

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹

¹Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου, 15780, Αθήνα,
Ελλάδα
e-mail: ndiakidis@gmail.com

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η συμπεριφορά θαλάμου μαγνητικής θωράκισης, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν διαφορετικές γεωμετρίες θαλάμων θωράκισης προκειμένου να βρεθεί αυτή με την καλύτερη απόδοση. Για την προσομοίωση θεωρήθηκε ισοδύναμο διδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του θαλάμου θωράκισης μέσα σε κυλινδρικό πηνίο, στο οποίο πραγματοποιήθηκε στατική ηλεκτρομαγνητική ανάλυση. Στη συνέχεια, οι γεωμετρικές παραλλαγές του θαλάμου εξετάστηκαν ως προς την απόδοσή τους και διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών παραμέτρων, που αφορούσαν το υλικό, σε αυτή. Τέτοιες παράμετροι ήταν το πάχος, η μαγνητική διαπερατότητα του φύλλου mumetal, καθώς και το πάχος των ενδιάμεσων στρωμάτων αέρα μεταξύ διαδοχικών στρώσεων υλικού.

Λέξεις Κλειδιά: Μαγνητική Θωράκιση, Mumetal, Υπολογιστική Προσομοίωση, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Βελτιστοποίηση.

Abstract

Magnetic shielding is used to offer protection from stray magnetic fields to devices sensitive to magnetic noise. 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 been investigated using the design optimization module existing in the ANSYS FE software. The efficiency of these configurations has been evaluated using the shielding factor as an index.

Keywords: Magnetic shielding, Mumetal, computational modeling, finite element analysis, optimization

1. Εισαγωγή

Οι αισθητήρες αποτελούν σημαντικό κομμάτι πολλών τεχνολογικών εφαρμογών [1,2]. Τα μαγνητικά φαινόμενα είναι με τη σειρά τους κομμάτι κομβικής σημασίας για πολλές εφαρμογές [3]. Η μαγνητοαντίσταση είναι σημαντική για τον σχεδιασμό αισθητήρων μαγνητικού πεδίου[4,4]. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας βελτίωσης της ακρίβειας των μαγνητόμετρων, ήταν η πυρήνωση και η μετάδοση των μαγνητικών τοιχωμάτων[6], το φαινόμενο της ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης [7], και οι αισθητήρες fluxgate [8,10]. Το φαινόμενο της διέγερσης και των μεθόδων ανίχνευσης πεδίων, αποτέλεσαν, επίσης, σημαντικό κομμάτι της μαγνητομετρίας [11-13] και των αισθητήρων [14-15] γενικότερα με πολλές μάλιστα εφαρμογές [16]. Η μοντελοποίηση τέτοιου είδους μαγνητόμετρων αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την εξέλιξή τους και την βελτιστοποίησή τους [17].

Τα μαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία συσκευών και εξοπλισμού οδηγώντας σε δυσλειτουργία και πολύ συχνά σε λανθασμένες μετρήσεις. Συγκεκριμένα, τα συνεχή (DC) μαγνητικά πεδία και γενικότερα τα πολύ χαμηλής συχνότητας πεδία, που δημιουργούνται από μόνιμους μαγνήτες, ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, ακόμη και από το πεδίο της γής, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα κατά τη λειτουργία πολύ ευαίσθητων συσκευών [18,19]. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό να παρέχονται μηχανισμοί προστασίας στις συσκευές αυτές, μέσω της θωράκισής τους είτε με ενεργητική, είτε με παθητική θωράκιση [19-21]. Η παθητική μαγνητική θωράκιση βασίζεται στη χρήση συγκεκριμένων υλικών, όπως κράματα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, τα οποία επιτρέπουν μια ευκολότερη δίοδο της μαγνητικής ροής δια μέσου τους. Συνεπώς, εκτρέπουν τις ανεπιθύμητες μαγνητικές γραμμές, από την κανονική τους πορεία απομακρύνοντάς τες από την περιοχή που πρέπει να προστατευθεί [18,19].

Οι θάλαμοι μαγνητικής θωράκισης είναι διατάξεις εξαιρετικά υψηλού κόστους καθώς αποτελούνται από πολύ ακριβά κράματα. Σύμφωνα με στοιχεία από κατασκευαστές τέτοιου είδους κραμάτων, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r τέτοιων υλικών κυμαίνεται από 5000 μέχρι και 350000. Εξαιτίας του πολύ υψηλού κόστους αυτών των υλικών η επιλογή αυτού με την βέλτιστη μαγνητική διαπερατότητα, είναι εξαιρετικά σημαντική, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο ισοζύγιο απόδοσης – κόστους.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη λύση σύνθετων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στο παρόν πρόβλημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία δεδομένης της δυνατότητάς της να επιλύει προβλήματα με σύνθετες γεωμετρίες και φαινόμενα [22], δίνοντας έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης της διάταξης θωράκισης ώστε να υπολογιστεί η απόδοσή της πριν ακόμα γίνει η κατασκευή της.

2. Μεθοδολογία

2.1. Μοντελοποίηση πηνίου διέγερσης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η υπολογιστική μοντελοποίηση έγινε με το λογισμικό ANSYS Multiphysics. Εκτός από τη μοντελοποίηση του θαλάμου αυτού καθαυτού, πραγματοποιήθηκε και η μοντελοποίηση πηνίου, που παράγει το μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο βρίσκεται ο θάλαμος. Κατά τη μοντελοποίηση του χρησιμοποιήθηκαν 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. Στην περίπτωση που μελετάται, τα στοιχεία του πηνίου δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης, οπότε κατά τη σχεδίαση και

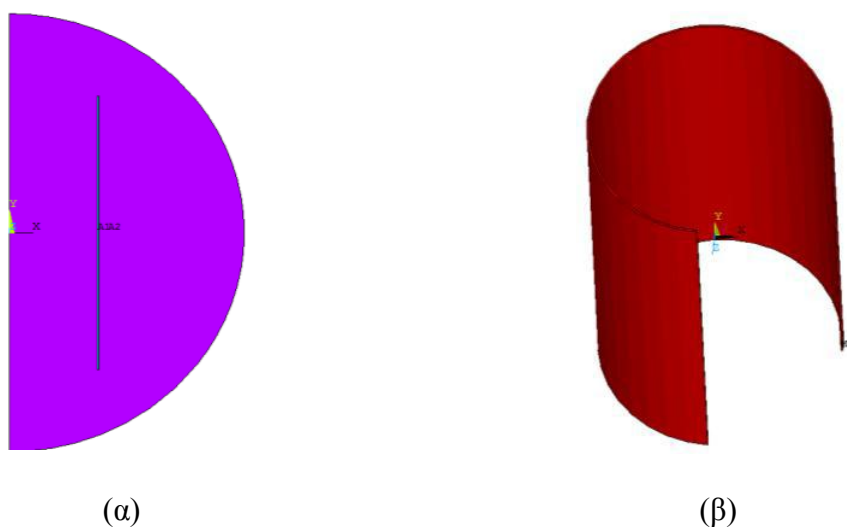
Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση θαλάμου θωράκισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

μοντελοποίηση, τα παραπάνω στοιχεία θεωρούνται μία ολότητα. Οι διαστάσεις του πηνίου δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Διαστάσεις Πηνίου Διέγερσης

Εξωτερική διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Πάχος (mm)	Μαγνητική Διαπερατότητα μ
610	1000	5	1

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 1) φαίνεται η τομή της αξονοσυμμετρικής αναπαράστασης του πηνίου διέγερσης μέσα από το πρόγραμμα μοντελοποίησης. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και ο περιβάλλοντας άερας, οποίος και αυτός θα αποτελέσει μέρος της μοντελοποίησης. Οι οριακές συνθήκες που θα επιβληθούν από το πηνίο διέγερσης είναι ρεύμα με την μορφή πυκνότητας ρεύματος (CurrentDensity JS). Οι μονάδες της πυκνότητας ρεύματος είναι A/m^2 . Στο συγκεκριμένο πρόβλημα που είναι αξονοσυμμετρικό δίνεται τιμή μόνο στην κάθετη 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, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000. 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.



Σχήμα 1: Γεωμετρία πηνίου (α) αξονοσυμμετρική και (β) ψευδο -τριδιάστατη αναπαράσταση με τομή στα 3/4

2.1. Μοντελοποίηση βασικού θαλάμου θωράκισης

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε το μοντέλο, του θαλάμου θωράκισης. Το σχήμα που χρησιμοποιήθηκε είναι κυλινδρικό καθώς και παραλλαγές αυτού. Οι διαστάσεις του εμφανίζονται στον Πίνακα 1. Η χρήση κυλινδρικού σχήματος δικαιολογείται από το ότι καμπυλωτά σχήματα προσφέρουν εύκολη οδό διέλευσης των μαγνητικών γραμμών, ενώ

Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση θαλάμου θωράκισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

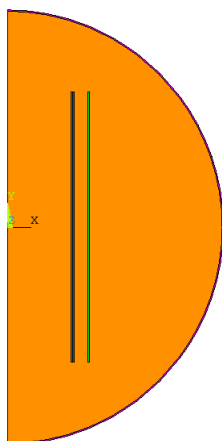
είναι και κατασκευαστικά πιο εφικτά σε σχέση με σχήματα που εμπεριέχουν γωνίες. Επιπλέον κατασκευαστική λεπτομέρεια αποτελεί το πλήθος των ομοαξονικών στρώσεων (χωρίς να βρίσκονται σε επαφή) υλικού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και οι οποίες αποτελούν το κυρίως σώμα του θαλάμου. Κατά την μοντελοποίηση, το κένο που παρεμβάλλεται μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων είναι αέρας, ενώ σαν τελευταία στρώση τοποθετήθηκε φύλλο αλουμινίου. Τα στοιχεία των στρώσεων παρατίθενται στον Πίνακα 2, ενώ στο Σχήμα.2 παρατίθενται σχηματικά η διαμόρφωση του θαλάμου (τομή).

Πίνακας 1: Διαστάσεις βασικού θαλάμου θωράκισης

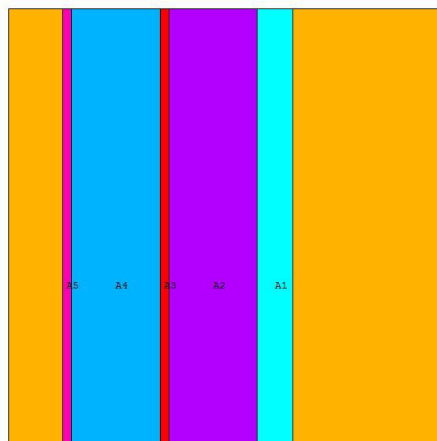
L(mm)	D (mm)
1000	500

Πίνακας 2 : Στοιχεία βασικού θαλάμου θωράκισης

	Πάχος Στρώσεων (mm)	Μαγνητική Διαπερατότητα μ
μ metal	0.5	5000
Αέρας	5	1
μ metal	0.5	5000
Αέρας	5	1
Αλουμίνιο	2	1
Συνολικό	13	-



(α)

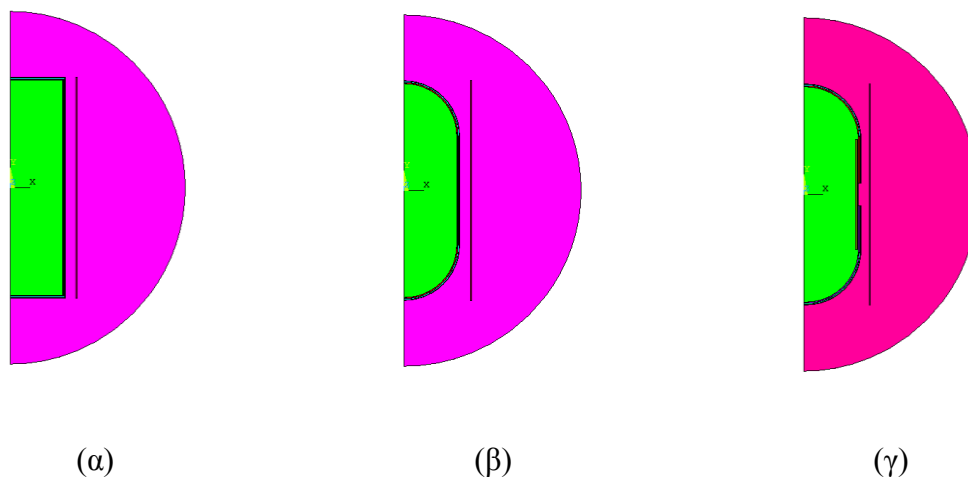


(β)

Σχήμα 2 :(α) 2D αναπαράσταση μοντέλου (β) λεπτομέρεια με ενδιάμεσες στρώσεις

2.2. Μοντελοποίηση γεωμετρικών παραλλαγών βασικού θαλάμου θωράκισης
 Βάσει της βασικής γεωμετρίας διερευνήθηκαν οι παρακάτω παραλλαγές (Σχήμα 3).

- Κύλινδρος κλειστός με επίπεδα καπάκια (Σχήμα 3(α)).
- Κύλινδρος κλειστός με οβάλ καπάκια (Σχήμα 3(β)).
- Κύλινδρος κλειστός με οβάλ καπάκια επικαλυπτόμενα επί του βασικού κορμού του θαλάμου (Σχήμα 3(β)).



Σχήμα 3: Παραλλαγές βασικού θαλάμου

2.3. Βελτιστοποίηση απόδοσης θαλάμου θωράκισης

Το βασικό κριτήριο κατά την βελτιστοποίηση ήταν η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του θαλάμου. Οι βασικές παράμετροι βάσει των οποίων διερευνάται η συμπεριφορά του θαλάμου θωράκισης είναι (α) το πάχος και (β) η τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του mumetal, καθώς και (γ) το πάχος των ενδιάμεσων στρώσεων αέρα, παράμετροι που προηγουμένως θεωρούνταν σταθερές. Η επίδραση της πρώτης παραμέτρου στο μοντέλο θα διερευνηθεί με τη μέθοδο πολλαπλών δοκιμών, ενώ η επίδραση των άλλων δυο παραμέτρων θα διερευνηθεί με τη χρήση των δύο μεθόδων βελτιστοποίησης που παρέχονται από το λογισμικό ANSYS. Αυτές είναι η Sub-problem Approximation και η First order. Η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος αποτελεί το κριτήριο και των δύο μεθόδων. Διερευνώντας την πρώτη μεταβλητή σχεδίασης (σχετική μαγνητική διαπερατότητα του mumetal), έγινε η υπόθεση ότι ο θάλαμος αποτελείται από ένα φύλλο mumetal προκειμένου να αποφευχθούν χρονοβόροι υπολογισμοί. Το εύρος της μεταβλητής αυτής είναι 5000 έως 350000. Όσον αφορά τα ενδιάμεσα κενά αέρος, το εύρος της μεταβλητής αυτής είναι από 1 μέχρι 10mm. Σε αυτήν την περίπτωση το πάχος του κάθε ενδιάμεσου στρώματος αέρα εξετάστηκε ξεχωριστά με το ένα από τα δύο, να παραμένει σταθερό και ίσο με 5mm.

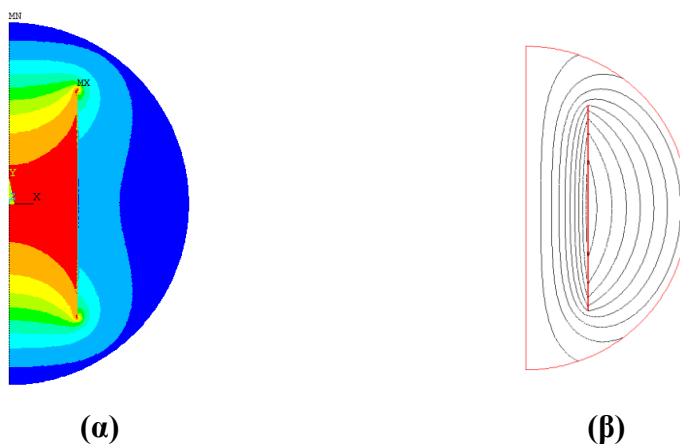
3. Αποτελέσματα

Για την προσομοίωση του θαλάμου χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πεπερασμένων στοιχείων, ο PLANE53 για τα στοιχεία του θαλάμου, του πηνίου διέγερσης και του αέρα και ο INFIN110 για τα στοιχεία του περιβάλλοντα αέρα προς το άπειρο. Η ανάλυση σε όλα τα μοντέλα έγινε σε δύο διαστάσεις (2D), και πραγματοποιήθηκε μαγνητοστατική αξονοσυμμετρική ανάλυση.

Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση θαλάμου θωράκισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.1 Πηνίο διέγερσης

Έπειτα από τις παραπάνω μοντελοποιήσεις προέκυψε το παραγόμενο πεδίο για διάφορες τιμές της πυκνότητας ρεύματος και φαίνεται ότι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό και γύρω από το πηνίο είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. (Σχήμα 4)



Σχήμα 4: Πηνίο (α) κατανομή μαγνητικού πεδίου (β) μαγνητικές γραμμές

Η μέγιστη τιμή της μαγνητική επαγωγής του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της τιμής της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου διέγερσης, όπως ήταν αναμενόμενο. Για να επιτύχουμε την τιμή του μαγνητικού πεδίου ίση με $B=100\mu\text{T}$ χρησιμοποιήσαμε στις επόμενες μοντελοποιήσεις τιμή διέγερσης την $J_S=20\text{A/m}^2$.

3.2 Θάλαμος θωράκισης και παραλλαγές

Στο Σχήμα 5(α) φαίνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου της τρίτης εκδοχής (επικαλυπτόμενα καπάκια). Η περιοχή μεταξύ του άξονα συμμετρίας του μοντέλου και του εσωτερικού τοιχώματος του θαλάμου είναι η περιοχή που θέλουμε να προστατεύσουμε από τα πεδία (περιοχή ενδιαφέροντος). Στο Σχήμα 5(β) φαίνεται η κατανομή της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος.



Σχήμα 5: Μαγνητικό πεδίο σε (α) όλο το μοντέλο (β) στην περιοχή ενδιαφέροντος

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου του βασικού θαλάμου καθώς και των τριών παραλλαγών του είναι ίδια, ενώ διαφέρουν στις τιμές της μέγιστης έντασης του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι τιμές αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 3

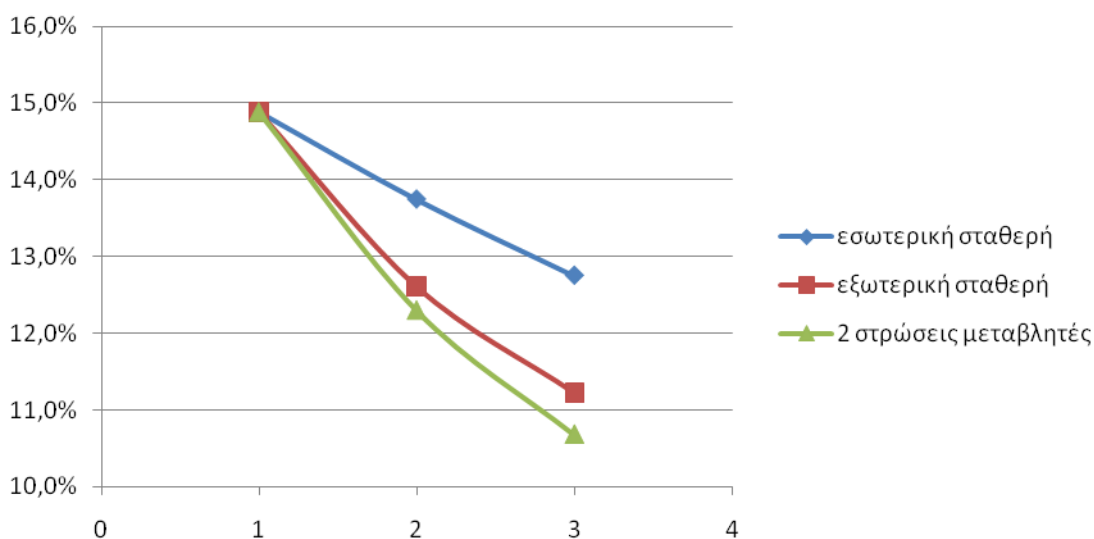
Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση θαλάμου θωράκισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 3: Μέγιστες τιμές του μαγνητικού πεδίου στην Περιοχή Ενδιαφέροντος για βασικό θάλαμο και των παραλλαγών του

(α)	(β)	(γ)	(δ)
0.009635	0.006371	0.005401	0.007443

3.3 Βελτιστοποίηση

Στο παρακάτω Σχήμα 6, διακρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για το πάχος του φύλλου υψηλής αγωγιμότητας. Συγκεκριμένα φαίνεται η ποσοστιαία μείωση του μέγιστου μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος σε περίπτωση που αυξάνουμε πάχος εξωτερικής, εσωτερικής καθώς και των δύο στρώσεων μαζί, αντίστοιχα.



Σχήμα 6: Καμπύλες ποσοστιαίας μείωσης μέγιστου μαγνητικού πεδίου ως προς πάχος στρώσεων υλικού υψηλής αγωγιμότητας.

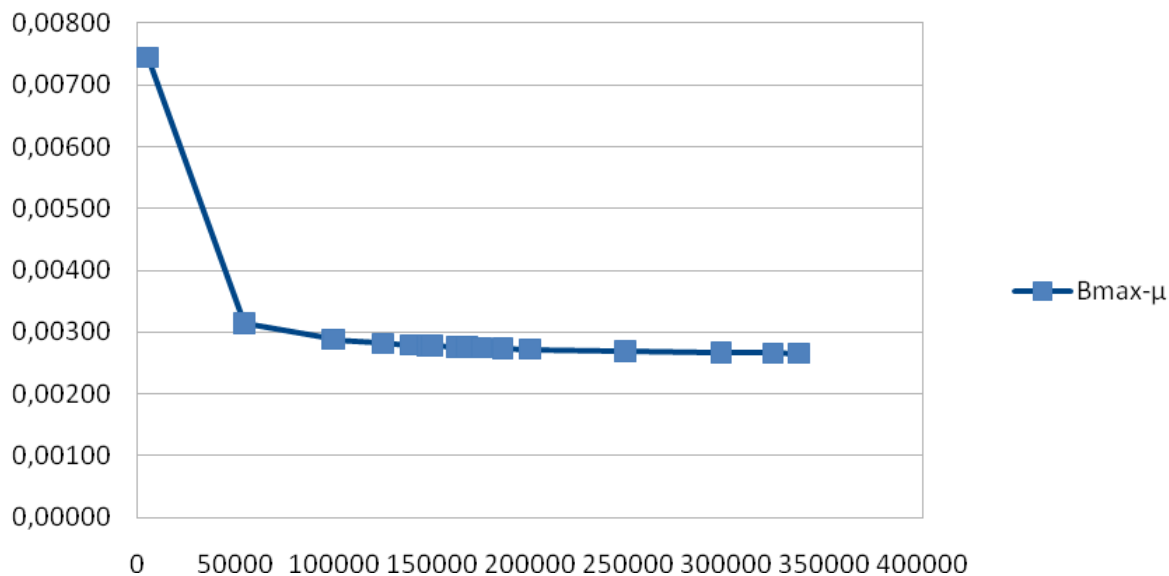
Όσον αφορά τις άλλες δύο μεταβλητές σχεδίασης, θα χρησιμοποιηθούν όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης του ANSYS, με πέντε διαφορετικές τιμές εκκίνησης των μεταβλητής σχεδίασης (μ , πάχος στρώματος αέρα). Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και για τις δύο χρησιμοποιηθείσες μεθόδους.

Πίνακας 4 : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης βάσει της διαπερατότητας του υλικού

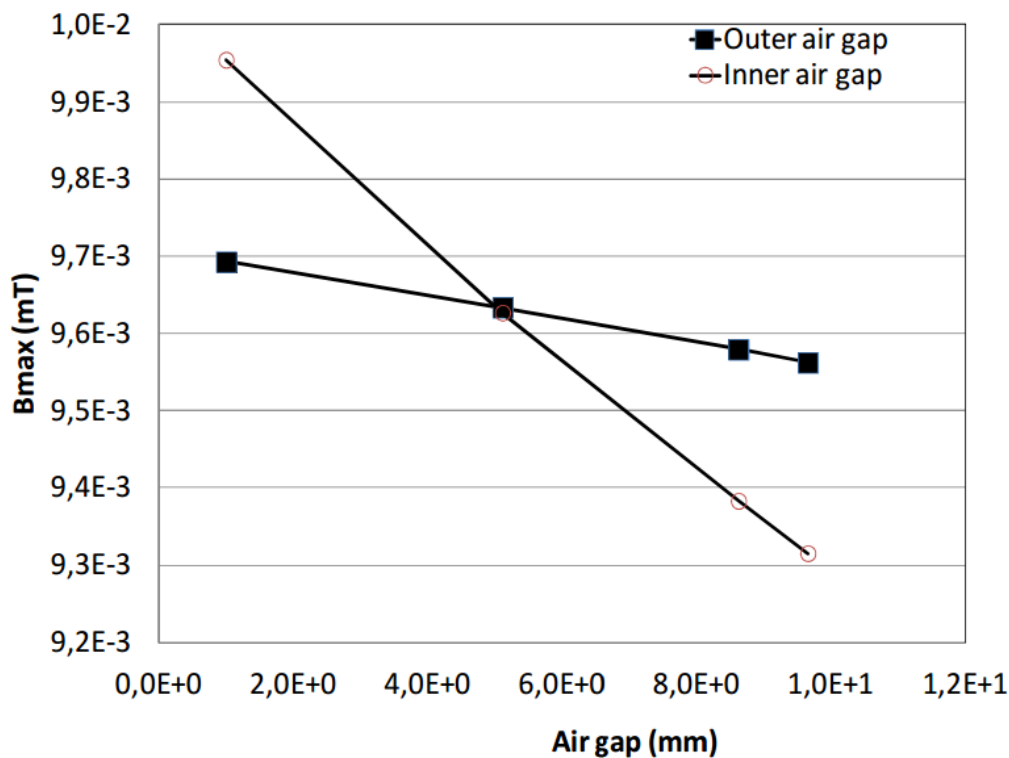
	μ_{best}	Min Bmax[mT]
Sub-Problem approximation	337000	0.00265
First Order	186000	0.00273

Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας, είναι εκεί όπου η τιμή του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι η μικρότερη. Συνδυάζοντας όλα τα αποτελέσματα προκύπτει το διάγραμμα στο Σχήμα 7. Τα αποτελέσματα της

βελτιστοποίησης των κενών αέρος μεταξύ των στρώσεων δίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 8.



Σχήμα 7: Σχετική μαγνητική διαπερατότητα υλικού



Σχήμα 8: Βελτιστοποίηση πάχους ενδιάμεσων στρώσεων αέρα

4. Συμπεράσματα – Πρόταση

Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία, καθώς το πάχος της θωράκισης θαλάμου είναι πάρα πολύ

Νικόλαος Διακίδης¹, Κλειώ Βόσου¹, Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση θαλάμου θωράκισης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

μικρό συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις του. Ξεπερνώντας λοιπόν τις δυσκολίες αυτές, φάνηκε ότι η διαμόρφωση του κυλίνδρου με τα οβάλ επικαλυπτόμενα καπάκια (Σχήμα 5(α), Πίνακας 3(γ,δ)) είναι και αποδοτική ως προς τη θωράκιση σύμφωνα με την τιμή της μέγιστης έντασης του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Εκτός της αποτελεσματικότητας της, αυτή η διαμόρφωση είναι και η πιο κατασκευαστικά εφικτή. Όσον αφορά την επίδραση της τιμής της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του φύλλου του τοιχώματος του θαλάμου, ως προς την αποτελεσματικότητα θωράκισης, τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης, αποδεικνύουν ότι η καμπύλη της $\max B_{\min} - \mu$ συγκλίνει σε μια ορισμένη τιμή του B_{\max} για ορισμένο μ (Σχήμα 7). Ως το πάχος των ενδιάμεσων στρωμάτων αέρα φαίνεται ότι αυξάνοντας το πάχος του εσωτερικού στρώματος, έχουμε και μεγαλύτερη μείωση του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με κάποια αλλαγή στο πάχος του εξωτερικού ενδιάμεσου στρώματος αέρα (Σχήμα 9).

5. Βιβλιογραφία

- [1] DS Vlachos, DK Fragoulis, JN Avaritsiotis An adaptive neural network topology for degradation compensation of thin film tin oxide gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 45, 3, p. 223–228, 1997
- [2] CA Papadopoulos, DS Vlachos, Effect of surface catalysts on the long-term performance of reactively sputtered tin and indium oxide gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* 42, 2, p. 95–101, 1997
- [3] Giouroudi, A. Ktena and E. Hristoforou, Microstructural characterization of cylindrical Fe_{1-x}Ni_x thin films, *J. Opt. Adv. Mat.*, 6, p. 45-50, 2004
- [4] E. Hristoforou, A. Ktena, Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications, *J. Magn. Magn. Mater.*, 316, p. 372-378, 2007
- [5] E. Hristoforou, H. Chiriac, M. Neagu, A New Magnetic Field Sensor Based on Magnetostrictive Delay Lines, *IEEE Trans. Instr. & Meas.*, 46, p. 632-635, 1997
- [6] E. Hristoforou and D. Niarchos, Mechanical Sensors Based on Re-Entrant Flux Reversal, *IEEE Trans. Mag.*, 28, p. 2190-2192, 1992
- [7] P. D. Dimitropoulos, J. N. Avaritsiotis and E. Hristoforou, A novel micro-Fluxgate sensor based on the AMR effect of ferromagnetic film-resistors, *Sensors and Actuators A*, 107, p. 238-247, 2003
- [8] P. Dimitropoulos, J.N. Avaritsiotis, E. Hristoforou, Boosting the Performance of Miniature Fluxgates With Novel Signal Extraction Techniques, *Sensors and Actuators A*, 90, p. 56-72, 2001
- [9] C. Petridis, I Petrou, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Determining appropriate magnetic core properties for a new type of flux-gate like sensor, *Sensor Letters*, 5, p. 98-101, 2007
- [10] B. Dufay, S. Saez, C. Cordier, C. Dolabdjian, C. Dubuc, E. Hristoforou, S. Ubizskii, 2D hybrid yttrium iron garnet magnetic sensor noise characterization, *IEEE Sensors Journal* (12), art. 5873114, p. 3211-3215, 2011
- [11] E. Hristoforou, H. Hauser and PD Dimitropoulos, On a New Principle of Smart Multi-Sensor Based on Magnetic Effects, *IEEE Sensors*, 6, p. 372-379, 2006
- [12] E. Hristoforou, New monolithic three dimensional field sensors with high sensitivity, *J. Opt. Adv. Mat.*, 8, p. 1691-1697, 2006
- [13] C. Petridis, A. Ktena, E. Laskaris, PD Dimitropoulos, E Hristoforou, Ni-Fe thin film coated Cu wires for field sensing applications, *Sensor Letters*, 5, p. 93-97, 2007

- [14] CA Papadopoulos, DS Vlachos, Effect of surface catalysts on the long-term performance of reactively sputtered tin and indium oxide gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 42, 2, p. 95–101, 1997
- [15] PD Skafidas, DS Vlachos, JN Avaritsiotis, Modelling and simulation of tin oxide based thickfilm gas sensors using Monte Carlo techniques, - *Sensors and Actuators B: Chemical*, 19, 1–3, p. 724–728, 1994
- [16] I Petrou, P Skafidas, E Hristoforou, Electronic toll and road traffic monitoring system using 3- D field AMR sensors, *Sensor Letters*, 11, p. 91-95, 2013
- [17] P.D. Dimitropoulos, G.I. Stamoulis, E. Hristoforou, A 3-d hybrid Jiles-Atherton/Stoner- Wohlfarth magnetic hysteresis model for inductive sensors and actuators, *IEEE Sensors Journal*, 6, p. 721-736, 2006
- [18] O. Bottauscio, M. Chiampi, G. Crotti, M. Zucca, Measurement accuracy in shielded magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Torino, 2004
- [19] Wan-Seop Kim, Yoon Bae Kim, Mun-Seog Kim, Kyu-Tae Kim, Yonuk Chong, Po Gyu Park, Young Gyun Kim, Optimizing the shielding effectiveness of a shielding cabinet via FEM simulation, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007
- [20] P. Sergeant, L. Dupre, J. Melkebeek, L. Vandenbossche, Magnetic field computation for optimized shielding of induction heaters, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2003
- [21] Helmut Soltner, Ulrich Pabst, Michael Butzek, Michael Ohl, Tadeusz Koziellewski, Michael Monkenbusch, Don Sokol, LarryMaltin, Eric Lindgren, Stuart Koche, David Fugate, Design, construction, and performance of a magnetically shielded room for a neutron spin echo spectrometer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011
- [22] M.V.K. Chari, S.J. Salon, *Numerical Methods in Electromagnetism*, Academic Press, San Diego, 2000