



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη αβεβαιότητας μετρήσεων και μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου με εφαρμογή επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Σ. Μαστοροπούλου

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη αβεβαιότητας μετρήσεων και μοντελοποίησης μαγνητικού πεδίου με εφαρμογή επίτευξης μαγνητικής καθαρότητας σε διαστημικές αποστολές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Σ. Μαστοροπούλου

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Ιανουάριο 2014.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....

Μαρία Σ. Μαστοροπούλου

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

Copyright ©Μαρία Μαστοροπούλου, 2014.

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και των παρεμβολών σε συστήματα μέτρησης μαγνητικού πεδίου στα πλαίσια των διαστημικών αποστολών. Κεντρικός άξονας είναι η διερεύνηση του εσωτερικού χώρου του διαστημικού οχήματος και ο εντοπισμός όλων εκείνων των υποσυστημάτων και τμημάτων του εξοπλισμού τα οποία χρήζουν ιδιαίτερη προσοχή εξαιτίας των διαταραχών που προκαλούν στη μαγνητική καθαρότητα στο περιβάλλον λειτουργίας τους.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης (*Multiple Magnetic Dipole Model, MDM*) της εκάστοτε συσκευής που έχει τεθεί υπό έλεγχο, με τη χρήση της στοχαστικής μεθόδου βελτιστοποίησης των *Γενετικών Αλγορίθμων*, που στοχεύει στη εύρεση των παραμέτρων του βέλτιστου μοντέλου διπόλων (θέσεις και μαγνητικές ροπές διπόλων), το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου θα προσεγγίζει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το πεδίο που παράγει στη πραγματικότητα η υπό εξέταση συσκευή. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί η λήψη μετρήσεων μαγνητικού πεδίου γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό υπό πραγματικές συνθήκες στις ειδικά διαμορφωμένες *Mobile Coil Facilities (MCF)* εγκαταστάσεις. Ωστόσο, λόγω αδυναμίας μέτρησης πραγματικών τιμών πεδίου δημιουργήθηκαν μέσω αλγορίθμων, σετ μετρήσεων που αντιστοιχούν στις τιμές αυτές.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετάται η αβεβαιότητα που εισάγεται στο παραγόμενο βέλτιστο μοντέλο εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης και ευθυγράμμισης της υπό εξέταση συσκευής πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα (*EUT position and alignment uncertainty*). Επειδή, όπως αναφέρθηκε δεν ήταν εφικτό να ληφθούν πραγματικές μετρήσεις γύρω από τη δοκιμαστική συσκευή σε *MCF* εγκαταστάσεις, στα πλαίσια ανάλυσης της αβεβαιότητας, κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία ενός νέου σετ μετρήσεων μαγνητικού πεδίου, με τη χρήση κατάλληλου αλγορίθμου, που αντιστοιχεί σε μετρήσεις πεδίου οι οποίες θα λαμβάνονταν στη περίπτωση που το δοκίμιο δεν είχε τοποθετηθεί και ευθυγραμμιστεί σωστά πάνω στη πλάκα.

Στο τέλος, παρουσιάζεται μια στατιστική ανάλυση των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων των μοντέλων καθώς και των τιμών του μαγνητικού πεδίου που υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης (*MDM*), η οποία συνοδεύεται με τα αντίστοιχα ιστογράμματα.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Μαγνητική καθαρότητα, Γενετικοί αλγόριθμοι, Κανονική κατανομή, Αβεβαιότητα

ABSTRACT

The purpose of this engineering thesis is the study of the electromagnetic compatibility and interference in magnetic field measurement systems within space missions. The main theme is the *MDM* modeling of all those subsystems and parts of equipment that need special attention because they cause disorders to the magnetic cleanliness in their operating environment.

The first part of the thesis describes the *MDM* modelling process of the device, which has been under testing, by applying the stochastic optimization method of Genetic algorithms. The method of Genetic algorithms aims to find the optimal parameters of the model *MDM* (dipoles position and magnetic moments) in order to have the biggest probability to predict the magnetic field of the specific Equipment Under Test (EUT). Magnetic field measurements around the test object in Mobile Coil Facilities (MCF) are necessary for the solution of the optimization problem. However, since it was impossible to take real magnetic field measurements, sets of measurements created through algorithms and these values of the magnetic fields were used as input by the method of Genetic algorithms.

The second part of the thesis is the study of the incorrect positioning and alignment of the EUT, which influences magnetic field measurements and contributes to multiple model dipole uncertainty (EUT position and alignment uncertainty). As mentioned before, it was not possible to take actual measurements around the test device in Mobile Coil Facilities (MCF), so it was necessary for the estimation of the *MDM* modelling procedure uncertainty, to create a new set of magnetic field measurements, using a suitable algorithm. The values of the new set correspond to field measurements which we would take if the test device was not fitted and aligned correctly on the plate of MCF facilities.

Finally, a statistical analysis of the coordinates' values, we had obtained from the positions of the dipoles composing the model, is presented. Additionally, a statistical analysis of the values of magnetic field that had been estimated during the modelling process is presented, combined with relative histograms.

Key words: Electromagnetic compatibility (EMC), Magnetic cleanliness, Genetic algorithms, Normal distribution, Magnetic Dipole Model(-ling) (*MDM*), Uncertainty, Mobile Coil Facilities (MCF)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω πρωτίστως τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Καψάλη που μου εμπιστεύτηκε την ανάθεση αυτής της εργασίας και μου παρείχε τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Σαράντη Κακαράκη και κ. Νικόλαο Καψάλη για τη καθοδήγηση και τη συνεχή τους υποστήριξη που συνέβαλαν καταλυτικά στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να απευθύνω ευχαριστίες στους φίλους μου για τη βοήθεια και τη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την διαρκή ηθική και υλική στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	4
<u>ABSTRACT</u>	5
<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	7
<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</u>	11
<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</u>	12
<u>ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ</u>	17
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	18
<hr/>	
1. MOBILE COIL FACILITIES (MCF) ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	
1.1. <u>Εισαγωγή</u>	19
1.2. <u>Σύστημα πηνίων</u>	24
1.3. <u>Τροφοδοσία ρεύματος των εγκαταστάσεων</u>	25
1.4. <u>Περιστρεφόμενη πλάκα</u>	27
1.5. <u>Σύστημα PERM/DEPERM</u>	28
1.6. <u>Μαγνητόμετρα</u>	30
<u>1.6.1 GSFC Μαγνητόμετρα</u>	31
<u>1.6.2 Bartington Μαγνητόμετρα</u>	31
1.7. <u>Σύστημα λήψης δεδομένων (DAQ)</u>	32
<u>1.7.1 Hardware</u>	32
<u>1.7.2 Bartington Spectramag-06</u>	33
1.8. <u>Software</u>	33
<u>1.8.1 MCF-MAGNET</u>	33
<u>1.8.2 Bartington Spectramag</u>	33
1.9. <u>Μοντελοποίηση (Modelling)</u>	35
1.10. <u>Περιγραφή της διαδικασίας λήψης μετρήσεων μαγνητικού πεδίου</u>	36
1.11. <u>Μαγνήτιση- Απομαγνήτιση (PERM/DEPERM)</u>	39
1.12. <u>Ακρίβεια MCF εγκαταστάσεων</u>	39
1.13. <u>Precision</u>	40
1.14. <u>Σύνοψη</u>	40

2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ (EMC)

2.1 Εισαγωγή στη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα-Ιστορική αναδρομή.....	42
2.2 Σχεδίαση σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.....	44
2.3 Πτυχές της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	46
2.4 Τρόποι διαφύλαξης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και προφύλαξης κατά των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.....	47
2.5 Μηχανισμοί διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.....	48
2.6 Νομικό πλαίσιο για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα.....	49
2.7 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και πρότυπα.....	50
2.8 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και θόρυβος.....	51
2.9 Εγκαταστάσεις δοκιμής και ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	52
2.10 Εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στο τομέα της αεροδιαστημικής.....	53
2.11 Μοντελοποίηση (MDM) μαγνητικού πεδίου με σκοπό την επίτευξη μαγνητικής καθαρότητας στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων.....	57
2.12 Περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης (MDM).....	58

3. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ MULTIPLE DIPOLE MODELLING (MDM)

3.1 Εισαγωγή.....	61
3.2 Ιστορική αναδρομή.....	62
3.3 Περιγραφή της δομής και της λειτουργίας των Γενετικών αλγορίθμων.....	62
3.4 Πλεονεκτήματα των Γενετικών αλγορίθμων.....	65
3.5 Εφαρμογή των Γενετικών αλγορίθμων για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου(MDM).....	66
3.6 Περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης (MDM).....	66
3.7 Περιγραφή της μεθόδου βελτιστοποίησης των Γενετικών αλγορίθμων στα πλαίσια εύρεσης του βέλτιστου μοντέλου (MDM).....	69
3.8 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	70

4. ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Εισαγωγή στις έννοιες της αβεβαιότητας και του σφάλματος.....	73
4.2 Είδη αβεβαιότητας και τύποι σφαλμάτων.....	75
4.3 Αβεβαιότητα στα πλαίσια μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.....	76
4.4 Βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής.....	76
4.4.1: Βασικοί τύποι συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων.....	78
4.5 Μοντελοποίηση μέτρησης.....	84
4.6 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A.....	85
4.7 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B.....	88
4.8 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας.....	93
4.9 Αβεβαιότητα ως προς τη διαδικασία μοντελοποίησης (MDM).....	95
4.10 Αβεβαιότητα ως προς το μοντέλο εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης του δοκιμίου.....	97

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή	98
5.2 Πρώτο σετ διπόλων	98
5.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης	98
5.2.2 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων	103
5.2.3 Συμπέρασμα	110
5.2.4 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των μαγνητικών πεδίων	110
5.2.5 Συμπέρασμα	114
5.3 Δεύτερο σετ διπόλων	114
5.3.1 Περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης	114
5.3.2 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων	117
5.3.3 Συμπέρασμα	124
5.3.4 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των μαγνητικών πεδίων	124
5.3.5 Συμπέρασμα	128
5.4 Τρίτο σετ διπόλων	128
5.4.1 Περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης	128
5.4.2 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων	130
5.4.3 Συμπέρασμα	137
5.4.4 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των μαγνητικών πεδίων	137
5.4.5 Συμπέρασμα	141
5.4.6 Παρουσίαση των ιστογραμμάτων των τιμών των μαγνητικών πεδίων με τις καμπύλες της κανονικής κατανομής	141

6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες των συστημάτων των πηνίων των MCF εγκαταστάσεων	24
Πίνακας 1.2: Τιμές ανάλυσης και σταθερότητας του ρεύματος τροφοδοσίας των πηνίων ανάλογα με τη κλίμακα εξόδου	26
Πίνακας 1.3: Μέγιστη εφικτή πυκνότητα μαγνητικής ροής ζεύγους πηνίων με τροφοδοσία ρεύματος έντασης 2A	27
Πίνακας 1.4: Χαρακτηριστικά των γραφικών παραστάσεων των PERM και DEPERM σημάτων	28
Πίνακας 1.5: Διαστήματα ευαισθησίας των αναλογικών μαγνητόμετρων	31
Πίνακας 4.1: Η κατανομή student-t: τιμές του κ για δεδομένα επίπεδα σημαντικότητας α ως συνάρτηση του αριθμού των βαθμών ελευθερίας	84
Πίνακας 4.2: Τιμές των πιθανοτήτων της τυποποιημένης κανονικής κατανομής	89
Πίνακας 5.1: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 1 ^{ου} σετ διπόλων	99
Πίνακας 5.2: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 2 ^{ου} σετ διπόλων	114
Πίνακας 5.3: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 3 ^{ου} σετ διπόλων	128

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Μαγνητικό πεδίο της Γης	19
Σχήμα 1.2: Απεικόνιση της λειτουργίας λήψης μετρήσεων πεδίου κυκλικά γύρω από το δοκιμαστικό δοκίμιο, με τη χρήση 3 αισθητήρων.....	20
Σχήμα 1.3: Επίπεδη επιφάνεια πεδίου που έχει δημιουργηθεί μεταξύ των δύο Braunbek πηνίων.....	21
Σχήμα 1.4: Ύψους 13 μέτρων Braunbek coil system της Nasa/GSFC, στις ΗΠΑ.....	21
Σχήμα 1.5: Ύψους 15 μέτρων Helmholtz coil system MFSA της IABG, στη Γερμανία.....	21
Σχήμα 1.6: Ύψους 1.6 μέτρων Helmholtz coil system MCF της ESA/ESTEC, στην Ολλανδία	22
Σχήμα 1.7: Απεικόνιση των πηνίων αντιστάθμισης του μαγνητικού πεδίου της Γης και των πηνίων μαγνήτισης-απομαγνήτισης της Ulysses Magnetic Coil Facility (MCF).....	23
Σχήμα 1.8: Περιστρεφόμενη πλάκα των MCF εγκαταστάσεων.....	27
Σχήμα 1.9: Γραφική παράσταση του Perm σήματος για τα τρία επίπεδα μαγνήτισης.....	29
Σχήμα 1.10: Γραφική παράσταση του deperm σήματος.....	30
Σχήμα 1.11: Fluxgate μαγνητόμετρο τριών αξόνων.....	30
Σχήμα 1.12: Μαγνητόμετρο Bartington Model MAG-01.....	32
Σχήμα 1.13: Απεικόνιση MCF εγκατάστασης ρυθμισμένης με σκοπό τη λήψη μετρήσεων.....	37
Σχήμα 2.1: Οι βασικές συνιστώσες ενός προβλήματος EMC σύζευξης.....	46
Σχήμα 2.2: Παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μέσω αγωγών.....	48
Σχήμα 2.3: Σύζευξη μέσω ακτινοβολίας.....	49
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	59
Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων.....	65
Σχήμα 3.2: Διαγραμματική παρουσίαση της λειτουργίας του Γενετικού Αλγορίθμου για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων.....	72
Σχήμα 4.1: Κανονική κατανομή.....	79
Σχήμα 4.2: Τριγωνική κατανομή.....	80

Σχήμα 4.3: Ομοιόμορφη κατανομή.....	81
Σχήμα 4.4: Κατανομή μορφής U.....	82
Σχήμα 4.5: Κανονική κατανομή Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας.....	84
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του πρώτου σετ διπόλων.....	100
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του πρώτου σετ.....	102
Σχήμα 5.3: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	104
Σχήμα 5.4: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	104
Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	105
Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	105
Σχήμα 5.7: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	106
Σχήμα 5.8: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	106
Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	107
Σχήμα 5.10: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	107
Σχήμα 5.11: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	108
Σχήμα 5.12: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	108
Σχήμα 5.13: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	109
Σχήμα 5.14: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1 ^ο σετ διπόλων.....	109

Σχήμα 5.15: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων).....	111
Σχήμα 5.16: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων	111
Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων).....	112
Σχήμα 5.18: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων	112
Σχήμα 5.19: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων).....	113
Σχήμα 5.20: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων	113
Σχήμα 5.21: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του δεύτερου σετ διπόλων	115
Σχήμα 5.22: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του δεύτερου σετ...116	116
Σχήμα 5.23: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 2° σετ διπόλων	118
Σχήμα 5.24: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων.....	118
Σχήμα 5.25: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 2° σετ διπόλων	119
Σχήμα 5.26: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων	119
Σχήμα 5.27: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 2° σετ διπόλων	120
Σχήμα 5.28: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων	120
Σχήμα 5.29: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 2° σετ διπόλων	121
Σχήμα 5.30: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων	121

Σχήμα 5.31: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	122
Σχήμα 5.32: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	122
Σχήμα 5.33: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	123
Σχήμα 5.34: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	123
Σχήμα 5.35: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2 ^ο σετ διπόλων).....	125
Σχήμα 5.36: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	125
Σχήμα 5.37: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2 ^ο σετ διπόλων).....	126
Σχήμα 5.38: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	126
Σχήμα 5.39: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2 ^ο σετ διπόλων).....	127
Σχήμα 5.40: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2 ^ο σετ διπόλων.....	127
Σχήμα 5.41: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του τρίτου σετ διπόλων.....	129
Σχήμα 5.42: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του τρίτου σετ.....	130
Σχήμα 5.43: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 3 ^ο σετ διπόλων.....	131
Σχήμα 5.44: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων.....	131
Σχήμα 5.45: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 3 ^ο σετ διπόλων.....	132
Σχήμα 5.46: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων.....	132

Σχήμα 5.47: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 3 ^ο σετ διπόλων	133
Σχήμα 5.48: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	133
Σχήμα 5.49: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 3 ^ο σετ διπόλων	134
Σχήμα 5.50: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	134
Σχήμα 5.51: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 3 ^ο σετ διπόλων	135
Σχήμα 5.52: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	135
Σχήμα 5.53: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 3 ^ο σετ διπόλων	136
Σχήμα 5.54: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	136
Σχήμα 5.55: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3 ^ο σετ διπόλων)	138
Σχήμα 5.56: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	138
Σχήμα 5.57: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3 ^ο σετ διπόλων)	139
Σχήμα 5.58: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	139
Σχήμα 5.59: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3 ^ο σετ διπόλων)	140
Σχήμα 5.60: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων	140
Σχήμα 5.61: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του σετ των μετατοπισμένων διπόλων(3 ^ο σετ διπόλων), με τη καμπύλη κανονικής κατανομής.....	142
Σχήμα 5.62: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B _z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3 ^ο σετ διπόλων , με τη καμπύλη κανονικής κατανομής.....	142

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

- MCF: Mobile Coil Facility
- EMC: Electromagnetic Compatibility
- MDM: Multiple Dipole Model(+ling)
- EUT: Equipment Under Test
- DUT: Device Under Test
- GA: Genetic Algorithms

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απαιτήσεις για τη αποτελεσματική διεκπεραίωση των διαστημικών αποστολών είναι ήδη πολύ υψηλές και με τη πάροδο του χρόνου παρατηρείται ότι αυξάνονται όλο και περισσότερο. Ο έλεγχος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συστημάτων στο εσωτερικό περιβάλλον λειτουργίας των διαστημόπλοιων πριν την εκτόξευσή τους κρίνεται ιδιαίτερα αναγκαίος, προκειμένου να εντοπιστούν όλες εκείνες οι συσκευές που αποτελούν ‘πηγή μόλυνσης’ για αυτό καθώς διαταράσσουν την *μαγνητική του καθαρότητα* και την ομαλή λειτουργία των γειτονικών τους εξοπλισμών εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που ακούσια πολλές φορές παράγουν.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης (*MDM*) αυτών των συστημάτων, κάνοντας χρήση της στοχαστικής μεθόδου των Γενετικών αλγορίθμων ενώ στη συνέχεια μελετάται η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το μοντέλο που έχει υπολογιστεί.

Αναλυτικότερα, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των ειδικά διαμορφωμένων *Mobile Coil Facilities* εγκαταστάσεων καθώς και της διαδικασίας λήψης μετρήσεων μαγνητικού πεδίου γύρω από τη περιστρεφόμενη πλάκα, την οποία διαθέτουν και είναι τοποθετημένος ο δοκιμαστικός εξοπλισμός.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην έννοια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και στον καθοριστικό ρόλο που έχει για την ομαλή διεξαγωγή των διαστημικών αποστολών και την ακριβή λήψη μετρήσεων.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης των Γενετικών αλγορίθμων καθώς και το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλείται να αντιμετωπίσει και αφορά την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων που θα προσομοιώνει τη μαγνητική συμπεριφορά της εκάστοτε ‘επικίνδυνης’ συσκευής.

Το 4^ο κεφάλαιο εξετάζει την αβεβαιότητα των μετρήσεων του πεδίου και συνεπώς του παραγόμενου μοντέλου εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης και ευθυγράμμισης της δοκιμαστικής συσκευής στη περιστρεφόμενη πλάκα των MCF εγκαταστάσεων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

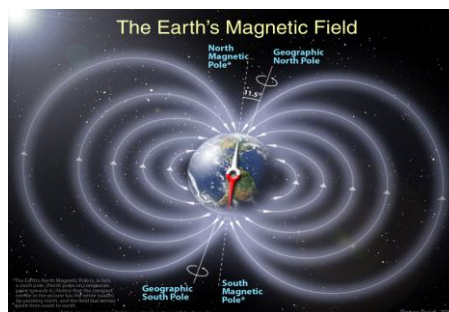
Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων και των μαγνητικών πεδίων που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της διαδικασίας της μοντελοποίησης και αναλυτική παρουσίαση αυτών σε ιστογράμματα.

Στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα ιστογράμματα των τιμών σχετικά με την κατανομή και τη αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις μετρήσεις.

1. MOBILE COIL FACILITIES (MCF) ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την επιτυχή διεξαγωγή διαστημικών αποστολών που έχουν ως στόχο τη ανάκτηση πληροφοριών σχετικά με τη δομική σύνθεση των πλανητών, τη χαρτογράφηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου του διαστήματος καθώς και τη μελέτη σύνθετων αντιδράσεων μεταξύ του ηλιακού ανέμου και του πεδίου της Γης, απαιτείται η εγκατάσταση μαγνητόμετρων στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό περιβάλλον των διαστημόπλοιων. Τα μαγνητόμετρα είναι επιστημονικά όργανα μέτρησης μαγνητικού πεδίου με μεγάλη ευαισθησία, το περιβάλλον λειτουργίας των οποίων θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μαγνητική καθαρότητα (Magnetic cleanliness). Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει στα σημεία εγκατάστασης των μαγνητόμετρων, η ένταση του συνολικού μαγνητικού πεδίου του διαστημόπλοιου να κυμαίνεται μεταξύ [0.1-1 nT]. Παρόλα αυτά, το ισχυρό πεδίο της Γης (~50000nT) σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο των άλλων πλανητών καθώς και η μη ακριβής εγκατάσταση των οργάνων αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες στη λειτουργία και στη σωστή λήψη αποτελεσμάτων καθώς διαταράσσουν τη μαγνητική καθαρότητα του διαστημόπλοιου και καθιστούν την ένταση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στα σημεία τοποθέτησης των μαγνητόμετρων εκτός των επιτρεπτών ορίων.[1]



Σχήμα 1.1: Μαγνητικό πεδίο της Γης

Η εμπειρία όμως ενός καλού μηχανικού για το σχεδιασμό και τη κατασκευή του διαστημόπλοιου σε συνδυασμό με τη εφαρμογή AIT/ AIV (Assembly Integration Testing and Verification) προγραμμάτων συμβάλλουν αποτελεσματικά στη δημιουργία ενός μαγνητικά καθαρού περιβάλλοντος στο εσωτερικό του. Τα AIT/ AIV προγράμματα συνεχούς μαγνητικής καθαρότητας βασίζονται στα εξής:

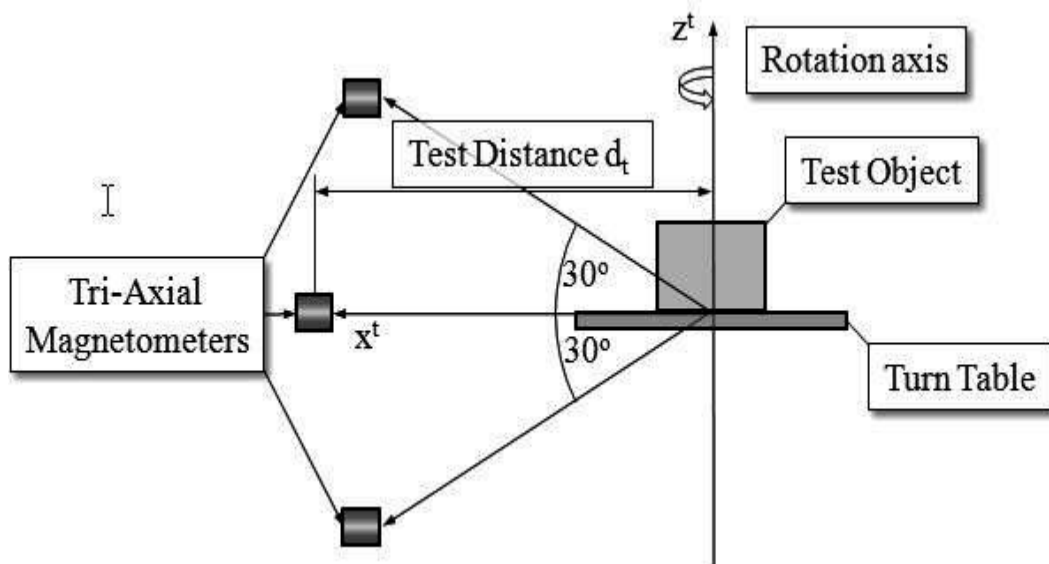
- ✓ στον έγκαιρο εντοπισμό των υποσυστημάτων και των στοιχείων που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή λόγω πιθανών παρεμβολών που μπορεί να προκαλέσουν.
- ✓ στη λήψη μετρήσεων σε κυκλικές τροχιές γύρω από δοκιμαστικό εξοπλισμό στις ειδικά διαμορφωμένες (MCF) Mobile Coil Facilities εγκαταστάσεις (τις οποίες θα περιγράψουμε εκτενέστερα στη συνέχεια). Με βάση τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν από αυτή τη πειραματική διαδικασία γύρω από τον υπό δοκιμή εξοπλισμό που πιθανότατα αποτελεί πηγή μόλυνσης για το ευρύτερο περιβάλλον λειτουργίας του, θα μπορεί ο μηχανικός να αποφανθεί για το αν το περιβάλλον του διαστημόπλοιου είναι κατάλληλο ή μη για τη ταυτόχρονη ομαλή λειτουργία όλων των συσκευών και για το αν χαρακτηρίζεται μαγνητικά καθαρό.

- ✓ στις δοκιμές του συστήματος σε μεγάλες μαγνητικές εγκαταστάσεις όπως στη MFSA του IABG.

Τα AIT/ AIV προγράμματα εκτελούνται πριν την εκτόξευση των διαστημικών οχημάτων, στα πλαίσια κάποιων εδάφρων δοκιμών που πραγματοποιούνται, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι το περιβάλλον λειτουργίας των μαγνητόμετρων στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων είναι μαγνητικά καθαρό.

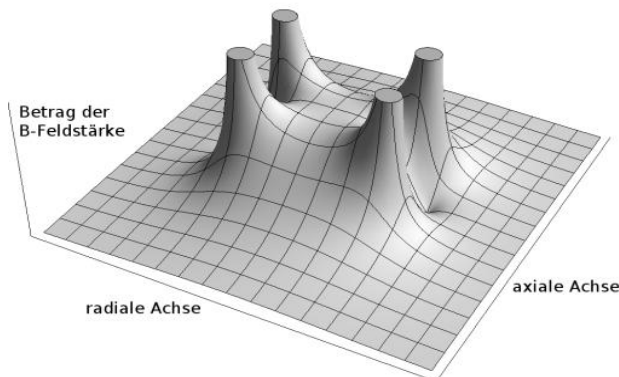
Επειδή το μακρινό μαγνητικό πεδίο (far-field) που παράγεται στο εσωτερικό περιβάλλον λειτουργίας του διαστημικού οχήματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα όπως το κοντινό (near-field), χρησιμοποιείται μια έμμεση προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των μετρήσεων κοντινού μαγνητικού πεδίου που έχουμε λάβει τοποθετώντας το δοκιμαστικό εξοπλισμό στις MCF εγκαταστάσεις, δημιουργούμε ένα σετ μαγνητικών δίπολων, το οποίο μπορεί να προσεγγίσει αρκετά ικανοποιητικά το μακρινό μαγνητικό πεδίο. [2]

Στο παρακάτω Σχήμα 1.2 απεικονίζεται η διάταξη MCF που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις του κοντινού πεδίου, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη κατασκευή του μοντέλου. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο τραπέζι (turn table), το δοκιμαστικό αντικείμενο (test object) καθώς και από 3 τριαξονικά μαγνητόμετρα. Η ιδανική τοποθέτηση των ευαίσθητων οργάνων στο κατακόρυφο επίπεδο είναι στο μισό κύκλο. Το αντικείμενο δοκιμής περιστρέφεται ενώ οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου λαμβάνονται κάθε 10 μοίρες. [1]



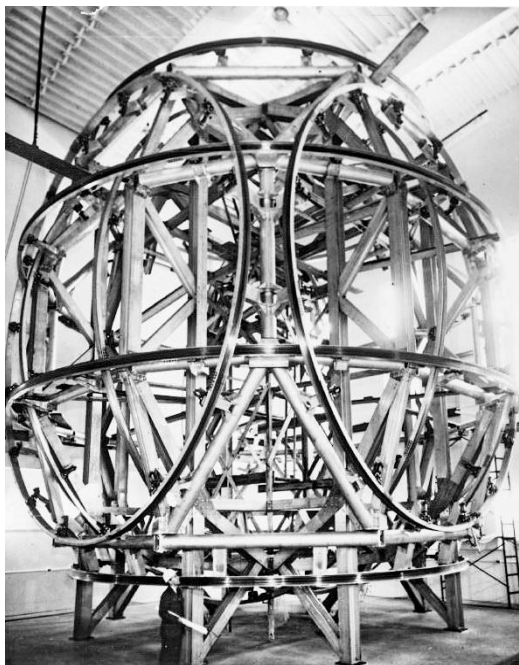
ΣΧΗΜΑ 1.2: Απεικόνιση της λειτουργίας λήψης μετρήσεων πεδίου κυκλικά γύρω από το δοκιμαστικό δοκίμιο, με τη χρήση 3 αισθητήρων

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη αντιστάθμιση του ισχυρού πεδίου της Γης, το οποίο αναμφίβολα επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων, είναι η χρήση coil συστημάτων όπως είναι το Helmholtz ή το Braunbek, τα οποία ουσιαστικά δημιουργούν μια επίπεδη επιφάνεια στο κέντρο όπου είναι εγκαταστημένο το περιστρεφόμενο τραπέζι. [1]



ΣΧΗΜΑ 1.3: Επίπεδη επιφάνεια πεδίου που έχει δημιουργηθεί μεταξύ των δύο Braunbek πηνίων

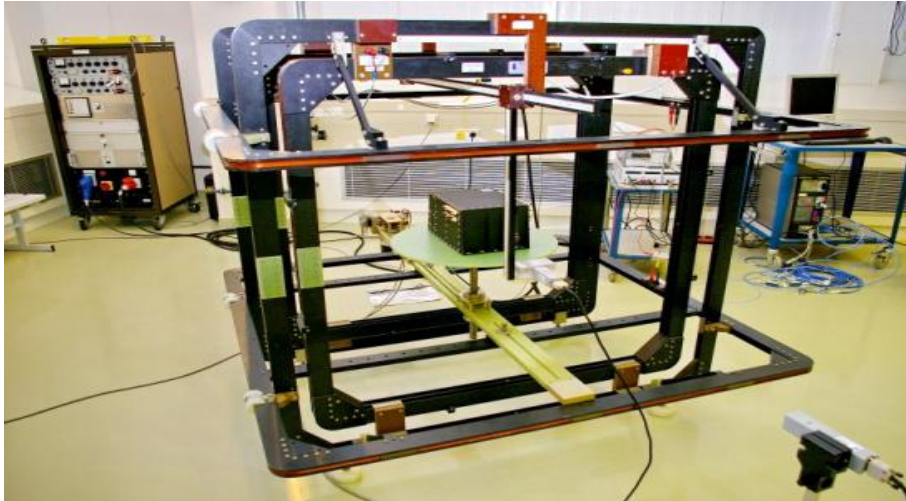
Υπάρχουν coil εγκαταστάσεις διαφόρων διαστάσεων. Τα μεγαλύτερα coil συστήματα διαθέτουν δάπεδο δοκιμών επιτυγχάνοντας ανάλυση των $\pm 0.1 \text{ nT}$ και σταθερότητα των $\pm 0.5 \text{ nT}$. Παρακάτω απεικονίζονται τέτοιου είδους εγκαταστάσεις ευρέως γνωστές.



Σχήμα 1.4: Ύψους 13m Braunbek coil system της Nasa/GSFC, στις Η.Π.Α



Σχήμα 1.5: Ύψους 15m Helmholtz coil system MFSA της IABG στη Γερμανία



Σχήμα 1.6: Ύψους 1.6m, Helmholtz coil system MCF της ESA/ESTEC, στην Ολλανδία

Με τη χρήση του *MCF (MOBILE COIL FACILITY)* λαμβάνουμε μετρήσεις έντασης μαγνητικού πεδίου, σε κυκλική συνήθως τροχιά γύρω από δοκιμαστικό εξοπλισμό, (equipment under test) βάση των οποίων στη συνέχεια, δημιουργείται ένα ισοδύναμο του αρχικού, μοντέλο από μαγνητικά δίπολα, ικανά να αναπαράγουν το ίδιο ή αν όχι παρόμοιο μακρινό μαγνητικό πεδίο με αυτό του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Σύμφωνα με τη ESTEC, η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε από τον Klaus Mehlum το 1978 και ονομάζεται *Multiple Dipole Modeling Method (MDM)*. Αναμφίβολα, παίζει καθοριστικό ρόλο στη διεξαγωγή των προγραμμάτων μαγνητικής καθαρότητας. Βασίζεται στο αξίωμα που υποστηρίζει ότι οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου έχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μέσω ενός πεπερασμένου συνόλου διακριτών δίπολων.

Για τη προσέγγιση του *Magnetic dipole model* αρκεί να προσδιορίσουμε τις δύο παραμέτρους του μοντέλου, τη θέση και τη μαγνητική ροπή των δίπολων, λαμβάνοντας υπόψη μας τις μετρήσεις του κοντινού πεδίου που έχουμε ανακτήσει. Έπειτα με τη χρήση του μοντέλου που δημιουργήσαμε μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό, ακόμη και σε σημεία που δεν ήταν εφικτό με άλλες μεθόδους. Ποια είναι η ακριβής διαδικασία που εκτελείται για τη δημιουργία του μοντέλου των διπόλων, που θα προσομοιώνει ουσιαστικά τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού αναλύεται λεπτομερώς σε κεφάλαιο που ακολουθεί. [1]

Ωστόσο, για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου δίπολων (*Magnetic dipole model*), εφαρμόζεται η στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης των *Γενετικών Αλγορίθμων*. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ανήκουν στη κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και χρησιμοποιούν την ιδέα της φυσικής επιλογής και της επιβίωσης του καλύτερου, όπως την είχε ορίσει ο Δαρβίνος. Στοχεύουν στη εύρεση της παγκόσμιας ελάχιστης ή μέγιστης τιμής. Το κύριο πλεονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων έναντι των υπολοίπων τεχνικών βελτιστοποίησης είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται από αρχικές συνθήκες. Αυτό

συνεπάγεται ότι αφενός υπάρχουν μεγαλύτερες πιθανότητες εύρεσης του απόλυτου βέλτιστου – (δεν «παγιδεύονται» δηλαδή σε τοπικά βέλτιστα) και αφετέρου το ότι δεν θέτουν περιορισμούς για τον χώρο λύσεων. Παρόλα αυτά, απαιτείται αυξημένη υπολογιστική δύναμη σε αντίθεση με άλλες τεχνικές λόγω του μεγάλου αριθμού συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται κατά τη αξιολόγηση ενώ παράλληλα έχουν μικρή ταχύτητα σύγκλισης. Αναλυτική περιγραφή της μεθόδου βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων θα γίνει σε επόμενο κεφαλαίο. [5]

Αναμφίβολα, όσο πιο ακριβής είναι ο προσδιορισμός των θέσεων και των μαγνητικών ροπών του μοντέλου των δίπολων, τόσο πιο ικανοποιητική θα είναι η προσέγγιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που αναπαράγεται. Η αβεβαιότητα σχετικά με το μαγνητικό πεδίο στο χώρο θα μειώνεται αρκετά. Τα αποτελέσματα των εδάφρων δοκιμών, που υφίσταται τα διαστημόπλοια πριν την εκτόξευσή τους θα είναι πιο αξιόπιστα με περιορισμένο ποσοστό σφάλματος, γεγονός που θα οδηγήσει σε καλύτερες επιδόσεις των διαστημικών αποστολών. Οι μελλοντικές διαστημικές αποστολές όπως οι LISA και SOLAR ORBITER απαιτούν πολύ αυστηρό έλεγχο ως προς το ανεπιθύμητο μαγνητικό πεδίο που παράγουν ακούσια κάποιες συσκευές στο εσωτερικό περιβάλλον λειτουργίας των διαστημόπλοιων καθώς επίσης και ως προς το μαγνητικό πεδίο που είναι εκτεθειμένο το διαστημικό όχημα, προκειμένου να ανταποκριθούν στις επιστημονικές απαιτήσεις.

Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι οι απαιτήσεις για τη αποτελεσματική διεκπεραίωση των διαστημικών εξερευνήσεων είναι ήδη πολύ υψηλές και με τη πάροδο του χρόνου θα αυξάνονται ακόμη περισσότερο. Η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα εντός του χρονικού πλαισίου καθώς και η μαγνητική καθαρότητα στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου θα πρέπει να εξασφαλίζονται με το καλύτερο δυνατό τρόπο. Κρίνεται συνεπώς επιτακτική η ανάγκη συνεχούς αναβάθμισης των εγκαταστάσεων και των μεθόδων μέτρησης προκειμένου να ικανοποιούνται όλες οι προδιαγραφές των διαστημικών αποστολών.

Μετά από είκοσι χρόνια επιτυχημένης εφαρμογής των εγκαταστάσεων MCF, κατά τη διάρκεια των ετών 2005-2006 αναβαθμίστηκαν με νέο υλικό hardware και με βελτιωμένο γραφικό περιβάλλον εργασίας για το χρήστη. Παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμη αρκετά περιθώρια βελτίωσης. [2]

Ας δούμε όμως σε αυτό το σημείο πιο αναλυτικά τις MCF εγκαταστάσεις, που αναμφίβολα η χρήση τους και οι μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω αυτών συντελούν αποτελεσματικά στη δημιουργία ενός μαγνητικά καθαρού περιβάλλοντος στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων.

Οι Mobile Coil Facilities, γνωστές ως MCF εγκαταστάσεις, αρχικά είχαν σχεδιαστεί για δραστηριότητες μαγνητικής καθαρότητας του διαστημικού οχήματος Ulysses της ESA και των διαστημόπλοιων Giotto. Μέχρι και σήμερα έχουν αναπτυχθεί πέντε όμοιες MCF εγκαταστάσεις: οι δύο από αυτές βρίσκονται στο *European Space Research and Technology*

Centre (ESTEC) και ονομάζονται Giotto και Ulysses, ενώ οι υπόλοιπες τρεις στο Imperial College του Λονδίνου, στο IWF Graz και στο IGM-TU-Braunschweig αντίστοιχα.[6]

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΗΝΙΩΝ

Κάθε MCF διαθέτει δύο ζεύγη τετραγωνικών πηνίων Helmholtz πλευράς μήκους περίπου 1,4 m, για τη αντιστάθμιση του ισχυρού πεδίου της Γης, το ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται για την κάθετη αντιστάθμιση του πεδίου (Z) και το άλλο για τη οριζόντια (H). Υπάρχει όμως και ένα επιπλέον όμοιο ζεύγος πηνίων για τη μαγνήτιση (perm) και τη απομαγνήτιση (deperm) του συστήματος. Το ζεύγος των πηνίων που έχουν σχεδιαστεί για την αντιστάθμιση της κατακόρυφης συνιστώσας του πεδίου της γης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει και μαγνητική ροπή. Οι ιδιότητες και των τριών ζευγών παρατίθενται στο Πίνακα 1.1. [6]

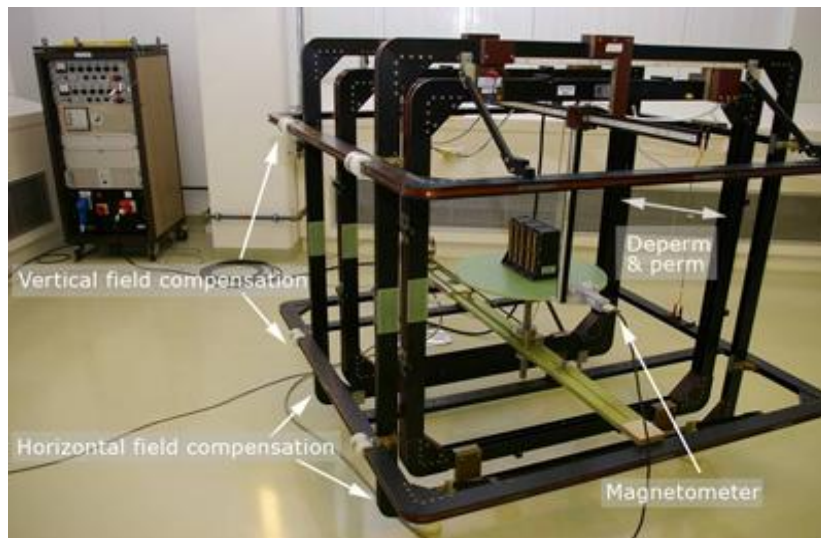
Πίνακας 1.1:Ιδιότητες των συστημάτων των πηνίων των MCF εγκαταστάσεων

Ζευγάρια πηνίων	Διαστάσεις $a \times b$ (cm \times cm)	Διαχωρισμός d (cm)	Αντίσταση R (Ω)	Αυτεπαγωγή L (mH)	Παράγοντας πηνίου B/I (nT/mA)
Κάθετη Αντιστάθμιση	144.9 \times 144.9	77.0	22.865 \pm 0.008	98.95 \pm 0.06	127.1 \pm 0.1
Οριζόντια Αντιστάθμιση	133.5 \times 133.5	70.7	24.675 \pm 0.005	109.44 \pm 0.05	129.60 \pm 0.05
Μαγνήτιση - Απομαγνήτιση	114.5 \times 114.5	60.0	7.53 \pm 0.02	156.4 \pm 0.2	244.3 \pm 0.1

Με τη ακρίβεια στις μετρήσεις μήκους να κυμαίνεται στο ± 1 mm, δίνονται οι διαστάσεις των ζευγών του συστήματος σε σχέση με τις εξωτερικές ακμές. Η τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του MCF ισούται με το άθροισμα των αντιστάσεων και των αυτεπαγωγών των επιμέρους ζευγών πηνίων, δεδομένου ότι και τα πηνία αντιστάθμισης και τα πηνία μαγνήτισης-απομαγνήτισης είναι συνδεδεμένα κατά σειρά για τη δημιουργία των αντίστοιχων ζευγαριών. Για το προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων απαραίτητη είναι η χρήση των μαγνητόμετρων. Εξαιτίας όμως του μη μαγνητικά καθαρού περιβάλλοντος λειτουργίας των οργάνων, εισάγεται αβεβαιότητα ,η οποία ορίζεται ως το τυπικό σφάλμα δέκα μετρήσεων. Ο πραγματικός αριθμός των περιελίξεων των πηνίων είναι άγνωστος, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί γύρω στις $N = 100 - 110$. Ο άξονας συμμετρίας του ζεύγους που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της οριζόντιας συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της Γης, κάτω από ιδανικές συνθήκες, θα πρέπει να είναι προσανατολισμένος στη κατεύθυνση Βορρά-Νότου. Σύμφωνα με το τοπικό σύστημα συντεταγμένων δοκιμής (TCS) του MCF, οριζόντια κατεύθυνση θεωρείται η x-διεύθυνση, με θετική φορά προς το Βορρά ενώ ως z- κατεύθυνση ορίζεται η κατακόρυφη διεύθυνση , με θετική φορά προς τα πάνω.

Το πεδίο της Γης με κατεύθυνση από τη Ανατολή προς τη Δύση , που στο σύστημα συντεταγμένων θεωρείται η y-διεύθυνση με y θετικό προς τη Δύση ,είναι μηδενικό σε ένα ιδανικό περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος, οπότε δεν απαιτείται χρήση κάποιου τρίτου πηνίου.

Η αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου της Γης ολοκληρώνεται πριν την έναρξη των μετρήσεων της μονάδας που βρίσκεται υπό δοκιμή, τοποθετώντας ένα τριαξονικό μαγνητόμετρο στο κέντρο του συστήματος πηνίων (coil system). [6]



Σχήμα 1.7: Απεικόνιση των πηνίων αντιστάθμισης του μαγνητικού πεδίου της Γης και των πηνίων μαγνήτισης-απομαγνήτισης της Ulysses Magnetic Coil Facility (MCF)

1.3 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΩΝ MCF ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Μέσω δύο πηγών ρεύματος Fluke 382A και κάποιων βαθμονομητών πολύ υψηλής σταθερότητας , τα ζεύγη των πηνίων αντιστάθμισης τροφοδοτούνται με συνεχές σταθερό ρεύμα, η ένταση των οποίων ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το πεδίο που δημιουργείται να μην υπερβαίνει μερικές δεκάδες nT. Η ανάλυση εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη κλίμακα εξόδου, της οποίας οι τιμές συνοψίζονται στο Πίνακα 1.2. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές όπως αυτές ορίζονται από το εργοστάσιο, η σταθερότητα είναι μεγαλύτερη από τα 50 ppm ανά μήνα, καθορίζοντας έτσι τη ακρίβεια του ρεύματος εξόδου να είναι καλύτερη από $\pm 0,02\%$.

Πίνακας 1.2: Τιμές ανάλυσης και σταθερότητας του ρεύματος τροφοδοσίας των πηνίων ανάλογα με τη κλίμακα εξόδου

Εύρος (mA)	Ανάλυση ΔI_r (μA)	Σταθερότητα $\Delta I_s/\Delta t$ ($\mu A/mo$)	Ακρίβεια ΔI_a (μA)
0 ... 5	0.01	0.25	1
0 ... 50	0.1	2.5	10
0 ... 500	1	25	100
0 ... 2000	10	100	400

Και οι δύο βαθμονομητές εκτιμάται ότι είναι ηλικίας άνω των 30 ετών και δεν επιδέχονται κάποια βελτίωση. Η μόνη μονάδα, η οποία μπορεί να υποστεί αλλαγές, βρίσκεται στο Laboratory Equipment Pool (LEP) της ESTEC. Με βάση το Πίνακα 1.2, η ακρίβεια στο εύρος των [0 ... 500] mA είναι καλύτερη από 1 mA (0,2%), όπως επαληθεύτηκε με ένα ψηφιακό πολύμετρο που παρέχει ακρίβεια 5 ppm. Γενικά, η σταθερότητα του ρεύματος τροφοδοσίας ελέγχεται προκειμένου να ξεπερνά το όριο σταθερότητας των πολυμέτρων που χρησιμοποιούνται, το οποίο είναι τα 17,5 μA (35 ppm) ανά μήνα. Ωστόσο, εξαιτίας της εμφάνισης διαταραχών στη γραμμή τροφοδοσίας, παρουσιάζονται διακυμάνσεις και μετατοπίσεις στη ένταση του ρεύματος που μπορεί να φτάσουν έως και τα 500 μA . Επομένως, το πεδίο που παράγεται από τα πηνία αντιστάθμισης με συντελεστή πηνίου περίπου 130 nT / mA αλλάζει συνήθως έως και 65 nT / mA .

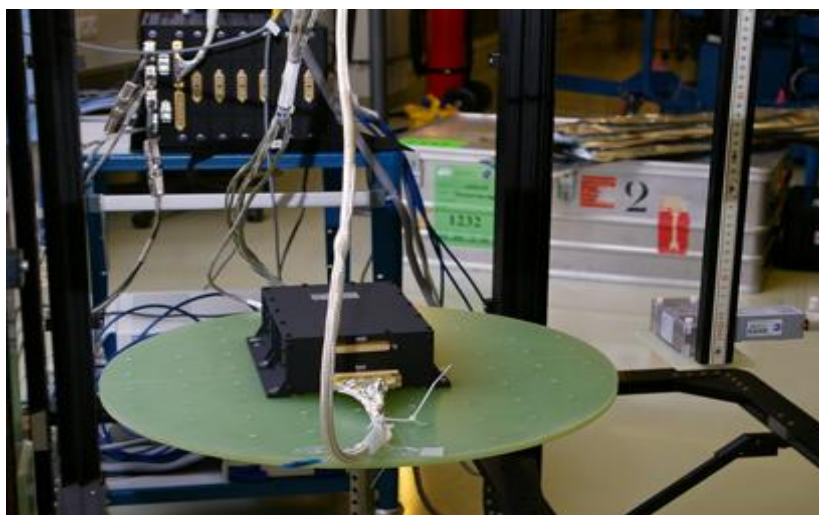
Στον Πίνακα 1.3 καταγράφονται οι μέγιστες πυκνότητες μαγνητικής ροής για κάθε ζεύγος πηνίων, με δεδομένο ότι η πηγή ρεύματος που τροφοδοτεί το MCF διαθέτει μέγιστη χωρητικότητα 2A, όπως η πηγή 382A Fluke που ήδη χρησιμοποιείται. Παρόλο που δεν υπάρχει συνεχής παροχή DC ρεύματος στο σύστημα, στο πίνακα αναφέρεται η μέγιστη δυνατή τιμή ροής και για το ζεύγος των πηνίων μαγνήτισης -απομαγνήτισης (perm/depem). Το μαγνητικό πεδίο της Γης, το οποίο κυμαίνεται περίπου στα 20 μT σε οριζόντια διεύθυνση και στα 45 μT σε κατακόρυφη , μπορεί να αξιοποιηθεί για περαιτέρω αύξηση των πυκνοτήτων μαγνητικής ροής των πηνίων. [6]

Πίνακας 1.3: Μέγιστη εφικτή πυκνότητα μαγνητικής ροής ζεύγους πηνίων με τροφοδοσία ρεύματος έντασης 2Α

Ζευγάρια πηνίων	Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής $B_{max} / \mu T$
Κάθετης αντιστάθμισης	254,26
Οριζόντιας αντιστάθμισης	259,21
Μαγνήτισης-Απομαγνήτισης	488,69

1.4 ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΠΛΑΚΑ

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, στο κέντρο των MCF εγκαταστάσεων είναι τοποθετημένη μία περιστρεφόμενη πλάκα πάνω στην οποία βρίσκεται ο υπό δοκιμή εξοπλισμός, η διάμετρος και το πάχος της οποίας είναι 50,5cm και 10mm αντίστοιχα. Κύριο υλικό κατασκευής της είναι ο υαλοβάμβακας, ενισχυμένος με πλαστικό ενώ σε όλη τη επιφάνεια της εκτείνεται ένα πλέγμα από CuBe μέσω οπών σπειρώματος M4 και 5cm μεταξύ τους απόσταση. Το ύψος της πλάκας είναι ρυθμισμένο από -26.8cm έως 0cm σε σχέση με το κέντρο του συστήματος των πηνίων. Κατακόρυφα, η περιστρεφόμενη πλατφόρμα μπορεί να κινείται ως προς τη κατεύθυνση Ανατολής –Δύσης σε ολόκληρο το εύρος των [- 45,45] cm με βήμα 5cm ενώ ως προς τη x-κατεύθυνση από -35,5cm βόρεια έως 45cm σε σχέση με τη κεντρική θέση. Η χωρητικότητα της πλάκας ανέρχεται στα 20Kg. Ωστόσο, όταν το βάρος του εξοπλισμού που βρίσκεται υπό δοκιμή ξεπερνά το 1Kg, θα πρέπει να είναι γνωστό το κέντρο βάρους του και τοποθετημένο πάνω από το κέντρο βάρους της πλατφόρμας. [6]



Σχήμα 1.8: Περιστρεφόμενη πλάκα των MCF εγκαταστάσεων

1.5 ΣΥΣΤΗΜΑ PERM/DEPERM

Το PERM/DEPERM σύστημα των MCF εγκαταστάσεων αποτελείται από μια ειδικά διαμορφωμένη γεννήτρια σήματος, ένα ενισχυτή DC- ρεύματος για τη μαγνήτιση του υπό δοκιμή εξοπλισμού καθώς και από ένα επιπλέον ενισχυτή υψηλής ισχύος και χαμηλής συχνότητας τόσο για τη μαγνήτιση(PERM) όσο και τη απομαγνήτιση(DEPERM) αυτού. Στα επίπεδα πυκνότητας μαγνητικής ροής παρατηρείται κάποια απόκλιση από τις τιμές που ίσχυαν μέχρι τώρα. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά τη μαγνήτιση (PERM) υπάρχουν τα επίπεδα των 0.15 , 0.3 και 0.45 mT ενώ για τη απομαγνήτιση (DEPERM) υπάρχει μόνο το επίπεδο των 5 mT. Οι τιμές αυτές επαληθεύτηκαν μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ένα πηνίο με αέρα στο πυρήνα το οποίο παρουσίαζε επίπεδα μαγνήτισης 0.1, 0.2 και 0.3 mT ή 1, 2, και 3 G αντίστοιχα και μεγαλύτερο από 4.2 mT ή 42 G επίπεδο απομαγνήτισης.

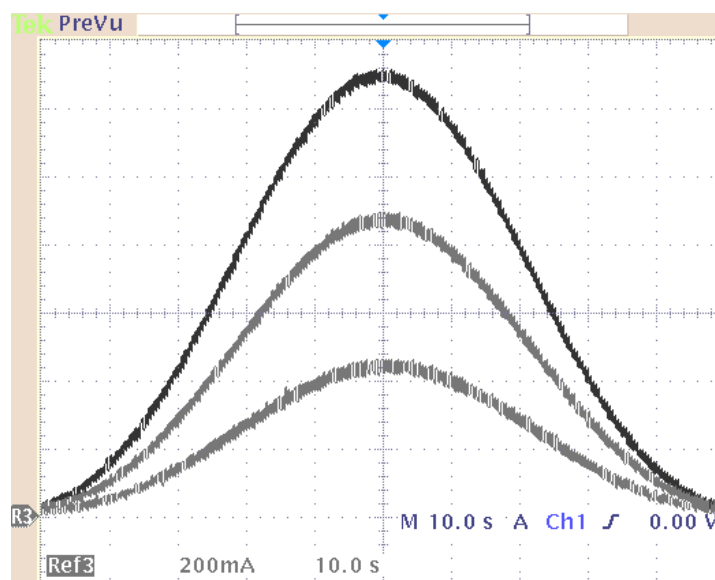
Πίνακας 1.4:Χαρακτηριστικά των γραφικών παραστάσεων των PERM και DEPERM σημάτων

	<i>Ένταση ρεύματος πηγίου I (mA)</i>	<i>Μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής Bmax (μT)</i>	<i>Διάρκεια t (min)</i>	<i>Λεπτομέρειες</i>
<i>Μαγνήτιση επίπεδο 1</i>	~440	~100	~2	DC, bell-shaped curve
<i>Μαγνήτιση επίπεδο 2</i>	~880	~200	~2	DC, bell-shaped curve
<i>Μαγνήτιση επίπεδο 3</i>	~1,300	~300	~2	DC, bell-shaped curve
<i>Απομαγνήτιση</i>		>4,200	~11	4 Hz~4 min exponentially increasing, ~7 min. exponentially decreasing

Στο παραπάνω Πίνακα 1.4 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά των γραφικών παραστάσεων των PERM και DEPERM σημάτων ενώ στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται αντίστοιχα οι κυματομορφές τους.

Το **PERM** σήμα παράγεται μέσω της ειδικά διαμορφωμένης γεννήτριας σήματος και ενισχύεται με τη χρήση του DC- ενισχυτή του συστήματος PERM/DEPERM. Κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης (PERM), το βόρειο με το νότιο πηνίο που αποτελούν το ζεύγος πηνίων μαγνήτισης-απομαγνήτισης συνδέονται “σε σειρά”. Στο Σχήμα 1.9 παρατηρούμε τις γραφικές παραστάσεις του PERM σήματος και για τα 3 επίπεδα μαγνήτισης. Πρόκειται για καμπύλες ομοιόμορφης κατανομής, όπου στο κατακόρυφο άξονα σημειώνονται οι τιμές της έντασης του ρεύματος (**200 mA/div**) ενώ στο οριζόντιο ο χρόνος (**10 s/div**). Και στα τρία επίπεδα μαγνήτισης, η συνολική διάρκεια του σήματος κυμαίνεται γύρω στα 120sec.

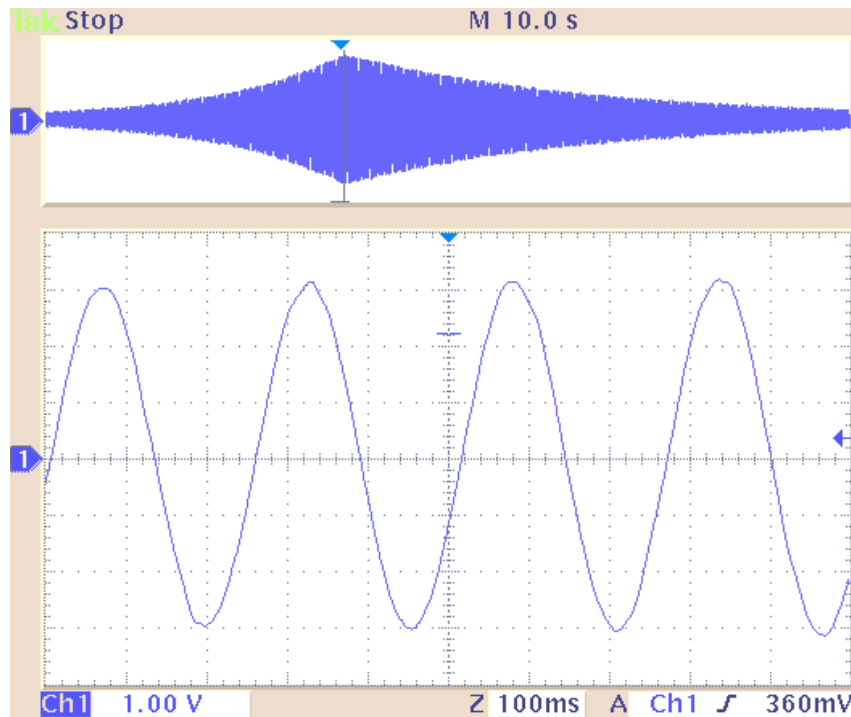
Εξαιτίας των περιορισμένων δυνατοτήτων του παλμοσκόπιου, τα πρώτα και τα τελευταία 10 sec του σήματος PERM δεν απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις.



Σχήμα 1.9: Γραφική παράσταση του Perm σήματος για τα τρία επίπεδα μαγνήτισης

Παράλληλα, η ειδικά σχεδιασμένη γεννήτρια του συστήματος DEPERM-PERM χρησιμοποιείται και για τη παραγωγή του DEPERM σήματος. Ωστόσο, η ενίσχυση του πραγματοποιείται μέσω ενός Chevin ResearchA5003 audio- ενισχυτή δύο καναλιών. Κάθε κανάλι του ενισχυτή είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποδίδει 2.500Watt σε φορτίο 2Ω. Παρόλα αυτά, η συνολική αντίσταση ανά πηνίο που στη περίπτωση ενός σήματος συχνότητας 4 Hz είναι περίπου 4Ω, περιορίζει τη μέγιστη τιμή της ισχύς εξόδου του ενισχυτή σε 1500Watt ανά κανάλι. Κατά τη διάρκεια της απομαγνήτισης (DEPERM), το βόρειο με το νότιο πηνίο που αποτελούν το ζεύγος πηνίων μαγνήτισης-απομαγνήτισης, συνδέονται παράλληλα. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται να δοθεί στο μέγιστο πλάτος(peak) του σήματος εξόδου της γεννήτριας σήματος το οποίο μπορεί να φτάσει έως και τα 3V. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητος ο έλεγχος της μέγιστης τιμής του πλάτους διότι το σήμα εξόδου θα πρέπει να “συμμορφωθεί” με τις προδιαγραφές του ενισχυτή, ο οποίος μπορεί να δεχθεί ως είσοδο, σήμα με μέγιστο πλάτος 1,141V. Αναμφισβήτητα, ακόμη και αν ο ενισχυτής δεχθεί ένα σήμα εισόδου με peak πέρα των δυνατοτήτων του όπως για παράδειγμα 3V, δεν θα υπάρξει άμεσα καταστροφή αυτού, αλλά αυτόματα θα ρυθμίσει το κέρδος του στα -6dB για την αποφυγή της παραμόρφωσης του σήματος.

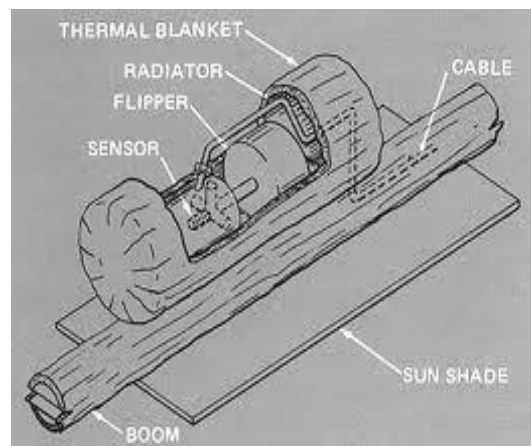
Στη Σχήμα 1.10 απεικονίζεται η γραφική παράσταση του deperm-σήματος, όπως αυτό μετρήθηκε στο κέντρο του συστήματος. Πρόκειται για μια ημιτονοειδή καμπύλη, συχνότητας 4Hz, το πλάτος της οποίας αυξάνεται εκθετικά σε μια χρονική περίοδο 4min ενώ μειώνεται με το ίδιο τρόπο για χρονικό διάστημα 7min. [6]



Σχήμα 1.10: Γραφική παράσταση του derperm σήματος

1.6 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ

Γενικά, η εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων που θα προσομοιώνει με το καλύτερο δυνατό τρόπο τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού καθίσταται σε αρκετές περιπτώσεις δύσκολη, κυρίως όταν παραμονεύει ο κίνδυνος προσέγγισης λανθασμένης ή μη βέλτιστης λύσης εξαιτίας της ύπαρξης πολλαπλών σετ δίπολων με το ίδιο μακρινό μαγνητικό πεδίο. Παρόλα αυτά, περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση πολλών αισθητήρων-μαγνητόμετρων. Όλες οι MCF εγκαταστάσεις είναι εξοπλισμένες με ένα τουλάχιστον τριαξονικό μαγνητόμετρο ενώ ορισμένες από αυτές διαθέτουν και ένα δεύτερο fluxgate μαγνητόμετρο για τη μέτρηση του θορύβου που εισάγει το περιβάλλον.



Σχήμα 1.11: Fluxgate μαγνητόμετρο τριών αξόνων

Με τη τοποθέτηση των fluxgate μαγνητόμετρων στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου, των οποίων η τιμή λόγω της χρηστικής τους αξίας είναι πλέον αρκετά προσιτή, βελτιώνεται η ακρίβεια του μοντέλου, χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου δοκιμής. Στις πρώτες διαστημικές αποστολές των διαστημικών

οχημάτων όπως στο Ulysses της ESA, οι MCF εγκαταστάσεις ήταν εξοπλισμένες με ένα fluxgate μαγνητόμετρο τριών αξόνων με ένα αισθητήρα, το οποίο είχε σχεδιαστεί από τη NASA's Goddard Space Flight Center (GSFC). Πρόσφατα όμως, έχει αντικατασταθεί από τη TEC-EEE με δύο όμοια fluxgate μαγνητόμετρα από τη κατηγορία των Bartington Instruments, των οποίων η χρήση είναι το ίδιο αποτελεσματική με εκείνη αρχικού μαγνητόμετρου. [6]

1.6.1 GSFC ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ

Τα GSFC μαγνητόμετρα, χρονολογούνται από την εποχή των Voyager I και II. Η ονομασία τους έχει προέλθει από το σχεδιαστή τους, ο οποίος είχε εκπονήσει το σχέδιο του αισθητήρα που διαθέτει το μαγνητόμετρο. Τέτοιου τύπου μαγνητόμετρα χρησιμοποιήθηκαν στις MCF εγκαταστάσεις των διαστημόπλοιων που είχαν εκτοξευτεί για τις 'Cluster' και 'Giotto' αποστολές. Όμως από το Δεκέμβρη του 1994, υπήρξε μια αλλαγή στη λειτουργία των GSFC μαγνητόμετρων, με τη σχεδίαση και τη χρήση των αναλογικών ηλεκτρονικών συστημάτων στο εσωτερικό τους. Σημαντική ήταν η συμβολή των αναλογικών μαγνητόμετρων στην επιτυχημένη διεξαγωγή των RPC-MAG και OPTMISM/MAG πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των διαστημικών αποστολών Rosetta και Mars96 αντίστοιχα. Η συχνότητα λειτουργίας των αισθητήρων των μαγνητόμετρων GSFC είναι στο διάστημα μεταξύ των 8KHz-16KHz.

Στο παρακάτω Πίνακα 1.5 σημειώνονται τα δύο διαφορετικά διαστήματα ευαισθησίας που χαρακτηρίζουν τα αναλογικά ηλεκτρονικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλο το εύρος της ευαισθησίας, η τάση εξόδου είναι σταθερή και ίση με $\pm 10V$. [6]

Πίνακας 1.5: Διαστήματα ευαισθησίας των αναλογικών μαγνητόμετρων

	<i>Εύρος</i>	<i>Τάση Εξόδου</i>
10,000 nT/V	-100 ... +100 μT	-10 ... +10 V
1,000 nT/V	-10 ... +10 μT	-10 ... +10 V

1.6.2 BARTINGTON ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΑ

Από το Μάιο του 2007, ένας νέος τύπος μαγνητόμετρων από τη κατηγορία των Bartington Instruments, άρχισε να χρησιμοποιείται και σταδιακά να παίρνει τη θέση των GSFC μαγνητόμετρων στις MCF εγκαταστάσεις. Πρόκειται για τα Bartington magnetometers, δύο όμοια fluxgate μαγνητόμετρα ευαισθησίας 100 mV/ μT , τα οποία είναι απόλυτα συμβατά με

το αρχικό σύστημα λήψης δεδομένων των MCF εγκαταστάσεων. Το Mag-03MSL100 ήταν το πρώτο μοντέλο από αυτή τη κατηγορία των μαγνητόμετρων που τέθηκε σε λειτουργία. Ουσιαστικά, επρόκειτο για μια βελτιωμένη έκδοση της σειράς των Mag-03MS μαγνητόμετρων, τα οποία έχουν τη ιδιότητα να περιορίζουν το εσωτερικό θόρυβο κάτω από 6 pT/ Hz, μέσω φίλτρων χαμηλής συχνότητας που περιέχονται στη Mag-03PSU μονάδα τροφοδοσίας του συστήματος. [6]



Σχήμα 1.12: Bartington Model MAG-01 1

1.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DAQ)

Για τη λήψη δεδομένων (DAQ), το σύστημα διαθέτει ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή με αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) και ένα ειδικά προσαρμοσμένο λογισμικό για το αυτόματο μηχανισμό δημιουργίας αναλυτικής παρουσίασης των δοκιμών-μετρήσεων.

1.7.1 HARDWARE

Στο σύστημα λήψης δεδομένων National Instruments (NI) DAQ που χρησιμοποιείται, ο υπολογιστής διαθέτει μια NI 6220 κάρτα PCI, η οποία συνδέεται σε ένα NI SCB-68 κιβώτιο συνδέσεων. Οι τιμές εισόδου της NI 6220 μπορεί να εναλλάσσονται μεταξύ ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V και $\pm 0,2$ V. Οι τιμές αυτές ψηφιοποιούνται από τον μετατροπέα ADC που βρίσκεται στη NI 6220 με ανάλυση 16 bit και κβαντοποιείται σε $2^{16}=65.536$ βήματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το NI DAQ σύστημα λήψης δεδομένων που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να αντικατασταθεί αποτελεσματικά με ένα άλλο σύστημα λήψης ανάλυσης 24 bit, χωρίς να χρειάζονται σημαντικές αλλαγές στο λογισμικό του υπολογιστή. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων έγκειται στο ADC μετατροπέα. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ένας 24 bit ADC που κβαντοποιεί το σήμα σε 16.777.216 βήματα και ανάλογα με το σήμα εισόδου που δέχεται, αποδίδει και τη αντίστοιχη ανάλυση των 12.52 ,6.26,1.25 ή 0,25pT. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή είναι πολύ μικρότερη από τις αλλαγές που γίνονται στο μαγνητικό πεδίο ή ακόμη και από το εσωτερικό θόρυβο των Mag-03MSL100 μαγνητόμετρων.

1.7.2 BARTINGTON SPECTRAMAG-06

Το Spectramag-06 αποτελεί και αυτό ένα σύστημα λήψης δεδομένων, 24 bit ανάλυσης, το οποίο επιτρέπει το φιλτράρισμα υψηλών συχνοτήτων του σήματος εισόδου αποκόβοντας τα DC σήματα. Δυστυχώς, όμως το σύστημα δεν είναι ακόμη συμβατό με το λογισμικό MCF-MAGNET. [6]

1.8 SOFTWARE

Το MCF-MAGNET είναι το λογισμικό που είναι εγκατεστημένο στους υπολογιστές των NI DAQ συστημάτων λήψης δεδομένων των MCF εγκαταστάσεων. Έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα, να αναπαράγει το μοντέλο και να δημιουργεί μια αναλυτική παρουσίαση σχετικά με αυτό. Το software MCF-MAGNET υποστηρίζει τη χρήση τόσο των GSFC όσο και των Bartington μαγνητόμετρων. Παράλληλα, σε συνδυασμό με το Spectramag-06 ADC μετατροπέα, μπορεί να δημιουργήσει ένα επιπλέον πακέτο λογισμικού το οποίο επιτρέπει κυρίως τη λήψη και τη Fast Fourier Transform (FFT) των δεδομένων.

1.8.1 MCF-MAGNET

Η πιο πρόσφατη έκδοση του MCF-MAGNET είναι η V1.1 και χρονολογείται από τη 1 Οκτωβρίου του 2007. Το λογισμικό αυτό μπορεί να υποστηρίξει είτε τη χρήση:

- ✓ ενός μόνο μαγνητόμετρου
- ✓ δύο μαγνητόμετρων, προκειμένου το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο υπό δοκιμή εξοπλισμός να προσδιορίζεται ανεξάρτητα, ή
- ✓ δύο μαγνητόμετρων, χρησιμοποιώντας το ένα αποκλειστικά για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος.

Το MCF-MAGNET, έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει το μέσο όρο ενός συγκεκριμένου αριθμού δειγμάτων-μετρήσεων που λαμβάνει το NI DAQ σύστημα, με ρυθμό 5 ksamples/sec. Η λήψη των μετρήσεων, η οποία όπως έχουμε ήδη αναφέρει γίνεται σε κυκλική τροχιά γύρω από το εξοπλισμό που εξετάζουμε, δεν είναι συνεχής αλλά υπάρχει η επιλογή λήψης κάθε 10°, 20°, 30° και 45°. Πρόσφατα βέβαια, έχουν γίνει κάποιες αναβαθμίσεις στο λογισμικό που επιτρέπουν τη συλλογή δειγμάτων κάθε 1°.

Ωστόσο, δεν προτείνεται αυτή η μέθοδος δειγματοληψίας διότι ορισμένες φορές ο φάκελος αποθήκευσης των δεδομένων που προέκυψε μετά τη αναβάθμιση δεν είναι συμβατός με το υπόλοιπο σύστημα. Γενικότερα, το αναβαθμισμένο MCF-MAGNET, δεν υποστηρίζει τη χρήση προγραμμάτων παλαιότερης έκδοσης του λογισμικού, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται στο χρήστη, η πρόσβαση σε προηγούμενες αναλύσεις και παρουσιάσεις. Ο αριθμός των δειγμάτων καθώς και ο ρυθμός δειγματοληψίας, είναι οι βασικοί παράγοντες

που θα ορίσουν το χρόνο λήψης των δεδομένων ανά γωνία. Και τα δύο αυτά μεγέθη θα πρέπει να ρυθμίζονται με κατάλληλες τιμές έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο ο θόρυβος που προέρχεται από το ευρύτερο περιβάλλον. Στην Ευρώπη, ο χρόνος λήψης δειγμάτων πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου με $fPL = 50$ Hz, δηλαδή $tPL = 1/fPL = 0.02$ s.

Σύμφωνα με τη θεωρία δειγματοληψίας του Nyquist, τα σήματα περιορισμένου φάσματος (π.χ. σήματα τα οποία στο πεδίο συχνοτήτων έχουν τιμές μέχρι μια μέγιστη συχνότητα) μπορούν να ανακατασκευαστούν πλήρως από την δειγματοληπτημένη μορφή τους εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη ή ίση από το διπλάσιο της μέγιστης(αρμονικής) συχνότητάς τους. Παρόλο που ο θόρυβος στη γραμμή τροφοδοσίας αποτελεί στην ουσία ένα αρμονικό σήμα, ο ρυθμός δειγματοληψίας καλό θα είναι να ισοδυναμεί περίπου με 10 φορές την υψηλότερη συχνότητα της γραμμής προκειμένου να συγκρατήσει κάποια ρεύματα, δηλαδή να ισχύει $f_s \geq 10fPL$ στη συγκεκριμένη περίπτωση. Επιπλέον, ο ρυθμός δειγματοληψίας θα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της κυρίαρχης συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας. Πιο αναλυτικά, αν τα δείγματα βρίσκονται κατά μέσο όρο πάνω από μία πλήρης κυματομορφή, επιτρέπεται αυτόματα η ακύρωση του αρμονικού μέρους του σήματος του θορύβου της γραμμής τροφοδοσίας, εφόσον το μέγιστο πλάτος είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα η $f_s = 500$ Hz θα αποτελεί μια καλή επιλογή για τις μετρήσεις στη ESTEC.

Το λογισμικό, για τη ακριβή λήψη δεδομένων απαιτεί το προσδιορισμό και τη μέτρηση της γωνίας σε κάθε βήμα απόκτησης δειγμάτων, έτσι ώστε να υπάρχει να μεταξύ των σημείων λήψης απόκλιση τόσων μοιρών όσο έχει επιλέξει ο χρήστης. Στη περίπτωση που η πλάκα περιστρέφεται χειροκίνητα παρατηρείται μια πιο γρήγορη ταχύτητα κατά τη διάρκεια μετάβασης από το ένα σημείο λήψης στο άλλο τα οποία απέχουν 10 μοίρες μεταξύ τους και μια πιο αργή κατά τη περίοδο συλλογής δεδομένων, με αποτέλεσμα ο χρόνος που ουσιαστικά εξοικονομείται να είναι 10sec. Ιδιαίτερη προσοχή παρόλα αυτά πρέπει να δοθεί από τους σχεδιαστές και τους τεχνικούς έτσι ώστε να περιορίζονται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό οι 'κραδασμοί' στο σύστημα των πηνίων.

Παράλληλα, το λογισμικό MCF-MAGNET εκτός από τις μετρήσεις σε κυκλική τροχιά γύρω από το υπό δοκιμή εξοπλισμό, επιτρέπει τη συνεχή και ενιαία απόκτηση δεδομένων, έχοντας ως περιοριστικό παράγοντα μόνο τη διαθέσιμη μνήμη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται εξαιρετικά μεγάλες χρονοσειρές, γεγονός όμως που οι υπάρχουσες ρυθμίσεις του λογισμικού, δεν μπορούν να το υποστηρίξουν.

1.8.2 BARTINGTON SPECTRAMAG

Το BARTINGTON SPECTRAMAG λογισμικό δεν είναι σχεδιασμένο με βάση τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των MCF εγκαταστάσεων, αλλά η χρήση του προορίζεται κυρίως για

συστήματα λήψης δεδομένων DAQ. Ο αριθμός των ψηφιοποιημένων δεδομένων περιορίζεται στα 100.000 συνεχόμενα ψηφία. Πρόσφατα, κατά τη διάρκεια αδιάκοπης λήψης δειγμάτων σημειώθηκε μια αύξηση στον ήδη υπάρχον ρυθμό δειγματοληψίας, που έφτασε έως και $f_s = 0.2 \text{ Hz}$, δηλαδή τα δεδομένα συλλέγονται κάθε 5sec. Το Spectramag-06 hardware εξασφαλίζει τη συνεχή διαίρεση του χρόνου σε διαστήματα. Οπότε έχουμε μία αδιάκοπη χρονική περίοδο $5 \text{ s} \cdot 100,000 = 5:18:21:20$ (days:hrs:min:sec). Παρόλα αυτά, μόνο τα σήματα συχνότητας άνω των 0,1 Hz μπορούν να ανιχνευτούν. Στα πλαίσια μιας κανονικής ανάλυσης, ο ρυθμός δειγματοληψίας μπορεί να επιλεγεί μεταξύ των συχνοτήτων $f_s = 0.2 \text{ Hz}$ και 20 kHz. Ο χρόνος όμως δειγματοληψίας περιορίζεται σε $1/f_s \cdot 100,000\text{sec}$. [6]

1.9 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ (MODELLING)

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις έντασης μαγνητικού πεδίου που πραγματοποιούνται σε κυκλική συνήθως τροχιά γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό (equipment under test) που είναι τοποθετημένος πάνω στη στρεφόμενη πλάκα της MCF και εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για τη επίλυση του μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων δημιουργείται ένα ισοδύναμο μοντέλο από μαγνητικά δίπολα (MDM), ικανά να αναπαράγουν το μακρινό μαγνητικό πεδίο του υπό δοκιμή εξοπλισμού. Για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου δίπολων (*Magnetic dipole model*), χρησιμοποιείται η ντετερμινιστική μέθοδος βελτιστοποίησης (DOM), *Gauss-Newton*. Ο κώδικας που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι σε Fortran 77 διπλής ακρίβειας. Μέσω του αλγόριθμου αυτού αναζητούνται οι μαγνητικές ροπές και οι θέσεις των διπόλων του μοντέλου, έτσι ώστε το πεδίο που παράγεται από την υπέρθεση αυτών των διπόλων κυκλικά γύρω από την DUT να ισοδυναμεί με τις μετρήσεις που είχαμε πάρει αρχικά. Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον υπολογισμό του ιδανικού μοντέλου δίπολων (*Magnetic dipole model*), αξιοποιείται η στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης των *Γενετικών Αλγορίθμων*.

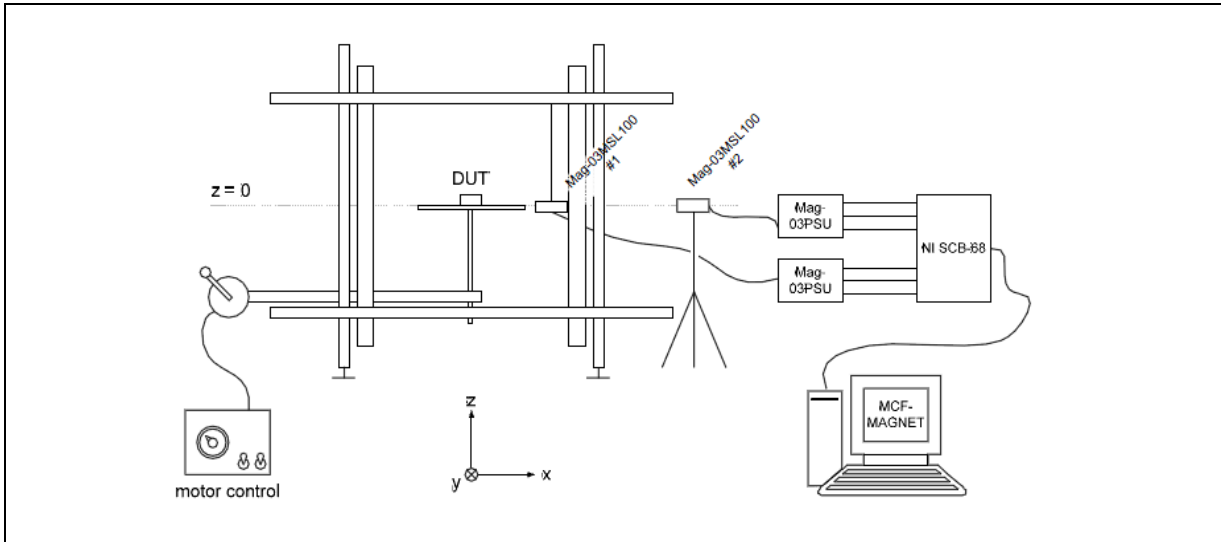
Κριτήριο αξιολόγησης για το μοντέλο διπόλων και στις δύο μεθόδους βελτιστοποίησης, είναι η μέση τετραγωνική ρίζα (rms) σφάλματος μεταξύ των θεωρητικών τιμών του μαγνητικού πεδίου που λαμβάνουμε μέσω των μαγνητόμετρων και των μετρήσεων του πεδίου που παράγεται από τα δίπολα του βέλτιστου μοντέλου. Αυτό το RMS σφάλμα εκτιμάται ότι ισοδυναμεί με τη τυπική απόκλιση σ , μόνο στη περίπτωση που οι διαφορές των τιμών των πεδίων που περιγράψαμε παραπάνω ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Με τη προϋπόθεση αυτή, μπορούμε να ορίσουμε και το κύριο σφάλμα ανάμεσα στο μαγνητικό πεδίο που παράγει το μοντέλο διπόλων που δημιουργήσαμε και στο θεωρητικό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσει ο υπό δοκιμή εξοπλισμός, το οποίο θα δίνεται από το τύπο $\frac{\sigma}{\bar{F}}$, όπου n ο αριθμός των σημείων μέτρησης, ο οποίος ισούται με $n=36$ στη περίπτωση που τα δείγματα λαμβάνονται κάθε 10° σε κυκλική τροχιά γύρω από τη DUT.

Εμπειρικά, όταν το μοντέλο διπόλων (MDM) αποτελείται μόνο από ένα δίπολο, το οποίο έχει τοποθετηθεί στο κέντρο των MCF εγκαταστάσεων και στο x-y επίπεδο, το σφάλμα του μοντέλου εκτιμάται ότι πλησιάζει αρκετά τη συνολική ακρίβεια του MCF συστήματος. Σε καθημερινή βάση πραγματοποιούνται αρκετές θεωρητικές εκτιμήσεις και μελέτες σχετικά με το σφάλμα που πρόκειται να εισάγει το ισοδύναμο με το εξεταζόμενο εξοπλισμό μοντέλο διπόλων. Για το ακριβή προσδιορισμό του σφάλματος γίνονται παράλληλα μια σειρά από μετρήσεις, κατά τη διάρκεια των οποίων μετριέται επαναλαμβανόμενα η μαγνητική ροπή δύο διαφορετικών σημείων. Τα πρώτα αποτελέσματα των μετρήσεων μας δίνουν τη τυπική απόκλιση αυτών, που συνήθως στα μοντέλα του ενός μόνο διπόλου είναι καλύτερη κατά 5%. Παρόλα αυτά με βάση τις τιμές που λαμβάνουμε από τα πειράματα διαπιστώνουμε ότι η μαγνητική ροπή του ενός τουλάχιστον διπόλου από το βέλτιστο μοντέλο μειώνεται με τον χρόνο γεγονός που οφείλεται κυρίως σε προβλήματα που σχετίζονται με τη διαμόρφωση του εξοπλισμού perm/derpm καθώς και τη τρέχουσα θέση αποθήκευσης του διπόλου. Αυτό σημαίνει ότι προς το παρόν, παρουσιάζεται αβεβαιότητα στις μετρήσεις εφόσον δεν έχει προσδιοριστεί απόλυτα η ακρίβεια αυτών. [6]

1.10 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Οι MCF εγκαταστάσεις έχουν σχεδιαστεί, όπως ήδη έχει αναφερθεί, με σκοπό τη λήψη μετρήσεων σε κυκλική τροχιά γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό, που είναι απαραίτητες για το προσδιορισμό των μαγνητικών ροπών και θέσεων των διπόλων του ισοδύναμου μοντέλου με το εξοπλισμό.

Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται μια πλήρως ρυθμιζόμενης MCF εγκατάσταση για τη λήψη μετρήσεων. Η χρήση του δεύτερου μαγνητόμετρου είναι προαιρετική, αλλά αναμφίβολα μπορεί να μειώσει σημαντικά το μαγνητικό πεδίο που παράγει το ευρύτερο περιβάλλον. Η περιστρεφόμενη πλάκα μπορεί να περιστρέφεται είτε χειροκίνητα μέσω ενός χειροστρόφαλο κατά 10 μοίρες ανά πλήρη περιστροφή είτε με τη χρήση ενός κινητήρα, η ταχύτητα του οποίου είναι ρυθμιζόμενη μεταξύ $0,25^\circ / \text{s}$ και $15^\circ / \text{s}$.



Σχήμα 1.13: Απεικόνιση MCF εγκατάστασης ρυθμισμένης με σκοπό τη λήψη μετρήσεων

Μια πλήρη περιστροφή του υπό δοκιμή εξοπλισμού, με λήψη μετρήσεων κάθε 10° , 20° , 30° ή 45° επαρκεί για το υπολογισμό των μαγνητικών ροπών των διπόλων του μοντέλου. Ανεξαρτήτως με το αν η μέτρηση των πεδίων γίνεται με ένα ή με δύο μαγνητόμετρα, το μαγνητικό πεδίο που παράγει το περιβάλλον πρέπει να αντισταθμιστεί πριν ξεκινήσει η συλλογή δεδομένων. Ως εκ τούτου έχει τοποθετηθεί ένα μαγνητόμετρο στο κέντρο των MCF εγκαταστάσεων έτσι ώστε κατά τη περιστροφή αυτών, ο αισθητήρας που μετράει το μαγνητικό πεδίο κατά τη y -διεύθυνση του συστήματος να μην υπερβαίνει το όριο των 10nT . Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή και συστηματικός έλεγχος έχει δοθεί κατά την εγκατάσταση των πηγών ρεύματος καθώς μέσω αυτών αντισταθμίζεται το μαγνητικό πεδίο του περιβάλλοντος κατά τη διεύθυνση x και z του συστήματος, περιορίζοντας τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής και των δύο αξόνων κάτω από 10nT . Παρόλα αυτά, με δεδομένου ότι το πεδίο του περιβάλλοντος της ESTEC κυμαίνεται συνήθως στο διάστημα των $10\text{-}100\text{nT/hour}$ ενώ αντισταθμίζονται περίπου κάποια 1 nT/min δηλαδή λιγότερο από 10nT συνολικά, αντιλαμβανόμαστε πως δεν υπάρχει κάποιο σημαντικό όφελος. Ιδιαίτερα, αν λάβουμε τη περίπτωση όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής του περιβάλλοντος ισούται με 100nT , η αντιστάθμιση είναι σχεδόν ανύπαρκτη, γεγονός που προκαλεί ανησυχία και θέτει σε συνεχή έλεγχο και παρακολούθηση το σύστημα πηνίων καθώς θα πρέπει να αναπροσαρμόζεται κάθε 30 λεπτά.

Προς το παρόν για τη αποφυγή τέτοιου είδους φαινομένων, γίνεται η χρήση δύο μαγνητόμετρων τύπου Mag-03MSL100, το ένα εκ των οποίων προορίζεται αποκλειστικά για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος και το άλλο για το προσδιορισμό του πεδίου που παράγει ο υπό δοκιμή εξοπλισμός. Στη περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται η αντιστάθμιση του πεδίου περιβάλλοντος αλλά κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός μέσω πειραματικών μεθόδων της απόστασης μεταξύ του κέντρου του συστήματος συντεταγμένων και του σημείο εκείνου που το δεύτερο μαγνητόμετρο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση

του πεδίου που παράγει ο εξοπλισμός να λαμβάνει μηδενική τιμή. Στο μέλλον, αν και απαιτούνται αρκετές αλλαγές στο λογισμικό MCF-MAGNET, σχεδιάζεται να εγκατασταθούν στις MCF εγκαταστάσεις δύο μαγνητόμετρα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου λόγω της DUT, όπου θα αξιοποιείται η διαφορά των τιμών αυτών.

Κύρια προϋπόθεση για τη λήψη μετρήσεων του πεδίου που παράγεται από το δοκιμαστικό εξοπλισμό είναι η εξασφάλιση συνθηκών μακρινού πεδίου. Ο λόγος SNR, δηλαδή το πηλίκο της ισχύς του σήματος (του πεδίου της DUT) προς τη ισχύ του θορύβου(του πεδίου περιβάλλοντος) πρέπει να βρίσκεται κάτω από διαρκή έλεγχο προκειμένου να είναι καλύτερος από 10:1 κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί εύκολα μέσω των γραφικών παραστάσεων που παρατίθενται κάθε φορά στη αναλυτική παρουσίαση των δοκιμών-μετρήσεων που παράγεται από το MCF-MAGNET λογισμικό.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει το ζεύγος των πηνίων για τη αντιστάθμιση της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση των μαγνητικών ροών που παράγουν τα δίπολα του ισοδύναμου με τον υπό δοκιμή εξοπλισμό μοντέλου. Εφόσον η πηγή ρεύματος που τροφοδοτεί τις MCF εγκαταστάσεις είναι 2,000 mA, η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι $2,000 \text{ mA} \cdot 127,1 \text{ nT} / \text{mA} = 254,2 \text{ } \mu\text{T} = 2.542\text{G}$, γεγονός που προκύπτει άμεσα με τη αξιοποίηση του μαγνητικού πεδίου της Γης που κατά προσέγγιση ισούται με $300 \text{ } \mu\text{T} = 3 \text{ G}$.

Σύμφωνα με τις διαδικασίες που ισχύουν και εφαρμόζονται έως και σήμερα, πριν τη έναρξη και μετά το πέρας μίας πλήρους περιστροφής του υπό δοκιμή εξοπλισμού, απαιτείται η καταγραφή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής όλων των μαγνητόμετρων των MCF εγκαταστάσεων χωρίς τη τοποθέτηση της DUT πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα. Με αυτό τον τρόπο, ελέγχεται πριν και μετά από τη περιστροφή εάν στο σύστημα η τιμή που καταγράφεται στο μαγνητόμετρο μέτρησης του πεδίου περιβάλλοντος, αποκλίνει από εκείνη του πεδίου που μετριέται στο δεύτερο μαγνητόμετρο μέτρησης μαγνητικού πεδίου του εξοπλισμού, περισσότερο από 10nT . Όμοια και στη περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμο μαγνητόμετρο μέτρησης πεδίου του περιβάλλοντος, οι πυκνότητες ροής πριν και μετά τη περιστροφή της πλάκας δεν θα πρέπει να διαφέρει πάνω από 10 nT.

Μια περιστροφική μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε πλήρως αυτοματοποιημένα με τη χρήση ενός κινητήρα είτε ημιαυτοματοποιημένα μέσω της χειροκίνητης περιστροφής της πλάκας. Εάν διατίθεται μαγνητόμετρο για την παρακολούθηση του πεδίου του περιβάλλοντος, η προτιμώμενη μέθοδος είναι η πλήρως αυτοματοποιημένη. Αντίθετα αν δεν είναι διαθέσιμο προτείνεται η



Σχήμα 1.14: MOTOR DRIVE

χειροκίνητη περιστροφή της πλάκας καθώς η DC τροφοδοσία του κινητήρα μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στις μετρήσεις. [6]

1.11 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ- ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ (PERM/DEPERM)

Η ύπαρξη και η συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών των MCF εγκαταστάσεων μπορούν να περιγραφούν και να εκτιμηθούν με τη χρήση της ελεγχόμενης μαγνήτισης. Μετά τη πρώτη μέτρηση της μαγνητικής ροπής των διπόλων, ο υπό δοκιμή εξοπλισμός DUT απομαγνητίζεται (depermed) κατά μήκος και των δύο αξόνων ταυτόχρονα. Συνεπώς το σήμα deperm εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της πλάκας με χαμηλή ταχύτητα διανύοντας περίπου 10μοίρες σε 3-5 sec. Το σήμα μπορεί να επαληθευτεί με ένα μαγνητόμετρο που έχει τοποθετηθεί σε απόσταση 2 μέτρων από το άξονα συμμετρίας του ζεύγους πηνίων μαγνήτισης-απομαγνήτισης. Για την πλήρη απομαγνήτιση του DUT ένα δεύτερο deperm σήμα κατά μήκος της τρίτης συνιστώσας του συστήματος συντεταγμένων είναι αναγκαίο. Αμέσως μετά τη απομαγνήτιση, ο υπό δοκιμή εξοπλισμός θα είναι μαγνητισμένος κάποια στιγμή κατά μήκος ενός μόνο άξονα στο χαμηλότερο επίπεδο μαγνήτισης $P1 = 1 \text{ G} = 0,1 \text{ Mt}$.

Μετά το πέρας της πρώτης μαγνήτισης, αρκεί μια πλήρης περιστροφική κίνηση της πλάκας για τον προσδιορισμό των πραγματικών μαγνητικών ροπών των διπόλων του ισοδύναμου με το δοκιμαστικό εξοπλισμό μοντέλου. Η διαδικασία της μαγνήτισης κατά μήκος και των τριών αξόνων και η επακόλουθη περιστροφική μέτρηση γύρω από τη DUT επαναλαμβάνεται για τα επίπεδα μαγνήτισης $P1 = 2 \text{ G} = 0,2 \text{ mT}$ και $P3 = 3 \text{ G} = 0,3 \text{ mT}$ όπου κρίνεται απαραίτητο, αποσκοπώντας στη συλλογή πληροφοριών σχετικά τον κορεσμό του πεδίου. Στη περίπτωση που ο υπό δοκιμή εξοπλισμός είναι μαγνητισμένος, θα αρχίσει να εκτελείται η απομαγνήτιση αυτού μέχρι σ' ότου να εξαλειφθεί πλήρως το μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, η μονάδα που εξετάζουμε θα πρέπει να μετακινηθεί σε απόσταση που να εξασφαλίζεται τουλάχιστον $0.4-0.6 \text{ G} = 40-60 \mu\text{T}$ απόκλιση από το πεδίο της Γης και πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να εκτεθεί σε τεχνικές εγκαταστάσεις όπου τα επίπεδα μαγνήτισης φθάνουν έως και $2-3 \text{ G} = 0.2-0,3 \text{ mT}$. Ως εκ τούτου, σε ειδικές περιπτώσεις, μπορεί να κριθεί απαραίτητη μια τελική deperm της DUT στο χώρο εκτόξευσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν στις MCF εγκαταστάσεις γίνεται χρήση πιο 'σκληρών' μαγνητικών υλικών, όπως ορισμένα κράματα χάλυβα, το τυπικό πεδίο κορεσμού θα αυξηθεί πάνω από $40 \text{ G} = 4 \text{ mT}$ και συνήθως δεν πραγματοποιείται ούτε μαγνήτιση ούτε απομαγνήτιση. [6]

1.12 ΑΚΡΙΒΕΙΑ MCF ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Η ακρίβεια μεταξύ διαφορετικών MCF εγκαταστάσεων ή και μεγαλύτερων συστημάτων πηνίων, όπως αυτών που είναι εγκατεστημένα στην Industrieanlagenbetriebsgesellschaft (IABG) στο Ottobrunn κοντά στο Μόναχο δεν έχει προσδιοριστεί προς το παρόν.

Παρόλα αυτά, λόγω του ότι ο υπολογισμός της μαγνητικής ροπής βασίζεται στη μέτρηση των σχετικών μεταβολών της πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά τη διάρκεια της περιστροφής του υπό δοκιμή εξοπλισμού, τα πιθανά συστηματικά σφάλματα των ρυθμίσεων(setup) των MCF εγκαταστάσεων παίζουν δευτερεύων ρόλο σε σχέση με εκείνα που εισάγονται κατά το σχεδιασμό της μεθόδου δοκιμής. Η ακρίβεια όσο αφορά τις μετρήσεις της πυκνότητας μαγνητικής ροής των διπόλων του μοντέλου αναμένεται να είναι της τάξης της ακρίβειας που παρέχουν τα μαγνητόμετρα ανάλογα με τη ευαισθησία τους η οποία είναι γνωστή στους διαχειριστές των συστημάτων. Για παράδειγμα, είναι δεδομένο ότι τα fluxgate μαγνητόμετρα παρουσιάζουν εξαιρετική γραμμικότητα σε συνδυασμό με μια μακροχρόνια σταθερότητα, γεγονός που καθιστά τη ευαισθησία των οργάνων φανερή με ακρίβεια καλύτερη από 1%, ακόμη και στις χειρότερες περιπτώσεις.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, ότι εν τέλει ο ακριβής προσδιορισμός των μαγνητικών ροπών και των θέσεων των διπόλων που συγκροτούν το MDM μοντέλο, το οποίο ισοδυναμεί με τη μονάδα που εξετάζεται, εξαρτάται από τη ακρίβεια των μετρήσεων των πυκνοτήτων μαγνητικής ροής που λαμβάνουμε. Συνεπώς, η αβεβαιότητα που προκύπτει για τα μεγέθη των μαγνητικών ροπών των διπόλων του μοντέλου δεν είναι ακόμη εφικτό να διερευνηθεί πλήρως. [6]

1.13 PRECISION

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει ο προσδιορισμός της ακρίβειας για τις μαγνητικές ροπές των δίπολων είναι ακόμη σε εξέλιξη. Αν εξετάσουμε όμως τη περίπτωση όπου:

- ✓ έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και παρακολούθηση κατά τη διάρκεια ρύθμισης των MCF εγκαταστάσεων και λήψης των μετρήσεων,(όπως π.χ τα μαγνητόμετρα να έχουν τοποθετηθεί με μεγάλη ακρίβεια στο σύστημα)
- ✓ το περιβάλλον στο οποίο εκτελούνται οι μετρήσεις ικανοποιεί τις συνθήκες μακρινού πεδίου
- ✓ ο λόγος SNR είναι καλύτερος από 10:1 και
- ✓ έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο σύστημα λήψης δεδομένων DAQ

τότε η τυπική απόκλιση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων είναι συνήθως καλύτερη από 5%. Αν παραβιαστεί κάποια από τις παραπάνω απαιτήσεις που αναφέραμε, η τυπική απόκλιση αρκετών μετρήσεων που λαμβάνουμε μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη.[6]

1.14 ΣΥΝΟΨΗ

Οι MCF εγκαταστάσεις επιτρέπουν, μέσω των μετρήσεων της πυκνότητας μαγνητικής ροής που λαμβάνουν σε κυκλική τροχιά γύρω από τον υπό δοκιμή εξοπλισμό, το προσδιορισμό της μόνιμης και επαγόμενης μαγνητικής ροπής.

Επιπλέον, η αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου του περιβάλλοντος, που κρίνεται απαραίτητη για τη ακριβή λήψη των μετρήσεων, είναι εφικτή στο κέντρο των MCF εγκαταστάσεων. Τα επίπεδα μαγνήτισης είναι τα 0.1, 0.2 και 0.3 mT ή 1, 2, και 3 G αντίστοιχα ενώ το επίπεδο απομαγνήτισης είναι μεγαλύτερο από 4.2 mT ή 42 G. Οι μαγνητικές ροπές και οι αντίστοιχες θέσεις των διπόλων του μοντέλου MDM, προέρχονται από τις μετρούμενες πυκνότητες ροής με τη χρήση διάφορων μεθόδων βελτιστοποίησης που στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θα είναι η στοχαστική μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων. Συνεπώς, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται επίσης και από το χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο.

Για το προσδιορισμό του θεωρητικού ορίου σφάλματος της μεθόδου που διαχειριζόμαστε, απαιτείται μια αριθμητική ανάλυση της συμπεριφοράς των μη γραμμικών λύσεων σε σχέση με τις παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν όπως για παράδειγμα τις μαγνητικές ροπές και τις αντίστοιχες θέσεις των διπόλων του μοντέλου.

Η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθώς και η καταγραφή των σχετικών πληροφοριών γίνεται αυτόματα από το λογισμικό που διαθέτει το σύστημα λήψης δεδομένων. Στο έγγραφο αυτό αναφέρονται και οι τιμές των μαγνητικών ροπών συμπεριλαμβανομένου του RMS σφάλματος μεταξύ των μετρήσεων που λαμβάνει ο διαχειριστής των MCF εγκαταστάσεων και του προσαρμοσμένου μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, ένα RMS σφάλμα μικρότερο από 15% θα εξασφαλίζει μια τυπική απόκλιση καλύτερη από 5% για δίπολα που είναι τοποθετημένα στο xy-επίπεδο. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τις μετρήσεις στις MCF εγκαταστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη πρόβλεψη των επιπέδων ισχύος του μαγνητικού πεδίου καθώς και για το προσδιορισμό των πυκνοτήτων μαγνητικής ροής σε επίπεδο συστήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη γραμμική υπέρθεση των μαγνητικών ροπών των διπολών που λαμβάνει το σύστημα λήψης δεδομένων σε συνδυασμό με αναλυτικούς και αριθμητικούς υπολογισμούς του συνολικού πεδίου. [6]

2. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ- ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, το πείραμα εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικού σήματος του Marconi πάνω από το Ατλαντικό ωκεανό αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στο τομέα αυτό, άρχισε να λαμβάνει χώρα και να καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Παράλληλα όμως, οι επιστήμονες παγκοσμίως ξεκίνησαν να παρατηρούν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης(παρεμβολής) μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων. Ως ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση ορίζεται οποιοδήποτε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο το οποίο μπορεί να μειώσει την επίδοση μιας διάταξης ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Παρόλα αυτά η μεγάλη απόσταση μεταξύ των ραδιοφωνικών δεκτών που ήταν διαθέσιμοι τη περίοδο εκείνη και ο περιορισμένος αριθμός αυτών, συνέβαλλαν καταλυτικά στη αποτελεσματική αντιμετώπιση των παρεμβολών που είχαν προκύψει.

Σε σύντομο χρονικό διάστημα όμως, και συγκεκριμένα το 1920, τεχνικές εκθέσεις με θέμα τις ραδιοφωνικές παρεμβολές άρχισαν να δημοσιεύονται σε διάφορα τεχνικά περιοδικά. Η πρόωπη και ακατέργαστη μορφή των κεραιών στους σταθμούς λήψης και εκπομπής, είχαν δημιουργήσει γόνιμο έδαφος για την ανάπτυξη παρεμβολών, σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και σε ραδιοφωνικές εκπομπές και λήψεις σημάτων. Ωστόσο, με την εισαγωγή και τη χρήση νέων τεχνικών σχεδίασης οι επιστήμονες και οι μηχανικοί κατάφεραν να δώσουν μια άμεση αλλά προσωρινή λύση στο πρόβλημα, καθώς το 1930 το θέμα των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών από ηλεκτρικό εξοπλισμό όπως ηλεκτρικές μηχανές, ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι και ηλεκτρικές σημάνσεις άρχισε να λαμβάνει μεγαλύτερες διαστάσεις.

Τα φαινόμενα των παρεμβολών έκαναν έντονη τη παρουσία τους και κατά τη διάρκεια του δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου, όπου η χρήση των ηλεκτρονικών συσκευών, κυρίως του ραδιοφώνου, των συσκευών πλοήγησης και των ραντάρ επιταχύνθηκε ραγδαία. Εξαιτίας όμως της μικρής πυκνότητας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που είχαν σχεδιαστεί σε σχέση με τη σημερινή εποχή, υπήρχε δυνατότητα αντιμετώπισης των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών μια προς μία μέσω της εναλλαγής των εκπεμπόμενων συχνοτήτων σε ένα λιγότερο συνωστισμένο φάσμα. Τα περισσότερα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών

παρεμβολών σημειώθηκαν τη δεκαετία του '50 με τη εφεύρεση των υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονικών παραγόντων όπως το διπολικό τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ενώ συνεχίστηκαν τη δεκαετία του '70 με τη ανάπτυξη των chip μικροεπεξεργαστών.

Παράλληλα, η αύξηση των απαιτήσεων πολλών υπηρεσιών για μετάδοση φωνής και δεδομένων επιβάρυνε το ήδη φορτωμένο φάσμα συχνοτήτων, γεγονός που κατέστησε επιτακτική τη ανάγκη για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, στρέφοντας τα βλέμματα στον προσεκτικό σχεδιασμό κάθε τμήματος και υποσυστήματος του εξοπλισμού της εκάστοτε διάταξης, με κύριο γνώμονα την λειτουργική διαχείριση του φάσματος. Το θέμα βέβαια των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος με την εισαγωγή της ψηφιακής επεξεργασίας και υπολογισμού. Άμεση συνέπεια της αντικατάστασης της αναλογικής επεξεργασίας των σημάτων με ψηφιακή ήταν η αισθητά αυξανόμενη εμφάνιση παρεμβολών μεταξύ των ψηφιακών συστημάτων. Ο έλεγχος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είχε αποτελέσει πλέον λόγο έντονου προβληματισμού και εξαιρετικής ανησυχίας για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς, οδηγώντας τους στην ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών για τη ακριβέστερη διεκπεραίωσή του.

Ο όρος ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) περιγράφει την ικανότητα μιας διάταξης, μιας συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε υπάρχει μέσα σε αυτό. Η μελέτη των προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης και οι προσπάθειες για εξεύρεση μόνιμης και αποτελεσματικής λύσης μέσω της ανάπτυξης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας κρίνεται περισσότερο αναγκαία στη σύγχρονη εποχή καθώς η ευρεία χρήση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στην επικοινωνία, τον αυτοματισμό και σχεδόν σε όλους τους τομείς της τεχνολογίας καθιστά απαραίτητη την λειτουργία κυκλωμάτων σε στενή εγγύτητα μεταξύ τους. Επιπλέον, στη σημερινή εποχή επιδείνωση των φαινομένων των παρεμβολών έχει προκαλέσει η αισθητή μείωση του μεγέθους των σύγχρονων ηλεκτρονικών εξοπλισμών με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς μειώνεται παράλληλα η απόσταση μεταξύ των ευαίσθητων κυκλωμάτων και των κυκλωμάτων παρεμβολής. Σφάλματα, ενοχλήσεις ή καταστροφές αποτελούν μερικές από τις επιπτώσεις της ασύμβατης λειτουργίας ηλεκτρικών, ηλεκτρομηχανικών, ηλεκτρονικών και επικοινωνιακών συσκευών, εφαρμογών και συστημάτων σε κοινό φάσμα συχνοτήτων η οποία είναι απόρροια της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής.

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε μερικά κλασικά παραδείγματα φαινομένων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών προκειμένου να δοθεί έμφαση στην αναγκαιότητα και τη σπουδαιότητα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας στα συστήματα που χρησιμοποιούνται:

- ✓ Η εμπλοκή που προκλήθηκε από την ταυτόχρονη λειτουργία των συστημάτων επικοινωνιών και έγκαιρης ειδοποίησης πυραύλων, οδήγησε το πλήρωμα του καταδρομικού HMS Sheffield του Ηνωμένου Βασιλείου το 1982 στην

απενεργοποίηση του δεύτερου συστήματος με αποτέλεσμα να δεχθεί πύραυλο από τον αντίπαλο (Αργεντινή).

- ✓ Το ελικόπτερο UH-60 Black Hawk, του Αμερικανικού στρατού, κόστισε τη ζωή πολλών λόγω των ατυχημάτων που προκλήθηκαν από την ευαισθησία του σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από radar sites μέχρι και CB πομπούς οι οποίες δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.
- ✓ Τέλος, θα γίνει μία αναφορά και για το Αμερικανικό αεροπλανοφόρο Forrestal της θάλασσας του Βορείου Βιετνάμ, όπου η παραγωγή σημάτων RF συχνοτήτων στις ενώσεις του radar υψηλής ισχύος του πλοίου, έφερε το θάνατο 134 ναυτών, από την ενεργοποίηση βομβών των μεταφερόμενων βομβαρδιστικών. Κύρια αιτία αυτής της ενεργοποίησης στάθηκε η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή των παραπάνω σημάτων RF.

2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Η Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική απόδοση συστημάτων-επικοινωνιών-ηλεκτρονικών. Είναι ο κλάδος της επιστήμης και της μηχανικής που ασχολείται με το σχεδιασμό και τον τρόπο λειτουργίας των κυκλωμάτων, των εξοπλισμών και των συστημάτων προκειμένου να εγκατασταθούν στα λειτουργικά περιβάλλοντά τους εν απουσία ευαισθησίας σε παρεμβολή και πιθανότητας δημιουργίας διαταραχών. Στόχος της είναι επομένως, η ομαλή λειτουργία των ηλεκτρονικών συστημάτων σε ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, χωρίς όμως να αποτελεί παράλληλα πηγή μόλυνσης για αυτό. Με δεδομένο ότι το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον συνίσταται τόσο από ακτινοβολούμενη όσο και από επαγόμενη ενέργεια, για τη επίτευξη του στόχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και έλεγχος δύο παραμέτρων: της ευαισθησίας και της εκπομπής.

Η *ευαισθησία* περιγράφει την ικανότητα μιας συσκευής ή ενός συστήματος να αντιδρά σε ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, γεγονός που θα έχει επιπτώσεις στη ορθή και ομαλή λειτουργία του. Ο σκοπός του ελέγχου της παραμέτρου της ευαισθησίας μιας διάταξης είναι ο καθορισμός του επιπέδου ατρωσίας αυτής, δηλαδή ο προσδιορισμός του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος έτσι ώστε να λειτουργεί ικανοποιητικά χωρίς υποβιβασμό της απόδοσης της, στη εμφάνιση μιας διαταραχής.

Η *εκπομπή* σχετίζεται με τη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που παράγει το σύστημα ή η συσκευή στο εξωτερικό περιβάλλον και προκαλεί παρεμβολές στη λειτουργία των υπόλοιπων κυκλωμάτων. Ο σκοπός του ελέγχου της παραμέτρου της εκπομπής είναι η μείωση της σκόπιμης παραγωγής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας των συσκευών και των συστημάτων στο λειτουργικό περιβάλλον τους έτσι ώστε να εξλειφθούν προβλήματα παρεμβολών που οδηγούν στη υποβάθμιση της απόδοσης των υπολοίπων.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, ότι οι σύγχρονοι σχεδιαστές οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τους το γεγονός ότι οι συνθήκες στο χώρο λειτουργίας του συστήματος ή της συσκευής, δεν θα είναι οι ιδανικές συνθήκες του εργαστηρίου. Έτσι λοιπόν, είναι υποχρεωμένοι να εξακριβώσουν τη φύση και τη σημασία των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών από διάφορα σημεία του εξοπλισμού, που ενδεχομένως αργότερα να προκαλέσουν ανασταλτικό παράγοντα της ομαλής λειτουργίας των υπόλοιπων τμημάτων του συστήματος καθώς και να διερευνήσουν τις επιπτώσεις των εξωτερικά παραγόμενων παρεμβολών στη λειτουργική του ακεραιότητα.

Ένα σύστημα είναι ηλεκτρομαγνητικά συμβατό όταν:

- Δεν προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλα συστήματα.
- Δεν είναι ευαίσθητο σε εκπομπές άλλων γειτονικών συστημάτων.
- Δεν προκαλεί παρεμβολές στον εαυτό του.

Η Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, θα πρέπει να αποτελεί βασική συνιστώσα στο σχεδιασμό όλων των ηλεκτρονικών προϊόντων ή συσκευών έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από εξωτερικές πηγές ηλεκτρομαγνητισμού στο περιβάλλον λειτουργίας τους καθώς επίσης και να μην αποτελούν πηγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που θα μολύνει το χώρο και θα επιδρά αρνητικά σε γειτονικά κυκλώματα. Στη προσπάθεια περιορισμού των φαινομένων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών, διάφορες κυβερνητικές υπηρεσίες και ρυθμιστικά όργανα έχουν θεσπίσει κανονισμούς τους οποίους ένα προϊόν ή μια συσκευή πρέπει να τηρεί πριν την εισαγωγή τους στη αγορά. Τα επιτρεπτά όρια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός εξοπλισμού και ο απαιτούμενος βαθμός ατρωσίας του είναι οι δύο παράμετροι που ελέγχονται από τους κανονισμούς προκειμένου να πιστοποιηθεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα μιας συσκευής. Επομένως, ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός ηλεκτρομαγνητικά συμβατού συστήματος δεν αφορά μόνο την ικανοποιητική λειτουργία του αλλά και τη εκπλήρωση των νομικών απαιτήσεων που όλες σχεδόν οι χώρες του κόσμου προβάλλουν πριν το σύστημα αποκτήσει άδεια να κυκλοφορήσει στην ελεύθερη αγορά. Κατά συνέπεια ο σχεδιαστής που αναπτύσσει ένα σύστημα είναι υπεύθυνος τόσο για τη επιτυχή λειτουργία του σε ένα περιβάλλον με εσωτερικά παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές όσο και για τη συμμόρφωση του συστήματος με τα όρια που έχουν οριστεί από τα εθνικά και τα διεθνή πρότυπα .

Υπάρχουν δύο προσεγγιστικές μέθοδοι που μπορεί να ακολουθήσει ένας σύγχρονος σχεδιαστής, προκειμένου να οδηγηθεί στο σχεδιασμό και τη παραγωγή ενός ηλεκτρομαγνητικά συμβατού εξοπλισμού.

- ✓ Η πρώτη τεχνική σχεδίασης ονομάζεται *προσέγγιση κρίσης (crisis approach)*. Σε αυτή τη περίπτωση ο σχεδιαστής, αφού πρώτα περάσει από το στάδιο του σχεδιασμού της συσκευής, στη φάση του ελέγχου και τελικά φτάσει στη παραγωγή αυτής, εξετάζει την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Πιο συγκεκριμένα, μόλις η

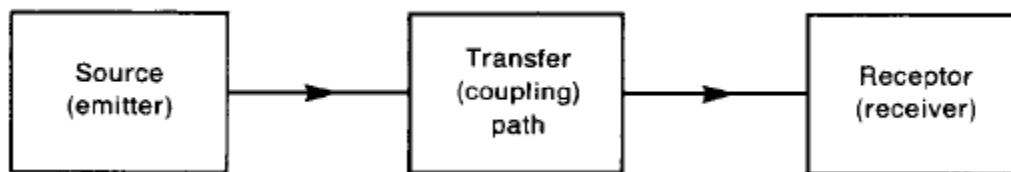
παραγόμενη συσκευή ολοκληρωθεί, μέσω κάποιων δοκιμών διερευνάται αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία της καθώς και αν ικανοποιούνται οι κανονισμοί όπως αυτοί έχουν θεσπιστεί από τις αρμόδιες υπηρεσίες και τα ρυθμιστικά όργανα. Το σύστημα, το οποίο έχει σχεδιαστεί χωρίς καμία μέριμνα για τη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, θα παρουσιάσει πιθανότατα αρκετά προβλήματα κατά τη διάρκεια των ελεγκτικών διαδικασιών, των οποίων η λύση θα είναι αρκετά δαπανηρή και λιγότερο αποτελεσματική λόγω του κόστους της οπισθοδρόμησης σε προηγούμενα στάδια της εν λόγω κατασκευής.

- ✓ Η δεύτερη μέθοδος σχεδίασης ονομάζεται *συστηματική προσέγγιση (system approach)*. Ο σχεδιαστής χρησιμοποιώντας αυτή τη τεχνική, λαμβάνει υπόψη του, την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα καθ' όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού του εξοπλισμού ή της συσκευής. Με τον τρόπο αυτό έχει τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσει όσο γίνεται περισσότερο, την παραγωγή παρεμβολής στο σημείο από όπου πηγάζει. Οι απαραίτητες τεχνικές μείωσης που θα ακολουθήσουν είναι συνήθως απλές και όχι ιδιαίτερα δαπανηρές. Η συστηματική προσέγγιση είναι πιο επιθυμητή και αποτελεσματική.

Η εύρεση των βέλτιστων λύσεων σε τέτοια σχεδιαστικά προβλήματα, δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη. Γίνονται συνεχείς προσπάθειες στο τομέα της έρευνας με σκοπό τη ανάπτυξη νέων μεθόδων και εργαλείων τέτοιες ώστε να επιτρέπουν διαδικασίες βέλτιστης σχεδίασης για επίτευξη συμβατότητας, που να είναι ενσωματωμένες στα αρχικά στάδια σχεδιασμού. Μέσω αυτών των τεχνικών σχεδίασης, το θέμα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας θα ελέγχεται στο στάδιο εννοιών της σχεδίασης και το κόστος θα ελαχιστοποιείται.

2.3 ΠΤΥΧΕΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα σχετίζεται με τη παραγωγή, τη μετάδοση και τη λήψη ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Αυτές οι τρεις πτυχές του EMC προβλήματος συνθέτουν το βασικό σκελετό κάθε EMC σχεδιασμού. Αυτό παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Οι βασικές συνιστώσες ενός προβλήματος EMC σύζευξης

Απαραίτητη προϋπόθεση, για να υφίσταται μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας και κατ' επέκταση να αναπτύσσονται φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών είναι η ύπαρξη μιας πηγής, η οποία αναφέρεται και ως πομπός καθώς είναι εκείνη που παράγει την εκπομπή, ενός μονοπατιού διάδοσης ή σύζευξης πάνω από το οποίο θα διαδίδεται η ενέργεια

καθώς και ενός δέκτη που θα τη λαμβάνει και θα τη επεξεργάζεται. Ο πομπός έχει τη δυνατότητα να μεταδώσει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είτε εκούσια είτε ακούσια, γεγονός το οποίο εξαρτάται από το μονοπάτι διάδοσης. Με οποιοδήποτε τρόπο και αν μεταδοθεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από το πομπό, μεταφέρεται μέσω της διαδρομής σύζευξης στο δέκτη, όπου και υπόκειται κάποια επεξεργασία, οδηγώντας τον σε επιθυμητή ή μη συμπεριφορά. Αν η ενέργεια που εκπέμπεται ακούσια από το πομπό και λαμβάνεται από το δέκτη, προκαλέσει μη φυσιολογική λειτουργία αυτού τότε έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της παρεμβολής. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η ακούσια εκπομπή είναι απαραίτητα καταστροφική καθώς προκαλεί διαταραχές μόνο στη περίπτωση που το λαμβανόμενο σήμα έχει αρκετό πλάτος και/ή φασματικό περιεχόμενο στη είσοδο του δέκτη ώστε να μην επιτρέψει τη επιθυμητή συμπεριφορά αυτού. Συνεπώς, η επεξεργασία της ληφθείσας ενέργειας από το δέκτη αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη εμφάνιση παρεμβολής.

2.4 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΦΥΛΑΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΦΥΛΑΞΗΣ ΚΑΤΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ

Υπάρχουν τρεις τρόποι προφύλαξης κατά των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκαλεί ο θόρυβος, προκειμένου να διασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των συστημάτων:

- ◆ *Μείωση των εκπομπών στο σημείο της πηγής*

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι υπάρχουν αρκετές συσκευές, οι οποίες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους εκπέμπουν ακούσια ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, προκαλώντας ανεπιθύμητες επιπτώσεις και διαταραχές στη ομαλή λειτουργία των γειτονικών τους εξοπλισμών. Αναμφίβολα λοιπόν, μειώνοντας τη εκπεμπόμενη ακτινοβολία των ‘μη σκόπιμων’ πηγών, μειώνεται παράλληλα και η εμφάνιση παρεμβολών στα υπόλοιπα συστήματα. Ωστόσο, η μείωση αυτή δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη καθώς περιορίζεται από τις προδιαγραφές επιθυμητής λειτουργίας κάθε συστήματος.

- ◆ *Μετατροπή της διαδρομής σύζευξης σε όσο το δυνατόν ‘μη αποτελεσματική’*

Η αύξηση της απόστασης μεταξύ του ευαίσθητου κυκλώματος-δέκτη από τη πηγή σε συνδυασμό με τη εισαγωγή ενός φράγματος ή θωράκισης γύρω από τον πομπό και το δέκτη, ελαττώνει σημαντικά την ικανότητα της διαδρομής σύζευξης, συμβάλλοντας στη αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρενοχλήσεων μεταξύ των εξοπλισμών. Παρόλα αυτά, η διαδικασία προστασίας παρεμβολών μέσω της τοποθέτησης του δέκτη και του πομπού σε μεταλλικό περίβλημα εκτός του ότι είναι δαπανηρή, μειώνει αισθητά και την απόδοση του συστήματος.

- ◆ *Μείωση της ευαισθησίας του δέκτη ως προς τη λήψη των παρεμβαλλόμενων εκπομπών*

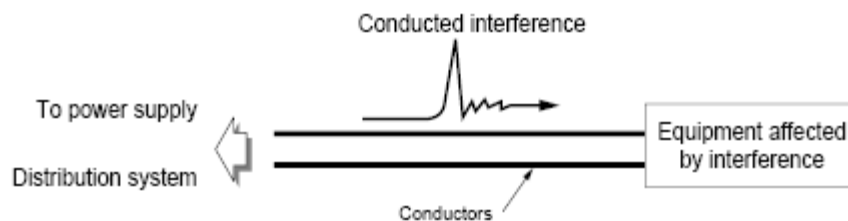
Κρατώντας τον ευαίσθητο εξοπλισμό-δέκτη μέσα σε προστατευτικό κάλυμμα με αγωγή ασπίδα, αναμφισβήτητα παρέχεται προστασία ενάντια στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και αυξάνεται το επίπεδο ατρωσίας του. Βέβαια για να υπάρχει αποτελεσματικότητα θα πρέπει το πάχος της αγωγίμης ασπίδας να είναι μεγαλύτερο από το βάθος που μπορούν να διαπεράσουν οι συχνότητες διαταραχής. Και σε αυτή τη περίπτωση όμως, το κόστος καθώς και η μη επιθυμητή λειτουργία που έχει μετά τη προστασία ο δέκτης, δεν το καθιστούν αποδεκτό από το χρήστη.

2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

Ο όρος σύζευξη αναφέρεται στη σύνδεση, τη μεταφορά ή τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών-παρεμβολών από το πομπό σε ευαίσθητες συσκευές. Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι σύζευξης:

- *Ο κοινός και διαφορικός τρόπος σύζευξης μέσω αγωγού*
- *Η κοινή σύζευξη εμπέδησης*
- *Ο διαφορικός τρόπος σύζευξης , μέσω ακτινοβολίας.*

Στην πρώτη περίπτωση της αγωγίμης σύζευξης, η διάδοση της παρεμβολής γίνεται κατά μήκος ενός κυκλώματος δύο καλωδίων, που πιθανότατα πρόκειται είτε για εσωτερικές γραμμές παροχής ισχύος και μεταφοράς δεδομένων είτε για διαύλους και σύρματα ελέγχου. Στο Σχήμα 2.2 παριστάνεται ένα παράδειγμα σύζευξης σε αγωγό όπου ένα σύστημα διανομής ισχύος επιδράει αρνητικά σε ένα ευαίσθητο δέκτη.



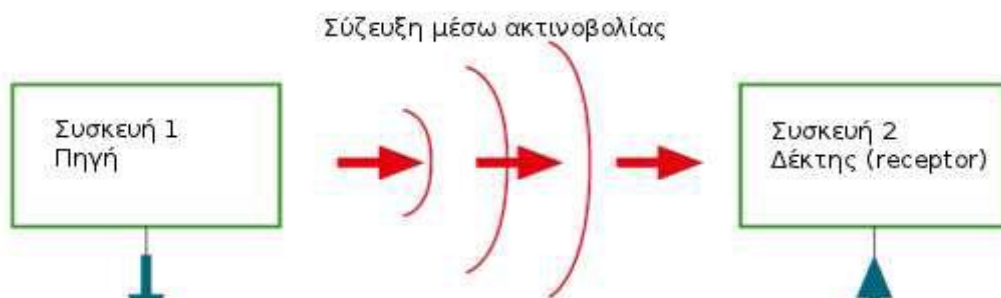
Σχήμα 2.2: Παράδειγμα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής μέσω αγωγών

Η αγωγή σύζευξη διαιρείται σε δύο υποκατηγορίες, στο κοινό και στο διαφορικό τρόπο σύζευξης , ανάλογα με τη πορεία και τη κατεύθυνση του παραγόμενου ρεύματος. Κατά τη διάρκεια του κοινού τρόπου αγωγίμης σύζευξης παράγεται στο κύκλωμα τάση ή ρεύμα διαταραχής κοινού τρόπου. Με το όρο τάση διαταραχής εννοούμε τη κοινή τάση που αναπτύσσεται στους αγωγούς ενός συστήματος με σημείο αναφοράς τη γείωση και έχει επιπτώσεις σε όλους τους ενεργούς αγωγούς ενώ με το όρο ρεύματος διαταραχής αναφερόμαστε στο ρεύμα που διαρρέει όλους τους ενεργούς αγωγούς κατά τη ίδια κατεύθυνση. Οι διαταραχές κοινού τρόπου αποτελούν κύριο πρόβλημα σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας διότι είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της διαδρομής

διάδοσης. Σε αντίθεση με το κοινό τρόπο αγωγίμης σύζευξης, στο διαφορικό τρόπο το ρεύμα διαδίδεται σε ένα από τους αγωγούς, περνάει μέσα από τον εξοπλισμό και στη συνέχεια επιστρέφει μέσω ενός άλλου αγωγού.

Ο δεύτερος τρόπος διάδοσης παρεμβολών της κοινής σύζευξης εμπέδησης παρουσιάζεται όταν έχουμε μια εμπέδηση η οποία είναι κοινή για δύο ή περισσότερα κυκλώματα. Πιο συγκεκριμένα, στη σύζευξη κοινής εμπέδησης, χρησιμοποιείται μια κοινή γραμμή και από τα δύο κυκλώματα πάνω στην οποία αναπτύσσεται τάση εξαιτίας της εμπέδησης και του ρεύματος που διαρρέει το ένα κύκλωμα. Έτσι η τάση αυτή εμφανίζεται στο άλλο κύκλωμα μεταδίδοντας το θόρυβο του πρώτου. Η κοινή εμπέδηση μπορεί να είναι η σύνδεση της γείωσης, το δίκτυο της γείωσης στη γη, το δίκτυο διανομής ισχύος κλπ

Τον τρίτο αλλά εξίσου σημαντικό μηχανισμό διάδοσης παρεμβολής αποτελεί η σύζευξη μέσω ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια της οποίας οι διαταραχές διαδίδονται μέσω του περιβάλλοντος (πχ αέρας). Ένα παράδειγμα διαδρομής που ακολουθεί η παρεμβολή όταν διαδίδεται μέσω ακτινοβολίας, εμφανίζεται με τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος που λαμβάνουν την ακτινοβολούμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και μεταφέρουν το φυσικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον στο δέκτη που τροφοδοτούν. Ο δέκτης, έπειτα είτε μέσω εκτεθειμένων συνδέσεων και σημάτων είτε μέσω άλλων γραμμών του εξοπλισμού λαμβάνει το ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο ή τη παρεμβολή από το περιβάλλον του. Η σύζευξη μέσω ακτινοβολίας διακρίνεται στη χωρητική και στην επαγωγική σύζευξη ανάλογα με το αν η αλλαγή σημειώνεται στο ρεύμα ή τη τάση του κυκλώματος. Χωρητική και επαγωγική σύζευξη έχουμε κυρίως όταν οι αγωγοί βρίσκονται σε παράλληλη θέση ή όταν συνυπάρχουν σε κοντινή απόσταση. Στο Σχήμα 2.3 που ακολουθεί αναπαριστάται ο τρόπος σύζευξης μέσω ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.3: Σύζευξη μέσω ακτινοβολίας

2.6 ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ

Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή αναγνωρίστηκε ως μείζον πρόβλημα και ξεκίνησε να γίνεται αντικείμενο συζήτησης στους κύκλους της επιστημονικής κοινότητας, όταν σημειώθηκε αυξανόμενη εμφάνιση διαταραχών στα ψηφιακά συστήματα και έντονος

ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος στις ραδιοφωνικές εκπομπές. Στη προσπάθεια αποφυγής ή έστω μείωσης των παραπάνω φαινομένων των παρεμβολών, το 1979 δημοσιεύτηκε, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ρυθμιστικό πλαίσιο από τη Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) που καθόριζε συγκεκριμένα όρια ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών για κάθε ψηφιακή συσκευή που ήταν ήδη ή επρόκειτο να εισαχθεί στη αγορά. Παράλληλα, και σε αρκετές χώρες της Ευρώπης, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα υπήρξε καίριο ζήτημα και αιτία έντονου προβληματισμού και ανησυχίας. Παρόμοιες τεχνικές δημοσιεύσεις που όριζαν το επίπεδο εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κάθε ψηφιακής συσκευής της περιόδου εκείνης, είχαν εκδοθεί και από τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά ρυθμιστικά όργανα. Σε σύντομο χρονικό διάστημα όμως, κρίθηκε από τη επιστημονική κοινότητα απαραίτητη και αναγκαία η συνεργασία όλων των ενδιαφερόμενων κρατών για την αποτελεσματική επίλυση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης. Αυτό οδήγησε τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή(IEC), το 1933 σε μια συνάντηση που έλαβε χώρα στο Παρίσι και δημιούργησε τη Διεθνή Ειδική Επιτροπή (ISC) σε ραδιοπαρεμβολές (CISPR).

Μετά τη λήξη του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου, η Διεθνής Επιτροπή(ISC) ξεκίνησε βαθμιαία τις συνεδριάσεις, κάνοντας σημαντικά βήματα τόσο στη συνεργασία μεταξύ των κρατών όσο και στη αντιμετώπιση φαινομένων ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών. Επειδή οι συσκευές δεν προορίζονται μόνο για τη χώρα που παράγονται κρίνεται αναγκαία η συνεργασία των χωρών και η υπακοή σε κοινές οδηγίες και οριοθετήσεις. Μετά από επακόλουθες συνεδριάσεις η Επιτροπή κατάφερε να δημοσιεύσει έγγραφα σχετικά με τεχνικές μετρήσεων καθώς και με τη θέσπιση ορίων λειτουργίας των συστημάτων. Το γεγονός αυτό κατέστησε τη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα ως βασική συνιστώσα κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος ή ενός προϊόντος προτού βγει στη αγορά τόσο για τη ικανοποιητική λειτουργία αυτού όσο και για την τήρηση των νομικών απαιτήσεων της χώρας στη οποία προωθείται ή χρησιμοποιείται. Σε περίπτωση που οι προδιαγραφές ενός προϊόντος δεν υπακούν στα όρια που έχουν καθοριστεί από τα ρυθμιστικά όργανα δεν μπορεί να πουληθεί στη συγκεκριμένη χώρα.

2.7 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ

Η ανάγκη για τυποποίηση της διαδικασίας ελέγχου-δοκιμής των δύο βασικών παραμέτρων της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας μιας συσκευής ή ενός προϊόντος της ευαισθησίας δηλαδή και της εκπομπή αυτού, οδήγησε τους διεθνείς και ευρωπαϊκούς οργανισμούς τυποποίησης, στη έκδοση 'Προτύπων' για το σύνολο σχεδόν των συσκευών. Πρόκειται για έγγραφα που παρουσιάζουν κανόνες, κατευθυντήριες οδηγίες και χαρακτηριστικά συσκευών που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν από τους σχεδιαστές των εξοπλισμών σε κάθε βήμα της σχεδιαστικής τους διαδικασίας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Πιο συγκεκριμένα, τα Πρότυπα αναφέρουν τις συσκευές που εμπίπτουν σε αυτά ενώ παράλληλα περιγράφουν μεθόδους δοκιμής, όρια για τα επιτρεπτά επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ευαισθησίας αυτών καθώς και προδιαγραφές που είναι υποχρεωτικό να πληρούν οι δέκτες των EMI μετρήσεων. Οι

κυβερνήσεις όλων των ανεπτυγμένων χωρών έχοντας υπόψη τους τις επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στη σύγχρονη εποχή, στοχεύουν μέσω της θέσπισης των προτύπων τόσο στη προστασία του καταναλωτικού κοινού και του περιβάλλοντος όσο και στη διαφύλαξη του υγιούς ανταγωνισμού μεταξύ των εταιρειών. Ένας σχεδιαστής, ο οποίος αναπτύσσει ένα σύστημα που λειτουργεί με επιτυχία όσο αφορά τις εσωτερικά παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, έχει επιπλέον χρέος να ελέγξει εάν το σύστημα λειτουργεί μέσα στα όρια που διευκρινίζονται από τα εθνικά και τα διεθνή πρότυπα. Η συμμόρφωση του συστήματος με αυτά τα όρια μπορεί να αποδειχθεί με μετρήσεις υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Σε μία τυπική περίπτωση, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, οι δοκιμές αυτές καλύπτουν εκπομπές ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής από τον ίδιο το εξοπλισμό καθώς επίσης και την ευαισθησία ή την ατρωσία του ίδιου του εξοπλισμού σε εξωτερικές παρεμβολές.[10]

Για τη λειτουργία των διαδικασιών τυποποίησης σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο έχουν συσταθεί και λειτουργούν οι παρακάτω Οργανισμοί Τυποποίησης:

- ✓ Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης-[CEN](#)
- ✓ Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης-[CENELEC](#)
- ✓ Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων -[ETSI](#)
- ✓ Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης-[ISO](#)
- ✓ Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή-[IEC](#)

Τόσο σε ευρωπαϊκό και όσο και διεθνές επίπεδο οι οργανισμοί τυποποίησης χρησιμοποιούν Τεχνικές Επιτροπές για το συντονισμό και για την εκπόνηση των προτύπων και λοιπών τυποποιητικών εγγράφων. Από ελληνικής πλευράς, ο φορέας που συμμετέχει, ελέγχει και προτείνει στη CENELEC είναι ο ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης), του οποίου οι επιτροπές απαρτίζονται από επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων.

2.8 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΘΟΡΥΒΟΣ

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ο σχεδιασμός των συσκευών και των συστημάτων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν ικανοποιητικά σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος, σε κοντινή απόσταση με τον υπόλοιπο εξοπλισμό και σε αντιστοιχία με τους κυβερνητικούς κανονισμούς για τη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Ο εξοπλισμός οφείλει δηλαδή να μην επηρεάζεται από εξωτερικές πηγές ηλεκτρομαγνητισμού καθώς επίσης και να μην αποτελεί πηγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που θα μολύνει το περιβάλλον λειτουργίας του και θα επιδρά αρνητικά σε γειτονικά κυκλώματα. Ας δούμε όμως σε αυτό το σημείο τι εννοούμε με το όρο θόρυβος και ποιες είναι οι κύριες πηγές θορύβου που κατά κύριο λόγο αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα στην ανάπτυξη ενός “μαγνητικά καθαρού” περιβάλλοντος, επηρεάζοντας δυσμενώς την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα αυτού.

Ως *θόρυβο* ορίζουμε κάθε ανεπιθύμητο είδος ενέργειας που τείνει να αναμειχθεί με το επιθυμητό σήμα κατά την διάρκεια λήψης και αναπαραγωγής του σήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για μια ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική οντότητα που δυσχεραίνει τη λειτουργία ενός συστήματος και αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα της αξιοπιστίας του. Άμεση συνέπεια της εμφάνισης θορύβου σε ένα κύκλωμα είναι τα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Ο θόρυβος βέβαια σε αντίθεση με τη παρεμβολή δεν μπορεί να εξαλειφθεί. Ωστόσο, μπορεί να μειωθεί σε τέτοιο βαθμό μέχρι του σημείου να μην προκαλεί παρεμβολές. Αν και οι πηγές θορύβου είναι πολλών ειδών, ο θόρυβος ταξινομείται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- *τεχνητός θόρυβος*: είναι ο θόρυβος που δημιουργείται από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες και προέρχεται από συσκευές ή μηχανήματα όπως διακόπτες, συστήματα ανάφλεξης κινητήρων, ηλεκτρικές συσκευές κλπ.. Η δυσμενής επίδρασή του μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με χρήση ειδικών καταστολέων θορύβου στις διάφορες συσκευές.
- *φυσικός θόρυβος*: είναι ο θόρυβος που οφείλεται στα διάφορα φυσικά φαινόμενα και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες τον ουράνιο και τον κυκλωματικό. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσεται ο θόρυβος που οφείλεται στη ηλιακή δραστηριότητα, τη γαλαξιακή ακτινοβολία και την ατμόσφαιρα. Όσο αφορά το κυκλωματικό θόρυβο οφείλεται σε δύο φαινόμενα. Αφενός, στη τυχαία κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ένα παθητικό στοιχείο ή κύκλωμα, αναπτύσσοντας έτσι το θερμικό θόρυβο και αφετέρου στην κατά τυχαίο τρόπο διακύμανση της παραγωγής φορέων σε ένα ενεργό στοιχείο δημιουργώντας το θόρυβο βολής.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, ότι οποιαδήποτε μορφή και να λάβει ο θόρυβος θα αποτελεί σχεδόν πάντα σοβαρή απειλή, για τη ομαλή λειτουργία ενός συστήματος ή μιας διάταξης καθώς δημιουργεί γόνιμο έδαφος για τη εμφάνιση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Επομένως, στη προσπάθεια ανάπτυξης ενός ‘ηλεκτρομαγνητικά καθαρού’ λειτουργικού περιβάλλοντος θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είτε αυτές βρίσκονται εσωτερικά είτε εξωτερικά σε σχέση με το σύστημα που εξετάζουμε.

2.9 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ

Στα πλαίσια έλεγχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ενός συστήματος ή ενός εξοπλισμού, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής και ικανοποιητική λειτουργία του, χωρίς όμως παράλληλα να αποτελεί πηγή μόλυνσης για το περιβάλλον του και αιτία υποβάθμισης των επιδόσεων των γειτονικών του συσκευών, γίνονται κάποιες δοκιμές σε ειδικά διαμορφωμένα EMC εργαστήρια. Το EMC Εργαστήριο έχει ως στόχο να παρέχει ένα κατάλληλο περιβάλλον για την εκτέλεση ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων, που θα δώσει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές και τους μηχανικούς, μοντελοποιώντας τις

συσκευές –εξοπλισμούς, να προσεγγίσουν τη μαγνητική τους συμπεριφορά και με κατάλληλες ενέργειες να διασφαλίσουν την υψηλή τους απόδοσή καθώς και το απαιτούμενο επίπεδο μαγνητικής καθαρότητας που θα πρέπει να χαρακτηρίζει το χώρο λειτουργίας τους. Είναι επανδρωμένο με Mobile Coil Facility (MCF) σύστημα και από ένα ειδικά προσαρμοσμένο λογισμικό για το αυτόματο μηχανισμό δημιουργίας αναλυτικής παρουσίασης των δοκιμών-μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθεί στη μοντελοποίηση της δοκιμαστικής συσκευής. Οι μετρήσεις στα EMC εργαστήρια πραγματοποιούνται κυρίως κατά τη διάρκεια του αρχικού σχεδιασμού των κυκλωμάτων, έτσι ώστε από τα πρώτα στάδια να πιστοποιείται η ηλεκτρομαγνητική τους συμβατότητα και να ελέγχεται αν λειτουργεί σύμφωνα με τα εθνικά και διεθνή πρότυπα.

2.10 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗΣ

Αναμφισβήτητα, η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ακόμη και στον τομέα της αεροδιαστημικής, είναι αιτία έντονου προβληματισμού και ανησυχίας, τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και για τους μηχανικούς, καθώς αποτελεί επιτακτική ανάγκη αφενός για τη επιτυχημένη επίτευξη των στόχων των διαστημικών αποστολών και αφετέρου για τη φυσιολογική λειτουργία των διαστημικών οχημάτων. Η ‘Μαγνητική καθαρότητα’, που είναι απόρροια της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συστημάτων θα πρέπει να χαρακτηρίζει το εσωτερικό των διαστημικών οχημάτων. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που αναπτύσσεται στο διαστημόπλοιο να μην υπερβαίνει κάποιο συγκεκριμένο κατώφλι και να μην προκαλεί ανεπιθύμητες παρεμβολές στα εγκατεστημένα συστήματα. Επειδή όμως το διαστημόπλοιο είναι εκτεθειμένο διαρκώς σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εσωτερικά από τις συσκευές με τις οποίες είναι επανδρωμένο και εκπέμπουν είτε εκούσια είτε ακούσια, αλλά και εξωτερικά εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου του διαστήματος, η δημιουργία ενός ηλεκτρομαγνητικά καθαρού διαστημόπλοιου συνθέτει συχνά ένα δύσκολο πρόβλημα για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς. Μη έγκυρη λήψη επιστημονικών δεδομένων, δυσλειτουργίες των συσκευών, υποβάθμιση της απόδοσης των συστημάτων είναι μερικές μόνο από τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η ελλιπής ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των συστημάτων στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου, που ενδεχομένως τελικά να οδηγήσει και σε μη επιτυχημένη διεξαγωγή της διαστημικής αποστολής.

Για την αποφυγή όλων των παραπάνω ανεπιθύμητων φαινομένων απαιτείται αμοιβαία συμβατότητα των συσκευών και των συστημάτων στο περιβάλλον λειτουργίας των εξοπλισμών καθώς και εφαρμογή αποτελεσματικών μεθόδων για την αντιμετώπιση του εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που επηρεάζει την λειτουργία των συστημάτων στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων.

Οι επιδράσεις που συνήθως επιφέρει ο φυσικός θόρυβος, ο οποίος προέρχεται κυρίως από τη γαλαξιακή και ηλιακή ακτινοβολία, στον εξοπλισμό και τις συσκευές του διαστημικού οχήματος είναι οι εξής:

- I. Καταστροφή των ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως είναι τα ηλιακά κελιά ή διάφορα άλλα υλικά εξαιτίας ακτινοβολιών από σωματίδια που βρίσκονται στις ζώνες ακτινοβολίας της Γης και σε ηλιακά ενεργητικά σωματίδια
- II. Μεμονωμένες επιδράσεις στα μικροηλεκτρονικά συστήματα λόγω του ιονισμού που υφίσταται ορισμένα υλικά εξαιτίας των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και των ηλιακά ενεργητικών σωματιδίων
- III. Παρεμβολές στα συστήματα καταγραφής και απεικόνισης

Γίνεται επομένως άμεσα αντιληπτό, πόσο προσεκτικοί και έμπειροι θα πρέπει να είναι οι σύγχρονοι σχεδιαστές και μηχανικοί των διαστημικών εξοπλισμών προκειμένου να σχεδιάζουν και να κατασκευάζουν συστήματα, που θα είναι εκτεθειμένα σε παρεμβολές και θα επηρεάζουν την ορθή λειτουργία τους. Επιπλέον, εκτός από τις διαταραχές που πιθανότατα θα επιφέρει ο θόρυβος του διαστήματος στο περιβάλλον λειτουργίας των συστημάτων, θα πρέπει να προβλέπουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που ενδεχομένως να προκαλέσουν οι γειτονικές συσκευές σε αυτά, διαμορφώνοντας ανάλογα το επίπεδο ατρωσίας τους και ευαισθησίας τους.

Για την εκτόξευση ενός διαστημόπλοιου και τη επιτυχημένη διεξαγωγή μιας διαστημικής αποστολής κρίνεται απαραίτητη, η ταυτόχρονη και ομαλή λειτουργία των παρακάτω συστημάτων και συσκευών που το επανδρώνουν, χωρίς όμως η παρουσία του ενός να αποτελεί πηγή παρεμβολών για το άλλο:

- **Σύστημα παραγωγής ισχύος:** πρόκειται για το τροφοδοτικό σύστημα ισχύος που δίνει ενέργεια και σε άλλα συστήματα. Παρέχεται από συσσωρευτές, ηλιακά στοιχεία ή συσκευές με πυρηνικά ισότοπα.
- **Σύστημα αυτόνομης πρόωσης:** συνίσταται από βοηθητικούς προωθητικούς πυραύλους που χρειάζονται για να μεταβάλλουν την ταχύτητα του διαστημοπλοίου. Χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν τις τροχιές των δορυφόρων, για να περιορίζουν την ταχύτητα (ανασχετικοί πύραυλοι), για να επιτυγχάνουν την επαναφορά στην ατμόσφαιρα και για να επιβραδύνουν το διαστημόπλοιο κατά την προσεδάφιση.
- **Συστήματα τηλεπικοινωνιών:** αφορά τις ραδιοηλεκτρονικές που συνδέουν το διαστημόπλοιο με τους δέκτες στη Γη. Χρησιμοποιούνται συχνότητες VHF για να μπορέσει το σήμα να διαπεράσει την ιονόσφαιρα.(100-3.000 MHz). Τα διαστημόπλοια διαθέτουν ραδιοφάρους εντοπισμού οι οποίοι εκπέμπουν συνεχώς.
- **Σύστημα ελέγχου στάσης:** πρόκειται για ένα σύστημα που στοχεύει σε δύο βασικές λειτουργίες
 - *Σταθεροποίηση:* σχετίζεται με τις εργασίες που εκτελούνται για τη διατήρηση του προσανατολισμού του διαστημοπλοίου προς μια ορισμένη διεύθυνση παρά τις αντίθετες επιδράσεις ποικίλων φυσικών δυνάμεων

- *Σκόπευση*: όπου απαιτεί από τα διαστημικά οχήματα, να στρέφουν τους αισθητήρες τους σε ένα στόχο που μπορεί να είναι ο Ήλιος, τμήματα της επιφάνειας της Γης, ένας πλανήτης ή αστέρας. Ο αναμεταδότης πρέπει να στρέφεται συνεχώς προς τη Γη στη διάρκεια της μετάδοσης.
- *Συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος*: είναι τα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τον έλεγχο των συνθηκών στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου έτσι ώστε να κυμαίνονται μέσα σε επιθυμητά όρια, λαμβάνοντας βέβαια κάθε φορά υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για να είναι δυνατή η ανθρώπινη διαβίωση στα διαστημόπλοια θα πρέπει να υπάρχει οξυγόνο για την αναπνοή και συστήματα κλιματισμού που θα απομακρύνουν τις τοξικές ουσίες και θα ελέγχουν τη θερμοκρασία και την πίεση. Τα συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος είναι υπεύθυνα για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου κλίματος επιβίωσης.
- *Σύστημα πλοήγησης και έλεγχου*: ο σκοπός του συστήματος αυτού είναι να οδηγεί το διαστημόπλοιο στην τροχιά του και να ελέγχει την ταχύτητά του.
- *Ηλεκτρονικός υπολογιστής*: αποτελεί απαραίτητο εργαλείο για τη λήψη στοιχείων προσανατολισμού και υπολογισμού πιθανών διορθωτικών μεταβολών.
- *Όργανα μετρήσεων*: πρόκειται για ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές όπως βολτόμετρα, αμπερόμετρα, θερμομέτρα και άλλα όργανα που δίνουν στοιχεία για την κατάσταση του διαστημόπλοιου. Οι αστροναύτες παρακολουθούνται από όργανα βιολογικών μετρήσεων που ελέγχουν τη φυσική τους κατάσταση.
- *Δομικό μέρος*: αποτελεί το σκελετό του διαστημοπλοίου, ο οποίος φυσικά υποστηρίζει και προφυλάσσει όλα τα επιμέρους υποσυστήματα. Τα περισσότερα διαστημόπλοια έχουν έναν κεντρικό πυρήνα και εξαρτήματα που μπορούν να ανοίξουν γύρω από αυτόν, όπως κεραίες, πτερύγια ηλιακών συσσωρευτών και εξαρτήματα για την ευστάθεια. Η όλη κατασκευή γίνεται συνήθως από αλουμίνιο ή μαγνήσιο για να είναι ελαφριά. Επιπλέον, το σχήμα του διαστημοπλοίου είναι πάντοτε συμμετρικό γύρω από έναν τουλάχιστον άξονα, ώστε να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις κατά τη διάρκεια των περιστροφών.

Ας δούμε όμως στο σημείο αυτό πιο αναλυτικά, ποιες είναι οι κύριες πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στα συστήματα του διαστημόπλοιου και με ποιους τρόπους μπορεί να μειωθεί.

Η ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων, οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη αγωγών αλλά και στην εμφάνιση μεταλλικών τμημάτων στα κουτιά που περιέχουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι αγωγοί σε ένα διαστημικό σκάφος, οι οποίοι συνήθως είναι δεμένοι μεταξύ τους σχηματίζοντας πλεξούδες (wire bundle), χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική διασύνδεση των συστημάτων και αποσκοπούν στη μεταφορά ηλεκτρονικών σημάτων, πληροφοριών και δεδομένων. Ωστόσο, μέσα από τις λειτουργίες που εκτελούν μεταφέρεται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε γειτονικούς αγωγούς ενώ παράλληλα στα σημεία που ενώνονται οι αγωγοί μεταξύ τους μέσω μεταλλικών ηλεκτρικών συνδέσμων, οι πλεξούδες έχουν την ικανότητα να

λειτουργούν είτε σαν κεραίες εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είτε σαν κεραίες λήψης, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται παρεμβολές. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξάλειψη των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών είναι η ροή μηδενικού ρεύματος σε ένα προστατευμένο, ισορροπημένο και απομονωμένο κύκλωμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη οδήγηση τόσο των αγωγών μεταφοράς σημάτων όσο και για των αγωγών μεταφοράς ισχύος, πάντα μαζί με τις επιστροφές τους. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά τους αγωγούς μεταφοράς σημάτων, πρέπει να είναι είτε ανά δύο πλεγμένοι μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ζεύγος καλωδίων (twisted pair) είτε να γίνεται χρήση ομοαξονικών καλωδίων (coaxial cables) ή θωρακισμένων με μεταλλικό πλέγμα- μπλεντάζ (shield) πλεγμένων ανά δύο αγωγών όταν πρόκειται για συστήματα επικοινωνιών. Η χρήση μη θωρακισμένων αγωγών έχει δυσμενή και ανεπιθύμητα αποτελέσματα για τα ηλεκτρονικά συστήματα. Αφαιρώντας την μεταλλική θωράκιση του ζεύγους που σχηματίζεται από τους δύο αγωγούς και διαχωρίζοντας τον αγωγό που μεταφέρει το σήμα ή την πληροφορία από τον αγωγό της επιστροφής του σε κάποια απόσταση μεταξύ τους, όχι μόνο μειώνεται η απόδοση του κυκλώματος, αλλά και το κύκλωμα πλέον γίνεται περισσότερο ευάλωτο σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία με τη σειρά τους μέσω των αγωγών μεταφέρονται στην μνήμη των επεξεργαστών, στους υπολογιστές, στα όργανα του διαστημόπλοιου καθώς και στους ελεγκτές που είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών του συνθηκών.

Αναμφίβολα δυσμενείς επιπτώσεις, επιφέρουν οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και στα συστήματα τηλεπικοινωνιών του διαστημόπλοιου, όπως ήδη έχουμε αναφέρει καθώς παράγονται διαταραχές στις οθόνες του πληρώματος με μορφή αλλοιωμένων γραφημάτων και ενδείξεων, εμφανίζονται απώλειες δεδομένων από την μνήμη των υπολογιστών πλοήγησης και οδηγούν στις χειρότερες περιπτώσεις σε διακοπή λειτουργίας διαφόρων συστημάτων. Παρόλα αυτά, η σωστή σχεδίαση των αγωγών σε συνδυασμό με τη κατάλληλη εγκατάσταση τους στο εσωτερικό του διαστημικού σκάφους, μπορεί να συντελέσουν στη αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των φαινομένων των παρεμβολών.

Συνεπώς, η ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αποτελεί τη μόνη σωτήρια λύση για τη μείωση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και τη εξάλειψη των παρεμβολών στο περιβάλλον λειτουργίας του διαστημόπλοιου. Τρεις είναι οι βασικές προϋποθέσεις που θα οδηγήσουν επιτυχώς στη δημιουργία της:

- ✓ Εγκατάσταση και χρήση ηλεκτρονικού εξοπλισμού και αγωγών που ικανοποιούν τις EMC προδιαγραφές.
- ✓ Τοποθέτηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μέσα σε κουτιά και θωράκιση των αγωγών.
- ✓ Δοκιμές και έλεγχος τόσο του ηλεκτρονικού εξοπλισμού όσο και των αγωγών ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές (EMI) σύμφωνα με τους κανονισμούς EMC.

2.11 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ(MDM) ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΔΙΑΣΤΗΜΟΠΛΟΙΩΝ

Είναι γεγονός ότι όλες οι διαδικασίες και οι έλεγχοι που εκτελούνται στο διαστημόπλοιο στα πλαίσια του προγράμματος μαγνητικής καθαρότητας παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ομαλή διεξαγωγή των διαστημικών αποστολών καθώς και στην ακριβή λήψη μετρήσεων. Κάθε υποσύστημα του διαστημικού οχήματος που φέρει μαγνητικό πεδίο, πρέπει να υποβάλλεται σε έλεγχο με τη χρήση των MCF εγκαταστάσεων στα EMC εργαστήρια πριν τη εκτόξευση έτσι ώστε να εξασφαλίζονται οι συνθήκες μαγνητικής καθαρότητας στο εσωτερικό του . Αυτό σημαίνει ότι στα σημεία τοποθέτησης των μαγνητόμετρων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δεδομένων θα πρέπει το μαγνητικό πεδίο να μην υπερβαίνει 0.1nT. Το μαγνητικά καθαρό περιβάλλον των διαστημόπλοιων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση και αναγκαία συνθήκη για την εκκίνηση των διαστημικών αποστολών καθώς η ύπαρξη του συμβάλλει στη αποφυγή και τη μείωση παρεμβολών που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις των μαγνητόμετρων. Παρόλα αυτά, σε αρκετές περιπτώσεις το μέγεθος του διαστημικού οχήματος υπερβαίνει τις διαστάσεις που μπορούν να διαχειριστούν ακόμη και οι μεγαλύτερες MCF εγκαταστάσεις που είναι διαθέσιμες σήμερα. Επιπλέον, καμία από τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις δεν έχει τη δυνατότητα να ελέγξει πειραματικά το επίπεδο μαγνητικής καθαρότητας στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου εφόσον η ανάλυση του εξοπλισμού είναι τυπικά μεγαλύτερη από 0,5 nT.

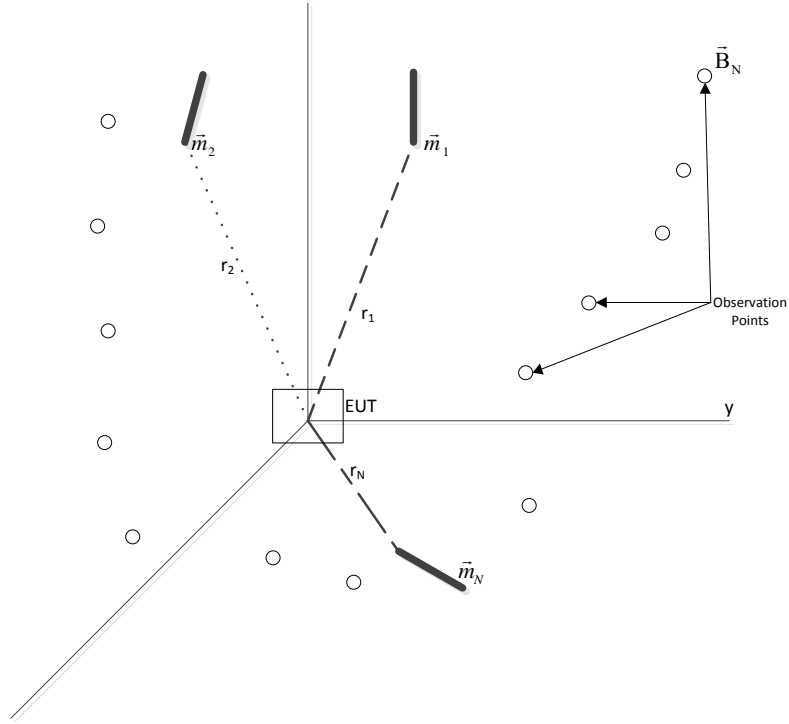
Για την αντιμετώπιση και τη αποφυγή τέτοιων φαινομένων που αναμφισβήτητα επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων και κατ' επέκταση την ορθότητα των αποτελεσμάτων των πειραματικών διαδικασιών, κρίνεται απαραίτητη η χρήση της MDMM (*Multiple Dipole Modeling Method*) μεθόδου. Σύμφωνα με τη ESTEC, η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε από τον Klaus Mehlem το 1978 και στοχεύει στη δημιουργία ενός μοντέλου διπόλων για κάθε υποσύστημα του διαστημικού οχήματος που δρα ως πηγή μαγνητικού πεδίου. Για το σχεδιασμό αυτών, αρκεί να προσδιορίσουμε τις δύο παραμέτρους του μοντέλου, δηλαδή τη θέση και τη μαγνητική ροπή των δίπολων, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις του κοντινού πεδίου (>10nT) που έχουμε ανακτήσει κατά τη διάρκεια των εδάφινων δοκιμών του διαστημόπλοιου στις MCF εγκαταστάσεις. Έπειτα, με τη χρήση των μοντέλων που δημιουργήσαμε μπορούμε να προβλέψουμε αρκετά ικανοποιητικά το μακρινό μαγνητικό πεδίο(< 0.01nT) που αναπτύσσεται γύρω από τη μονάδα του διαστημικού οχήματος που εξετάζεται κάθε φορά προσεγγίζοντας την μαγνητική του συμπεριφορά.

2.12 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ (MDM)

Κάνοντας μια αναδρομή στο παρελθόν παρατηρούμε ότι η μέθοδος MDM έχει αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο πολλών εφαρμογών όπως για παράδειγμα στη προσομοίωση ηλεκτροκαρδιογραφημάτων, στη ανάλυση του κοντινού πεδίου των κεραίων, στη αναπαράσταση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, κτλ.. Βασίζεται στο αξίωμα που υποστηρίζει ότι οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου έχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μέσω ενός πεπερασμένου συνόλου διακριτών δίπολων. Στη περίπτωση των διαστημικών οχημάτων που εξετάζουμε, τα μοντέλα των διπόλων που αναπτύσσονται μέσω της MDDM τεχνικής προσομοιώνουν τη μαγνητική συμπεριφορά των υποσυστημάτων που παράγουν μαγνητικό πεδίο και επηρεάζουν τις μετρήσεις πεδίου που λαμβάνουν τα μαγνητόμετρα. Ας περιγράψουμε όμως στο σημείο αυτό εκτενέστερα πως ακριβώς παράγονται τα σετ διπόλων και πως αξιοποιούνται για τη πρόβλεψη του μακρινού μαγνητικού πεδίου.[5]

Αρχικά, μέσω των εδάφίων δοκιμών που υφίσταται τα διαστημόπλοια πριν την εκτόξευσή τους, εντοπίζονται τα υποσυστήματα τα και τα τμήματα του εξοπλισμού τα οποία χρήζουν ιδιαίτερη προσοχή εξαιτίας των παρεμβολών που πιθανόν να προκαλέσουν στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου. Αμέσως μετά τη διερεύνηση του εσωτερικού χώρου του διαστημικού οχήματος, τα τμήματα αυτά μεταφέρονται στις MCF εγκαταστάσεις, όπου τοποθετούνται πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα για να ξεκινήσει η λήψη των μετρήσεων του κοντινού μαγνητικού πεδίου σε κυκλική τροχιά. Οι τιμές των πεδίων όπως σημειώνονται στα μαγνητόμετρα, σε σημεία γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό, συλλέγονται από το σύστημα λήψης δεδομένων των MCF για να αξιοποιηθούν στη συνέχεια στο προσδιορισμό των παραμέτρων του αντίστοιχου μοντέλου διπόλων. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, οι θέσεις και οι μαγνητικές ροπές των διπόλων αποτελούν τις βασικές παραμέτρους για τη προσέγγιση των MDM μοντέλων. Υποθέτουμε ότι η δοκιμαστική μονάδα (EUT) βρίσκεται στο σημείο (0,0,0), στο κέντρο δηλαδή του συστήματος συντεταγμένων. Η μαγνητική της συμπεριφορά μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός συνόλου μαγνητικών δίπολων, που στη περίπτωση που εξετάζουμε θεωρούμε ότι αποτελείται από δύο δίπολα.

Έστω ότι τα δίπολα αυτά είναι τοποθετημένα στις θέσεις (x_i, y_i, z_i) όπου $i=1,2$ με μαγνητικές ροπές $\vec{m}_i = m_{x_i} \hat{x} + m_{y_i} \hat{y} + m_{z_i} \hat{z}$ αντίστοιχα. Θεωρούμε $M(x_{oj}, y_{oj}, z_{oj})$ τα σημεία παρατήρησης όπου $j=1,2,\dots,36$ τα οποία είναι διατεταγμένα σε κυκλική τροχιά γύρω από το υπό δοκιμή εξοπλισμό. Τα σημεία παρατήρησης είναι συνολικά τριάντα έξι κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της πλάκας καθώς τα δείγματα λαμβάνονται κάθε 10 μίρες σε ακτίνα κύκλου 40cm.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το μαγνητικό πεδίο του i -δίπολου στο σημείο παρατήρησης j εκφράζεται ως υπέρθεση των B_x , B_y , B_z και ισοδυναμεί με

$$\vec{B}_{ij} = B_{x_{ij}}\hat{x} + B_{y_{ij}}\hat{y} + B_{z_{ij}}\hat{z} \quad (2.1)$$

$$B_{x_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(x_{oj}-x_i)}{\rho_{ij}^5} (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_{x_i}}{\rho_{ij}^3} \quad (2.2)$$

$$B_{y_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(y_{oj}-y_i)}{\rho_{ij}^5} (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_{y_i}}{\rho_{ij}^3} \quad (2.3)$$

$$B_{z_{ij}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(z_{oj}-z_i)}{\rho_{ij}^5} (L_{ij}) - \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m_{z_i}}{\rho_{ij}^3} \quad (2.4)$$

$$L_{ij} = m_{x_i}(x_{oj}-x_i)^2 + m_{y_i}(y_{oj}-y_i)^2 + m_{z_i}(z_{oj}-z_i)^2 \quad (2.5)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{(x_{oj}-x_i)^2 + (y_{oj}-y_i)^2 + (z_{oj}-z_i)^2} \quad (2.6)$$

και όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης j δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\vec{B}_{ij} = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}x_{ij} \hat{x} + \sum_{i=1}^N \mathbf{B}y_{ij} \hat{y} + \sum_{i=1}^N \mathbf{B}z_{ij} \hat{z} \quad (2.7)$$

Μόλις ολοκληρωθεί η λήψη των μετρήσεων του συνολικού μαγνητικού πεδίου και για τα τριάντα έξι σημεία παρατήρησης γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό στις ειδικά διαμορφωμένες (MCF) εγκαταστάσεις, ξεκινάει η διαδικασία μοντελοποίησης MDM της συσκευής, που θα αποσκοπεί στη εύρεση του μοντέλου διπόλων, το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του οποίου θα προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά το πεδίο που είχε προηγουμένως μετρηθεί. Αναζητούνται επομένως στη ουσία οι κατάλληλες συντεταγμένες των θέσεων που θα πρέπει να τοποθετηθούν τα δίπολα του μοντέλου καθώς και οι κατάλληλες τιμές των συνιστωσών των μαγνητικών ροπών που θα πρέπει να τα χαρακτηρίζουν. Για τη εύρεση των παραμέτρων του βέλτιστου μοντέλου διπόλων, που θα προσομοιώνει με το καλύτερο δυνατό τρόπο τη μαγνητική συμπεριφορά των υποσυστημάτων του διαστημικού οχήματος που χρήζουν ιδιαίτερη προσοχή λόγω του μαγνητικού πεδίου που παράγουν στο εσωτερικό του, χρησιμοποιείται όπως ήδη έχουμε αναφέρει η στοχαστική μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ανήκουν στη κατηγορία των **εξελικτικών αλγορίθμων** και αποτελούν τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης που έχουν προέλευση και έμπνευση από τον κόσμο της βιολογίας. Εκτενής και αναλυτική περιγραφή της εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων για τη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που αφορά τον προσδιορισμό των μαγνητικών ροπών και θέσεων του βέλτιστου σετ διπόλων παρατίθεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΙ MULTIPLE DIPOLE MODEL (MDM)

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις πιο θεμελιώδεις αρχές στο σύγχρονο κόσμο είναι η αναζήτηση μιας βέλτιστης κατάστασης. Τα προβλήματα της βελτιστοποίησης θεωρούνται πολύ σημαντικά τόσο για τις επιστήμες της Φυσικής ή των Μαθηματικών, όσο και για τις Εφαρμοσμένες Επιστήμες και ιδιαίτερα των Μηχανικών. Παρουσιάζεται λοιπόν η ανάγκη της εύρεσης μιας μεθόδου που να βοηθά το μελετητή να καταλήξει στην καλύτερη δυνατή λύση του ζητήματος που τον απασχολεί. Υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων για την εύρεση της βέλτιστης λύσης κάθε μια από τις οποίες έχει τη δική της πολυπλοκότητα και ταχύτητα σύγκλισης. Οι βασικότερες μέθοδοι βελτιστοποίησης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- I. *Μαθηματικές τεχνικές (ντετερμινιστικές μέθοδοι):* Αντλούν πληροφορίες από τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης με στόχο τον εντοπισμό σημείων τοπικού ελαχίστου. Οι μαθηματικές μέθοδοι προέρχονται από τις επιστημονικές περιοχές των οικονομικών μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και ήταν οι πρώτες που εφαρμόστηκαν σε προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών. π.χ. μη-γραμμικός προγραμματισμός, τετραγωνικός προγραμματισμός, SQP, κ.ά.
- II. *Στοχαστικές μέθοδοι:* Χρησιμοποιούνται για την ανάλυση προβλημάτων τυχαίων μεταβλητών με γνωστή κατανομή. Κατηγορία αυτών αποτελούν οι Εξελικτικές ή Δαρβίνειες μέθόδους που είναι τεχνικές βασισμένες σε τυχαίες διαδικασίες δειγματοληψίας που προσομοιώνουν γενετικές διεργασίες και πρότυπα για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης π.χ γενετικοί αλγόριθμοι, μέθοδος simplex
- III. *Στατιστικές μέθοδοι:* Χρησιμοποιούνται για την δημιουργία εμπειρικών μοντέλων από πειραματικά στοιχεία ώστε να επιτευχθεί ακριβέστερη αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος. Π.χ. Regression analysis

Στη παρούσα διπλωματική, η μέθοδος βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί για τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων, που θα προσομοιώνει με το καλύτερο δυνατό τρόπο τη μαγνητική συμπεριφορά της δοκιμαστικής μονάδας, ανήκει στη κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων. Οι στοχαστικές μέθοδοι (stochastic methods) βασίζονται στην συγκροτημένα τυχαία αναζήτηση νέων λύσεων, καλύτερων ως προς την υπάρχουσα, που τελικά οδηγεί στη βέλτιστη. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν εγκλωβίζονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα αλλά έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν την περιοχή της ολικά βέλτιστης λύσης, συνήθως μετά από ένα μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης. Ακριβώς λόγω της ικανότητας απεγκλωβισμού τους από τις περιοχές των τοπικών βέλτιστων, προτιμούνται για την επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το μοναδικό τους μειονέκτημα είναι ότι συχνά έχουν

αυξημένο υπολογιστικό κόστος (συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης), καθώς δεν μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού. Βασικός αντιπρόσωπος των στοχαστικών μεθόδων, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι οι *εξελικτικοί αλγόριθμοι*.

Οι *εξελικτικοί αλγόριθμοι* αποτελούν τεχνικές αναζήτησης και βελτιστοποίησης που έχουν προέλευση και έμπνευση από τον κόσμο της βιολογίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν την ιδέα της φυσικής επιλογής και της επιβίωσης του καλύτερου, όπως την είχε ορίσει ο Δαρβίνος. Μιμούνται τις φυσικές διαδικασίες της επιλογής ή αναπαραγωγής (selection, reproduction), της μετάλλαξης (mutation) και της διασταύρωσης (crossover), προκειμένου να βρουν, πιο σύντομα τις βέλτιστες λύσεις στα προβλήματα. Οι υποψήφιες λύσεις έχουν το ρόλο των ατόμων (individuals) ενός πληθυσμού και η συνάρτηση ικανότητας (fitness function) καθορίζει το περιβάλλον μέσα στο οποίο θα βρίσκονται. Η εξέλιξη του πληθυσμού λαμβάνει χώρα μετά την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή αυτών των τελεστών.

Ο όρος *εξελικτικοί αλγόριθμοι* είναι πολύ γενικός και εμπεριέχει σχετιζόμενες αλλά όχι ίδιες μεταξύ τους μεθοδολογίες. Ωστόσο, κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεθόδων είναι ότι εκμεταλλεύονται ιδέες από τη φυσική εξέλιξη και επιλογή. Η πιο χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι οι *Γενετικοί Αλγόριθμοι*, στους οποίους θα αναφερθούμε εκτενέστερα, καθώς ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ως μέρος της διπλωματικής εργασίας ανήκει σε αυτή τη κατηγορία των *εξελικτικών αλγορίθμων*. [8]

3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η εισαγωγή των γενετικών αλγορίθμων στη κατηγορία των μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, έγινε το 1958 από τον *Friedberg*, ο οποίος επιχείρησε να συνδυάσει μικρά προγράμματα FORTRAN. Παρόλα αυτά, οι αλγόριθμοι που προέκυπταν τις περισσότερες φορές δεν ήταν εκτελέσιμοι. Τελικά οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland την δεκαετία του 1960 και αναπτύχθηκαν από τους φοιτητές του και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan.

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Η ορολογία για την περιγραφή των δομικών στοιχείων του γενετικού αλγορίθμου είναι δανεισμένη από το χώρο της γενετικής. Συγκεκριμένα, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αναφέρονται στην έννοια του *πληθυσμού*, ο οποίος αποτελείται από *άτομα* (individuals) ή γενότυπους. Κάθε άτομο αποτελείται από *χρωμοσώματα*. Σε αυτή τη κατηγορία αλγορίθμων, τα άτομα αποτελούνται από ένα χρωμόσωμα, οπότε οι δύο έννοιες θεωρούμε ότι ταυτίζονται. Τα άτομα αποτελούν τις υποψήφιες λύσεις για το πρόβλημα που εξετάζεται και η δομή τους περιγράφεται σαν μια διατεταγμένη γραμμική ακολουθία *γονιδίων*, τα

οποία ορίζουν τα γενετικά χαρακτηριστικά. Μέσω των *γονιδίων* γίνεται η μεταβίβαση των χαρακτηριστικών ενός ατόμου στους απογόνους του. Για την αναπαράσταση της πληροφορίας των ατόμων χρησιμοποιείται κατά κύρια βάση η δυαδική αναπαράσταση. Το χρωμόσωμα, που αποτελεί ουσιαστικά μια υποψήφια λύση του προβλήματος κωδικοποιείται τις περισσότερες φορές ως μια ακολουθία από δυαδικά ψηφία. Τα *γονίδια* αντιστοιχούν είτε σε μεμονωμένα δυαδικά ψηφία είτε σε μια ομάδα δυαδικών ψηφίων αν ορίζεται έτσι η κωδικοποίηση των μεταβλητών του προβλήματος. Η απεικόνιση της υποψήφιας λύσης, γίνεται μέσω του *φαινότυπου*, ο οποίος αποτελεί την πραγματική αναπαράσταση της λύσης στο χώρο αναζήτησης και προκύπτει μέσω της αποκωδικοποίησης της δυαδικής συμβολοσειράς του ατόμου. Ο φαινότυπος, απεικονίζει ουσιαστικά το μεταφρασμένο περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος και με βάση την τιμή του γίνεται η αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων.

Ο γενετικός αλγόριθμος ξεκινά την αναζήτηση με ένα τυχαίο πληθυσμό ατόμων. Αρχικά, αντιστοιχίζεται μια τιμή συνάρτησης ικανότητας (*fitness*) σε κάθε άτομο. Η *συνάρτηση ικανότητας* αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία σύνδεσης των γενετικών αλγορίθμων με το πρόβλημα. Παίρνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά, το φαινότυπο δηλαδή του αντίστοιχου χρωμοσώματος και επιστρέφει μια τιμή (συνήθως πραγματική), που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα η συγκεκριμένη συμβολοσειρά. Η τιμή αυτή αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου. Επομένως, για κάθε άτομο-πιθανή λύση που αντιστοιχίζεται μια *τιμή ικανότητας* ή *απόδοσης* (*fitness* ή *score*), αξιολογείται για το πόσο καλή είναι η λύση όσο αφορά τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης και κατ' επέκταση για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται μόλις αξιολογηθούν όλα τα άτομα του πληθυσμού.

Έκτοτε, τη σκυτάλη παίρνει η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ που είναι η αναπαραγωγή του πληθυσμού. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας περιλαμβάνει τη *διασταύρωση* και τη *μετάλλαξη*, ενώ λίγο πριν εκτελείται η διαδικασία της *επιλογής*. Μέσω της επιλογής, καθορίζεται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της διαδικασίας της επιλογής είναι να επιτρέψει την εκθετική αύξηση των ικανότερων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών, την επικράτησή τους. Μόλις επιλεχθεί ο "καλύτερος" πληθυσμός ξεκινάει η διαδικασία του ζευγαρώματος για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Με τον τρόπο αυτό διαιρείται ο πληθυσμός που έχει προκύψει από την επιλογή, με τυχαίο τρόπο σε ομάδες των δύο όπου σε κάθε ομάδα τα δύο μέλη παίρνουν μέρος σε μια απλή λειτουργία ανταλλαγής γενετικού υλικού, θέτοντας έτσι τη διαδικασία της διασταύρωσης σε εφαρμογή. Στόχος της διασταύρωσης είναι η νέα γενιά που θα προκύψει με τη λειτουργία της, να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Παράλληλα όμως, ενεργεί και η διαδικασία της μετάλλαξης. Πρόκειται για τη τελευταία λειτουργία στον

κύκλο της αναπαραγωγικής διαδικασίας αλλά εξίσου χρήσιμη με τις υπόλοιπες καθώς λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Πιο συγκεκριμένα, η μετάλλαξη δρα βελτιωτικά στο πληθυσμό μέσω κάποιων αλλαγών που προκαλεί στη δυαδική αναπαράσταση των ατόμων καθώς μεταβιβάζουν τα χαρακτηριστικά τους στους απογόνους τους.

Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι ο πληθυσμός τροποποιείται κάθε φορά από τρεις βασικούς τελεστές (τελεστής επιλογής, μετάλλαξης και διασταύρωσης) ενώ ένας νέος, πιθανόν καλύτερος πληθυσμός δημιουργείται. Αυτός ο κύκλος του αλγορίθμου ονομάζεται γενιά (generation). Υπάρχουν διάφορα κριτήρια τερματισμού του γενετικού αλγορίθμου:

- A. Ο μέγιστος αριθμός των γενεών. Επιλέγοντας εκ των προτέρων το μέγιστο αριθμό γενιών, ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να σταματήσει μόλις ο αριθμός αυτός συμπληρωθεί.
- B. Η μέγιστη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Μπορούμε να εξετάζουμε σε κάθε γενιά τη μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness) του πληθυσμού και ο αλγόριθμος να σταματήσει μόλις προσεγγίσει τη ζητούμενη τιμή.
- C. Τέλος, μπορούμε να θέσουμε εξαρχής το χρονικό διάστημα για το οποίο θα τρέχει ο αλγόριθμος.

Ας δούμε όμως στο σημείο αυτό απεριθμημένα τα βήματα που καθορίζουν τη λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου.

Βήμα 1: Τυχαία αρχικοποίηση των μελών του αρχικού πληθυσμού.

Βήμα 2: Αξιολόγηση κάθε μέλους με βάση τη δοθείσα συνάρτηση αξιολόγησης καταλληλότητας.

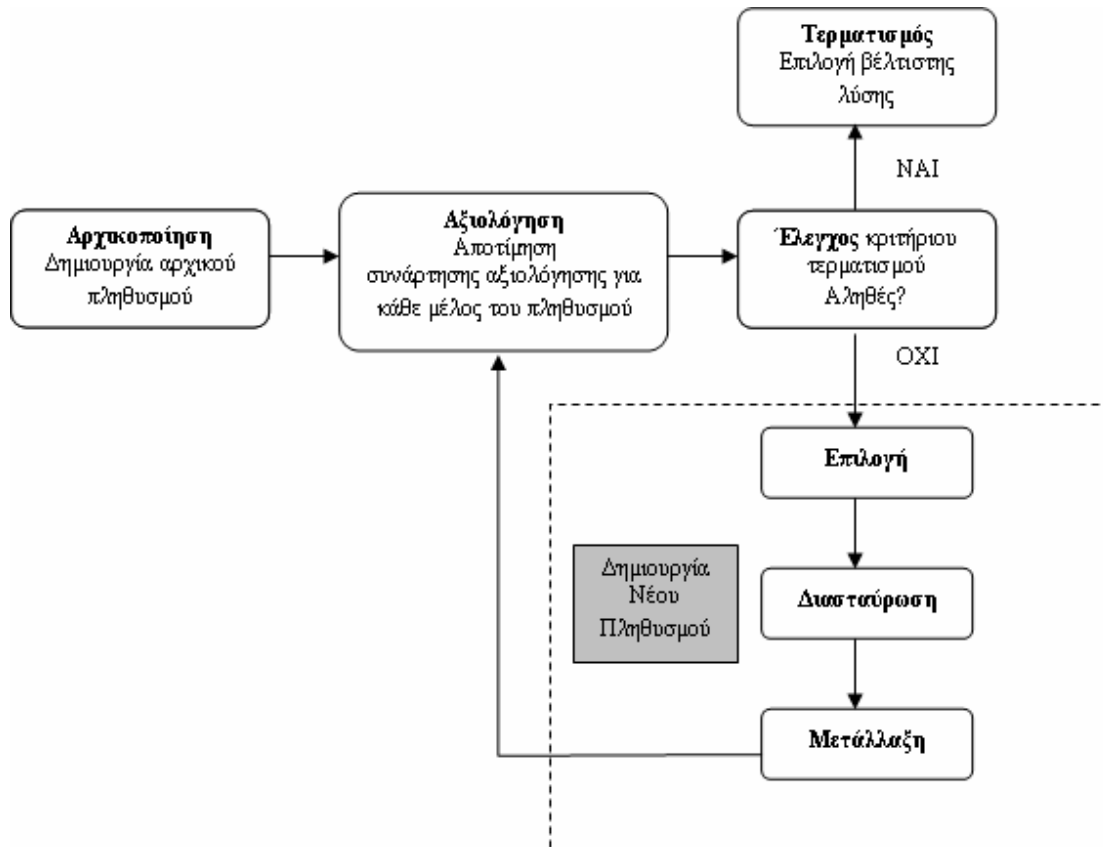
Βήμα 3: Εφαρμογή της διαδικασίας της επιλογής για κάθε μέλος του τρέχοντος πληθυσμού. Άτομα με μεγάλη τιμή στη συνάρτηση καταλληλότητας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν.

Βήμα 4: Εφαρμογή της διαδικασίας της διασταύρωσης για κάποια μέλη του πληθυσμού με βάση την καθορισμένη πιθανότητα διασταύρωσης.

Βήμα 5: Εφαρμογή της διαδικασίας της μετάλλαξης για κάποια γονίδια των μελών του πληθυσμού με βάση την καθορισμένη πιθανότητα μετάλλαξης.

Βήμα 6: Επιστροφή στο βήμα 2 και έλεγχος κριτηρίου τερματισμού. Εάν δεν ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 2.

Στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί αποτυπώνονται διαγραμματικά τα παραπάνω βήματα:



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση λειτουργίας του Γενετικού Αλγόριθμου

3.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ΓΑ, που τους καθιστούν σε διάφορες εφαρμογές τη πιο ελκυστική και αποτελεσματική μέθοδο βελτιστοποίησης είναι τα ακόλουθα: [7]

- Μπορούν να λύσουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα.

- Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι.
- Μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους
- Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο.
- Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.
- Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας.
- Είναι η μόνη μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.
- Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού

3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ(MDM)

Η μέθοδος βελτιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων αποτελεί βασικό και απαραίτητο εργαλείο για τη διεκπεραίωση του πρώτου μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που μελετά τη διαδικασία μοντελοποίησης MDM ενός εξοπλισμού, που χρήζει ιδιαίτερη προσοχή λόγω του μαγνητικού πεδίου που παράγει καθώς και για την ανάλυση του δεύτερου ζητήματος που θα εξετάσουμε, και αφορά την αβεβαιότητα που εισάγεται στο παραγόμενο μοντέλο εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης του εξοπλισμού στις ειδικά διαμορφωμένες (MCF) Mobile Coil Facilities εγκαταστάσεις. Για τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων, που θα προσεγγίζει το μαγνητικό πεδίο της εκάστοτε συσκευής που εξετάζεται καθώς αποτελεί πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο περιβάλλον λειτουργίας της, απαιτείται ο προσδιορισμός των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του, δηλαδή των θέσεων και των μαγνητικών ροπών του. Προκύπτει έτσι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπου η στοχαστική μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων καλείται να δώσει ή έστω να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση.

3.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ(MDM)

Γενικά, απαραίτητη προϋπόθεση για οποιαδήποτε μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται από το χρήστη στα πλαίσια αναζήτησης του βέλτιστου μοντέλου που θα προσομοιώνει με ακρίβεια τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού δοκιμίου είναι η λήψη μετρήσεων πεδίου σε διάφορα σημεία παρατήρησης, γύρω από αυτό, στις ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις (MCF). Κρίνεται προφανώς αναγκαίο, να έχει προηγηθεί η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση του εξοπλισμού πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα έτσι ώστε οι μετρήσεις που θα ληφθούν να είναι έγκυρες και ακριβείς.

Ωστόσο, στη παρούσα διπλωματική εργασία λόγω αδυναμίας λήψης τέτοιων πραγματικών μετρήσεων, δημιουργούνται σετ μετρήσεων που στη συνέχεια θα αποτελέσουν δεδομένα της μεθόδου βελτιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων, η οποία θα αξιοποιηθεί για τη εύρεση του ιδανικού μοντέλου διπόλων.

Ας δούμε όμως πως προκύπτουν αυτά τα σετ μετρήσεων:

I. Δημιουργία σετ μετρήσεων θεωρητικού μαγνητικού πεδίου

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας για τη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αναπτύσσονται αλγόριθμοι μέσω των οποίων παράγονται σετ μετρήσεων μαγνητικού πεδίου, καθώς δεν είναι εφικτό όπως αναφέρθηκε να ληφθούν μετρήσεις πεδίου γύρω από τη δοκιμαστική συσκευή σε (MCF) *Mobile Coil Facilities* εγκαταστάσεις, υπό πραγματικές συνθήκες. Πιο αναλυτικά, για τη δημιουργία αυτών των σετ μετρήσεων ο διαχειριστής με τη χρήση ενός αλγορίθμου, ορίζει αρχικά ένα θεωρητικό μοντέλο επιλέγοντας τις αρχικές τιμές των συντεταγμένων x, y, z των θέσεων και των συνιστωσών m_x, m_y, m_z των μαγνητικών ροπών των διπόλων που το συγκροτούν. Έπειτα, μέσω του ίδιου αλγορίθμου, καλώντας μία συνάρτηση, υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_{th} του θεωρητικού αυτού μοντέλου που ουσιαστικά αποτελεί και το σετ των διπόλων το οποίο θα επιδιώξει εν τέλει να προσεγγίσει. Αναλυτική περιγραφή της συνάρτησης που καλείται καθώς και των εντολών που εμπεριέχει και χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό του πεδίου παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

II. Δημιουργία σετ μετρήσεων μαγνητικού πεδίου που παράγει το μοντέλο με τα μετατοπισμένα δίπολα

Στη συνέχεια, με τη χρήση κατάλληλων εντολών, που είχε εισάγει στον ήδη χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο, αλλάζει τις θέσεις των διπόλων, μεταβάλλοντας τις συντεταγμένες κατά μέγιστο 0,1mm τυχαία στο χώρο ενώ παράλληλα διατηρεί σταθερές τις μαγνητικές τους ροπές. Έτσι, κάνοντας ξανά κλήση της ίδιας συνάρτησης με πριν, προσδιορίζει το νέο μαγνητικό πεδίο \mathbf{TBc} που παράγει το μοντέλο, το οποίο βέβαια διαφέρει από αυτό του θεωρητικού καθώς εμπεριέχει κάποιο ποσοστό σφάλματος (displacement error). Το μαγνητικό πεδίο που παράγει το μοντέλο με τα μετατοπισμένα δίπολα αποτελεί στην ουσία το παραγόμενο σετ μετρήσεων πεδίου, το οποίο θα ληφθεί αργότερα ως είσοδος κατά την εκτέλεση της μεθόδου βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων.

Οι μεταβολές των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων του μοντέλου στο χώρο και οι αντίστοιχες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου \mathbf{TBc} , που παράγονται δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει και να μελετήσει την αβεβαιότητα ενός μοντέλου διπόλων (MDM) που θα προσομοιώνει τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, επειδή δεν είναι εφικτό να ληφθούν πραγματικές μετρήσεις γύρω από τη συσκευή σε *Mobile Coil Facilities* εγκαταστάσεις και ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια και τη αξιοπιστία του μοντέλου είναι η σωστή τοποθέτηση του δοκιμαστικού εξοπλισμού πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα αυτών των ειδικά διαμορφωμένων εγκαταστάσεων, επιδιώκουμε με τη αλλαγή των συντεταγμένων των διπόλων να δημιουργήσουμε σετ μετρήσεων μαγνητικού πεδίου που θα αντιστοιχούν σε μετρήσεις πεδίου τις οποίες θα λαμβάναμε στη περίπτωση που το δοκίμιο δεν είχε

τοποθετηθεί και ευθυγραμμιστεί σωστά πάνω στη πλάκα. Έτσι, κάνοντας μετέπειτα μια στατιστική ανάλυση των μετρήσεων αυτών, μπορούμε να μελετήσουμε το βαθμό με τον οποίο συμβάλει η μη ακριβής τοποθέτηση των διπόλων στο χώρο και κατ' επέκταση η μη ακριβής τοποθέτηση του δοκιμίου στις (MCF) Mobile Coil Facilities εγκαταστάσεις στη συνολική αβεβαιότητα του μοντέλου (*EUT Displacement Uncertainty*).

Περιγραφή συνάρτησης

Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε νωρίτερα, αποτελείται βασικά από ένα σύνολο εντολών που δέχεται ως είσοδο τις θέσεις και τις μαγνητικές ροπές των διπόλων και επιστρέφει τη ένταση του συνολικού μαγνητικού πεδίου στα τριάντα έξι σημεία παρατήρησης που έχουν οριστεί κυκλικά γύρω από το μοντέλο διπόλων. Μέσω αυτής της συνάρτησης υπολογίζεται τόσο το μαγνητικό πεδίο του θεωρητικού μοντέλου όσο και το πεδίο που παράγει το μοντέλο, του οποίου τα δίπολα έχουν υποστεί μικρές αλλαγές στις συντεταγμένες των θέσεων τους. Το πεδίο που δημιουργεί το μοντέλο των μετατοπισμένων διπόλων είναι ουσιαστικά το πεδίο του θεωρητικού μοντέλου με ένα προκαθορισμένο ποσοστό σφάλματος (*displacement error*), το οποίο αυξάνεται όσο αποκλίνουμε από τις θέσεις των διπόλων που είχε επιλέξει αρχικά ο χρήστης. Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου γίνεται χρήση των εξισώσεων Maxwell, που ισοδυναμούν με τους τύπους (2.1 έως και 2.7), οι οποίοι έχουν περιγραφεί εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο.

III. Περιγραφή αντικειμενικής συνάρτησης και εύρεση βέλτιστου μοντέλου

Στόχος μας γενικότερα είναι να υπολογίσουμε ένα μοντέλο διπόλων, του οποίου το μαγνητικό πεδίο \mathbf{TB} θα προσεγγίζει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το μαγνητικό πεδίο \mathbf{TB}_e που παράγει το μοντέλο με τα μετατοπισμένα δίπολα. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της στοχαστικής μεθόδου βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι ουσιαστικά θα δίνουν σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου τυχαίες τιμές στις θέσεις των διπόλων, εντός φυσικά κάποιων ορίων $[-\rho, \rho]$ που θα έχουν προσδιοριστεί από το χρήστη (όπου ρ η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς γύρω από το δοκιμαστικό εξοπλισμό πάνω στην οποία βρίσκονται τα σημεία παρατήρησης) και λαμβάνοντας ως είσοδο κάποιες από τις τιμές του μαγνητικού πεδίου \mathbf{TB}_e που θα επιλέγονται κάθε φορά τυχαία από το ίδιο αλγόριθμο, θα τείνουν να συγκλίνουν στο βέλτιστο μοντέλο. Βέλτιστο θα θεωρηθεί εκείνο το μοντέλο, που θα παράγει μαγνητικό πεδίο \mathbf{TB} το οποίο θα ελαχιστοποιεί τη παρακάτω συνάρτηση

$$\mathbf{F} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\mathbf{TB}_{ij} - \mathbf{TB}_{eij})^2}{N}} \quad (3.1)$$

όπου $N=1,2,..,n$ ο αριθμός των διπόλων και $M =1,....,36$ ο αριθμός των σημείων παρατήρησης, η οποία ορίζεται και ως το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ του

υπολογίσιμου και του 'πειραγμένου' μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς αντικειμενική συνάρτηση.

3.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (MDM)

Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά στο σημείο αυτό πως ακριβώς λειτουργεί ο γενετικός αλγόριθμος προκειμένου να οδηγηθεί στη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου.

Αρχικά, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλέγει τυχαία τις τιμές για τις συντεταγμένες x, y, z των θέσεων των διπόλων, που θα πρέπει βέβαια να είναι εντός κάποιων επιτρεπτών ορίων $[-\rho, \rho]$ τα οποία όπως αναφέραμε ορίζονται από τον ίδιο το χρήστη. Έπειτα, έχοντας ως δεδομένα τις συντεταγμένες των θέσεων αυτών και λαμβάνοντας τυχαία κάποιες τιμές από το πεδίο **T_{Bc}** (το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το αριθμό των διπόλων που θα συγκροτούν το μοντέλο), προκύπτει ένα σύστημα από εξισώσεις του Maxwell, οι λύσεις του οποίου θα ισοδυναμούν με τις μαγνητικές ροπές του μοντέλου. Στη συνέχεια με τις τιμές m_x, m_y, m_z συνιστωσών των ροπών των διπόλων που θα προσδιοριστούν από τη επίλυση του συστήματος και των συντεταγμένων που είχε επιλέξει ο γενετικός αλγόριθμος στη αρχή της διαδικασίας, υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο του μοντέλου **T_B** με τη χρήση των τύπων (από 2.1 έως 2.7) που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας θα γίνεται, μέχρις ότου κριθεί ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει προκύψει με τη τυχαία επιλογή των τιμών του πεδίου **T_{Bc}** από τους γενετικούς αλγόριθμους και των τιμών του μαγνητικού πεδίου **T_B** που υπολογίστηκαν, δεν μπορεί να ελαχιστοποιηθεί περισσότερο και τείνει να εκμηδενιστεί.

Επομένως σε κάθε επανάληψη του γενετικού αλγόριθμου, θα επιλέγεται μια καινούρια είσοδος από τις τιμές του πεδίου **T_{Bc}** και θα δίνονται καινούριες τιμές για τις συντεταγμένες των θέσεων των διπόλων σχηματίζοντας έτσι νέες γενεές που θα αντιστοιχούν σε σετ διπόλων με διαφορετικές παραμέτρους (θέσεις) και με διαφορετικό παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, αναζητώντας εκείνο το πεδίο **T_B** το οποίο θα αποκλίνει λιγότερο από το **T_{Bc}** πεδίο. Προφανώς, όσο περισσότερο συγκλίνουν οι τιμές των παραμέτρων του βέλτιστου μοντέλου που θα προσδιοριστεί εν τέλει μέσω της μεθόδου βελτιστοποίησης, στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα τόσο πιο ακριβές θα είναι το μοντέλο που δημιουργήσαμε και τόσο μικρότερη θα είναι η αβεβαιότητα σχετικά με το μαγνητικό πεδίο που παράγει η δοκιμαστική συσκευή. Αυτό συμβαίνει διότι προσεγγίζοντας το πεδίο **T_{Bc}** (το θεωρητικό δηλαδή πεδίο με κάποιο ποσοστό σφάλματος που εισάγεται στις μετρήσεις εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης του δοκιμίου) μέσω της χρήσης του βέλτιστου μοντέλου, προσεγγίζεται και κατ' επέκταση το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο που παράγει το μοντέλο που είχε ορίσει εξ αρχής ο χρήστης.

3.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η προσέγγιση του μαγνητικού πεδίου που παράγει μια συσκευή μέσω ενός σετ διπόλων, αναμφίβολα συντελεί στη αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση φαινομένων παρεμβολών και στη δημιουργία ενός μαγνητικά καθαρού λειτουργικού περιβάλλοντος, αρκεί το μοντέλο να είναι το κατάλληλο και όσο το δυνατόν πιο ακριβές.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, με τη χρήση της στοχαστικής μεθόδου βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων και την αξιοποίηση των τιμών του μαγνητικού πεδίου που θα υπολογίζουμε από τις εξισώσεις του Maxwell (2.1-2.7), αποσκοπούμε στη προσομοίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς μιας οποιαδήποτε συσκευής μέσω ενός μοντέλου δύο διπόλων, η οποία κατά τη λειτουργία της μπορεί να αποτελέσει πηγή μόλυνσης και διαταραχών για την ομαλή λειτουργία των γειτονικών της εξοπλισμών. Παράλληλα, όμως μελετάμε και την επίδραση της κακής τοποθέτησης του δοκιμίου στην διαδικασία μοντελοποίησης MDM καθώς και το κατά πόσο ο παράγοντας αυτός συμβάλλει στη συνολική αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το μοντέλο.

Η πειραματική διαδικασία που εκτελέστηκε στα πλαίσια της εργασίας αφορούσε τρία διαφορετικά σετ των δύο διπόλων, οι θεωρητικές τιμές των θέσεων και των μαγνητικών ροπών των οποίων επιλέχθηκαν τυχαία από εμάς στη πρώτη φάση του πειράματος. Έπειτα, ακολούθησε ο υπολογισμός του θεωρητικού μαγνητικού πεδίου και η δημιουργία των σετ μετρήσεων του θεωρητικού μαγνητικού πεδίου έχοντας εισάγει όμως κάποιο ποσοστό σφάλματος (displacement error), όπως ακριβώς περιεγράφηκαν στη προηγούμενη υποενότητα. Στη προσπάθεια μας, ουσιαστικά να μελετήσουμε τη αβεβαιότητα του μοντέλου εξαιτίας της επίδρασης της κακής τοποθέτησης του δοκιμίου εισήγαμε στο θεωρητικό μαγνητικό πεδίο B_{th} ένα μη καθορισμένο ποσοστό σφάλματος (displacement error), που αναμφίβολα θα παρουσιαζόταν στις μετρήσεις πεδίου υπό πραγματικές συνθήκες, το οποίο επιτυγχάναμε μέσω της αλλαγής των παραμέτρων του αντίστοιχου θεωρητικού μοντέλου και της παραγωγής των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα.

Το παραγόμενο αυτό πεδίο, το οποίο επιδιώκουμε να προσεγγίσουμε μέσω της μεθόδου των Γενετικών αλγορίθμων, αντιστοιχεί σε τριάντα έξι σημεία παρατήρησης κυκλικά γύρω από τις θέσεις των διπόλων, με ακτίνα 40cm.

Παρακάτω αριθμούνται τα βήματα που εκτελέστηκαν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης για τον εντοπισμό του ιδανικού-βέλτιστου μοντέλου:

- I. Αρχικά, ο γενετικός αλγόριθμος επιλέγει ως είσοδο τιμές από το συνολικό μαγνητικό πεδίο T_{Bc} που είχαμε παράγει για δύο τυχαία σημεία παρατήρησης, $T_{Bc_1}, T_{Bc_2} (chp)$ και αποδίδει στις θέσεις των δύο διπόλων του μοντέλου που

αναζητούμε κάποιες τυχαίες συντεταγμένες (x_1, y_1, z_1) και (x_1, y_2, z_2) αντίστοιχα. Καλείται επομένως, να δώσει τιμές σε οκτώ μεταβλητές συνολικά. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το πλήθος των μεταβλητών αυτών μεγαλώνει, όσο αυξάνεται το πλήθος των διπόλων που συγκροτούν το μοντέλο που επιδιώκουμε να υπολογίσουμε. Στα πλαίσια της πειραματική διαδικασίας που ακολουθούμε το μοντέλο που πρόκειται να προσομοιώνει τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμίου θα αποτελείται από δύο δίπολα, γεγονός που σημαίνει ότι χρειάζονται εκτός από τις έξι μεταβλητές για τις θέσεις των διπόλων και άλλες δύο, που θα αντιστοιχεί μία για κάθε δίπολο και οι τιμές τους θα ισοδυναμούν με το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο **TBc**, δύο διαφορετικών σημείων. Για αυτό όπως αναφέραμε έχουμε συνολικά οκτώ μεταβλητές.

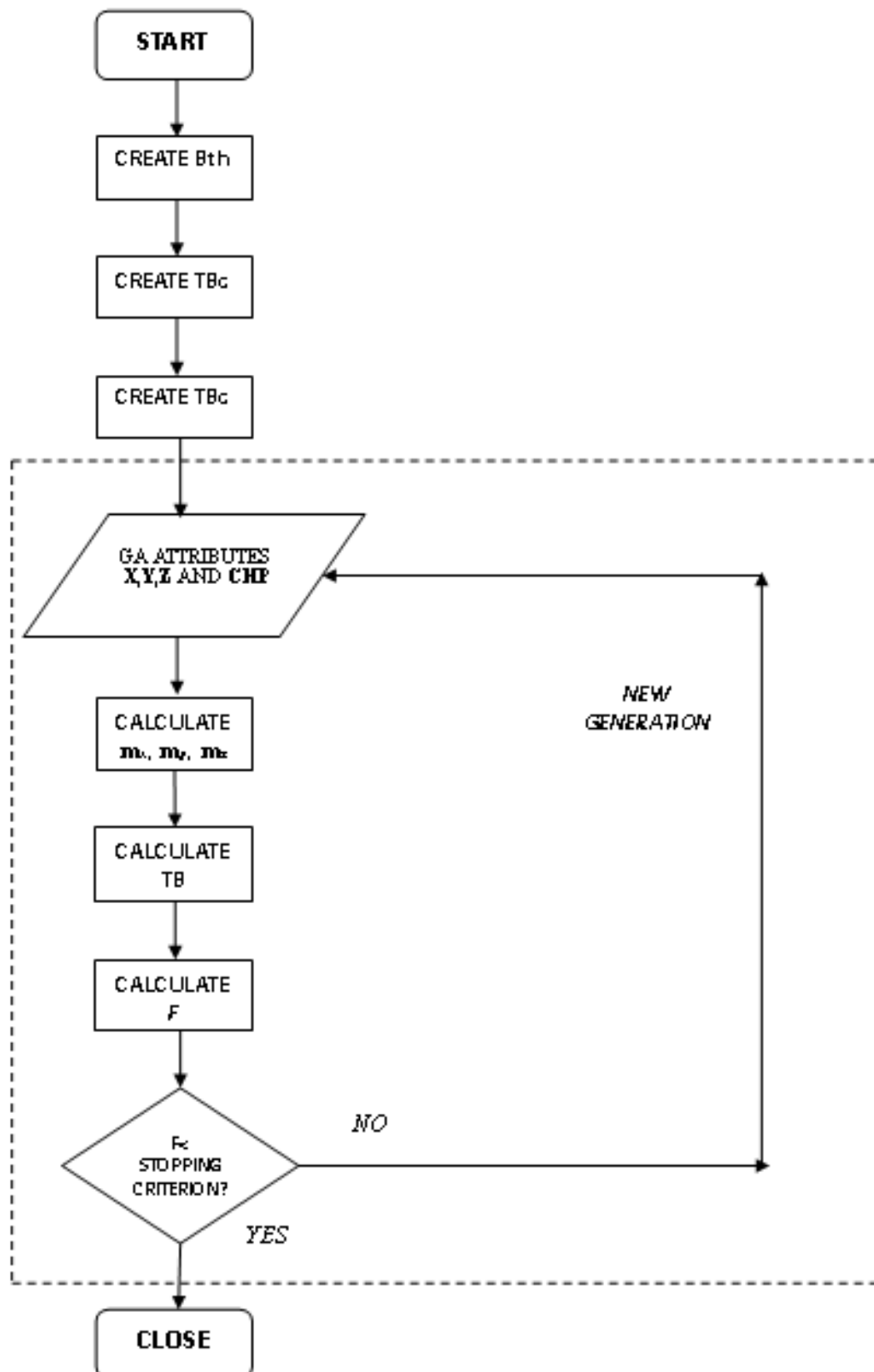
- II. Η μέθοδος βελτιστοποίησης, που θα μας οδηγήσει στη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου συνεχίζεται με την επίλυση ενός συστήματος έξι εξισώσεων που έχουμε δημιουργήσει, χρησιμοποιώντας τους τύπους του Maxwell για το μαγνητικό πεδίο (2.1-2.7) και λαμβάνοντας ως δεδομένα τις τιμές που έχει αποδώσει ο γενετικός αλγόριθμος στις οκτώ μεταβλητές στο βήμα I. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη επίλυση του συστήματος ισοδυναμούν με τις τιμές των συνιστωσών των μαγνητικών ροπών για το κάθε δίπολο αντίστοιχα, δηλαδή

$$m_{x1}, m_{y1}, m_{z1} \text{ και } m_{x2}, m_{y2}, m_{z2}$$

- III. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των μαγνητικών ροπών που έχουμε ήδη υπολογίσει και τις συντεταγμένες των θέσεων των διπόλων που επέλεξε στο πρώτο βήμα, ο γενετικός αλγόριθμος αφού πρώτα υπολογίσει το μαγνητικό πεδίο του μοντέλου TB, επιδιώκει μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, να ελαχιστοποιήσει τη αντικειμενική συνάρτηση, βρίσκοντας το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο TB που θα αποκλίνει όσο το δυνατόν λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο TBc που είχε αρχικά διαλέξει. Αυτό το επιτυγχάνει με συνεχείς αλλαγές τόσο στις θέσεις των διπόλων όσο και στις θέσεις επιλογής των σημείων μετρήσεων του πεδίου TBc που λαμβάνει, δημιουργώντας έτσι κάθε φορά μια νέα γενιά που θα αντιστοιχεί σε ένα νέο σετ διπόλων με διαφορετικές παραμέτρους και ένα νέο παραγόμενο μαγνητικό πεδίο TB.

- IV. Η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία ολοκληρώνεται λοιπόν μόλις εντοπιστούν οι κατάλληλες παράμετροι, δηλαδή εκείνες οι συντεταγμένες (x_1, y_1, z_1) και (x_1, y_2, z_2) των θέσεων και οι m_{x1}, m_{y1}, m_{z1} και m_{x2}, m_{y2}, m_{z2} συνιστώσες των μαγνητικών ροπών του μοντέλου, του οποίου το παραγόμενο πεδίο TB ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (rms) μεταξύ αυτού και του 'TBc' μαγνητικού πεδίου.

Παρακάτω απεικονίζεται ένα διάγραμμα ροής σχετικά με τη διαδικασία που ακολουθεί η στοχαστική μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων για τη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης και τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων.



Σχήμα 3.2: Διαγραμματική παρουσίαση της λειτουργίας του Γενετικού αλγορίθμου για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων

4. ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο, καθώς είναι πηγή πληροφοριών για τη διεκπεραίωση ποικίλων σκοπών και τη λήψη σημαντικών αποφάσεων. Αναμφίβολα, ένα αποτέλεσμα μπορεί να κρίνει αν ένα προϊόν ή μια υπηρεσία συμμορφώνεται με τη νομοθεσία, τις απαιτήσεις ενός πελάτη ή ενός κράτους και το πιο σημαντικό αν είναι κατάλληλο ή μη για χρήση ή κατανάλωση. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες όπως είναι οι ατέλειες και η πεπερασμένη ικανότητα των οργάνων μέτρησης, η πεπερασμένη ικανότητα του παρατηρητή, οι απρόβλεπτες μεταβολές των συνθηκών μέτρησης, κτλ. οι οποίοι γενικότερα περιορίζουν την ακρίβεια μιας μέτρησης ενώ παράλληλα οδηγούν σε ένα αποτέλεσμα που αποτελεί μόνο μια προσέγγιση ή μια εκτίμηση της τιμής της φυσικής ποσότητας που υπόκειται σε μέτρηση. Στη σημερινή εποχή, είναι διεθνώς αποδεκτό ότι μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι ολοκληρωμένη εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό.

Με τον επιστημονικά και μετρολογικά ορθό όρο αβεβαιότητα αναφερόμαστε, στην εκτίμηση μιας περιοχής τιμών, συνήθως γύρω από την μετρούμενη τιμή, η οποία με μία πιθανότητα, μεταξύ 95% -99%, περιέχει την “αληθινή” τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η αβεβαιότητα επομένως μιας μέτρησης κρίνει την αξιοπιστία της και την εγγύτητα της στην πραγματική, αλλά πάντοτε άγνωστη, τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα:

- ✓ Επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, επιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της διαθέσιμης γνώσης για τη συγκεκριμένη ποσότητα.
- ✓ Δίνεται μια ποσοτική εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος τούτου.

Κατέστη έτσι παγκόσμια ανάγκη να υπάρχει ένα οδηγός για την εκτίμηση της αβεβαιότητας μιας μέτρησης. Το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), το 1995 εξέδωσε την οδηγία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων «Guide to the expression of Uncertainty in Measurements», GUM.[15] Ο

οδηγός αυτός περιγράφει ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε μια οποιαδήποτε μέτρηση και είναι διαθέσιμος στο διαδίκτυο, και πιο συγκεκριμένα στον ιστότοπο του BIPM. Παρόλο που ο GUM αποτελεί μια γενική οδηγία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε μια οποιαδήποτε μέτρηση, για αρκετές εφαρμογές δεν ενδείκνυται καθώς χαρακτηρίζεται ως ένα δύσχρηστο κείμενο. Αυτό συμβαίνει διότι συχνά απαιτεί να είναι γνωστές μετρολογικές πληροφορίες σχετικές με τη μέτρηση ή τα μετρητικά συστήματα, στοιχεία όμως που δεν είναι πάντα διαθέσιμα και φθηνά στη συλλογή τους. Ως αποτέλεσμα αυτού, καθώς επίσης και με αφορμή την πρώτη έκδοση του προτύπου ISO 17025:1999, το οποίο έθεσε ως απαραίτητη και αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία των εργαστηρίων, τη εκτέλεση διαδικασιών που θα αποσκοπούν στην εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεών τους, η EURACHEM εξέδωσε οδηγία για την ποσοτικοποίηση την αβεβαιότητας των αναλυτικών μετρήσεων. Μέσα στην επόμενη δεκαετία άρχισαν να κάνουν την εμφάνιση τους μια σειρά από οδηγίες και προτάσεις με εναλλακτικούς τρόπους για την εκτίμηση της αβεβαιότητας οι οποίοι βασίζονται κυρίως στο γεγονός ότι οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον κλασικό τρόπο εκτίμησης της αβεβαιότητας δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες, όπως επίσης και στο ότι δεδομένα που διαθέτει ήδη το εργαστήριο μπορούν να αξιοποιηθούν για να δώσουν μια πιο απλή και ρεαλιστική εκτίμηση της αβεβαιότητας. Απόρροια αυτού ήταν να εκδοθούν παράλληλα οδηγίες από διάφορους φορείς (NORDTEST, EUROLAB, SANCO κ.α.) που να εκτιμούν την αβεβαιότητα με διαφορετικές προσεγγίσεις.

Σύμφωνα με τις οδηγίες που προτείνονται από το Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών (BIPM) και περιγράφονται στον Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), η αβεβαιότητα ορίζεται συγκεκριμένα ως:

«παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος».

Η έννοια της *αβεβαιότητας (uncertainty)* είναι σχετικά πρόσφατη στην ιστορία της μετρολογίας. Ωστόσο, συχνά παρατηρείται το φαινόμενο η έννοια της να συγχέεται με τη έννοια του *σφάλματος*. Το *σφάλμα* είναι μια εξ ορισμού απροσδιόριστη, αφηρημένη έννοια που αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους. Είναι επομένως απαραίτητο να διαφοροποιείται από την *αβεβαιότητα*, η οποία αποτελεί, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Ίσως η σύγχυση οφείλεται στο γεγονός ότι είναι δυνατόν, με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων τεχνικών (για παράδειγμα τη διακρίβωση), να διορθωθεί ένα μέρος του σφάλματος. Το σφάλμα, όμως αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών. Στην πραγματικότητα το μόνο σφάλμα που μπορούμε να γνωρίζουμε ποσοτικά είναι αυτό που μπορούμε να διορθώσουμε και το οποίο κατά συνέπεια, μετά τη διόρθωση αυτή, παύει να υπάρχει. Πρακτικά, η έννοια του σφάλματος δεν έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα, αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία ένδειξη. Αντίθετα, η

πληροφορία που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης μέσω της αβεβαιότητας αφορά όχι μόνο την καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και το προσδιορισμό της διασποράς των πιθανών τιμών που το μέγεθος θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή.

4.2 ΕΙΔΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τις οδηγίες των ISO και BIPM, η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: [14]

- **Συνιστώσες τύπου A.** Οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες που σχετίζονται με την επίδραση του περιβάλλοντος (θόρυβος, μεταβολή θερμοκρασίας, παρεμβολές), τις ατέλειες οργάνων, την αλληλεπίδραση οργάνου-μετρούμενου μεγέθους καθώς και σε υποκειμενικούς παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους (Γνωστά και ως Τυχαία Σφάλματα). Πιο συγκεκριμένα, οι συνιστώσες Τύπου A προκύπτουν από την (υπολογιζόμενη ή εκτιμούμενη) μεταβλητότητα (*variance*) ή την τυπική απόκλιση και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος ενώ σε πολλές περιπτώσεις και η γνώση της συμμεταβλητότητας (*covariance*) κρίνεται αναγκαία και απαραίτητη.
- **Συνιστώσες τύπου B.** Οφείλονται συνήθως σε μη ικανοποιητική ή λανθασμένη βαθμονόμηση οργάνων, σε λανθασμένες ενέργειες του παρατηρητή, της μεθόδου ανάλυσης κλπ. Ο υπολογισμός τους γίνεται με άλλους τρόπους, αξιοποιώντας πληροφορίες που προέρχονται από πιστοποιητικά διακρίβωσης, χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης, εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση κ.α. Παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Στην κατηγορία των συνιστωσών Τύπου B υπάγονται τα λεγόμενα Συστηματικά σφάλματα, η αβεβαιότητα έμμεσης μέτρησης και η σύνθετη αβεβαιότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και τα σφάλματα των μετρήσεων διακρίνονται ανάλογα με τη προέλευση τους σε δύο κατηγορίες: τα *συστηματικά* και τα *τυχαία* σφάλματα.

- I. **Συστηματικά:** είναι τα σφάλματα που παραμένουν αμετάβλητα σε διαδοχικές μετρήσεις ή που μεταβάλλονται με κάποιο συστηματικό τρόπο με το χρόνο ή κάποια άλλη παράμετρο. Μπορεί να οφείλονται σε ατέλειες του οργάνου, στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε ή και στον ίδιο τον παρατηρητή. Τα συστηματικά σφάλματα είναι δύσκολο να ανιχνευτούν και συχνά είναι τα σημαντικότερα σφάλματα. Η πείρα του παρατηρητή είναι ο κυριότερος παράγοντας για την αποφυγή και τη διόρθωσή τους. Ο πιο κοινός τρόπος ανίχνευσης των συστηματικών σφαλμάτων είναι η σύγκριση των οργάνων ή και ολόκληρου του συστήματος μέτρησης με άλλα που έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και που είναι διαπιστωμένο ότι έχουν αμελητέα συστηματικά σφάλματα. Παράλληλα, η βαθμονόμηση με τη χρήση προτύπων είναι μια αρκετά αποτελεσματική μέθοδος για την εκτίμηση του συστηματικού σφάλματος, αλλά δεν μπορεί να το εξαλείψει παρά μόνο να το μειώσει. Τα σφάλματα που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία ορίζουν την ακρίβεια (ορθότητα)(*accuracy*) της μέτρησης,

δηλαδή κατά πόσο οι μετρήσεις είναι κοντά στις πραγματικές τιμές ή υπάρχουν συστηματικές αποκλίσεις.

- II. **Τυχαία:** είναι τα σφάλματα που οφείλονται σε πολλούς απρόβλεπτους παράγοντες, μεταβάλλονται με το χρόνο κατά ακανόνιστο τρόπο και είναι εξίσου πιθανό να είναι θετικά ή αρνητικά. Η βασική ιδιότητα των τυχαίων σφαλμάτων να είναι με ίσες πιθανότητες θετικά ή αρνητικά, καθώς και το γεγονός ότι μικρές αποκλίσεις από τη πραγματική τιμή είναι πιο πιθανές από τις μεγάλες, κάνουν δυνατό τον περιορισμό της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό ενός μεγέθους με τη επανάληψη της μέτρησης πολλές φορές, ώστε κατά μέσο όρο τα σφάλματα να αλληλοαναιρούνται σε κάποιο βαθμό. Τα τυχαία σφάλματα ορίζουν την ακρίβεια επανάληψης (precision) της μέτρησης, δηλαδή το μέγεθος της μεταβολής των τιμών σε κάθε επανάληψη της μέτρησης (για τις ίδιες συνθήκες του πειράματος).

4.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑΣ

Στα πλαίσια μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) ενός συστήματος ή μιας διάταξης, ο υπολογισμός της αβεβαιότητας έγκειται στο προσδιορισμό των ορίων αβεβαιότητας και κατανομής πιθανοτήτων όλων εκείνων των συσκευών-εξοπλισμών που αποτελούν πηγή μόλυνσης για το περιβάλλον λειτουργίας τους εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που παράγουν ακούσια. Παρόλα αυτά, συχνά το μέγεθος της αβεβαιότητας μπορεί να μην παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης, γεγονός που σημαίνει ότι θα πρέπει να ληφθεί από το χρήστη μια απόφαση σχετικά με τη κατάλληλη στιγμή που χρειάζεται να τη διακόψει. Η μη όμοια συνεισφορά της αβεβαιότητας μέχρι τη ολοκλήρωση της μέτρησης, πιθανότατα να οδηγήσει στην υπερεκτίμηση της, που σε πολλές περιπτώσεις προκειμένου να αποφευχθούν οι πιο σύνθετοι υπολογισμοί και οι επιπλέον διαδικασίες κρίνεται προτιμότερη. Ωστόσο, στη περιοχή του ορίου ή των ορίων των προδιαγραφών δοκιμής, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε η εκτίμηση της αβεβαιότητας να γίνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια.

4.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, εξαιτίας της ύπαρξης ποικίλων και συχνά απρόβλεπτων παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια του, δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένο. Έτσι, διαμορφώνεται τυχαία ένα πιθανό σύνολο αποτελεσμάτων από τις μη ελεγχόμενες επιδράσεις, που εμπεριέχει και το επιζητούμενο αποτέλεσμα της μέτρησης. Αυτό καθιστά τη προσέγγιση της μέτρησης στοχαστική, όπου μη μπορώντας να ελέγξουμε τις επιρροές που διαμορφώνουν το εκάστοτε αποτέλεσμα, τα διάφορα αποτελέσματα αποτελούν δυνητικά συμβάντα μιας τυχαίας πειραματικής διαδικασίας. Με το τρόπο αυτό γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι το μόνο εργαλείο που μπορεί να δώσει απάντηση σε διάφορα

ερωτήματα όπως ποια η πιθανότητα η αληθής τιμή να βρίσκεται σε συγκεκριμένο διάστημα με βάση τη τιμή της μέτρησης και τη κατανομή που ακολουθεί η συγκεκριμένη τιμή, είναι η θεωρία των Πιθανοτήτων και της Στατιστικής.

Η θεωρία των Πιθανοτήτων και της Στατιστικής είναι ένα από τα πιο πολυχρησιμοποιημένα και ισχυρά εργαλεία για να καταλάβουμε, να χειριστούμε και να ελέγξουμε την αβεβαιότητα. Επιτρέπει στο χρήστη να εντοπίσει ένα εύρος αποτελεσμάτων για τις πιο σημαντικές μεταβλητές που τον ενδιαφέρουν και να εφαρμόσει πιθανότητες σε αυτές. Αποτελεί, ίσως τη πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για το χαρακτηρισμό της αβεβαιότητας, κυρίως για τις περιπτώσεις συστημάτων όπου οι εκτιμήσεις για τη κατανομή των πιθανοτήτων των αβέβαιων παραμέτρων είναι διαθέσιμες. Οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα περισσότερα συστήματα συνήθως περιγράφονται από συναρτήσεις κατανομής πιθανοτήτων και ο αντικειμενικός σκοπός είναι να εκτιμήσουμε την εξαγόμενη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας.

Στη συνέχεια θα γίνει μια αναφορά σε μερικές κατανομές που εμφανίζονται σε πρακτικές εφαρμογές αντιμετώπισης της αβεβαιότητας αφού όμως πρώτα παρατεθούν οι ορισμοί χρήσιμων στατιστικών εννοιών.

1. **Τυχαία μεταβλητή:** Κατά τη μελέτη ενός πειράματος μπορούμε να αντιστοιχίσουμε σε κάθε δειγματικό σημείο έναν αριθμό χρησιμοποιώντας έναν προκαθορισμένο κανόνα αντιστοίχισης. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα ορισμού μιας συνάρτησης X η οποία σε κάθε σημείο ω του δειγματικού χώρου Ω να αντιστοιχεί έναν πραγματικό αριθμό $X(\omega)$. Μία τέτοια συνάρτηση καλείται τυχαία μεταβλητή.
2. **Μέσος όρος ή μέση τιμή:** Ορίζεται ως το άθροισμα των παρατηρήσεων, μετρήσεων δια του πλήθους αυτών. Συμβολίζεται με \bar{x} . Γενικός τύπος της μέσης τιμής είναι:

$$E(X) = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n),$$

όπου x_i η i μέτρηση και n το πλήθος των μετρήσεων

3. **Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας:** Έστω $X : \Omega \rightarrow \mathcal{R}$ μία τυχαία μεταβλητή. Η συνάρτηση κατανομής (σ.κ.) F_X της τυχαίας μεταβλητής X είναι η συνάρτηση $F_X : \mathcal{R} \rightarrow [0, 1]$ με τύπο:

$$F(x) = P(X \leq x) = P(\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq x\}), x \in \mathcal{R}.$$

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ:

$$0 \leq F(x) \leq 1$$

$$F(-\infty) = 0$$

$$F(\infty) = 1$$

$$F(x_1) \leq F(x_2) \text{ όπου } x_1 \leq x_2$$

4. **Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π) ορίζεται ως:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

$$f(x_i) \geq 0, \forall x_i$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

5. **Μεταβλητότητα ή διασπορά (variance):** Η διασπορά δίνει ένα μέτρο διάχυσης της κατανομής της τ.μ X γύρω από τη μέση τιμή της \bar{x} και υπολογίζεται από το τύπο:

$$V(x) = E(X - E(X))^2 = E(X^2) - E^2(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (X - E(X))^2 f(x) dx$$

6. **Τυπική απόκλιση :** Η θετική τετραγωνική ρίζα της διασποράς καλείται τυπική απόκλιση (standard deviation) της τυχαίας μεταβλητής X και δίνεται από το τύπο :
 $\sigma = \sqrt{V(x)}$

7. **Συμμεταβλητότητα (covariance):** Η συμμεταβλητότητα μεταξύ δύο μεγεθών X και Y ορίζεται ως:

$$\text{Cov}(X, Y) = E[(X - E(X))(Y - E(Y))] = \iint_{-\infty}^{+\infty} [X - E(X)][Y - E(Y)]f(x, y) dx dy$$

Γενικότερα, στη θεωρία των Πιθανοτήτων και της Στατιστικής υπάρχουν δύο κατηγορίες κατανομών: η ομοιόμορφη *συνεχής* και η ομοιόμορφη *διακριτή* κατανομή. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπου διερευνάται η δυνατότητα συστηματικής προσέγγισης και εκτίμησης της αβεβαιότητας κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων, λόγω της παρουσίας βλαπτικών παραγόντων (π.χ. θορύβου) και πηγών μόλυνσης (π.χ συσκευές που παράγουν ακούσια μαγνητικό πεδίο και επηρεάζουν τη ορθή λειτουργία των γειτονικών εξοπλισμών) σε εσωτερικό περιβάλλον του διαστημόπλοιου, οι ποσότητες οι οποίες μετρώνται είναι συνεχείς. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετρήσεις που διεξάγονται γίνονται πάνω σε μετρικές κλίμακες. Τέσσερις είναι οι κύριες ομοιόμορφες συνεχείς κατανομές που θα μας απασχολήσουν κατά τη διάρκεια μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συστημάτων: η κανονική, η ορθογώνια, η τριγωνική και η μορφής U .[14]

4.4.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ

Κανονική κατανομή

Πρόκειται για μια από τις σπουδαιότερες συνεχείς κατανομές της θεωρίας Πιθανοτήτων και της Στατιστικής τόσο από θεωρητική , όσο και από τη πρακτική πλευρά καθώς συχνά η

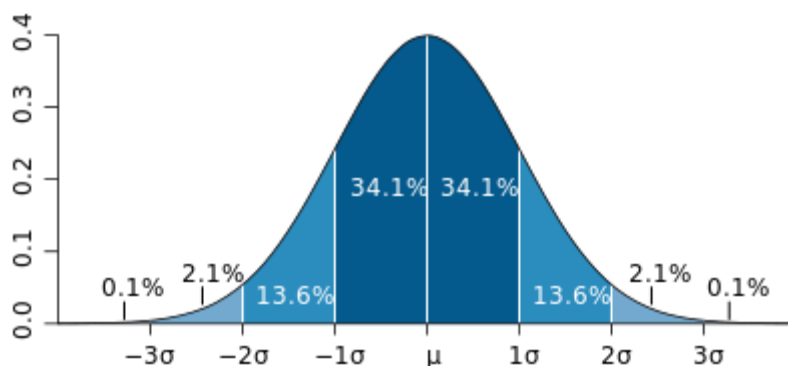
εφαρμογή της συμβάλλει στη αποτελεσματική επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Μια από τις πρώτες εφαρμογές της, έγινε το 1809 από το μεγάλο Γερμανό Μαθηματικό *Carl F. Gauss* ο οποίος διαπίστωσε ότι τα σφάλματα που γίνονται σε αστρονομικές παρατηρήσεις μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, διαπιστώθηκε, ότι γενικά τα τυχαία σφάλματα (όχι τα συστηματικά) που εμφανίζονται σε διάφορες μετρήσεις ακολουθούν με ικανοποιητική προσέγγιση κανονική κατανομή. Για το λόγο αυτό, η κανονική κατανομή ονομάζεται και κατανομή των σφαλμάτων (law of errors) ενώ παράλληλα είναι γνωστή και ως κατανομή του Gauss (Gaussian distribution), για τη μεγάλη συνεισφορά του *Gauss* στην ανάδειξη των ιδιοτήτων και της σημασίας της.

Ιδιότητες της κανονικής καμπύλης

Η κανονική καμπύλη έχει κωδωνοειδή μορφή, είναι συμμετρική και οι «ουρές» της πλησιάζουν τον οριζόντιο άξονα ομαλά (ασυμπτωτικά). Οι κυριότερες παράμετροί της είναι η μέση τιμή μ και η τυπική απόκλιση σ , για αυτό συμβολίζεται και ως $N(\mu, \sigma^2)$. Η συνάρτηση πυκνότητας της κανονικής κατανομής δίνεται από το τύπο:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < +\infty \quad (1.1)$$

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται ένα σχεδιάγραμμα της κανονικής κατανομής.



Σχήμα 4.1: Κανονική κατανομή

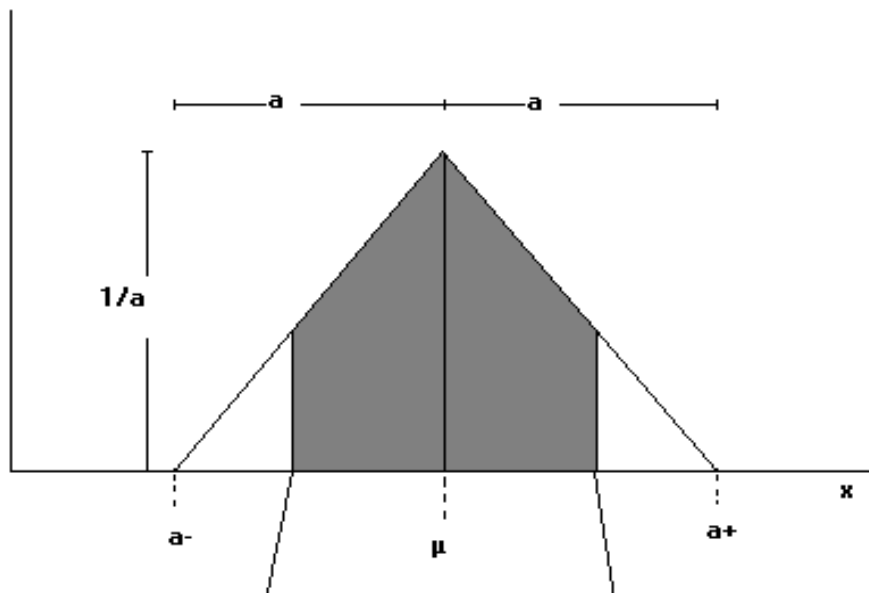
Παρατηρώντας το διάγραμμα κανονικής κατανομής διαπιστώνουμε ότι το 68,2% των τιμών απέχει το πολύ κατά σ από τη μέση τιμή, βρίσκεται δηλαδή στο διάστημα $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$, το 95,5% των τιμών βρίσκεται στο $[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$ και το 99,7% στο $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$.

Η τυπική απόκλιση είναι ουσιαστικά το μέγεθος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή. Η ακριβής τιμή της ποικίλει και είναι ανάλογη της αβεβαιότητας που αντιστοιχεί στη μέση τιμή. Όσο υψηλότερη είναι η αβεβαιότητα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η τιμή που θα λαμβάνει η τυπική απόκλιση. Η πιθανότερη τιμή αναπαριστάται από την μέση τιμή μ και η αβεβαιότητα από το εύρος των τιμών γύρω από τη μέση τιμή (διακύμανση). Ωστόσο, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα, η επιζητούμενη τιμή να βρίσκεται εκτός του εύρους των τιμών που ορίζεται στο ανοικτό διάστημα $(\mu-3\sigma, \mu+3\sigma)$ και να εντοπίζεται στα άκρα που τείνουν στο άπειρο της κανονικής κατανομής.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπου εξετάζονται όλοι εκείνοι οι παράγοντες που εισάγουν τυχαία σφάλματα κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων και επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία των συσκευών-εξοπλισμών στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων, η κανονική κατανομή κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, τα τυχαία σφάλματα προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη κανονική κατανομή, γεγονός που διευκολύνει τη μελέτη και τη αντιμετώπιση τους. Ένας τελευταίος αλλά εξίσου σημαντικός λόγος που καθιστά αυτή τη μορφή συνεχούς κατανομής περισσότερο χρηστική σε σχέση με τις υπόλοιπες είναι ότι ακόμη και η κατανομή που περιγράφει τη συνολική επίδραση όλων των απρόβλεπτων και τυχαίων παραγόντων και προκύπτει από το άθροισμα των αντίστοιχων κατανομών, συχνά τείνει να γίνει κανονική.

Τριγωνική Κατανομή

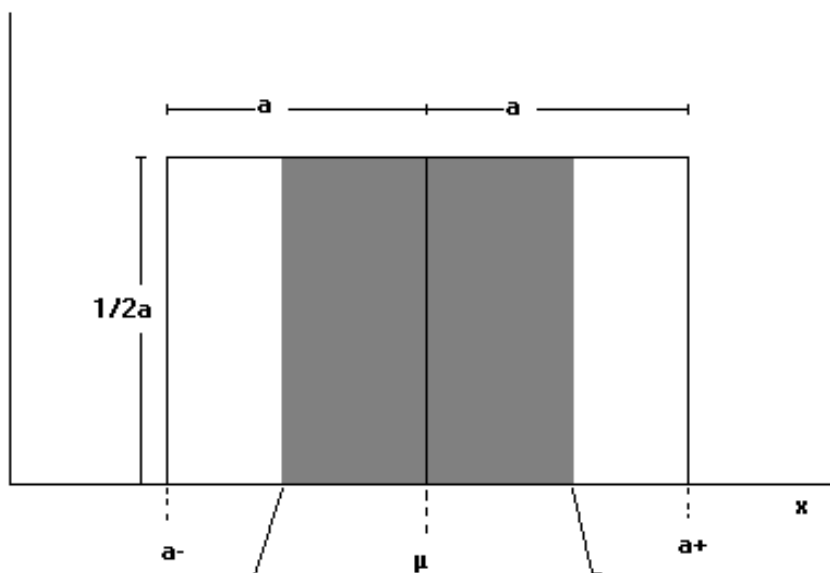
Η τριγωνική κατανομή, εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις που η αναφερόμενη(κεντρική) τιμή έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι αληθής τιμή, σε σχέση με τα άκρα. Πρόκειται για μια κλειστή κατανομή, η οποία μπορεί να είναι είτε συμμετρική είτε ασύμμετρη. Η αναπαράσταση μέσω της τριγωνικής κατανομής απαιτεί από το χρήστη να δώσει τιμές σχετικά με τη πιο πιθανή, τη μέγιστη και τη ελάχιστη παρατήρηση. Αυτό συνεπάγεται ότι το διάγραμμα της, θα διαμορφώνεται με βάση τη λογική διαδικασία που θα έχει ορίσει ο ίδιος ο χρήστης. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η γραφική αναπαράσταση της τριγωνικής κατανομής.



Σχήμα 4.2: Τριγωνική κατανομή

Ορθογώνια Κατανομή

Καλείται και ως ομοιόμορφη κατανομή. Περιγράφεται από τη συνάρτηση $f(x) = \frac{1}{2a}$ όπου $x \in [-a \leq x \leq a]$ και το σχεδιάγραμμα της είναι:



Σχήμα 4.3: Ομοιόμορφη κατανομή

Σε αυτού του είδους τη κατανομή, θεωρούμε ότι όλες οι τιμές εντός του εύρους τιμών έχουν την ίδια πιθανότητα να είναι η αληθής τιμή. Συνεπώς, χρησιμοποιείται όταν στο εύρος το οποίο καλύπτουν οι αβεβαιότητες όλες οι τιμές είναι ισοπίθανες. Η αναμενόμενη-κεντρική τιμή βρίσκεται στο μέσο και ισούται με:

$$E(x) = \mu$$

ενώ η τυπική απόκλιση προκύπτει από τη σχέση:

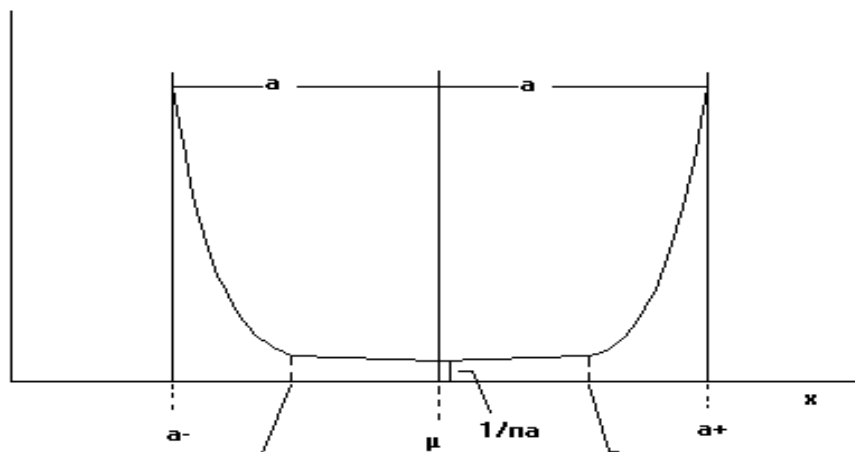
$$\sigma = \sqrt{[V(X)]} = \sqrt{E(X)^2} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Τόσο η τριγωνική και όσο και η ορθογώνια κατανομή αποτελούν δύο υποπεριπτώσεις της τραπεζοειδούς κατανομής.

Κατανομή Πιθανότητας Μορφής U

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της κατανομής πιθανότητας μορφής U. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής μορφής U δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{a^2+x^2}} \text{ όπου } x \in -a \leq x \leq a.$$



Σχήμα 4.4: Κατανομή μορφής U

Μια επιπλέον μορφή κατανομής που θα φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη στα πλαίσια μελέτης της αβεβαιότητας των μετρούμενων μεγεθών είναι η κατανομή t-student.

Κατανομή t-Student

Η κατανομή του t ή κατανομή Student με n βαθμούς ελευθερίας μοιάζει με την κανονική κατανομή και για μεγάλα δείγματα τείνει να ταυτιστεί με αυτήν. Πρόκειται, στην ουσία για μια οικογένεια κατανομών καθώς για κάθε τιμή του n αντιστοιχεί και μια άλλη κατανομή t. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης πυκνότητας της έχει κωδωνοειδή μορφή και είναι συμμετρική ως προς τον κατακόρυφο άξονα στο 0. Η μέση τιμή της t_n είναι ίση με 0 ενώ η διασπορά της δίνεται από τον τύπο: $Var(T) = \frac{n}{n-2}$. Αν υποθέσουμε ότι εξετάζεται ένα δείγμα παρατηρήσεων $x_i, i = 1 \dots N$ ενός μεγέθους X, η κατανομή του οποίου θεωρείται κανονική με αναμενόμενη τιμή μ και μεταβλητότητα σ^2 , υπολογίζεται ο μέσος όρος \bar{x} του δείγματος και η τυπική απόκλιση s και αποδεικνύεται ότι η μεταβλητή $t = \frac{(\bar{x}-\mu)}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{(\bar{x}-\mu)}{\sigma}$ ακολουθεί κατανομή Student με $v = n-1$ βαθμούς ελευθερίας.

Για την κατανομή t_n υπάρχουν πίνακες που δίνουν τιμές t για διάφορα επίπεδα σημαντικότητας α και για ποικίλους βαθμούς ελευθερίας $v=n-1$, όπου n ο αριθμός των παρατηρήσεων του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα:

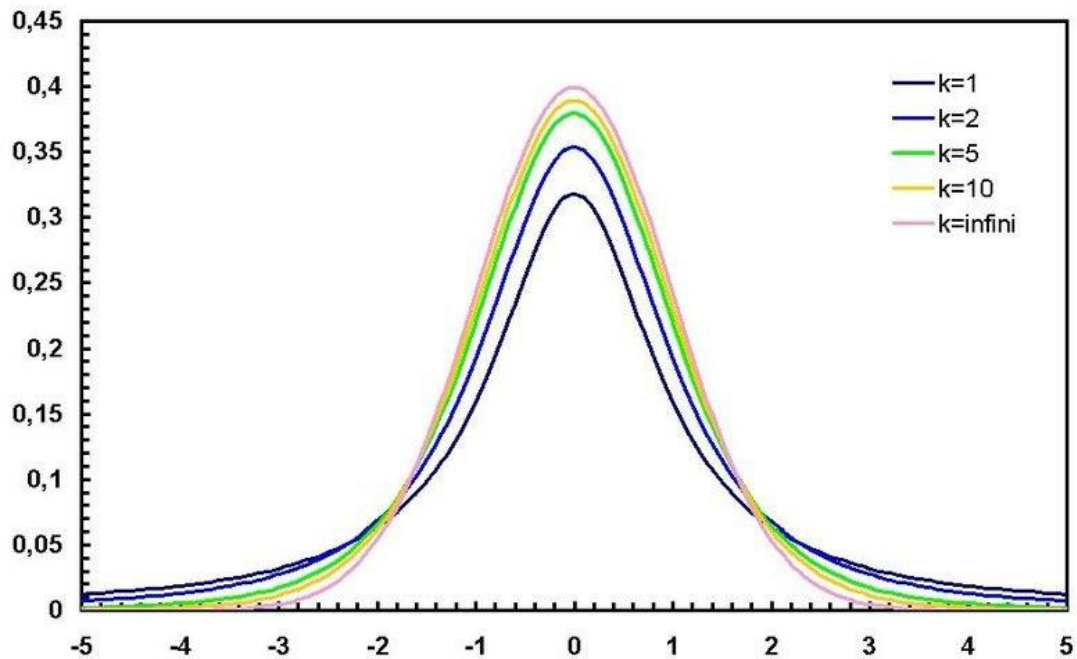
- στην αριστερή στήλη των πινάκων δίνονται οι βαθμοί ελευθερίας που ισοδυναμούν με $n - 1$, όπου n το σύνολο των παρατηρήσεων
- ενώ στη πρώτη οριζόντια γραμμή καταγράφεται η πιθανότητα της τυπικής ή ανηγμένης μεταβλητής που συμβολίζεται με t να υπερβεί την τιμή που αναγράφεται στο πεδίο για δεδομένο αριθμό βαθμών ελευθερίας.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας t που δίνει τις τιμές του t για διάφορα επίπεδα σημαντικότητας α και βαθμούς ελευθερίας $\nu = n-1$.

Πίνακας 4.1: Η κατανομή student-t: τιμές του κ για δεδομένα επίπεδα σημαντικότητας α , ως συνάρτηση του αριθμού των βαθμών ελευθερίας ν

ν	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.025$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.005$
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

Γενικότερα, η κατανομή Student μιας μεταβλητής επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας, η διαφορά $\bar{x} - \mu$ να βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια σχετιζόμενα με τη τυπική απόκλιση σ της μέσης τιμής του δείγματος. Στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί φαίνεται η γραφική παράσταση της κατανομής Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 4.4: Κανονική κατανομή Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Στο σημείο αυτό θα δημιουργήσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο ουσιαστικά θα περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού μιας μετρούμενης ποσότητας έξοδου Y από N ποσότητες εισόδου X_1, X_2, \dots, X_N μέσω μιας συνάρτησης f που θα περιέχει όλες εκείνες τις τιμές των μεγεθών που εισάγουν αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι ποσότητες X_1, X_2, \dots, X_N αντιστοιχούν και αυτές σε αποτελέσματα μετρήσεων, που εξαρτώνται όμως από άλλες ποσότητες όπως συντελεστές διόρθωσης για συστηματικά σφάλματα καθιστώντας έτσι τη συνάρτηση f ιδιαίτερα περίπλοκη.

Αν θέσουμε x_1, x_2, \dots, x_n τις εκτιμήσεις των N εισόδων τότε μέσω της ανάλογης σχέσης

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

προκύπτει αντίστοιχα και η εκτίμηση για την έξοδο y που θα αποτελεί και το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης της εξόδου y που εκτιμάται με τη χρήση του παραπάνω τύπου, απαιτείται ο κατάλληλος συνδυασμός όλων των τιμών τυπικής απόκλισης-αβεβαιότητας $u(x_i)$ κάθε εκτίμησης εισόδου x_i . Οι επιμέρους αυτές αβεβαιότητες που συνεισφέρουν στη συνολική αβεβαιότητα του αποτελέσματος εξόδου μπορούν να ανήκουν είτε στις συνιστώσες τύπου A είτε συνιστώσες τύπου B. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει εκτενής περιγραφή της μεθόδου υπολογισμού αβεβαιότητας για καθεμία από τις μορφές αυτές.

4.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ A

Η μετρητική αβεβαιότητα Τύπου A, U_A , καθορίζεται από τη στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία προκύπτουν από επαναλαμβανόμενες ανεξάρτητες μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα κάτω από ελεγχόμενες παρόμοιες συνθήκες, με τη χρήση οργάνων μέτρησης μεγάλης ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα, μόλις ολοκληρωθεί η λήψη όλων των μετρήσεων, διερευνάται η στατιστική κατανομή που ακολουθούν τα αποτελέσματα αυτά, που για πρακτικούς λόγους θεωρούμε ότι προσεγγίζουν τη κανονική, καθώς η πραγματική κατανομή τους είναι σπάνια γνωστή με ακρίβεια. Με τη παραδοχή λοιπόν της κανονικής κατανομής, για το προσδιορισμό της αβεβαιότητας τύπου A απαραίτητος είναι αρχικά ο υπολογισμός του μέσου όρου του συνόλου των μετρήσεων. Η καλύτερη εκτίμηση της μέσης τιμής της κατανομής που ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ο αριθμητικός μέσος που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

όπου x_i η τιμή της i μέτρησης του x μεγέθους και n το πλήθος των μετρήσεων.

Το μέγεθος που θα χαρακτηρίζει τη διασπορά των μετρήσεων γύρω από τη μέση τιμή και θα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε περιπτώσεις που θεωρούμε ότι έχουμε ύπαρξη μεμονωμένων τιμών και απουσία συστηματικού σφάλματος είναι η τυπική απόκλιση (ή πειραματική τυπική απόκλιση κατά GUM). Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

Ο λόγος που διαιρούμε με n (πλήθος των μετρήσεων) για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής και με $n - 1$ για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης από τη μέση τιμή είναι ο εξής: Για τον υπολογισμό της διασποράς δεν χρησιμοποιείται η αληθινή μέση τιμή του x αλλά η καλύτερη εκτίμησης της δηλαδή ο αριθμητικός μέσος του συνόλου των μετρήσεων. Έτσι η υπολογιζόμενη ποσότητα $(x_i - \bar{x})^2$ είναι πάντα λίγο μικρότερη από την επιθυμητή

$(x_i - \bar{x}_{\text{αληθ}})^2$. Στη θεωρία των πιθανοτήτων, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι οι μετρήσεις ακολουθούν κατανομή Gauss, έχει αποδειχθεί ότι αυτή η υποτίμηση διορθώνεται χρησιμοποιώντας τον παράγοντα $n - 1$ αντί για n .

Παράλληλα, ένα ακόμη μέγεθος που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και μπορεί να εκτιμηθεί από μια σειρά μετρήσεων, προκειμένου να χαρακτηρίσει το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής και να εκφράζει το πόσο καλά ο αριθμητικός μέσος \bar{x} εκτιμά την αληθή τιμή είναι η τυπική απόκλιση του μέσου όρου (ή πειραματική τυπική απόκλιση μέσου όρου κατά GUM). Η τυπική απόκλιση του μέσου όρου συνδέεται με το μέγεθος της τυπικής απόκλισης με τη σχέση:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

Συνεπώς, για μια ποσότητα που καθορίζεται από n διαδοχικές παρατηρήσεις, η τυπική αβεβαιότητα τύπου A θα ισούται με ένα από τους δύο παραπάνω τύπους. Η πρακτική εμπειρία δείχνει ότι χρησιμοποιείται το μέγεθος της τυπικής απόκλισης όταν επιθυμούμε να εκτιμήσουμε την αβεβαιότητα λόγω της διασποράς των τιμών και το μέγεθος της τυπικής απόκλισης του μέσου όρου όταν επιδιώκουμε να υπολογίσουμε τη αβεβαιότητα που προκύπτει λόγω της ύπαρξης κάποιου συστηματικού σφάλματος όπου το ζητούμενο είναι να προσδιορίσουμε την απόσταση της αληθούς τιμής από το μέσο όρο.

Με δεδομένο ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων ακολουθούν τη κανονική κατανομή και με κριτήριο το πλήθος των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- ✓ Αβεβαιότητα U_A για μικρό πλήθος παρατηρήσεων ($n \leq 10$)

ΤΥΠΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ: $U_A = \frac{ts(x_i)}{\sqrt{n}}$

όπου n ο αριθμός των μετρήσεων

P το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης

$s(x_i)$ η τυπική απόκλιση των μετρήσεων, που υπολογίζεται από το τύπο (4.2),

\bar{x} ο αριθμητικός μέσος των x_i παρατηρήσεων, που προσδιορίζεται από το τύπο (4.1),

t ο συντελεστής Student, που προκύπτει από τους πίνακες t-Student κατανομής.

- ✓ Αβεβαιότητα U_A για μεγάλο πλήθος παρατηρήσεων ($n \gg 10$)

$$\text{ΤΥΠΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ: } U_A = \frac{ks(x_i)}{\sqrt{n}}$$

όπου k ο συντελεστής κάλυψης που αντικαθιστά το συντελεστή t Student. Προσεγγιστικές τιμές του k μπορούν να υπολογιστούν από το πίνακα κανονικής κατανομής. Για τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ζητείται συνήθως διάστημα εμπιστοσύνης 95% που αντιστοιχεί σε $k=1,96$. Γενικότερα όμως για μεγαλύτερη ακρίβεια θα πρέπει οι παράγοντες k να προσδιορίζονται μέσω της ειδικής κατανομής γνωστής ως κατανομή student-t. Οι πίνακες για αυτή τη κατανομή έχουν ήδη απεικονιστεί παραπάνω.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να επαναλαμβάνεται από την αρχή η διαδικασία για το υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου A κάθε φορά που γίνεται η ίδια μέτρηση ή επαναλαμβανόμενες μετρήσεις παρόμοιου μεγέθους σε πανομοιότυπες συνθήκες. Όταν δεν γίνονται σημαντικές αλλαγές στη διαδικασία ή στη διάταξη της μέτρησης, είναι επαρκές να εκτιμηθεί η αβεβαιότητα με βάση τις προηγούμενες μετρήσεις και πληροφορίες που έχουν προκύψει από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων τους. Αυτό σημαίνει ότι αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση της κατανομής που ακολουθούν οι 'τρέχουσες' μετρήσεις χρησιμοποιείται η ήδη υπολογισμένη $s(x_i)$ από παλαιότερες όμοιες παρατηρήσεις και η σχέση για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας θα διαμορφώνεται ως:

$$U_A = \frac{ks_r}{\sqrt{n_1}}$$

Θα πρέπει όμως σε τακτά χρονικά διαστήματα να γίνεται επαλήθευση των συνθηκών που επικρατούν για να εξασφαλίζεται ότι τα τυχαία σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου A δεν έχουν μεταβληθεί.

Συνοψίζοντας λοιπόν, επισημαίνουμε ότι η τυπική αβεβαιότητα $u(x_i)$ μιας εκτίμησης x_i , που είναι στη ουσία και το μέγεθος που μας ενδιαφέρει προκειμένου να περιγράψουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε και κατ' επέκταση του μοντέλου των διπόλων που σχεδιάζουμε, με βάση τον τύπο αξιολόγησης A ισοδυναμεί με $u(x_i) = U_A$.

4.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ B

Η αβεβαιότητα τύπου B, U_B είναι εκείνη που υπολογίζεται με άλλες τεχνικές και όχι με τη στατιστική ανάλυση και επεξεργασία μιας σειράς παρατηρήσεων. Στην περίπτωση αυτή οι εκτιμήσεις μας μπορούν να βασιστούν σε κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τη πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, προκειμένου να 'χτιστεί' μια εικόνα για τη

πιθανή κατανομή που ακολουθούν οι τιμές αυτού μεγέθους. Οι πληροφορίες αυτές συνήθως προέρχονται από:

- Δεδομένα προηγούμενων πειραματικών μετρήσεων
- Δεδομένα που περιέχονται σε πιστοποιητικά διακρίβωσης ή άλλες αναφορές
- Από την εμπειρία και το ένστικτο του εκτιμητή
- Από τα χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης

Συνήθως αυτά τα δεδομένα έχουν τη μορφή εύρους ή ανοχής $\pm\alpha$, από το οποίο θα πρέπει να υπολογιστεί η τυπική αβεβαιότητα, αφού πρώτα βέβαια αναγνωρισθεί το είδος της κατανομής των τιμών των μεγεθών που έχουμε.

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας τύπου B περιλαμβάνει πέντε στάδια:

- I. Εντοπισμός όλων εκείνων των αιτιών που προκαλούν επιπτώσεις στην ακριβή λήψη μετρήσεων και αποτελεσμάτων, εισάγοντας τυχαία και συστηματικά σφάλματα.
- II. Έρευνα για τη ανάκτηση οποιασδήποτε πληροφορίας σχετικά με τις επιπτώσεις αυτές.
- III. Περιγραφή των επιπτώσεων με χρήση κατάλληλης μορφής κατανομής.
- IV. Προσδιορισμός των στατιστικών παραμέτρων, της μέσης τιμής και της διακύμανσης, για τη κατανομή αυτή.
- V. Και τέλος, καθορισμός του διαστήματος εμπιστοσύνης.

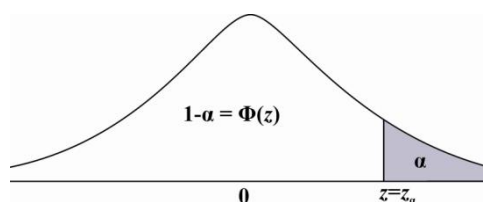
Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη φάση για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας τύπου B, είναι ανάλογη με την λήψη μετρήσεων στην εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A και έγκειται στη εύρεση όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και προκαλούν τη διασπορά των τιμών.

Στην αμέσως επόμενη φάση, ο χρήστης στοχεύει στη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων δεδομένων σχετικά με αυτές τις επιπτώσεις έτσι ώστε να γίνει έπειτα η περιγραφή τους με χρήση κατάλληλης κατανομής που να προσεγγίζει με τη μεγαλύτερη ακρίβεια τη μορφή τους. Στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στα πλαίσια ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, όπως ήδη έχουμε επισημάνει, τέσσερις είναι οι τύποι συναρτήσεων κατανομής που παρατηρούνται πιο συχνά: η κανονική, η ορθογώνια, η τριγωνική και η κατανομή της μορφής U.

- **Κανονική Κατανομή:** Στη περίπτωση που τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή, είναι απαραίτητο να αναφέρεται μια δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης. Η πιο συνηθισμένη στάθμη που απαιτείται σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι 0,95 (ή 95%). Ανάλογα λοιπόν με τη τιμή του p% ,για τον υπολογισμό της τυπικής αβεβαιότητας διαιρείται η αβεβαιότητα που είναι συνήθως της μορφής $x \pm \alpha$ με τον αντίστοιχο συντελεστή κάλυψης k. Οι συντελεστές

κάλυψης, που ουσιαστικά ταυτίζονται με τους συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί το εύρος /ανοχή της τιμής αναφέρονται στον Πίνακα που ακολουθεί και εξαρτώνται κάθε φορά από τη δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης της κανονικής κατανομής. Η κανονική κατανομή ορίζεται κυρίως όταν υπάρχει συνεισφορά πολλαπλών αβεβαιοτήτων. Για το υπολογισμό, συνεπώς, της τυπικής αβεβαιότητας μιας συνεισφοράς με υποτιθέμενη κανονική κατανομή χρησιμοποιείται ο τύπος: $u(x_i) = \frac{U}{k}$.

Πίνακας 4.2: Τιμές των πιθανοτήτων $\Phi(z) = P(Z \leq z) = P(Z < z)$ της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $N(0, 1)$ για $z \geq 0$. Για $z < 0$ ισχύει $\Phi(z) = 1 - \Phi(-z)$.



Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.500 00	0.503 99	0.507 98	0.511 97	0.515 95	0.519 94	0.523 92	0.527 90	0.531 88	0.535 86
0.1	0.539 83	0.543 80	0.547 76	0.551 72	0.555 67	0.559 62	0.563 56	0.567 49	0.571 42	0.575 35
0.2	0.579 26	0.583 17	0.587 06	0.590 95	0.594 83	0.598 71	0.602 57	0.606 42	0.610 26	0.614 09
0.3	0.617 91	0.621 72	0.625 52	0.629 30	0.633 07	0.636 83	0.640 58	0.644 31	0.648 03	0.651 73
0.4	0.655 42	0.659 10	0.662 76	0.666 40	0.670 03	0.673 64	0.677 24	0.680 82	0.684 39	0.687 93
0.5	0.691 46	0.694 97	0.698 47	0.701 94	0.705 40	0.708 84	0.712 26	0.715 66	0.719 04	0.722 40
0.6	0.725 75	0.729 07	0.732 37	0.735 65	0.738 91	0.742 15	0.745 37	0.748 57	0.751 75	0.754 90

0.7	0.758 04	0.761 15	0.764 24	0.767 30	0.770 35	0.773 37	0.776 37	0.779 35	0.782 30	0.785 24
0.8	0.788 14	0.791 03	0.793 89	0.796 73	0.799 55	0.802 34	0.805 11	0.807 85	0.810 57	0.813 27
0.9	0.815 94	0.818 59	0.821 21	0.823 81	0.826 39	0.828 94	0.831 47	0.833 98	0.836 46	0.838 91
1.0	0.841 34	0.843 75	0.846 14	0.848 50	0.850 83	0.853 14	0.855 43	0.857 69	0.859 93	0.862 14
2.0	0.977 25	0.977 78	0.978 31	0.978 82	0.979 32	0.979 82	0.980 30	0.980 77	0.981 24	0.981 69
3.0	0.998 65	0.998 69	0.998 74	0.998 78	0.998 82	0.998 86	0.998 89	0.998 93	0.998 97	0.999 00

P%	0.0005	0.001	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10
z_{α}	3.29	3.09	2.576	2.326	1.960	1.645	1.282

- **Ομοιόμορφη-ορθογώνια Κατανομή:** Όταν τα δεδομένα που λαμβάνουμε σχετικά με τη αβεβαιότητα από τα πιστοποιητικά διακριβώσεων και γενικότερα από τις υπόλοιπες πηγές πληροφοριών, προσδιορίζουν μόνο το εύρος / ανοχή ($\pm a$) χωρίς να κάνουν αναφορά για τη στάθμη εμπιστοσύνης, τότε θεωρούμε ότι τα αποτελέσματα ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Με την ομοιόμορφη κατανομή επιλέγουμε ως δεδομένο ότι όλες οι τιμές εντός του εύρους τιμών το οποίο καλύπτουν οι αβεβαιότητες, έχουν την ίδια πιθανότητα να είναι η αληθής τιμή, γεγονός που γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας και τη γραφική παράσταση της κατανομής όπως φαίνεται και το Σχήμα 3.2. Η τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}$$

όπου a_i το μισό μήκος του διαστήματος που δίνεται από τα ορισμένα όρια της μεμονωμένης συμβολής αβεβαιότητας.

- Τριγωνική Κατανομή: Η τριγωνική κατανομή χρησιμοποιείται κυρίως όταν είναι γνωστό ότι οι περισσότερες τιμές των μετρήσεων είναι πιθανό να βρίσκονται κοντά στο κέντρο της κατανομής. Αυτό σημαίνει ότι ορίζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου η συμβολή έχει μια κατανομή με καθορισμένα όρια και όπου η πλειοψηφία των τιμών μεταξύ των ορίων βρίσκονται γύρω από το κεντρικό σημείο. Η σχέση για το υπολογισμό της τυπικής αβεβαιότητας μιας συνεισφοράς που ακολουθεί τη τριγωνική κατανομή είναι:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}}$$

- Κατανομή μορφής U: Η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται για την αβεβαιότητα που προκύπτει κατά τις μετρήσεις ισχύος σε ραδιοσυχνότητες και μικροκυματικές συχνότητες. Για τις κατανομές μορφής U, ο τύπος που υπολογίζει τη τυπική

αβεβαιότητα είναι: $u(x_i) = \frac{K}{\sqrt{2}}$. Η τιμή του ορίου για την ασυσχέτιστη αβεβαιότητα M που συνδέεται με τη μεταφορά ισχύος σε μια σύνδεση λαμβάνεται από τη σχέση

$20 \log_{10}(1 \pm |F_e||F_L|) dB$ όπου F_e και F_L είναι οι συντελεστές αντανάκλασης για την πηγή και το φορτίο. Ωστόσο, επειδή η συνεισφορά της στη συνολική αβεβαιότητα είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες, θεωρούμε ότι η τιμή της ασυσχέτιστης αβεβαιότητας ισοδυναμεί με το μεγαλύτερο εκ των δύο όρο, δηλαδή με το αρνητικό άθροισμα $20 \log_{10}(1 - |F_e||F_L|) dB$.

Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις, λόγω της ελλιπής πληροφορίας, καθίσταται δύσκολος ο προσδιορισμός της πραγματικής κατανομής. Για το λόγο αυτό, γίνεται χρήση της κατανομής Student-t για να χαρακτηριστεί η αβεβαιότητα που αντιστοιχεί στην επιλογή και στην περιγραφή της κατανομής.

Ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την συνάρτηση κατανομής που έχει επιλεγθεί καθώς και η καταγραφή όλων εκείνων των υποθέσεων που καθόρισαν τις εκτιμήσεις που έγιναν αποτελούν το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου B.

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου B είναι:

$$U_B = k \sqrt{S_a^2 + S_b^2}$$

όπου S_a η τυπική απόκλιση της ορθογώνιας κατανομής για τη περίπτωση που τα αποτελέσματα ακολουθούν αυτού του είδους τη κατανομή και S_b η τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής για τη περίπτωση που ακολουθούν την κανονική. Ο παραπάνω τύπος για n ανεξάρτητες κατανομές *ισοδυναμεί με την εξίσωση*

$$U_B = k \sqrt{\frac{\alpha_1^2}{3} + \frac{\alpha_2^2}{3} + \frac{\alpha_3^2}{3} + \dots + \frac{\alpha_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{k_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_n}{k_1}\right)^2}$$

όπου $\frac{\alpha_n}{\sqrt{3}}$ η τυπική απόκλιση της n-οστής συνεισφοράς που ακολουθεί ορθογώνια κατανομή,

U_1 έως U_n οι αβεβαιότητες με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης και k_1 έως k_n οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης.

Παράλληλα, υπάρχουν και κάποιοι επιπλέον παράγοντες που αναμφίβολα συνεισφέρουν στη αβεβαιότητα τύπου B και είναι οι ακόλουθοι: [15]

1. Διακριτική ικανότητα του οργάνου μέτρησης, R. Η αβεβαιότητα που συνδέεται με την διακριτική ικανότητα του οργάνου μέτρησης, U_{res} , καθορίζεται σύμφωνα με τον οδηγό GUM από τη σχέση:

$$u_{res} = R / \sqrt{12}$$

2. Πιστοποιητικό διακρίβωσης του μετρητικού οργάνου. Στο εν λόγω πιστοποιητικό δηλώνεται η αβεβαιότητα της διακρίβωσης, U_{CAL} , καθώς και ο συντελεστής επικάλυψης k ή το διάστημα εμπιστοσύνης. Η τυπική αβεβαιότητα που οφείλεται στον παράγοντα αυτό, , δίνεται από τη σχέση:

$$u_{CAL} = U_{CAL} / k$$

3. Προδιαγραφή ακρίβειας του μετρητικού οργάνου σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Με την υπόθεση ότι η αβεβαιότητα που οφείλεται στον παράγοντα αυτό, u_{SPEC} , ακολουθεί κανονική κατανομή και A_c είναι η τεχνική προδιαγραφή για την επίδοση ακρίβειας του μετρητικού οργάνου όπως καθορίζεται από τον κατασκευαστή:

$$u_{spec} = A_c / \sqrt{3}$$

Η συνδυασμένη αβεβαιότητα που προσδιορίζεται από το σύνολο των παραπάνω παραγόντων με την σχέση

$$u_B = \sqrt{u_{res}^2 + u_{CAL}^2 + u_{spec}^2}$$

θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια υπολογισμού της αβεβαιότητας τύπου B και κατ'έκταση της συνολικής αβεβαιότητας.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στα πλαίσια ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας ενός συστήματος ή ενός εξοπλισμού, κρίνεται απαραίτητο να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό της αβεβαιότητας, όλες εκείνες οι δυνατές συμβολές αβεβαιότητας ακόμη και αν κριθεί από το χρήστη ότι κάποια δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική έτσι ώστε να φανεί ότι έχει ληφθεί υπόψη.

4.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Η ολική αβεβαιότητα $u_{ολικό}$ που συνοδεύει το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός μεγέθους, απαιτεί το συνδυασμό και των δύο επιμέρους συνιστωσών της

αβεβαιότητας (δηλαδή συνιστώσα τύπου A και τύπου B) και δίνεται από τη σχέση:

$$u_{ολικό} = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}.$$

Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να εκφραστεί μια αβεβαιότητα, είτε αυτή είναι σε ένα έγγραφο (πιστοποιητικό CRM, διακρίβωσης, ανάλυσης κ.λ.π.), είτε προσδιορίζεται από ένα εργαστήριο είναι οι εξής : [15]

- ✓ **ΤΥΠΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (standard uncertainty, u):** ορίζεται η αβεβαιότητα μιας ποσότητας, εκφρασμένη ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης της κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα .
- ✓ **ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΤΥΠΙΚΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ (combined standard uncertainty, u_C):** ορίζεται η αβεβαιότητα του μετρούμενου μεγέθους που προκύπτει από το μαθηματικό συνδυασμό των διαφορετικών τυπικών αβεβαιοτήτων και ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των τυπικών αβεβαιοτήτων κάθε συνιστώσας που συνεισφέρει στην αβεβαιότητα. Ας το δούμε όμως πιο αναλυτικά.

Πολύ συχνά συναντάμε περιπτώσεις όπου το μέγεθος που μας ενδιαφέρει δεν μετράται απευθείας αλλά υπολογίζεται έμμεσα από τις μετρήσεις άλλων μεγεθών των οποίων είναι συνάρτηση. Όπως ήδη έχουμε περιγράψει στο κεφάλαιο μοντελοποίησης της μέτρησης, κάθε μετρούμενη τιμή y_i του μεγέθους Y προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών εισόδου X_1, X_2, \dots, X_N μέσω μιας συνάρτησης $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος. Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός μεγέθους Y συμβολίζεται με $u_c(y)$ και κατά τον υπολογισμό της λαμβάνονται υπόψη η τυπική αβεβαιότητα $u(x_i)$ κάθε ποσότητας εισόδου X_i . Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της βασίζονται στην προσέγγιση της συνάρτησης

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

με σειρά Taylor πρώτης τάξης. Πιο αναλυτικά, η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$\bullet \quad u_y^1 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^1 u_{x_i}^1$$

στη περίπτωση που οι ποσότητες εισόδου X_1, X_2, \dots, X_N θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους

$$\bullet \quad u_y^1 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^1 u_{x_i}^1 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και $u(x_i, x_j)$ η συμμεταβλητότητα μεταξύ των x_i και x_j , στην περίπτωση που δύο ή περισσότερες ποσότητες εισόδου είναι αλληλοεξαρτώμενες.

Ωστόσο, κατά τη διαδικασία υπολογισμού της τυπικής αβεβαιότητας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ένας επιπλέον παράγοντας, ο οποίος πιθανότατα να διαμορφώσει διαφορετικά τις παραπάνω σχέσεις. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια μελέτης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας συστημάτων, υπάρχουν περιπτώσεις όπου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι μονάδες με τις οποίες εκφράζεται μια ποσότητα εισόδου διαφέρουν με εκείνες που περιγράφουν την αντίστοιχη ποσότητα εξόδου. Έτσι κρίνεται απαραίτητο να εισαχθεί ένας συντελεστής ευαισθησίας ο οποίος ουσιαστικά να μπορεί να συσχετίσει τις δύο αυτές ποσότητες εισόδου-εξόδου και να μετατρέψει ένα παράγοντα από μια μονάδα σε μία άλλη. Αυτός ο συντελεστής ευαισθησίας αναφέρεται ως c_i και συνήθως ισοδυναμεί με τις μερικές παραγώγους $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, όταν η σχέση μεγεθών εισόδου-εξόδου είναι μη γραμμική. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του γεγονότος ότι ο προσδιορισμός του όρου $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ συχνά είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, χρησιμοποιείται μια γραμμική προσέγγιση και ο συντελεστής ευαισθησίας διαμορφώνεται ως το πηλίκο $\Delta f / \Delta x_i$, όπου Δf είναι η αλλαγή της f σαν αποτέλεσμα μιας αλλαγής Δx_i μέσα στο x_i . Συνεπώς:

$$\text{συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα} = u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2},$$

όπου N οι συνεισφορές και c_i οι συντελεστές ευαισθησίας

- ✓ **Διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty, U):** αποτελεί τη μορφή της αβεβαιότητας που δίνεται συνήθως από ένα εργαστήριο για να συνοδεύσει ένα αποτέλεσμα που αποστέλλεται στον πελάτη του. Εκφράζει το διάστημα μέσα στο οποίο εκτιμάται ότι βρίσκεται η μετρούμενη τιμή με κάποιο βαθμό βεβαιότητας-σιγουριάς, που αποκαλείται πιθανότητα κάλυψης p ή επίπεδο εμπιστοσύνης. Συνήθως η τιμή της διευρυμένης αβεβαιότητας προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τη συνδυασμένη αβεβαιότητα με ένα παράγοντα κάλυψης (coverage factor, k). Η επιλογή του παράγοντα κάλυψης βασίζεται στο τρόπο κατανομής των μετρήσεων καθώς και στην επιθυμητή στάθμη εμπιστοσύνης. Το επίπεδο εμπιστοσύνης που προτείνεται από το UKAS για τη δοκιμή EMC είναι 95% που για τις περισσότερες περιπτώσεις αντιστοιχεί σε συντελεστή κάλυψης $k=2$. Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις, όπου για συντελεστή κάλυψης $k=2$ δεν παρέχεται το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και απαιτείται μια αναθεωρημένη τιμή του k , η k_p , για να επιτευχθεί. Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι:

$$\text{διευρυμένη αβεβαιότητα} = U = k \times u_c(y)$$

4.9 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ (MDM)

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπου εξετάζεται η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των εξοπλισμών-συστημάτων που είναι εγκατεστημένα στο εσωτερικό των διαστημόπλοιων, η μελέτη και η εκτίμηση της αβεβαιότητας των μετρήσεων στα πλαίσια των δοκιμών που πραγματοποιούνται, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική και χρήσιμη. Έχουμε ήδη αναφέρει ότι για τη δημιουργία ενός μαγνητικά καθαρού περιβάλλοντος λειτουργίας στο διαστημόπλοιο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι αφενός ο εντοπισμός όλων εκείνων των συσκευών που αποτελούν 'πηγή μόλυνσης' για αυτό καθώς διαταράσσουν την ομαλή λειτουργία των γειτονικών τους εξοπλισμών εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που ακούσια πολλές φορές παράγουν και αφετέρου η προσομοίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς τους με το κατάλληλο μοντέλο διπόλων. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου μοντέλου, δηλαδή του μοντέλου εκείνου που το παραγόμενο πεδίο των διπόλων του θα προσεγγίζει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το μαγνητικό πεδίο που παράγει η υπό εξέταση συσκευή, βασίζεται σε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου που λαμβάνουν χώρα στις ειδικά διαμορφωμένες EMC εγκαταστάσεις.

Ωστόσο, η παρουσία τυχαίων και συστηματικών σφαλμάτων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου των διπόλων, δημιουργώντας έτσι ανησυχία για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και ένα κλίμα αβεβαιότητας ως προς το μοντέλο που σχεδιάστηκε με σκοπό να προσομοιώσει το δοκιμαστικό εξοπλισμό. Αναμφίβολα, λοιπόν κατά τη διάρκεια του ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας των συστημάτων στο εσωτερικό περιβάλλον λειτουργίας των διαστημόπλοιων, κρίνεται αναγκαία η εκτίμηση της αβεβαιότητας που θα χαρακτηρίζει το μοντέλο διπόλων, προκειμένου ο χρήστης να είναι ενήμερος σχετικά με τη αξιοπιστία αυτού και με κατάλληλες ενέργειες να επιδιώκει την αντιμετώπιση των σφαλμάτων που την προκαλούν.

Το μέγεθος της αβεβαιότητας του μοντέλου των διπόλων που δημιουργήθηκε με σκοπό τη προσομοίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός συστήματος ή μιας συσκευής εξαρτάται από την απόκλιση που έχει το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του μοντέλου αυτού με το πεδίο που αναπτύσσει στη πραγματικότητα ο δοκιμαστικός εξοπλισμός.

Είναι άμεσα αντιληπτό ότι όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο που σχεδιάζεται, δηλαδή όσο πιο πολύ συγκλίνουν οι τιμές των παραμέτρων του βέλτιστου μοντέλου που εν τέλει επιλέχθηκε στις τιμές του θεωρητικού μοντέλου που είχε ορίσει αρχικά ο χρήστης και το οποίο αντικατοπτρίζει στην ουσία τις ιδανικές συντεταγμένες των θέσεων και των συνιστωσών των μαγνητικών ροπών των διπόλων καθώς και το πραγματικό μαγνητικό πεδίο που παράγει εν λειτουργία η υπό εξέταση συσκευή, τόσο πιο έγκυρα θα είναι και τα αποτελέσματα που θα πηγάζουν από τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Το γεγονός αυτό θα έχει ως απόρροια τη ανάκτηση ολοκληρωμένης γνώσης και εικόνας από τη πλευρά του χρήστη ως προς τη μαγνητική συμπεριφορά κάθε 'επικίνδυνης' συσκευής που

μπορεί να ‘απειλήσει’ τη μαγνητική καθαρότητα του λειτουργικού περιβάλλοντος του διαστημόπλοιου. Προφανώς, αυτό θα συνεισφέρει στη ταυτόχρονη και ομαλή λειτουργία όλων των εξοπλισμών, που με τη σειρά της βέβαια θα οδηγήσει σε επιτυχημένες διαστημικές αποστολές.

Η αβεβαιότητα αποτελεί λοιπόν παράγοντα ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων μιας οποιασδήποτε διαστημικής δοκιμασίας καθώς συμβάλλει καταλυτικά μέσω των σημαντικών πληροφοριών που προσφέρει σχετικά με το σετ των διπόλων, στη αντιμετώπιση των φαινομένων παρεμβολών που πιθανότατα να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της παράλληλης λειτουργίας των συστημάτων καθώς και στη δημιουργία ενός μαγνητικά καθαρού λειτουργικού περιβάλλοντος στο εσωτερικό του διαστημόπλοιου. Στη αρχή του κεφαλαίου, έχει γίνει αναφορά σχετικά με τους τρόπους έκφρασης της αβεβαιότητας καθώς και αναλυτική περιγραφή των διάφορων μεθόδων υπολογισμού και εκτίμησης αυτής ανάλογα με το τύπο της. Εφαρμόζοντας λοιπόν τις κατάλληλες μεθόδους κάθε φορά είναι εφικτό να προσδιοριστεί σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό η αβεβαιότητα ως προς το μοντέλο, που απορρέει κυρίως εξαιτίας της έντονης παρουσίας συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της λήψης των μετρήσεων καθώς και κατά τη φάση επεξεργασίας και στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Μετά από συστηματική μελέτη της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας για την εύρεση του βέλτιστου μοντέλου διπόλων με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, διαπιστώθηκε ότι υπήρξαν αρκετοί παράγοντες-σφάλματα που επηρέαζαν την ακρίβεια των μετρήσεων και συνεισέφεραν στη ανάπτυξη της αβεβαιότητας. Θα αναφέρουμε συνοπτικά τους κυριότερους:

- ✓ Οι ατέλειες των οργάνων μέτρησης
- ✓ Η μη σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση του δοκιμαστικής μονάδας πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα στις ειδικά διαμορφωμένες MCF εγκαταστάσεις (displacement error).
- ✓ Η κακή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των μαγνητόμετρων που χρησιμοποιούνταν για τη λήψη των μετρήσεων.
- ✓ Σφάλματα που προέκυπταν κατά τη ανάγνωση των γωνιών, για το προσδιορισμό των σημείων παρατήρησης.
- ✓ Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν πχ. θόρυβος.
- ✓ Οι απαραίτητες προσαρμογές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης σε συνδυασμό με τις προδιαγραφές που χαρακτήριζαν το σύστημα συλλογής δεδομένων ενδεχομένως να προκαλούσε σφάλματα στα αποτελέσματα των μετρήσεων.
- ✓ Η επιλογή της κατανομής που ακολουθούν οι μετρήσεις.

4.10 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗ ΣΩΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Ας περιγράψουμε, ωστόσο πιο αναλυτικά στη υποενότητα αυτή, πως επηρεάζει η μη σωστή τοποθέτηση του δοκιμαστικού εξοπλισμού πάνω στη πλάκα, την ακρίβεια και την εγκυρότητα των μετρήσεων και συνεπώς τη συνολική αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το μοντέλο διπόλων που υπολογίσαμε.

Αναμφίβολα, αποτελεί ένα από τους κυριότερους παράγοντες αβεβαιότητας καθώς εισάγει σφάλματα (displacement error) στις μετρήσεις πεδίου που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης των Γενετικών αλγορίθμων για τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα:

Αν υποθέσουμε ότι η δοκιμαστική μονάδα έχει ευθυγραμμιστεί και τοποθετηθεί στη σωστή θέση πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα, από τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που λαμβάνουμε στα σημεία παρατήρησης κυκλικά γύρω από το εξοπλισμό, υπολογίζουμε ένα μοντέλο διπόλων (MDM) του οποίου η μαγνητική συμπεριφορά προσομοιώνει αποτελεσματικά τη μαγνητική συμπεριφορά της συσκευής που εξετάζουμε.

Ωστόσο, αν λάβουμε τη περίπτωση που εξαιτίας, είτε της ελλιπούς γνώσης ως προς τη σωστή θέση του εξοπλισμού και των περιορισμένων δυνατοτήτων του χρήστη είτε των ατελειών των οργάνων μέτρησης έχει τοποθετηθεί λανθασμένα ο δοκιμαστικός εξοπλισμός στις MCF εγκαταστάσεις, προκαλούνται μετατοπίσεις στις συντεταγμένες που ορίζουν τη σωστή θέση του EUT, μετατοπίζοντας παράλληλα και το κέντρο των αξόνων. Το γεγονός αυτό επιφέρει αλλαγές στις μετρήσεις πεδίου που λαμβάνουμε στα ίδια σημεία παρατήρησης και την παραγωγή ενός νέου μοντέλου διπόλων που θα διαφέρει από ιδανικό.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν, ότι όσο η ευθυγράμμιση και η θέση του δοκιμίου πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα τείνουν να προσεγγίζουν τις σωστές τιμές, τόσο πιο ακριβείς και αξιόπιστες θα είναι οι μετρήσεις πεδίου που θα λαμβάνουμε και κατ' επέκταση το μοντέλο που θα υπολογίζουμε.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ας δούμε στη υποενότητα αυτή, πιο αναλυτικά τα τρία διαφορετικά σετ των δύο διπόλων που μελετήσαμε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και τα συμπεράσματα που πρόεκυψαν από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήσαμε.

5.2 ΠΡΩΤΟ ΣΕΤ ΔΙΠΟΛΩΝ

5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ (MDM)

ΒΗΜΑ 1^ο

Για το πρώτο σετ διπόλων, όπως και για τα υπόλοιπα δύο σετ, στη πρώτη φάση της διαδικασίας επιλέξαμε τις αρχικές τιμές των συντεταγμένων x, y, z των θέσεων και των συνιστωσών m_x, m_y, m_z των μαγνητικών ροπών των δύο διπόλων που το συγκροτούν, ορίζοντας ένα θεωρητικό μοντέλο και υπολογίσαμε μέσω των τύπων του Maxwell(2.1-2.7) το αντίστοιχο θεωρητικό μαγνητικό πεδίο **Bth** που παράγει σε τριάντα έξι σημεία παρατήρησης κυκλικά γύρω από τις θέσεις των διπόλων, με ακτίνα 40cm.

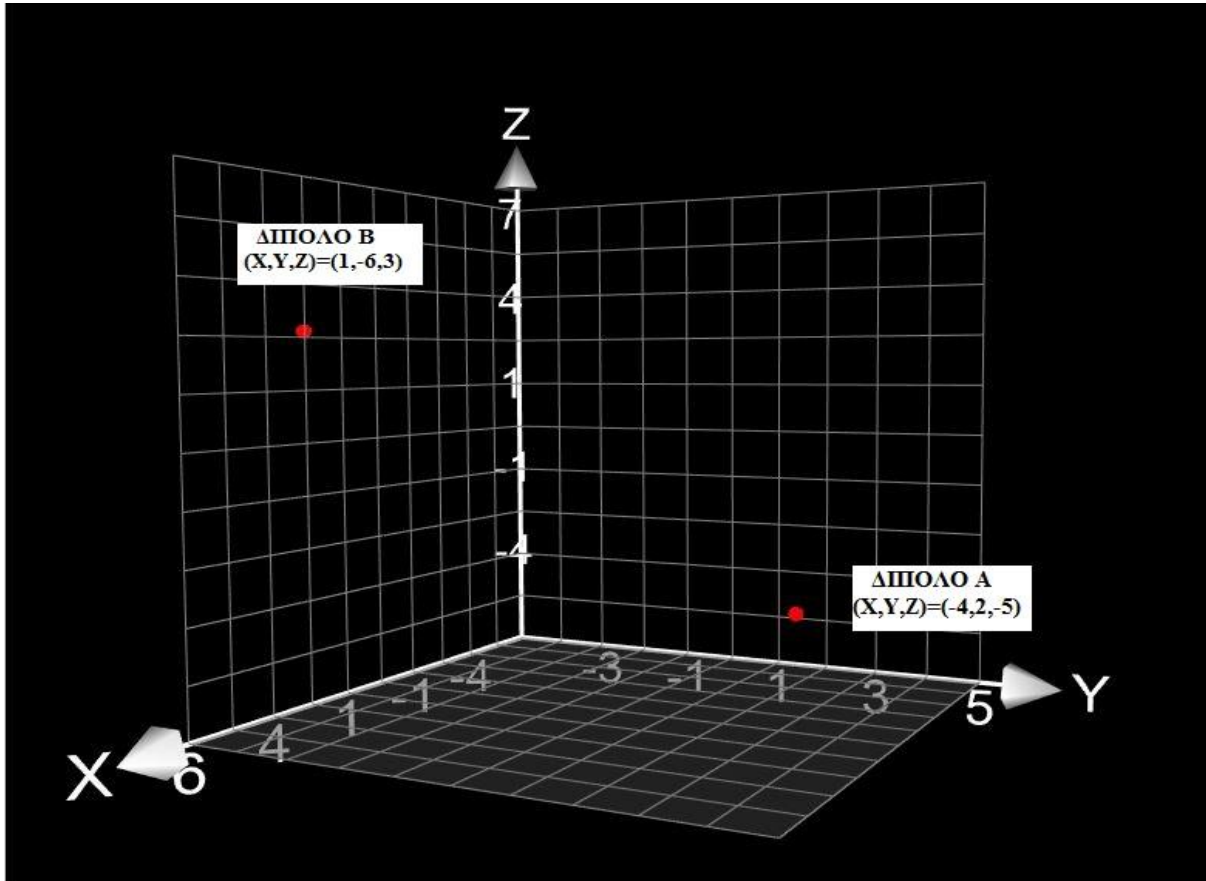
Λόγω αδυναμίας λήψης πραγματικών μετρήσεων πεδίου γύρω από το δοκιμαστικό δοκίμιο σε ειδικά διαμορφωμένες MCF εγκαταστάσεις, δημιουργήσαμε αυτό το σετ μετρήσεων θεωρητικού πεδίου, που αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μετρήσεις πεδίου τις οποίες θα λαμβάναμε στη περίπτωση που το δοκίμιο είχε τοποθετηθεί και ευθυγραμμιστεί σωστά πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα των MCF εγκαταστάσεων υπό ιδανικές συνθήκες.

Οι θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του πρώτου σετ διπόλων που επιλέξαμε καταγράφονται στο Πίνακα 5.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 5.1: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 1^{ου} σετ διπόλων

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ		
ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΠΟΛΩΝ	1^ο ΔΙΠΟΛΟ	2^ο ΔΙΠΟΛΟ
x(cm)	-4	1
y(cm)	2	-6
z(cm)	-5	3
ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ		
m_x(A·m²)	-550	500
m_y(A·m²)	950	300
m_z(A·m²)	-300	600

Στο παρακάτω σύστημα συντεταγμένων απεικονίζονται οι θέσεις των διπόλων που ορίζουν το θεωρητικό μοντέλο.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του πρώτου σετ διπόλων

ΒΗΜΑ 2^ο

Στη συνέχεια, κάνοντας χρήση των εντολών,

```

for j = 1:2
    x(j) = (rand-rand)*0.1 + x(j) ;
    y(j) = (rand-rand)*0.1 + y(j);
    z(j) = (rand-rand)*0.1 + z(j);
end

```

όπου $j=1,2$ ο αριθμός των διπόλων,

μετατοπίσαμε τις θέσεις των δύο διπόλων κατά maximum 0,1mm τυχαία στο χώρο ενώ παράλληλα διατηρήσαμε σταθερές τις μαγνητικές τους ροπές. Ακολούθησε ο υπολογισμός του πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα διπόλα, στα τριάντα έξι ίδια σημεία

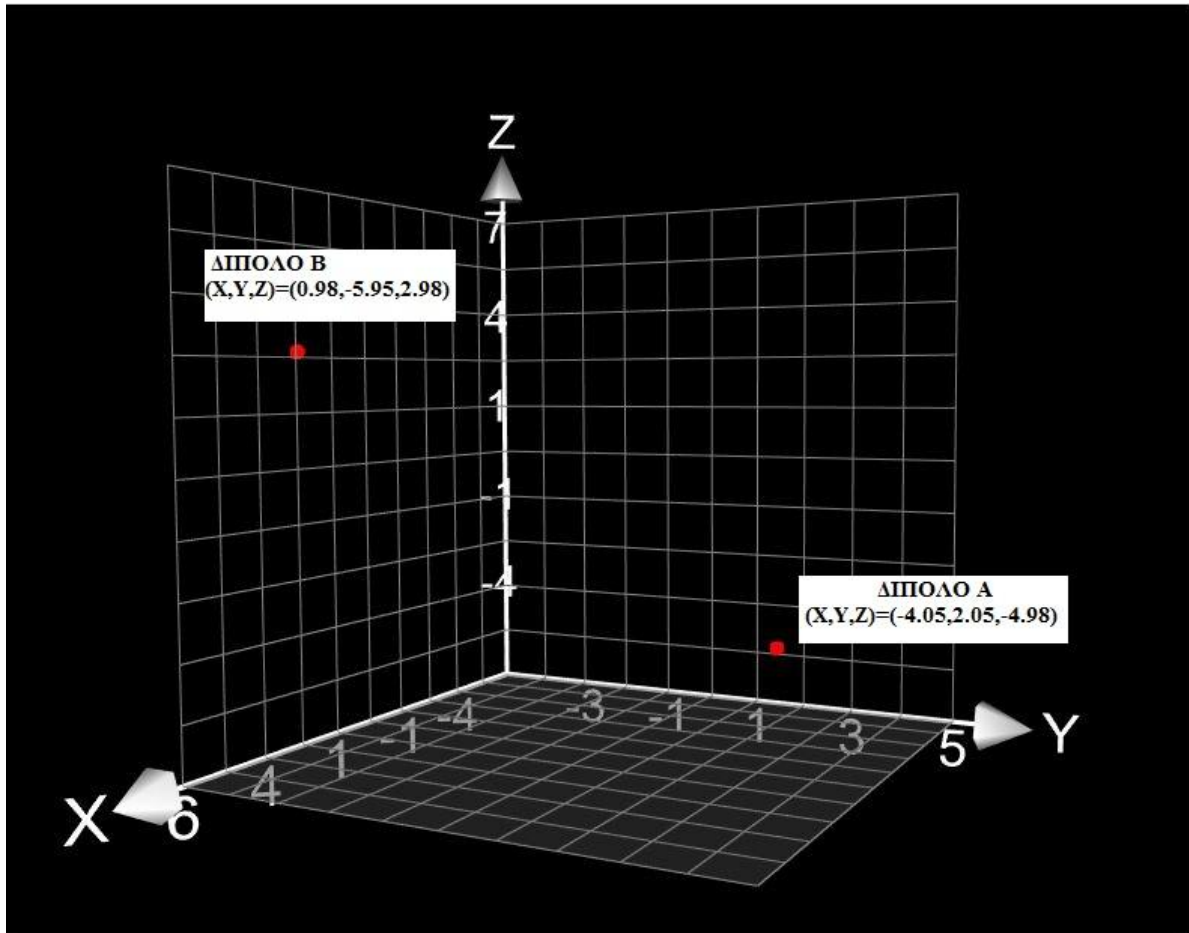
παρατήρησης με πριν, τα οποία όπως αναφέραμε βρίσκονταν σε κυκλική τροχιά γύρω από τα δίπολα, κάνοντας ξανά χρήση των τύπων του Maxwell(2.1-2.4). Η μετατόπιση των θέσεων των διπόλων του μοντέλου καθώς και ο υπολογισμός του αντίστοιχου μαγνητικού πεδίου που παρήγαγε συνέβη εκατό φορές(100 επαναλήψεις).

Στόχος μας ήταν να δημιουργήσουμε ένα νέο σετ μετρήσεων , το οποίο θα εμπεριείχε τις τιμές του πεδίου του θεωρητικού μοντέλου έχοντας όμως εισάγει ένα μη προκαθορισμένο ποσοστό σφάλματος(displacement error).

Οι μεταβολές των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων του μοντέλου στο χώρο και οι αντίστοιχες μετρήσεις μαγνητικού πεδίου που υπολογίσαμε, μας έδωσαν τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε το δοκιμαστικό δοκίμιο καθώς και να μελετήσουμε τη αβεβαιότητα που εισάγεται στο παραγόμενο μοντέλο εξαιτίας της μη σωστής τοποθέτησης του εξοπλισμού στις ειδικά διαμορφωμένες (*MCF*) *Mobile Coil Facilities* εγκαταστάσεις που θα προσομοιώνει τη μαγνητική συμπεριφορά του δοκιμαστικού εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, επειδή δεν ήταν εφικτό, όπως αναφέραμε και νωρίτερα να ληφθούν πραγματικές μετρήσεις γύρω από τη συσκευή σε *Mobile Coil Facilities* εγκαταστάσεις και ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια και τη αξιοπιστία του μοντέλου είναι η σωστή τοποθέτηση του δοκιμαστικού εξοπλισμού πάνω στη περιστρεφόμενη πλάκα αυτών των ειδικά διαμορφωμένων εγκαταστάσεων, επιδιώξαμε με τη αλλαγή των συντεταγμένων των διπόλων να δημιουργήσουμε σετ μετρήσεων μαγνητικού πεδίου που θα αντιστοιχούσαν σε μετρήσεις πεδίου τις οποίες θα λαμβάναμε στη περίπτωση που το δοκίμιο δεν είχε τοποθετηθεί και ευθυγραμμιστεί σωστά πάνω στη πλάκα.

Συνεπώς, με τον τρόπο αυτό κατέστη όπως θα δούμε στη συνέχεια εφικτή, η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου του μοντέλου, του οποίου οι συντεταγμένες των θέσεων των διπόλων αποκλίνουν από τις σωστές τιμές καθώς και η μελέτη της αβεβαιότητας που εισάγεται στο παραγόμενο μοντέλο λόγω της απόκλισης αυτής.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η πρώτη μετατόπιση που υπέστησαν οι συντεταγμένες x, y, z των θέσεων και των δύο διπόλων στο χώρο:



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του πρώτου σετ

ΒΗΜΑ 3^ο

Σε αυτό το τρίτο στάδιο, ξεκίνησε ουσιαστικά η διαδικασία μοντελοποίησης(MDM) κάνοντας χρήση της στοχαστικής μεθόδου των Γενετικών Αλγορίθμων και λαμβάνοντας ως δεδομένα τις τιμές πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα.

Πιο αναλυτικά, επιδιώξαμε μέσω της μεθόδου βελτιστοποίησης να υπολογίσουμε το βέλτιστο μοντέλο διπόλων, το μαγνητικό πεδίο του οποίου θα ισοδυναμούσε ή αν όχι θα ήταν παραπλήσιο με εκείνο του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα που υπολογίσαμε στο ΒΗΜΑ 2^ο.

Τα βήματα που εκτελέστηκαν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης για τον εντοπισμό του ιδανικού-βέλτιστου μοντέλου, περιγράφονται λεπτομερώς στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, στην υποενότητα 'ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ'.

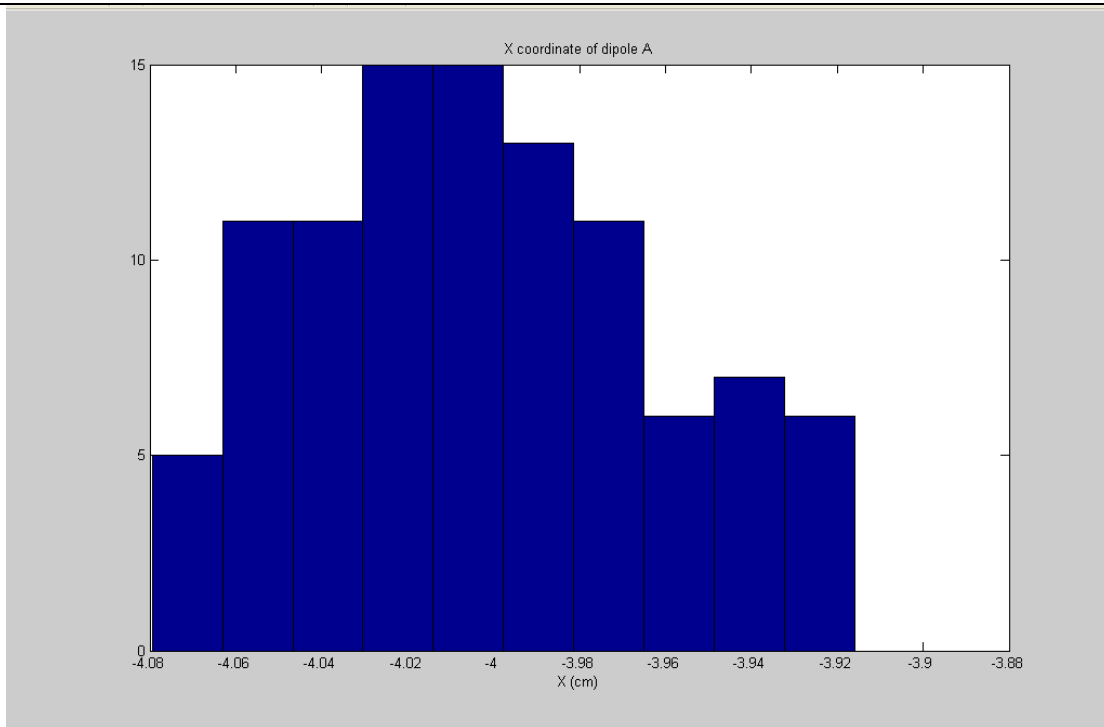
Η διαδικασία μοντελοποίησης ολοκληρώθηκε μόλις βρέθηκαν οι κατάλληλες παράμετροι, δηλαδή εκείνες οι συντεταγμένες των θέσεων και οι συνιστώσες των μαγνητικών ροπών

των του μοντέλου, του οποίου το παραγόμενο πεδίο ελαχιστοποιούσε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (rms) μεταξύ αυτού και του μαγνητικού πεδίου που δημιούργησε το μοντέλο με τα μετατοπισμένα δίπολα.

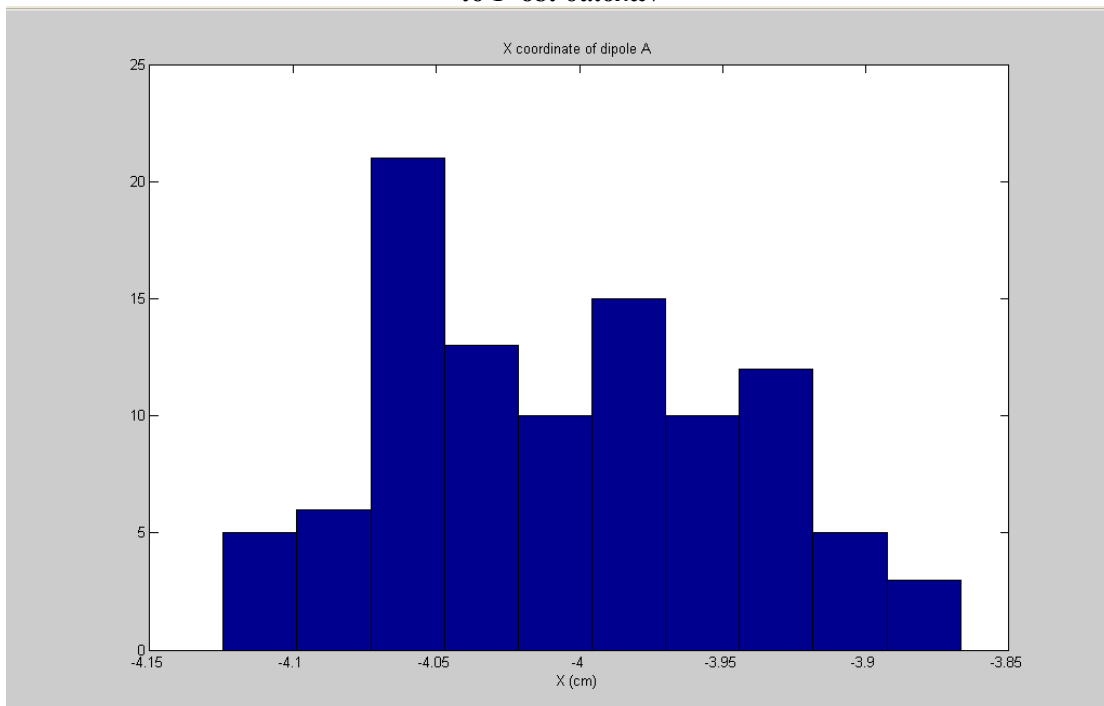
5.2.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΙΠΟΛΩΝ

Τα ιστογράμματα των τιμών που ακολουθούν, παρουσιάζουν τη γραφική παράσταση κατανομής συχνότητας των συντεταγμένων x, y, z των θέσεων των μετατοπισμένων διπόλων A και B που μετρήθηκαν στις εκατό επαναλήψεις καθώς και των θέσεων των διπόλων που αντιστοιχούν στα βέλτιστα μοντέλα που υπολογιστήκαν κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων αυτών. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι μετρήσεις των συντεταγμένων ενώ στο κατακόρυφο οι τιμές των συχνότητων.

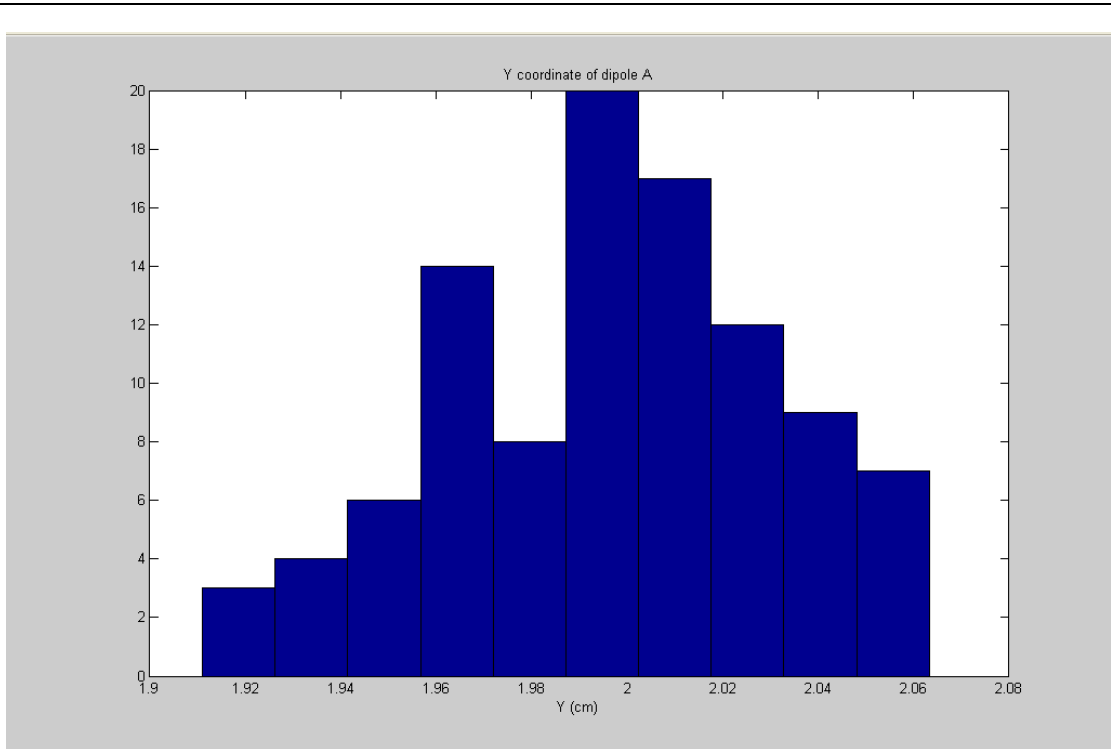
ΔΙΠΟΛΟ Α
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



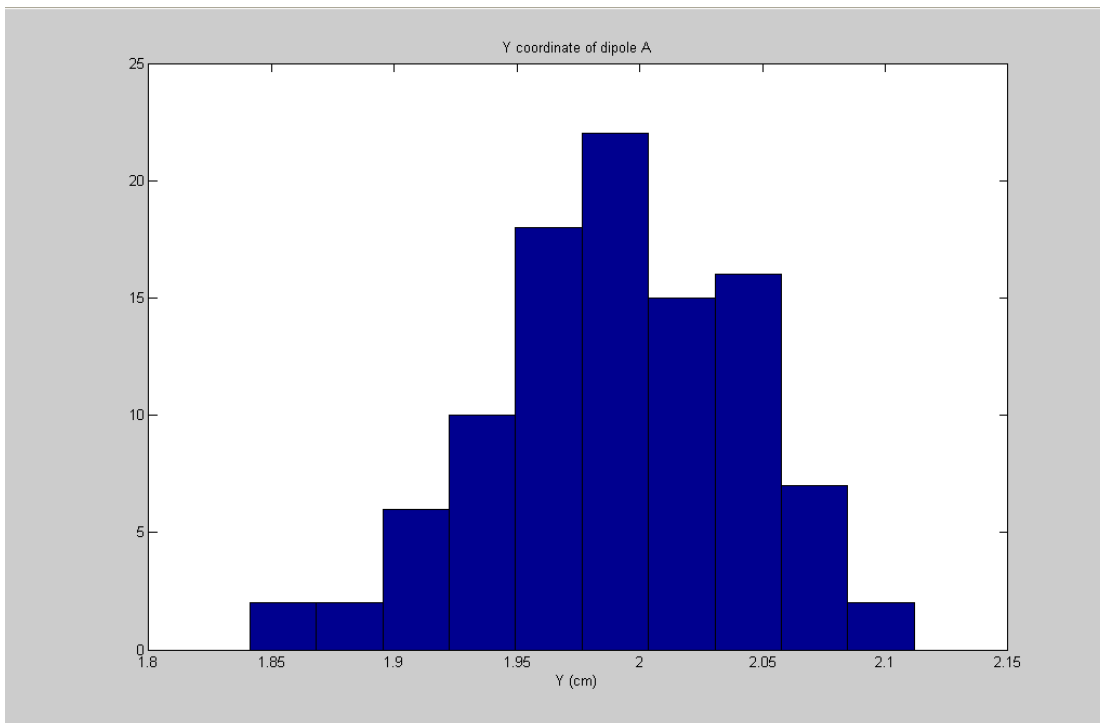
Σχήμα 5.3: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Α για το 1^ο σετ διπόλων



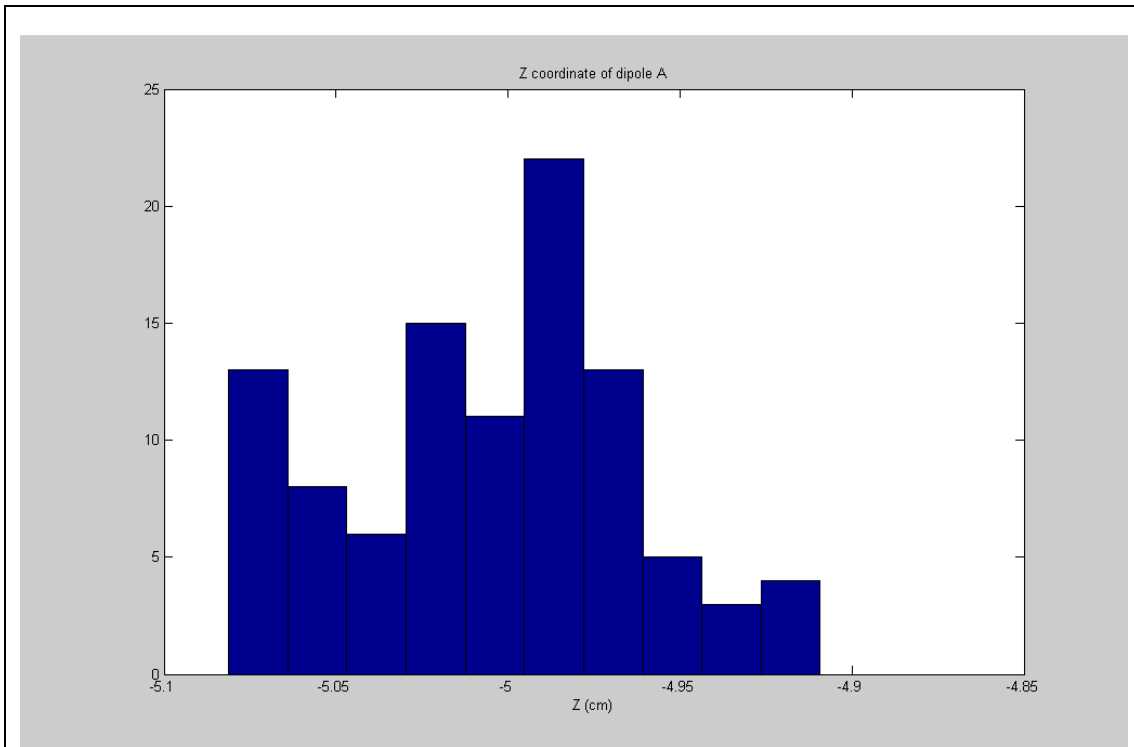
Σχήμα 5.4: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Α του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1^ο σετ διπόλων



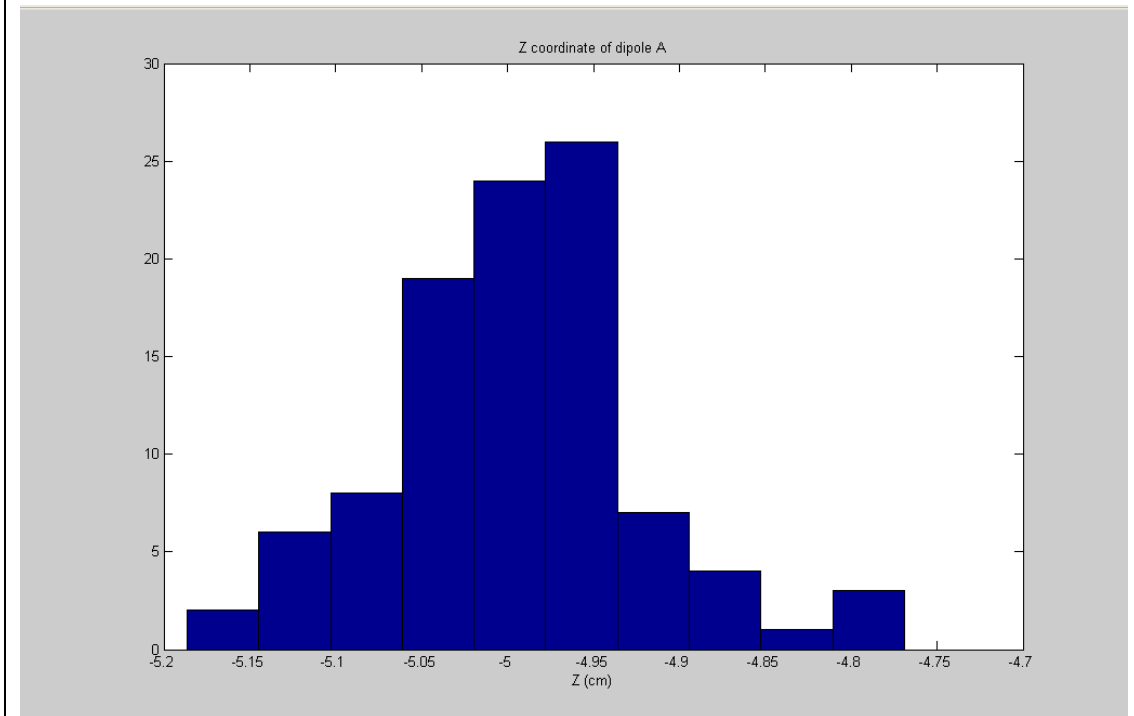
Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Α για το 1^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Α του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1^ο σετ διπόλων

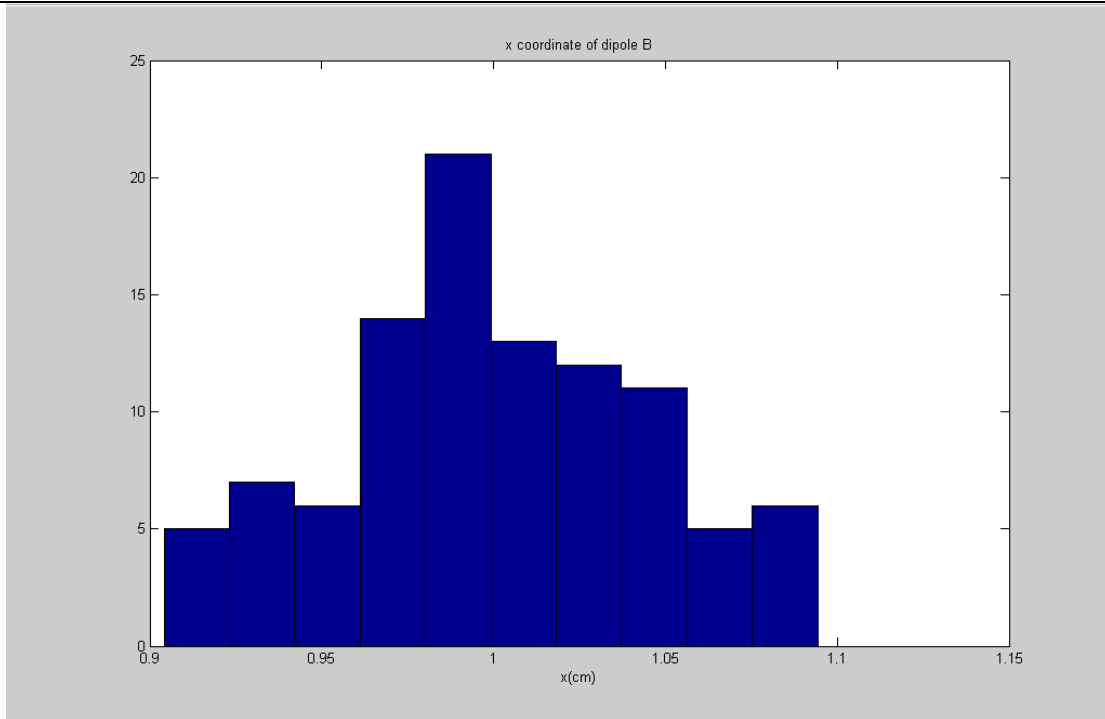


Σχήμα 5.7: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 1ο σετ διπόλων

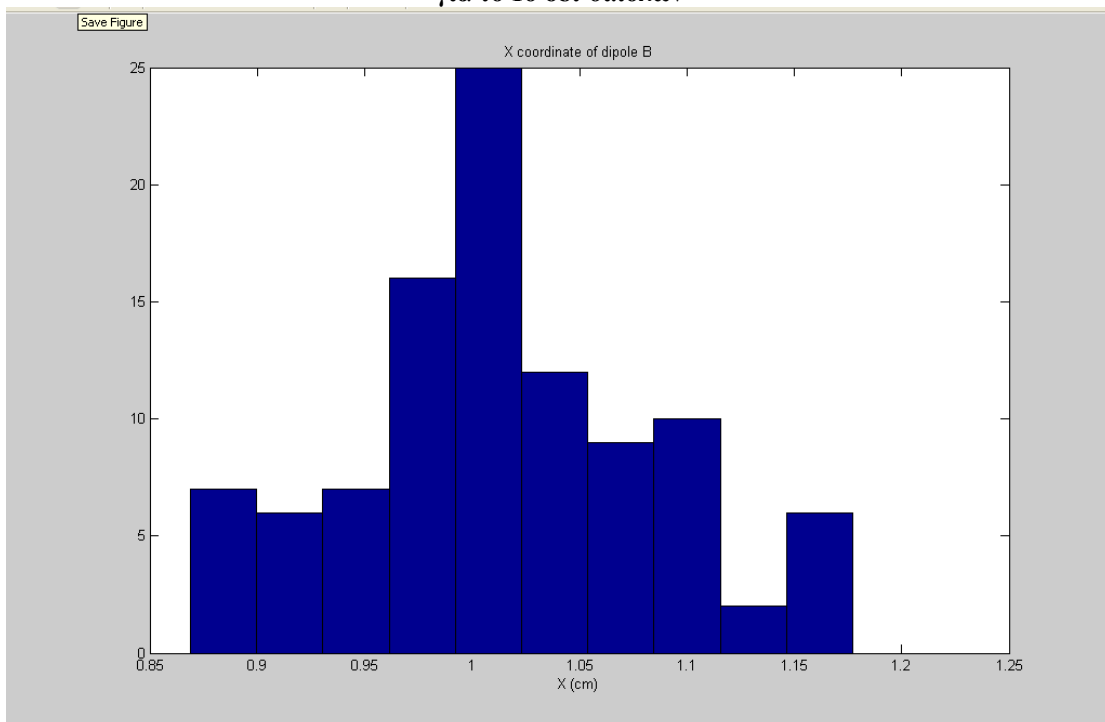


Σχήμα 5.8: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1ο σετ διπόλων

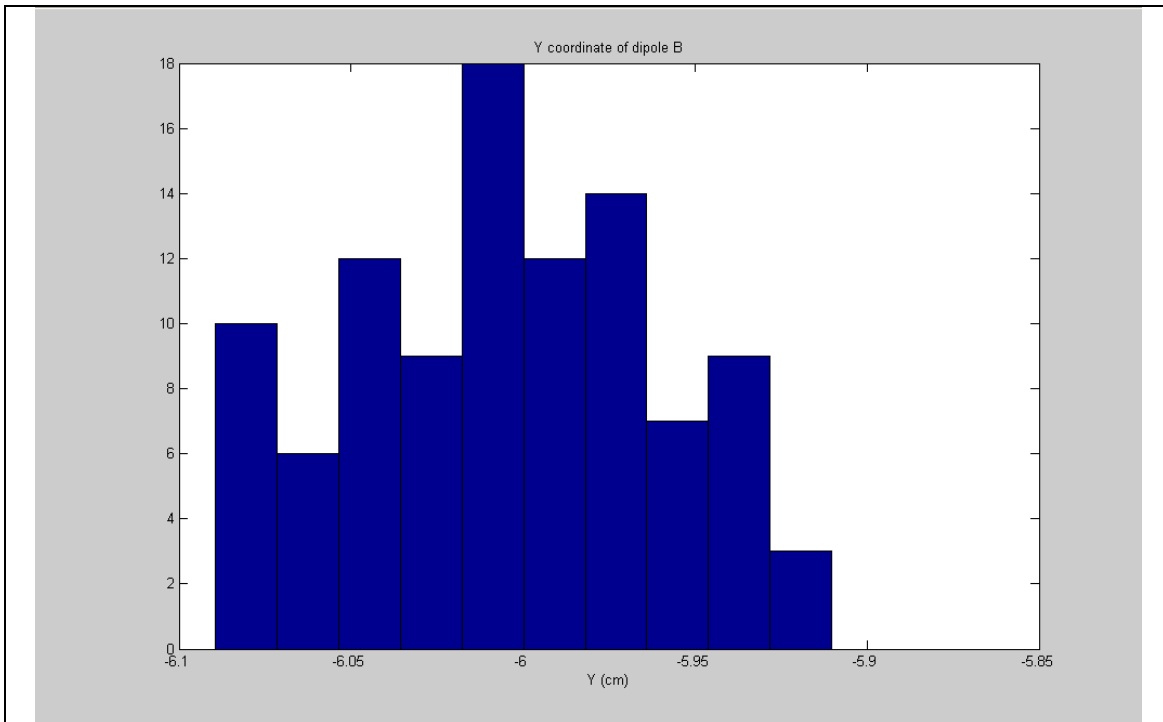
ΔΙΠΟΛΟ Β
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



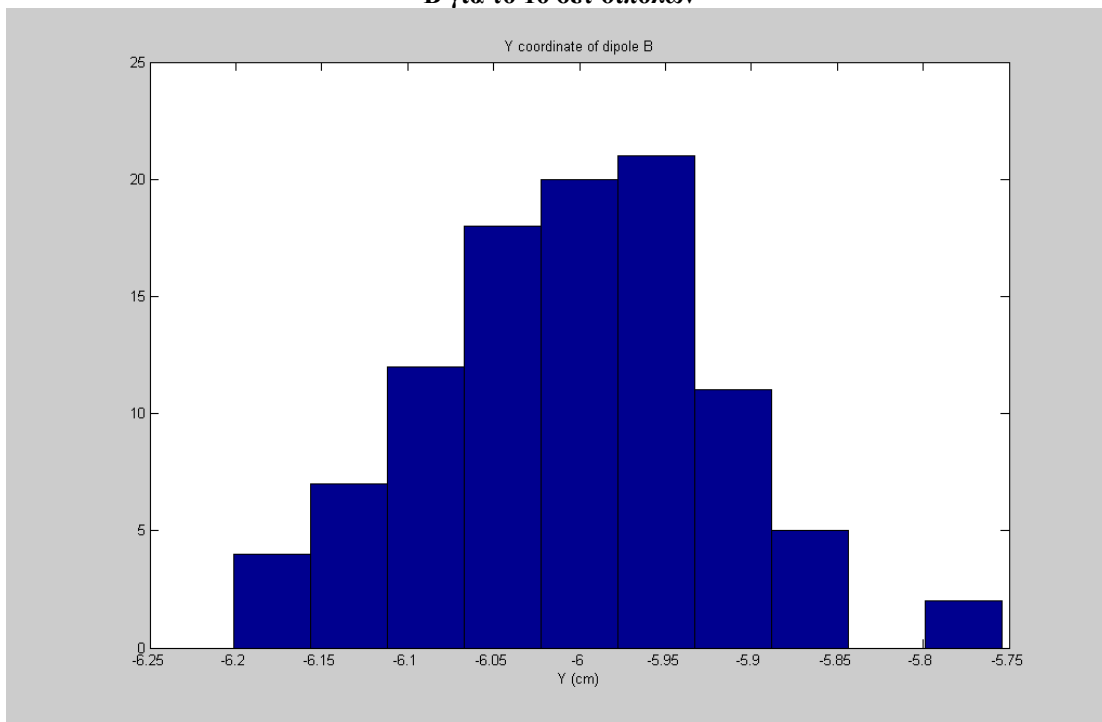
Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1ο σετ διπόλων



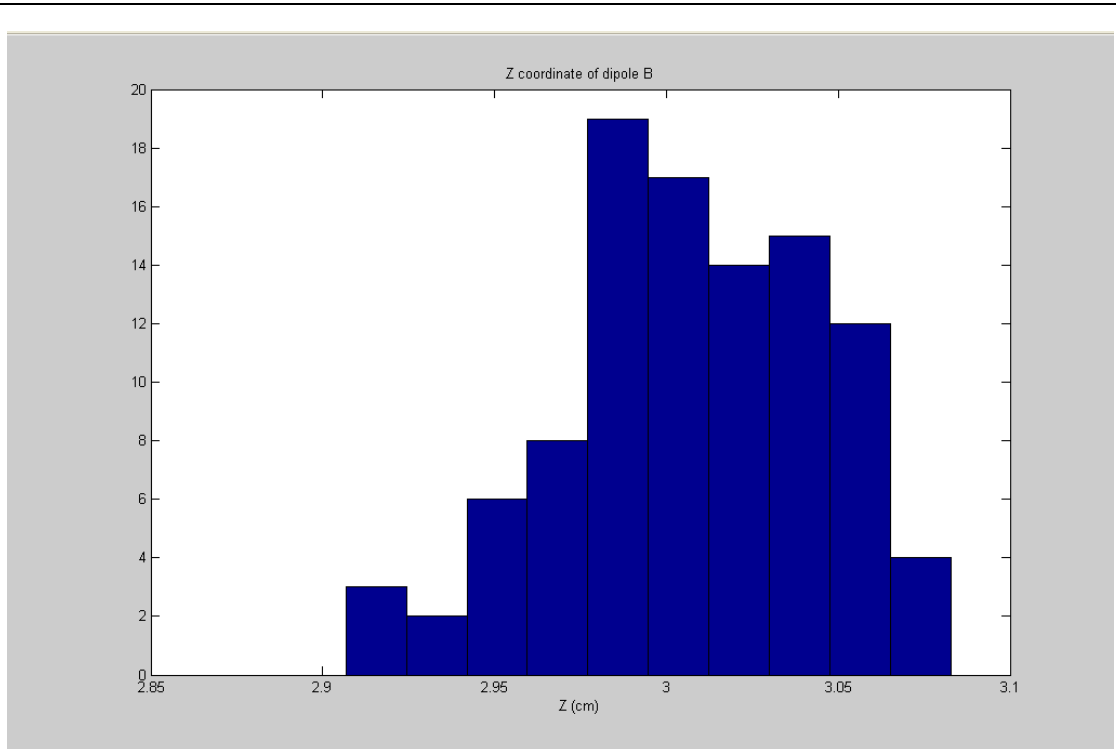
Σχήμα 5.10: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1ο σετ διπόλων



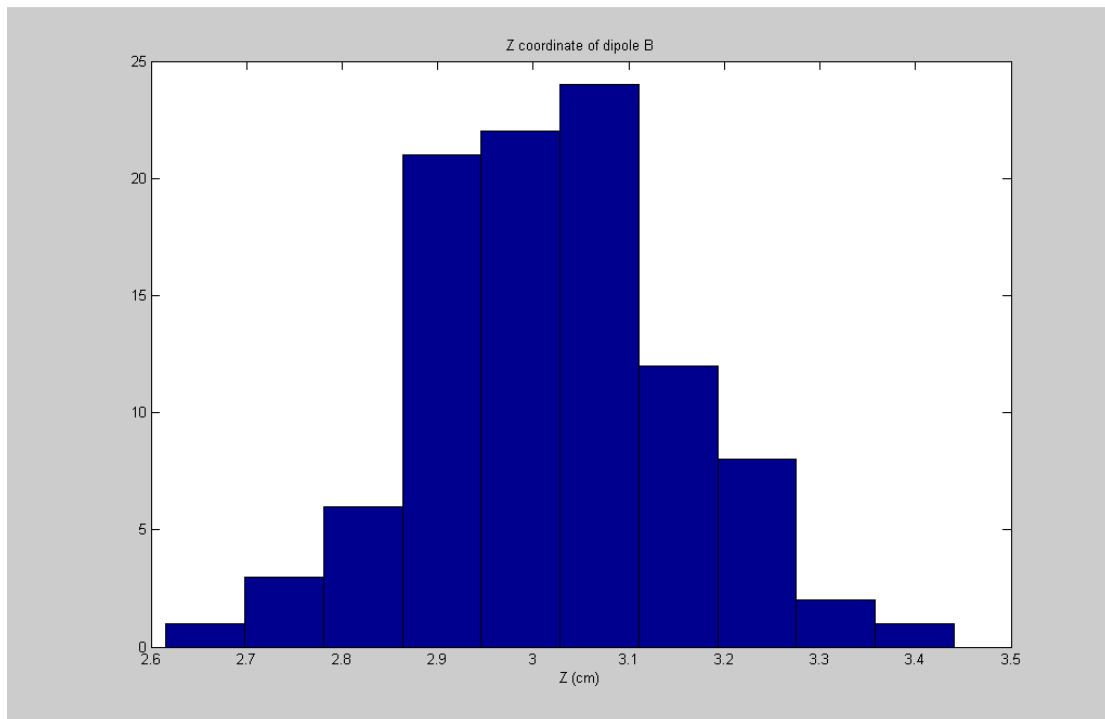
Σχήμα 5.11: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.12: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.13: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 1^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.14: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1^ο σετ διπόλων

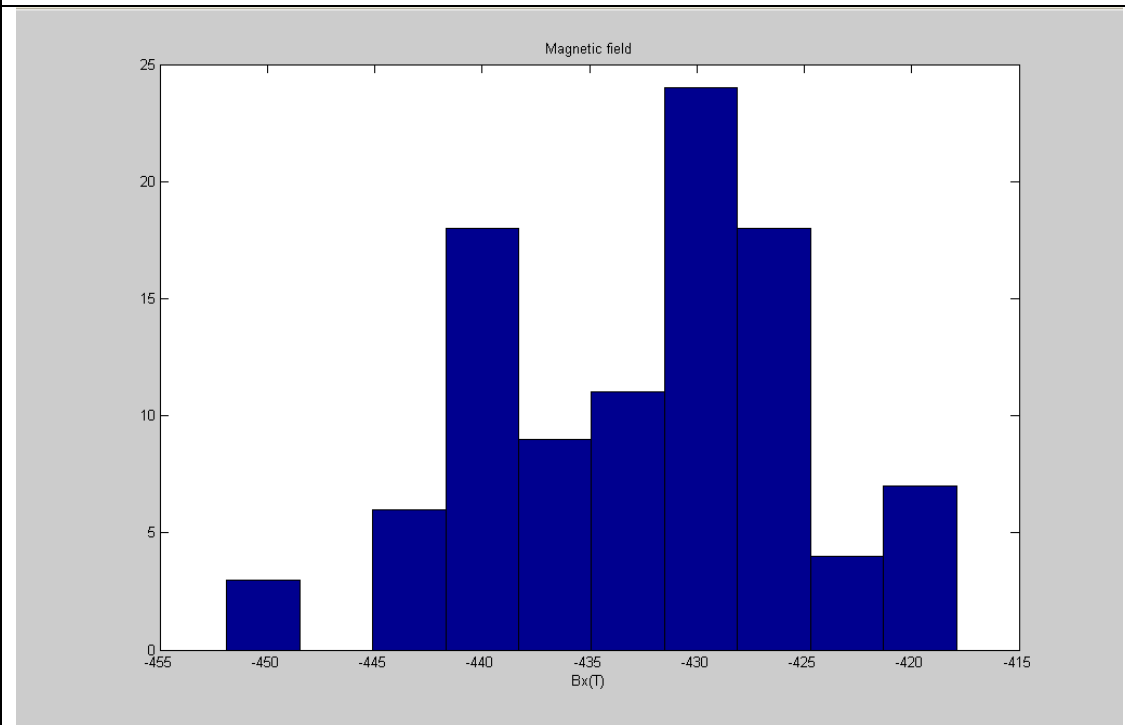
5.2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Σύμφωνα με το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov (K-S), που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια ελέγχου κανονικότητας τόσο των τιμών των συντεταγμένων x, y, z των θέσεων των μετατοπισμένων διπόλων (A και B) όσο και των θέσεων των διπόλων (A και B) του βέλτιστου μοντέλου, διαπιστώθηκε ότι όλες οι μετρήσεις ακολουθούν κανονική κατανομή.

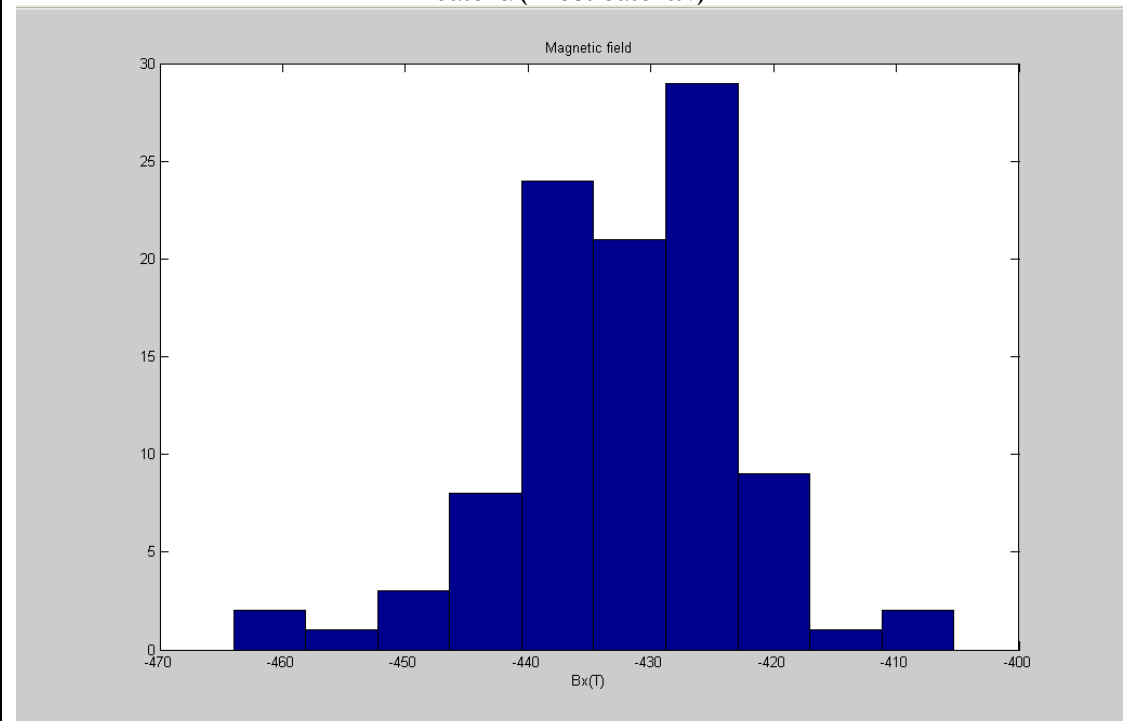
5.2.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, απεικονίζονται τα ιστογράμματα των τιμών του συνολικού μαγνητικού πεδίου B_x, B_y, B_z που παράγαν τα μοντέλα με τα αντίστοιχα μετατοπισμένα δίπολα καθώς και των τιμών πεδίου των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων. Επιλέχθηκε ως σημείο παρατήρησης, το 36^ο σημείο το οποίο βρίσκεται σε κυκλική τροχιά γύρω από τις θέσεις των διπόλων.

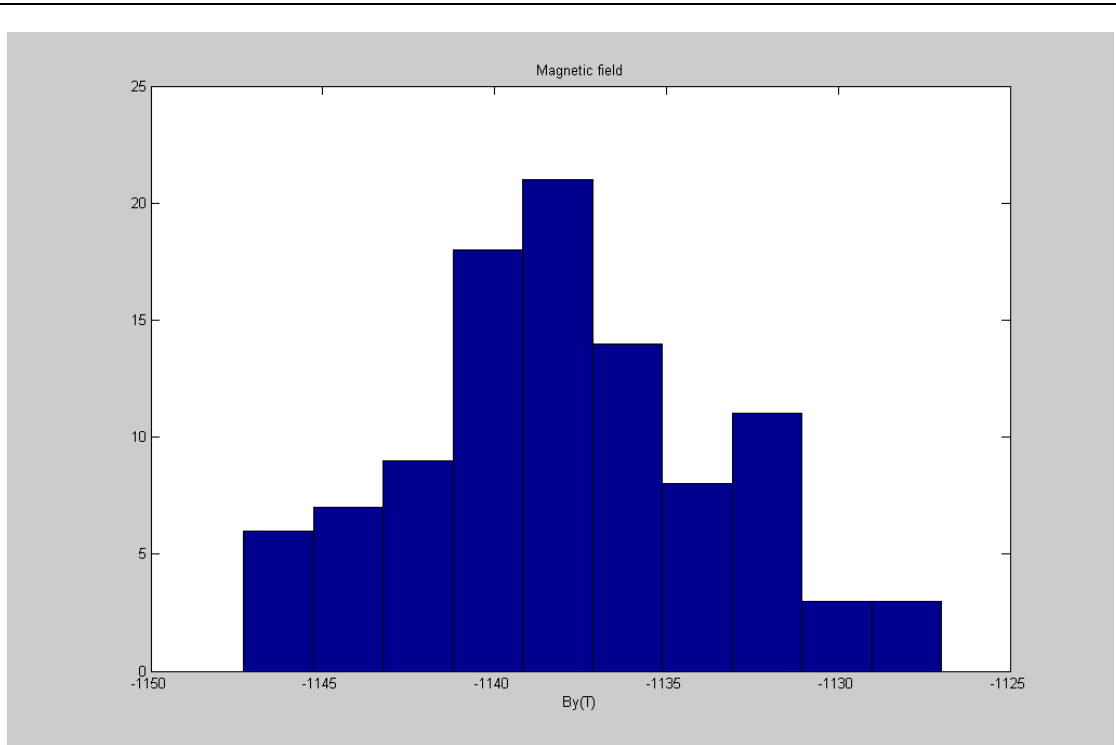
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



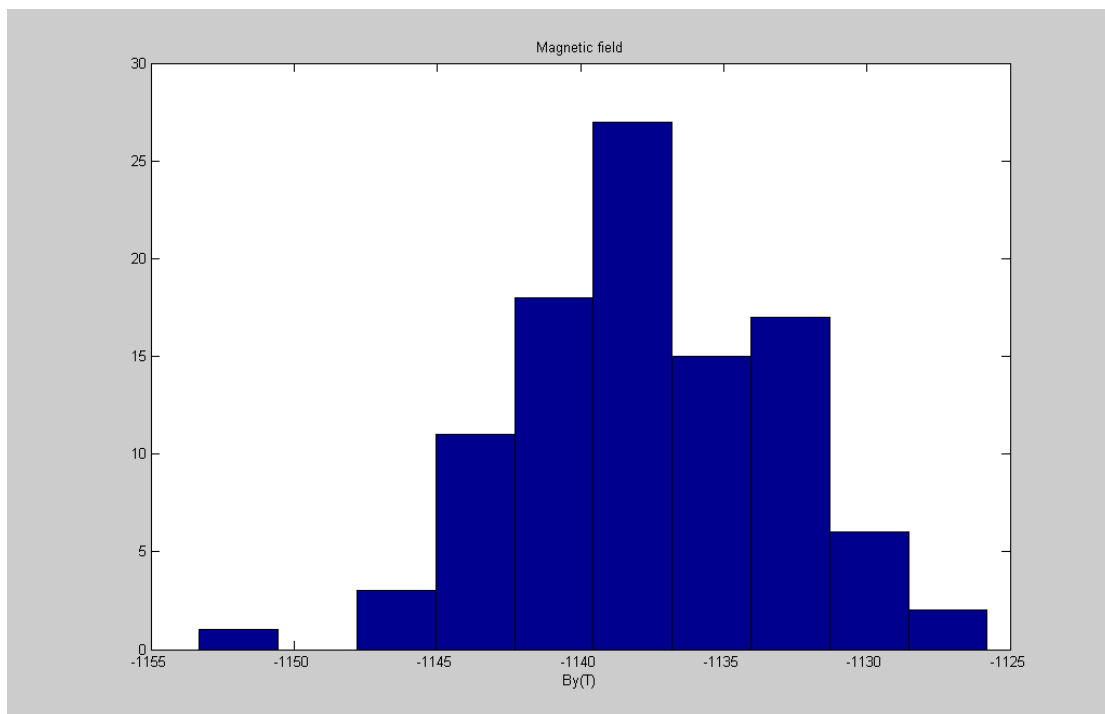
Σχήμα 5.15: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων)



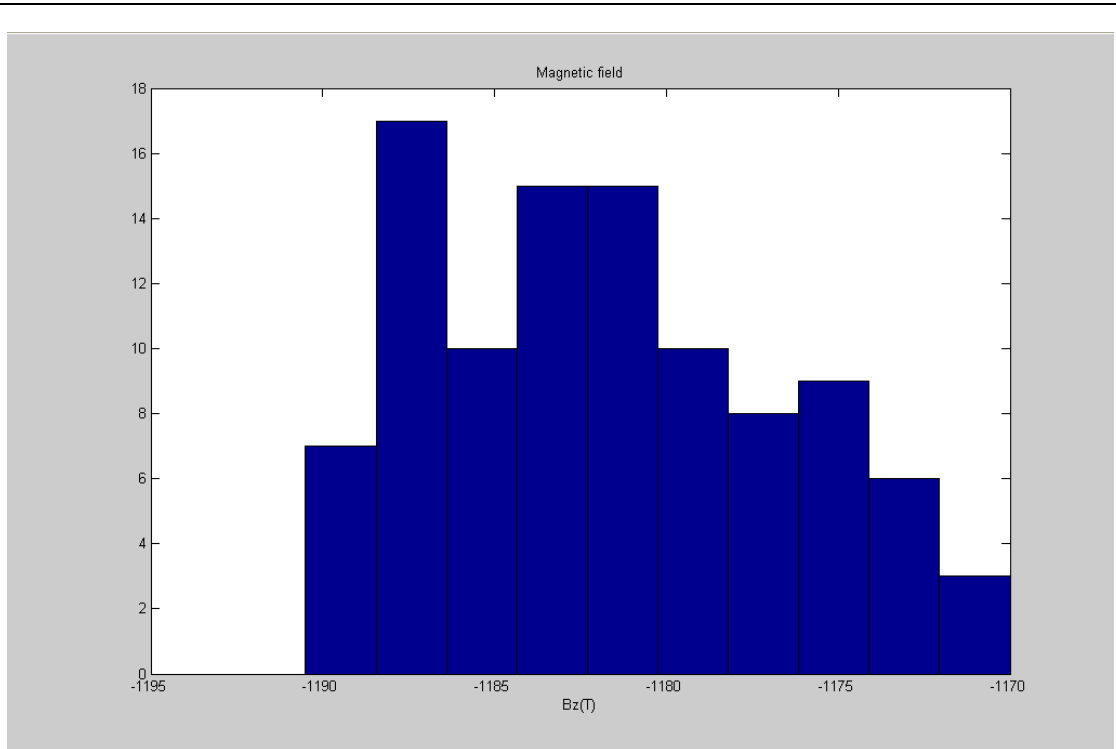
Σχήμα 5.16: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων



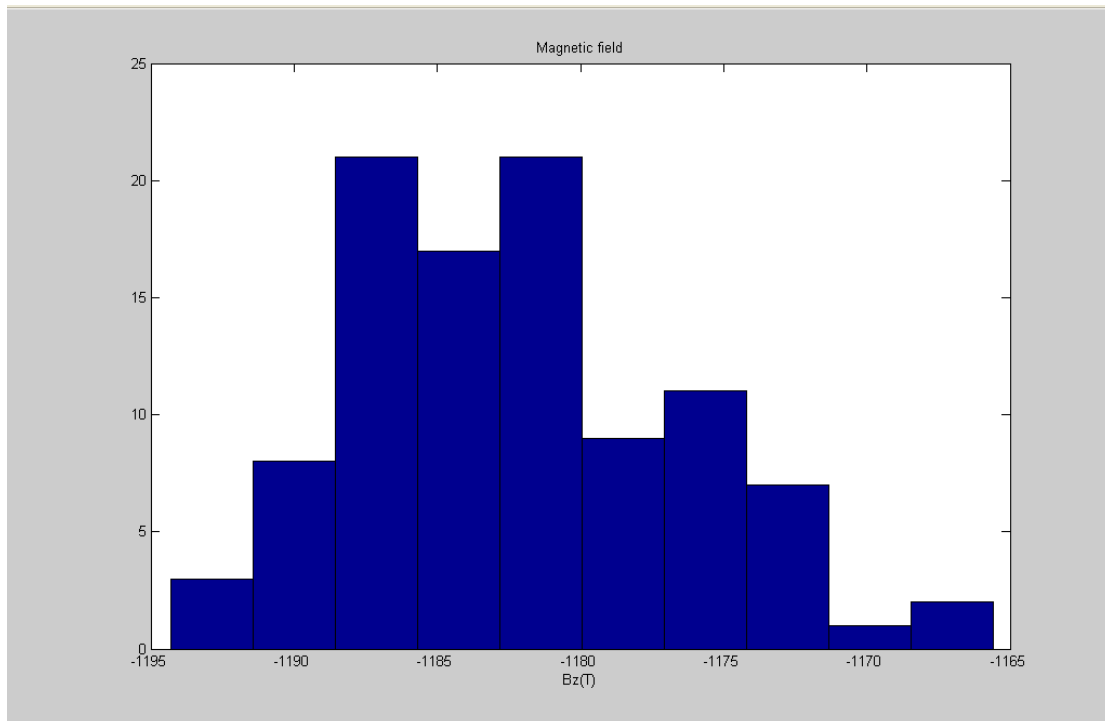
Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων)



Σχήμα 5.18: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων



Σχήμα 5.19: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (1° σετ διπόλων)



Σχήμα 5.20: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 1° σετ διπόλων

5.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Στη προσπάθεια μας να ελέγξουμε αν οι τιμές των συνιστωσών του συνολικού μαγνητικού πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα καθώς και του πεδίου του βέλτιστου μοντέλου προσεγγίζουν κανονική κατανομή, κάναμε χρήση ξανά του στατιστικού τεστ Kolmogorov-Smirnov (K-S) και καταλήξαμε ότι πράγματι την ακολουθούν.

5.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΕΤ ΔΙΠΟΛΩΝ

5.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ακριβώς τη ίδια διαδικασία για τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου, που ακολουθήσαμε στη περίπτωση του πρώτου σετ διπόλων, επαναλάβαμε και για το δεύτερο. Η μόνη διαφορά συνίσταται στις θεωρητικές τιμές των συντεταγμένων των θέσεων που δόθηκαν αρχικά στα δίπολα του μοντέλου καθώς και στο σημείο παρατήρησης που επιλέχθηκε για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου των μοντέλων.

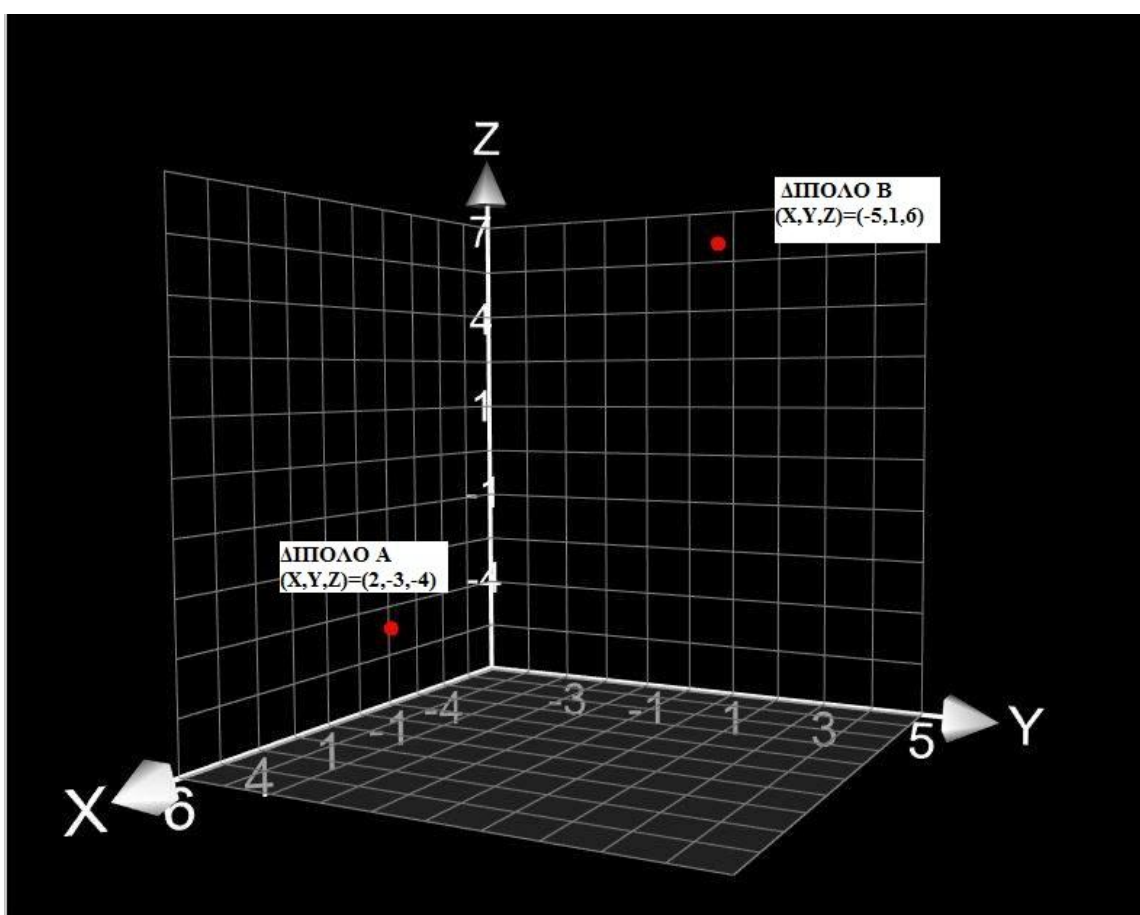
Οι θεωρητικές τιμές των παραμέτρων που δώσαμε στο δεύτερο σετ διπόλων παρουσιάζονται στο Πίνακα 5.2 που ακολουθεί:

Πίνακας 5.2: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 2^{ου} σετ διπόλων

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ		
ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΠΟΛΩΝ	1 ^ο ΔΙΠΟΛΟ	2 ^ο ΔΙΠΟΛΟ
x(cm)	2	-5
y(cm)	-3	1
z(cm)	-4	6

ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ		
$m_x(\text{A} \cdot \text{m}^2)$	500	-550
$m_y(\text{A} \cdot \text{m}^2)$	300	950
$m_z(\text{A} \cdot \text{m}^2)$	600	-300

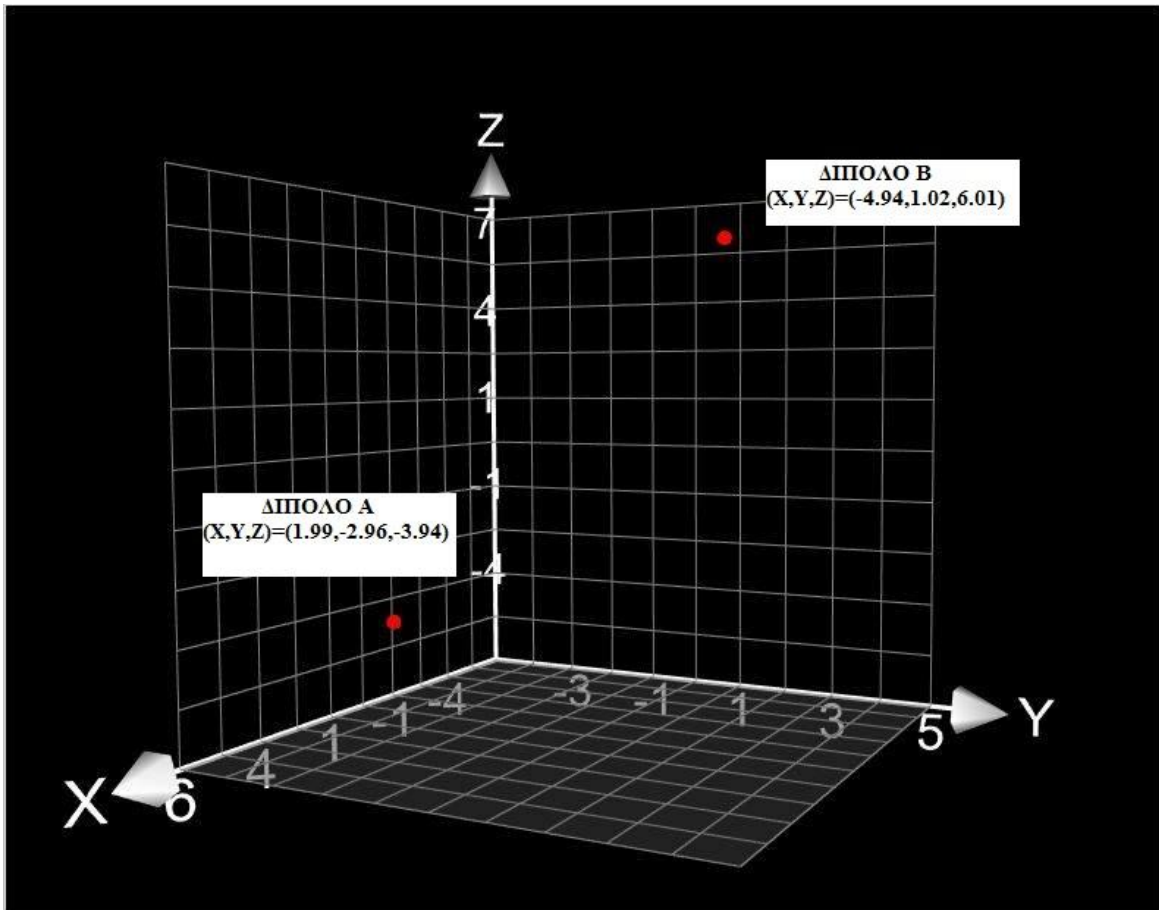
Στο παρακάτω σύστημα συντεταγμένων απεικονίζονται οι θεωρητικές τιμές των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων, που προσδιορίζουν το θεωρητικό μοντέλο.



Σχήμα 5.21: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του δεύτερου σετ διπόλων

Για την δημιουργία του νέου σετ μετρήσεων που θα περιελάμβανε τις τιμές πεδίου του θεωρητικού μοντέλου έχοντας εισάγει κάποιο ποσοστό σφάλματος (displacement error), μετατοπίσαμε τις συντεταγμένες που όριζαν τις αρχικές θεωρητικές τιμές των θέσεων των διπόλων με τη χρήση των εντολών (5.1) και υπολογίσαμε το μαγνητικό πεδίο που παράγει στο 27^ο σημείο παρατήρησης που βρίσκεται σε κυκλική τροχιά γύρω από τα δίπολα.

Στο σύστημα συντεταγμένων που ακολουθεί φαίνεται η πρώτη μετατόπιση που υπέστησαν οι αρχικές θέσεις του θεωρητικού μοντέλου.

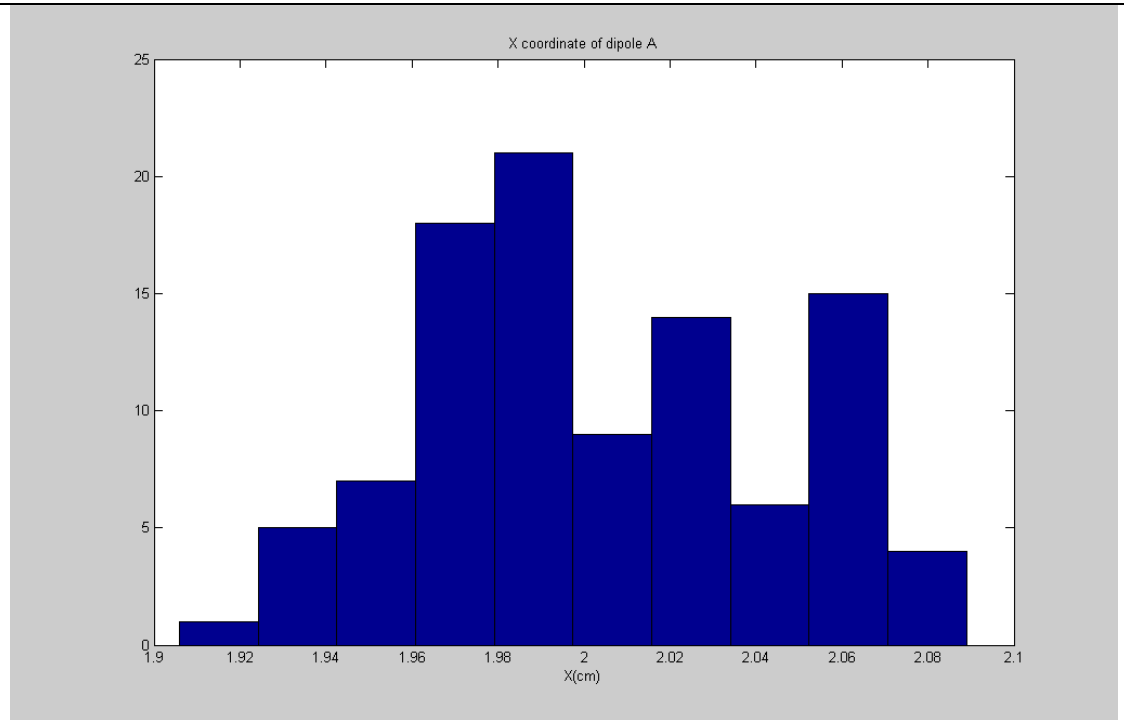


Σχήμα 5.22: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του δεύτερου σετ

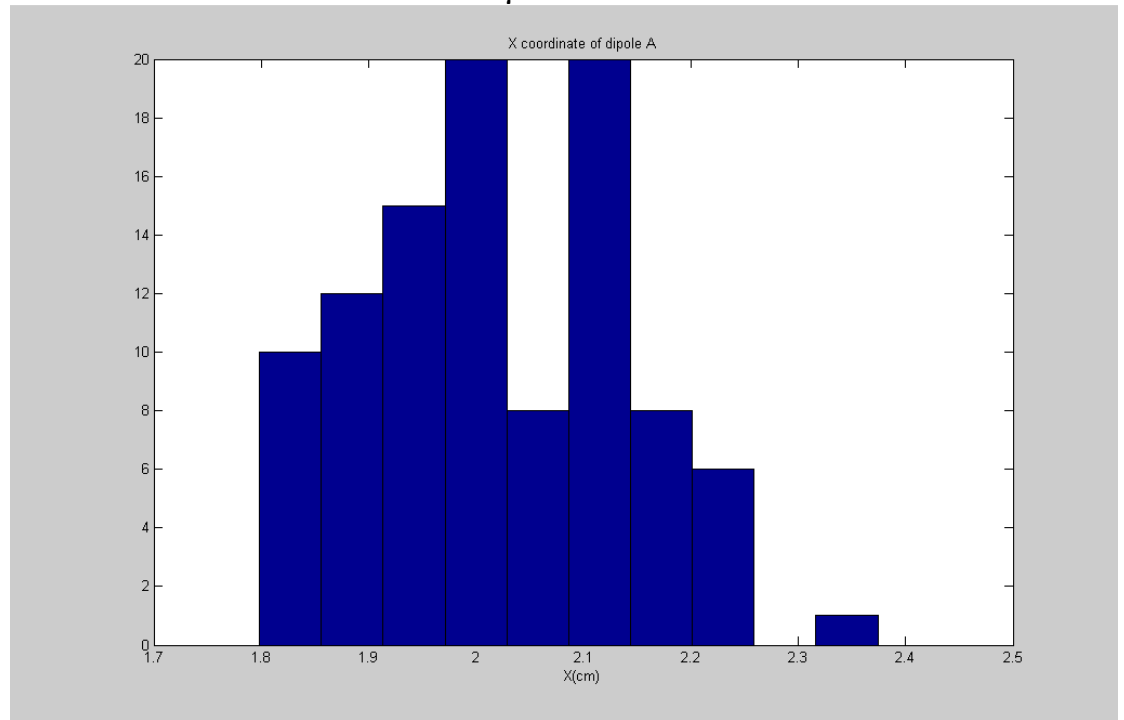
5.3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΙΠΟΛΩΝ

Ομοίως , με τη περίπτωση του πρώτου σετ διπόλων, ακολούθησε στατιστική ανάλυση των τιμών των συντεταγμένων x, y, z των θέσεων των μετατοπισμένων διπόλων A και B που μετρήθηκαν στις εκατό επαναλήψεις καθώς και των θέσεων των διπόλων των βέλτιστων μοντέλων που υπολογιστήκαν κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων αυτών, από την οποία προέκυψαν τα παρακάτω ιστογράμματα.

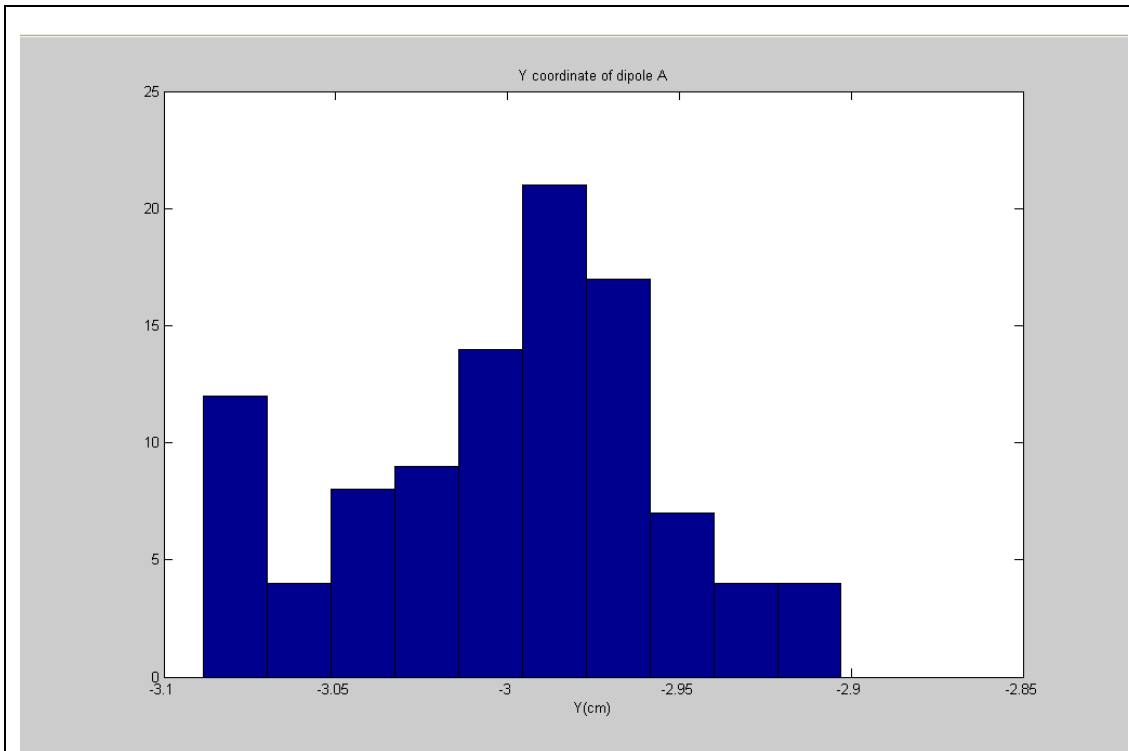
ΔΙΠΟΛΟ Α
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



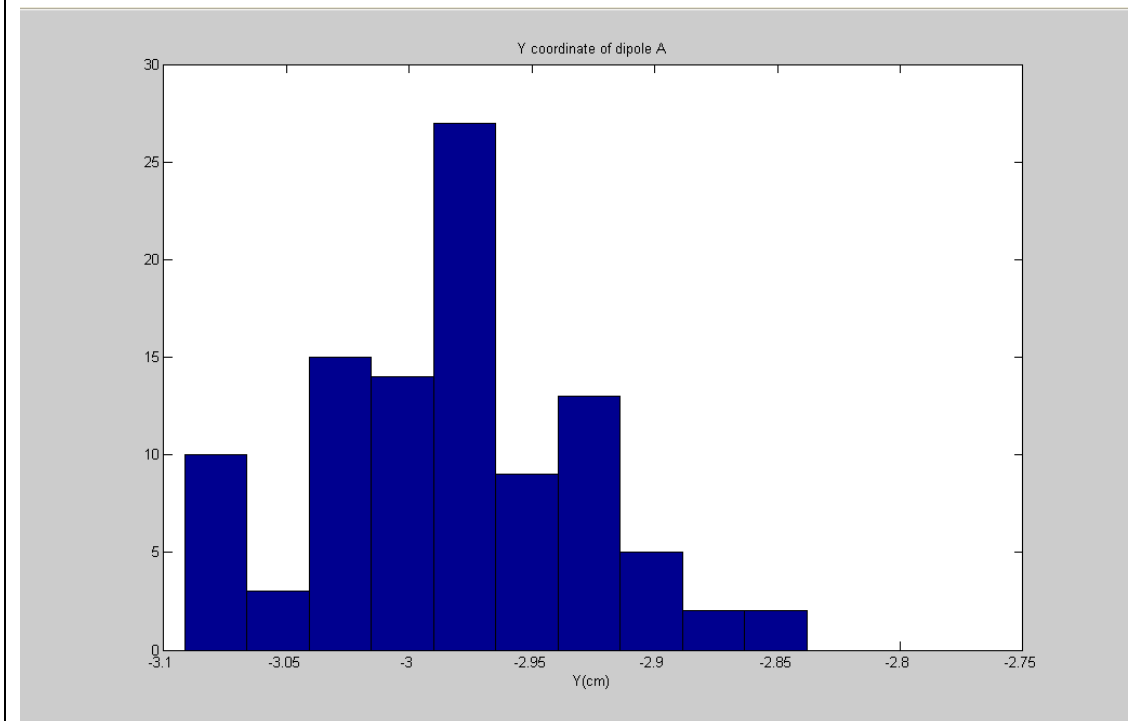
Σχήμα 5.23: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Α για το 2^ο σετ διπόλων



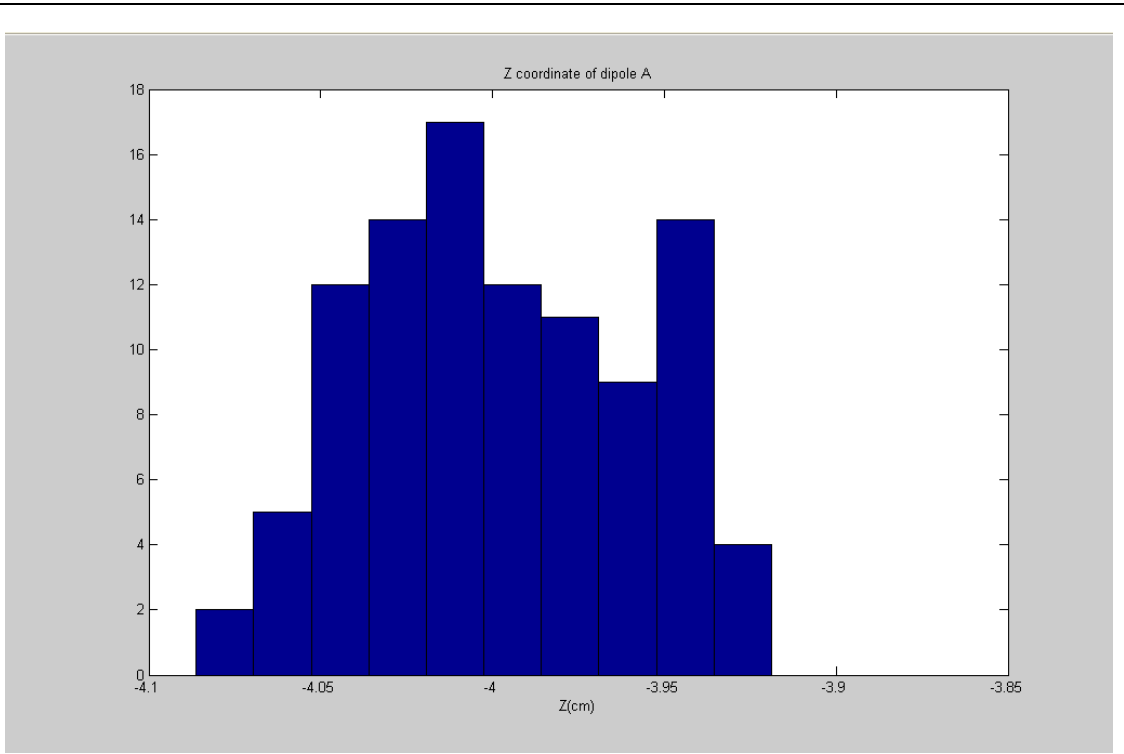
Σχήμα 5.24: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Α του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων



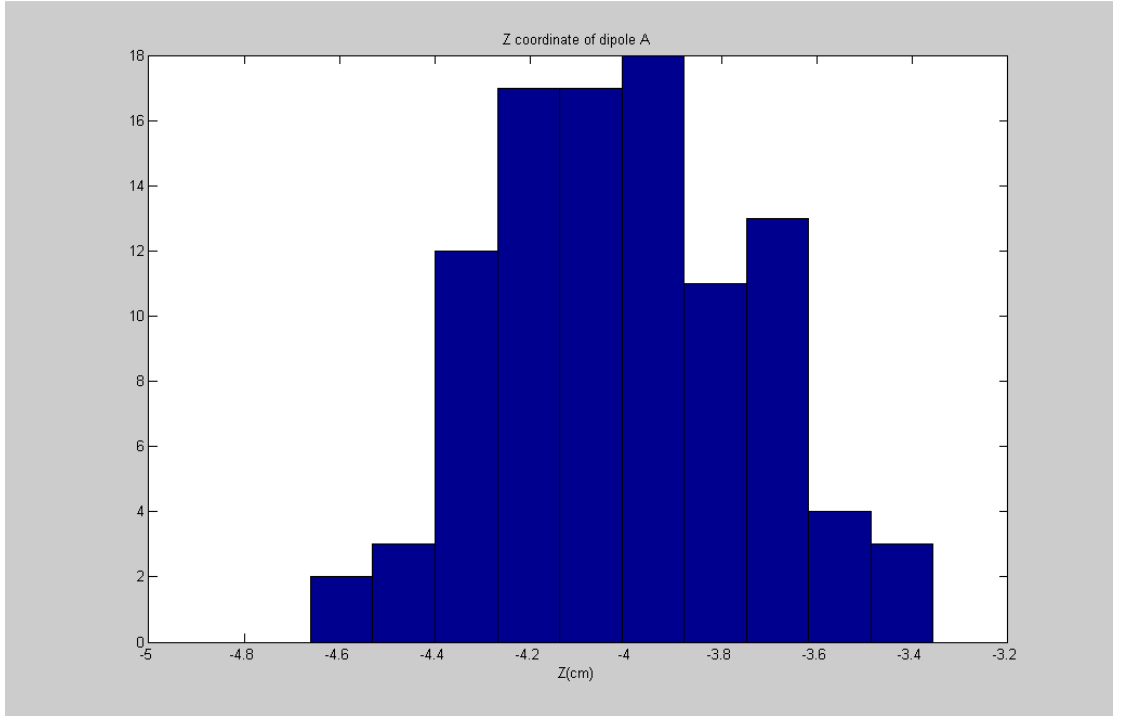
Σχήμα 5.25: Ιστογράμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 2^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.26: Ιστογράμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων

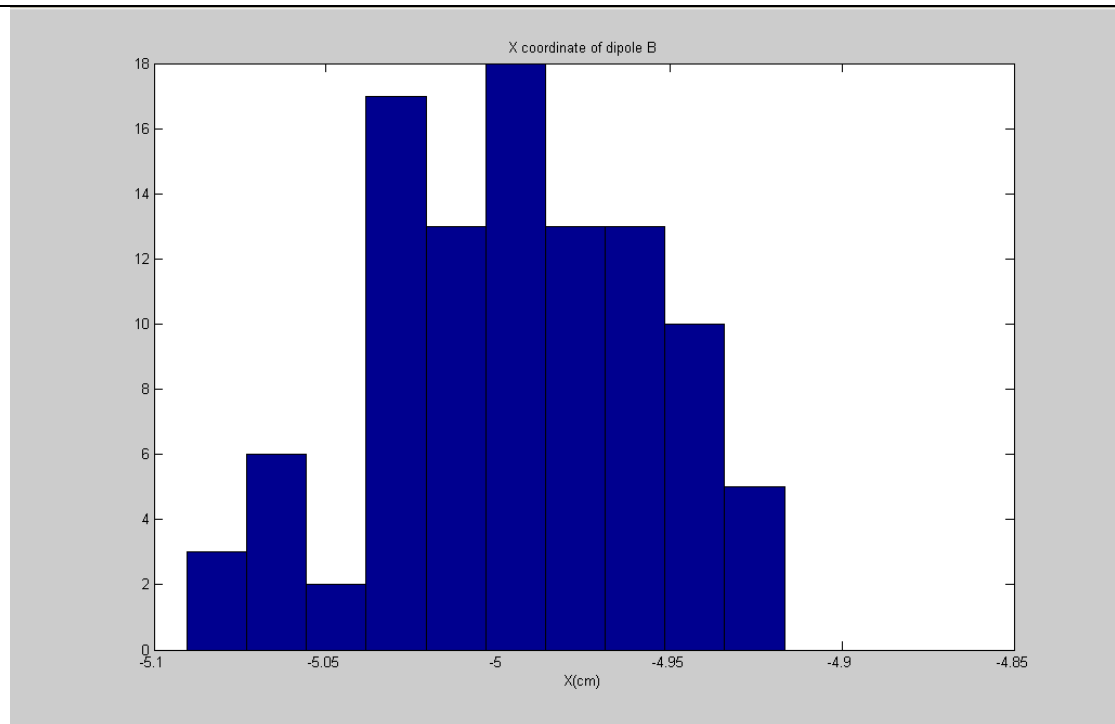


Σχήμα 5.27: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 2^ο σετ διπόλων

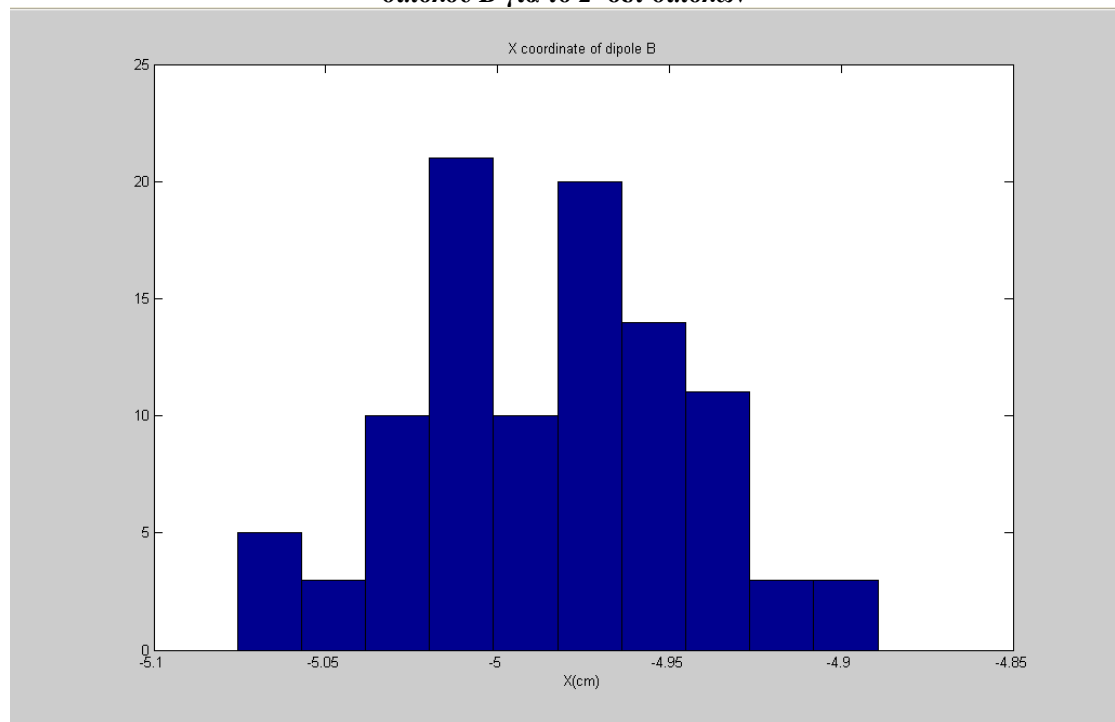


Σχήμα 5.28: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων

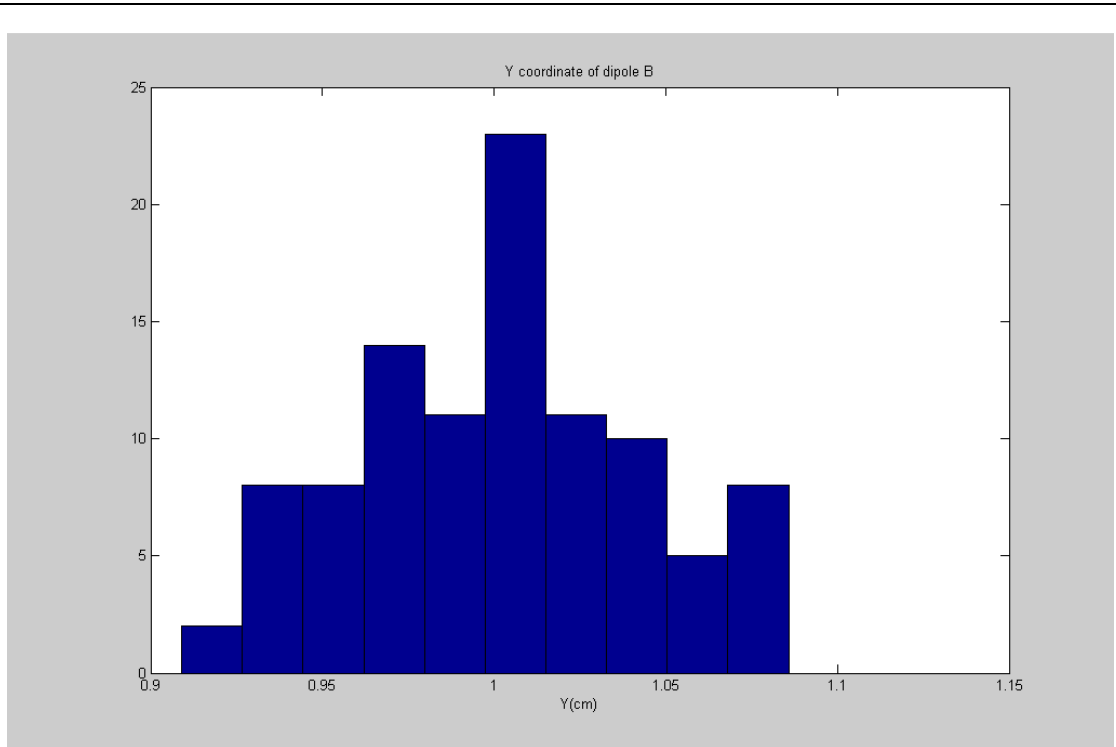
ΔΙΠΟΛΟ Β
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



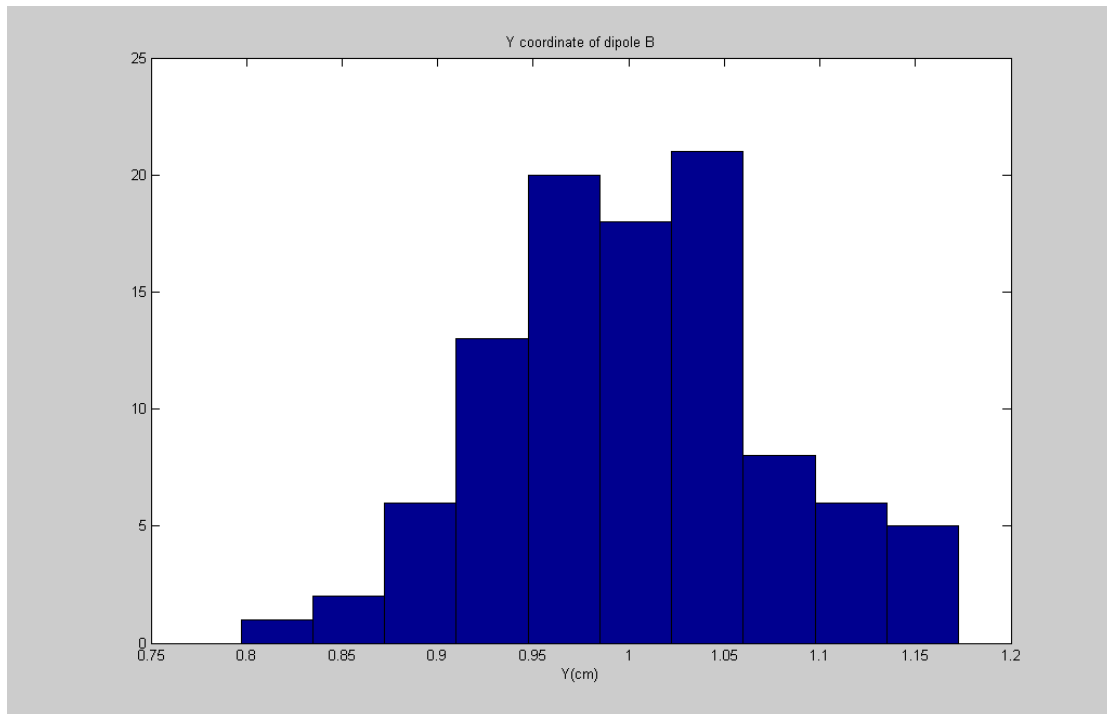
Σχήμα 5.29: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Β για το 2^ο σετ διπόλων



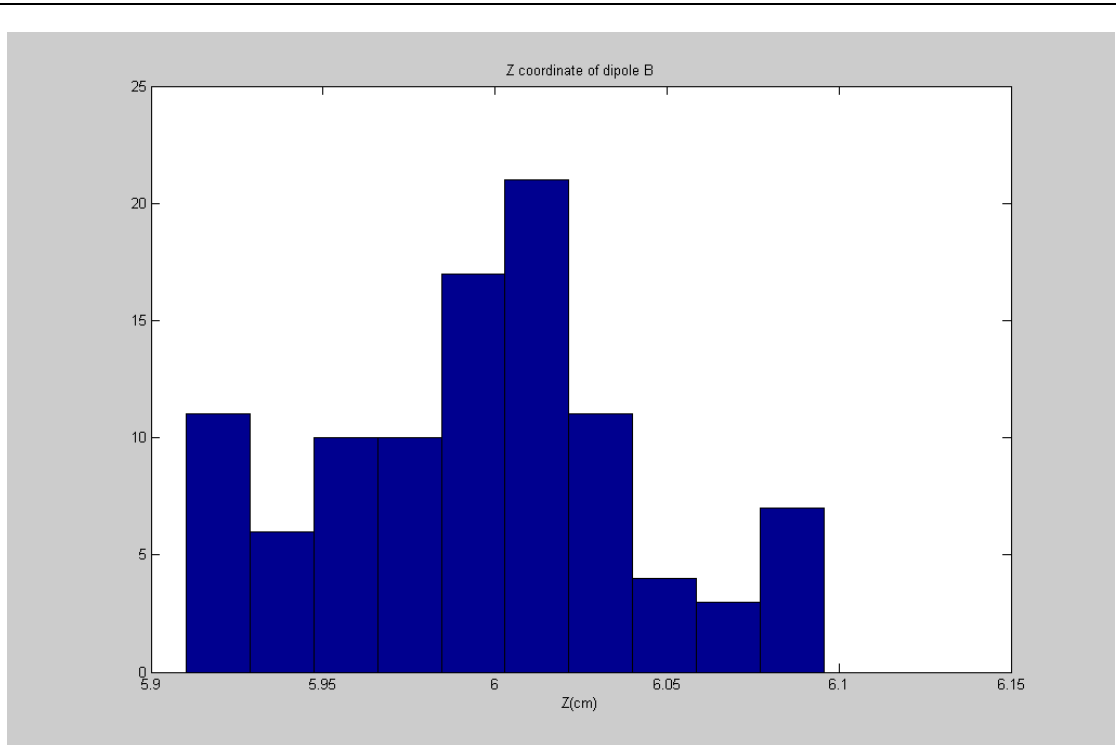
Σχήμα 5.30: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Β του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων



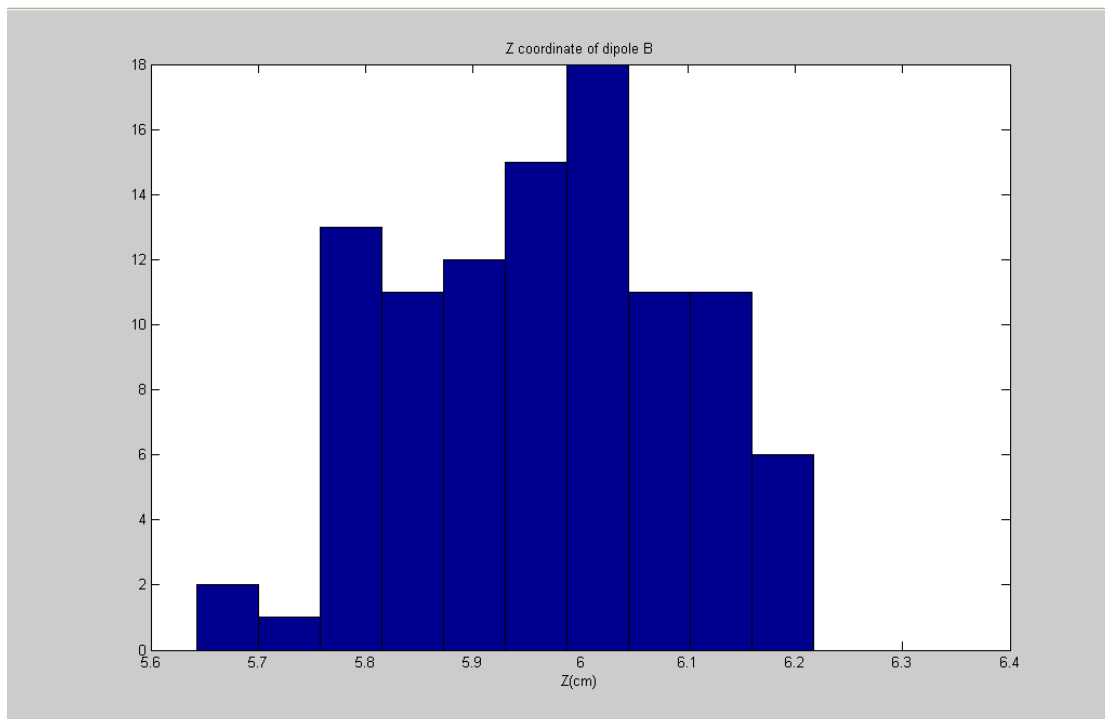
Σχήμα 5.31: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 2^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.32: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.33: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 2^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.34: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων

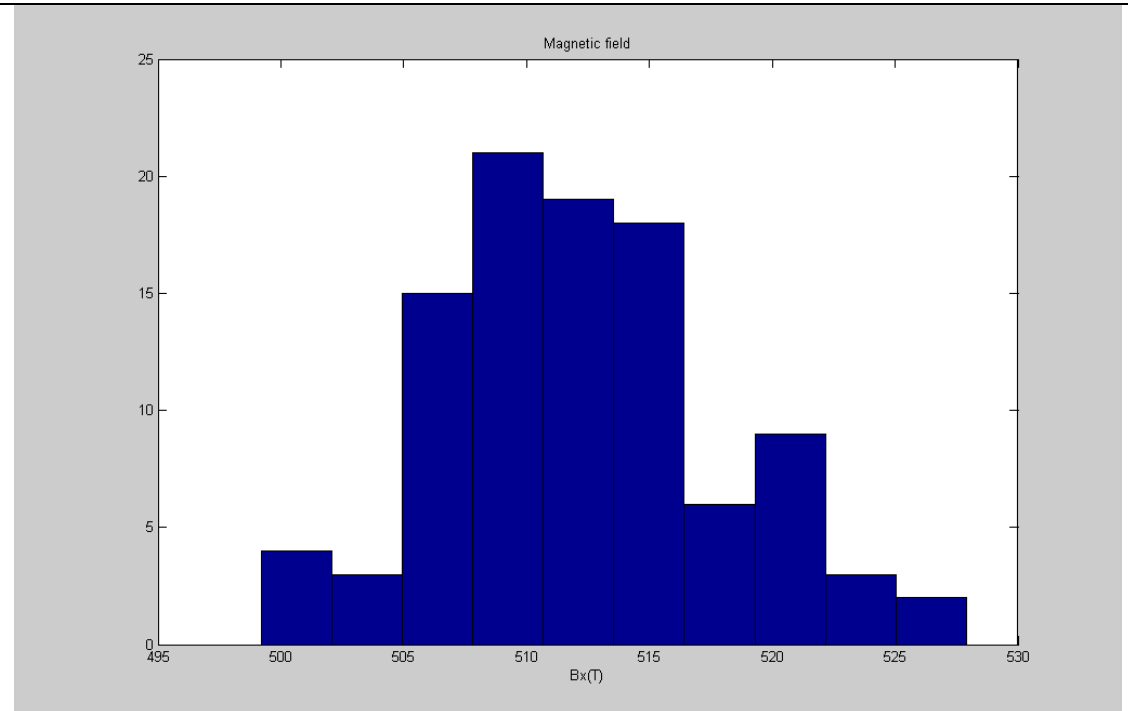
5.3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Οι μετρήσεις των συντεταγμένων που προσδιορίζουν τις θέσεις των διπόλων των μοντέλων με τα μετατοπισμένα δίπολα και τις θέσεις των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίσαμε, κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων, σύμφωνα με το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov (K-S), ακολουθούν κανονική κατανομή.

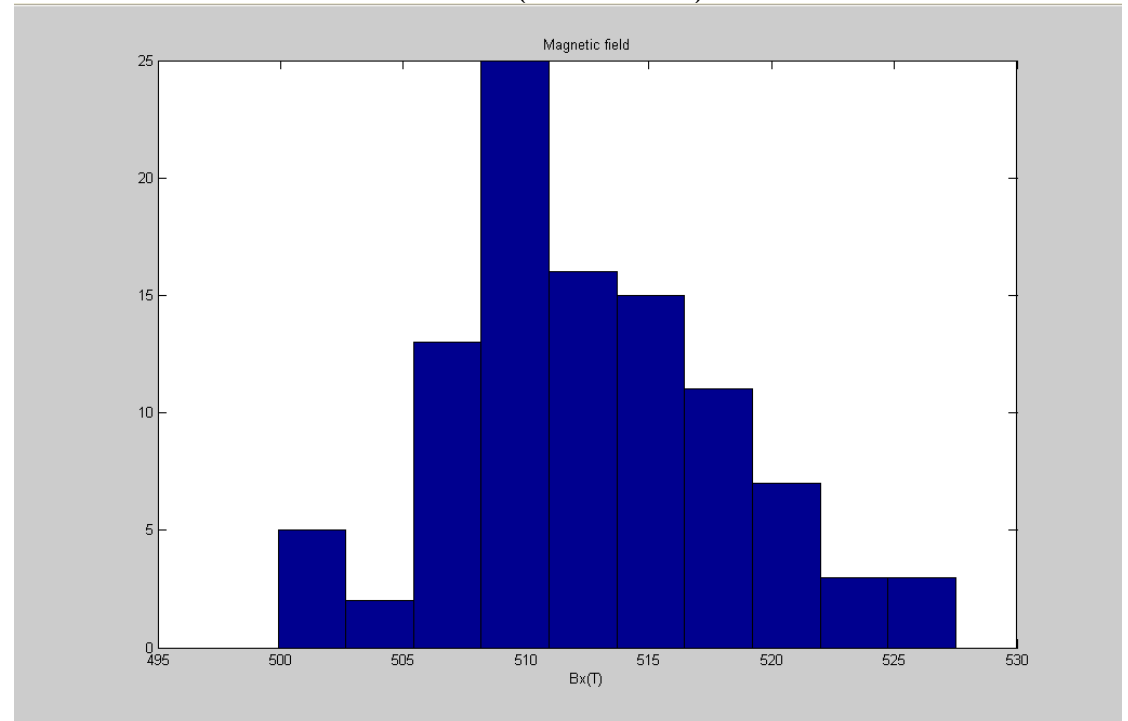
5.3.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Τα παρακάτω ιστογράμματα, παρουσιάζουν τη γραφική παράσταση της κατανομής συχνότητας των τιμών του συνολικού μαγνητικού πεδίου E_x, E_y, E_z που παρήγαγαν τα μοντέλα με τα αντίστοιχα μετατοπισμένα δίπολα καθώς και των τιμών πεδίου των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων.

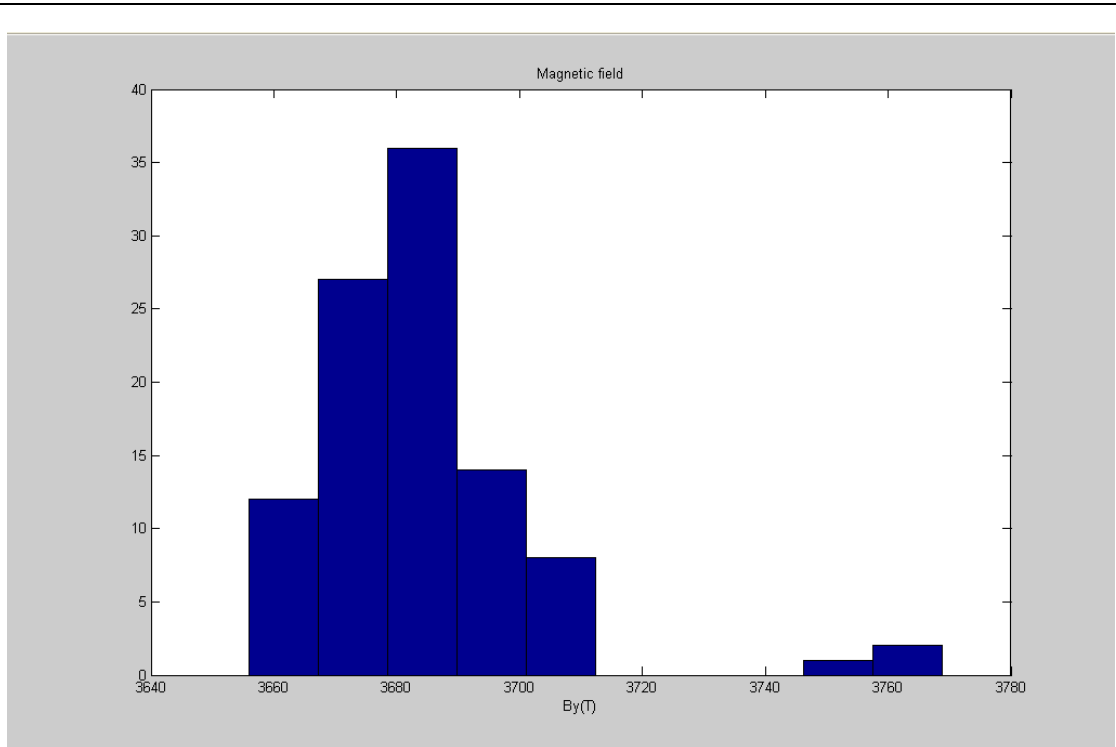
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



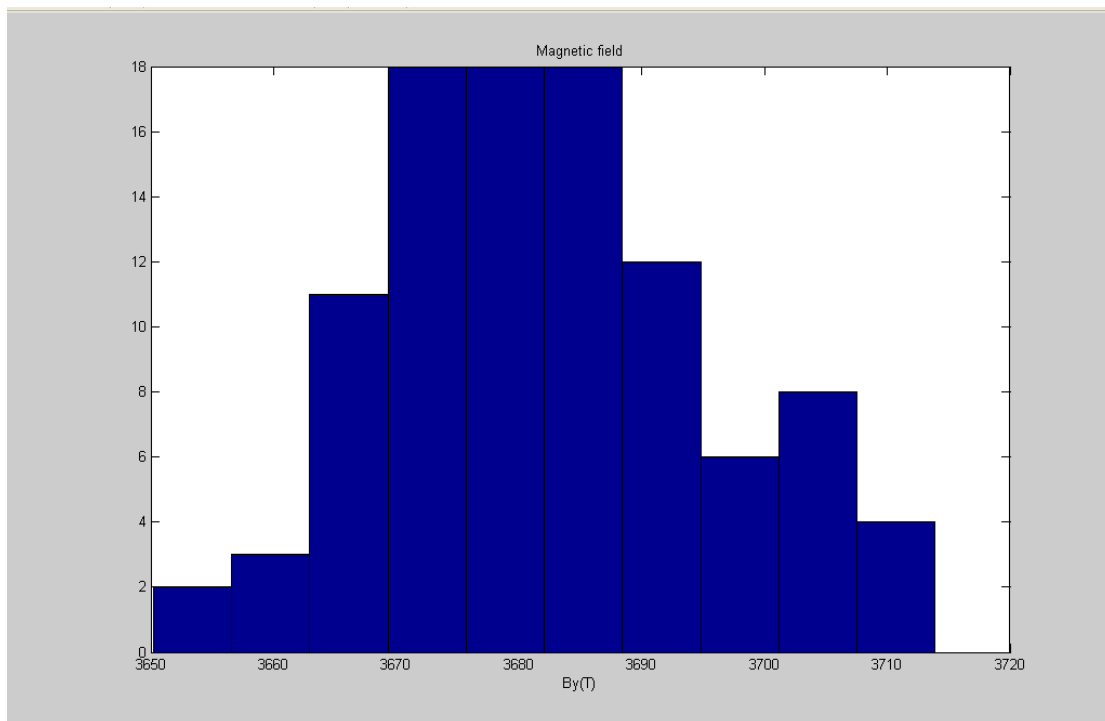
Σχήμα 5.35: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2^ο σετ διπόλων)



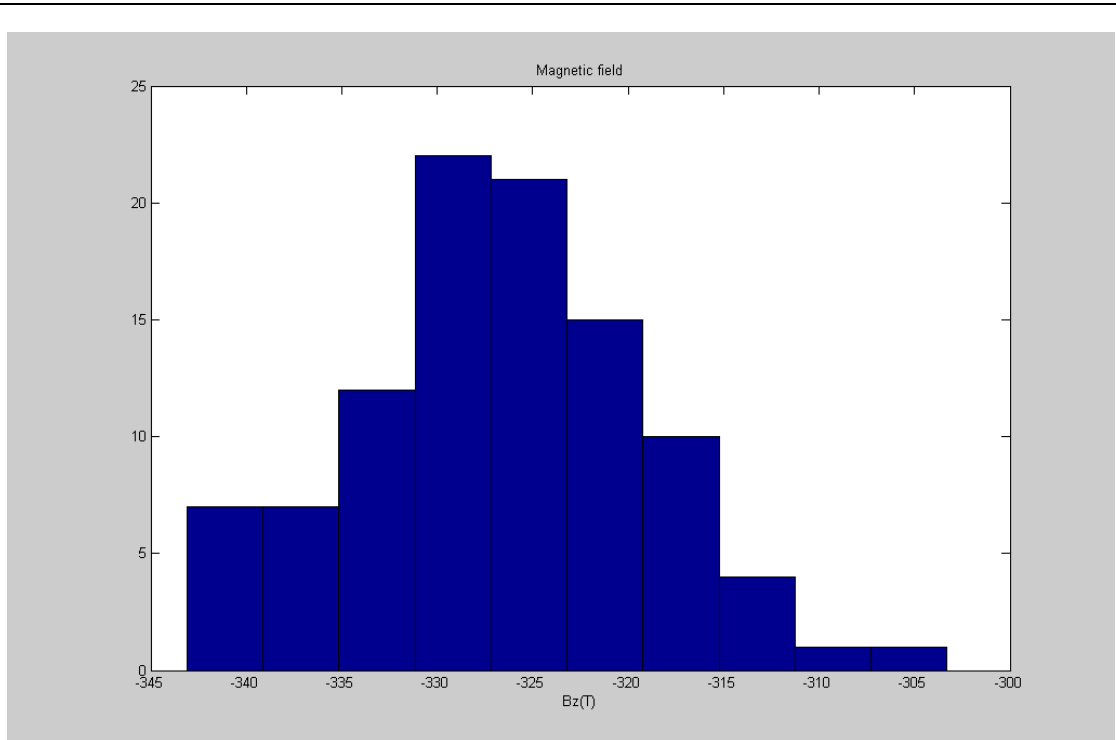
Σχήμα 5.36: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2^ο σετ διπόλων



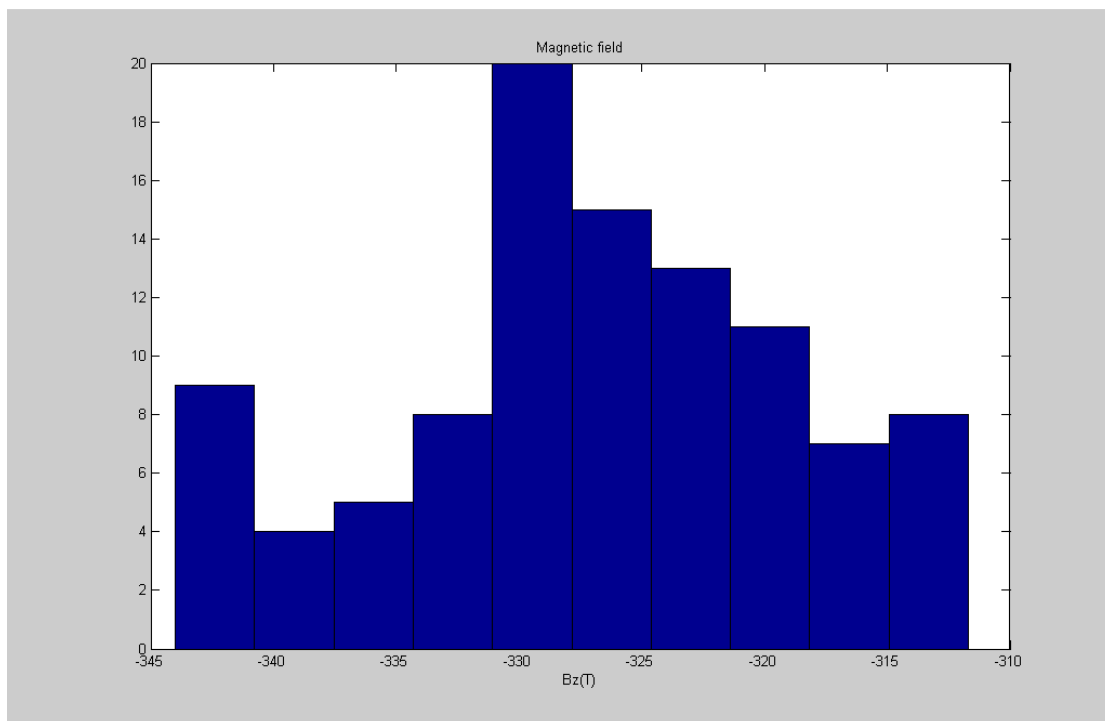
Σχήμα 5.37: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2° σετ διπόλων)



Σχήμα 5.38: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων



Σχήμα 5.39: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (2° σετ διπόλων)



Σχήμα 5.40: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 2° σετ διπόλων

5.3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Παρατηρώντας τα ιστογράμματα των τιμών του μαγνητικού πεδίου των μοντέλων με τα μετατοπισμένα δίπολα και των τιμών του πεδίου των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν στα πλαίσια των εκατό επαναλήψεων και εφαρμόζοντας το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov (K-S), μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η κατανομή των μετρήσεων είναι κανονική.

5.4 ΤΡΙΤΟ ΣΕΤ ΔΙΠΟΛΩΝ

5.4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όμοια, και στο τρίτο σετ διπόλων αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι αρχικές θεωρητικές τιμές των θέσεων και μαγνητικών ροπών των δύο διπόλων που το αποτελούν, υπολογίστηκε το θεωρητικό μαγνητικό πεδίο που παράγει μέσω των εξισώσεων του Maxwell.

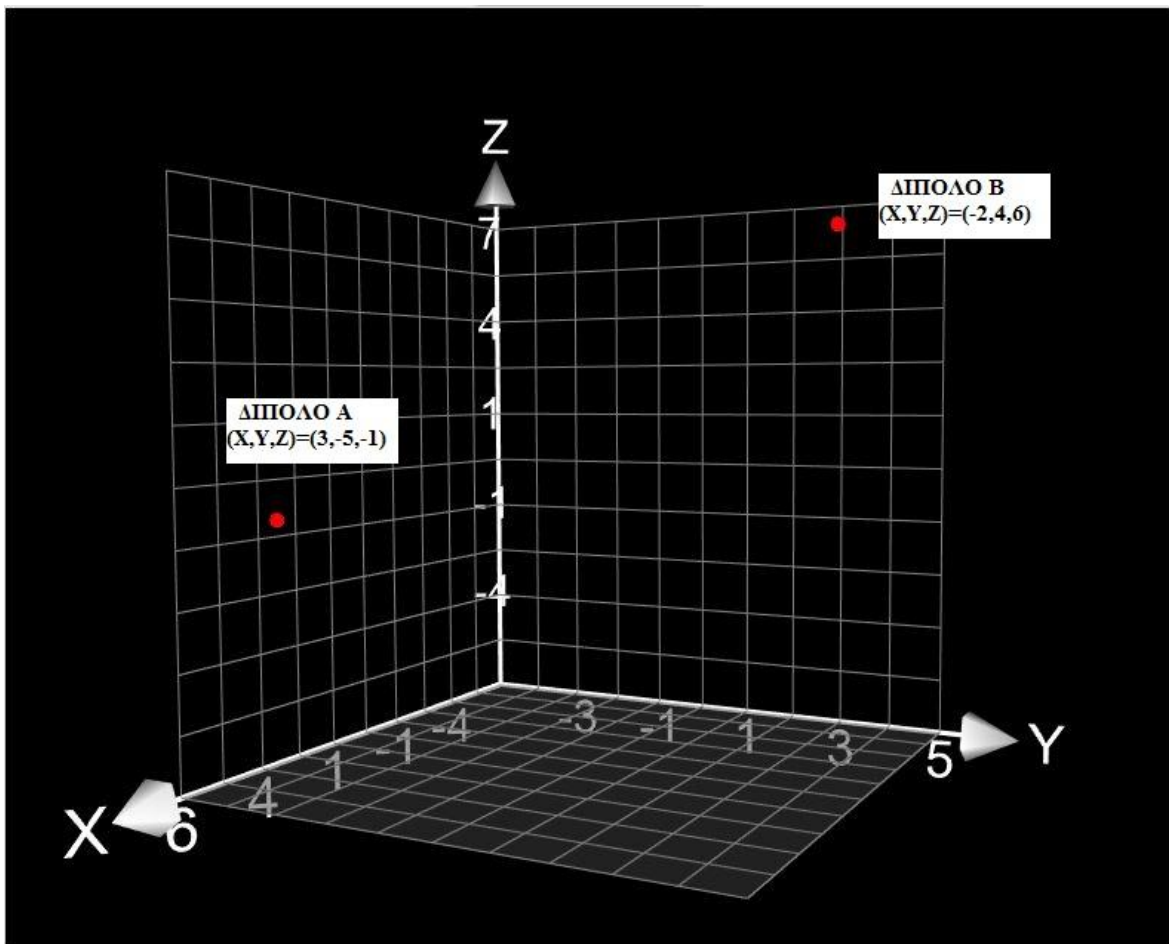
Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων του θεωρητικού μοντέλου:

Πίνακας 5.3: Θεωρητικές τιμές των παραμέτρων του 3^{ου} σετ διπόλων

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ		
ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΠΟΛΩΝ	1^ο ΔΙΠΟΛΟ	2^ο ΔΙΠΟΛΟ
x(cm)	3	-2
y(cm)	-5	4
z(cm)	-1	6
ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ		
m_x(A·m²)	500	-550
m_y(A·m²)	300	950

$m_z(\text{A} \cdot \text{m}^2)$	600	-300
----------------------------------	-----	------

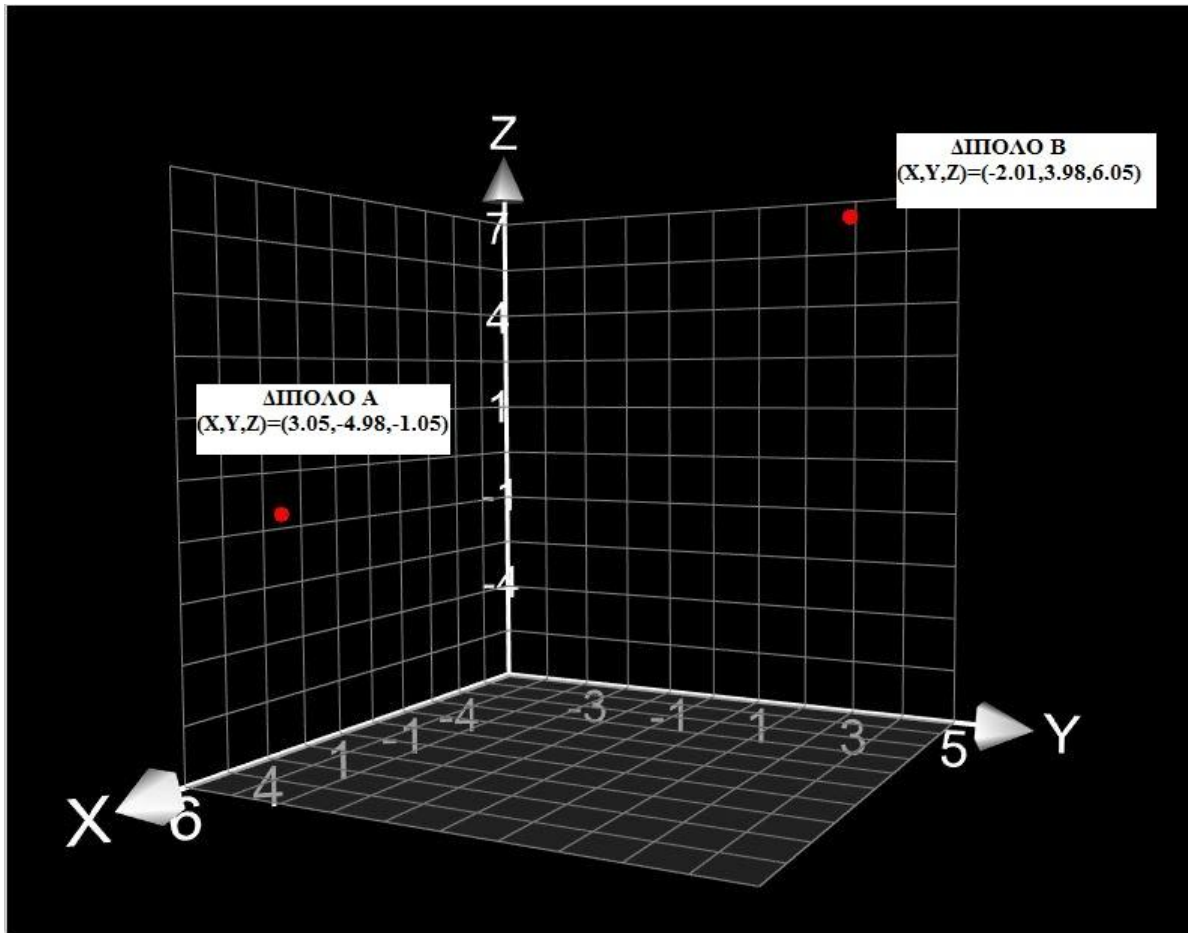
Στο σύστημα συντεταγμένων που ακολουθεί απεικονίζονται οι θέσεις των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου.



Σχήμα 5.41: Απεικόνιση των θέσεων των διπόλων του θεωρητικού μοντέλου του τρίτου σετ διπόλων

Για τη δημιουργία του νέου σετ μετρήσεων πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα, μεταβάλλαμε τις θεωρητικές τιμές των συντεταγμένων κατά το maximum 0,1mm κάνοντας χρήση των ίδιων εντολών με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις και υπολογίσαμε το μαγνητικό πεδίο που παράγει στο πρώτο σημείο παρατήρησης, διατηρώντας σταθερές τις μαγνητικές ροπές του θεωρητικού μοντέλου.

Στο παρακάτω σύστημα συντεταγμένων παρουσιάζεται η πρώτη μετατόπιση που υπέστησαν οι θέσεις του θεωρητικού μοντέλου.

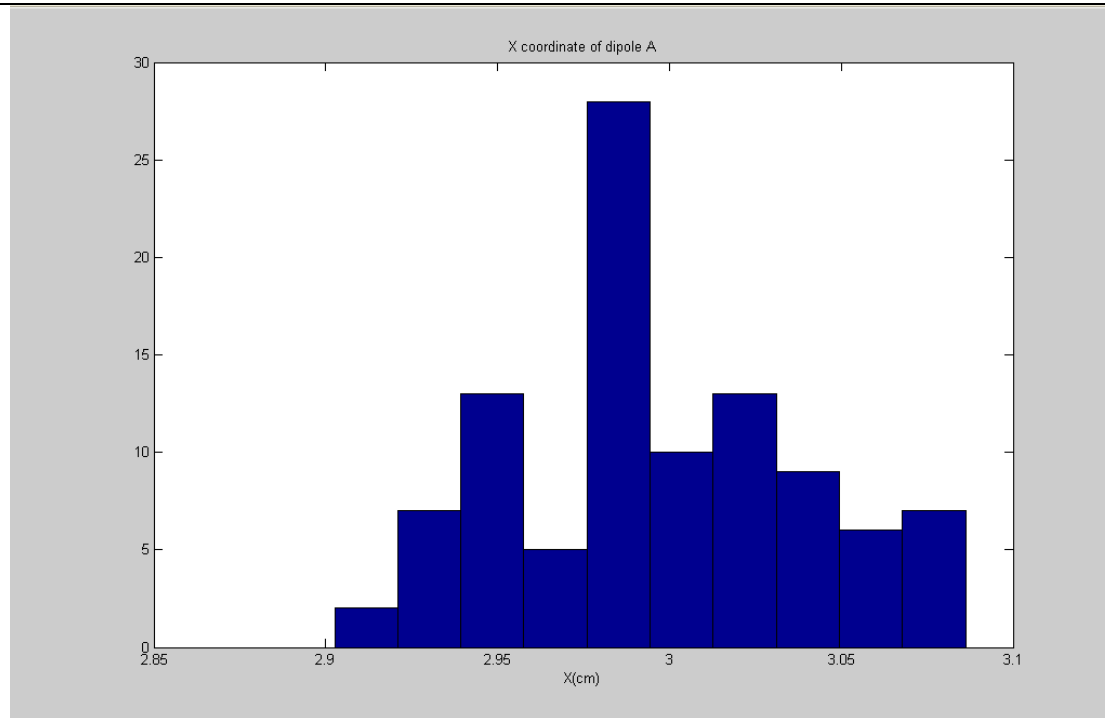


Σχήμα 5.42: Απεικόνιση των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων του τρίτου σετ

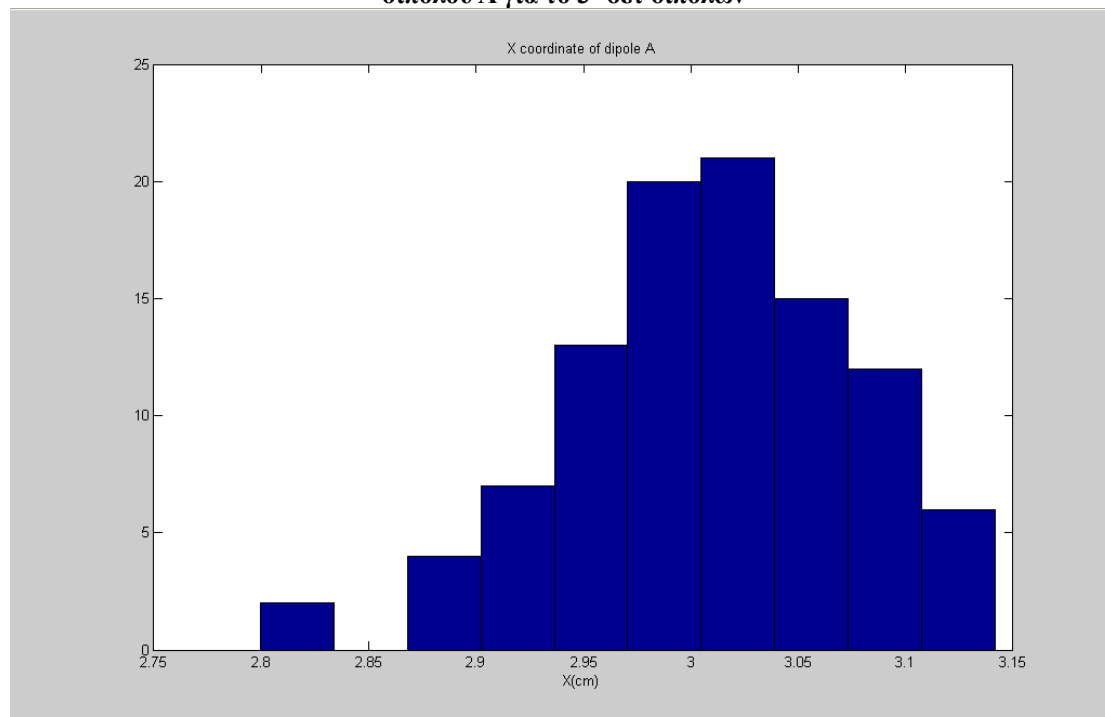
5.4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΙΠΟΛΩΝ

Τα ιστογράμματα που προέκυψαν, από τις τιμές των συντεταγμένων των μετατοπισμένων διπόλων (A και B) καθώς και από τις τιμές των συντεταγμένων των διπόλων (A και B) των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων, παρουσιάζονται αμέσως μετά.

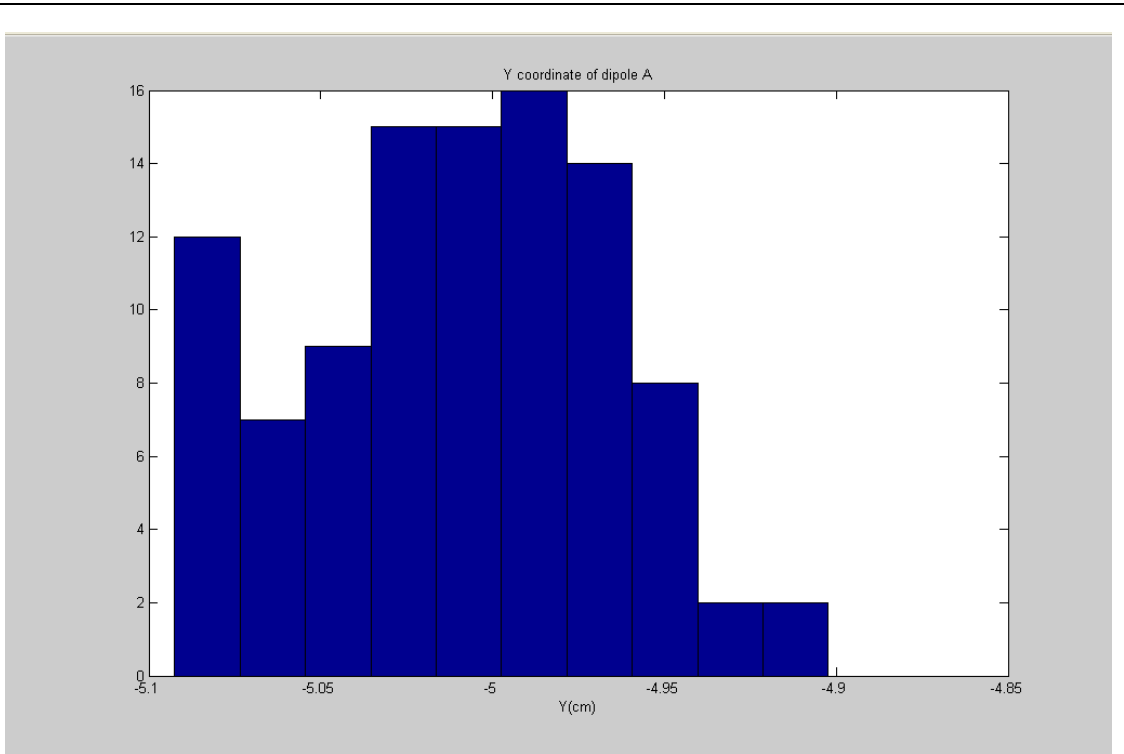
ΔΙΠΟΛΟ Α
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



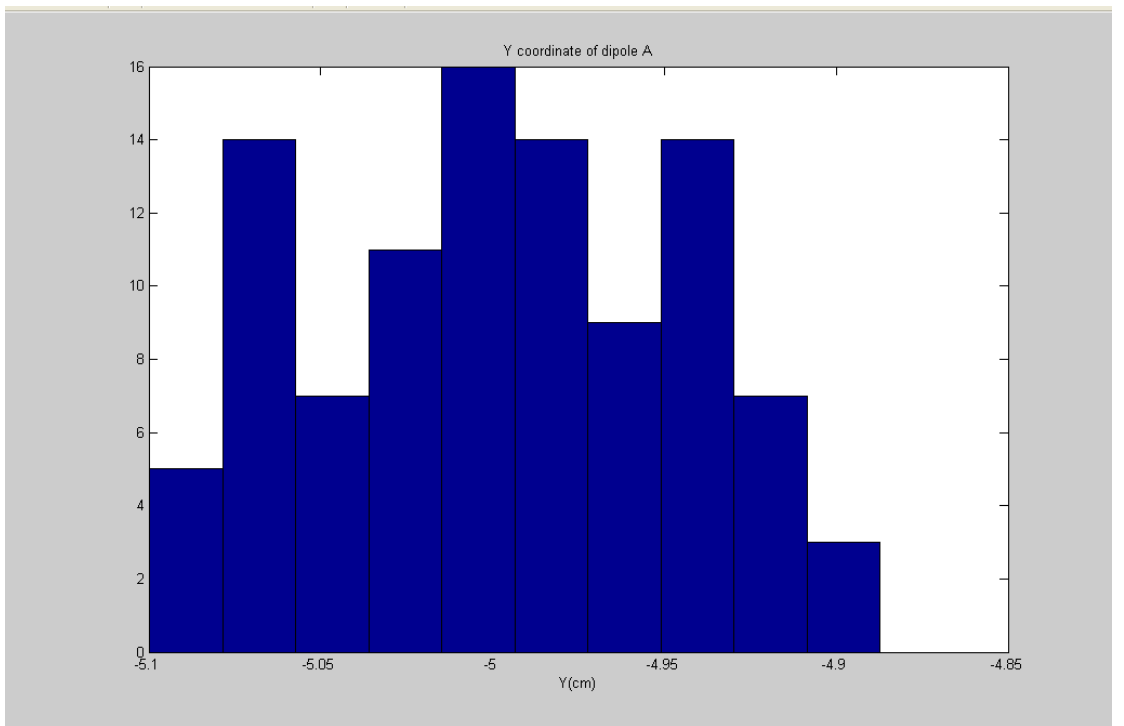
Σχήμα 5.43: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Α για το 3^ο σετ διπόλων



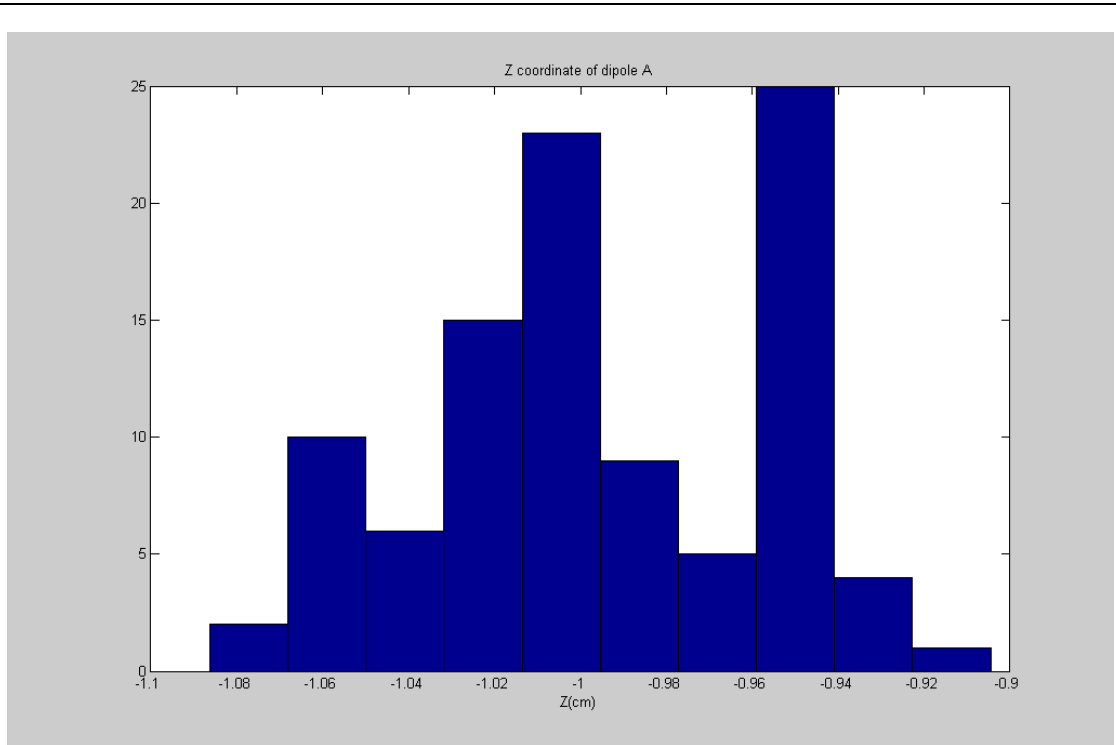
Σχήμα 5.44: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Α του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων



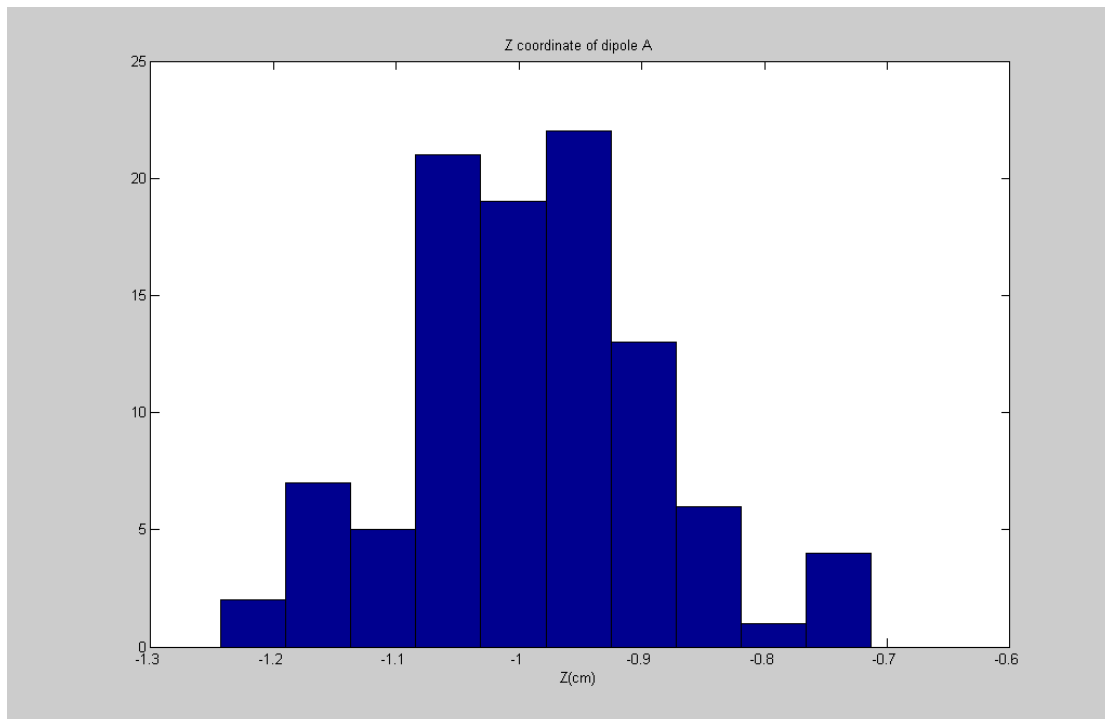
Σχήμα 5.45: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 3^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.46: Ιστόγραμμα των τιμών της y-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων

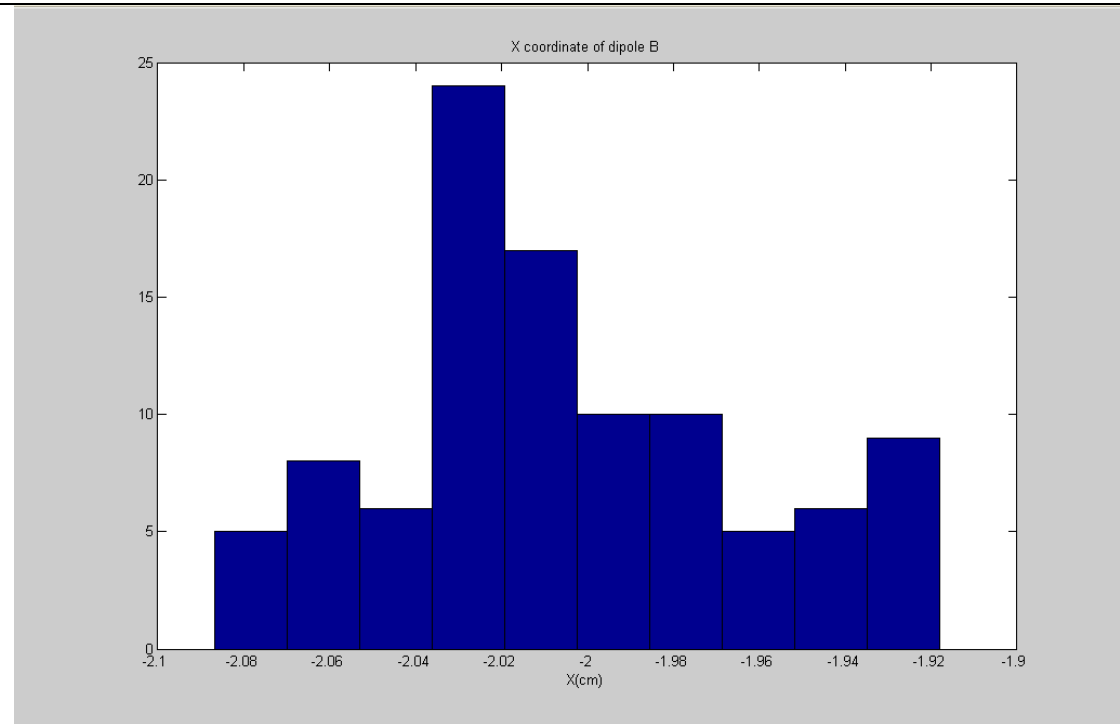


Σχήμα 5.47: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου A για το 3^ο σετ διπόλων

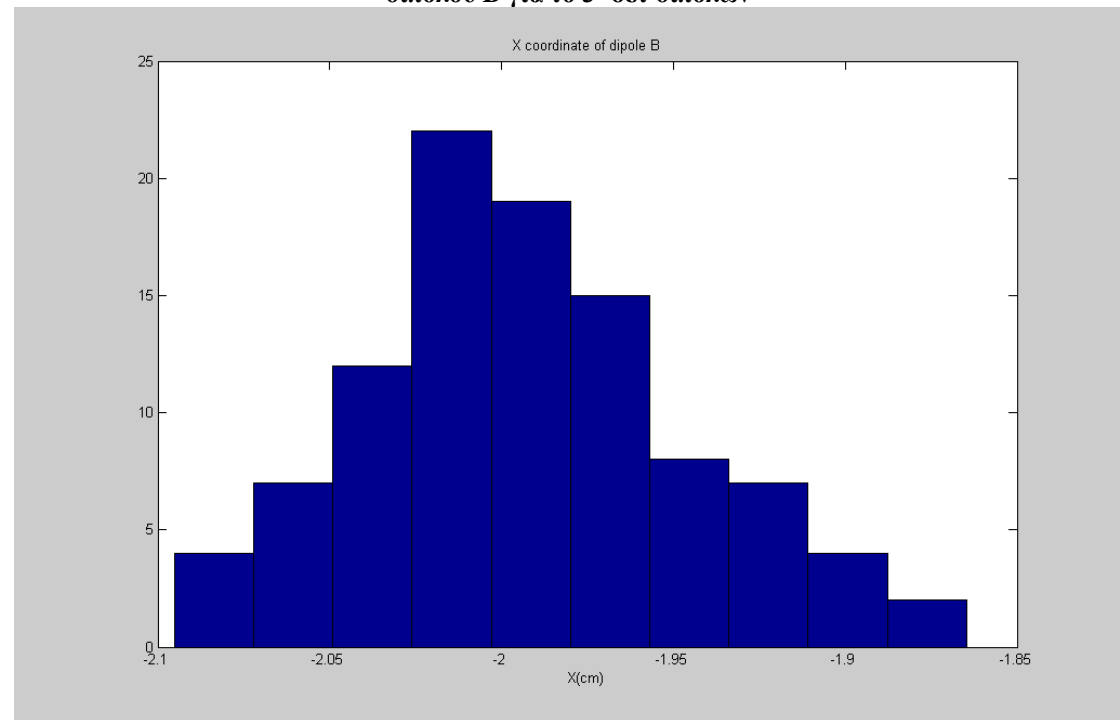


Σχήμα 5.48: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου A του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων

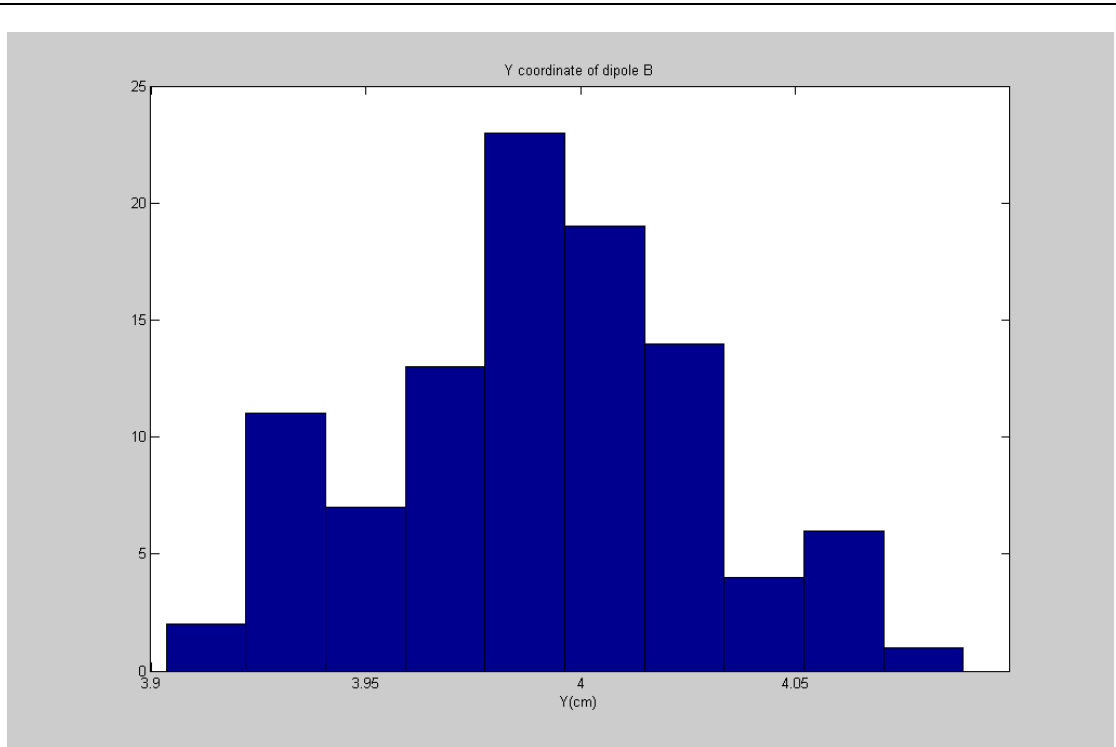
ΔΙΠΟΛΟ Β
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΔΙΠΟΛΟΥ



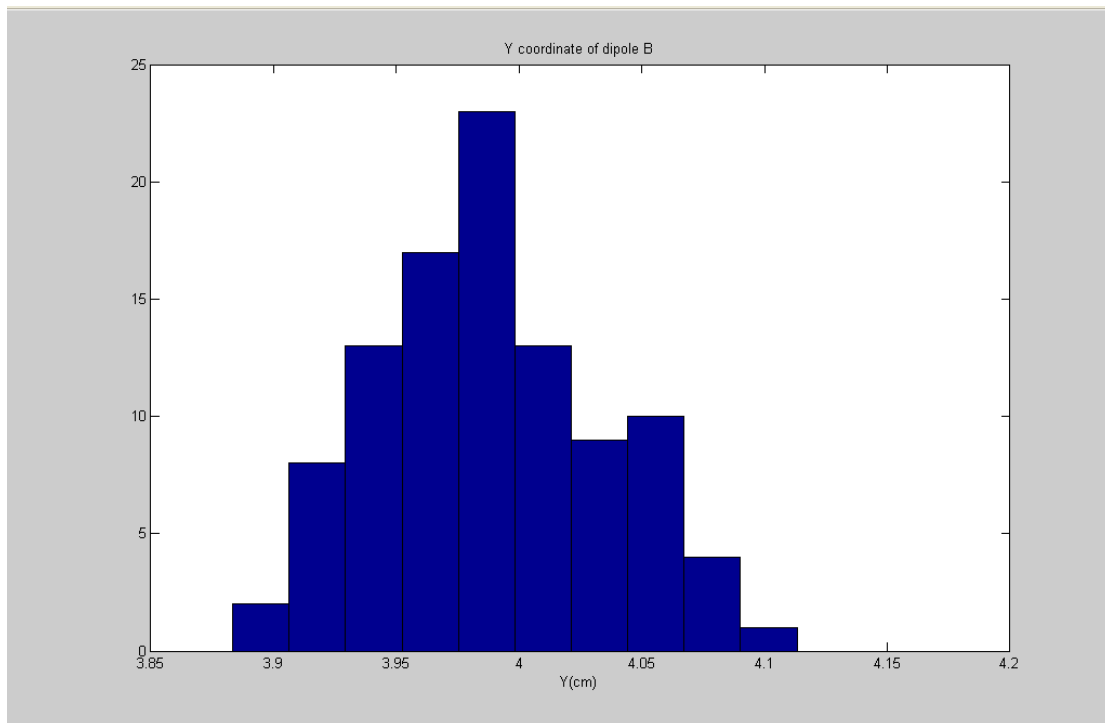
Σχήμα 5.49: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου Β για το 3^ο σετ διπόλων



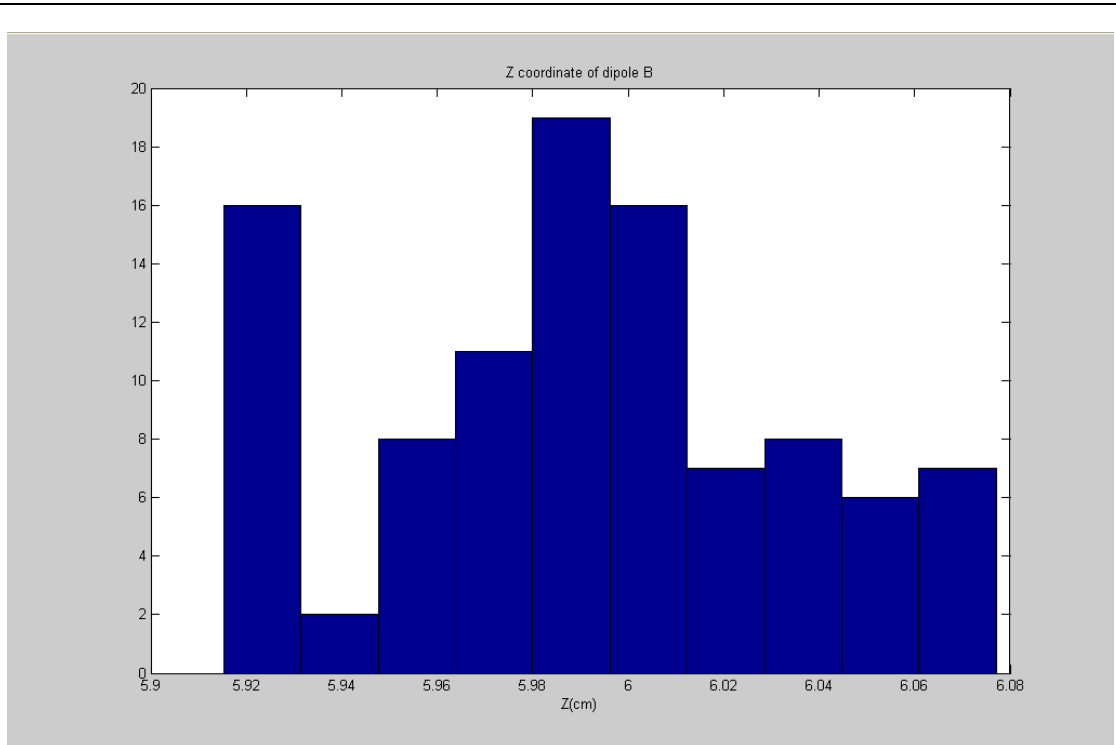
Σχήμα 5.50: Ιστόγραμμα των τιμών της x-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου Β του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων



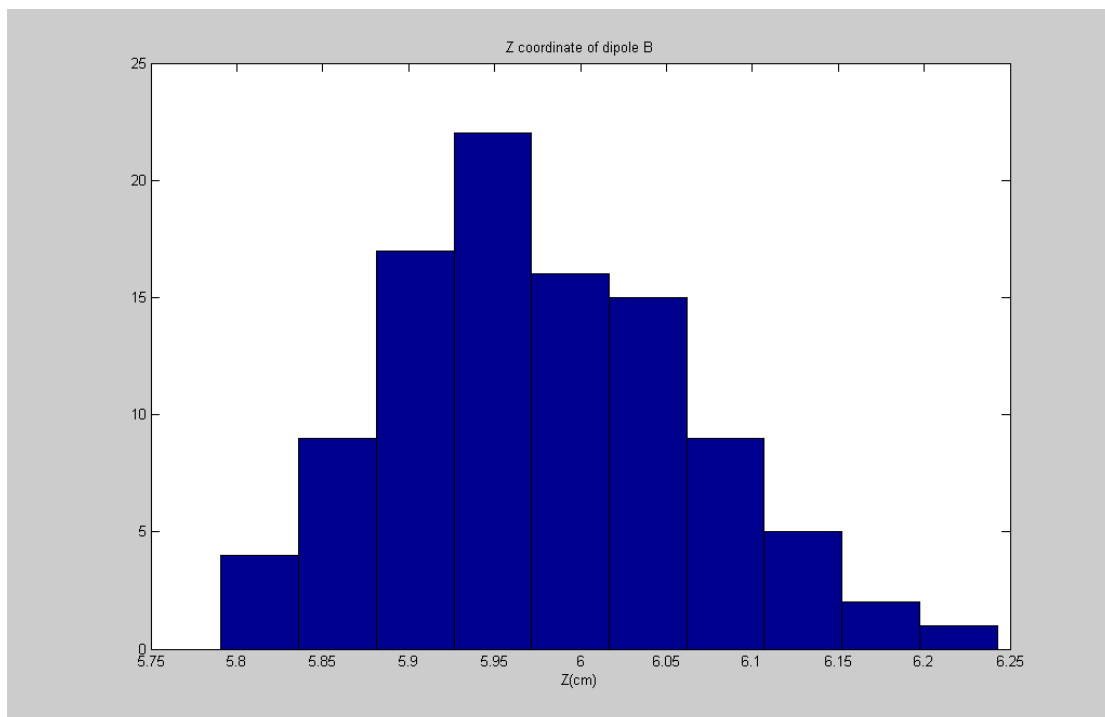
Σχήμα 5.51: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 3^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.52: Ιστόγραμμα των τιμών της y -συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.53: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του μετατοπισμένου διπόλου B για το 3^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.54: Ιστόγραμμα των τιμών της z-συντεταγμένης των θέσεων του διπόλου B του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων

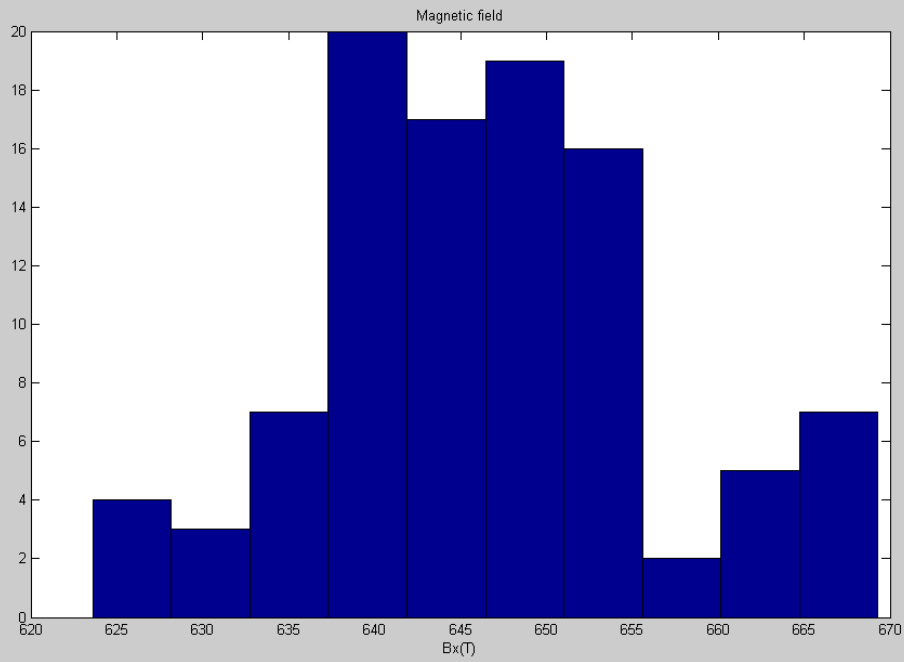
5.4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Και στο τρίτο σετ διπόλων παρατηρούμε κάνοντας ξανά χρήση του στατιστικού τεστ Kolmogorov-Smirnov, ότι τόσο η κατανομή των μετρήσεων των συντεταγμένων των μοντέλων του οποίου τα δίπολα (A και B) έχουν μετατοπιστεί όσο και των τιμών των συντεταγμένων που ορίζουν τις θέσεις των διπόλων (A και B) των βέλτιστων μοντέλων έχουν κανονική μορφή.

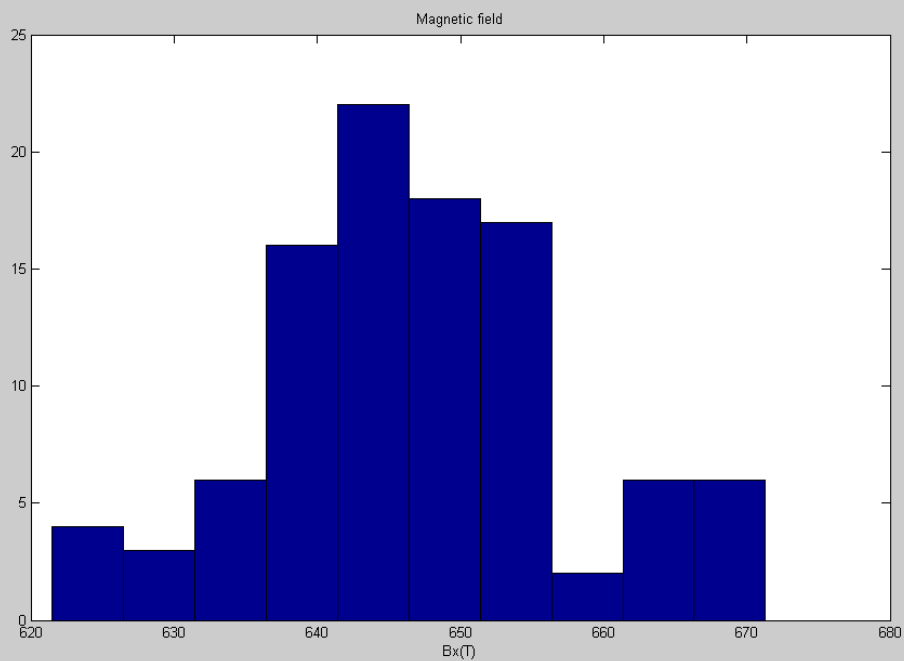
5.4.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Ακολουθούν τα ιστογράμματα των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου των μοντέλων του οποίου τα δίπολα έχουν υποστεί μετατόπιση και του πεδίου των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων. Οι μετρήσεις αφορούν το πρώτο σημείο παρατήρησης που βρίσκεται σε κυκλική τροχιά γύρω από τις θέσεις των διπόλων του μοντέλου.

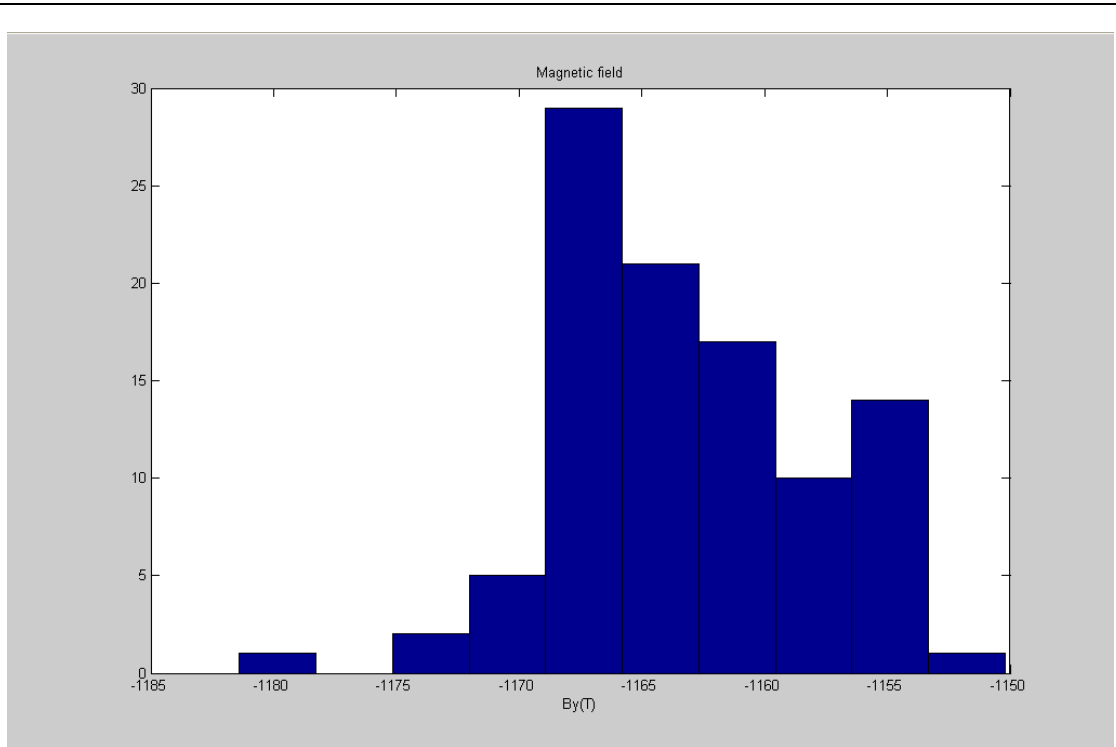
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



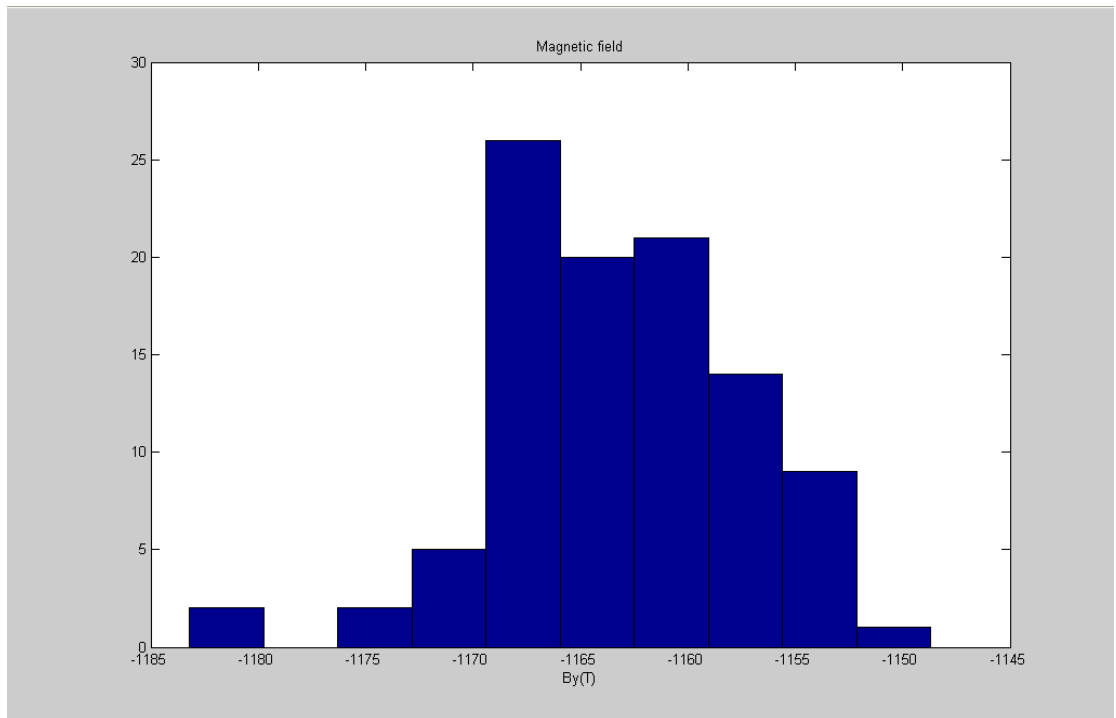
Σχήμα 5.55: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3° σετ διπόλων)



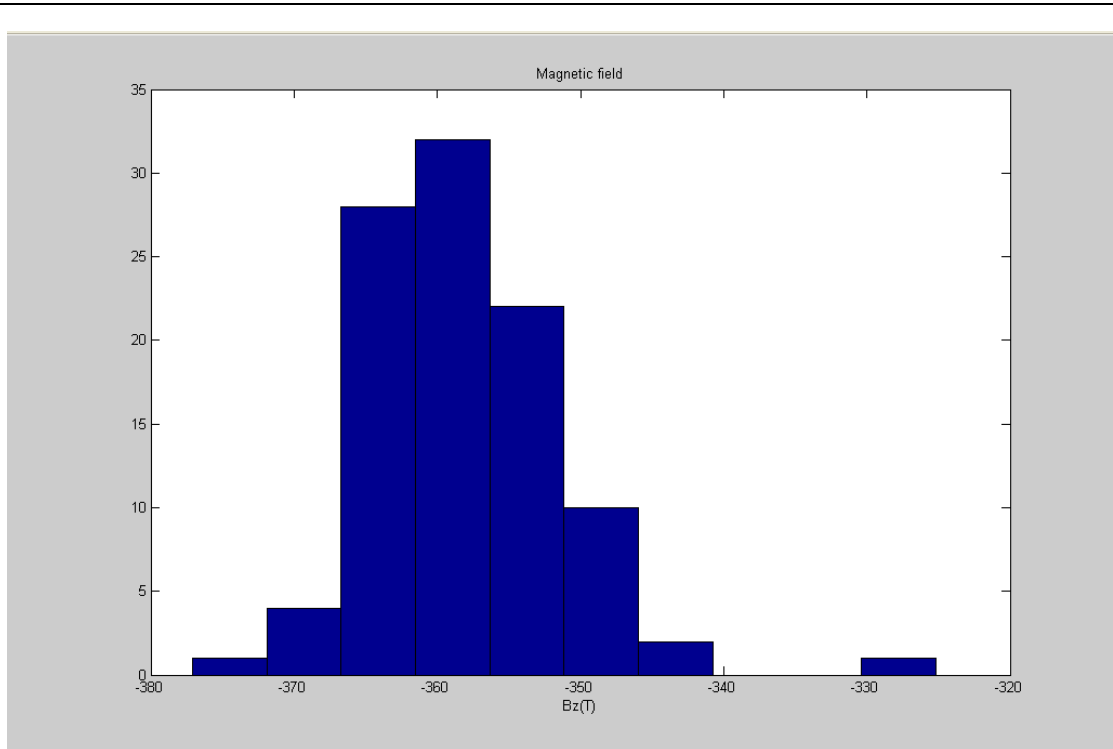
Σχήμα 5.56: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_x του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3° σετ διπόλων



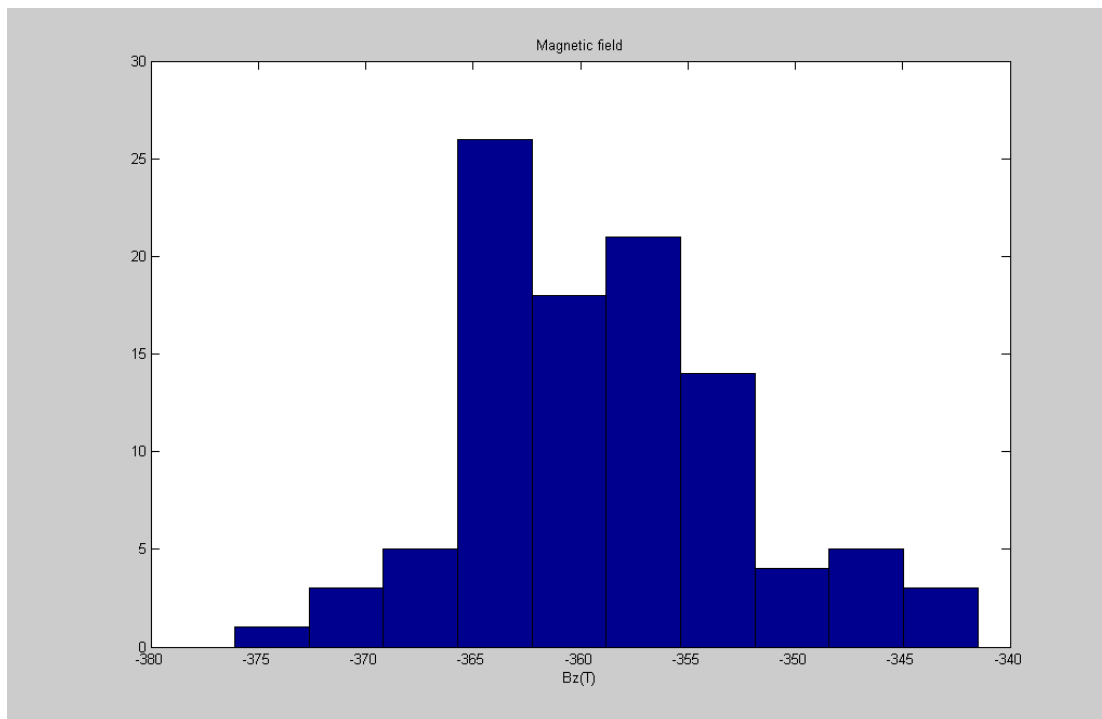
Σχήμα 5.57: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3^ο σετ διπόλων)



Σχήμα 5.58: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_y του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^ο σετ διπόλων



Σχήμα 5.59: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του σετ με τα μετατοπισμένα δίπολα (3^o σετ διπόλων)



Σχήμα 5.60: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου(MDM) για το 3^o σετ διπόλων

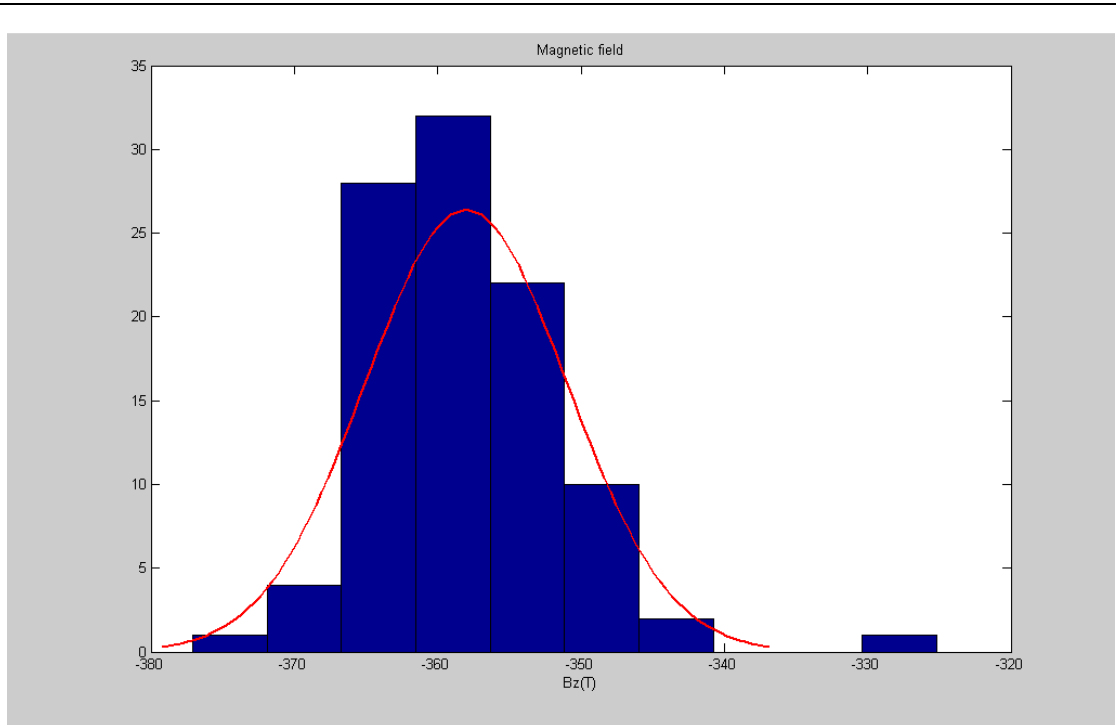
5.4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Σύμφωνα με το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov, οι κατανομές των τιμών του πεδίου που παρήγαγαν τα μοντέλα των μετατοπισμένων διπόλων στο πρώτο σημείο παρατήρησης κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων ακολουθούν κανονική κατανομή.

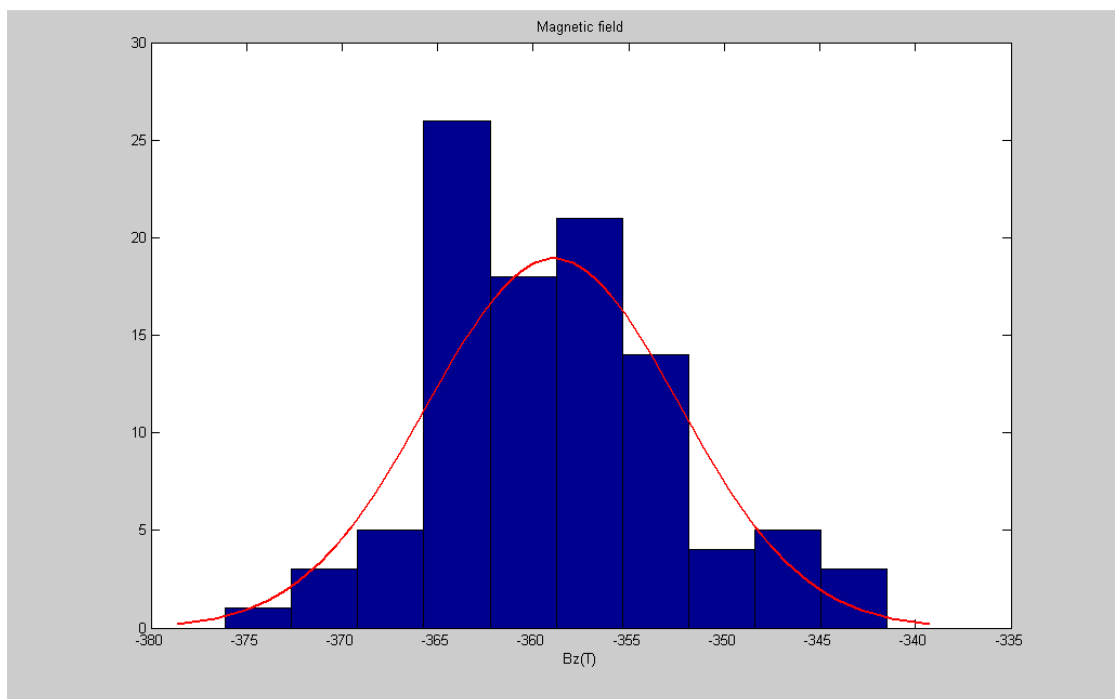
5.4.6 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΗΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Στο Σχήμα 5.61 και Σχήμα 5.62 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα ιστογράμματα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z που παράγουν τα σετ των μετατοπισμένων διπόλων και τα βέλτιστα μοντέλα(MDM) που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των εκατό επαναλήψεων,

έχοντας απεικονίσει και τη καμπύλη της κανονικής κατανομής, προκειμένου να επιβεβαιωθεί το παραπάνω συμπέρασμα.



Σχήμα 5.61: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του σετ των μετατοπισμένων διπόλων (3^ο σετ διπόλων), με τη καμπύλη κανονικής κατανομής



Σχήμα 5.62: Ιστόγραμμα των τιμών του μαγνητικού πεδίου B_z του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου (MDM) για το 3^ο σετ διπόλων, με τη καμπύλη κανονικής κατανομής

Παρατηρώντας, τα ιστογράμματα των τιμών με τις καμπύλες της κανονικής κατανομής, διαπιστώνουμε ότι όντως επιβεβαιώνεται το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov και η κατανομή των μετρήσεων του πεδίου και στις δύο περιπτώσεις προσεγγίζει τη κανονική.

6. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας προσεκτικά τα ιστογράμματα των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των δύο διπόλων (συντεταγμένες μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα που παρουσιάζουν σφάλματα ,displacement errors -συντεταγμένες του παραγόμενου βέλτιστου μοντέλου) και των τιμών των τριών συνιστωσών του συνολικού μαγνητικού πεδίου(πεδίο του μοντέλου των μετατοπισμένων διπόλων -πεδίο βέλτιστου μοντέλου) που παράγει κάθε ένα από τα τρία σετ διπόλων μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ Στα ιστογράμματα των τιμών των συντεταγμένων x, y, z που ορίζουν τις θέσεις των μετατοπισμένων διπόλων των τριών μοντέλων αντίστοιχα και εμπεριέχουν σφάλματα (displacement error), παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις ακολουθούν περίπου μια ομοιόμορφη κατανομή, (η οποία βέβαια σύμφωνα με το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov μπορεί να θεωρηθεί και κανονική). Αυτό ήταν βέβαια αναμενόμενο, εξαιτίας της παρουσίας της συνάρτησης *rand* στο αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια δημιουργίας των σετ μετρήσεων που θα περιελάμβαναν τις τιμές των μετατοπισμένων θέσεων των διπόλων. Η συνάρτηση *rand* έχει την ιδιότητα να επιστρέφει έναν τυχαίο αριθμό ομοιόμορφης κατανομής στο διάστημα (0,1). Συνεπώς, μεταβάλλοντας τις τιμές των x, y, z κατά maximum 0,1mm τυχαία στο χώρο, κάνοντας χρήση αυτής της συνάρτησης, αναμφίβολα τα αποτελέσματα των συντεταγμένων των θέσεων που θα προέκυπταν θα προσέγγιζαν τη ομοιόμορφη κατανομή.
- ✓ Ωστόσο, κοιτάζοντας προσεκτικά τα ιστογράμματα των τιμών των συντεταγμένων των θέσεων των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν με τη στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων διακρίνουμε μια 'εξομάλυνση', των μετρήσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των συντεταγμένων των μετατοπισμένων διπόλων και μια κλίση της κατανομής τους προς τη κανονική μορφή. Επαληθεύεται προφανώς, το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα το οποίο υποστηρίζει πως αν από έναν πληθυσμό που ακολουθεί οποιαδήποτε κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 , επιλέξουμε τυχαία μεγάλα δείγματα μεγέθους n (θεωρητικά $n \rightarrow \infty$) και υπολογίσουμε τους μέσους, τότε η κατανομή αυτών των μέσων (των δειγματικών) είναι κατά προσέγγιση κανονική κατανομή με μέση τιμή επίσης μ και διασπορά σ^2/n . Εκείνο όμως που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξίζει να μελετήσουμε είναι η τάση του γενετικού αλγόριθμου, να στρέψει την κατανομή των μετρήσεων να προσεγγίσει την κανονική. Η αβεβαιότητα των γενετικών αλγορίθμων που εισάγεται στη διαδικασία που ακολουθείται, για την εύρεση των παραμέτρων των θέσεων των βέλτιστων μοντέλων, είναι ένας παράγοντας που δικαιολογεί αυτή τους, τη συμπεριφορά.
- ✓ Σε αντίθεση με τα ιστογράμματα των συντεταγμένων των θέσεων των διπόλων, στη

περίπτωση των ιστογραμμάτων των μαγνητικών πεδίων παρατηρούμε ότι δεν σημειώνονται σημαντικές διαφορές στις κατανομές των τιμών του πεδίου που έχουν παραχθεί από τα μοντέλα των οποίων οι θέσεις των διπόλων έχουν μετατοπιστεί και παρουσιάζουν κάποιο ποσοστό σφάλματος (displacement errors) και των τιμών του πεδίου των βέλτιστων μοντέλων που υπολογίστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώνουμε ότι τόσο το πεδίο που παράγουν τα μοντέλα με τα μετατοπισμένα δίπολα όσο και το πεδίο που δημιουργεί το βέλτιστο μοντέλο ακολουθούν σχεδόν ίδιας μορφής κατανομή, που σε όλες τις περιπτώσεις συγκλίνουν προς τη κανονική, παρόλο που οι τιμές των πεδίων υπολογίστηκαν από διαφορετικές τιμές συντεταγμένων, με διαφορετική μορφή κατανομής, και δικαιολογημένα θα περιμέναμε να προσεγγίζουν και αυτές μη όμοιες μορφές κατανομών. Παρατηρούμε όμως ότι κάτι τέτοιο δεν υφίσταται. Αντίθετα, αυτό που αντιλαμβανόμαστε κοιτάζοντας τα αντίστοιχα ιστογράμματα τιμών είναι ότι η αβεβαιότητα των Γενετικών Αλγορίθμων δεν κάνει τόσο έντονη τη παρουσία της κατά τη διάρκεια υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που παράγει το βέλτιστο μοντέλο, με αποτέλεσμα οι τιμές του πεδίου να τείνουν να διατηρήσουν την ίδια μορφή κατανομής με τις αντίστοιχες τιμές του πεδίου του μοντέλου με τα μετατοπισμένα δίπολα, που χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές εισόδου στη στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης για τη εύρεση του βέλτιστου μοντέλου. Συνεπώς, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν μοντέλα με διαφορετικές παραμέτρους (θέσεις-μαγνητικές ροπές) που να παράγουν παραπλήσιο μαγνητικό πεδίο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K.Mehlem, A.Wiegand: “Magnetostatic Cleanliness of Spacecraft” *Sonnenweg 22, 56203 Hoehr-Grenzhausen, Germany Astos Solution GmbH Grund 1, 78089 Unterkirnach, Germany*
- [2] “ European Space Agency Directorate of Technical and Quality Management”, *Appendix 1 to ESTEC/ITT AO/1-6655/10/NL/GLC, STATEMENT OF WORK Innovative EMI/EMC Testing and Modelling Approaches for Full Development Cycle Support and Reduced AIT/AIV Reference: TEC-EEE/2010.640 Issue: 1, Revision 112.11.201*
- [3] N. C. Kapsalis, S.-D. J. Kakarakis, and C. N. Capsalis: “ Prediction of Multiple Magnetic Dipole Model Parameters from Near Field Measurements Employing Stochastic Algorithms”, National Technical University of Athens
- [4] G. Musmann and J. Stadelmann: “Magnetic Cleanliness Program”, Test Procedure and Manual for ESTEC-ULUSSES-MCF,(upgraded version), MCF-MAGNET, 15.03.2006
- [5] Klaus Mehlem: “Multiple Magnetic Dipole Modeling and Field Prediction of Satellites”, 1978
- [6] Jens Stadelmann and Gunter Musmann: “MCF-MAGNET Software User Manual (SUM)”, version 1.2, 13.03.2011
- [7] David E. Goldberg: “Genetic Algorithms in Search , Optimization , and Machine Learning”, The University of Alabama , Alabama 1989.
- [8] Σπυρίδων Λυκοθανάσης: “Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές”, *Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής Πανεπιστημίου Πατρών*
- [9] Axel Junge: “ Ulysses Mobile Coil Facility Specification“, TEC-EEE/2007.184/AJ, issue 1 revision 1 – 05.10.2007, Under revision , SP, TEC-EEE, LISA Pathfinder, Swarm. BepiColombo
- [10] Clayton R.Paul: “Introduction to Electromagnetic Compatibility (Wiley Series in Microwave and Optical Engineering)”
- [11] Henry W. Ott: “Electromagnetic Compatibility Engineering”, September 2009
- [12] Dag Bjoerkloef: “EMC Standards and Their Application”, 1999 Annual Reference
- [13] EM research group at Michigan State University under support from the National Science Foundation GOALI program “Course notes”

[14] NASA Handbook: “ Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods”, NASA Measurement Quality Assurance Handbook- ANNEX 3, July 2010, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC 20546

[15] “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”, first edition September 2008, GUM 1995 with minor corrections, JCGM 100:2008

[16] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης: “Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής”, Εκδόσεις Συμεών

[17]http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering/Electromagnetic_Compatibility_and_Magneto-static_Laboratory