες. Για να μπορέσουμε όμως να μιλήσουμε για πρακτική υλοποιήσιμες επιλογές και να έχουμε ένα μέτρο σύγκρισης θα προβούμε στην ακόλουθη κατηγοριοποίηση. Θα διακρίνουμε τις SRMs. Θα διακρίνουμε τις SRMs σε κανονικής (regular) και μη κανονικής (irregular) δομής. Ως SRM κανονικής δομής θα ορίσουμε εκείνη την SRM που έχει συμμετρικό δρομέα και στάτη αμφοτέρους με ισαπέχοντες πόλους. Ως μη κανονικής δομής χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε SRM δεν εμπίπτει στην παραπάνω προδιαγραφή, δεν είναι δηλαδή κανονικής δομής.

Για μία κανονικής δομής SRM μπορούμε να ορίσουμε την απόλυτη ζώνη παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής και ουσιαστική ζώνη παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η απόλυτη ζώνη παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $\tau_a$  (absolute torque zone) θεωρείται το τόξο εκείνο εντός του οποίου μία φάση SRM μπορεί να παράγει μηδενική ροπή προς μία κατεύθυνση και δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_a^{(\max)} = \frac{\pi}{P_r} \quad (4)$$

Η ουσιαστική ζώνη παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $\tau_e$  (effective torque zone) θεωρείται το τόξο εκείνο εντός του οποίου μια φάση της SRM μπορεί να παράγει ωφέλιμη ροπή συγκρίσιμης τιμής με την ονομαστική. Το τόξο αυτό είναι ουσιαστικά το τόξο που διαρκεί η σταδιακή επικάλυψη των πόλων στάτη-δρομέα και προκύπτει ίσο με το εύρος του πόλου του στάτη:

$$\tau_e = \beta_s \quad (5)$$

Η γωνία πλήγματος  $\varepsilon$  (stoke angle) δίνεται από τη εξίσωση:

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{S} = \frac{2\pi}{NP_r} \quad (6)$$

Ο λόγος απόλυτης επικάλυψης πόλων  $\rho_a$  (absolute overlap ratio) ορίζεται ως ο λόγος της απόλυτης ζώνης παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $\tau_a$  προς τη γωνία πλήγματος  $\varepsilon$ . Ο λόγος ισούται με  $N/2$ . Μία τιμή μεγαλύτερη της μονάδας είναι αναγκαία ώστε μια SRM κανονικής δομής να μπορεί να εκκινήσει από κάθε γωνιακή θέση δρομέα. Είναι σαφές ότι ο ανωτέρω λόγος γίνεται μεγαλύτερος της μονάδας για μηχανές που διαθέτουν τρεις ή περισσότερες φάσεις. Για διφασικές μηχανές ο λόγος αυτός λαμβάνει οριακή τιμή της μονάδας. Όμως αυτό δεν είναι αρκετό καθώς μία φάση είναι αδύνατο να παράγει ροπή συγκρίσιμη της ονομαστικής καθ'όλο το μήκος της απόλυτης ζώνης παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου δεν είναι δυνατή η εκκίνηση από οποιαδήποτε γωνιακή θέση δρομέα. Ο λόγος ουσιαστικής επικάλυψης πόλων  $\rho_e$  (absolute overlap ratio) ορίζεται ως ο λόγος της ουσιαστικής ζώνης παραγωγής ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $\tau_e$  προς τη γωνία πλήγματος  $\varepsilon$ . Για κανονικής δομής SRM με  $\beta_s < \beta_r$ , ο λόγος αυτός ισούται κατά προσέγγιση με  $\beta_s/\varepsilon$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι πάντα ισχύει  $\rho_e < \rho_a$ . Ένας λόγος με τιμή μεγαλύτερη της μονάδας σημαίνει δυνατότητα για καλή ροπή εκκίνησης από οποιαδήποτε γωνιακή θέση του δρομέα, με μόνο μία φάση να άγει, και αποτελεί αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για να μην έχουμε βυθίσεις στη ροπή [6].

## 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΑΣ SRM

Το ισοδύναμο κύκλωμα για την περιγραφή μίας SRM μπορεί να αποτελείται από μία αντίσταση και την αυτεπαγωγή. Το αποτέλεσμα του μαγνητικού κορεσμού, ροή περίθλασης γύρω από τις γωνίες του πόλου, διαρροή ροής, και αμοιβαία σύζευξη των φάσεων δεν συμπεριλαμβάνονται. Το γραμμικό αναλυτικό μοντέλο της SRM μπορεί να περιγραφεί από τρεις διαφορετικές εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν ως: εξίσωση τάσης, εξίσωση κίνησης και εξίσωση ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η εξίσωση τάσης:

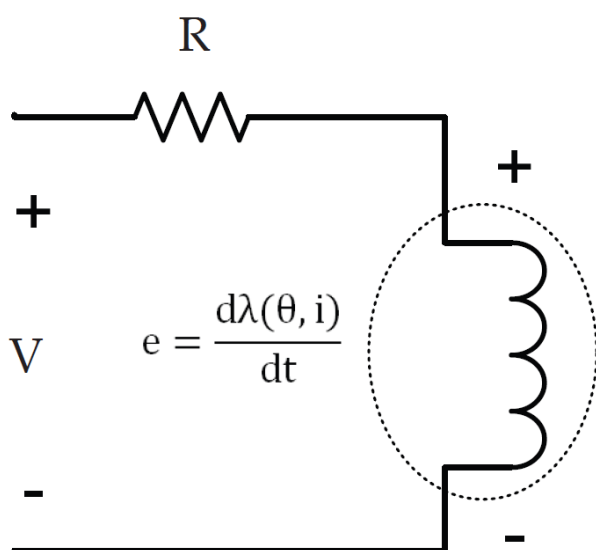
$$V = R \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (7)$$

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για την SRM δείχνονται στο Σχήμα.1.3 . Όπου  $V$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση από φάση σε φάση, το  $R$  είναι η αντίσταση της φάσης, και το  $e$  είναι back-EMF. Κανονικά, το  $e$  είναι η συνάρτηση της τρέχουσας φάσης και τη θέση του δρομέα, και  $\lambda$  μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο της αυτεπαγωγής και περιέλιξης του ρεύματος:

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) \cdot i \quad (8)$$

Και από τις (7) και (8) προκύπτει:

$$V = R \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$



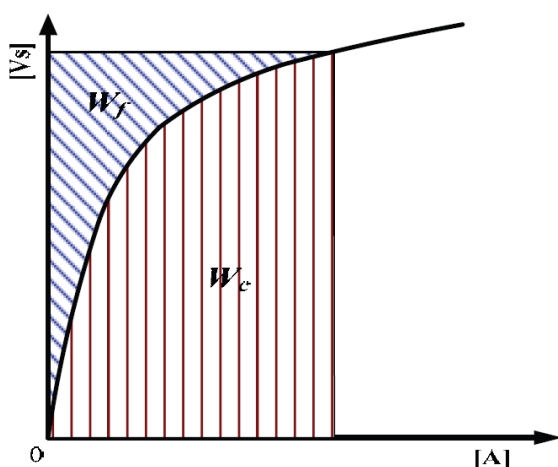
Σχήμα1.3: Ισοδύναμο κύκλωμα μίας SRM

Για τη μετατροπή της ηλεκτρομηχανικής ενέργειας, μία μη γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπόψη τον μαγνητικό κορεσμό του κυκλώματος. Γενικά η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια ορίζεται ως  $W_f$  και η συν-ενέργεια ορίζεται ως  $W_c$ :

$$W_f = \int i d\psi \quad (10)$$

$$W_c = \int \psi di \quad (11)$$

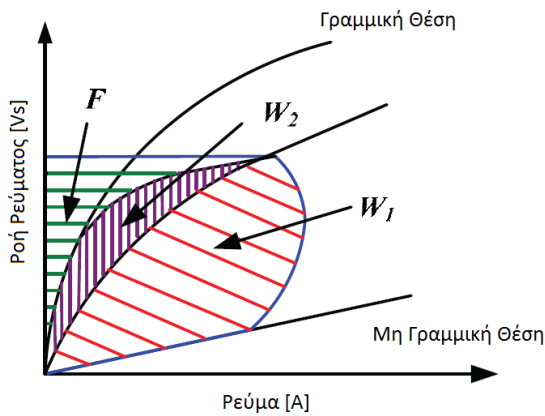
Η σχέση που προκύπτει μεταξύ της ενέργειας  $W_f$  και της συν-ενέργειας  $W_c$  ως συνάρτηση της ροής και του ρεύματος φαίνεται στην σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4: Η σχέση της ενέργειας  $W_f$  και της συν-ενέργειας  $W_c$

Όταν η θέση του δρομέα ταιριάζει με τη θέση διέγερσης, η φάση της διέγερσης είναι συζευγμένη· τότε η τασική φάση αρχίζει να δημιουργεί την τρέχουσα φάση. Εκείνη τη στιγμή ένα μέρος της ενέργειας που εισάγεται θα αποθηκευτεί ως μαγνητικό πεδίο. Με την αύξηση της αυτεπαγωγής, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου θα αυξηθεί μέχρι τη γωνία αποκοπής. Ένα άλλο τμήμα της μαγνητικής ενέργειας θα μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια και τέλος στις απώλειες. Στην εικόνα 1.5, η ροή της λειτουργίας του κινητήρα δεν είναι σταθερή. Ωστόσο, ομοιόμορφη παραλλαγή της ροής είναι το σημείο κλειδί για την απόκτηση εξομάλυνσης της ροπής.  $W1$  είναι το μηχανικό έργο που παράγεται από τη διαδικασία της μαγνήτισης, με άλλα λόγια, το  $W1$  είναι η συνενέργεια στη μετατροπή της ενέργειας.  $F+W2$  είναι το μαγνητικό πεδίο ενέργειας μεταξύ της γωνίας σύζευξης και αποκοπής. Κατά τη διάρκεια παραγωγής της καμπύλης ενέργειας και του ενεργειακού ισοζυγίου, με σταθερή παροχή τάσης  $V_s$  και η ταχύτητα του δρομέα  $\omega$  μπορούν να υποθετηθούν.

Όταν η θέση του δρομέα ταιριάζει με τη θέση αποκοπής, η φάση της διέγερσης είναι αποκομμένη (απενεργοποιημένη). Κατά συνέπεια θα σταματήσει να εισάγεται ενέργεια. Όμως η μαγνητική ενέργεια του πεδίου είναι  $F+W_2$  εκείνη τη χρονική στιγμή. Η μαγνητική ενέργεια του πεδίου πρέπει να απελευθερωθεί, και στη συνέχεια η τρέχουσα φάση αρχίζει να τροφοδοτεί ενέργεια την πηγή ισχύος. Εκείνη τη δεδομένη στιγμή, η μαγνητική ενέργεια πεδίου, η οποία είναι  $W_2$ , μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και απώλειες. Το πλεονέκτημα του πεδίου ενέργειας  $F$  είναι η ανατροφοδότηση της πηγής ισχύος.



Σχήμα 1.5 : Γραφική αναπαράσταση της ενέργειας και της συνενέργειας του κινητήρα.

Η αναλυτική απάντηση του ρεύματος μπορεί να ληφθεί από την εξίσωση (9). Η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι:

$$T_e = \frac{\partial W'}{\partial \theta} = \frac{\partial W'(\theta + \Delta\theta) - \partial W'(\theta)}{\Delta\theta} \quad (12)$$

Από την (12) μπορεί να προκύψει μία αναλυτική απάντηση για την ροπή.  $W'$  είναι η συνενέργεια η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$W' = \int_0^i \lambda di \quad (13)$$

Και η εξίσωση της κίνησης ως:

$$T_e = J \frac{\partial W}{\partial t} + D\omega + T_L \quad (14)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$

Όπου  $T_L$ ,  $T_e$ ,  $J$ ,  $\omega$  και  $D$  είναι οι εκφράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η ταχύτητα του δρομέα, η αδράνεια του δρομέα και ο συντελεστής τριβής αντίστοιχα.

Η εξίσωση που αναφέρθηκε ανώτερα, μπορεί να συνδυαστεί ώστε να δημιουργηθεί το μοντέλο προσομοίωσης για ένα σύστημα SRM. Ωστόσο, η συνάρτηση της αυτεπαγωγής πρέπει να έχει ληφθεί χρησιμοποιώντας είτε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είτε πειραματικά σε πρότυπο μοτέρ [5].

## 5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Byrne, J. and Lacy, J.C., “Electrodynamic system comprising a variable reluctance machine”, *U.S. Patent 3956678*, May 1976.
- [2] Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. and Fulton, N.N., “Variable-speed Switched Reluctance Motors”, *Proc. IEE* Vol. 127, Pt B, No. 4, pp. 253-265, July 1980.
- [3] Krishnan, R., Arumugam, R. and Lindsay, J.F., “Design Procedure for Switched- Reluctance Motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, No. 3, pp. 456-461, May/June 1988.
- [4] Arumugam, R., Lowther, D.A., Krishnan, R. and Lindsay, J.F., “Magnetic field analysis of switched reluctance motor using 2-dimensional finite element model”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-21, No. 5, pp. 1883-1885, 1985.
- [5] Jin-Woo Ahn, Ph.D Kyungsoong University Korea; Switched Reluctance Motor;pp. 205-208
- [6] Ιάκωβος Στ. Μανωλάς, Ph.D Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχεδίαση και Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (Switched Reluctance Machines-SRMs), pp.23-24 & 34-37



## 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### Σχεδίαση μίας 6-4 SRM

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός μίας περιστροφικής μηχανής μεταβλητής αντίστασης είναι μια διαδικασία προσεγγιστικού υπολογισμού και προσδιορισμού γεωμετρικών διαστάσεων, υλικών και ηλεκτρικών παραμέτρων, έτσι ώστε η μηχανή να έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και να εμπίπτει στις προσδιορισθείσες προδιαγραφές. Η ανωτέρω διαδικασία, όπως και στις κλασσικές μηχανές στηρίζεται στη εξίσωση εξόδου, τη σχέση δηλαδή που προσδιορίζει την απολαβή μηχανικής ισχύος σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά της μηχανής.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά και μεθοδικά τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τον σχεδιασμό μιας περιστροφικής μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (SRM). Αρχικά θα παράγουμε την εξίσωση εξόδου και στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον τρόπο επιλογής και των υπόλοιπων γεωμετρικών διαστάσεων. Οι σχεδιαστικοί συμβιβασμοί που θα προκύψουν από τις αντικρουόμενες ανάγκες θα αναλυθούν λεπτομερώς. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μέθοδοι προσεγγιστικού υπολογισμού των απωλειών χαλκού και των απωλειών του πυρήνα.

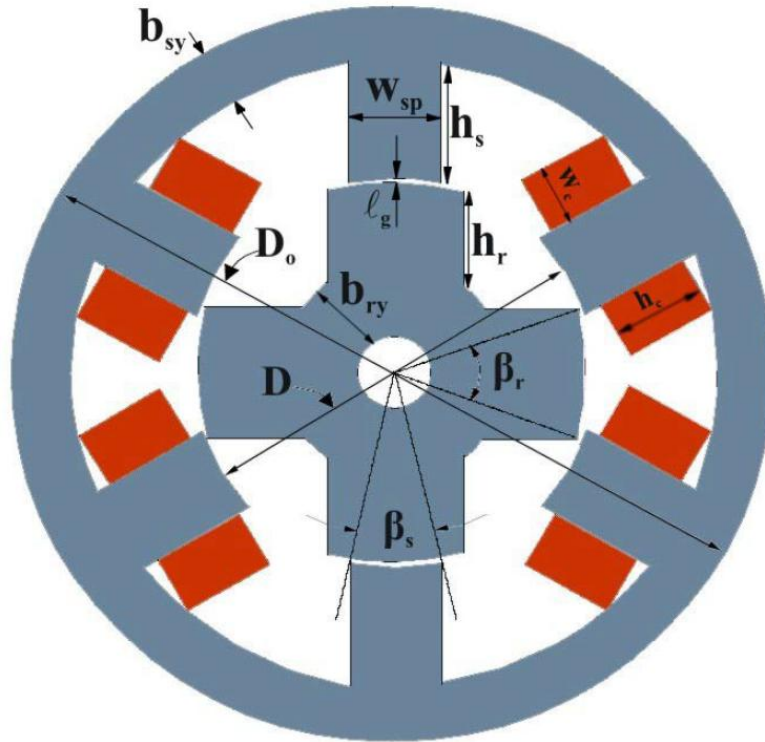
Στόχος του κεφαλαίου αυτού αρχικά είναι να μας εισάγει στη νοοτροπία σχεδιασμός μίας πρότυπης πειραματικής SRM μηχανής και στη συνέχεια ο σχεδιασμός μίας πρότυπης πειραματικής τριφασικής 6/4 SRM. Το σχέδιο αυτό στη συνέχεια θα αναλυθεί περισσότερο με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός θα επικεντρωθεί στο συγκεκριμένο τύπο μηχανής, ενώ θα δοθούν ορισμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

## 2 ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ

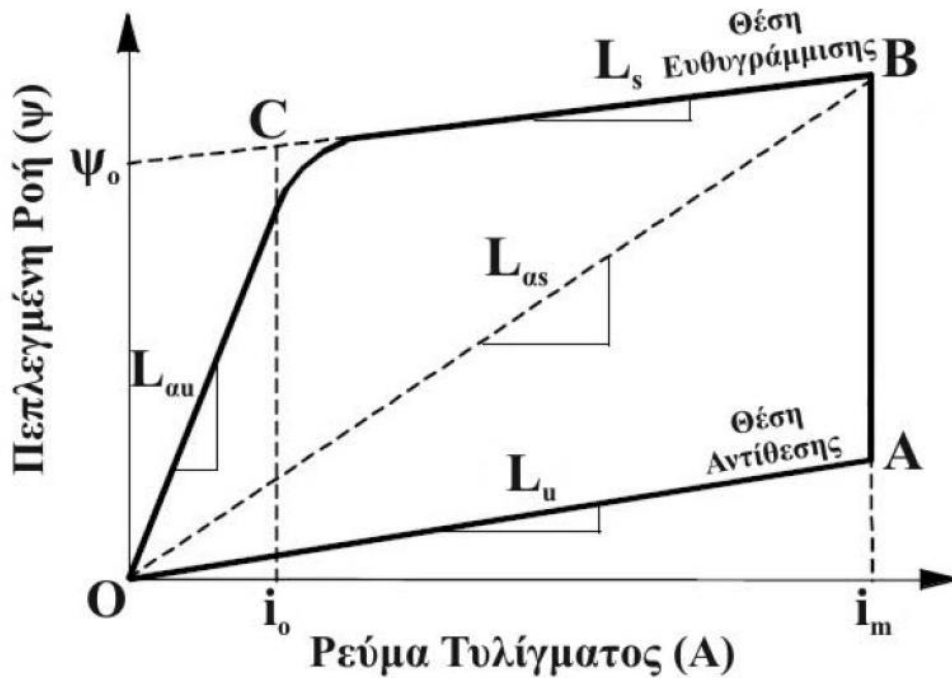
Η εξίσωση εξόδου συνδέει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως την εσωτερική διάμετρο του στάτη και το μήκος της μηχανής, την ταχύτητα περιστροφής της και την ηλεκτρική της φόρτιση με την έξοδο της μηχανής. Γενικώς, ο σχεδιασμός κάθε μηχανής ξεκινά από την εξίσωση αυτή. Η επιλογή των διαφόρων παραμέτρων στη συνέχεια είναι μια συστηματική διαδικασία. Η εμπειρία από το σχεδιασμό κλασσικών μηχανών μπορεί λόγω της ομοιότητας της διαδικασίας να αξιοποιηθεί και στο σχεδιασμό των SRMs, παρότι η εξίσωση εξόδου διαφέρει αρκετά από εκείνη μίας συμβατικής μηχανής.

Θεωρούμε την τριφασική 6/4 SRM του σχήματος 2-1, στην οποία είναι σημειωμένα και ορισμένα μερικά από τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στο σχήμα 2-2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές μεταβλητές μαγνήτισης της εν λόγω μηχανής με σημειωμένες τις κυριότερες μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Το εμβαδόν που περικλείεται από τα σημεία OABCO ισοδυναμεί κατά προσέγγιση με τη μετατρεπόμενη μαγνητική ενέργεια. Αμελώντας την επίδραση της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος, η εφαρμοζόμενη τάση ισούται με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης ροής. Συνεπώς, η σχέση που συνδέει την πεπλεγμένη ροή με την εφαρμοζόμενη τάση για ιδανικό (μορφής τετραγωνικού παλμού) φασικό ρεύμα τυλίγματος έχει ως εξής:

$$v \cong \frac{d\psi}{dt} \cong \frac{(\psi_a - \psi_u)}{\Delta t} = \frac{(L_{as} - L_u)i}{\Delta t} \quad (1)$$



Σχήμα 2-1: τριφασική 6/4 SRM με σημειωμένες τις κυριότερες γεωμετρικές παραμέτρους της. Το βάθος του σχήματος (μήκος της μηχανής) είναι L.



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα πεπλεγμένης ροής συναρτήσει του ρεύματος τυλίγματος με τους συμβολισμούς που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση που ακολουθεί[1].

όπου  $L_{as}$  είναι η ανά φάση επαγωγή στη θέση ευθυγράμμισης λαμβάνοντας υπόψη το μαγνητικό κορεσμό,  $L_u$  είναι η ανά φάση επαγωγή στη θέση αντίθεσης,  $v$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση και  $\Delta t$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο δρομέας για να κινηθεί από τη θέση αντίθεσης στη θέση ευθυγράμμισης. Ο χρόνος αυτός μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση, η οποία εμπλέκει το τόξο πόλου του στάτη και τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα:

$$\Delta t = \frac{\beta_s}{\omega_m} \quad (2)$$

Το τόξο του πόλου του στάτη  $\beta_s$  μετράται σε rad και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $\omega_m$  σε rad/s. Ορίζουμε τις ακόλουθες ποσότητες:

$$\sigma_s = \frac{L_{as}}{L_{au}} \quad (3)$$

$$\text{και } \sigma_u = \frac{L_{au}}{L_u} \quad (4)$$

όπου  $L_{au}$  είναι η ανά φάση επαγωγή στη θέση ευθυγράμμισης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός. Η σχέση (1) αντικαθιστώντας τις (2), (3) και (4) γίνεται:

$$v \cong \frac{\omega_m}{\beta_s} L_{as} i \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u}\right) \quad (5)$$

Μπορούμε να γράψουμε την πεπλεγμένη ροή στη θέση ευθυγράμμισης ως εξής:

$$L_{as} i = \Phi N_t = (B \cdot A_{sp}) \cdot N_t = B \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot L \cdot \beta_s\right) \cdot N_t \quad (6)$$

όπου  $\Phi$  είναι η μαγνητική ροή μέσω του πόλου του στάτη στη θέση ευθυγράμμισης,  $A_{sp}$  είναι η επιφάνεια της διατομής του πόλου του στάτη,  $D$  είναι η εσωτερική διάμετρος του στάτη (σχήμα 2-1),  $L$  είναι το αξονικό μήκος του πόλου του στάτη,  $B$  είναι η μαγνητική επαγωγή του πόλου του στάτη στη θέση ευθυγράμμισης και  $N_t$  είναι ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση. Με την παραπάνω σχέση (6) έχουμε καταφέρει να συνδέσουμε τα πεδιακά μεγέθη με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Το φασικό ρεύμα του στάτη μπορεί να προκύψει από το συντελεστή ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης που δίνεται από τη σχέση:

$$A_s = \frac{2N_t \cdot i \cdot m}{\pi D} \quad (7)$$

όπου  $m$  είναι ο αριθμός των φάσεων που άγουν ταυτοχρόνως. Στην περίπτωση της τριφασικής 6/4 SRM που μας ενδιαφέρει ειδικά, υπό κανονικές συνθήκες, μία μόνο φάση άγει κάθε χρονική στιγμή. Η αναπτυσσόμενη ισχύς δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = k_e \cdot k_d \cdot \hat{V} \cdot I_p \cdot m \quad (8)$$

όπου  $\hat{V}$  και  $I_p$  είναι τα πλάτη των αντίστοιχων φασικών μεγεθών,  $k_e$  είναι η απόδοση της μηχανής και  $k_d$  είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης που ορίζεται ως εξής:

$$k_d = \frac{\theta_i \cdot q \cdot P_r}{360} \quad (9)$$

Με  $\theta_i$  συμβολίζουμε τη γωνία αγωγής της κάθε φάσης σε μοίρες για κάθε πλήγμα,  $q$  είναι ο αριθμός των φάσεων του στάτη που ισούται με  $P_s/2$ , όπου  $P_s$  είναι ο αριθμός των πόλων του στάτη, και  $P_r$  είναι ο αριθμός πόλων του δρομέα. Από το συνδυασμό των εξισώσεων (5) και (6) προκύπτει η αναπτυσσόμενη ισχύς που δίνεται από τη σχέση:

$$P = k_e \cdot k_d \cdot \left(\frac{\pi^2}{120}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u}\right) \cdot B \cdot A_s \cdot D^2 \cdot L \cdot n_r \quad (10)$$

με  $n_r$  συμβολίζουμε την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ η rpm). Τέλος μπορούμε να γράψουμε την παραπάνω εξίσωση έτσι ώστε να έχει την ίδια μορφή με τη συμβατική εξίσωση εξόδου για μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος:

$$P = k_e \cdot k_d \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot B \cdot A_s \cdot D^2 \cdot L \cdot n_r \quad (11)$$

$$\text{όπου } k_1 = \frac{\pi}{4} \quad \text{και } k_2 = 1 - \left(\frac{1}{\sigma_s \sigma_u}\right) \quad (12)$$

Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$T_e = \frac{P}{\omega_m} = k_e \cdot k_d \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot B \cdot A_s \cdot D^2 \cdot L \quad (13)$$

$$\text{όπου } k_3 = \frac{\pi}{4} \quad (14)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η απολαβή ισχύος αλλά και η ροπή είναι ευθέως ανάλογες αφενός του γινομένου της ειδικής ηλεκτρικής και της ειδικής

μαγνητικής φόρτισης και αφετέρου του όγκου του κυλίνδρου, που ορίζεται από την εσωτερική διάμετρο του στάτη (bore) και είναι  $(\pi D^2 L)/4$ . Ο συντελεστής  $k_2$  είναι η μοναδική μεταβλητή που εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της μηχανής και καθορίζεται από το φασικό ρεύμα τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη, τις χαρακτηριστικές μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών και τις γεωμετρικές διαστάσεις της μηχανής. Για κάποιο δεδομένο σημείο λειτουργίας, ο συντελεστής  $k_2$  είναι σταθερός. Κατά συνέπεια, για να εξάγουμε τη μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ από μία SRM, ο συντελεστής  $k_2$  θα πρέπει να υπολογιστεί με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος τροφοδοσίας. Εξ αυτού του λόγου, οι χαρακτηριστικές πεπλεγμένης ροής συναρτήσει του ρεύματος για τις θέσεις ευθυγράμμισης και αντίθεσης θα πρέπει να υπολογιστούν για διάφορες τιμές ρεύματος. Εάν επιλεγεί  $k_d=1$ , η απόδοση είναι μέγιστη και ομοίως ισχύει για την παραγόμενη μηχανική ισχύ. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές βέβαια, ο συντελεστής χρησιμοποίησης  $k_d$  είναι μικρότερος της μονάδας. Τέλος θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι ο έλεγχος ισχύος και ροπής επιτυγχάνονται μέσω του συντελεστή χρησιμοποίησης  $k_d$ , όπως περίπου συμβαίνει σε μία μηχανής συνεχούς (DC) ελεγχόμενη από έναν τεμαχιστή(chopper). Η ταχύτητα ελέγχεται από τη συχνότητα μεταγωγής των φάσεων, όπως περίπου συμβαίνει σε μία σύγχρονη μηχανή.

## 3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

### 3.1 Διάμετρος και μήκος

Εφόσον οι SRM χρησιμοποιούνται σε συστήματα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας, είναι χρήσιμο να ορίσουμε κάποια προδιαγραφή βασικής ταχύτητας λειτουργίας. Στη βασική ταχύτητα η μηχανή απαιτείται να αποδείξει την προδιαγεγραμμένη ροπή και ως εκ τούτου και την προδιαγεγραμμένη ισχύ εξόδου. Θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση(11) που περιγράφει την αποδιδόμενη ισχύ και θα επιλέξουμε το μήκος της μηχανής να είναι ανάλογο της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη (bore), δηλαδή:

$$L = k \cdot D \quad (15)$$

όπου το  $k$  είναι μια σταθερά αναλογίας (πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο), που είναι δυνατόν να επιλέγει αυθαίρετα από το σχεδιαστή. Παρακάτω θα δοθούν κάποια ενδεικτικά όρια τιμών για το  $k$ . Αντικαθιστώντας την (15) στην (11) λαμβάνουμε:

$$P \propto k_2 \cdot D^2 \quad (16)$$

Από την (2) μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάμετρο  $D$ , αν γνωρίζουμε για τη βασική ταχύτητα τις τιμές  $B$ ,  $A_{sp}$ ,  $k_2$ ,  $k_d$  και  $k$ . Είναι εύλογο να ξεκινήσουμε την επαναληπτική διαδικασία του σχεδιασμού με κάποιες λογικές τιμές εντός του εύρους:

$$0,65 < k_2 < 0,75 \quad (17)$$

Ως τιμές της μαγνητικής επαγωγής  $B$  για τη θέση ευθυγράμμισης μπορεί να εκλεγεί η μέγιστη επιτρεπτή τιμή επαγωγής για το χρησιμοποιούμενο σιδηρομαγνητικό υλικό. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε αμπέρ-ελίγματα ανά μέτρο κυμαίνεται συνήθως εντός του εύρους:

$$25000 < A_s < 90000 \quad (18)$$

Ο συντελεστής  $k_d$  μπορεί να υποθεθεί αρχικά ίσος με τη μονάδα. Βάση των ανωτέρω αρχικών τιμών μπορούν να υπολογιστούν η εσωτερική διάμετρος του στάτη  $D$  (bore) και συνεπακόλουθα το μήκος της μηχανής  $L$ . Η τιμή του διακένου αέρος θα καθοριστεί από κατασκευαστικούς περιορισμούς και από τις ανοχές των χρησιμοποιούμενων εξαρτημάτων. Στις μικρές ισχύος μηχανές μπορεί να πάρει τιμές από 0,18-0,25mm. Στις μηχανές μεγαλύτερες του ενός ίππου μπορεί να λάβει τιμές



από 0,3-0,5mm. Ο λόγος  $k$  που συνδέει το μήκος με τη διάμετρο (1) δε χρειάζεται να επιλεγεί αυθαίρετα. Η επιλογή του συνδέεται με τη φύση της εφαρμογής και τους περιορισμούς χώρου. Για εφαρμογές ελέγχου θέσης (servo) το εύρος της σταθεράς  $k$  συνήθως είναι:

$$1 < k < 3 \quad (19)$$

ενώ για τις υπόλοιπες εφαρμογές συνήθεις επιλογές είναι:

$$0,25 < k < 0,7 \quad (20)$$

### 3.2 Αριθμός ελιγμάτων

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων ελιγμάτων ανά φάση για ένα δεδομένο ρεύμα τροφοδοσίας. Η διατομή του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί, επιλέγεται έτσι ώστε να πληρώνεται ο διαθέσιμος χώρος της αύλακας. Η προκύπτουσα πυκνότητα ρεύματος υπολογίζεται και συγκρίνεται με τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή, η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο ψύξεως της μηχανής. Εάν δεν υπάρχει περιορισμός ως προς την εξωτερική διάμετρο, ο χώρος που θα καταλάβουν τα τυλίγματα υπολογίζεται από τον αριθμό των ελιγμάτων, τη διατομή του αγωγού και το πάχος της μόνωσης. Το ύψος του πόλου του στάτη μπορεί να υπολογιστεί τότε από το χώρο που απαιτεί το τύλιγμα.

Από την εξίσωση (7) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για συγκεκριμένη ηλεκτρική φόρτιση και εσωτερική διάμετρο στάτη (bore) το γινόμενο  $N_t \cdot i$  είναι σταθερό. Οι βέλτιστες επιλεγόμενες τιμές είναι εκείνες που ικανοποιούν τις παρακάτω αντικρουόμενες απαιτήσεις:

- Χαμηλής τιμής ρεύμα, που συνεπάγεται απαίτηση για μεγαλύτερο αριθμό ελιγμάτων.
- Χαμηλές τιμές ωμικής αντίστασης και επαγωγής του τυλίγματος, όπερ μεθερμηνευόμενων ανάγκη για μικρότερο αριθμό ελιγμάτων

Ένας συμβιβασμός πρέπει να συντελεστεί μεταξύ των δύο ανωτέρω αναγκών, με γνώμονα πάντοτε τη θερμική ισορροπία. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή των κατάλληλων τιμών για το ρεύμα και τον αριθμό των ελιγμάτων εξαρτάται

επιπλέον και από τη διαθέσιμη συνεχή τάση (DC), που θα τροφοδοτήσει τον ηλεκτρικό μετατροπέα ισχύος.

### 3.3 Υπολογισμός απωλειών Μηχανής Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

Δεδομένου ότι η SRM είναι ένας ηλεκτρομηχανικός μετατροπέας ενέργειας παράγει απώλειες, καθώς και μετατροπείς ηλεκτρικής ισχύος ανήκει στο σύστημα της μηχανής. Οι απώλειες στις SRM μηχανές μπορούν να υποδιαιρεθούν σε απώλειες χαλκού, πυρήνα, μηχανολογικές και άλλες απώλειες. Ο βρόγχος και τα δινορρέυματα του υλικού του σιδήρου είναι υπεύθυνα για τις απώλειες του πυρήνα. Στις μηχανικές απώλειες συνυπολογίζονται οι απώλειες με την τριβή του αέρα αλλά και οι απώλειες μέσα στα ρουλεμάν. Πρόσθετες απώλειες που έχουν προκαλούνται και δεν μπορούν να μετρηθούν εκ των προτέρων και να εντοπιστούν ακριβώς είναι μηχανικές και ηλεκτρικές ζημίες[4]. Τέλος, στον μετατροπέα μπορούν να προκύψουν απώλειες στη μεταγωγή από τις διόδους και τους διακόπτες. Πρόσθετες απώλειες μπορούν να προκύψουν στο μετατροπέα, παραδείγματος χάρη στους πυκνωτές dc ή όταν έχουν παραμεληθεί τα συστήματα ελέγχου όπως στα διδακτορικά[5,6]. Για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας του συστήματος μπορούμε να ορίσουμε ξεχωριστά την απόδοση τόσο της SRM όσο και του μετατροπέα και στη συνέχεια να τις πολλαπλασιάσουμε όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\eta_{sys} = \eta_{Conv} \cdot \eta_{SRM} = \frac{P_{Conv}}{P_{el}} \cdot \frac{P_{mech}}{P_{Conv}} = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \quad (21)$$

όπου  $P_{mech}$  είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς,  $P_{el}$  η εισερχόμενη στο σύστημα ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από τη γραμμή dc και η  $P_{Conv}$  είναι η παραγόμενη από τον μετατροπέα ισχύς [2].

### 3.4 Απώλειες Χαλκού

Ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών του χαλκού σε όλες τις ταχύτητες περιστροφής μίας SRM περιπλέκεται από το γεγονός ότι η κυματομορφή του ρεύματος στην SRM δεν είναι ημιτονοειδής. Επιπλέον η κυματομορφή εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας, ιδιαίτερα από το ρεύμα διέγερσης, την ταχύτητα και την στρατηγική που ακολουθείται στην μεταγωγή. Στην περίπτωση των ρευμάτων με κυματομορφή επίπεδης κορυφής, η κυματομορφή του ρεύματος μπορεί να

υπολογιστεί προσεγγιστικά από έναν ορθογώνιο φραγμό και έχει αποδειχθεί μεταξύ των άλλων από τους [8] και [7] ότι ο μέση ενεργός τιμή του ρεύματος ανά φάση, αν υποθέσουμε το μεμονωμένο κύκλο λειτουργίας, μπορεί να υπολογιστεί με τη μέγιστη τιμή  $I_p$  ως:

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{q}} \quad (q - \text{ο αριθμός των φάσεων}) \quad (22)$$

Ωστόσο, στην πράξη, η τρέχουσα φάση δεν παρουσιάζει συνήθως κυματομορφή επίπεδης κορυφής, συνεπώς, για μία ακριβή πρόβλεψη για τις απώλειες του χαλκού η τρέχουσα μέση ενεργός τομή πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια από την εξίσωση:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{el}} \int_t^{t+T_e} i_{ph}^2(t) dt} \quad (23)$$

όπου  $T_{el}$  είναι η ηλεκτρική χρονική περίοδος της φάσης. Τότε οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται:

$$P_{cu} = q I_{rms}^2 R_{ph} \quad (24)$$

Προκειμένου να προβλέψει την dc αντίσταση  $R_{ph}$  που προκύπτει από το τυλίγμα της κάθε φάσης, το μέσο μήκος  $l_w$  μίας σπείρας γύρω από έναν πόλο του στάτη, είναι περίπου:

$$l_w \approx 2 \cdot l_{stk} + 4 \cdot l_{oh} \quad (25)$$

με το μήκος στοίβας  $l_{stk}$  και μήκος προεξοχής σε κάθε άκρο της σπείρας  $l_{oh}$ . Το  $l_{oh}$  μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από τον τύπο  $l_{oh} = 1.2w_s$ , όπου το  $w_s$  είναι το πλάτος των πόλων του στάτη. Η dc αντίσταση τυλίγματος ανά φάση με ζεύγη πόλων περιγράφεται στη συνέχεια από [4]:

$$R_{ph} = \frac{2\rho \cdot N_p \cdot l_w}{\chi_{cu} \cdot S} \quad \text{με } \chi_{cu} = \chi_{cu} \cdot (1 + \alpha_{cu,20} \cdot (\theta - \theta_0)) \quad (26)$$

όπου  $S$  η κάθετη διατομή του αγωγού,  $N_p$  το συνολικό μήκος του τυλίγματος του κάθε πόλου και  $\chi_{cu}$  η αγωγιμότητα του χαλκού σε θερμοκρασία, όπου  $\chi_{cu,20} = 58000 \text{ S/mm}$  σε  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{cu} = 39 \cdot 10^{-4} \text{ K}$

Στην παραπάνω εξίσωση αμελείται το επιδερμικό φαινόμενο.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί επίσης:

$$R_{ph} = \rho \frac{l_w}{S} = K_r \cdot \frac{N_t}{S} \quad (27)$$

όπου  $N_t$  είναι το συνολικό μήκος του τυλίγματος σε κάθε φάση και το  $K_r$  είναι το γινόμενο της ειδικής αντίστασης με το μέσο μήκος κάθε σπείρας  $l_m$ . Από τις (24) και (27) προκύπτει:

$$P_{cu} = K_r \frac{l_p}{S} (I_p N_t) \quad (28)$$

Αν ορίσουμε τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος ως:

$$\hat{J}_c = \frac{I_p}{S} \quad (29)$$

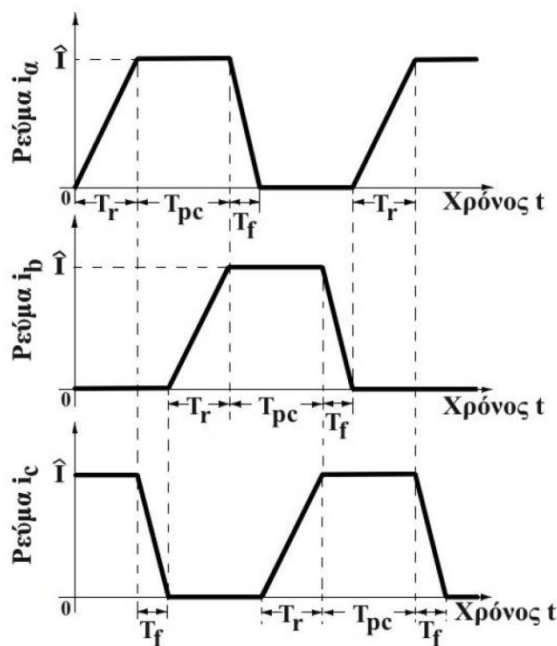
καταλήγουμε ότι οι απώλειες χαλκού είναι:

$$P_{Cu} \propto \hat{J}_c \cdot (N_t I_p) \quad (30)$$

Εφόσον η μέγιστη τιμή του γινομένου  $N_t \cdot i$  είναι μια σταθερά για το σχεδιασμό, οι απώλειες χαλκού είναι ανάλογες της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος. Συνεπώς, για να μειώσουμε τις απώλειες χαλκού θα πρέπει να μειώσουμε τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος. Φυσικά αυτό συνεπάγεται χρήση περισσότερου χαλκού επομένως η τελική επιλογή είναι πάντα προϊόν ενός οικονομοτεχνικού συμβιβασμού.

Στην περίπτωση που έχουμε αλληλοεπικάλυψη των φάσεων ρευμάτων, που είναι και η πλέον ρεαλιστική εκδοχή για ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης με SRM, έχουμε

την απεικόνιση του σχήματος 3-1 για τα ρεύματα των τριών φάσεων.



**Σχήμα 3-1:** Τυπικές απλοποιημένες κυματομορφές ρεύματος με αλληλοεπικάλυψη για 6/4 SRM[1].

Στην περίπτωση αυτή, οι στιγμιαίες απώλειες χαλκού προκύπτουν ως η επαλληλία των απωλειών και των τριών φάσεων. Το χρονικό διάστημα  $T_{pc}$  κατά το οποίο η επαγωγή της φάσης μεταβάλλεται και κατά τη διάρκεια του οποίου είναι επιθυμητό να έχουμε σταθερό ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$T_{pc} = \frac{\theta_{pc}}{\omega_m} = \frac{2\pi}{\left(\frac{P_s P_r}{2}\right)\omega_m} = \frac{4\pi}{\omega_m P_s P_r} \quad (31)$$

Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, η μία φάση υποτίθεται ότι τροφοδοτείται από το μέγιστο ρεύμα (σταθερό), ενώ το ρεύμα στη φάση που προηγήθηκε φθίνει και στη φάση που θα ακολουθήσει αυξάνεται. Οι συνολικές απώλειες χαλκού είναι το συγκεντρωτικό αποτέλεσμα όλων των ανώτερων ρευμάτων, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{Cu} = I_p^2 R_s = \frac{R_s}{T_{pc}} \left[ I_p^2 T_{pc} + \frac{1}{3} I_p^2 T_r + \frac{1}{3} I_p^2 T_f \right] = I_p^2 R_s \left[ 1 + \frac{(T_r + T_f)}{3T_{pc}} \right] \quad (32)$$

όπου  $T_r$  και  $T_f$  είναι οι χρόνοι ανόδου και μηδενισμού του ρεύματος, αντιστοίχως και το σχήμα 3-1. Οι χρόνοι αυτοί μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της SRM. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι από τις σχέσεις (31) και (32) προκύπτει ότι οι απώλειες χαλκού της

μηχανής εξαρτώνται από τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής της. Ως εκ τούτου, αρκεί να υπολογιστούν και να ληφθούν υπόψη μόνο με τη μέγιστη ταχύτητα της μηχανής, καθώς κάθε άλλο σημείο λειτουργίας είναι στη θερμικά ασφαλή περιοχή.

### 3.5 Εκτίμηση απωλειών πυρήνα

Η πρόβλεψη των απωλειών μαγνήτισης παίζει σημαντικό πόλο στη σχεδίαση της μηχανής και στον καθορισμό της θερμικής ισορροπίας. Η διαδικασία υπολογισμού, έστω και κατά προσέγγιση, των απωλειών μαγνήτισης είναι ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική, καθώς υφίστανται διαφορετικές πυκνότητες μαγνητικής ροής που περιλαμβάνουν και ανώτερες αρμονικές συχνότητες στα επιμέρους τμήματα της μηχανής.

Οι απώλειες πυρήνα σε μία SRM διακρίνονται σε απώλειες υστέρησης (hysteresis) και απωλειών δινορρευμάτων (eddy currents). Για να μειώσουμε τις απώλειες λόγω δινορρευμάτων, το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα και του στάτη είναι διαμορφωμένο σε λεπτά ελάσματα, τα οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους. Οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται πάντα από τη συχνότητα και τη διαδρομή της μαγνητικής ροής σε όλες τις διαδρομές μαγνητικής ροής της μηχανής. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι υπάρχουν  $P_s$  τμήματα διαδρομής στο σώμα του στάτη και ακόμα  $P_s$  τμήματα στους πόλους. Όσον αφορά το δρομέα και τα τμήματά του είναι οι  $P_r$  πόλοι και το σώμα του δρομέα. Για τροφοδοσία μόνο μιας φάσεως του στάτη, μόνο δύο πόλοι του στάτη και δύο πόλοι του δρομέα αναλαμβάνουν τη μεταγωγή της μαγνητικής ροής μαζί με το σώμα του στάτη και του δρομέα. Ο αριθμός των διακριτικών τμημάτων σιδηρομαγνητικού υλικού σε q-φασική SRM δίνεται από τη σχέση:

$$j = q + 2 \quad (33)$$

Ο συνολικός αριθμός τμημάτων σιδήρου που <<χρησιμοποιούνται>> ταυτοχρόνως για μη αλληλεπικαλυπτόμενα ρεύματα (τροφοδοσία μίας φάσεως κάθε φορά) προκύπτει από τη σχέση:

$$k = 2q + 6 = 2(j + 1) \quad (34)$$

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό συνίσταται στον υπολογισμό της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε κάθε τμήμα της μηχανής. Αυτό μπορεί να γίνει είτε σε

αναλυτικές είτε με αριθμητικές μεθόδους. Ταυτόχρονα θα πρέπει να υπολογιστούν και οι συχνότητες που περιλαμβάνει η μαγνητική ροή και η μάζα του κάθε τμήματος. Από τις χαρακτηριστικές του κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας, γνωρίζοντας την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, τη συχνότητα και τη μάζα του τμήματος, καταλήγουμε στις απώλειες υστέρησης του εξεταζόμενου τμήματος. Η μάζα είναι απαραίτητη, καθώς ο κατασκευαστής δίνει το συντελεστή απωλειών υστέρησης σε W/kg. Τέλος, οι συνολικές απώλειες υστέρησης της μηχανής προκύπτουν με άθροιση των ανωτέρω επιμέρους απωλειών των διαφόρων τμημάτων. Εν κατακλείδι, θα πρέπει να τονιστεί ότι η ανωτέρω διαδικασία προσφέρει έναν προσεγγιστικό υπολογισμό των απωλειών υστέρησης, χωρίς όμως ιδιαίτερη ακρίβεια. Εάν απαιτείται ακριβής υπολογισμός, η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι μονόδρομος.

### 3.6 Επιλογή τόξων πόλων

Ο κυριότερες απαιτήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή των τόξων του στάτη και του δρομέα είναι οι εξής:

- Ικανότητα εκκίνησης της μηχανής.
- Κατάλληλη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών στατικής ροπής συναρτήσει της θέσης του δρομέα.

Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να ενσωματωθούν στη σχεδίαση της μηχανής μέσω του υπολογισμού των ελάχιστων τιμών για τα τόξα του στάτη και του δρομέα που εξασφαλίζουν δυνατότητα εκκίνησης. Επιπλέον, ένα άνω όριο θα πρέπει να τεθεί στη γωνία αλληλοεπικάλυψης των πόλων στάτη και δρομέα και στο μέγιστο τόξο πόλου δρομέα. Παρακάτω θα συγκρίνουμε τις ανωτέρω κατευθύνσεις.

### 3.7 Ελάχιστη τιμή τόξου στάτη για δυνατότητα εκκίνησης

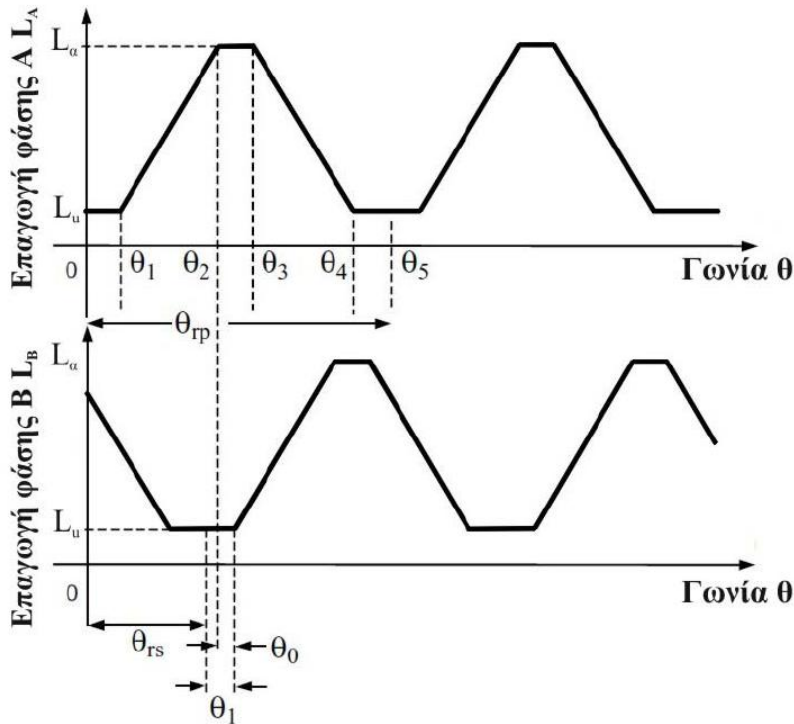
Ορίζουμε το μηχανικό εύρος πόλου δρομέα ως:

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r} \quad (rad) \quad (35)$$

Η διαφορά φάσεως μεταξύ δύο διαδοχικών επαγωγών του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r} \frac{1}{q} = \frac{\theta_{rp}}{q} \quad (\text{rad}) \quad (36)$$

όπου  $q = \frac{P_s}{2}$ , σε συνηθισμένες τοπολογίες ( με ένα δόντι ανά πόλο). Αν εξετάσουμε τις κυματομορφές επαγωγής δύο διαδοχικών φάσεων, που φαίνεται στο σχήμα 3-2,



**Σχήμα 3-2:** Κυματομορφές επαγωγής συναρτήσει της γωνίας θέσης του δρομέα για δύο διαδοχικές φάσεις του στάτη, όπου σημειώνονται οι κυριότερες μεταβλητές της ανάλυσης[1].

μπορούμε να δούμε ότι η ανάγκη για ανάπτυξη ροπής εκκίνησης σε κάθε θέση μεταφράζεται σε γωνία αλληλοεπικάλυψης φάσεων μικρότερων ή ίσων του μηδενός:

$$\theta_0 \leq 0 \quad (37)$$

Εάν θεωρήσουμε την κρίσιμη τιμή της γωνίας αλληλοεπικάλυψης  $\theta_0 = 0$ , τότε μπορούμε να εκφράσουμε τη γωνία  $\theta_0$  συναρτήσει των υπολοίπων γωνιών ως εξής:

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 = \theta_{rs} - (\theta_1 - \theta_2) = 0 \quad (38)$$

και από την παραπάνω σχέση προκύπτει η ελάχιστη τιμή για τη ποσότητα  $(\theta_2 - \theta_1)$ :

$$(\theta_2 - \theta_1)^{\min} = \theta_{rs} = \frac{\theta_{rp}}{q} = \frac{2\pi}{qP_r} = \frac{4\pi}{P_s P_r} \quad (39)$$



Μπορούμε να εκφράσουμε τις γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  συναρτήσει των τόξων των πόλων στάτη και δρομέα σύμφωνα με τις ακόλουθες απλές σχέσεις:

$$\theta_1 = \frac{1}{2}[\theta_{rp} - (\beta_s + \beta_r)] \quad (40)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (41)$$

Επομένως, η διαφορά  $(\theta_2 - \theta_1) = \beta_s$  (42)

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (39) και (42) προκύπτει η ελάχιστη τιμή για το τόξο πόλου του στάτη (υποθέτοντας γραμμικές χαρακτηριστικές μαγνήτισης) που είναι:

$$\beta_s^{min} = \frac{4\pi}{P_s P_r} \quad (rad) \quad (43)$$

### **Όρια για τη γωνία αλληλεπίδρασης πόλων στάτη-δρομέα**

Τα όρια για τη γωνία αλληλοεπικάλυψης πόλων στάτη-δρομέα  $\theta_0$  ώστε να υπάρχει δυνατότητα εκκίνησης από κάθε θέση είναι:

$$\theta_0^{min} = 0$$

$$\theta_0^{min} = -\frac{2\pi}{P_r} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{q} \right) \quad (44)$$

Εφόσον έχουμε αλληλοεπικάλυψη πόλων, η γωνία  $\theta_0$  είναι αρνητική και με το max νοείται η μέγιστη αρνητική τιμή της. Από το σχήμα 3-2 είναι φανερό ότι θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός, κάτι που σημαίνει ότι:

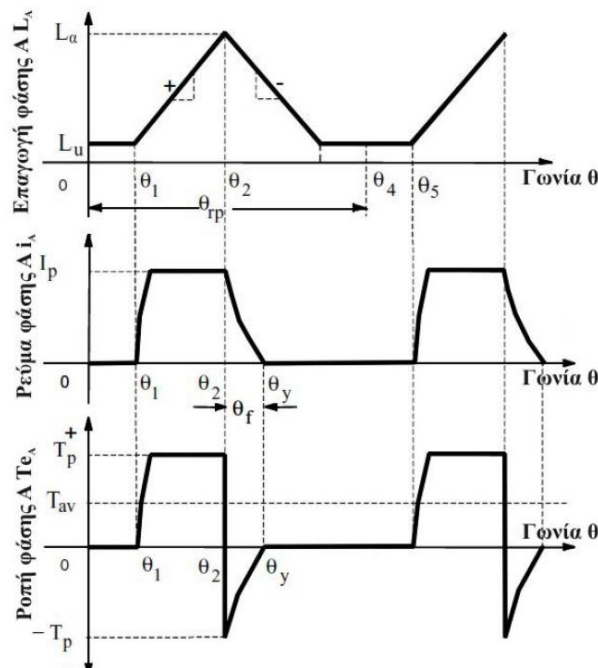
$$(\beta_r - \beta_s) \geq 0 \rightarrow \beta_r \geq \beta_s \quad (45)$$

Κατά συνέπεια, το τόξο πόλου του δρομέα προκύπτει ότι θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του πόλου του στάτη. Άρα η σχέση (43) προκύπτει ένα κάτω όριο και για το τόξο του πόλου του δρομέα ίσο με το κάτω όριο που ορίστηκε για το τόξο πόλου του στάτη.

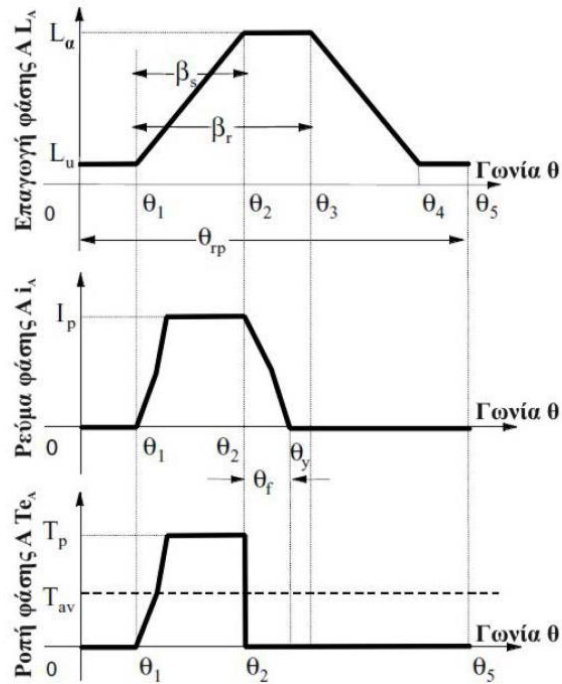
### **3.8 Άνω όριο για το τόξο πόλου του δρομέα**

Το να επιλεγεί τόξο του πόλου του δρομέα μεγαλύτερο από το αντίστοιχό του στάτη έχει αξία όσον αφορά την παραγωγή ροπής μόνο στις περιπτώσεις λειτουργίας SRM, που δεν έχουμε ιδανική διακοπή του ρεύματος τροφοδοσίας του τυλίγματος. Με τον όρο ιδανική διακοπή εννοείται ο μηδενισμός του ρεύματος τροφοδοσίας ακριβώς στο

σημείο της μέγιστης επαγωγής, ώστε να έχουμε ανάπτυξη αρνητικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 3-4. Λόγω της σημαντικής τιμής επαγωγής κοντά στη θέση ευθυγράμμισης, ο μηδενισμός του ρεύματος γίνεται με μεγαλύτερη χρονική σταθερά. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να δίνεται εντολή για μεταγωγή της φάσεως σε κατάλληλη χρονική στιγμή πριν ο δρομέας φτάσει στη θέση ευθυγράμμισεως, όπου θέλουμε να επέλθει ο μηδενισμός. Εάν τα τόξα του πόλου του δρομέα και του στάτη είναι ίσα, η στιγμή της μεταγωγής θα πρέπει να είναι γνωστή με εξαιρετική ακρίβεια για κάθε σημείο λειτουργίας, κάτι που δεν είναι πρακτικά εφικτό. Από την άλλη πλευρά θα πρέπει να έχουμε υπόψη ότι το τμήμα του μεγαλύτερου πόλου δρομέα είναι μεγαλύτερος όγκος και βάρος σιδηρομαγνητικού υλικού. Για το λόγο αυτό στη πράξη στις περισσότερες μηχανές επιλέγεται ελάχιστα μεγαλύτερο τόξο πόλου δρομέα από το αντίστοιχο τόξο του στάτη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια περιοχή σταθερής επαγωγής πέριξ της θέσης ευθυγράμμισης, η οποία δίνει ένα περιθώριο για μηδενισμό του ρεύματος χωρίς την ανάπτυξη αρνητικής ροπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-5. Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την επιλογή ενός ελαφρώς μεγαλύτερου τόξου πόλου δρομέα σε σχέση με το αντίστοιχο του στάτη συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:



**Σχήμα 3-4:** Επίδραση στην ανάπτυξη ροπής της επιλογής ίσων τόξων πόλου για στάτη και δρομέα[1].

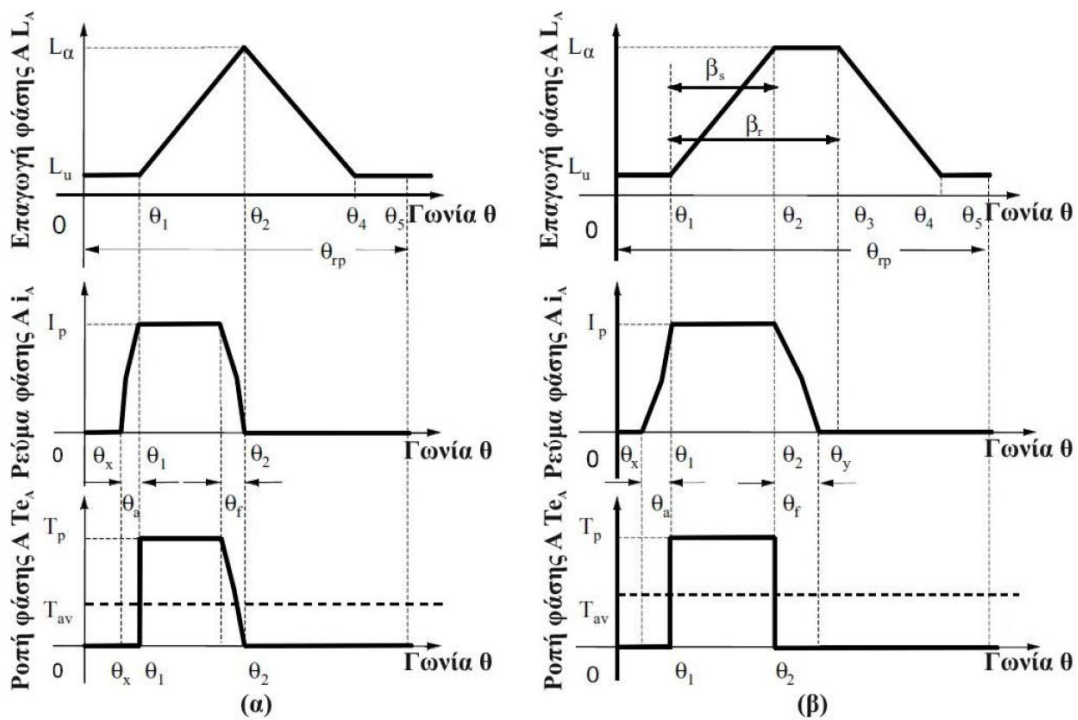


**Σχήμα 3-5:** Επίδραση στην ανάπτυξη ροπής της επιλογής του πόλου δρομέα μεγαλύτερο από το τόξο πόλου του στάτη[1].

- A. Η παραγωγή αρνητικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής μπορεί να αποφευχθεί πλήρως με την υιοθέτηση μιας νεκρής ζώνης, από τη γωνία  $\theta_2$  έως τη  $\theta_3$  εύρους  $(\beta_r - \beta_s)$ . Στη ζώνη αυτή δε παράγεται ροπή, λόγω της σταθερής επαγωγής, ακόμα και αν το πηνίο τροφοδοτείται με ρεύμα. Η ιδιότητα αυτή τελικά αυξάνει την εισφορά ροπής της φάσης, καθώς δεν αναπτύσσεται αρνητική ροπή.
- B. Ο ακριβής υπολογισμός της γωνίας μηδενισμού του ρεύματος  $\theta_f$  δεν είναι πλέον απαραίτητος για κάθε λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Αρκεί μόνο να υπολογίσουμε το μέγιστο απαιτούμενο τόξο πόλου δρομέα στη περίπτωση μεγίστου ρεύματος λειτουργίας, κάτι που θα αναλύσουμε στα επόμενα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξάλειψη της ανάγκης για συνεχή υπολογισμό της γωνίας μηδενισμού ρεύματος μειώνει δραματικά το υπολογιστικό κόστος και συμβάλλει στη λειτουργική απλότητα του συστήματος οδήγησης.
- C. Αν η γωνία μεταγωγής (turn-on angle) της φάσης προηγηθεί κατάλληλα, το μέγιστο ρεύμα θα μπορούσε να διατηρηθεί κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιοχής παραγωγής θετικής ροπής, όταν  $\beta_r > \beta_s$ . Το γεγονός αυτό οδηγεί σε

σημαντική αύξηση της μέσης ροπής σε σχέση με μία SRM με ίσα τόξα πόλων στάτη και δρομέα. Αυτό είναι κεφαλαιώδες πλεονέκτημα, τόσο στη μόνιμη λειτουργία όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα. Το κέρδος αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 3-6, στο οποίο οι περιοχές παραγωγής ροπής και τα μέγιστα φασικά ρεύματα θεωρούνται ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ οι γωνίες έναυσης και σβέσης έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να μην έχουν παραγωγή αρνητικής ροπής. Παρότι η παραγόμενη ροπή στη δεύτερη περίπτωση, όπου  $\beta_r > \beta_s$ , είναι μεγαλύτερη, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι και η RMS τιμή του ρεύματος προκύπτει μεγαλύτερη.

D. Η εξάλειψη της αρνητικής παραγόμενης ροπής μειώνει την κυμάτωση της ροπής και κατά συνέπεια την ακουστική όχληση.



**Σχήμα 3-6:** Επίδραση της μέσης αναπτυσσόμενης ροπής της επιλογής τόξου πόλου δρομέα και στάτη[1]. (α)  $\beta_r = \beta_s$  και (β)  $\beta_r > \beta_s$

Βάσει όλων των παραπάνω δεδομένων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι είναι ιδιαίτερος πλεονεκτικό να επιλέγουμε τόξο πόλου δρομέα μεγαλύτερο από το τόξο πόλου του στάτη. Συνεπώς, πλέον το θέμα είναι η ποσοτικοποίηση της παραπάνω επιλογής. Το άνω όριο για το τόξο πόλου του δρομέα τίθεται σε σχέση:

$$\beta_r^{max} = \beta_s + \theta_{fr} \quad (44)$$

όπου  $\theta_{fr}$  είναι η γωνία μηδενισμού του ρεύματος για ονομαστική λειτουργία. Η παραπάνω σχέση εξασφαλίζει μέγιστη παραγωγή ροπής αλλά δε βελτιστοποιεί την απόδοσή ή την απολαβή ροπής ανά μονάδα ρεύματος. Η γωνία μηδενισμού του ρεύματος θα υπολογιστεί από το χρόνο μηδενισμού που δίνεται από τη σχέση  $T_f = \tau_\alpha \ln[1 + \frac{R_s I_p}{\varphi}]$  (χρόνος μηδενισμού), όπου  $\tau_\alpha = \frac{L_a}{R_s}$  (σταθερά χρόνου στη θέση ευθυγράμμισης) ως εξής:

$$\theta_{fr} = \omega_m T_f = [\omega_m \tau_\alpha] \ln[1 + \frac{R_s I_p}{\varphi}] \quad (45)$$

Το γινόμενο ( $\omega_m T_f$ ) είναι η εφαπτομένη της γωνίας εμπέδησης της μηχανής στη θέση ευθυγράμμισης για ρεύμα  $I_p$ . Συνεπώς σύμφωνα με τα προηγούμενα το εύρος επιλογής για το τόξο πόλου του δρομέα προκύπτει:

$$\beta_s \leq \beta_r \leq (\beta_s + \theta_{fr}) \quad (46)$$

Τέλος μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις στις οποίες η γωνία μηδενισμού του ρεύματος  $\theta_{fr}$  μπορεί να είναι μέχρι και 50% του τόξου του πόλου του δρομέα ή και μεγαλύτερη. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι συμφέρον να συνεχίσουμε να αυξάνουμε το εύρος του τόξου πόλου του δρομέα για να αποφύγουμε την παραγωγή αρνητικής ροπής, καθώς αυξάνεται ασύμφορα το βάρος και ο όγκος του χρησιμοποιούμενου σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομέα. Η εναλλακτική σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ο ακριβής υπολογισμός της γωνίας μεταγωγής, που παρότι μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της μέσης ροπής, είναι σαφώς προτιμότερη λύση.

### 3.9 Πάχος σώματος στάτη

Το πάχος του σώματος του στάτη  $b_{sy}$  (stator back iron thickness) καθορίζεται από την προδιαγραφή για τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής εντός του και επιπροσθέτως από την ανάγκη για μείωση των ταλαντώσεων, που προκαλούν ακουστική όχληση. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο σιδηρούν σώμα του στάτη είναι κατά προσέγγιση η μισή της πυκνότητας στον πόλο του στάτη. Για να έχουμε όμως μια ασφαλέστερη εκτίμηση ακόμα και στην περίπτωση μη ομοιόμορφου διαμοιρασμού της ροής, επιλέγουμε μια ελαφρώς μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής από τη μισή του πόλου για το σχεδιασμό. Τα τόξα των πόλων του στάτη θα πρέπει να έχουν κατάλληλο μήκος, ώστε να καλύπτουν την προδιαγραφή για τη μέγιστη πυκνότητα

μαγνητικής ροής στον πόλο. Το μήκος του τόξου που αντιστοιχεί στον πόλο δίνεται από τη σχέση:

$$W_{sp} = D \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (47)$$

Συνεπώς το πάχος του σώματος του στάτη θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με  $0,5w_{sp}$ . Λόγω των απαιτήσεων για μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και μείωση των ταλαντώσεων, η τιμή του στη πράξη επιλέγεται να είναι εντός του εύρους:

$$0,5w_{sp} \leq b_{sy} < w_{sp} \quad (48)$$

Συνίσταται να επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή για το  $b_{sy}$  από την ελάχιστη επιτρεπτή.

### 3.10 Διαστάσεις πηνίων στάτη

Οι διαστάσεις των πηνίων του στάτη καθορίζονται από το πλάτος  $W_c$  και το ύψος του  $h_c$ . Εξαρτώνται από τη διατομή του αγωγού  $S$ , από τη πυκνότητα του ρεύματος και τον αριθμό των ελιγμών ανά φάση  $N_t$ . Με  $w_{cs}$  συμβολίζουμε την απόσταση μεταξύ δύο πηνίων που φιλοξενούνται στην ίδια αύλακα. Το εμβαδόν της διατομής ενός πηνίου του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$w_c \cdot h_c = \frac{S \cdot N_t}{2} \quad (49)$$

Το μέγιστο πλάτος  $w_c$  προκύπτει από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη (bore) αν αφαιρέσουμε τα τόξα των πόλων και τα κενά μεταξύ των πηνίων που φιλοξενούνται στην ίδια αύλακα και διαιρέσουμε το αποτέλεσμα με τον αριθμό των πηνίων του στάτη, δηλαδή:

$$w_s = \frac{\pi D - P_s [\beta_s \frac{D}{2} - w_{cs}]}{2P_s} = \frac{\pi}{2P_s} - \frac{1}{2} \left\{ \frac{D}{2} \beta_s + w_{cs} \right\} \quad (50)$$

Συνδυάζοντας τις (38) και (39) το διαθέσιμο ύψος του πηνίου προκύπτει:

$$h_c = \frac{SN_t}{2w_c} = SN_t \left[ \frac{P_s}{\pi D - P_s (\beta_s \frac{D}{2} - w_{cs})} \right] \quad (51)$$

### 3.11 Ύψος πόλου στάτη

Το ελάχιστο ύψος πόλου είναι περίπου ίσο με το το ύψος του πηνίου αυξημένο κατά το ύψος του στοιχείου συγκράτησης του πηνίου στη θέση του που τοποθετείται κοντά

στην άκρη του πόλου. Επίσης το πηνίο δεν εφαρμόζει επακριβώς στη βάση του πόλου και ως εκ τούτου κάποιες ανοχές θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Παίρνοντας υπόψη τις παραπάνω απαιτήσεις το ύψος του πόλου  $h_s$  εκλέγεται:

$$h_c < h_s < 1,4h_c \quad (52)$$

### 3.12 Εξωτερική διάμετρος στάτη

Εάν η εξωτερική διάμετρος είναι προαποφασισμένη, τότε ο σχεδιασμός εκτελείτε από το εξωτερικό προς το εσωτερικό της μηχανής. Ειδάλλως, η εξωτερική διάμετρος είναι μία απλή άθροιση των μεγεθών που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα:

$$D_o = D + 2b_{sy} + 2h_s \quad (53)$$

### 3.13 Πάχος σώματος δρομέα

Για την επιλογή κατάλληλης τιμής για το πάχος του σώματος του δρομέα  $b_{ry}$  (rotor back iron thickness) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο η μηχανική αντοχή του δρομέα όσο και η τήρηση των ορίων πυκνότητας μαγνητικής ροής στο σώμα του. Δεν απαιτείται να έχει το πάχος του σώματος του στάτη ούτε χρειάζεται να έχει τουλάχιστον το μισό πάχος του πόλου του δρομέα. Το εύρος τιμών που θα προκύψει από την ανάγκη για σημαντικό διάκενο μεταξύ των πόλων, έτσι ώστε να έχουμε μεγάλης τιμής λόγο επαγωγών μεταξύ των θέσεων ευθυγράμμισης και αντίθεσης. Ταυτόχρονα, υπάρχει η απαίτηση για μικρού μήκους πόλους δρομέα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ταλαντώσεις στη μηχανή. Βασιζόμενοι σε αυτές τις απαιτήσεις, το πάχος του σώματος του δρομέα θα πρέπει να εμπίπτει στο διάστημα:

$$0,5w_{sp} < b_{ry} < 0,75w_{sp} \quad (54)$$

### 3.14 Ύψος σώματος δρομέα

Δοθείσης της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη (bore), το μήκος το διακένου  $l_g$ , το πάχος του σώματος του δρομέα και τη διάμετρο του άξονα, το ύψος του δρομέα προκύπτει από τη σχέση:

$$h_r = \frac{D - 2l_g - D_{sh} - 2b_{ry}}{2} \quad (55)$$

όπου  $D_{sh}$  είναι η διάμετρος του άξονα της μηχανής.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας στο σημείο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανής σύμφωνα με τις ορισθείσες προδιαγραφές και έχουμε στη συνέχεια τη δυνατότητα να προχωρήσουμε και στην κατασκευή του σχεδίου βάση τις διαστάσεις που θα προκύψουν. Στη δεδομένη μηχανή οι υπολογισμοί των διαστάσεων θα ξεκινήσουν από έξω προς τα μέσα λόγω του ότι έχουμε περιορισμό στο μέγεθος του  $D_o=0,074m$ . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι σημαντικότερες διαστάσεις ενός 6-4 SRM.

Διαστάσεις 6-4 SRM	
<b><math>D_o</math></b>	0,074
<b><math>D</math></b>	0,048
<b><math>b_{sy}</math></b>	0,0084
<b><math>b_{ry}</math></b>	0,0084
<b><math>h_r</math></b>	0,0085
<b><math>l_g</math></b>	0,0002
<b><math>D_{sh}</math></b>	0,014
<b><math>h_s</math></b>	0,0043
<b><math>h_c</math></b>	0,0031
<b><math>w_{cs}</math></b>	0,003
<b><math>w_{sp}</math></b>	0,012
<b><math>\beta_s</math></b>	29
<b><math>\beta_r</math></b>	30

Πίνακας 3-1: Σημαντικότερες διαστάσεις ενός 6-4 SRM



## 5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιάκωβος Στ. Μανωλάς, Ph.D Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχεδίαση και Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (Switched Reluctance Machines-SRMs), pp 55-71
- [2] Torsten Wichert, M.Sc., Ph.D. THESIS, WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines, pp 55-56
- [3] Müller, G.: „Theorie elektrischer Maschinen“. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1. Aufl., 1995
- [4] Vogt, K.: „Elektrische Maschinen: Berechnung rotierender elektrischer Maschinen“. VEB Verlag Technik, Berlin, 4. Aufl., 1988
- [5] Reinert, J.: „Optimierung der Betriebseigenschaften von Antrieben mit geschalteter Reluktanzmaschine“. D 82 Diss. RWTH Aachen, Verlag der Augustinus Buchhandlung im Besitz des Verlags Mainz, 1998
- [6] Risse, S.: „Entwicklung einer geschalteten Reluktanzmaschine als Elektrofahrzeugantrieb“. D 82 Diss. RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 1. Aufl., 2002
- [7] Krishnan, R., Arumugam, R., Lindsay, F.F.: “Design Procedure for Switched-Reluctance Motors”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No. 3, May/June 1998
- [8] Laube, F.: „Simulation Geschalteter Reluktanzmaschinen (SRM) mit SIMPLORER®“. Aus dem Jahresbericht der Technischen Universität Braunschweig, 2001

## 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

# Μοντελοποίηση της SRM στο COMSOL Multiphysics

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του Η/Υ, αν και κατήργησε σταδιακά τις περισσότερες «προσεγγιστικές» παραδοχές, τις οποίες είχε επιβάλλει το παλιό, χειρόγραφο σύστημα υπολογισμών, δεν απεμπλέκει ολοκληρωτικά τόσο για λόγους συνήθειας και ομαλότερης προσαρμογής των μελετητών στην νέα τεχνολογία, όσο και αποφυγής χρονοβόρων μαθηματικών πράξεων (καθόλου αμελητέων σε συστήματα Η/Υ της περασμένης δεκαετίας-πενταετίας).

Όμως η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας της πληροφορικής και οι ολοένα και περισσότερες απαιτήσεις της σύγχρονης γενιάς μελετητών έδωσαν, όπως ήταν φυσικό, την αφορμή για λεπτομερέστερη μελέτη των συστημάτων και ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων εξομοίωση.

Το COMSOL είναι ένα περιβάλλον προσομοίωσης που προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων και αλληλεπιδραστικών φυσικών φαινομένων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αποτελεί δε την ιδανική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού σε πληθώρα εφαρμογών όπως αισθητήρες και μικρό ηλεκτρομηχανολογικές συσκευές (MEMS), και γενικότερα οποιουδήποτε προβλήματος σχεδιασμού και μοντελοποίησης συζευγμένων φυσικών φαινομένων.

## 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS

### 2.1 Μερική διαφορική εξίσωση

Το μοντέλο στο COMSOL Multiphysics μίας γεννήτριας είναι ένα χρονοεξαρτούμενο δυσδιάστατο πρόβλημα μίας κάθετης τομής στο εσωτερικό του κινητήρα. Είναι ένα πραγματικά χρονοεξαρτούμενο μοντέλο όπου η κίνηση της μαγνητικής πηγής στο δρομέα υπολογίζεται από τη συνοριακή συνθήκη ανάμεσα στο στάτη και τη γεωμετρία του δρομέα. Έτσι, δεν υπάρχει κάποιος όρος της εξίσωσης Lorentz, ως αποτέλεσμα παίρνεις την εξίσωση PDE:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = 0$$

όπου το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό έχει μόνο ένα z στοιχείο.

### 2.2 Γεωμετρικός διαχωρισμός

Η περιστροφή διαμορφώνεται χρησιμοποιεί ένα παραμορφωμένο πλέγμα (ALE), στην οποία το κεντρικό τμήμα της γεωμετρίας, που περιλαμβάνει τον δρομέα και ένα μέρος του κενού που δημιουργείται μεταξύ του δρομέα και του στάτη, περιστρέφεται με μία περιστροφική μετασχηματική σχέση με το σύστημα συντεταγμένων του στάτη. Η περιστροφή του πλέγματος μετασχηματισμού καθορίζεται από τον μετασχηματισμό

$$\begin{bmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{stat} \\ y_{stat} \end{bmatrix}$$

Ο δρομέας και ο στάτης σχεδιάζονται ως δύο διαφορετικά γεωμετρικά αντικείμενα, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσεις έναν συντελεστή. Αυτό έχει μερικά πλεονεκτήματα: η σύζευξη ανάμεσα στο δρομέα και τον στάτη γίνεται αυτόματα, τα μέρη πλεγματοποιούνται ανεξάρτητα, και επιτρέπει μια ασυνέχεια στο δυναμικό του φορέα στο σημείο διεπαφής μεταξύ των δύο γεωμετρικών αντικειμένων. Το πρόβλημα του δρομέα λύνεται με ένα σύστημα συντεταγμένων όπου ο δρομέας είναι σταθερός[1], το πρόβλημα στο στάτη λύνεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων που καθορίζεται με τη θέση του στάτη. Μεταξύ του δρομέα και του

στάτη δημιουργείται ένα ζεύγος ταυτοτήτων που συνδέει τον περιστρεφόμενο δρομέα και τον σταθερό στάτη. Το ζεύγος ταυτοτήτων ενισχύει τη σύζευξη για τον δυναμικό του φορέα στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων [2].

### 2.3 Επιλογή υλικού

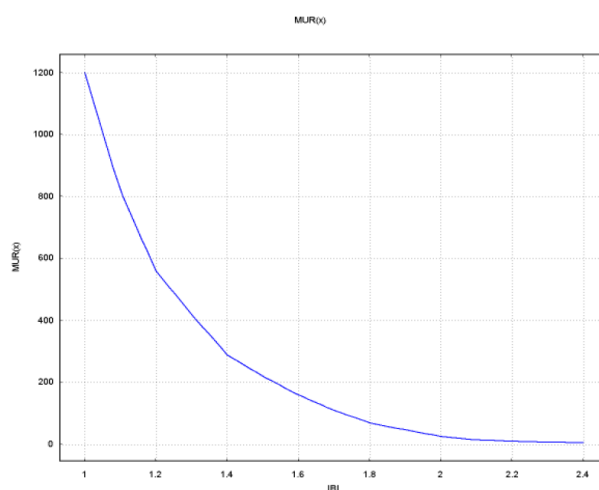
Το υλικό στον στάτη κι στο κέντρο του δρομέα έχουν μία μη γραμμική σχέση μεταξύ της μαγνητικής ροής,  $B$  και του μαγνητικού πεδίου,  $H$  έτσι αποκαλούνται καμπύλη  $B$ - $H$ [3]. Αυτό εισάγεται με τη χρήση της σχετικής διαπερατότητας,  $\mu_r$ , η οποία δημιουργεί μια συσχέτιση με τον τύπο της μαγνητικής ροής,  $|B|$ . Είναι σημαντικό ότι υπάρχει διαφωνία για την σχετική διαπερατότητα και την συσχέτισή της με την μαγνητική ροή,  $|B|$  αντί για την τύπο του μαγνητικού πεδίου,  $|H|$ . Σε αυτό το πρόβλημα το  $B$  υπολογίζεται από την εξάρτηση της μεταβλητής  $A$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$B = \nabla \times A$$

το  $H$  υπολογίζεται από το  $B$  χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$H = \frac{B - B_r}{\mu_0 \mu_r}$$

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ή έναν κυκλικό ορισμό του  $\mu_r$  έχει  $|H|$  το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ως ορισμός για τη λειτουργία της διαπερατότητας. Στο COMSOL Multiphysics, η καμπύλη  $B$ - $H$  εισάγεται ως παρεμβαλλόμενη λειτουργία. Δείτε σχήμα 3.1. Αυτή η σχέση για το  $\mu_r$  είναι προκαθορισμένη για το υλικό Soft Iron της βιβλιοθήκης υλικών που σχετίζονται με την ενότητα AC/DC, `acdc_lib.txt`.



**Σχήμα 2-1:** Η σχετική διαπερατότητα vs. τύπου της μαγνητικής ροής  $|B|$ , από το υλικό του δρομέα και του στάτη.

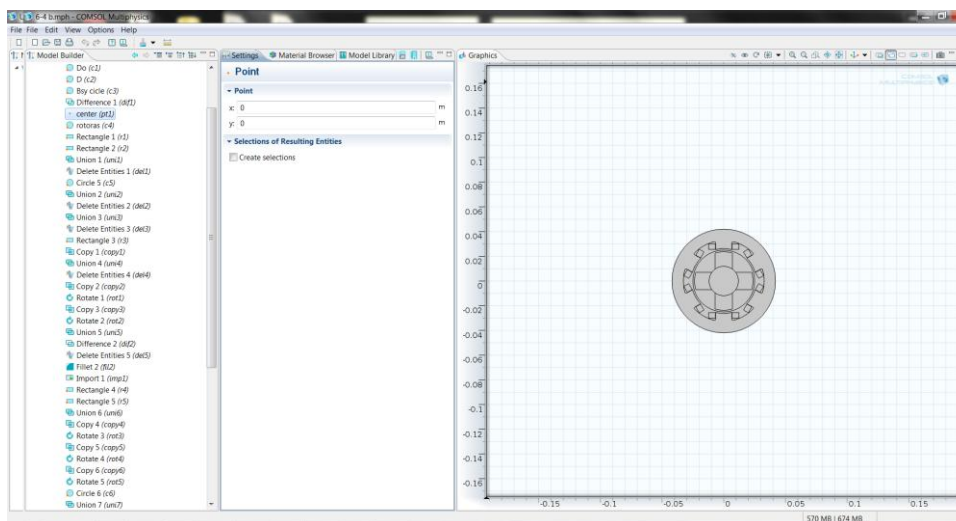
## 2.4 Παραγόμενη τάση

Η παραγόμενη τάση υπολογίζεται σαν γραμμική σχέση του ηλεκτρικού πεδίου,  $E$ , κατά το μήκος του τυλίγματος. Δεδομένου ότι οι σπείρες δεν είναι συνδεδεμένες στη δισδιάστατη γεωμετρία, δεν μπορεί να τα διεξαχθεί μία αναπόσπαστη ακέραιη γραμμή. Μία απλή προσέγγιση είναι να παραμελήσει τη συνεισφορά της τάσης από το τέλος του δρομέα, όπου οι περιοχές των τυλιγμάτων ενώνονται. Η τάση που λαμβάνεται από τη εξαγωγή του μέσου όρου του  $z$  εξαρτώμενο από το  $E$  πεδίο για κάθε περιοχή διατομή των σπειρών, πολλαπλασιαζόμενα με το αξονικό μήκος του δρομέα και λαμβάνοντας το άθροισμα απ' όλες τις επιφάνειες περιτυλίγματος[4].

$$V_i = NN \sum_{winding} \frac{L}{A} \int E_z dA$$

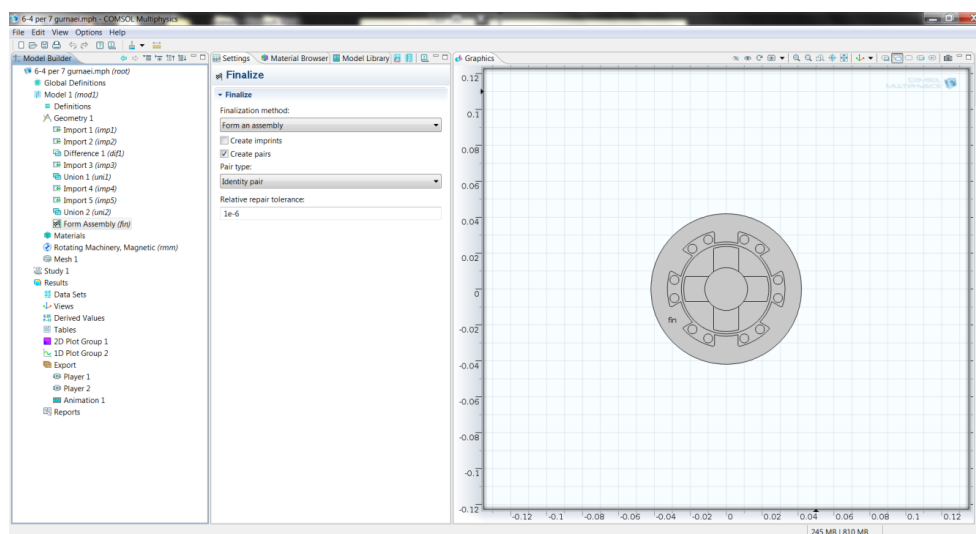
### 3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ 6/4 SRM ΣΤΟ COMSOL

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα - διαστάσεις που διεξήχθησαν από το προηγούμενο κεφάλαιο σχεδιάσαμε βήμα προς βήμα τον ηλεκτροκινητήρα όπως φαίνεται παρακάτω(εικόνα 3-1). Αρχικά σχεδιάσαμε το σύνολο του κινητήρα και στη συνέχεια των χωρίσαμε σε τμήματα.



Εικόνα 3-1: Σχεδιασμός του κινητήρα βάσει των αποτελεσμάτων από το προηγούμενο κεφάλαιο.

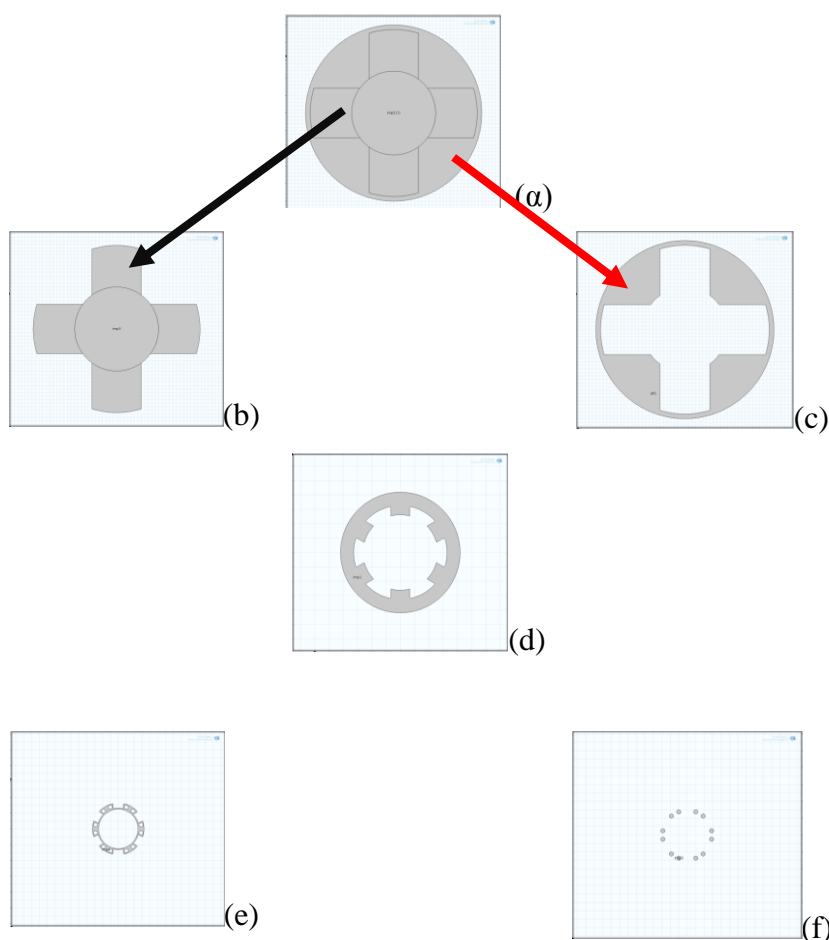
Για υπολογιστικούς λόγους του προγράμματος θεωρήθηκε καλύτερο να αλλάξουμε το σχέδιο των πηνίων στο COMSOL από τετράγωνα σε κυκλικά όπως φαίνεται στο παρακάτω εικόνα(3-2).



Εικόνα 3-2: Σχεδιασμός των καινούργιων πηνίων και ενσωμάτωσή τους στο τελικό σχέδιο.

### 3.1 Τμηματοποίηση του σχεδίου

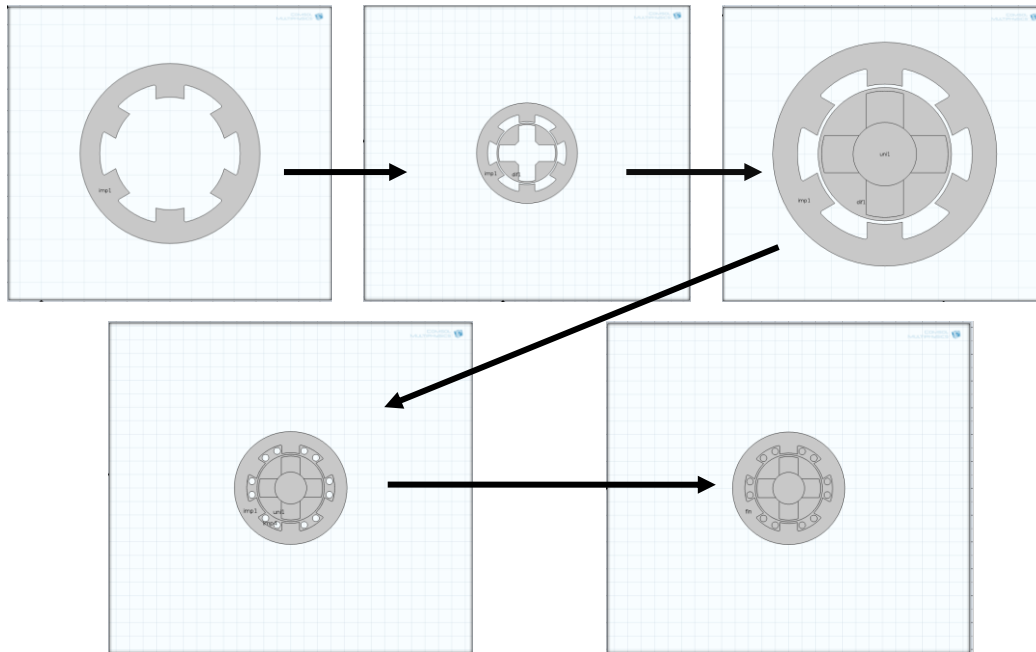
Ο χωρισμός του σχεδίου σε κομμάτια έγινε για την διεξαγωγή αποτελεσμάτων. Το COMSOL σχεδιάζοντας απλά το σχέδιο δεν μπορούσε να καταλάβει την τμηματοποίηση την οποία θέλαμε εμείς να δείξουμε με αποτέλεσμα στις πρώτες δοκιμές να μην έχουμε εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αυτό το πρόβλημα μας οδήγησε στον σχεδιασμό κάθε τμήματος ανεξάρτητα απο το άλλο όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 3-3:** (a) ο δρομέας μαζί με την περιοχή στην οποία θα συμμετέχουν στην περιστροφική κίνηση, (b) ο δρομέας, (c) η περιοχή του αέρα που θα συμμετέχει μαζί με τον δρομέα στην περιστροφική κίνηση, (d) στάτορας, (e) η περιοχή του αέρα η οποία θεωρητικά δεν επηρεάζεται και μένει σταθερή μαζί με τον στάτη, (f) τα πηνία που σχεδιάστηκαν για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα.

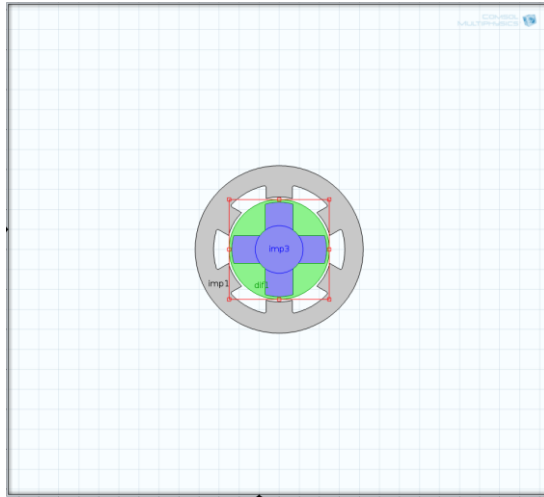


Μετά την τμηματοποίηση του αρχικού σχεδίου αρχίσαμε να τοποθετούμε μεθοδικά το κάθε τμήμα στο σχέδιο ξεχωριστά. Αρχικά εισάγαμε στο σχέδιο τον στάτη, έπειτα την περιοχή του αέρα η οποία συμμετέχει στην περιστροφική κίνηση του δρομέα. Στη συνέχεια εισήχθη στο σχέδιο ο δρομέας, μετά η περιοχή του αέρα που παραμένει σταθερή μαζί με τον στάτη και τέλος τα πηνία. Όπως φαίνεται και σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3-4) .



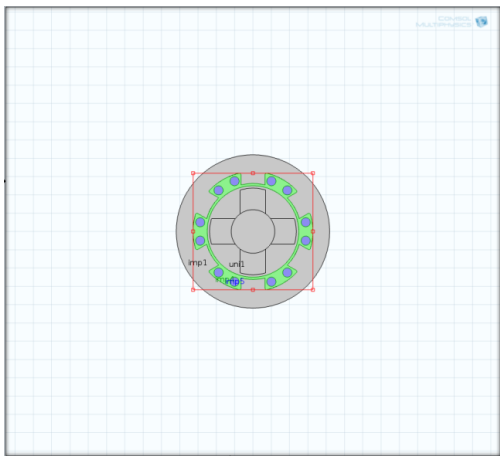
**Σχήμα 3-4:** Σταδιακή απεικόνιση για την κατασκευή του SRM 6-4 στο COMSOL Multiphysics

Κατα το στάδιο στο οποίο εισήχθη ο δρομέας στο σχέδιο κάναμε ενοποίηση του σχεδίου του με αυτό της περιοχής του αέρα που συμμετέχει στην περιστροφική κίνηση μαζί με αυτόν (εικόνα 3.5).

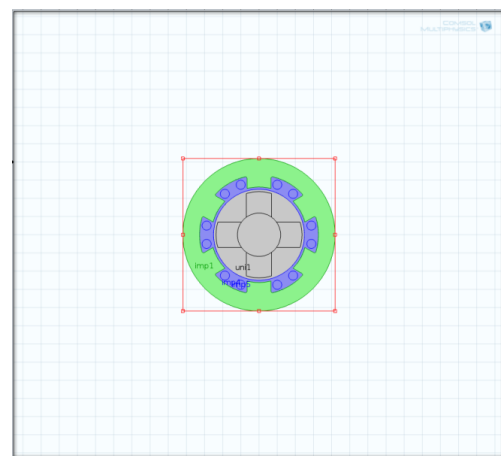


Εικόνα 3.5: Ενοποίηση των τμημάτων τα οποία φαίνονται με μωβ-μπλε και πράσινο χρώμα, ο δρομέας και η περιοχή του αέρα που συμμετέχει στην περιστροφική κίνηση αντίστοιχα.

Αφού εισαγάγαμε στο σχέδιο όλα τα τμήματα του κινητήρα επαναλάβαμε την διαδικασία της ενοποίησης αλλά αυτή τη φορά κάναμε του αέρα που παραμένει σταθερός αρχικά με τα πηνία (εικόνα3.6) και στη συνέχεια την περιοχή αυτή με τον στάτη (εικόνα3.7).



Εικόνα 3.6: Ενοποίηση του αέρα που παραμένει σταθερός με τα πηνία που σχεδιάσαμε.



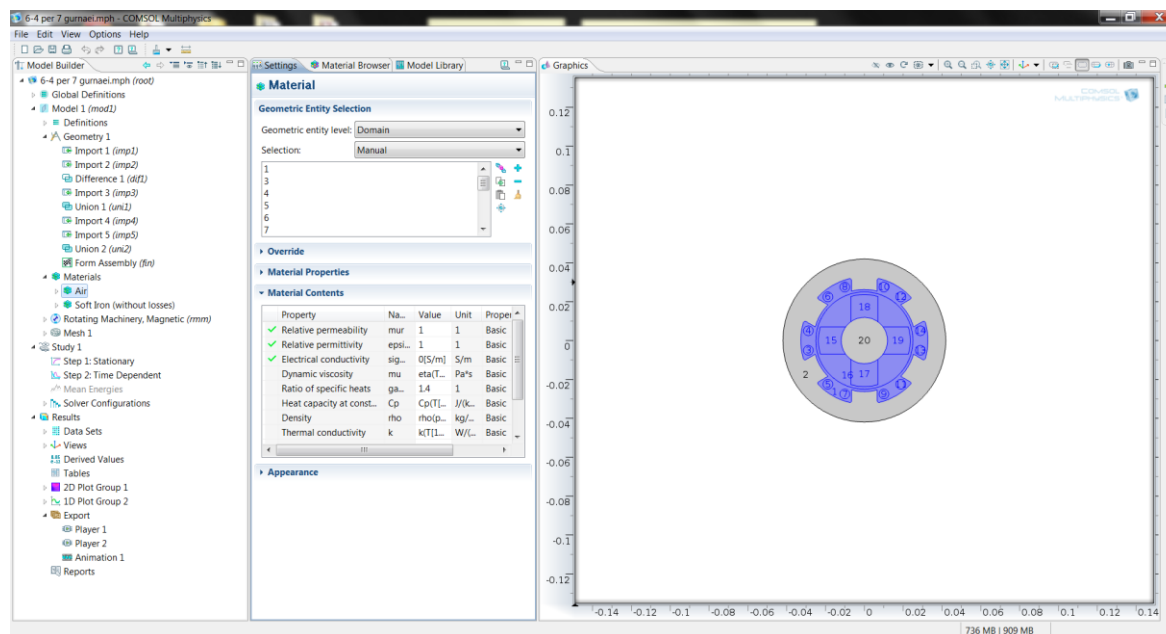
Εικόνα 3.7: Ενοποίηση του στάτη μαζί με την περιοχή του αέρα που μένει σταθερού και των πηνίων.

Στη συνέχεια αφού τελείωσε η σχεδίαση του κινητήρα χρησιμοποιήσαμε σαν πρότυπο τις ρυθμίσεις από τον κινητήρα που είχε το ίδιο το πρόγραμμα (COMSOL Multiphysics). Αρχικά έγινε ρύθμιση στις παραμέτρους δηλαδή ότι ο κινητήρας θα κινητέ με 60 rpm και το μήκος του θα είναι 1 m.

## 3.2 Materials (Υλικά)

Στη συνέχεια ακολουθώντας τον πίνακα για το πώς να στήσουμε ένα μοντέλο πραγματοποιούμε την επιλογή των υλικών τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε στον κινητήρα μας. Επιλέξαμε μόνο δύο υλικά τον αέρα και το μαλακό σίδηρο. Η επιλογή έγινε με γνώμονα όπως ήδη έχει αναφερθεί, τον κινητήρα του ίδιου του προγράμματος στο τρόπο που έχει κατασκευαστεί αλλά και στην επιλογή των εξισώσεων που χρησιμοποιήσαμε κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης. Στις παρακάτω εικόνες γίνονται διακριτές οι περιοχές στις οποίες χρησιμοποιήσαμε σαν υλικό τον αέρα (air) αλλά και τον μαλακό σίδηρο χωρίς απώλειες (soft iron without losses).

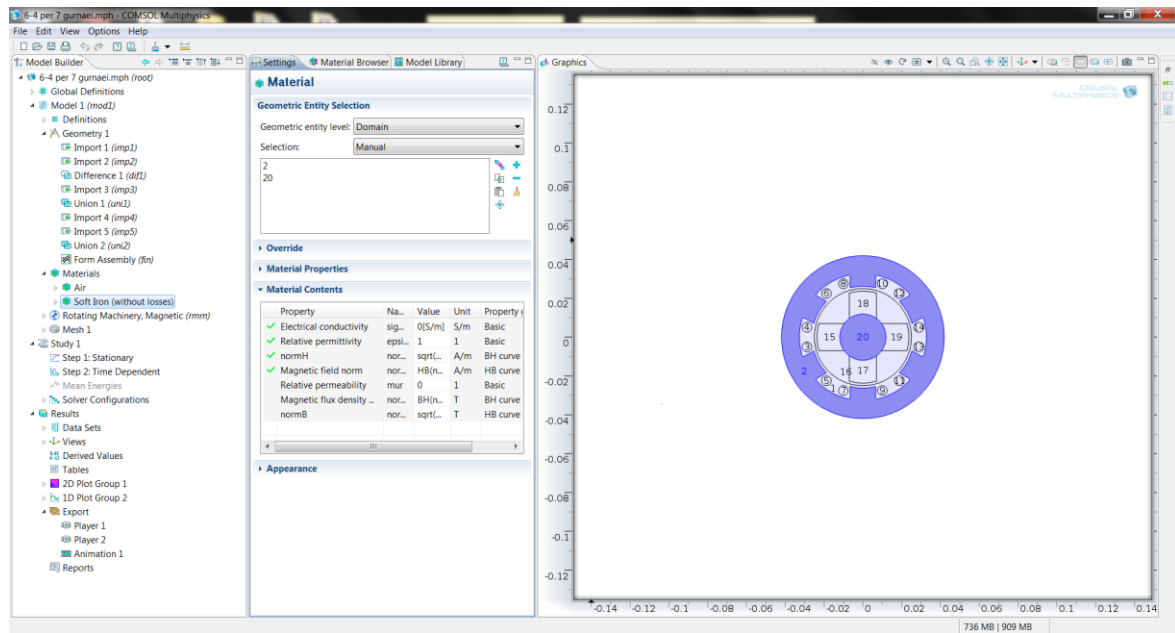
### 3.2.1 Air(αέρας)



Εικόνα 3-8: Οι περιοχές στη γεωμετρία οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως αέρας.

Ο λόγος που στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 3-8) διακρίνεται ότι, τα πηνία τα έχουν χαρακτηριστεί ως αέρας ενώ στον πραγματικό κινητήρα είναι από χαλκό είναι γιατί μας ενδιαφέρει η σχετική διαπερατότητα, και η σχετική διηλεκτρική σταθερά οι οποίες δύο αυτές τιμές είναι ίδιες και στον αέρα, και στον χαλκό. Επιπλέον η ηλεκτρική αγωγιμότητα θέλουμε να είναι η ίδια με τον αέρα γιατί αλλιώς μας παρουσιάζει κενά στη μήτρα που μελετάμε με αποτέλεσμα να μην υπάρχει εξαγωγή αποτελέσματος.

### 3.2.2 Soft Iron(without losses) (μαλακός σίδηρος χωρίς απώλειες)

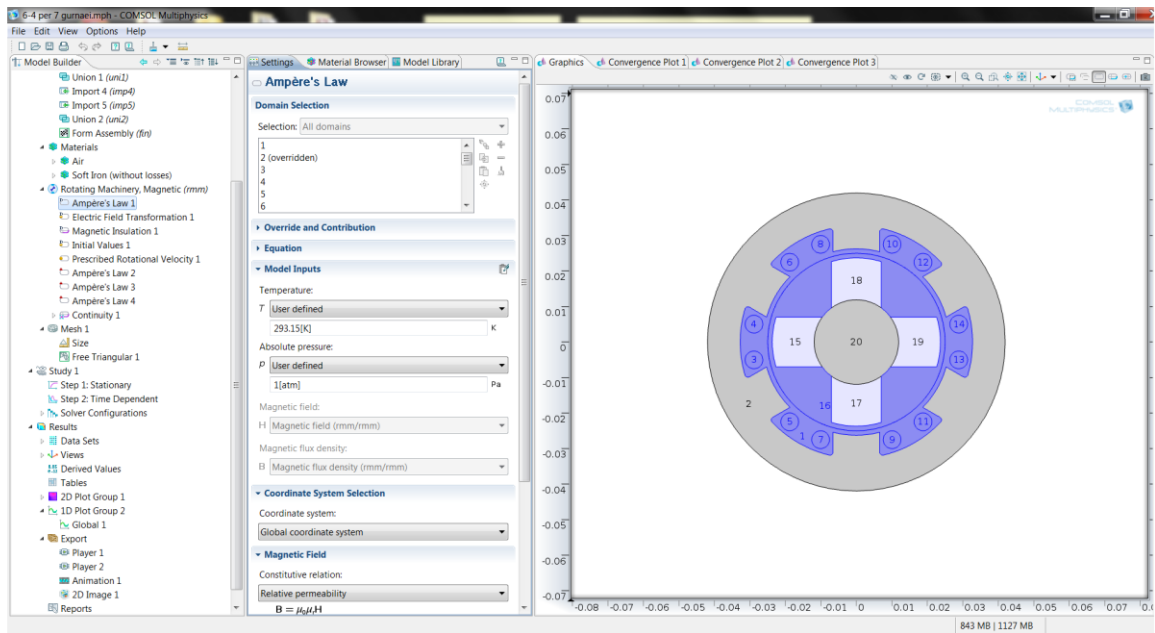


Εικόνα 3.9 : Οι περιοχές που επιλέξαμε ότι θα αποτελούνται από μαλακό σίδηρο

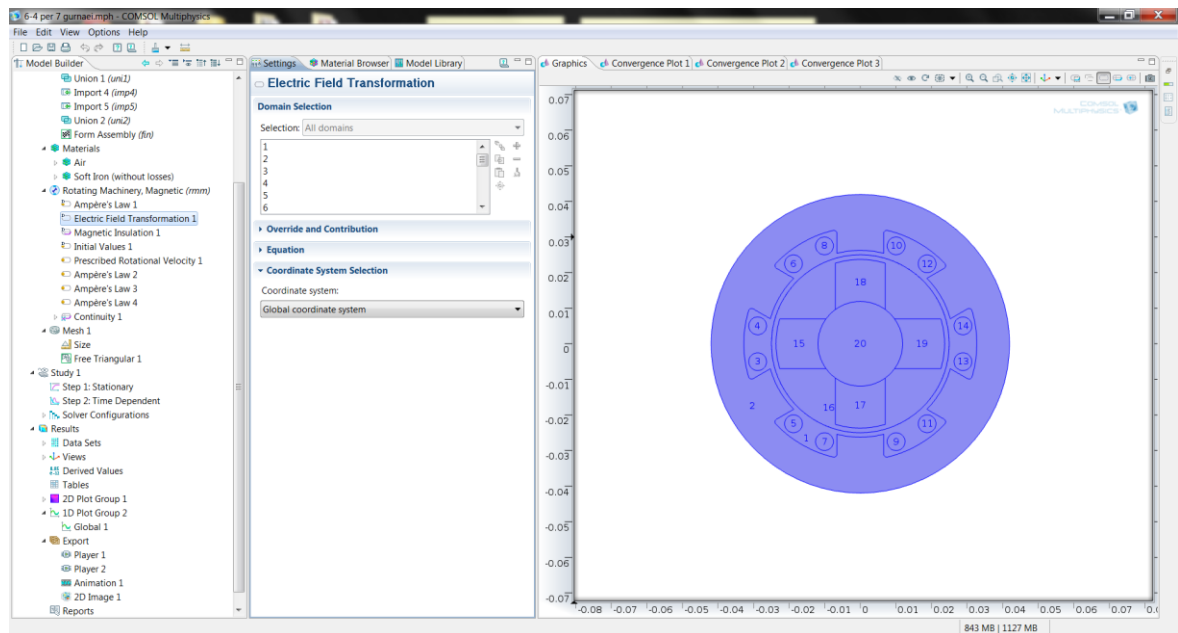
### 3.3 Rotating Machinery, Magnetic(rmm)

Όπως και παραπάνω οι επιλογή των εξισώσεων αλλά και των τμημάτων που θα επιλεγούν για τις συγκεκριμένες εξισώσεις ώστε να πραγματοποιηθεί η περιστροφική κίνηση του δρομέα έγιναν με γνώμονα τον πρότυπο κινητήρα που περιείχε το ίδιο το πρόγραμμα "COMSOL Multiphysics". Οποιαδήποτε λάθος επιλογή είτε στις εξισώσεις είτε στην επιλογή της σωστής γεωμετρίας είχε επιπτώσεις και πάντα κατέληγε στην ένδειξη error όταν πραγματοποιούσαμε τη μελέτη του κινητήρα.

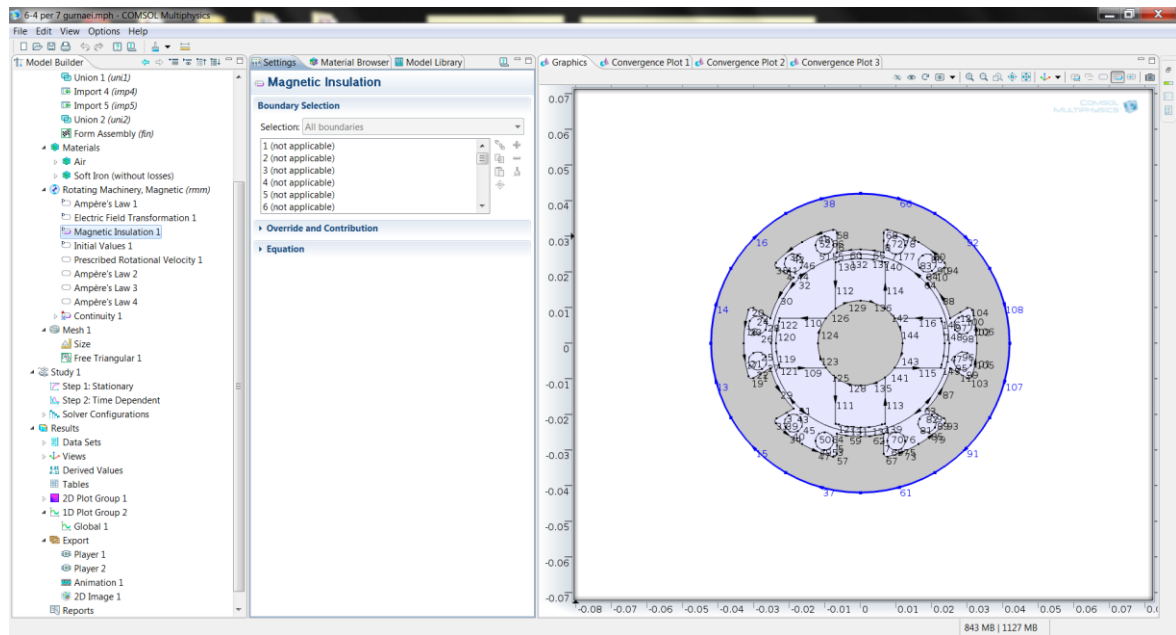
### 3.3.1 Ampere's Law 1



### 3.3.2 Electric Field Transformation 1 (Μετασχηματισμός του ηλεκτρικού πεδίου)

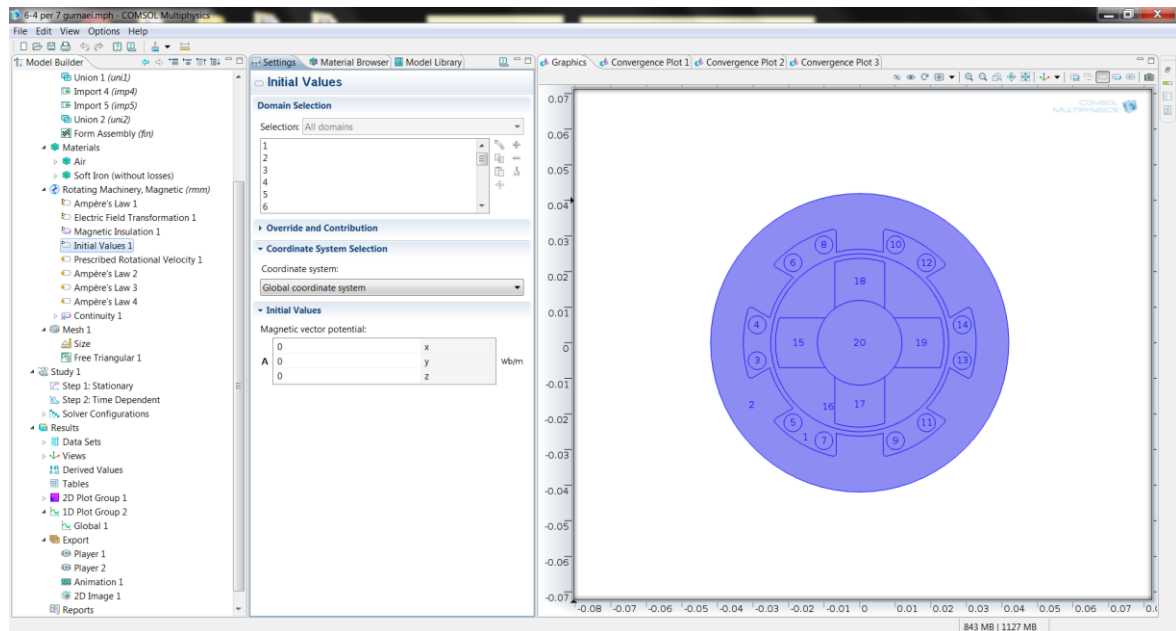


### 3.3.3 Magnetic Insulation 1 (Μαγνητική θωράκιση)

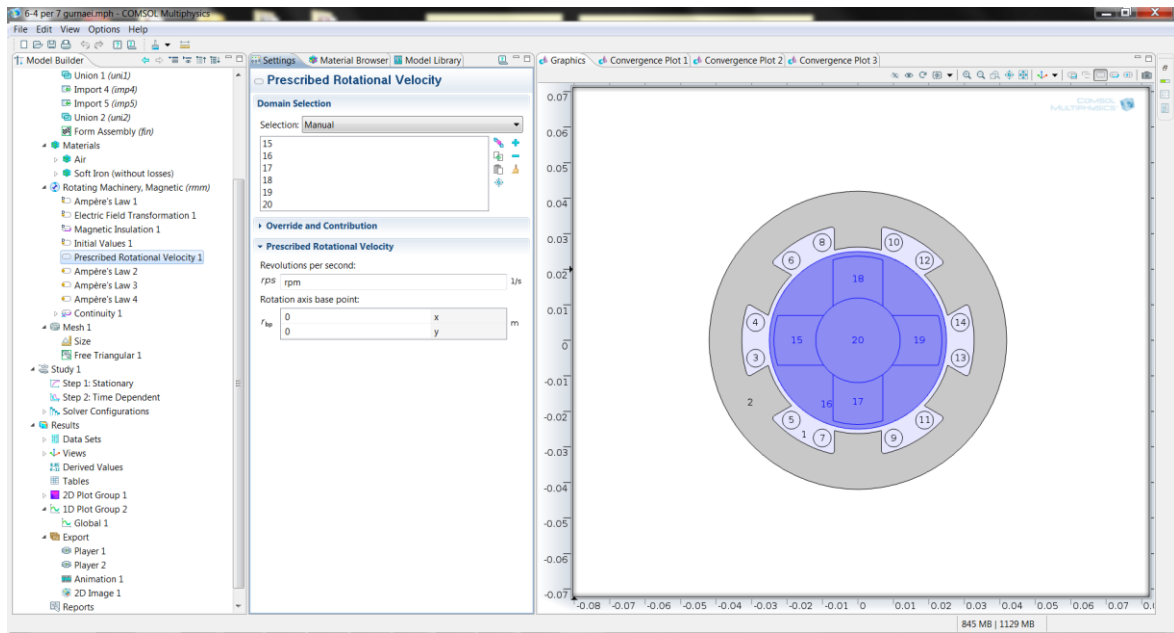


Εικόνα 3-10 : Μαγνητική θωράκιση του ηλεκτροκινητήρα.

### 3.3.4 Initial Values 1

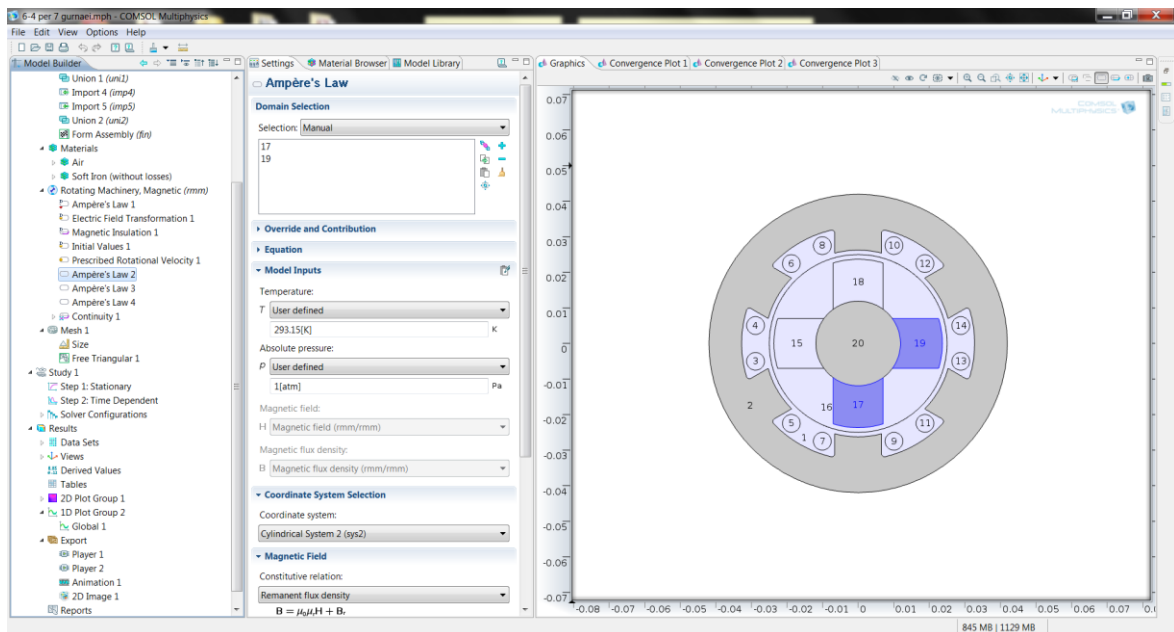


### 3.3.5 Prescribed rotational velocity



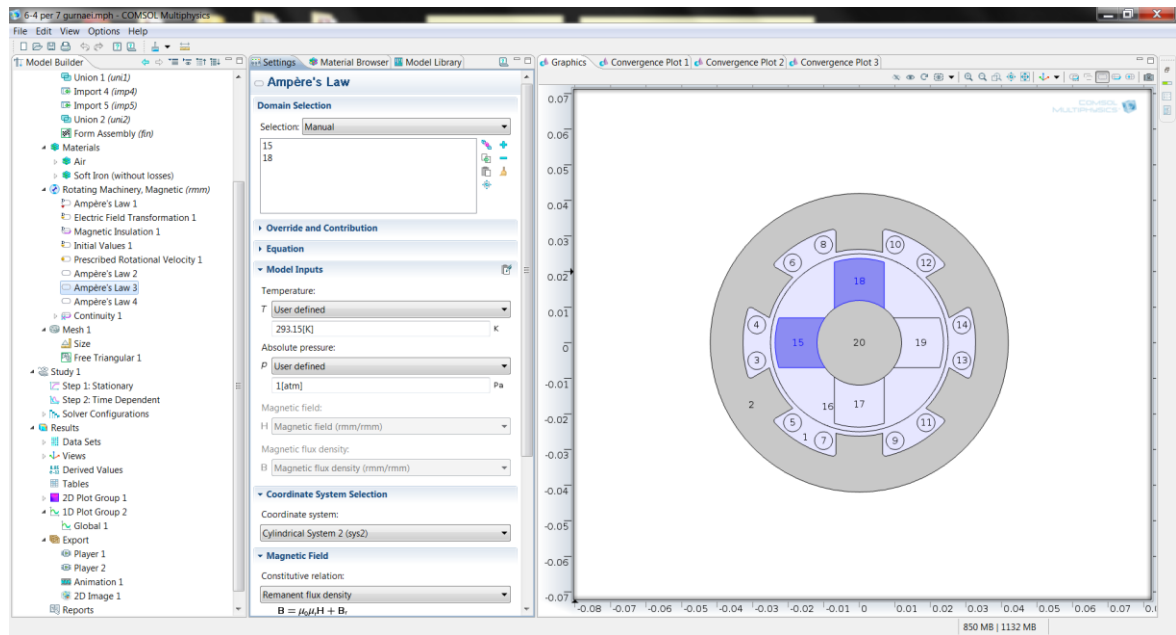
Εικόνα 3-11: Τα γεωμετρικά τμήματα του κινητήρα τα οποία συμμετέχουν στην περιστροφική κίνηση.

### 3.3.6 Magnets Outwards



Εικόνα 3-12 : Οι πόλοι του δρομέα από τους οποίους γίνεται η εισαγωγή των μαγνητικών ροών στον δρομέα.

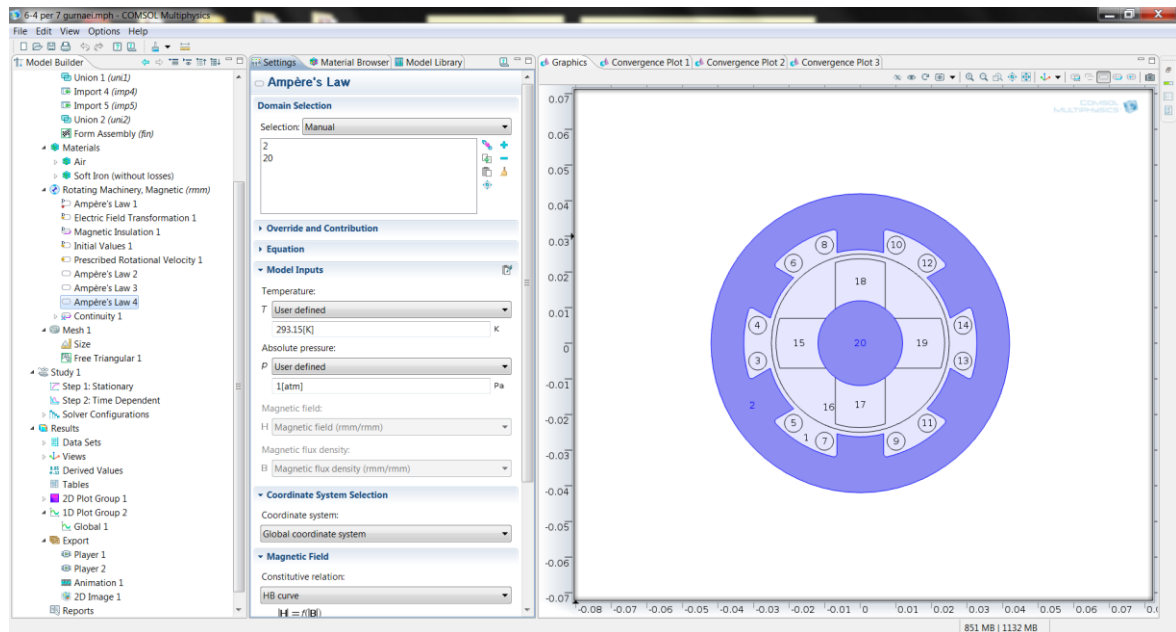
### 3.3.7 Magnets Inwards



Εικόνα 3-13 : Οι πόλοι του δρομέα από τους οποίους γίνεται η έξοδος των μαγνητικών ροών στον δρομέα.

Οι πόλοι του δρομέα για την είσοδο και την έξοδο των μαγνητικών ροών βρίσκονται αντιπαράλληλα.

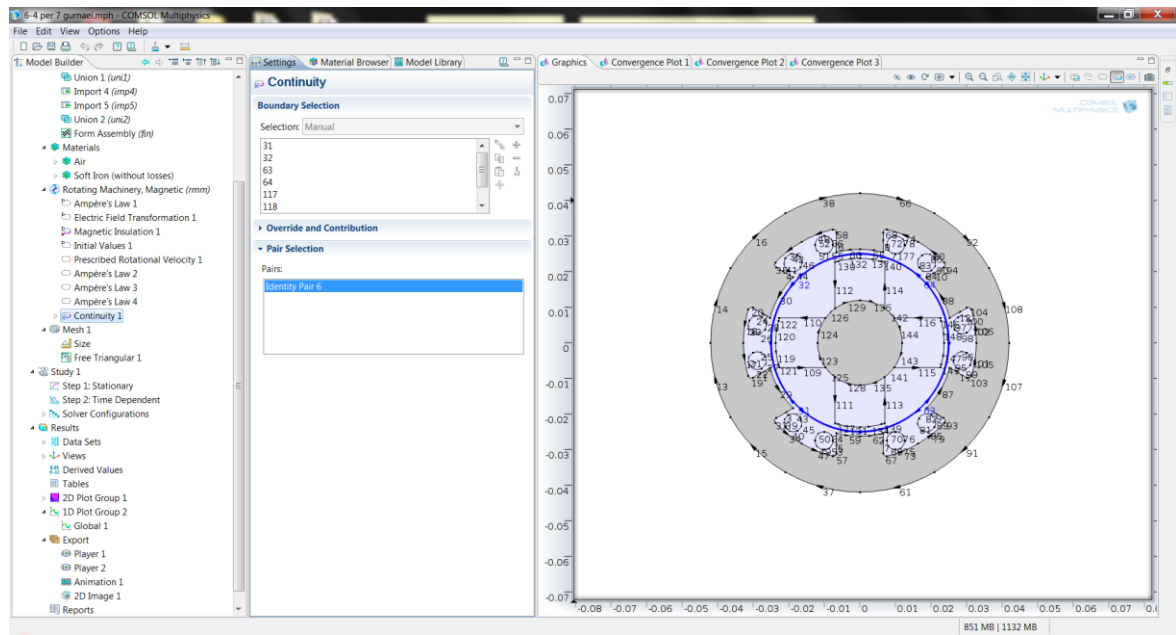
### 3.3.8 Iron



Εικόνα 3-15 : Τα σημεία που έχουν επιλεγεί στη γεωμετρία ως μαλακός σίδηρος.



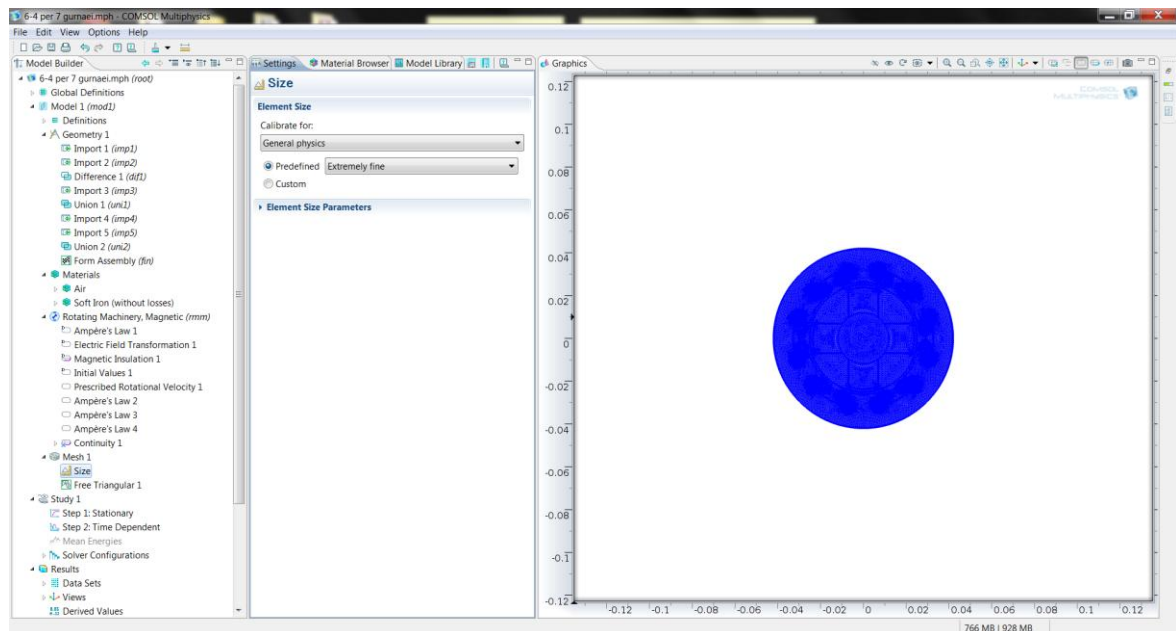
### 3.3.9 Continuity 1

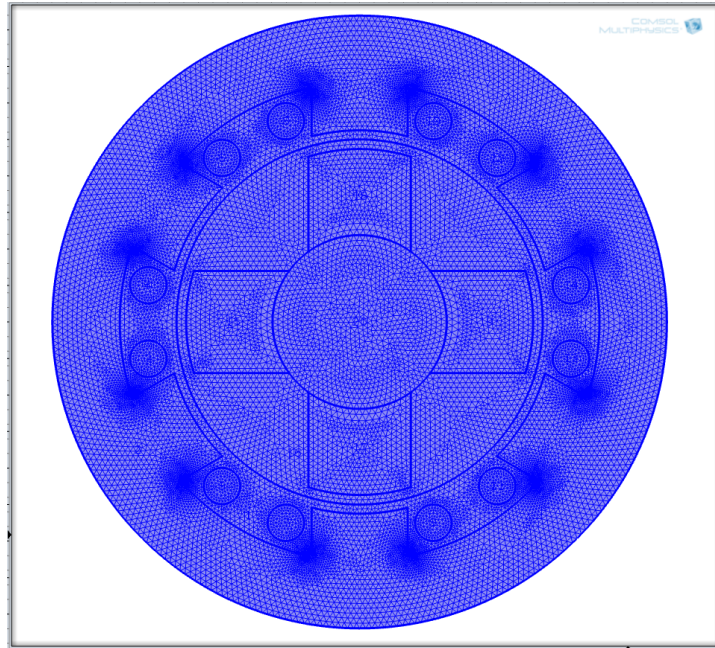


Εικόνα 3-16: Το σημείο εμφάνισης συνέχειας στο κινητήρα.

Στην παραπάνω εικόνα γίνεται φανερό το σημείο συνέχειας που αναφέραμε στην εισαγωγή. Είναι το σημείο διεπαφής του σταθερού τμήματος με το περιστρεφόμενο.

### 3.3.10 Mesh (πλέγμα)





Εικόνα 3-17 : Μεγέθυνση στο πλέγμα τριγωνοποίησης.

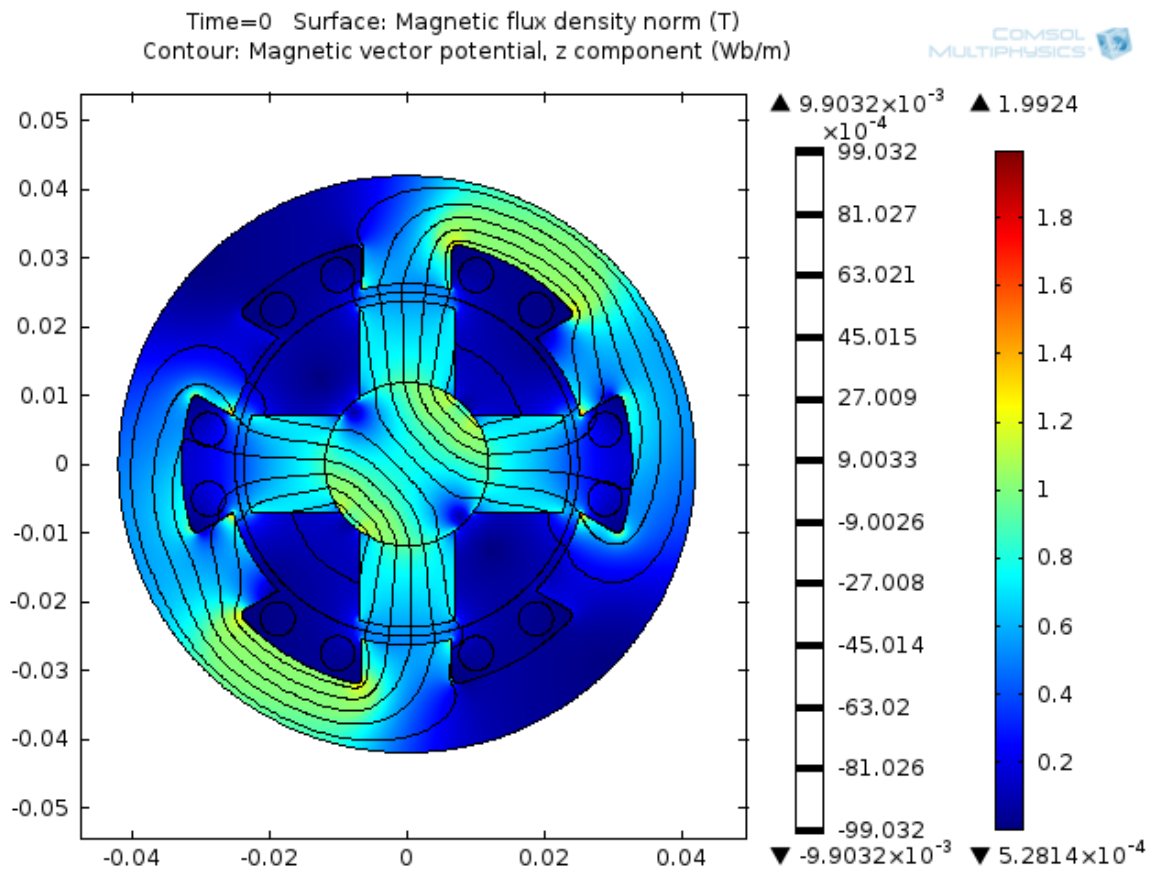
Στην παραπάνω εικόνα ( εικόνα 3-17) φαίνεται το πλέγμα της τριγωνοποίησης σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Στον κινητήρα έχουμε κάνει "extremely fine" πλέγμα. Το να πραγματοποιήσουμε μια τόσο μεγάλη τριγωνοποίηση έχει κόστος στη μνήμη ram του υπολογιστή για τους υπολογισμούς αλλά έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στην τελική μελέτη και στα αποτελέσματα που διεξήχθησαν.

### 3.4 Μελέτη του μοντέλου

Το μοντέλο το οποίο δημιουργήσαμε μελετήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι το στατικό κομμάτι και στη συνέχεια η χρονοεξάρτηση στη τη διάρκεια της περιστροφής με τις εξισώσεις τις οποίες έχουμε επιλέξει. Σε περίπτωση οποιασδήποτε ασυνέχειας εμφανιζόταν στο πρόγραμμα η ένδειξη error και με ένα είδος μηνύματος που εμφάνιζε μας ενημέρωνε σε ποιο στάδιο είτε του σχεδίου είτε των εξισώσεων είτε των επιλογών που κάναμε σε υλικά αλλά ακόμα και στο πλέγμα εμφάνιζε κάποιο πρόβλημα. Το μήνυμα το οποίο εμφάνιζε δεν ήταν πάντα κατανοητό μέχρι να γίνει αντιληπτός ο τρόπος αποκωδικοποίησης του.

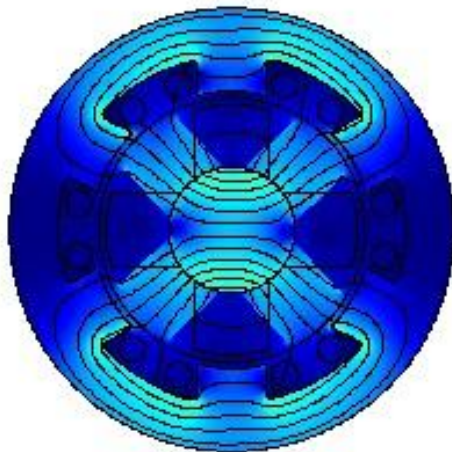
Ποίο αναλυτικά στο στατικό όπως και στο χρονοεξαρτόμενο τμήμα το πρόγραμμα έκανε συλλογή των εξισώσεων. Στη συνέχεια πρόσθετε τις μεταβλητές και τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν στις εξισώσεις και τέλος έκανε την επίλυση των εξισώσεων.

Μετά από πολλές δοκιμές σωστού-λάθους και μετά από πολλές αλλαγές διότι μέχρι να αναλήψεις σε ένα πρόγραμμα τι πραγματικά δεν έχεις ρυθμίσει σωστά καταφέραμε να πετύχουμε περιστροφή του κινητήρα και ταυτόχρονα να εμφανίζονται και οι μαγνητική ροή σε αυτόν.



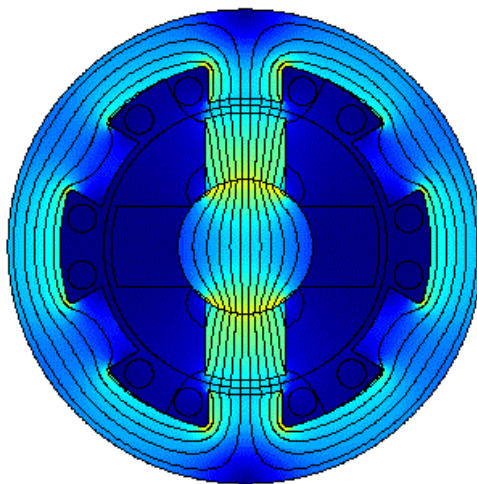
Εικόνα 3-18: Εμφάνιση μαγνητικών γραμμών και τα σημεία στα οποία έχει εμφανιστεί πύκνωση αυτών.

Η εικόνα 3-18 είναι η πρώτη εικόνα που αντικρίζει κανείς μόλις το πρόγραμμα καταφέρει να τελειώσει όλους τους υπολογισμούς τόσο στο στατικό όσο και στο χρονοεξαρτούμενο κομμάτι των πεπερασμένων στοιχείων. Οπότε το μόνο που μένει είναι να δούμε την κίνηση. Ο χρόνος για τον οποίο προγραμματίσαμε το πρόγραμμα να κάνει τη ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι 0,25sec με βήμα 0,01sec. Αυτός ο χρόνος αντιστοιχεί σε περιστροφή ενός τετάρτου του κύκλου. Η εικόνα 3-19 μας δείχνει την περιστροφή του κινητήρα σε μία ενδιάμεση θέση (γωνία 45°). Ο σταυρός στην εικόνα αυτή παραμένει σταθερός για να μας υποδείξει την αρχική θέση του δρομέα.



**Εικόνα 3-19:** Απαθανάτιση του δρομέα κατά τη διάρκεια της περιστροφής του όταν βρίσκεται σε γωνία 45° από την αρχική του θέση.

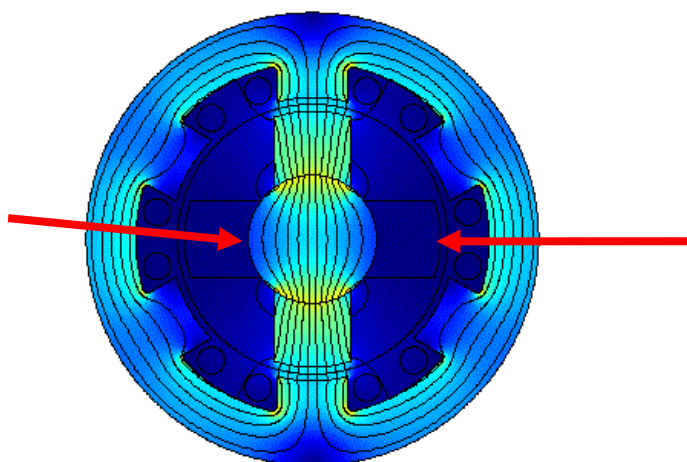
Το πρόβλημα το οποίο δεν έχουμε καταφέρει να επιλύσουμε είναι το πως οι μαγνητικές ροές θα εισέρχονται από τους απέναντι πόλους στο δρομέα και ταυτόχρονα να έχουμε περιστροφική κίνηση του δρομέα. Το πρώτο από τα δύο επετεύχθη όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-20.



Εικόνα 3-20 : Η μαγνητική ροή όπως θα έπρεπε να φαίνεται στο δρομέα

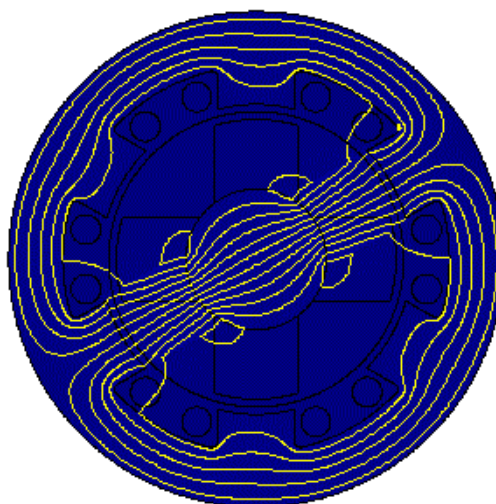
Βέβαια για να επιτευχθεί αυτό αφαιρέσαμε τους άλλους δύο δρομείς από τις εξισώσεις. Όμως, με μόνο αυτούς τους δύο δρομείς ο κινητήρας δεν παρουσιάζει

κίνηση. Στη συνέχεια αφαιρέσαμε αυτούς τους δύο πόλους του δρομέα και επιλέξαμε αυτούς που δεν συμμετέχουν παραπάνω (κόκκινα βέλη) εικόνα 3-21.



**Εικόνα 3-21:** Επισήμανση πόλων του δρομέα με κόκκινα βέλη οι οποίοι είχαν αφαιρεθεί από τις εξισώσεις της πρώτης δοκιμής.

Επαναλαμβάνοντας λοιπόν το παραπάνω "πείραμα" διαπιστώσαμε ότι υπήρχε περιστροφική κίνηση του δρομέα μέχρι τη θέση ευθυγράμμισης των πόλων του δρομέα με αυτή των πόλων του στάτη εικόνα 3-22.



**Εικόνα 3-22:** Το σημείο ευθυγράμμισης των πόλων που είχαν επισημανθεί με κόκκινο βέλος με τον δρομέα κατά το δεύτερο "πείραμα".

Το πρόβλημα είναι ότι ακόμη δεν έχει βρεθεί ο τρόπο για την χρονική ανεξάρτητη ενεργοποίηση των ζευγαριών των πόλων που πρέπει να ενεργοποιηθούν κάθε φορά

ώστε να έχουμε περιστροφική κίνηση στον δρομέα ανάλογη με αυτή που περιμένουμε.

## 4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Software version- Comsol multiphysics Module 4.2, Model Library path:

AC/DC\_Module/Motors\_and\_Drives/generator

[2] William T. Ryan, "Design of Electrical Machinery" Volume 3; New York; John Wiley & Sons, 1912

[3] W. S. Franklin and R. B. Williamson, "The Elements of Alternating Currents"; The Macmillan company, London, 1901.

[4] Alfred Still, "Principles of Electrical Design dc and ac Generators"; McGraw-Hill book company, New York, 1916

4<sup>ο</sup>

Κεφάλαιο

Χαρακτηρισμός του υλικού



# 1 ΧΑΛΥΒΑΣ

## 1.1 Γενικά

Οι Χάλυβες (κοινώς ατσάλι) στη σημερινή εποχή αποτελούν πάνω από το 80% των βιομηχανικών κραμάτων. Αυτό βασικά οφείλεται τόσο στο χαμηλό τους κόστος όσο και στη σχετική ευκολία παραγωγής χαλύβων σε μεγάλες ποσότητες με ακριβείς προδιαγραφές. Οι χάλυβες παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων με αντοχές που κυμαίνονται από 200 έως και 5000MPa. Άλλοι πρόσθετοι λόγοι για την υπεροχή των χαλύβων είναι οι εξής:

- a) Τα μεγάλα παγκόσμια αποθέματα μεταλλευμάτων (ο φλοιός της γης περιέχει ~ 4% Fe) που ανάγονται εύκολα στη μεταλλική κατάσταση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανακύκλωσης του παλαιοσιδήρου (scrap).
- b) Το σημείο τήξεως του σιδήρου (1539°C) επιτρέπει την θερμική ενεργοποίηση των εργασιών σε θερμοκρασίες ( $T > 400^\circ\text{C}$ ) που επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα και ελέγχονται βιομηχανικά.
- c) Η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες (π.χ. ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός) επιτρέπουν τον σχηματισμό μίας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων.

Ο χάλυβας είναι ίσως το πιο σύνθετο μεταλλικό κράμα. Η ευρεία εμπειρική γνώση που έχει συσσωρευτεί (από το 2000π.Χ. που χρησιμοποιείται) δεν έχει οδηγήσει σε πλήρη κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του. Μόνον πρόσφατα (κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα) υπήρξε πρόοδος σε μία πιο επιστημονική προσέγγιση και ουσιαστικά κατανόηση των χαλύβων, γεγονός που αποδεικνύεται με την ανάπτυξη νέων χαλύβων (π.χ. ανοξείδωτοι και πυρίμαχοι χάλυβες) οι οποίοι ανταποκρίνονται σε ειδικές απαιτήσεις [3].

Ο Χάλυβας είναι κράμα σιδήρου- άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.025% έως 2.1%κ.β., αλλά στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται χάλυβες με περιεκτικότητα άνω του 1.2% και σπανιότερα μέχρι 1.5% [1]. Πέραν αυτών οι χάλυβες περιέχουν συνήθως μαγγάνιο και πυρίτιο σε μικρές αναλογίες. Αυτά έχουν προστεθεί για την αύξηση της αντοχής του φερρίτη, αλλά πέραν αυτού χρησίμευαν σε

κάποιο στάδιο της χαλυβοποίησης για την επεξεργασία του χάλυβα (το πυρίτιο για την αποξείδωση, το μαγγάνιο για την αποξείδωση και την αποθείωση)[2].

Πέραν αυτού το θείο και ο φώσφορος είναι συνήθεις ακαθαρσίες, όπως και διάφορα αέρια σε διάλυση μέσα στον χάλυβα, οξυγόνο, άζωτο, υδρογόνο. Με την ένταση της ανακύκλωσης των πρώτων υλών ανευρίσκουμε επίσης σήμερα το νικέλιο, το χρώμιο, τον χαλκό, τον κασσίτερο, κλπ. ως ακαθαρσίες. Ένας τέτοιος χάλυβας θεωρείται κοινός, παρά τις προσμίξεις που περιέχει, διότι αυτές δεν προστέθηκαν εκουσίως, και επειδή εξ' άλλου η επίδραση τους παραμένει αμελητέα εφ' όσον δεν υπερβαίνουν ορισμένα όρια περιεκτικότητας [2].

Σ' έναν κραματωμένο χάλυβα, πέραν των προηγούμενων, έχουν προστεθεί και κραματικά στοιχεία σε αναλογίες τέτοιες, ώστε να επηρεάζουν στην επιθυμητή κατεύθυνση ορισμένων ιδιοτήτων [2].

## **1.2 Ηλεκτρικός Χάλυβας**

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους μη προσανατολισμένους ηλεκτρικούς χάλυβες και τους προσανατολισμένους ηλεκτρικούς χάλυβες.

### **1.2.1 Εισαγωγή**

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι αναπόσπαστο κομμάτι της βάσης της ανάπτυξης που συνδέεται με την ανάπτυξη ηλεκτρικών εφαρμογών. Ο πυριτιούχος χάλυβας αναπτύχθηκε στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και σύντομα έγινε το κύριο υλικό για μεγάλους μετασχηματιστές, μηχανές και γεννήτριες. Οι βασικοί πυριτιούχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε μαλακά μαγνητικά υλικά σε ηλεκτρικές συσκευές και μηχανές, και αξιολογούνται βάση των απωλειών όταν μαγνητίζονται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνολική παγκόσμια παραγωγή σε ηλεκτρικούς χάλυβες ανέρχεται στο 1% της συνολικής παραγωγής χαλύβων. Η Worldsteel Committee on economic studies, στις Βρυξέλλες αναφέρει ότι παγκόσμια παραγωγή ελασμάτων το 2008 ήταν 10.291.000 μετρικοί τόνοι και στην Ευρώπη 1.498.000 μετρικούς τόνους. Η παράγωγή του ηλεκτρικού χάλυβα διπλασιάστηκε μέσα σε μία δεκαετία.

Η δομή είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον καθορισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων στα χαλύβδινα φύλλα. Ο προτιμητέος κρυσταλλογραφικός ιστός αποκρίνεται σε κυβική συμμετρία ιστού με κόκκους των οποίων τα επίπεδα

ολίσθησης είναι (001) και (110) παράλληλα στο διαμήκη άξονα διαμόρφωσης του φύλλου και ομοιογενή κατανομή γύρω από τη διεύθυνση [100]. Η Γκαουσιανή κατανομή του κρυσταλλογραφικού ιστού ανάπτυξης με πλήρη κατευθυντικότητα κρυσταλλογραφική των κόκκων στο ακόλουθο συνδυασμό επιπέδου και διεύθυνσης ανάπτυξης (110)[100] αποτελεί την αντιπροσωπευτικότερη προσέγγιση κρυσταλλογραφικής δομής των προσανατολισμένων πυριτιούχων χαλύβων.

Ο πυριτιούχος χάλυβας είναι θεμελιώδης για την οικονομία των ηλεκτρικών εφαρμογών, και συχνά ο καλύτερος συνδυασμός για μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απαιτούμενες ιδιότητες αυτού του χάλυβα είναι η υψηλή διαπερατότητα και επαγωγή, μικρές μαγνητικές απώλειες και μικρή μαγνητοσυστολή. Η υψηλή διαπερατότητα και επαγωγικότητα μειώνει το μέγεθος και το βάρος των τμημάτων όπου χρησιμοποιείται. Οι μικρές μαγνητικές απώλειες ελαττώνουν τη παραγωγή θερμότητα και κατανάλωση ενέργειας και η μικρή μαγνητοσυστολή μειώνει το θόρυβο (που εμφανίζεται σαν βουητό) στους μετασχηματιστές και στις μηχανές υψηλής χωρητικότητας.

Η βασική τεχνολογία για την παραγωγή μη προσανατολισμένων, πλήρως επεξεργαζόμενων ηλεκτρικών χαλύβων δεν έχει αλλάξει σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, η βασική χημεία είναι ίδια σε όρους των κυρίων κραματικών στοιχείων και τα βήματα επεξεργασίας είναι κυρίως τα ίδια. Ωστόσο οι απώλειες σε ένα χάλυβα με δοσμένη περιεκτικότητα σε Si και Al είναι σήμερα αρκετά μικρότερη συγκρινόμενη με τις προηγούμενες δεκαετίες. Επομένως οι παραγωγοί ηλεκτρικών χαλύβων έχουν κάνει κυρίως μόνο μικρές αλλαγές στη βασική χημεία που χρησιμοποιείται για τις περισσότερες εμπορικές τυποποιημένες ποιότητες. Παγκόσμια και Εθνικά πρότυπα καθορίζουν μόνο τις μέγιστες απώλειες (και συχνά ακόμη την ελάχιστη πόλωση/διαπερατότητα) και δεν έχει κατώτερο όριο απωλειών. Συνεπώς για δοσμένα πρότυπα όρια η διαφορά μεταξύ των μεγίστων εγκεκριμένων απωλειών και των πραγματικών απωλειών του υλικού έχουν σημαντική αύξηση με το πέρασμα του χρόνου.

Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ένα εμπορικό προϊόν με τιμή αγοράς που προσδιορίζετε από τον βαθμό της περιγραφής. Από πλευράς του χρήστη, αυτή η ανάπτυξη έχει φέρει πλεονεκτήματα, αλλά έχει αυξήσει επίσης την ποικιλία στην αγορά αλλά και την αβεβαιότητα σε ποίο βαθμό είναι τυποποιημένο το προϊόν[4].

### 1.2.2 Μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες

Οι μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες σε ελάσματα είναι φύλλα με διαμορφωμένα στο να έχουν ειδικές ιδιότητες και παράγονται από κράματα Fe-Si και Fe-Si-Al. Τα ελάσματα αυτά ενσωματώνονται σε ένα εύρη φάσμα εφαρμογών, από απλές οικιακές συσκευές μέχρι υβριδικές και “καθαρά” ηλεκτρικά οχήματα. Μελλοντικές προσπάθειες εστιάζονται στο έλεγχο των υπολειπόμενων στοιχείων του μετάλλου, βελτιώνοντας την θερμότητα και ψυχρή έλαση, καθώς επίσης και την ανάπτυξη της κρυσταλλογραφικής δομής, με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος [4].

### 1.2.3 Ταξινόμηση

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα, εμπορικά καλείται επίσης ως φύλλα χάλυβα, πυριτιούχος ηλεκτρικός χάλυβας, πυριτιούχος χάλυβας, είναι ειδικά χαλύβδινο έλασμα επεξεργασμένο ώστε να έχει συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται σε μορφή φύλλων λαμαρίνας κυρίως σε κινητήρες, μετασχηματιστές και εναλλάκτες ανάλογα με τις ιδιότητες του.

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες ως προς την επίτευξη των μαγνητικών τους ιδιοτήτων:

- Πλήρη διαδικασία διαμόρφωσης, όπου αποστέλλεται στις καλύτερες συνθήκες, με συνεχόμενες ανοπτήσεις και μερικές φορές και επικαλυμμένος. Έχει πιστοποιημένες μαγνητικές ιδιότητες που συμφωνούν με τα πρότυπα. Π.χ. EN 10106:2009
- Μερική-μη ολοκληρωμένη διαδικασία διαμόρφωσης, όπου δίνεται στον αγοραστή για την τελική ανοπτηση και ανάπτυξη των μαγνητικών ιδιοτήτων.

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα συχνά κατασκευάζεται με τη διαδικασία της ψυχρής έλασης με πάχος (0.35, 0.5, 0.65 και 1.00)mm και με συγκεκριμένη τιμή μεγίστων απωλειών σε W/kg. Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας παρέχεται είτε σε στοίβες στην περίπτωση που είναι φύλλα είτε σε κουλούρες όταν είναι σε λωρίδες [4].



**Εικόνα 1-1:** Ηλεκτρικός χάλυβας σε κουλούρες

#### **1.2.4 Κύρια κραματικά στοιχεία του ηλεκτρικού χάλυβα**

##### **Σημασία αυτών για την βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων**

Οι Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

Μαγνητικά μαλακοί χάλυβες. Περιέχουν μεγάλο ποσοστό Si (4-5%) και έχουν τις εξής ιδιότητες: μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και μικρές απώλειες ενέργειας από υστέρηση και δινορρεύματα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών για ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες.

Μαγνητικά σκληροί χάλυβες. Τυπικοί μαγνητικοί σκληροί χάλυβες περιέχουν C (0,8-1,0%), Cr (0,6-0,9%), W (έως 6,0%), και Co (3,0 και 15%). Άλλα μαγνητικά υλικά με βάση το σίδηρο, είναι κράματα Fe-Ni, Fe-Co και Fe-Co-Ni. Επίσης, τελευταία έχουν βελτιωθεί οι ιδιότητες τους με προσθήκες Al, Cu και Ti, όπως είναι το κράμα 57Fe-12Co-9Al-16Ni-5Cu-1Ti (κράμα Alnico). Παρουσιάζουν μεγάλο βρόγχο υστέρησης και παραμένουσες μαγνητικές επαγωγές ( $B_r$ ) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως μόνιμοι μαγνήτες [5].

## 2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Ο καλύτερος τρόπος για να παρουσιάσουμε τα διαφορετικά είδη μαγνητισμού είναι να περιγράψουμε πως τα μαγνητικά υλικά αποκρίνονται στην επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Η κύρια διάκριση είναι ότι σε κάποια υλικά δεν υπάρχει μια ομοιόμορφη αλληλεπίδραση του των ατομικών μαγνητικών ροπών, ενώ σε άλλα υλικά η αλληλεπίδραση αυτή είναι ισχυρή. υπάρχουν δύο τύποι μαγνητικών υλικών :

- Τα μαγνητικά υλικά τα οποία μαγνητίζονται μόνο όταν τους εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά.
- Τα μαγνητικά που διατηρούν την μαγνητική τους κατάσταση ακόμα και κατά την απουσία εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (αυθόρμητη μαγνήτιση). Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα φερρομαγνητικά, αντιφερρομαγνητικά και φεριμαγνητικά υλικά. Τα περισσότερα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικές εφαρμογές ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

1 H 2 He

3 Li 4 Be 5 B 6 C 7 N 8 O 9 F 10 Ne

11 Na 12 Mg 13 Al 14 Si 15 P 16 S 17 Cl 18 Ar

19 K 20 Ca 21 Sc 22 Ti 23 V 24 Cr 25 Mn 26 Fe 27 Co 28 Ni 29 Cu 30 Zn 31 Ga 32 Ge 33 As 34 Se 35 Br 36 Kr

37 Rb 38 Sr 39 Y 40 Zr 41 Nb 42 Mo 43 Tc 44 Ru 45 Rh 46 Pd 47 Ag 48 Cd 49 In 50 Sn 51 Sb 52 Te 53 I 54 Xe

55 Cs 56 Ba 57 La 58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 Pm 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tm 70 Yb 71 Lu

72 Hf 73 Ta 74 W 75 Re 76 Os 77 Ir 78 Pt 79 Au 80 Hg 81 Tl 82 Pb 83 Bi 84 Po 85 At 86 Rn

87 Fr 88 Ra 89 Ac

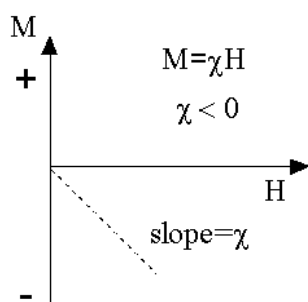
■ Σιδηρο μαγνητικά ■ Αντισιδηρομαγνητικά

■ Παραμαγνητικά ■ Διαμαγνητικά

Εικόνα 2-1: Μαγνητικός περιοδικός πίνακας

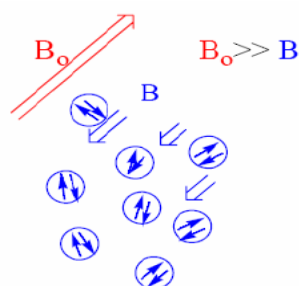
## 2.2 Διαμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή της τάξης  $\chi = -10^{-5}$ . Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Όταν ένα διαμαγνητικό υλικό, τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης  $M$  εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



**Εικόνα 2-2:** Μαγνήτιση διαμαγνητικών υλικών

Στα διαμαγνητικά υλικά όλα τα ηλεκτρόνια είναι συζευγμένα, είναι δηλαδή όλες οι στιβάδες/υποστιβάδες συμπληρωμένες, έτσι όταν δεν υπάρχει εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο δεν υπάρχει και μόνιμη μαγνητική ροπή.



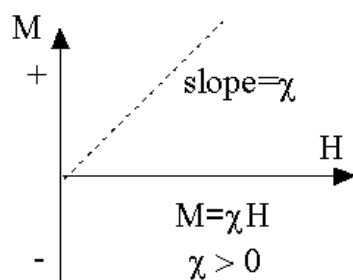
**Εικόνα 2-3:** Εσωτερικό και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα διαμαγνητικά υλικά καθώς και οι απεικόνιση των συμπληρωμένων υποστιβάδων.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα διαμαγνητικά υλικά απωθούν το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και ότι υπό την απουσία μαγνητικού πεδίου δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες [6].

## 2.3 Παραμαγνητικά υλικά

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική και κυμαίνεται από  $10^{-3}$  έως  $10^{-5}$ , γεγονός που δεικνύει ότι τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται από το μαγνητικό πεδίο.





**Εικόνα 2-4:** Μαγνήτιση παραμαγνητικών υλικών

Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαίους προσανατολισμούς. Παρουσία μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση  $M$  συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, και η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Οι παραμαγνητικές ιδιότητες οφείλονται στην ύπαρξη ασύζευκτων ηλεκτρονίων και έτσι τα παραμαγνητικά υλικά έχουν διπολική μαγνητική ροπή. Αν και υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια οι μαγνητικές τους ροπές δεν αλληλεπιδρούν μαγνητικά και η συνολική μαγνήτιση, όπως και στα διαμαγνητικά υλικά, είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα παραμαγνητικά υλικά ελκύονται από το μαγνητικό πεδίο και δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν η επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου πάψει να υπάρχει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο [6].

## 2.4 Φερρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά

Η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000) και εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Έτσι, έχουν μεγάλη και θετική επιδεκτικότητα που εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έχουν μια ισχυρή αλληλεπίδραση σε ένα μαγνητικό πεδίο και είναι ικανά να διατηρήσουν τις μαγνητικές του ιδιότητες ακόμα και όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο πάψει να υπάρχει. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση  $M$  και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι μη γραμμική. Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie,  $T_c$ . Για θερμοκρασία πάνω από την  $T_c$  ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται



παραμαγνητικό. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματα τους.

## **2.5 Αντιφερρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά**

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, απουσία πεδίου εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν υπάρχει μαγνήτιση. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel  $T_N$ . Σε θερμοκρασίες πάνω από την  $T_N$ , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά [6].

## **2.6 Φερομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά**

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie ( $T_C$ ), παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $T_C$ , τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές, μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν διαφορετικό μέτρο, και έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι οι φερρίτες ( $Fe_3O_4$ ) [6].

## **2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ**

### **2.7.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ**

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική του επαγωγή  $\mathbf{B}$  ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου  $\mathbf{H}$  σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του  $\mathbf{H}$  (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης). Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες

τιμές, απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου [6].

### 2.7.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

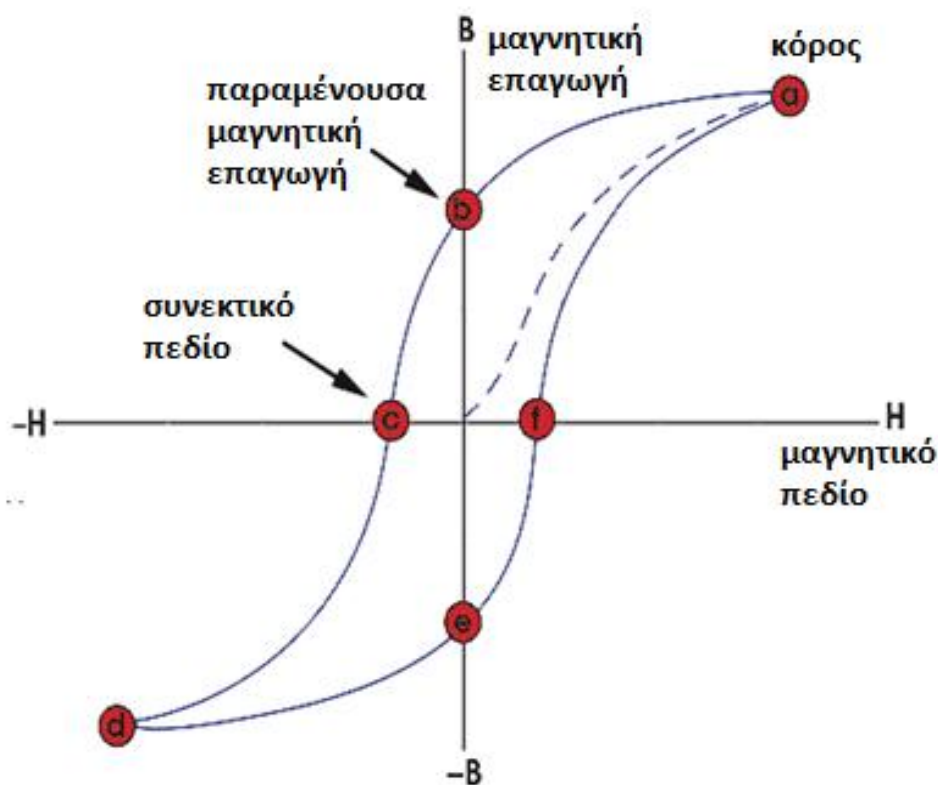
Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο και να διατηρούν τη μαγνήτιση τους και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ικανότητα τους αυτή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία αν και εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου παύουν να είναι μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνση αυτού [6].

### 2.7.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος του της μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  συναρτήσεως του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες.

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.

Σε ένα φερρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, η εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  προς την διεύθυνση του πεδίου (διακεκομμένη γραμμή της εικόνας 2-5.) Κατά την αύξηση του μαγνητικού πεδίου  $H$  σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Φτάνοντας στο σημείο  $a$ , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή  $B$ . Η τιμή της επαγωγής στο σημείο  $a$  είναι  $B_s$  (επαγωγή κόρου και κατά συνέπεια μαγνήτιση κόρου  $M_s$ ) απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$ , οπότε περαιτέρω αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζει καθόλου την μαγνήτιση  $M$  και κατά συνέπεια την μαγνητική επαγωγή  $B$ . Η μαγνήτιση κορεσμού  $M_s$  εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου.



Εικόνα 2-5: Βρόχος Υστέρησης

Στη συνέχεια, καθώς το  $H$  αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο  $a$  στο  $b$ . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η επαγωγή δεν είναι μηδέν αλλά έχει τιμή  $B_r$ . Στο σημείο  $b$  το υλικό έχει μετατραπεί σε μόνιμο μαγνήτη γιατί υπάρχει μαγνήτιση χωρίς εξωτερικό πεδίο  $H$  και η μαγνήτιση ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση  $M_r$  και κατ' επέκταση παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $B_r$ .

Εφαρμόζοντας στο υλικό πεδίο που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο  $c$  μηδενίζεται ( $B=0 \rightarrow$  κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης). Στο σημείο αυτό το μαγνητικό πεδίο έχει τιμή  $-H_c$  και ονομάζεται συνεκτικό πεδίο.

Αυξάνοντας αρνητικά το πεδίο, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο  $d$ ). Ελαττώνοντας το εξωτερικό πεδίο η καμπύλη περνάει από το σημείο  $e$  (παραμένουσα μαγνητική επαγωγή  $-B_r$ ). Καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το  $H$ , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το σημείο  $f$  (συνεκτικό πεδίο  $H_c$ )

#### **2.7.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ**

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$ , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$  προς την διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο  $H$ , η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή  $M_0$ . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$  και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου [6].

#### **2.7.5 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ**

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου έντασης  $H_c$ . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του  $H$  στα σημεία  $c$  και  $f$  της καμπύλης υστέρησης [6].

#### **2.7.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE**

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie, εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραματικών [6].

### **2.8 ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου,

οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

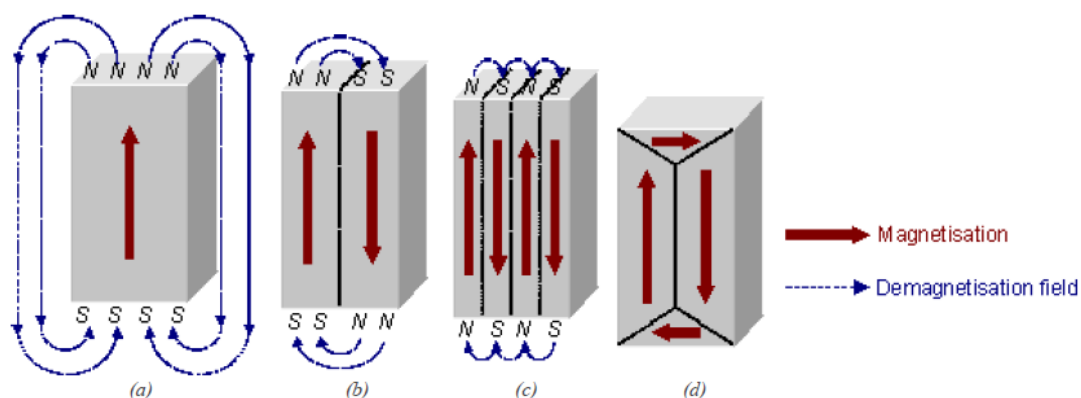
Τα μαλακά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές [6].

# 3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

## 3.1 Μαγνητικές περιοχές

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου αποτελείται από μαγνητικές περιοχές. Μια μαγνητική περιοχή (magnetic domain) χαρακτηρίζεται από spin μαγνητικές ροπές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και η ύπαρξη τους είναι απαραίτητη για κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, καθώς ένα δείγμα μιας περιοχής έχει αυξημένη μαγνητοστατική ενέργεια. Το «σπάσιμο» της μαγνήτισης σε τοπικές περιοχές μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια. Στο σχήμα 5, δίνεται σχηματικά η εμφάνιση και ανάπτυξη των περιοχών σε ένα δείγμα που ενώ αρχικά έχει παραμένουσα μαγνήτιση και είναι κορεσμένο, απομαγνήτιζεται.

Το δείγμα έχει μεγάλη μαγνητοστατική ενέργεια (a) που είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ελεύθερων μαγνητικών γραμμών οι οποίες εξέρχονται από την επιφάνεια του υλικού και προκαλούν τη δημιουργία εξωτερικού πεδίου απομαγνήτισης. Το πεδίο απομαγνήτισης αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα μαγνήτιση του υλικού. Η διαίρεση της μαγνήτισης σε δύο περιοχές (b), μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια κατά το ήμισυ, στο (c) κατά το ένα τέταρτο της αρχικής και ούτω καθεξής. Στο σχήμα (d) η μαγνητοστατική ενέργεια θα είναι θεωρητικά μηδενική αν δεν υπεισερχόταν ο παράγοντας της ανισοτροπίας και των γειτονικών περιοχών που έχουν διαφορά προσανατολισμού κατά  $180^\circ$  [6].

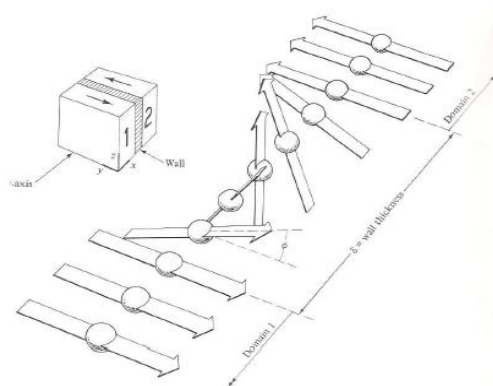


**Εικόνα 3-1:** Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές. Σε κάθε περιοχή, τα spin είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό

### 3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

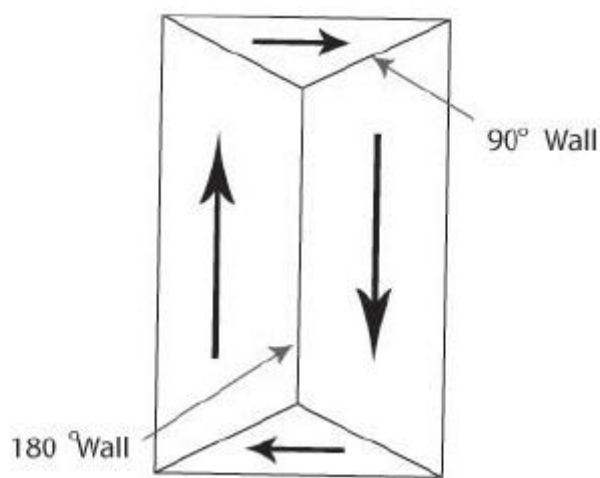
Τα μαγνητικά τοιχώματα αποτελούν τα χωρίσματα των μαγνητικών περιοχών, στις οποίες η μαγνήτιση έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Μέσα στο τοίχωμα, η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση από αυτή της μίας περιοχής στην άλλη. Τα τοιχώματα αυτά δεν είναι απείρως λεπτά αλλά έχουν ένα πεπερασμένο πλάτος. Το πάχος τους ουσιαστικά είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής (που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους) και την ενέργεια ανισοτροπίας (που απαιτεί την ύπαρξη ενός λεπτού τοιχώματος). Ένα στενό τοίχωμα δημιουργεί μεγάλες γωνίες για γειτονικά spin και η ενέργεια ανταλλαγής είναι μεγάλη, ενώ σε ένα ευρύ τοίχωμα, πολλά spin έχουν κατεύθυνση μακριά από τις διευθύνσεις εύκολης μαγνήτισης με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας ανισοτροπίας. Έτσι το πάχος ισορροπίας είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανισοτροπίας εντός του τοιχώματος.

Γενικά τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα  $180^\circ$  και σε μη- $180^\circ$ , δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές. Τα τοιχώματα  $180^\circ$  συναντώνται σχεδόν σε όλα τα υλικά και διαφέρουν από όλα τα άλλα τοιχώματα στο ότι δεν επηρεάζονται από την επιβολή μηχανικής τάσης. Στα τοιχώματα αυτά οι διευθύνσεις της μαγνήτισης σε γειτονικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες και κατά συνέπεια οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών έχουν διευθύνσεις ισοδύναμων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Στην εικόνα 7 απεικονίζεται ένα τοίχωμα  $180^\circ$  που διαχωρίζει δύο περιοχές με μαγνήτιση σε αντίθετες διευθύνσεις. Αν η μαγνήτιση περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια του τοιχώματος, τότε το τοίχωμα καλείται τοίχωμα Bloch [6].



Εικόνα 3-2: Δομή τοιχώματος Bloch  $180^\circ$

Στα υλικά που κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα, τα τοιχώματα μη-180° είναι όλα 90°, έτσι ώστε οι διευθύνσεις των δίπολων σε γειτονικές μαγνητικές περιοχές να είναι ορθές γωνίες. Γι' αυτό στο σίδηρο που οι κύριοι άξονες είναι στις διευθύνσεις (100), τα μαγνητικά τοιχώματα ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (-100) είναι όλα 180°, ενώ αυτά που είναι ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (010) είναι τοιχώματα 90°. Συχνά όλα τα μη -180° μαγνητικά τοιχώματα αναφέρονται εσφαλμένα ως τοιχώματα 90° για να τονίζεται η ευαισθησία που έχουν στην επιβολή μηχανικής τάσης σε σχέση με τα τοιχώματα 180°[6].



**Εικόνα 3-3:** Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90°

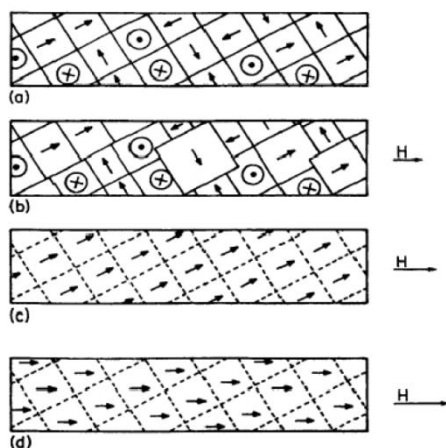
### 3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από μαγνητικές περιοχές ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μαγνήτισης και στην κατάσταση απομαγνήτισης είναι η διαφορετική διάταξη και προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών. Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμοσθεί σε ένα μη μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό οι μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής **B** συναρτήσει του πεδίου **H** παράγουν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης.

Σε ενδιάμεσες τιμές πεδίου ένας άλλος μηχανισμός αρχίζει να αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Αυτός ο μηχανισμός είναι η περιστροφή μαγνητικών περιοχών, κατά τον οποίο οι ατομικές ροπές σε περιοχή που είναι προσανατολισμένη σε μη θεμιτή κατεύθυνση ξεπερνούν την ενέργεια ανισοτροπίας και περιστρέφονται έως ότου προσανατολιστούν παράλληλα με έναν ισοδύναμο εύκολο κρυσταλλογραφικό άξονα που σχηματίζει μικρότερη γωνία με το επιβαλλόμενο πεδίο.



Η τελική επίδραση του πεδίου στις μαγνητικές περιοχές εμφανίζεται σε ισχυρά πεδία. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι μαγνητικές ροπές που έχουν σχηματίζει μικρή γωνία με το πεδίο), αρχίζουν με την περαιτέρω αύξηση του πεδίου να αποκλίνουν σταδιακά τείνοντας να ευθυγραμμιστούν απόλυτα με το πεδίο. Έτσι το υλικό αποκτά μία μόνο μαγνητική περιοχή[6].



**Εικόνα 3-4:** Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμπής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (γ) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (δ)

### 3.4 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ

Όταν όλες οι περιοχές έχουν προσανατολιστεί, με το διάνυσμα της αυθόρμητης μαγνήτισης τους παράλληλα στο πεδίο, το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μία μόνο μαγνητική περιοχή. Η κατάσταση αυτή αποκαλείται τεχνητή μαγνήτιση κόρου. Εάν το μαγνητικό πεδίο αυξηθεί πέρα από αυτή την τιμή, τότε παρατηρείται μία περαιτέρω, αργή, αύξηση της μαγνήτισης. Σε αυτό το σημείο οι ατομικές μαγνητικές ροπές, που δεν είναι τέλεια διατεταγμένες λόγω της θερμικής κίνησης, φθάνουν σε κατάσταση πλήρους διάταξης, με αποτέλεσμα την αύξηση της αυθόρμητης μαγνήτισης του υλικού. Η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους 0 K είναι ίση με τη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πέφτει το μηδέν καθώς προσεγγίζεται η θερμοκρασία Curie. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 K, οι μαγνητικές ροπές εκτελούν μία μεταπτωτική κίνηση γύρω από τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της θερμικής ενέργειας. Αυτή η κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα η αυθόρμητη μαγνήτιση να είναι μικρότερη από τη μαγνήτιση κορεσμού. Σε πολύ υψηλά

μαγνητικά πεδία οι μαγνητικές ροπές διατάσσονται πλήρως και η μαγνήτιση φθάνει τη μαγνήτιση κορεσμού[6].

### **3.5 ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ**

Για να μαγνητιστεί, ένας σιδηρομαγνητικός μονοκρυστάλλος θα πρέπει ένα μετακινηθούν τα τοιχώματα των περιοχών που έχουν μαγνήτιση παράλληλη προς το επιβαλλόμενο πεδίο εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι αντίθετη προς τη μαγνήτιση του επιβαλλόμενου πεδίου.

Η μετατόπιση ενός τοιχώματος εντός ενός κρυστάλλου επηρεάζεται από τις κρυσταλλικές ατέλειες, και τις προσμίξεις. Έτσι δεν είναι ομαλή και είναι, συνήθως, μη αντιστρεπτή εκτός από την περίπτωση που το υλικό είναι υψηλής καθαρότητας. Τα μαγνητικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επηρεάζονται από τις μη μαγνητικές προσμίξεις, τα εγκλείσματα, τρύπες και ρωγμές. Ένα εγκλείσμα για παράδειγμα που βρίσκεται σε μια περιοχή, μαγνητίζεται και δημιουργούνται σε αυτό βόρειος και νότιος πόλος. Αν το τοίχωμα έπρεπε να περάσει από μέσα από το εγκλείσμα, τότε η μαγνητοστατική ενέργεια θα ήταν μικρότερη, γεγονός που είναι ενεργειακά προτιμότερο. Η μείωση της μαγνητοστατικής δυναμικής ενέργειας σημαίνει ότι απαιτείται πλέον μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθεί το τοίχωμα και να απομακρυνθεί από το εγκλείσμα. Έτσι μακροσκοπικά φαίνεται ότι οι προσμίξεις έλκουν τα τοιχώματα και καταφέρνουν να συγκρατούν κατά κάποιο τρόπο την κίνηση τους.

Επίσης, οι διαταραχές στον κρυστάλλο του υλικού δημιουργούν πεδία τοπικών τάσεων, τα οποία με τη σειρά τους αναπτύσσουν μία ανομοιογενή τάση μέσα στον όγκο του στερεού εμποδίζοντας έτσι την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Αυτό εξηγεί γιατί δοκίμια που έχουν υποστεί ψυχρή μηχανουργική κατεργασία εμφανίζουν υψηλότερο συνεκτικό πεδίο και μικρή αρχική επιδεκτικότητα σε σχέση με άλλα δοκίμια του ίδιου υλικού, τα οποία έχουν ανακτηθεί. Για την απομάκρυνση ενός τοιχώματος από μία διαταραχή, απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου.

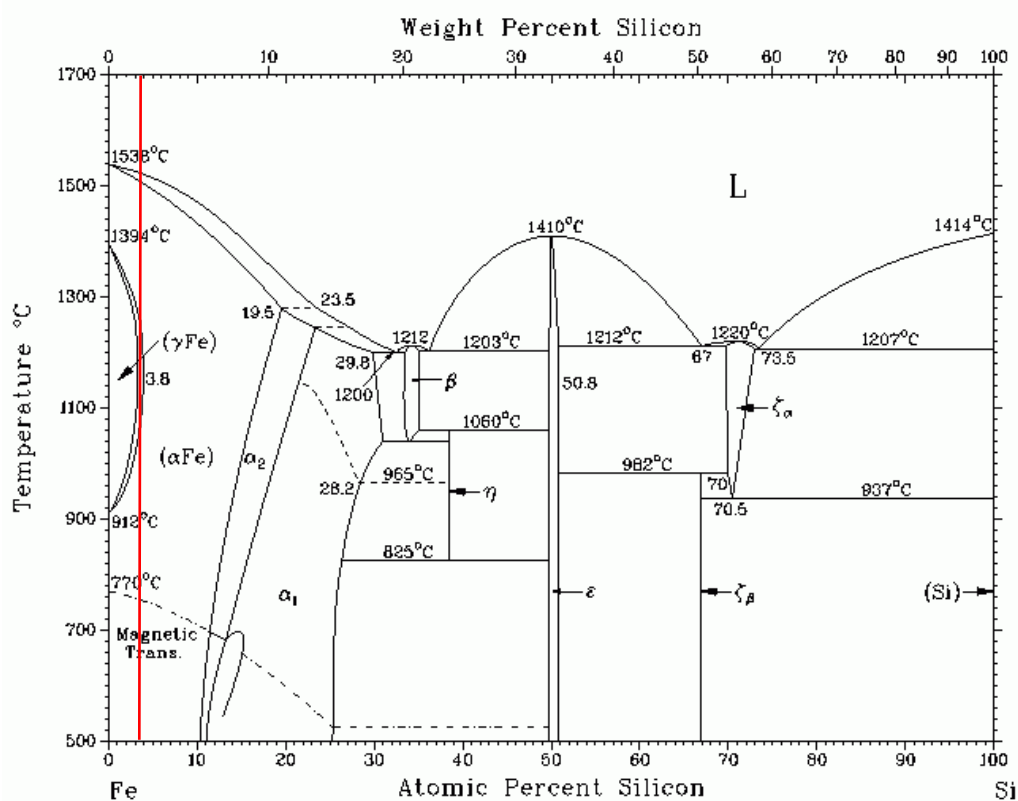
Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Το τοίχωμα συγκρατείται σε κάποιο σημείο από μία ατέλεια ή από μία πρόσμειξη και για να ελευθερωθεί απαιτείται η εφαρμογή ενός ισχυρότερου πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί, το

τοίχωμα κινείται μέχρις ότου να δεσμευτεί από μία άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο αυξηθεί ακόμα παραπάνω και ούτω καθεξής [6].

# 4 ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

## 4.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Το σύνολο του υπό εξέταση υλικού προήλθε εξολοκλήρου από την LADIS & GYR. Προμηθευτήκαμε μια κουλούρα ηλεκτρικού χάλυβα πάχους 0,5mm και όπως δόθηκε από τον προμηθευτή η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ήταν 3wt%. Όπως φαίνεται και στο διμερές διάγραμμα φάσεων του Fe-Si, **Εικόνα 4.1** το υλικό στις συνήθειες θερμοκρασίες είναι μονοφασικό, αποτελείται από μια φερριτική μήτρα, και διατηρείται μονοφασικό σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος.



Εικόνα 4-1: Διμερές διάγραμμα φάσεων Fe- Si.

Για το χαρακτηρισμό του δείγματος, τόσο σε επίπεδο μικροδομής όσο και σε επίπεδο μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων, εξετάστηκε αρχικά το αναφορικό υλικό στην κατάσταση στην οποία παραλήφθηκε (as received) και εν συνεχεία το ανοπτημένο υλικό σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 400°C – 950°C σε διάφορους χρόνους και στη συνέχεια ακολουθεί η βαφή του στον αέρα.

## 4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Πριν τη μελέτη ενός δοκιμίου πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του, η οποία σε πρώτη φάση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες και σε δεύτερη φάση αποκαλύπτει τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και η χημική προσβολή.

### 4.2.1 Κοπή δοκιμίων

Από την κουλούρα του υλικού κόπηκαν ορθογώνιες λωρίδες με πλάτος 20mm και μήκος 50mm. Η κοπή αυτή πραγματοποιήθηκε στο δισκοτόμο της σχόλης MMM, όπου κατά τη διάρκεια της κοπής το εκάστοτε δοκίμιο ψύχονταν ώστε να μην θερμανθεί.

### 4.2.2 Εγκιβωτισμός

Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin UN-no:3082, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener UN-no:2259. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες σύριγγες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλίνδρων της Struers τα δείγματα και στη συνέχεια συμπληρώθηκε με το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης.

### 4.2.3 Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in<sup>2</sup>). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειάζονταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνταν σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

#### **4.2.4 Στίλβωση**

Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα αντίστοιχο κάθε φορά της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3μm και στη συνέχεια 1μm. Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος λιπαντικό για την ψήξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε τρεχούμενο νερό, καθαρίζονταν με βαμβάκι, στη συνέχεια με αιθανόλη και τέλος ξηραίνονταν σε ρεύμα θερμού αέρα.

#### **4.2.5 Χημική προσβολή**

Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων των κόκκων (etching). Ουσιαστικά, η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται από ένα ισχυρά όξινο διάλυμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα η χημική προσβολή της επιφάνειας του δείγματος γίνεται με Nital 2% για 20sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολουθεί έκπλυση του δείγματος.

### **4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ**

#### **4.3.1 Οπτικό Μικροσκόπιο (OM)**

Για την οπτική μεταλλογραφία χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός OLYMPUS BX41-M για την παρατήρηση και ερμηνεία της μικροδομής του υλικού. Η μεγέθυνση ήταν x125. Χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για τη λήψη φωτογραφιών.

#### **4.3.2 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)**

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope) που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπος Jeol GSM 6380-LV. Μέσω εικόνας δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η μορφολογία και η κατανομή των κόκκων στην

επιφάνεια του υλικού, ενώ μέσω εικόνας πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ταυτοποιήθηκε η μονοφασικότητα του υπό εξέταση υλικού. Οι παράμετροι για την λήψη της εικόνας ήταν:

- Τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων (acceleration voltage) 20kV
- Spot size: 50 (για εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων) και 60 (για εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων)
- Working distance: 15mm

#### **4.3.3 Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS – Energy Dispersive Spectroscopy)**

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκαν σημειακές και γενικευμένες χημικές στοιχειομετρικές αναλύσεις στην επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της μικροανάλυσης ήταν η εξέταση της περιεκτικότητας του πυριτίου ενδοκρυσταλλικά και διακρυσταλλικά. Ποσοτικός προσδιορισμός ελαφριών στοιχείων (όπως C, N, B, O) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί

#### **4.3.4 Περίθλαση ακτίνων X (XRD)**

Για την ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης στο υλικό και τον προσδιορισμό του μακρο-κρυσταλλογραφικού ιστού (macrotecture), χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων X (X-ray Diffraction), τύπου Brucker D8 Focus. Το XRD έφερε λάμπα χαλκού ( $\text{CuK}\alpha_1$ ) με ακτινοβολία  $1,5405 \text{ \AA}$ , δυναμικό 40KV και ένταση ρεύματος 40mA. Η βήμα σάρωσης της δέσμης ήταν  $0,02^\circ$ , ο χρόνος παραμονής σε κάθε μοίρα ήταν 1sec, ενώ το γωνιακό εύρος εξέτασης των δοκιμίων, μετρούμενο σε γωνία  $2\theta$ , ήταν από  $30$  ως  $130^\circ$  για όλα τα υπό εξέταση δοκίμια.

### **4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ**

#### **4.4.1 Δοκιμές μάκρο σκληρομέτρησις**

Για τη μέτρηση της σκληρότητας η επιφάνεια του υλικού είχε λειανθεί μέχρι χαρτί καρβιδίου του πυριτίου 1200 grit. Χρησιμοποιήθηκε μακροσκληρομέτρηση με τη μέθοδο Vickers στο σκληρόμετρο του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας τύπου Karl Frane GMBH και για τη λήψη των μετρήσεων εφαρμόστηκε φορτίο 196N. Καθώς η διαμαντένια πυραμίδα γωνίας  $136^\circ$  διείσδυε στην επιφάνεια του δοκιμίου, άφηνε ένα

ρομβοειδές αποτύπωμα. Για τη σωστή διεύθυνση της διαμαντένιας πυραμίδας οι προς εξέταση επιφάνειες ήταν λείες. Πραγματοποιήθηκαν 10 μετρήσεις ανά δοκίμιο για ελαχιστοποίηση πιθανότητας σφάλματος. Από τη μέτρηση με αναλογικό τρόπο του μέσου όρου των διαγωνίων του αποτυπώματος προέκυπτε η σκληρότητα του δείγματος, σύμφωνα με τους πίνακες μετατροπής της ένδειξης σε σκληρότητα.

#### **4.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ**

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών δοκιμών στον ηλεκτρικό χάλυβα χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλωγνωσίας. Η διάταξη αυτή πρέπει να είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη παράγει συγκριτικές μετρήσεις καθώς δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς γνωστών και πιστοποιημένων ιδιοτήτων.

Η διάταξη στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει είτε το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα. Έτσι το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον πυρήνα (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου πεδίου στο υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια (ημιτονοειδής) και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από:

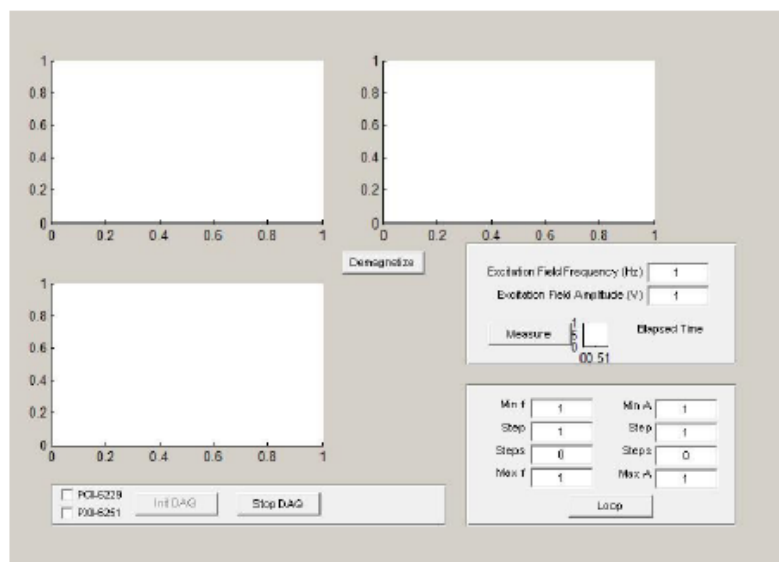
- το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και
- πηνία διέγερσης και λήψης τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή:



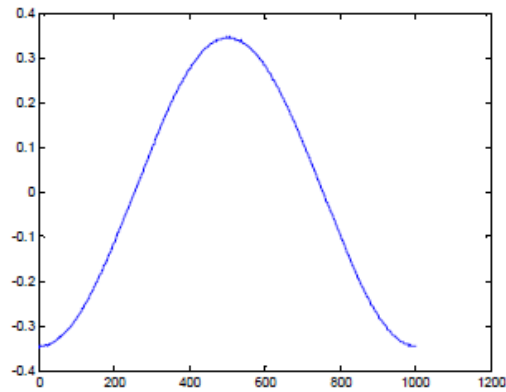
- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).
- Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά  $\pm 70V$ ,  $\pm 6A$  της Kerco

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται Στην Εικόνα 7-1.



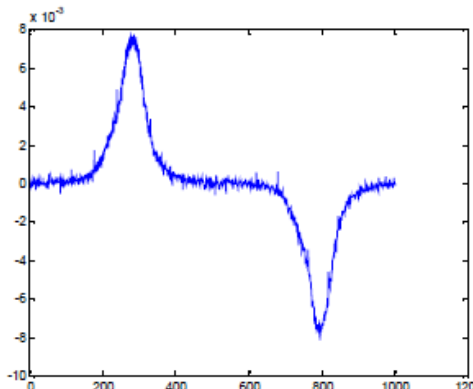
**Εικόνα 4-2:** Πλατφόρμα μετρήσεων του λογισμικού

Το σήμα διέγερσης (Εικόνα 7-2) δημιουργείται μέσω συνάρτησης από το Matlab με δυνατότητα επιλογής των επιθυμητών τιμών του πλάτους και της συχνότητας (από τον χρήστη) ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.

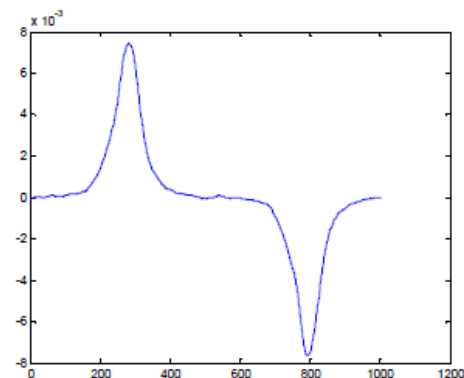


**Εικόνα 4-3:** Σήμα διέγερσης

Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (Εικόνα7-3). Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υψιπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (Εικόνα 7-4) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (Εικόνα 7-5).

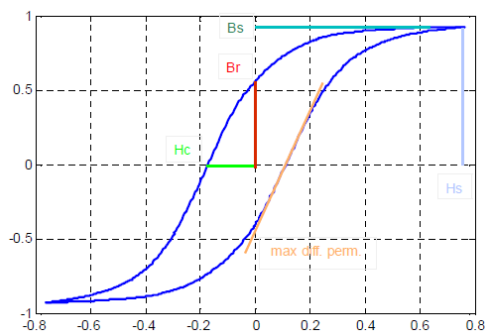


**Εικόνα 4-4:** Σήμα λήψης



**Εικόνα 4-5:** Σήμα λήψης μετά από ψηφιακό ηλεκτρονικό φιλτράρισμα

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντας το με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά.



**Εικόνα 4-6:** Βρόχος υστέρησης

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον προκύπτοντα βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (Εικόνα 7-5) προσδιορίζονται και οι παράμετροι των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού.

## 4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.6.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ (ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ)

Το υλικό αναφοράς αποτελείται από φερριτικούς πολυγωνικούς κόκκους, μη ισαξονικούς με ετερογένεια στον προσανατολισμό τους. Παρατηρείται ανομοιομορφία στην κατανομή του μέσου μεγέθους τους το οποίο προσδιορίστηκε στα 67 $\mu\text{m}$  από την μικροσκοπία και 62,6 $\mu\text{m}$  από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

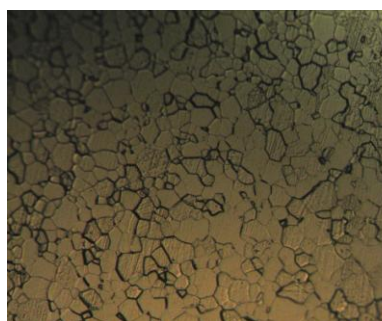
Κατά την διαδικασία της αποτατικής ανόπτησης του, με τη θέρμανσή του στους 400°C και στη συνέχεια βαφή του στον αέρα, στην επιφάνεια του δείγματος παρατηρείται ανομοιογένεια τόσο στη μορφολογία όσο και στη κατανομή του μέσου μεγέθους του κόκκου χωρίς ωστόσο να μεταβάλλεται η τιμή του μέσου μεγέθους τους. Καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στην ισοθερμοκρασιακή διαδικασία από τα 30min στις 2h δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση του μέσου μεγέθους του κόκκου ούτε διαμόρφωση της ισοαξονικότητας της μορφολογίας τους.

Μετά την ανακρυστάλλωση του υλικού, με θέρμανση του υλικού στους 750°C και στη συνέχεια βαφή του στον αέρα, παρατηρείται διεύρυνση του μέσου μεγέθους του κόκκου ωστόσο διατηρείται η ανομοιογένεια τόσο στη μορφολογία όσο και στη κατανομή των κόκκων. Καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στην ισοθερμοκρασιακή διαδικασία από τα 30min στις 2h δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων αλλά οι κόκκοι εμφανίζονται πιο γωνιώδης.

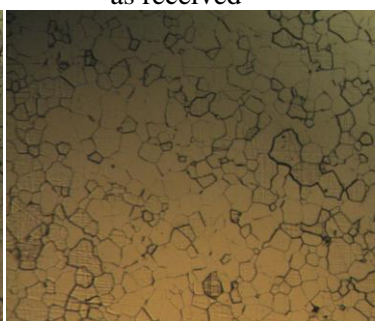
Τέλος ύστερα από τη θέρμανση του υλικού στους 950 °C και την βαφή του στον αέρα, στο υλικό παρατηρείται σημαντική αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων και καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στην θερμοκρασία ανόπτησης οι κόκκοι παύουν να είναι τόσο γωνιώδεις και αποκαθιστάτε μία ομοιομορφία στη μορφολογία τους.



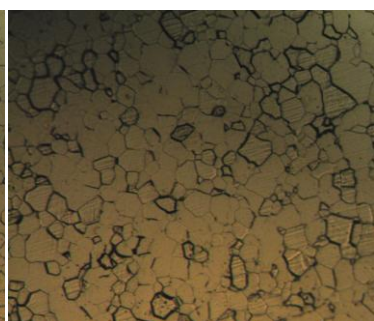
as received



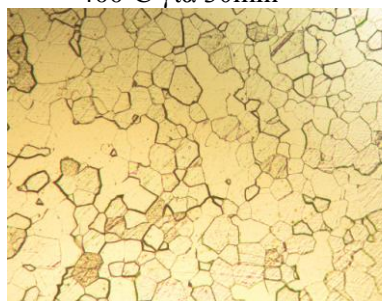
400°C για 30min



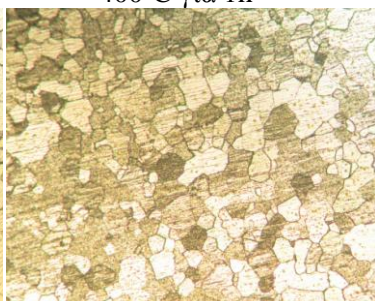
400°C για 1h



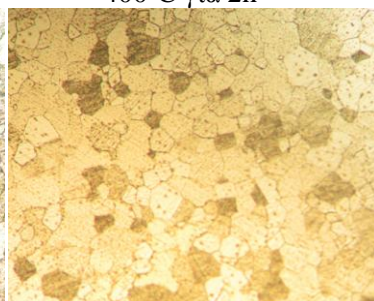
400°C για 2h



750°C για 30min

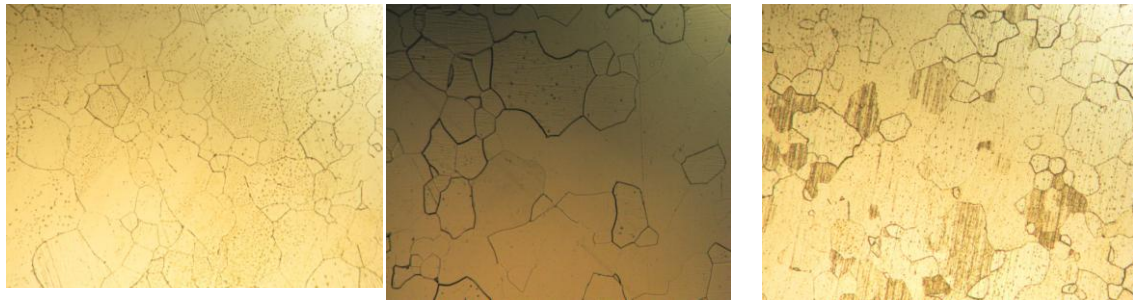


750°C για 1h



750°C για 2h

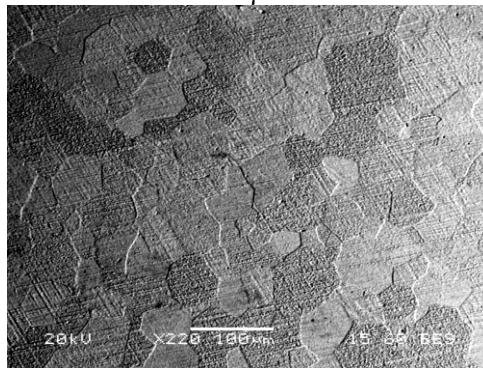




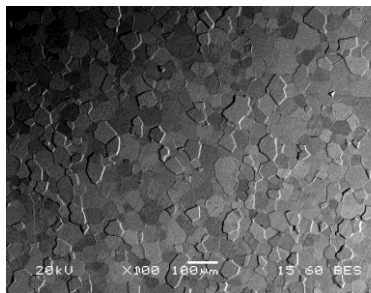
950°C για 30min

950°C για 1h

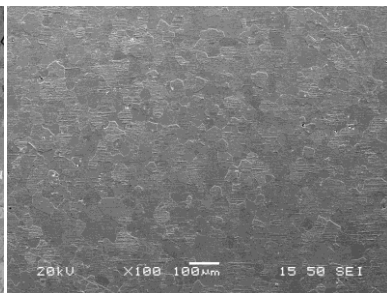
950°C για 2h



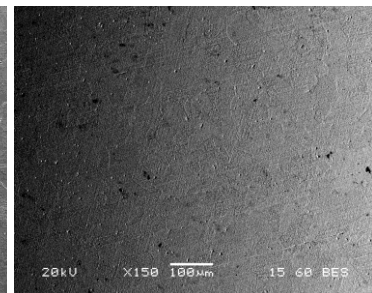
as received



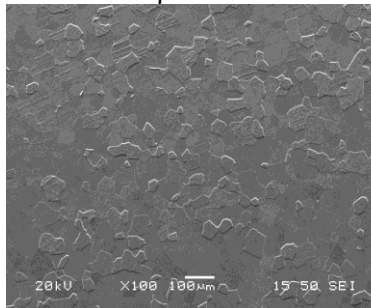
400°C για 30min



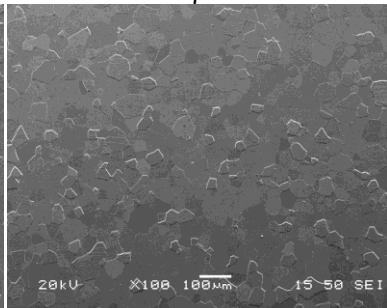
400°C για 1h



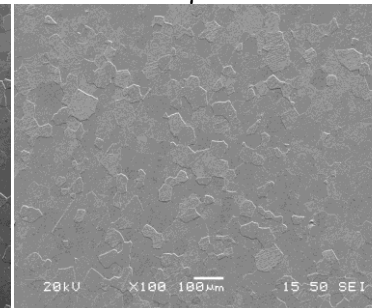
400°C για 2h



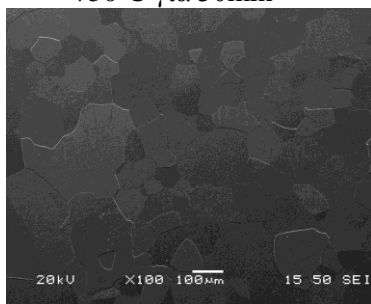
750°C για 30min



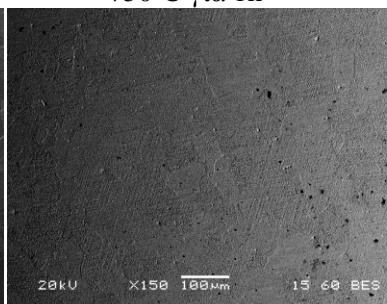
750°C για 1h



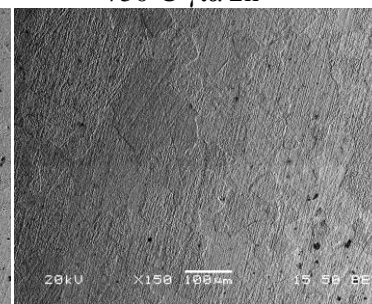
750°C για 2h



950°C για 30min



950°C για 1h



950°C για 2h

**Εικόνα 4-7:** Μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, για τις διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης και χρόνους παραμονής.

#### 4.6.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ (ΜΕΣΩ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ)

Ο προσδιορισμός του μέσου μεγέθους των κόκκων έγινε κατά ASTM E112-96. Για τον υπολογισμό αυτού του τυποποιημένου αριθμού καταρχήν υπολογίζουμε στην εικόνα της μικροδομής που διαθέτουμε τον αριθμό των κόκκων σε επιφάνεια μιας τετραγωνικής ίντσας (λαμβάνοντας φυσικά υπόψη και κλάσματα κόκκων). Εάν αυτός ο αριθμός των κόκκων σε 1 in<sup>2</sup> είναι N σε τυποποιημένη μεγέθυνση 100 τότε ο αριθμός n υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = 2^n - 1$$

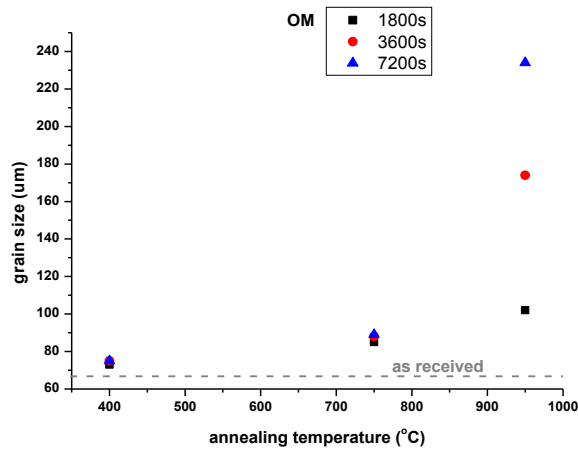
Εάν όμως, όπως και στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεγέθυνση δεν είναι 100 αλλά μια άλλη M τότε ο αριθμός των κόκκων σε εμβαδόν μιας τετραγωνικής ίντσας είναι N<sub>M</sub> και η προηγούμενη σχέση τροποποιείται σε:

$$N_M \left( \frac{M}{100} \right)^2 = 2^n - 1 \quad \rightarrow \quad \log N_M + 2 \log \frac{M}{100} = (n - 1) \log 2$$

$$\rightarrow \quad n = \frac{\log N_M + 2 \log \frac{M}{100}}{\log 2} + 1$$

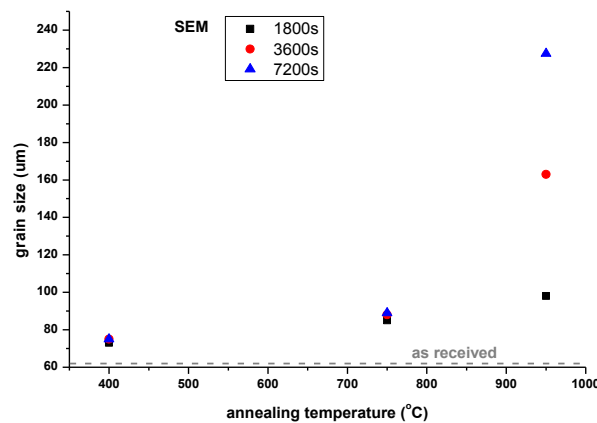
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται συνοπτικά η διακύμανση του μέσου μεγέθους των κόκκων στις διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης και χρόνους παραμονής, όπως αυτό προσδιορίστηκε από την οπτική μικροσκοπία και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

<b>Πίνακας 4-1: Προσδιορισμός του μέσου μεγέθους των κόκκων μέσω οπτικού μικροσκοπίου</b>			
<b>Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)</b>	<b>Μέγεθος κόκκου (μm)</b>		
	<b>1800s</b>	<b>3600s</b>	<b>7200s</b>
<b>400</b>	73	75	75
<b>750</b>	85	89	89
<b>950</b>	92	174	234
<b>As received</b>	67μm		



**Σχήμα 4-1:** Γραφική απεικόνιση του μέσου μεγέθους των κόκκων, όπως αυτό προσδιορίστηκε από την οπτική μικροσκοπία, για τις διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης και χρόνους παραμονής.

Πίνακας 4-2: Προσδιορισμός του μέσου μεγέθους των κόκκων μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης			
Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)	Μέγεθος κόκκου (μm)		
	1800s	3600s	7200s
400	70	70	70
750	80	80	80
950	98	163	227.4
As received	62.7μm		



**Σχήμα 4-2:** Γραφική απεικόνιση του μέσου μεγέθους των κόκκων, όπως αυτό προσδιορίστηκε από την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης, για τις διάφορες θερμοκρασίες ανόπτησης και χρόνους παραμονής.

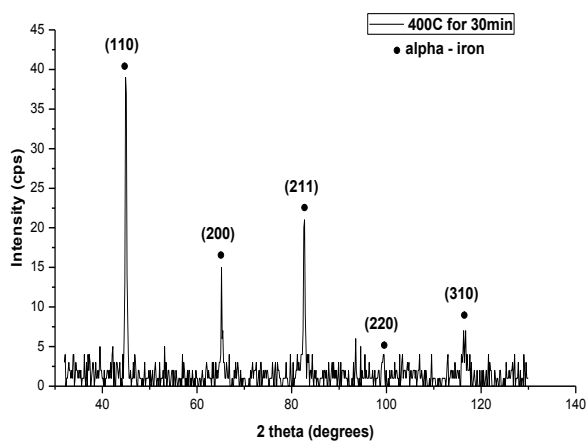
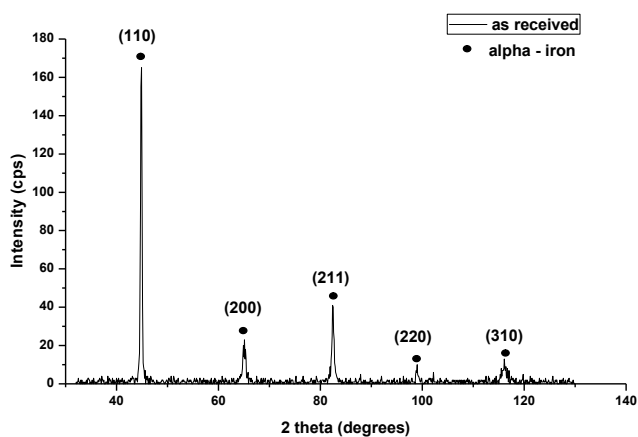
Όπως γίνεται φανερό, κατά τη διάρκεια της αποτατικής ανόπτησης το μέσο μέγεθος του κόκκου δεν μεταβάλλεται σημαντικά σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς, καθώς όπως είναι γνωστό με την αποτατική ανόπτηση ελαχιστοποιούνται οι παραμένουσες τάσεις που διατηρούνται στο υλικό. Στο στάδιο της ανακρυστάλλωσης παρατηρείται αύξηση στην τιμή του μέσου μεγέθους του κόκκου, αλλά όχι ιδιαίτερα

σημαντική, καθώς στο στάδιο αυτό παρατηρείται μια ομοιογένεια στον προσανατολισμό του κρυσταλλογραφικού ιστού. Τέλος στη θερμοκρασία των 950°C είναι εμφανής η αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής στην εκάστοτε θερμοκρασία ανόπτησης αυξάνεται και το μέσο μέγεθος των κόκκων.

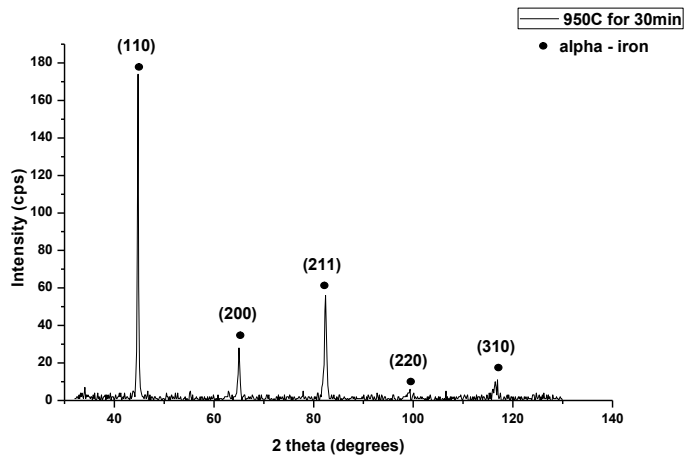
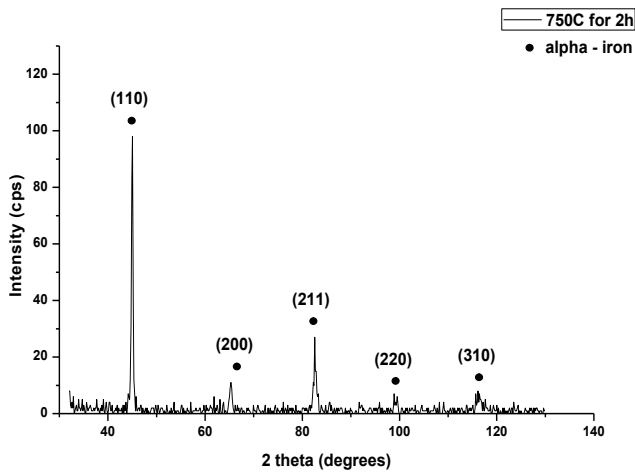
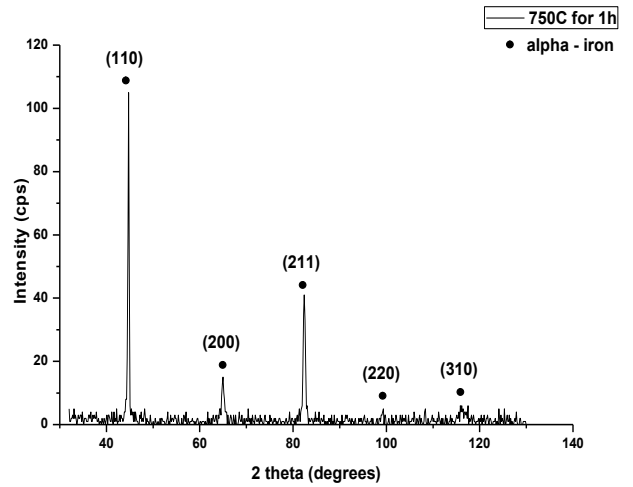
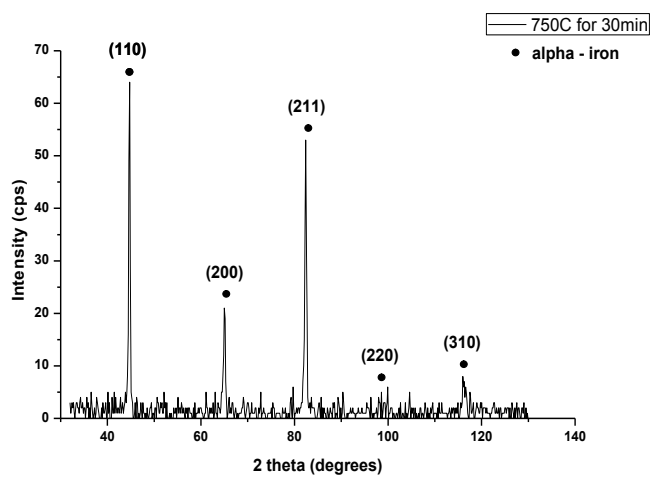
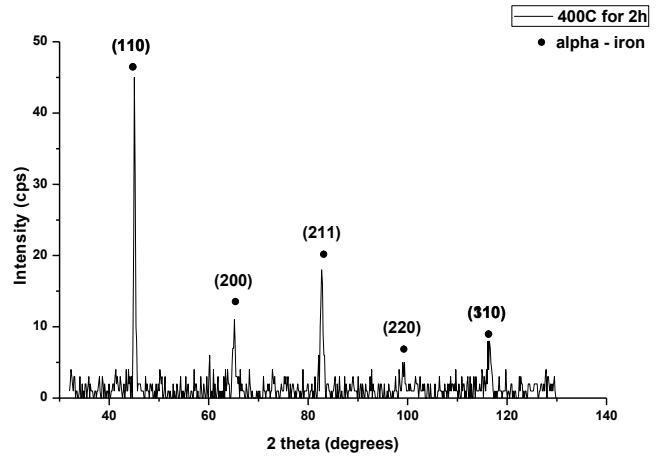
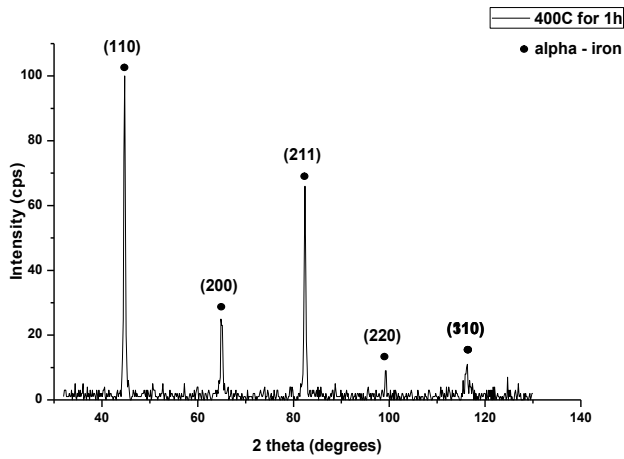
Σημειώνεται τέλος, ότι οι διαφορές στις τιμές του μέσου μεγέθους των κόκκων όπως προσδιορίστηκαν μέσω οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου οφείλονται στην στη λεπτομερέστερη εικόνα που λήφθηκε από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

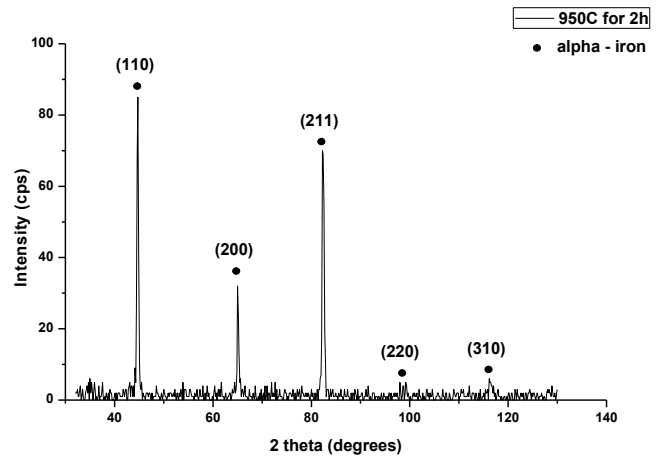
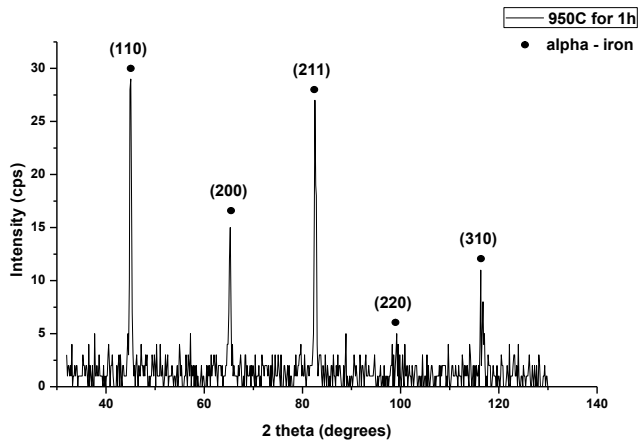
### 4.6.3 XRD ΑΚΤΙΝΟΔΟΑΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΜΑΚΡΟ-ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ

Το πολυκρυσταλλικό υλικό ακτινοβολείται με ακτίνες X και δίνει διαγράμματα όπως δείχνουν οι εικόνες 4.8. παρουσιάζονται ανακλάσεις κρυσταλλικών επιπέδων που ταυτοποιούν την φερριτική φάση ( $\alpha$ -Fe) στο υλικό αναφοράς αλλά και στα ανοπτημένα δείγματα. Παρατηρείται ότι όλα τα ακτινοδιαγράμματα έχουν την ίδια μορφή, κάτι το οποίο υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει σχηματισμός νέων φάσεων κατά τη θέρμανση του υλικού.





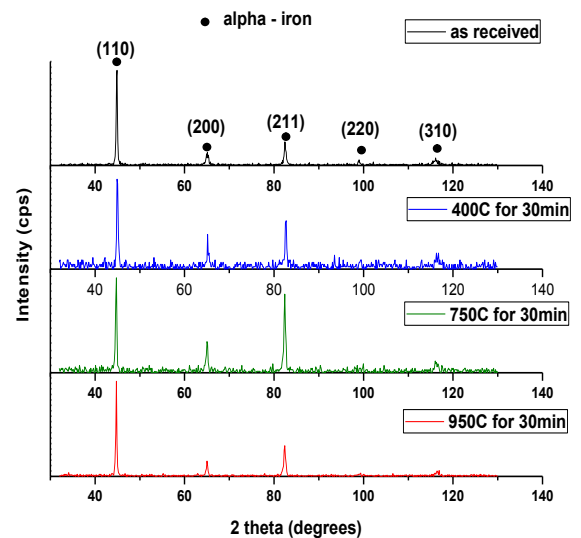
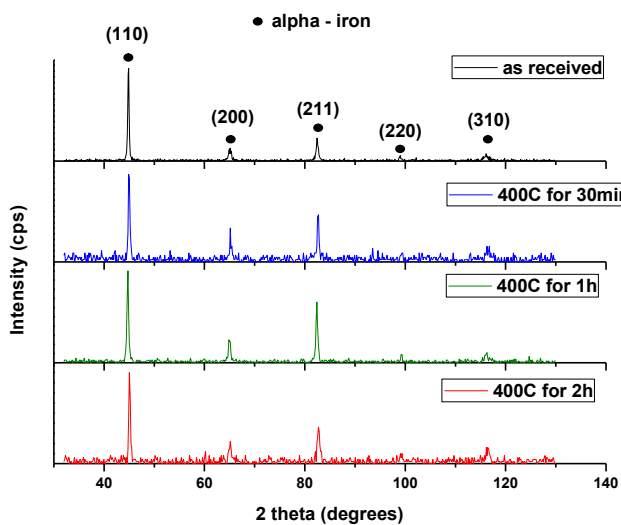


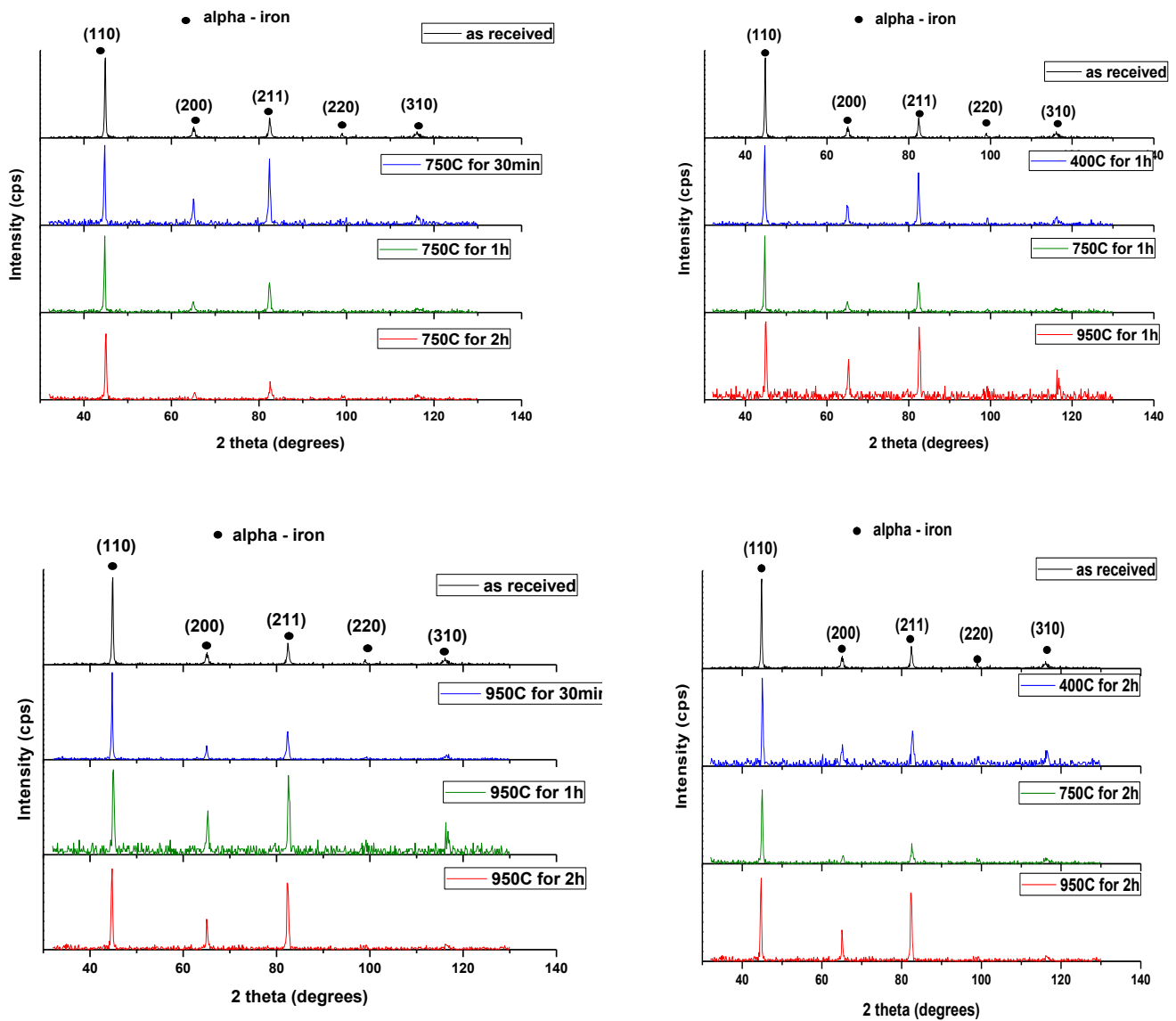


**Εικόνα 4-8:** Ακτινοδιάγραμμα XRD για τις διάφορες θερμοκρασίες απόπτωσης και χρόνους παραμονής.

Συγκρίνοντας τα ακτινοδιαγράμματα στην Εικόνα 4.9 παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονή στην εκάστοτε θερμοκρασία απόπτωσης, η ένταση των α οι ανακλάσεις από τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (220) και (310) μειώνεται, ενώ καθώς μειώνεται η θερμοκρασία απόπτωσης για τους ίδιους χρόνους παραμονής διευρύνεται η κορυφή του (110) κρυσταλλογραφικού επιπέδου γεγονός που καταδεικνύει τη μείωση του μεγέθους των κόκκων.

Η εμφάνιση ανακλάσεων με διαφορετικό ύψος μεγίστων ως προς το δείγμα αναφοράς φανερώνει την ύπαρξη προτιμητέου κρυσταλλογραφικού ιστού ανάπτυξης των κόκκων (μακρο-κρυσταλλογραφικός ιστός) στις διάφορες θερμοκρασίες απόπτωσης και διαφορετικούς χρόνους παραμονής.





**Εικόνα 4-9:** Συγκριτικά ακτινοδιαγράμματα XRD α) στις ίδιες θερμοκρασίες με διαφορετικούς χρόνους παραμονής και β) για τον ίδιο χρόνο παραμονής στις διαφορετικές ισοθερμοκρασιακές ανοπτήσεις.

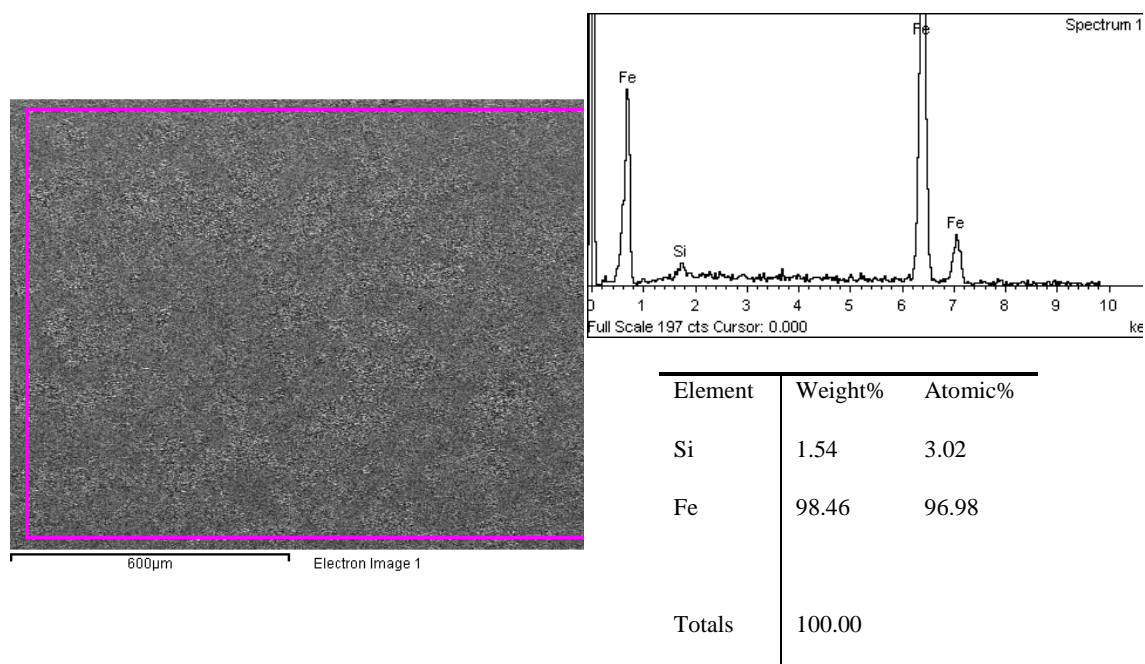
#### 4.6.4 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (ΜΕΣΩ EDS ΑΝΑΛΥΣΗΣ)

Η χημική σύσταση του υλικού όπως αυτή δόθηκε από τον προμηθευτή είναι:

**Πίνακας 4-3:** Τυπική σύσταση σε wt% του NO ηλεκτρικού γάλυβα όπως αυτή δόθηκε από τον προμηθευτή.

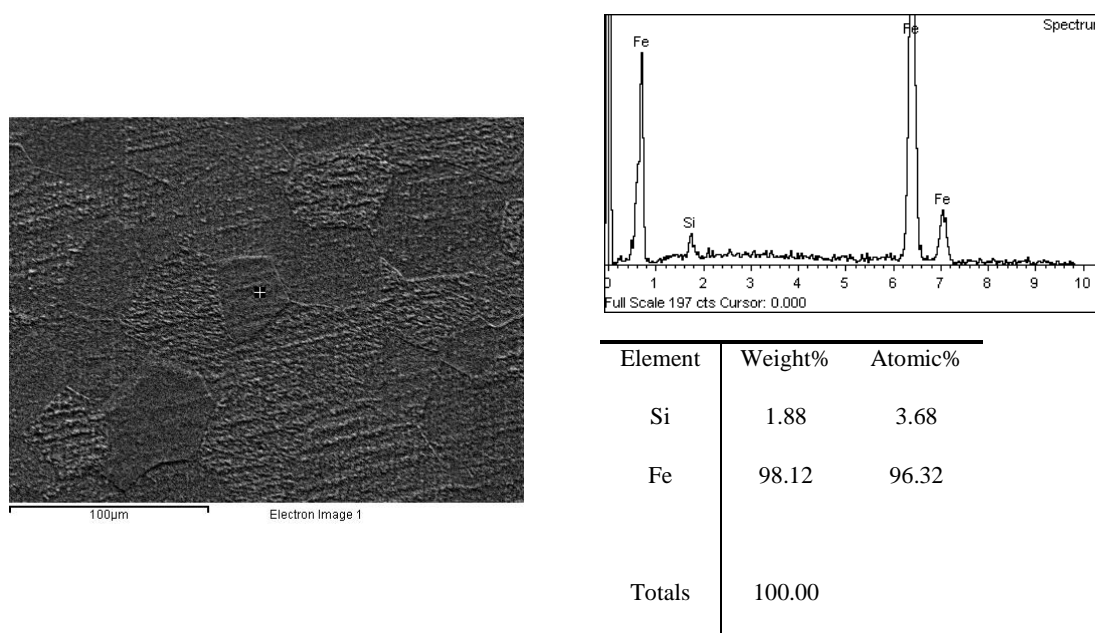
Si	Al	Mn	C	P	S	Fe
2.18	0.35	0.12	18ppm	0.9ppm	0.5ppm	Balance

Στο δοκίμιο αναφοράς πραγματοποιήθηκε γενικευμένη χημική στοιχειομετρική ανάλυση για την με σκοπό την ποσοτική ανάλυση της συμμετοχής του πυριτίου στην επιφάνεια του δείγματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα 4.10.

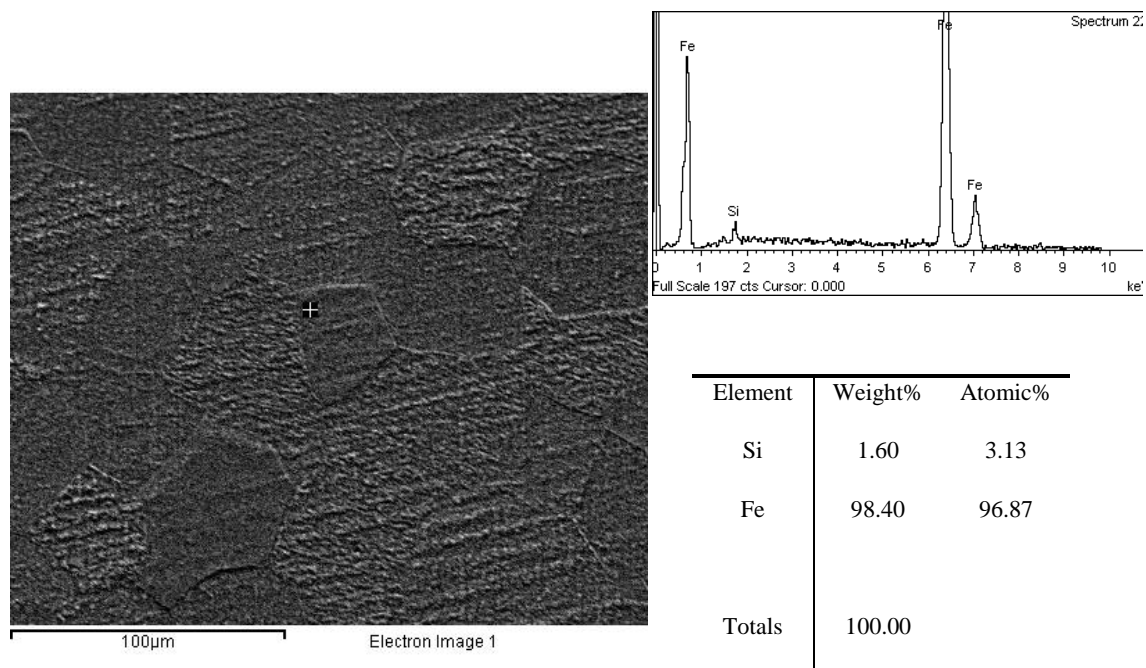


**Εικόνα 4-10:** Αποτελέσματα γενικευμένης ποσοτικής μικροανάλυσης μέσω EDS στην επιφάνεια του δείγματος αναφοράς.

Πραγματοποιήθηκαν και σημειακές στοιχειακές αναλύσεις ενδοκρυσταλλικά και διακρυσταλλικά και βρέθηκε χημική ανομοιογένεια στη συγκέντρωση του πυριτίου λόγω μικροδιαφορισμού του (Εικόνα 4.11 και 4.12).



**Εικόνα 4-11:** Ενδεικτική ενδοκρυσταλλική σημειακή ποσοτική μικροανάλυση μέσω EDS στην επιφάνεια του δείγματος.



**Εικόνα 4-12:** Ενδεικτική διακρυσταλλική σημειακή ποσοτική μικροανάλυση μέσω EDS στην επιφάνεια του δείγματος.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες κατά βάρος συγκεντρώσεις πυριτίου μετά από γενικευμένες και σημειακές χημικές στοιχειακές αναλύσεις όπως αυτές διαμορφώνονται μετά την ανόπτηση σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 400 °C – 950°C για διάφορους χρόνους παραμονής. Παρατηρείται χημική ανομοιομορφία λόγω εμπλουτισμού είτε των ορίων των κόκκων είτε του πυρήνα με πυρίτιο.

**Πίνακας 4-4:** Κατά βάρος συγκέντρωση πυριτίου στην επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα κατόπιν EDS μικροανάλυσης

Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)	30min			1h			2h		
	Γενικευμένη	Ενδο - κρυσταλλικά	Περι - κρυσταλλικά	Γενικευμένη	Ενδο - κρυσταλλικά	Περι - κρυσταλλικά	Γενικευμένη	Ενδο - κρυσταλλικά	Περι - κρυσταλλικά
<b>400</b>	1,94	1,66	0,86	1,76	1,67	1,96	1,98	1,54	1,69
<b>750</b>	2,24	2,03	1,44	1,76	1,50	1,76	2,68	1,54	1,39
<b>950</b>	2,00	1,96	1,23	1,76	1,69	1,52	1,99	2,29	1,90

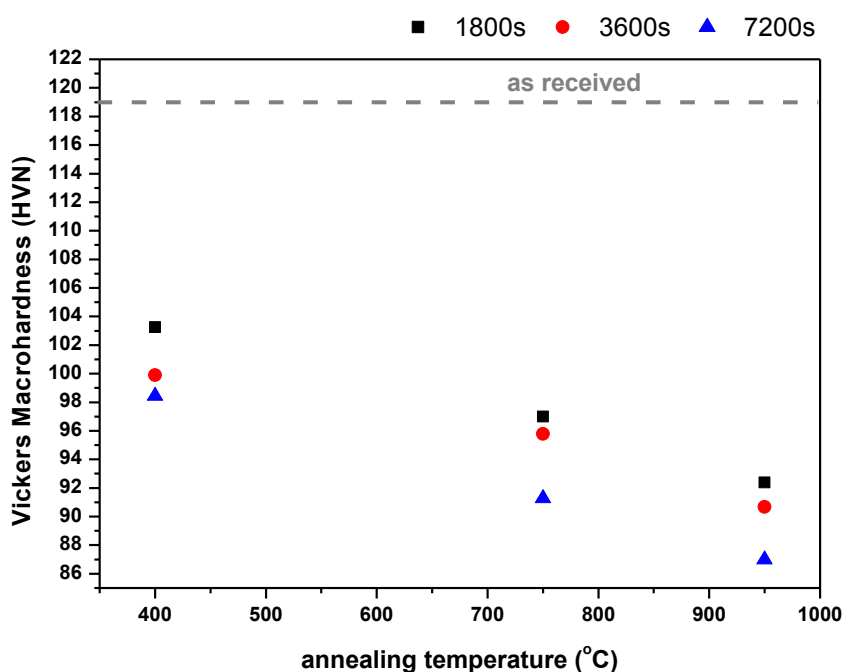
#### 4.6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Για τη λήψη της τιμής της μακροσκληρότητας ελήφθησαν από την επιφάνεια κάθε δείγματος 12 μετρήσεις και κατόπιν των μετρήσεων εξήχθη ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση αυτών (πίνακας 4.3). Εμφανίζοντας μόνο τις τιμές της

μακροσκληρομέτρησης σε μια γραφική παράσταση (εικόνα 4.10 ) για την εκάστοτε θερμοκρασία ανόπτησης και για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στην θερμοκρασία αυτή παρατηρούμε ότι οι τιμές της μακροσκληρότητας μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης.

Πίνακας 4-5: Μακροσκληρομετρήσεις στις θερμοκρασίες ανόπτησης ανάλογα με τον χρόνο παραμονής σε αυτές και η τυπική απόκλιση αυτών.				
Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)		Μακροσκληρότητα Vickers (HVN)		
		30min	1h	2h
400	Τιμή	103,25	99,90	98,45
	Τυπική απόκλιση ±	1,02	5,13	3,01
750	Τιμή	97,00	95,78	91,28
	Τυπική απόκλιση ±	8,04	6,82	4,11
950	Τιμή	92,38	90,68	86,99
	Τυπική απόκλιση ±	8,15	4,79	2,53
As received	Τιμή	119,66		
	Τυπική απόκλιση ±	2,59		

Πίνακας 4-6: Προσδιορισμός της μακροσκληρότητας για το δείγμα του ηλεκτρικού χάλυβα			
Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)	Μακροσκληρότητα Vickers (HVN)		
	1800s	3600s	7200s
400	103,25	99,9	98,45
750	97	95,78	91,28
950	92,38	90,68	86,99
As received	119,66		



Εικόνα 4-13: Μακροσκληρομετρήσεις για την εκάστοτε θερμοκρασία ανόπτησης και για τους διαφορετικούς χρόνους παραμονής στην θερμοκρασία αυτή.

Γνωρίζουμε ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του κόκκου σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό η τιμή της σκληρότητας μειώνεται (εξίσωση Hall-Petch). με βάση αυτή την παρατήρησης, συγκρίνοντας τις μακροσκληρομετρήσεις για την ίδια θερμοκρασία ανόπτησης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος παραμονής η τιμή της σκληρότητας μειώνεται καθώς όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου το μέσο μέγεθος αυξάνεται. Ομοίως, συγκρίνοντας τις τιμές της σκληρότητας στους ίδιους χρόνους παραμονής για διαφορετικές θερμοκρασίες, παρατηρούμε μια συνεχή μείωση της τιμής της μηχανικής ιδιότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, ακριβώς λόγω της αύξησης του μέσου μεγέθους των κόκκων.

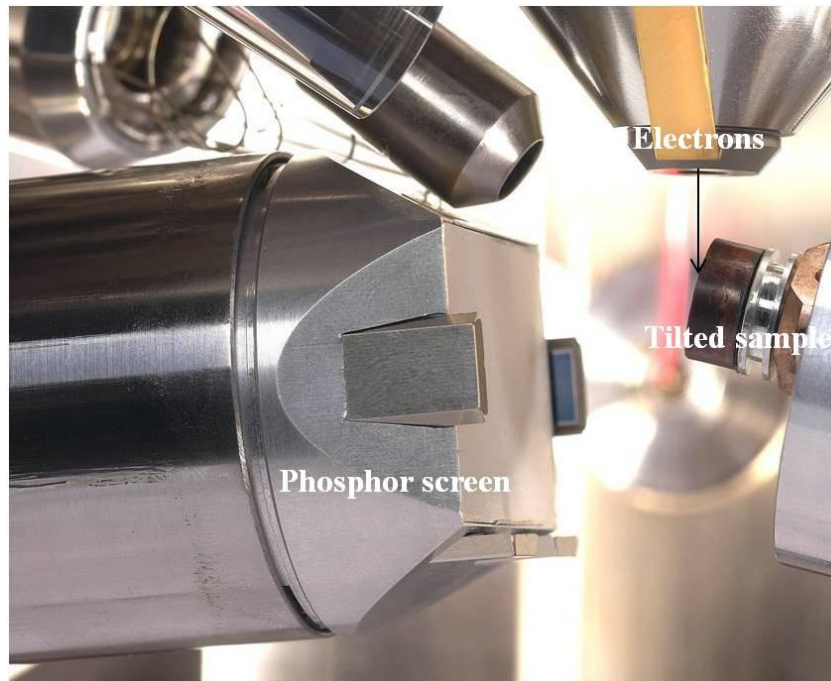
#### **4.7 ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD-ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD)**

Η τεχνική αυτή αφορά στο προσδιορισμό προτιμητέων προσανατολισμών ανάπτυξης για οποιοδήποτε μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό υλικό. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ιστού από μεταλλοτεχνική κατεργασία (texture), για τη μελέτη ελαττωμάτων της μικροδομής, τη ταυτοποίηση φάσεων και το δομικό χαρακτηρισμό σε επίπεδο μικροκλίμακας, τη μορφολογία ορίων κόκκων, τη παράμετρο αναντιστοιχίας μεταξύ μητρικών και δευτερευουσών φάσεων και τη ποσοτικοποίηση μικροπαραμορφώσεων και υπολειπόμενων τάσεων. Συνήθως τα αποτελέσματα από τη μελέτη EBSD τίθενται υπό συνδυαστική μελέτη με αυτά της περιθλασιμετρίας ακτινών X (XRD).

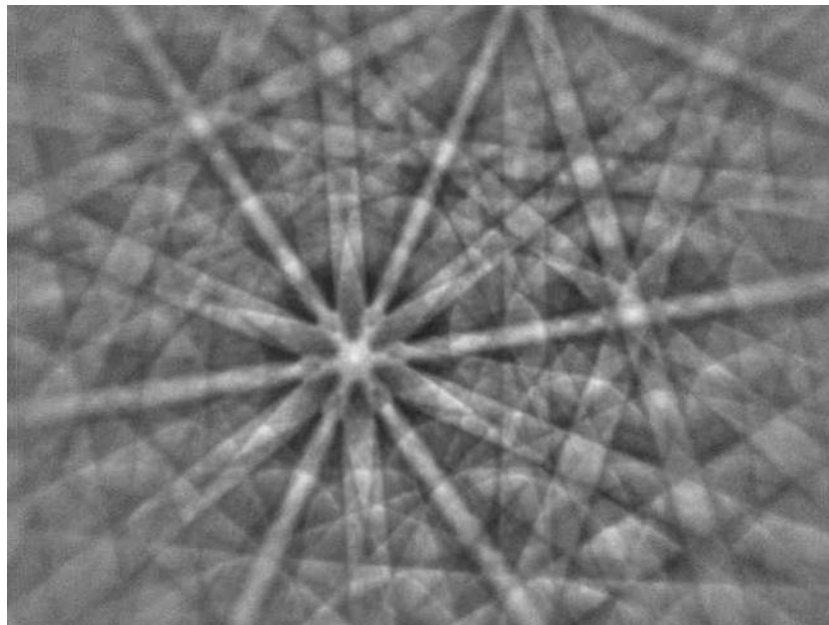
Πειραματικά, μελέτη EBSD διεξάγεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εξοπλισμένο με κάμερα backscatter ηλεκτρονίων. Μια δέσμη ηλεκτρονίων κατευθύνεται στη περιοχή ενδιαφέροντος του κρυσταλλικού δείγματος που βρίσκεται υπό εξέταση σε κλίση 70 μοιρών. Ο μηχανισμός δημιουργίας ζωνών περίθλασης είναι περίπλοκος αλλά ακολουθεί μια δεδομένη αρχή. Τα άτομα στο υλικό συγκρούονται ανελαστικά με προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και ένα ποσοστό ηλεκτρονίων με μικρή απώλεια ενέργειας απομακρύνεται ως μια δεύτερη πηγή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του δείγματος. Μερικά από αυτά τα ηλεκτρόνια προέρχονται από κρυσταλλικά επίπεδα σε γωνίες τέτοιες ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg:  $n\lambda = 2d\sin\theta$ . Έτσι δημιουργείται μια μορφολογία κώνων υψηλής γωνίας, οι οποίοι αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επίπεδα και συνεισφέρουν στη



δημιουργία των kikuchi bands. Τα kikuchi bands παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το βαθμό παραμόρφωσης ενός υλικού, καθώς κατά τη παραμόρφωση η αναπτυσσόμενη πυκνότητα διαταραχών στον όγκο του κρυστάλλου δύναται να μεταβάλλει τις συνθήκες περίθλασης.



**Εικόνα 4-14:** Διάταξη για τη τεχνική EBSD εντός του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.



**Εικόνα 4-15:** Τυπικό EBSP για τον  $\alpha$  σίδηρο



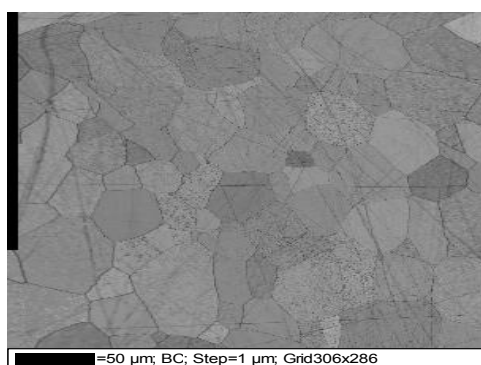
Μέσω της τεχνικής EBSD μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα γύρω από :

- Τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, μέσω σημειακής ανάλυσης (point analysis) και της κρυσταλλογραφικής χαρτογράφησης (crystal orientation mapping)
- Αναντιστοιχία γωνίας πλέγματος
- Κρυσταλλογραφικό ιστό. Οι ιστοί αυτοί διαχωρίζονται αυτόματα, υπολογίζεται ο κλασματικός όγκος συμμετοχής τους και προσδιορίζονται τοπολογικά οι περιοχές από τις οποίες προέρχονται.
- Μέγεθος κόκκων
- Ταυτοποίηση φάσεων κ.α.

## 4.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD

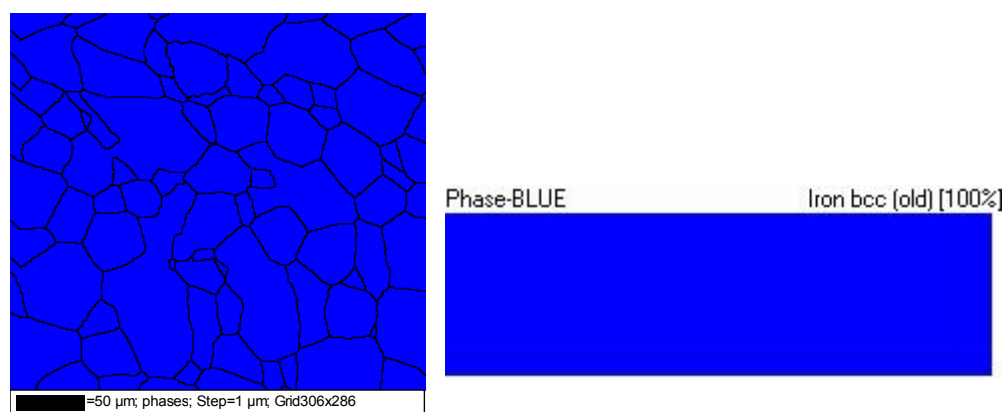
### 4.8.1 Δομικός χαρακτηρισμός μέσω τεχνικής EBSD

Η κρυσταλλογραφική χαρτογράφηση με την χρήση της τεχνικής EBSD πραγματοποιήθηκε στην ακόλουθη επιφάνεια του δείγματος (Εικόνα 4.16)



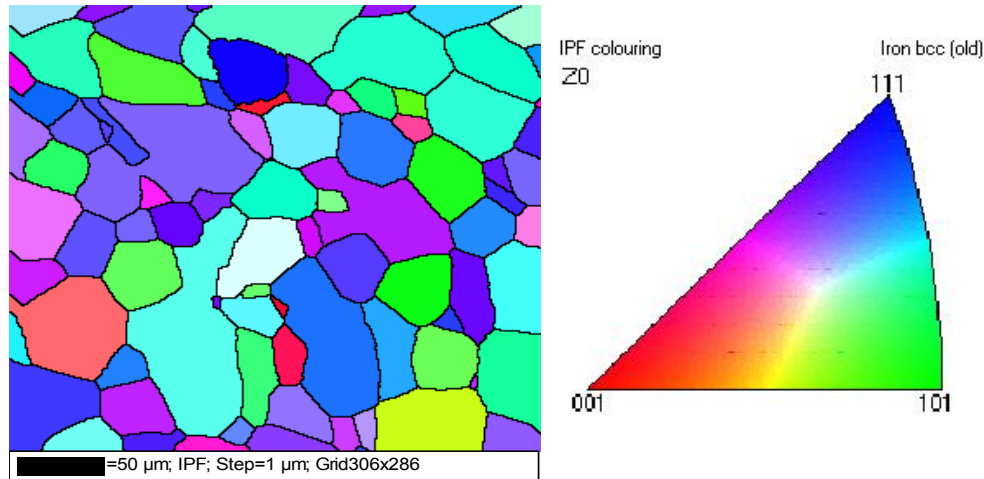
Εικόνα 4-16: Υπό εξέταση επιφάνεια μέσω της τεχνική EBSD

Το πολυκρυσταλλικό υλικό ταυτοποιήθηκε ότι είναι μονοφασικό με φερριτική μήτρα (Εικόνα 4.17)



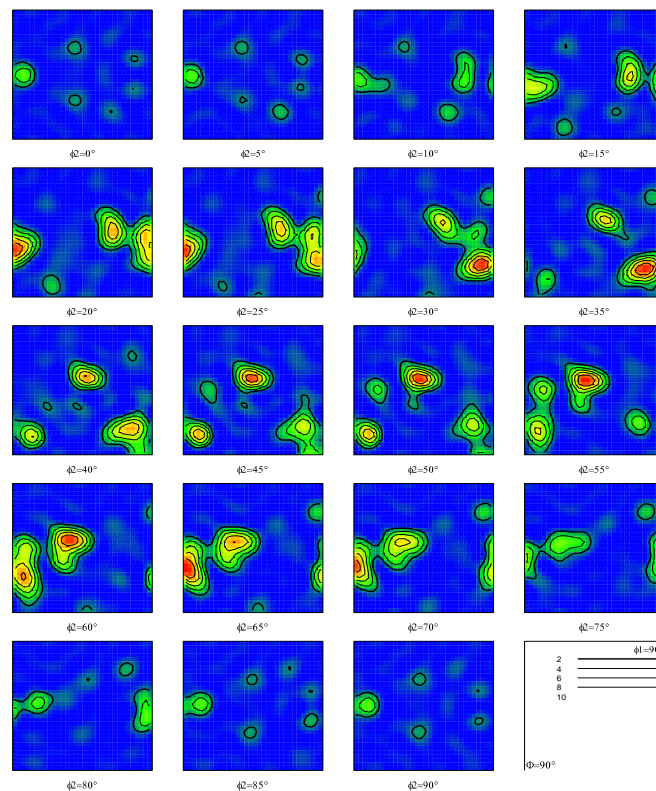
Εικόνα 4-17: Ταυτοποίηση φάσεων στο υπό εξέταση υλικό μέσω της τεχνική EBSD

Μέσω των ανάστροφων στερεογραφικών προβολών (invert pole figures IPF) (Εικόνα 4.18) παρατηρείται μια ετεροτροποία στην ανάπτυξη των προτιμητέων κρυσταλλογραφικών ιστών ανάπτυξης σε διάφορα κρυσταλλογραφικά επίπεδα. Ωστόσο η κατανομή του είναι πολύ κοντά στους εύκολους άξονες μαγνήτισης, όπως αυτό υπαγορεύει η κραμάτωση του υλικού με Si.



**Εικόνα 4-18:** Προτιμητέος κρυσταλλογραφικός ιστός ανάπτυξης μέσω IPF.

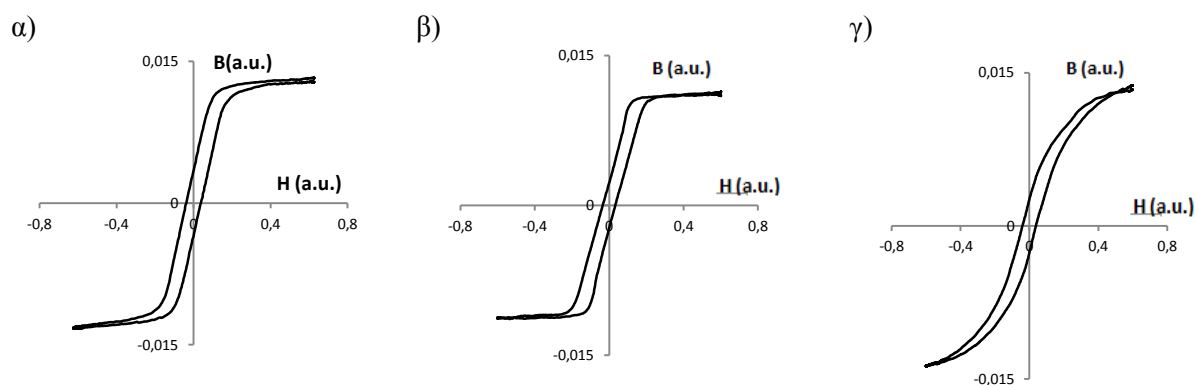
Από τα διαγράμματα του Euler (Εικόνα 4.19) παρατηρούμε ότι οι κόκκοι εμφανίζουν προτίμηση στην ανάπτυξή τους στους Cubic και Goss ιστούς.



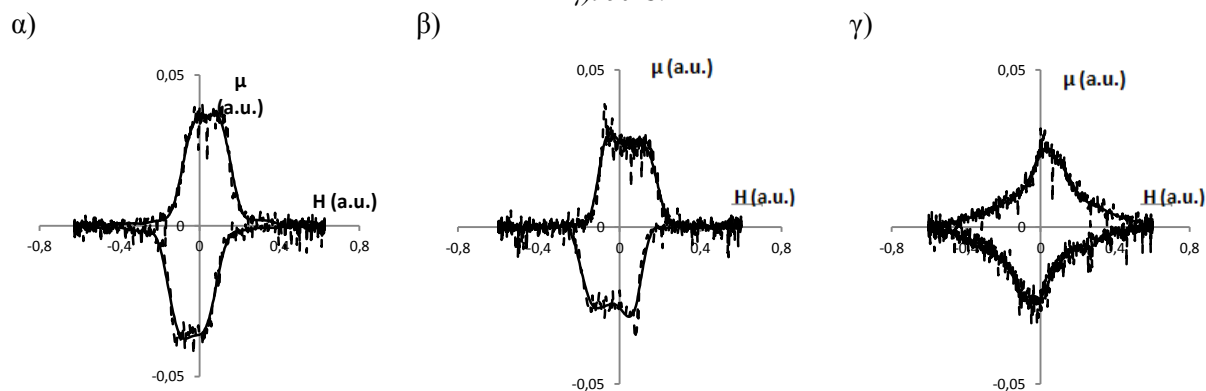
**Εικόνα 4-19:** Διαγράμματα του Euler

## 4.9 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Στην Εικόνα 4.20 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αποκρίσεις μαγνητικών βρόχων υστέρησης για τα ανοπτημένα υλικά, για 2h παραμονής σε θερμοκρασίες  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $750^{\circ}\text{C}$ , και  $950^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα για επιλεγμένη συχνότητα  $f=0.1\text{Hz}$ . Αν και οι άξονες δεν είναι βαθμονομημένοι μπορούμε να εξάγουμε ποιοτικά συμπεράσματα για τη μεταβολή των διαφόρων μαγνητικών μεγεθών, όπως η μαγνητική επαγωγή κόρου, η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και το συνεκτικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η μαγνητική επαγωγή κόρου μειώνεται καθώς οι κόκκοι μεγαλώνουν και η διεπιφανειακή ενέργεια των ορίων των κόκκων αυξάνεται, ενώ το συνεκτικό πεδίο μειώνεται. Η εμφανής μείωση της μαγνήτισης κορεσμού και της διαπερατότητας (Εικόνα 4.21) δεικνύει ότι η μέτρηση πραγματοποιείται εκτός του εύκολου άξονα της μαγνήτισης. Καθώς η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ομαλοποιείται με την αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης επιβεβαιώνεται η αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων στην επιφάνεια των δειγμάτων. Επιπλέον η εξομάλυνση των γωνιών του βρόχου υστέρησης λόγω αποστατικής ανόπτησης είναι αποτέλεσμα της ομογενοποίησης και της μεγέθυνσης των κόκκων οι οποίοι δρουν ως σημεία ακυρώσεως στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Ως εκ τούτου η αύξηση του μεγέθους τους σημαίνει ταυτόχρονα και τη μείωση της επιφάνειας των ορίων τους και την ομαλότερη μαγνήτιση του υλικού χωρίς απότομες περιστροφές των μαγνητικών διπόλων.



**Εικόνα 4-20:** Βρόχοι υστέρησης για τα ανοπτημένα υλικά 2h παραμονής σε θερμοκρασίες α)  $400^{\circ}\text{C}$ , β)  $750^{\circ}\text{C}$ , και γ)  $950^{\circ}\text{C}$ .



**Εικόνα 4-21:** Συσχέτιση μαγνητικής διαπερατότητας με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο για τα ανοπτημένα υλικά 2h παραμονής σε θερμοκρασίες α)  $400^{\circ}\text{C}$ , β)  $750^{\circ}\text{C}$ , και γ)  $950^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.9.1 Συσχέτιση μαγνητικής διαπερατότητας με σκληρότητα και μέγεθος κόκκου**

Η μορφή της μαγνητικής διαπερατότητας ομαλοποιείται καθώς η θερμοκρασία ανόπτησης αυξάνεται από τους 400°C στους 950°C. Κινείται λοιπόν από μία αρχική σχεδόν τετραγωνική μορφή σε μία πιο καμπυλώδη με λιγότερες διακυμάνσεις γεγονός που δεικνύει την ύπαρξη μικρότερου εμβαδού επιφανειών των ορίων των κόκκων, επιβεβαιώνουμε έτσι την διεύρυνση της επιφάνειας των κόκκων και κατά συνέπεια την αύξηση του μέσου μεγέθους τους.

Καθώς το δείγμα γίνεται πιο χονδρόκοκκο η μηχανική σκληρότητας μειώνεται. Το εμβαδόν που περικλείουν οι καμπύλες τη μαγνητικής διαπερατότητας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης και η μορφή παρατηρείται να γίνεται συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα, γεγονός που σημαίνει ότι οι απώλειες μειώνονται και το ανακρυσταλλωμένο δείγμα βελτιστοποιείται ως προς τις μαγνητικές ιδιότητες του.

## 5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ.Δ. Παπαδημητρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π., Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ (ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ); Αθήνα 1993;pp. 53
- [2] Γ.Δ. Παπαδημητρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π., Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα; Αθήνα 2000;pp.71
- [3] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία; Εκδόσεις Τζιόλα; Κεφ. 10;pp. 630-631
- [4] Darja Steiner Petrovic, Non-Oriented electrical steel sheets; *Materiali in tehnologije/ Materials and technology* 44 (2010)6; pp. 317-325
- [5][www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROYXA%20KRAMATA](http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROYXA%20KRAMATA) W.pdf
- [6] S.O. Kasap, Αρχες Ηλεκτρονικών υλικών και Διατάξεων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου; pp.851-912