



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μοντελοποίηση στατικών και αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών
πεδίων σε διαστημικές αποστολές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Π. Ζαχαριάς

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μοντελοποίηση στατικών και αργά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων σε διαστημικές αποστολές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Π. Ζαχαριάς

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Μάιο 2016.

.....
Χ.Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π.Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γ. Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2016

.....
Παναγιώτης Π. Ζαχαριάς

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

Copyright ©Παναγιώτης Π. Ζαχαριάς, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Καψάλη για την άμεση ανταπόκριση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι συμβουλές του ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων Σωτήρη Σπαντιδέα για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η άρτια συνεργασία μας αποτέλεσε βασικό συστατικό της ευχάριστης διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους μου τους φίλους και συγγενείς για τη βοήθειά τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, δεν μπορώ παρά να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς και τα αδέρφια μου για την συμπαράσταση, βοήθεια και ανοχή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ζαχαριάς Παναγιώτης

Μάιος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού που αποτελείται από πολυάριθμους μαγνητικούς βρόχους στα πλαίσια διαστημικών αποστολών. Κεντρικό ζήτημα είναι ο προσδιορισμός του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου του εκάστοτε εξοπλισμού ώστε να είναι δυνατή η επέκταση του πεδίου σε συγκεκριμένα επιθυμητά σημεία. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται μια ενδελεχής και συστηματική ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος με χρήση νέων τεχνικών και μεθόδων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις σημαντικότερες διαστημικές αποστολές των τελευταίων δύο αιώνων καθώς και αναφορές σε αποστολές υπό εξέλιξη. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται εκτενώς το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και συγκεκριμένες εφαρμογές σε γεωμετρικές που χρειάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνεται DC και AC μοντελοποίηση, αναλυτική λύση του μαγνητικού πεδίου ενός τετραγωνικού βρόχου, εξάρτηση νόμου ελάττωσής από γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ρευματικές κατανομές.

Το δεύτερο και μεγαλύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής αποτελεί τον κύριο κορμό της πειραματικής διαδικασίας. Πιο αναλυτικά, περιγράφεται εκτενώς η υπό εξέταση διάταξη δηλαδή ο δοκιμαστικός εξοπλισμός με σαφή προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων. Ακόμα, εξετάζεται η περίπτωση ενός τετραγωνικού βρόχου μεταβαλλόμενης πλευράς και δίνονται ορισμένα πρωταρχικά αποτελέσματα για την περίπτωση 50 ρευματικών βρόχων. Έπειτα, εισάγεται η τεχνική των δύο μαγνητομέτρων, πάνω στην οποία βασίζεται η υπόλοιπη εργασία. Δύο νέες μέθοδοι, αυτή της εκθετικής παρεμβολής και της μεθόδου εξομάλυνσης, εισάγονται με κύριο στόχο την ακριβή πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε συγκεκριμένα σημεία. Τα σημεία αυτά βρίσκονται είτε ανάμεσα των δύο μαγνητόμετρων είτε σε μια μακρινή απόσταση από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Στο τελευταίο κομμάτι των προσομοιώσεων, εισάγεται η έννοια των common-mode ρευμάτων και εξετάζεται η επίδραση που έχουν στην ικανότητα ακριβούς πρόβλεψης.

Τέλος, στο τρίτο και τελευταίο κομμάτι της διπλωματικής γίνεται μια σύντομη αποτίμηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και συγχρόνως παρουσιάζονται σχετικά θέματα για μελλοντική μελέτη και έρευνα.

Λέξεις Κλειδιά : Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση, Μαγνητική Καθαρότητα, Μαγνητόμετρα

ABSTRACT

In the present diploma thesis, a thorough study of DC and slowly varying magnetic fields is carried out for purposes of magnetic cleanliness in space missions. The main issue is to determine “magnetically clean” specification points, inside or in close proximity to the spacecraft, where sensitive measuring equipment (e.g. magnetometers) is placed. Hence, systematic analysis is performed in order to model the magnetic signature of an Equipment under Test (EUT) consisting of multiple magnetic sources. Thereafter, the distance power law of the magnetic field fall-off is employed in various cases to accurately predict the magnetic behavior of an EUT. Furthermore, novel techniques are implemented in order to extrapolate the EUT’s magnetic field contribution at the intended specification points.

In the first part of the thesis, a throwback to the most important space missions of the past two centuries and references to ongoing missions are presented. Additionally, the necessary mathematical background of electromagnetic theory and particular geometries which are needed in the following chapters are illustrated. Specifically, this thesis contains DC and AC modeling procedure, analytical solution of the magnetic field of a square loop, power-law dependence of geometric features and current distributions.

The second part of the thesis constitutes the main backbone of experimental procedure. In particular, the equipment under test is described in detail highlighting the most crucial parameters. Moreover, a scenario of a single square loop with variable side is examined and also preliminary results regarding a case of 50 magnetic loops are given. Furthermore, the dual magnetometer technique is introduced which is the fundamental component of the rest of the work. Two novel techniques, namely exponential interpolation and smoothing method, are extensively analysed aiming at the prediction of the magnetic field’s value at specific observation points. These observation points are located either between the two magnetometers or far away from the EUT. In the final part of simulation results, the influence of common-mode current on a precise forecast is examined.

Finally, the third part of the thesis contains several simulation results and additionally, potential future work is proposed.

Key Words: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Analysis, Magnetic Cleanliness, Magnetometers

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
1.1 Γενικές πληροφορίες διαστημικών αποστολών	18
1.1.1 Ιστορία του διαστήματος	18
1.1.2 Διαστημική Αποστολή VeriColombo	20
1.1.3 Διαστημική Αποστολή Lisa Pathfinder	21
1.2 Ειδικά θέματα διαστημικών αποστολών.....	22
1.2.1 Μαγνητική Καθαρότητα	22
1.2.2 Εγκαταστάσεις MCF.....	23
2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ- ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	25
2.1 Εξισώσεις Maxwell.....	25
2.2 DC-μοντελοποίηση διπόλου	26
2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο DC-μοντελοποίησης.	26
2.2.2 Σύντομη επισκόπηση PSO-αλγόριθμου.....	28
2.2.3 Μαθηματική περιγραφή προβλήματος	29
2.2.4 Εφαρμογή PSO-αλγόριθμου για το πρόβλημα πολλαπλών μαγνητικών διπόλων.	30
2.3 AC-μοντελοποίηση διπόλου	31
2.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία	31
2.3.2 Νόμος Biot-Savart	32
2.3.3 Διανυσματικό Δυναμικό	33
2.4 Μαθηματική ανάλυση ορθογωνικού βρόχου.....	35
2.4.1 Αναλυτική λύση.....	35
2.4.2 Αναλυτική λύση κοντινής περιοχής.....	36
2.4.3 Αναλυτική λύση μακρινής περιοχής.....	38
2.4.4 Αναλυτική λύση ενδιάμεσης περιοχής	39
2.5 Εξάρτηση μαγνητικού πεδίου από σχήμα, συχνότητα, εμβαδόν, ρευματική κατανομή.....	40
2.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία	40
2.5.2 Εξάρτηση από συχνότητα	41
2.5.3 Εξάρτηση από το σχήμα	42
2.5.4 Εξάρτηση από εμβαδόν	42
2.5.5 Common και Differential ρεύματα	43

3.ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	45
3.1 Περιγραφή EUT σαν Box, βασικό υπόβαθρο και θεμελιώδεις παραδοχές	45
3.2 Μελέτη περίπτωσης τετραγωνικού βρόχου με μεταβλητό εμβαδό	48
3.2.1 Επίδραση του μεγέθους του βρόχου και ικανότητα ακριβής πρόβλεψης..	48
3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων-Σχολιασμός αποτελεσμάτων	50
3.3 Μελέτη περίπτωσης 50 τετραγωνικών βρόχων	56
3.3.1 Περιγραφή προβλήματος πολλαπλών ρευματικών βρόχων	56
3.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα- Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	57
4.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 50 ΡΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΜΕ DIFFERENTIAL-MODE CURRENT.....	63
4.1 Χρήση μαγνητομέτρου ως βασικού ερευνητικού εργαλείου.....	63
4.1.1 Γενικές πληροφορίες περί μαγνητόμετρων	63
4.1.2 Διαστημικά μαγνητόμετρα.....	64
4.1.3 Η τεχνική των δύο μαγνητομέτρων	64
4.2 Μέθοδος κλιμακούμενης απόστασης μαγνητόμετρων για ακριβή πρόβλεψη και επέκταση πεδίου.....	66
4.2.1 Περιγραφή προβλήματος και τελικός στόχος εργασίας	66
4.2.2 Μοντελοποίηση προβλήματος	68
4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	71
4.3.1 Επέκταση μαγνητικού πεδίου σε μακρινές αποστάσεις χρησιμοποιώντας εκθετική παρεμβολή	71
4.3.2 Επέκταση μαγνητικού πεδίου σε μακρινές αποστάσεις χρησιμοποιώντας μέθοδο εξομάλυνσης των τιμών	75
4.3.3 Επέκταση μαγνητικού πεδίου ενδιάμεσα των δύο μαγνητόμετρων	79
4.4 Σύγκριση μεθόδων	81
4.4.1 Σύγκριση των προαναφερθέντων μεθόδων με τους νόμους $r - 2$, $r - 3$.	81
4.5 Αλλαγή διαστάσεων δοκιμαστικού εξοπλισμού.....	84
4.5.1 Επίδραση διαστάσεων δοκιμαστικού εξοπλισμού στην πρόβλεψη του πεδίου	84
4.6 Πραγματικές μετρήσεις.....	85
4.6.1 Επαλήθευση μεθόδων με χρήση κινητού ως δοκιμαστικό εξοπλισμό	85
5.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 50 ΡΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ COMMOM-MODE ΡΕΥΜΑΤΩΝ	87
5.1 Επίδραση των common-mode ρευμάτων στην πρόβλεψη του πεδίου	87
5.1.1 Περιγραφή προβλήματος και επεξήγηση του common-mode ρεύματος....	87
5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	89

5.2.1 Αποτελέσματα για μακρινή πρόβλεψη	89
5.2.2. Αποτελέσματα για ενδιάμεση πρόβλεψη.....	90
5.2.3 Αποτελέσματα για συγκεκριμένη θέση βρόχων για μακρινή πρόβλεψη....	92
6.ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....	96
6.1 Συμπεράσματα-Μελλοντική έρευνα.....	96
6.1.1 Βασικά συμπεράσματα προσομοιώσεων	96
6.1.2 Μελλοντική εργασία	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Διεθνής διαστημικός σταθμός.....	18
Εικόνα 1.2: Εκτόξευση διαστημικού αεροσκάφους.....	19
Εικόνα 1.3: Spuntik 1.....	19
Εικόνα 1.4: Explorer 1.....	19
Εικόνα 1.5: Mercury Planetary Orbiter.....	20
Εικόνα 1.6: Lisa Pathfinder.....	21
Εικόνα 1.7: Θέση μαγνητομέτρου σε διαστημικό σκάφος.....	22
Εικόνα 1.8: Χαρακτηριστική MCF-εγκατάσταση.....	23
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση PSO-αλγορίθμου.....	28
Εικόνα 2.2: Γεωμετρία προβλήματος.....	29
Εικόνα 2.3: Common και Differential current ενός τετραγωνικού βρόχου.....	32
Εικόνα 2.4: Ένταση μαγνητικού πεδίου διπόλου και τετραγωνικού βρόχου.....	33
Εικόνα 2.5: Ορθογωνικός βρόχος xy-επίπεδο.....	35
Εικόνα 2.6: Μαγνητικοί βρόχοι υπό εξέταση.....	40
Εικόνα 2.7: Μαγνητικό πεδίο ορθογωνικού βρόχου σε σχέση με το πλήθος των στοιχειωδών κομματιών.....	40
Εικόνα 2.8: Μαγνητικό πεδίο ορθογωνικού βρόχου υπολογισμένο με Biot-Savart και διανυσματικό δυναμικό σε διάφορες συχνότητες.....	41
Εικόνα 2.9: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από 0.5m.....	42
Εικόνα 2.10: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από 0.5m.....	42
Εικόνα 2.11: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από 0.5m.....	43
Εικόνα 2.12: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από 0.5m.....	43
Εικόνα 2.13: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από 0.5m.....	43
Εικόνα 2.14: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από 0.5m.....	43
Εικόνα 3.1: EUT σε Box με ρευματικούς βρόχους.....	47
Εικόνα 3.2: Τετραγωνικός βρόχος μέσα σε EUT.....	48
Εικόνα 3.3: Πειραματική διάταξη τετραγωνικού βρόχου.....	49
Εικόνα 3.4: Διακύμανση των power-laws σε σχέση με την ακτίνα του βρόχου.....	50

Εικόνα 3.5: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.1m.....	51
Εικόνα 3.6: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.2m.....	52
Εικόνα 3.7: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.3m.....	52
Εικόνα 3.8: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.4m.....	53
Εικόνα 3.9: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.5m.....	53
Εικόνα 3.10: EUT με 50 βρόχους και διαστήματα μετρήσεων.....	56
Εικόνα 3.11: Ραβδόγραμμα νόμων ελάττωσης του πεδίου για 12 προσομοιώσεις.....	58
Εικόνα 3.12: Γραφική σύγκλιση του power-law στο -3.....	58
Εικόνα 3.13: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-1η επανάληψη.....	59
Εικόνα 3.14: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-2η επανάληψη.....	60
Εικόνα 3.15: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-3η επανάληψη.....	60
Εικόνα 3.16: Πραγματικές τιμές μαγνητικού πεδίου για αποστάσεις $r=2,3,4,5m$ από EUT με 50 τετραγωνικούς βρόχους.....	61
Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικό μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στα σκάφη Pioneer 10 και 11.....	63
Εικόνα 4.2: Διαστημικό σκάφος Voyager με εμφανές το κοντάρι (boom).....	64
Εικόνα 4.3: Πειραματική διάταξη τεχνικής δύο μαγνητομέτρων.....	65
Εικόνα 4.4: Τυχαία θέση ρευματικών βρόχων μέσα στο EUT.....	68
Εικόνα 4.5: Σημεία παρατήρησης σε κοντινή απόσταση από το EUT.....	69
Εικόνα 4.6: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 30cm.....	72

Εικόνα 4.7: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 40cm.....	73
Εικόνα 4.8: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 50cm.....	73
Εικόνα 4.9: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm.....	74
Εικόνα 4.10: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing.....	75
Εικόνα 4.11: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 30cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	76
Εικόνα 4.12: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 40cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	77
Εικόνα 4.13: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 50cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	77
Εικόνα 4.14: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	78
Εικόνα 4.15: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	79
Εικόνα 4.16: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη.....	80
Εικόνα 4.17: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.....	80
Εικόνα 4.18: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για spacing 60cm και για τις δυο τεχνικές.....	81
Εικόνα 4.19: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, μέχρι break point.....	82
Εικόνα 4.20: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, από break point έως τα 3m.....	83
Εικόνα 4.21: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές.....	83
Εικόνα 4.22: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση μικρού εξοπλισμού.....	84
Εικόνα 4.23: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση μεγάλου εξοπλισμού.....	85
Εικόνα 4.24: Πειραματική διάταξη μετρήσεων μαγνητικού πεδίου ενός κινητού ως δοκιμαστικό εξοπλισμό.....	86

Εικόνα 4.25: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση κινητού τηλεφώνου.....	86
Εικόνα 5.1: Ομοαξονικό καλώδιο με differential και common mode ρεύμα.....	88
Εικόνα 5.2: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 10% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	89
Εικόνα 5.3: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 20% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	89
Εικόνα 5.4: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 30% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	90
Εικόνα 5.5: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 10% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	91
Εικόνα 5.6: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 20% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	91
Εικόνα 5.7: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 30% των βρόχων με common-mode ρεύμα.....	92
Εικόνα 5.8: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για spacing 30cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα.....	93
Εικόνα 5.9: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για spacing 40cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα.....	93
Εικόνα 5.10: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για spacing 50cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα.....	94
Εικόνα 5.11: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1ου μαγνητόμετρου για spacing 60cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα.....	94

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορες συχνότητες.....	41
Πίνακας 2.2: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορα σχήματα βρόχων.....	42
Πίνακας 2.3: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορα εμβαδά.....	43
Πίνακας 2.4: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για common και differential.....	44
Πίνακας 3.1: Σχέση μεταξύ Power-law και αναφερόμενο διάστημα.....	50
Πίνακας 3.2: MAPE μετρήσεων και ακρίβεια προβλέψεων.....	55
Πίνακας 3.3: Power-laws για 12 προσομοιώσεις.....	57
Πίνακας 4.1: Συνοπτικά αριθμητικά στοιχεία (παράμετροι) του προβλήματος.....	69
Πίνακας 5.1: Συνοπτικοί παράμετροι προβλήματος.....	87

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές πληροφορίες διαστημικών αποστολών

1.1.1 Ιστορία του διαστήματος

Το ενδιαφέρον της ανθρωπότητας για τη ζωή πέρα από τη Γη είναι διαχρονικό και διαρκές. Οι άνθρωποι καλούνται να εξερευνήσουν τον κόσμο εκτός των ορίων της Γης, να ανακαλύψουν νέους κόσμους και να διερευνήσουν τα όρια του ήδη υπάρχοντος. Αυτό το διαρκές ενδιαφέρον του ανθρώπου για τη δομή και την ιστορία του διαστήματος παρέχει πολλά οφέλη για ολόκληρη την ανθρώπινη κοινωνία. Η εξερεύνηση του διαστήματος βοηθά στην κατανόηση θεμελιωδών ερωτημάτων σχετικά με τη θέση του πλανήτη Γη στο σύμπαν, την ιστορία του ηλιακού συστήματος. Για το λόγο αυτό έχουν ιδρυθεί εταιρίες που κύριο μέλημά τους είναι η απάντηση αυτών των ερωτημάτων, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος(NASA). Κύρια πρόκληση της NASA είναι η ανάπτυξη μεθόδων που θα επιτρέψουν την εξερεύνηση του διαστήματος πέρα από τις χαμηλές γήινες τροχιές.

Πρώτο βήμα όμως για την εξερεύνηση του διαστήματος είναι η κατασκευή διαστημικών σταθμών που αποτελεί βασικό θεμέλιο για μια επιτυχή διαστημική αποστολή. Ο διεθνής διαστημικός σταθμός χρησιμεύει ως εργαστήριο που ερευνά υλικά, βιολογικά στοιχεία και πραγματοποιεί διάφορες δοκιμές. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η συνεχής βελτίωση των διαστημικών αποστολών, παρέχεται η κατάλληλη ασφάλεια στους αστροναύτες και εμπλουτίζονται οι γνώσεις των επιστημόνων σχετικά με την συμπεριφορά των υλικών και των βιολογικών συστημάτων έξω από την επίδραση της βαρύτητας.



Εικόνα 1.1: Διεθνής Διαστημικός Σταθμός

Οι διαστημικές πτήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν εντός ή και εκτός της γήινης επιφάνειας, με ή χωρίς ανθρώπους (χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω). Οι διαστημικές πτήσεις πραγματοποιούνται για την εξερεύνηση του διαστήματος, για εμπορικές δραστηριότητες όπως διαστημικός τουρισμός και για δορυφορικές επικοινωνίες. Μη εμπορικές διαστημικές πτήσεις περιλαμβάνουν διαστημικά παρατηρητήρια (σταθμούς), γενικούς δορυφόρους και άλλους δορυφόρους ειδικού σκοπού παρατήρησης της Γης.

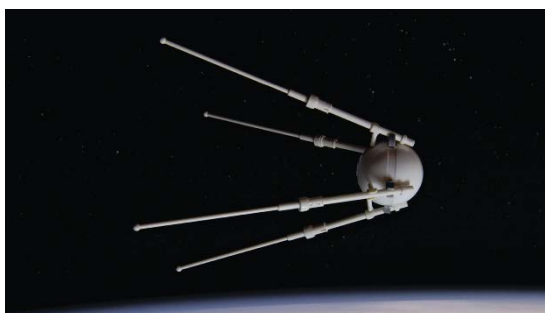
Μια διαστημική πτήση ξεκινά με την εκτόξευση πυραύλου, η οποία παρέχει την αρχική ώθηση ώστε να υπερνικηθεί η δύναμη της βαρύτητας με τελικό στόχο την προώθηση του σκάφους πέρα από την επιφάνεια της Γης. Καθώς το αεροσκάφος βγει εκτός της γήινης επιφάνειας, η κίνησή του περιγράφεται από την επιστημονική περιοχή της αστροδυναμικής. Κάποια διαστημόπλοια παραμένουν επ'άοριστον στο διάστημα, άλλα διασπώνται και καταστρέφονται από την επανείσοδό τους στη Γη και άλλα φθάνουν και προσγειώνονται σε μια άλλη πλανητική επιφάνεια.

Η εξερεύνηση του διαστήματος αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της επιστήμης των τελευταίων αιώνων. Ως εξερεύνηση του διαστήματος ορίζεται η εξερεύνηση και μελέτη των ουράνιων δομών και σωμάτων με τη βοήθεια της τεχνολογίας. Οι επιστήμονες που μελετούν το διάστημα και τις ιδιότητες αυτού ονομάζονται αστρονόμοι και έχουν ως κύριο όργανο χρήσης το τηλεσκόπιο. Η φυσική εξερεύνηση του διαστήματος πραγματοποιείται είτε με μη επανδρωμένα ρομπότ είτε με οργανωμένες διαστημικές αποστολές.



Εικόνα 1.2: Εκτόξευση Διαστημικού αεροσκάφους

Ιστορικά η πρώτη μη επανδρωμένη διαστημική αποστολή έγινε στις 4 Οκτωβρίου 1957 από την Σοβιετική Ένωση με το όνομα Sputnik 1 [1]. Ο δορυφόρος ζύγιζε περίπου 84 κιλά και φημολογείται πως τέθηκε σε τροχιά γύρω από τη Γη σε ύψος 250 χλμ. Συγκεκριμένα ο δορυφόρος είχε δύο ραδιοπομπούς σε συχνότητες 20 και 40 MHz. Οι ραδιοπομποί εκπέμπαν ένα χαρακτηριστικό σήμα (ηχητικό μήνυμα), το οποίο ακουγόταν σε επίγεια ραδιόφωνα. Μέσα από την ανάλυση των λαμβανόμενων σημάτων συλλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με την πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα, με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στην περιοχή. Δύο μήνες αργότερα η Αμερική προσπάθησε ανεπιτυχώς να στείλει κι αυτή έναν δορυφόρο με το όνομα Vanguard . Τελικά καταφέρνει με επιτυχία στις 11 Ιανουαρίου 1958 να θέσει σε τροχιά έναν δορυφόρο με το όνομα Explorer 1.



Εικόνα 1.3: Spuntik 1



Εικόνα 1.4: Explorer 1

Η πρώτη επανδρωμένη διαστημική αποστολή με το διαστημικό αεροσκάφος Vostok 1 έγινε στις 27 Απριλίου 1961 στην οποία συμμετείχε ο Ρώσος αστροναύτης Yuri

Gagarin. Η διάρκεια της διαστημικής πτήσης ήταν 108 λεπτά και το διαστημικό σκάφος ανέβηκε σε τροχιά 169 χλμ από τη Γη.

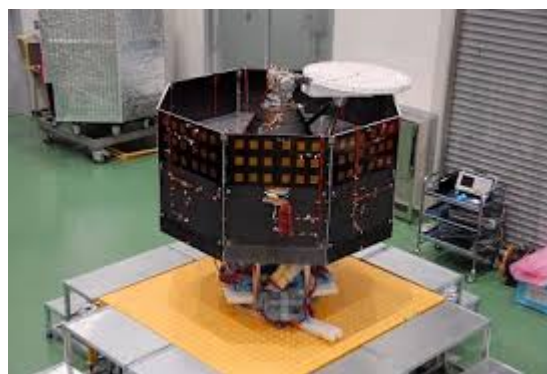
1.1.2 Διαστημική Αποστολή BepiColombo

Η αποστολή Bepi Colombo [2] είναι μια από τις πιο σημαντικές αποστολές της ESA(Ευρωπαϊκή διαστημική εταιρία),θα μελετήσει και θα κατανοήσει την σύσταση, τη γεωφυσική, την ατμόσφαιρα, την μαγνητόσφαιρα και γενικά την ιστορία του Ερμή. Ο Ερμής αποτελεί τον ελάχιστο εξερευνημένο πλανήτη του ηλιακού μας συστήματος.

Η αποστολή Bepi Colombo αποτελεί μια συνεργασία της Ευρωπαϊκή διαστημική εταιρία(ESA) και της Ιαπωνικής Αεροδυναμικής Υπηρεσίας εξερεύνησης (JAXA) και θα δώσει τις πιο σημαντικές πληροφορίες για τη δομή του Ερμή έως σήμερα. Η αποστολή αποτελείται από δύο διαστημικά σκάφη που θα εκτοξευτούν μαζί τον Ιανουάριο του 2017:

- το Mercury Planetary Orbiter (MPO) :
- το Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO).

Τα δύο σκάφη πρόκειται να φτάσουν στην τροχιά του Άρη τον Ιανουάριο του 2024 όπου και θα διασπαστούν με σκοπό την παρατήρηση του Άρη για ένα χρόνο και ίσως δοθεί παράταση ακόμα ενός χρόνου. Τα δύο διαστημικά σκάφη θα είναι εφοδιασμένα με επιστημονικά όργανα που έχουν προμηθευτεί από διάφορες ευρωπαϊκές χώρες καθώς και από την Ιαπωνία. Συγκεκριμένα η Ρωσία θα προμηθεύσει την αποστολή με φασματογράφο ακτίνων γ και φασματογράφο νετρονίων ώστε να επαληθευτεί η ύπαρξη παγωμένου νερού στους πολικούς κρατήρες οι οποίοι βρίσκονται υπό τη σκιά του ήλιου.



Εικόνα 1.5: Mercury Planetary Orbiter

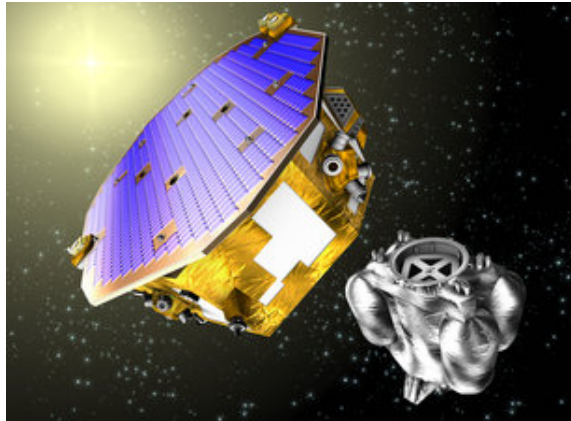
Όντας ο κοντινότερος πλανήτης στον ήλιο, ο Ερμής παίζει κομβικό ρόλο στην απόκτηση γνώσεων σχετικά με τη διαμόρφωση και το σχήμα των πλανητών. Ο ήλιος, η Αφροδίτη, ο Ερμής και η Γη αποτελούν το σύμπλεγμα των γήινων πλανητών, ο καθένας από τους οποίους κρύβουν πολύτιμες πληροφορίες για την ιστορική τους διαμόρφωση.

Πιο συγκεκριμένα οι κύριοι στόχοι της αποστολής είναι οι εξής:

- Μελέτη της προέλευσης και εξέλιξης του πλανήτη.
- Μελέτη του σχήματος, του εσωτερικού, της δομής, της γεωλογίας, της σύστασης καθώς και του κρατήρα του πλανήτη.
- Εξερεύνηση της εξώσφαιρας (σύστασης και δομής) του πλανήτη
- Μελέτη της μαγνητόσφαιρας του πλανήτη (δομή και δυναμική αυτής)
- Εξερεύνηση της προέλευσης του μαγνητικού πεδίου του πλανήτη.
- Επιβεβαίωση της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein, μετρώντας με μεγάλη ακρίβεια τις παραμέτρους β (βήττα) και γ (γάμμα)

1.1.3 Διαστημική Αποστολή Lisa Pathfinder

Η αποστολή Lisa Pathfinder αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διαστημικές αποστολές της ESA και θα εξετάσει το σενάριο ανίχνευσης βαρυτικών κυμάτων χαμηλής συχνότητας. Συγκεκριμένα θα εξετασθούν δύο μάζες σε τέλειες συνθήκες ελεύθερης πτώσης, μετρώντας και ελέγχοντας τα χαρακτηριστικά της κίνησης τους με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό θα επιτευχθεί με χρήση αισθητήρων αδράνειας, με ειδικό σύστημα drag-free [3] και ένα υπερ-ακριβές σύστημα μικρό-ώθησης.



Εικόνα 1.6: Lisa Pathfinder

Στόχος της αποστολής είναι να αποδείξει, σε διαστημικό περιβάλλον, πως η ελεύθερη πτώση των σωμάτων ακολουθεί το ισοδύναμο των ευθειών γραμμών σε καμπυλόγραμμο χώρο (γεωδαισιακές καμπύλες) με ακρίβεια καλύτερη των δύο τάξεων μεγέθους σε σχέση με μετρήσεις του παρελθόντος.

Η αποστολή

- Αποδεικνύει την ελεύθερη κίνηση των διαστημοπλοίων σε γεωδαισιακές καμπύλες με μοναδική επίδραση την βαρύτητα, μοντελοποιώντας το με δύο πραγματικές μάζες.
- Εξετάζει την ικανότητα υπολογισμού της συμβολομετρικής μετατόπισης (interferometric displacement) [3] με λέιζερ ανάλυσης picom ($1 \times 10^{-12} m$) σε χαμηλές συχνότητες, πλησιάζοντας τα $10^{-12} m Hz^{-1/2}$ σε μάντα συχνοτήτων 1-30 mHz.
- Εξετάζει την αντοχή των διαφόρων οργάνων και εξοπλισμών στο διαστημικό περιβάλλον.

Η διαστημική αποστολή Lisa Pathfinder είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι εξετάζει υπό διαφορετική σκοπιά ζητήματα σχετικά με την ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων στο διάστημα. Μέχρι τώρα η γνώσεις μας για το σύμπαν βασίζεται στις παρατηρήσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως το φως, το υπέρυθρο, το υπεριώδες, τις ακτίνες X και Γ. Όμως με τη συγκεκριμένη αποστολή θα ανιχνευτούν βαρυτικά κύματα που θα επιτρέψουν στους αστροφυσικούς να απαντήσουν βασικά ερωτήματα σχετικά με το σύμπαν όπως η ύπαρξη και η συγχώνευση μαύρων τρυπών.

Βαρυτικά κύματα είναι κυματισμοί στην καμπύλωση του χωροχρόνου που διαδίδονται, ταξιδεύοντας μακριά από την πηγή που τα δημιούργησε. Τα βαρυτικά κύματα είχαν προβλεφθεί από τον A.Einstein το 1916 [4] στα πλαίσια της γενικής θεωρίας της σχετικότητας [5]. Συγκεκριμένα τα βαρυτικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια με τη

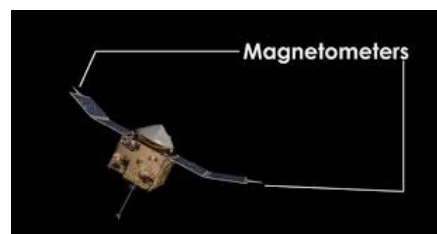
μορφή βαρυτικής ακτινοβολίας. Τα βαρυτικά κύματα είχαν ανιχνευτεί άμεσα το 2015 από το Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory(LIGO) και η ανακάλυψη τους ανακοινώθηκε στις 11 Φεβρουαρίου 2016. Μελετώντας τα βαρυτικά κύματα θα εμπλουτιστούν οι γνώσεις των επιστημόνων για τη γενική θεωρία της σχετικότητας και θα επιτρέψει την ανίχνευση της επίδρασης των αστρονομικών γεγονότων.

Η Lisa Pathfinder αποτελεί μια πρωτοποριακή διαστημική αποστολή καθώς τα πειράματα των δύο μαζών δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν στη Γη, διότι το περιβάλλον και η βαρύτητα της Γης αλλοιώνουν τα πραγματικά αποτελέσματα. Μόνο στο διάστημα είναι δυνατή η ανίχνευση της επίδρασης των βαρυτικών κυμάτων χαμηλής συχνότητας με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

1.2 Ειδικά θέματα διαστημικών αποστολών

1.2.1 Μαγνητική Καθαρότητα

Στις διαστημικές αποστολές πέρα από ένα πλήθος επιστημονικών οργάνων, απαραίτητη είναι η ύπαρξη μαγνητόμετρων. Οι διαστημικές αποστολές έχουν ως βασικό στόχο την εύρεση του μαγνητικού πεδίου των πλανητών, την χαρτογράφηση αυτών καθώς και τη γενικότερη δομή του διαστημικού χώρου. Οι παραπάνω διεργασίες είναι εφικτές με την εγκατάσταση ειδικών μαγνητόμετρων στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό του σκάφους. Συγκεκριμένα τα μαγνητόμετρα είναι επιστημονικά όργανα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου στο χώρο με μεγάλη ευαισθησία. Η υψηλή ευαισθησία αυτών των συσκευών καθιστά απαραίτητη, για την εξασφάλιση πραγματικών μετρήσεων, την ύπαρξη μαγνητικής καθαρότητας στο χώρο όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις. Συγκεκριμένα[6] θα πρέπει στον χώρο εγκατάστασης των μαγνητόμετρων η ένταση του μαγνητικού πεδίου του διαστημοπλοίου να κυμαίνεται μεταξύ 0.1-1nT. Όμως το μαγνητικό πεδίο της Γης(περίπου 5000nT) καθώς και η ύπαρξη των εξωτερικών παρεμβολών (εξωτερικών πεδίων) από τους υπόλοιπους πλανήτες καθιστούν την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητα αρκετά δύσκολη.



Εικόνα 1.7 : Θέση μαγνητόμετρων σε διαστημικό σκάφος

Όπως ήδη αναφέρθηκε η διατήρηση μαγνητικής καθαρότητας είναι ζωτικής σημασίας για διαστημικές αποστολές που πραγματοποιούν μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Αν δεν συμπεριληφθεί η μαγνητική καθαρότητα, είναι αδύνατον να διαχωριστεί το πραγματικό υπάρχων πεδίο του διαστήματος από αυτό που γεννάται από τον διαστημικό σκάφος και τις διάφορες συσκευές του. Η μόλυνση του πεδίου από το αεροσκάφος οφείλεται στο γεγονός πως κάθε διαστημικό σκάφος αποτελείται από άλλα αυτόνομα κομμάτια τα οποία συμπεριφέρονται ως μικροί DC-μαγνήτες εξ αιτίας των ιδιοτήτων των υλικών απ' τα οποία έχουν κατασκευαστεί. Ακόμα κάθε άλλη συσκευή που διαρρέεται από ρεύμα (σύμφωνα με τους νόμους του Maxwell) [7] γεννά ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Άρα κάθε διαστημικό αεροσκάφος σχετίζεται με κάποιο μαγνητικό πεδίο το οποίο εξαρτάται από τα υλικά που έχει κατασκευαστεί και από την ύπαρξη ρευματικών κατανομών.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές καταπολέμησης του προβλήματος της μαγνητικής καθαρότητας. Η πρώτη μέθοδος είναι η μείωση του πεδίου που εκπέμπει το σκάφος

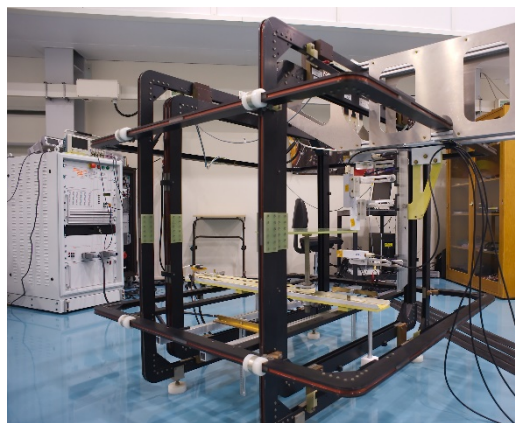
πριν τη λήψη μετρήσεων και η δεύτερη μέθοδος είναι η αφαίρεση του μαγνητικού πεδίου του αεροσκάφους από τα δεδομένα μετά την λήψη των μετρήσεων. Ένας προφανής τρόπος μείωσης της συνεισφοράς του μαγνητικού πεδίου του αεροσκάφους είναι η τοποθέτηση των μαγνητόμετρων μακριά από αυτό. Με βάση την προσέγγιση του απλού δίπολου [8], το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μια πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογο του κύβου της απόστασης ($B \propto r^{-3}$), έτσι αν τοποθετηθεί σε μια διπλάσια απόσταση από την προδιαγεγραμμένη τότε το πεδίο μειώνεται στο οκταπλάσιο. Αυτή η τεχνική δουλεύει και για AC αλλά και για DC πηγές.

Εναλλακτικός τρόπος μείωσης του μαγνητικού πεδίου, αν δεν υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης των μαγνητόμετρων μακριά από το σκάφος, είναι η χρήση σκληρών και όχι μαλακών υλικών. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι περισσότερο ευαίσθητα και επηρεάζονται πολύ εύκολα από την ύπαρξη εξωτερικού πεδίου. Επιπροσθέτως έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα πράγμα που σημαίνει πως μπορούν να μαγνητιστούν εύκολα και να παράγουν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα τα σκληρά μαγνητικά υλικά απαιτούν ισχυρά εξωτερικά μαγνητικά πεδία για να επηρεαστούν. Τελικά η χρήση υλικών όπως το αλουμίνιο είναι κατάλληλα για την εξασφάλιση μαγνητικής καθαρότητας σε σχέση με το ατσάλι.

Γενικά για να εξασφαλιστεί η επιτυχία οποιασδήποτε διαστημικής αποστολής, πρέπει κάθε μεμονωμένη συσκευή να έχει εξετασθεί σε ειδικές εγκαταστάσεις ώστε να είναι γνωστή η ηλεκτρομαγνητική της ταυτότητα. Για το σκοπό αυτό οι μηχανικοί χρησιμοποιούν ειδικά AIT/AIV προγράμματα (Assembly Integration Testing and Verification) [6] που εξασφαλίζουν σε μεγάλο βαθμό ένα μαγνητικά καθαρό περιβάλλον στο εσωτερικό του διαστημικού αεροσκάφους. Τα AIT/AIV προγράμματα εκτελούνται πριν την προγραμματισμένη εκτόξευση του αεροσκάφους προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το περιβάλλον του αεροσκάφους είναι μαγνητικά καθαρό.

1.2.2 Εγκαταστάσεις MCF

Για την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας, ο εξοπλισμός ενός αεροσκάφους υποβάλλεται σε κάποια μαγνητικά τεστ σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις μέτρησης μαγνητικού πεδίου (magnetic coil facilities-MCF). Συγκεκριμένα οι MCF-εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται για την μέτρηση και τον χαρακτηρισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων του εξοπλισμού του αεροσκάφους πριν τα επιμέρους εξαρτήματα τοποθετηθούν στο τελικό αεροσκάφος. Σε τέτοιου είδους τεστ υποβάλλονται τα αεροσκάφη που συνήθως θα πραγματοποιήσουν μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Το υπό εξέταση αντικείμενο τοποθετείται στις ειδικές εγκαταστάσεις και έπειτα λαμβάνονται μετρήσεις σε κυκλικές τροχιές γύρω από



Εικόνα 1.8: Χαρακτηριστική MCF-εγκατάσταση.

αυτό. Με βάση τις μετρήσεις του πεδίου που λαμβάνονται είναι δυνατή η εξακρίβωση της συμπεριφοράς του αντικειμένου μέσα στο αεροσκάφος και κρίνεται για το αν είναι κατάλληλο ή όχι για την διατήρηση της μαγνητικής καθαρότητας μέσα σε αυτό.

Για τον υπολογισμό του μακρινού πεδίου που εξάγει το κάθε αντικείμενο, επειδή δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα όπως το κοντινό πεδίο, χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι. Συγκεκριμένα μέσα από τις μετρήσεις του κοντινού πεδίου που έχουμε λάβει από τις MCF-εγκαταστάσεις, δημιουργούμε μια ομάδα μαγνητικών διπόλων το οποίο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά το μακρινό πεδίο.

Οι MCF-εγκαταστάσεις επιτρέπουν συνοπτικά τις εξής διαδικασίες:

- Αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης, χρησιμοποιώντας δύο ζεύγη πηνίων Helmholtz [9]
- Απομαγνήτιση των επιμέρους μονάδων του εξοπλισμού
- Έλεγχος της ευαισθησίας του εξοπλισμού στον μαγνητισμό
- Αυτόματη επανάκτηση του μαγνητικού πεδίου του εξοπλισμού κατά την περιστροφή του 360° και υπολογισμός του ισοδύναμου μοντέλου πολλαπλών διπόλων (multiple dipole model) [10]. Επίλυση, στην πραγματικότητα, του αντίστροφου μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος του μοντέλου πολλαπλών διπόλων αφορά τη μοντελοποίηση του DC-μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν εξοπλισμό που αποτελείται από ένα σύνολο μαγνητικών διπόλων με συγκεκριμένες θέσεις, προσανατολισμό και πλάτος πεδίου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο αξίωμα [10] πως ένα δεδομένο αντικείμενο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο πεπερασμένων διπόλων.

2.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ- ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1 Εξισώσεις Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell στον ελεύθερο χώρο και σε διαφορική μορφή μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως, θεωρώντας \mathbf{E} την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και \mathbf{B} το μαγνητικό πεδίο:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.1.4)$$

Όπου ρ η πυκνότητα φορτίου, \mathbf{J} η πυκνότητα ρεύματος, t ο χρόνος, μ_0 η διαπερατότητα του ελευθέρου χώρου και ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του ελευθέρου χώρου.

Οι παραπάνω εξισώσεις όταν αναφέρονται σε ένα υλικό με σχετική διαπερατότητα μ_r και σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , τροποποιούνται ως εξής :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1.8)$$

Όπου :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$$

Είναι επίσης δυνατή η έκφραση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} μέσα από το διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} ως εξής :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.1.9)$$

καθώς σε πολλά μαθηματικά προβλήματα είναι ευκολότερο πολλές φορές ο προσδιορισμός του διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} και μετά με τη βοήθεια της ανωτέρω εξίσωσης ο προσδιορισμός του \mathbf{B} .

Ας θεωρηθεί το παράδειγμα του ελευθέρου χώρου δίχως κανένα είδους φορτίο. Τότε εφαρμόζοντας τις εξισώσεις 2.1.6 και 2.1.8 για τον ελεύθερο χώρο προκύπτουν:

$$\nabla \cdot \mathbf{B}=0 \quad (2.1.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}=0 \quad (2.1.11)$$

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση της σχέσης 2.1.9 και με δεδομένη τη σχέση που συνδέει τα μεγέθη \mathbf{B}, \mathbf{H} ($B=\mu H$) προκύπτουν τα ακόλουθα :

$$\nabla \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu}=0 \quad (2.1.12)$$

$$\nabla \cdot \frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu}=0 \quad (2.1.13)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) =0 \quad (2.1.14)$$

$$\nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}=0 \quad (2.1.15)$$

Με βάση την προσέγγιση του στατικού μαγνητικού πεδίου [11] μπορούμε να θεωρήσουμε $\nabla \cdot \mathbf{A}=0$

Αρα τελικά προκύπτει η σχέση: $\nabla^2 \mathbf{A}=0$ (2.1.16), η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση Laplace (*Laplace Equation*)

2.2 DC-μοντελοποίηση διπόλου

2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο DC-μοντελοποίησης.

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η περίπτωση πρόβλεψης του μακρινού μαγνητικού πεδίου ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού (EUT) από μετρήσεις που λαμβάνονται από κοντινές μετρήσεις πεδίου. Για την κατανόηση της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο πολλαπλών μαγνητικών διπόλων (*Multiple magnetic dipole model*) [10]. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου (θέσης και μαγνητικής ροπής) γίνεται με χρήση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης (Particle Swarm Optimization algorithm) ο οποίος χρησιμοποιεί τις κοντινές μετρήσεις πεδίου που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί.

Το πρόβλημα αυτό, υπολογισμού της θέσης του διπόλου, ανήκει στην κατηγορία των αντίστροφων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων και βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση για τη σωστή λήψη των μετρήσεων από τα μαγνητόμετρα είναι απαραίτητη η επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας εντός του διαστημικού αεροσκάφους. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου η καταγραφή του μαγνητικού

πεδίου σχετίζεται με μικρές τιμές έντασης αυτού, περίπου 0.1-1nT [10], η επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας καθίσταται ζωτικής σημασίας.

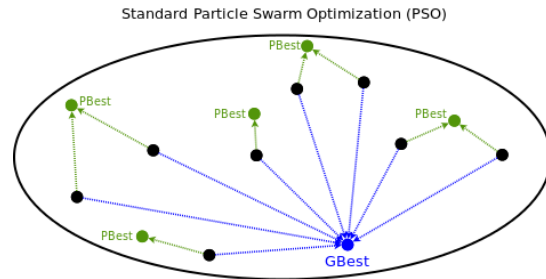
Για τη σωστή εκτίμηση της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού έχουν αναπτυχθεί διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι. Τέτοιες μέθοδοι έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί [10] και βασίζονται στο μοντέλο πολλαπλών διπόλων. Οι παράμετροι του μοντέλου (θέση και μαγνητική ροπή) υπολογίζονται από μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ειδικές εγκαταστάσεις(MCF-εγκαταστάσεις). Λαμβάνοντας αυτές τις μετρήσεις και με χρήση ειδικών αλγορίθμων είναι δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων του προβλήματος. Το μοντέλο πολλαπλών διπόλων βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις όπως στην ανάλυση κοντινού πεδίου κεραιών[12], στην προσομοίωση ηλεκτροκαρδιογραφήματος [13] και στην αναπαράσταση της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [14]. Εναλλακτικές τεχνικές για ντετερμινιστικές μεθόδους είναι σήμερα διαθέσιμες ώστε να επιλύσουν προβλήματα βελτιστοποίησης όπως η μελέτη προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Από την άλλη μεριά, στοχαστικές μέθοδοι έχουν αρχίσει ευρέως να χρησιμοποιούνται με συντριπτικά πλεονεκτήματα έναντι των ντετερμινιστικών. Οι στοχαστικές τεχνικές δεν απαιτούν προσδιορισμό σημείου αναφοράς ούτε την λήψη διάφορων παραδοχών στις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων είναι η σημαντική υπολογιστική πολυπλοκότητα λόγω της χρήσης μεγάλου αριθμού συναρτήσεων. Για το λόγο αυτό η χρήση υπολογιστικής μηχανής είναι απαραίτητη.

Στην παρούσα ενότητα για την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου που παράγει ο δοκιμαστικός εξοπλισμός γίνεται χρήση του αλγορίθμου PSO (Particle Swarm Optimization). Αυτός ο αλγόριθμος παράγει μια ομάδα διπόλων με τέτοιες θέσεις και μαγνητικές ροπές που αυξάνουν την πιθανότητα ακριβούς υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Για το λόγο αυτό θεωρείται ένα θεωρητικό μοντέλο με συγκεκριμένες θέσεις και μαγνητικές ροπές των διπόλων. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται οι θεωρητικές τιμές του πεδίου του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Συνήθως οι θέσεις των διπόλων βρίσκονται σε κυκλική τροχιά γύρω από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Στη συνέχεια οι θεωρητικές τιμές του πεδίου αλλοιώνονται προσθέτοντας θόρυβο. Η απόκλιση αυτή του θορύβου κυμαίνεται από 1% έως 5% επί των θεωρητικών τιμών του πεδίου.

Με βάση τις τιμές που προκύπτουν, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των θέσεων και των μαγνητικών ροπών των διπόλων.

2.2.2 Σύντομη επισκόπηση PSO-αλγορίθμου.

Ο PSO αλγόριθμος είναι σχετικά μια σχετικά καινούρια αναπτυσσόμενη υπολογιστική μέθοδος και βασίζεται στην κίνηση και νοημοσύνη των σμήνων. Αναπτύχθηκε από τους Kennedy και Eberhart το 1995 [15] και βασίζεται στην κίνηση ενός σμήνου σωματιδίων μέσα σε ένα πεδίο. Βασικός στόχος είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων των σωματιδίων σε έναν συγκεκριμένο χώρο. Η αρχική θέση των σωματιδίων είναι τυχαία καθώς τυχαία είναι επίσης και η ταχύτητα με την οποία κινούνται. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια αρχική φάση του προβλήματος. Σε κάθε επαναληπτικό βήμα του αλγορίθμου οι ταχύτητες των σωματιδίων αλλάζουν με βάση την βέλτιστη θέση καθενός σωματιδίου καθώς και τον υπολογισμό του συνολικού βέλτιστου διάνυσματος θέσεων. Το trade-off μεταξύ της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και επίτευξης του βέλτιστου καθορίζεται από 2 παράγοντες που ελέγχουν ποιο από τα δύο χαρακτηριστικά είναι καλύτερο. Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου οι θέσεις των σωματιδίων και οι ταχύτητες αυτών ενημερώνονται συνεχώς μέχρις ότου επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.



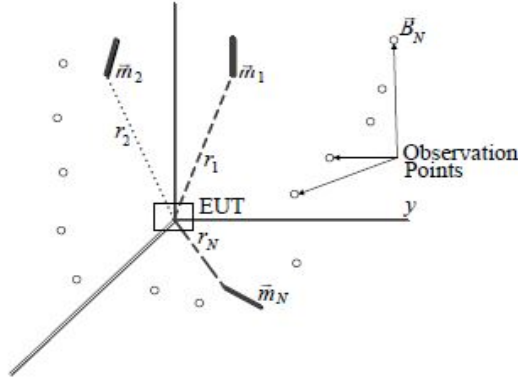
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση PSO-αλγορίθμου

Οι όροι και οι βασικές οντότητες του αλγορίθμου περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

1. Σωματίδιο: κάθε στοιχείο του σμήνου. Η αρχική θέση αυτών είναι τυχαία και αλλάζει συνεχώς προς την επίτευξη βέλτιστης λύσης.
2. Θέση: Η θέση του κάθε σωματιδίου προσδιορίζεται από ένα διάνυσμα-στήλη 6 στοιχείων, $\mathbf{D}=(x_i, y_i, z_i, mx_i, my_i, mz_i)$, $i=1,2,\dots,N$.
3. Καταλληλότητα-Προσαρμογή: Αποτελεί μέτρο υπολογισμού της βελτιστοποίησης (βέλτιστης προσαρμογής) του μοντέλου.
4. pbest: Η θέση με την μικρότερη προσαρμοστική τιμή σε σχέση με κάθε σωματίδιο ξεχωριστά.
5. gbest: Η θέση με την μικρότερη προσαρμοστική τιμή συγκριτικά με όλα τα σωματίδια.

2.2.3 Μαθηματική περιγραφή προβλήματος

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η γεωμετρία του υπό εξέταση προβλήματος. Ο δοκιμαστικός εξοπλισμός τοποθετείται στην αρχή των αξόνων δηλαδή στο σημείο $O(0,0,0)$. Η μαγνητική συμπεριφορά του εξοπλισμού μοντελοποιείται με τη βοήθεια ενός συνόλου μαγνητικών διπόλων.



Εικόνα 2.2: Γεωμετρία προβλήματος

Τα δίπολα βρίσκονται σε θέσεις (x_i, y_i, z_i) , $i=1,2,\dots,N$, με μαγνητικές ροπές \vec{m}_i , όπου

$$\vec{m}_i = m x_i \cdot \hat{x} + m y_i \cdot \hat{y} + m z_i \cdot \hat{z} \quad (2.2.1)$$

Τα M σημεία παρατήρησης βρίσκονται στα σημεία (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , $j=1,2,\dots,M$. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο του i -στου διπόλου εκφράζεται ως υπέρθεση των επιμέρους συνιστωσών $B x_{ij}$, $B y_{ij}$, $B z_{ij}$ ως εξής

$$\vec{B}_{ij} = B x_{ij} \cdot \hat{x} + B y_{ij} \cdot \hat{y} + B z_{ij} \cdot \hat{z} \quad (2.2.2)$$

Όπου :

$$B x_{ij} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (x_{0j} - x_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot L_{ij} - \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{m x_i}{\rho_{ij}^3} \quad (2.2.3)$$

$$B y_{ij} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (y_{0j} - y_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot L_{ij} - \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{m y_i}{\rho_{ij}^3} \quad (2.2.4)$$

$$B z_{ij} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z_{0j} - z_i)}{\rho_{ij}^5} \cdot L_{ij} - \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{m z_i}{\rho_{ij}^3} \quad (2.2.5)$$

$$L_{ij} = m x_i \cdot (x_{0j} - x_i) + m y_i \cdot (y_{0j} - y_i) + m z_i \cdot (z_{0j} - z_i) \quad (2.2.6)$$

και

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_i)^2 + (y_{0j} - y_i)^2 + (z_{0j} - z_i)^2} \quad (2.2.7)$$

Τελικά το συνολικό μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο παρατήρησης j μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\vec{B}_j = \sum_{i=1}^N Bx_{ij} \cdot \hat{x} + \sum_{i=1}^N By_{ij} \cdot \hat{y} + \sum_{i=1}^N Bz_{ij} \cdot \hat{z} \quad (2.2.8)$$

Εναλλακτικά ένας συμπαγής και κλειστός τύπος υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο είναι ο ακόλουθος:

$$\mathbf{B}(\boldsymbol{\rho}) = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{3 \cdot (\boldsymbol{\rho}) \cdot (\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{m})}{|\boldsymbol{\rho}|^5} - \frac{\mathbf{m}}{|\boldsymbol{\rho}|^3} \right] \quad (2.2.9)$$

2.2.4 Εφαρμογή PSO-αλγορίθμου για το πρόβλημα πολλαπλών μαγνητικών διπόλων.

Για τη μοντελοποίηση του MDM(multiple dipole model) προβλήματος θεωρούμε ένα $(3 \times M)$ πίνακα TB_{th} . Αυτός ο πίνακας περιέχει τις τιμές του μαγνητικού πεδίου στα σημεία παρατήρησης $j=1,2,\dots,M$. Οι παραγόμενες τιμές του πεδίου κάθε επανάληψης αποθηκεύονται σε έναν άλλο πίνακα TB $(3 \times M)$. Καθώς ο αλγόριθμος τρέχει κάθε σωματίδιο ενημερώνει τη θέση του και έπειτα με βάση τις εξισώσεις 2.2.1-2.2.8 υπολογίζονται οι τιμές του πεδίου, οι οποίες ενημερώνουν τον TB πίνακα. Αφού υπολογιστούν τα p_{best} και g_{best} , οι θέσεις των σωματιδίων ενημερώνονται σύμφωνα με τη σχέση 2.2.10. Η ταχύτητα του i -οστού στοιχείου του n -οστού διπόλου υπολογίζεται ως:

$$u_{in} = w \cdot u_{in} + c_1 \cdot rand() \cdot (p_{best_{in}} - p_{in}) + c_2 \cdot rand() \cdot (g_{best_{in}} - p_{in}) \quad (2.2.10)$$

Όπου w αναπαριστά την κλίμακα της ταχύτητας της προηγούμενης επανάληψης και c_1, c_2 σταθερές που καθορίζουν το trade-off μεταξύ εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και επίτευξης του βέλτιστου. Το p_{in} αναπαριστά τη θέση του i -οστού στοιχείου του n -οστού διπόλου. Έτσι η τελική θέση υπολογίζεται ως εξής:

$$p_{in} = p_{in} + u_{in} \quad (2.2.11)$$

Ως κριτήριο απόδοσης και καταλληλότητας του μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί ο υπολογισμός της rms τιμής των δύο πινάκων ως εξής:

$$Rmsvalue = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (TB_{ij} - TB_{th_{ij}})^2}{N}} \quad (2.2.12)$$

2.3 AC-μοντελοποίηση διπόλου

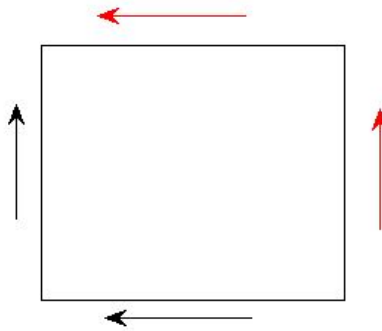
2.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προσδιορισμός της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλές επιστημονικές εφαρμογές. Επιπροσθέτως η επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας είναι εξίσου σημαντική για την ακριβή λήψη μετρήσεων μαγνητικού πεδίου από έναν δοκιμαστικό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα σε αρκετές διαστημικές αποστολές πραγματοποιούνται τοπικές μετρήσεις πραγματικού χρόνου AC-μαγνητικού πεδίου. Τέτοιου είδους μετρήσεις απαιτούν μεγάλη ακρίβεια για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η ύπαρξη μαγνητικής καθαρότητας στις θέσεις όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις. Για τον ακριβή προσδιορισμό τέτοιων μαγνητικά καθαρών θέσεων, όπου εκεί θα τοποθετηθούν τα μαγνητόμετρα, πρέπει να πληρούνται πολύ αυστηρές προϋποθέσεις μαγνητικής καθαρότητας.

Δεδομένου πως ο εξοπλισμός που τοποθετείται στο διαστημικό αεροσκάφος είναι η κύρια αιτία μόλυνσης των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου, η εκτενής εξέταση των επιμέρους εξοπλισμών του σκάφους (που λειτουργούν σαν πηγές μαγνητικού πεδίου) είναι ιδιαίτερα σημαντική. Κάθε δοκιμαστικός εξοπλισμός μπορεί να θεωρηθεί σαν μια υπέρθεση πηγών συνεχούς ρεύματος (dc-sources) και εναλλασσόμενου ρεύματος (ac-sources). Τέτοιου είδους διαχωρισμός είναι απαραίτητος για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων των μαγνητικών πηγών. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η ορθή επέκταση του μαγνητικού πεδίου του δοκιμαστικού εξοπλισμού (extrapolated-field) σε συγκεκριμένα σημεία παρατήρησης. Κατά κανόνα οι πηγές συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος αντιμετωπίζονται σαν μαγνητικά δίπολα, για το λόγο αυτό θεωρείται πως το μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται με βάση το νόμο r^{-3} (power-law) του κλασικού διπόλου [10,16]. Αυτή η υπόθεση δεν είναι όμως πάντα σωστή εξαιτίας πολλών παραγόντων που επιδρούν στη μαγνητική συμπεριφορά της πηγής. Για παράδειγμα, ο αριθμός, οι θέσεις καθώς και οι παράμετροι των μαγνητικών βρόχων μέσα σε έναν δοκιμαστικό εξοπλισμό επηρεάζουν τη μαγνητική συμπεριφορά του και οδηγούν σε έναν άλλο νόμο ελάττωσης μαγνητικού πεδίου.

Κάθε δοκιμαστικός εξοπλισμός είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας περισσότερους του ενός βρόχου, πράγμα το οποίο μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία ακούσιων ρευματικών κατανομών γνωστών σαν *common-mode current* [17]. Τέτοιου είδους ρεύματα εμφανίζονται σε πολλές περιπτώσεις όπως σύρματα, κυκλώματα και άλλες μεταλλικές διατάξεις. Τα common-mode ρεύματα είναι κατά κανόνα ανεπιθύμητα και πολλές φορές παράγουν τιμές μαγνητικού πεδίου υψηλότερες από αυτές που παράγουν τα differential-mode ρεύματα.

Στην εικόνα 2.3 απεικονίζεται ένας τετραγωνικός βρόχος ο οποίος διαρρέεται από σταθερό ρεύμα. Τα ακούσια επαγόμενα ρεύματα (κόκκινο χρώμα) έχουν διαφορετική από την αναμενόμενη φορά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την τροποποίηση του μαγνητικού πεδίου του τετραγωνικού βρόχου και κατά συνέπεια την απόκλιση, κατά πολύ, από το νόμο r^{-3} . Τα βελάκια με μαύρο χρώμα, απεικονίζουν το differential current.



Εικόνα 2.3: Common και Differential current ενός τετραγωνικού βρόχου.

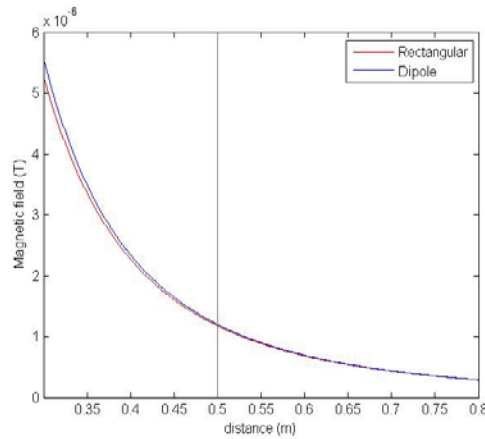
2.3.2 Νόμος Biot-Savart

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου ενός πεπερασμένου στοιχείου με μήκος dl , το οποίο διαρρέεται από σταθερό ρεύμα I , χρησιμοποιείται ο νόμος Biot-Savart ως εξής:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \oint \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3} \quad (2.3.1)$$

Όπου \mathbf{R} είναι το διάνυσμα απόστασης ανάμεσα στο σημείο παρατήρησης και στο στοιχειώδες σημείο ολοκλήρωσης πάνω στο βρόχο. Το ολοκλήρωμα υπολογίζεται επί της καμπύλης (επικαμπύλιο ολοκλήρωμα) που διέρχεται η ρευματική κατανομή.

Προκειμένου να εντοπισθούν τυχόν περιορισμοί στον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου ενός διπόλου, που μοντελοποιεί τους βρόχους ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού, συγκρίνεται το μαγνητικό του πεδίο με αυτό ενός απλού τετραγωνικού βρόχου πλευράς 0.1m. Και οι δύο πηγές είναι τοποθετημένες στην αρχή των αξόνων και έχουν ίσες μαγνητικές ροπές μ ($\mu = I \cdot A$ όπου A το εμβαδόν που περικλείει ο βρόχος). Όπως φαίνεται από την εικόνα 2.4 η μαγνητική συμπεριφορά των δύο πηγών είναι παρόμοια όταν το σημείο παρατήρησης απέχει το 5πλάσιο της πλευράς του τετραγώνου [18]. Πέρα από αυτή την απόσταση το μαγνητικό πεδίο του τετραγώνου ακολουθεί το νόμο ελάττωσης r^{-3} [8]. Όμως πριν από αυτή την απόσταση ο νόμος των δύο πηγών φαίνεται να αποκλίνει από τον κλασικό νόμο r^{-3} .



Εικόνα 2.4: Ένταση μαγνητικού πεδίου διπόλου και τετραγωνικού θρόχου.

2.3.3 Διανυσματικό Δυναμικό

Το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ εξαιτίας μιας AC ρευματικής κατανομής είναι δυνατό να υπολογιστεί είτε άμεσα με τον νόμο Biot-Savart που ήδη αναφέρθηκε είτε έμμεσα με χρήση του διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} .

Με κατάλληλη επεξεργασία των εξισώσεων του Maxwell είναι δυνατή η έκφραση της κυματικής εξίσωσης του ηλεκτρικού δυναμικού Φ καθώς και του διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} ως εξής:

$$\nabla^2 \cdot \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.3.2)$$

Και

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (2.3.3)$$

Η λύση των παραπάνω εξισώσεων μπορεί να βρεθεί εφαρμόζοντας τις συναρτήσεις Green για την κυματική εξίσωση [8].

Συγκεκριμένα ας θεωρήσουμε πως υπάρχει μια πηγή πυκνότητας ρεύματος $\mathbf{J}(\mathbf{x}', t')$ στη θέση $\mathbf{x}'=(x', y', z')$, τη χρονική στιγμή t' . Τότε το διανυσματικό δυναμικό σε ένα σημείο παρατήρησης $\mathbf{x}=(x, y, z)$ τη στιγμή t εκφράζεται ως:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R} \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') d^3 x' \quad (2.3.4)$$

Όπου $R = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ είναι η απόσταση μεταξύ σημείου παρατήρησης και σημείου ολοκλήρωσης και $t' = t - R/c = t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c$ είναι ο χρόνος καθυστέρησης και εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το κύμα να διαδοθεί από το σημείο x' στο σημείο x .

Αν θεωρηθεί $\mathbf{J}(\mathbf{x}', t) = \mathbf{J}(\mathbf{x}') \cdot e^{j\omega t}$, τότε η 2.3.4 γράφεται ισοδύναμα:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_V \mathbf{J}(\mathbf{x}') \cdot \frac{e^{-ikr}}{r} dV' \quad (2.3.5)$$

Όπου $k=\omega/c$.

Τέλος το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται ως :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.3.6)$$

Εκτός από τον έμμεσο υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} μέσα από τη σχέση 2.3.6, υπάρχει ισοδύναμη απευθείας έκφραση. Από τη στροφή (curl) του νόμου του Ampere προκύπτει:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0(\nabla \times \mathbf{J}) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \times \mathbf{E}) \quad (2.3.7)$$

Από τους νόμους του Faraday και του Maxwell για τον μαγνητισμό, η παραπάνω σχέση αποδίδει την κυματική εξίσωση για το μαγνητικό πεδίο ως:

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{J}) \quad (2.3.8)$$

Από την παραπάνω κυματική εξίσωση εφαρμόζοντας τις συναρτήσεις Green προκύπτει:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \left[\frac{1}{R^2} \mathbf{J}(\mathbf{x}', t') + \frac{1}{cR} \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right] \times \hat{\mathbf{R}} d^3x' \quad (2.3.9)$$

Όμοια το ηλεκτρικό πεδίο προκύπτει:

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left[\frac{\hat{\mathbf{R}}}{R^2} \rho(\mathbf{x}', t) + \frac{\hat{\mathbf{R}}}{cR} \frac{\partial \rho(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} - \frac{1}{cR^2} \frac{\partial \mathbf{J}(\mathbf{x}', t')}{\partial t'} \right] d^3x' \quad (2.3.10)$$

Από τις εξισώσεις 2.3.9 και 2.3.10 (γενικευμένες εξισώσεις μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου) φαίνεται ξεκάθαρα πως η πυκνότητα ρεύματος \mathbf{J} είναι αυτή που γεννά το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Η σχέση που συνδέει την χωρική πυκνότητα ρ με την πυκνότητα ρεύματος είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial \rho(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (2.3.11)$$

2.4 Μαθηματική ανάλυση ορθογωνικού βρόχου

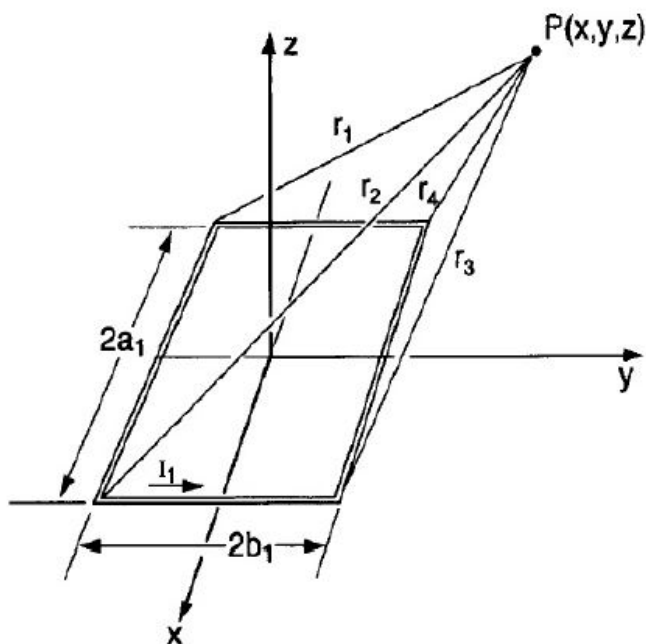
2.4.1 Αναλυτική λύση

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η περίπτωση ορθογωνικού βρόχου διαστάσεων $2a \times 2b$ ο οποίος βρίσκεται στο xy -επίπεδο. Για τον υπολογισμό του χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου κάνουμε χρήση των σχέσεων 2.3.4 και 2.3.6 ή ισοδύναμα τη σχέση 2.3.9. Χωρίζοντας τον βρόχο σε 4 σύρματα (πλευρές), παρατηρείται ροή ρεύματος σε x -διεύθυνση για τις πλευρές 1,3 και σε y -διεύθυνση για τις πλευρές 2,4. Θεωρώντας αμελητέα τη διατομή του σύρματος, η πυκνότητα ρεύματος J της πλευράς 1 μπορεί να γραφεί ως:

$$J(x',t) = \begin{cases} I_1(t')\delta(z')\delta(y'-b)\hat{x}, & -a < x < a. \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.4.1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, θεωρείται πως η χωρική και η χρονική μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος είναι ανεξάρτητες γι' αυτό το λόγο διαχωρίστηκαν. Η υπόθεση αυτή είναι λογική καθώς το μήκος κύματος λ ενός χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του ορθογωνικού βρόχου.

Η διάταξη που εξετάζεται φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.5: Ορθογωνικός βρόχος στο xy -επίπεδο

Το διάνυσμα της απόστασης ενός τυχαίου σημείου παρατήρησης P από την πρώτη πλευρά μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{x} - \mathbf{x}' = (x - x')\hat{x} + (y - b)\hat{y} + z\hat{z} \quad (2.4.2)$$

Μέτρο του διανύσματος \mathbf{R}_1 , θεωρούμε το $R_1 = |\mathbf{R}_1|$.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του διανυσματικού δυναμικού σε καρτεσιανές συντεταγμένες προκύπτει :

$$A_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R_1} I_1(t') \delta(z') \delta(y' - b) d^3x' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{I_1(t')}{R_1} dx' \Rightarrow$$

$$A_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{I_1(t - R_1/c)}{\sqrt{(x - x')^2 + (y + b)^2 + z^2}} dx' \quad (2.4.3)$$

Όμοια, λαμβάνοντας υπόψιν την φορά του ρεύματος κάθε φορά, προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις για τις υπόλοιπες τρεις πλευρές:

$$A_{x3}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_a^{-a} \frac{I_1(t - R_3/c)}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - b)^2 + z^2}} dx' \quad (2.4.4)$$

$$A_{y2}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-b}^b \frac{I_1(t - R_2/c)}{\sqrt{(x + a)^2 + (y - y')^2 + z^2}} dy' \quad (2.4.5)$$

$$A_{y4}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_b^{-b} \frac{I_1(t - R_4/c)}{\sqrt{(x - a)^2 + (y - y')^2 + z^2}} dy' \quad (2.4.6)$$

Για να υπολογισθούν αναλυτικά τα παραπάνω ολοκληρώματα, είναι απαραίτητη η γνώση της χρονικής συμπεριφοράς του ρεύματος $I(t)$. Επιπροσθέτως είναι δυνατές ορισμένες απλοποιήσεις που σχετίζονται με τη θέση του σημείου παρατήρησης, ώστε να απλουστευτούν οι υπολογισμοί των ολοκληρωμάτων. Συγκεκριμένα έστω d η μεγαλύτερη διάσταση του ορθογωνικού βρόχου, τότε μπορούμε να χωρίσουμε το χώρο μελέτης σε τρεις περιοχές:

- Την κοντινή (στατική) περιοχή, όπου $d \ll r \ll \lambda$
- Την ενδιάμεση (επαγωγική) περιοχή, όπου $d \ll r \sim \lambda$
- Την μακρινή (ακτινοβολούμενη) περιοχή, όπου $d \ll \lambda \ll r$

2.4.2 Αναλυτική λύση κοντινής περιοχής

Στην κοντινή περιοχή, η απόσταση παρατήρησης είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με την ταχύτητα του φωτός. Ένα φαινόμενο που συμβαίνει στη θέση x' θα γίνει αμέσως αντιληπτό και στη θέση x . Επομένως υποθέτουμε πως $R_1, R_2, R_3, R_4 \ll c$ και έτσι απαλείφονται οι όροι $R_i/c, i=1,2,3,4$ από τις εξισώσεις 2.4.3 έως 2.4.6. Το ολοκλήρωμα για την πρώτη πλευρά γίνεται στην περίπτωση αυτή:

$$A_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y+b)^2 + z^2}} dx' \Rightarrow$$

$$A_{x1}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left[\frac{(r_1 + a + x)}{(r_2 - a + x)} \right] \quad (2.4.7)$$

Υπολογίζοντας όλα τα ολοκληρώματα και αθροίζοντας τις συνεισφορές τους (ανά δύο) προκύπτει η τελική λύση για τις συνιστώσες του διανυσματικού δυναμικού:

$$A_x(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left[\frac{(r_1 + a + x)}{(r_2 - a + x)} \cdot \frac{(r_3 - a + x)}{(r_4 + a + x)} \right] \quad (2.4.8)$$

$$A_y(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \ln \left[\frac{(r_2 + b + y)}{(r_3 - b + y)} \cdot \frac{(r_4 - b + y)}{(r_1 + b + y)} \right] \quad (2.4.9)$$

Όπου οι αποστάσεις r_1, r_2, r_3, r_4 από τις άκρες του βρόχου είναι:

$$r_1 = \sqrt{(a+x)^2 + (y+b)^2 + (z)^2} \quad (2.4.10)$$

$$r_2 = \sqrt{(a-x)^2 + (y+b)^2 + (z)^2} \quad (2.4.11)$$

$$r_3 = \sqrt{(a-x)^2 + (y-b)^2 + (z)^2} \quad (2.4.12)$$

$$r_4 = \sqrt{(a+x)^2 + (y-b)^2 + (z)^2} \quad (2.4.13)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.3.6, οι συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται ως:

$$B_x = -\frac{\partial A_y}{\partial z}, \quad B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z}, \quad B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (2.4.14)$$

Εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες μερικές παραγώγους για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, τελικά προκύπτει:

$$B_x(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \frac{(-1)^{n+1} z}{r_n [r_n + d_n]} \quad (2.4.15)$$

$$B_y(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \frac{(-1)^{n+1} z}{r_n [r_n + (-1)^{n+1} c_n]} \quad (2.4.16)$$

$$B_z(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 I_1(t)}{4\pi} \sum_{n=1}^4 \left[\frac{(-1)^n d_n}{r_n [r_n + (-1)^{n+1} c_n]} - \frac{c_n}{r_n [r_n + c_n]} \right] \quad (2.4.17)$$

$$\begin{array}{lll} \text{όπου} & c_1 = -c_4 = \alpha + x & d_1 = d_2 = y + b \\ & c_2 = -c_3 = \alpha - x & d_3 = d_4 = y - b \end{array}$$

Από τις εξισώσεις 2.4.15 έως 2.4.17 φαίνεται πως το η χρονική συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της χρονικής κατανομής του ρεύματος ($B(t) \sim I(t)$). Τέλος ο χαρακτήρας του πεδίου είναι ημι-στατικός και τα χαρακτηριστικά του βρόχου (σχήμα, μέγεθος, ρευματική κατανομή) παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή της τελικής μορφής του πεδίου.

2.4.3 Αναλυτική λύση μακρινής περιοχής

Όπως και στην κοντινή περιοχή, για τη διευκόλυνση της επίλυσης, γίνονται ορισμένες απλοποιήσεις. Στην περίπτωση της μακρινής περιοχής εκφράζουμε την χρονοεξαρτώμενη πυκνότητα ρεύματος σαν ένα ολοκλήρωμα Fourier. Αναλύοντας την πηγή κατά Fourier είναι πιο εύκολος ο χειρισμός των συχνοτήτων σαν ανεξάρτητες μεταξύ τους.

Ο μετασχηματισμός Fourier της πυκνότητας ρεύματος είναι:

$$J(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(\mathbf{x}, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.4.18)$$

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να μελετήσουμε το πρόβλημα για μια κυκλική συχνότητα ω . Οι υπέρθεση των επιμέρους λύσεων μπορεί να γενικεύσει το αποτέλεσμα για πολλαπλές συχνότητες. Οι πηγές μπορούν να εκφραστούν ως:

$$J(\mathbf{x}, t) = J(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \quad (2.4.19)$$

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}) e^{-i\omega t} \quad (2.4.20)$$

Οι φυσικές οντότητες λαμβάνονται παίρνοντας το πραγματικό μέρος των παραπάνω εξισώσεων. Το διανυσματικό δυναμικό από τη σχέση 2.3.4 γράφεται ως:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{R} J(\mathbf{x}') e^{-i\omega(t - \frac{R}{c})} d^3x' = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \int \frac{e^{-ikR}}{R} J(\mathbf{x}') d^3x' \quad (2.4.21)$$

Όπου $k = \omega/c$ ο κυματαριθμός και $R = |\mathbf{R}| = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$. Φαίνεται ξεκάθαρα πως στην κοντινή περιοχή, όπου ισχύει $kr \ll 1$, το εκθετικό μέσα στο ολοκλήρωμα μπορεί να αντικατασταθεί με τη μονάδα, καθώς $e^{-ikR} \rightarrow 1$. Έτσι οδηγούμαστε στην προηγούμενη λύση. Στην περίπτωση του μακρινού πεδίου ($kr \gg 1$) η απόσταση R προσεγγίζεται ως:

$$|\mathbf{x} - \mathbf{x}'| = r - \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}' \quad (2.4.22)$$

όπου \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση του \mathbf{x} . Στην πραγματικότητα, αυτή η προσέγγιση ισοδυναμεί με την $r \gg d$ και είναι επαρκής ακόμα και στην περίπτωση του κοντινού πεδίου. Ακόμα αν κρατήσουμε μόνο τον επικρατή όρο του kr , μπορούμε να αντικαταστήσουμε το αντίστροφο της απόστασης με το r . Τότε το διανυσματικό δυναμικό προκύπτει:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') e^{-ik\mathbf{n}\cdot\mathbf{x}'} d^3x' \quad (2.4.23)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως στη μακρινή περιοχή το διανυσματικό δυναμικό συμπεριφέρεται σαν ένα σφαιρικά εξερχόμενο κύμα το οποίο εξαρτάται από τη γωνιακή συχνότητα ω . Είναι εύκολο να δειχθεί πως τα πεδία που προκύπτουν είναι εγκάρσια προς το διάνυσμα της ακτίνας και ο νόμος ελάττωσής τους είναι r^{-1} . Σε περίπτωση όπου οι διαστάσεις του βρόχου είναι πολύ μικρές συγκριτικά με το μήκος κύματος λ , τότε η ανάλυση του εκθετικού σε δυνάμεις δίνει:

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \sum_n \frac{(-ik)^n}{n!} \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') (\mathbf{n}\cdot\mathbf{x}')^n d^3x' \quad (2.4.24)$$

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται στο μακρινό πεδίο οφείλεται κυρίως στον πρώτο μη μηδενικό όρο της σειράς. Έτσι η έκφραση του διανυσματικού δυναμικού για έναν τετραγωνικό βρόχο προκύπτει :

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{(-ik)\mu_0 a^2 I_1 e^{-i\omega t}}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \sin(\theta) \hat{\phi} \quad (2.4.25)$$

Από τον παραπάνω τύπο είναι πολύ απλός πλέον ο υπολογισμός του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

2.4.4 Αναλυτική λύση ενδιαμέσης περιοχής

Στην ενδιαμέση περιοχή δεν είναι δυνατή η εφαρμογή κάποιας προσέγγισης όπως έγινε στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις. Χρησιμοποιώντας τη σφαιρική συνάρτηση Green και υποθέτοντας πως οι διαστάσεις του βρόχου είναι μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος λ , το διανυσματικό δυναμικό προκύπτει:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = & \frac{\mu_0 e^{-i\omega t}}{4\pi} \sum_{l,m} \frac{4\pi}{2l+1} Y_{lm}(\theta, \varphi) \frac{e^{ikr}}{r^{l+1}} [1 + a_1(ikr) + \dots \\ & + a_l(ikr)^l] \int \mathbf{J}(\mathbf{x}') r'^l Y_{lm}^*(\theta', \varphi') d^3x' \end{aligned} \quad (2.4.26)$$

όπου $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ είναι αρμονικές σφαιρικές συναρτήσεις και οι συντελεστές a_i προέρχονται από τις σφαιρικές συναρτήσεις Hankel. Ο όρος

$$\frac{e^{ikr}}{r^{l+1}} [1 + a_1(ikr) + \dots + a_l(ikr)^l]$$

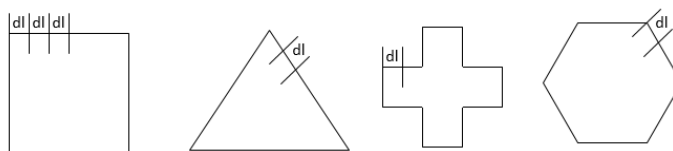
δείχνει στην πραγματικότητα την μετάβαση από την κοντινή στη μακρινή περιοχή.

2.5 Εξάρτηση μαγνητικού πεδίου από σχήμα, συχνότητα, εμβαδόν, ρευματική κατανομή

2.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

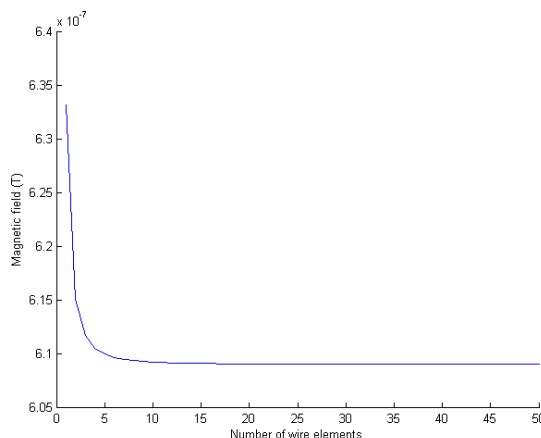
Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου στην κλασσική περίπτωση ενός διπόλου είναι r^{-3} . Υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις τις οποίες πρέπει να λάβουμε υπόψιν, στις οποίες υπάρχει απόκλιση από τον προαναφερόμενο νόμο. Γενικά σε κάθε δοκιμαστικό εξοπλισμό, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από κλειστούς ρευματοφόρους βρόχους, περιγράφεται με βάσεις του προαναφερθέντες νόμους (Biot-Savart, vector potential). Όπως έχει ήδη αναφερθεί το κοντινό πεδίο ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού εξαρτάται από τα επιμέρους χαρακτηριστικά των ρευματικών βρόχων που περιέχει. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι το σχήμα του βρόχου, η συχνότητα λειτουργία της πηγής και η ύπαρξη common-mode ρευμάτων.

Τα σχήματα που εξετάζονται φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.6: Μαγνητικοί βρόχοι υπό εξέταση

Προκειμένου τα υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο των σχημάτων, γίνεται χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Model*). Στη μέθοδο αυτή οι ρευματικοί βρόχοι χωρίζονται σε πεπερασμένα W κομμάτια μήκους dl και σταθερού ρεύματος I . Προκειμένου να καθοριστεί ο ελάχιστος αριθμός στοιχειωδών κομματιών που θα χωρίσουμε τους βρόχους, υπολογίστηκε με χρήση του νόμου Biot-Savart το μαγνητικό πεδίο ενός απλού τετραγωνικού βρόχου μεταβάλλοντας τον αριθμό των στοιχειωδών κομματιών.

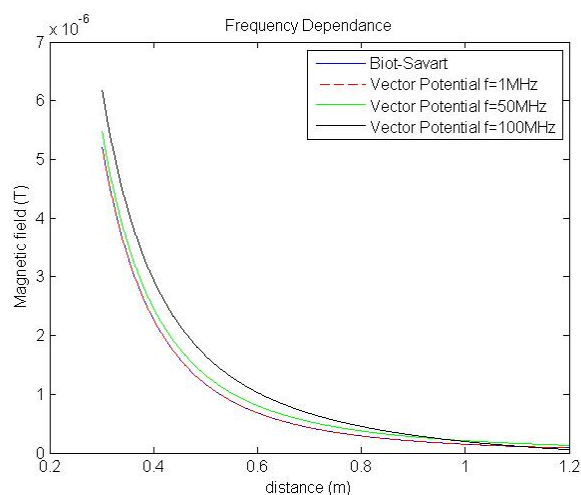


Εικόνα 2.7: Μαγνητικό πεδίο ορθογωνικού βρόχου σε σχέση με το πλήθος των στοιχειωδών κομματιών

Από την εικόνα 2.7 φαίνεται πως όταν ο βρόχος χωρίζεται σε περισσότερα από 20 στοιχειώδη κομμάτια, τότε η τιμή του πεδίου σταθεροποιείται και η μέθοδος FEM δουλεύει αρκετά καλά. Για το λόγο αυτό, για τα υπόλοιπα αποτελέσματα επιλέγεται ένα ασφαλές όριο διαχωρισμού ίσο με 50 στοιχειώδη κομμάτια.

2.5.2 Εξάρτηση από συχνότητα

Θεωρώντας έναν τετραγωνικό βρόχο υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζοντας είτε το νόμο Biot-Savart είτε με τη μέθοδο του διανυσματικού δυναμικού για συχνότητες 1, 50 και 100MHz. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.8: Μαγνητικό πεδίο ορθογωνικού βρόχου υπολογισμένο με Biot-Savart και διανυσματικό δυναμικό σε διάφορες συχνότητες

Ακόμα υπολογίστηκε ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου για κάθε συχνότητα καθώς και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε κάθε περίπτωση. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα:

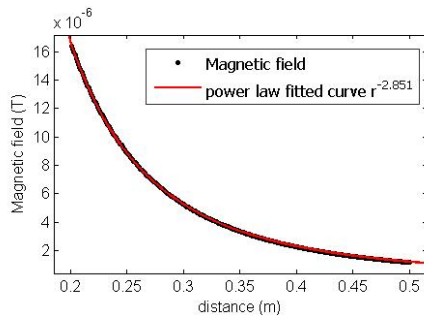
Frequency of the current feeding the square loop	Power law	Relative error in the fitting process (RMSE)
1 MHz	$r^{-2.899}$	2.723e-08
50 MHz	$r^{-2.747}$	2.955e-08
100 MHz	$r^{-2.529}$	7.05e-08

Πίνακας 2.1: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορες συχνότητες

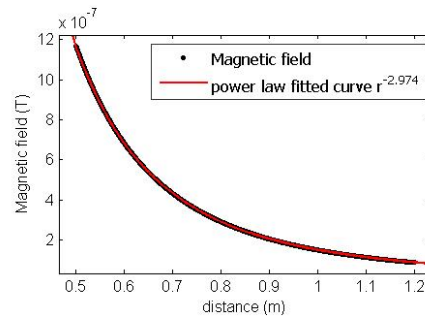
Από τον πίνακα 2.1 και την εικόνα 2.8 παρατηρείται πως για συχνότητες μικρότερες του 1MHz οι δύο μέθοδοι δεν έχουν διαφορά και οι καμπύλες ταυτίζονται, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες του 1MHz οι καμπύλες αποκλίνουν και ο νόμος ελάττωσης απομακρύνεται από τον αναμενόμενο νόμο r^{-3} .

2.5.3 Εξάρτηση από το σχήμα

Τα διαφορετικά σχήματα που εξετάστηκαν στην περίπτωση αυτή φαίνονται στην εικόνα 2.6. Το κέντρο τους βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και καθένα από αυτά έχει εμβαδόν $0,01m^2$. Όπως έχει στην ενότητα 2.3.2 εξετάζονται δύο ξεχωριστές περιοχές [18], αυτή έως τα $0,5m$ και η υπόλοιπη από τα $0,5m$ και μετά. Για τον τετραγωνικό βρόχο ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του fitting tool της matlab φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.9: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από $0,5m$



Εικόνα 2.10: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από $0,5m$

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τα υπόλοιπα σχήματα. Επιπροσθέτως υπολογίστηκαν για κάθε ένα σχήμα και για κάθε διακριτή περιοχή ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

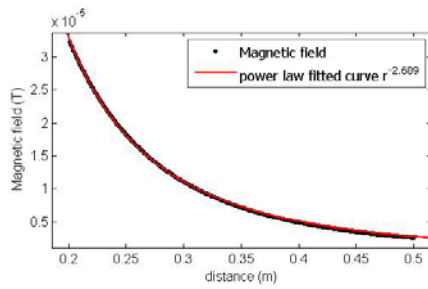
Shape of the magnetic loop	Power law region 1	Relative error in the fitting process region 1 (RMSE)	Power law region 2	Relative error in the fitting process region 2 (RMSE)
Rectangular	$r^{-2.851}$	$3.643e-08$	$r^{-2.974}$	$4.327e-10$
Triangular	$r^{-2.761}$	$8.176e-08$	$r^{-2.956}$	$1.094e-09$
Cross	$r^{-2.831}$	$4.076e-08$	$r^{-2.97}$	$4.989e-10$
Hexagonal	$r^{-2.856}$	$3.554e-08$	$r^{-2.975}$	$4.175e-10$

Πίνακας 2.2: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορα σχήματα βρόχων

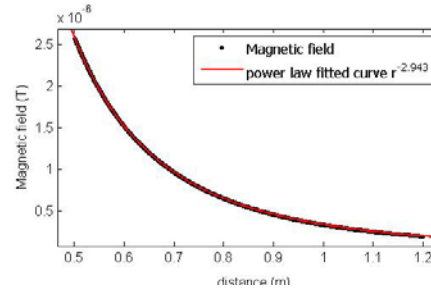
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, πριν τα $0,5m$ η μαγνητική συμπεριφορά των βρόχων διαφέρει σημαντικά, ενώ μετά τα $0,5m$ ο νόμος ελάττωσης ανεξάρτητα το σχήμα ακολουθεί με πολύ μικρή απόκλιση τον νόμο του απλού διπόλου r^{-3} .

2.5.4 Εξάρτηση από εμβαδόν

Στην ενότητα αυτή εξετάστηκε η περίπτωση του τετραγωνικού βρόχου με διαφορετικό εμβαδόν κάθε φορά. Συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση η πλευρά του τετραγωνικού βρόχου ήταν $\alpha=0,1m$ και στη δεύτερη περίπτωση $\alpha=0,15m$. Η περίπτωση για $\alpha=0,1m$ έχει ήδη αναπαρασταθεί στις εικόνες 2.9 και 2.10. Για $\alpha=0,15m$ λαμβάνουμε τις εξής εικόνες:



Εικόνα 2.11: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από 0,5m



Εικόνα 2.12: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από 0,5m

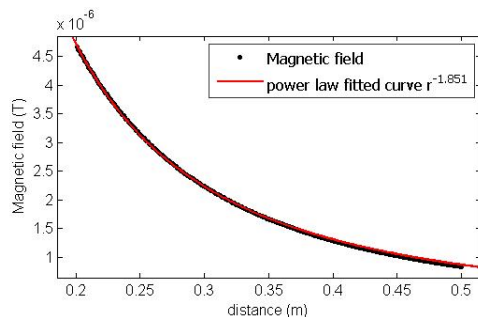
Από τις παραπάνω εικόνες κάτω από τα 0,5m η αύξηση του εμβαδού του τετραγωνικού βρόχου έχει άμεση επιδραση στο νόμο ελάττωσης του πεδίου. Αντίθετα, όπως ήταν αναμενόμενο για αποστάσεις μεγαλύτερες του 0,5m δεν έχει μεγάλη επίδραση η αλλαγή του εμβαδού. Στη συνέχεια φαίνονται και τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα:

Side of the rectangular magnetic loop	Power law region 1	Relative error in the fitting process region 1 (RMSE)	Power law region 2	Relative error in the fitting process region 2 (RMSE)
a = 0.1 m	$r^{-2.851}$	3.643e-08	$r^{-2.974}$	4.327e-10
a = 0.15 m	$r^{-2.689}$	1.57e-07	$r^{-2.943}$	2.128e-09

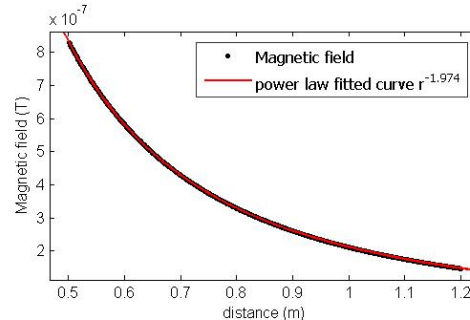
Πίνακας 2.3: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για διάφορα εμβαδά

2.5.5 Common και Differential ρεύματα

Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των common-mode ρευμάτων, εξετάστηκε η περίπτωση ενός τετραγωνικού βρόχου με μόνο common-mode ρεύμα και μια άλλη περίπτωση με μόνο differential mode ρεύμα. Κατά κανόνα τα common mode ρεύματα είναι πιο ασθενή από τα differential [17]. Με βάση την προηγούμενη παραδοχή, το common mode ρεύμα είναι 10% του differential mode ρεύματος. Για την περίπτωση του common mode λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 2.13: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μικρότερη από 0,5m



Εικόνα 2.14: Νόμος ελάττωσης πεδίου για απόσταση μεγαλύτερη από 0,5m

Από τις εικόνες 2.13 και 2.14 ανεξάρτητα την περιοχή παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από τον κλασικό νόμο και συγκεκριμένα κοντα στο r^{-2} . Αυτή η μεγάλη απόκλιση οφείλεται στην ύπαρξη του common-mode ρεύματος. Ο πίνακας με τα συγκριτικά αποτελέσματα φαίνεται παρακάτω:

Current Type	Power law region 1	Relative error in the fitting process region 1 (RMSE)	Power law region 2	Relative error in the fitting process region 2 (RMSE)
Differential Mode Current	$r^{-2.851}$	3.643e-08	$r^{-2.974}$	4.327e-10
Common Mode Current	$r^{-1.851}$	2.002e-08	$r^{-1.974}$	5.778e-10

Πίνακας 2.4: Νόμος ελάττωσης πεδίου και rmse για common και differential current

3.ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 Περιγραφή EUT σαν Box, βασικό υπόβαθρο και θεμελιώδεις παραδοχές

Η επιτυχία μιας διαστημικής αποστολής εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, ένας από τους σημαντικότερους είναι οι επιστημονικές δοκιμές και εξετάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί. Κάθε διαστημική αποστολή και ιδιαίτερα αυτές που έχουν ως κύριο στόχο τη λήψη μετρήσεων από κάποιο άλλο ουράνιο σώμα, πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα η επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας είναι ζωτικής σημασίας. Η μαγνητική καθαρότητα σχετίζεται με τις συνθήκες που πρέπει να επικρατούν εντός αλλά κυρίως εκτός του διαστημικού αεροσκάφους ώστε να επιτευχθούν όσο το δυνατό ακριβείς μετρήσεις με μικρές αποκλίσεις και κυρίως χωρίς τη μόλυνση του πεδίου από εξωτερικές παρεμβολές.

Κάθε διαστημικό αεροσκάφος αποτελείται από ένα πλήθος ανεξάρτητων εξαρτημάτων καθένα απ' τα οποία έχει τη δική του μαγνητική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα εντός του διαστημικού σκάφους κάθε εξάρτημα που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί τοπικά ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο επηρεάζει τα υπόλοιπα υπάρχοντα μαγνητικά πεδία. Άρα η εξακρίβωση της μαγνητικής συμπεριφοράς των επιμέρους εξαρτημάτων είναι απαραίτητη για τον περιορισμό των παρεμβολών στις μετρήσεις. Η μαγνητική συμπεριφορά εξετάζεται πάντα πριν την έναρξη της αποστολής σε ειδικές εγκαταστάσεις (MCF-εγκαταστάσεις). Πιο αναλυτικά, κάθε εξάρτημα τοποθετείται σε μια διάταξη όπου έχει ελευθερία κίνησης 360° και λαμβάνονται μετρήσεις του πεδίου που παράγει. Με βάση τις μετρήσεις η συσκευή χαρακτηρίζεται για το αν παράγει ισχυρό ή ασθενές πεδίο, αν έχει αρκετή ισχύ παρεμβολής, αν είναι ευάλωτη σε παρεμβολές κ.α. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η χαρτογράφηση της μαγνητικής συμπεριφοράς των εξαρτημάτων.

Στην παρούσα εργασία για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά ενός εξαρτήματος γίνεται χρήση θεωρητικών εξισώσεων και του πακέτου της Matlab. Επιπροσθέτως ως εξάρτημα θεωρείται ένα δοκιμαστικός εξοπλισμός (*Equipment Under Test*) που εξετάζεται σαν ένα μαύρο κουτί. Δηλαδή ανεξάρτητα του πλήθους των πηγών, το είδος των ρευματικών κατανομών, το προσανατολισμό καθώς και τη θέση των βρόχων στο εσωτερικό του εξοπλισμού, αναζητάτε η μαγνητική του συμπεριφορά σε διάφορες αποστάσεις.

Ο όρος μαγνητική συμπεριφορά ποσοτικοποιείται με τον υπολογισμό του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, σε όλη την έκταση της εργασίας, θεωρούμε πως το μαγνητικό πεδίο, χωρίς βλάβη της γενικότητας, έχει τη μορφή:

$$B = a r^n \quad (3.1.1)$$

όπου B είναι το μαγνητικό πεδίο, a η σταθερά του πεδίου, n ο συντελεστής ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου ($n < 0$) και r η απόσταση στην οποία υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το μαγνητικό πεδίου του δοκιμαστικού εξοπλισμού χρησιμεύουν στον υπολογισμό των a, n . Ο υπολογισμός των δύο σταθερών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια εργαλείων της Matlab (curve fitting tool). Συγκεκριμένα λαμβάνονται μετρήσεις δηλαδή τιμές μαγνητικού πεδίου σε συγκεκριμένες αποστάσεις και αυτές προσαρμόζονται με το κατάλληλο εργαλείο (cft-matlab) ώστε να προκύψει τελικά ο νόμος ελάττωσης του πεδίου.

Εναλλακτικά, χωρίς χρήση κάποιου υπολογιστικού εργαλείου, είναι δυνατή η εύρεση των a, n μέσω μαθηματικών σχέσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την μέθοδο της παρεμβολής των μετρούμενων τιμών πεδίου και απόστασης. Συνοπτικά ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

$$B = a \cdot r^n \rightarrow$$

$$\ln(B) = \ln(a) + n \ln(r) \quad (3.1.2)$$

Με βάση την τελευταία σχέση προκύπτει το ακόλουθο σύστημα:

$$\text{Σύστημα: } \begin{cases} \sum_{i=1}^m \ln(B_i) = m \ln(a) + n \sum_{i=1}^m \ln(r_i) & (3.1.3) \\ \sum_{i=1}^m \ln(B_i) \cdot \ln(r_i) = \ln(a) \cdot \sum_{i=1}^m \ln(r_i) + n \sum_{i=1}^m (\ln(r_i))^2 & (3.1.4) \end{cases}$$

Η τιμές του συνολικού μαγνητικού πεδίου του δοκιμαστικού εξοπλισμού σε μια συγκεκριμένη απόσταση υπολογίζεται ως η επαλληλία των m μαγνητικών βρόχων. Δηλαδή αθροίζεται η συνολική συνεισφορά αυτών.

$$\mathbf{B}_{total}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^m \mathbf{B}_i(\mathbf{r}) \quad (3.1.5)$$

Το μαγνητικό πεδίο κάθε βρόχου υπολογίζεται εφαρμόζοντας το νόμο Biot-Savart και εξαρτάται από το σχήμα του. Στην περίπτωση του τετραγωνικού βρόχου γίνεται χρήση του τύπου 2.2.9.

Με δεδομένες m τιμές των B, r είναι δυνατός ο υπολογισμός των μεγεθών $\ln(a), n$. Άρα τελικά και ο υπολογισμών των a, n .

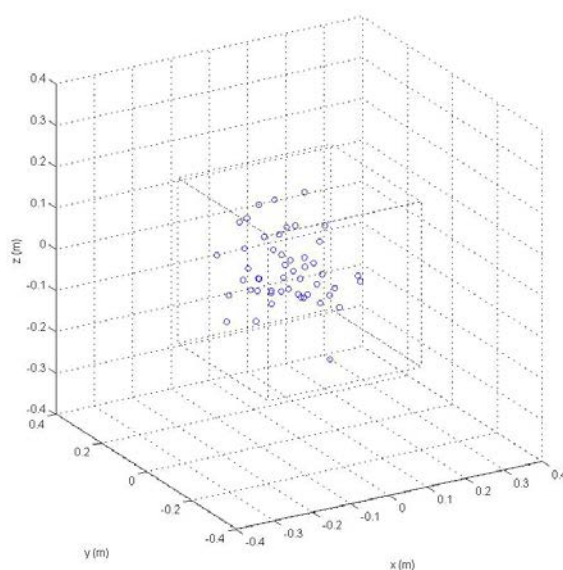
Με δεδομένες τις τιμές των a, n και με βάση την εξίσωση 3.1.1 υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο σε οποιαδήποτε απόσταση r . Ιδιαίτερα σημαντικό είναι στοιχείο είναι πως η απόσταση r λαμβάνεται από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού (*EUT*) διότι είναι άγνωστη η κατανομή των ρευματικών βρόχων μέσα σε αυτόν. Όπως θα

εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο, η σχετική θέση των ρευματικών βρόχων παίζει καθοριστικό ρόλο στην υποεκτίμηση και στην υπερεκτίμηση του νόμου ελάττωσης του πεδίου (*under-overestimation*).

Κύριος και βασικός στόχος του προβλήματος που παρουσιάζεται είναι η ικανότητα επέκτασης του πεδίου σε μακρινότερες αποστάσεις. Αυτό απασχολεί περισσότερο καθώς σε πραγματικές συνθήκες μετρήσεων, πρέπει να είμαστε σε θέση, με βάση μια δεδομένη μετρούμενη τιμή, να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του εξοπλισμού σε μακρινότερες αποστάσεις. Συγκεκριμένα η βασικότερη παράμετρος σωστής πρόβλεψης είναι η σωστή προσέγγιση του νόμου ελάττωσης n του μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού του n , μερικές από τις οποίες θα παρουσιαστούν εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Η υπό μελέτη διάταξη ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού σαν ένα κουτί (κύβος) φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.1: EUT σαν Box με ρευματικούς βρόχους

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται ένας κύβος ως δοκιμαστικός εξοπλισμός. Μέσα στον κύβο είναι τοποθετημένοι ρευματικοί βρόχοι με τυχαία θέση και προσανατολισμό.

Σκοπός της μελέτης είναι ο προσδιορισμός του νόμου ελάττωσης n με τέτοιο τρόπο ώστε το σχετικό (απόλυτο) σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης (extrapolated-field) και της πραγματικής τιμής να είναι μικρό. Ως σχετικό απόλυτο σφάλμα ορίζεται η ποσότητα:

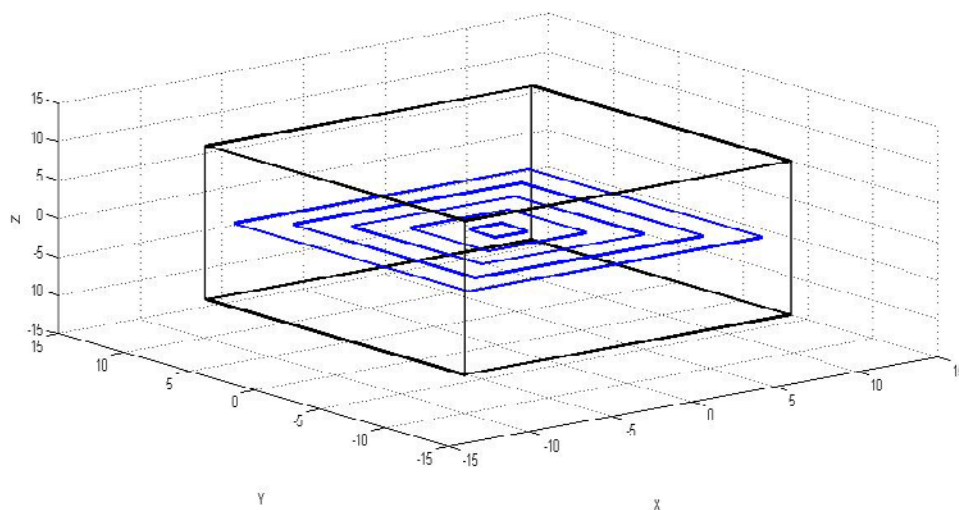
$$\text{Relative Absolute Error} = \frac{|B_{\text{predicted}} - B_{\text{actual}}|}{B_{\text{actual}}} \cdot 100\% \quad (3.1.6)$$

Η απαίτηση μικρού ποσοστού σφάλματος είναι σχετική καθώς μικρό σφάλμα σημαίνει καλύτερη ακρίβεια στις προβλεπόμενες μετρήσεις, άρα καλύτερη μοντελοποίηση του θεωρητικού μοντέλου το οποίο δεν απέχει κατά πολύ από ένα πραγματικό σενάριο. Ακόμα, σε επόμενες περιπτώσεις που εξετάζονται εκτενώς τα σχετικά σφάλματα, τοποθετείται ένα άνω επιτρεπτό όριο σχετικού σφάλματος. Αν το σχετικό σφάλμα ξεπερνά ένα κατώφλι προδιαγραφών, τότε θεωρείται μη ακριβές το αποτέλεσμα της πρόβλεψης του πεδίου κάποιο σημείο του χώρου.

3.2 Μελέτη περίπτωσης τετραγωνικού βρόχου με μεταβλητό εμβαδό

3.2.1 Επίδραση του μεγέθους του βρόχου και ικανότητα ακριβής πρόβλεψης

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η περίπτωση ενός τετραγωνικού βρόχου με αυξανόμενη κάθε φορά την ακτίνα του. Συγκεκριμένα ως δοκιμαστικό εξοπλισμό θεωρούμε έναν κύβο $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$ και στο εσωτερικό του κάθε φορά έναν τετραγωνικό βρόχο. Η πλευρά που έχει κάθε φορά ο τετραγωνικός βρόχος διαφέρει και συγκεκριμένα εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η ακτίνα είναι $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\text{m}$. Επιπροσθέτως ο τετραγωνικός βρόχος βρίσκεται κάθε φορά στο xy -επίπεδο με κέντρο στην αρχή των αξόνων (σημείο $O(0,0,0)$) και διαρρέεται από σταθερό ρεύμα 1mA (differential-mode). Ακολουθεί η εικόνα με την υπό μελέτη διάταξη που αναπαριστά συνοπτικά τη γεωμετρία του προβλήματος:

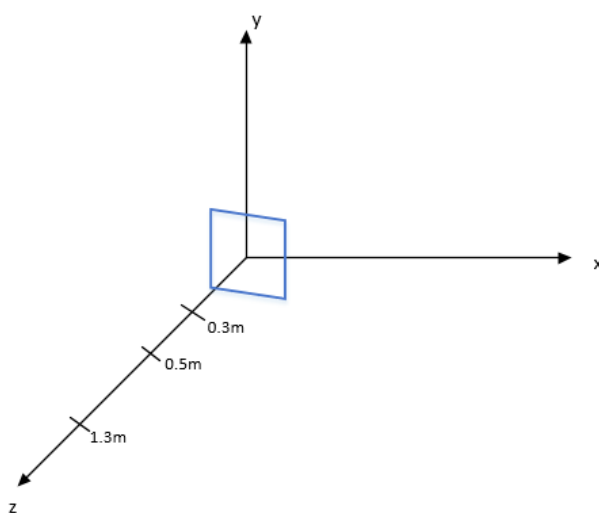


Εικόνα 3.2: Τετραγωνικός βρόχος μέσα σε EUT.

Στη συνέχεια λαμβάνονται μετρήσεις μαγνητικού πεδίου για την εκάστοτε περίπτωση ακτίνας τετραγωνικού βρόχου. Οι μετρήσεις του πεδίου λαμβάνονται κατά μήκος του άξονα z . Με τη βοήθεια υπολογιστικού εργαλείου της Matlab (curve fitting tool) υπολογίζονται για συγκεκριμένα διαστήματα κατά μήκος του άξονα z οι σταθερές a , n

της εξίσωσης $B = \alpha \cdot r^n$. Στην πραγματικότητα το cf-tool της Matlab, με βάση τις μετρήσεις του πεδίου που λαμβάνει, προσομοιώνει με βέλτιστο τρόπο μια καμπύλη σε αυτές. Η καμπύλη αυτή χαρακτηρίζεται από μια σταθερά α και έναν εκθέτη απόσβεσης του πεδίου n . Ο εκθέτης n είναι σε κάθε περίπτωση αρνητικός καθώς το πεδίο οποιασδήποτε διάταξης φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή (τετραγωνικό βρόχο). Για καλύτερες και αξιόπιστες μετρήσεις το βήμα μέτρησης είναι 0.001 και λαμβάνονται συνολικά 1000 τιμές πεδίου. Η μεγάλη πυκνότητα των μετρήσεων βοηθά στην καλύτερη αποκωδικοποίηση της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού στα σημεία του χώρου.

Για κάθε τετραγωνικό βρόχο υπολογίζονται κάθε φορά τρεις τιμές του n δηλαδή τρεις νόμους ελάττωσης (*Power-law*). Πιο αναλυτικά, θεωρούμε την κοντινή περιοχή μετρήσεων στον δοκιμαστικό εξοπλισμό και την μακρινή περιοχή. Η κοντινή περιοχή θεωρείται από τα 0.3m έως 0.5m και η μακρινή από 0.5m έως 1.3m. Τα συγκεκριμένα όρια δεν έχουν οριστεί τυχαία αλλά ούτε και με συστηματικό τρόπο. Δηλαδή το κάτω όριο θα πρέπει να είναι κοντά στο άκρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού (μόλις 0.1m) και το άνω όριο σε μια λογική απόσταση όπου έχει νόημα να λάβουμε μετρήσεις πεδίου σχετικά ισχυρές. Κι αυτό διότι, σε μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω της εκθετικής πτώσης του πεδίου, οι μετρήσεις θα είναι πολύ ασθενείς και μη αντιπροσωπευτικές. Η απόσταση 0.5m ονομάζεται κρίσιμη [19] (*break distance*) καθώς αποτελεί το μεταβατικό στάδιο από την κοντινή περιοχή μετρήσεων στη μακρινή. Τέλος ο τρίτος νόμος ελάττωσης υπολογίζεται από την απόσταση με άκρα τα δύο όρια δηλαδή από 0.3m έως 1.3m.



Εικόνα 3.3: Πειραματική διάταξη τετραγωνικού βρόχου

Σκοπός του προβλήματος είναι η εύρεση εκείνου του νόμου που εξασφαλίζει καλύτερη πρόβλεψη στα σημεία επέκτασης του πεδίου δηλαδή σε $r = 2,3,4,5m$. Στα σημεία αυτά με βάση το νόμο που προκύπτει κάθε φορά, θα επιχειρείται πρόβλεψη η οποία θα συγκρίνεται πάντα με την θεωρητική τιμή. Ως κριτήριο καλύτερης προσαρμογής των αποτελεσμάτων στα θεωρητικά, χρησιμοποιείται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (*Mean Absolut Percentage Error*). Ως MAPE ορίζεται:

$$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \cdot 100\% \quad (3.2.1)$$

όπου n είναι το πλήθος των μετρήσεων (συγκεκριμένα τέσσερις μετρήσεις, αφού γίνεται extrapolation σε τέσσερις αποστάσεις) για έναν δεδομένο νόμο ελάττωσης, A_t η πραγματική τιμή και F_t η προβλεπόμενη από το νόμο τιμή μαγνητικού πεδίου. Σα μέτρο αξιοπιστίας της πρόβλεψης χρησιμοποιείται η ακρίβεια της πρόβλεψης (accuracy). Σε περίπτωση όπου το σφάλμα υπερβαίνει το 100% τότε προφανώς η ακρίβεια του μοντέλου είναι μηδενική. Σε κάθε άλλη περίπτωση, όσο μικρότερο σφάλμα υπάρχει, τόσο καλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης πετυχαίνεται.

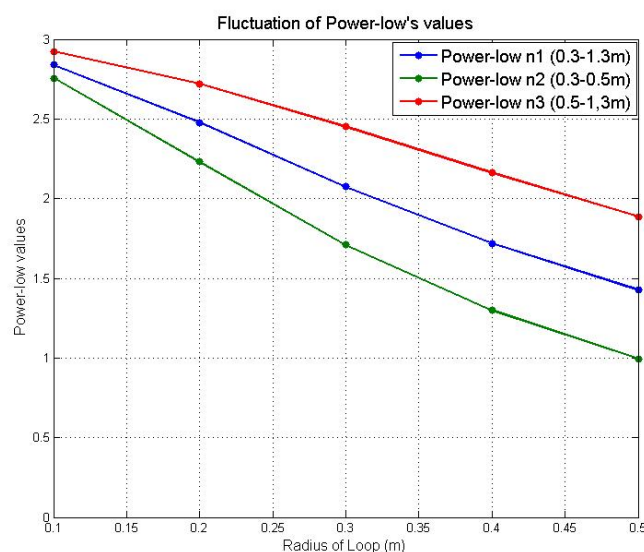
3.2.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοιώσεων-Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρούμε τρεις περιοχές υπολογισμού του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αντιστοιχία νόμων και αποστάσεων:

n1	0,3-1,3 (m)
n2	0,3-0,5 (m)
n3	0,5-1,3 (m)

Πίνακας 3.1: Σχέση μεταξύ Power-law και αναφερόμενο διάστημα.

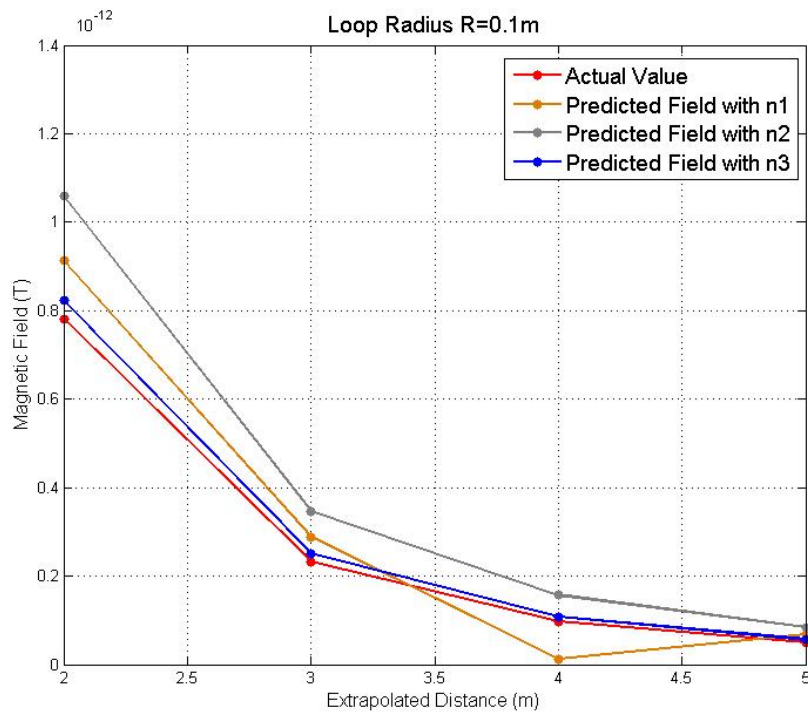
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, δείχνουν την παρακάτω εικόνα διακύμανσης των νόμων ελάττωσης σε σχέση με τη ακτίνα του τετραγωνικού βρόχου αλλά και την περιοχή εξέτασης:



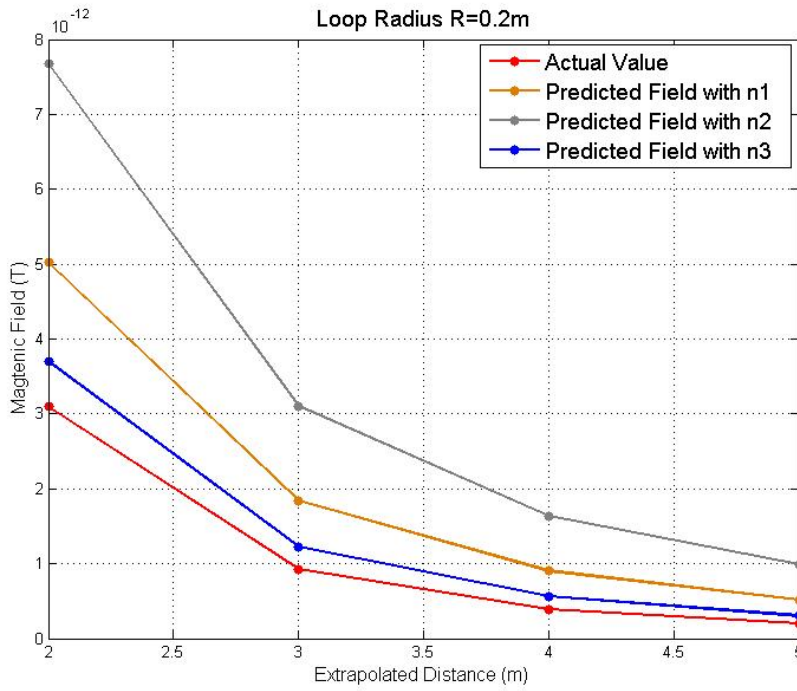
Εικόνα 3.4: Διακύμανση των power-laws σε σχέση με την ακτίνα του βρόχου

Από την εικόνα 3.4 φαίνεται ξεκάθαρα πως για μικρή τιμή της ακτίνας ($R=10\text{cm}$), ανεξάρτητα σε ποια περιοχή βρισκόμαστε ο νόμος πλησιάζει τον νόμο του διπόλου r^{-3} . Καθώς αυξάνεται η ακτίνα του τετραγωνικού βρόχου υπάρχει όλο και μεγαλύτερη απόκλιση και από το -3 . Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη πτώση της τιμής (κατά απόλυτη τιμή) συμβαίνει όταν εξετάζουμε τις τιμές του πεδίου κοντά στον τετραγωνικό βρόχο. Αυτό είναι λογικό αφού αυξάνοντας το μέγεθος του βρόχου και παραμένοντας σε κοντινή περιοχή μετρήσεις, η συμπεριφορά των κλασσικών νόμων αλλοιώνεται αφού παίρνουμε υψηλότερες τιμές πεδίου. Οι υψηλές τιμές οφείλονται στο γεγονός πως ένας μεγαλύτερος μαγνητικός βρόχος θα παράγει ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο. Έτσι μετρώντας σε κοντινή απόσταση από αυτόν, το πεδίο δεν έχει προλάβει να εξασθενήσει δίνοντας λανθασμένο και μη αντιπροσωπευτικό νόμο ελάττωσης(περίπου r^{-1} .)

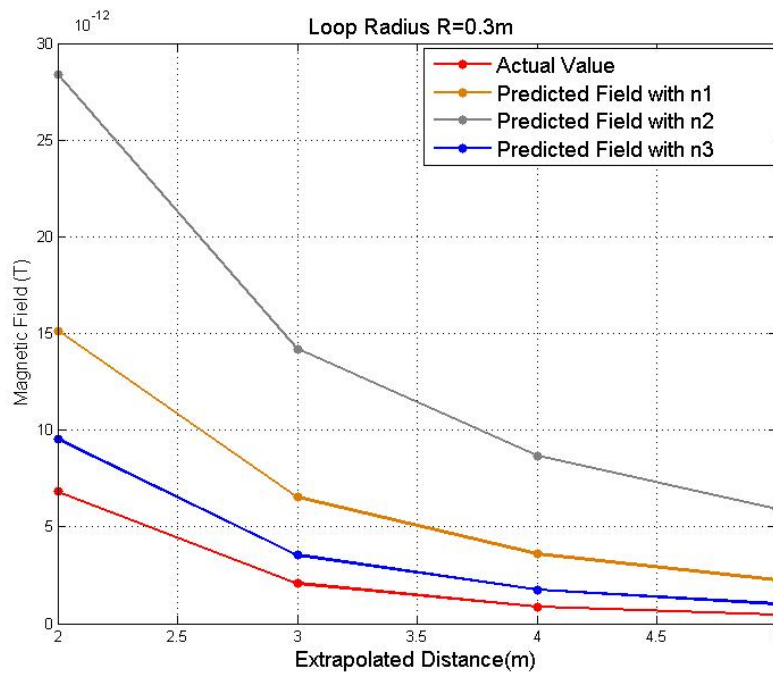
Στη συνέχεια για κάθε μια περίπτωση ακτίνας τετραγωνικού βρόχου, παρατίθενται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε αποστάσεις $r = 2,3,4,5\text{m}$



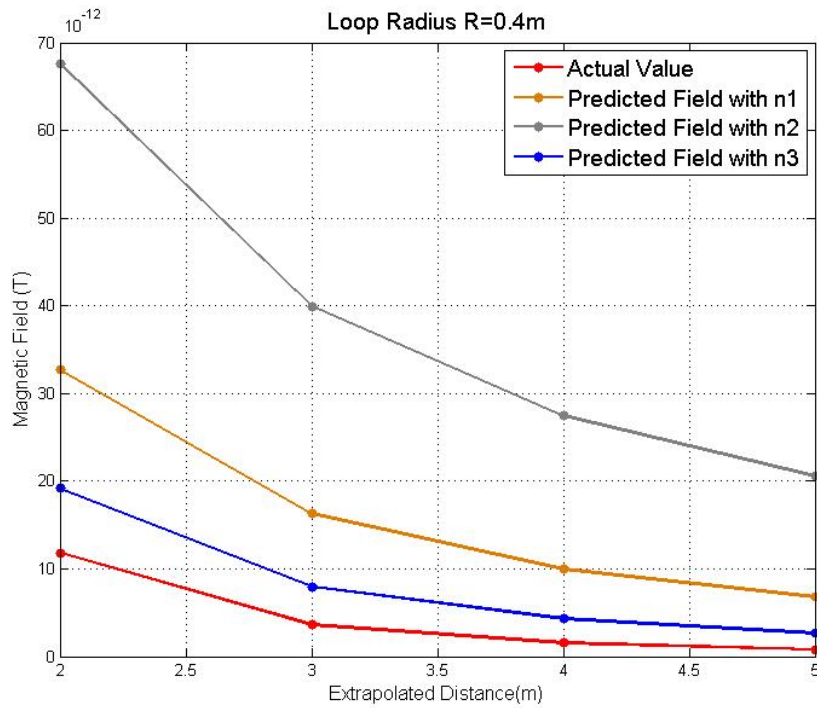
Εικόνα 3.5: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από τους τρεις διαφορετικούς νόμους για πλευρά βρόχου 0.1m



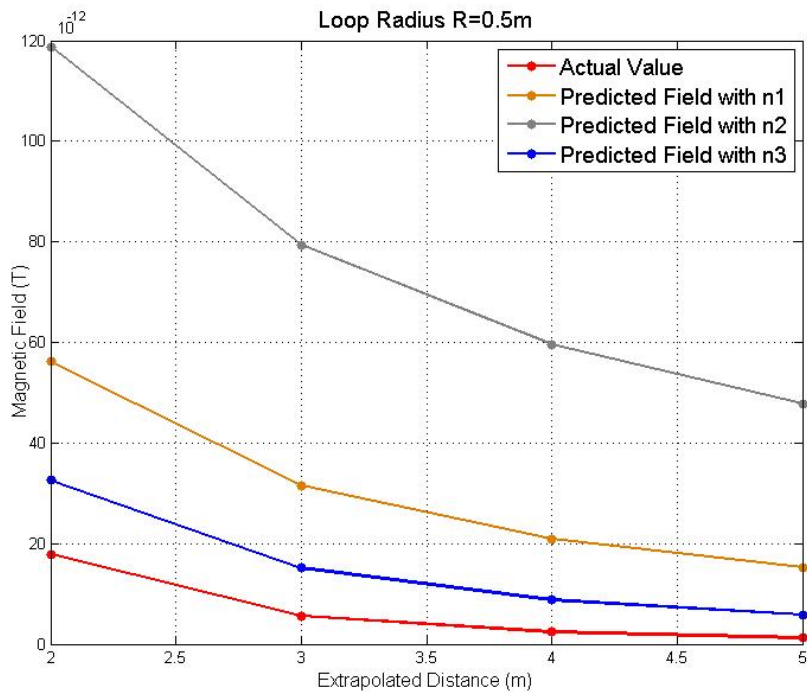
Εικόνα 3.6: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για πλευρά βρόχου 0.2m



Εικόνα 3.7: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για πλευρά βρόχου 0.3m



Εικόνα 3.8: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για πλευρά βρόχου 0.4m



Εικόνα 3.9: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για πλευρά βρόχου 0.5m

Από τις εικόνες 3.7 έως 3.8 φαίνεται πως η καλύτερη ταύτιση (fitting) με τις πραγματικές τιμές του πεδίου πετυχαίνεται με τη χρήση του νόμου n_3 . Ο νομος n_3 προκύπτει όταν λαμβάνονται τιμές μακριά από τον τετραγωνικό βρόχο. Πιο συγκεκριμένα, για μικρή ακτίνα τετραγωνικού βρόχου πετυχαίνεται η καλύτερη πρόβλεψη πεδίου και συγκεκριμένα όταν απομακρυνόμαστε πολύ μακριά από τον βρόχο (π.χ στα 5m) η προβλεπόμενη τιμή ταυτίζεται σχεδόν με την πραγματική. Όσο αυξάνει η ακτίνα, οι προβλεπόμενες τιμές του πεδίου απομακρύνονται από τις πραγματικές. Αυτό είναι λογικό, αφού όπως διαπιστώθηκε και από τους κανόνες ελάττωσης (εικόνα 3.4) για μεγαλύτερη τιμή πλευράς ο νόμος καταστρατηγείται. Σε κάθε περίπτωση όμως όσο απομακρύνεται το σημείο παρατήρησης, τόσο ακριβέστερη πρόβλεψη πραγματοποιείται. Επιπροσθέτως, φαίνεται πως ανεξάρτητα του μεγέθους του βρόχου, πάντα καλύτερη προσαρμογή (fitting) έχει ο νόμος n_3 αμέσως μετά ο n_1 και τέλος ο n_2 .

Τα παραπάνω γραφικά αποτελέσματα αποτυπώνονται στη συνέχεια μέσα από μαθηματικές σχέσεις. Συγκεκριμένα γίνεται χρήση του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος. Με βάση την τιμή του *MAPE* είναι δυνατός ο προσδιορισμός του ποσοστού ακρίβειας του νόμου ελάττωσης στην πρόβλεψη του πεδίου σε οποιαδήποτε θέση.

Παρατίθενται σχετικός πίνακας:

<u>R=0,1</u>				
	Actual Value	Predicted law-n1	Predicted law-n2	Predicted law-n3
r=2m	7.8193	9.133	10.5903	8.2232
r=3m	2.3219	2.8863	3.4642	2.5128
r=4m	9.8029	12.7465	15.6773	10.835
r=5m	5.0208	6.7619	8.4759	5.6424
MAPE law-n1 (%)	26.45	Accuracy (%)	73.55	
MAPE law-n2 (%)	53.34	Accuracy (%)	46.66	
MAPE law-n3 (%)	9.07	Accuracy (%)	90.93	
<u>R=0,2</u>				
	Actual Value	Predicted law-n1	Predicted law-n2	Predicted law-n3
r=2m	3.0938	5.0221	7.6737	3.6982
r=3m	9.2465	18.3953	31.0435	12.2649
r=4m	3.9127	9.0206	16.3346	5.6051
r=5m	2.0062	5.1903	9.9267	3.0535
MAPE law-n1 (%)	112.6327	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n2 (%)	274.0112	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n3 (%)	36.9092	Accuracy (%)	63.09	
<u>R=0,3</u>				
	Actual Value	Predicted law-n1	Predicted law-n2	Predicted law-n3
r=2m	6.8253	15.1363	28.3914	9.5502
r=3m	2.0616	6.5231	14.1871	3.5352
r=4m	8.7569	35.8988	86.7211	17.4658
r=5m	4.4978	22.5889	59.1986	10.1079
MAPE law-n1 (%)	100.56	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n2 (%)	304.04	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n3 (%)	31.18	Accuracy (%)	68.82	
<u>R=0,4</u>				
	Actual Value	Predicted law-n1	Predicted law-n2	Predicted law-n3
r=2m	1.1819	3.2684	6.7586	1.9169
r=3m	3.6222	16.2795	39.9128	7.9781
r=4m	1.5466	9.9282	27.4673	4.2833
r=5m	7.963	67.6523	205.5556	26.44
MAPE law-n1 (%)	187.40	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n2 (%)	620.35	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n3 (%)	58.01	Accuracy (%)	41.99	
<u>R=0,5</u>				
	Actual Value	Predicted law-n1	Predicted law-n2	Predicted law-n3
r=2m	1.786	5.6161	11.8819	3.2602
r=3m	5.5733	31.514	79.3768	15.1753
r=4m	2.3954	20.9154	59.62	8.8207
r=5m	1.2372	15.2184	47.7503	5.7907
MAPE law-n1 (%)	645.78	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n2 (%)	2009.50	Accuracy (%)	0	
MAPE law-n3 (%)	222.78	Accuracy (%)	0.00	

Πίνακας 3.2: MAPE μετρήσεων και ακρίβεια προβλέψεων

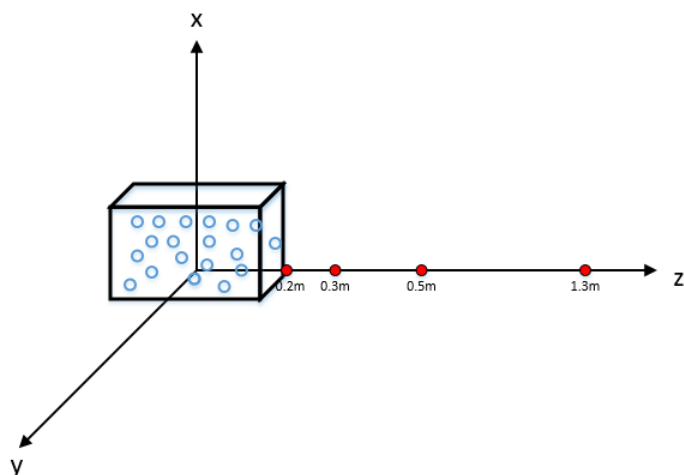
Ο πίνακας 3.2 (οι τιμές πεδίου είναι σε $\text{Tesla} \times 10^{-12}$) επιβεβαιώνει τις προηγούμενες εικόνας. Συγκεκριμένα για μικρή πλευρά βρόχου(0.1,0.2m) η ακρίβεια πρόβλεψης του νόμου n_3 είναι πολύ υψηλή. Όσο αυξάνεται η ακτίνα, οι νόμοι n_1, n_2 αδυνατούν να κάνουν σωστή πρόβλεψη του πεδίου καθώς το $MAPE > 100\%$. Για το μεγαλύτερο μήκος πλευράς, δηλαδή 0,5m, κανένας από τους νόμους ελάττωσης είναι ικανός να προβλέψει σωστά. Αυτό επαληθεύεται γραφικά και από την εικόνα 3.9 όπου οι καμπύλες έχουν απομακρυνθεί ακόμα περισσότερο από την πραγματική.

3.3 Μελέτη περίπτωσης 50 τετραγωνικών βρόχων

3.3.1 Περιγραφή προβλήματος πολλαπλών ρευματικών βρόχων

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε η περίπτωση ενός μόνο τετραγωνικού βρόχου. Μέσα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν προσδιορίστηκε η μαγνητική συμπεριφορά του βρόχου σε συγκεκριμένες αποστάσεις καθώς και η δυνατότητα σωστής πρόβλεψης. Στην πραγματικότητα, η συγκεκριμένη περίπτωση είναι ιδανική αφού σε πραγματικές συνθήκες ο αριθμός των ρευματικών βρόχων ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού θα είναι πολύ μεγαλύτερος. Επιπροσθέτως εξετάζοντας την συνύπαρξη πολλών τετραγωνικών βρόχων βγαίνουν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη ενότητα τοποθετούνται μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό 50 τετραγωνικοί βρόχοι. Ο δοκιμαστικός εξοπλισμός είναι ένα κύβος διαστάσεων $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 40\text{cm}$. Η πλευρά των τετραγωνικών βρόχων είναι ίση με 1cm και διαρρέονται από ρεύμα 1mA(differential-mode current). Η θέση των βρόχων επιλέγεται να είναι τυχαία ώστε να προσομοιώνεται όσο το δυνατό καλύτερα ένα πραγματικό σενάριο. Οι επαναλήψεις που εκτελούνται είναι συνολικά δώδεκα, ένας αριθμός που μας επιτρέπει να εξάγουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μέσα στις δώδεκα επαναλήψεις περιλαμβάνονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις θέσεων και αλληλεπίδρασης των τετραγωνικών βρόχων μεταξύ τους. Ακόμα από όλες τις δυνατές θέσεις ίσως να προκύψουν συμπεράσματα για την καλύτερη και τη χειρότερη περίπτωση πρόβλεψης στην επέκταση του μαγνητικού πεδίου. Σχηματικά φαίνεται παρακάτω η γεωμετρία του προβλήματος:



Εικόνα 3.10: EUT με 50 βρόχους και διαστήματα μετρήσεων

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10 το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού βρίσκεται στην αρχή των αξόνων και περιλαμβάνει τους 50 ρευματικούς βρόχους. Η λογική των μετρήσεων των τιμών του μαγνητικού πεδίου ακολουθεί τη λογική του προηγούμενου κεφαλαίου. Πιο αναλυτικά, πέραν της άκρης του δοκιμαστικού εξοπλισμού στα 0.2m, η περιοχή χωρίζεται σε δύο διαστήματα. Στο πρώτο διάστημα (από 0.3m έως 0.5m) ο νόμος ελάττωσης προκύπτει με τιμές που λαμβάνονται από την περιοχή κοντά στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Όμοια στο δεύτερο διάστημα (από 0.5m έως 1,3m) ο νόμος ελάττωσης προκύπτει από τις τιμές του πεδίου που λαμβάνονται από την περιοχή μακριά του δοκιμαστικού εξοπλισμού.

Βασικός στόχος της προσομοίωσης είναι η εξαγωγή ενός γενικού νόμου (global-law) με τον οποίο θα γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη πρόβλεψη ανεξάρτητα από τις θέσεις των βρόχων μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Στην πράξη αυτό που έχει σημασία είναι η δυνατότητα ακριβής πρόβλεψης του μαγνητικού πεδίου ενός εξοπλισμού σε αποστάσεις που δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση ειδικών συσκευών μέτρησης μαγνητικού πεδίου. Έτσι μπορεί να προσδιοριστεί η μαγνητική συμπεριφορά του εξοπλισμού και η αλληλεξάρτηση που υπάρχει σε έναν χώρο όταν συνυπάρχουν περισσότερες μαγνητικές πηγές.

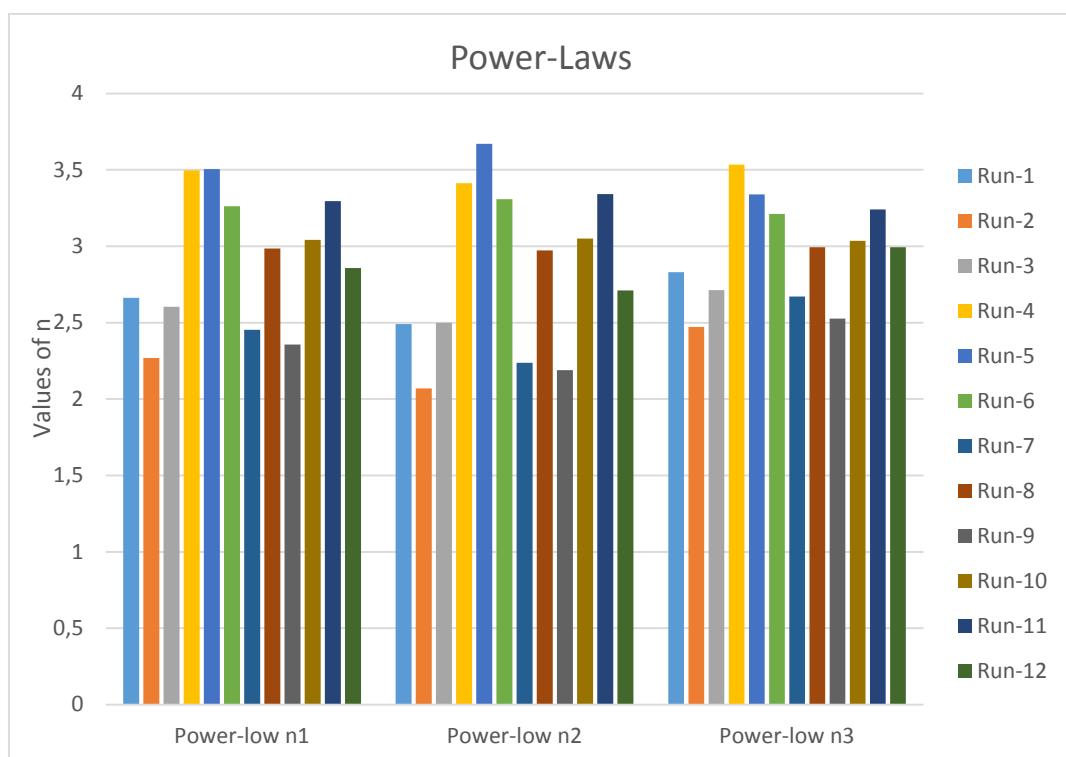
3.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα- Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μετά από τις δώδεκα προσομοιώσεις προέκυψαν οι παρακάτω νόμοι ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου:

A/A Τρεξίματος	Power-low n1	Power-low n2	Power-low n3
1-run	2,662	2,492	2,83
2-run	2,268	2,07	2,472
3-run	2,605	2,5	2,713
4-run	3,497	3,414	3,534
5-run	3,505	3,67	3,34
6-run	3,263	3,309	3,211
7-run	2,454	2,237	2,672
8-run	2,985	2,974	2,995
9-run	2,356	2,19	2,526
10-run	3,043	3,051	3,035
11-run	3,295	3,342	3,241
12-run	2,858	2,712	2,994

Πίνακας 3.3: Power-laws για 12 προσομοιώσεις

Προφανώς οι τιμές αναφέρονται στην απόλυτη τιμή του νόμου, καθώς όπως έχει ήδη ειπωθεί το n είναι πάντα αρνητικό. Παρακάτω γίνεται γραφική αναπαράσταση των νόμων σε ένα ραβδόγραμμα για να φανούν ορισμένα στοιχεία καλύτερα:

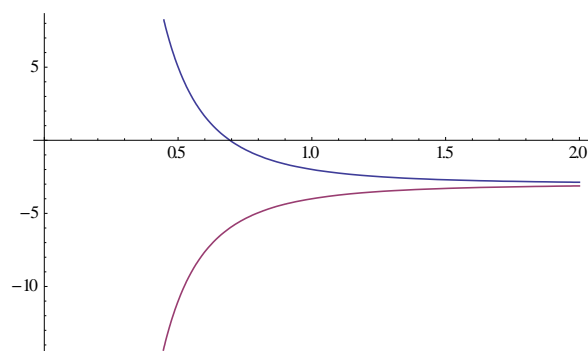


Εικόνα 3.11: Ραβδόγραμμα νόμων ελάττωσης του πεδίου για 12 προσομοιώσεις

Από την εικόνα 3.11 φαίνεται πως οι νόμοι για τις τρεις περιοχές δεν έχουν κάποια σταθερή τιμή. Συγκεκριμένα στην παραπάνω εικόνα έχουν συγκεντρωτικά αναπαρασταθεί οι νόμοι που προκύπτουν από τα δώδεκα τρεξίματα για κάθε μια

περιοχή μέτρησης. Με μια πρώτη ματιά η διακύμανση των τιμών είναι αρκετά μεγάλη πράγμα που οφείλεται στην τυχαία θέση των τετραγωνικών βρόχων. Κάποιες τιμές ξεκινούν από το -2 και καταλήγουν στο -3 και συγχρόνως κάποιες άλλες ξεκινούν πιο υψηλά (κατά απόλυτη τιμή). Αυτή η συμπεριφορά των νόμων συνδέεται άμεσα από τη θέση των βρόχων. Πιο συγκεκριμένα όταν οι βρόχοι βρίσκονται στο πίσω μέρος του δοκιμαστικού εξοπλισμού (αρνητικές τιμές ζευγών xyz), τότε η εξασθένηση του πεδίου σε μια θέση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την εξασθένηση που υπάρχει όταν οι βρόχοι βρίσκονται στο μπροστινό τμήμα του δοκιμαστικού εξοπλισμού.

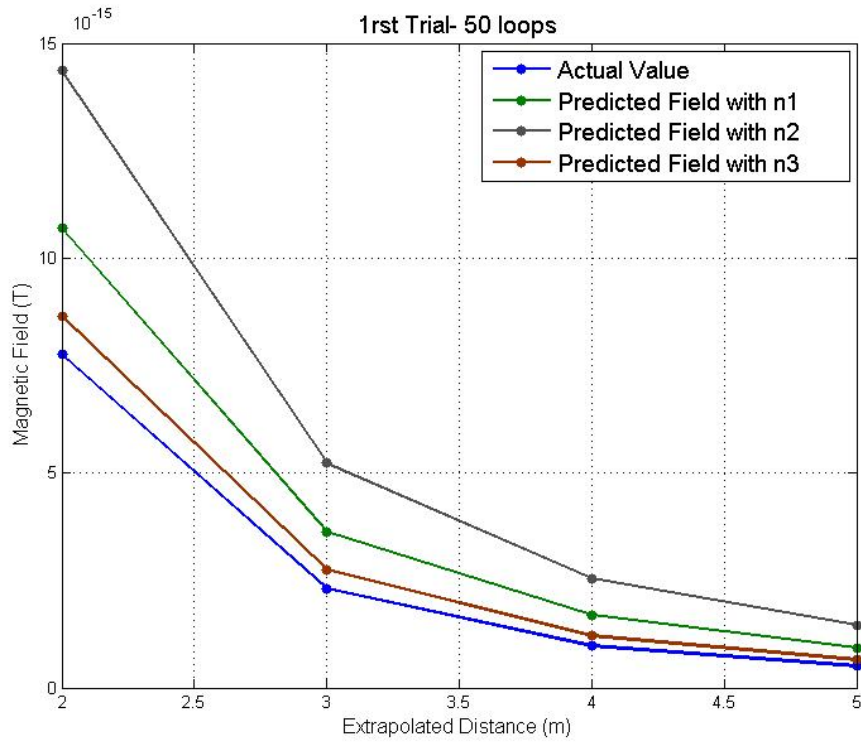
Σχηματικά η σύγκλιση των νόμων ανάλογα με τη θέση των βρόχων φαίνεται παρακάτω:



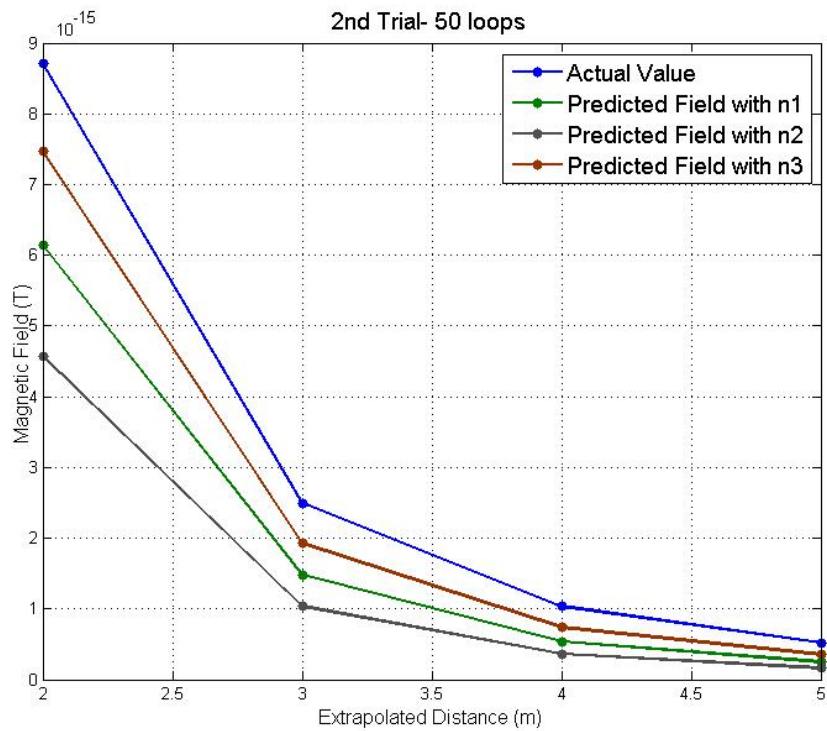
Εικόνα 3.12: Γραφική σύγκλιση του power-law στο -3

Στην πραγματικότητα, στην εικόνα φαίνεται η γραφική παράσταση των συναρτήσεων x^{-3} και $-x^{-3}$. Μέσα από τη γραφική παράσταση της εικόνας 3.12 γίνεται αντιληπτή η συμπεριφορά των νόμων. Αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι πως ανεξάρτητα της θέσης των βρόχων μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό, όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν ο νόμος ελάττωσης του πεδίου πλησιάζει τον θεωρητικό αναμενόμενο του απλού διπόλου δηλαδή το r^{-3} .

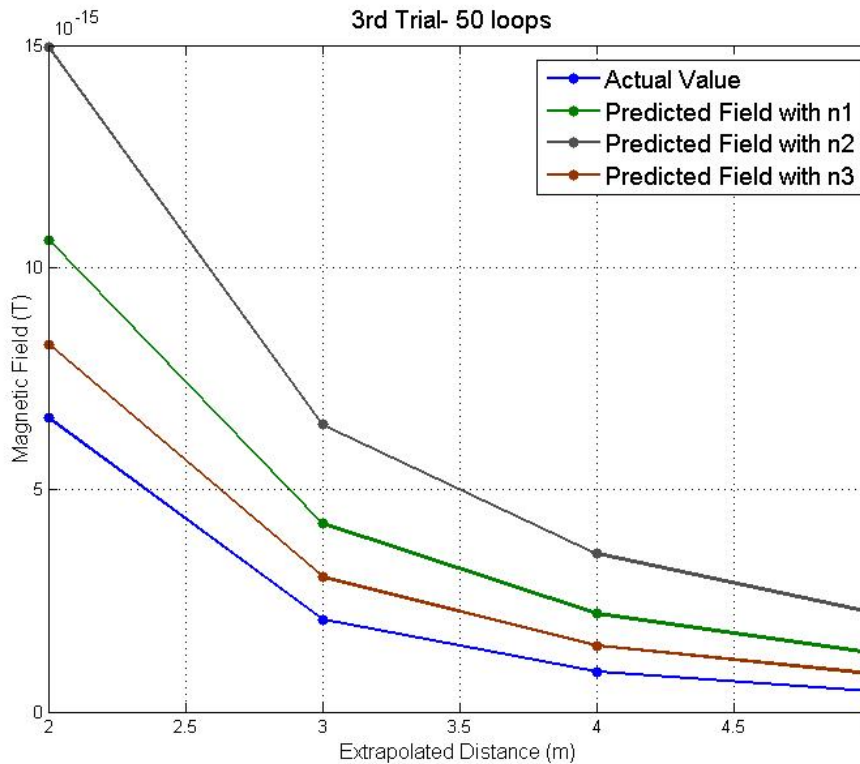
Στη συνέχεια για τρεις από τις δώδεκα προσομοιώσεις αποτυπώνονται όπως και στην περίπτωση του απλού τετραγωνικού βρόχου, η συμπεριφορά των νόμων σε σχέση με την πραγματική τιμή του πεδίου. Οι προσομοιώσεις που επιλέχθηκαν αποτελούν τις πλέον αντικρουόμενες από πλευράς σύγκλισης νόμων ώστε να εξετάσουμε κατά πόσο ο νόμος ελάττωσης παίζει ρόλο σαν καθαρός αριθμός.



Εικόνα 3.13: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-1^η επανάληψη



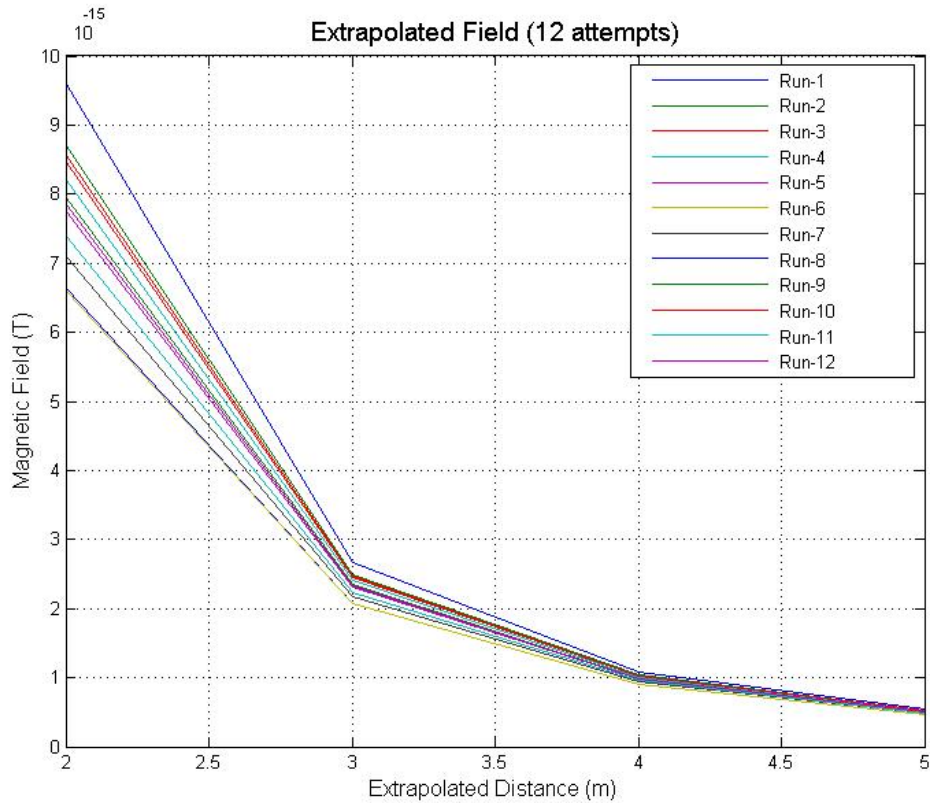
Εικόνα 3.14: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-2^η επανάληψη



Εικόνα 3.15: Σύγκριση έντασης μαγνητικού πεδίου μεταξύ πραγματικών τιμών και τιμών που προκύπτουν από του τρεις διαφορετικούς νόμους, για EUT με 50 βρόχους-3^η επανάληψη

Από τις εικόνες 3.13 έως 3.15 φαίνεται πως και στην περίπτωση των 50 τετραγωνικών βρόχων ο νόμος που προκύπτει από τις μετρήσεις μακριά από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό έχει τη μικρότερη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές. Αμέσως καλύτερη σύγκλιση έχει ο νόμος n_1 που προκύπτει από μετρήσεις ολόκληρης της περιοχής και τέλος ο χειρότερος νόμος είναι ο n_2 . Η εικόνα 3. προέκυψε από ένα τρέξιμο όπου οι νόμοι ξεκινούν από πολύ αρνητικές τιμές (κοντά στο -3,6) και μετά τείνουν όπως έχει ήδη εξηγηθεί στο -3. Στην περίπτωση αυτή οι καμπύλες που προκύπτουν από τους νόμους n_1, n_2, n_3 βρίσκονται κάτω από τη θεωρητική καμπύλη. Δηλαδή υπάρχει υποεκτίμηση (underestimation) της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Άρα όταν οι βρόχοι στο πίσω μέρος του δοκιμαστικού εξοπλισμού γίνεται υποεκτίμηση του πεδίου για κοντινές αποστάσεις. Σε κάθε περίπτωση όμως, όταν γίνεται χρήση του νόμου n_3 , η πρόβλεψη σε μακρινή απόσταση (πχ 5m) είναι ικανοποιητική.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα μέχρι τώρα, δεν φαίνεται να προκύπτει κάποιος γενικός κανόνας (global-law) για την πρόβλεψη σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Αυτό συμβαίνει, διότι οι νόμοι που προκύπτουν εξαρτώνται άμεσα από τη γεωμετρία των βρόχων μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Όμως ο τελικός στόχος είναι η σωστή πρόβλεψη και όχι κατ' ανάγκη η εξασφάλιση ενός συγκεκριμένου νόμου. Παρακάτω φαίνονται οι πραγματικές τιμές του μαγνητικού πεδίου όλων των προσομοιώσεων, αγνοώντας ποιος νόμος υπάρχει κάθε φορά:



Εικόνα 3.16: Πραγματικές τιμές μαγνητικού πεδίου για αποστάσεις $r=2,3,4,5m$ από EUT με 50 τετραγωνικούς βρόχους

Η εικόνα 3.16 παρουσιάζει ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού αποτελούμενου από 50 ρευματικούς βρόχους. Συγκεκριμένα φαίνονται οι τιμές του πεδίου στα σημεία επέκτασης (extrapolated distance) για τις διάφορες, τυχαίες κάθε φορά, θέσεις των βρόχων. Από την γραφική αναπαράσταση προκύπτει πως ανεξάρτητα των θέσεων των βρόχων, άρα και των νόμων που προκύπτουν κάθε φορά, όσο απομακρύνεται το σημείο παρατήρησης από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό τόσο μεγαλύτερη σύγκλιση υπάρχει. Αν εξαιρεθεί το γεγονός πως η κλίμακα αναπαράστασης είναι $T \times 10^{-15}$ (αρκετά μικρή), τότε μετά τα 3m περίπου εμφανίζεται πολύ καλή σύγκλιση των τιμών του πεδίου. Με βάση τον κύριο στόχο ακριβής πρόβλεψης αλλά και το γεγονός ότι δεν είναι τόσο αναγκαία η εξαγωγή γενικού κανόνα, οδηγούμαστε σε άλλες μεθόδους και τεχνικές με τις οποίες θα είναι δυνατή σε κάθε περίπτωση η σωστή πρόβλεψη του πεδίου. Οι τεχνικές αυτές θα εξετασθούν και θα εξηγηθούν στην επόμενη ενότητα.

4.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 50 ΡΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΜΕ DIFFERENTIAL-MODE CURRENT

4.1 Χρήση μαγνητόμετρου ως βασικού ερευνητικού εργαλείου

4.1.1 Γενικές πληροφορίες περί μαγνητόμετρων

Τα μαγνητόμετρα είναι εργαλεία μέτρησης που χρησιμοποιούνται για δύο βασικούς σκοπούς: για τη μέτρηση της μαγνήτισης ενός μαγνητικού υλικού όπως ενός σιδηρομαγνητικού υλικού και για τη μέτρηση της έντασης και σε πολλές περιπτώσεις της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του διαστήματος. Το πρώτο μαγνητόμετρο εφευρέθηκε από τον Carl Friedrich Gauss το 1833 [20]. Τα μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου της Γης και σε γεωφυσικές έρευνες για τον εντοπισμό μαγνητικών ανωμαλιών. Χρησιμοποιούνται επίσης και στο στρατό για τον εντοπισμό υποβρυχίων. Ακόμα τα μαγνητόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανιχνευτές μετάλλων. Είναι ικανά να ανιχνεύσουν μεγάλα αντικείμενα όπως αυτοκίνητα. Τα τελευταία χρόνια τα μαγνητόμετρα έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό όπου μπορούν να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα με πολύ χαμηλό κόστος και βρίσκουν εφαρμογή σε πυξίδες αλλά και σε πολλές άλλες καταναλωτικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές, tablet.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μαγνητόμετρων : Τα vector-magnetometers και τα total field magnetometers. Τα vector (διανυσματικά) μαγνητόμετρα μετρούν τα διανυσματικά μέρη του μαγνητικού πεδίου. Τα total-field μαγνητόμετρα ή βαθμωτά μαγνητόμετρα μετρούν την ένταση (το μέγεθος) του μαγνητικού πεδίου. Τα μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου της Γης μπορούν να εξάγουν πληροφορίες σχετικά με την απόκλιση της Γης (η γωνία μεταξύ της οριζόντιας συνιστώσας του διανυσματικού πεδίου και του μαγνητικού βορρά) και με την κλίση αυτής (η γωνία μεταξύ του διανύσματος πεδίου και την οριζόντια επιφάνεια). Τα absolute μαγνητόμετρα μετρούν την απόλυτη τιμή της έντασης του διανυσματικού πεδίου χρησιμοποιώντας τεχνικές εσωτερικής διακρίβωσης [21] (internal calibration) ή γνωστές φυσικές σταθερές του μαγνητικού αισθητήρα. Ακόμα τα relative μαγνητόμετρα ή variometers όπως αποκαλούνται πολλές φορές μετρούν τις αποκλίσεις και τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικό μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στα σκάφη Pioneer 10 και 11

Τα μαγνητόμετρα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την κατάστασή τους ή την επιδιωκόμενη χρήση τους. Για παράδειγμα υπάρχουν τα σταθερά μαγνητόμετρα που εγκαθίστανται σε μια σταθερή θέση και λαμβάνονται μετρήσεις όσο τα μαγνητόμετρα

ακίνητα. Ακόμα φορητά και κινητά μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κίνηση ενός οχήματος και μπορούν να μεταφερθούν χειροκίνητα από το ένα μέρος σε κάποιο άλλο. Τα μαγνητόμετρα του εργαστηρίου που χρησιμοποιούνται κυρίως για να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο ενός υλικού είναι συνήθως σταθερά σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Επιπροσθέτως τα ερευνητικά μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων σε γεωμαγνητικές έρευνες βρίσκονται είτε σε κάποια σταθερή θέση ενός επίγειου σταθμού βάσης είτε μεταφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

4.1.2 Διαστημικά μαγνητόμετρα

Τα μαγνητικά μαγνητόμετρα είναι μαγνητόμετρα που χρησιμοποιούνται στο εξωτερικό του διαστημικού αεροσκάφους καθώς και στους δορυφόρους κυρίως για επιστημονικές έρευνες. Τα διαστημικά μαγνητόμετρα είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα επιστημονικά όργανα σε έρευνες αλλά και στην παρατήρηση των δορυφόρων. Τέτοιου είδους μαγνητόμετρα έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ανακάλυψη των ζωνών Van Allen [22] γύρω από τη Γη από το Explorer 1 και έχουν αναλύσει το μαγνητικό πεδίο της Γης, της Σελήνης, του Ήλιου, του Άρη, της Αφροδίτης και άλλων πλανητών.



Εικόνα 4.2: Διαστημικό σκάφος Voyager με εμφανές το κοντάρι (boom)

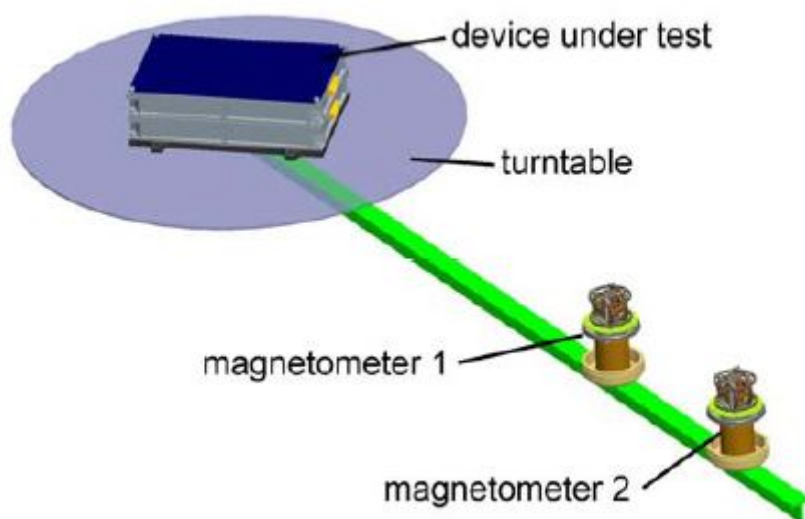
Το πρώτο διαστημικό μαγνητόμετρο τοποθετήθηκε στο διαστημικό σκάφος Spuntik 3 το 1958 και οι πιο αναλυτικές μαγνητικές παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τους δορυφόρους Magsat και Orsted. Επιπροσθέτως κατά τη διάρκεια της διαστημικής αποστολής Apollo [23] μεταφέρθηκαν μαγνητόμετρα και στη Σελήνη. Γενικά έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετοί μέθοδοι για τη μέτρηση της έντασης αλλά και της κατεύθυνσης των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου γύρω από τη Γη αλλά και σε ολόκληρο το ηλιακό σύστημα. Τα διαστημικά μαγνητόμετρα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα fluxgate (ροή πύλης) μαγνητόμετρα, τα search-coil (πηνίου), μαγνητόμετρα και τα ionized-gas (ιονισμού) μαγνητόμετρα.

4.1.3 Η τεχνική των δύο μαγνητομέτρων

Είναι γνωστό πως η ύπαρξη ενός μαγνητικού πεδίου ενός διαστημικού αεροσκάφους μπορεί να είναι μια κυρίαρχη πηγή λάθους στις μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου εκτός του αεροσκάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό για τα μεγάλα διαστημικά σκάφη τα οποία έχουν κατασκευαστεί με τους ελάχιστους μαγνητικούς περιορισμούς και παράγουν σημαντικά πεδία. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος χρήσης δύο μαγνητομέτρων.

Ένας τυπικός σχεδιασμός ενός πειράματος στο διάστημα με χρήση dc μαγνητομέτρου είναι η τοποθέτηση του πρωτεύοντος αισθητήρα κοντά στο τέλος του κονταριού (boom) και του δευτερεύοντος αισθητήρα μεταξύ του υπάρχοντος αισθητήρα και του

διαστημικού σκάφους. Το boom χρησιμοποιείται για να κρατά τα μαγνητόμετρα όσο το δυνατόν μακριά από το σώμα του διαστημικού αεροσκάφους με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι μαγνητικές παρεμβολές από τη λειτουργία του διαστημικού σκάφους. Η χρήση δύο διαφορετικών μαγνητόμετρων (αισθητήρων) στον γενικότερο σχεδιασμό ενός πειράματος γίνεται με σκοπό για να υπάρχει πλεονασμός μετρήσεων του πρωτεύοντος αισθητήρα σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τις μετρήσεις του δευτερεύοντος. Όταν και οι δύο αισθητήρες λαμβάνουν μετρήσεις με τον ίδιο ρυθμό, τότε αυτή η περίπτωση είναι γνωστή σαν τεχνική των δύο μαγνητόμετρων [24]. Η μέθοδος των δύο μαγνητόμετρων επιτρέπει μια εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το διαστημικό αεροσκάφος. Αυτό σημαίνει πως σε περίπτωση όπου το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το αεροσκάφος παρεμβάλλεται στο προς μέτρηση μαγνητικό σήμα τότε η τεχνική των δύο μαγνητόμετρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να απομακρυνθεί το ανεπιθύμητο πεδίο. Ακολουθεί ένα κατατοπιστικό σχήμα μιας πειραματικής διάταξης:



Εικόνα 4.3: Πειραματική διάταξη τεχνικής δύο μαγνητόμετρων

Η παραπάνω διάταξη περιλαμβάνει μια πλατφόρμα με δύο fluxgate μαγνητόμετρα και ένα στρεφόμενο τραπέζι. Ο προσανατολισμός του στρεφόμενου τραπεζιού μετράται με τη βοήθεια ενός αποκωδικοποιητή γωνίας. Οι αισθητήρες και ο αποκωδικοποιητής γωνίας συνδέονται ηλεκτρονικά μεταξύ τους σε μια συσκευή. Ακόμα στη διάταξη υπάρχει και ο δοκιμαστικός εξοπλισμός, από τον οποίο λαμβάνουμε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Για τον διαχωρισμό του πεδίου που παράγεται από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό και του εξωτερικού παρεμβαλλόμενου πεδίου χρειάζονται δύο μαγνητόμετρα. Ο διαχωρισμός βασίζεται στον νόμο ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου του κλασικού διπόλου δηλαδή στον r^{-3} . Οι θέσεις των αισθητήρων δεν είναι σταθερές και ρυθμίζονται κάθε φορά στη βέλτιστη θέση. Όμως γενικά ολόκληρη η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ειδικό εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τη βοήθεια ενός υπολογιστικού συστήματος και έπειτα γίνεται η

κατάλληλη επεξεργασία αυτών. Υπάρχουν δύο τρόποι μέτρησης: DC και AC μετρήσεις. Στον DC τρόπο λειτουργίας ο δοκιμαστικός εξοπλισμός περιστρέφεται και λαμβάνονται μετρήσεις για διάφορες τιμές γωνιών. Στον AC τρόπο λειτουργίας τα μαγνητόμετρα μετρούν μετρούν συνεχώς και σε αυτή την περίπτωση ο δοκιμαστικός εξοπλισμός λειτουργεί υπό την παρουσία θορύβου ώστε να υπολογισθεί η AC διαταραχή.

4.2 Μέθοδος κλιμακούμενης απόστασης μαγνητόμετρων για ακριβή πρόβλεψη και επέκταση πεδίου

4.2.1 Περιγραφή προβλήματος και τελικός στόχος εργασίας

Η πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς των μαγνητικών πηγών που εντοπίζονται σε έναν χώρο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλές επιστημονικές και μηχανικές εφαρμογές[16,25]. Ειδικότερα, η μαγνητική καθαρότητα στις διαστημικές αποστολές αποτελεί ένα επιστημονικό πεδίο που απαιτεί τον προσδιορισμό της μαγνητικής συμπεριφοράς όλων των πηγών που περιλαμβάνονται στον εξοπλισμό ενός διαστημικού σκάφους. Πολλές πρόσφατες αλλά και επικείμενες (Solar Orbiter, Juice) αποστολές έχουν σχεδιαστεί για την εκτέλεση επιτόπιων AC μετρήσεων μαγνητικού πεδίου αλλά και για την μέτρηση των δυναμικών επιδράσεων σε δοκιμαστικές μάζες(Lisa Pathfinder). Ο εξοπλισμός μέτρησης (μαγνητόμετρα) πρέπει να τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία που είναι μαγνητικά καθαρά δηλαδή σε σημεία όπου η συνεισφορά του μαγνητικού πεδίου διατηρείται κάτω από 0.1-1nT [10]. Για τον καθορισμό αυτών των μαγνητικά καθαρών σημείων, πρέπει να διασφαλισθούν αυστηρές απαιτήσεις για μαγνητική καθαρότητα πάνω στη γη και όχι σε διαστημικό περιβάλλον. Για αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που περιλαμβάνουν μετρήσεις και διαδικασίες μοντελοποίησης τόσο σε επίπεδο μονάδας όσο και σε ολόκληρο το σύστημα. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την μελέτη των μαγνητικών πηγών οι οποίες έχουν την ίδια μαγνητική συμπεριφορά με τον εξοπλισμό που τοποθετείται στα διαστημικά σκάφη.

Για την ακριβή πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς οποιουδήποτε δοκιμαστικού εξοπλισμού, πραγματοποιούνται κοντινές μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Η περίπτωση του συνεχούς-DC ρεύματος έχει μελετηθεί εκτενώς και έχουν προκύψει αρκετές χρήσιμες προσεγγίσεις [26]. Συγκεκριμένα, η κυρίαρχη προσέγγιση περιλαμβάνει το μοντέλο του μαγνητικού δίπολου (MDM) [27,28]. Συμβατικά οι μαγνητικές πηγές που σχετίζονται με τον εξοπλισμό του διαστημικού σκάφους μπορούν να θεωρηθούν ως μαγνητικά δίπολα, υποθέτοντας πως ο νόμος ελάττωσης της απόστασής τους προσεγγίζει το νόμο r^{-3} . Ωστόσο η υπόθεση αυτή δεν είναι πάντα σωστή αφού διάφορες παράμετροι των μαγνητικών πηγών μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Ως εκ τούτου, αυτοί οι μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοσθούν σε περιπτώσεις όπου ο δοκιμαστικός εξοπλισμός αποτελείται από πολλαπλές μαγνητικές πηγές. Ακόμα, επικείμενες διαστημικές αποστολές έχουν πρόσθετες απαιτήσεις όσον αφορά την AC μαγνητική καθαρότητα με

επίκεντρο την περιοχή DC-1 MHz όπου το μαγνητικό πεδίο μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν στατικό [11]. Προηγούμενες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί στόχευαν στον εντοπισμό της χειρότερης περίπτωσης, όπως για παράδειγμα την μέγιστη δυνατή τιμή του μαγνητικού πεδίου σε προδιαγεγραμμένα σημεία. Αυτό απαιτεί την πρόληψη από τυχόν υποεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου αφού η υπερεκτίμηση του πεδίου θεωρείται λιγότερο σημαντική. Παρ' όλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται η ακριβής πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου, ανεξάρτητα αν μας δεν μας επηρεάζει η υπό ή η υπέρ-εκτίμηση του πεδίου.

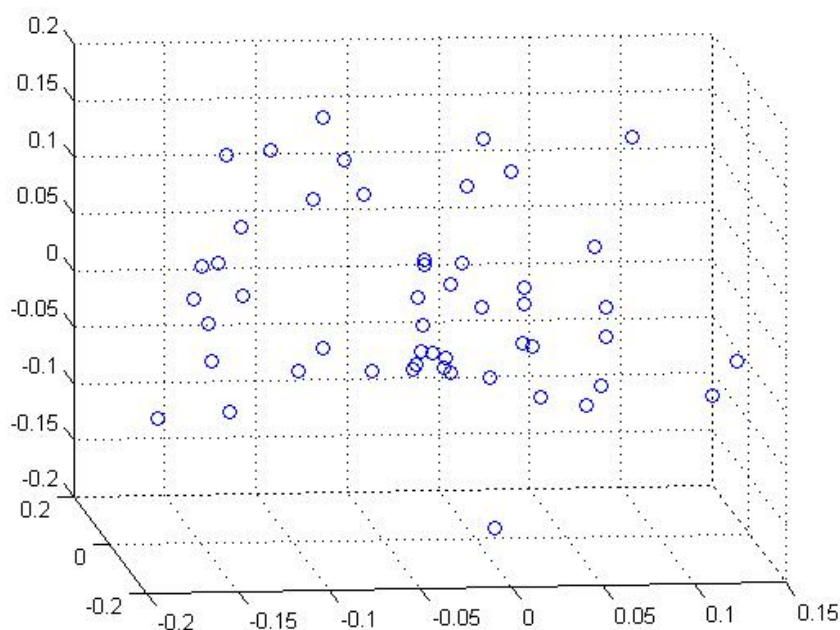
Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών που επιτρέπουν εν τέλει τον ακριβή προσδιορισμό της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού που αποτελείται από πολλαπλές μαγνητικές πηγές (ρευματικούς βρόχους). Για το λόγο αυτό, για την σύνθεση του δοκιμαστικού εξοπλισμού έχουν χρησιμοποιηθεί μαγνητικές πηγές χαμηλής συχνότητας (μέχρι 1 MHz) σε τυχαίες θέσεις κάθε φορά. Το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται κάνοντας χρήση του νόμου Biot-Savart και του διανυσματικού δυναμικού. Σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, οι δύο προαναφερθέντες νόμοι μπορούν εναλλακτικά για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου[8]. Τελικά, μέσα από την παρούσα εργασία θα είναι δυνατή η ακριβής επέκταση του μαγνητικού πεδίου ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου.

Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τις προσομοιώσεις εξετάζεται κυρίως ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση παρατήρησης. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, δύο σημεία παρατήρησής (μέθοδος δύο μαγνητόμετρων) είναι αρκετά ώστε να υπολογισθεί ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια αφού έχει υπολογισθεί ο νόμος ελάττωσης γίνεται χρήση αυτού για την πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού σε διάφορες αποστάσεις. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετήσει την επίδραση που έχει η θέση των μαγνητόμετρων στην ακριβή πρόβλεψη του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιούνται σε κοντινή σχετικά απόσταση από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό ώστε οι τιμές του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) να κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Η μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού θεωρείται πως ακολουθεί τον κλασσικό νόμο ελάττωσης του διπόλου όταν το σημείο παρατήρησης βρίσκεται σε απόσταση 5 φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάσταση του εξοπλισμού [18]. Κάτω από αυτό το κατώφλι, όπου τοποθετούνται τα μαγνητόμετρα, ο νόμος ελάττωσης διαφέρει από τον νόμο r^{-3} .

Ένας άλλος λόγος απόκλισης του νόμου από τον αναμενόμενο είναι κατανομή των θέσεων των ρευματικών βρόχων μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θέση των βρόχων επηρεάζει σημαντικά τον νόμο ελάττωσης που προκύπτει και αυτό διότι αν οι ρευματικοί βρόχοι είναι συγκεντρωμένοι σε εάν σημείο (μπροστινό ή πισινό μέρος) τότε ο νόμος διαφέρει από αυτόν που προκύπτει αν οι βρόχοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στον όγκο του εξοπλισμού. Όπως θα αναφερθεί παρακάτω, ανεξάρτητα από τις θέσεις των βρόχων θα πρέπει για κάθε τυχαία γεωμετρία να είναι δυνατή η ακριβής επέκταση του μαγνητικού πεδίου σε διάφορα σημεία παρατήρησης.

4.2.2 Μοντελοποίηση προβλήματος

Κάθε εξοπλισμός που μπορεί να επηρεάσει τις απαιτήσεις μαγνητικής καθαρότητας σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα “μαύρο” κουτί με ρευματικές πηγές στο εσωτερικό του [19]. Ένας μη ιδανικός δοκιμαστικός εξοπλισμός αποτελείται από πολλούς ρευματικούς βρόχους (στη συγκεκριμένη περίπτωση 50) η θέση των οποίων δεν είναι γνωστή εξ’ αρχής. Στην παρούσα εργασία, ο δοκιμαστικός εξοπλισμός βρίσκεται στην αρχή των αξόνων με διαστάσεις $0.4 \times 0.4 \times 0.4 m^3$. Ακόμα η θέση (x_j, y_j, z_j) της j -στης ρευματικής πηγής, με $j=0, 1, \dots, N$, μέσα στο κουτί επιλέγεται τυχαία. Στην εικόνα 4.4 φαίνεται μια τυχαία κατανομή των 50 τετραγωνικών βρόχων μέσα στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Κάθε μαγνητική πηγή θεωρείται πως είναι ένας τετραγωνικός βρόχος πλευράς $a=1cm$ με εμβαδόν ίσο με $A=\pi \cdot a^2$ και ρεύμα I . Τα κέντρα των ρευματικών βρόχων είναι τυχαία διασκορπισμένα ακολουθώντας μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[(-b+a)/2, (b-a)/2]$ m σε κάθε κατεύθυνση (x, y, z) εξασφαλίζοντας ότι όλοι οι βρόχοι θα είναι εντός των ορίων του κουτιού.



Εικόνα 4.4: Τυχαία θέση ρευματικών βρόχων μέσα στο EUT

Οι παράμετροι του προβλήματος σχετικά με τα χαρακτηριστικά του δοκιμαστικού εξοπλισμού αλλά και των ρευματικών βρόχων συνοψίζονται στον πίνακα 4.1. Όλοι οι μαγνητικοί βρόχοι είναι ευθυγραμμισμένοι κατά τον άξονα z , διατυπώνοντας έτσι το χειρότερο σενάριο από άποψη έντασης μαγνητικού πεδίου.

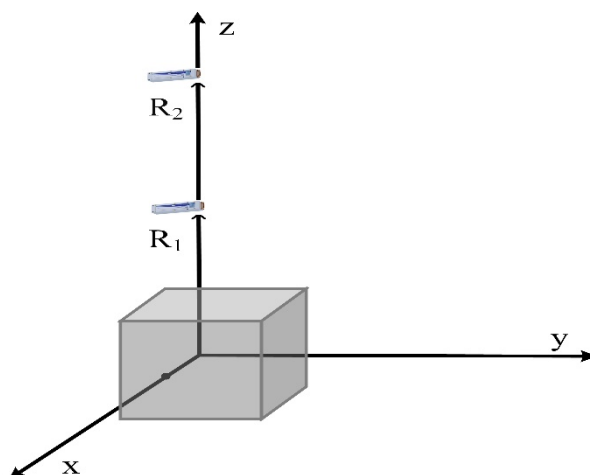
Τέλος, διεξήχθησαν αρκετές προσομοιώσεις σχετικά με την τυχαία τοποθέτηση των βρόχων μέσα στο κουτί ώστε να προκύψουν όσο πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Είναι προφανές πως η θέση των πηγών μέσα στο κουτί είναι καθοριστικής σημασίας για τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού, οδηγώντας σε σημαντικές αποκλίσεις από τον νόμο ελάττωσης r^{-3} .

Παράμετροι	
Εμβαδόν Βρόχου	$\pi \text{ cm}^2$
Ρεύμα Βρόχου	1 mA
Θέση Βρόχου	Τυχαία
Προσανατολισμός Βρόχου	Στον z-άξονα
Αριθμός Βρόχων	50
Πλάτος Κουτιού	0.40 m
Αριθμός ανεξάρτητων δοκιμών	12

Πίνακας 4.1: Συνοπτικά αριθμητικά στοιχεία (παράμετροι) του προβλήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανάλυση θα βασιστεί σε δύο σημεία παρατήρησης όπου τοποθετούνται τα μαγνητόμετρα. Τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται θεωρητικά στον z-άξονα, με διαφορετικές κάθε φορά αποστάσεις από τα κέντρα του κουτιού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.5: Σημεία παρατήρησης σε κοντινή απόσταση από το EUT

Για να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο στα σημεία παρατήρησης, ακολουθώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι μαγνητικοί βρόχοι χωρίζονται σε W πεπερασμένα ρευματικά στοιχεία στοιχειώδους μήκους dl και ρεύματος $I=1\text{mA}$ (κάθε

βρόχος διαιρείται σε 200 κομμάτια). Έπειτα το μαγνητικό πεδίο του i -στου στοιχείου υπολογίζεται με το νόμο Biot-Savart ως:

$$d\vec{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{(I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}_i)}{|\vec{r}_i|^3} \quad (4.2.1)$$

όπου $\vec{r}_i = (\vec{x} - \vec{x}'_i)$ είναι το διάνυσμα απόστασης μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του τρέχοντος στοιχείου w_i . Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο όλων των πηγών υπολογίζεται σαν υπέρθεση του μαγνητικού πεδίου όλων των στοιχειωδών κομματιών ως εξής:

$$\vec{B} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^W d\vec{B}_{ij} \quad (4.2.2)$$

Εναλλακτικά, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_V \vec{J}(\vec{x}') \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} dV' \quad (4.2.3)$$

όπου $k=\omega/c$ ο κυματαριθμός του κενού και με την υπόθεση ημιτονοειδούς χρονικής εξάρτησης της πυκνότητας ρεύματος J (δηλαδή $\vec{J}(\vec{x}, t) = \vec{J}(\vec{x}) \cdot e^{j\omega t}$). Το μαγνητικό πεδίο μετά υπολογίζεται ως:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.2.4)$$

Για χαμηλές συχνότητες ($k \rightarrow 0$), η μέθοδος του διανυσματικού δυναμικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του νόμου Biot-Savart.

Καθώς ο δοκιμαστικός εξοπλισμός έχει προσδιοριστεί πλήρως από όλες τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν, υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο σε αποστάσεις παρατήρησης χρησιμοποιώντας το νόμο Biot-Savart είτε τον τύπο με το διανυσματικό δυναμικό A . Στη συνέχεια οι τιμές του μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκαν, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου. Ο υπολογισμός του νόμου ελάττωσης r^{-n} γίνεται με χρήση εκθετικής παρεμβολής. Τουλάχιστον δύο σημεία παρατήρησης απαιτούνται ώστε να εφαρμοσθεί η μέθοδος της εκθετικής παρεμβολής.

Το μαγνητικό πεδίο θεωρείται της μορφής:

$$B = |\vec{B}| = \frac{a}{r^n} \quad (4.2.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\ln B = \ln \alpha - n \cdot \ln r \quad (4.2.6)$$

Ως εκ τούτου, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στα δύο σημεία παρατήρησης είναι επαρκή για τον προσδιορισμό των συντελεστών α, n . Η απόσταση παρατήρησης από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού αλλά και η απόσταση μεταξύ των δύο μαγνητόμετρων ποικίλει. Αξίζει να σημειωθεί πως η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί για κάθε συνιστώσα (B_x, B_y, B_z) ξεχωριστά. Σε κάθε περίπτωση ο νόμος ελάττωσης χρησιμοποιείται για την επέκταση του πεδίου σε συγκεκριμένα σημεία παρατήρησης όπου βρίσκεται ο ευαίσθητος εξοπλισμός μέτρησης. Ως κριτήριο αξιολόγησης της συνολικής διαδικασίας πρόβλεψης χρησιμοποιείται το σχετικό σφάλμα (relative error) μεταξύ των προβλεπόμενων και των θεωρητικών τιμών του μαγνητικού πεδίου.

Το σχετικό σφάλμα ορίζεται ως:

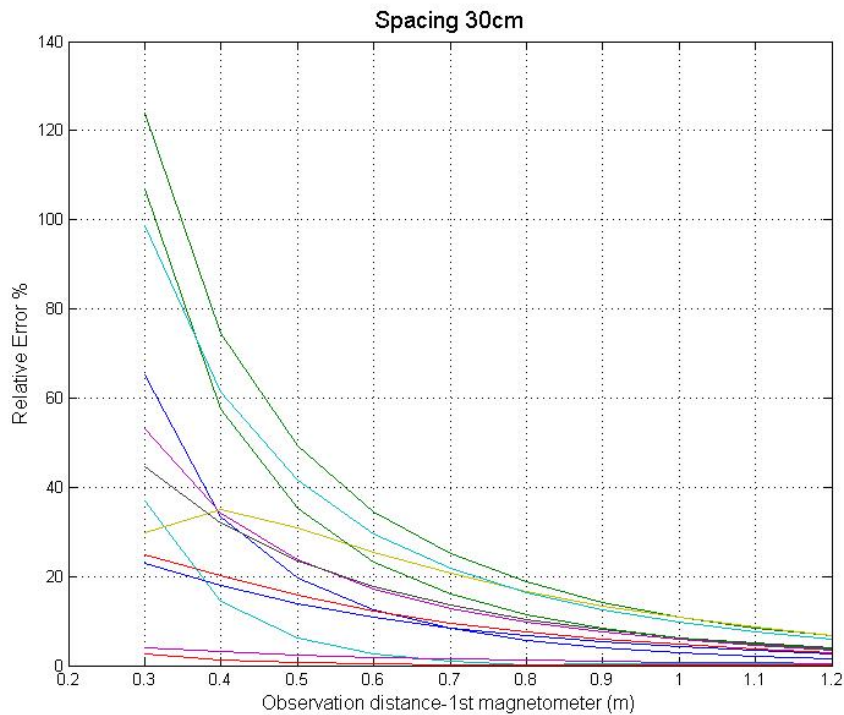
$$RE = \frac{|B_{predicted} - B_{theoretical}|}{|B_{theoretical}|} \cdot 100\% \quad (4.2.7)$$

4.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

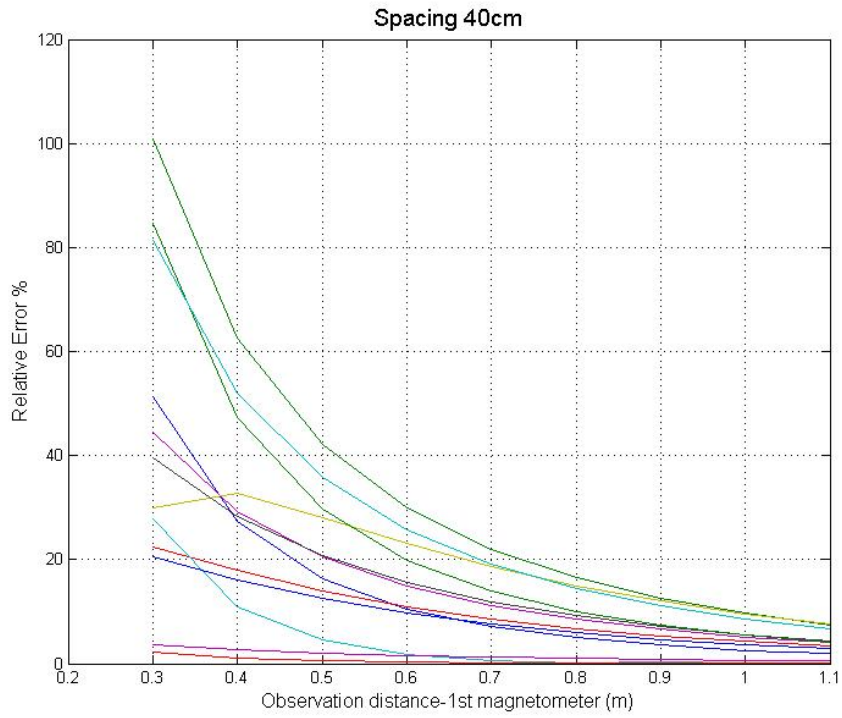
4.3.1 Επέκταση μαγνητικού πεδίου σε μακρινές αποστάσεις χρησιμοποιώντας εκθετική παρεμβολή

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, ως EUT θεωρείται ένα κουτί διαστάσεων $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ και εξετάζεται η επίδραση της απόστασης παρατήρησης από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό στην ακριβή πρόβλεψη του πεδίου σε συγκεκριμένες αποστάσεις. Επιπροσθέτως, η απόσταση μεταξύ των δύο μαγνητόμετρων διαφέρει κάθε φορά και παίζει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια της επέκτασης του πεδίου. Η τιμή του μαγνητικού πεδίου προβλέπεται κάθε φορά σε διάφορα σημεία μετρώντας από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μέθοδος πρόβλεψης αξιολογείται με βάση το σχετικό σφάλμα που προκύπτει από τη μετρούμενη και την πραγματική τιμή του πεδίου. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται για 12 φορές.

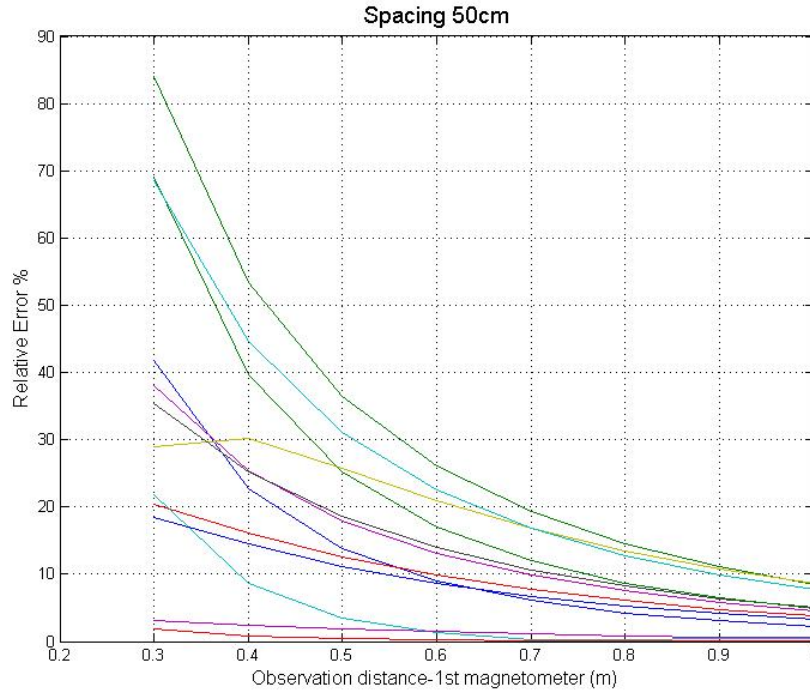
Αρχικά εξετάζεται η επέκταση του πεδίου σε μακρινές αποστάσεις από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Η απόσταση επέκτασης του πεδίου επιλέγεται ίση με 3m (7.5 φορές του μήκους του δοκιμαστικού εξοπλισμού), ενώ οι μεταβλητοί παράγοντες είναι οι θέσεις και οι αποστάσεις μεταξύ των μαγνητόμετρων. Σε κάθε περίπτωση η απόσταση μεταξύ των μαγνητόμετρων παραμένει σταθερή και αλλάζουν οι θέσεις στις οποίες τοποθετούνται. Οι σταθερές αποστάσεις που επιλέγονται είναι 30,40,50 και 60cm. Οι τιμές του πεδίου που λαμβάνονται στις θέσεις των μαγνητόμετρων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των σταθερών a_n και έτσι τελικά εκφράζεται για κάθε περίπτωση ο νόμος ελάττωσης του πεδίου. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που αναπαριστούν το σχετικό σφάλμα μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων μετρήσεων για κάθε περίπτωση μεταβλητής απόστασης των 2 μαγνητόμετρων (spacing).



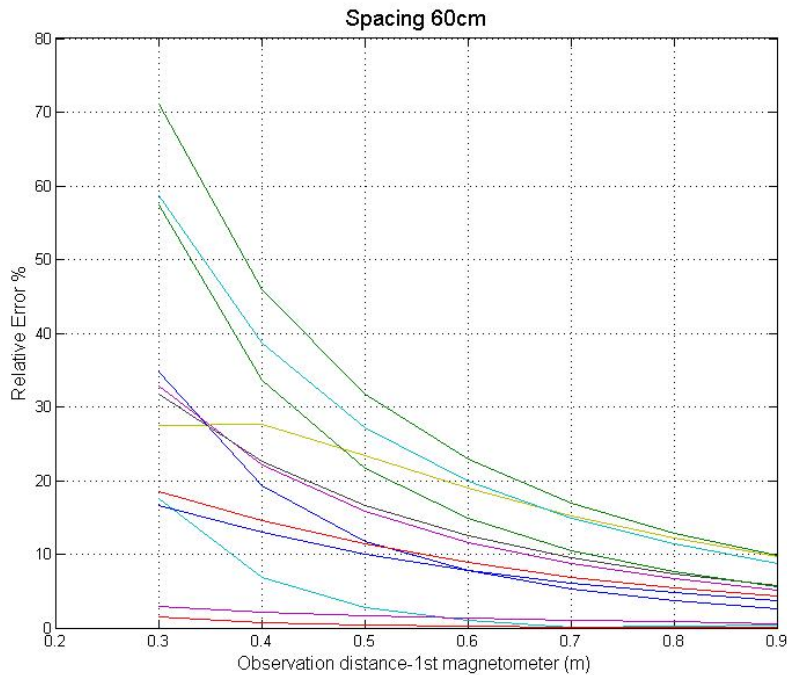
Εικόνα 4.6: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 30cm



Εικόνα 4.7: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 40cm



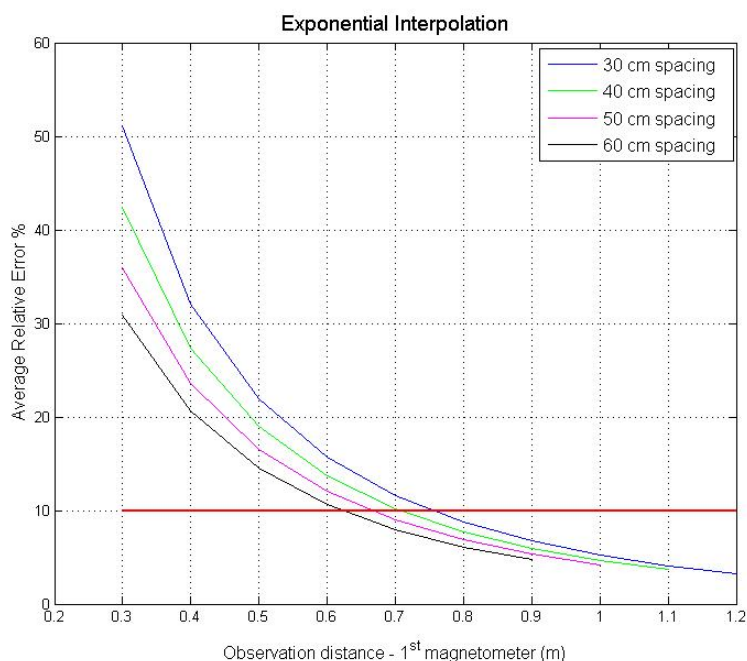
Εικόνα 4.8: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 50cm



Εικόνα 4.9: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες οι θέσεις των βρόχων μέσα στο κουτί παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαδικασία της επέκτασης του πεδίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι βρόχοι συγκεντρώνονται γύρω από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού, έτσι επιτυγχάνεται ο νόμος ελάττωσης r^{-3} με αρκετή ακρίβεια κοντά στο κουτί. Αντιθέτως, σε άλλες περιπτώσεις όπου οι βρόχοι είναι συγκεντρωμένοι στα άκρα του κουτιού, παρατηρείται υπό ή υπερ-εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου στα 3m. Από όλες τις παραπάνω εικόνες, φαίνεται ξεκάθαρα πως όταν το πρώτο μαγνητόμετρο τοποθετείται σε μακρινή απόσταση από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό τότε το σχετικό σφάλμα μειώνεται σημαντικά.

Έπειτα υπολογίζεται το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα για κάθε μια από τις εξεταζόμενες αποστάσεις των μαγνητόμετρων, ώστε να προκύψει ένα πιο εποπτικό και συμπαγές συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση που έχει το spacing στην ακριβή πρόβλεψη. Ως κριτήριο καλής ή κακής πρόβλεψης τίθεται ένα κατώφλι, κάτω από το οποίο η πρόβλεψη θα είναι ικανοποιητική. Το κατώφλι αυτό ορίζεται στο 10% σχετικό σφάλμα. Αν δηλαδή το σχετικό σφάλμα είναι πάνω από 10%, τότε η πρόβλεψη δεν θεωρείται αξιόπιστη. Ακολουθεί το διάγραμμα με τα μέσα σχετικά σφάλματα:



Εικόνα 4.10: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing

Είναι φανερό από την εικόνα 4.10 πως όταν το πρώτο μαγνητόμετρο βρίσκεται σε απόσταση διπλάσια της μέγιστης πλευράς του κουτιού, ανεξάρτητα από το γεγονός πως ο νόμος ελάττωσης δεν έχει προλάβει να συγκλίνει στον αναμενόμενο (r^{-3}), το σχετικό σφάλμα είναι μικρότερο από το μέγιστο αποδεκτό. Αποδεικνύεται ακόμα πως όταν η απόσταση μεταξύ των μαγνητόμετρων αυξάνεται το σχετικό σφάλμα στην πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου μειώνεται ανεξάρτητα από τις θέσεις των μαγνητόμετρων. Έτσι είναι δυνατή η τοποθέτηση του πρώτου μαγνητόμετρου πιο κοντά στον δοκιμαστικό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιείται spacing 60cm, τότε το πρώτο μαγνητόμετρο μπορεί να τοποθετηθεί σε απόσταση 1.5 φορά της μέγιστης πλευράς του κουτιού πετυχαίνοντας έτσι μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο.

4.3.2 Επέκταση μαγνητικού πεδίου σε μακρινές αποστάσεις χρησιμοποιώντας μέθοδο εξομάλυνσης των τιμών

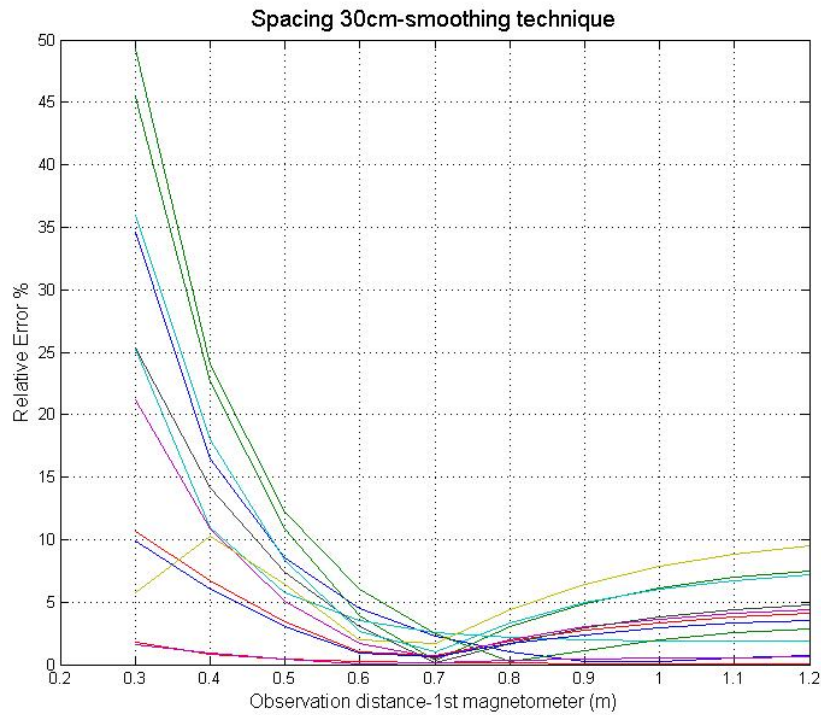
Σε αυτή την ενότητα χρησιμοποιείται μια μέθοδος εξομάλυνσης για την περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης στα 3m μακριά από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Σε απόσταση επέκτασης 3 μέτρων, ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου συγκλίνει στον νόμο r^{-3} [18,29]. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής 3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξομαλυνθούν οι εκτιμώμενες τιμές του n.

Η μέθοδος που εφαρμόζεται περιγράφεται μαθηματικά με την εξής σχέση:

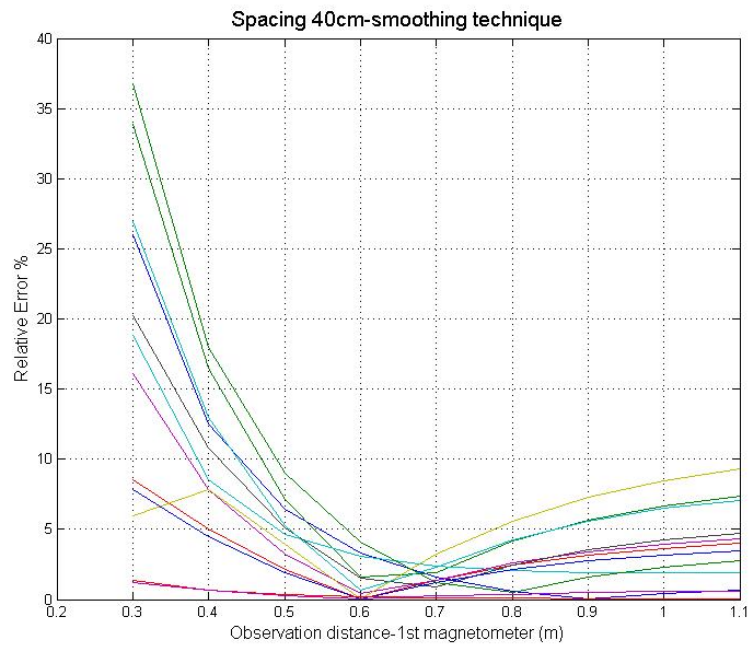
$$B = |\vec{B}| = \frac{\alpha}{r^{(n+3)/2}} \quad (4.3.1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει πως ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου θα τείνει στον r^{-3} σε μικρότερες αποστάσεις, επιτρέποντας έτσι την τοποθέτηση του μαγνητόμετρου ακόμα πιο κοντά στον δοκιμαστικό εξοπλισμό.

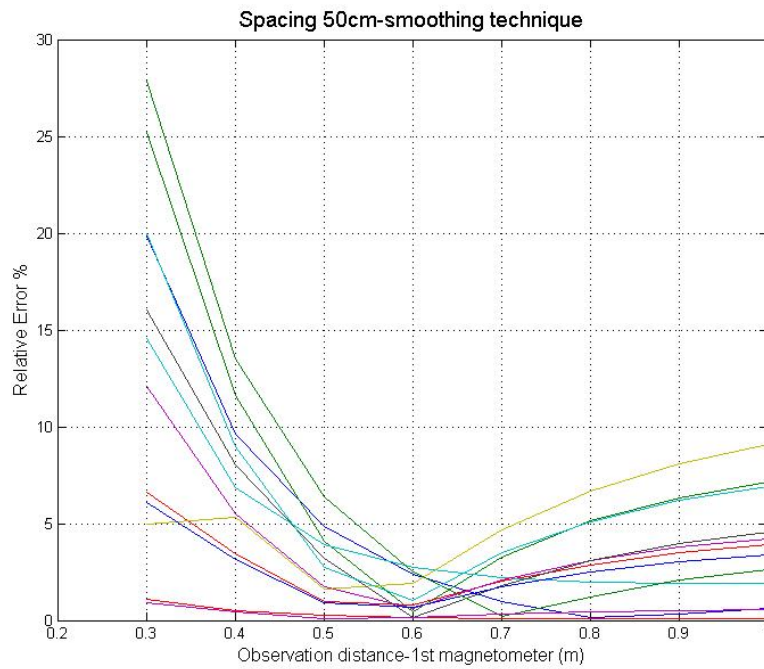
Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με την ίδια λογική όπως προηγουμένως με τη μόνη διαφορά πως αυτή τη φορά έχει γίνει εφαρμογή της σχέσης 4.3.1 για την πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου στα 3m.



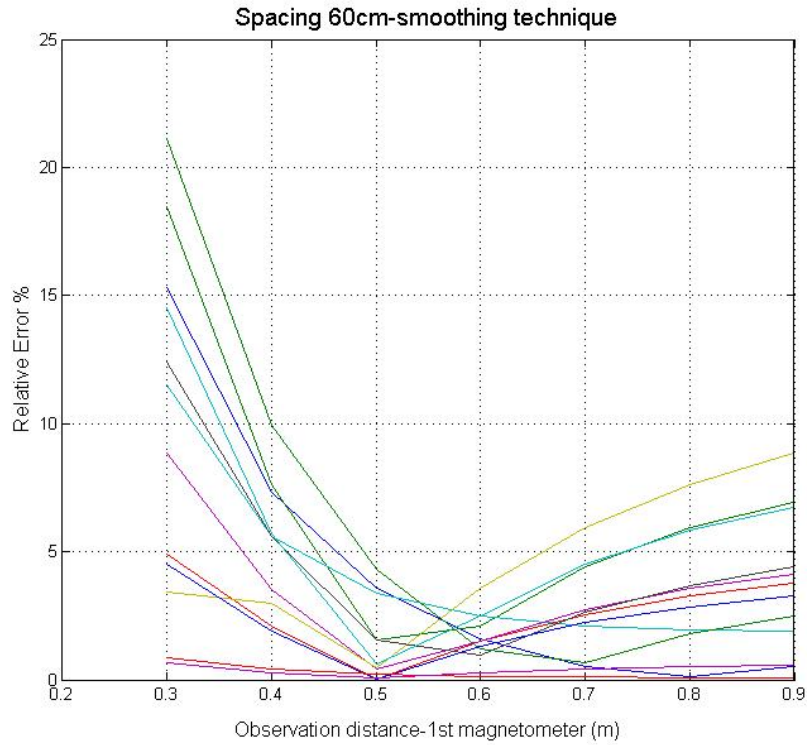
Εικόνα 4.11: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 30cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης



Εικόνα 4.12: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 40cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης



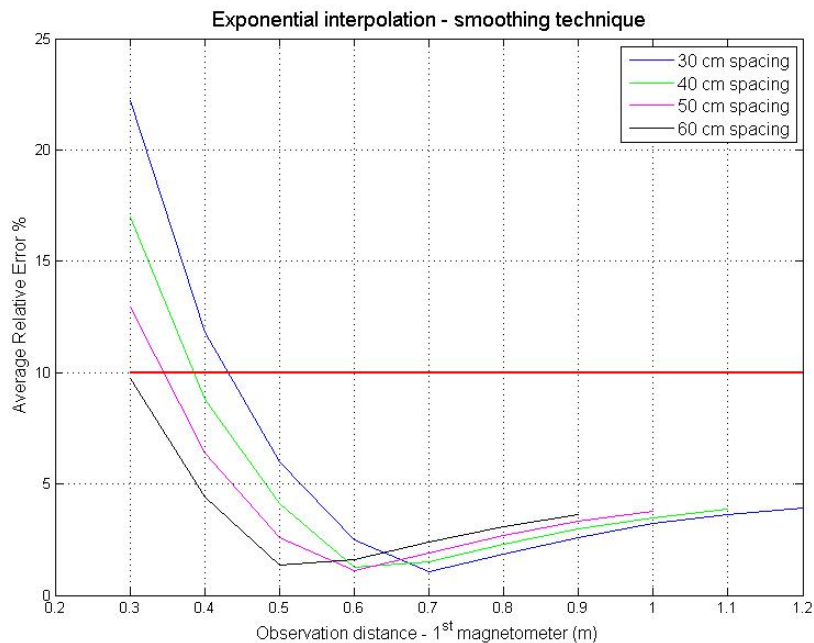
Εικόνα 4.13: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 50cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης



Εικόνα 4.14: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm με τη μέθοδο της εξομάλυνσης

Από τις εικόνες 4.3.11 έως 4.3.14 φαίνεται πως υπάρχει ένα διάστημα στο οποίο παρατηρείται μια καμπή στο σχετικό σφάλμα. Συγκεκριμένα το διάστημα αυτό κυμαίνεται από 0.5 έως 0.7m. Αυτό συμβαίνει καθώς στο προαναφερθέν διάστημα ο νόμος ελάττωσης έχει συγκλίνει στον r^{-3} . Από αυτό το διάστημα και πέρα παρατηρείται χειροτέρευση (αύξηση) του σχετικού σφάλματος καθώς η τεχνική της εξομάλυνσης είναι περιττή.

Το αντίστοιχο διάγραμμα με τα μέσα σχετικά σφάλματα ανά spacing φαίνεται ακολούθως:



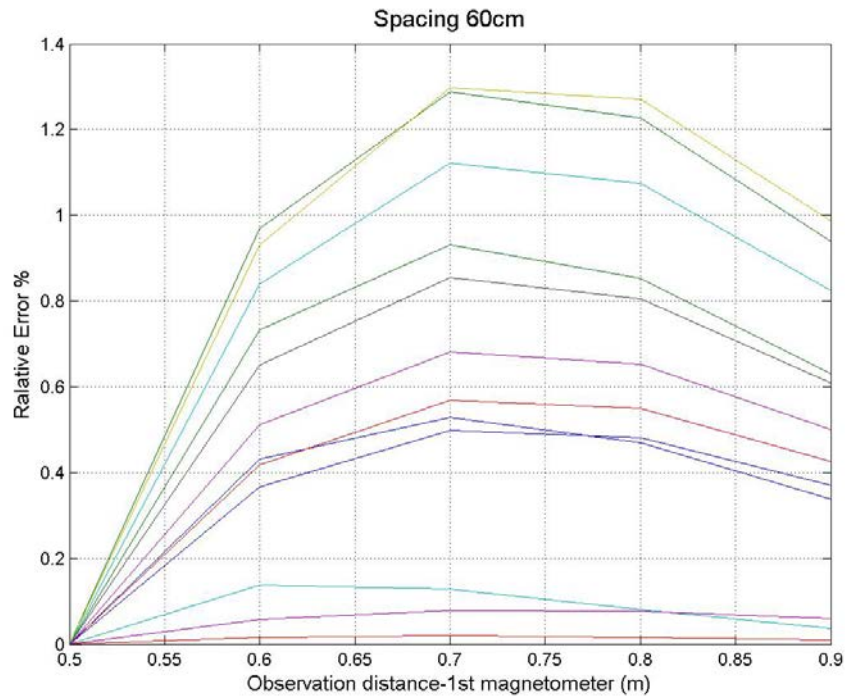
Εικόνα 4.15: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing με τη μέθοδο της εξομάλυνσης.

Όπως παρατηρείται, η μέθοδος της εξομάλυνσης μειώνει σημαντικά το σχετικό σφάλμα για όλες τις θέσεις των μαγνητόμετρων. Τα μαγνητόμετρα μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα πιο κοντά στον δοκιμαστικό εξοπλισμό, πετυχαίνοντας υψηλές τιμές του SNR. Συγκεκριμένα, το πρώτο μαγνητόμετρο μπορεί πλέον να τοποθετηθεί σε απόσταση 1 φορά της μέγιστης πλευράς του κουτιού. Άρα η τεχνική της εξομάλυνσης είναι κατάλληλη όταν τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται κοντά στο EUT και επιχειρείται πρόβλεψη σε μακρινές αποστάσεις. Όσο τα σημεία παρατήρησης βρίσκονται μακριά από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό η μέθοδος γίνεται λιγότερο αποτελεσματική και συγκλίνει στην προηγούμενη απλή μέθοδο της εκθετικής παρεμβολής τιμών.

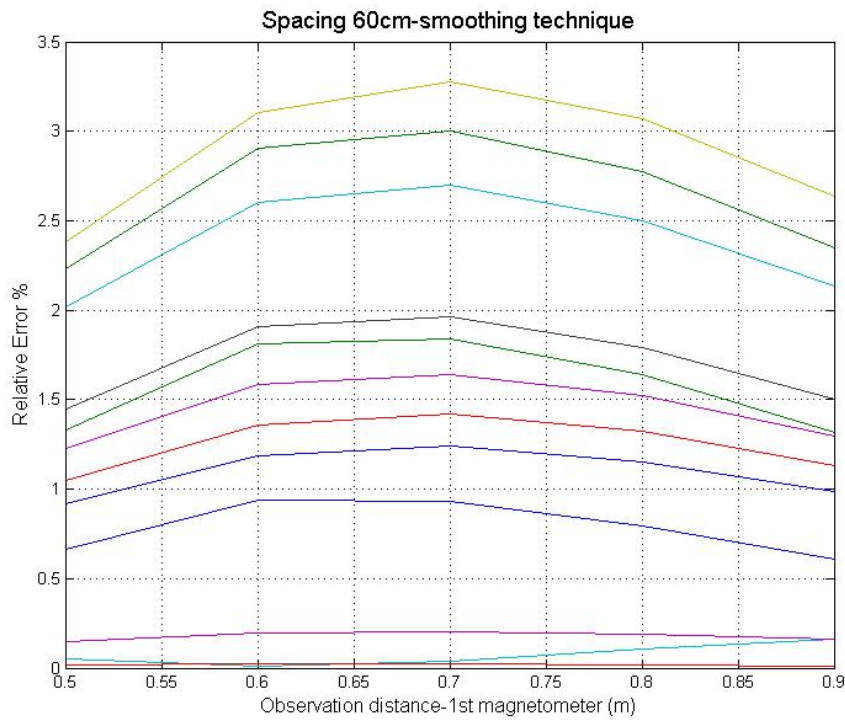
4.3.3 Επέκταση μαγνητικού πεδίου ενδιάμεσα των δύο μαγνητόμετρων

Σε αυτή την υποενότητα ακολουθείται παρόμοια λογική με τη μόνη διαφορά πως το σημείο επέκτασης του πεδίου βρίσκεται ενδιάμεσα των δύο μαγνητόμετρων. Συγκεκριμένα, γίνεται πρόβλεψη του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση 1.1m μακριά από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό χρησιμοποιώντας την τεχνική της εκθετικής παρεμβολής και τη μέθοδο της εξομάλυνσης. Το σημείο επέκτασης βρίσκεται ανάμεσα στα δύο μαγνητόμετρα πραγματοποιώντας έτσι μια ενδιάμεση πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας η απόσταση των δύο μαγνητόμετρων παραμένει σταθερή και οι θέσεις τους κάθε φορά διαφέρουν. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του σχετικού σφάλματος με

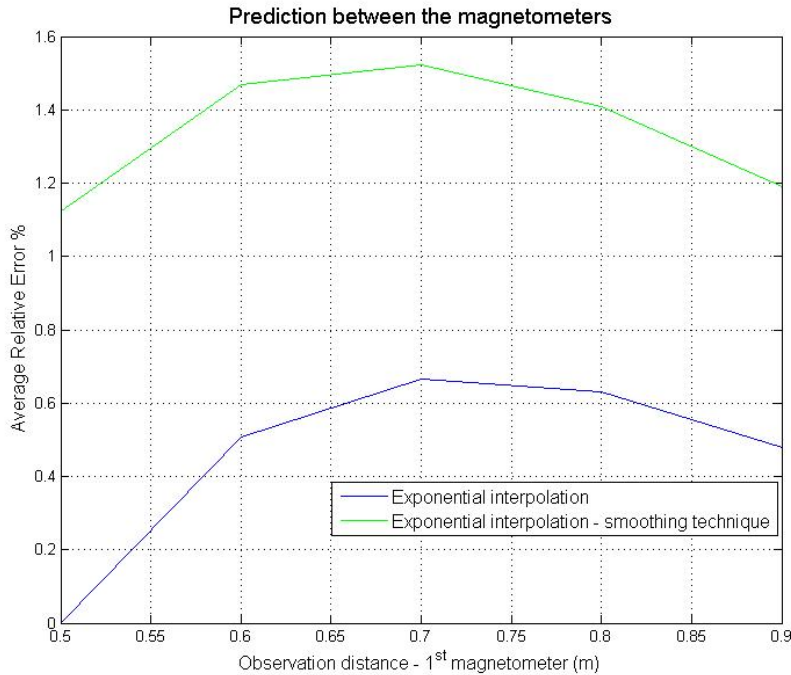
τη χρήση των δύο μεθόδων καθώς και του μέσου σχετικού σφάλματος λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις προσομοιώσεις:



Εικόνα 4.16: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη



Εικόνα 4.17: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη με τη μέθοδο της εξομάλυνσης



Εικόνα 4.18: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για spacing 60cm και για τις δυο τεχνικές

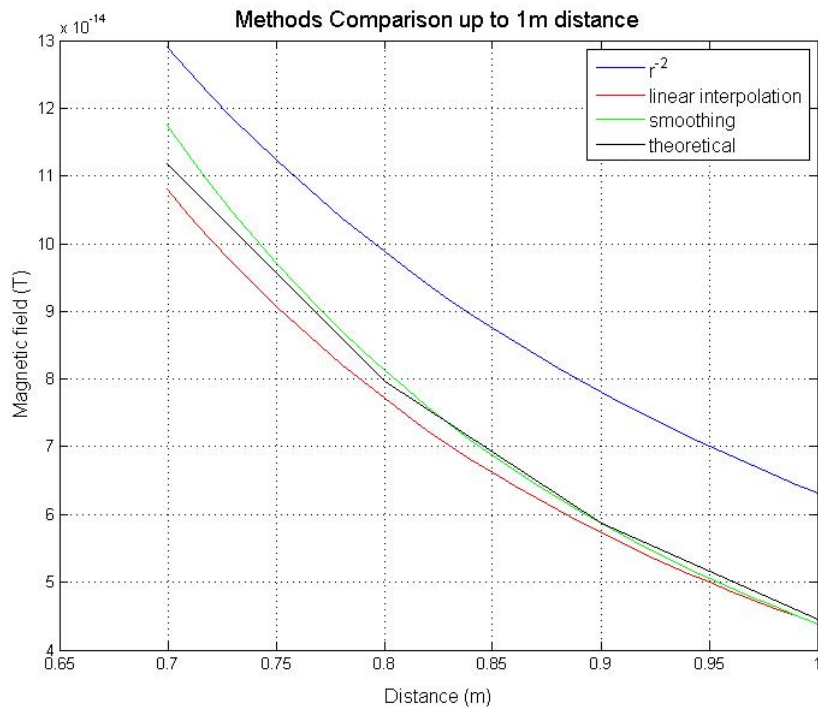
Όπως φαίνεται από τις εικόνες 4.16 έως 4.18 η μέθοδος της εξομάλυνσης με τον παράγοντα 3 δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς χειροτερεύει την ακρίβεια της πρόβλεψης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όπως έχει ήδη εξηγηθεί η τεχνική της εξομάλυνσης είναι χρήσιμη για πρόβλεψη μακριά από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό και ο νόμος ελάττωσης στην ενδιάμεση περιοχή διαφέρει κατά πολύ από τον r^{-3} . Εξαιρώντας την μέθοδο της εξομάλυνσης και λαμβάνοντας υπόψιν την απλή μέθοδο της εκθετικής παρεμβολής το σχετικό σφάλμα προκύπτει αρκετά μικρό ($< 2\%$) ανεξάρτητα της θέσης των δύο μαγνητόμετρων. Αυτό μας επιτρέπει μια πολύ καλή πρόβλεψη στην ενδιάμεση περιοχή των δύο μαγνητόμετρων.

4.4 Σύγκριση μεθόδων

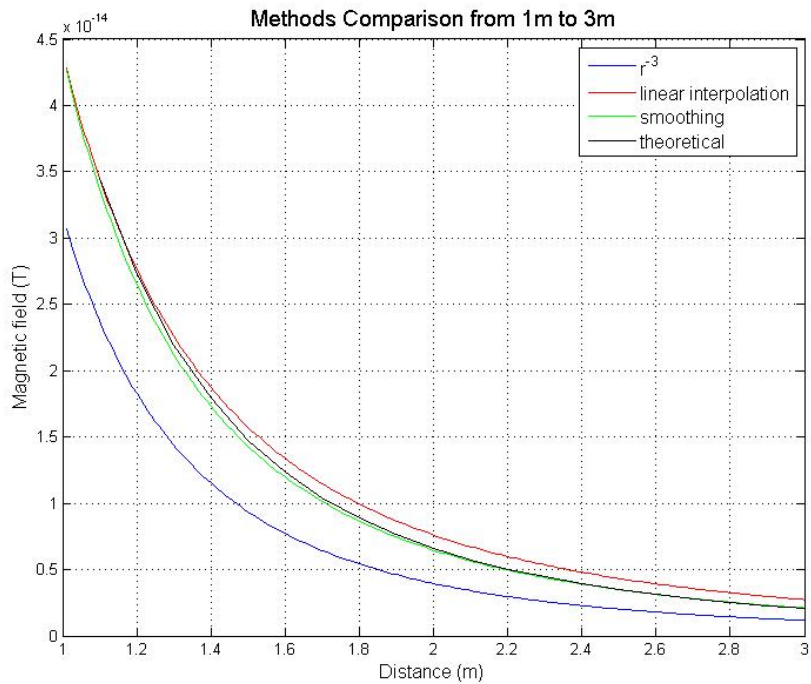
4.4.1 Σύγκριση των προαναφερθέντων μεθόδων με τους νόμους r^{-2} , r^{-3}

Σκοπός της σύγκρισης των επιμέρους μεθόδων είναι η αξιολόγηση αυτών σε σχέση με προ υπάρχουσες τεχνικές. Συγκεκριμένα, προηγούμενες τεχνικές επέκτασης του πεδίου χρησιμοποιούσαν είτε το νόμο r^{-2} είτε το νόμο r^{-3} , οδηγούμενη κατά συνέπεια σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου. Μια άλλη πιο προχωρημένη τεχνική επικεντρώνεται στην πρόληψη της υποτίμησης του μαγνητικού πεδίου, λαμβάνοντας τιμές μόνο από ένα σημείο παρατήρησης (verification distance). Πιο αναλυτικά, το μοντέλο περιλάμβανε μια μεταβολή του νόμου ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου μετά από μια καθορισμένη απόσταση από r^{-2} σε r^{-3} .

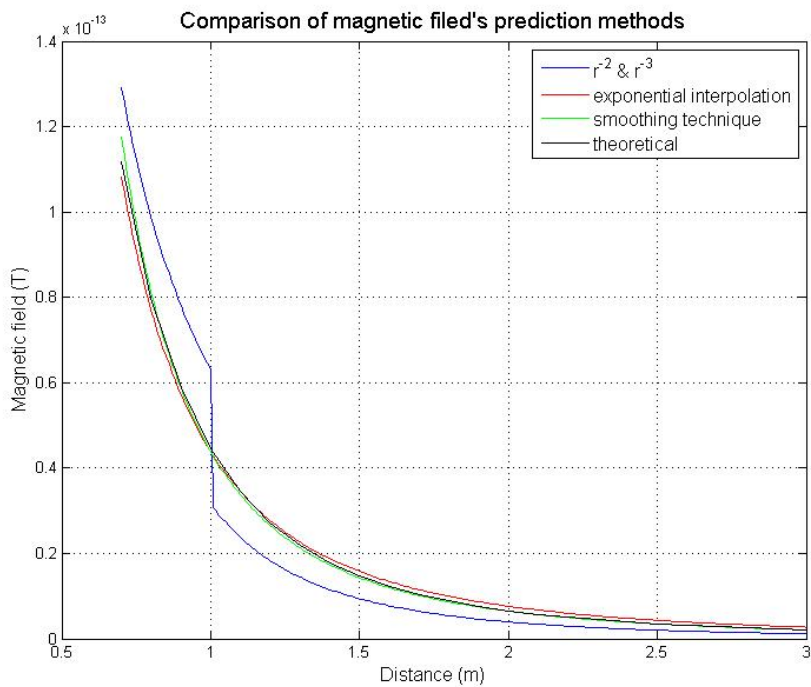
Αυτή η κρίσιμη απόσταση μετάβασης από τον ένα νόμο στον άλλο ονομάζεται break distance [19]. Προκειμένου να συγκρίνουμε τις επιμέρους μεθόδους με την τεχνική που μόλις αναφέρθηκε, επιλέγονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου μιας τυχαία προσημείωσης. Οι διαστάσεις του δοκιμαστικού εξοπλισμού παραμένουν ίδιες και η θέση των μαγνητόμετρων επιλέγονται στα 0.5m (απόσταση 1 περίπου φορά της μέγιστης διάστασης του κουτιού) και spacing 60cm (απόσταση 1.5 φορές της μέγιστης διάστασης του κουτιού). Άρα η θέση του δεύτερου μαγνητόμετρου είναι στα 1.10m. Το πρώτο μαγνητόμετρο θεωρείται το σημείο παρατήρησης (verification point) και επιλέγεται ως break distance το 1m (απόσταση 2.5 φορές της μέγιστης διάστασης του κουτιού). Πρακτικά μέχρι το 1m γίνεται σύγκριση των με το νόμο r^{-2} και πέρα από το 1m με το νόμο r^{-3} . Ακολουθούν τα αποτελέσματα :



Εικόνα 4.19: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, μέχρι break point



Εικόνα 4.20: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, από break point έως τα 3m



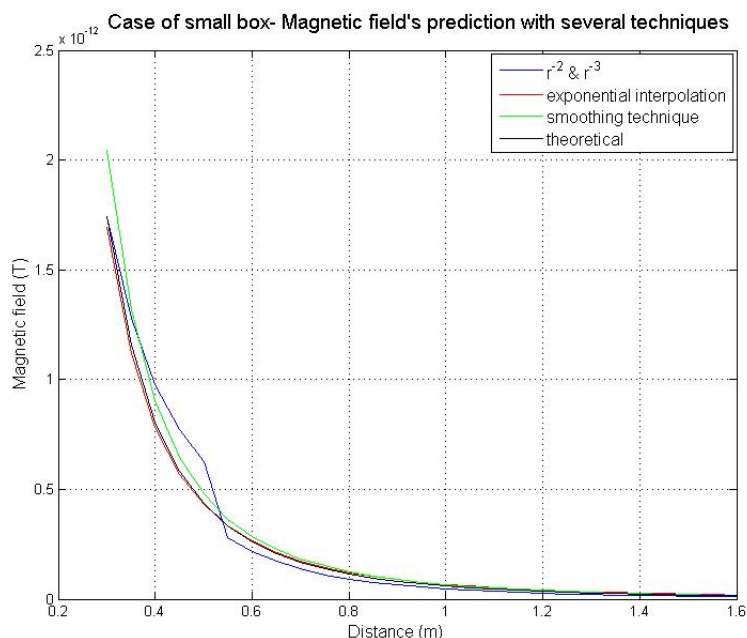
Εικόνα 4.21: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές

Όπως φαίνεται από τις εικόνες 4.19 έως 4.21 με την τεχνική της μετάβασης του νόμου ελάττωσης από τον r^{-2} στον r^{-3} υπάρχει υπερεκτίμηση του μαγνητικού πεδίου μέχρι το break distance και υποεκτίμηση από το break distance έως τα 3m. Ωστόσο η εκθετική παρεμβολή και η μέθοδος της εξομάλυνσης πετυχαίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα πρόβλεψης σε όλο το εύρος της εξεταζόμενης απόστασης.

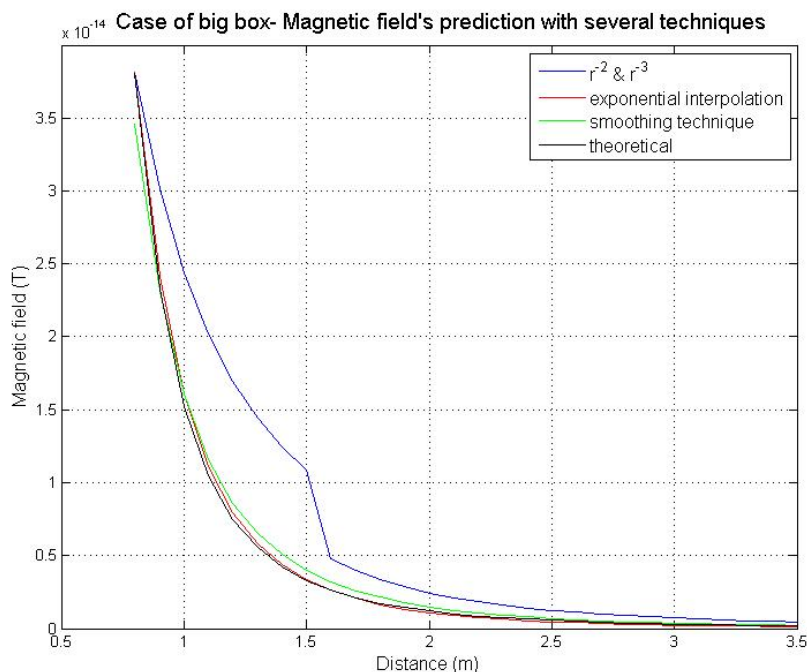
4.5 Αλλαγή διαστάσεων δοκιμαστικού εξοπλισμού

4.5.1 Επίδραση διαστάσεων δοκιμαστικού εξοπλισμού στην πρόβλεψη του πεδίου

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους του κουτιού στη μέθοδο πρόβλεψης, πραγματοποιείται η ίδια σύγκριση όπως παραπάνω για διαφορετικού κάθε φορά όγκου δοκιμαστικού εξοπλισμού. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται ένα μικρότερο κουτί διαστάσεων $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$ και έπειτα ένα μεγαλύτερο διαστάσεων $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$. Για κάθε περίπτωση το πρώτο σημείο παρατήρησης (θέση πρώτου μαγνητόμετρου) βρίσκεται σε απόσταση περίπου 1 φορά μεγαλύτερη της μέγιστης διάστασης του κουτιού και το spacing μεταξύ των δύο μαγνητόμετρων σε απόσταση 1.5 φορές της μέγιστης διάστασης του κουτιού. Ακολουθούν τα αποτελέσματα :



Εικόνα 4.22: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση μικρού εξοπλισμού



Εικόνα 4.23: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση μεγάλου εξοπλισμού

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η τεχνική μετάβασης από το νόμο r^{-2} στον r^{-3} αποκλίνει σημαντικά ανεξάρτητα του μεγέθους του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του κουτιού τόσο μεγαλύτερο σχετικό σφάλμα υπάρχει. Αυτό είναι λογικό αφού όσο μικραίνει ο δοκιμαστικός εξοπλισμός τόσο καλύτερα προσεγγίζεται το μοντέλο του κλασικού διπόλου καθώς όλοι οι βρόχοι αντιμετωπίζονται σαν ένας σε μια μακρινή απόσταση. Παρόλα αυτά οι δύο προτεινόμενες τεχνικές πετυχαίνουν σε κάθε περίπτωση μικρότερα σφάλματα από τις θεωρητικές τιμές του μαγνητικού πεδίου.

4.6 Πραγματικές μετρήσεις

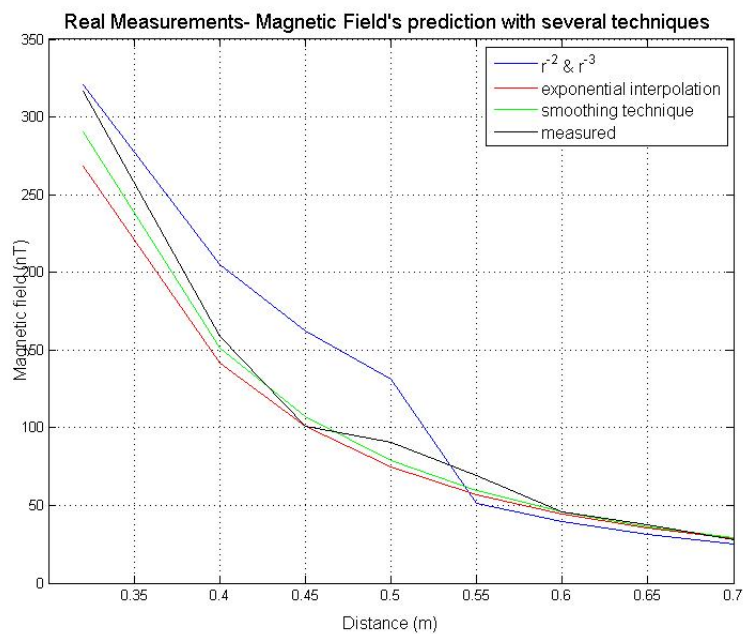
4.6.1 Επαλήθευση μεθόδων με χρήση κινητού ως δοκιμαστικό εξοπλισμό

Για την πρακτική επαλήθευση των ήδη προτεινόμενων μεθόδων, πραγματοποιήθηκαν πραγματικές μετρήσεις, θεωρώντας ένα κινητό τηλέφωνο ως δοκιμαστικό εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κοντινού πεδίου ενός κινητού τηλεφώνου $15 \times 8 \times 1 \text{ cm}^3$. Σημειώνεται πως για την ανάγκη του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο μαγνητόμετρο. Η πειραματική διάταξη φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4.24: Πειραματική διάταξη μετρήσεων μαγνητικού πεδίου ενός κινητού ως δοκιμαστικό εξοπλισμό

Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα σύγκρισης όλων των μεθόδων. Πειραματικά επιβεβαιώνονται όλα τα θεωρητικά αποτελέσματα που είχαν προκύψει μέχρι τώρα.



Εικόνα 4.25: Πρόβλεψη μαγνητικού πεδίου με σταθερές θέσεις μαγνητόμετρων χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές για την περίπτωση κινητού τηλεφώνου

5.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 50 ΡΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΒΡΟΧΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑ COMMON-MODE ΡΕΥΜΑΤΩΝ

5.1 Επίδραση των common-mode ρευμάτων στην πρόβλεψη του πεδίου

5.1.1 Περιγραφή προβλήματος και επεξήγηση του common-mode ρεύματος

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται το ίδιο σενάριο δοκιμαστικού εξοπλισμού όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, βασικός στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η κατανόηση των common-mode ρευμάτων καθώς και η επίδραση τους στην ικανότητα ακριβής πρόβλεψης του μαγνητικού πεδίου ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού. Στο 2^ο κεφάλαιο εξετάστηκε η παρουσία των common-mode ρευμάτων σε διάφορες γεωμετρίες (βλ. 2.3.1) και εξάχθηκαν διάφορα σημαντικά αποτελέσματα. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρούμε όπως και προηγουμένως ένα κουτί ως δοκιμαστικό εξοπλισμό με διαστάσεις $0.4 \times 0.4 \times 0.4 m^3$ αποτελούμενο από 50 ρευματικούς βρόχους τετραγωνικής διατομής. Οι ρευματικοί βρόχοι είναι τυχαία τοποθετημένοι κάθε φορά και συνολικά εκτελούνται 5 ανεξάρτητες προσομοιώσεις. Στη συνέχεια με βάση τις λαμβανόμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου προσδιορίζεται κάθε φορά ο νόμος ελάττωσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την επέκταση του πεδίου στα 3m αλλά και για πρόβλεψη ενδιάμεσα των μαγνητομέτρων στα 1.1m. Λόγω της ύπαρξης των common-mode ρευμάτων, ο νόμος ελάττωσης αποκλίνει κατά πολύ από τον νόμο του κλασικού διπόλου r^{-3} . Για το λόγο αυτό η μέθοδος της εκθετικής εξομάλυνσης δε βρίσκει πρακτική εφαρμογή σε αυτή την περίπτωση. Επομένως θα χρησιμοποιηθεί μόνο η μέθοδος της απλής εκθετικής παρεμβολής για την εξαγωγή του νόμου ελάττωσης σε κάθε περίπτωση. Τέλος επιλέγεται ως ένταση του common-mode ρεύματος το 10% του κανονικού ρεύματος, δηλαδή:

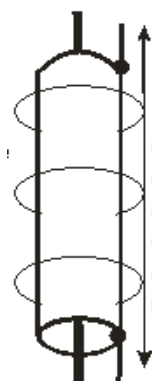
$$I_{common} = 10\% \cdot I_{differential} \quad (6.1.1)$$

Συνοπτικά οι παράμετροι του προβλήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι	
Εμβαδόν Βρόχου	πcm^2
Ρεύμα Βρόχου	1 mA
Ακούσιο Ρεύμα (common-mode)	0,1mA
Θέση Βρόχου	Τυχαία
Προσανατολισμός Βρόχου	Στον z-άξονα
Αριθμός Βρόχων	50
Πλάτος Κουτιού	0.40 m
Αριθμός ανεξάρτητων δοκιμών	5

Πίνακας 5.1: Συνοπτικοί παράμετροι προβλήματος

Τα common-mode ρεύματα δημιουργούνται επαγωγικά από άλλες πηγές και ευθύνονται για την ακτινοβολία που δημιουργείται. Συγκεκριμένα τα common-mode ρεύματα έχουν αντίθετη κατεύθυνση από τα κανονικά ρεύματα και δεν επιστρέφουν στο υπό εξέταση καλώδιο. Όταν τα ρεύματα ρέουν σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση τότε τα αντίθετα σε αυτά ρεύματα ονομάζονται common-mode ρεύματα(βλ. εικόνα 2.3). Τα common-mode ρεύματα προωθούν την εξωτερική σύζευξη (external coupling) και ευθύνονται για την εκπεμπόμενη ακτινοβολία [30]. Για παράδειγμα, σε ένα ομοαξονικό καλώδιο τα common-mode ρεύματα δεν ρέουν στο εσωτερικό του καλωδίου αλλά μόνο στο εξωτερικό αυτού, ενώ τα differential-mode ρεύματα ρέουν στο εσωτερικό αυτού(όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα):



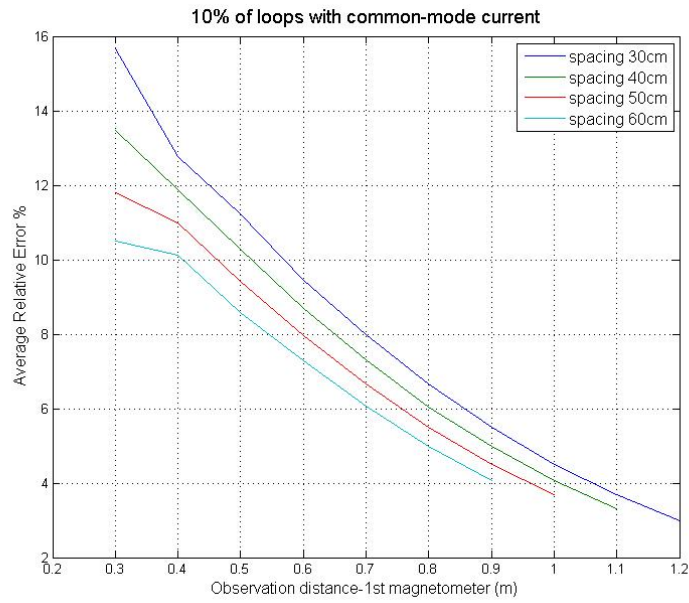
Εικόνα 5.1: Ομοαξονικό καλώδιο με differential και common mode ρεύμα

Σε πειραματικό επίπεδο, όπως ήδη αναφέρθηκε πραγματοποιούνται 5 ανεξάρτητες προσομοιώσεις με διαφορετικό κάθε φορά ποσοστό μαγνητικών βρόχων που διαρρέονται με common-mode ρεύμα. Πιο αναλυτικά, εξετάζονται οι περιπτώσεις με 10%,20% και τέλος 30% των βρόχων με common-mode ρεύμα. Για την πρόβλεψη σε μακρινή απόσταση από τον δοκιμαστικό εξοπλισμό επιλέγονται τα 3m (από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού) και μεταβλητό spacing 30,40,50 και 60cm. Για ενδιάμεση πρόβλεψη, ανάμεσα στα δύο μαγνητόμετρα επιλέγεται η απόσταση 1,1m (από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού) και σταθερό spacing 60cm. Τέλος, για μια πιο εμπειριστατωμένη εικόνα σχετικά με την επίδραση του ποσοστού των ρευματικών βρόχων με common-mode ρεύμα στην ικανότητα ακριβής πρόβλεψης, εξετάζεται μια συγκεκριμένη γεωμετρία θέσεων των μαγνητικών βρόχων με μεταβλητές το ποσοστό των βρόχων με common-mode και το spacing μεταξύ των δύο μαγνητομέτρων. Κριτήριο απόφασης παραμένει και πάλι το σχετικό σφάλμα (και μέσο σχετικό σφάλμα, για συγκεντρωτικές εικόνες) ανάμεσα στην πραγματική και την προβλεπόμενη τιμή.

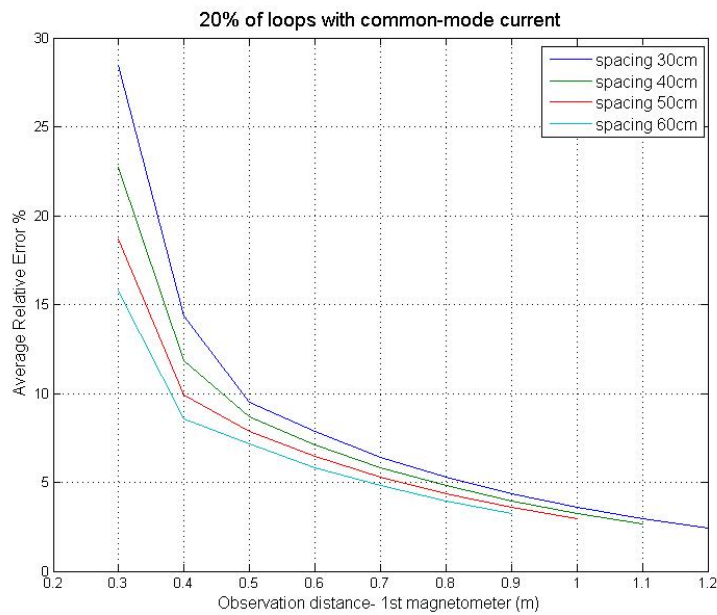
5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

5.2.1 Αποτελέσματα για μακρινή πρόβλεψη

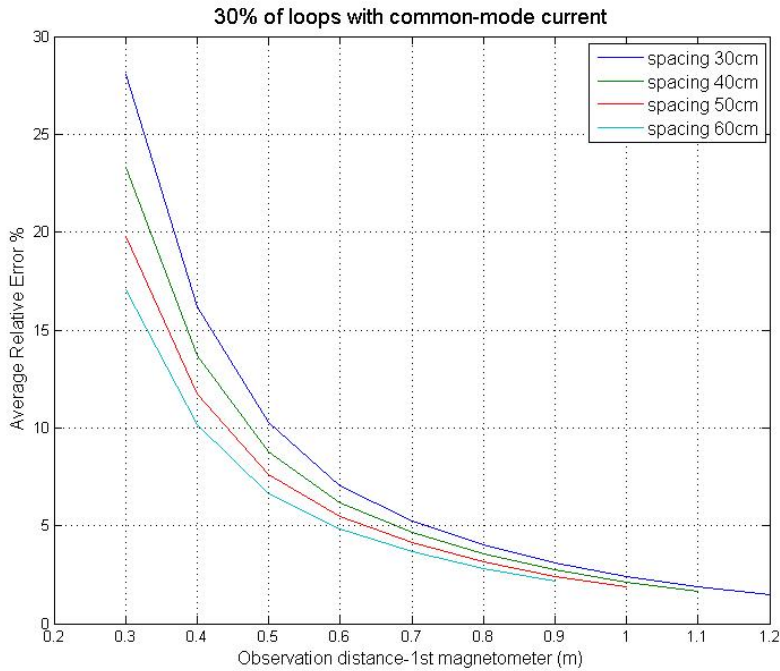
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μακρινή πρόβλεψη πραγματοποιείται στα 3m από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού και για απόσταση μαγνητομέτρων (spacing) 30,40,50 και 60cm. Πραγματοποιούνται 5 προσομοιώσεις και λαμβάνονται τα εξής συγκεντρωτικά αποτελέσματα για ποσοστό ρευματικών βρόχων με common-mode ρεύμα 10,20,30% αντίστοιχα:



Εικόνα 5.2: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 10% των βρόχων με common-mode ρεύμα



Εικόνα 5.3: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 20% των βρόχων με common-mode ρεύμα

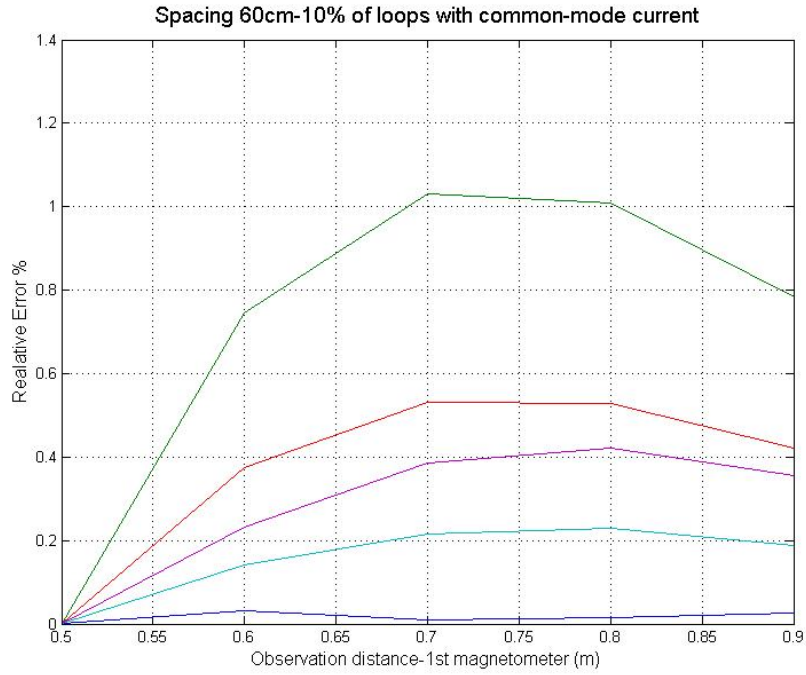


Εικόνα 5.4: Μέσο σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για όλες τις περιπτώσεις spacing και 30% των βρόχων με common-mode ρεύμα

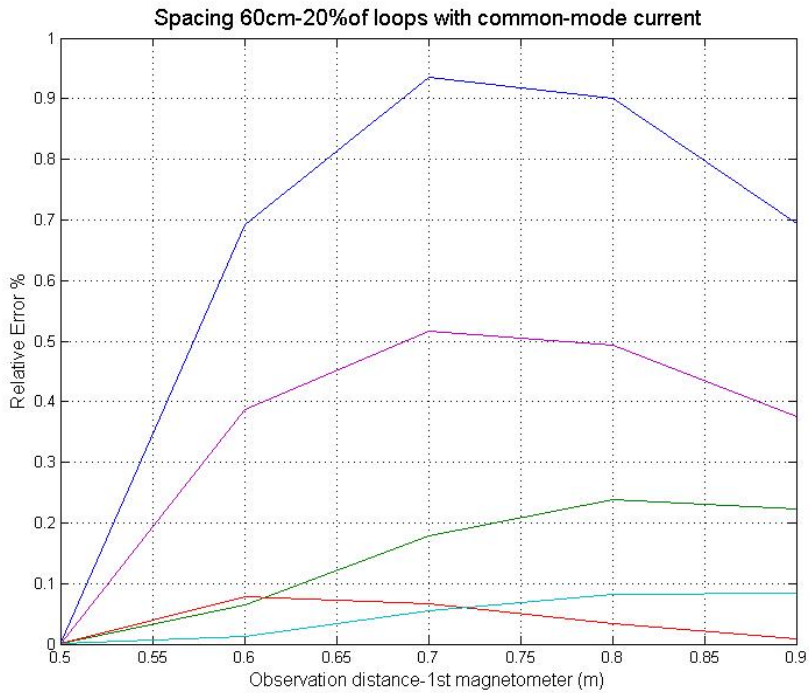
Από τις εικόνες 5.2 έως 5.4 φαίνεται πως όσο αυξάνει το spacing μεταξύ των μαγνητομέτρων τόσο το μέσο απόλυτο σφάλμα γίνεται μικρότερο. Όσον αφορά το ποσοστό των βρόχων με common-mode, συμπεραίνουμε το αναμενόμενο αποτέλεσμα, δηλαδή ότι η αύξηση των βρόχων που διαρρέονται από common-mode ρεύμα οδηγεί σε χειρότερη πρόβλεψη. Επιπροσθέτως, το μέσο απόλυτο σφάλμα καθώς αυξάνει το ποσοστό αυτό, ξεκινά από μεγαλύτερες τιμές και μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε. Σε κάθε περίπτωση, όταν απομακρυνθεί η θέση του μαγνητόμετρου τότε το σφάλμα είναι αρκετά μικρό (<10%), ανεξάρτητα από το ποσοστό των βρόχων με common-mode ρεύμα.

5.2.2. Αποτελέσματα για ενδιάμεση πρόβλεψη

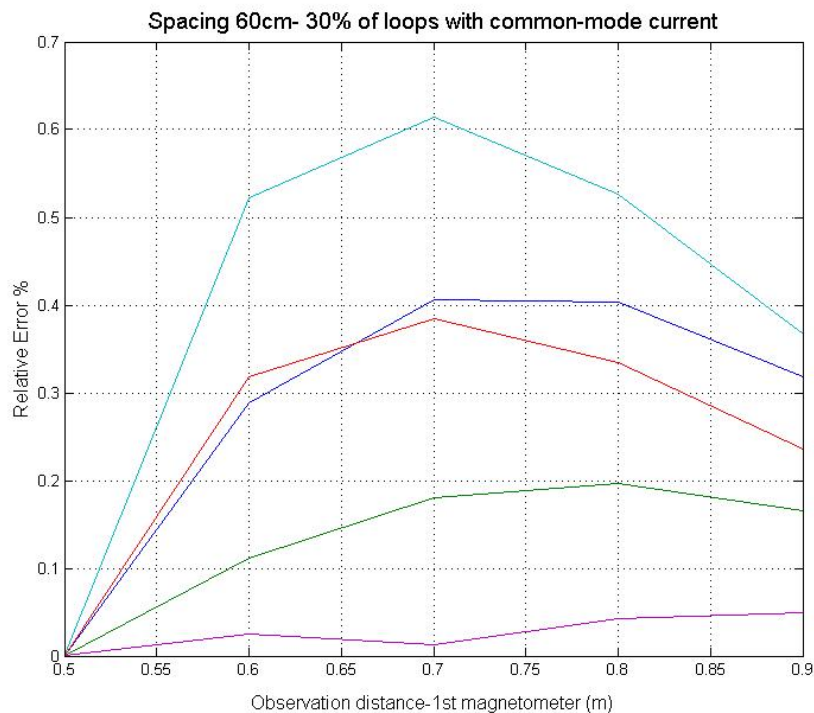
Ακολουθούν παρόμοια διαγράμματα για πρόβλεψη στα 1.1m από το κέντρο του δοκιμαστικού εξοπλισμού:



Εικόνα 5.5: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 10% των βρόχων με common-mode ρεύμα



Εικόνα 5.6: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 20% των βρόχων με common-mode ρεύμα

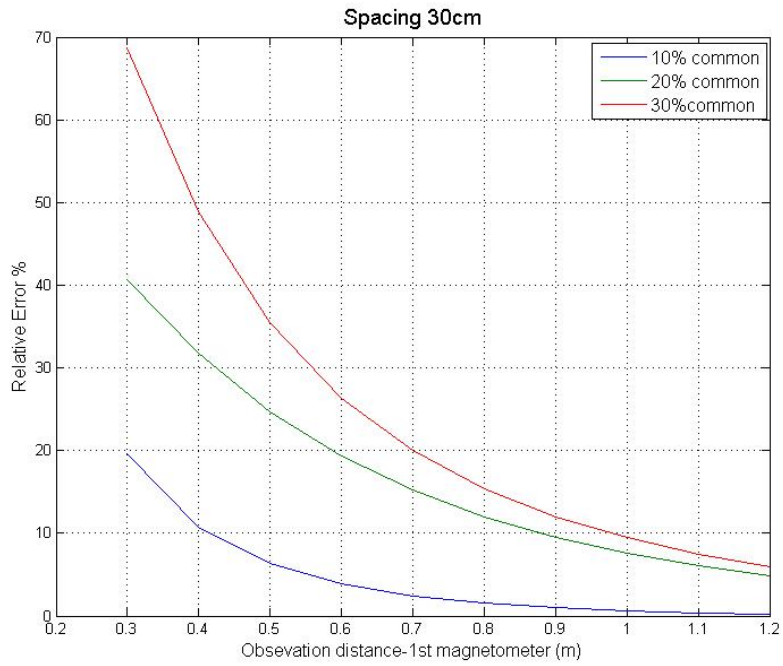


Εικόνα 5.7: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για σταθερό spacing 60cm για ενδιάμεση πρόβλεψη και 30% των βρόχων με common-mode ρεύμα

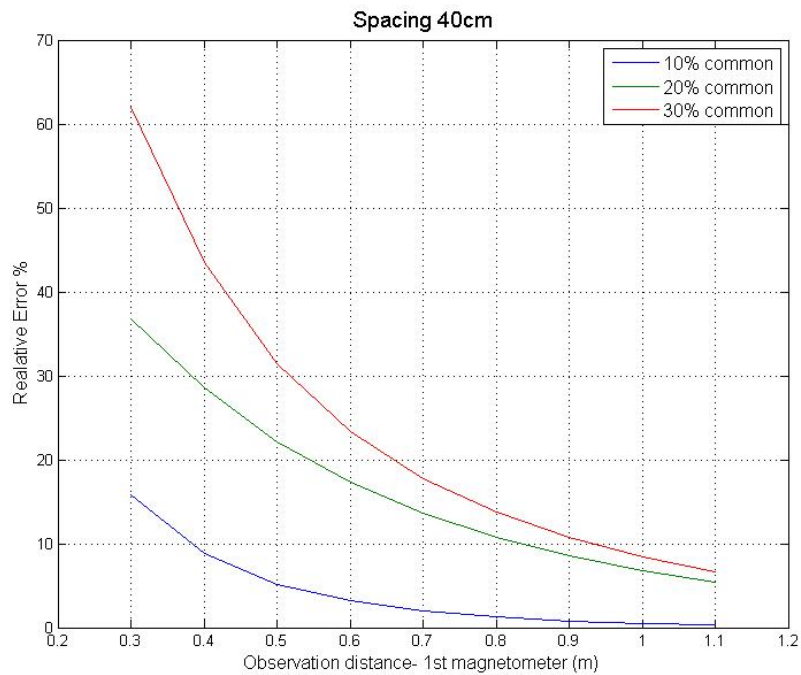
Από τις εικόνες 5.5 έως 5.7 παρατηρείται πως η ενδιάμεση πρόβλεψη δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με τα σφάλματα να κυμαίνονται σε χαμηλά αποτελέσματα, ανεξάρτητα του ποσοστού των βρόχων με common-mode ρεύμα.

5.2.3 Αποτελέσματα για συγκεκριμένη θέση βρόχων για μακρινή πρόβλεψη

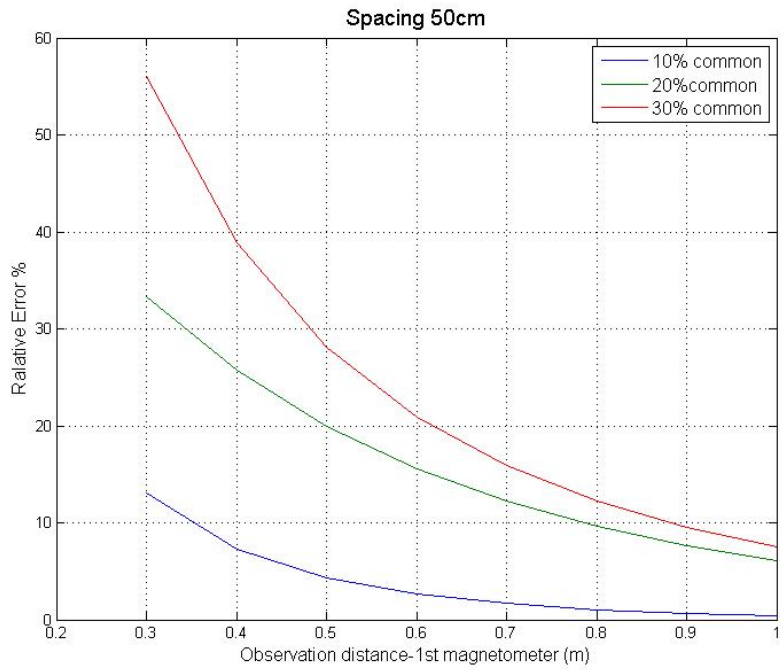
Σε αυτή την ενότητα για μια συγκεκριμένη γεωμετρία θέσεων των βρόχων, μεταβάλλουμε το ποσοστό των βρόχων με common-mode ρεύμα και την απόσταση μεταξύ των δύο μαγνητομέτρων. Προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:



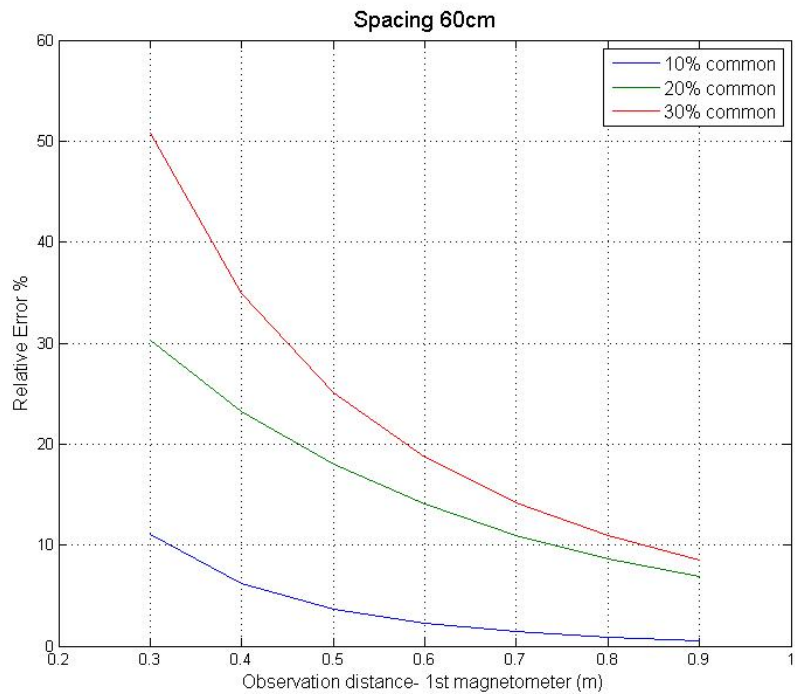
Εικόνα 5.8: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για spacing 30cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα



Εικόνα 5.9: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για spacing 40cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα



Εικόνα 5.10: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για spacing 50cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα



Εικόνα 5.11: Σχετικό σφάλμα μαγνητικού πεδίου σε σχέση με θέση του 1^{ου} μαγνητόμετρου για spacing 60cm για μακρινή πρόβλεψη και μεταβαλλόμενο αριθμό βρόχων με common-mode ρεύμα

Από τις εικόνες 5.8 έως 5.11 είναι φανερό το κοινό μοτίβο που ακολουθείται σχετικά με το ποσοστό των βρόχων που διαρρέονται από common-mode ρεύμα. Συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση spacing, όταν αυξάνει το ποσοστό των βρόχων με common-mode ρεύμα χειροτερεύει το σχετικό σφάλμα πρόβλεψης. Αυτό είναι λογικό, καθώς με υψηλό ποσοστό common-mode ρευματικών βρόχων ο νόμος ελάττωσης καταστρατηγείται και αποκλίνει κατά πολύ από τον r^{-3} . Ο παράγοντας spacing παρουσιάζει και σε αυτή την περίπτωση παρόμοια συμπεριφορά καθώς όσο αυξάνεται τόσο καλύτερη πρόβλεψη πετυχαίνεται.

6.ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

6.1 Συμπεράσματα-Μελλοντική έρευνα

6.1.1 Βασικά συμπεράσματα προσομοιώσεων

Από τα τρία βασικά κεφάλαια (3^ο,4^ο,5^ο) των προσομοιώσεων προκύπτουν ορισμένα βασικά συμπεράσματα.

Αρχικά, στο 3^ο κεφάλαιο εξετάστηκαν δύο γεωμετρίες: ένας τετραγωνικός βρόχος και 50 τετραγωνικοί βρόχοι μέσα σε έναν δοκιμαστικό εξοπλισμό καθορισμένων διαστάσεων. Από τις προσομοιώσεις σχετικά με την επίδραση που έχει το μέγεθος του τετραγωνικού βρόχου στην ικανότητα πρόβλεψης, προέκυψε το συμπέρασμα πως όσο αυξάνει το μέγεθος του βρόχου τόσο μεγαλύτερη αβεβαιότητα εισάγεται στην πρόβλεψη της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Με δεδομένο πως τα σημεία επέκτασης δεν αλλάζουν αλλά παραμένουν ίδια και συγχρόνως το μέγεθος του βρόχου αυξάνει, είναι λογική η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές καθώς όσο πιο κοντινές είναι οι μετρήσεις τόσο μεγαλύτερη απόκλιση υπάρχει από τον νόμο ελάττωσης r^{-3} . Για την περίπτωση των 50 τετραγωνικών βρόχων, η προσπάθεια εντοπισμού ενός ενιαίου κανόνα (global-law) ελάττωσης δεν είναι δυνατή και αυτό διότι η διαφορετική θέση των τετραγωνικών βρόχων κάθε φορά επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον νόμο ελάττωσης που προκύπτει για τις τρεις περιοχές. Για το λόγο αυτό αναλύθηκε η τεχνική των δύο μαγνητομέτρων όπου γίνεται κατανοητό πως δεν είναι αναγκαίος ο εντοπισμός ενός γενικού κανόνα αλλά με βάση τον εκάστοτε νόμο ελάττωσης να είναι δυνατή μια ακριβής επέκταση του πεδίου.

Στο 4^ο κεφάλαιο που αποτελεί και τον πυρήνα της παρούσας εργασίας, εισάγεται η έννοια του μαγνητομέτρου ως βασικού εργαλείου μέτρησης του μαγνητικού πεδίου καθώς και η τεχνική των δύο μαγνητομέτρων. Πιο αναλυτικά, ο δοκιμαστικός εξοπλισμός αποτελείται από πολλούς μαγνητικούς βρόχους των οποίων η θέση δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Για την πρόβλεψη της μαγνητικής συμπεριφοράς του δοκιμαστικού εξοπλισμού αναπτύχθηκαν δύο νέες τεχνικές. Ο νόμος ελάττωσης του μαγνητικού πεδίου υπολογίστηκε με βάση τις τιμές που μετρήθηκαν από τα δύο σημεία παρατήρησης (μαγνητόμετρα). Η πρώτη τεχνική που εφαρμόστηκε ήταν η εκθετική παρεμβολή των τιμών που λαμβάνονται και η δεύτερη ήταν η τεχνική της εξομάλυνσης που έχει ως σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης του πεδίου. Και οι δύο τεχνικές επιτρέπουν τον προσδιορισμό του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις (σημεία επέκτασης). Το κριτήριο που εφαρμόστηκε στη συνολική διαδικασία πρόβλεψης ήταν το σχετικό σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης και της θεωρητικής τιμής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν πως η απόσταση παρατήρησης καθώς και η απόσταση μεταξύ των δύο μαγνητομέτρων παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχετικό σφάλμα της πρόβλεψης. Επομένως, οι προαναφερθέντες παράμετροι μπορούν να ελεγχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σχετικό σφάλμα των μετρήσεων. Επιπροσθέτως, τα μαγνητόμετρα μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στον δοκιμαστικό εξοπλισμό, πετυχαίνοντας έτσι υψηλό λόγω σήματος προς θόρυβο. Τέλος, είναι φανερό πως αυτοί οι παράμετροι είναι ανεξάρτητοι του μεγέθους και σχήματος του δοκιμαστικού εξοπλισμού.

Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο των προσομοιώσεων εξετάζεται η περίπτωση ύπαρξης και common-mode ρευμάτων. Συγκεκριμένα, όλα οι παράμετροι του προβλήματος του 4^{ου} κεφαλαίου παραμένουν ίδιες με τη μόνη διαφορά πως σε αυτή την περίπτωση κάποιο ποσοστό των βρόχων κάθε φορά διαρρέεται και από common-mode ρεύμα. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει πως όσο αυξάνει ο αριθμός των βρόχων που διαρρέονται από common-mode ρεύμα, τόσο περισσότερο αποκλίνει ο νόμος από τον r^{-3} με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη απόκλιση της πραγματικής και της προβλεπόμενης τιμής. Η υψηλή τιμή του σχετικού σφάλματος δυσχεραίνει κατά πολύ την ικανότητα για ακριβή πρόβλεψη.

6.1.2 Μελλοντική εργασία

Μελλοντική ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί για διάφορες άλλες παραμέτρους που μπορούν περαιτέρω να επηρεάζουν τη μαγνητική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα παράμετροι που αφορούν χωρική και χρονική συμπεριφορά του εφαρμοζόμενου ρεύματος, μπορούν να ενσωματωθούν στην ανάλυση ώστε να ενισχυθεί η ικανότητα σωστής πρόβλεψης. Οι παράμετροι αυτοί μπορεί να αφορούν περιοδικά εφαρμοζόμενα ρεύματα, διαφορετικές γεωμετρίες ρευματικών βρόχων (όχι μόνο τετραγωνικοί βρόχοι), διαφορετικός προσανατολισμός βρόχων, διαφορετικά σημεία παρατήρησης. Ακόμα, η μοντελοποίηση του γενικού προβλήματος έγινε με χρήση των νόμων Biot-Savart και διανυσματικού δυναμικού. Μελλοντική προσέγγιση του προβλήματος μπορεί να γίνει θεωρώντας τους ρευματικούς βρόχους σαν ισοδύναμα μαγνητικά και ηλεκτρικά δίπολα. Τέλος, εναλλακτική συσκευή μέτρησης (εκτός των μαγνητομέτρων) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το gradiometer (συσκευή που μετρά το grad του πεδίου). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η βελτίωση της ακρίβειας επέκτασης του πεδίου, αυξάνοντας τον αριθμό των σημείων μέτρησης και επομένως το πλήθος των πληροφοριών που μπορούν να συλλεχθούν για τη μοντελοποίηση του προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1
2. <http://sci.esa.int/bepicolombo/>
3. Aguilo Diaz. Marc, “*Magnetic Diagnostics Algorithms for Lisa Pathfinder: System Identification and Data Analysis*”, Doctoral Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2011.
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave
5. https://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity
6. Μαρία Σ. Μαστοροπούλου, «Διπλωματική Εργασία: *Μελέτη αβεβαιότητας μετρήσεων και μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου με εφαρμογή επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές*», Ιανουάριος 2014.
7. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/maxeq.html>
8. Jackson, J. D.: *Classical Electrodynamics*, New York, John Wiley and Sons, 1999
9. Vinay Bhatt, R. S. Rautela, Priyanka Sharma, D. C. Tiwari, Subhash Khushu, “*Design & Development of Helmholtz Coil for Hyperpolarized MRI*”, Institute of Nuclear Medicine & Allied Sciences (DRDO), Delhi, India
10. Mehlem, K., “*Multiple magnetic dipole modeling and field prediction of satellites*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 14, No 5, 1064-1071, Sep. 1978
11. Knoepfel, H. E., “*Magnetic Fields: A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use*”, New York: Wiley, 2000
12. Mikki, S. M. and Y. M. M. Antar, “*Near-field analysis of electromagnetic interactions in antenna arrays through equivalent dipole models*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 60, No 3, 1381-1389, Mar. 2012
13. Ciamak, A. and H. Juergen, “*Real-time ECG emulation: A multiple dipole model forelectrocardiography simulation*”, Studies in Health Technology and Informatics, 142:7_9, PMID: 19377101, 2009
14. Pan, S., J. Kim, S. Kim, J. Park, H. Oh, and J. Fan, “*An equivalent three-dipole model for IC radiated emissions based on TEM cell measurements*”, 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 652-656, Jul. 25-30, 2010.
15. Kennedy, J. and R. Eberhart, “*Particle swarm optimization*”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, 1942-1948, Nov./Dec. 1995.
16. Song, H., J. Chen D. Zhou, D. Hou, and J. Lin, “*An equivalent model of magnetic dipole for the slot coupling of shielding cavity*”, 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, ISAPE 2008, 970-973, Nov. 2-5, 2008

17. Clayton R. Paul, “*Introduction to Electromagnetic Compatibility*”, John Wiley and Sons, 1992.
18. Jung, A. and F. Marliani, “*Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft*”, 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 834-839, Aug. 14-19, 2011
19. Pudney, M.A., Carr, C. M., Schwartz, S. J. and Howarth, S. I., “*Near-magnetic-field scaling for verification of spacecraft equipment*”, Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems, 2. 249-255, 2013
20. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetometer>
21. M.H Acuna, “*Space-based magnetometers*”, Rev. Sci. Instrum., vol. 73,3717-3736, Nov. 2002
22. http://www.physics4u.gr/faq/van_allen.html
23. http://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/
24. Ness et al.(1971)
25. Nara, T., S. Suzuki, and S. Ando, “*A closed-form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, 3291-3293, Oct. 2006
26. Kapsalis, N. C., Kakarakis, S.-D. J. and Capsalis, C. N., “*Prediction of multiple magnetic dipole model parameters from near field measurements employing stochastic algorithms*”, Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol.34, 111-112,2012
27. Kakarakis, S-D. J., Kapsalis, N. C. and Capsalis, C. N., “*A Semianalytical Heuristic Approach for Prediction of Eut’s Multiple Dipole Model by Reducing the Number of Heuristics*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 57, No.1, pp.87-92, Feb. 2015
28. Spantideas, S. T., Kapsalis, N. C., Kakarakis, S.-D. J. and Capsalis, C. N., “*A Method of Predicting Composite Magnetic Sources Employing Particle Swarm Optimization*”, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 39, 161-170,2014
29. Spantideas, S. T., Kakarakis, S-D. J., Kapsalis, N. C. and Capsalis, C. N., “*Theoretical Methods for Studying Distance and Frequency Scaling for AC Magnetic Fields in Satellite Missions*”, IEEE Transactions on Magnetics, accepted for publication.
30. http://www.w8ji.com/common_mode_current.htm
31. Zacharias, P. P., Chatzineofytou, E. G., Spantideas, S. T., and Capsalis, C. N.: “*Distance Scaling Method for Accurate Prediction of Slowly Varying Magnetic Fields in Satellite Missions*”, Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss., doi:10.5194/gi-2015-47, in review, 2016.