ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Νικόλαος Διακίδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Χριστοφόρου

ΑΘΗΝΑ 2013

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας (ΜΕ), είναι η μελέτη της συμπεριφοράς θαλάμου μαγνητικής θωράκισης, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, πραγματοποιείται βελτιστοποίηση παραμέτρων που αφορούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, μοντελοποιείται μια βασική γεωμετρία του θαλάμου θωράκισης, που αποτελείται από τρεις ομοαξονικούς ανοιχτούς κυλίνδρους, δύο υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (mumetal), εσωτερικά, και ένας αγώγιμου υλικού (Al), καθώς και παραλλαγές αυτής. Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της σταθερής έναντι της μεταβαλλόμενης μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, και αφού γίνει η επιλογή της αποδοτικότερης και λειτουργικότερης γεωμετρίας του θαλάμου πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Αυτές οι παράμετροι είναι η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και το πάχος των κενών αέρα ανάμεσα στους τρεις κυλίνδρους.

Αναλυτικότερα, στο *πρώτο κεφάλαιο* γίνεται αναφορά στη θεωρία που αφορά τον μαγνητισμό και τα βασικά του μεγέθη. Επίσης, αναφέρονται βασικά μαγνητικά υλικά και οι μαγνητικές ιδιότητές τους.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* καταγράφεται η βασική θεωρία της μαγνητικής θωράκισης, δηλαδή οι μέθοδοι και μοντέλα θαλάμων μαγνητικής θωράκισης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, ενώ περιγράφονται υλικά που χρησιμοποιούνται στις υπάρχουσες διατάξεις θαλάμων θωράκισης.

Το *τρίτο κεφάλαιο* αναφέρεται γενικά στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και στην διαδικασία που ακολουθείται κατά την μοντελοποίηση σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή. Επίσης, παρατίθενται οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο που μελετάται (εξισώσεις Maxwell) καθώς και οι αριθμητικές λύσεις αυτών.

Στο *τέταρτο κεφάλαιο* γίνεται μια εισαγωγή στη βελτιστοποίηση και περιγράφονται βασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Σε αυτό το σημείο γίνεται περιγράφονται και δύο βασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης που προσφέρονται από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή η Sub - Problem Approximation και η First Order.

Το *πέμπτο κεφάλαιο* πραγματεύεται τη μοντελοποίηση του θαλάμου θωράκισης, ξεκινώντας με μια σύντομη αναφορά στη διαδικασία που ακολουθείται κατά τη μοντελοποίηση στο συγκεκριμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, σε

πρώτο στάδιο, αναλύεται η μοντελοποίηση του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο θα βρίσκεται ο θάλαμος θωράκισης, και σε δεύτερο στάδιο η καθ' αυτή διαδικασία μοντελοποίησης του βασικού θαλάμου θωράκισης.

Στο *έκτο κεφάλαιο* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης του βασικού θαλάμου θωράκισης μέσα στο μαγνητικό πεδίο και η γεωμετρικές του παραλλαγές (με ενιαία επίπεδα καπάκια, με ενιαία καμπυλωτά καπάκια και με καμπυλωτά ξεχωριστά εξωτερικά κουμπωμένα καπάκια με τρία διαφορετικά μήκη επικάλυψης του βασικού κυλινδρικού κορμού. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται διερεύνηση της ακρίβειας στη μοντελοποίηση της μαγνητικής διαπερατότητας στην θωράκιση δοκιμάζοντας το ίδιο μοντέλο θαλάμου θωράκισης με σταθερή και με μεταβαλλόμενη μαγνητική διαπερατότητα.

Το *κεφάλαιο επτά* αναφέρεται στις μεθόδους βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθούν και περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη βελτιστοποίηση στο εν λόγω λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, στο *όγδοο κεφάλαιο* πραγματοποιείται διερεύνηση με δοκιμές για να διαπιστωθεί η επίδραση του πάχος των κυλίνδρων μαγνητικού υλικού στην αποτελεσματικότητα της θωράκισης. Στη συνέχεια, με χρήση και δύο μεθόδων βελτιστοποίησης (Sub - Problem Approximation και First Order), γίνεται βελτιστοποίηση της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (mumetal), καθώς και του πάχους κενών αέρα που παρεμβάλλονται στους τρεις επάλληλους κυλίνδρους του θαλάμου θωράκισης. Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία κλείνει με την σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων καθώς και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξή της

Abstract

Magnetic shielding is used to offer protection from stray magnetic fields to devices sensitive to magnetic noise. In this Master Thesis the Finite Element method has been used in order to simulate the magnetic shielding effect of a chamber in a static magnetic field. Different geometries for the chamber have been considered and simulated, in the static magnetic field generated by a cylindrical coil. The cylindrical coil has been part of this analysis too. Several types of materials of different properties have been used such as high permeable Mumetal and conductive Aluminum, for the chamber, Copper for the coil and Air as the medium for the creation of the magnetic field.

The influence of certain parameters, like the optimum thickness of the ferromagnetic alloy, in the effectiveness of the shielding has been investigated. The effect of the width of the air gaps, and the material properties (permeability μ) of the ferromagnetic material (mumetal) has also been investigated using the design optimization module existing in ANSYS FE software. The efficiency of these configurations has been evaluated using the shielding factor as an index.

Πρόλογος

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές αποτελούν ένα πρόβλημα το οποίο επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού προκαλώντας δυσλειτουργίες και λανθασμένες μετρήσεις. Σε ένα κόσμο που εξαρτάται από τη λειτουργία τέτοιων συσκευών, η ικανοποιητική προστασία έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αποτελεί επιτακτική ανάγκη και ταυτόχρονα μία δύσκολη δοκιμασία για τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές τέτοιων διατάξεων. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, τόσο η εξέλιξη των ηλεκτρονικών συσκευών όσο και οι εξελίξεις στο χώρο των υλικών οδήγησαν στην ανάπτυξη όλο και πιο αποτελεσματικών συστημάτων ενεργητικής και παθητικής θωράκισης έναντι εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Παρόλο που η βασική ιδέα στον τομέα της παθητικής θωράκισης δεν έχει αλλάξει εδώ και 50 χρόνια, οι σχεδιαστικές βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οδήγησαν σε μικρότερες, ελαφρύτερες και αποτελεσματικότερες διατάξεις θωράκισης. Η συνεχής αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους, απαιτείται, δεδομένου ότι οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές γίνονται όλο και πιο ευαίσθητες.

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία αποτελεί μια προσπάθεια μοντελοποίησης ενός τέτοιου συστήματος μαγνητικής θωράκισης, με τη χρήση ενός εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS v.14.0). Συγκεκριμένα, μοντελοποιούνται διαφορετικές πιθανές γεωμετρίες ενός τέτοιου θαλάμου και μελετάται η επίδραση κάποιων σχεδιαστικών παραμέτρων καθώς και παραμέτρων των υλικών του στην αποτελεσματικότητά του. Οι παράμετροι που διερευνώνται με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι τα πάχη και οι αποστάσεις των στρώσεων υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, καθώς και οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού αυτού.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση αυτής της εργασίας καθώς και για τη διαρκή του στήριξη. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στη Διδάκτορα Μηχανικό Κλειώ Βόσου για την υπερπολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κύριο Χριστόφορο Προβατίδη για την φιλοξενία του στο εργαστήριό του.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ I

ABSTRACT III

ΠΡΟΛΟΓΟΣ V

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ VII

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ XI

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ XIII

1 ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ 1

1.1 Μαγνητικό πεδίο 1

1.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου 1

1.3 Μαγνητική διαπερατότητα 1

1.4 Σχετική μαγνητική διαπερατότητα 2

1.5 Μαγνητική επαγωγή 2

1.6 Μαγνήτιση ή μαγνητική ροπή 3

1.7 Μαγνητική επιδεκτικότητα υλικού 3

1.8 Μαγνητικά υλικά 4

1.9 Βρόγχος υστέρησης B-H 4

1.10 Μαγνητική κόρωση 5

2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ 7

2.1 Μέθοδοι θωράκισης 7

2.2 Παθητική μαγνητική θωράκιση στη βιβλιογραφία 8

Αξιολόγηση θαλάμου θωράκισης – Συντελεστής θωράκισης 10

2.3 Σχεδιασμός παθητικής μαγνητικής θωράκισης 11

2.4 Χρησιμοποιούμενα υλικά σε θαλάμους παθητικής θωράκισης 12

Σιδηρομαγνητικά ή φερρομαγνητικά υλικά 12

Παραμαγνητικά υλικά 15

3 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ 17

3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method - FEM) 17

3.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση ειδικού λογισμικού 19

Διατυπώσεις πεπερασμένων στοιχείων και γένεση πλέγματος 22

Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων 23

3.3 Ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις Maxwell 24

Είδη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων 25

3.4 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Maxwell 27

4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ 29

4.1 Κατηγορίες μεθόδων βελτιστοποίησης 30

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS . 32

5.1 Γενικά για τη διαδικασία μοντελοποίησης 32

Βήμα 1^{ο} – Κατασκευή γεωμετρίας 33

Βήμα 2^{ο} – Επιλογή τύπου πεπερασμένων στοιχείων και γένεση πλέγματος 33

Βήμα 3^{ο} – Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και επιβολή οριακών συνθηκών 33

Βήμα 4^{ο} – Επιλογή του τρόπου επίλυσης και επίλυση 34

Βήμα 5^{ο} – Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους 34

5.2 Μοντελοποίηση μαγνητικού πεδίου γύρω από πηνίο 35

Αποτελέσματα 36

6 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ 39

6.1 Βασικός θάλαμος θωράκισης 39

6.2 Γεωμετρικές παραλλαγές βασικού θαλάμου θωράκισης 43

6.3 Διερεύνηση μεταβαλλόμενης μαγνητικής διαπερατότητας στο mumetal 47

7 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS 52

7.1 Διαδικασία βελτιστοποίησης με το λογισμικό ANSYS 52

7.2 Βελτιστοποίηση Σχεδίασης 53

Sub-problem Approximation (προσέγγισης υπό-προβλήματος) 53

First order (πρώτης τάξης) 53

Σύγκριση των δύο μεθόδων 54

8 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΘΑΛΑΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ 55

8.1 Διερεύνηση πάχους υλικού mumetal 55

8.2 Βελτιστοποίησης της τιμής μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal 57

8.3 Βελτιστοποίηση πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα 59

9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 63

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 65

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΚΩΔΙΚΑΣ APDL 66

Κώδικας κατασκευής και επίλυσης μοντέλου βασικού θαλάμου θωράκισης 66

Κώδικας βελτιστοποίησης με τη μέθοδο subproblem approximation 77

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1 (α) Βρόγχος υστέρησης Β-Η (β) Καμπύλες μαγνήτισης 9 διαφορετικών υλικών, που δείχνουν την κόρωση (1. φύλλο χάλυβα, 2. σιλικονούχος χάλυβας, 3. χυτοχάλυβας, 4.χάλυβας βολφραμίου, 5.μαγνητικός χάλυβας, 6. χυτοσίδηρος, 7. νικέλιο, 8. κοβάλτιο, 9. μαγνητίτης) 6

Σχήμα 2-1: Τυπική διάταξη ενεργητικής θωράκισης 7

Σχήμα 2-2: (α) Διάταξης παθητικής θωράκισης (β) Ενδεικτική εικόνα μαγνητικών γραμμών δια μέσου μαγνητικού υλικού 8

Σχήμα 2-3: Θάλαμος παθητικής θωράκισης (α) σχήματος σφαίρας (β) ¼ κυλινδρικού σχήματος και διπλής στρώσης 9

Σχήμα 2-4: Συντελεστής θωράκισης για διάφορα υλικά και τιμή έντασης μαγνητικού πεδίου 11

Σχήμα 5-1: Περιβάλλον λογισμικού Ansys 32

Σχήμα 5-2: Γεωμετρία πηνίου (α) αξονοσυμμετρική αναπαράσταση, άξονας συμμετρίας y και (β) ψευδο - τριδιάστατη αναπαράσταση με τομή στα 3/4 35

Σχήμα 5-3: (α) Κατανομή πεδίου παραγόμενο από το πηνίο (β) Γραμμές ροής 36

Σχήμα 5-4: Μεταβολή πυκνότητας ρεύματος – μέγιστης τιμής μαγνητικού πεδίου (α) ημιλογαριθμικός και (β) λογαριθμικό διάγραμμα 37

Σχήμα 5-5: Μαγνητική επαγωγή στην περιοχή ενδιαφέροντος 38

Σχήμα 6-1: (α) 2-D αναπαράσταση μοντέλου (β) λεπτομέρεια με ενδιάμεσες στρώσεις υλικών 40

Σχήμα 6-2: Τριδιάστατη αναπαράσταση (3/4) του θαλάμου θωράκισης βασικής γεωμετρίας 40

Σχήμα 6-3: (α) Τετραπλευρικό και (β) τριγωνικό PLANE53 41

Σχήμα 6-4: Στοιχείο INFIN110 42

Σχήμα 6-5: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής (α) σε όλο το πεδίο (β) στην περιοχή ενδιαφέροντος 43

Σχήμα 6-6: Διδιάστατα αξονοσυμμετρικά μοντέλα θαλάμων θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης 44

Σχήμα 6-7: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο συνολικό μοντέλο για θάλαμο θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά

καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης 45

Σχήμα 6-8: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη περιοχή ενδιαφέροντος στο εσωτερικό θαλάμου θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης 46

Σχήμα 6-9: Διάγραμμα B-H 47

Σχήμα 6-10: Μαγνητικές γραμμές ροής και κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για σταθερή και μεταβαλλόμενη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ για JS = 10000 A/m^2 49

Σχήμα 6-11: Μαγνητικές γραμμές ροής και κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για σταθερή και μεταβαλλόμενη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ για JS = 20 A/m^2 ... 51

Σχήμα 8-1: Καμπύλες μεταβολής συντελεστή μείωσης ως προς το πάχος των στρωσεων του mumetal 57

Σχήμα 8-2 Καμπύλη μεταβολής τιμής έντασης πεδίου ως προς την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal 59

Σχήμα 8-3: Μεταβολή μέγιστη τιμής μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του πάχους των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα 61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Εξισώσεις Maxwell 24

Πίνακας 5-1: Πυκνότητα ρεύματος πηνίου και μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής αυτού 37

Πίνακας 6-1: Μέγιστες τιμές πεδίου στο συνολικό μοντέλο (Bout), στην περιοχή ενδιαφέροντος (Bin) και ο συντελεστής θωράκισης (Sf) (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης.47

Πίνακας 8-1: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για διαφορετικές τιμές του l_3.....56

Πίνακας 8-2: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για διαφορετικές τιμές του l_3.....56

Πίνακας 8-3: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για ταυτόχρονη μεταβολή των παχών l_5 και l_3.....56

Πίνακας 8-5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τιμής μαγνητικής διαπερατότητας mumetall με τη μέθοδο Sub – Problem Approximation.....58

Πίνακας 8-7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τιμής μαγνητικής διαπερατότητας mumetall με τη μέθοδο First Order 59

Πίνακας 8-8: Βέλτιστες τιμές πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα.....61

Πίνακας 8-9: Διαδικασία βελτιστοποίησης ταυτόχρονης μεταβολής πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα με τη μέθοδο sub – Problem Approximation 61

Πίνακας 8-10: Διαδικασία βελτιστοποίησης ταυτόχρονης μεταβολής πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα με τη μέθοδο First Order.....62

1 Μαγνητισμός και βασικά μεγέθη

Με τον όρο *μαγνητισμός* χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο κάποια υλικά λεγόμενα *μαγνήτες*, ασκούν ελκτικές ή απωστικές δυνάμεις σε άλλα υλικά. Οι δυνάμεις αυτές, καθώς και το σύνολο των φαινομένων που παράγονται από τον μαγνητισμό οφείλονται στην κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, αποδίδονται στη συσσώρευση της λεγόμενης μαγνητικής μάζας στους πόλους τους. Με τον όρο *μαγνητική μάζα*, χαρακτηρίζεται η ποσότητα μαγνητισμού στη συσσώρευση του οποίου, στους πόλους των μαγνητών, αποδίδονται οι μαγνητικές δυνάμεις αυτών. Η μαγνητική μάζα του βορείου πόλου του μαγνήτη θεωρείται *βόρεια* (Μβ), και αντίστοιχα του νότιου πόλου, *νότια* (Μν). Αν και όλα τα υλικά επηρεάζονται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό από την παρουσία μαγνητικού πεδίου [1], κάποια γνωστά υλικά που παρουσιάζουν εύκολα ανιχνεύσιμες μαγνητικές ιδιότητες είναι το νικέλιο, ο σίδηρος, μερικά είδη ατσαλιού και το ορυκτό μαγνητίτης.

1.1 Μαγνητικό πεδίο

Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται, γενικά, ο χώρος μέσα στον οποίο παρατηρούνται μαγνητικές δυνάμεις. Χαρακτηρίζεται ως *ασθενές* ή *ισχυρό* και ως *ομοιόμορφο* ή *ανομοιόμορφο* και αυτό αναπαρίσταται από τις μαγνητικές γραμμές οι οποίες μπορεί να είναι *αραιές* ή *πυκνές* και *παράλληλες* ή *όχι*. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες και κινούμενα ηλεκτρικά φορτία και σχηματίζεται γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς.

1.2 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Ένταση μαγνητικού πεδίου, Η, σε ένα σημείο αυτού, ονομάζεται η μαγνητική δύναμη που επενεργεί επί της μονάδας της βόρειας μαγνητικής μάζας όταν αυτή βρίσκεται σε αυτό το σημείο. Αποτελεί το χαρακτηριστικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου και έχει ως μονάδα το $\frac{A}{m}$ (Ampere / Meter) στο σύστημα SI και το Oe (Oersted) στο σύστημα cgs. Η σχέση μετατροπής μεταξύ των μονάδων είναι: $1\frac{A}{m} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} Oersted$

1.3 Μαγνητική διαπερατότητα

Η *μαγνητική διαπερατότητα*, μ, αποτελεί το μέτρο της ικανότητας των υλικών, να επιτρέπουν την κυκλοφορία μαγνητικού πεδίου διαμέσου τους. Με άλλα λόγια

αντιπροσωπεύει το βαθμό μαγνήτισης που αποκτά ένα υλικό ως απόκριση σε ένα επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Μονάδες της μαγνητικής διαπερατότητας είναι το $\frac{N}{A^2}$ ή $T \cdot \frac{m}{A}$ στο S.I.

Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, γνωστή και ως *σταθερά μαγνητικής διαπερατότητας*, είναι το μέτρο της αντίστασης που εντοπίζεται σε κενό αέρος όταν εμφανίζεται μαγνητικό πεδίο εντός αυτού. Έχει ως μέτρο $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} T \frac{m}{A} \approx 1.2566 \times 10^{-6} \frac{N}{A^2}$.

Γενικά, η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι ένα σταθερό μέγεθος, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση στο μέσο, τη συχνότητα του επιβαλλόμενου πεδίου, την υγρασία και τη θερμοκρασία. Έτσι, στα μαγνητικά υλικά μετράται είτε η *αρχική μαγνητική διαπερατότητα,* μ_i, είτε η *μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα,* $\mu_{\max}$. Σε ένα μη γραμμικό μέσο, η διαπερατότητα εξαρτάται και από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Ως συνάρτηση της συχνότητας η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να πάρει πραγματικές ή μη τιμές.

1.4 Σχετική μαγνητική διαπερατότητα

Η *σχετική μαγνητική διαπερατότητα,* μ_r, είναι ο λόγος της μαγνητικής διαπερατότητας ενός υλικού μέσου προς την διαπερατότητα του κενού μ_0.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι αδιάστατο μέγεθος, αποτελεί μέτρο του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα υλικό και σε πολλά μαγνητικά υλικά δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται καθώς μαγνητίζεται το υλικό.

1.5 Μαγνητική επαγωγή

Με τον όρο *μαγνητική επαγωγή* ή *μαγνήτιση εξ επαγωγής*, B, χαρακτηρίζεται το φαινόμενο της μαγνήτισης, (δηλαδή της μετάδοσης των μαγνητικών ιδιοτήτων), που προέρχεται από επαγωγή, δηλαδή είτε από την είσοδο ενός μαγνητικού σώματος μέσα σε μαγνητικό πεδίο, είτε από κάποια απόσταση, είτε ακόμη και εκ της δημιουργίας μαγνητικού πεδίου πλησίον ή πέριξ ενός μαγνητικού σώματος. Αναπαριστά την ένταση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού λόγω διευθέτησης των μαγνητικών ροπών των ατόμων και δίδεται από τη σχέση:

$$B = \mu \cdot H$$

όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και H η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η μονάδα της μαγνητικής επαγωγής είναι το Tesla (T) ή $\frac{Wb}{m^2}$ στο σύστημα SI και το Gauss (G) στο σύστημα cgs. Οι σχέσεις μετατροπής μεταξύ των μονάδων αυτών είναι: $1T = 1\frac{Wb}{m^2} = 10^4 G$.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του κενού ισχύει, $B_0 = \mu_0 \cdot H$, όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

1.6 Μαγνήτιση ή μαγνητική ροπή

Η *μαγνήτιση* ή *μαγνητική ροπή*, M, ενός υλικού αναπαριστά την επαγόμενη μαγνητική ροπή στο υλικό ανά μονάδα όγκου. Συγκεκριμένα, εκφράζει την πυκνότητα των προσανατολισμένων στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μαγνητικών διπολικών ροπών και σχετίζεται με την ηλεκτρονική δομή του στερεού. Με δεδομένη τη μαγνήτιση, η μαγνητική επαγωγή, B, δίνεται από την σχέση:

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M = \mu_0 \cdot (H + M)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για ορισμένα ισχυρά μαγνητικά υλικά, επειδή η μαγνήτιση είναι πολύ μεγαλύτερη της έντασης του εφαρμοζόμενου πεδίου, χρησιμοποιείται, συχνά, η σχέση:

$$B \approx \mu_0 \cdot M$$

1.7 Μαγνητική επιδεκτικότητα υλικού

Η *μαγνητική επιδεκτικότητα*, χ, ενός υλικού εκφράζει την ενίσχυση της μαγνητική επαγωγής που οφείλεται στην παρουσία του υλικού μέσα στο εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Επίσης η μαγνήτιση συνδέεται με την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου μέσω της σχέσης:

$$M = \chi \cdot H$$

όπου χ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού

Με δεδομένη τη σχέση μαγνήτισης και επιδεκτικότητας προκύπτει η σχέση μεταξύ έντασης μαγνητικού πεδίου και επιδεκτικότητας:

$$\left.\begin{array}{r} M = \chi \cdot H \\ B = \mu_0 (H + M) \end{array}\right\} \Rightarrow B = \mu_0 (1 + \chi) \cdot \mathrm{H}$$

Άρα, δεδομένων των παραπάνω σχέσεων η μαγνητική διαπερατότητα συναρτήσει της μαγνητικής επιδεκτικότητας δίνεται από την σχέση:

$$\mu = \mu_0 \cdot (1+\chi)$$

Αντίστοιχα, για τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα ισχύει:

$$\mu_r = 1+\chi$$

1.8 Μαγνητικά υλικά

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν κάποιο είδος μαγνητικής δραστηριότητας. Σε πολλά υλικά η μαγνητική δραστηριότητα είναι τόσο ασθενής ώστε τα υλικά αυτά να θεωρούνται μη μαγνητικά. Το μόνο πραγματικά μη μαγνητικό μέσο είναι το κενό ($\mu_r = 1$).

Η κατάταξη των υλικών σε κατηγορίες με βάση τη μαγνητική τους συμπεριφορά καθώς και τα αντίστοιχα είδη μαγνητισμού καθορίζονται από:

α) την ύπαρξη ή όχι μόνιμων ατομικών μαγνητικών ροπών, και

β) τη διάταξη των ατομικών μαγνητικών ροπών.

Η διάταξη των μαγνητικών ροπών εξαρτάται από το πόσο ισχυρές είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Αν η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο γειτονικών ροπών είναι ισχυρή, έχει ως αποτέλεσμα οι γειτονικές ροπές να διατάσσονται παράλληλα ή αντιπαράλληλα.

Ανάλογα με την μαγνητική τους συμπεριφορά τα υλικά διακρίνονται σε *διαμαγνητικά*, *παραμαγνητικά*, *σιδηρομαγνητικά (φερρομαγνητικά)*, *αντι-σιδηρομαγνητικά*, *σιδηριμαγνητικά (φερριμαγνητικά)* και *υπερπαραμαγνητικά*.

1.9 Βρόγχος υστέρησης B-H

Η επίδραση της έντασης, H, ενός μαγνητικού πεδίου στη μαγνητική επαγωγή, B, ενός μη μαγνητισμένου φερρομαγνητικού υλικού χαρακτηρίζεται από την καθυστέρηση της μαγνητικής επαγωγής ως προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου (φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης). Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος (**Σχήμα 1-1 (α)**), από τον κλειστό δρόμο (βρόχο) 2-3-4-5-6-7-2, ο οποίος ονομάζεται *κύριος βρόχος υστέρησης*. Ο κύριος βρόχος υστέρησης είναι ο μέγιστος βρόχος που είναι δυνατόν να προκύψει, όσο μεγάλες κι αν είναι οι ακραίες τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Συγκεκριμένα, εάν ένα υλικό μαγνητιστεί μέχρι τον κόρο (σημείο 2) και στη συνέχεια το πεδίο που προκάλεσε τη μαγνήτιση μηδενιστεί, η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται αλλά διατηρεί μία θετική τιμή (σημείο 3). Η τιμή αυτή ονομάζεται

παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r και η αντίστοιχη τιμή της μαγνήτισης, παραμένουσα μαγνήτιση M_r. Στην ουσία παρόλο τον μηδενισμό της μαγνητικής διέγερσης, παραμένει στο υλικό ένας αριθμός μαγνητικών περιοχών με προσανατολισμό κατά τη διεύθυνση του πεδίου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *υστέρηση* και η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης εξαρτάται από το υλικό και την κατεργασία του. Αντιστρέφοντας τη φορά του πεδίου (καμπύλη 3-4) στο σημείο 4 μηδενίζεται η μαγνήτιση. Η τιμή της μαγνητικής διέγερσης H_c για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση ονομάζεται *σημείο απομαγνήτισης* (coercivity point). Το σημείο απομαγνήτισης εξαρτάται από την κατάσταση του υλικού και μπορεί να επηρεαστεί από εξωγενείς παράγοντες όπως π.χ. η θερμική επεξεργασία. Αυξάνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου Η, κατά την ίδια φορά (καμπύλη 4-5) το υλικό φτάνει σε κόρο με τις μαγνητικές ροπές προσανατολισμένες αντίστροφα – ίδια φορά με το πεδίο. Μειώνοντας στη συνέχεια το πεδίο, (καμπύλη 5-6), μέχρι να μηδενιστεί, έχουμε και πάλι παραμένουσα μαγνητική επαγωγή στο υλικό με αντίθετη κατεύθυνση (σημείο 6). Εφαρμόζοντας ξανά θετικό πεδίο, η καμπύλη επιστρέφει στο σημείο 2 οπότε και κλείνει η καμπύλη του βρόγχου υστέρησης.

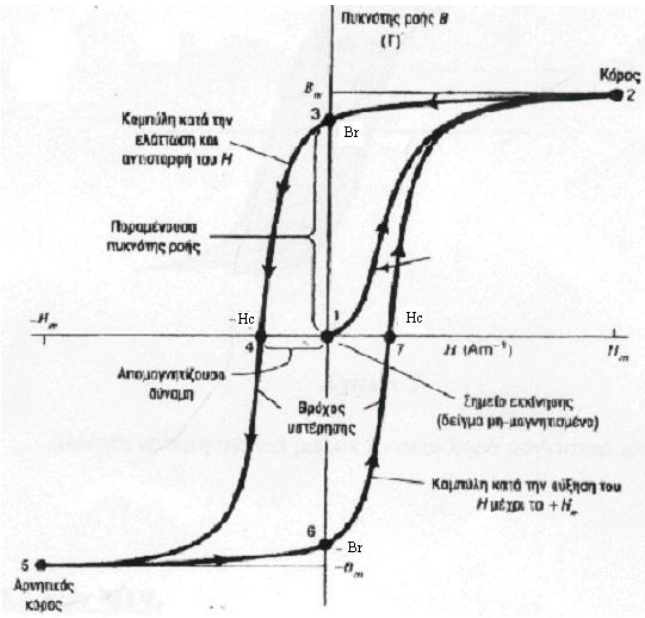
Το εμβαδόν που περικλείει ο βρόγχος υστέρησης Β-Η αποτελεί μέτρο των απωλειών ενέργειας που λαμβάνουν χώρα σε ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης - απομαγνήτισης του υλικού. Το γινόμενο (Β x Η) έχει μονάδες ενέργειας ανά μονάδα όγκου ($\frac{Joule}{m^3}$) [2,3].

1.10 Μαγνητική κόρωση

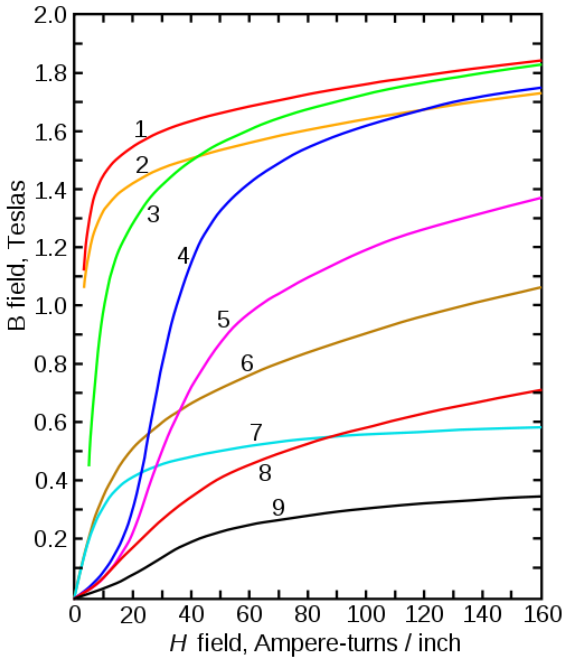
Μαγνητική κόρωση είναι η κατάσταση στην οποία φτάνει ένα υλικό όταν ένα επιβαλλόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης Η δε μπορεί να αυξήσει περεταίρω την τιμή της μαγνητικής επαγωγής Β και μάλιστα σταθεροποιείται ασυμπτωτικά σε μία συγκεκριμένη τιμή αυτής. Παρατηρείται σε κάποια μαγνητικά υλικά, και συγκεκριμένα είναι χαρακτηριστικό των φερρομαγνητικών υλικών, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και των κραμάτων τους. Το σημείο μαγνητικού κορεσμού είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει η μαγνητική επαγωγή Β και αποτελεί χαρακτηριστικό του κάθε υλικού.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μαγνητική διαπερατότητα και το σημείο μαγνητικού κορεσμού των υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογες ποσότητες. Συγκεκριμένα, όσο η τιμή της διαπερατότητας αυξάνεται, το σημείο κορεσμού μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι υλικά με πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα όπως το Amumetal έχουν πολύ χαμηλές τιμές κόρωσης. Λόγω της φτωχής θωράκισης που προσφέρει ένα κορεσμένο

υλικό, είναι σημαντικό να επιλέγονται υλικά με καλή αναλογία κόρωσης και προσφερόμενης θωράκισης. Οι χαρακτηριστικές τιμές κόρωσης και μαγνητικής διαπερατότητας φαίνονται στην **Σχήμα 1-1** (β) για 9 διαφορετικά μαγνητικά υλικά [4,5].



(α)



(β)

Σχήμα 1-1 (α) Βρόγχος υστέρησης B-H (β) Καμπύλες μαγνήτισης 9 διαφορετικών υλικών, που δείχνουν την κόρωση (1. φύλλο χάλυβα, 2. σιλικονούχος χάλυβας, 3. χυτοχάλυβας, 4.χάλυβας βολφραμίου, 5.μαγνητικός χάλυβας, 6. χυτοσίδηρος, 7. νικέλιο, 8. κοβάλτιο, 9. μαγνητίτης)

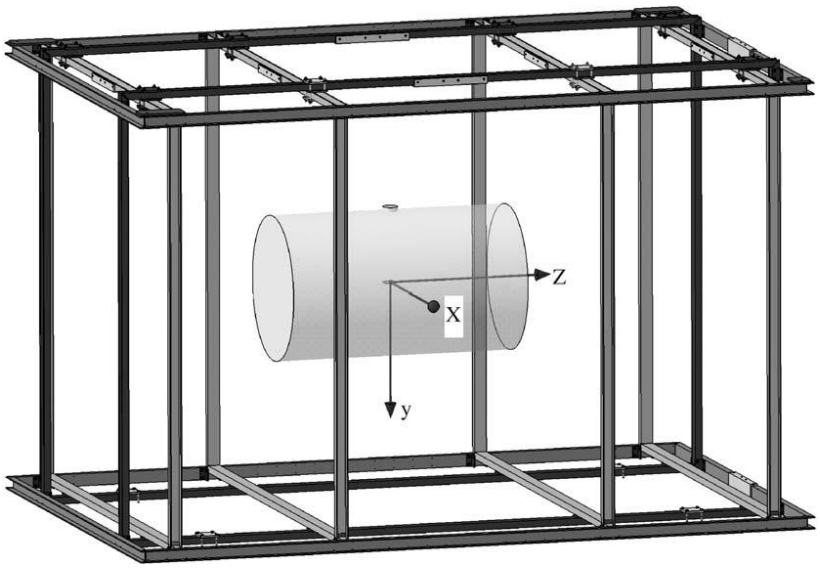
2 Μαγνητική θωράκιση

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές επηρεάζουν τη λειτουργία ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, προκαλώντας δυσλειτουργίες και λανθασμένες ενδείξεις. Γι' αυτό η αντιμετώπισή τους αποτελεί πρόκληση για τους σχεδιαστές του σχετικού εξοπλισμού. Η συνεχής παραγωγή και χρήση ηλεκτρονικών συσκευών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη όλο και πιο αποτελεσματικών συστημάτων θωράκισης. Στη ουσία όσο πιο ευαίσθητος είναι ο εξοπλισμός τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάγκη για θωράκιση έναντι εξωτερικών πεδίων [7].

2.1 Μέθοδοι θωράκισης

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί μείωση της τιμής του μαγνητικού πεδίου σε μια περιοχή εντός αυτού, ο *ενεργητικός* και ο *παθητικός*.

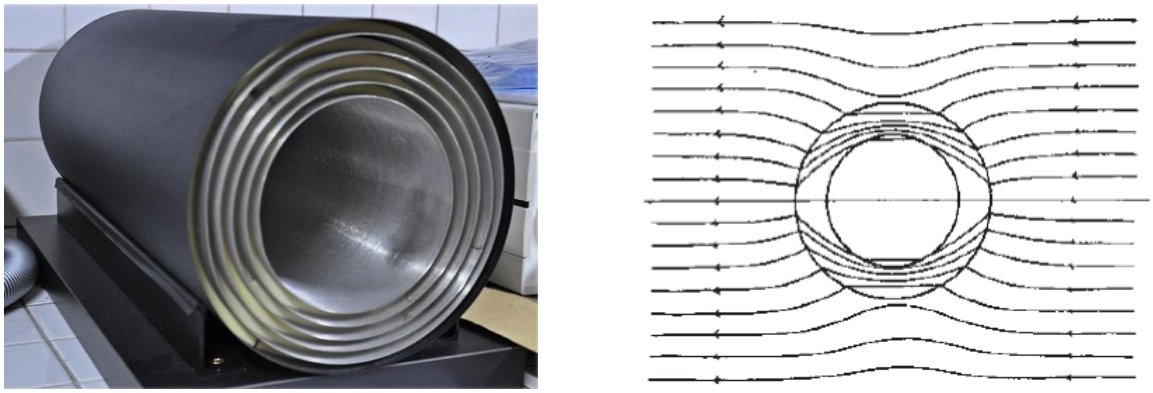
Ο ενεργητικός τρόπος μαγνητικής θωράκισης χρησιμοποιεί ηλεκτρικές συσκευές, όπως αισθητήρες fluxgate, οι οποίες βρίσκονται εξωτερικά (και πολύ κοντά στην υπό προστασία περιοχή) και μετρούν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Οι συσκευές αυτές δίνουν ως έξοδο σήμα το οποίο τροφοδοτεί με ρεύμα ένα περιβάλλον σύστημα πηνίων ώστε να παραχθεί ένα νέο μαγνητικό πεδίο (ίδιου μεγέθους και με διαφορά φάσης 180°). Όταν τα δύο πεδία διασταυρωθούν στην υπό εξέταση περιοχή, αλληλοαναιρούνται. Στο **Σχήμα 2-1** παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τέτοιας θωράκισης.



Σχήμα 2-1: Τυπική διάταξη ενεργητικής θωράκισης

Στον παθητικό τρόπο μαγνητικής θωράκισης, υλικά με δεδομένες μαγνητικές ιδιότητες (υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, υψηλή αγωγιμότητα κ.ά.) αλληλεπιδρούν με

το ανεπιθύμητο μαγνητικό πεδίο και το απομακρύνουν από την προστατευόμενη περιοχή. Ο παθητικός τρόπος θωράκισης διαχωρίζεται περαιτέρω ανάλογα με τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται. Υλικά με υψηλές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, μ, έχουν την ικανότητα να κατευθύνουν τη ροή του ανεπιθύμητου μαγνητικού πεδίου μέσα από αυτά και όχι μέσα στην προστατευόμενη περιοχή, προσφέροντάς της πορεία εύκολης διέλευσης. Τα υλικά αυτά είτε περιβάλλουν είτε διαχωρίζουν την προστατευόμενη περιοχή από τις μαγνητικές πηγές και η τιμή της σχετικής διαπερατότητας τους, μ_r, κυμαίνεται μεταξύ 5000-1000000. Το είδος αυτό της θωράκισης χαρακτηρίζεται ως θωράκιση *"παγίδευσης ροής"* (flux entrapment shields) και χρησιμοποιείται ευρύτατα για θωρακίσεις από στατικά (D.C.) μαγνητικά πεδία (**Σχήμα 2-2**). Υλικά αγώγιμα με χαμηλή διαπερατότητα, όπως ο σίδηρος και ο χάλυβας, χρησιμοποιούνται για τις λεγόμενες θωρακίσεις *"απώλειας ενέργειας"* (lossy shields). Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στο επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) [8]. Το επιδερμικό φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργού διατομής που άγει το ρεύμα και αύξηση της A.C. αντίστασης. Όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα του πεδίου τόσο μειώνεται το επιδερμικό φαινόμενο.



(α) (β)

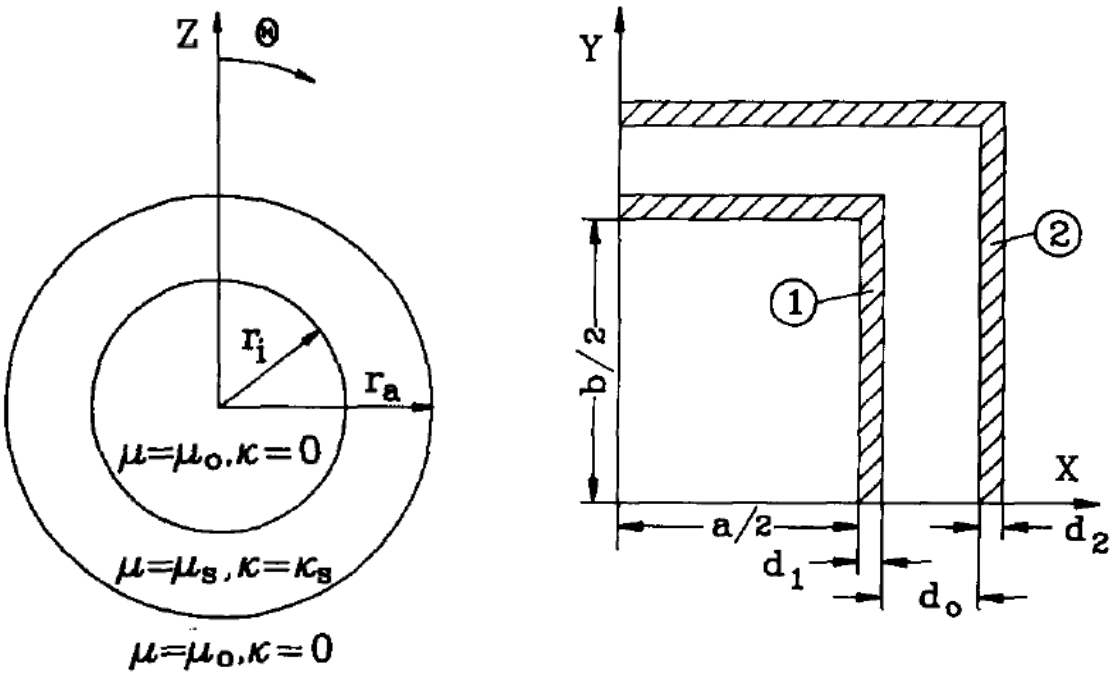
Σχήμα 2-2: (α) Διάταξης παθητικής θωράκισης (β) Ενδεικτική εικόνα μαγνητικών γραμμών δια μέσου μαγνητικού υλικού

2.2 Παθητική μαγνητική θωράκιση στη βιβλιογραφία

Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα με σκοπό τη μελέτη της μαγνητικής θωράκισης θεωρούν απλοποιημένα σχήματα του θαλάμου θωράκισης όπως αυτό της σφαίρας (**Σχήμα 2-3 (α)**) ή κυλίνδρου (**Σχήμα 2-3 (β)**). Για την επίλυση αυτών των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι

όπως η μέθοδος των πεπερασμένων και των συνοριακών στοιχείων. Παραδείγματα μερικών από αυτά παρατίθενται στην συνέχεια.

Σε δύο μοντέλα, ένα σχήματος σφαίρας και ένα σχήματος κυλίνδρου (με ελάχιστες παραλλαγές) έγινε αναλυτικός υπολογισμός του πεδίου γύρω και μέσα από την παθητική θωράκιση με τη βοήθεια των πινάκων θωράκισης και με χρήση των σταθερών Ansatz. Αυτό το θεωρητικό μοντέλο είναι κατάλληλο για την προσομοίωση θωράκισης πολλαπλών ομοαξονικών στρώσεων [9, 10].



(α) (β)

Σχήμα 2-3: Θάλαμος παθητικής θωράκισης (α) σχήματος σφαίρας (β) ¼ κυλινδρικού σχήματος και διπλής στρώσης

Επίσης, έχει μοντελοποιηθεί μαγνητική θωράκιση δύο στρώσεων, τετραγωνικής διατομής και απείρου μήκους, μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο B = 40 mT κατά την κατεύθυνση y. Για την εξωτερική στρώση επιλέχθηκε υλικό υψηλής κόρωσης (παρόμοιο με VACOFLUX) και στην εσωτερική στρώση υλικό με χαμηλή κόρωση και πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα (παρόμοιο με mumetal). Τέθηκαν ως περιορισμοί ένα ελάχιστο συνολικό πάχος στρώσεων των δύο υλικών και ενδιάμεσου κενού αέρος, ελάχιστος επιτρεπόμενος παράγοντας θωράκισης καθώς και μέγιστες τιμές μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό των δύο στρώσεων. Με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και βελτιστοποίησης έγινε η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού πάχους στρώσης και απόστασης μεταξύ των στρώσεων, ούτως ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή θωράκιση.

Με παρόμοιο τρόπο αναπτύχθηκε και ένα κυβικό μοντέλο με δύο παραλλαγές, ένα με μονή και ένα με διπλή (υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας) στρώση. Και πάλι με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική η θωράκιση με τις δύο στρώσεις [9].

Τέλος η μέθοδος των πινάκων θωράκισης χρησιμοποιήθηκε στη βιβλιογραφία για τον θεωρητικό υπολογισμό θαλάμων παθητικής θωράκισης που συνδυάζουν στρώσεις υλικών για την αντιμετώπιση συνεχών (D.C.) πεδίων καθώς και στρώση αγώγιμων υλικών για την αντιμετώπιση εναλλασσόμενων (A.C.) πεδίων.

Αξιολόγηση θαλάμου θωράκισης – Συντελεστής θωράκισης

Άξιες αναφοράς είναι κάποιες παραλλαγές των προαναφερθέντων μοντέλων στις οποίες υπολογίζεται η αποτελεσματικότητα θωράκισης μέσω του ορισμού του συντελεστή θωράκισης για διάφορες κατευθύνσεις πεδίων, δηλαδή κάθετα [11,12,13] και παράλληλα [12,13] στον επιμήκη άξονα του θαλάμου θωράκισης.

Ο συντελεστής θωράκισης είναι ο λόγος του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου πριν την θωράκιση, προς το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο μετά την θωράκιση, για συγκεκριμένο πάχος υλικού και δεδομένη συχνότητα μαγνητικού πεδίου. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα μέτρο για την αποτελεσματικότητα της θωράκισης.

Η σχέση που δίνει τον συντελεστή μαγνητικής θωράκισης ακολουθεί παρακάτω:

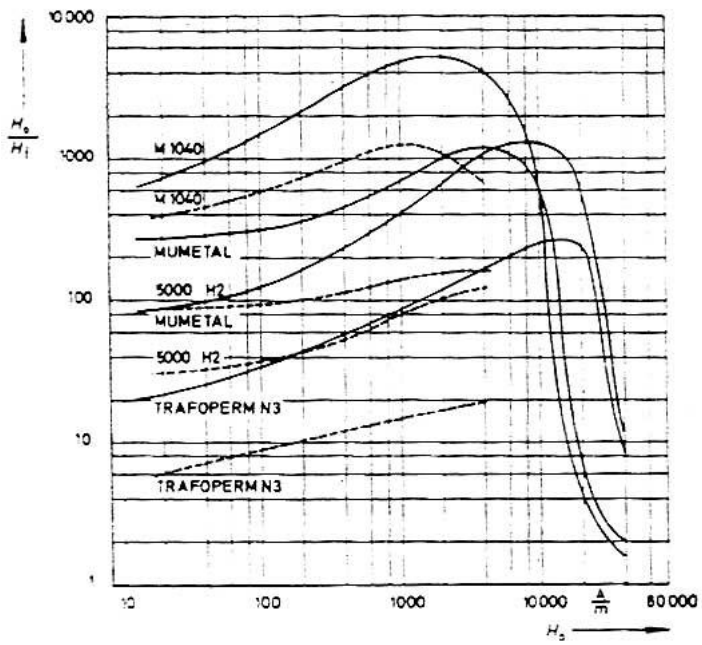
$$f_s = \frac{H_o}{H_i}$$

Για παράδειγμα αν το πεδίο πριν τη θωράκιση είναι 450 mG και το μετρούμενο πεδίο εντός της θωράκισης, 10 mG ο συντελεστής θωράκισης είναι 450/10=45.

Ο συντελεστής αυτός εκφράζεται, πολλές φορές, χρησιμοποιώντας ως μονάδα τα decibels (dB) και υπολογίζεται με χρήσηη της παρακάτω σχέσης [8]:

$$f_s = 20\log\frac{H_o}{H_i}(dB)$$

Στο **Σχήμα 2-4** φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή θωράκισης για διάφορες τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και για διαφορετικά υλικά. Παρατηρείται ότι η τιμή του αρχικά, αυξάνει εωσότου αποκτήσει μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Χαρακτηριστικό είναι ότι το μέγιστο των καμπύλων των διαφόρων υλικών δεν εμφανίζεται στην ίδια ένταση H_o.



Σχήμα 2-4: Συντελεστής θωράκισης για διάφορα υλικά και τιμή έντασης μαγνητικού πεδίου

2.3 Σχεδιασμός παθητικής μαγνητικής θωράκισης

Για να σχεδιαστεί ένα σύστημα μαγνητικής παθητικής θωράκισης πρέπει να είναι γνωστό το πεδίο το οποίο πρέπει να αποκοπεί. Ο σχεδιαστής καλείται να επιλέξει την κατάλληλη γεωμετρία και το κατάλληλο υλικό του θαλάμου θωράκισης.

Το μέγεθος του πεδίου που εκπέμπεται στον περιβάλλοντα χώρο από ένα μαγνήτη εξαρτάται από το σχήμα του και τη διάταξη των κενών αέρος του. Ο σχεδιαστής πρέπει να έχει ακριβή εικόνα της κατανομής του πεδίου ώστε να πετύχει αποτελεσματική θωράκιση.

Κατά το σχεδιασμό της γεωμετρίας του θαλάμου θωράκισης λαμβάνονται υπόψη γενικοί κανόνες που αφορούν στο σχήμα και στο μέγεθός του. Βασική επιδίωξη του σχεδιαστή είναι το σχήμα να διατηρείται όσο πιο απλό γίνεται καθώς η μαγνητική ροή "προτιμά" την ευνοϊκότερη διαδρομή, δηλαδή αυτή με τη μικρότερη αντίσταση. Τα μοντέλα τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, δεν είναι πάντα κατασκευαστικά εφικτά, οπότε η γεωμετρία του θαλάμου θωράκισης πρέπει να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης τροποποιώντας τους υπολογισμούς που προβλέπει το θεωρητικό μοντέλο ανάλογα με το πόσο διαφέρει το πραγματικό σχήμα του θαλάμου από αυτό της σφαίρας ή του κυλίνδρου. Τα σχήματα τα οποία προτιμώνται, στην πράξη, περιλαμβάνουν καμπυλωμένες γωνίες καθώς η μαγνητική ροή δυσχεραίνεται όταν διέρχεται από αντικείμενα που περιέχουν ορθές γωνίες [6].

Το μέγεθος του θαλάμου θωράκισης επιλέγεται έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Με άλλα λόγια, το υλικό που χρησιμοποιείται για τη θωράκιση περιβάλλει και εσωκλείει την υπό προστασία περιοχή όσο πιο κοντά και πιο στενά γίνεται. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα της θωράκισης και ελαττώνεται το κόστος της αφού το υλικό που χρησιμοποιείται είναι λιγότερο.

Ανοίγματα, οπές και επαφές, που μπορεί να υπάρξουν εάν η θωράκιση αποτελείται από δύο υλικά, δεν ενδείκνυνται κατά το σχεδιασμό της θωράκισης. Επειδή στην πλειονότητα των περιπτώσεων η παρουσία τους είναι αναγκαία, όπως για γραμμές εισόδου κι εξόδου, γραμμές ισχύος, οπές εξαερισμού, κ.ά. πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να διατηρείται η ομαλή και συνεχής πορεία της μαγνητικής ροής μέσα στο υλικό. Αυτό επιτυγχάνεται για τις μεν επαφές μηχανικά, με καλή σύζευξη των επιφανειών των μετάλλων (συνήθως εξασκώντας πίεση με βίδες) και στις οπές επιλέγοντας τη σωστή διάμετρο. Σύμφωνα με τη θεωρία, τα μαγνητικά πεδία διαδίδονται ελεύθερα μέσα σε κάθε άνοιγμα σε απόσταση ίση με το πενταπλάσιο της διαμέτρου τους [6]. Επιτυγχάνοντας αναλογία διαμέτρου προς μήκος όσο το δυνατό μικρότερη βελτιώνεται η απόδοση της θωράκισης αφού προσεγγίζεται η γεωμετρία του κυλίνδρου απείρου μήκους.

Όταν ένας θάλαμος θωράκισης σχεδιαστεί με τα παραπάνω κριτήρια απομένει να αποφασιστεί το υλικό του. Για τη θωράκιση από υψηλά μαγνητικά πεδία προτιμάται η χρήση περισσοτέρων του ενός υλικού και το μέγεθος που επηρεάζει την τελική επιλογή τους είναι κόρωση. Συνήθως, το εξωτερικό στρώμα σε ένα υψηλό μαγνητικό πεδίο κατασκευάζεται από υλικό χαμηλής διαπερατότητας - υψηλής κόρωσης. Τα ακόλουθα στρώματα κατασκευάζονται από υλικό υψηλής διαπερατότητας-χαμηλής κόρωσης υλικό αφού πλέον το πρόβλημα κόρωσης του υλικού από το πεδίο έχει αντιμετωπιστεί. Επίσης, τα στρώματα αυτά διαχωρίζονται από το πρώτο στρώμα αλλά και μεταξύ τους με κενό αέρος έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο το οποίο φτάνει σε αυτό να έχει αποσβεστεί αρκετά κατά τη διαδρομή και η ένταση του να είναι αισθητά μικρότερη [6].

2.4 Χρησιμοποιούμενα υλικά σε θαλάμους παθητικής θωράκισης

Κατά την παθητική μαγνητική θωράκιση χρησιμοποιούνται δύο είδη μαγνητικών υλικών τα σιδηρομαγνητικά και τα παραμαγνητικά υλικά.

Σιδηρομαγνητικά ή φερρομαγνητικά υλικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν τη σημαντικότερη κλάση μαγνητικών υλικών. Αυτό μπορεί εύκολα να φανεί τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Απαντώνται σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, χάρη κυρίως στην υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα η οποία μπορεί να λάβει τιμές που κυμαίνονται από 5000-1000000, καθώς και στην ιδιότητά τους να διατηρούν τη μαγνήτιση τους, ακόμη και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Σε σιδηρομαγνητικά υλικά, η σχέση μεταξύ B και H παρουσιάζει μη γραμμικότητα και υστέρηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το B εξαρτάται, εκτός από το H, και από την ιστορία μαγνήτισης του υλικού.

Βάσει της τιμής απομαγνήτισής τους τα σιδηρομαγνητικά υλικά διαχωρίζονται σε σκληρά και σε μαλακά μαγνητικά υλικά. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις τομογραφίες, στις κεφαλές ανάγνωσης μικρόφωνα ηχεία κ.τ.λ., ενώ τα μαλακά μαγνητικά σιδηρομαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρομαγνήτες καθώς και σε εφαρμογές θωράκισης [14]. Τυπικά φερρομαγνητικά υλικά αποτελούν τα κράμματα permalloy και mumetal.

Permalloy

Το permalloy είναι κράμα νικελίου – σιδήρου με περιεκτικότητα 80% σε νικέλιο και 20% σε σίδηρο και εδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή με σταθερά πλέγματος 0.355 nm. Στο εμπόριο, τα κράματα permalloy έχουν τυπικές τιμές σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας της τάξης του $\mu_r = 100000$.

Η υψηλή τιμή μαγνητικής του διαπερατότητας, το κάνει χρήσιμο σε εφαρμογές μαγνητικού πυρήνα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, όπως επίσης σε εφαρμογές μαγνητικής θωράκισης έναντι εξωτερικών μαγνητικών πεδίων. Είναι γνωστό ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να χωριστεί σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Η ηλεκτρική συνιστώσα μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με χρήση αγώγιμων υλικών τα οποία έχουν γειωθεί κατάλληλα, ενώ αντίθετα για να αντιμετωπιστεί η μαγνητική συνιστώσα απαιτείται η χρήση ενός υλικού με υψηλή διαπερατότητα όπως το permalloy.

Εκτός της υψηλής διαπερατότητας, άλλες ιδιότητές του είναι η χαμηλή απομαγνήτιση, η σχεδόν μηδενική μαγνητοσυστολή, και η ανισοτροπική μαγνητοαντίσταση. Η χαμηλή μαγνητοαντίσταση είναι σημαντική για βιομηχανικές εφαρμογές, επιτρέποντας τη χρήση του permalloy σε λεπτά φιλμ όπου μεταβλητές τάσεις σε περίπτωση άλλου υλικού θα προκαλούσαν μεγάλη μεταβολή στις μαγνητικές του ιδιότητες. Η ηλεκτρική αντίσταση του permalloy μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση και τη δύναμη του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Μειονεκτήματα του permalloy αποτελούν η χαμηλή ολκιμότητα και κατεργασιμότητά του, επομένως οι εφαρμογές που απαιτούν τη δημιουργία σχημάτων όπως θάλαμοι μαγνητικής θωράκισης χρησιμοποιούν άλλα κράματα υψηλής διαπερατότητας [15].

Mumetal

Το mumetal είναι μια ποικιλία από κράματα σιδήρου - νικελίου και άλλων στοιχείων τα οποία διακρίνονται για την υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η σύνθεσή τους αποτελείται, συγκεκριμένα, από 77% νικέλιο, 16% σίδηρο, 5% χαλκό και 2% χρώμιο ή μολυβδαίνιο. Το mumetal έχει τυπική τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας που κυμαίνεται από 5000 ως 350000, που είναι υψηλή συγκριτικά με τις μερικές χιλιάδες του ατσαλιού.

Είναι ένα μαλακό μαγνητικό υλικό που έχει χαμηλή μαγνητική ανισοτροπία και μαγνητοσυστολή, δίνοντας έτσι χαμηλή απομαγνήτιση με αποτέλεσμα να επέρχεται κορεσμός σε χαμηλής συχνότητας μαγνητικά πεδία. Αυτό συνεπάγεται μικρές απώλειες υστέρησης όταν χρησιμοποιείται σε υψηλόσυχνα μαγνητικά κυκλώματα. Η υψηλή διαπερατότητά του κάνει το mumetal χρήσιμο για θωράκιση έναντι στατικών ή χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων τα οποία δε μπορούν να εξασθενήσουν με άλλες μεθόδους. Επίσης, παρέχει ένα μικρής μαγνητικής αντίστασης μονοπάτι για την μαγνητική ροή, δημιουργώντας έτσι μαγνητική θωράκιση έναντι στατικού ή χαμηλόσυχνου μαγνητικού πεδίου.

Ως προς τον τρόπο παρασκευής τους τα κράματα mumetal περνάνε από μια ειδική θερμική επεξεργασία αφού έχουν λάβει την τελική τους μορφή. Επιπλέον, ανοπτύονται σε μαγνητικό πεδίο μέσα σε περιβάλλον υδρογόνου, το οποίο ανεβάζει τη μαγνητική του διαπερατότητα κατά 40 φορές. Η ανόπτυση μεταβάλλει την κρυσταλλική δομή του υλικού ευθυγραμμίζοντας τους κόκκους και απομακρύνοντας οποίες κενώσεις, και ειδικά τον άνθρακα ο οποίος εμποδίζει την ελεύθερη κίνηση των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών.

Η μαγνητική θωράκιση με χρήση κραμάτων όπως το mumetal, δεν εμποδίζει τη διέλευση των μαγνητικών πεδίων αλλά παρέχει ένα μονοπάτι για τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου περιμετρικά από την προς θωράκιση περιοχή που. Έτσι, το καλύτερο σχήμα για δωμάτια θωράκισης είναι κλειστά δοχεία τα οποία θα περιβάλλουν την προς θωράκιση περιοχή. Να τονιστεί εδώ ότι η αποτελεσματικότητα της θωράκισης με χρήση mumetal μειώνεται όσο μειώνεται η μαγνητική διαπερατότητα. Στη θωράκιση με χρήση mumetal, θεωρείται σημαντικό να παρεμβάλλονται στρώματα αέρα, χάρη στα οποία προκαλείται σταδιακή μείωση του πεδίου που εισέρχεται στην υπό προστασία περιοχή. Το

mumetal υπερέχει έναντι του permalloy λόγω της υψηλής ολκιμότητας και της εύκολης κατεργασιμότητάς του κάνοντάς το ιδανικό για εφαρμογές μαγνητικής θωράκισης. [16]

Παραμαγνητικά υλικά

Τα παραμαγνητικά υλικά είναι υλικά που προκαλούν ενίσχυση του επιβαλλόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυτών είναι ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας $\mu_r > 1$ και έχουν μικρή και θετική μαγνητική επιδεκτικότητα ($\chi \approx 10^{-6} - 10^{-2}$). Ο παραμαγνητισμός δημιουργείται από τον προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ατόμων ή των μορίων κατά τη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του ασκούμενου μαγνητικού πεδίου. Τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται ελαφρά από ένα μόνιμο μαγνήτη. Γενικότερα, τα παραμαγνητικά υλικά εμφανίζουν την ιδιότητα της μαγνήτισης μόνο όταν βρεθούν υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Όταν αυτά απομακρυνθούν από το μαγνητικό πεδίο οι μαγνητικές ροπές των ατόμων προσανατολίζονται και πάλι τυχαία με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει το υλικό πλέον μαγνήτιση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι ο αέρας, το παλλάδιο, και το αλουμίνιο [17,18].

Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των παραμαγνητικών υλικών. Η ηλεκτρομαγνητική αποτελεσματικότητα του αλουμινίου εξαρτάται από τον τύπο του επιβαλλόμενου πεδίου (ηλεκτρικό, μαγνητικό), τη συχνότητά του (η οποία καθορίζει και το βάθος διείσδυσης), καθώς και το πάχος του φύλλου αλουμινίου . Κατά τη θωράκιση με αλουμίνιο ένα μέρος του επιβαλλόμενου πεδίου ανακλάται από την επιφάνειά του και το υπόλοιπο εισέρχεται και απορροφάται.

Τα φύλλα αλουμινίου δεν είναι αποδοτικά όσον αφορά στην εξασθένηση χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η συχνότητα του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, τόσο αυξάνεται και η αποδοτικότητα της θωράκισης με χρήση φύλλων αλουμινίου. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του αλουμινίου είναι $\mu_r \approx 1$.

3 Χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα

Για την υλοποίηση ή τη βελτίωση ενός προϊόντος είναι αναγκαίο να διενεργηθεί μία συγκεκριμένη διαδικασία η οποία ξεκινάει από τον σχεδιασμό και καταλήγει στην παραγωγή. Η διαδικασία του σχεδιασμού περιλαμβάνει τη σύνθεση και την ανάλυση. Για τη σύνθεση χρησιμοποιούνται εργαλεία τύπου CAD (Computer Aided Design), ενώ για την ανάλυση χρησιμοποιούνται εργαλεία τύπου CAE (Computer Aided Engineering). Τέλος, η σύνδεση του σταδίου του σχεδιασμού με αυτό της παραγωγής γίνεται με τη βοήθεια εργαλείων τύπου CAM (Computer Aided Manufacturing). Όλα τα προαναφερθέντα εργαλεία χρησιμοποιούν Η/Υ, για την δημιουργία, την τροποποίηση, την ανάλυση και την βελτιστοποίηση ενός σχεδιασμού. Στα πλαίσια της ανάλυσης, εντάσσεται η μοντελοποίηση, άρα πραγματοποιείται με χρήση εργαλείων CAE, τα οποία, συνήθως, βασίζονται στην αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [19].

3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method - FEM)

Η αναλυτική λύση των διαφορικών εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα συνήθη προβλήματα φυσικής ή μηχανικής (ελαστικότητα, ακουστική, μετάδοση θερμότητας, μαγνητισμός, ηλεκτρομαγνητισμός κ.ά.) είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου τα χωρία και οι οριακές συνθήκες είναι απλά. Συνήθως όμως, εμφανίζεται η ανάγκη να λυθούν πραγματικά σύνθετα προβλήματα στα οποία οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το εκάστοτε φαινόμενο δεν έχουν αναλυτική λύση. Γι' αυτόν τον λόγο αναπτύχθηκαν προσεγγιστικές μέθοδοι, όπως είναι *η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων* [20].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται γενικότερα για την εύρεση προσεγγιστικής λύσης μερικών διαφορικών εξισώσεων καθώς και ολοκληρωτικών εξισώσεων. Η προσέγγιση της λύσης βασίζεται στην προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε μία ισοδύναμη πολυωνυμική εξίσωση, η οποία μπορεί να λυθεί μέσω αριθμητικών τεχνικών επίλυσης όπως οι πεπερασμένες διαφορές. Κατά την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, πρωταρχικό μέλημα είναι η δημιουργία εξίσωσης η οποία θα προσεγγίζει την προς μελέτη εξίσωση, και η οποία θα είναι αριθμητικά σταθερή, που σημαίνει ότι δεν θα συσσωρεύονται σφάλματα, κατά την εξαγωγή δεδομένων και ενδιαμέσων υπολογισμών, οδηγώντας στο τέλος, σε αποτελέσματα κακής ποιότητας. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια καλή επιλογή για την επίλυση μερικών

διαφορικών εξισώσεων σε πολύπλοκα χωρία – γεωμετρίες ή όταν η επιθυμητή ακρίβεια δεν είναι σταθερή σε ολόκληρη την γεωμετρία.

Αναλυτικότερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων με τη χρήση συστήματος τμηματικά πολυωνυμικών παρεμβολών. Κατά την επίλυση, κάθε πολυωνυμική καμπύλη μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν αριθμό σημείων, οπότε η επίλυση γίνεται μόνο πάνω στα σημεία. Τα σημεία αυτά είναι γνωστά ως κομβικά σημεία ή απλά κόμβοι. Μια γραμμική πολυωνυμική καμπύλη απαιτεί δύο ενώ μια τετραγωνική τρία σημεία. Η μείωση των σημειακών μερικών διαφορικών εξισώσεων σε μία μορφή πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τουλάχιστον τρόπους, την μέθοδο Galerkin και την αρχή της διακύμανσης. Οι δύο αυτές μέθοδοι είναι ισοδύναμες για συμμετρικούς διαφορικούς φορείς, δεδομένου ότι έχουν γίνει οι κατάλληλες παραδοχές, παρόλα αυτά η μέθοδος Galerkin είναι πιο γενική.

Συνοπτικά, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το προς μελέτη χωρίο χωρίζεται σε ένα αριθμό μικρών περιοχών που λέγονται πεπερασμένα στοιχεία και έχουν απλό γεωμετρικό σχήμα. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι απλές, συνήθως πολυωνυμικές εκφράσεις. Χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό στοιχείων και λύνοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις σε καθένα από αυτά γίνεται δυνατό να αποκτηθεί μια καλή προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης.

Η μεθοδολογία αυτή, παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα
- μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα φυσικής και μηχανικής που μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση διαφορικών εξισώσεων.
- οι συναρτήσεις που χρησιμοποιεί είναι απλές και δεν απαιτείται ικανοποίηση κάποιων οριακών συνθηκών στα σύνορα του σώματος
- οι ολοκληρώσεις γίνονται σε κάθε στοιχείο χωριστά (οι συναρτήσεις είναι μηδέν έξω από κάθε στοιχείο), οπότε, σε απλές περιπτώσεις το αποτέλεσμα προκύπτει εύκολα με αναλυτικό τρόπο, ενώ σε πιο σύνθετες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αριθμητική ολοκλήρωση.

Ως μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αναφέρονται οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα γεωμετρικά σχήματα ή περίπλοκες οριακές συνθήκες, αλλά αυτό το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τελευταία χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών.

Όπως είναι εμφανές από τα παραπάνω, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια ισχυρή μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων οριακών συνθηκών. Πραγματικά, αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους μηχανικούς στην προσπάθεια τους να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα κατασκευών ως εξέλιξη της μητρωικής ανάλυσης την οποία χρησιμοποιούσαν στις ραβδωτές κατασκευές. Η μέθοδος της μητρωικής ανάλυσης μάλιστα, σήμερα έχει ενταχθεί στα λογισμικά που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [21] και χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την επίλυση τεχνικών προβλημάτων. Το αρχαιότερο εν χρήση εμπορικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων είναι το NASTRAN. Άλλα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήση είναι το ABAQUS, το ALGOR, το ANSYS κ.α..

3.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση ειδικού λογισμικού

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει

- την περιγραφή της γεωμετρίας
- τη γένεση πλέγματος
- την επιβολή οριακών συνθηκών (στήριξη και φόρτιση)
- την επίλυση και
- την προεπισκόπηση των αποτελεσμάτων

Τα παραπάνω βήματα αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται *μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων* (finite element modeling).

Ο προεπεξεργαστής *(pre-processor)* του λογισμικού ξεκινάει με την περιγραφή της γεωμετρίας του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά, τα λογισμικά ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis - FEA) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες σχεδίασης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD και είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Συγκεκριμένα η γεωμετρία που έχει κατασκευαστεί σε ένα λογισμικό CAD μπορεί να εισαχθεί στο λογισμικό CAE με τη μορφή ουδέτερου αρχείου (neutral file) π.χ. .igs. Η επιλογή της κατασκευής της γεωμετρία σε άλλο περιβάλλον μπορεί να είναι πολύ ελκυστική και ιδιαίτερα σε όσους ήδη γνωρίζουν κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, αλλά πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή. Ο χρήστης πρέπει να εισάγει την παράμετρο της ανοχής (tolerance), και να επιβεβαιώσει ότι όλα τα στοιχεία που συνδέονται με την μοντελοποίηση έχουν εισαχθεί σωστά, διαφορετικά πρέπει να γίνεται επιδιόρθωση της

γεωμετρίας. Ακόμα, συχνά, μετά την εισαγωγή της γεωμετρίας στο λογισμικό εμφανίζεται στο γεωμετρικό μοντέλο το φαινόμενο ύπαρξης διπλών γεωμετρικών οντοτήτων (γραμμών, σημείων κλπ.). Τότε πρέπει να γίνει συγχώνευση αυτών (merge). Η απευθείας σύνδεση CAD με CAE κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης και την απώλεια δεδομένων μικραίνοντας ουσιαστικά τον κύκλο σχεδιασμού - ανάλυσης. Περεταίρω, η χρήση συστημάτων CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής μιας σύνθετης γεωμετρίας. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων, ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να "φαίνεται" τέλειο αλλά στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά τη διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να "καθαρίσουν" την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η γένεση πλέγματος που περιλαμβάνει τη δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων με τους αντίστοιχους κόμβους τους. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα οκταεδρικών ή τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικών ή τριγωνικών στοιχεία για επιφάνεια στον τριδιάστατο χώρο. Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν σε παραμέτρους γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος ή το ελάχιστο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου. Επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές και τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα. Οι παραπάνω λειτουργίες είναι απαραίτητες γιατί ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στην τιμή ή τη συμπεριφορά μεγεθών ενδιαφέροντος (όπως συγκέντρωση τάσης γύρω από οπές) πρέπει να έχουν περισσότερους κόμβους, άρα πυκνότερο πλέγμα από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα λογισμικ ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library).

Όσο πιο πολλά είδη πεπερασμένων στοιχείων εμπεριέχονται σε αυτήν τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία (με ενδιάμεσους ή όχι κόμβους) ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Ο αριθμός των κόμβων ενός πλέγματος συσχετίζεται με τους αγνώστους που πρέπει να προσδιοριστούν ή αλλιώς τους βαθμούς ελευθερίας. Οι άγνωστοι μπορεί να είναι τιμές μετατόπισης, περιστροφής, θερμοκρασίας, ενέργειας, έντασης πεδίου κ.ο.κ.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει να αποδοθούν οι ιδιότητες του υλικού που αντιπροσωπεύει. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, ο λόγος Poisson (για ελαστικές κατασκευές), η μαγνητική διαπερατότητα για ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα κ.ά.. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα κτλ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ. Τέλος, σε κάποια πεπερασμένα στοιχεία ορίζονται γεωμετρικές σταθερές, όπως το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών.

Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες, όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις και θερμοκρασίες, οι οποίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε γεωμετρικά στοιχεία του προβλήματος ώστε να μετατραπούν σε τιμές σε συγκεκριμένους κόμβους πεπερασμένων στοιχείων. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Τα περισσότερα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, παρέχουν κατά την μοντελοποίηση έναν αριθμό επιλογών εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Από τη στιγμή που γίνει η μοντελοποίηση, το μοντέλο εισάγεται στον πυρήνα του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων που είναι ο επιλύτης, ο οποίος εφαρμόζει τη μέθοδο λύνοντας τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Σε αυτό το στάδιο, καθορίζεται και ο τύπος της ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί (π.χ. στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική).

Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον μετα-επεξεργαστής *(post-processor)*. Τα περισσότερα λογισμικά προσφέρουν ποικίλους

τρόπους επισκόπησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν, τάση, παραμόρφωση και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος απεικόνισης αποτελεσμάτων είναι υπό μορφή ζωνών ισοϋψών επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματική κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα λογισμικά διαθέτουν δυνατότητα, τόσο για την εποπτεία των ιδιομορφών ταλάντωσης όσο και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη – γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά λογισμικά διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω σαν κείμενα, παρουσιάσεις κτλ.

Διατυπώσεις πεπερασμένων στοιχείων και γένεση πλέγματος

Μία από τις κρισιμότερες αποφάσεις κατά την ανάπτυξη ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου πεπερασμένου στοιχείου με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη. Επιπρόσθετα, το πλήθος καθώς και το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός του πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (που καθορίζει τον τύπο του πεπερασμένου στοιχείου), τόσο ακριβέστερη είναι η επίλυση, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή από άποψη χρόνου και υπολογιστικής ισχύος. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η δημιουργία πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα [21].

Οι βασικοί τύποι πεπερασμένων στοιχείων είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι με 3 βαθμούς ελευθερίας)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι με 6 βαθμούς ελευθερίας)
- Επίπεδης εντατικής κατάστασης (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μεμβράνη
- Κέλυφος
- Στοιχείο ορθοτροπικού – πολυστρωματικού υλικού

- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

Σε κάποιους τύπους πεπερασμένων στοιχείων, ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλλει [21].

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει, επίσης, την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου και τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου. Κάποιες μέθοδοι γένεσης πλέγματος που απαιτούν πρόσθετη δεδομένα όπως την υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται ως ημιαυτόματες μέθοδοι [21].

Είδη ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιηθεί, γενικά, ο τρόπος ανάλυσης, στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες γενικές κατευθύνσεις. Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα λογισμικά υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων φυσικών και μηχανικών προβλημάτων που μπορούν να προσεγγιστούν με διαφορικές εξισώσεις όπως, θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορρεύματα), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών κ.λ.π.. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων, συνήθως, αποδίδεται με τον όρο “MULTI-PHYSICS”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων πεδίων της Φυσικής.

Η δεύτερη επιλογή του μελετητή αφορά στον καθορισμό του προβλήματος ανάλογα με το αν μεταβάλλεται κάποιο μέγεθος του προβλήματος στο πεδίο του χρόνου. Έτσι, τα προβλήματα και κατ’ επέκταση οι επιλύσεις διαχωρίζονται σε στατικά (Static) και δυναμικά (Dynamic).

- *Στατικά* (static analysis), δηλαδή μη εξαρτημένα από τον χρόνο
- *Δυναμικά* (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενα (π.χ. η μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος).

Η τελευταία σημαντική κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη γραμμικό (non-linear).

- Γραμμικό λέγεται το πρόβλημα στο οποία εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος. Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή θεωρούνται) γραμμικά.
- Μη-γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε ελαστικά προβλήματα η μη – γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων.

3.3 Ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις Maxwell

Στον ηλεκτρομαγνητισμό, οι διαφορικές εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν είναι οι εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες αποτελούν ένα σύνολο τριών εξισώσεων, που περιγράφουν τη συμπεριφορά ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, καθώς και την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη. Οι τρεις αυτές εξισώσεις εκφράζουν αντίστοιχα, την πειραματική απουσία μαγνητικών μονόπολων, (νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό), το πώς το ρεύμα και τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν μαγνητικά πεδία (νόμος Ampere – Maxwell), και τέλος το πώς τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία παράγουν ηλεκτρικά πεδία (νόμος του Faraday για την αγωγιμότητα) και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 3-1**) σε διαφορική και ολοκληρωματική μορφή.

Πίνακας 3-1 Εξισώσεις Maxwell

Όνομα	Διαφορική μορφή	Ολοκληρωματική μορφή
Νόμος Gauss για μαγνητισμό	$div\,\vec{B} = 0$	$\oiint_{\partial A} \vec{B}.d\,\vec{A} = 0$
Νόμος Faraday για την επαγωγή	$curl\,\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$	$\oint_{\partial A} \vec{E}.d\,\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t}\iint_A \vec{B}.d\,\vec{A}$
Νόμος Ampere (επέκταση νόμου Maxwell)	$curl\,\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t}\vec{D}$	$\oint_{\partial A} \vec{H}.d\,\vec{s} = \iint_A \left(J + \frac{\partial}{\partial t}\vec{D} \right) d\,\vec{A}$

Όπου το $D[C/m^2]$ συμβολίζει την ηλεκτρική μετατόπιση ή αλλιώς την πυκνότητα ηλεκτρικού πεδίου, το $\vec{E}[V/m]$ είναι το ηλεκτρικό πεδίο, το $\vec{H}[A/m]$ είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το $\vec{B}[T\ ή\ W/m^2]$ η μαγνητική επαγωγή, και τέλος το $\vec{J}[A/m]$ η πυκνότητα ρεύματος.

Αναλυτικότερα, ο νόμος του Gauss στην ολοκληρωματική του μορφή, δηλώνει ότι η καθαρή μαγνητική επαγωγή είναι πάντα ίση με το μηδέν. Δεδομένου ότι η απόκλιση ενός διανύσματος του πεδίου είναι ανάλογη με την πυκνότητα του ρεύματος της πηγής, ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό σε διαφορική μορφή υποδηλώνει ότι δεν υπάρχουν ελεύθερα μαγνητικά φορτία. Ο νόμος του Faraday για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, υποδηλώνει ότι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από ένα κλειστό κύκλο είναι ίσο με το αρνητικό του ρυθμού αλλαγής της πυκνότητας της μαγνητικής ροής διαμέσου της περιοχής που περικλείεται του κύκλου αυτού. Αυτό το γραμμικό ολοκλήρωμα είναι ίσο με την γενικευμένη τάση ή την ηλεκτρεγερτική δύναμη μέσα στον κύκλο. Τέλος, ο νόμος του Ampere, υποδηλώνει ότι το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου πέριξ του κλειστού κύκλου είναι ίσο με το άθροισμα του ρυθμού αλλαγής της ηλεκτρικής ροής, της επαγωγής και της πυκνότητας ρεύματος διαμέσου της επιφάνειας του κλειστού κύκλου.

Συμπληρωματικά στις εξισώσεις Maxwell χρησιμοποιούνται οι εξισώσειςQ

- $\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{\mathrm{E}}$
- $\vec{\mathrm{B}} = \mu \cdot \vec{\mathrm{H}}$
- $\vec{J} = \kappa \cdot \vec{\mathrm{E}}$

Τα *ε*, *μ* και *κ*, αποτελούν χαρακτηριστικά των υλικών και συγκεκριμένα, *ε* είναι η διηλεκτρική σταθερά, *μ* η μαγνητική διαπερατότητα και *κ* η αγωγιμότητα. Συνήθως, είναι βαθμωτά μεγέθη και η τιμή τους εξαρτάται από την θέση του υλικού που χαρακτηρίζουν εντός του πεδίου, την ένταση του πεδίου και τη χρονική στιγμή.

Είδη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη μεταβολή των μεγεθών τους ως προς το χρόνο, στα στατικά και στα χρονικά μεταβαλλόμενα.

Τα *στατικά πεδία* διακρίνονται σε *ηλεκτροστατικά* και σε *μαγνητοστατικά*. Στα ηλεκτροστατικά το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι ανεξάρτητο του χρόνου, οπότε $\frac{\partial}{\partial t}\vec{E} = 0$ (ή $curl\,\vec{E} = 0$). Από τον νόμο του Faraday, αυτή η παραδοχή προϋποθέτει την πλήρη απουσία ή τη σχεδόν απουσία χρονομεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων: $\frac{\partial}{\partial t}\vec{B} = 0$. Με άλλα λόγια, τα ηλεκτροστατικά προβλήματα, δεν απαιτούν την απουσία μαγνητικών πεδίων ή

ηλεκτρικών ρευμάτων. Ακόμη και αν υπάρχουν μαγνητικά πεδία ή ηλεκτρικά ρεύματα, δεν πρέπει να μεταβάλλονται με τον χρόνο, ή στην χειρότερη περίπτωση, πρέπει να μεταβάλλονται με τον χρόνο μόνο πολύ αργά. Στα μαγνητοστατικά προβλήματα, τα μαγνητικά πεδία είναι στατικά. Ουσιαστικά, η μαγνητοστατική ανάλυση είναι η μελέτη στατικών μαγνητικών πεδίων. Σε αυτήν, τα φορτία καθώς και τα ρεύματα είναι σταθερά. Όπως έχει αποδειχθεί, η μαγνητοστατική ανάλυση είναι μία καλή προσέγγιση ακόμη και όταν τα ρεύματα δεν είναι στατικά και δεν μεταβάλλονται ταχέως. Εδώ, ξεκινώντας από τις εξισώσεις του Maxwell, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω απλοποιήσεις. Συγκεκριμένα κάθε ηλεκτροστατικό φορτίο θεωρείται αμελητέο, όπως και κάθε ηλεκτρικό πεδίο, και το μαγνητικό πεδίο θεωρείται σταθερό σε σχέση με τον χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι $\vec{E} = \vec{D} = 0$, $div\,\vec{B} = 0$ και τελικά $curl\,\vec{H} = \vec{J}$.

Το πιο γενικό πρόβλημα είναι η διερεύνηση πεδίων με τυχαία εξάρτηση από τον χρόνο, δηλαδή τα *χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία*. Στην περίπτωση αυτή, τα φορτία δεν παράγουν μονάχα ηλεκτρικά πεδία. Όσο τα φορτία κινούνται, δημιουργούν και μαγνητικά πεδία (νόμος Ampere) και εφόσον το μαγνητικό πεδίο αλλάζει, παράγει ηλεκτρικά πεδία. Αυτό το δευτερεύον ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον νόμο επαγωγής του Faraday. Αυτό σημαίνει ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρικό πεδίο, πιθανώς μεταβαλλόμενο με το χρόνο.

Για την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, παρατίθενται δύο γενικές προσεγγίσεις, η υψήσυχνη και η χαμηλόσυχνη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση. Η *υψησυχνη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση* υπολογίζει την διάδοση των ιδιοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και κυμάτων σε μια δοσμένη γεωμετρία. Η ανάλυση υψήσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, προσομοιώνει τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σε μία γεωμετρία όταν το μήκος κύματος ενός σήματος είναι ίδιας τάξης μεγέθους ή μικρότερο από τις διαστάσεις του μοντέλου. Το εύρος συχνοτήτων σε αυτή την περίπτωση κυμαίνεται από μερικά εκατοντάδες MHz σε μερικά εκατοντάδες GHz. Η *χαμηλόσυχνη ηλεκτρομαγνητική ανάλυση*, χρησιμοποιείται όταν το μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται ως αποτέλεσμα ενός ηλεκτρικού ρεύματος, ενός μόνιμου μαγνήτη, ή ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου. Για χαμηλόσυχνα προβλήματα, ή σχεδόν στατικά, η μετατόπιση του ρεύματος αμελείται ($\partial \vec{D} / \partial t = 0$). Ως εκ τούτου η συσσώρευση φορτίου και τα χωρητικά φαινόμενα αποκλείονται. Αυτή η προσέγγιση είναι δεκτή όταν το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, και

οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις δεν είναι εμφανείς στο σύστημα. Οπότε, όλες οι εξισώσεις του Maxwell, πρέπει να επιλυθούν.

3.4 Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell μπορούν να διαμορφωθούν ως ένα υπερβολικό (hyperbolic) σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αναλυτική λύση των εξισώσεων του Maxwell μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε πολύ απλές γεωμετρίες. Συχνά, για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων.

Στην περίπτωση μιας υψήσυχνης ανάλυσης, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη διάκριση σε *χρονικά αρμονική ανάλυση* και σε *συνδυασμένη υψήσυχνη ανάλυση*. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της χαμηλόσυχνης ανάλυσης μπορεί να γίνει *στατική ανάλυση* για την ανάλυση μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται από συνεχές ρεύμα (D.C.) ή μόνιμους μαγνήτες, *αρμονική ανάλυση* για μαγνητικά πεδία εξαιτίας χαμηλόσυχνα μεταβαλλόμενου ρεύματος (A.C.) ή τάσης και, τέλος, *μεταβατική ανάλυση* η οποία αναλύει μαγνητικά πεδία εξαιτίας τυχαίου ηλεκτρικού ρεύματος ή εξωτερικού πεδίου το οποίο μεταβάλλεται με το χρόνο [22].

4 Μέθοδοι βελτιστοποίησης

Βελτιστοποίηση είναι μια διαδικασία μέσω της οποίας κάτι γίνεται καλύτερο. Γενικά, αυτό είναι επιθυμητό για πρακτικούς ή οικονομικούς λόγους. Συνήθως, ο μηχανικός πρέπει να βρει εκείνη την λύση που θα χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και υψηλή πρακτική αξία. Με άλλα λόγια πρέπει να αναζητήσει τη βέλτιστη λύση ή ισοδύναμα να βελτιστοποιήσει τη λύση του. Ο Η/Υ είναι το ιδανικό εργαλείο στην επίτευξη αυτού του έργου, δεδομένου ότι εκτελεί αριθμητικούς υπολογισμούς εξαιρετικά γρήγορα με μεγάλη ακρίβεια και πολύ υψηλή αξιοπιστία. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι η βελτίωση κάποιας παραμέτρου μέσω της διαδικασίας δόκιμής – λάθους (trial and error). Προφανώς, αυτός είναι ο απλούστερος τρόπος βελτιστοποίησης και συνήθως δεν οδηγεί σε συνολικό ακρότατο αλλά δίνει μια εικόνα για το πώς μια παράμετρος σχεδίασης επηρεάζει το πρόβλημα. Ωστόσο, για να ληφθεί η βέλτιστη λύση πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικές διαδικασίες, οι οποίες είναι ευρύτερα γνωστές ως «Μέθοδοι Βελτιστοποίησης».

Ο όρος *βέλτιστη λύση* υπονοεί την ύπαρξη πολλών λύσεων, οι οποίες, ωστόσο, δεν έχουν την ίδια αξία (πρακτική ή άλλης μορφής). Ο καθορισμός του κριτηρίου βάσει του οποίου μία λύση χαρακτηρίζεται ως βέλτιστη ή μη βέλτιστη είναι στενά συνυφασμένος με το είδος του προς επίλυση προβλήματος, τη μέθοδο βελτιστοποίησης καθώς και από τις επιτρεπόμενες ανοχές των αριθμητικών πράξεων. Συνεπώς, η εύρεση της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα καθορίζεται σε σημαντικό βαθμό από τις γνώσεις και την εμπειρία εκείνου που καλείται να επιλύσει το πρόβλημα. Τελικά, με τον όρο *βέλτιστο σημείο* ή *βέλτιστη λύση* χαρακτηρίζεται το ακρότατο (μέγιστο ή ελάχιστο) μια συνάρτησης. Εν γένει, υπάρχουν προβλήματα με ένα ακρότατο και προβλήματα με πολλά ακρότατα, τα οποία προφανώς εμφανίζουν και μεγαλύτερη δυσκολία στην επίλυσή τους [20].

Συνοψίζοντας, πολλά από τα προβλήματα σχεδίασης που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός αποτελούν δύσκολα Συνδυαστικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης (Combinatorial Optimization Problems – COP) ή δύνανται να μεθόδους από συνεχείς συναρτήσεις που εμφανίζουν μεγάλο πλήθος λύσεων και συνήθως απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων και μεθόδων βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης, που αποτελούν αυτό ακριβώς που δηλώνει το όνομά τους, αποσκοπούν στην απλοποίηση της επαναληπτικής διαδικασία που στοχεύει στην εύρεση βέλτιστης λύσης, βελτιώνοντας σημαντικά την «ποιότητα» της και μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για την εύρεσή της.

Για να εφαρμοστεί μια μέθοδος βελτιστοποίησης σε κάποιο πρόβλημα, πρέπει να περιγραφούν μαθηματικά τρία βασικά στοιχεία:

1. η *αντικειμενική συνάρτηση* (objective function) που περιγράφει αυτό που πρέπει να επιτευχθεί με τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, δηλαδή τη συνάρτηση της οποίας πρέπει να βρεθεί το ακρότατο,
2. οι *παράμετροι βελτιστοποίησης* (optimization parameters ή design variables) που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα προσαρμόζεται για να πετύχει τους στόχους που έχουν τεθεί. Αυτοί, συνήθως, ταυτίζονται με τον αριθμό των αγνώστων της αντικειμενικής συνάρτησης και το αποτέλεσμα μιας μεθόδου βελτιστοποίησης, είναι να βρεθεί το διάνυσμα τιμών των παραμέτρων βελτιστοποίησης, που ικανοποιεί με τον απαιτούμενο τρόπο την αντικειμενική συνάρτηση, και
3. οι *περιορισμοί* (constraints ή state variables) που διέπουν τις μεταβλητές του προβλήματος και οδηγούν τη βελτιστοποίηση μέσα από καταστάσεις που πρέπει να ικανοποιούνται.

4.1 Κατηγορίες μεθόδων βελτιστοποίησης

Οι αλγόριθμοι ή μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες με πολλά κριτήρια. Στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικότερες κατηγοριοποιήσεις αυτών.

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των μεθόδων βελτιστοποίησης μπορεί να γίνει βάσει του αν πρέπει να οριστούν περιορισμοί ή όχι. *Βελτιστοποίηση άνευ περιορισμών*, όπως άλλωστε δηλώνει και ο όρος, σημαίνει ότι οι παράμετροι μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή. *Βελτιστοποίηση με περιορισμούς* σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση αναζητείται με ταυτόχρονη επιβολή ορισμένων συνθηκών που αφορούν στις παραμέτρους

Επίσης, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να διαχωριστούν, ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών σχεδίασης που μπορούν να αντιμετωπίσουν. Εάν μπορούν να αντιμετωπίσουν μόνο μία παράμετρο, τότε η βελτιστοποίηση χαρακτηρίζεται ως *μονοδιάστατη*. Ένα πρόβλημα με δύο ή περισσότερες παραμέτρους απαιτεί τη χρήση βελτιστοποίησης *πολλαπλών διαστάσεων*. Όσο ο αριθμός των διαστάσεων αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και η δυσκολία επίλυσης του αντίστοιχου προβλήματος. Αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης πολλαπλών διαστάσεων στηρίζονται στην αναγωγή του προβλήματος σε μία σειρά από μονοδιάστατες βελτιστοποιήσεις.

Ένας ακόμα τρόπος διάκρισης των μεθόδων βελτιστοποίησης προκύπτει με κριτήριο τη συνεχή ή διακριτή φύση των παραμέτρων. Οι διακριτές παράμετροι μπορούν να πάρουν μόνο ορισμένες τιμές και υπάρχουν μέθοδοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται σε τέτοια προβλήματα και ονομάζονται *διακριτές*, ενώ οι συνεχείς

παράμετροι μπορούν να λάβουν ένα άπειρο πλήθος τιμών και βρίσκονται με τη χρήση αντίστοιχων *συνεχών* μεθόδων βελτιστοποίησης.

Η εξάρτηση του αποτελέσματος της βελτιστοποίησης από τον χρόνο αποτελεί έναν ακόμα διαχωρισμό των μεθόδων βελτιστοποίησης. Έτσι, υπάρχει η *δυναμική βελτιστοποίηση* που δηλώνει ότι η έξοδος της διαδικασίας δίνεται συναρτήσει του χρόνου, και η *στατική βελτιστοποίηση*, στην οποία η έξοδος είναι ανεξάρτητη του χρόνου.

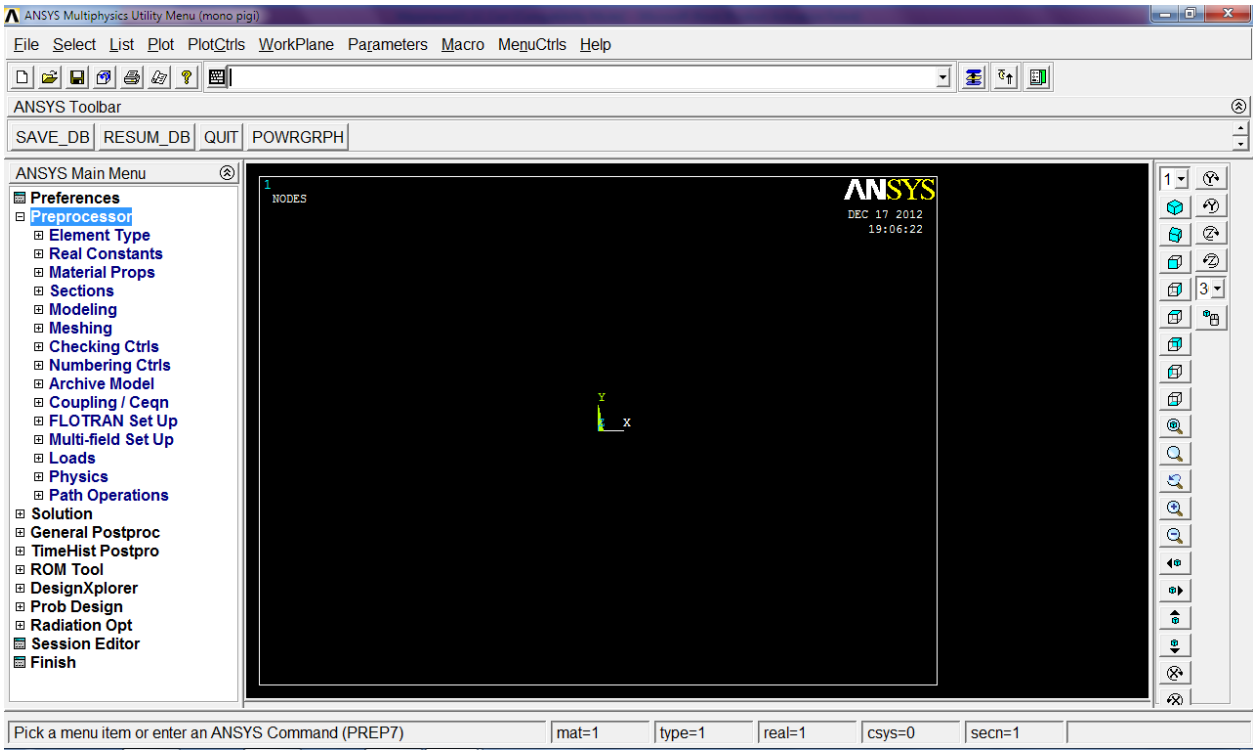
Τέλος, ένας πολύ βασικός διαχωρισμός των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι στις ντετερμινιστικές και τις στοχαστικές μεθόδους. Κάποιες μέθοδοι βελτιστοποίησης αναζητούν την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης εκκινώντας από ένα αρχικό σύνολο τιμών των παραμέτρων βελτιστοποίησης, το οποίο διαρκώς διορθώνεται μέχρι το πέρας του αλγορίθμου. Όταν αυτή η διόρθωση υπακούει σε κανόνες των μαθηματικών και της αριθμητικής ανάλυσης, τότε η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως *ντετερμινιστική*. Σε αντίθετη περίπτωση όταν αυτή η διόρθωση επιτυγχάνεται μέσα από διαδικασίες πιθανοτικού λογισμού, τότε χαρακτηρίζονται ως *στοχαστικές*. Βασικό μειονέκτημα των ντετερμινιστικών μεθόδων είναι ο εγκλωβισμός σε τοπικά ακρότατα, ενώ βασικό πλεονέκτημά των στοχαστικών μεθόδων είναι η μικρότερη πιθανότητα εγκλωβισμού τους σε τοπικά ακρότατα. Βασικό μειονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων αποτελεί ο αργός ρυθμός σύγκλισης [23].

5 Μοντελοποίηση μαγνητικού πεδίου στο λογισμικό ANSYS

Η διαδικασία της μοντελοποίησης του μαγνητικού πεδίου και του θαλάμου θωράκισης γίνεται με τη χρήση του λογισμικού ANSYS v. 14.0 [22]. Το ANSYS είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης το οποίο περιλαμβάνει εργαλεία προεπεξεργασίας (κατασκευή γεωμετρίας, γένεση πλέγματος και επιβολής οριακών συνθηκών), επίλυσης και μετεπεξεργασίας, σε ένα ενιαίο περιβάλλον, αλλά παράλληλα έχει και τη δυνατότητα προγραμματισμού με χρήση της γλώσσας APDL.

5.1 Γενικά για τη διαδικασία μοντελοποίησης

Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 5-1**) φαίνεται το περιβάλλον του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS v. 14.0. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων από το γραφικό του περιβάλλον ή με τη σύνταξη κώδικα στη γλώσσα προγραμματισμού του λογισμικού (APDL). Η ανάπτυξη ενός μοντέλου σε APDL επιτρέπει εύκολες αλλαγές σε παραμέτρους του. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία η ανάπτυξη των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων έγινε σε APDL γιατί σκοπός ήταν η διερεύνηση συγκεκριμένων παραμέτρων του, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.



Σχήμα 5-1: Περιβάλλον λογισμικού Ansys

Σε κάθε περίπτωση για την ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

Βήμα 1^{ο} – Κατασκευή γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας που περιγράφει το πρόβλημα μέσα στον προεπεξεργαστή του λογισμικού μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, δημιουργούνται κρίσιμα σημεία ελέγχου (keypoints), στη συνέχεια από τα σημεία αυτά κατασκευάζονται γραμμές (lines) και από αυτές επιφάνειες (areas), ώστε τελικά να πραγματοποιηθεί η κατασκευή όγκων (volumes), αν χρειάζεται. Σύμφωνα, με τον δεύτερο τρόπο, κατασκευάζονται απευθείας επιφάνειες ή όγκοι, είτε από σημεία ελέγχου, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε εισάγοντας τις διαστάσεις βασικών γεωμετρικών σχημάτων, όπως κύκλοι, κύλινδροι, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος.

Βήμα 2^{ο} – Επιλογή τύπου πεπερασμένων στοιχείων και γένεση πλέγματος

Η επιλογή του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το πρόβλημα που μοντελοποιείται, δηλαδή από την επίλυση που πρέπει γίνει. Αφού έχει γίνει η επιλογή του τύπου ή τύπων των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι αυτόματο πλέγμα, ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές, ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος ακμής) και η επιλογή του Smart Size η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή πυκνώνει τα πεπερασμένα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και τα αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη για λεπτή διαμέριση. Γενικά, οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πολλές και μπορούν να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα οριστούν.

Βήμα 3^{ο} – Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και επιβολή οριακών συνθηκών

Οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά πρέπει να υπάρξει προσοχή όσον αφορά στις μονάδες. Οι μονάδες όλες είναι στο S.I. εκτός αν οριστεί διαφορετικά. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που πρέπει να πραγματοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να οριστεί η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών.

Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου επιβάλλονται. Μπορούν να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικές οντότητες είτε σε στοιχεία του πλέγματος (κόμβους και πεπερασμένα στοιχεία). Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

Βήμα 4^{ο} – Επιλογή του τρόπου επίλυσης και επίλυση

Η επιλογή του τρόπου επίλυσης (solver) (γραμμικός – μη γραμμικός – μεταβατικός κ.α.) έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του φαινομένου που μοντελοποιείται. Όσον αφορά στην επίλυση, προσφέρονται πολλές δυνατότητες οι οποίες έχουν να κάνουν με διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης, που, αν το μοντέλο έχει κατασκευαστεί ορθά, δε θα δώσουν διαφορετικό αποτέλεσμα, αλλά θα έχουν διαφορετικό χρόνο επίλυσης. Υπάρχουν επιλύτες (solvers) που χρησιμοποιούν περισσότερο τον σκληρό δίσκο για την εγγραφή ενδιάμεσων αρχεία ή την φυσική μνήμη. Είναι προφανές ότι αφού η ταχύτητα της μνήμης είναι μεγαλύτερη από αυτή του σκληρού δίσκου αυτή η μέθοδος είναι και πιο γρήγορη. Υπάρχει όμως περίπτωση να μην υπάρχει διαθέσιμη η απαιτούμενη για το φυσικό πρόβλημα μνήμη ή σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις να μην είναι όλοι οι επιλύτες ικανοί να αντιμετωπίσουν τη φύση του προβλήματος. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία έγινε στατική ηλεκτρομαγνητική επίλυση.

Βήμα 5^{ο} – Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταγράφονται σε ένα αρχείο μετά από την επίλυση. Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων είναι ένα ζήτημα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής και γίνεται στον μετεπεξεργαστή του λογισμικού (postprocessor). Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα. Ενδεικτικό αναφέρονται τα αποτελέσματα στους κόμβους (Nodal Solution) και τα αποτελέσματα στα στοιχεία (Element Solution). Στους κόμβους δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία είναι κοινός και έχει συνεχή τιμή, ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία δίνεται μία τιμή του μεγέθους ανά στοιχείο. Ακόμη υπάρχει και η επιλογή του Element Table μέσω του οποίου γίνεται η ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων βγάζοντας μέσους όρους (Element Table Average). Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η επισκόπηση των τιμών των υπό εξέταση μεγεθών στους κόμβους του μοντέλου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο θάλαμος θωράκισης που μοντελοποιείται στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου. Έτσι, πριν γίνει η μοντελοποίηση του θαλάμου θωράκισης έγινε μια διερεύνηση του τρόπου μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου στο εν λόγω λογισμικό.

5.2 Μοντελοποίηση μαγνητικού πεδίου γύρω από πηνίο

Όπως είναι γνωστό ένα πηνίο δημιουργεί εντός και γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Στα πλαίσια της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκεται ο θάλαμος. Κατά τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν εργαλεία, τύποι πεπερασμένων στοιχείων και επιλύτης, που αφορούν σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

Για τη μοντελοποίηση του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου θεωρήθηκε ότι το πηνίο είναι κυλινδρικό και αποτελείται από σύρμα χαλκού, σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_r = 1$, το οποίο περιελίσσεται γύρω από πλαστικό, το οποίο είναι και το πιο σύνηθες. Στην περίπτωση που μελετάται, τα στοιχεία του πηνίου δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης, οπότε κατά την σχεδίαση και μοντελοποίηση, τα παραπάνω στοιχεία θεωρούνται μία ολότητα. Οι διαστάσεις του πηνίου, ώστε στη συνέχεια, να χωρά στο εσωτερικό του το θάλαμο θωράκισης, είναι:

- Διάμετρος $d_{\delta\iota\varepsilon\gamma} = 305mm$
- Μήκος $l_{\delta\iota\varepsilon\gamma} = 1000mm$
- Πάχος $m_{\delta\iota\varepsilon\gamma} = 5mm$

Στο **Σχήμα 5-2** που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία του πηνίου διέγερσης και του περιβάλλοντος αέρα.

(α) (β)

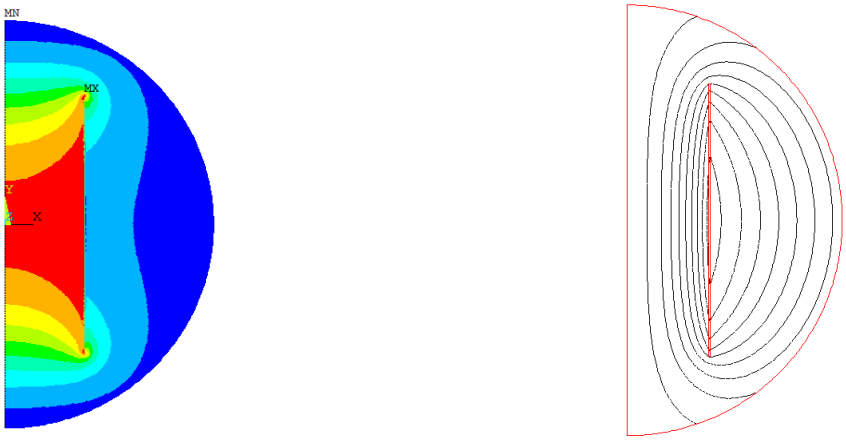
Σχήμα 5-2: Γεωμετρία πηνίου (α) αξονοσυμμετρική και (β) ψευδο - τριδιάστατη αναπαράσταση με τομή στα 3/4

Δεδομένου ότι το πηνίο είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα y και αποτελεί σώμα εκ περιστροφής, το μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί αξονοσυμμετρικό (axisymmetric), άρα η γεωμετρία του πηνίου και του αέρα που βρίσκεται γύρω από αυτό θα σχεδιαστεί διδιάστατα (2D).

Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο ANSYS στο πηνίο διέγερσης είναι ρεύμα με την μορφή πυκνότητας ρεύματος (Current Density JS). Οι μονάδες της πυκνότητας ρεύματος είναι A/m^2. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα που είναι αξονοσυμμετρικό δίνεται τιμή μόνο στην κατά Z διεύθυνση και έχει φορά προς τα αρνητικά του άξονα, άρα αρνητική τιμή. Για να διερευνηθεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ένα τέτοιο πηνίο έγιναν δοκιμές με διαφορετικές τιμές πυκνότητας ρεύματος, και συγκεκριμένα $JS = 0.1\times10^{-3}$, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000 A/m^2. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι να επιτευχθεί μέγιστη τιμή πεδίου στο εσωτερικό του πηνίου κοντά στα $B = 100\mu T$ που είναι το πεδίο που έχει μετρηθεί στο χώρο που θεωρητικά θα τοποθετηθεί ο θάλαμος θωράκισης. Να σημειωθεί εδώ ότι η πυκνότητα ρεύματος επιβάλλεται στα πεπερασμένα στοιχεία (elements) της πηγής και όχι σε κόμβους ή επιφάνειες αυτής.

Αποτελέσματα

Έπειτα από τις παραπάνω μοντελοποιήσεις προέκυψε το παραγόμενο πεδίο για διάφορες τιμές της πυκνότητας ρεύματος και όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό και γύρω από το πηνίο είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις (**Σχήμα 5-3**).



(α) (β)

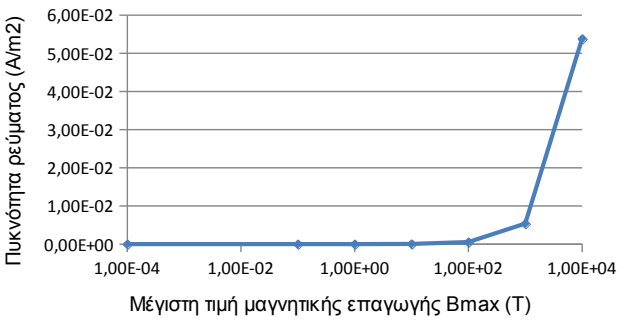
Σχήμα 5-3: (α) Κατανομή πεδίου παραγόμενο από το πηνίο (β) Γραμμές ροής

Η μέγιστη τιμή της μαγνητική επαγωγής του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της τιμής της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου διέγερσης, όπως ήταν αναμενόμενο. Αυτό φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5-1**).

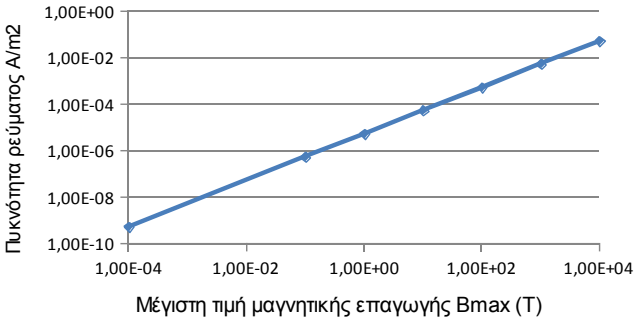
Πίνακας 5-1: Πυκνότητα ρεύματος πηνίου και μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής αυτού

Πυκνότητα Ρεύματος JS (A/m2)	Bmax (T)
1.00E-04	5.38E-10
0.1	5.38E-07
1	5.38E-06
10	5.38E-05
100	5.38E-04
1000	5.38E-03
10000	5.38E-02

Στο **Σχήμα 5-4** παρουσιάζονται δύο διαγράμματα, ένα ημιλογαριθμικό και ένα λογαριθμικό, της πυκνότητας ρεύματος ως προς τη μέγιστη τιμή του πεδίου, η οποία εμφανίζεται στο εσωτερικό του πηνίου και μάλιστα πάνω στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου του πηνίου. Βάσει αυτών των διαγραμμάτων και δεδομένου ότι πρέπει να προσομοιωθεί πεδίο έντασης $B = 100\mu T$, βρίσκεται (με παρεμβολή) ότι η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος είναι $JS = 20\frac{A}{m^2}$.



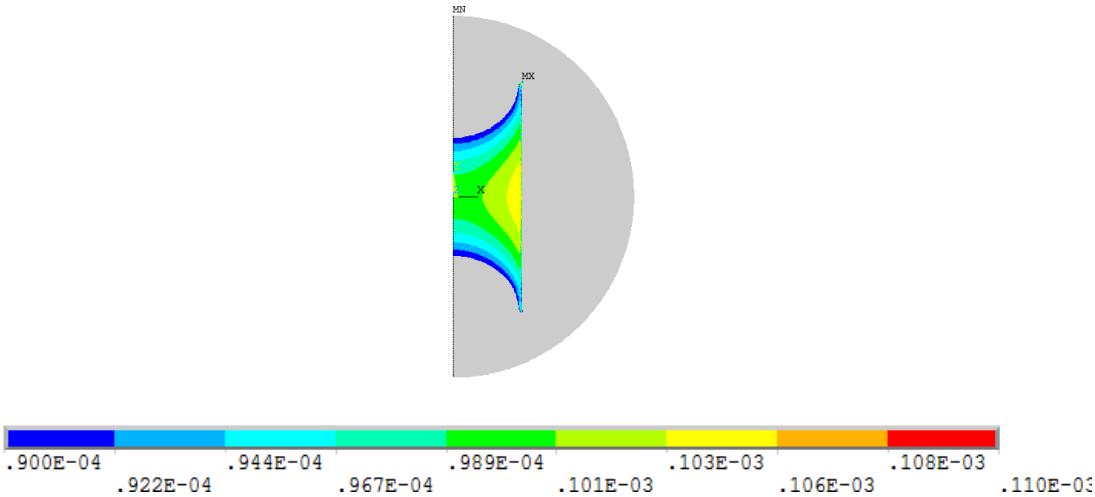
(α)



(β)

Σχήμα 5-4: Μεταβολή πυκνότητας ρεύματος – μέγιστης τιμής μαγνητικού πεδίου (α) ημιλογαριθμικός και (β) λογαριθμικό διάγραμμα

Για την επαλήθευση της παραπάνω υπόθεσης έγινε μια μοντελοποίηση του πηνίου με πυκνότητα ρεύματος $JS = 20\frac{A}{m^2}$. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε αυτή την περίπτωση ήταν *B=105 μT*. Στο **Σχήμα 5-5** παρουσιάζεται η περιοχή στην η μαγνητική επαγωγή B παίρνει τιμές στην περιοχή $B = 90 - 110\mu\text{T}$.



Σχήμα 5-5: Μαγνητική επαγωγή στην περιοχή ενδιαφέροντος

6 Μοντέλα προσομοίωσης θαλάμων θωράκισης διαφορετικής γεωμετρίας

Αφού καθορίστηκε ο τρόπος μοντελοποίησης του πεδίου, ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου του θαλάμου θωράκισης μέσα στο μαγνητικό πεδίο και της προσομοίωσης θαλάμων διαφορετικής γεωμετρίας.

6.1 Βασικός θάλαμος θωράκισης

Βασικό γεωμετρικό σχήμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μοντελοποίηση του θαλάμου θωράκισης είναι ο κύλινδρος. Τα βασικά γεωμετρικά του μεγέθη είναι:

- Μήκος L=1000 mm
- Διάμετρος D=500 mm

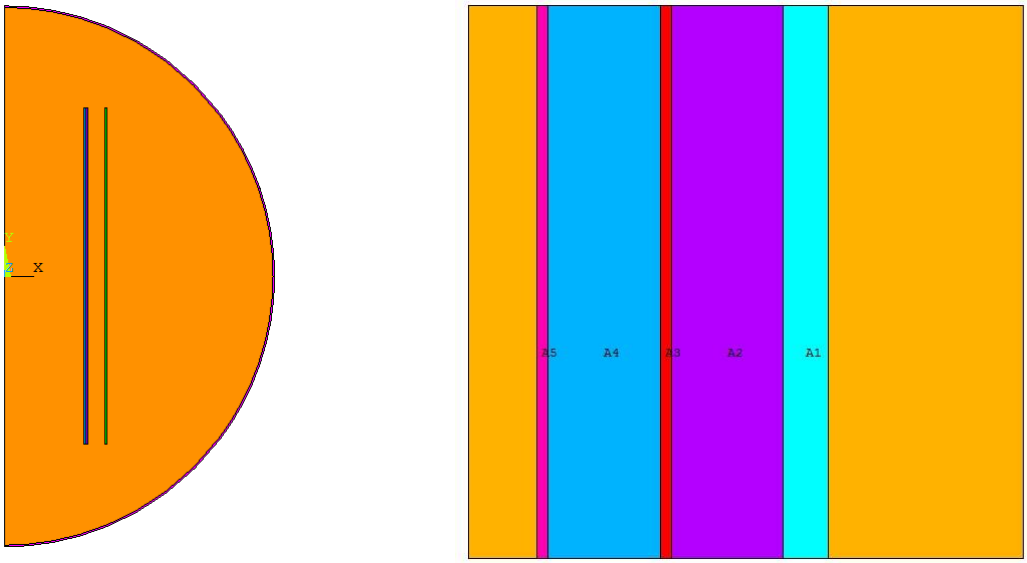
Ο λόγος που χρησιμοποιείται το σχήμα του κυλίνδρου και όχι κάποιο άλλο γεωμετρικό σχήμα όπως π.χ. ορθογώνιο ή σφαίρα, είναι, σύμφωνα με τη θεωρεία [6], η δημιουργία εύκολης οδού διέλευσης των μαγνητικών γραμμών, που μπορούν να προσφέρουν σχήματα με καμπυλότητα (κύλινδρος έναντι ορθογωνίου), και η κατασκευαστική ευκολία που μπορεί ένα τέτοιο σχήμα να προσφέρει (κύλινδρος έναντι σφαίρας). Τελικά, ο κυλινδρικός θάλαμος θωράκισης, σύμφωνα με τη θεωρία [6], αποτελείται από διαδοχικές, ομοαξονικές, κυλινδρικές στρώσεις διαφορετικών υλικών ώστε να γίνει πιο αποδοτικός και αποτελεσματικός ως προς τη δυνατότητα θωράκισης του εσωτερικού του έναντι εξωτερικών μαγνητικών πεδίων. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από:

- δύο στρώσεις με υλικό υψηλής διαπερατότητας (mumetal) πάχους $l_5 = l_3 = 0.5$ mm και μαγνητικής διαπερατότητας $\mu = 5000$.
- μια στρώση εξωτερικά αλουμινίου πάχους $l_1 = 2$ mm και μαγνητικής διαπερατότητας $\mu = 1$.

Οι παραπάνω τρεις κύλινδροι διαχωρίζονται από δύο στρώματα αέρα πάχους $l_4 = l_2 = 5$ mm. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω (κυλινδρική συμμετρία) η μοντελοποίηση του θαλάμου θωράκισης, του πηνίου και του αέρα έγινε αξονοσυμμετρική.

Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 6-1**) φαίνεται σε διδιάστατη (αξονοσυμμετρική) μορφή το βασικό μοντέλο θαλάμου θωράκισης δηλαδή αυτό του κυλίνδρου με ανοιχτά άκρα. Στην μεγέθυνση στο (β) φαίνεται η τομή του κυλίνδρου, στην οποία είναι ορατά τα ενδιάμεσα στρώματα που απαρτίζουν το σώμα του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα οι περιοχές A3 και A5 είναι οι στρώσεις υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, οι περιοχές A2

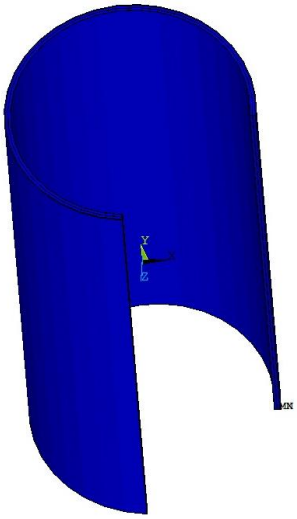
και A4 είναι τα ενδιάμεσα κενά αέρος μεταξύ των στρώσεων και η περιοχή A1 είναι η εξωτερική στρώση αλουμινίου. Να τονιστεί εδώ ότι η περιοχή χρώματος πορτοκαλί αριστερά και δεξιά των στρώσεων είναι ο αέρας του εσωτερικού και του εξωτερικού αντίστοιχα. Ο αέρας, έχει θεωρηθεί ως σφαίρα άπειρης ακτίνας.



(α) (β)

Σχήμα 6-1: (α) 2-D αναπαράσταση μοντέλου (β) λεπτομέρεια με ενδιάμεσες στρώσεις υλικών

Στο παρακάτω σχήμα (**Σχήμα 6-2**) φαίνεται το μοντέλο του βασικού θαλάμου θωράκισης ψευδοτριδιάστατα.



Σχήμα 6-2: Τριδιάστατη αναπαράσταση (3/4) του θαλάμου θωράκισης βασικής γεωμετρίας

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτούνται διδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία με βαθμούς ελευθερίας ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη. Οι κατάλληλοι τύποι είναι το PLANE53 για τη μοντελοποίηση όλων των υλικών, εκτός από την εξωτερική επιφάνεια του αέρα και το INFIN110 γι' αυτήν.

Στο **Σχήμα 6-3** που ακολουθεί, φαίνεται το στοιχείο PLANE53 στην τετραπλευρική και την τριγωνική του μορφή. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση 2D (επίπεδων και αξονοσυμμετρικων) μαγνητικών πεδίων. Αυτός ο τύπος πεπερασμένου στοιχείου χαρακτηρίζεται από 8 κόμβους και έχει έως 4 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο:

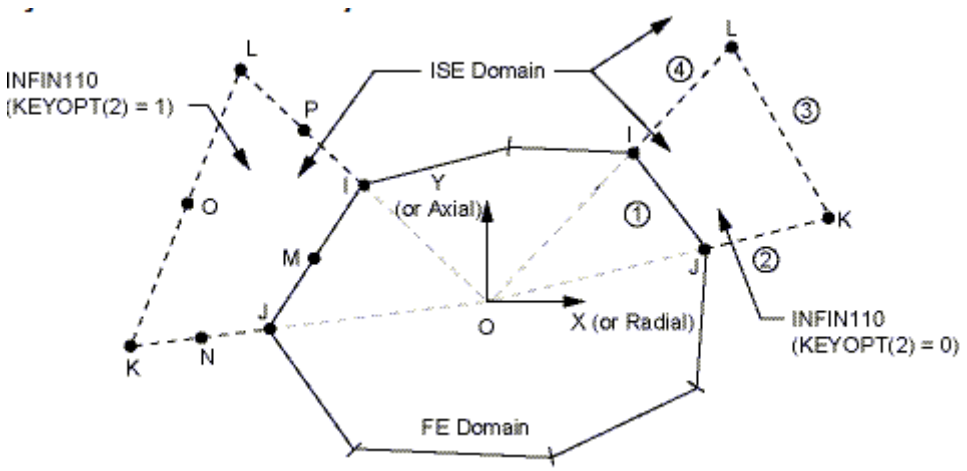
- Την τρίτη συνιστώσα το διανύσματος του μαγνητικού πεδίου (AZ)
- Το ηλεκτρικό δυναμικό ως συνάρτηση του χρόνου (VOLT)
- Το ηλεκτρικό ρεύμα (CURR)
- Την ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF)

(α) (β)

Σχήμα 6-3: (α) Τετραπλευρικό και (β) τριγωνικό PLANE53

Ο τύπος πεπερασμένου στοιχείου PLANE53 βασίζεται στη διαμόρφωση του διανύσματος του μαγνητικού δυναμικού και χρησιμοποιείται για την ανάλυση χαμηλόσυχνων μαγνητικών πεδίων όπως δινορεύματα (AC time harmonic και transient analysis) και για μαγνητικά πεδία δημιουργούμενα από τάση (στατική, μεταβατική ανάλυση, και ανάλυση αρμονικών του χρόνου).

Επειδή είναι αδύνατο να διακριτοποιηθεί ο χώρος του περιβάλλοντα αέρα (άπειρος), είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όρια στα οποία δεν αναπτύσσεται το μαγνητικό πεδίο. Αυτή τη δυνατότητα την παρέχουν τα στοιχεία INFIN110 που η γεωμετρία τους φαίνεται στο **Σχήμα 6-4** που ακολουθεί.



Σχήμα 6-4: Στοιχείο INFIN110

Ο τύπος πεπερασμένου στοιχείου INFIN110 χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του ανοιχτού ορίου ενός 2D (επίπεδου και αξονοσυμμετρικού) προβλήματος δίχως όρια. Χαρακτηρίζεται από 4 ή 8 κόμβους με ένα βαθμό ελευθερίας και στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται η τρίτη συνιστώσα το διανύσματος του μαγνητικού πεδίου (AZ) ανά κόμβο. Στο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία το πεπερασμένο στοιχείο INFIN110 επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση της οριακής συνθήκης του ανοιχτού ορίου.

Το πλέγμα που κατασκευάστηκε είναι ανομοιογενές, όπως είναι σύνηθες, δεδομένου ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις γεωμετρικές διαστάσεις και κάποιες περιοχές του μοντέλου είναι σημαντικές για την μετά επεξεργασία. Έτσι, το πηνίο, τα τοιχώματα του θαλάμου θωράκισης καθώς και ο αέρας γύρω από αυτά έχουν πυκνότερο πλέγμα, προκειμένου να περιοριστεί το σφάλμα διακριτοποίησης στις περιοχές αυτές.

Στη συνέχεια καθορίζονται οι μαγνητικές ιδιότητες, δηλαδή η μαγνητική διαπερατότητα, των χρησιμοποιηθέντων υλικών. Συγκεκριμένα ανά υλικό θεωρήθηκαν οι παρακάτω τιμές.

- Mumetal: μ=5000
- Al: μ=1
- Πηνίο (χαλκός): μ=1
- Μέσο (αέρας): μ=1

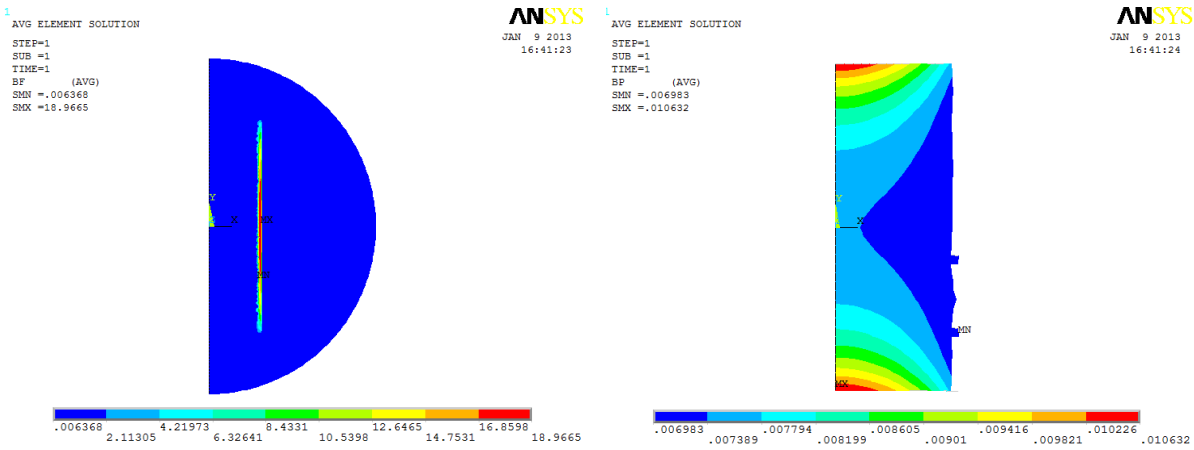
Η διέγερση που μοντελοποιήθηκε είναι το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από κυλινδρικό πηνίο με διάμετρο D = 500 mm και έχει πυκνότητα ρεύματος ίση με JS=-10000A/m. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του επαγόμενου πεδίου είναι ίση με $B_{\max} = 0.0538T$ και βρίσκεται στον κεντρικό άξονα του πηνίου, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.2. Επίσης, θεωρήθηκε ότι η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου κατά Z

(AZ) είναι ίση με μηδέν στη θέση X=0 και ότι ο αέρας εκτείνεται στο άπειρο, άρα στο όριό του μηδενίζεται το μαγνητικό πεδίο που προκαλεί το πηνίο.

Δεδομένου ότι πρόκειται για ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα, ο επιλύτης που χρησιμοποιείται είναι αυτός που ορίζεται από το λογισμικό για τη μαγνητοστατική ανάλυση.

Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση του προβλήματος παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και τιμές της τόσο στην περιοχή γύρω από τον κύλινδρο θωράκισης, όσο και στο εσωτερικό του, δηλαδή στην περιοχή που πρέπει να προστατευθεί.

Μετά την επίλυση του μοντέλου σχεδιάστηκε η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6-5**. Συμπληρωματικά στο ίδιο σχήμα παρατίθεται η κατανομή του ίδιου μεγέθους στο εσωτερικού του κυλίνδρου θωράκισης και συγκεκριμένα σε περιοχή 200 x 280 mm που αποτελεί την περιοχή ενδιαφέροντος της υπό προστασία περιοχής.



(α) (β)

Σχήμα 6-5: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής (α) σε όλο το πεδίο (β) στην περιοχή ενδιαφέροντος

6.2 Γεωμετρικές παραλλαγές βασικού θαλάμου θωράκισης

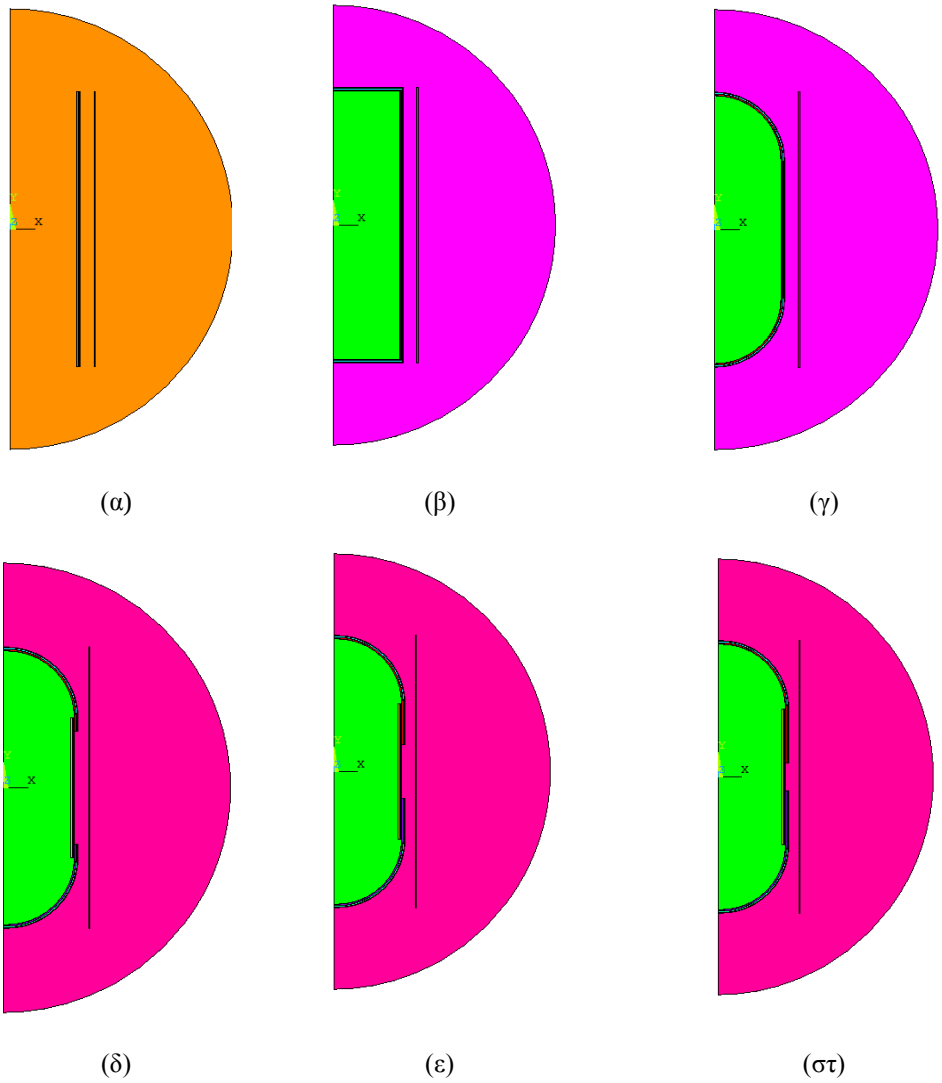
Εκτός της βασικής γεωμετρίας του θαλάμου θωράκισης διερευνήθηκαν και οι παρακάτω παραλλαγές της:

- Κύλινδρος κλεισμένος και από τις δύο μεριές από επίπεδα καπάκια
- Κύλινδρος κλεισμένος και από τις δύο μεριές από οβάλ καπάκια.

Λόγω κατασκευαστικής δυσκολίας κυλίνδρου με ενιαία καπάκια μοντελοποιήθηκε συμπληρωματικά κύλινδρος του οποίου τα καπάκια κουμπώνουν εξωτερικά του κυρίως κορμού με μήκος επικάλυψης:

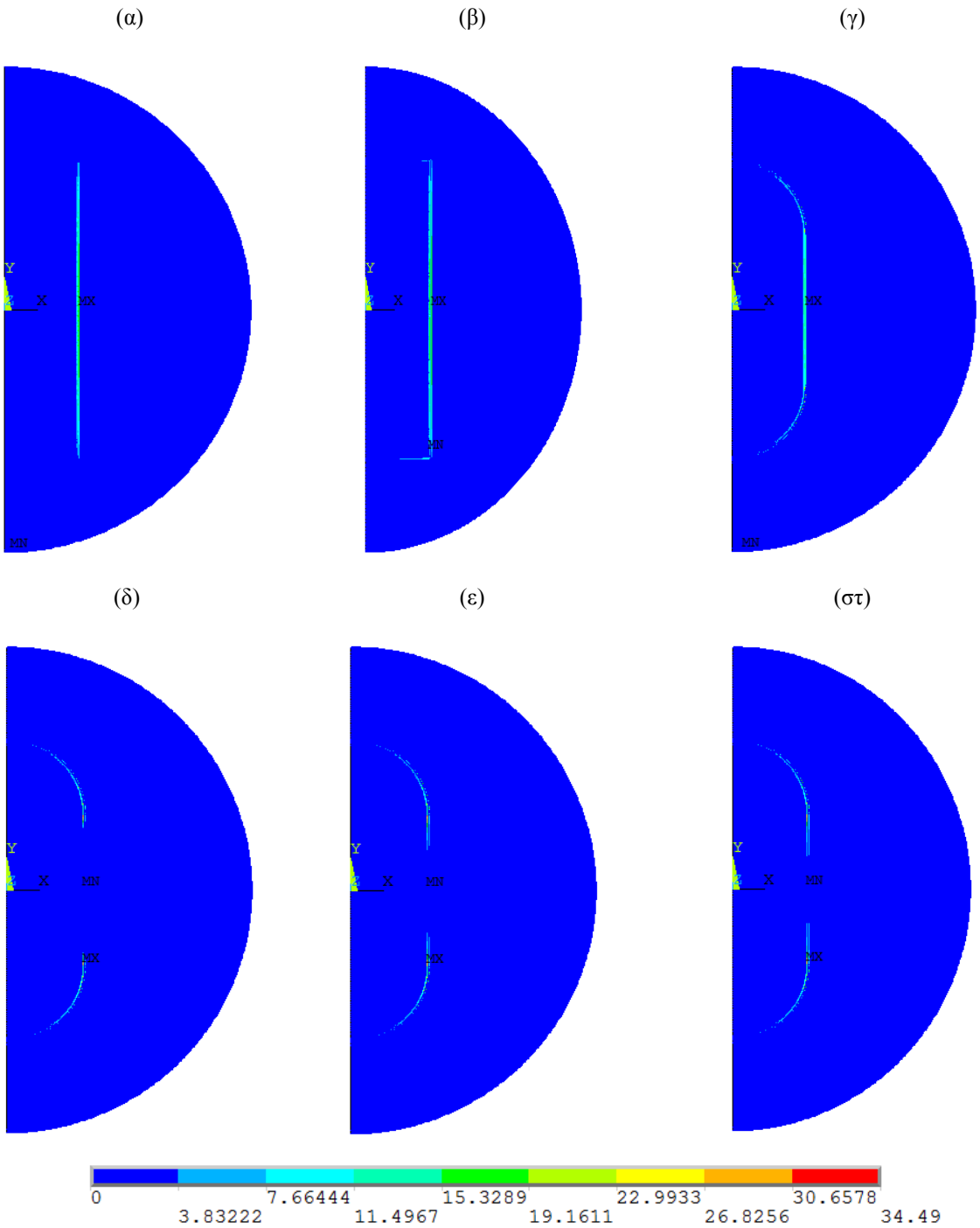
- Μικρό: 50 mm
- Μεσαίο: 150 mm
- Μεγάλο: 200 mm

Στο **Σχήμα 6-6** παρουσιάζονται εποπτικά οι παραπάνω γεωμετρίες και η βασική γεωμετρία δηλαδή του ανοιχτού κυλίνδρου.



Σχήμα 6-6: Διδιάστατα αξονοσυμμετρικά μοντέλα θαλάμων θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης

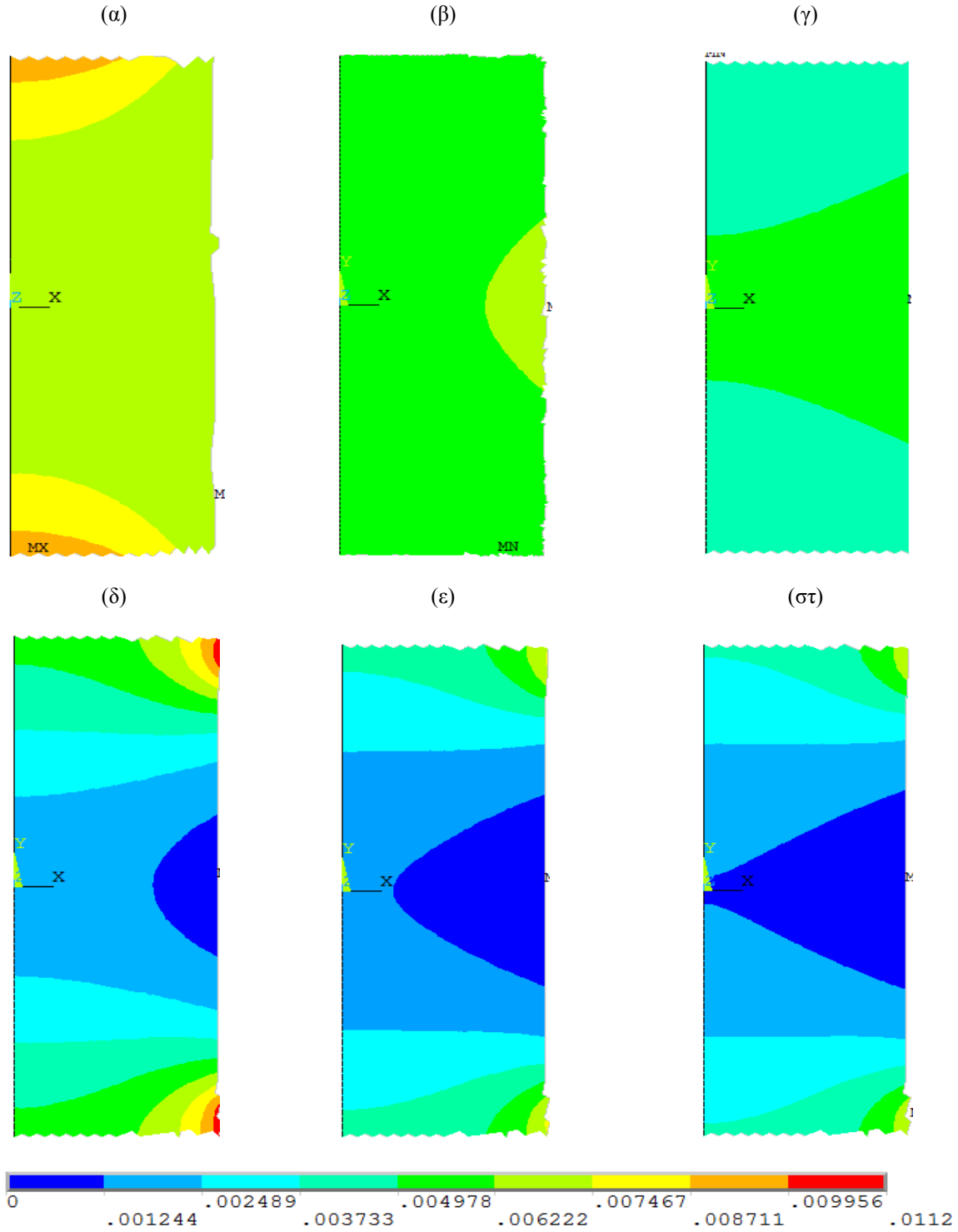
Όπως έγινε και με τον βασικό θάλαμο θωράκισης μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά σε μαγνητικό πεδίο των παραλλαγών του σε πεδίο με μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής $B_{\max} = 0.0538T$ που παράγεται από το πηνίο εξαιτίας επιβολής πυκνότητας ρεύματος σε αυτό ίση με $JS = -10000A/m^2$.



Σχήμα 6-7: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο συνολικό μοντέλο για θάλαμο θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης

Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου στα συνολικά μοντέλα (πηνίο, θάλαμος, αέρας) παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-7** που προηγείται. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις κατανομές μαγνητικής επαγωγής που ακολουθούν, για λόγους καλύτερης εποπτείας έχει χρησιμοποιηθεί κοινή κλίμακα. Είναι εμφανές ότι η μαγνητική επαγωγή συγκεντρώνεται στους κυλίνδρους του θαλάμου θωράκισης. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6-8** παρουσιάζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του

θαλάμου θωράκισης και συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως αυτή ορίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6-8: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη περιοχή ενδιαφέροντος στο εσωτερικό θαλάμου θωράκισης (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης

Στη συνέχεια παρατίθεται ο **Πίνακας 6-1** που περιέχει τις μέγιστες τιμές του πεδίου στο συνολικό μοντέλο (Bout), στην περιοχή ενδιαφέροντος (Bin) καθώς και τον συντελεστή θωράκισης (Sf) όπως αυτός αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Παρατηρείται ότι η

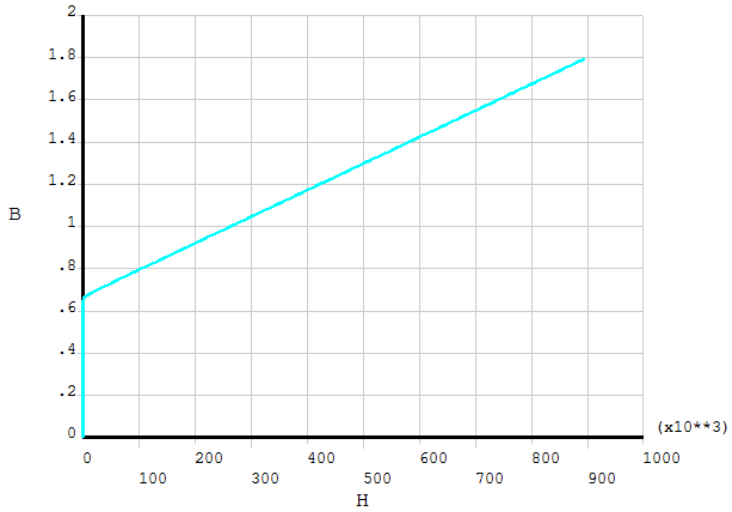
μέγιστη τιμή μαγνητικού πεδίου βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις πάνω στα τοιχώματα του θαλάμου θωράκισης.

Πίνακας 6-1: Μέγιστες τιμές πεδίου στο συνολικό μοντέλο (Bout), στην περιοχή ενδιαφέροντος (Bin) και ο συντελεστής θωράκισης (Sf) (α) Ανοιχτός, (β) Κλειστός με επίπεδα καπάκια, (γ) Κλειστός με κυρτά καπάκια, Κλειστός με κυρτά καπάκια (δ) μικρού μήκους επικάλυψης, (ε) μεσαίου μήκους επικάλυψης, (στ) μεγάλου μήκους επικάλυψης

	Bout (T)	Bin(T)	Sf(dB)
(α)	34,41	0,009635	71,06
(β)	34,49	0,006371	74,67
(γ)	30,39	0,005401	75,01
(δ)	31,67	0,011204	69,02
(ε)	28,10	0,007860	71,07
(στ)	27,26	0,007443	71,27

6.3 Διερεύνηση μεταβαλλόμενης μαγνητικής διαπερατότητας στο mumetal

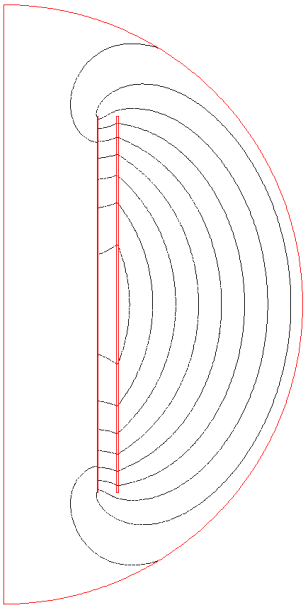
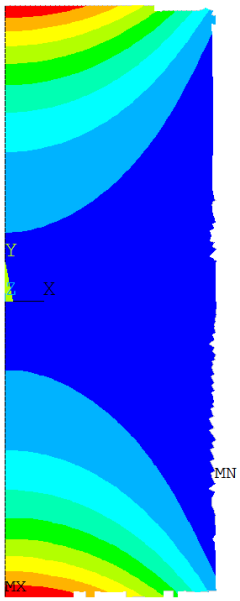
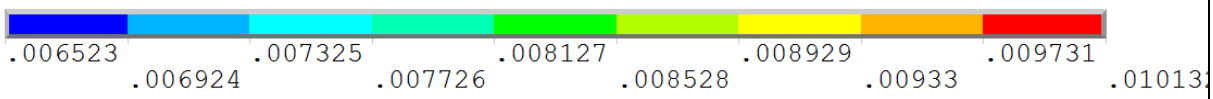
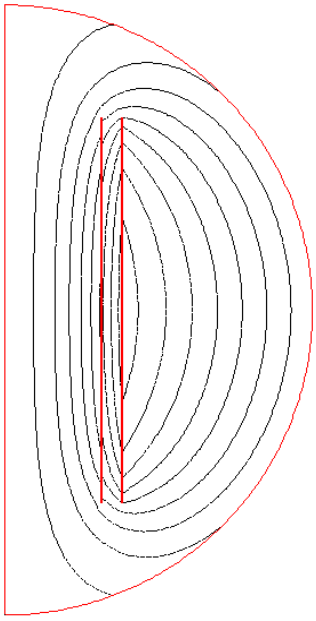
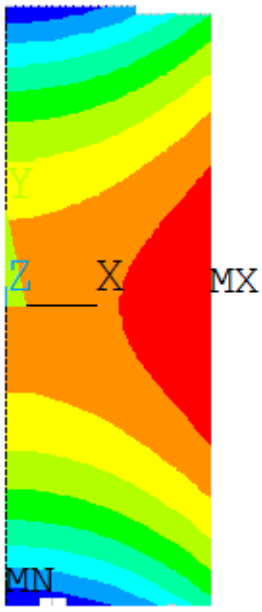
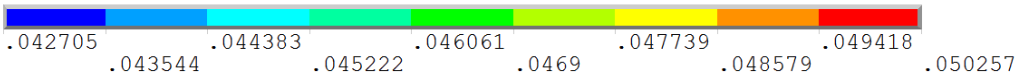
Κατά τη μοντελοποίηση του βασικού θαλάμου θωράκισης προέκυψε το θέμα της επίδρασης της μεταβλητής τιμής μαγνητικής διαπερατότητας στα αποτελέσματα της μαγνητοστατικής ανάλυσης. Για να διερευνηθεί η επίδραση που έχει κάτι τέτοιο στη θωράκιση έγινε η μοντελοποίηση ενός κυλίνδρου πάχους l = 0.5 mm από mumetal. Δοκιμάστηκε σταθερή και μεταβλητή τιμή μαγνητικής διαπερατότητας μ με τη χρήση καμπύλης B – H που βρέθηκε στη βιβλιογραφία για το mumetal (**Σχήμα 6-9**).



Σχήμα 6-9: Διάγραμμα B-H του mumetal

Αρχικά, έγινε μια διερεύνηση για το πεδίο που δημιουργεί πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα πυκνότητας JS=-10000A/m^2 και τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 6-10**. Στο

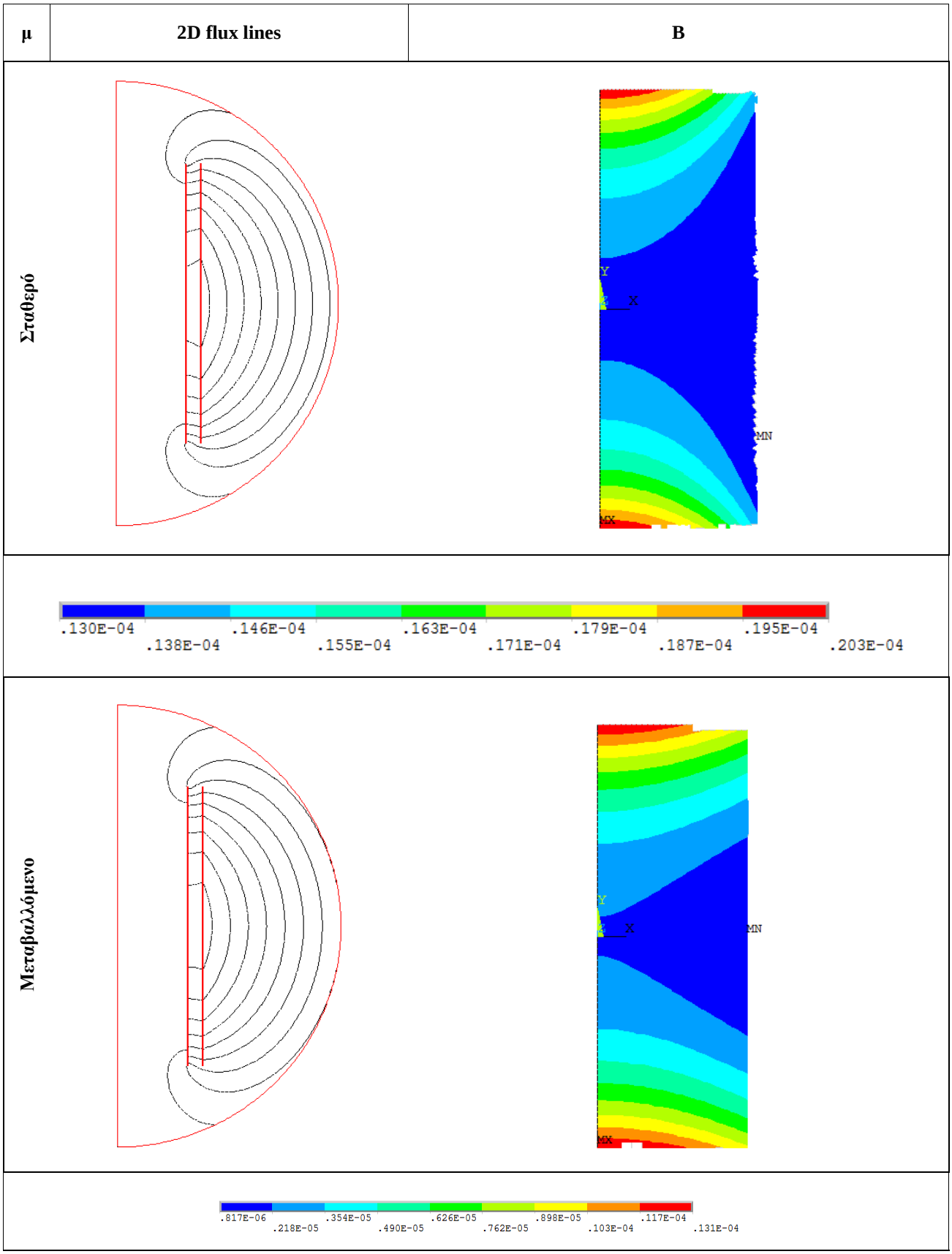
σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι γραμμές ροής του πεδίου και κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του κυλίνδρου, συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

μ	2D flux lines	B
σταθερό		
		
Μεταβαλλόμενο		
		

Σχήμα 6-10: Μαγνητικές γραμμές ροής και κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για σταθερή και μεταβαλλόμενη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ για JS = 10000 A/m^2

Είναι προφανές ότι το υλικό αν χρησιμοποιηθεί η καμπύλη B-H φτάνει στον κόρο του και παύει να λειτουργεί επαρκώς. Στη συνέχεια έγινε η ίδια δοκιμή για το πεδίο που παράγει πηνίου που διαρέεται από ρεύμα πυκνότητας 20A/m^2 δηλαδή Bmax = 100 μT που είναι και το πεδίο που τελικά θα κληθεί να αντιμετωπίσει ένας αντίστοιχος θάλαμος θωράκισης, και τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 6-11** που ακολουθεί.

Σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρείται διαφορά στις γραμμές ροής αλλά αλλάζει ελαφρώς η κατανομή του πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Από αυτό το σημείο και πέρα η μοντελοποίηση του mumetal θα γίνει με σταθερή τιμή μαγνητικής διαπερατότητας αφού στο μέγεθος του πεδίου έναντι του οποίου ζητείται η θωράκιση το υλικό δεν φτάνει στον κόρο.



Σχήμα 6-11: Μαγνητικές γραμμές ροής και κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για σταθερή και μεταβαλλόμενη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας μ για JS = 20 A/m^2

7 Βελτιστοποίηση στο λογισμικό ANSYS

Το ANSYS εκτός από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, περιέχει και δύο είδη βελτιστοποίησης, την *Βελτιστοποίηση Τοπολογίας* (Topological Optimization) και την *Βελτιστοποίηση Σχεδίασης* (Design Optimization). Η Βελτιστοποίηση Σχεδίασης είναι μια διαδικασία που επιδιώκει να καθορίσει το Βέλτιστο Σχέδιο. Με τον όρο "*Βέλτιστο Σχέδιο*" εννοείται το σχέδιο που καλύπτει όλες τις δεδομένες απαιτήσεις αλλά με την ελάχιστη δαπάνη συγκεκριμένων πόρων όπως το βάρος, η επιφάνεια, ο όγκος, η πίεση, το κόστος κλπ. Με άλλα λόγια το βέλτιστο σχέδιο είναι, συνήθως, αυτό που είναι κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερο [23].

Ουσιαστικά κάθε πτυχή ενός σχεδιασμού μπορεί να βελτιστοποιηθεί: οι διαστάσεις (όπως το πάχος), η μορφή (όπως οι ακτίνες καμπυλότητας), η τοποθέτηση των υποστηρίξεων, το κόστος της επεξεργασίας, οι ιδιότητες υλικών κ.ά.. Πραγματικά οποιοδήποτε στοιχείο εισάγεται στο λογισμικό ANSYS μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή παραμέτρων μπορεί να υποβληθεί σε Βελτιστοποίηση είτε Σχεδίασης είτε Τοπολογίας.

7.1 Διαδικασία βελτιστοποίησης με το λογισμικό ANSYS

Στο ANSYS η διαδικασία για την βελτιστοποίηση σχεδίασης περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία ενός αρχικού αρχείου ανάλυσης. Το αρχείο αυτό πρέπει να έχει κατάληξη .lgw και πρέπει να περιλαμβάνει μία πλήρη ανάλυση και συγκεκριμένα:
2. Παραμετρική δημιουργία του μοντέλου (PREP7)
3. Διαδικασία επίλυσης (SOLUTION)
4. Ανάκτηση και αντιστοίχηση των παραμέτρων στις αντίστοιχες ποσότητες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές κατάστασης και σαν αντικειμενική συνάρτηση (POST1)
5. Αρχικοποίηση της ανάλυσης βελτιστοποίησης
6. Εισαγωγή της επιλογής OPT και προσδιορισμός του αρχείου ανάλυσης (OPT)
7. Δήλωση των μεταβλητών βελτιστοποίησης
8. Επιλογή της μεθόδου βελτιστοποίησης
9. Προσδιορισμός των βρόγχων ελέγχου βελτιστοποίησης
10. Πραγματοποίηση του κύκλου βελτιστοποίησης
11. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δεδομένων σχεδίασης βελτιστοποίησης καθώς και των αποτελεσμάτων του μετεπεξεργαστή (POST1)

7.2 Βελτιστοποίηση Σχεδίασης

Ειδικά στη βελτιστοποίηση σχεδίασης, το λογισμικό ANSYS παρέχει συγκεκριμένες μεθόδους βελτιστοποίησης. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία θα χρησιμοποιηθούν δύο από αυτές, η Sub -problem Approximation *(προσέγγισης υπό-προβλήματος)* και η First order (*πρώτης τάξης*), οι οποίες περιγράφονται σύντομα στη συνέχεια.

Sub-problem Approximation (προσέγγισης υπό-προβλήματος)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία βελτιωμένη μέθοδο μηδενικής τάξης (zero order) που μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά σε πολλές εφαρμογές. Χρησιμοποιεί μόνο τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών και την αντικειμενική συνάρτηση αλλά όχι τις παραγώγους αυτών. Οι εξαρτημένες μεταβλητές, αρχικά αντικαθίστανται από προσεγγίσεις τύπου ελάχιστων τετραγώνων και το περιορισμένο πρόβλημα ελαχιστοποίησης μετατρέπεται σε μη περιορισμένο με τη χρήση συναρτήσεων ποινής. Η ελαχιστοποίηση εκτελείται σε κάθε επανάληψη στην προσεγγισμένη, ποινικοποιημένη συνάρτηση που ονομάζεται "υπό πρόβλημα" (sub problem) εωσότου επιτευχθεί η σύγκλιση ή ο αριθμός των προκαθορισμένων επαναλήψεων. Στην παρούσα μέθοδο κάθε επανάληψη (iteration) αντιστοιχεί σε ένα πλήρη βρόχο ανάλυσης. Με δεδομένο ότι η μέθοδος βασίζεται σε προσεγγίσεις της αντικειμενικής συνάρτησης και των εξαρτημένων μεταβλητών, είναι απαραίτητο ένα συγκεκριμένο πλήθος από δεδομένα να μπορούν να δημιουργηθούν απευθείας από το χρήστη χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους και εργαλεία βελτιστοποίησης. Αν δε γίνει αυτό η μέθοδος *Sub-problem* θα δημιουργήσει αυτόματα κάποια τυχαία σχεδιαστικά σύνολα για να τα χρησιμοποιήσει στη συνέχεια.

Ένα σημεία που πρέπει να προσεχθεί σε αυτή τη μέθοδο είναι ότι είναι πιθανό να οδηγήσει σε τοπικό και όχι σε ολικό ελάχιστο και παίζει σημαντικό ρόλο το αρχικό σημείο από όπου ξεκινά η βελτιστοποίηση.

First order (πρώτης τάξης)

Η μέθοδος First order είναι μια μέθοδος που βασίζεται στη σχεδιαστική ακρίβεια του μοντέλου και χρησιμοποιείται σε προβλήματα που απαιτούν υψηλή ακρίβεια. Η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιστοποίησης κάνει χρήση πληροφοριών από τις παραγώγους πρώτης τάξης των παραμέτρων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Το περιορισμένο πρόβλημα μετατρέπεται σε μη περιορισμένο μέσω συναρτήσεων ποινής. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις ποινής παραγωγίζονται οδηγώντας σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση αναζήτησης στο χώρο των πιθανών σχεδίων. Αναζητήσεις με τη μέθοδο

μέγιστων κλίσεων και συζυγών κλίσεων εκτελούνται σε κάθε επανάληψη (iteration) εωσότου το πρόγραμμα οδηγηθεί σε σύγκλιση. Κάθε επανάληψη αποτελείται από υπό επαναλήψεις που περιλαμβάνουν υπολογισμούς για τις παραγώγους και τις κατευθύνσεις αναζήτησης. Με άλλα λόγια μια επανάληψη της μεθόδου βελτιστοποίησης First Order αποτελείται από πολλούς βρόχους ανάλυσης.

Σύγκριση των δύο μεθόδων

Το λογισμικό ANSYS, και στις δύο παραπάνω μεθόδους, εκτελεί μια σειρά από αναλυτικούς – υπολογιστικούς κύκλους τροποποίησης του μοντέλου. Η μέθοδος SubProblem Approximation μπορεί ικανοποιητικά να εφαρμοστεί στα πιο πολλά προβλήματα και να οδηγήσει σε ικανοποιητικό αποτέλεσμα, ενώ η First Order μέθοδος είναι πιο ακριβής και ταυτόχρονα πιο χρονοβόρα και με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Παρόλα αυτά η υψηλή ακρίβεια δεν εγγυάται πάντα και το καλύτερο αποτέλεσμα. Εν κατακλείδι, η First Order συγκρινόμενη με τη μέθοδο SubProblem Approximation, είναι πιο απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ και πιο ακριβής. Με γνώμονα τα παραπάνω, και με δεδομένο ότι το μοντέλο προς βελτιστοποίηση δεν είναι απαιτητικό σε υπολογιστική ισχύ στις βελτιστοποιήσεις που θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια θα δοκιμαστούν και οι δύο μέθοδοι.

8 Διερεύνηση παραμέτρων θαλάμου θωράκισης

Στο παρόν κεφάλαιο ορίζονται οι βασικές παράμετροι του θαλάμου θωράκισης και διερευνάται η συμπεριφορά του με τη μεταβολή των τιμών τους. Οι βασικές παράμετροι που διακρίνονται είναι (α) *το πάχος* και (β) *η τιμή μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal*, καθώς και (γ) *το πάχος των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα*. Η επίδραση της πρώτης παραμέτρου στο μοντέλο θα διερευνηθεί με τη μέθοδο πολλαπλών δοκιμών, ή δοκιμής και σφάλματος, ενώ η επίδραση των άλλων δυο παραμέτρων θα διερευνηθεί με τη χρήση των δύο μεθόδων βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και παρέχονται από το λογισμικό ANSYS.

8.1 Διερεύνηση πάχους υλικού mumetal

Το πάχος των στρώσεων του υλικού υψηλής διαπερατότητας (mumetal) σύμφωνα με μια ενδεικτική έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε σε κατασκευαστές είναι διακριτά και κυμαίνονται από 0.25 mm έως 1.2 mm. Στη διερεύνηση που ακολουθεί, αξίζει να σημειωθεί ότι μεταβάλλεται το πάχος τόσο της εξωτερικής όσο και της εσωτερικής στρώσης του υλικού υψηλής διαπερατότητας προκειμένου να φανεί ο τρόπος μεταβολής του πεδίου μέσα στο θάλαμο θωράκισης σε σχέση με το πάχος του υλικού. Αντίθετα, η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας και το πάχος αέρα μεταξύ των στρώσεων του mumetal είναι μεγέθη σταθερά με τιμές μ=5000 και $l_4 = l_2 = 5$ mm.

Δεδομένου ότι η αύξηση του πάχους του mumetal σημαίνει και αύξηση του κόστους του, οι δοκιμές που γίνονται, περιορίζονται σε πάχη 0.50 mm, 0.75 mm και 1.00 mm. Αρχικά, διατηρείται το πάχος της εσωτερικής στρώσης σταθερό (l_5 = 0.50 mm) ούτως ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της θωράκισης κατά τη μεταβολή του πάχους της εξωτερικής στρώσης l_3.

Για την σύγκριση της αποτελεσματικότητας του θαλάμου θωράκισης χρησιμοποιείται ένας συντελεστής μείωσης της τιμής του πεδίου που δίνεται από τη σχέση:

$$\Sigma\mathrm{M}\% = \frac{B_{\max \Pi\eta\nu\acute{\iota}ou}}{\mathrm{B}_{in}} \cdot 100\%$$

όπου B_{in} είναι η μέγιστη μετρούμενη τιμή του πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου και $B_{\max \Pi\eta\nu\acute{\iota}ou}$ η μέγιστη τιμή του πεδίου που παράγει το πηνίο διέγερσης. Η τιμή αυτή είναι ίση με $B_{\max \Pi\eta\nu\acute{\iota}ou} = 0,05358\mathrm{T}$ και βρίσκεται στην περιοχή από την οποία περνά ο κεντρικός άξονας του θαλάμου θωράκισης.

Στον **Πίνακας 8-1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται η τιμή του πλάτους l_3 στη δεύτερη η ελάχιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου μέσα στο θάλαμο και συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος καθώς και η τιμή του συντελεστή μείωσης.

Πίνακας 8-1: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για διαφορετικές τιμές του l_3

l_3 (mm)	Bmin (T)	ΣΜ (%)
0.5	0.007443	14.9%
0.75	0.006873	13.7%
1	0.006375	12.8%

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η αντίστοιχη διαδικασία για την εσωτερική στρώση του mumetal l_5. Συγκεκριμένα, διατηρείται σταθερό το πάχος της εξωτερικής στρώσης (l_3 = 0.50 mm) και μεταβάλλεται το πάχος της εσωτερικής. Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-2),** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη μεταβολή του πάχους της εσωτερικής στρώσεις.

Πίνακας 8-2: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για διαφορετικές τιμές του l_3

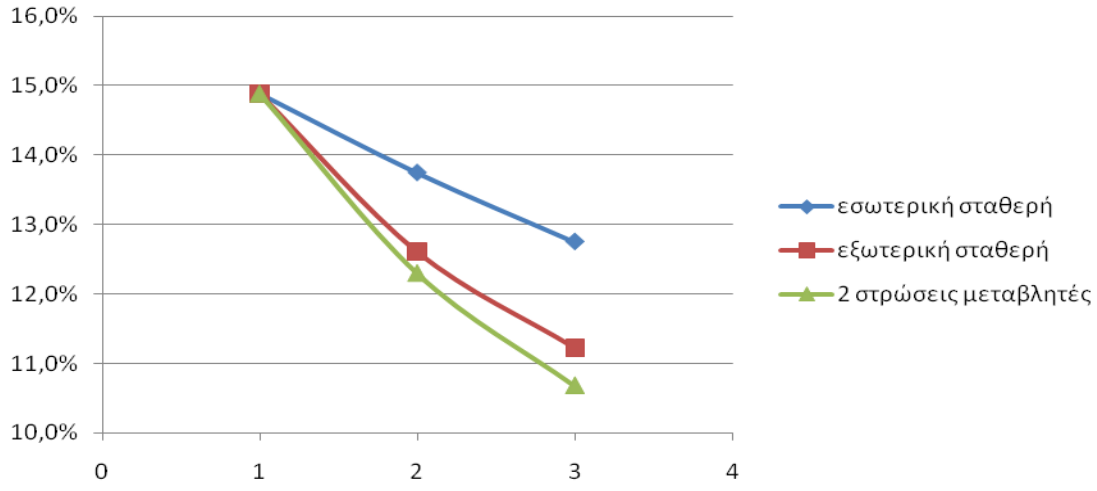
l_5 (mm)	Bmin (T)	ΣΜ (%)
0.5	0.007443	14.9%
0.75	0.006305	12.6%
1	0.005613	11.2%

Τέλος, διερευνάται η συμπεριφορά της θωράκισης στην ταυτόχρονη μεταβολή του πάχους και των δύο στρώσεων. Σε αυτήν την περίπτωση το πάχος και των δύο στρώσεων έχει κάθε φορά ίδια τιμή και μεταβάλλεται ταυτόχρονα. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-3**).

Πίνακας 8-3: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης και τιμές του συντελεστή μειωσης για ταυτόχρονη μεταβολή των παχών l_5 και l_3

l_5 (mm)	l_3 (mm)	Bmin (T)	ΣΜ (%)
0.50	0.50	0,007443	14,9%
0.75	0.75	0,006150	12,3%
1.00	1.00	0,005340	10,7%

Στο **Σχήμα 8-1** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καμπύλες των παραπάνω διερευνήσεων.



Σχήμα 8-1: Καμπύλες μεταβολής συντελεστή μείωσης ως προς το πάχος των στρωσεων του mumetal

Όπως είναι φανερό από το παραπάνω σχήμα (**Σχήμα 8-1**) η αύξηση του πάχους των στρώσεων του mumetal, είτε της εξωτερικής είτε της εσωτερικής είτε συνδυασμένα, οδηγεί σε μείωση του ποσοστού της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου που εισέρχεται στο θάλαμο θωράκισης. Ειδικότερα στις δύο τελευταίες περιπτώσεις, δηλαδή στην περίπτωση αύξησης του πάχους της εξωτερικής στρώσης l_3 και σε αυτήν της ταυτόχρονης αύξησης των παχών l_5 και l_3, παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση αυτού του ποσοστού. Επίσης, ενώ κατά τη μεταβολή του πάχους της εξωτερικής στρώσης ο συντελεστής μειώνεται γραμμικά δε συμβαίνει το ίδιο κατά τη μεταβολή του πάχους της εξωτερικής. Δεδομένων, λοιπόν, των παραπάνω αλλά και των μικρών διαφορών μεταξύ των δύο τελευταίων περιπτώσεων (μεταβολή l_3 και μεταβολή l_5 και l_3 ταυτόχρονα), συμπεραίνεται ότι αποτελεσματικότερη θωράκιση επιτυγχάνεται όταν το πάχος της εσωτερικής στρώσης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αυτό της εξωτερικής.

8.2 Βελτιστοποίηση της τιμής μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal

Δεδομένης της άμεσης σύνδεσης κόστους mumetal και τιμής μαγνητικής διαπερατότητας (ανάλογη) είναι ανάγκη να ευρεθεί μια ικανοποιητική τιμή για μαγνητικής διαπερατότητας η οποία να επιτυγχάνει ικανοποιητική θωράκιση με το μικρότερο δυνατό κόστος. Σύμφωνα, με τους κατασκευαστές τέτοιων υλικών η μαγνητική διαπερατότητα του λαμβάνει τιμές από μ = 5000 - 350000, επομένως αυτό είναι το εύρος των τιμών που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση.

Οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν είναι η μέθοδος Sub-problem Approximation και η First order. Κοινά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν και στις δύο μεθόδους είναι τα παρακάτω:

- Μεταβλητές σχεδίασης (Design Variables): η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας. Το εύρος τιμών καθορίζεται και είναι ίσο με μ=5000-350000.
- Μεταβλητές κατάστασης (State Variables) δεν ορίζονται σε αυτήν την περίπτωση
- Αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function): η μέγιστη τιμή του πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης δηλαδή η B_{in}.

Το πλήθος των επαναλήψεων επιλέχθηκε και για τις δύο μεθόδους 100.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου sub-problem approximation πραγματοποιείται τρεις φορές η διαδικασία της βελτιστοποίησης με διαφορετική τιμή εκκίνησης της τιμής μαγνητικής διαπερατότητας κάθε φορά. Συγκεκριμένα, εκκινείται από τις τιμές 5000, 150000 και 200000. Σε κάθε περίπτωση η μέθοδος συνέκλινε μετά από τέσσερις επαναλήψεις. Η βέλτιστη λύση είναι αυτή που έχει τη μικρότερη τιμή πεδίου στο εσωτερικό και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-4**)

Πίνακας 8-4: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τιμής μαγνητικής διαπερατότητας mumetall με τη μέθοδο Sub – Problem Approximation

Σημείο εκκίνησης μ	μ_{best}	B_{min}
5000	249000	0,00269
150000	337000	0,00265
200000	324000	0,00266

Η συνολικά βέλτιστη λύση από τις τρεις διαφορετικές βελτιστοποιήσεις είναι

$$\mu_{sub-opt} = 337000$$

$$B_{\max-sub-opt} = 0.00265T$$

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου First Order η βελτιστοποίησης πραγματοποιείται δύο φορές με διαφορετική τιμή εκκίνησης της μαγνητικής διαπερατότητας 5000 και 100000, αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση η μέθοδος συνέκλινε μετά από τέσσερις επαναλήψεις. Η βέλτιστη λύση είναι αυτή που έχει τη μικρότερη τιμή πεδίου στο εσωτερικό και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-5**).

Πίνακας 8-5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης τιμής μαγνητικής διαπερατότητας mumetall με τη μέθοδο First Order

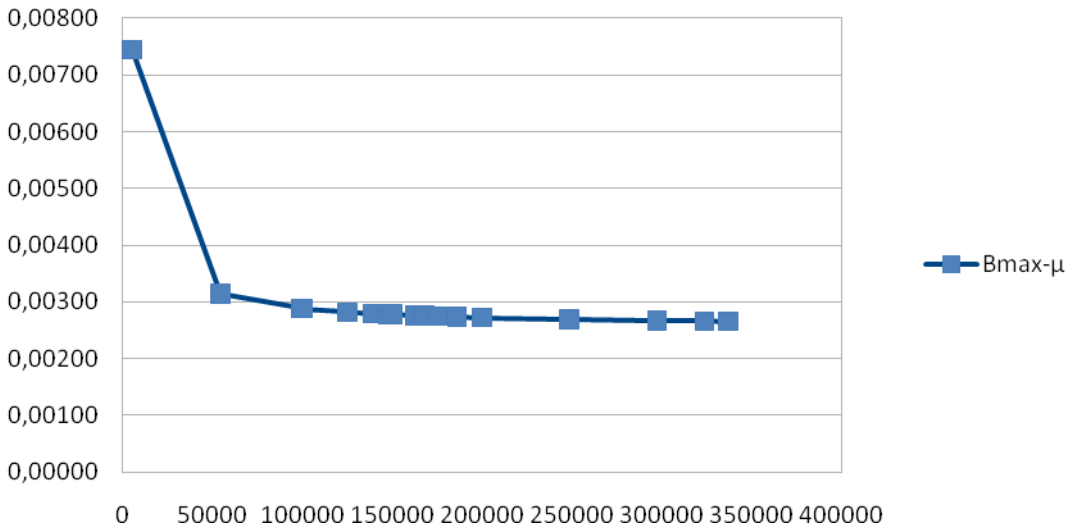
Σημείο εκκίνησης μ	**μ_{best}**	**B_{min}**
5000	175000	0,00274
100000	186000	0,00273

Η συνολικά βέλτιστη λύση είναι αυτή που έχει τη μικρότερη τιμή πεδίου στο εσωτερικό και συγκεκριμένα είναι:

$$\mu_{sub-opt} = 186000$$

$$B_{\max-sub-opt} = 0.00273T$$

Με σκοπό την εποπτικότερη παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, συγκεντρώνονται τα ζευγάρια τιμών μ – B_{min} που προέκυψαν από όλες τις διαδικασίες βελτιστοποίησης. Απομακρύνοντας τις κοινές τιμές που προέκυψαν κατά την σύμπτυξη αυτή, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 8-2** το διάγραμμα μ – B_{min}.



Σχήμα 8-2 Καμπύλη μεταβολής τιμής έντασης πεδίου ως προς την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal

Όπως είναι εμφανές το διάγραμμα αυτό έχει ασυμπτωτική συμπεριφορά προς μία τιμή έντασης του πεδίου. Δηλαδή, με αύξηση της τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού η μέγιστη τιμή του πεδίου στο εσωτερικό δε θα μεταβάλλεται περεταίρω. Επίσης, στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η αύξηση μέχρι περίπου μ=70000 επιφέρει αξιόλογη μείωση του πεδίου ενώ περεταίρω αύξηση της δεν έχει διαφορά. Οπότε στην προκειμένη περίπτωση βέλτιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού θωράκισης είναι:

$\mu_{opt} = 50000$

8.3 Βελτιστοποίηση πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα

Σε αυτό το σημείο είναι ανάγκη να διερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζεται η συμπεριφορά της θωράκισης εξαιτίας του πάχους των στρωμάτων αέρα μεταξύ των στρώσεων των υλικών θωράκισης. Στις έως τώρα μοντελοποιήσεις το πάχος του αέρα θεωρείται ίσο με 5 mm. Στη βελτιστοποίηση που ακολουθεί το εύρος τιμών που λαμβάνουν τα ενδιάμεσα στρώματα αέρα κινείται από 1 – 10 mm.

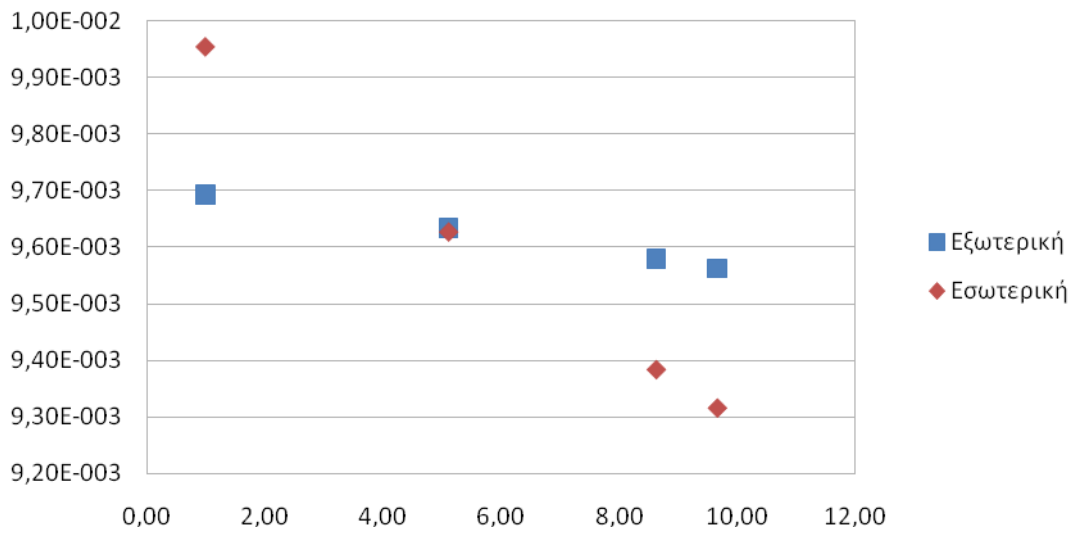
Οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν και σε αυτήν την περίπτωση είναι η μέθοδος Sub-problem Approximation και η First order. Κοινά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν και στις δύο μεθόδους είναι τα παρακάτω:

- Μεταβλητές σχεδίασης (Design Variables): το πάχος των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα. Το εύρος τιμών καθορίζεται και είναι ίσο με 1mm-10mm.
- Μεταβλητές κατάστασης (State Variables) δεν ορίζονται σε αυτήν την περίπτωση
- Αντικειμενική συνάρτηση (Objective Function): η μέγιστη τιμή του πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος στο εσωτερικό του θαλάμου θωράκισης δηλαδή η B_{in}.

Να σημειωθεί εδώ ότι λόγω υψηλών απαιτήσεων του συγκεκριμένου μοντέλου σε υπολογιστική ισχύ λόγω κατασκευής πλέγματος, θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση στην πιο απλή γεωμετρία του θαλάμου θωράκισης που είναι αυτή του ανοιχτού κυλίνδρου.

Κατά τη βελτιστοποίηση μέσω της μεθόδου Sub-problem Approximation θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα διαφορετικών περιπτώσεων. Τουτέστιν, στην πρώτη περίπτωση διατηρείται το πάχος της εσωτερικής στρώσης σταθερό ενώ μεταβάλλεται αυτό της εξωτερικής και στην δεύτερη πραγματοποιείται ακριβώς το αντίστροφο, δηλαδή παραμένει το πάχος της εξωτερικής στρώσης σταθερό και μεταβάλλεται αυτό της εσωτερικής.

Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις πραγματοποιούνται τέσσερις επαναλήψεις με τιμές εκκίνησης και για τις δύο στρώσεις 5 mm και τα αποτελέσματα καταγράφονται στο παρακάτω διάγραμμα (**Σχήμα 8-3**).



Σχήμα 8-3: Μεταβολή μέγιστη τιμής μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του πάχους των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα

Οι βέλτιστες τιμές και για τις δύο περιπτώσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-6**).

Πίνακας 8-6: Βέλτιστες τιμές πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα

Εσωτερική στρώση	Εξωτερική στρώση
$P_{\varepsilon\sigma-opt} = 9,66mm$	$P_{\varepsilon\sigma} = 5mm$
$P_{\varepsilon\xi} = 5mm$	$P_{\varepsilon\xi-opt} = 9,66mm$
$B_{\max-sub-opt} = 0.00932T$	$B_{\max-sub-opt} = 0.00956T$

Στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση με ταυτόχρονη μεταβολή του πάχους και των δύο στρώσεων αέρα με τιμές εκκίνησης πάχους εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης ίσες με 5 mm. Με τη χρήση της μεθόδου Sub-problem Approximation, η σύγκλιση επιτυγχάνεται ύστερα από έξι επαναλήψεις και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-7**).

Πίνακας 8-7: Διαδικασία βελτιστοποίησης ταυτόχρονης μεταβολής πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα με τη μέθοδο sub – Problem Approximation

Ρεξ	5,00	8,62	4,49	5,84	8,42	9,60
Ρεξ	5,00	5,11	7,23	6,56	9,43	9,85
BMAX	0,00964	0,00957	0,00948	0,00951	0,00928	0,00923

Με τον ίδιο τρόπο έγινε βελτιστοποίηση με τη μέθοδο First Order, η οποία συνέκλινε ύστερα από 3 επαναλήψεις και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 8-8**).

Πίνακας 8-8: Διαδικασία βελτιστοποίησης ταυτόχρονης μεταβολής πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα με τη μέθοδο First Order

Ρεξ	5,00	6,03	10,00
Ρεσ	5,00	10,00	10,00
BMAX	0,00964	0,00928	0,00921

Όπως είναι φανερό από το **Σχήμα 8-3** η μπλε ευθεία που αφορά στη μεταβολή του πάχους της εξωτερικής στρώσης είναι σχεδόν σταθερή οπότε συμπεραίνεται ότι το πάχος της εξωτερικής στρώσης δε παίζει μεγάλο ρόλο στην βελτίωση της θωράκισης. Αυτό είναι λογικό καθώς η εξωτερική στρώση αέρα παρεμβάλλεται μεταξύ της στρώσης αλουμινίου και της στρώσης υλικού θωράκισης. Το αλουμίνιο έχει ίδια τιμή μαγνητικής διαπερατότητα με τον αέρα (μ=1) και δεδομένου ότι πραγματοποιείται στατική ανάλυση (δηλαδή διερευνάται η ικανότητα του θαλάμου θωράκισης σε στατικό μαγνητικό πεδίο, όπως είναι αυτό της γης) το αλουμίνιο έχει την ίδια συμπεριφορά με τον αέρα. Όσον αφορά στην εσωτερική στρώση ύστερα από βελτιστοποίηση που έγινε και με τις δύο μεθόδους (Sub-problem Approximation και First Order) συμπεραίνεται ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο στρώσεων υλικού μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας επιφέρει μείωση του εισερχόμενου πεδίου στην υπό προστασία περιοχή.

9 Γενικά Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση του συνόλου των μοντελοποιήσεων που προδιαγραφήκαν και των διαδικασιών της βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν σε βασικές παραμέτρους του θαλάμου θωράκισης εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα τα οποία μπορούν να οδηγήσουν στην κατασκευή ενός θαλάμου θωράκισης από μαγνητικά πεδία της τάξης των B = 100 μT.

Καταρχάς παρατηρήθηκε ότι η γεωμετρία παίζει σημαντικό ρόλο στην θωράκιση. Όπως φαίνεται και στο **Κεφάλαιο 2.2** κυλινδρικά σχήματα με μεγάλες καμπυλότητες προσφέρουν πορεία εύκολης διέλευσης στις γραμμές ροής με αποτέλεσμα να «ελκύουν» όλο και περισσότερες γραμμές ροής, δηλαδή να εκτρέπουν το πεδίο. Επομένως, το πεδίο στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι μικρότερο. Βέβαια, γεωμετρίες στις οποίες τα καπάκια είναι συνέχεια του βασικού κορμού του θαλάμου είναι κατασκευαστικά αδύνατες, οπότε θεωρείται πιο σωστή η χρήση θαλάμων με εξωτερικά κουμπωτά καπάκια τα οποία αποτελούν κατασκευαστικά εφικτή λύση. Επιπροσθέτως, η διπλή στρώση από υλικό mumetal, είχε αξιοσημείωτη επίδραση στην απόδοση της θωράκισης. Ενώ παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης της θωράκισης και κατά την αύξηση του πάχους του ενδιάμεσου αέρα μεταξύ αυτών των στρώσεων.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνεται ότι αντικείμενο μελλοντικής μελέτης θα μπορούσε να είναι η επίδραση επιπλέον των δύο στρώσεων υλικού mumetal. Επίσης η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μοντελοποιήσεων με πειραματικές μεθόδους αποτελεί την εξέλιξη της παραπάνω διερεύνησης καθώς είναι σημαντικό να γίνει η σύνδεση των ιδιοτήτων του μοντέλου με την πραγματική κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του συγκεκριμένου μοντέλου. Δεδομένου του μεγάλου κόστους κατασκευής ενός θαλάμου θωράκισης με πολλαπλές στρώσεις υλικών πολύ υψηλής διαπερατότητες (mumetal, permalloy), είναι χρήσιμη η διερεύνηση, με τη χρήση μοντελοποίησης αρχικά, θαλάμου θωράκισης από τυπικό υλικό (πολύ μικρό κόστος), όπως το ατσάλι (steel), διερευνώντας τον αριθμό στρώσεων του υλικού αυτού καθώς και το πάχος των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα που θα μπορούσαν να έχουν το ίδιο αποτέλεσμα θωράκισης με αυτό του θαλάμου που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τέλος, ως συνέχεια, είναι απαραίτητη η διερεύνηση της συμπεριφοράς θαλάμου θωράκισης που θα αποκόπτει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και μαγνητικό πεδίο υψηλών συχνοτήτων. Η σημασία μιας τέτοιας διερεύνησης είναι μεγάλη καθώς οι συσκευές που απαιτούν προστασία βρίσκονται ως επί των πλείστων σε χώρους με υψίσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Αναφορές

[1]http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82

[2] Χριστοφόρου – Αισθητήρες Σημειώσεις ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού 2011

[3] http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/fisiki2/askisi7.pdf

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic)

[5] http://amuneal.com/magnetic-shielding/theory-design/magnetic-shielding-materials

[6] Arnold H. Green - Shielding Magnetic Fields

[8] Τσαλίκα - Μαγνητική θωράκιση γενικά

[9] E. Baum and J. Bork, Systematic design of magnetic shields, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 101 (1991) 69-74, North-Holland

[10] H. Kaden, Wirbelstrome und Schirmung in der Nachrichtentechnik, vol. 2, Aufl. (Springer, Berlin-Giittingen- Heidelberg, 1959).

[11] W.G. Wadey, Rev. Sci. Instr. 27, 11 (1956) 910-916.

[12] D.U. Gubser, S.A. Wolf, and J.E. Cox, Rev. Sci. Instrum. 50 (1979) 751.

[13] D. Dubbers, Simple formula for multiple mu-metal shields

[14] Γαγάρα Νικολέττα, "Παρελθόν, παρόν και μέλλον των μαλακών μαγνητικών υλικών" Α.Π.Θ., 2010

[15] http://en.wikipedia.org/wiki/Permalloy

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Mu-metal

[17] Μανωλακάκης Γεώργιος, Δούνος Δημήτριος, "Διερεύνηση της καταγραφής βρόγχων υστέρησης μαλακών μαγνητικών υλικών με τη μέθοδο του ροομετρητή",2006

[18]Σ. Καλογεροπούλου, "Μαγνητικές ιδιότητες – Μαγνητικά υλικά", Τεχνολογία υλικών, Τμήμα ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Πειραιά

[19] Γ.Ι. Τσαμασφύρος, Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων ΙΙ, Εκδόσεις Συμμετρία

[20] http://el.wikipedia.org/wiki/Μέθοδος_πεπερασμένων_στοιχείων

[21] Ιωάννης Αντωνιάδης, Χριστόφορος Προβατίδης, Υπολογιστικές Μέθοδοι στις κατασκευές, Πρόχειρες Σημειώσεις ΕΜΠ

[22] Behrouz Fateh, Master Thesis, Modeling, Simulation and Optimization of a Microcoil for MRI-Cell Imaging

[23] Χριστόφορος Προβατίδης, Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών – ΙΙ, Πρόχειρες σημειώσεις, ΕΜΠ

Παράρτημα 1: Κώδικας APDL

Κώδικας κατασκευής και επίλυσης μοντέλου βασικού θαλάμου θωράκισης

```
/BATCH
/NOPR ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO ! Echo following commands to log
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15

KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,1
KEYW,MAGNOD,1
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO

/PREP7

! Element Type
ET,1,PLANE53

KEYOPT,1,1,0  !AZ degree of freedom: static domain, induced eddy current domain
KEYOPT,1,2,0  !Velocity effects ignored
KEYOPT,1,3,1  !Axisymmetric
KEYOPT,1,4,0  !Element coordinate system is parallel to the global coordinate system
```

```
KEYOPT,1,5,0  !Basic element printout
KEYOPT,1,7,0  !Midside node (higher-order) structural elements

ET,2,INFIN110

KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,1
KEYOPT,2,3,1
KEYOPT,2,6,0


! Material Properties

MPTEMP,,,,,,,,          !Air
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,,1

MPTEMP,,,,,,,,          !Al
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,2,,1

MPTEMP,,,,,,,,          !µMetal
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,3,,5000

MPTEMP,,,,,,,,          !Cu
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,4,,1


/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
```

```
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,0
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
!Shielding Room

! Flat kapakia panw (mazi me to keno gia ta kalodia)
RECTNG,0,237,498,500,
RECTNG,237,237.5,498,500,
RECTNG,237.5,242.5,498,500,
RECTNG,242.5,243,498,500,
RECTNG,243,248,498,500,
RECTNG,248,250,498,500,

RECTNG,0,237,493,498,
RECTNG,237,237.5,493,498,
RECTNG,237.5,242.5,493,498,
RECTNG,242.5,243,493,498,
RECTNG,243,248,493,498,
RECTNG,248,250,493,498,

RECTNG,0,237,492.5,493,
RECTNG,237,237.5,492.5,493,
RECTNG,237.5,242.5,492.5,493,
RECTNG,242.5,243,492.5,493,
RECTNG,243,248,492.5,493,
RECTNG,248,250,492.5,493,

RECTNG,0,237,487.5,492.5,
RECTNG,237,237.5,487.5,492.5,
RECTNG,237.5,242.5,487.5,492.5,
RECTNG,242.5,243,487.5,492.5,
RECTNG,243,248,487.5,492.5,
```

```
RECTNG,248,250,487.5,492.5,

RECTNG,0,237,487,487.5,
RECTNG,237,237.5,487,487.5,
RECTNG,237.5,242.5,487,487.5,
RECTNG,242.5,243,487,487.5,
RECTNG,243,248,487,487.5,
RECTNG,248,250,487,487.5,

! Swma
RECTNG,248,250,-487,487,
RECTNG,243,248,-487,487,
RECTNG,242.5,243,-487,487,
RECTNG,237.5,242.5,-487,487,
RECTNG,237,237.5,-487,487,



!Flat kapakia katw
RECTNG,0,237,-498,-500,
RECTNG,237,237.5,-498,-500,
RECTNG,237.5,242.5,-498,-500,
RECTNG,242.5,243,-498,-500,
RECTNG,243,248,-498,-500,
RECTNG,248,250,-498,-500,

RECTNG,0,237,-493,-498,
RECTNG,237,237.5,-493,-498,
RECTNG,237.5,242.5,-493,-498,
RECTNG,242.5,243,-493,-498,
RECTNG,243,248,-493,-498,
RECTNG,248,250,-493,-498,

RECTNG,0,237,-492.5,-493,
```

```
RECTNG,237,237.5,-492.5,-493,
RECTNG,237.5,242.5,-492.5,-493,
RECTNG,242.5,243,-492.5,-493,
RECTNG,243,248,-492.5,-493,
RECTNG,248,250,-492.5,-493,

RECTNG,0,237,-487.5,-492.5,
RECTNG,237,237.5,-487.5,-492.5,
RECTNG,237.5,242.5,-487.5,-492.5,
RECTNG,242.5,243,-487.5,-492.5,
RECTNG,243,248,-487.5,-492.5,
RECTNG,248,250,-487.5,-492.5,

RECTNG,0,237,-487,-487.5,
RECTNG,237,237.5,-487,-487.5,
RECTNG,237.5,242.5,-487,-487.5,
RECTNG,242.5,243,-487,-487.5,
RECTNG,243,248,-487,-487.5,
RECTNG,248,250,-487,-487.5,


!Pigi
RECTNG,300,305,-500,500,     !area 16 cu

!Air
CYL4,0,0,800,90,0,-90,           !area 17 air



ASBA, 67, 66, , DELETE, KEEP
NUMCMP,AREA

*DO,I,1,60
ASBA, 67, I, , DELETE, KEEP
```

```
NUMCMP,AREA
*ENDDO

*DO,I,61,65
ASBA, 68, I, , DELETE, KEEP
NUMCMP,AREA
*ENDDO


!Merge Items
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
/REPLOT

! Material attribution
ASEL,S,AREA,,7,11,1!
ASEL,A,AREA,,19,21,1
ASEL,A,AREA,,42,46,1!
ASEL,A,AREA,,11,,!
ASEL,A,AREA,,23,,!
ASEL,A,AREA,,46,,!
ASEL,A,AREA,,58,,!
ASEL,A,AREA,,54,56,1!
ASEL,A,AREA,,67,68,1!
ASEL,A,AREA,,32,,!
ASEL,A,AREA,,34,,!
ASEL,A,AREA,,17,,!
ASEL,A,AREA,,29,,!
ASEL,A,AREA,,52,,!
ASEL,A,AREA,,58,,!
ASEL,A,AREA,,27,,!
ASEL,A,AREA,,62,,!
ASEL,A,AREA,,64,,!
AATT,1,,1,0,
```

```
ASEL,S,AREA,,1,6,1!
ASEL,A,AREA,,36,41,1!
ASEL,A,AREA,,47,65,6!
ASEL,A,AREA,,12,30,6!
ASEL,A,AREA,,31,,!
AATT,2,,1,0,

ASEL,S,AREA,,13,16,1!
ASEL,A,AREA,,25,26,1!
ASEL,A,AREA,,22,28,6!
ASEL,A,AREA,,33,35,2!
ASEL,A,AREA,,48,51,1!
ASEL,A,AREA,,57,63,6!
ASEL,A,AREA,,60,61,1!
AATT,3,,1,0,

ASEL,S,AREA,,66,,!
AATT,4,,1,0,



!Number of divisions of lines
LSEL, S,,,52,,!
LSEL, A,,,100,,!
LSEL, A,,,50,,!
LSEL, A,,,53,,!
LSEL, A,,,54,,!
LSEL, A,,,29,,!
LSEL, A,,,37,,!
LSEL, A,,,58,,!
```

```
LSEL, A,,,61,,!
LSEL, A,,,62,,!
LSEL, A,,,77,,!
LSEL, A,,,98,,!
LSEL, A,,,101,,!
LSEL, A,,,102,,!
LSEL, A,,,85,,!
LSEL, A,,,106,,!
LSEL, A,,,109,,!
LSEL, A,,,110,,!
LSEL, A,,,192,,!
LSEL, A,,,240,,!
LSEL, A,,,137,,!
LSEL, A,,,238,,!
LSEL, A,,,242,,!
LSEL, A,,,219,,!
LSEL, A,,,129,,!
LSEL, A,,,227,,!
LSEL, A,,,246,,!
LSEL, A,,,250,,!
LSEL, A,,,171,,
LSEL, A,,,190,,
LSEL, A,,,194,,
LSEL, A,,,195,,
LSEL, A,,,179,,
LSEL, A,,,198,,
LSEL, A,,,202,,
LSEL, A,,,203,,
LSEL, A,,,203,,!
LSEL, A,,,114,,
LSEL, A,,,118,,
LSEL, A,,,66,,
LSEL, A,,,70,,!
LSEL, A,,,145,,
```

```
LSEL, A,,,147,,
LSEL, A,,,153,,
LSEL, A,,,155,,!
LSEL, A,,,206,,
LSEL, A,,,210,,!
LSEL, A,,,254,,
LSEL, A,,,258,,!
LSEL, A,,,5,,
LSEL, A,,,7,,!
LSEL, A,,,13,,
LSEL, A,,,15,,
LSEL, A,,,261,,
LSEL, A,,,263,,
LESIZE,ALL, , ,3, , , , ,1
ALLSEL,ALL
/REPLOT



!Meshing
ASEL,S,MAT,,2,,                !Al
AESIZE,ALL,1,

ASEL,S,MAT,,3,,                !μMetal
AESIZE,ALL,1,

ASEL,S,MAT,,4,,                !Cu
AESIZE,ALL,1,

ASEL,S,MAT,,1,,
ASEL,U,AREA,,67,68,1           !air small
AESIZE,ALL,1,

ASEL,S,AREA,,67,,
```

```
ASEL,A,AREA,,68,,     !AirBig
AESIZE,ALL,5,

ALLSEL,ALL
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
AMESH,ALL

!fortia
LSEL,S,,,265
NSLL,S,1
ESLN,S
EMODIF,ALL,TYPE,2,
ALLSEL,ALL

LSEL,S,,,265
SFL,265,INF
ALLSEL,ALL


! Loading conditions
ESEL,S,MAT,,4
BFE,ALL,JS,1, , ,10000, ,
ALLSEL,ALL


FINISH



/SOL
MAGSOLV,0,3,0.001, ,25,

FINISH
```

```
/POST1


PLVECT,B, , , ,VECT,ELEM,ON,0
/image,save,BsumVecs,bmp

numel=elmiqr(0,14)
*DIM,BSUMF,ARRAY,numel,1,1, , ,
*DIM,BSUMP,ARRAY,numel,1,1, , ,

ETABLE,BF,B,SUM
PLETAB,BF,AVG
/CONTOUR, , , 0, , 34,49                    !einai gia tin klimaka
/REPLOT
*VPUT,BSUMF,ELEM,all,ETAB,BF, , ,
/image,save,BsumCont,bmp

NSEL,S,LOC,X,0,200
NSEL,R,LOC,Y,-280,280
numelp=elmiqr(0,13)

ETABLE,BP,B,SUM
PLETAB,BP,AVG
/CONTOUR, , , 0, , 0.01120                  ! einai gia tin klimaka
*VPUT,BSUMP,ELEM,all,ETAB,BP, , ,
/REPLOT
*VSCFUN,BPMAX,MAX,BPSUMP
/image,save,BsumCMi,bmp

PLF2D,27,0,10,1
/image,save,Bw2fluxLines,bmp


APLOT
```

```
/REPLOT,RESIZE
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,1
/PNUM,VOLU,0
/PNUM,NODE,0
/PNUM,TABN,0
/PNUM,SVAL,0
/NUMBER,1
/PNUM,ELEM,0
/REPLOT
/image,save,Geometria,bmp
```

Κώδικας βελτιστοποίησης με τη μέθοδο subproblem approximation

```
/opt
opanl,veltistopoiisi                !Assign oploop file

opvar,mu,DV,5000,350000                !murx tou mumetal--> DV
opvar,Bmax,OBJ,,,

!treximo optimization
opkeep,on ! Save best design
optype,subp ! Subproblem approximation method
opsubp,100,5
opsave,,, ! Save the current opt database
opexe

!Apotelesmata
oplist,all,,,1
plvaropt,mu
plvaropt,Bmax
finish
```