



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

# **Μελέτη διεγέρσεων στη χρήση μαγνητομέτρου SQUID με εφαρμογή σε Μη Καταστροφικούς Ελέγχους**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Βουλγαράκη Χαρίκλεια-Χαριτίνη  
Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός, MSc

Κοζάνη 2014

*Στην κόρη μου, Βικτώρια*

*“Scientific work must be done for itself, for the beauty of science, and then there is always the chance that a scientific discovery may become a benefit for humanity...”*

*Marie Curie*

## **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Θεόδωρος Θεοδοουλίδης, Καθηγητής (επιβλέπων)

Νικόλαος Σιακαβέλλας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Νικόλαος Πουλάκης, Καθηγητής

## **ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Θεόδωρος Θεοδοουλίδης, Καθηγητής

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής

Νικόλαος Πουλάκης, Καθηγητής

Στέργιος Μαρόπουλος, Καθηγητής

Νικόλαος Σιακαβέλλας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεόδωρος Ζυγκιρίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Δημήτριος Γιαγκόπουλος, Λέκτορας Καθηγητής

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ξεκίνησε επίσημα τον Απρίλιο του 2011 στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας (ΠΔΜ). Η διατριβή εκπονήθηκε στο ΠΔΜ σε συνεργασία με το εργαστήριο Μη Καταστροφικού Ελέγχου του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας (ΤΕΙ ΔΜ). Η έρευνα υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Ηράκλειτος ΙΙ. Η προετοιμασία, η ολοκλήρωση και η συγγραφή αυτής της διατριβής έγινε με τη συμβολή πολλών ανθρώπων τους οποίους και ευχαριστώ.

Πρωτίστως θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του ΠΔΜ και επιβλέποντά μου Θεόδωρο Θεοδουλίδη, καθώς και τον καθηγητή του ΤΕΙ ΔΜ κ. Νικόλαο Πουλάκη και μέλος της τριμελούς επιτροπής για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, τη συνεχή και πολύτιμη επιστημονική καθοδήγησή τους και το ενδιαφέρον που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια. Τους ευχαριστώ πολύ γιατί βρέθηκαν στο πλευρό μου και με στήριξαν σε όλες τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή και μέλος της τριμελούς επιτροπής κ. Σιακαβέλλα Νικόλαο για τη μελέτη της εργασίας μου και τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του στη διάρκεια της διατριβής.

Ευχαριστώ τον ερευνητή Δρ. Roberto Miorelli από το ερευνητικό κέντρο CEA της Γαλλίας για την άψογη συνεργασία του, την πολύτιμη βοήθειά του και την διάθεση που είχε πάντα να ασχοληθεί με οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε σχετικά με το λογισμικό προσομοίωσης CIVA.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. Αντώνη Τίγγο από το ΤΕΙ ΔΜ για το χρόνο που αφιέρωσε καθόλη τη διάρκεια του διδακτορικού μου σε μηχανολογικές κατασκευές που ήταν απαραίτητες για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Γιάννη Βανδίκη από το ΤΕΙ ΔΜ για την επίλυση των ηλεκτρολογικών προβλημάτων που προέκυψαν στο εργαστήριο.

Ευχαριστώ τον αδερφό μου Θεωρή για την συνεχή του ενθάρρυνση και συμπαράσταση.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο σύζυγό μου Θέμη για την υπομονή και ανοχή του σε όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη που νιώθω προς στους γονείς μου. Όσα ευχαριστώ και να τους πω θα ήταν πραγματικά λίγα. Η διατριβή αυτή είναι ουσιαστικά και δικό τους κομμάτι καθώς η συμβολή τους στη διεκπεραίωση της ήταν καθοριστική. Όλα αυτά τα χρόνια μου πρόσφεραν ψυχολογική αλλά και έμπρακτη υποστήριξη κρατώντας την κόρη μου Βικτώρια ατελείωτες ώρες ώστε να μπορώ να αφοσιωθώ με προσήλωση στο διδακτορικό μου και να συνεχίσω το ταξίδι προς τη δική μου “Ιθάκη”. Τους ευχαριστώ από καρδιάς.

Χαριτίνη Βουλγαράκη

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦ1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	8
1.1.Γενικές εφαρμογές του μαγνητομέτρου SQUID	8
1.2.Εφαρμογές του μαγνητομέτρου SQUID στους ΜΚΕ	9
1.3.Διάρθρωση της εργασίας	11
1.4.Βιβλιογραφικές αναφορές	14
<b>ΚΕΦ.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ</b>	20
2.1.Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης	21
2.2.Αισθητήρες τύπου Fluxgate	23
2.3.Αισθητήρες Hall	24
2.4.Αισθητήρας dc SQUID	25
2.4.1.Η κβάντωση της μαγνητικής ροής σε έναν υπεραγώγιμο βρόχο	25
2.4.2.Το φαινόμενο Josephson	26
2.5.Βιβλιογραφικές αναφορές	31
<b>ΚΕΦ.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ</b>	36
3.1.Ιστορική αναδρομή	36
3.2.Αρχή λειτουργίας	37
3.3.Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	45
3.4.Εφαρμογές	45
3.5.Βιβλιογραφικές αναφορές	49
<b>ΚΕΦ.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ</b>	51
4.1.Σύγκριση λογισμικών Comsol και CIVA	51
4.2.Χρήση του λογισμικού CIVA	53
4.3.Βιβλιογραφικές αναφορές	55

<b>ΚΕΦ.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ</b>	<b>57</b>
5.1.Περιγραφή μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου SQUID	57
5.2.Διαδικασία βαθμονόμησης μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου	60
5.3.Πλάκες αλουμινίου	61
5.4.Πηνίο	62
5.5.Σαρωτής XY	64
5.6.Ηλεκτρονική διάταξη	65
5.7.Σύστημα λήψης δεδομένων	67
5.8.Βιβλιογραφικές αναφορές	70
<b>ΚΕΦ.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ SQUID</b>	<b>71</b>
6.1.Διερευνητικά πειράματα με τη χρήση του μαγνητόμετρου SQUID σε πρότυπες πλάκες αλουμινίου	71
6.1.1.Πειράματα με το πηνίο A	71
6.1.2.Διερεύνηση πηνίου	81
6.1.3.Πειράματα με το πηνίο B	85
6.2.Διεξαγωγή πειραμάτων με το μαγνητόμετρο και βαθμιδόμετρο SQUID	86
6.2.1.Πειράματα και προσομοιώσεις στις πλάκες 1mm πάχους	87
6.2.2.Προσομοιώσεις στο λογισμικό CIVA για βελτίωση της πειραματικής διάταξης	90
6.2.3.Πειράματα και προσομοιώσεις στις πλάκες πάχους 1mm με το βαθμιδόμετρο	92
6.2.4.Προσομοιώσεις στις πλάκες 2mm πάχους	95
6.2.5.Προσομοιώσεις στο λογισμικό CIVA για διερεύνηση βέλτιστης συχνότητας με το βαθμιδόμετρο	97
6.3.Θεωρητική διερεύνηση πηνίων διαφόρων σχημάτων με το βαθμιδόμετρο	99
<b>ΚΕΦ.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL</b>	<b>118</b>
7.1.Σύγκριση βιομηχανικού οργάνου δινορρευμάτων και PXI	118
7.1.1Πειραματική διάταξη	119

7.1.2.Περιγραφή πειράματος	121
7.1.3.Έλεγχος ευαισθησίας	122
7.1.4.Χωρική διακριτική ικανότητα	128
7.1.5.Ταχύτητα και διάμετρος πηνίου	131
7.1.6.Λειτουργία του οργάνου PXI με αισθητήρα SQUID	135
7.1.7.Συμπεράσματα	136
7.2. Σύγκριση της απόδοσης των οργάνων LCR meter και Phasec2d στη σάρωση πρότυπων πλακών αλουμινίου	138
7.2.1.Αποτελέσματα	140
7.3.Χρήση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιθεώρηση επίπεδων πρότυπων πλακών με τεχνητές ρωγμές	152
7.3.1.Πειραματική διάταξη	155
7.3.2.Αποτελέσματα επιθεωρήσεων	156
7.4.Χρήση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιθεώρηση πραγματικού δοκιμίου αεροπορίας	169
7.5.Βιβλιογραφικές αναφορές	179
<b>ΚΕΦ.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	180
8.1.Θέματα προς διερεύνηση	183
<b>Παράρτημα</b>	185
A' Abstract	185

# ΚΕΦ.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διατριβή ανήκει στο γενικό επιστημονικό πεδίο των Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ) και συγκεκριμένα στη μέθοδο των δινορρευμάτων (Eddy Current). Οι ΜΚΕ είναι όλες εκείνες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με ένα μηχανολογικό εξάρτημα χωρίς αυτό να καταστρέφεται. Ο ΜΚΕ υλικών, εξαρτημάτων και κατασκευών αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της εφαρμοσμένης επιστήμης και της τεχνολογίας. Οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι ΜΚΕ είναι οι Ακτίνες Χ και  $\gamma$ , οι Υπέρηχοι, τα Μαγνητικά Σωματίδια, τα Διεισδυτικά Υγρά, η Θερμογραφία, η Ακουστική Εκπομπή. Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους στηρίζεται σε διαφορετικό φυσικό φαινόμενο, έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και το δικό της συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών. Το πεδίο εφαρμογών της μεθόδου των δινορρευμάτων είναι αρκετά ευρύ και εφαρμόζεται σε όλο το φάσμα της βιομηχανίας, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην αεροπορική βιομηχανία, κλπ.

Οι κλασσικές τεχνικές της μεθόδου των δινορρευμάτων αντιμετωπίζουν όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα, την περιορισμένη διείσδυση του πεδίου, λόγω του επιδερμικού φαινομένου και, συνεπώς την αδυναμία ελέγχου σε μεγάλα βάθη (Monebhurrin et al 1999, Ruosi et al 2000, Matsuda et al 2007). Το πολύ σημαντικό αυτό πρόβλημα, καλείται να επιλύσει η παρούσα διατριβή χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης μαγνητικού πεδίου με την υπεραγωγίμη κβαντική συσκευή συμβολής, το μαγνητόμετρο Superconducting Quantum Interference Device (SQUID), για την εύρεση σφαλμάτων σε μεταλλικά δοκίμια παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία (Cochran et al 1996). Ακολουθεί μια γενική παρουσίαση του μαγνητομέτρου SQUID.

## 1.1.Γενικές εφαρμογές του μαγνητομέτρου SQUID

Το SQUID έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορα επιστημονικά πεδία (Cochran et al 1996, Donaldson 1989, Koch 1997). Στην ιατρική, όπου ο εγκέφαλος και η καρδιά παράγουν μικρά μαγνητικά πεδία, το SQUID χρησιμοποιείται στις μετρήσεις των ζωτικών λειτουργιών των οργάνων του ανθρώπινου σώματος περισσότερο (Sternickel et al 2006). Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από τις διατριβές που έχουν κατατεθεί στο εθνικό αρχείο διδακτορικών διατριβών και εντάσσονται στο ευρύ πεδίο της ιατρικής, όπου στηρίζονται στην ιδιότητα του SQUID να καταγράφει τη βιομαγνητική δραστηριότητα είτε από το νευρικό σύστημα του εγκεφάλου είτε από τη ροή του αίματος στα αγγεία (Λυμπέρης 1988, Κουτσούγερας 1988, Γεμουσακάκης 2012). Παρόλο που οι περιοχές ελέγχου του SQUID στηρίζονται κυρίως στην ανίχνευση βιομαγνητικών πεδίων (Romani et al 1982, Zhang et al 2000, Koch 2001), το μαγνητόμετρο χρησιμοποιείται με επιτυχία και στο μη καταστροφικό έλεγχο (Weinstock 1991, Vrba et al 1993, Donaldson et al 1996, Donaldson 1996, Jenks et al 1997, Braginski et al 2000, Chatraphorn et al 2000, Ruosi et al 2000, Krause et al 2002). Επίσης, χρησιμοποιείται στη γεωφυσική όπου οι γεωλόγοι το χρησιμοποιούν για ανίχνευση κοιτασμάτων πετρελαίου και ορυκτών τα οποία προκαλούν μικρές τοπικές μεταβολές στο πεδίο της γης (Zhang et al 1995). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των τεκτονικών πλακών της γης καθώς και για τη χρονολόγηση του εδάφους και διαφόρων υποστρωμάτων του (Bick et al 1999).



Οι πρώτες χρήσεις του SQUID στους ΜΚΕ ξεκίνησαν το 1982 από τον Weinstock και τον Nisenoff στο ερευνητικό εργαστήριο Navalstiw Η.Π.Α. και από τον Donaldson, στο Πανεπιστήμιο Strathclyde της Γλασκώβης. Οι Weinstock και Nisenoff διερεύνησαν ασυνέχειες, οπές και συγκολλήσεις αναλύοντας τα μαγνητικά σήματα. Οι πρώτες μετρήσεις με SQUID στη μέθοδο των δινορρευμάτων του έγιναν από τον Carobianco et al. Ο Wikswo από το πανεπιστήμιο Vanderbilt το 1990, ήταν η πρώτη ομάδα που ασχολήθηκε με τη δυνατότητα εύρεσης του τύπου της ρωγμής και τη γεωμετρία της από το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο.

## 1.2.Εφαρμογές του μαγνητομέτρου SQUID στους ΜΚΕ

Η πρώτη προσπάθεια στη χρήση του SQUID για τον έλεγχο των αεροσκαφών έγινε το 1993 από τους Ma και Wikswo, με SQUID χαμηλής θερμοκρασίας. Μετά από δύο χρόνια η ομάδα του Wikswo παρουσίασε μια σειρά πειραμάτων για την ανίχνευση υπο-επιφανειακών ρωγμών που προέρχονται από διάβρωση ή κόπωση στα αεροσκάφη πολλών ετών. Την ίδια χρονιά, το 1993, αναφέρθηκε και η πρώτη χρήση SQUID υψηλών θερμοκρασιών στη χαρτογράφηση ac μαγνητικού πεδίου (Cochran et al 1993). Λίγο αργότερα, ο Podney χρησιμοποίησε SQUID χαμηλής θερμοκρασίας low-Tc (κρύας ψύξης, cryo-cooled) για την ανίχνευση ρωγμών σε αεροσκάφη. Με τη χρήση μικρής έντασης ρεύματος έως μερικών Ampere και με τη βοήθεια ενός απομακρυσμένου διαφορικού πηνίου κατάφερε να εντοπίσει μικρές ασυνέχειες (1mm) ακόμη και σε βάθος μερικών χιλιοστών αλουμινίου. Οι παραπάνω εφαρμογές προσέλκυσαν το ενδιαφέρον για τη χρήση του αισθητήρα SQUID σε έλεγχο τμημάτων από αεροσκάφη (Wikswo 1995, Krause et al 1998, Allweins et al 2003). Η ασφάλεια στα αεροσκάφη είναι υψίστης σημασίας διότι καθημερινά έρχονται αντιμέτωπα με πολλές δύσκολες συνθήκες λειτουργίας (όπως πολύ ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας) και αυτό συνεπάγεται την ανάπτυξη ρωγμών και διάβρωσης σε διάφορα σημεία (Wikswo et al 1993, Boltz 1998, Smith et al 2001, Hohmann et al 1999, Hatsukade et al 2004). Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση συστήματος ελέγχου υψηλής ευαισθησίας με δυνατότητα ανίχνευσης μικρών ρωγμών (Tavrin et al 1999, Bick et al 1999). Από όλες τις μεθόδους ΜΚΕ, η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι η πιο κατάλληλη ιδιαίτερα για δομές πολυστρωματικές και ιδιαίτερα τα συστήματα SQUID (Ma et al 1992, Ma et al 1996, Ma et al 1998, Gans et al 1993, Knopp et al 2004).

Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν το SQUID ως μια από τις πιο κατάλληλες τεχνικές για τη μέθοδο των δινορρευμάτων είναι η υψηλή του ευαισθησία (Drung et al 2007) σε μεγάλα πεδία (ικανότητα ανίχνευσης πεδίων έως και της τάξεως των nT), λειτουργία σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων από πολύ χαμηλές (μερικά Hz) σε πολύ μεγάλες συχνότητες (MHz) επιτρέποντας την ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών (Tavrin et al 1996, Yang et al 2003). Η υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα το καθιστά ικανό να ανιχνεύει μικρά μαγνητικά πεδία (εξαιτίας μικρών ρωγμών) σε περιβάλλον με μεγάλο μαγνητικό θόρυβο που μπορεί να προέρχεται από το φαινόμενο του άκρου (edge effect), ή ενδεχομένως από γεωμετρικές ατέλειες στην επιφάνεια είτε στο εσωτερικό του εξεταζόμενου δοκιμίου (Weinstock 1996, Lucia et al 1997, Carr et al 2002, Knopp et al 2009). Το SQUID πρέπει να λειτουργεί σε περιβάλλον ψύξης. Η μέτρηση των πολύ μικρών σημάτων της τάξεως nT, σε ένα περιβάλλον μη θωρακισμένο, απαιτεί τη μείωση της παρεμβολής των 50 ή 60Hz (και των αρμονικών τους) (Haller et al 1997). Επιπλέον, η υψηλή γραμμικότητα του SQUID επιτρέπει την ποιοτική εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο εξεταζόμενο δοκίμιο (Peluso et al 1997, Ruosi et al

1999). Μια άμεση σύγκριση ανάμεσα στο μαγνητόμετρο SQUID και στις τεχνικές των συμβατικών μεθόδων δινορρευμάτων έδειξε την ανωτερότητα του αισθητήρα καθώς έχει πολύ υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (Cochran et al 1993, Nagendran 2012).

Η ανίχνευση ρωγμών υπό-επιφανειακών ρωγμών κυρίως στο δεύτερο στρώμα στη δομή των αεροσκαφών είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί κυρίως γιατί οι ρωγμές εντοπίζονται κάτω από τους ήλους συναρμογής, οι οποίοι παράγουν πολύ ισχυρά σήματα και καλύπτουν τα σήματα από τις ρωγμές (Tavrin et al 1999, Kreutzbruck et al 1999, Hohmann et al 2001). Επιπλέον, η χρήση χαμηλής συχνότητας διέγερσης για βαθύτερη διείσδυση οδηγεί στη μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο.

Το SQUID έχει ισχυρά γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή παρουσιάζει το ίδιο χαμηλό επίπεδο μαγνητικού θορύβου και την ίδια υψηλή ευαισθησία σε όλη την κλίμακα συχνοτήτων (Pagano et al 1998, Ruosi et al 2001). Ο συνδυασμός της υψηλής ευαισθησίας ακόμη και σε περιβάλλον μη θωρακισμένο, η υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, το δυναμικό του εύρος και η γραμμική του συμπεριφορά σε σχέση με τη συχνότητα, έχουν καταστήσει το SQUID σαν έναν από τους πιο ικανούς αισθητήρες δινορρευμάτων για ανίχνευση βαθιών ασυνεχειών σε αγωγίμες δομές καθώς και σε ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών (Ruosi et al 1999, Ruosi et al 2002).

Το βασικό μειονέκτημα του SQUID είναι ότι δέχεται όλο τον εξωτερικό θόρυβο (Krause et al 2006). Ο εξωτερικός θόρυβος περιλαμβάνει το θόρυβο περιβάλλοντος όπως το θόρυβο από τις γραμμές ρεύματος (50Hz και των αρμονικών του), από τους υπολογιστές (75Hz- 150Hz), παρεμβολή σημάτων είτε από κινητή τηλεφωνία είτε από εκπομπή ραδιοφωνικών κυμάτων. Άλλες διαταραχές μπορεί να προέρχονται από ηλεκτρικές συσκευές και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που βρίσκονται στην ίδια περιοχή με το μαγνητόμετρο, σήματα που προέρχονται είτε από τον ίδιο τον αισθητήρα (ηλεκτρονικός θόρυβος), είτε από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που δημιουργούν παρεμβολές στο σήμα εξόδου που προσπαθούμε να μετρήσουμε. Ο θόρυβος συνήθως προέρχεται από χαμηλές συχνότητες. Επιπλέον, η κίνηση του αισθητήρα προκαλεί το φαινόμενο της κλίσης (tilting effect), το φαινόμενο της ανύψωσης (lift off effect) και το φαινόμενο του άκρου (edge effect). Ο στόχος λοιπόν της βαθμονόμησης του μαγνητόμετρου, είναι η αντιστάθμιση των διαταραχών που προέρχονται από το θόρυβο (Clarke 1989).

Η απόσταση του πηνίου από το εξεταζόμενο δοκίμιο ονομάζεται lift off. Εάν το πηνίο βρίσκεται μακριά από το εξεταζόμενο δοκίμιο τότε η μαγνητική ροή που δημιουργείται, αποτυγχάνει να φτάσει στο εξεταζόμενο δοκίμιο (Kreutzbruck et al 1999, Shimizu et al 1993). Όσο μικραίνει η απόσταση του πηνίου από το εξεταζόμενο δοκίμιο τόσο περισσότερες γραμμές μαγνητικής ροής εισέρχονται σε αυτό.

Τα περισσότερα συστήματα SQUID για βελτίωση των δυνατοτήτων τους δεν εκθέτουν τον αισθητήρα απευθείας στο προς ανίχνευση μαγνητικό πεδίο. Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένα πηνίο λήψης πολλών σπειρών που συνδέεται επαγωγικά με το SQUID. Η ανιχνεύσιμη μαγνητική ροή εξαρτάται από την περιοχή του πηνίου και καθώς το μαγνητόμετρο SQUID έχει συνήθως πηνίο με μικρές διαστάσεις (μικρότερο από  $1\text{mm}^2$ ), τα μεγαλύτερα πηνία βοηθούν στη βελτίωση της ευαισθησίας.

### 1.3.Διάρθρωση της εργασίας

Το αντικείμενο της μελέτης αυτής αφορά τη διερεύνηση μαγνητομέτρου SQUID υψηλών θερμοκρασιών σε εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου εστιασμένο στην ανίχνευση ασυνεχειών (επιφανειακών και υπό-επιφανειακών) σε δομές παρόμοιες της αεροπορίας. Η διάρθρωση της μελέτης χωρίζεται σε οχτώ κεφάλαια τα οποία περιγράφονται συνοπτικά.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι γενικές εφαρμογές του μαγνητομέτρου SQUID και εστιάζεται η χρήση του στους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους. Στη συνέχεια περιγράφεται η διάρθρωση της εργασίας καθώς το 1ο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι μαγνητικοί αισθητήρες καθώς ο αισθητήρας SQUID ανήκει στην κατηγορία αυτή. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά, οι εφαρμογές και η ευαισθησία τους. Στον αισθητήρα SQUID η περιγραφή είναι πιο λεπτομερής σε σχέση με τους υπόλοιπους καθώς αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης και επομένως είναι σημαντικό να αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του, τα βασικά χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες του που τον καθιστούν τον πιο ευαίσθητο ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μέθοδος των δινορρευμάτων. Επισημαίνεται η σημασία της μεθόδου στον έλεγχο αγωγίμων δοκιμίων αλλά και το μειονέκτημα των συμβατικών τεχνικών της καθώς λόγω του επιδερμικού φαινομένου χάνουν την ευαισθησία τους με τη μείωση της συχνότητας. Επίσης αναφέρονται οι πολλές εφαρμογές της μεθόδου δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στον έλεγχο αεροσκαφών διότι αυτή η μελέτη ερευνά προβλήματα που συναντώνται στις αεροπορικές δομές και ο έλεγχος αυτός απαιτεί χαμηλές συχνότητες. Το SQUID υπερέχει στην ανίχνευση τέτοιων δομών λόγω της διατήρησης της υψηλής του ευαισθησίας ακόμη και στις πολύ χαμηλές συχνότητες για τον εντοπισμό υπό-επιφανειακών ασυνεχειών.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναλύεται η επιλογή του λογισμικού προσομοίωσης CIVA το οποίο ήταν ιδανικό για την περίπτωση μας, την ανίχνευση επίπεδων πλακών αλουμινίου με οπή ή με οπή και ρωγμή όπως συναντώνται στους ήλους συναρμογής των αεροσκαφών. Με το λογισμικό διερευνήθηκε η επίδραση πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου και είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου, η απόσταση του πηνίου από το δοκίμιο, οι διαστάσεις του δοκιμίου, η συχνότητα του πηνίου διέγερσης και η τιμή της έντασης του ρεύματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση επαληθεύτηκαν στη συνέχεια από τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του λογισμικού πακέτου CIVA.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων με το SQUID. Περιγράφονται και οι δύο τύποι μαγνητομέτρου SQUID (απλό και διπλό), οι πλάκες στις οποίες θα μελετηθεί η συμπεριφορά του SQUID, η αναγκαιότητα χρήσης διπλού συμμετρικού πηνίου για την αποφυγή του κορεσμού του SQUID, ο σαρωτής που μετακινεί τα υπό-εξέταση δοκίμια, η απαραίτητη ηλεκτρονική διάταξη και το σύστημα λήψης δεδομένων. Η ανάλυση της διάταξης είναι απαραίτητη γιατί θα θεωρείται δεδομένη στη διεξαγωγή των πειραμάτων τα οποία παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

Στο **έκτο κεφάλαιο** περιγράφονται τα εργαστηριακά πειράματα σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν ώστε να διασφαλιστούν οι βέλτιστες συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων. Τα πρώτα πειράματα ήταν καθαρά διερευνητικά και αποτέλεσαν τη βάση για την εξέλιξη της έρευνας. Η ανάγκη για σημαντικές αλλαγές στην πειραματική διάταξη προέκυψε μετά από μελέτη των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων έχοντας στόχο τη βελτιστοποίηση του πειράματος. Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε λεπτομερής μελέτη διεγέρσεων τόσο θεωρητικά στο λογισμικό προσομοίωσης CIVA όσο και πειραματικά στο εργαστήριο. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση για τις διαστάσεις και τα σχήματα του πηνίου ώστε να επιλεγεί και να κατασκευαστεί στη συνέχεια το βέλτιστο πηνίο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Επίσης έγιναν πολλές προσομοιώσεις για τον εντοπισμό βέλτιστης συχνότητας σε μια σειρά περιπτώσεων (υπό-επιφανειακές, διαμπερείς και επιφανειακές ρωγμές, ρωγμές σε πολυστρωματικές δομές, ρωγμές με διαφορετική τοποθέτηση δίπλα στην οπή, ρωγμές με διαφορετικό μέγεθος, κ.α.). Η μελέτη των διεγέρσεων οδήγησε σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα καθώς μέσα από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του SQUID στην ανίχνευση ρωγμών.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** τα εργαστηριακά πειράματα συνεχίζονται με το μαγνητικό αισθητήρα Hall καθώς συγκρίνεται ένα βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων με ένα αρθρωτό όργανο PXI. Στο εργαστήριο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον της γραφικής γλώσσας προγραμματισμού Labview η εφαρμογή του λογισμικού που ελέγχει το αρθρωτό όργανο. Έγινε σύγκριση της διακριτικής ικανότητας, της ταχύτητας σάρωσης και της ευαισθησίας των δύο οργάνων. Στη συνέχεια στο αρθρωτό όργανο προσαρμόστηκε το μαγνητόμετρο SQUID τονίζοντας το πλεονέκτημα της προσαρμοστικότητας των αρθρωτών οργάνων να δέχονται οποιοδήποτε μαγνητικό αισθητήρα. Έπειτα, το βιομηχανικό όργανο συγκρίνεται και με όργανο ακριβείας (LCR meter) πάνω στις πρότυπες πλάκες αλουμινίου για να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά ενός βιομηχανικού οργάνου σε σχέση με τα όργανα ακριβείας που χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς. Τα πειράματα συνεχίζονται με μετρήσεις ακριβείας (Benchmark 2014) σε πρότυπες πλάκες αλουμινίου με σύστημα μέτρησης που αποτελείται από τον μαγνητικό αισθητήρα Hall τοποθετημένο μέσα σε κυλινδρικό πηνίο. Ο αισθητήρας αυτός έχει πολύ μικρότερο εύρος ευαισθησίας σε σχέση με το SQUID αλλά σε συνδυασμό με κατάλληλη διάταξη μελετάται η συμπεριφορά του για αξιόπιστα αποτελέσματα σε διάφορες περιπτώσεις που διερευνούμε όπως πλάκα με διαμπερή ρωγμή ή πλάκα με υπό-επιφανειακή ρωγμή μεγάλου σχετικά βάθους. Οι εργαστηριακές αυτές μετρήσεις συγκρίνονται με τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το CIVA και διεξάγονται κρίσιμα συμπεράσματα. Τέλος, τα πειράματα ολοκληρώνονται με μετρήσεις σε δοκίμιο αναφοράς (Reference Standard A310) που χρησιμοποιείται για τους ελέγχους που πραγματοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία και έχουν σαν στόχο να διερευνηθεί η επίδραση που έχει ο ήλος συναρμογής (πιρτσίνι) στο σήμα των ρωγμών.

Στο **όγδοο** κεφάλαιο εξάγονται τα γενικά συμπεράσματα όλης της έρευνας και προτείνονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της.

Η συνεισφορά της εργασίας εστιάζεται στα παρακάτω:

1. Θεωρητική και πειραματική μελέτη διεγέρσεων τόσο από πλευράς συχνότητας, όσο και από πλευράς σχήματος και διαστάσεων πηνίων στη χρήση μαγνητομέτρου SQUID.
2. Ακριβής μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε μεταλλικές δομές παρόμοιες των αεροπορικών δομών και αξιόπιστη ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ασυνεχειών.
3. Συμβολή στη βιομηχανική αυτοματοποίηση με κατασκευή φορητών οργάνων ακριβείας στις επιθεωρήσεις με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.
4. Διερεύνηση βέλτιστων συνθηκών για μετρήσεις ακριβείας.

#### 1.4.Βιβλιογραφικές αναφορές

Allweins K., Gierelt G., Krause H.J. and Kreutzbruck M.V., “Defect Detection in Thick Aircraft Samples Based on HTS SQUID Magnetometry and Pattern Recognition”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.13, no.2, pp. 250-253, 2003.

Bick M., Panaitov G., Wolters N., Zhang Y., Bousack H., Braginski A.I., Kalberkamp U., Burkhardt H. and Matzander U., “A HTS SQUID Vector Magnetometer for Geophysical Exploration”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.9, pp.3780-3785, 1999.

Boltz E.S., “New Electromagnetic Sensors for Detection of Subsurface Cracking and Corrosion”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, vol.17, pp.1033-1038, 1998.

Braginski A.I. and Krause H.J., “Nondestructive Evaluation Using High Temperature SQUIDS”, Physica C., vol.335, pp.179-183, 2000.

Capobianco T.E., Moulder J.C. and Fickett F.R. “Flaw Detection with a Magnetic Field Gradiometer”, D.W. Moore and G.A. Matzkanin (Eds.), NDE Testing Information Analysis Center, Proc. Symposium on NDE, pp. 15, San Antonio, 1986.

Carr C., Macfarlane J.C. and Donaldson G.B., “The Development of a Fully Portable Cryocooled HTS SQUID NDE Instrument” Physica C, vol.372-376, pp.259-262, 2002.

Chatrathorn S., Fleet E.F., Wellstood F.C., Knauss L.A. and Eiles T.M. “Scanning SQUID Microscopy of Integrated Circuits”, Applied Physics Letters, vol.76, pp.2304-2306, 2000.

Clarke J., “Principles and Applications of SQUIDS”, Proceedings of the IEEE, vol.77, iss.8, pp.1208-1223, 1989.

Cochran A., Donaldson G.B., Carr C., McKirdy D.McA., Carr C., McKirdy D. McA, Walker M.E., Klein U., Kuznic J. and McNab A., “Advances in the Theory and Practice of SQUID NDE”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol.15, pp.1151-1158, 1996.

Cochran A., Donaldson G.B., Evanson S. and Bain R.J.P., “First Generation SQUID Based Nondestructive Testing System”, IEE Proceedings A, vol.140, no.2, pp.113-120, 1993.

Donaldson G. B., Cochran A. and McKirdy D. McA., “The Use of Squids for Nondestructive Evaluation”, SQUID Sensors: Fundamentals Fabrication and Applications, H.Weinstock, vol.329, pp 599-628, 1996.

Donaldson G.B., "The Use of SQUIDs for NDE", SQUID Sensors, H. Weinstock (Ed.), Fundamentals, Fabrication and Applications, Nato ASI Series E, vol.329, pp.599-628, 1996.

Donaldson G.B., "SQUIDs for Everything Else", Superconducting Electronics, H. Weinstock and M. Nisenoff (Eds.), Springer, pp.175-207, 1989.

Drung D., Abmann C., Beyer J., Kriste A., Peters M., Ruede F. and Schurig T., "Highly Sensitive and Easy to Use SQUID Sensors", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.17, no.2, pp.699-704, 2007.

Gans R.R. and Rose R.M., "Crack Detection in Conducting Materials Using SQUID Magnetometry", Nondestructive Evaluation, vol.12, no.4, 1993.

Haller A., Tavrín Y. and Krause H.J., "Eddy Current Nondestructive Material Evaluation by High Temperature SQUID Gradiometer Using Rotating Magnetic Fields", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.7, no.2, pp.2874-2877, 1997.

Hatsukade Y., Inaba T., Kasai N., Maruno Y., Ishiyama A. and Tanaka S., "Detection of Deep Lying Defects in Carbon Fiber Composites Using SQUID NDE System Cooled by a Cryocooler", Physica C, vol.412-414, pp.1484-1490, 2004.

Hohmann R., Lomparski D., Krause H.J., Kreutzbruck M.V. and Becker W., "Aircraft Wheel Testing with Remote Eddy Current Technique Using a HTS SQUID Magnetometer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.11, no.1, pp.1279-1282, 2001.

Hohmann R., Maus M., Lomparski D., Gruneklee M., Zhang Y., Krause H.J., Bousack H. and Braginski A.I., "Aircraft Wheel Testing with Machine-Cooled HTS SQUID Gradiometer System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.9, no.2, pp.3801-3804, 1999.

Jenks W.G., Sadeghi S.S.H. and Wikswo J.P., "SQUIDs for Nondestructive Evaluation", Journal of Physics D: Applied Physics, vol.30, pp.293-323, 1997.

Knopp J. S., Aldrin J. C., Ko R. T. and Sabbagh H., "Numerical and Experimental Study of Eddy Current Crack Detection around Fasteners in Multi-Layer Structures", Review of Progress in QNDE, AIP, vol.23, pp.336-343, 2004.

Knopp J.S., Aldrin J.C. and Jata K.V., "Computational Methods in Eddy Current Crack Detection at Fastener Sites in Multi-layer Structures", Nondestructive Testing and Evaluation, vol.24, no.1-2, pp.103-120, 2009.

Koch H., "Mature SQUID-Systems and their Application", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.7, no.2, pp.3738-3743, 1997.

Koch H., "SQUID Magnetocardiography: Status and Perspectives", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.11, pp.49 -59, 2001.

Krause H.J. and Gordon G., "The SQUID Handbook, Applications of SQUIDS and SQUID Systems", Ch.13: Nondestructive Evaluation of Materials and Structures Using SQUIDS, J. Clarke and A.I. Braginski (Eds), Wiley-VCH, vol.II, pp.443-447, 2006.

Krause H.J. and Kreuzbruck M.V., "Recent Developments in SQUID NDE", Physica C, vol.368, pp.70-79, 2002.

Krause H.J., Hohmann R., Groneklee M., Maus M., Zhang Y., Lomparski D., Soltner H., Wolf W., Banzet M., Schubert J., Zander W., Bousack H. and Braginski A.I., "Aircraft Wheel and Fuselage Testing with Eddy Current and SQUID", ndt.net, vol.3, no.9, 1998.

Kreuzbruck M.V., Baby U., Theiss A., Muck M. and Heiden C., "Inspection of Aircraft Parts with High Remanent Magnetization by Eddy Current SQUID NDE ", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol.9, no.2, pp.3805-3808, 1999.

Lucia M. L., Hohmann R., Soltner H., Krause H-J., Wolf W., Bousack H., Faley M.I., Sporn G. and Binneberg A., "Operation of HTS SQUIDS with a Portable Cryostat: a SQUID System in Conjunction with Eddy Current Technique for Non-Destructive Evaluation", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.7, no.2, pp.2878-2887, 1997.

Ma Y.P. and Wikswo J.P , Jr, "Detection Of A Deep Flaw Inside A Conductor Using A Squid Magnetometer", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D.O Thomson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, vol.11, 1992.

Ma Y.P. and Wikswo J.P.Jr, "Depth Selective SQUID Eddy Current Techniques for Second Layer Flaw Detection", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, vol.15, pp.1151-1158, 1996.

Matsuda M., Kataishi T. and Kuriki S., "SQUID operation at a Constant Voltage", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.17, no.2, pp.695-698, 2007.

Monebhurrun V., Lesselier D., Duchene B. Ruosi A., Valentino M., Pepe G.P. and Peluso G., "Eddy Current Nondestructive Evaluation Using SQUIDS", Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (III), IOS press, pp.171-181, 1999.

Nagendran R. and Janawadkar M.P., "Nondestructive Testing Methods and New Applications", Ch.2: SQUID Based Nondestructive Evaluation, Nondestructive Testing Methods and New Applications, M. Omar (Ed.), InTech, pp.25-52, 2012.



Pagano S., Sarnelli E., Camerlingo, Monaco A., Russo M., Peluso G., Peluso G., Pepe G., Ruosi A., Valentino M., Teti R., Buonadonna P., Maritato L., Salvato M., and Prencipe M., "HTc SQUID for Nondestructive Evaluation", *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II)*, R.Albanese et al, IOS, pp.206-214, 1998.

Peluso G., Pepe G., Ruosi A., Barone A., Buonadonna P., Teti R., Valentino M., Klein U, Attanasio C., Maritato I., Salvato M., Camerlingo C., Pagano S., Russo M. and Sarnelli E., "A New Project on Nondestructive Evaluation with High Temperature SQUIDS", *Review of Progress in Quantative Nondestructive Evaluation*, D.O.Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, vol.16, pp.1083-1090, 1997.

Romani G.L., Williamson S.J. and Kaufman L., "Biomagnetic Instrumentation", *IEEE Review of Scientific Instruments*, vol.53, pp.1815 - 1845, 1982.

Ruosi A., Pepe, G., Peluso, G., Valentino, M., Monebhurrun V., "Experimental and numerical results of electromagnetic nondestructive testing with HTc SQUIDS", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.9, is.2, pp. 3499-3502, 1999.

Ruosi A., Valentino M., Peluso G. and Pepe G., "Analysis of Low Velocity Impact Damage in Reinforced Carbon Fiber Composites by HTS –SQUID Magnetometers", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.11, is.1, pp.1172-1175, 2002.

Ruosi A., Valentino M., Peluso G. and Pepe G., "Analysis of Low-Velocity Impact Damage in Reinforced Carbon Fiber Composites by HTS-SQUID Magnetometers", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 11, no.1, pp. 1172-1175, 2001.

Ruosi A., Valentino M., Pepe G., Monebhurrun V., Lesselier D. and Duchene B., "High Tc SQUIDS and Eddy Current NDE: a Comprehensive Investigation from Real Data to Modelling", *Measurement Science and Technology*, vol.11, pp.1639-1648, 2000.

Shimizu N., Odawara A., Nakayama S. and Chinone K., "An Automatic Measurement System of DC SQUID Characteristics Using a Computer Control", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.3, no.1, pp.1906-1909, 1993.

Smith A.R. and Hugo G.R., "Deep Corrosion and Crack Detection in Aging Aircraft using Transient Eddy Current NDE", *Proceedings 5<sup>th</sup> NASA Conference on Aging Aircraft*, Orlando, 2001.

Staton D.J., Ma Y.P., Sepulveda N.G. and Wikswow J.P., "High Resolution Magnetic Mapping Using SQUID Magnetometer Array", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.27, pp.342-378, 1991.

Sternickel K. and Braginski A.I., "Biomagnetism Using SQUIDS: Status and Perspectives", *Superconductor Science and Technology*, vol.19, pp. S160-S171, 2006.

Tavrin Y. and Siegel M., "Standard Method for Detection of Magnetic Defects in Aircraft Engine Discs Using a HTS SQUID Gradiometer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.9, no.2, pp. 3809-3812, 1999.

Tavrin Y., Krause H.J., Wolf W., Glyantsev V., Schubert J., Zander W. and Bousack H., "Eddy Current Technique with High Temperature SQUID for Non-Destructive Evaluation of Non-Magnetic Metallic Structures", Cryogenics, vol.36, pp.83-86, 1996.

Vrba J., Betts K., Burbank M., Cheung T., Fife A.A. and Haid G., "Whole Cortex 64 Channel SQUID Biomagnetometer System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.3, pp.1878-1882, 1993.

Weinstock H. and Nisenoff M., "Defect Detection with a SQUID Magnetometer", Review of Progress in QNDE, D.O. Thompson and D.E. Chimenti (Eds.), Plenum Press, vol.5, pp.699-704, 1986.

Weinstock H. and Nisenoff M., "Nondestructive Evaluation of Metallic Structures using a SQUID gradiometer", H.D. Hahlbohm and H. Lubigg (Eds.), SQUID'85 Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Superconducting Quantum Devices, Berlin, 1985.

Weinstock H., "A Review of SQUID Magnetometry Applied to Nondestructive Evaluation", IEEE Transactions on Magnetics, vol.27, pp.3231-3236, 1991.

Weinstock H., "SQUID Sensors Fundamentals Fabrication and Applications", Kluwer Academic Publishers, 1996.

Wikswa J.P., "SQUID Magnetometers for Biomagnetism and Nondestructive Testing: Important Questions and Initial Answers", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.5, pp.74-120, 1995.

Wikswa J.P., Ma Y.P., Sepulveda N.G., Staton D.J., Tan S. and Thomas I. M., "Superconducting Magnetometry: A Possible Technique for Aircraft NDE", SPIE Proceedings, Nondestructive Inspection of Aging Aircraft, vol.2001, pp.164-192, 1993.

Yang T.Q. and Enpuku K., "SQUID Magnetometer Utilizing Normal Pick up Coil and Resonant Type Coupling Circuit", Physica C, vol.392-396, pp.1396-1400, 2003.

Zhang Y., Panaitov G., Wang S.G., Wolters N., Otto R., Schubert J., Zander W., Krause H.J., Soltner H., Bousack H. and Braginski A.I., "Second Order High Temperature Superconducting Gradiometer for Magnetocardiography in Unshielded Environment", Applied Physics Letters, vol.76, pp.906-908, 2000.

Zhang Y., Tavrin Y., Krause H.J., Bousack H., Braginski A.I., Kalberkamp U., Matzander U., Burghoff M. and Trahms L., "Applications of High Temperature SQUIDS", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.3, pp.367-381, 1995.

Γεμουσακάκης Τ.Γ., “Προσδιορισμός των Κέντρων της Γεύσης στον Εγκέφαλο με τη χρήση της Μαγνητοεγκεφαλογραφίας”, Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών, 2012.

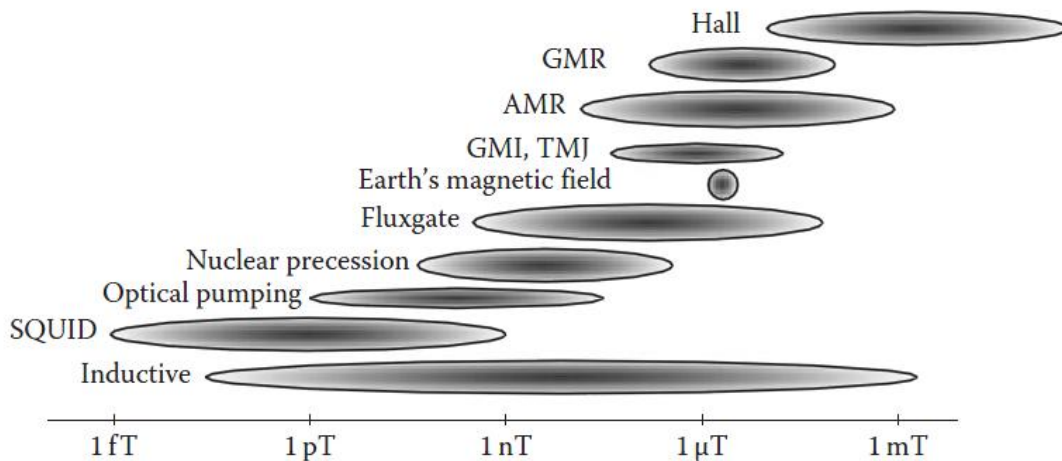
Κουτσούγερας Γ., “Η Συμβολή του Βιομαγνητόμετρου στη Διερεύνηση Αιμοδυναμικής του Ομφάλιου Λώρου”, Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών, 1988.

Λυμπέρης Β., “ Η Συμβολή του Βιομαγνητόμετρου στη Διερεύνηση της Εμβρυικής Εγκεφαλικής Λειτουργίας”, Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών, 1988.

## ΚΕΦ.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι μαγνητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς η μέτρηση μαγνητικών πεδίων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε πλήθος από τεχνικούς τομείς. Οι μαγνητικοί αισθητήρες παρέχουν μια τάση εξόδου ανάλογη προς την πυκνότητα μαγνητικής ροής (συχνά απαντάται με τον όρο μαγνητική επαγωγή).

Η Εικ.2.1 απεικονίζει την ευαισθησία των πιο διαδεδομένων αισθητήρων μαγνητικού πεδίου (MFS, magnetic field sensors), η οποία είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος που καθορίζει το εύρος εφαρμογής του αισθητήρα. Τα τελευταία χρόνια δεν παρατηρείται ανάπτυξη νέων αισθητήρων καθώς οι ίδιοι τύποι αισθητήρων βελτιώνονται συνεχώς με τη χρήση μικροηλεκτρονικών (Boll et al 1989, Lenz 1990, Heremans 1993, Ripka 2001, Tumanski 2004, Lenz 2006). Οι αισθητήρες αυτοί είναι οι αισθητήρες τύπου fluxgate, οι αισθητήρες Hall, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (magnetoresistive sensors), τα επαγωγικά πηνία (inductive coils or sensors) και το μαγνητόμετρο SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).



Εικόνα 2.1. Το εύρος της ευαισθησίας των πιο διαδεδομένων αισθητήρων (Tumanski 2011).

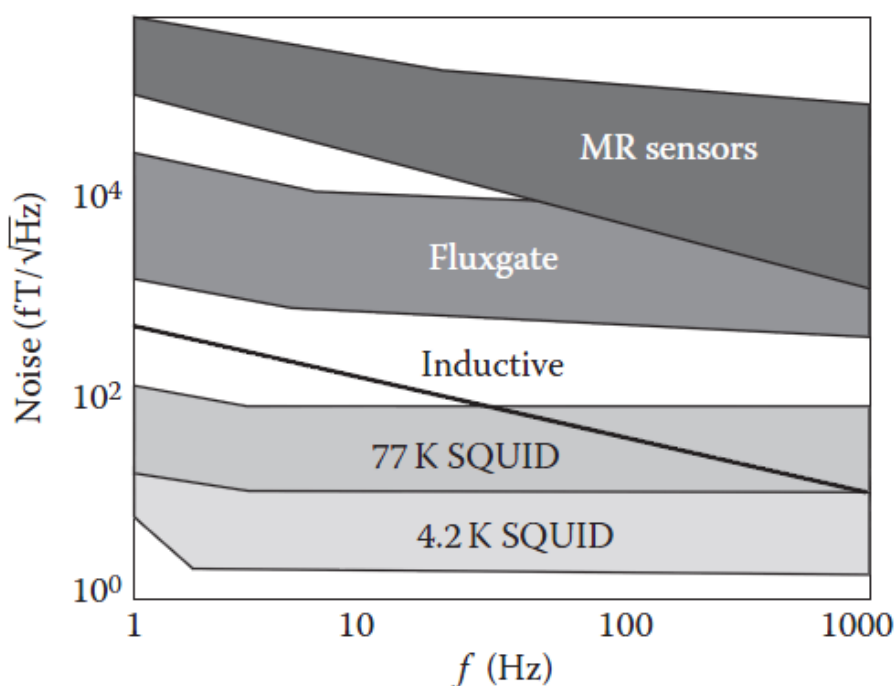
Για πολύ ασθενή μαγνητικά πεδία κυρίως βιομαγνητικά χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες SQUID. Για πεδία λίγο μεγαλύτερα από 0.1nT, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες fluxgate (Tumanski 2001).

Οι αισθητήρες fluxgate είναι πολύ μικρότεροι και μετρούν τη διανυσματική τιμή του μαγνητικού πεδίου (Phan et al 2008). Σε τιμές συγκρίσιμες με το μαγνητικό πεδίο της γης χρησιμοποιούνται κυρίως οι αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης AMR (Anisotropic Magneto-Resistance) και οι αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης GMR (Ripka et al 2009). Ισχυρότερα μαγνητικά πεδία μετρώνται σχεδόν αποκλειστικά με αισθητήρες Hall (Tumanski 2011). Τέλος, τα επαγωγικά πηνία ή επαγωγικοί αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ πεδίο τιμών από μερικά pT μέχρι και πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία. Οι επαγωγικοί αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων πολλών GHz (Tumanski et al 2001), αλλά το σήμα τους προκύπτει από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής μέσα από αυτά. Επιπλέον, το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων πηνίου περιορίζεται από το φαινόμενο του συντονισμού (resonance). Ο επαγωγικός αισθητήρας μετράει μόνο εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία (Tumanski 1986) και δεν μπορεί να μετρήσει τη μαγνητική επαγωγή  $B$  καθεαυτή αλλά μόνο τη χρονική της

παράγωγο  $\text{dB/dt}$ . Συνήθως, οι επαγωγικοί αισθητήρες (πηνία) λειτουργούν σε εύρος συχνοτήτων πάνω από 10Hz καθώς και για χρήση μεγαλύτερων συχνοτήτων.

Εν γένει, τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που είναι πολύ σημαντικά κατά την εφαρμογή τους είναι τα ακόλουθα:

- Επίπεδο θορύβου και ευαισθησία (sensitivity).
- Χωρική διακριτική ικανότητα (spatial resolution).
- Γραμμικότητα.
- Εύρος συχνοτήτων.
- Θερμοκρασιακή σταθερότητα.



Εικόνα 2.2. Ανάλυση του επίπεδου θορύβου για διάφορους αισθητήρες (Tumanski 2011).

Η Εικ.2.2 απεικονίζει το επίπεδο του θορύβου για τους πιο διαδεδομένους αισθητήρες.

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των πιο διαδεδομένων τύπων μαγνητικών αισθητήρων:

### 2.1. Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης

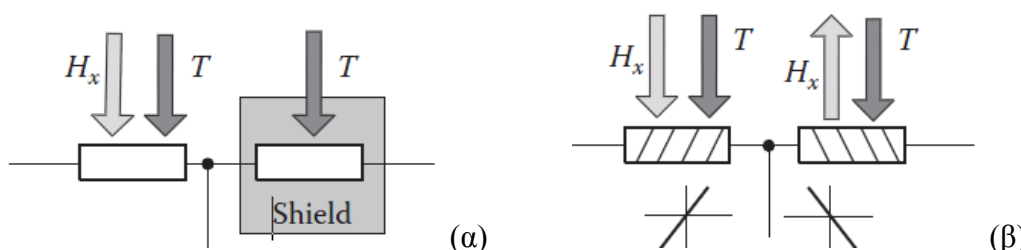
Το φαινόμενο μαγνητοαντίστασης (MR) υπάρχει σε όλα τα μέταλλα και αφορά την αλλαγή της αντίστασης που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο. Αυτό ανιχνεύεται μόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και σε υψηλά μαγνητικά πεδία. Υπάρχουν όμως κάποια υλικά στα οποία το φαινόμενο είναι έντονο ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου. Τέτοια υλικά είναι τα σιδηρομαγνητικά, οι ημιαγωγοί και μερικά ορυκτά όπως βισμούθιο, ή λανθάνιο με οξείδια. Επίσης το φαινόμενο μπορεί να είναι έντονο και σε μερικές τεχνητές πολυστρωματικές (multilayered) δομές.

Οι αισθητήρες αυτοί έχουν πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών. Έχουν απλό σχέδιο και μπορούν να κατασκευαστούν σε προσιτή τιμή (Fontana 1995). Οι αισθητήρες

μαγνητοαντίστασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στους αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) και στους αισθητήρες γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR). Οι AMR έχουν καλύτερη ευαισθησία και πιο απλή τεχνολογία σε σχέση με τους GMR. Και οι δύο αισθητήρες έχουν τα δικά τους ξεχωριστά χαρακτηριστικά και λειτουργούν συμπληρωματικά ο ένας σε σχέση με τον άλλο (Hebbert et al 1966, Popovic et al 2002, Heremans 1993, Eijkel et al 1990).

Για εύρος πεδίου πάνω από 1nT χρησιμοποιούνται αισθητήρες AMR (O’Barr et al 1996, McGuire et al 1975, Daughton 1999). Οι αισθητήρες GMR χρειάζονται μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο σε σχέση με τους αισθητήρες AMR (Fert et al 1995, Riedling 1999). Για τη μέτρηση μεγάλων μαγνητικών πεδίων (1Tesla ή μεγαλύτερο) χρησιμοποιούμε αισθητήρες Hall. Για την ανίχνευση μικρών μαγνητικών πεδίων είναι πιο κατάλληλοι οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (Tumanski 2001).

Γενικά, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης (ανισοτροπικής AMR και γιγαντιαίας GMR) επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Ένα ακόμη συγκριτικό πλεονέκτημα των αισθητήρων αυτών σε σχέση με άλλους είναι το μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Επιπλέον, μπορεί να μετρηθεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας, όπως η επιτυχής μέτρηση που έγινε σε μαγνητικό πεδίο με συχνότητα 300MHz (Hebbert et al 1966). Τυπικό εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων αυτών είναι από 0-1MHz. Σε σύγκριση με τους επαγωγικούς αισθητήρες, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης είναι η απευθείας μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής B ενώ οι επαγωγικοί αισθητήρες μετράνε την παράγωγο dB/dt (Wallash et al 2000). Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση τους είναι το σφάλμα μη γραμμικότητας, η θερμοκρασιακή μετατόπιση (thermal drift) και ο θόρυβος, τα οποία όμως μπορούν να ξεπεραστούν με την εφαρμογή μαγνητικής ανάδρασης (Niet et al 1979). Το πρόβλημα της θερμοκρασιακής μετατόπισης είναι πιο έντονο στην περίπτωση των αισθητήρων γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης, διότι εκεί οι αλλαγές της αντίστασης που προέρχονται από το μαγνητικό πεδίο δεν μπορούν να διαχωριστούν με ευκολία από τις αλλαγές της αντίστασης από τη θερμοκρασία (Parkin 1994). Ο πιο εύκολος τρόπος για την αντιστάθμιση της θερμοκρασιακής μετατόπισης είναι ένα κύκλωμα γέφυρας.



Εικόνα 2.3. Επίδραση της θερμοκρασίας στον (α) αισθητήρα GMR και (β) αισθητήρα AMR (Tumanski 2011).

Η Εικ.2.3 (α) και (β) δείχνει πώς επηρεάζονται ένας αισθητήρας γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης (GMR) και ένας αισθητήρας ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR), αντίστοιχα. Στην Εικ.2.3α φαίνεται ότι και οι δυο αισθητήρες επηρεάζονται από την ίδια θερμοκρασία αλλά μόνο ο ένας επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο καθώς ο δεύτερος είναι θωρακισμένος. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των αισθητήρων γιγαντιαίας μαγνητοαντίστασης σε σχέση με τους αισθητήρες ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης (AMR) είναι ό,τι απαιτούν μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι απαραίτητο για την αλλαγή της αντίστασης (Ripka et al 2010, Bernieri et al 2013).

Σε σύγκριση με τους άλλους αισθητήρες, οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης προσφέρουν πολύ ανταγωνιστικές συμπεριφορές (Gordon et al 1972, Lenz 1990, Porovic 1996). Πρωτίστως, μπορούν να σχεδιαστούν πολύ μικροί αισθητήρες διατηρώντας πολύ καλή ευαισθησία (πολύ καλό σήμα εξόδου) (Thompson 2001, Shelledy et al 1975).

Εξαιτίας των πολύ μικρών διαστάσεων των αισθητήρων μπορούν να εντοπίσουν μαγνητικά πεδία με εξαιρετικά πολύ μικρή διακριτική ικανότητα. (O’Barr et al 1996, Yamamoto et al 1969, Indeck et al 1988).

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης υπερτερούν στα ακόλουθα:

- Μικρές διαστάσεις.
- Υψηλή αξιοπιστία και απλότητα, χαμηλό κόστος.
- Εξαιρετικά μεγάλο εύρος συχνότητας συμπεριλαμβανομένου και πεδίου συνεχούς ρεύματος.
- Το σήμα εξόδου είναι ανάλογο με την τιμή του H.

## 2.2.Αισθητήρες τύπου Fluxgate

Ο αισθητήρας fluxgate είναι γνωστός από το 1936 (Aschennbrenner et al 1936) αλλά χρησιμοποιείται ακόμη λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του. Το εύρος μέτρησης του κυμαίνεται από 10pT έως και 1mT. Η ευαισθησία του αισθητήρα fluxgate εξαρτάται από:

- Τον αριθμό των σπειρών του πηνίου.
- Τη συχνότητα διέγερσης του μαγνητικού πεδίου.
- Το μήκος του πυρήνα.

Ένας τυπικός αισθητήρας fluxgate (Forster 1955) έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: Αποτελείται από πηνία με αριθμό στροφών  $n_1=n_2=1000$ , συχνότητα  $f=3\text{kHz}$ , μήκος  $l=2\times 60\text{mm}$ , εμβαδό  $A=3\times 0.1\text{mm}^2$  και η ευαισθησία του ξεπερνά τα  $10\mu\text{V/nT}$ . Παρόμοιες τυπικές τιμές ευαισθησίας (μεταξύ 3 και  $20\mu\text{V/nT}$ ) καταγράφονται και από άλλους συγγραφείς (Moldovanu et al 1997).

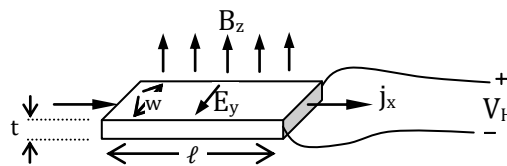
Η διακριτική ικανότητα του μαγνητικού αισθητήρα fluxgate επηρεάζεται έντονα από το μαγνητικό θόρυβο (Barkhausen noise) (Zurek et al 2009). Αυτός είναι και ο λόγος που η ποιότητα του πυρήνα του μετάλλου είναι πολύ σημαντική και θα πρέπει να πληροί τα ακόλουθα: μεγάλη διαπερατότητα, μικρή υστέρηση, μικρή αλλαγή μαγνήτισης, μικρός μαγνητικός θόρυβος, υψηλή αντίσταση ή χαμηλές απώλειες δινορρευμάτων και υψηλή θερμοκρασία (Gordon et al 1972, Primdahl 1979, Ripka 1992).

Επίσης, οι αισθητήρες fluxgate χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ασθενών πεδίων (κάτω από 10mT) (Ripka 1992, Tumanski 1986). Στην πραγματικότητα οι αισθητήρες fluxgate μπορούν να υπολογίσουν μαγνητικά πεδία εύρους 100nT–100T με ευαισθησία περίπου  $10\text{V/nT}$  (Pavel 2000, Butta 2012). Το σήμα εξόδου των αισθητήρων fluxgate είναι εναλλασσόμενο όταν μετράται το άμεσο μαγνητικό πεδίο (Pavel 2003).

Επιπλέον, είναι εύκολο να διαχωρίσουμε το σήμα της χαμηλής συχνότητας εάν το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι σε πολύ μεγαλύτερη συχνότητα διότι η χαμηλή συχνότητα του μαγνητικού πεδίου προκαλεί διαμόρφωση στην υψηλή συχνότητα του σήματος εξόδου (Ripka 1992).

### 2.3. Αισθητήρες Hall

Ο αισθητήρας Hall ανακαλύφθηκε από τον Edwin Hall (1879). Βασίζεται στο φαινόμενο της ανάπτυξης ενός ηλεκτρικού πεδίου (πεδίο Hall) μεταξύ των δύο πλευρών ενός αγωγού στη διεύθυνση  $\vec{j} \times \vec{B}$ , όταν ένα ρεύμα  $\vec{j}$  ρέει στον αγωγό κατά μήκος ενός μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  (Εικ.2.4).



Εικόνα 2.4. Φαινόμενο Hall.

Η ένταση του πεδίου Hall δίνεται από τη σχέση

$$E_y = R_H j_x B_z \dots \dots \dots (1)$$

όπου ο συντελεστής  $R_H$  ονομάζεται συντελεστής Hall και στην προσέγγιση των ελευθέρων ηλεκτρονίων ενός ιδανικού μετάλλου (Kittel 1986), δίνεται από τη σχέση

$$R_H = -\frac{1}{ne} \dots \dots \dots (2)$$

δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων  $n$  του μετάλλου τόσο ισχυρότερο είναι το φαινόμενο Hall.

Υποθέτοντας  $w$  τη διάσταση του αισθητήρα κατά μήκος του πεδίου Hall και  $t$  το πάχος του (οπότε η πυκνότητα ρεύματος  $j_x = I/wt$ ), η τάση Hall που αναπτύσσεται στα άκρα του αισθητήρα δίνεται από τη σχέση

$$V_H = E_y w = R_H j_x w B_z = \left(\frac{R_H}{t} I\right) B_z \dots \dots \dots (3)$$

δηλαδή, για δεδομένη τιμή του ρεύματος  $I$  πόλωσης, η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall είναι ανάλογη προς τη  $z$  (κάθετη) συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αισθητήρων Hall. Η πρώτη κατηγορία είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση μαγνητικού πεδίου, οι οποίοι είναι πολύ οικονομικοί και το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το μεγάλο σήμα εξόδου. Η δεύτερη κατηγορία των αισθητήρων είναι οι αισθητήρες-μετρητές Hall, οι οποίοι έχουν εξαιρετική συμπεριφορά, όπως γραμμικότητα, μικρό σφάλμα λόγω θερμοκρασίας και μικρά επίπεδα θορύβου αλλά κοστίζουν ακριβά.

Η ευαισθησία των αισθητήρων Hall εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων όπως το υλικό του αισθητήρα και οι γεωμετρικές του διαστάσεις (Mittleman 1997). Το σήμα εξόδου των αισθητήρων εξαρτάται από το σήμα εισόδου του μαγνητικού πεδίου και από το σήμα του ρεύματος. Η διακριτική ικανότητα των αισθητήρων Hall είναι του επιπέδου μερικών mT. Επιπλέον, η συμπεριφορά τους επηρεάζεται από τη

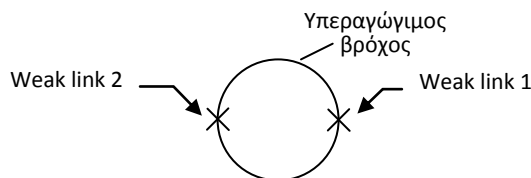


γραμμικότητα τους, με όριο που καθορίζει το λάθος μη γραμμικότητας να είναι πολύ μικρό της τάξεως του 0.1T (Poronic 2004). Ένας περιορισμός στην εφαρμογή των αισθητήρων Hall είναι η επίδραση της θερμοκρασίας λόγω αλλαγής της αντίστασης και μπορεί να εξαλειφθεί εάν χρησιμοποιηθεί μια συνεχής τάση για την πόλωση.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των αισθητήρων Hall είναι οι μικρές τους διαστάσεις, τα ισχυρά σήματα εξόδου, η γραμμικότητα, οι καλές ιδιότητες σε σχέση με τη συχνότητα καθώς και η άμεση εξάρτηση από την τιμή του μαγνητικού πεδίου (Poronic 2004). Οι αισθητήρες Hall έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας όσον αφορά τη συχνότητα από μερικά dc έως και GHz και το σήμα εξόδου τους εξαρτάται από την τιμή του μαγνητικού πεδίου. Το μειονέκτημα του αισθητήρα Hall είναι η μικρή του ευαισθησία, η οποία στην καλύτερη περίπτωση για τον αισθητήρα InSb είναι 10V/T. Επιπλέον, το τυπικό εύρος μαγνητικού πεδίου για τον αισθητήρα αυτό είναι 1-50mT. (Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα Hall που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται στο Κεφ.7.)

## 2.4.Αισθητήρας dc SQUID

Το μαγνητόμετρο SQUID είναι η διάταξη με τη μέγιστη ευαισθησία στη μέτρηση μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν δύο τύποι SQUID, το dc και το ac SQUID. Η λειτουργία του μαγνητομέτρου SQUID βασίζεται στα δύο υπεραγωγία φαινόμενα: το φαινόμενο της κβάντωσης της μαγνητικής ροής μέσα από έναν υπεραγωγίμο βρόχο και το φαινόμενο Josephson (Ford et al 2005). Το dc SQUID, ο συνηθέστερος και πλέον ευαίσθητος τύπος αισθητήρα, είναι ένας βρόχος από υπεραγωγίμο υλικό που διακόπτεται από δύο πολύ λεπτά μονωτικά στρώματα γνωστά ως επαφές Josephson ή ασθενείς συνδέσεις “weak links” (Εικ.2.5) (Josephson 1974).



Εικόνα 2.5. Σχηματικό διάγραμμα ενός dc SQUID.

### 2.4.1.Η κβάντωση της μαγνητικής ροής σε έναν υπεραγωγίμο βρόχο

Η ολική μαγνητική ροή, που διέρχεται μέσα από έναν υπεραγωγίμο δακτύλιο (βρόχο), παίρνει μόνο κβαντισμένες τιμές, ακέραια πολλαπλάσια του κβάντου μαγνητικής ροής

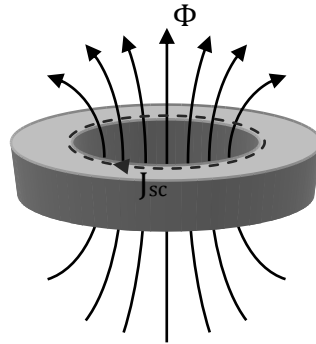
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}$$

όπου, h και e φυσικές σταθερές: h = 6.62 × 10<sup>-34</sup> J·s η σταθερά του Planck και e = 1.60 × 10<sup>-19</sup> C το φορτίο του ηλεκτρονίου. Επομένως, η μονάδα της μαγνητικής ροής έχει την τιμή

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \cong 2.07 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2 \text{ (Wb)}$$

και ονομάζεται και fluxoid.

Η μαγνητική ροή  $\Phi$  μέσα από το βρόχο είναι το άθροισμα της εξωτερικής μαγνητικής ροής,  $\Phi_{\text{ext}}$ , δηλαδή της μαγνητικής ροής από εξωτερικές πηγές και της ροής  $\Phi_{\text{sc}}$  από τα υπεραγώγιμα ρεύματα  $J_{\text{sc}}$  που ρέουν στην επιφάνεια του βρόχου:  $\Phi = \Phi_{\text{ext}} + \Phi_{\text{sc}}$ . Τα υπεραγώγιμα ρεύματα  $J_{\text{sc}}$  ρέουν στην επιφάνεια του βρόχου προκειμένου να θωρακίσουν το εσωτερικό του και να αποτρέψουν την είσοδο του εξωτερικού πεδίου μέσα στον υπεραγωγό (φαινόμενο Meissner των υπεραγωγών) (Falicov 1989).

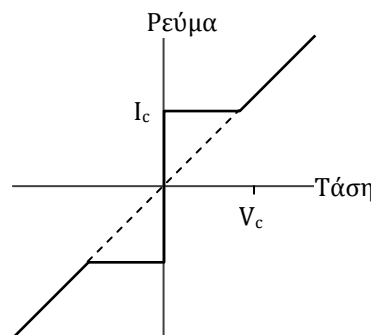


Εικόνα 2.6. Η μαγνητική ροή μέσα στο βρόχο.

Η ολική ροή  $\Phi$  είναι κβαντισμένη. Δεν υπάρχει καμία συνθήκη κβάντωσης της εξωτερικής μαγνητικής ροής στη φύση. Η κβάντωση της ολικής ροής  $\Phi$  μέσα από τον υπεραγώγιμο βρόχο λαμβάνει χώρα καθώς η τιμή των υπεραγώγιμων ρευμάτων  $J_{\text{sc}}$  προσαρμόζεται πάντα στην εξωτερική ροή  $\Phi_{\text{ext}}$  ώστε  $\Phi = \Phi_{\text{ext}} + \Phi_{\text{sc}} = n\Phi_0$ , όπου  $n = \text{ακέραιος}$ .

#### 2.4.2. Το φαινόμενο Josephson

Το φαινόμενο Josephson περιγράφει τη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης μιας ασθενούς επαφής (επαφής Josephson) (Εικ.2.7). Ένα dc ρεύμα διαρρέει μια ασθενή επαφή υπό μηδενική τάση που μπορεί να φτάσει ως μια μέγιστη κρίσιμη τιμή  $I_c$  (dc φαινόμενο Josephson). Για τιμές του ρεύματος πόλωσης της επαφής  $I > I_c$ , η επαφή παρουσιάζει μια πεπερασμένη αντίσταση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας τάσης  $V > V_c$  στα άκρα της, ενώ το ρεύμα έχει μια αρμονική συνιστώσα με συχνότητα  $f = (2e/h)V = V/\Phi_0$  (ac φαινόμενο Josephson).



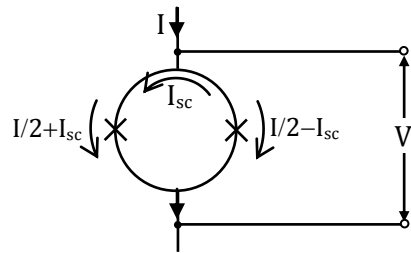
Εικόνα 2.7. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης μιας επαφής Josephson (Kittel, 1986).

Στη συνέχεια, δίνεται μια απλοποιημένη περιγραφή της λειτουργίας του SQUID ως μετατροπέα της μαγνητικής ροής σε τάση. Στην περιγραφή αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι οι δύο επαφές είναι πανομοιότυπες και τοποθετημένες συμμετρικά στο βρόχο. Στην απουσία οιασδήποτε μαγνητικής ροής μέσα από το βρόχο ή με  $\Phi = n\Phi_0$ , δεν υπάρχει υπεραγώγιμο ρεύμα στο βρόχο ( $I_{\text{sc}} = 0$ ) και το ρεύμα πόλωσης  $I$  διαιρείται σε

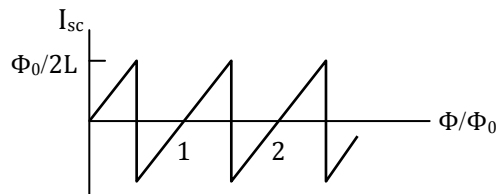
δύο ίσα μέρη  $I/2$  μεταξύ των δύο επαφών (Εικ. 2.8α). Το μετρούμενο κρίσιμο ρεύμα πόλωσης είναι  $2I_c$ , όπου  $I_c$  το κρίσιμο ρεύμα κάθε επαφής (Simon et al 2004).

Στην περίπτωση που εφαρμοστεί μια εξωτερική μαγνητική ροή  $\Phi_{ext}$ , ένα πεπερασμένο υπεραγώγιμο ρεύμα  $I_{sc}$  θα αναπτυχθεί στο βρόχο έτσι ώστε η ολική ροή  $\Phi = \Phi_{ext} + \Phi_{sc}$  να είναι κβαντισμένη ( $\Phi = n\Phi_0$ ). Η τιμή του υπεραγώγιμου ρεύματος θα είναι  $I_{sc} = \Phi_{sc}/L$ , όπου  $L$  η αυτεπαγωγή του βρόχου. Το υπεραγώγιμο ρεύμα προστίθεται στο ρεύμα πόλωσης  $I/2$  που διαρρέει τη μία επαφή και αφαιρείται από το ρεύμα πόλωσης που διαρρέει την άλλη (Εικ.2.8β). Σαν αποτέλεσμα, το ρεύμα που διαρρέει τη μια επαφή φτάνει στην κρίσιμη τιμή όταν  $I/2 + I_{sc} = I_c$  την ίδια στιγμή που στην άλλη επαφή είναι  $I_c - 2I_{sc}$ . Επομένως, σε εξωτερική μαγνητική ροή  $\Phi_{ext} \neq n\Phi_0$  το SQUID παράγει τάση εξόδου όταν το ρεύμα πόλωσης είναι  $I = 2I_c - 2I_{sc} = 2I_c - 2\Phi_{sc}/L$ .

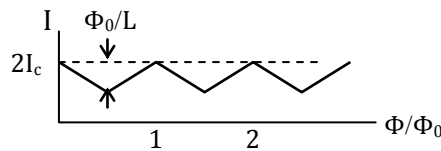
Καθώς η εξωτερική ροή αυξάνεται κατά  $\Phi_0/2$  (στη τιμή  $n\Phi_0 + \Phi_0/2$ ), το ρεύμα στο βρόχο γίνεται μέγιστο,  $I_{sc} = \Phi_0/2L$  και το ρεύμα πόλωσης παίρνει τη μικρότερη τιμή του,  $2I_c - \Phi_0/L$  (Εικ.2.8γ). Καθώς η μαγνητική ροή αυξάνεται πέραν του  $\Phi_0/2$ , το SQUID μεταβαίνει απότομα από την κατάσταση  $n$  στην  $n+1$  και το υπεραγώγιμο ρεύμα  $I_{sc}$  αλλάζει πρόσημο. Τέλος, για ροή  $\Phi_0$ , το  $I_{sc}$  μηδενίζεται και το ρεύμα πόλωσης επανέρχεται στην μέγιστη τιμή του  $I = 2I_c$ .



(α)



(β)



(γ)

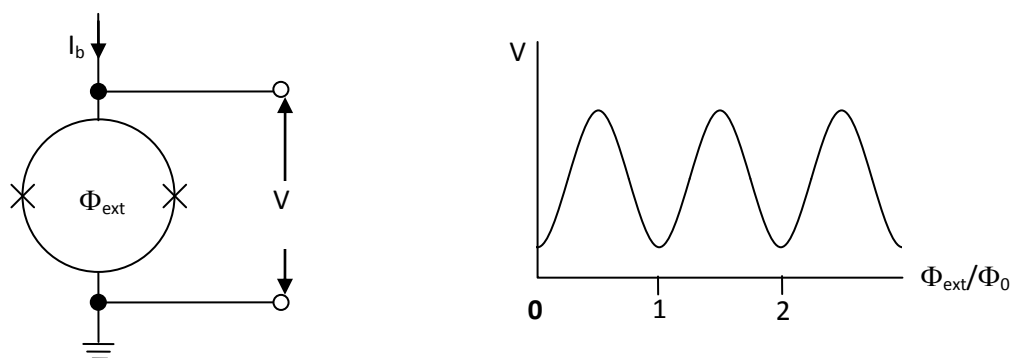
Εικόνα 2.8. Απλοποιημένο μοντέλο του dc SQUID (Clarke 1996).

Οι αισθητήρες SQUID για να γίνουν υπεραγώγιμοι χρειάζεται να ψυχθούν. Υπάρχουν δύο είδη αισθητήρων SQUID, οι χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Οι αισθητήρες χαμηλής θερμοκρασίας SQUID (Low Tc SQUID) κατασκευάζονται από νιόβιο, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά σαν υπεραγώγιμο υλικό. Τα μαγνητόμετρα υψηλής θερμοκρασίας SQUID είναι κατασκευασμένα από λεπτά υμένα  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

(YBCO) και σε αντίθεση από τα χαμηλής θερμοκρασίας SQUID που λειτουργούν σε συνθήκες θερμοκρασίας υγρού ηλίου (4.2K), αυτά λειτουργούν σε συνθήκες θερμοκρασίας υγρού αζώτου (77K) (Drung 2003). Επιπλέον, η χρήση του υγρού He (χαμηλής θερμοκρασίας SQUID) περιόριζε αρκετά τις εφαρμογές τους καθώς τα υψηλής θερμοκρασίας SQUID που χρησιμοποιούν υγρό άζωτο είναι πιο οικονομικά και συγχρόνως το υγρό άζωτο είναι πιο εύκολα προσβάσιμο (Koelle et al 1999).

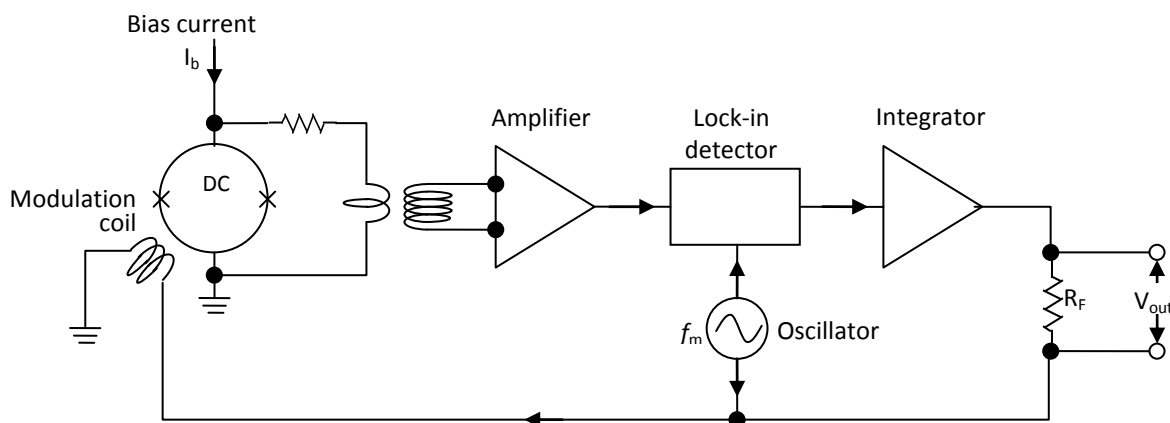
Τα δοχεία που περιέχουν τα κρυοστατικά υγρά ονομάζονται dewars (κρυοστάτες), και είναι θερμικά μονωμένα με μια επένδυση κενού αέρος που παρέχει προσεκτικά σχεδιασμένη θωράκιση από ακτινοβολίες και σήματα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται ο θόρυβος και επίσης προφυλάσσεται το μαγνητόμετρο από σήματα χαμηλής συχνότητας (Kreutzbruck et al 1999). Το fiberglass και παρόμοια πλαστικά έχουν αποδειχτεί ιδανικά υλικά για την κατασκευή κρυοστατών λόγω της φυσικής αντοχής τους και της χαμηλής τους περιεκτικότητας σε παραμαγνητικές ουσίες.

Στην Εικ.2.9 δείχνεται μεταβολή της τάσης εξόδου του SQUID σε σχέση με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής  $\Phi_{ext}$  από εξωτερικές πηγές. Επομένως, το SQUID μετατρέπει τη μαγνητική ροή σε dc τάση και επομένως είναι ένας μη γραμμικός μετατροπέας ροής τάσης πάρα πολύ μεγάλης ευαισθησίας αφού ανιχνεύει μαγνητικά πεδία τάξης  $10^{-15}T$  (1fT) (Gutt et al 1993).

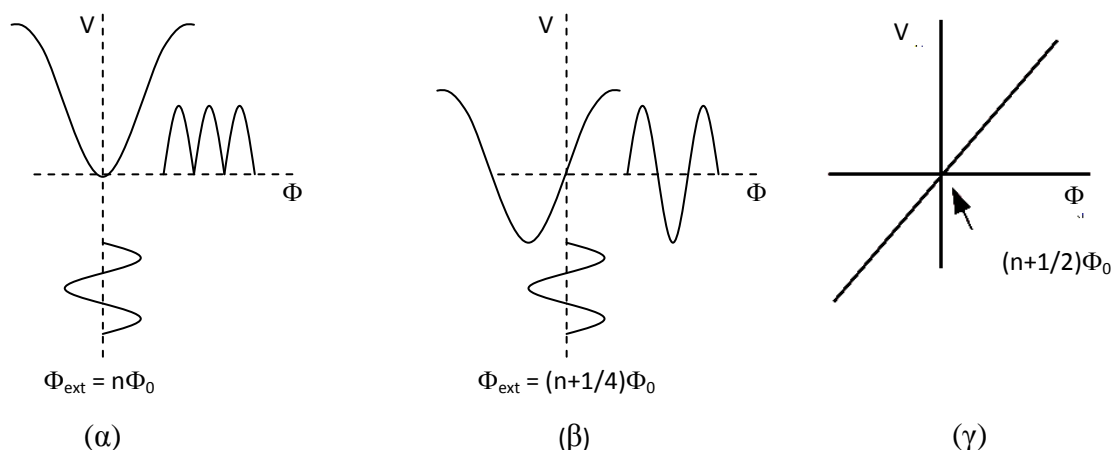


Εικόνα 2.9. Ένα dc SQUID, η σχέση της τάσης εξόδου του  $V$  και της μαγνητικής ροής (Braginski et al 2004).

Όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικ.2.9, η έξοδος του SQUID, αν και υψηλής ευαισθησίας μαγνητικός αισθητήρας, δεν είναι γραμμική αλλά περιοδική συνάρτηση της μετρούμενης εξωτερικής μαγνητικής ροής. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές όμως αυτό αποτελεί μειονέκτημα. Για να γίνει γραμμική η μορφή της τάσης εξόδου, το SQUID χρησιμοποιείται σε έναν βρόχο κλειδωμένης ροής (FLL - Flux Locked Loop) και το ρεύμα εξόδου χρησιμοποιείται σαν ανάδραση (Gershenson 1997, Drung 1997, Burmistrov 2009) (Εικ.2.10). Ο βρόχος FLL υλοποιείται με την προσαρμογή στο SQUID ενός πηνίου διαμόρφωσης (modulation coil) το οποίο τροφοδοτείται μέσω ενός ταλαντωτή (oscillator) ο οποίος τροφοδοτεί το πηνίο με ρεύμα τέτοιου πλάτους ώστε η επαγόμενη ροή στο SQUID να έχει πλάτος  $\Phi_0/4$  ( $\Phi_0/2$  peak-to-peak). Η συχνότητα ταλάντωσης  $f_m$  του ταλαντωτή είναι μεταξύ 100 και 500 kHz.



Εικόνα.2.10. Σχηματικό διάγραμμα του βρόχου κλειδωμένης ροής (FLL) (Braginski et al 2004).



Εικόνα.2.11. Σχηματικό διάγραμμα της ροής διέγερσης που απεικονίζει την τάση μέσα στο dc SQUID (α) για  $\Phi_{\text{ext}}=n\Phi_0$ , (β)  $\Phi_{\text{ext}}=(n+1/4)\Phi_0$  και (γ) η τάση εξόδου από το Lock-in σε σχέση με το  $\Phi_{\text{ext}}$  (Braginski et al 2004).

Όταν η εξωτερική μαγνητική ροή  $\Phi_{\text{ext}}$  στο μέσα από το SQUID είναι μηδενική (ή  $n\Phi_0$ ), η τάση εξόδου είναι ανορθωμένη μορφή της ημιτονοειδούς ροής του πηνίου διαμόρφωσης με συχνότητα  $2f_m$ , όπως φαίνεται στην Εικ.2.11. Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση εξόδου από το φίλτρο του Lock-in είναι μηδενική (σημειώνεται ότι ο Lock-in επιτρέπει να περάσουν τα σήματα των οποίων οι συχνότητες συμπίπτουν με τη συχνότητα αναφοράς) (Koch et al 1994). Όταν η μαγνητική ροή είναι  $(n+1/4)\Phi_0$ , η έξοδος του Lock-in είναι μέγιστη. Η dc έξοδος του Lock-in οδηγείται σε έναν ολοκληρωτή (integrator) και μέσω μίας αντίστασης ανάδρασης  $R_F$  (στην περίπτωση μας οι τιμές της αντίστασης είναι  $1\text{k}\Omega$ ,  $10\text{k}\Omega$ ,  $100\text{k}\Omega$  και  $1\text{M}\Omega$ ) τροφοδοτεί το πηνίο διέγερσης. Η περιέλιξη του πηνίου διέγερσης είναι τέτοια ώστε η το dc ρεύμα από ανάδρασης από την  $R_F$  να προκαλεί μια dc ροή στο SQUID φοράς  $-1/4\Phi_0$ , ώστε να αντισταθμίζει την αύξηση  $1/4\Phi_0$  της εξωτερικής μαγνητικής ροής. Με αυτόν τον τρόπο, το SQUID λειτουργεί πάντα στην περιοχή της καμπύλης  $V-\Phi$  με τη μέγιστη κλίση. Έτσι, το SQUID είναι ένας πολύ ευαίσθητος αισθητήρας

μαγνητικού πεδίου καθώς παράγει μια σχετικά μεγάλη τάση εξόδου για πολύ μικρές μεταβολές της μαγνητικής ροής (της τάξης των υποπολλαπλασίων του  $\Phi_0$ ).

Η τυπική έξοδος ενός dc μαγνητομέτρου SQUID είναι πολύ μικρή και συνήθως δεν ξεπερνάει τα  $100\mu\text{V}/\Phi_0$  παρόλο που αναφέρεται ευαισθησία μεγαλύτερη από  $300\mu\text{V}/\Phi_0$  (Drung et al 1990). Το επίπεδο θορύβου είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζει τη συμπεριφορά του SQUID. Επιπλέον, τα μαγνητόμετρα SQUID είναι απαραίτητα εργαλεία για τη μέτρηση μαγνητικού πεδίου σε εύρος από fT σε pT με τυπική ανάλυση περίπου 5fT. Αυτή η συμπεριφορά επιτυγχάνεται με τη χρήση χαμηλής θερμοκρασίας SQUID (LowTc rf/dc SQUID). Η συμπεριφορά του αισθητήρα είναι δέκα φορές χειρότερη στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας SQUID (HighTc dc/rf SQUID) με την ευαισθησία να είναι περίπου από  $100\mu\text{V}/\Phi_0$  και απαιτείται υψηλής ποιότητας προ-ενισχυτής (Keene et al 1993, Drung et al 2004). Το εύρος από 1-10fT μπορεί να μετρηθεί με τη χρήση χαμηλής θερμοκρασίας (4.2K) SQUID. Σε εύρος από 10fT έως και 1pT χρησιμοποιείται συνήθως ο αισθητήρας υψηλής θερμοκρασίας (77K) SQUID (Tumanski 2001).

## 2.5.Βιβλιογραφικές αναφορές

Aschennbrener H. and Goubau G., “Eine Anordnung zur Registrierung Rascher Magnetischer Storungen”, Hochfrequenz-Technik U. Electroakustik, vol.47, pp.177-181, 1936.

Clarke J., “SQUID Fundamentals in “SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications”, H. Weinstock editor, NATO ASI Series, 1996.

Bernieri A., Betta G., Ferrigno L. and Laracca M. “Improving Performance of GMR Sensors”, IEEE Sensors Journal, vol.13, iss.11, pp.4513-4521, 2013.

Boll R. and Overshott K.J., “Sensors:Magnetic Sensors”, Wiley-VCH,vol.5, 1989.

Braginski A.I. and Clarke J., “SQUID Handbook, Fundamentals and Technology of SQUIDS”, Wiley-VCH, vol.I, pp.9-12, 2004.

Burmistrov V.E., Slobodchikov Y., Khanin V.V., Maslennikov Y.V., and Snigirev O.V., “DC SQUID Modulation Electronics for Operation With HTS DC SQUID Magnetometers in the Unshielded Environment”, IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol.19, no.3, 2009.

Butta M., “Magnetic Sensors-Principles and Applications”, Ch.4: Orthogonal Fluxgates, K. Kuang (Ed), Intech, pp.29-40, 2012.

Daughton J.M., “GMR Applications”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.192, pp.334-342, 1999.

Drung D. and Muck M., “The SQUID Handbook, Fundamentals and Technology of SQUIDS”, Ch.4: SQUID Electronics, J. Clarke and A.I. Braginski (Eds), Wiley-VCH, vol.I, pp.127-165, 2004.

Drung D., “High-TC and Low-TC Dc SQUID Electronics,” Superconductor Science and Technology, vol.16, pp. 1320–1336, 2003.

Drung D., “Improved DC SQUID Read Out Electronics with Low 1/f noise Preamplifier”, IEEE Review of Scientific Instruments, vol.68, pp.4066-4076, 1997.

Drung D., Cantor R., Peters M., Scheer H.J. and Koch H., “Low Noise High Speed DC Superconducting Quantum Interference Device Magnetometer with Simplified Feedback Electronics”, Applied Physics Letters, vol.57, pp.406-408, 1990.

Eijkel K.J.M. and Fluitman J.H.J., “Optimization of the Response of Magnetoresistive Elements”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.26, pp.311-321, 1990.

Falicov M.L., “Superconductivity: a Brief Introduction to its Phenomenology and Theories”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.25, iss.11, pp.2358-25364, 1989.

- Fert A., Grunberg P., Barthelem A., Petroff F. and Zinn W., "Layered Magnetic Structures Interlayer Exchange Coupling and Giant Magnetoresistance", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol.140-144, pp.1-8, 1995.
- Fontana R.E., "Process Complexity of Magnetoresistive Sensors-A Review", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.31, pp.2579-2583, 1995.
- Ford P.J. and Saunders G.A., "The Rise of Superconductors", CRC Press, 2005.
- Forster F., "Ein Verfahren zur Messung von Magnetischen Gleichfeldern", *Zeitschr Metallkunde*, vol. 46, pp.358-370, 1955.
- Gershenson M., "Performance Analysis Of Modified Flux-Locked-Loop Additional Positive Feedback SQUID", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.7, iss. 1 pp.23-26, 1997.
- Gordon D., Brown R.E. and Haben J.F., "Methods for Measuring Magnetic Fields", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.8, iss.1, pp.48-51, 1972.
- Gordon D. and Brown R.E., "Recent Advances in Fluxgate Magnetometry", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.8, pp.76-82, 1972.
- Gutt G.M., Kasdin N.J., Condron M.R., Muhlfelder B., Lockhart J.M. and Cromar M.W., "A Method for Simulating a Flux-Locked Dc SQUID", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.3, iss.1, pp.1837-1840, 1993.
- Hall E., "On a New Action of the Magnet on Electric Currents", *American Journal of Mathematics*, vol.2, no.3, pp.287-292, 1879.
- Hebbert R.S. and Schwee L.J., "Thin Film Magnetoresistance Magnetometer", *Review of Scientific Instruments*, vol.37, pp.1321-1323, 1966.
- Heremans J., "Solid State Magnetic Field Sensors and Applications", *Journal of Applied Physics D*, vol.26, pp.1149-1168, 1993.
- Indeck R.S., Judy J.H. and Iwasaki S., "A Magnetoresistive Gradiometer", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.24, iss.6, pp.2617-2619, 1988.
- Josephson B.D., "The Discovery of Tunneling Supercurrents", *Reviews of Modern Physics*, vol.46, pp.251-254, 1974.
- Keene M.N., Goodyear S.W., Satchell J.S., Edwards J.A., Chew N.G. and Humphreys R.G., "Thin Film HTc SQUID Construction and Characterisation", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.3, iss.1, pp.2430-2433, 1993.
- Kittel C., "Introduction to Solid State Physics", 6th ed., Wiley. New York, 1986.



Koch R.H., Foglietti V., Rozen J.R., Stawiasz K.G., Ketchen M.B., Lathrop D.K., Sun J.Z. and Gallagher W.J., "Effects of Radio Frequency Radiation on the Dc SQUID", *Applied Physics Letters*, vol.65, iss.1, pp.100-102, 1994.

Koelle D., Kleiner R., Ludwig F., Dantsker E. and Clarke. J. "High Transition Temperature Superconducting Interference Devices", *Reviews of Modern Physics*, vol.71, iss.1, pp.631-686, 1999.

Kreutzbruck M.V., Theiss A., Muck M. and Heiden C., "Compensation Electronics for Larger Dynamic Range of a SQUID Based Nondestructive Evaluation System", *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, iss.9, pp. 3714-3718, 1999.

Lenz J. and Edelstein S.A., "Magnetic Sensors and Their Applications", *IEEE Sensors Journal*, vol.6, pp.631-649, 2006.

Lenz J., "A Review of Magnetic Sensors", *Proceedings of the IEEE*, vol.78, no.6, pp.973-989, 1990.

McGuire T.R. and Potte R.I., "Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3D Alloys", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.11, pp.1018-1038, 1975.

Mittleman D.M., Cunningham J., Nuss M.C. and Geva M., "Noncontact Semiconductor Wafer Characterization with the Terahertz Hall Effect", *Applied Physics Letters*, vol.71, pp.16-18, 1997.

Moldovanu A., Chiriac H., Macoviciuc M., Diaconu E., Ioan C., Moldovanu E. and Tomut M., "Functional Study of Fluxgate Sensors with Amorphous Magnetic Materials Core", *Sensors and Actuators A:Physical*, vol.A59, pp.105-108, 1997.

Niet E., Vreeken R., "A Magnetoresistive Head with Magnetic Feedback", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.15, iss.6, pp.1625-1627, 1979.

O'Barr R., Lederman M. and Schultz S., "A Scanning Microscope Using A Magnetoresistive Head as the Sensing Element ", *Journal of Applied Physics*, vol.79, pp.8067-8069, 1996.

Parkin S.S.P., "Giant Magnetoresistance in Magnetic Multilayers and Granular Alloys", *Materials Letters*, vol.20, pp.1-4, 1994.

Pavel R., "Advances in Fluxgate Sensors", *Sensors and Actuators A*, vol. 106, pp. 8-14, 2003.

Pavel R., "New Directions in Fluxgate Sensors", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215-216, pp.735-739, 2000.

Phan M.H. and Peng H.X. "Giant Magnetoimpedance Materials: Fundamentals and Applications", *Progress in Materials Science*, vol.53, pp.323-420, 2008.

Popovic R.S., "Hall Effect Devices", IOP Publishing, pp.236-247, 2004.

Popovic R.S., "The Future of Magnetic Sensors", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.A56, pp.39-55, 1996.

Popovic R.S., Drljaca P.M. and Schott C., "Bridging the Gap between AMR, GMR and Hall Magnetic Sensors", *Proc. 23<sup>rd</sup> International Conference on Microelectronics*, Niš Yugoslavia, 2002.

Primdahl F., "The Fluxgate Magnetometer", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol.12, pp.241-253, 1979.

Riedling S., Knorr N., Mathieu C., Jorzick J., Demokritov S.O., Hillebrands B., Schreiber R. and Grunberg P., "Magnetic Ordering and Anisotropies of Atomically Layered Fe/Au (001) Multilayers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol.198-199, pp.348-350, 1999.

Ripka P., "Magnetic Sensors and Magnetometers", Artech House, 2001.

Ripka P., "Review of Fluxgate Sensors and Actuators", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.33, pp.129-141, 1992.

Ripka P., Janosek M. and Butta M., "Crossfield Sensitivity in AMR Sensors", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.45, is.10, pp.4514-4517, 2009.

Ripka P. and Janosek M., "Advances in Magnetic Field Sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol.10, iss.6, pp.1108-1116, 2010.

Shelley F.B. and Nix G., "Magnetoresistive Heads for Magnetic Tape and Disk Recording", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.11, pp.1206-1208, 1975.

Simon R.W., Burns M.J., Colclough M.S. and Cantor R., "Mr SQUID User's Guide", StarCryoelectronics, version 6.2.2, 2004.

Thompson S.M., "Magnetoresistive Heads: Physical Phenomena", *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, pp.5095-5101, 2001.

Tumanski S., "Analysis of Induction Coil Performances in Application for Measurement of Weak Magnetic Field", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol.62, pp.137-141, 1986.

Tumanski S., "Thin Film Magnetoresistive Sensors", IOP Publishing, 2001.

Tumanski S., "A Review of Magnetic Sensors and Applications", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol.80, pp.74-80, 2004.

Tumanski S., "Handbook of Magnetic Measurements", CRC Press, 2011.

Wallash A. and Wang W., "A Study of Diode Protection for Giant Magnetoresistive Recording Heads", *Journal of Electrostatics*, vol.49, pp.257-267, 2000.

Yamamoto S.Y., Vier D.C. and Schultz S., "High Resolution contact recording and Diagnostics with Raster-Scanned MR Head", IEEE Transactions on Magnetics, vol.32, is.5, pp.3410-3412, 1969.

Zurek S., Marketos P., Tumanski S., Patel H.V. and Moses A.J., "Correlation Between Surface Magnetic Field and Barkhausen Noise in Grain Oriented Electrical Steel", Przegląd Elektrotechniczny, vol.85 (1), pp.111-114, 2009.

# ΚΕΦ.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Τα δινορρεύματα είναι μία από τις αναγνωρισμένες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και διασφαλίζουν όπως και οι άλλες μέθοδοι την έγκαιρη ανίχνευση και καθορισμό των ασυνεχειών (Hellier 2013).

## 3.1.Ιστορική αναδρομή

Η παρουσία των δινορρευμάτων ανακαλύφθηκε από τον James Maxwell το 1864, ο οποίος όρισε τις εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Το 1879 ο Hughes χρησιμοποίησε το τηλέφωνο σαν μεταδότη ήχου (το 1876 ο Graham Bell εφηύρε και πατένταρε την πρώτη συσκευή –τηλέφωνο- που μετέδιδε τον ήχο και τη φωνή) για να ανιχνεύσει την ανισορροπία ανάμεσα σε δύο ζευγάρια επαγωγικών πηνίων για τον έλεγχο νομισμάτων (Nondestructive Testing Handbook 1986). Εάν συγκριθούν δύο όμοια νομίσματα χρησιμοποιώντας ένα πηνίο στο κέντρο του κάθε νομίσματος τότε θα υπάρχει πλήρης ισορροπία. Εάν όμως είναι φθαρμένα ή παρουσιάζουν διαφορετική θερμοκρασία γίνεται άμεσα αντιληπτό. Ο Hughes κατάφερε να ελέγξει ένα οποιοδήποτε αγωγίμο υλικό μετρώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική τους διαπερατότητα. Στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ο Hughes χρησιμοποίησε το μέταλλο του χαλκού σαν αναφορά και του έδωσε την τιμή 100 δηλαδή οι τιμές είναι παρόμοιες με αυτές που σήμερα δίνει το Διεθνές Πρότυπο Ανοπτημένου Χαλκού (International Annealed Copper Standard). Επιπλέον έκανε τις καμπύλες κραμάτων δείχνοντας τα αποτελέσματα από τα διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας (ασήμι-χρυσό, χαλκός κασσίτερος, κ.α.). Τέλος, όρισε τις βασικές αρχές ελέγχου και ροής των δινορρευμάτων και του ελέγχου μαγνητικής επαγωγής με τον τρόπο που τα χρησιμοποιούμε μέχρι και σήμερα.

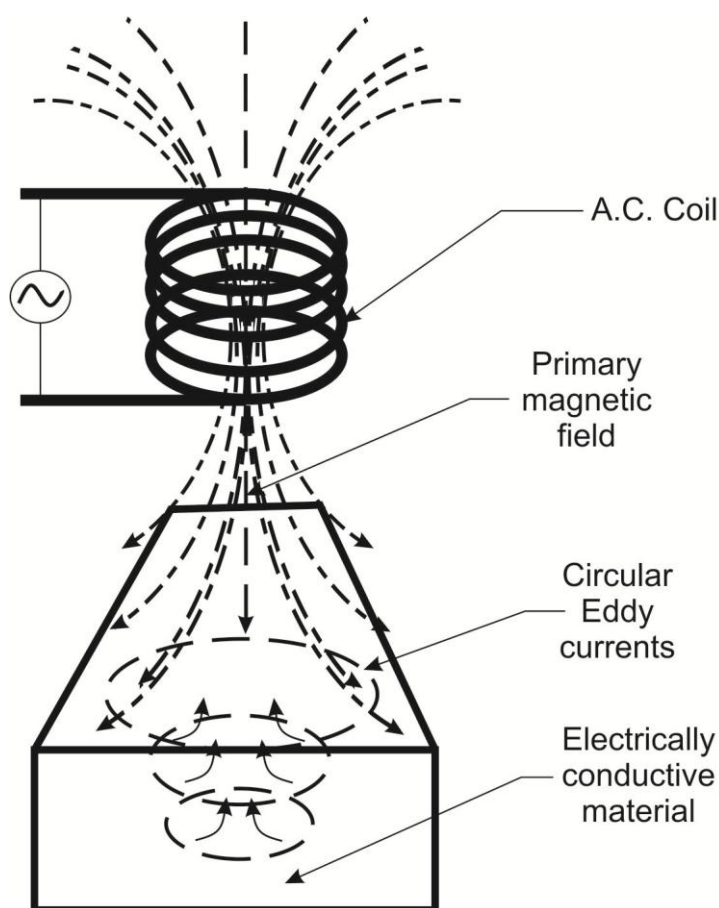
Κοντά στο 1890, ο Charles Proteus Steinmetz δούλεψε στην General Electric και ανέπτυξε απλές μεθόδους ανάλυσης σήματος χρησιμοποιώντας διανύσματα (Nondestructive Testing Handbook 2004). Από το 1925 έως και το τέλος του Β' Παγκοσμίου, το 1945, κατασκευάστηκαν πολλά όργανα δινορρευμάτων (τα οποία κατοχυρώθηκαν σαν πατέντες). Τα πρώτα όργανα υστερούσαν σε ακριβείς μετρήσεις σχετικά με τον προσδιορισμό των ασυνεχειών, της αγωγιμότητας κ.α. Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, οι μέθοδοι (που ανέπτυξε ο Steinmetz) της ανάλυσης σήματος στο μιγαδικό επίπεδο χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στην ανάλυση των σημάτων στη μέθοδο των δινορρευμάτων. Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις σε πολλά επιστημονικά πεδία συνέβαλλαν στην ζήτηση και στην ανάπτυξη νέων τεχνικών ΜΚΕ (Nondestructive Testing Handbook 1986). Η ανάπτυξη της αεροπορικής βιομηχανίας και των πυρηνικών σταθμών οδήγησε στην ανάγκη χρήσης οργάνων υψηλής ευαισθησίας για την αξιολόγηση των μετάλλων και τον αξιόπιστο έλεγχο. Αυτές οι βιομηχανίες ήταν και οι πρώτοι χορηγοί για την έρευνα σε όλες τις Μη Καταστροφικές Δοκιμές (ΜΚΔ).

Η ανάπτυξη της μεθόδου έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1940, όπου ο Friedreich Foerster ίδρυσε το Ίδρυμα Foerster, το οποίο ανέπτυξε και προώθησε πολλές συσκευές δινορρευμάτων (Foerster et al 1943). Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, το ίδρυμα ανέπτυξε μια γραμμή παραγωγής για κάθε εφαρμογή δινορρευμάτων και σε συνεργασία με Αμερικανούς κατασκευαστές (Magnaflux Corporation) καθιέρωσαν τη

μέθοδο στην Αμερική. Επίσης, ένας ακόμη κατασκευαστής ο Intercontrolle στη Γαλλία το 1974, ανέπτυξε τη μέθοδο των πολλών συχνοτήτων. Η ανάπτυξη του μικροεπεξεργαστή στα μέσα της δεκαετίας του 1980, βελτίωσε τη χρήση των συσκευών των δινορρευμάτων (Moore et al 2004).

### 3.2. Αρχή λειτουργίας

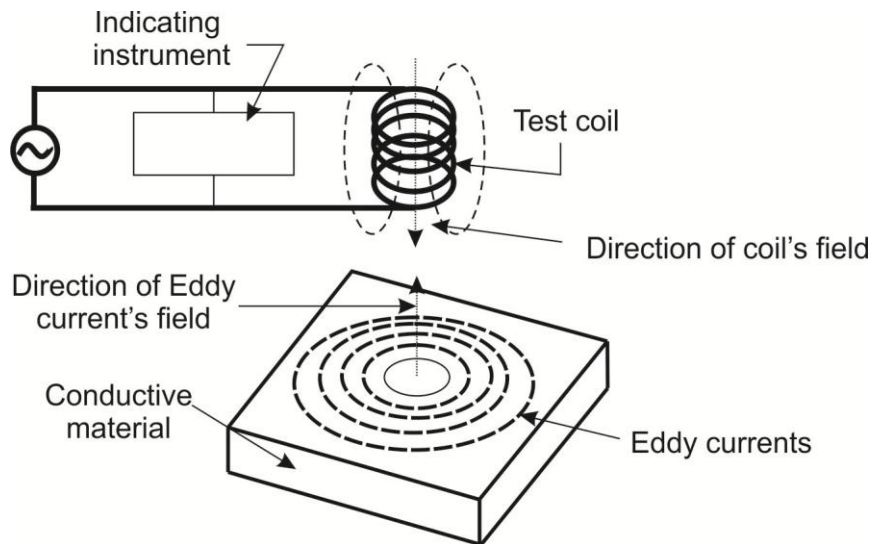
Όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα διέρχεται μέσα από ένα πηνίο τότε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διέρχεται μέσα και γύρω από αυτό (Cecco et al 1983, Hagemaiier 1990). Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου συνεχώς μεταβάλλεται με το εναλλασσόμενο ρεύμα. Εάν εισάγουμε ένα αγωγίμο μέταλλο κοντά στο πεδίο τότε επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από αμοιβαία επαγωγή. Εάν το υλικό έχει αντίσταση τότε η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη θα προκαλέσει ρεύματα τα οποία μεταβάλλονται και σχηματίζουν δίνες και για αυτό αποκαλούνται δινορρεύματα. Σύμφωνα με το Νόμο του Lenz, η κατεύθυνση των επαγόμενων δινορρευμάτων και συνεπώς το δευτερεύον πεδίο που δημιουργείται από αυτά αντιτίθεται στην αλλαγή του αρχικού πεδίου (Rao 2007).



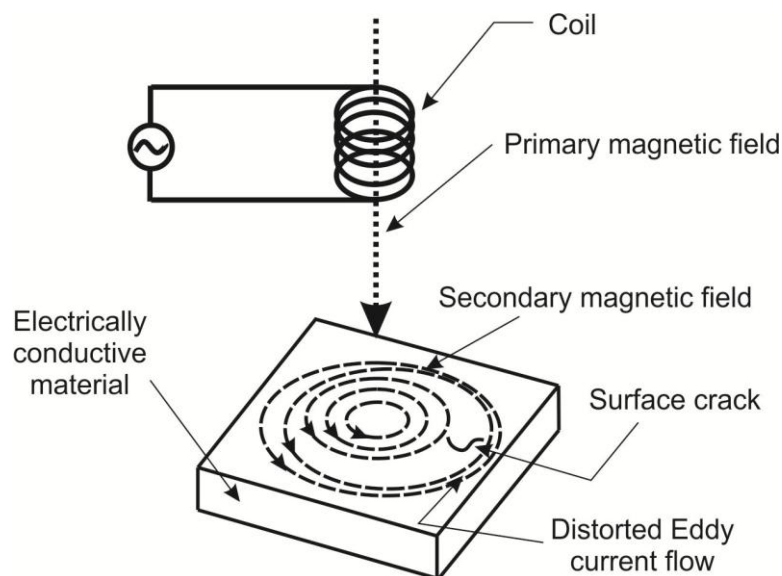
Εικόνα 3.1. Δημιουργία δινορρευμάτων σε ένα ηλεκτρικά αγωγίμο δοκίμιο (Rao 2007).

Το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα δινορρεύματα αντιτίθεται στο πρωτεύον μαγνητικό πεδίο και προκαλούν μεταβολή στο συνολικό μαγνητικό πεδίο (απεικονίζεται στις Εικ.3.1-3.5) (Rao et al 2013, Hellier 2003). Στη μέθοδο των δινορρευμάτων, το μετρούμενο μέγεθος είναι η σύνθετη αντίσταση του πηνίου και γίνεται προσπάθεια να ερμηνευτούν οι αλλαγές που την προκαλούν (Libby 1979, Franklin 1982, Cecco et al 1983, Hagemaiier 1982). Η παρουσία ασυνέχειας

συνοδεύεται από αλλαγές (στην αντίσταση και επαγωγική αντίδραση του πηνίου) καθώς τα δινορρεύματα ρέουν σε διαφορετική κατεύθυνση από την αρχική. Η διάδοση των δινορρευμάτων σε ένα δεδομένο υλικό επηρεάζεται από τις μεταλλικές ιδιότητες του υλικού, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα, οι τυχόν ασυνέχειες που θα υπάρχουν στο υπό-εξέταση δοκίμιο, η γεωμετρία του δοκιμίου, η συχνότητα διέγερσης που καθορίζει το βάθος διείσδυσης, η γεωμετρία του πηνίου και η απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και στο αγωγίμο δοκίμιο (ανύψωση lift off). (Mukherjee et al 1982, Rao 2007).



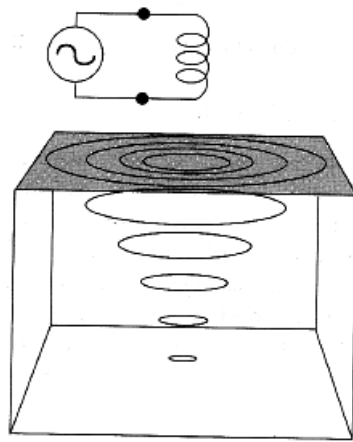
Εικόνα 3.2. Η ροή των δινορρευμάτων σε αγωγίμο δοκίμιο χωρίς ασυνέχεια (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).



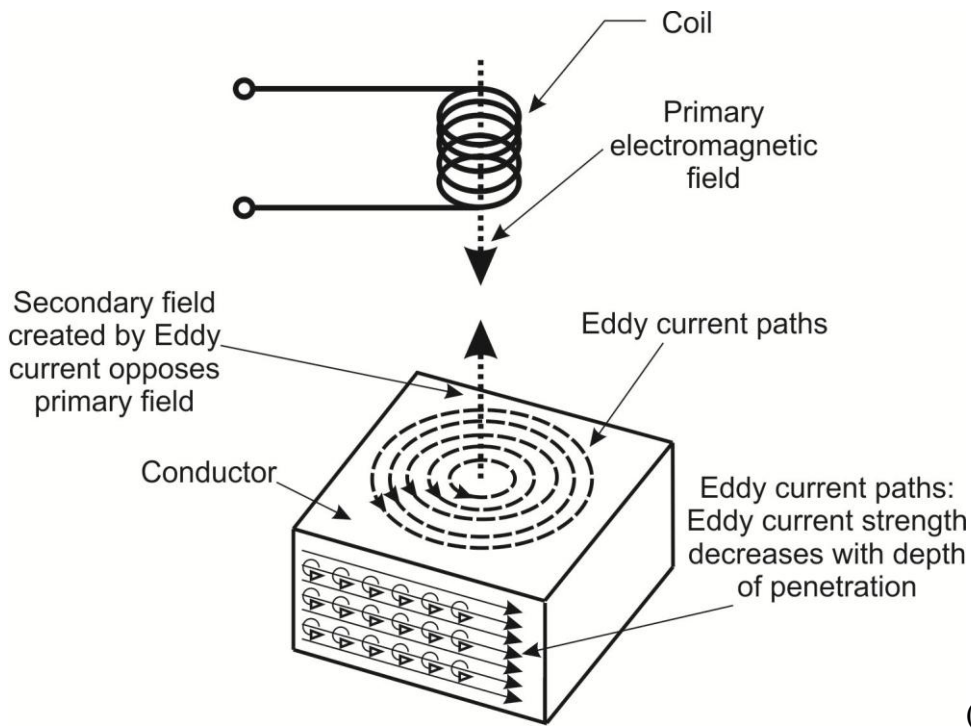
Εικόνα 3.3. Η μεταβολή της ροής των δινορρευμάτων σε αγωγίμο δοκίμιο με ασυνέχεια (Rao 2007).

Τα δινορρεύματα είναι κλειστοί βρόχοι επαγόμενων ρευμάτων που ταξιδεύουν παράλληλα στις σπείρες του πηνίου και παράλληλα στη μεταλλική επιφάνεια. Τα δινορρεύματα όπως και η μαγνητική ροή κατανέμονται με μεγαλύτερη πυκνότητα

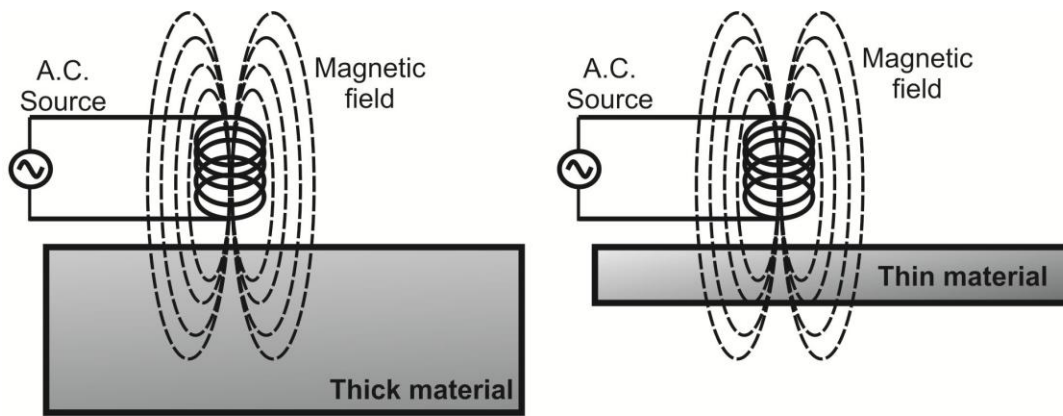
κοντά στην μεταλλική επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Το επιδερμικό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της αμοιβαίας επίδρασης των δινορρευμάτων και εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, την αγωγιμότητα και τη διαπερατότητα. Το φαινόμενο τείνει να συγκεντρώνει τα δινορρεύματα κοντά στην μεταλλική επιφάνεια, ακριβώς κάτω από το πηνίο διέγερσης (Εικ.3.4-3.5) (Harvey 1995). Επομένως, τα δινορρεύματα δεν κατανέμονται ομοιόμορφα. Είναι ισχυρότερα στην επιφάνεια κάτω από το πηνίο και όσο αυξάνει το βάθος κάτω από την επιφάνεια τόσο μειώνεται η έντασή τους. Επίσης, σε ένα μέταλλο μεγάλου πάχους δεν θα υπάρξει καθόλου ροή των δινορρευμάτων εντός του δοκιμίου παρά μόνο στην επιφάνεια του (Εικ.3.6) (Harfield et al 1997).



Εικόνα 3.4. Τα δινορρεύματα μέσα σε ένα αγώγιμο δοκίμιο (Rao 2007).



Εικόνα 3.5. Η μείωση της έντασης των δινορρευμάτων καθώς αυξάνεται το βάθος (επιδερμικό φαινόμενο) (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).



Εικόνα 3.6. Τα δινορρεύματα μέσα σε ένα αγώγιμο δοκίμιο μεγάλου πάχους και μέσα σε ένα λεπτό αγώγιμο δοκίμιο (Classroom Training Handbook, Eddy Current Testing 1979).

Το βάθος διείσδυσης ποικίλει ανάλογα με το υλικό του μετάλλου. Συγκεκριμένα, το βάθος διείσδυσης επηρεάζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα τόσο μεγαλύτερη και η ευαισθησία στις επιφανειακές ασυνέχειες αλλά τόσο λιγότερη διείσδυση στο υπό-εξέταση υλικό. (Η επίδραση της μαγνητικής διαπερατότητας είναι αμελητέα στα μη σιδηρομαγνητικά υλικά. Επίσης στα σιδηρομαγνητικά υλικά εάν τα μαγνητίσουμε και τα οδηγήσουμε σε κορεσμό με dc πηνίο πάλι η επίδραση της μαγνητικής διαπερατότητας θα είναι ελάχιστη). Καθώς η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών αυξάνει, αυξάνουν και τα σήματα θορύβου από τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας και αυτό ενισχύεται με την αύξηση του βάθους (Nondestructive Testing Handbook 2004).

Στα δινορρεύματα είναι πολύ σημαντικό να επιτυγχάνεται η διείσδυσή τους σε αναμενόμενο βάθος. Ο παράγοντας που επηρεάζει το βάθος διείσδυσης είναι η συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και το πρότυπο βάθος διείσδυσης. Επομένως, το βάθος μειώνεται όσο η συχνότητα αυξάνεται. Στις υψηλές συχνότητες, η ευαισθησία είναι πολύ υψηλή αλλά το βάθος διείσδυσης περιορίζεται σε ένα λεπτό στρώμα κάτω αλλά πολύ κοντά στην επιφάνεια έτσι ώστε τα πιο βαθιά κομμάτια δεν μπορούν να ανιχνευθούν, αλλά έχει αυξηθεί η ευαισθησία των δινορρευμάτων σε επιφανειακές ασυνέχειες. Στις χαμηλές συχνότητες το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο αλλά η ευαισθησία στην ανίχνευση ασυνεχειών μειώνεται και πολλές μικρές ασυνέχειες είναι μη ανιχνεύσιμες αλλά τα δινορρεύματα διεισδύουν σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στο υλικό. Η επιλογή πρέπει να γίνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων και όχι απαραίτητα σε μια συγκεκριμένη τιμή λόγω του ότι σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων η ευαισθησία εντοπισμού είναι περίπου ίδια. Επιπλέον, τα σήματα των δινορρευμάτων που προκύπτουν από τη σάρωση της κεφαλής πάνω από ασυνέχεια εξαιτίας της απόστασης του πηνίου από το δοκίμιο, της αγωγιμότητας και της μαγνητικής διαπερατότητας είναι διαφορετικής έντασης και διαφορετικής φάσης. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα του εντοπισμού με ακρίβεια μιας εσωτερικής ασυνέχειας σε σχέση με μια επιφανειακή. Το εύρος των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στα δινορρεύματα ποικίλουν από μερικά Hz σε μερικά MHz. Η επιλογή γίνεται με στόχο την παροχή του μέγιστου σήματος. Επειδή όμως, υπάρχει μια σειρά από μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δινορρευμάτων, η βέλτιστη συχνότητα καθορίζεται έπειτα από την διεξαγωγή πειραμάτων. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή συχνότητας είναι το πάχος του υπό εξέταση δοκιμίου και το επιθυμητό βάθος διείσδυσης (Cecco et al 1983).



Ως πρότυπο βάθος διείσδυσης  $\delta$  (standard depth of penetration), ορίζεται το βάθος στο οποίο η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται στο  $1/e=37\%$  της τιμής τους στην επιφάνεια του υλικού (Udrea et al 1999). Η πυκνότητα των δινορρευμάτων για ένα, δύο και τρία πρότυπα βάθη διείσδυσης:

$$1\delta \rightarrow 1/e = 1/2.71828 = 0.368 = 36.8\%$$

$$2\delta \rightarrow 1/e^2 = 1/7.38906 = 0.135 = 13.5\%$$

$$3\delta \rightarrow 1/e^3 = 1/20.08554 = 0.0498 = 5.0\%$$

Εάν ξεπεράσουμε τα τρία πρότυπα βάθη, η πυκνότητα είναι τόσο μικρή που δεν μπορεί να δώσει σήμα (Εικ.3.7).

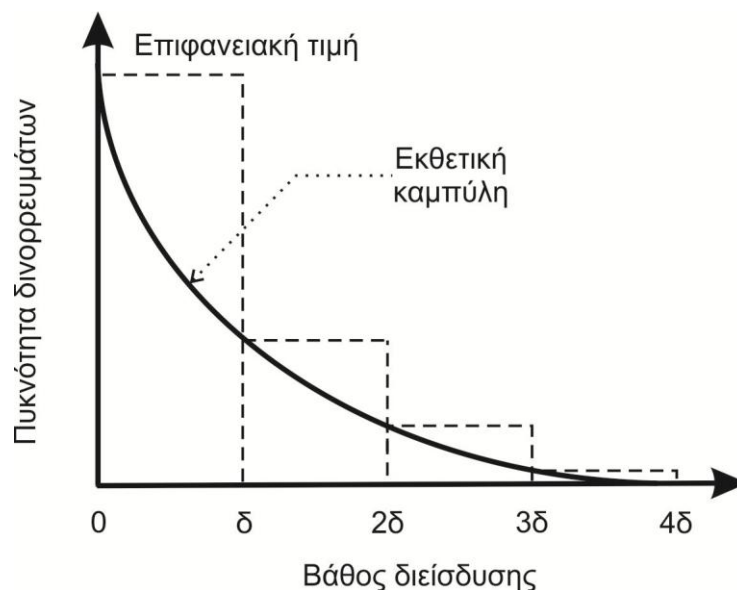
Το πρότυπο βάθος διείσδυσης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα,

$\sigma$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα,

$\mu$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mu_r$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα και  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ J/K}$ )

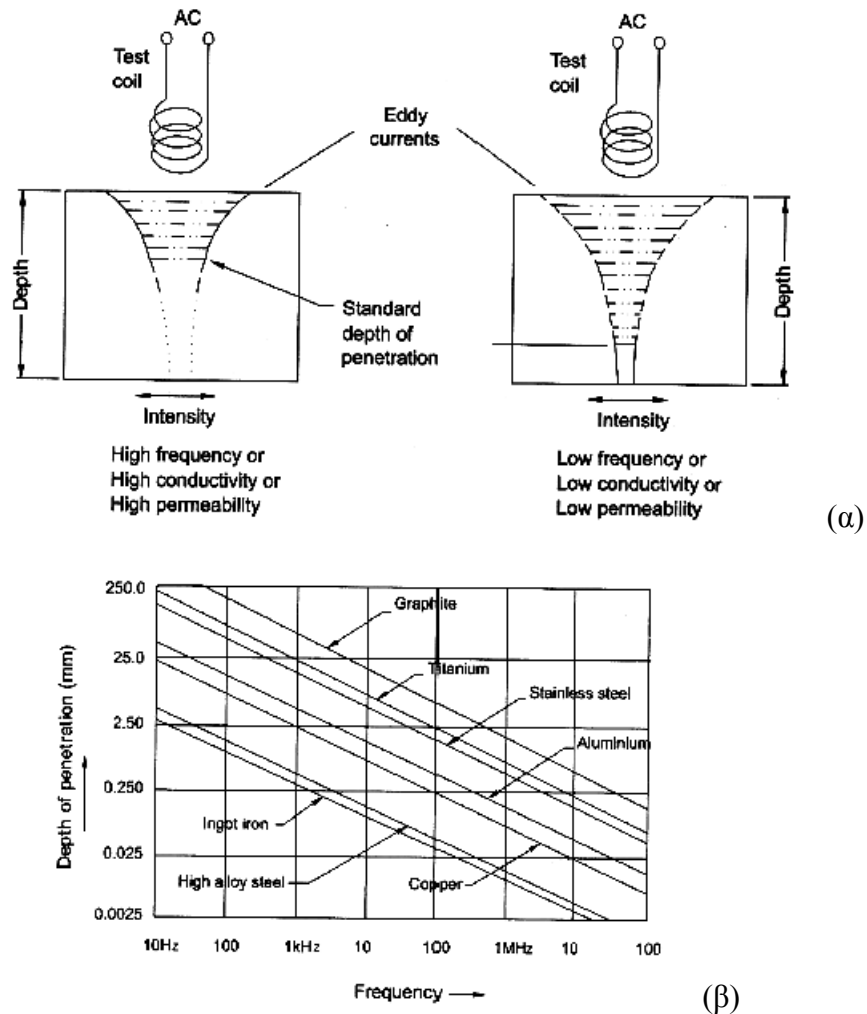


Εικόνα 3.7. Η πυκνότητα των δινορρευμάτων σε σχέση με το πρότυπο βάθος διείσδυσης  $\delta$ .

Το βάθος διείσδυσης όπως φαίνεται και από τον τύπο 1. εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη μαγνητική διαπερατότητα και τη συχνότητα στο υπό εξέταση δοκίμιο. Για ένα δεδομένο υλικό η συχνότητα είναι αυτή που καθορίζει το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων καθώς και την αλληλεπίδραση των δινορρευμάτων με τις ασυνέχειες σε διαφορετικά βάθη. Εάν θέλουμε να επιτευχθεί μεγάλη διείσδυση σε υψηλά αγώγιμες πλάκες πρέπει να χρησιμοποιηθούν χαμηλές συχνότητες. Αντίθετα, υψηλές συχνότητες πρέπει να επιλεγούν σε περιπτώσεις μελέτης επιφανειακών χαρακτηριστικών ή λεπτών μεταλλικών πλακών. Επιπλέον, πρέπει να διευκρινιστεί

ότι τα δινορρεύματα δεν σταματούν στο πρότυπο βάθος διείσδυσης αλλά συνεχίζουν να κατανέμονται και σε μια απόσταση πιο κάτω από αυτό. Εάν το πρότυπο βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο από το πάχος του δοκιμίου τότε αυτός ο περιορισμός θα παρουσιαστεί ως αλλαγή στην αγωγιμότητα του υλικού. Συνήθως, το υλικό πρέπει να έχει πάχος δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερο από το πρότυπο βάθος διείσδυσης (Halmshaw, 1993).

Η Εικ.3.8 δείχνει το πρότυπο βάθος διείσδυσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα για διάφορα μέταλλα (για παράδειγμα στη συχνότητα των 100kHz το βάθος διείσδυσης για το χαλκό είναι 0.25mm και για το τιτάνιο είναι 25mm).



Εικόνα 3.8. (α) Το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων σε δύο διαφορετικές καταστάσεις και (β) το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων σε διαφορετικά υλικά σε σχέση με τη συχνότητα (B.P.C. Rao 2007).

Το πρότυπο βάθος είναι έγκυρο για αγωγή δοκίμια με μεγάλα πάχη και μεγάλα πηνία (Hagemaiier 1985, Cartz 1995). Έστω ότι υπάρχει ένα αγωγίμο δοκίμιο με πάχος πέντε φορές το πρότυπο βάθος διείσδυσης, όπου η πυκνότητα των δινορρευμάτων είναι μόνο 0.67% της επιφανειακής πυκνότητας. Τότε η επίδραση από το πάχος είναι τόσο μικρή που το μόνο που επηρεάζει τα δινορρεύματα είναι το μέγεθος του πηνίου. Σε αυτήν την περίπτωση, το πεδίο των δινορρευμάτων που δημιουργείται, περιορίζεται από τη διάμετρο του πηνίου. Επομένως, όταν το πηνίο είναι πολύ μικρό η πυκνότητα του ρεύματος για ένα δεδομένο βάθος θα είναι μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται από το πρότυπο βάθος διείσδυσης. Το ενεργό

βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων καθορίζεται σαν το βάθος στο οποίο η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται στο 5% από την επιφανειακή πυκνότητα.

Η ροή των δινορρευμάτων περιορίζεται στην περιοχή του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου το οποίο είναι ανάλογο με τη γεωμετρία του πηνίου (Rao 2007). Η περιοχή ελέγχου της κεφαλής είναι η περιοχή κάτω από το πηνίο μαζί με μια ακόμη περιοχή η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα που χρησιμοποιούμε. Αυτή η περιοχή ονομάζεται  $D_e$  και υπολογίζεται προσεγγιστικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_e = D_c + 4\delta$$

$D_c$  είναι η διάμετρος του πηνίου και  $\delta$  είναι το βάθος διείσδυσης.

Στις υψηλές συχνότητες ο όρος  $4\delta$  γίνεται αμελητέος και επομένως η περιοχή ελέγχου καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη διάμετρο του πηνίου. Η διείσδυση και η ευαισθησία, όσον αφορά τη γεωμετρία του πηνίου επηρεάζονται από αντίθετες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, η ευαισθησία για μικρές ασυνέχειες περιορίζει τη διάμετρο του πηνίου ώστε να έχει το ελάχιστο μήκος όσο θα είναι κατά μήκος της ασυνέχειας που θα ανιχνευθεί και από την άλλη η διείσδυση των δινορρευμάτων περιορίζεται από τη διάμετρο του πηνίου, η οποία καθορίζει το βάθος διείσδυσης (όσο η διάμετρος του πηνίου). Συνεπώς τα πηνία (κεφαλές) μεγάλης διαμέτρου παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία και διακριτική ικανότητα αλλά επιτυγχάνουν γρήγορη επιθεώρηση.

Οι διαστατικοί παράγοντες του πηνίου που επηρεάζουν τα δινορρεύματα, που επάγονται στο υλικό, είναι η απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και στο υπό εξέταση δοκίμιο (lift-off), το μέγεθος και το σχήμα του πηνίου.

Όταν ένα πηνίο είναι στον αέρα πάνω από ένα αγωγίμο δοκίμιο, η σύνθετη αντίσταση του πηνίου έχει μια συγκεκριμένη τιμή. Καθώς το πηνίο μεταφέρεται πιο κοντά στο αγωγίμο δοκίμιο η τιμή αυτή αλλάζει καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση με το υπό εξέταση δοκίμιο. Η πυκνότητα των δινορρευμάτων μειώνεται εκθετικά με την απόσταση του πηνίου από το αγωγίμο δοκίμιο, με άμεση συνέπεια την αύξηση της ευαισθησίας της μεθόδου (Mix 2005). Όσο πιο κοντά βρίσκεται το πηνίο με το υπό εξέταση δοκίμιο, τόσο πιο πυκνό θα είναι το πεδίο των δινορρευμάτων που θα αναπτυχθεί.

Σημαντική είναι και η διάκριση μεταξύ απόλυτων και διαφορικών πηνίων. Το απόλυτο πηνίο ανταποκρίνεται στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου που γίνονται στο δοκίμιο χωρίς να συγκρίνεται η απόκρισή του με ένα δεύτερο πηνίο. Στην απόλυτη μέτρηση, τα αποτελέσματα είναι οι αντιπροσωπευτικές αλλαγές στο υπό εξέταση δοκίμιο. Ένα πρόβλημα του απόλυτου πηνίου (απόλυτη κεφαλή) είναι η δυσκολία που έχει να ανιχνεύει μικρές αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση. Τα διαφορικά πηνία είναι 2 ή περισσότερα πηνία που συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε οι ηλεκτρομαγνητικές αλλαγές να προκαλούν μια ανισοροπία μεταξύ τους, η οποία πρέπει να αναλυθεί. Στις διαφορικές μετρήσεις, τα αποτελέσματα είναι σχετικά καθώς είναι η διαφορά που προκύπτει από τη μέτρηση των δύο διαφορετικών περιοχών.

Τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη μέθοδο των δινορρευμάτων είναι η ευαισθησία, η διακριτική ικανότητα και το βάθος διείσδυσης.

Συγκεκριμένα, η ευαισθησία είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στη μέθοδο των δινορρευμάτων καθώς καθορίζει το μικρότερο μέγεθος ασυνέχειας που μπορεί να ανιχνευτεί μέσα σε ένα δεδομένο πάχος αγώγιμου δοκιμίου. Η ευαισθησία της μεθόδου μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση στην οποία εντοπίζεται η πιθανή ασυνέχεια διότι εξαρτάται από την πυκνότητα των δινορρευμάτων στη θέση που βρίσκονται ασυνέχειες (Moore et al 2004). Η διαδικασία εντοπισμού ασυνεχειών είναι πιο δύσκολη όταν το δοκίμιο που ελέγχεται είναι σιδηρομαγνητικό καθώς υπάρχει μια επιπρόσθετη μείωση στην αυτεπαγωγή του πηνίου καθώς η ένταση των δινορρευμάτων μειώνεται στο εσωτερικό του δοκιμίου αλλά υπάρχει και μια επιπλέον μείωση της αυτεπαγωγής του πηνίου λόγω της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. (Γενικά όταν υπάρχει σιδηρομαγνητικό υλικό η αυτεπαγωγή του πηνίου μειώνεται και αυτό συνοδεύεται από αύξηση της αντίστασης που οφείλεται στα δινορρεύματα και στις απώλειες λόγω της μαγνητικής υστέρησης). Οι αλλαγές που προκύπτουν από τις ασυνέχειες σε ένα δοκίμιο είναι συχνά πολύ μικρές σε σχέση με τη δεδομένη τιμή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου. Η ευαισθησία είναι μέγιστη όταν οι ασυνέχειες είναι κάθετες στη ροή των δινορρευμάτων και ελάχιστη όταν η ασυνέχεια είναι παράλληλη στα δινορρεύματα ή όταν βρίσκεται στο κέντρο του πηνίου. Μεγαλύτερη ευαισθησία επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή συχνότητας ανάλογα με το βάθος εντοπισμού της ασυνέχειας.

Αλλαγή του σήματος και συγκεκριμένα μεταβολή της ροής των δινορρευμάτων συμβαίνει όταν βρεθούν σε κάποια άκρη ή στο τέλος ενός δοκιμίου, καθώς δεν έχουν διαδρομή να κινηθούν. Το αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής πορείας των δινορρευμάτων είναι γνωστή ως “φαινόμενο άκρου” (edge effect). Το πηνίο αντιλαμβάνεται την άκρη σαν μια μεγάλη ρωγμή ή σαν οπή και το σήμα που προκύπτει είναι πολύ ισχυρό. Τα όρια που πρέπει να τηρούνται για την απόσταση που πρέπει να έχει το πηνίο από την άκρη καθορίζεται από το μέγεθος του πηνίου (Cox 1997). Επίσης, η ανίχνευση ασυνεχειών όπως ρωγμές που εντοπίζονται κοντά στις άκρες ή στις οπές για τους ήλους συναρμογής στα αεροσκάφη είναι δύσκολη καθώς υπάρχει παρεμβολή σήματος από το φαινόμενο άκρου η οποία πρέπει να εξαλειφθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σταθερή διατήρηση της απόστασης μεταξύ του πηνίου και της άκρης. Εάν η απόσταση παραμείνει ίδια τότε η απόκριση των δινορρευμάτων θα είναι ίδια εκτός και αν υπάρχει κάποια ασυνέχεια, η οποία θα προκαλέσει αλλαγή στην ένδειξη του οργάνου.

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις κεφαλές δινορρευμάτων κατανέμεται σε όλες τις κατευθύνσεις από το πηνίο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δοκιμίου επηρεάζουν τη ροή των δινορρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων. Άκρες, γωνίες, δύσκολες γεωμετρικές επηρεάζουν τη ροή των δινορρευμάτων. Καθώς το πηνίο προσεγγίζει τις δύσκολες γεωμετρικές, η κεφαλή δεν μπορεί να μετρήσει σωστά το σήμα από τα δινορρεύματα καθώς αυτά δεν μπορούν να ρέουν πέρα από την άκρη. Αυτό περιορίζει την έντασή τους και προκαλεί αλλαγές στη ροή τους.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τα δινορρεύματα είναι η θερμοκρασία καθώς επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και συνεπώς την ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων. Η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επιπλέον, επηρεάζεται και η ηλεκτρική αντίσταση του πηνίου καθώς και αυτή αυξάνεται γραμμικά με τη θερμοκρασία. Επομένως, εάν υπάρξει αλλαγή στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια ελέγχου, το τελικό σήμα από το όργανο των δινορρευμάτων αλλάζει λόγω των αλλαγών που γίνονται στην ηλεκτρική αντίσταση

του πηνίου και των καλωδίων. Αυτό χαρακτηρίζεται ως θερμοκρασιακή απόκλιση. Αυτή η επίδραση μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση διαφορικών κεφαλών ή πηνίων που αντισταθμίζουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

### 3.3.Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι: η υψηλή ταχύτητα ελέγχου, η ακριβής μέτρηση αγωγιμότητας, η ανίχνευση επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών, η υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση μικρών ασυνεχειών, τα άμεσα αποτελέσματα μέτρησης, η ακριβής μέτρηση πάχους επικάλυψης, ο χαμηλός κόστους φορητός εξοπλισμός (Θεοδοουλίδης 2011).

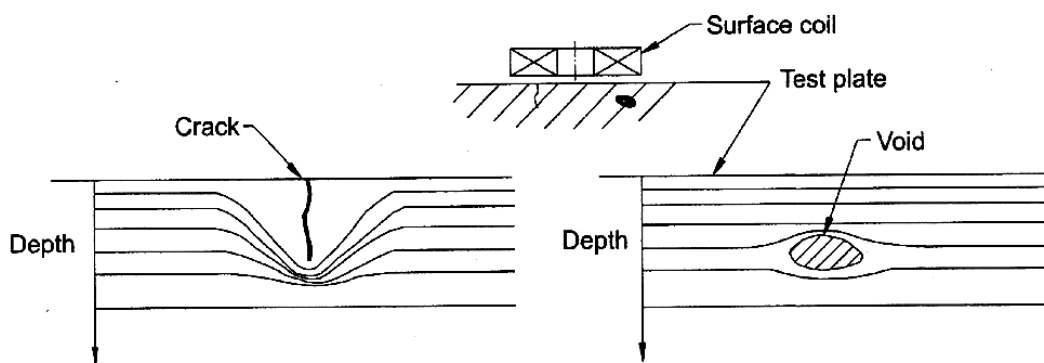
Οι περιορισμοί της μεθόδου είναι το περιορισμένο βάθος διεύθυνσης, οι πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν συγχρόνως το σήμα εξόδου, το γεγονός ότι ο εντοπισμός των ασυνεχειών είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός, ότι το υλικό πρέπει να είναι αγωγίμο και ότι πολλές μη σχετικές ενδείξεις μπορεί να προκύψουν από φαινόμενα άκρου ή από δύσκολες γεωμετρίες.

### 3.4.Εφαρμογές

Η ανάπτυξη της μεθόδου των δινορρευμάτων έχει πολλές εφαρμογές εξαιτίας της μεγάλης τους ευαισθησίας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για:

- Μέτρηση διακυμάνσεων αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας.
- Ανίχνευση ασυνεχειών.
- Μέτρηση απόστασης μεταξύ δοκιμίου και πηνίου (ανύψωση lift off).
- Παχυμέτρηση.
- Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε αγωγίμες πλάκες.

Η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι κατάλληλη για ανίχνευση επιφανειακών και κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών αγωγίμων υλικών καθώς και για μέτρηση της απόστασης πηνίου δοκιμίου για τον υπολογισμό του πάχους επικάλυψης των αγωγίμων υλικών. Το πλάτος και η φάση της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης δίνει πληροφορίες για την ανίχνευση και χαρακτηρισμό των ασυνεχειών όπως μήκος, πλάτος, βάθος, σχήμα και μέγεθος (Shull 2002).



Εικόνα 3.9. Η μεταβολή της διάδοσης των δινορρευμάτων σε σχέση με την ασυνέχεια που εντοπίζουν (Rao 2007).

Στην Εικ.3.9 φαίνεται ότι οι ασυνέχειες με κατεύθυνση κάθετη στη ροή των δινορρευμάτων προκαλούν μέγιστη μεταβολή στη ροή δινορρευμάτων και ανιχνεύονται με τη μέγιστη ευαισθησία.

Το βασικό πρόβλημα στα δινορρέυματα είναι η σωστή ερμηνεία της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης του πηνίου, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (Bettaieb et al 2010). Επίσης, θα πρέπει οι έλεγχοι που γίνονται στα δοκίμια να είναι σε περιοχές που δεν επηρεάζονται από μαγνητικές ή ηλεκτρικές διακυμάνσεις. Σε μερικές εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως στη χρήση μαγνητομέτρου SQUID πρέπει οποιοδήποτε αγώγιμο υλικό εκτός από το υπό-εξέταση δοκίμιο να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το πηνίο.

Στον έλεγχο με δινορρέυματα οι ασυνέχειες μεταβάλλουν τη ροή των δινορρευμάτων, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μεγάλη αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Ασυνέχειες που δεν προκαλούν αλλαγές στη διάδοση των δινορρευμάτων ανιχνεύονται με μεγάλη δυσκολία (όπως φαίνεται και στην Εικ.3.9). Η διακριτική ικανότητα, είναι ο βαθμός διάκρισης ανάμεσα σε διαφορετικά σήματα, μαζί με την ευαισθησία της μεθόδου παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανίχνευση μικρών ασυνεχειών και πολλές φορές τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται και από το μέγεθος του πηνίου (Rao 2007).

Η ικανότητα ανίχνευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κεφαλή που χρησιμοποιείται. Με κατάλληλη επιλογή κεφαλής μια ρωγμή μπορεί να ανιχνευτεί με σχετική ευκολία. Επίσης, οι διαστάσεις των ασυνεχειών μπορεί να ποικίλουν μέσα σε ένα δοκίμιο, μπορεί να είναι πολύ μικρές, μεσαίες ή πολύ μεγάλες. Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί η μέθοδος των δινορρευμάτων να ανιχνεύσει όλες τις ρωγμές που υπάρχουν σε ένα δοκίμιο. Επίσης, η ενίσχυση της διακριτικής ικανότητας γίνεται στις υψηλές συχνότητες. Με τη μέθοδο των δινορρευμάτων το ζητούμενο είναι η ανίχνευση των ασυνεχειών αλλά και η διαστασιολόγησή τους μαζί με τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης τους. Σημειώνεται ότι η γωνία της φάσης καθορίζει το βάθος ή την τοποθεσία της ασυνέχειας με αναφορά την απόσταση της μεταλλικής επιφάνειας με το πηνίο. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγεθος του σήματος και η γωνία φάσης του χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τη διαστασιολόγηση των ασυνεχειών. Το πλάτος του σήματος είναι ένας δείκτης που δίνει πληροφορίες για την ένταση της ασυνέχειας.

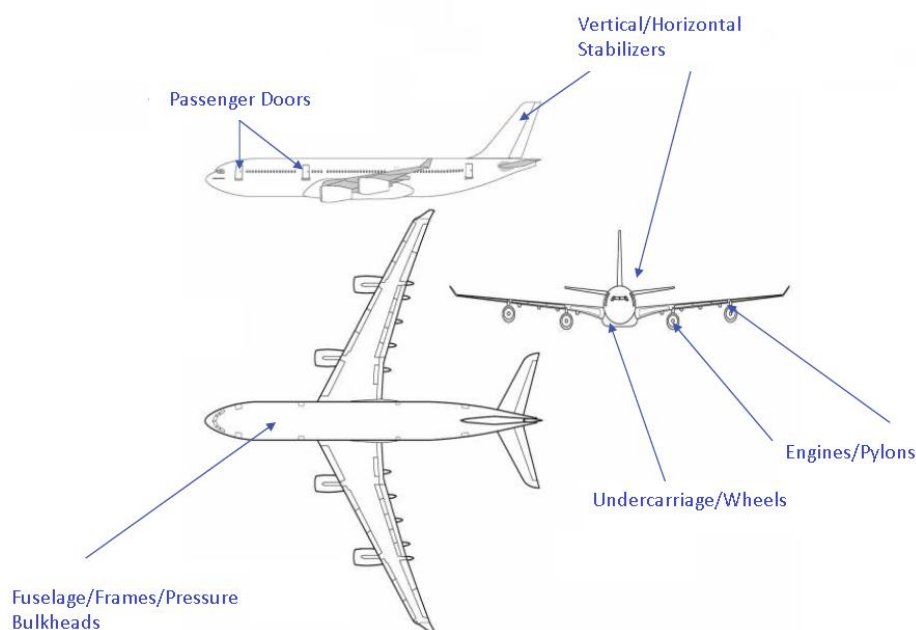
Ο έλεγχος με δινορρέυματα είναι πολύ αξιόπιστος και δεν είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες επιπλέον διαδικασίες όπως να αφαιρεθεί η επικάλυψη (όπως στα διεισδυτικά υγρά). Επιπλέον, ο έλεγχος αποκαλύπτει μικρές ρωγμές με τη χρήση υψηλών συχνοτήτων για αυτό και μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις ελέγχου όπως η επιθεώρηση σωλήνων σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνικά ή συμβατικά) καθώς και σε γενικές περιπτώσεις επιθεώρησης σωληνώσεων, συρματόσχοινων, αεροσκαφών κ.α. Επίσης, με τον έλεγχο των δινορρευμάτων μπορεί να γίνει κατάταξη μετάλλων καθώς όταν ένα πηνίο τοποθετηθεί πάνω από ένα αγώγιμο υλικό προκύπτει μια συγκεκριμένη τιμή σύνθετης αντίστασης. Επομένως, οποιοδήποτε δοκίμιο από το ίδιο αγώγιμο υλικό θα προκαλεί την ίδια τιμή στη σύνθετη αντίσταση του πηνίου. Με παρόμοιο τρόπο γίνονται αξιόπιστα και μετρήσεις επικαλύψεων. Συγκεκριμένα, για να επιτευχθούν μετρήσεις επικάλυψης, θα πρέπει το πηνίο να τοποθετηθεί πάνω σε υλικό με γνωστό πάχος επικάλυψης καθώς τότε η σύνθετη αντίσταση έχει μια συγκεκριμένη τιμή-“πάχος”. Συνεπώς, οποιαδήποτε

αλλαγή στην ένδειξη της τιμής της σύνθετης αντίστασης θα σημαίνει και αλλαγή στο πάχος της επικάλυψης.

Η παρούσα διατριβή μελετά εφαρμογές επιθεώρησης με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στα αεροπλάνα (εστιάζοντας στην ανίχνευση ρωγμών) και για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια μικρή αναφορά σε αυτές.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος των δινορρευμάτων για την ανίχνευση ρωγμών στην αεροπορική βιομηχανία χρησιμοποιείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η πλειοψηφία του εξοπλισμού είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες (10 kHz έως και 1MHz) για ανίχνευση πολύ μικρών επιφανειακών ασυνεχειών. Το 1973 καθορίστηκε ότι τα δινορρεύματα είναι πιο ευαίσθητη μέθοδος και από τη ραδιογραφία στην ανίχνευση ρωγμών από κόπωση (Southworth 1973, Anderson et al 1973). Αυτό αποτέλεσε και το εφαλτήριο για τη χρήση των δινορρευμάτων σε εντοπισμό υπό-επιφανειακών ρωγμών. Τη δεδομένη χρονική περίοδο όμως δεν υπήρχαν συσκευές δινορρευμάτων που λειτουργούσαν σε χαμηλή συχνότητα (100 Hz έως 10kHz) και επιπλέον οι κεφαλές είχαν μεγάλη διάμετρο με αποτέλεσμα να υστερούν σε ευαισθησία ανίχνευσης μικρών ρωγμών. Ο έλεγχος σε χαμηλές συχνότητες με τη μέθοδο των δινορρευμάτων έγινε αξιόπιστος με τη χρήση οργάνων που χρησιμοποιούσαν ανάλυση φάσης. Επιπλέον, οι κατασκευαστές πέτυχαν τη μείωση της τιμής της συχνότητας λειτουργίας στα 60Hz σε συνδυασμό με τη μείωση και του μεγέθους των κεφαλών.

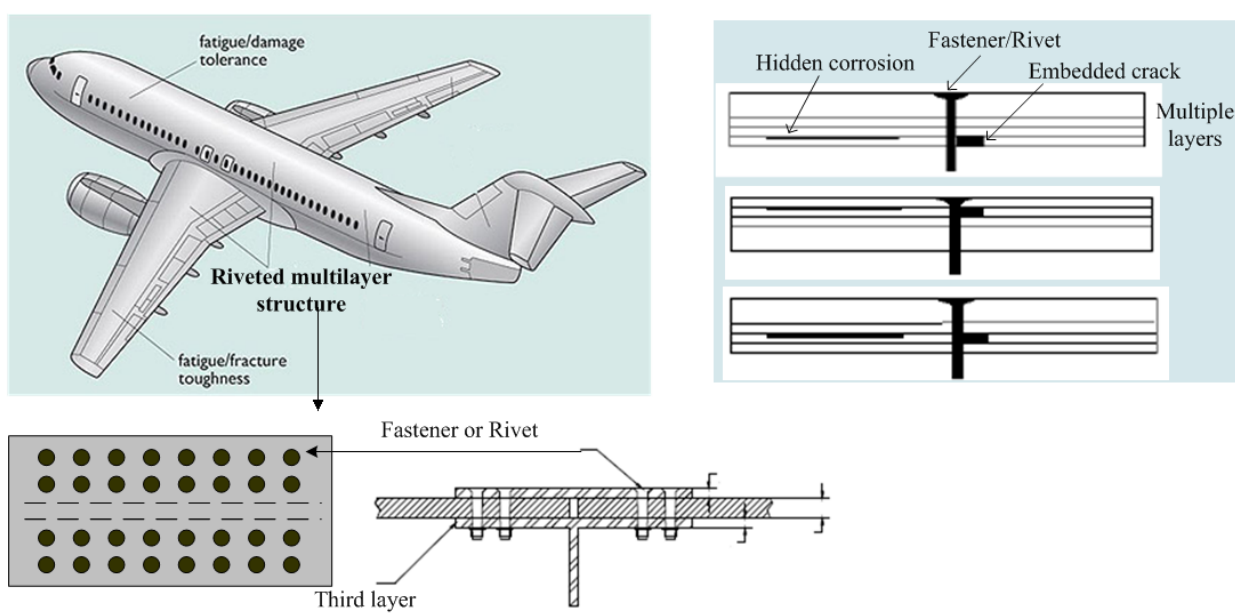
Οι πιο συνηθισμένες περιοχές ελέγχου στα αεροπλάνα είναι ο έλεγχος του σκάφους του (άτρακτος και πτερύγια) κυρίως από διάβρωση, το σύστημα προσγείωσης από τις πιέσεις που δέχεται κατά την προσγείωση στους άξονες και τροχούς, το σύστημα του μηχανικού εξοπλισμού και οι οπές συναρμογής με ή χωρίς ήλους. Οι Εικ.3.10 έως και Εικ.3.12 απεικονίζουν τις περιοχές αυτές δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον έλεγχο των οπών συναρμογής.



Εικόνα 3.10. Τυπικές περιοχές ελέγχου στα αεροσκάφη (GE Inspection Technologies 2008).



Εικόνα 3.11. Εφαρμογές ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στα αεροσκάφη (Rao 2013).



Εικόνα 3.12. Έλεγχος με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στις οπές συναρμογής στα αεροσκάφη (Yang et al 2013).



### 3.5.Βιβλιογραφικές αναφορές

Anderson R.T., DeLacy T.J. and Steward R.C., “Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Testing Methods”, Final Report NASA-CR-128946 (GDCA-DBG73-002) Springfield VA, National Technical Information Service, 1973.

Bettaieb L., Kokabi H., Poloujadoff M., Sentz A. and Tcharkhtchi C., “Fatigue and Crack Detection in NDE”, Nondestructive Testing and Evaluation, vol.25, no.1, pp.13-24, 2010.

Cartz L., “Nondestructive Testing”, ASM Intl, Metals Park, Ohio, 1995

Cecco V.S., Van Drunen C and Sharp F.L., “Eddy Current Test Manual”. Chalk River, Ontario: Chalk River Nuclear Laboratories, 1983.

Cox J., “Nondestructive Testing Eddy Current”, ed. Harrisburg, NC: PH Diversified, pp. B1–B8, 1997.

Forster F and Breitfeld H., “Nondestructive Test by an Electrical Method”, Aluminum, vol.25, pp.130, 1943.

Franklin E.M., “Eddy Current Inspection”, Materials Evaluation Columbus, ASNT, vol. 40, no. 10. pp 1008-1010, 1982.

GE Inspection Technologies, Eddy Current Workshop Typical Industry Applications, 2008.

Hagamaier D.J. and Steinberg A.P., “Low-Frequency Eddy Current Inspection of Aircraft Structure”, Materials Evaluation Columbus, ASNT, vol.40, no.2, pp.206-210, 1982.

Hagamaier D.J., “Eddy Current Standard Depth of Penetration.” Materials Evaluation Columbus, ASNT, vol.43, no.11, pp.1438-1454, 1985.

Hagamaier D.J., “Fundamentals of Eddy Current Testing”, ASNT, 1990.

Halmshaw R, “Nondestructive Testing”, Edward Arnold, London, 1993.

Harfield N. and Bowler J.R., “Theory of Thin-Skin Eddy-Current Interaction with Surface Cracks”, Journal of Applied Physics, vol.82, iss.9, pp.4590-4603, 1997.

Harvey E.D., “Eddy Current Testing, Theory and Practice”, Columbus, ASNT, 1995.

Hellier C., “Handbook of Non destructive Evaluation”, McGRAW-HILL, 2003.

Hellier C., “Handbook of Non destructive Evaluation”, McGRAW-HILL, 2013.

Libby H.L., “Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods”, Wiley-Interscience, New York, 1979.

Mix P.E., "Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2005.

Moore P.O. and Udpa S.S., "Non-destructive Testing Handbook Electromagnetic Testing", ASNT, vol.4, 2004.

Mukherjee S., Morjaria M.A. and Moon F.C., "Eddy Currents Flows Around Cracks in Thin Plates for Nondestructive Testing", Journal of Applied Mechanics-Transactions ASME, vol.49, no.2, pp.389-395, 1982.

Nondestructive Testing Handbook: Electromagnetic Testing, Second edition, ASNT, vol.4, 1986.

Nondestructive Testing Handbook: Electromagnetic Testing, Third edition, ASNT, vol.5, 2004.

Nondestructive Testing: Eddy Current, Classroom Training Handbook, Second Edition, General Dynamics, Convair Division, 1979.

Rao B.P.C. and Jayakumar T., "Recent Advances in Eddy Current Nondestructive Evaluation and Future Directions", 18th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Bratislava, 2013.

Rao B.P.C., "Practical Eddy Current Testing", Indian Society for Non-Destructive Testing-National Certification Board Series, Alpha Science International Ltd., 2007.

Shull P.J., "Non Destructive Evaluation: Theory, Techniques and Application", Marcel Dekker Inc, New York, 2002.

Southworth H., "Practical Sensitivity Limits of Production Nondestructive Testing Methods in Aluminum and Steel", Wright Patterson Air Force Base OH- AFMLTR-1, United States AirForce, 1973.

Udpa S.S. and Udpa L., "Eddy Current Nondestructive Evaluation", Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. NY: John Wiley and Sons, New York, pp. 149-163, 1999.

Yang G., Huang Y., Udpa L. and Udpa S.S., "Enhanced EC-GMR Inspection of Buried Cracks at Ferromagnetic Fastener Sites", 18<sup>th</sup> International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Bratislava, 2013.

Θεοδουλίδης Θ., "Σημειώσεις Θεωρία Δινορρευμάτων", Κέντρο Τεχνολογίας και Ποιοτικού Ελέγχου, Βόλος, 2011.

## ΚΕΦ.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η προσομοίωση παίζει κρίσιμο ρόλο στους μη καταστροφικούς ελέγχους (ΜΚΕ) καθώς βοηθά να μελετηθεί η ευαισθησία της μεθόδου και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία της και περιορίζουν την εφαρμογή της (αλλαγή κάποιων παραμέτρων όπως θέση ρωγμής, προσανατολισμός) (Zeng et al 2011). Επίσης, συντελεί στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του ελέγχου και στην καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων μιας επιθεώρησης (Zienkiewicz et al 2005, Szlagowska et al 2013).

Σήμερα, οι υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης είναι πολύ ανεπτυγμένες και αποτελούν πολύ χρήσιμο εργαλείο καθώς επιτρέπουν την εξαγωγή γρήγορων και αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε προβλήματα για τα οποία, υπό άλλες συνθήκες θα χρειαζόνταν τεράστιο χρονικό διάστημα (Bouchala et al 2013).

Η μελέτη ενός προβλήματος με προσομοίωση συνίσταται στη δημιουργία ενός μοντέλου, το οποίο αναλύεται στον Η/Υ για την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων που ερμηνεύουν τις ιδιότητες ή προβλέπουν την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών προτού αυτά υλοποιηθούν στο εργαστήριο (Huang et al 2012). Η απλή παρουσίαση των σημαντικών συμπερασμάτων που παρέχονται από την εφαρμογή της μοντελοποίησης αρκεί για να γίνει αντιληπτή η σημασία τους στη σύγχρονη βιομηχανική έρευνα. Με τη μοντελοποίηση παρέχεται η δυνατότητα μελέτης της ανταπόκρισης των διατάξεων σε ποικιλία εφαρμογών. Η μοντελοποίηση επιτρέπει την πραγματοποίηση μελετών που υποκαθιστούν την πραγματοποίηση πειραμάτων και οι οποίες χαρακτηρίζονται από πλήρη επαναληψιμότητα (Zienkiewicz et al 2005). Ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει στον επιθυμητό βαθμό όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί και επίσης να κάνει προβλέψεις για παραμέτρους που είναι δυνατό να μελετηθούν πειραματικά, υποδεικνύοντας την κατεύθυνση που θα πρέπει να λάβει η πειραματική έρευνα.

Επομένως στην προσομοίωση, σε σχετικά χαμηλά κόστη θα γίνει σχεδιασμός και θα υπάρχει εικόνα για το αποτέλεσμα πριν αυτό πραγματοποιηθεί σε χώρο εργαστηρίου, όπου στην περίπτωση αυτή το κόστος και ο χρόνος θα είναι πολύ περισσότερα. Παραδείγματος χάριν, η εισαγωγή ενός νέου αισθητήρα και η σύγκρισή του με ένα συμβατικό θα δώσει συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του πριν την αντικατάσταση και την επένδυση στη νέα τεχνολογία. Επομένως, η προσομοίωση είναι αποτελεσματική και συντελεί στην εξοικονόμηση χρόνου και οικονομικών πόρων. Συνεπώς, η διαδικασία της προσομοίωσης είναι καθοριστική καθώς δίνει τη δυνατότητα με χαμηλό κόστος να μελετηθούν μια σειρά από παραμέτρους όπως η αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio), ελάχιστο μήκος ρωγμής, κ.α.(Paillard et all 2008). Επίσης, οι διάφορες συχνότητες λειτουργίας, οι διαφορετικές διαστάσεις των πηνίων, κ.α. μπορούν πολύ εύκολα να οριστούν και να αλλάξουν, δίνοντας μια συνολική εικόνα για την απόδοση του συστήματος.

### 4.1.Σύγκριση λογισμικών Comsol και CIV4

Το λογισμικό προσομοίωσης επιλέγεται για την επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων στοχεύει στη βέλτιστη σχεδίαση της πειραματικής διάταξης για να προκύψει βελτιστοποίηση του σήματος και μεγιστοποίηση της ευαισθησίας του συστήματος. Για την επαλήθευση των πειραματικών δεδομένων αρχικά έγινε χρήση

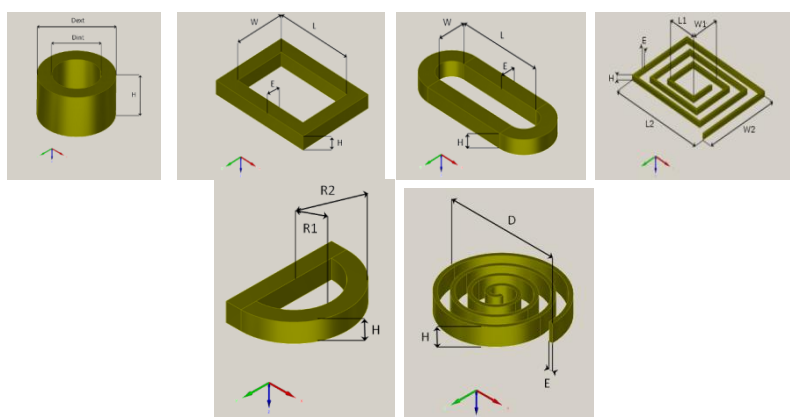
του λογισμικού πακέτου Comsol Multiphysics, που επιλύει διαφορικές εξισώσεις μέσω της διακριτοποίησης των σχέσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Κατά την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων σχεδόν όλες οι προς προσομοίωση γεωμετρίες περιέχουν μη φραγμένες περιοχές με άπειρα όρια, στις οποίες το χωρικό φάσμα των υπολογιζόμενων πεδίων δεν περιορίζεται κατά μία ή περισσότερες διευθύνσεις (Binns et al 1992, Taflove et al 2000). Ωστόσο, λόγω περιορισμένης υπολογιστικής δύναμης, ο χώρος υπολογισμού θα πρέπει να είναι περιορισμένου μεγέθους. Έτσι, θα πρέπει η γεωμετρία μας να περιέχει τα αντικείμενα που θέλουμε να προσομοιώσουμε και παράλληλα θα πρέπει να εφαρμόζεται και μια κατάλληλη οριακή συνθήκη στο εξωτερικό όριο του χώρου ώστε να προσομοιώνεται η έκταση του χώρου ως το άπειρο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) χρησιμοποιείται ευρέως στη μοντελοποίηση των φαινομένων των δινορρευμάτων (Zhiwei et al 2010, Zeng et al 2011, Yu et al 2011). Στην ουσία η μέθοδος των ΠΣ είναι μία μαθηματική μέθοδος που έχει τη δυνατότητα επίλυσης περίπλοκων προβλημάτων (Bossavit et al 1982, Huang et al 2012). Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου (Alonso et al 2004) προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Τα μοντέλα των δινορρευμάτων απαιτούν πλέγμα ιδιαίτερα λεπτομερές (Rachek et al 2007, Meddahi et al 2006) και αυτό περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων απο ότι είναι αναγκαίο, με αποτέλεσμα το κόστος του υπολογιστικού χρόνου και ο αναγκαίος χρόνος για την ανάλυση να είναι πολύ μεγάλος (Dunbar 1985). Το μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι για τη μοντελοποίηση μιας επιθεώρησης μη καταστροφικού ελέγχου που περιλαμβάνεται και η κίνηση της κεφαλής απαιτείται για κάθε κίνηση του πηνίου καινούριο πλέγμα (Sarreshtedari et al 2010).

Στην περίπτωσή μας, η εκτεταμένη χρήση των ΠΣ (FEM) δεν είναι κατάλληλη για μια σειρά λόγων όπως το πολύ μικρό πάχος των πλακών, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται ένα μεγάλο (πυκνό) πλέγμα. Επίσης, η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου λόγω της ρωγμής ήταν πάρα πολύ μικρή σε σχέση με το συνολικό μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, ο χρόνος υπολογισμού για την επίλυση του προβλήματος είναι υπερβολικά μεγάλος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ανακριβή. Η τοποθέτηση του μαγνητομέτρου SQUID σε μια σχετικά μεγάλη απόσταση πάνω από το εξεταζόμενο δοκίμιο οδηγεί σε πολύ μικρή διακύμανση του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με το συνολικό σήμα.

Το λογισμικό, που χρησιμοποιήθηκε και αποτέλεσε το εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της πειραματικής μας διάταξης καθώς έδωσε ακριβή αποτελέσματα σύγκρισης ανάμεσα σε πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα, είναι το CIVA. Το λογισμικό αυτό στηρίζεται σε ημι-αναλυτικές μεθόδους που λύνουν προβλήματα σε πολύ μικρούς χρόνους, το οποίο δίνει ένα συγκριτικό αποτέλεσμα καθώς μπορεί να επιλύσει μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών σε πολύ ανταγωνιστικούς χρόνους σε σχέση με τις καθαρά μαθηματικές μεθόδους (Lhemery 2009). Συγκεκριμένα στο CIVA, χρησιμοποιείται η ολοκληρωτική μέθοδος όγκων (volumetric integral method), η οποία απαιτεί διακριτοποίηση μόνο της ρωγμής και αναλυτικό υπολογισμό του επαγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσα σε ένα αγωγίμο δοκίμιο (Foucher et al 2012). Επιπλέον υπολογίζει τη σύνθετη αντίσταση μιας κεφαλής και προσομοιώνει το σήμα της ρωγμής από έναν ή περισσότερους αισθητήρες.

Το λογισμικό CIVA επιτρέπει την κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν μία επιθεώρηση και συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού καθώς το γραφικό περιβάλλον χρήσης περιέχει λειτουργίες για σχεδίαση των μοντέλων, εισαγωγή εικόνων και σχεδίων, ορισμό των ιδιοτήτων και των εξισώσεων των υλικών. Το CIVA συνοδεύεται από μία βιβλιοθήκη στοιχείων, όπως μια ποικιλία αισθητήρων, πηνία διαφόρων σχημάτων (όπως D-Coil, ορθογωνικό και τύπου μαϊάνδρος) (Εικ.4.1), υλικά με διάφορες τιμές αγωγιμότητας, κλπ. (Foucher et al 2011). Συνδυάζοντας τις παραπάνω παραμέτρους είναι δυνατόν να εντοπιστεί ο βέλτιστος τρόπος διεξαγωγής του πειράματος.



Εικόνα.4.1. Σχήματα πηνίων στο CIVA.

Η διαδικασία μοντελοποίησης συνίσταται σε τρία κύρια στάδια, το υπολογιστικό, το στάδιο επίλυσης και το μετα-υπολογιστικό στάδιο (Foucher et al 2012).

Το πρώτο στάδιο είναι ο προ-επεξεργαστής (preprocessor stage) της ανάλυσης και συνίσταται στον ορισμό του προβλήματος όπου καθορίζεται:

- Επιλογή των παραμέτρων (πλάκα, πηνίο, συχνότητα, καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού, κ.α.).
- Δημιουργία μοντέλου με κατάλληλες διαστάσεις.
- Ορισμός της περιοχής που θα γίνει η προσομοίωση.
- Καθορισμός πυκνότητας πλέγματος (mesh density).

Στο στάδιο της επίλυσης (computation stage) εφαρμόζονται στο μοντέλο οι οριακές συνθήκες στις διαφορικές εξισώσεις (Miorelli 2013).

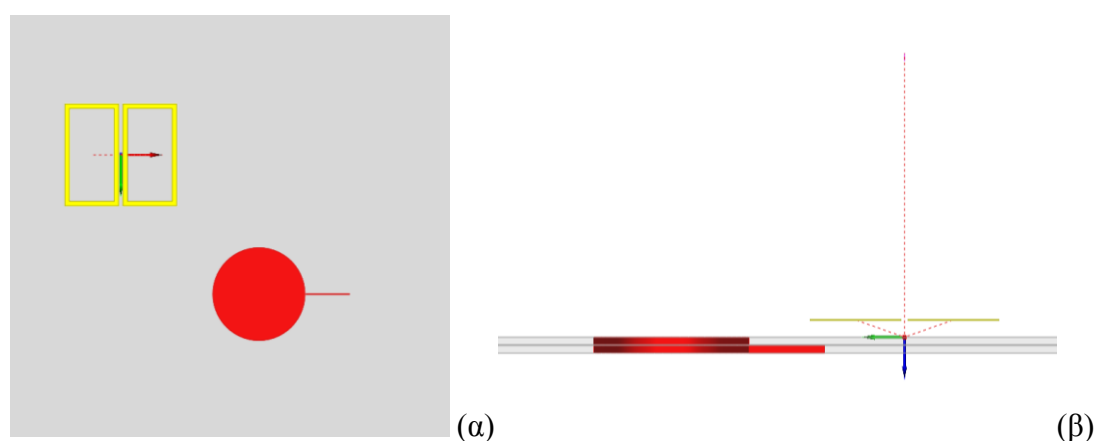
Στο τελευταίο στάδιο είναι ο μετα-επεξεργαστής (post-processor) που γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν τη μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων.

## 4.2.Χρήση του λογισμικού CIVA

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τη μελέτη της χρήσης του μαγνητομέτρου SQUID σε εφαρμογές ΜΚΕ για την εύρεση ρωγμών σε αεροπορικές δομές και συγκεκριμένα ρωγμών επιφανειακών και υπο-επιφανειακών που δημιουργούνται δίπλα στις οπές με ήλους συναρμογής. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δομές παρόμοιες με αυτές που συναντώνται στα αεροπλάνα. Τα πειραματικά δεδομένα έπρεπε να συγκριθούν με ένα αξιόπιστο λογισμικό.

Συγκεκριμένα, έπρεπε να προσομοιωθούν πλάκες αλουμινίου συγκεκριμένης αγωγιμότητας με οπή, οπή και ρωγμή, καθώς επίσης και συστήματα τα οποία

περιλαμβάνουν υπό-επιφανειακή ρωγμή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος δύο πλακών αλουμινίου με υπό-επιφανειακή ρωγμή απεικονίζεται στην Εικ.4.2. Το κυρίαρχο πλεονέκτημα του CIVA είναι ότι στην διακριτοποίηση το πλέγμα διατηρείται ίδιο για οποιαδήποτε θέση του πηνίου (δεν ισχύει στην περίπτωση του Comsol) (Foucher et al 2012). Επομένως, αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επικεντρωθεί μόνο στην διαταραχή του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από την ασυνέχεια και όχι από το σύνολο του συστήματος (Miorelli 2012). Επιπλέον, ο χρόνος υπολογισμού είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με το χρόνο που απαιτείται με τη χρήση των πεπερασμένων καθώς δεν είναι ανάλογος των θέσεων του πηνίου όπως συμβαίνει στα πεπερασμένα στοιχεία (FEM) (Foucher et al 2011).



Εικόνα 4.2. Διπλό ορθογωνικό πηνίο που σαρώνει σύστημα δυο πλακών αλουμινίου με διαμπερή οπή και υπό-επιφανειακή ρωγμή (α) Κάτοψη και (β) Πλάγια Όψη (CIVA).

Το λογισμικό CIVA χρησιμοποιήθηκε για να βελτιωθούν οι αρχικές συνθήκες των πρώτων πειραμάτων, οι οποίες ήταν διερευνητικές. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν πηνία διαφόρων σχημάτων για να επιλεγεί αυτό που είχε την καλύτερη διακριτική ικανότητα και στη συνέχεια να κατασκευαστεί το βέλτιστο πηνίο στο εργαστήριο, στο μηχάνημα τυπωμένων κυκλωμάτων. Επίσης, έγινε σειρά προσομοιώσεων για να επιλεγεί η βέλτιστη συχνότητα για την καλύτερη ανίχνευση τόσο επιφανειακών όσο και υπό-επιφανειακών ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου. Με οδηγό το CIVA αποδείχθηκε η σημασία της μικρής απόστασης μεταξύ του μαγνητομέτρου και του υπό εξέταση δοκιμίου και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν βελτιωμένα πειράματα στο εργαστήριο. Επιπλέον, υπήρχε πάντα καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων σε όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν.

Γενικά, οι προβλέψεις που γίνονται με τη χρήση λογισμικών προσομοίωσης έχουν ανάγκη αξιολόγησης και σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα ώστε να επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση της προσομοίωσης. Το στάδιο αυτό καθορίζει την αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης και τη δυνατότητα περαιτέρω χρήσης του (Kincaid 1979). Στην περίπτωσή μας τα αποτελέσματα της ανάλυσης με CIVA επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα που παρέχουν οι πειραματικές μελέτες και με αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνει επακριβώς τις πραγματικές συνθήκες ελέγχου.

### 4.3.Βιβλιογραφικές αναφορές

Alonso A., Hitpmair R. and Valli A., “Mixed Finite Element Approximation of Eddy Current Problems”. IMA J. Numerical Mathematics and Advanced Applications, vol.24, pp 255–271, 2004.

Binns K.J., Lawrenson P.J. and Trowbridge C.W., “The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields”, JohnWiley & Sons, Chichester, 1992.

Bossavit A. and Verite J., “A Mixed FEM/BIEM Method to Solve Eddy-Current Problems”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.18, pp 431–435, 1982.

Bouchala T., Abdelhadi B. and Benoudjit A., “Fast Analytical Modeling of Eddy Current Non-Destructive Testing of Magnetic Material”, Journal of Nondestructive Evaluation, vol.32, pp.294–299, 2013.

Dunbar W.S., “The Volume Integral Method of Eddy Current Modeling”, Journal of Nondestructive Evaluation, vol.5, no.1, pp.9-14, 1985.

Foucher F and Dubois P., “Applications and Recent Evolutions of the CIVA Simulation Platform”, 18th World Conference on Nondestructive Testing/ Durban South Africa, 2012.

Foucher F., Fernande R. and Dubois P., “Recent evolutions of the CIVA simulation platform and applications”, Smart Materials Structures and NDT in Aerospace/ Quebec Canada, 2011.

Huang L., He R. and Z. Zeng, “An Extended Iterative Finite Element Model for Simulating Eddy Current Testing of Aircraft Skin Structure”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.48, no.7, 2012.

Kincaid T. and Chari M., “The Application of Finite Element Method Analysis to Eddy Current Nondestructive Evaluation”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.15, issue: 6, pp.1956 – 1960, 1979.

Lhemery A., Paradis L., Rizzo P., Talvard M. and Benoist P., “Multiple-Technique NDT Simulations of Realistic Configurations at the French Atomic Energy Commission (CEA)”, New Applications in Modelling and Inversion Techniques for Non-Destructive Testing/London, 2009.

Meddahi S. and Selgas V., “A FEM–BEM Formulation for a Time–Dependent Eddy Current Problem”, Numerical Mathematics and Advanced Applications, pp. 1155-1163, 2006.

Miorelli R. (2012,-2014), Προσωπική Επικοινωνία.

Paillard S., Pichenot G., Choua Y., Le Bihan Y., Lambert M., Voillaume H. and Dominguez N., “Modeling of Flawed Riveted Structures for EC Inspection in

Aeronautics”, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 31, pp.217–224,2008.

Rachek M. and Feliachi M., “3-D Movement Simulation Techniques Using FE Methods: Application to Eddy Current Non-Destructive Testing”, *NDT&E International*, vol. 40, pp. 35–42, 2007.

Sarreshtedari F., Pourhashemi A., Asad N., Schubert J., Banzet M. and Fardmanesh M., “An Efficient Finite-Element Approach for the Modelling of Planar Double-D Excitation Coils and Flaws in SQUID NDE Systems”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.20, no.2, pp.76-81, 2010.

Szlagowska-Spychalska J.M., Spychalski M.M. and Kurzydowski K.J., “A Novel Approach for Measuring of Thickness of Induction Hardened Layers Based on the Eddy Current Method and the Finite Element Modeling”, *NDT&E International*, vol.54, pp.56–62, 2013.

Taflove A. and Hagness S., *Computational Electrodynamics: “The Finite-Difference Time-Domain Method”*, Artech House Publishers, 2000.

Yu Y., Li X., Simm A. and Tian G., “Theoretical Model-Based Quantitative Optimisation of Numerical Modelling for Eddy Current NDT”, *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol.26, no.2, pp.129–140, 2011.

Zeng Z., Deng Y., Liu X., Udpa L., Udpa S., Koltenbah B., Bossi R. and Steffes G., “EC-GMR Data Analysis for Inspection of Multilayer Airframe Structures” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.47, no.12, pp.4745–4752, 2011.

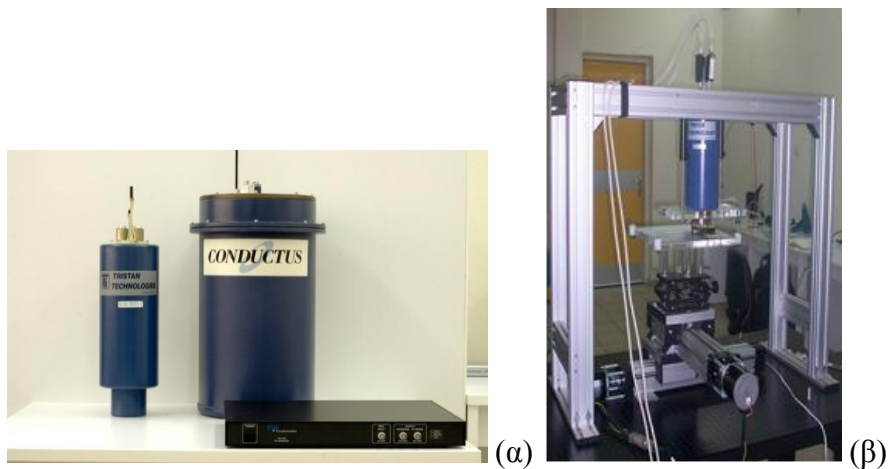
Zhiwei Z., Udpa L. and Udpa S., “Finite Element Model for Simulation of Ferrite-Core Eddy Current Probe”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.46, no.3, pp.905-909, 2010.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z., “*The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*”, Butterworth-Heinemann, Oxford, 6<sup>th</sup> edition, 2005.



## ΚΕΦ.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν δύο SQUID της εταιρείας Tristan Technologies, USA (Εικ.5.1α), το μαγνητόμετρο με ένα πηνίο λήψης και το διπλό μαγνητόμετρο το οποίο θα αποκαλείται βαθμιδόμετρο με δυο πηνία λήψης. Και τα δύο μοντέλα είναι κατασκευασμένα από μονό στρώμα λεπτού υμενίου του υπεραγωγού YBCO και ψύχονται με υγρό άζωτο για να φτάσουν σε συνθήκες υπεραγωγίμης κατάστασης (Star Cryoelectronics). Τα υπεραγωγίμα πηνία λήψης βρίσκονται και στα δύο μοντέλα στο κατώτατο μέρος του κρυοστάτη και βυθίζονται μέσα στο υγρό άζωτο για να αποκτήσουν υπεραγωγίμες ιδιότητες. Τόσο το μαγνητόμετρο όσο και το βαθμιδόμετρο μετρούν την ένταση ενός εφαρμοζόμενου πεδίου (τη συνιστώσα  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου) ( Kreutzbruck 2003).



Εικόνα 5.1. (α) SQUID βαθμιδόμετρο και μαγνητόμετρο και (β) κοινή πειραματική διάταξη.

### 5.1.Περιγραφή μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου SQUID

Το μοντέλο M1000 High-Tc dc SQUID είναι μαγνητόμετρο που αποτελείται από ένα μεγάλο υπεραγωγίμο βρόχο διαστάσεων περίπου  $5\text{mm} \times 8\text{mm}$ . Αντίστοιχα το μοντέλο M1000 High-Tc dc SQUID είναι βαθμιδόμετρο (dual) που αποτελείται από δύο αισθητήρες τοποθετημένους αξονικά σε απόσταση μεταβαλλόμενη από 5 ως 10cm (pcSQUID User's manual) (Εικ. 5.2). Ο υπεραγωγίμος βρόχος, σε αντίθεση με τους μεταλλικούς βρόχους στους οποίους η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη με την αλλαγή της μαγνητικής ροής, ανιχνεύει άμεσα την αλλαγή της μαγνητικής ροής και επομένως η χρήση του είναι κρίσιμη για να διατηρηθεί η ευαισθησία χαμηλής συχνότητας.

Το πλεονέκτημα του μαγνητόμετρου/ βαθμιδόμετρου SQUID είναι η ανεξάρτητη ευαισθησία του από τη συχνότητα του μετρούμενου μαγνητικού σήματος από μερικά Hz ως αρκετά MHz. Αυτό το γεγονός το καθιστά κατάλληλο για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ασυνεχειών σε μεγάλο βάθος, οι οποίες είναι μη ανιχνεύσιμες με την κλασική μέθοδο των δινορρευμάτων εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλει το επιδερμικό φαινόμενο (Jenks et al 1991, Chen et al 2002, Weinstock 1991, Muck et al 2005, Klein et al 1997). Η χρήση υψηλών συχνοτήτων συνήθως τείνει να αυξάνει το πλάτος των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια, παρόλο που η ένταση των δινορρευμάτων μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Επομένως, το βάθος της ασυνέχειας περιορίζεται με τη χρήση υψηλών συχνοτήτων ενώ η χρήση χαμηλών συχνοτήτων με στόχο την αύξηση του βάθους διεύθυνσης ενισχύει την επίδραση του

θορύβου. Το σημαντικό μειονέκτημα του SQUID είναι ότι στο σήμα παρεμβάλλεται ο θόρυβος του περιβάλλοντος λόγω της εξαιρετικής ευαισθησίας του μαγνητόμετρου και έρχεται εύκολα σε κορεσμό με αποτέλεσμα να δυσκολεύει η διεξαγωγή ενός πειράματος (χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα πειράματα γινόταν κυρίως όταν δεν υπήρχε έντονη κινητικότητα από κινητά τηλέφωνα στους γύρω χώρους του εργαστηρίου). Η απόρριψη των σημάτων θορύβου στην περίπτωσή μας έγινε με τη χρήση του βαθμιδόμετρου αντί του μαγνητόμετρου.

Η λογική της χρήσης του βαθμιδόμετρου SQUID είναι η απόρριψη του μεγαλύτερου μέρους του Η/Μ θορύβου του περιβάλλοντος ο οποίος οφείλεται στις μακρινές πηγές, όπως, π.χ., οι ηλεκτρικές γραμμές του κτιρίου, οι μετασχηματιστές και οι γεννήτριες, τα τροφοδοτικά των ηλεκτρονικών συσκευών, καθώς και το ηλεκτρικό σύστημα των διερχόμενων αυτοκινήτων. Στο βαθμιδόμετρο SQUID γίνεται κανονικοποίηση του ενός αισθητήρα ως προς τον άλλο και αφαιρούνται οι τάσεις εξόδου τους. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα από τις μακρινές πηγές, το οποίο έχει σχεδόν ίδιο πλάτος στους δύο πλησίον ευρισκόμενους αισθητήρες, αναιρείται. Αντιθέτως, το μαγνητικό πεδίο των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται σε ένα δοκίμιο τοποθετημένο ακριβώς κάτω από τον έναν αισθητήρα είναι ισχυρό σε αυτόν τον αισθητήρα και αμελητέο στον απώτερο αισθητήρα. Η αφαίρεση, επομένως, των τάσεων εξόδου των δύο αισθητήρων αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστο το σήμα μέτρησης των δινορρευμάτων και απορρίπτει πολύ ικανοποιητικά όλο το θόρυβο του περιβάλλοντος.

Η ευαισθησία του μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου SQUID καθορίζεται από τον εσωτερικό θόρυβο του πεδίου και είναι αντίστοιχα  $100\text{fT/Hz}^{1/2}$  και  $150\text{fT/Hz}^{1/2}$  (pcSQUID User's manual).



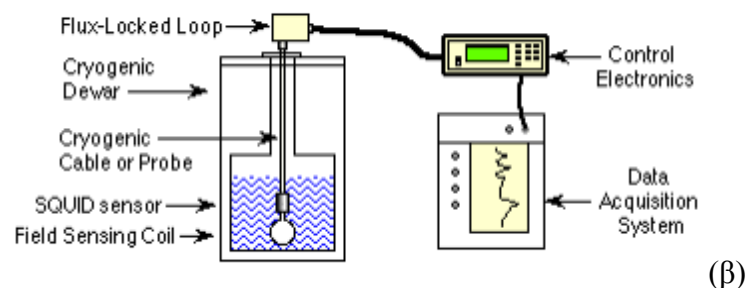
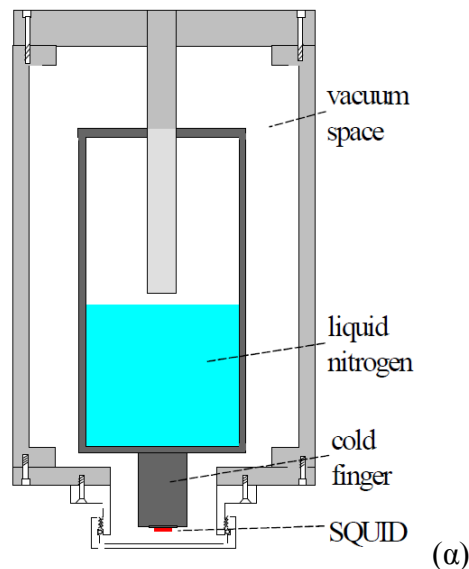
Εικόνα 5.2. Βαθμιδόμετρο SQUID με δύο πηνία λήψης.

Τα χαρακτηριστικά του μαγνητόμετρου είναι:

- Χαμηλό επίπεδο θορύβου (μικρότερο από  $100\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ ).
- Μεγάλη περιοχή βρόχου ( $9.3\text{mm}\times 8.5\text{mm}$  εξωτερικών διαστάσεων και  $3.8\text{mm}\times 3.0\text{mm}$  εσωτερικών διαστάσεων).
- Περιβάλλεται από μονωμένο συμπαγές υλικό.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 76K έως 78K και συνήθως χρησιμοποιείται η 77K.

Αντίστοιχα, τα χαρακτηριστικά του βαθμιδόμετρου είναι:

- Χαμηλό επίπεδο θορύβου (μικρότερο από  $150\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ ) Η ευαισθησία του μαγνητόμετρου SQUID καθορίζεται από τον εσωτερικό θόρυβο του πεδίου.
- Μεγάλη περιοχή βρόχου ( $8.7\text{mm}\times 7.45\text{mm}$  εξωτερικών διαστάσεων και  $3.8\text{mm}\times 2.7\text{mm}$  εσωτερικών διαστάσεων).
- Περιβάλλεται από μονωμένο συμπαγές υλικό.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 75K έως 79K και συνήθως χρησιμοποιείται η 77K.



Εικόνα 5.3. (α) Σχηματικό διάγραμμα μαγνητόμετρου SQUID(Kreutzbruck 2003) και (β) τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος SQUID.

## 5.2. Διαδικασία βαθμονόμησης μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου SQUID

Αρχικά, οι κρυοστάτες του μαγνητόμετρου και του βαθμιδόμετρου SQUID υποβάλλονται σε διαδικασία κενού (Εικ.5.4). Οι διατάξεις παραγωγής κενού αφαιρούν τον αέρα από ένα θάλαμο κενού κατεβάζοντας την πίεση μέσα σε αυτόν σε πολύ χαμηλά επίπεδα (Ohring 2002).



Εικόνα 5.4. Αντλία κενού.

Η εφαρμογή της διαδικασίας κενού στο μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο SQUID γίνεται με στόχο να μην υπάρχουν απώλειες λόγω αγωγής θερμότητας μέσα από τα τοιχώματα του κρυοστάτη μετά την εισαγωγή του υγρού αζώτου.

Το μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο SQUID μετά την διαδικασία κενού και την εισαγωγή αζώτου από δοχείο υγρού αζώτου (Εικ.5.5) εισέρχονται μέσα σε μαγνητικά θωρακισμένο διπλότοιχο δοχείο (Εικ.5.6) κατασκευασμένο από  $\mu$ -metal (σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\sim 600000$ ) για να εξασφαλιστεί η μαγνητική θωράκιση και να μην επηρεαστεί από το θόρυβο που ενυπάρχει στο χώρο (ηλεκτρικός, μαγνητικός). Στη συνέχεια ακολουθεί η βαθμονόμηση τους, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού του SQUID (pc SQUID, PCS100, Control Software v2.4.0). Το λογισμικό ελέγχου του μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου SQUID περιλαμβάνει τον έλεγχο του SQUID, τη λήψη των δεδομένων (data acquisition), την ανάλυση φάσματος (spectrum analysis) και τη βαθμονόμηση (Autotune/Calibration modules).

Μέσα από τη διαδικασία βαθμονόμησης επιτυγχάνεται η ρύθμιση του ρεύματος πόλωσης  $I_B$  και άλλων παραμέτρων του SQUID, με σκοπό την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής απόκρισης τάσης εξόδου ανά κβάντο μαγνητικής ροής  $\Phi_0$  (μεγιστοποίηση ευαισθησίας).



Εικόνα 5.5. Δοχεία αποθήκευσης υγρού αζώτου.



Εικόνα 5.6. Δοχείο μαγνητικής θωράκισης.

### 5.3. Πλάκες αλουμινίου

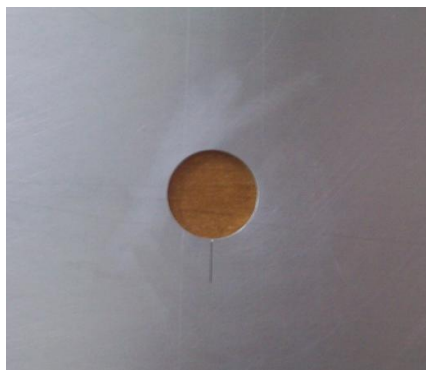
Η συμπεριφορά του μαγνητόμετρου και του βαθμιδόμετρου εξετάστηκε πάνω σε πρότυπες πλάκες αλουμινίου διαφόρων παχών και χαρακτηριστικών. Στον Πίνακα 5.1. παρατίθενται οι ονομασίες των πλακών αλουμινίου και τα χαρακτηριστικά τους που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Σημειώνεται ότι οι πλάκες φέρουν πιστοποιητικό γνησιότητας (VM Products Inc Certificate of Compliance).

**Πίνακας 5.1.** Χαρακτηριστικά πρότυπων πλακών αλουμινίου 300mm×300mm

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΠΑΧΟΣ[mm]	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ		ΜΗΚΟΣ		ΠΛΑΤΟΣ	
		ΟΠΗΣ[mm]	ΡΩΓΜΗ	ΡΩΓΜΗΣ[mm]	ΡΩΓΜΗΣ[mm]	ΡΩΓΜΗΣ[mm]	
VMT1	1	20.00	ΟΧΙ	-	-	-	
VMT1N	1	20.00	ΝΑΙ	9.6	0.2	1.00	
VMT2	2	20.00	ΟΧΙ	-	-	-	
VMT2N	2	20.00	ΝΑΙ	9.9	0.2	2.00	
VMT4N	4	-	ΝΑΙ	30.0	0.3	4.00	
VMT4	4	-	ΟΧΙ	-	-	-	
VMT5N	5	-	ΝΑΙ	30.0	0.2	3.85	
VMT6N	6	-	ΝΑΙ	30.0	0.4	4.00	
VMT8N	8	-	ΝΑΙ	28.7	0.3	4.03	

Η αγωγιμότητα των πλακών μετρήθηκε με ακρίβεια καθώς για τη μέτρησή της χρησιμοποιήθηκε το βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων Phasec 2d. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι όλες οι πλάκες αλουμινίου (VMT1, VMT1N, VMT2, VMT2N, VMT4, VMT5N, VMT6N και VMT8N) έχουν αγωγιμότητα 17MS/m εκτός από τις πλάκες VMT4 και VMT4N, η οποία έχει 17.5MS/m. Οι παραπάνω πλάκες VMT1, VMT1N, VMT2 και VMT2N έχουν οπή στο κέντρο της πλάκας και οι πλάκες VMT1N και VMT2N έχουν δίπλα στην οπή μία ρωγμή (τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον

Πίνακα 5.1.) έτσι ώστε η διάταξή τους να είναι παρόμοια με τις ρωγμές που εμφανίζονται στα αεροπλάνα δίπλα στις οπές από τις οποίες διέρχονται οι ήλοι συναρμογής (Εικ.5.7).



Εικόνα 5.7. Πλάκα Αλουμινίου με οπή και ρωγμή.

Στην τράπεζα εργασίας κάτω από το μαγνητόμετρο SQUID τοποθετήθηκαν οι πρότυπες πλάκες αλουμινίου πάνω σε υλικό fiberglass, μη μεταλλικό και μη σιδηρομαγνητικό. Επίσης, πολύ μεγάλη προσοχή δόθηκε στην αποφυγή χρήσης μαγνητικών υλικών σε απόσταση περίπου 500mm από τις πλάκες αλουμινίου που επιθεωρήθηκαν.

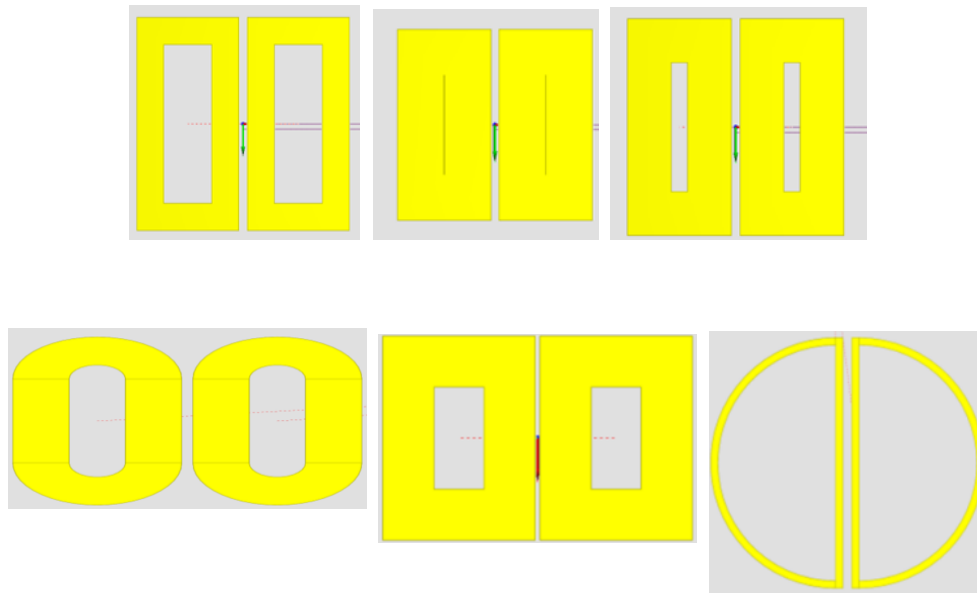
#### 5.4. Πηνίο

Η μέθοδος των δινορρευμάτων απαιτεί τη δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου στο υπό εξέταση δοκίμιο για την ανίχνευση ασυνεχειών. Η μεγάλη ευαισθησία του μαγνητόμετρου/ βαθμιδόμετρου SQUID προϋποθέτει την διασφάλιση χαμηλού μαγνητικού πεδίου στη θέση του, διότι διαφορετικά έρχεται σε κορεσμό και αδυνατεί να ανιχνεύσει τις αλλαγές που θα προκύψουν στο μαγνητικό πεδίο (εξαιτίας της παρουσίας ασυνεχειών). Επομένως είναι πολύ σημαντικό να διασφαλιστεί ταυτόχρονα ισχυρό μαγνητικό πεδίο στο υπό εξέταση δοκίμιο και χαμηλό μαγνητικό πεδίο στη θέση του SQUID. Αυτή η ιδιαιτερότητα της τεχνικής του SQUID καθιστά υποχρεωτική τη χρήση διπλού πηνίου διέγερσης (διαφορετικό από αυτά που χρησιμοποιούνται στις παραδοσιακές τεχνικές δινορρευμάτων). Συγκεκριμένα, η χρήση μονού πηνίου (σύνηθες στη μέθοδο των δινορρευμάτων) στην τεχνική του SQUID προκαλεί ισχυρά επαγόμενο μαγνητικό πεδίο καθώς επίσης και μεγάλη τάση εξόδου, η οποία μπορεί να οδηγήσει το SQUID σε επίπεδα κορεσμού (Nagendran et al 2012). Ο τρόπος αποφυγής του κορεσμού του SQUID με ταυτόχρονη δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου στο υπό-εξέταση δοκίμιο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διπλού συμμετρικού πηνίου διέγερσης (double coil) (τα σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζονται στις Εικ.5.8 και 5.9). Το πηνίο διέγερσης τοποθετείται με ακρίβεια δεκάτου του χιλιοστού ακριβώς κάτω από το κέντρο του SQUID. Η συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου είναι μηδέν στον κεντρικό άξονα του διπλού συμμετρικού πηνίου. Παρόλα αυτά ακόμη και όταν το μαγνητόμετρο τοποθετηθεί ακριβώς στη μέση των δυο μισών του πηνίου υπάρχει μια μικρή αλλά αμελητέα ποσότητα πεδίου. Η χρήση του διπλού συμμετρικού πηνίου μειώνει τα σήματα θορύβου και διευκολύνει την ανίχνευση μικρών βαθιών ασυνεχειών. Η παρουσία ρωγμής σε μεταλλικά δοκίμια ανιχνεύεται από τη μέτρηση της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου καθώς ο μαγνητικός αισθητήρας μετακινείται από μια περιοχή χωρίς ρωγμή σε μία περιοχή που περιλαμβάνει ρωγμή. Ένα μη μηδενικό μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται όταν υπάρχει κάποια ασυμμετρία κάτω από το σύστημα μέτρησης.

Στο εργαστήριο υπάρχει συσκευή κατασκευής πηνίων PCB (printed circuit board) (όπως φαίνεται στην Εικ.5.10) με την οποία σχεδιάστηκαν οι ακριβείς διαστάσεις των πηνίων που χρησιμοποιήθηκαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων, μετά από θεωρητική διερεύνηση που έγινε στο λογισμικό πρόγραμμα CIVA. Η φάση μεταξύ της τάσης εξόδου του SQUID και του ρεύματος του πηνίου υπολογίστηκε για κάθε συχνότητα πειράματος με το πηνίο στον αέρα και ακρίβεια  $0.1^\circ$ . Με αυτό τον τρόπο βρίσκονται συνεχώς σε φάση ο ενισχυτής σήματος με το ρεύμα διέγερσης του πηνίου και συνεπώς τα πειραματικά αποτελέσματα είναι άμεσα συγκρίσιμα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς.



Εικόνα 5.8. Απεικόνιση διπλών πηνίων PCB.



Εικόνα 5.9. Απεικόνιση πηνίων διεγέρσεων στο λογισμικό προσομοίωσης CIVA.



Εικόνα 5.10. Συσκευή κατασκευής πηνίων PCB (printed circuit board).

### 5.5.Σαρωτής XY

Μία πολύ σημαντική απαίτηση στην πειραματική διάταξη με το μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο SQUID είναι ο σαρωτής (Εικ.5.11α), ο οποίος μετακινεί το υπό-εξέταση δοκίμιο κάτω από το σταθερό σύστημα SQUID. Οι τράπεζες εργασίας και οι σαρωτές του εμπορίου λόγω των μαγνητικών υλικών που περιλαμβάνουν δημιουργούν υψηλό μαγνητικό θόρυβο. Η τράπεζα εργασίας που υπάρχει στο εργαστήριο είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο, μήκους εργασίας 900mm. Ο σαρωτής XY έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η σάρωση επίπεδων δοκιμίων με ακρίβεια 0.01mm (NI PXI-1033 User Manual). Επίσης, η περιοχή σάρωσης είναι 300mm×300mm, με βήμα από 0.01mm έως 2mm και ταχύτητα από 1 έως 50mm/sec. Τα χαρακτηριστικά του XY σαρωτή είναι η ελεγχόμενη βάση, μια υποστηρικτική πλατφόρμα που μετακινείται με σταθερό βήμα (το οποίο καθορίζεται από το χρήστη) πάνω σε μια λεία επιφάνεια και απαιτούνται μη μεταλλικές στηρίξεις. Σημειώνεται ότι κίνηση που κάνει ο σαρωτής στον άξονα X και Y είναι ελεγχόμενη από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι εντολές κίνησης δίνονται με τη χρήση του μοντέλου Parker XL80i (με χωρική ακρίβεια συστήματος σάρωσης 40μm) (Εικ.5.11β).



(α)



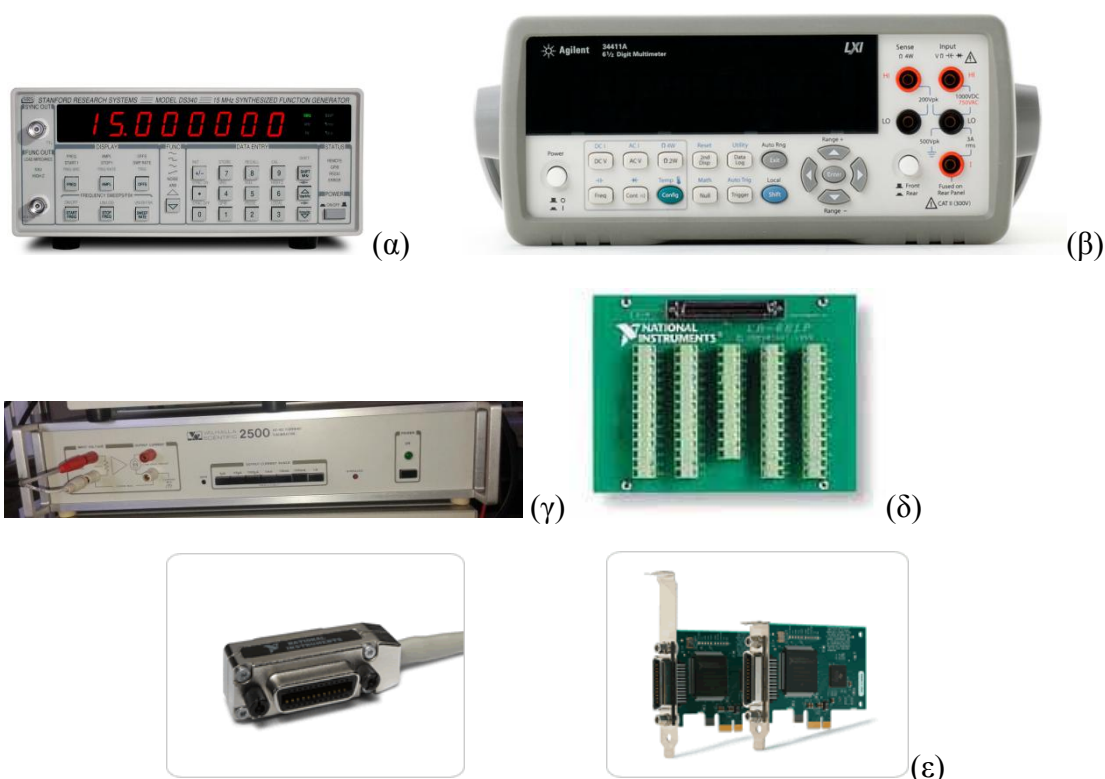
(β)

Εικόνα 5.11. Σαρωτής XY και ελεγκτής Parker XL80i.



## 5.6. Ηλεκτρονική διάταξη

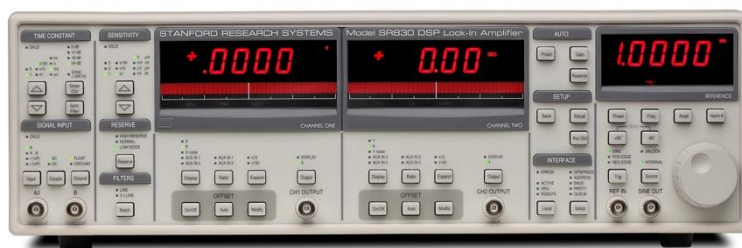
Η ηλεκτρονική διάταξη αποτελείται από τη γεννήτρια σήματος (Standard Research System, Εικ.5.12α), το πολύμετρο (Agilent 34411a, στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε και ως αμπερόμετρο και ως βολτόμετρο, Εικ.5.12β), τη γεννήτρια ρεύματος (Valhala Scientific 2500AC-DC Current Calibrator, Εικ.5.12γ) και την κάρτα PCI GPIB, General Purpose Interface Bus, (IEEE-488, National Instrument, Εικ.5.12ε), μέσω της οποίας ελέγχονταν το μαγνητόμετρο από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την ψηφιοποίηση του σήματος του πηνίου ανίχνευσης, χρησιμοποιήθηκε κάρτα συλλογής δεδομένων (Data acquisition card) της National Instruments (Εικ.5.12δ) με την οποία έγινε η συλλογή των δεδομένων από το πηνίο ανίχνευσης απευθείας στον υπολογιστή χωρίς την παρέμβαση κάποιου άλλου οργάνου.



Εικόνα 5.12. (α) Γεννήτρια σήματος (Synthesized function generator, model ds 340 - 15MHz, Standard Research System), (β) πολύμετρο (Agilent 34411a, 6112 digital multimeter), (γ) γεννήτρια ρεύματος (Valhala Scientific 2500AC-DC current calibrator), (δ) κάρτα συλλογής δεδομένων (Data acquisition card της National Instruments) και (ε) κάρτα PCI GPIB. .

Για τη μέτρηση του σήματος από τα πηνία ανίχνευσης χρησιμοποιήθηκε και ένας ενισχυτής Lock-in (Εικ.5.13). Ο ενισχυτής Lock-in αποτελεί μια τυπική διάταξη, ευρύτατης χρήσης, η οποία είναι κατάλληλη για την ενίσχυση χαμηλόσυχνων (σχεδόν σταθερών), αλλά ασθενών σημάτων. Ο ενισχυτής Lock-in, αποτελεί ένα “ιδανικό” φίλτρο που επιτρέπει να περάσουν σήματα των οποίων οι συχνότητες ανταποκρίνονται στη συχνότητα αναφοράς (Tumanski 2011) καθώς ένα ηλεκτρικό κύκλωμα είναι μια επιπρόσθετη πηγή θορύβου. Η λειτουργία του βασίζεται στη διαμόρφωση, εκλεκτική ενίσχυση, συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση και πέρασμα του σήματος από χαμηλοπερατό φίλτρο. Επομένως, ο Lock-in (γνωστός και ως ανιχνευτής ευαίσθητος στη φάση του σήματος-phase sensitive detector-) μπορεί να μετρήσει και να ενισχύσει ένα σήμα ορισμένης συχνότητας  $f$  το οποίο βρίσκεται σε

φάση με ένα σήμα αναφοράς το οποίο διεγείρει τη μετρητική διάταξη. Η επεξεργασία σήματος μπορεί να συντελέσει στην καταστολή του θορύβου. Ο λόγος που είναι σημαντικό αυτό το γεγονός είναι ότι το σήμα θορύβου είναι ένα σύνθετο σήμα που προκύπτει από τυχαία σήματα διαφόρων συχνοτήτων. Σε ένα ενισχυτή Lock-in, το αρχικό σήμα υφίσταται προ-ενίσχυση και κατόπιν περνά από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο εξαιρετικά στενού εύρους συχνοτήτων με αποτέλεσμα να διέρχεται μόνο το σήμα που είναι σε φάση με το σήμα αναφοράς (το dc-σήμα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην ενισχύεται ο θόρυβος. Το τελικό dc-σήμα ενισχύεται από 0-10 volts για κάθε κλίμακα σήματος.



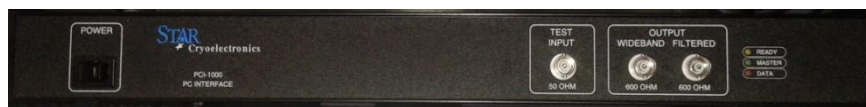
Εικόνα 5.13. Ο ενισχυτής Lock in.

Η συνδεσμολογία έχει ως εξής:

Αρχικά, η γεννήτρια σήματος, συνδέεται με τη γεννήτρια ρεύματος και αυτή με τη σειρά της συνδέεται με το πηνίο. Η έξοδος από την γεννήτρια ρεύματος χρησιμοποιήθηκε για την αρμονική διέγερση του πηνίου και αποτέλεσε την αναφορά για τον ενισχυτή σήματος (Lock-in). Η έξοδος της γεννήτριας σήματος συνδέεται με το Lock-in. Ο Lock-in συνδέεται με την κάρτα δεδομένων (Data Acquisition), τη γεννήτρια σήματος καθώς και την έξοδο τάσης του SQUID (μέσω του μονοκάναλου όταν χρησιμοποιήθηκε το μαγνητόμετρο SQUID και του πολυκάναλου όταν χρησιμοποιήθηκε το βαθμιδόμετρο SQUID) (Εικ.5.14).



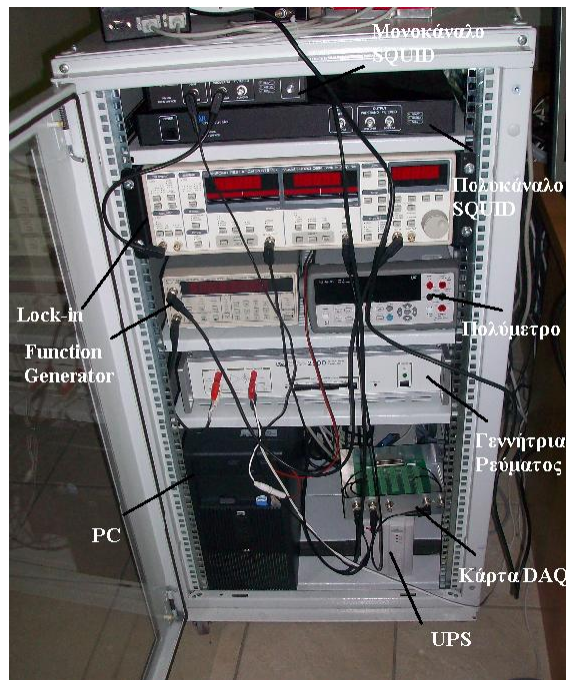
(α)



(β)

Εικόνα 5.14. (α) Το μονοκάναλο του μαγνητομέτρου SQUID και (β) το πολυκάναλο του βαθμιδομέτρου SQUID (PCI-1000, pcSQUID User's manual ).

Η πειραματική διάταξη με τη χρήση του μαγνητόμετρου και του βαθμιδομέτρου SQUID στοχεύει την καλύτερη αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N) ακόμη και στις χαμηλές συχνότητες λειτουργίας. Ο λόγος S/N για το μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο που χρησιμοποιήσαμε είναι  $10^3$  και αυξάνει όσο στενεύει το φίλτρο του ενισχυτή Lock-in. Η αύξηση του λόγου S/N βελτιώνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία της μέτρησης.



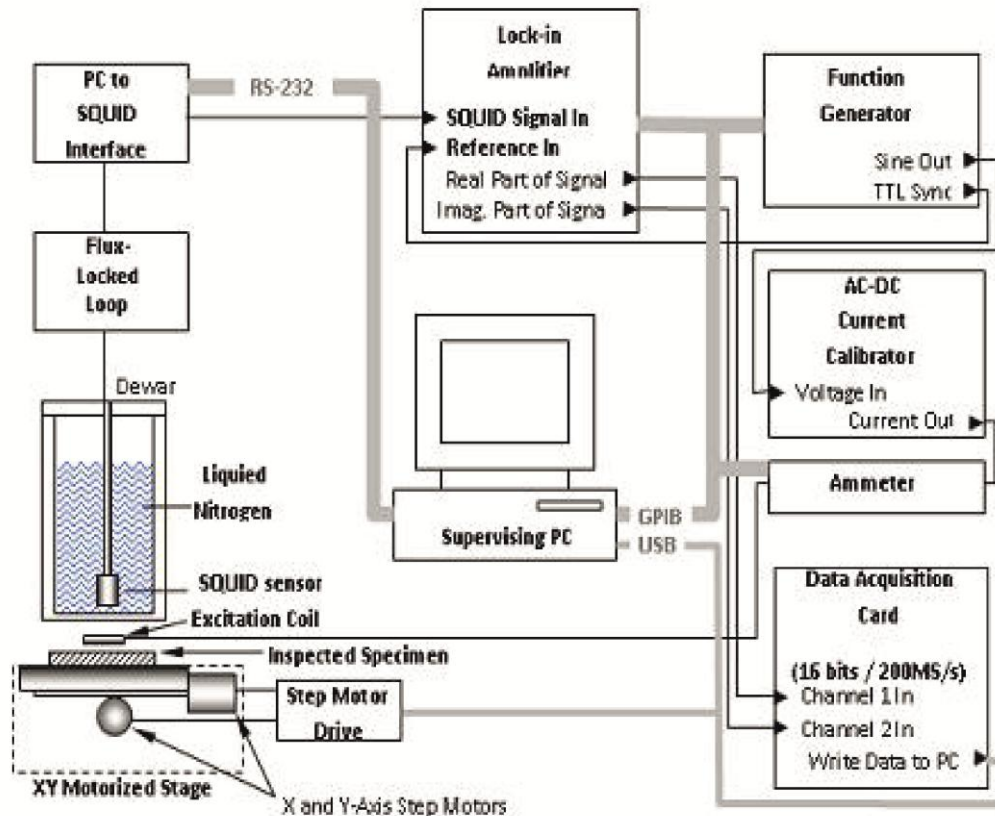
Εικόνα 5.15. Ηλεκτρονική συνδεσμολογία.

Για το έλεγχο των οργάνων και την καταγραφή των μετρήσεων αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού LabVIEW της National Instruments. Η γλώσσα LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) είναι ένα προγραμματιστικό περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού για τον έλεγχο εργαστηριακών συσκευών, γραφικής απεικόνισης και αποθήκευσης των μετρήσεων (Πουλάκης 2005). Στη συγκεκριμένη γλώσσα ο προγραμματισμός επιτυγχάνεται σε διαγραμματικά μπλόκ (Καλοβρέκτης 2007). Επίσης προσφέρει και πολλές διευκολύνσεις όπως ρουτίνες για την απεικόνιση των μετρήσεων, την επεξεργασία τους (φιλτράρισμα, Fast Fourier Transform κλπ) και την αποθήκευσή τους σε αρχείο. Για την κατασκευή του προγράμματος του μαγνητόμετρου και βαθμιδόμετρου ακολουθήθηκε η μεθοδολογία των «εντολών προς εκτέλεση». Ο προγραμματισμός στο Labview γίνεται μέσα από δύο οθόνες: το παράθυρο γραφικών (Front Panel) και το τμήμα του διαγράμματος (Block Diagram). Κάθε εργαλείο που χρησιμοποιείται εμφανίζεται και στις δύο οθόνες. Στο Front Panel έχουμε την αλληλεπίδραση με το χρήστη που κάνει τη μέτρηση ενώ στο Block Diagram φαίνεται η ροή της πληροφορίας και ο τρόπος λειτουργίας της εικονικής διάταξης. Βέβαια, κάθε εργαλείο έχει δικό του μενού για τη λεπτομερή ρύθμιση της λειτουργίας του.

### 5.7.Σύστημα λήψης δεδομένων

Η Εικ.5.16. δείχνει την πειραματική διάταξη του συστήματος SQUID, στο οποίο γίνεται η μετακίνηση του υπό-εξέταση δοκιμίου με το σαρωτή XY. Η οποιαδήποτε αλλαγή στη μαγνητική ροή προκαλεί την επαγωγή ενός νέου ρεύματος στο βρόχο. Η σύνδεση του μαγνητόμετρου με το βρόχο κλειδωμένης ροής FLL (flux locked loop) δημιουργεί μια τάση εξόδου ανάλογη του μαγνητικού πεδίου. Ο παλμογράφος χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των σημάτων του μαγνητόμετρου SQUID με τη χρήση του βέλτιστου ρεύματος, το πλάτος της ροής, κ.α. Το σύστημα λήψης αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Labview. Ο χρήστης επιλέγει για κάθε σάρωση την αρχική θέση, το διάστημα που θα σαρώσει, την ταχύτητα σάρωσης και την τελική θέση του δοκιμίου. Το δοκίμιο σαρώνεται κάτω από το μαγνητόμετρο

SQUID και η έξοδός του καταγράφεται στον Η/Υ. Για κάθε βήμα στέλνεται ένας TTL παλμός στο data logger (τύπου Agilent), το οποίο αποθηκεύει τα δεδομένα του σε ένα buffer όταν ένας παλμός έρχεται από τη μονάδα ελέγχου. Τα πρώτα δεδομένα έχουν συγκεντρωθεί σε ένα λογισμικό ενεργοποίησης παλμού (software trigger). Μετά από κάθε σάρωση στον άξονα που ορίστηκε, το δοκίμιο μετακινείται ανά βήμα με το καθορισμένο βήμα που ορίστηκε. Τα δεδομένα μεταφέρονται στον υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση. Σε κάθε σάρωση καταγράφεται η ακριβής θέση και μεταφέρεται σαν ψηφιακό δεδομένο.



Εικόνα 5.16. Πειραματική διάταξη του συστήματος Μη Καταστροφικού Ελέγχου με το μαγνητόμετρο SQUID.

Η πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών με τη μέθοδο των δινορρευμάτων και την τεχνική του SQUID σε ένα εύρος συχνοτήτων τόσο χαμηλών όσο και υψηλών. Η τεχνική στηρίζεται στη δημιουργία δινορρευμάτων μέσα σε ένα αγωγίμο δοκίμιο όπου υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο που έχει προκύψει από τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Στην τεχνική του μαγνητόμετρου SQUID η παρουσία ρωγμών μετριέται άμεσα από το μαγνητόμετρο. Οι ασυνέχειες διαταράσσουν την πορεία των επαγόμενων δινορρευμάτων μέσα στο αγωγίμο δοκίμιο και εμφανίζονται ως μαγνητικές διαταραχές στο σημείο που σαρώνεται κάτω από το μαγνητόμετρο. Το πλάτος και το μέγεθος της μαγνητικής διαταραχής ανταποκρίνονται στην παρουσία ασυνέχειας και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της όπως μέγεθος, προσανατολισμός ασυνέχειας, κ.α. Οι αλλαγές που θα προκύψουν στη ροή των επαγόμενων δινορρευμάτων εξαιτίας της παρουσίας ασυνέχειας φαίνονται σαν αλλαγές στο σήμα της μαγνητικής ροής που ανιχνεύεται από το μαγνητόμετρο SQUID καθώς σαρώνει το υπό-εξέταση δοκίμιο. Γίνεται η καταγραφή τόσο του πραγματικού μέρους (βρίσκεται σε φάση με το ρεύμα διέγερσης) όσο και του φανταστικού μέρους ( $90^\circ$  εκτός φάσης από το ρεύμα διέγερσης) της τάσης του μαγνητόμετρου/ βαθμιδόμετρου SQUID ανάλογη των αλλαγών της μαγνητικής ροής.

Η έξοδος από το μαγνητόμετρο/ βαθμιδόμετρο ενισχύεται από τον ενισχυτή Lock-in του οποίου το κανάλι αναφοράς τροφοδοτείται από έναν ταλαντωτή (oscillator). Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Η/Υ ανάλογα με τις συντεταγμένες της ασυνέχειας στο υπό-εξέταση δοκίμιο με τη βοήθεια ενός σαρωτή ακριβείας (XY). Τα τελικά αποτελέσματα καταγράφονται και πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή μεταφοράς του SQUID  $1.71 \Phi_0/V \times 8.78 \text{ nT}/\Phi_0 = 15.78 \text{ nT}/V$ . Ο συντελεστής  $8.78 \text{ nT}/\Phi_0$  δίνεται από τον κατασκευαστή του μαγνητόμετρου SQUID και δίνει την αναλογία  $\Phi_0/V$ , η οποία αλλάζει κάθε φορά που αλλάζει η πειραματική διάταξη.

## 5.8.Βιβλιογραφικές αναφορές

Agilent 4284A/4285A, Precision LCR meter Family, Technical Overview, 2004.

Chen L., Li J. and Ong C.K., “Novel Excitation Coils for Non-Destructive Evaluation of Non-Magnetic Metallic Structures by High-Tc Dc SQUID”, *Superconductor Science and Technology*, vol.15, no.6, pp.855-858, 2002.

Jenks W.G, Sadeghi S.S.H. and Wikswo J.P., “SQUIDs for Nondestructive Evaluation”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol.30, pp.293-323, 1997.

Klein U., Walker M.E., Carr C., McKirdy D.M., Pegrum C.M., Donaldson G.B., Cochran A. and Nakane H., “Integrated Low-Temperature Superconductor SQUID Gradiometers for Nondestructive Evaluation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.7, no.2, pp. 3037-3039, 1997.

Kreutzbruck M.V., “Unrivalled Sensitivity- SQUIDs in Nondestructive Testing“, *High Temperature Superconductivity 2-Engineering Applications*, Narlikar A.V.(Ed.), Springer (Heidelberg), pp.223-297, 2003.

Mück M., Korn M., Welzel C., Grawunder S. and Schölz F., “Nondestructive Evaluation of Various Materials Using a SQUID-Based Eddy-Current System”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.15, no.2, pp.733-736, 2005.

Nagendran R. and Janawadkar M.P., “Nondestructive Testing Methods and New Applications”, Ch.2: SQUID Based Nondestructive Evaluation, *Nondestructive testing methods and new applications*, Mohammad Omar (Ed.), InTech, pp.25-52, 2012.

NI PXI-1033 User Manual, National Instruments, February 2011.

Ohring M., “Vacuum Science and Technology”, in *Materials Science of Thin Films*, Academic Press: San Diego, pp. 57–93, 2002.

pcSQUID Software, STAR Cryoelectronics PCS 100DA version 2.4.0.

pcSQUID™User’s Manual, STAR Cryoelectronics, [www.starcryo.com](http://www.starcryo.com).

Tumanski S., “Handbook of Magnetic Measurements”, CRC Press, 2011.

Weinstock H., “A Review of SQUID Magnetometry Applied to Nondestructive Evaluation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.27, no.2, pp.3231-3236, 1991.

Καλοβρέκτης Κ.Π., LABVIEW για Μηχανικούς Προγραμματισμός Συστημάτων DAQ, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, σελ.170-180, 2007.

Πουλάκης Ν., “Εισαγωγή στα συστήματα SCADA, Σημειώσεις Θεωρίας και Εργαστηρίου”, ΤΕΙ Δυτ. Μακεδονίας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ, 2005.

# ΚΕΦ.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ SQUID

Η πειραματική διάταξη που περιγράφεται στο Κεφ.5 χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών πειραμάτων. Τα αρχικά πειράματα ήταν διερευνητικά και αποτέλεσαν οδηγό για τη μετέπειτα έρευνα. Οι βέλτιστες συνθήκες για τη διεξαγωγή τους προέκυψαν μετά από διερεύνηση στο λογισμικό CIVA σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των πρώτων πειραμάτων. Το SQUID αποτέλεσε το βασικό αισθητήρα για την έρευνα επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου με διάφορα πάχη.

## **6.1.Διερευνητικά πειράματα με τη χρήση του μαγνητομέτρου SQUID σε πρότυπες πλάκες αλουμινίου**

### **6.1.1.Πειράματα με το πηνίο A**

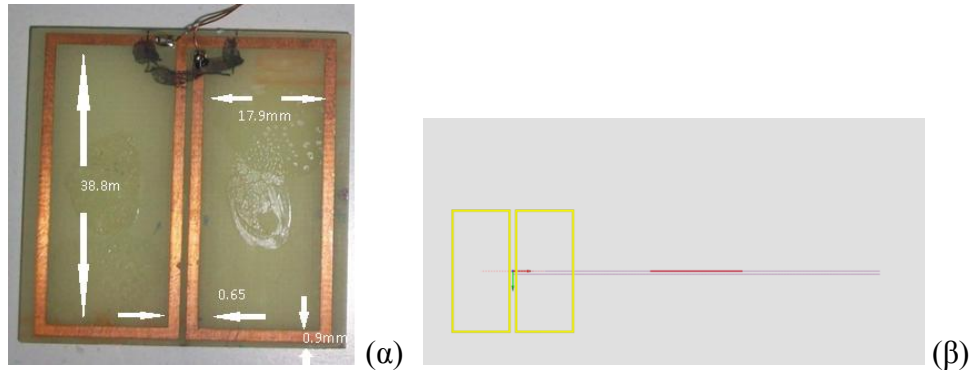
Το αρχικό πηνίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν διπλό ορθογωνικό, λόγω ευκολίας κατασκευής, διαστάσεων 38.8mm×17.9mm, πάχους 0.9mm, ύψους 0.03mm, μίας στροφής (Πηνίο A) όπως φαίνεται και στην Εικ.6.1.1α. Το διπλό πηνίο τοποθετείται πάνω στο μαγνητόμετρο SQUID, ακριβώς κάτω από τον αισθητήρα. Είναι σημαντική η σωστή τοποθέτηση του διπλού πηνίου καθώς πρέπει το κέντρο του αισθητήρα να βρίσκεται στη μέση των δύο πηνίων ώστε όταν εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο η ροή που μεταβάλλεται να έχει ίδιο μέτρο και αντίθετη φορά δίνοντας συνολική μεταβολή θορύβου ίση με το μηδέν. Επίσης υπολογίζεται η φάση (μεταξύ της τάσης εξόδου του SQUID και του ρεύματος) του πηνίου για κάθε συχνότητα που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα καθώς αυτή μεταβάλλεται με την εκάστοτε συχνότητα. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για την ευθυγράμμιση του πηνίου σε σχέση με την πλάκα που θα ελεγχθεί.

Στην αρχή επιθεωρήθηκαν οι πλάκες των 8mm VMT8N και 1mm VMT1N με και χωρίς ρωγή (τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στο Κεφάλαιο 5). Καθώς οι πλάκες σαρώνονται από το μαγνητόμετρο SQUID, η παρουσία των ρωγμών καταγράφεται σαν αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο ανάλογα με τις ακριβείς συντεταγμένες των ρωγμών. Για κάθε σάρωση οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες της τάσης εξόδου του μαγνητομέτρου καταγράφηκαν με τη βοήθεια του ενισχυτή Lock-in.

Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πλάκα αλουμινίου πάχους 8mm, VMT8N με 39.9mm απόσταση του αισθητήρα από την πλάκα αλουμινίου, η οποία προκύπτει από το άθροισμα της απόστασης dewar-πλάκας (22.3mm) και απόσταση SQUID-dewar (17.6mm). Η απόσταση αυτή έγινε αποδεκτή μετά από σειρά πειραμάτων στα οποία το μαγνητόμετρο έδωσε τελικά σήμα με μηδενική μεταβολή ροή θορύβου. Η σάρωση έγινε κατά μήκος της ρωγμής (όπως φαίνεται στην Εικ.6.1.1β, σε δύο συχνότητες 325Hz και 1025Hz, όπου τα αντίστοιχα βάθη διείσδυσης είναι 6.7mm και 3.8mm). Η απόσταση μεταξύ του πηνίου και της πλάκας αλουμινίου VMT8N είναι 2.5mm.

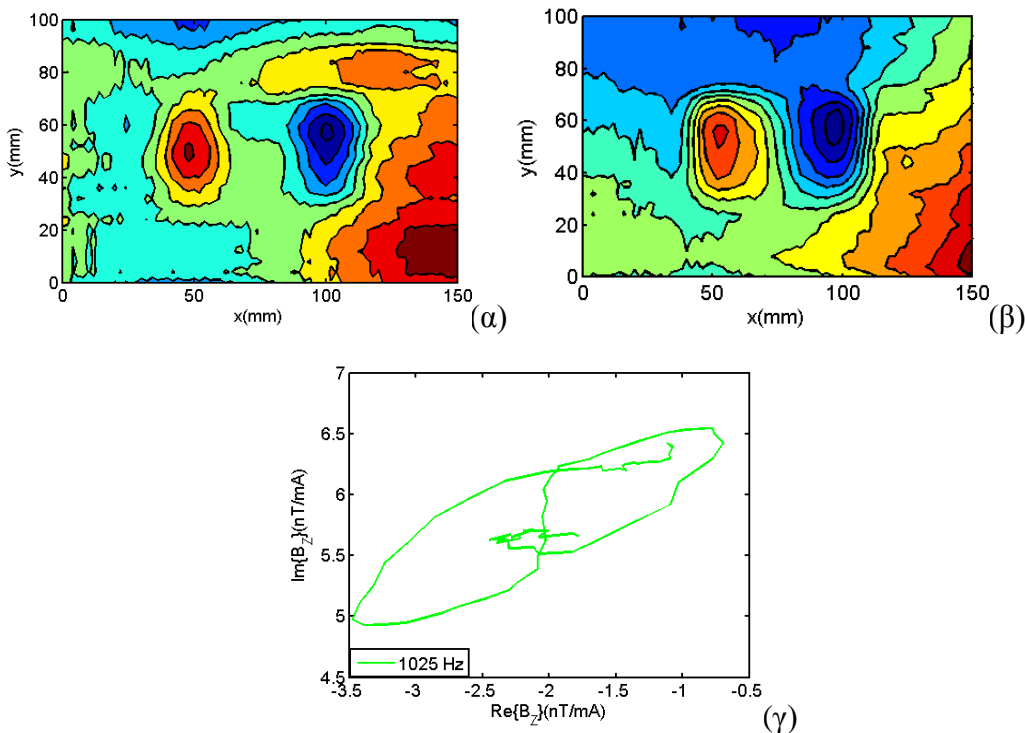
Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σχετίζεται με την ένταση του πεδίου που θα προκύψει από τις ρωγμές, η οποία πολλές φορές είναι κατά πολύ μικρότερη από την

ένταση του πεδίου διέγερσης. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που κάποιος προσπαθεί να δημιουργήσει υψηλό πεδίο έντασης στο δοκίμιο αλλά ένα χαμηλής έντασης πεδίο διέγερσης στη θέση του μαγνητομέτρου SQUID. Ένα συμμετρικό διπλό πηνίο διέγερσης χρησιμοποιείται ώστε το πεδίο διέγερσης στο κέντρο του πηνίου να είναι μηδέν. Παρόλα αυτά ακόμη και όταν το μαγνητόμετρο τοποθετείται ακριβώς στη μέση των δυο μισών του πηνίου υπάρχει μια μικρή αλλά αμελητέα ποσότητα πεδίου. Η χρήση του διπλού συμμετρικού πηνίου επίσης μειώνει τα σήματα θορύβου και διευκολύνει την ανίχνευση μικρών βαθιών ασυνεχειών.



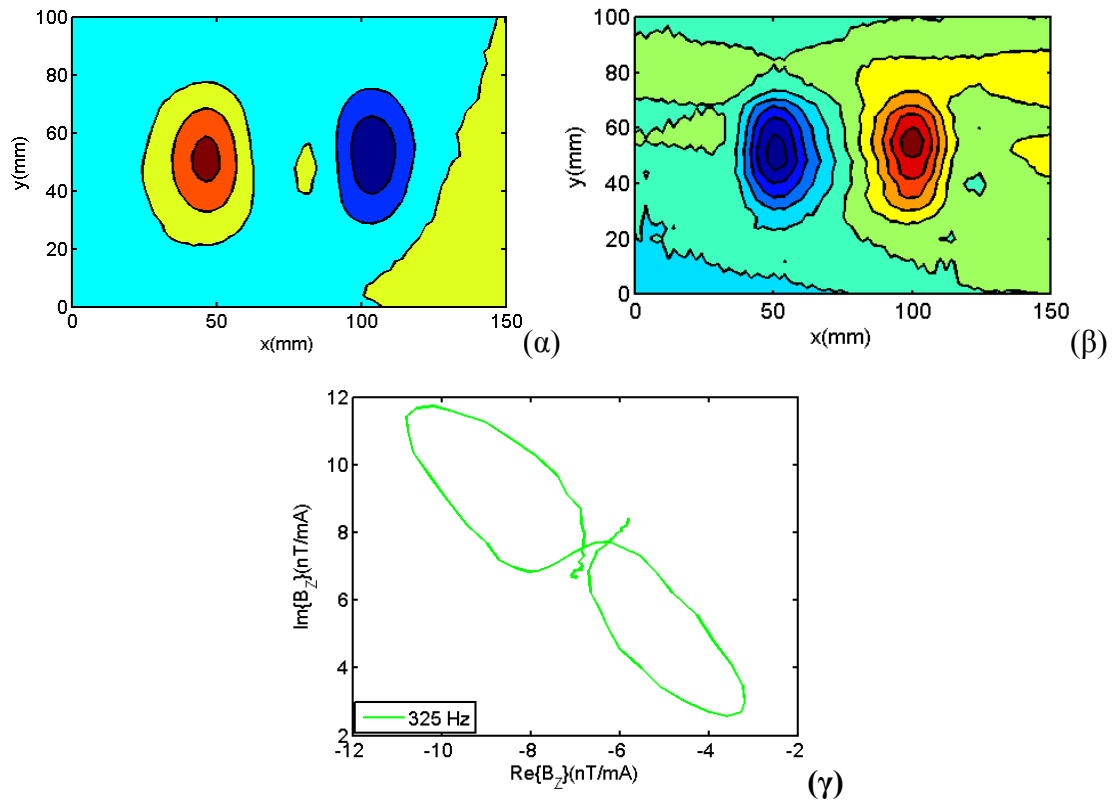
Εικόνα 6.1.1. (α) Πηνίο Α (διπλό ορθογωνικό πηνίο τυπωμένου κυκλώματος) και (β) σάρωση κατά μήκος της ρωγμής (προσομοίωση στο CIVA).

Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις σαρώσεις στην πλάκα VMT8N στις δύο συχνότητες. Συγκεκριμένα, στις Εικ.6.1.2-6.1.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σάρωση της πλάκας VMT8N σε συχνότητα 1025Hz με ρεύμα 0.08mA, ενώ στην Εικ.6.1.4-6.1.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη σάρωση της πλάκας VMT8N σε συχνότητα 325Hz και ρεύμα 0.4mA.



Εικόνα 6.1.2. α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής σε συχνότητα 1025Hz, Πλάκα VMT8N.

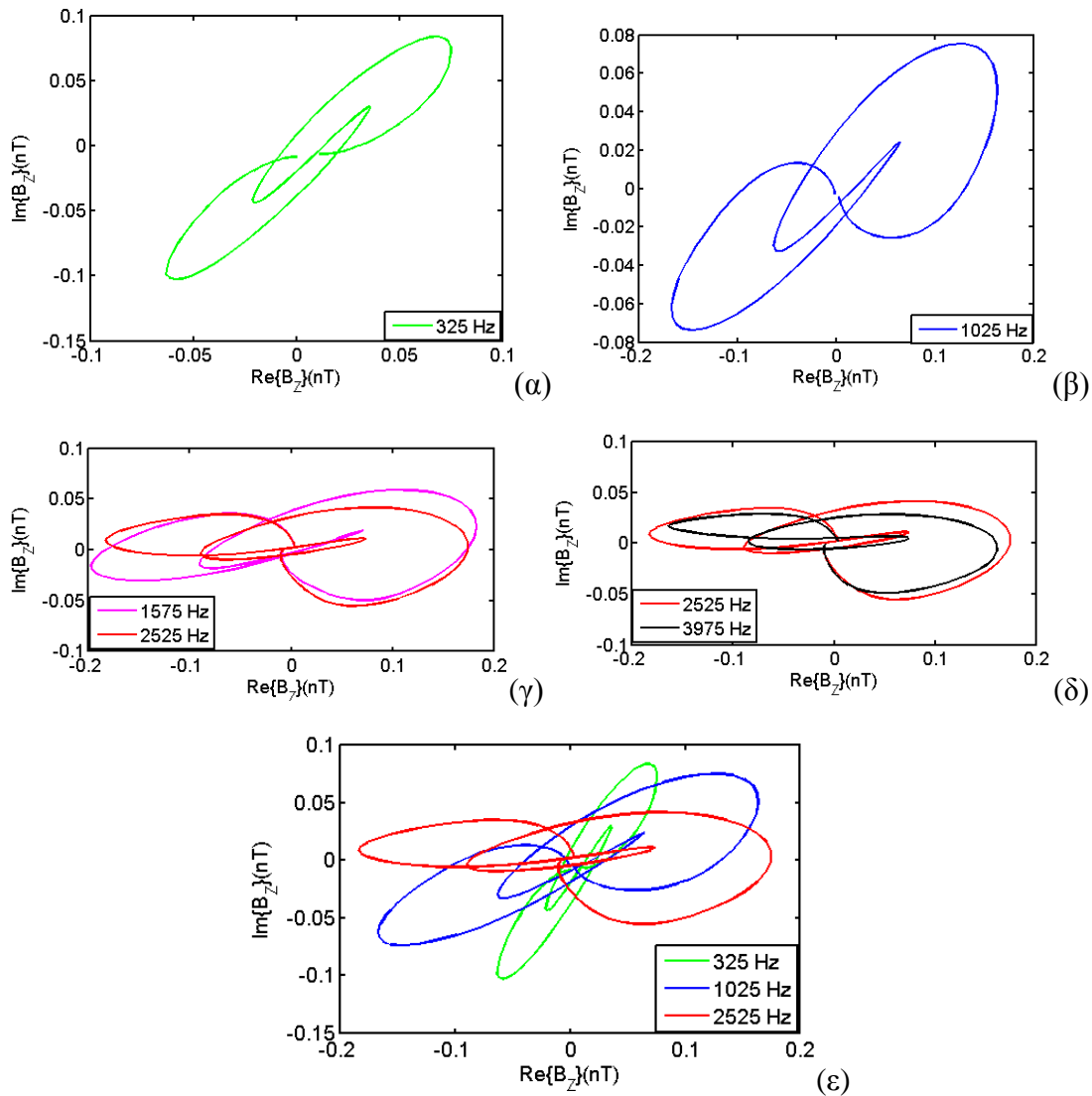




Εικόνα 6.1.3. α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής σε συχνότητα 325Hz, Πλάκα VMT8N.

Στις απεικονίσεις παρατηρείται ότι οι δύο συχνότητες κατά τη σάρωση της πλάκας VMT8N έχουν έντονες διαφορές και το πρόβλημα οφείλεται στην διαφορετική ένταση ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε. Στη συχνότητα των 1025 Hz η απόκριση του σήματος από τη ρωγμή δεν είναι τόσο ισχυρή σε σχέση με το σήμα από την απόκριση της πλάκας διότι το ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ μικρής έντασης, μόλις 0.08mA. Στη συχνότητα των 325Hz χρησιμοποιήθηκε ρεύμα έντασης 0.4mA το οποίο ενίσχυσε το σήμα της ρωγμής σε σχέση με την απόκριση της πλάκας. Επομένως το σήμα της ρωγμής αλλάζει μαζί με την απόκρισή της πλάκας με την ένταση του ρεύματος που χρησιμοποιείται. Σημειώνεται ότι το ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε στα επόμενα πειράματα (μέχρι την ολοκλήρωση της διατριβής) ήταν μεγαλύτερο από τα πρώτα πειράματα (της τάξεως των Ampere, περίπου 0.1Amp). Επομένως, όλα τα επόμενα αποτελέσματα (οι συνιστώσες) της τάσης εξόδου δίνονται σε nT/A.

Στη συνέχεια έγινε στο εργαστήριο διερεύνηση με το πηνίο A για την εύρεση της βέλτιστης συχνότητας όπου η απόκριση του σήματος της ρωγμής έχει τη μέγιστη τιμή. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πλάκα VMT1N (τα χαρακτηριστικά της αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5). Οι σαρώσεις έγιναν σε διαφορετικές συχνότητες και συγκεκριμένα στις συχνότητες 325Hz, 1025Hz, 1575Hz, 2525Hz και 3975Hz με αντίστοιχα βάθη διείσδυσης: 6.3mm, 3.8mm, 3.1mm, 2.5mm, 1.9mm.

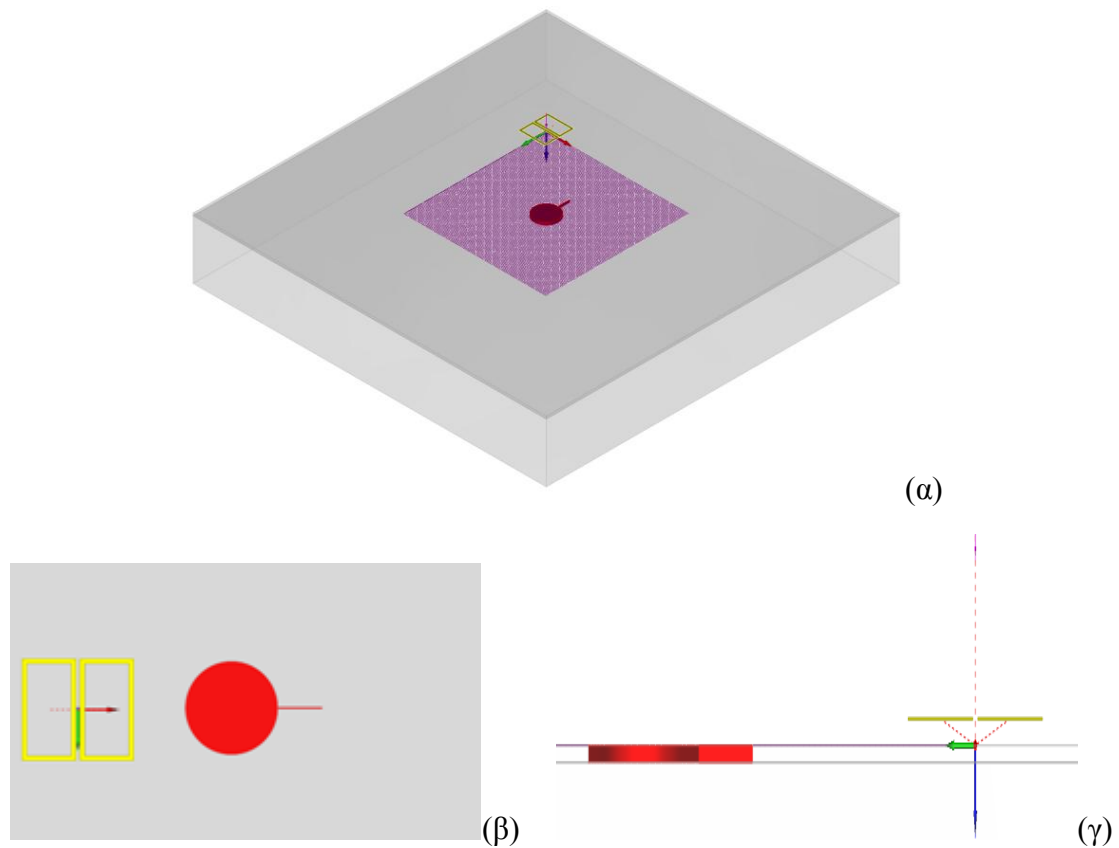


Εικόνα 6.1.4. Σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής (α) συχνότητα 325Hz, (β) συχνότητα 1025Hz, (γ) συχνότητες 1575 και 2525Hz, (δ) συχνότητες 2525 και 3975Hz και (ε) συχνότητες 325 Hz, 1025 Hz και 2525Hz, Πλάκα VMT1N.

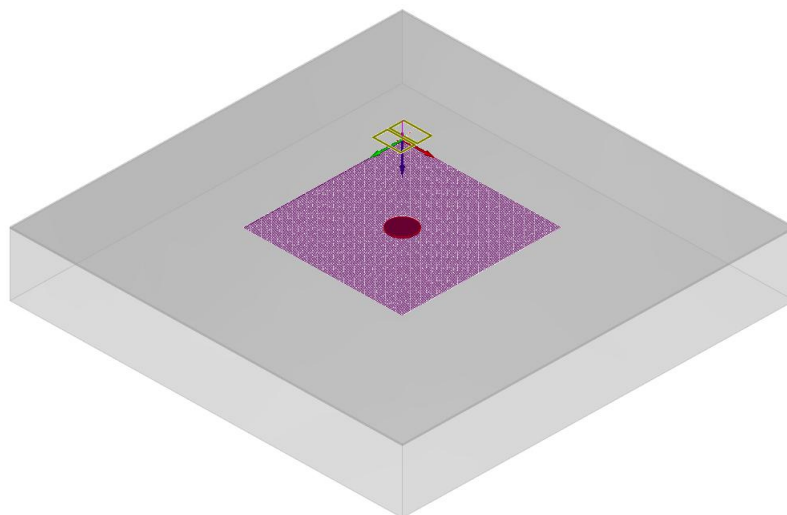
Στην Εικ.6.1.4 φαίνεται ότι οι συχνότητες 1575, 2525 και 3975 δίνουν παρόμοια σήμα. Η διαφορά έγκειται στη συχνότητα των 325Hz, όπου ο λοβός είναι στενός και το σήμα λιγότερο ισχυρό από τις υπόλοιπες συχνότητες. Όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνει το μέγεθος του λοβού και το σήμα είναι πιο ισχυρό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της συχνότητας είναι επιθυμητή για την περίπτωση μας σε αντιδιαστολή με τη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης καθώς πραγματοποιείται έλεγχος σε πλάκα με επιφανειακή ρωγή (επιθυμητό μικρό βάθος διείσδυσης) και παρατηρήθηκε ότι δεν έχει ιδιαίτερη σημασία να αυξάνεται συνεχώς η συχνότητα αλλά μέχρι ένα όριο καθώς το αποτέλεσμα από μια τιμή και μετά είναι σχεδόν το ίδιο (το αποτέλεσμα είναι σχεδόν ίδιο στις συχνότητες των 1575, 2525 και 3975Hz).

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διερεύνησης εφαρμόστηκαν σε πειράματα στις πλάκες VMT1 και VMT1N (τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5), με το ίδιο πηνίο Α στις συχνότητες των 325Hz και 1575Hz. Επίσης επιλέχτηκε να γίνει σάρωση και σε μια μικρότερη συχνότητα των 325Hz (στα 125Hz). Το πηνίο Α (αρχικό πηνίο, μικρό) τοποθετήθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως και η σάρωση έγινε κατά μήκος της ρωγμής. Η νέα απόσταση ανάμεσα στο πηνίο και στις

πλάκες αλουμινίου VMT1 και VMT1N μειώθηκε από 2.5mm σε 2.2mm. Για την αποφυγή του φαινόμενου άκρου η σάρωση έγινε σε περιορισμένη περιοχή σάρωσης 120mm (60mm απόσταση από κάθε άκρο της ρωγμής).



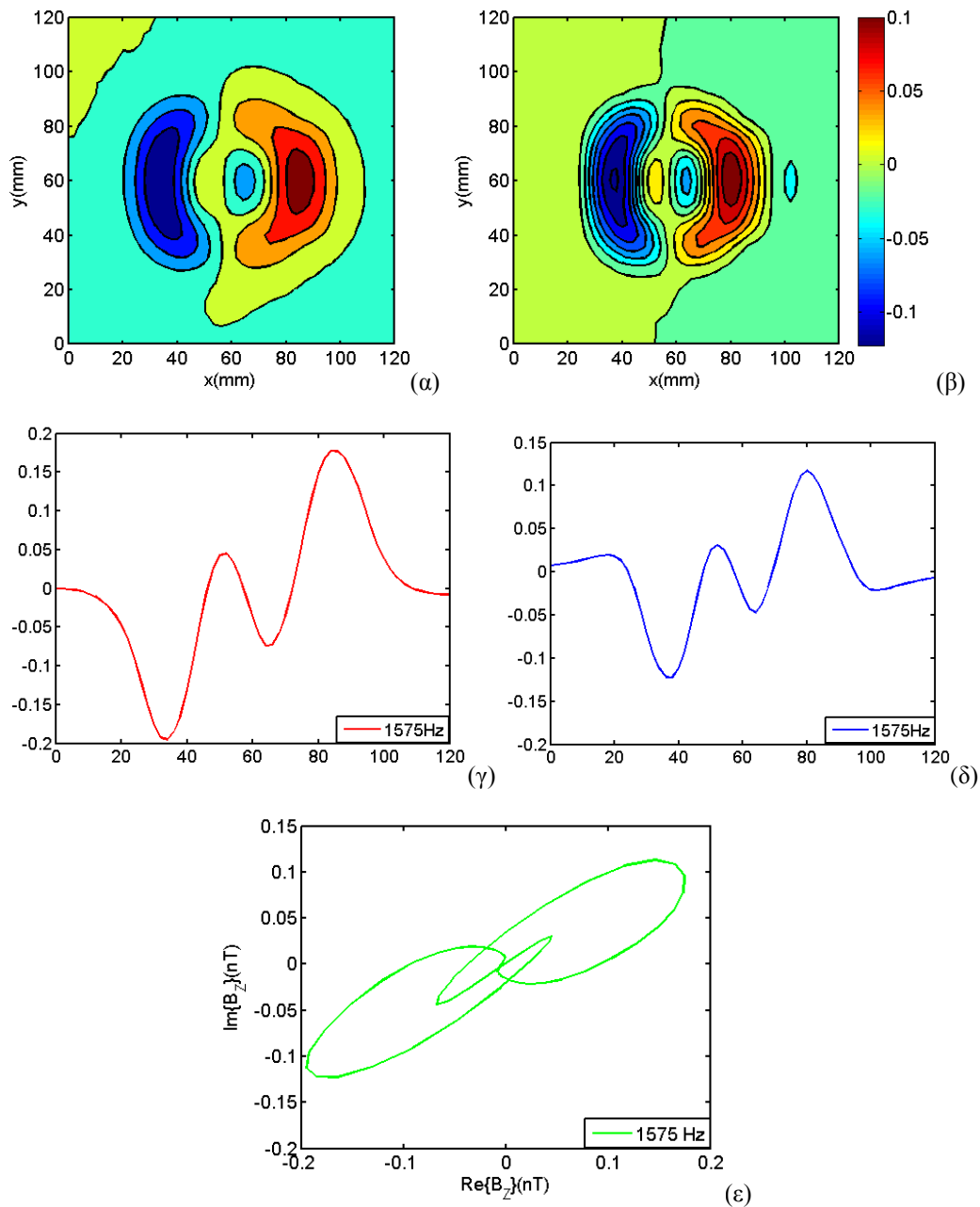
Εικόνα 6.1.5. Η πλάκα 1mm (VMT1N με διαμερή οπή και ρωγμή δίπλα στην οπή)(α) σε τρισδιάστατη απεικόνιση (β)σε κάτοψη και (γ) σε πλάγια όψη.



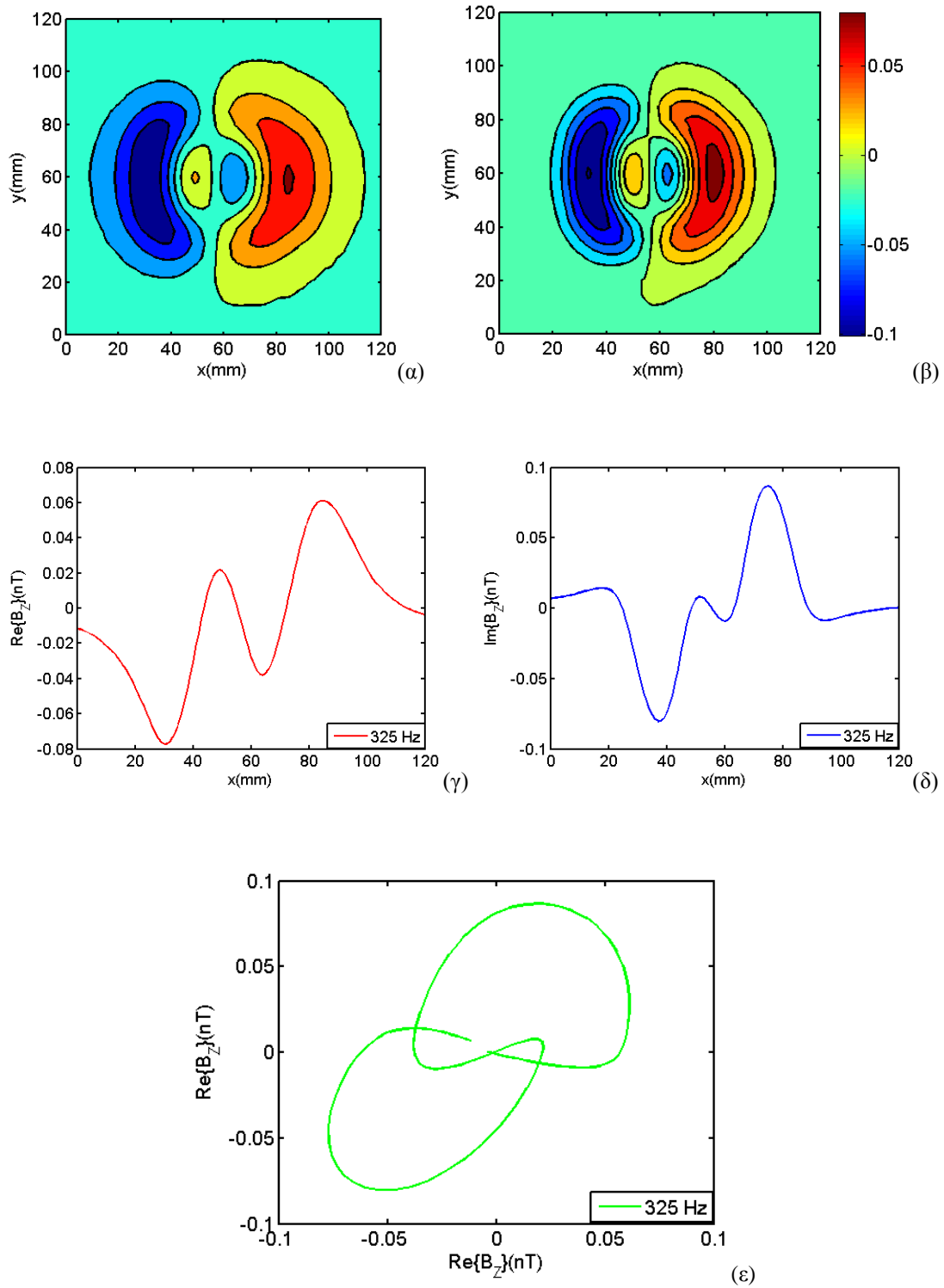
Εικόνα 6.1.6. Η πλάκα 1mm (VMT1 με διαμερή οπή) σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Στις Εικ.6.1.7 έως και την Εικ.6.1.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σάρωσης στην πλάκα VMT1N σε τρεις συχνότητες στα 1575Hz, στα 325Hz και στα 125Hz, με αντίστοιχα βάθη διείσδυσης 3.1mm, 6.3mm και 10.9mm. Η απόσταση μεταξύ του

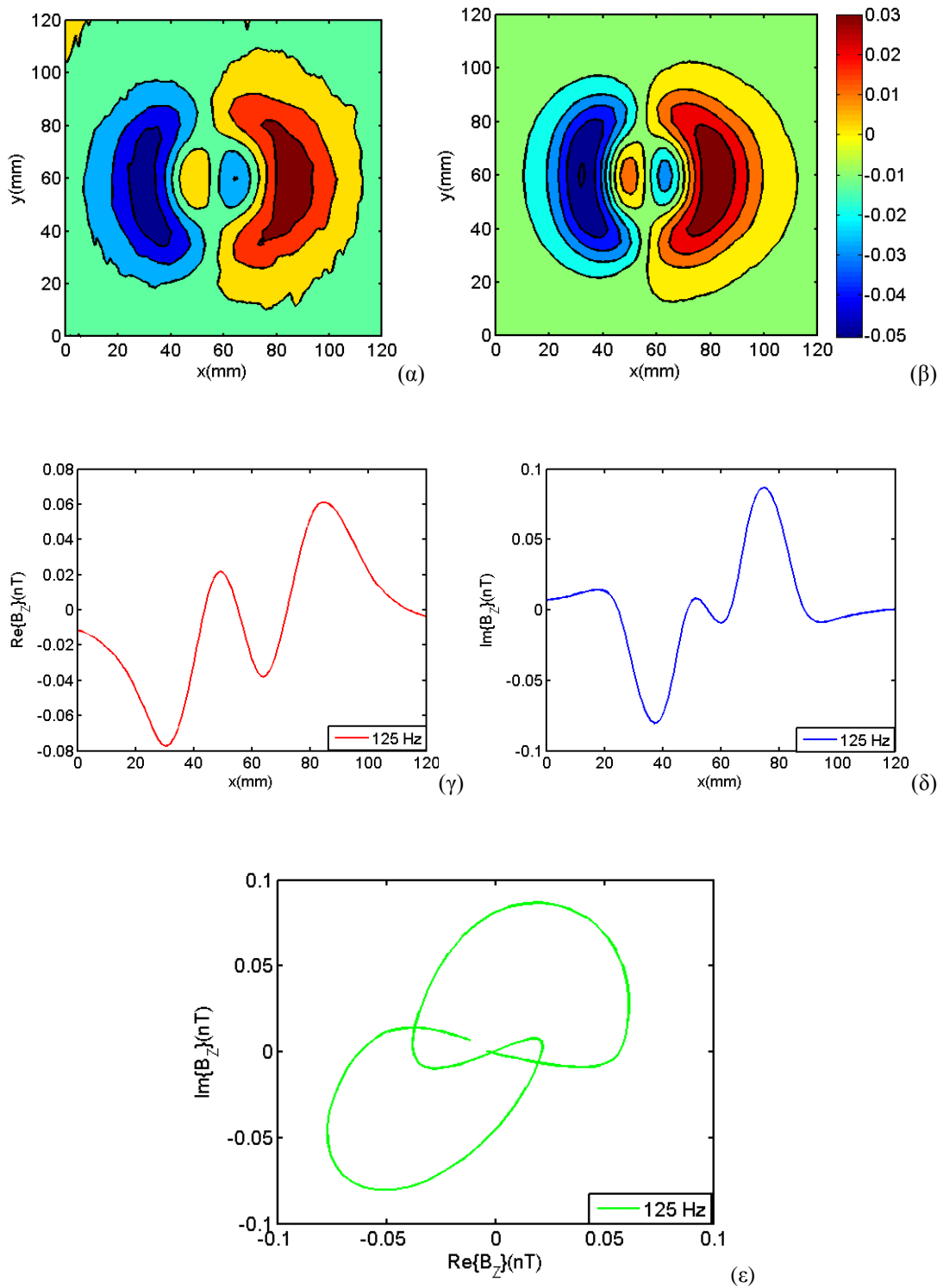
αισθητήρα και του συστήματος πλακών είναι 37.1mm (είναι η μικρότερη δυνατή απόσταση ανάμεσα στο SQUID και στις υπό-εξέταση πλάκες, το κατασκευαστικό όριο το οποίο όταν το ξεπερνάμε το SQUID έρχεται σε κορεσμό). Παρακάτω παρατίθενται οι εικόνες που προκύπτουν από τις παραπάνω συχνότητες.



Εικόνα 6.1.7. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 1575Hz με το πηνίο A. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (γ) πραγματικό και (δ) φανταστικό μέρος καθώς ο αισθητήρας περνά κατά μήκος της ρωγμής και (ε) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής.



Εικόνα 6.1.8. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 325Hz με το πηνίο Α. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (γ) πραγματικό και (δ) φανταστικό μέρος καθώς ο αισθητήρας περνά κατά μήκος της ρωγμής και (ε) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής.

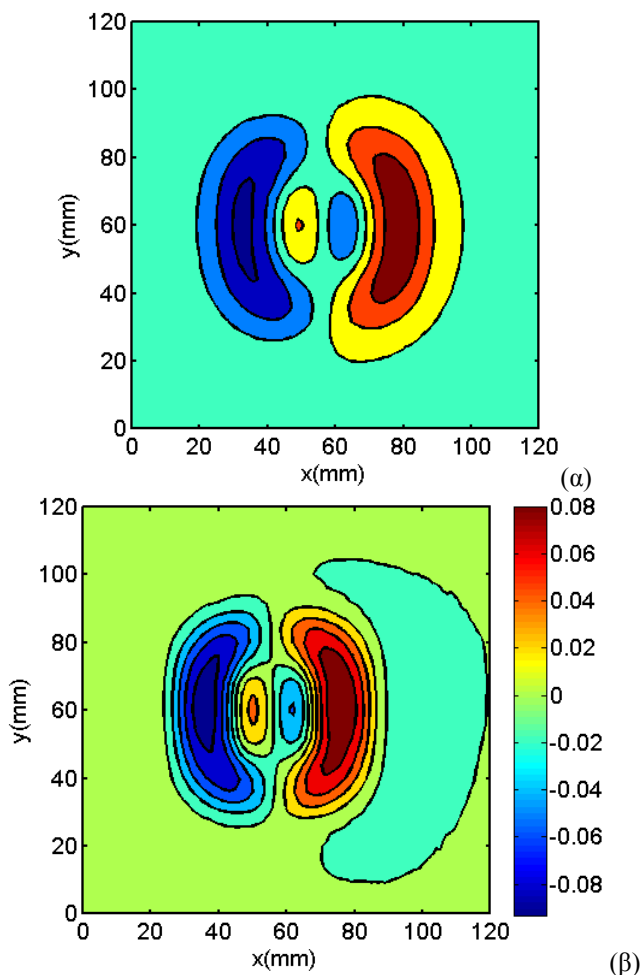


Εικόνα 6.1.9. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 125Hz με το πηνίο Α. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (γ) πραγματικό και (δ) φανταστικό μέρος καθώς ο αισθητήρας περνά κατά μήκος της ρωγμής και (ε) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής.

Στις παραπάνω εικόνες (Εικ.6.1.7-6.1.9) παρατηρείται ότι η ρωγμή εμφανίζεται σε όλες τις συχνότητες της σάρωσης, αλλά το σήμα που προκύπτει δεν είναι πολύ ισχυρό. Στη συχνότητα των 1575Hz είναι πιο ισχυρό το σήμα σε σχέση με τις άλλες δύο χαμηλές συχνότητες (όπως ήταν και το αναμενόμενο καθώς η ρωγμή είναι επιφανειακή). Το σήμα που προκύπτει στη συχνότητα των 125Hz είναι παρόμοιο με

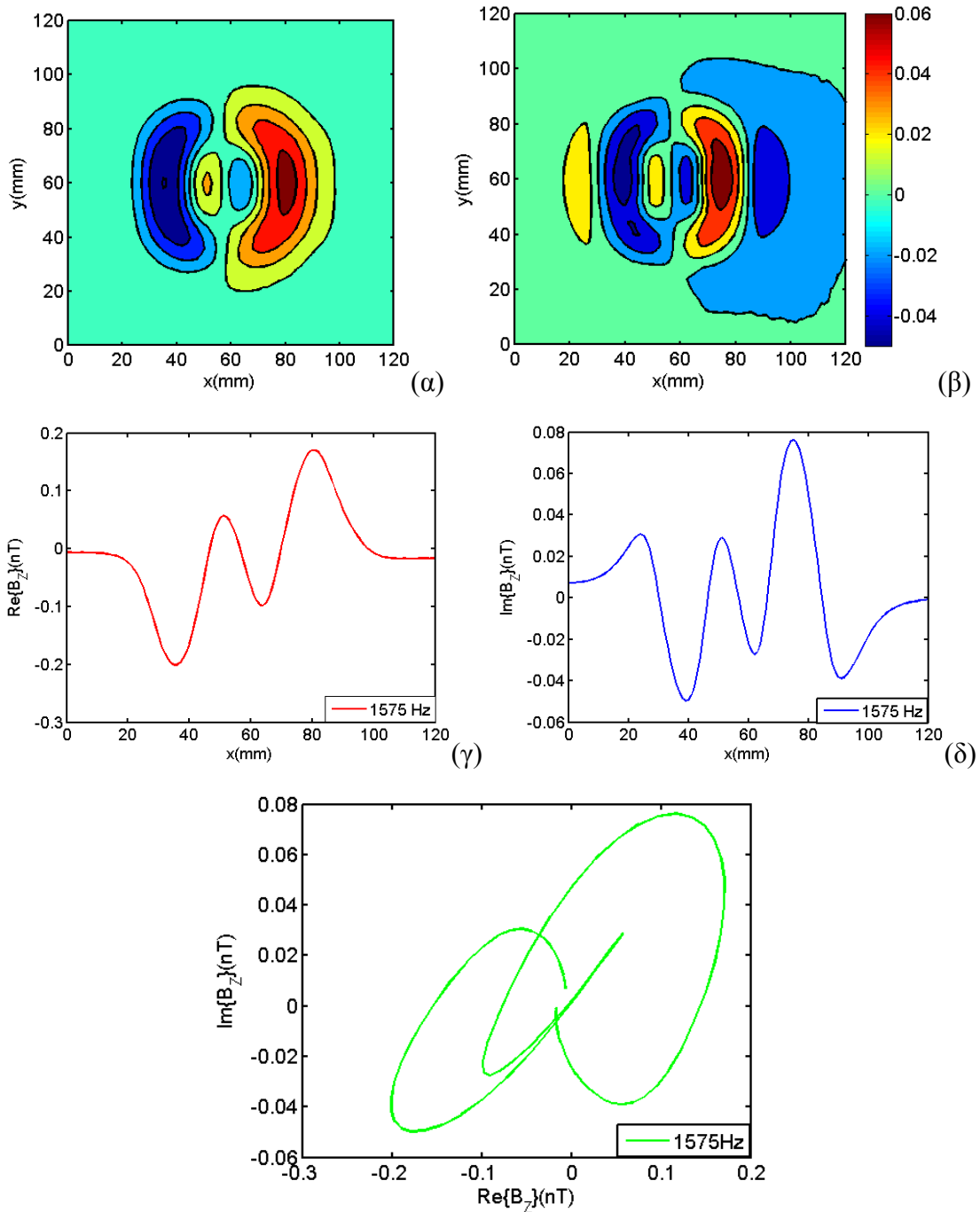
το σήμα που προκύπτει στη συχνότητα των 325Hz, με τη μικρή διαφορά ότι το σήμα στη χαμηλή συχνότητα έχει περισσότερο θόρυβο (σε σχέση με τη συχνότητα των 325Hz).

Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν με τη σάρωση της πλάκας VMT1 (βλ. Κεφάλαιο 5) η οποία έχει μόνο οπή στο κέντρο της. Η σάρωση πραγματοποιήθηκε στη συχνότητα των 1575Hz και όπως φαίνεται και στην Εικ.6.1.10 το αποτέλεσμα έδωσε τη συμμετρικότητα της οπής καθώς οι δύο λοβοί που σχηματίζονται είναι σχεδόν ίδιοι.



Εικόνα 6.1.10. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου στην πλάκα VMT1 (πάχους 1mm με διαμετρική οπή) σε συχνότητα 1575Hz με το πηνίο A. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου.

Ακολούθησε η σάρωση στο σύστημα των 2mm το οποίο αποτελείται από τις δύο πλάκες των VMT1 και VMT1N τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη με την πλάκα VMT1N στο κάτω μέρος ώστε να δημιουργηθεί υπό-επιφανειακή ρωγμή. Η συχνότητα που έγινε η σάρωση είναι η 1575Hz. Η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του συστήματος πλακών είναι 37.1mm (κατασκευαστικό όριο) και στις δυο συχνότητες που γίνεται η σάρωση.



Εικόνα 6.1.11. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 1575Hz με το πηνίο A. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (γ) πραγματικό και (δ) φανταστικό μέρος καθώς ο αισθητήρας περνά κατά μήκος της ρωγμής και (ε) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο κατά μήκος της ρωγμής.

Οι παραπάνω απεικονίσεις στην Εικ.6.1.11 δείχνουν ότι δεν μπορεί να διαχωριστεί έντονα το σήμα της υπό-επιφανειακής ρωγμής με το μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήσαμε σε συνδυασμό με το πηνίο A. Επομένως το πηνίο A που χρησιμοποιήθηκε δεν έχει καλή διακριτική ικανότητα και πρέπει να γίνει διερεύνηση για να χρησιμοποιηθεί νέο πηνίο με καλύτερη διακριτική ικανότητα.

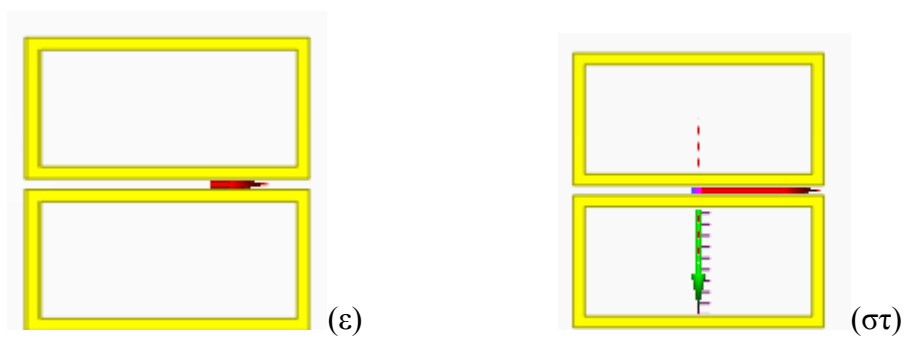
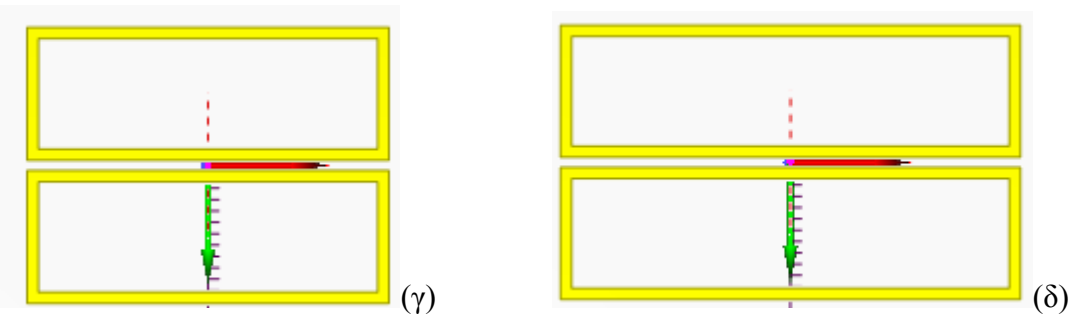
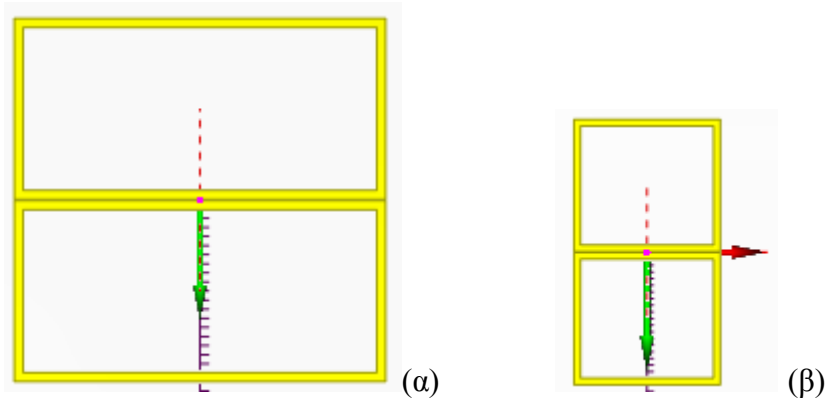


### 6.1.2.Διερεύνηση πηνίου

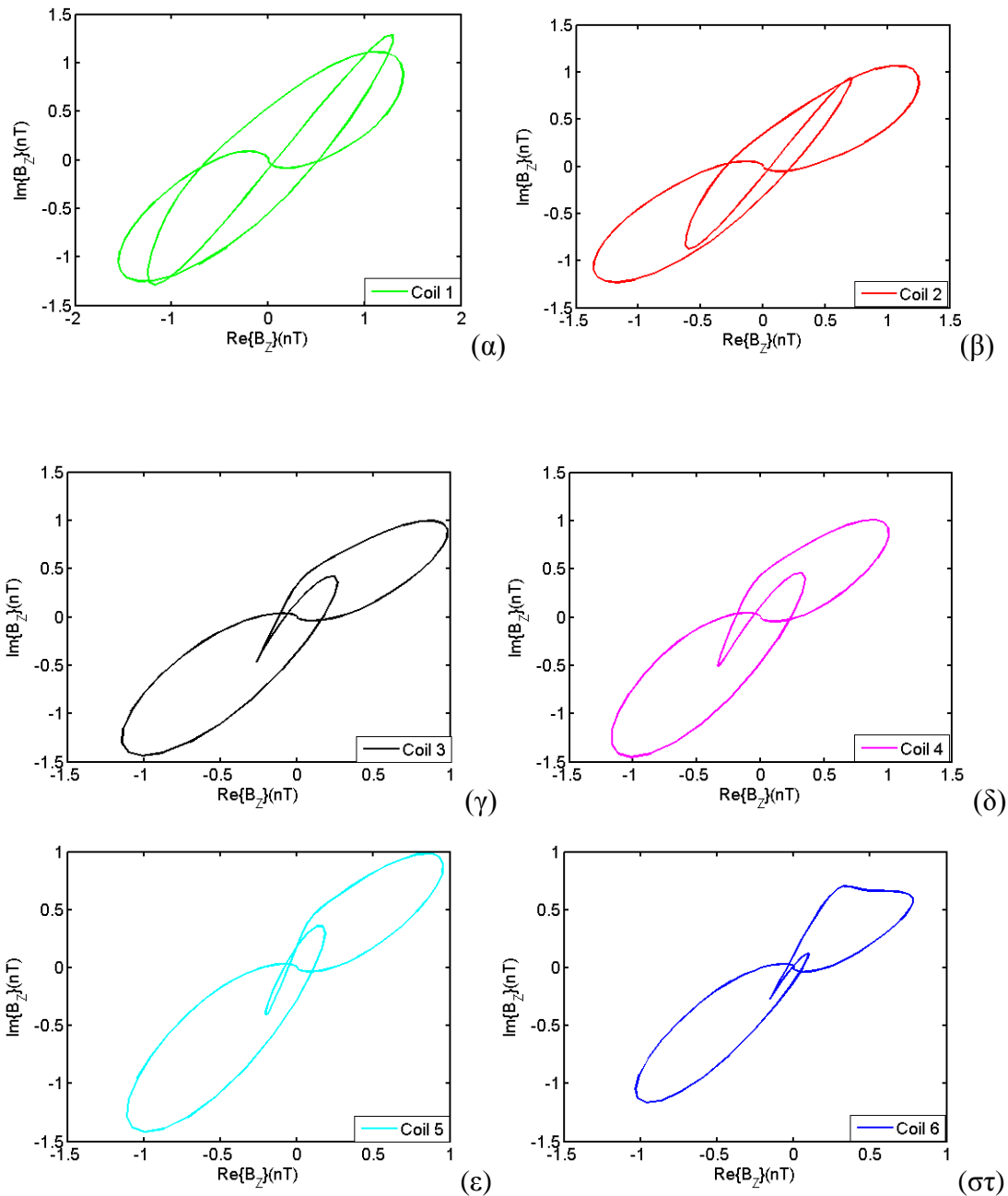
Στη συνέχεια έγινε θεωρητική διερεύνηση για τις διαστάσεις του πηνίου στην πλάκα VMT1N ώστε να βελτιωθεί η διακριτική του ικανότητα. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα σενάρια για τις νέες διαστάσεις του πηνίου. Αρχικά διερευνήθηκε η συμπεριφορά του πηνίου Α σε μία και μόνο σάρωση κατά μήκος της ρωγμής και της οπής. Το αποτέλεσμα όπως φαίνεται στην Εικ.6.1.13α δείχνει ότι το πηνίο Α δεν μπορεί να διακρίνει ξεχωριστά το σήμα της ρωγμής αλλά αντιμετωπίζει την οπή και τη ρωγμή σαν δύο διαφορετικά σήματα τα οποία τα συνθέτει και τα απεικονίζει μαζί. Μετά από μελέτες περιπτώσεων για τις διαστάσεις του πηνίου παρουσιάζονται οι πιο αντιπροσωπευτικές. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η μείωση και η αύξηση των διαστάσεων του πηνίου Α. Με θεωρητικές προσομοιώσεις στο CIVA παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά ανίχνευσης του πηνίου βελτιώνεται με τη χρήση πηνίου μικρότερων διαστάσεων. Από την άλλη μεριά η χρήση μικρότερου πηνίου πρακτικά σημαίνει μεγαλύτερος χρόνος σάρωσης και μείωση του βάθους διείσδυσης. Οι προσομοιώσεις για την περίπτωση μας, (απεικονίζονται στις Εικ.6.1.12α έως και Εικ.6.1.12ε), δείχνουν ότι υπάρχει μια προφανής σταδιακή βελτίωση στο σήμα της ρωγμής. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η διάμετρος του πηνίου καθορίζει το μέγεθος ανίχνευσης των ρωγμών. Στην περίπτωση των πλακών με οπή και ρωγμή, οι ρωγμές στις πρότυπες πλάκες που επιθεωρούνται έχουν μέγιστο μήκος 9.6mm. Επομένως είναι σημαντικό να επιλεγεί πηνίο όπου το πλάτος του να είναι από 9.6mm έως το πολύ 10mm. Στην περίπτωση ανίχνευσης πλακών με ρωγμή μεγαλύτερη (πλάκα VMT8N, τα χαρακτηριστικά της αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5) ενδείκνυται η χρήση πηνίου μεγαλύτερου πλάτους.

**Πίνακας 6.1.** Διερεύνηση διαστάσεων πηνίου Α

Διαστάσεις Πηνίου[mm]	Πηνίο 1	Πηνίο 2	Πηνίο 3	Πηνίο 4	Πηνίο 5	Πηνίο 6
Μήκος	38.85	20.00	30.00	38.80	25.00	20.00
Πλάτος	17.90	17.90	17.90	9.70	9.70	9.70
Ύψος	0.03	0.03mm	0.03	0.03	0.030	0.03
Πάχος	0.65	0.65	0.65	0.65	0.650	0.65
Απόσταση πηνίων	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

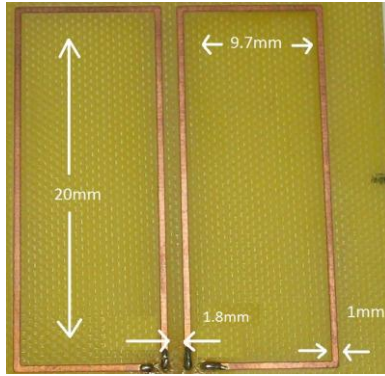


Εικόνα 6.1.12. Σχηματική απεικόνιση των πηγίων που διερευνήθηκαν για την επιλογή του βέλτιστου.



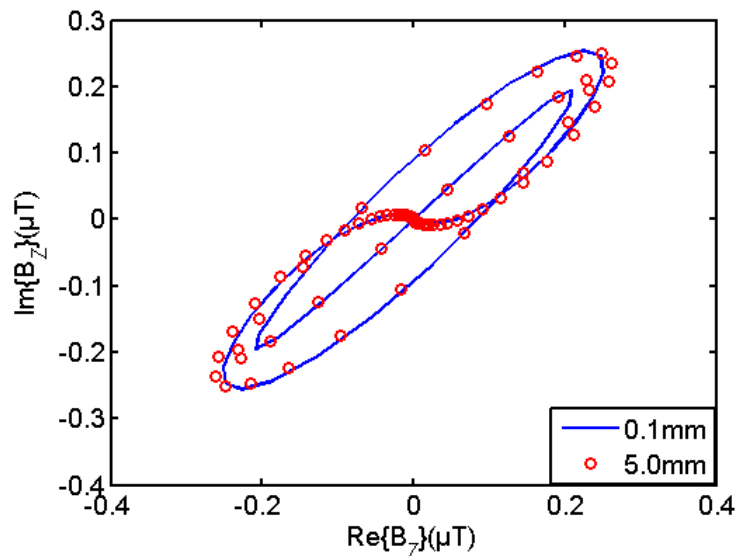
Εικόνα 6.1.13. Συγκεντρωτική απεικόνιση για την επιλογή βέλτιστου πηνίου στην πλάκα VMT1N και συχνότητα 1575Hz.

Οι παραπάνω εικόνες (Εικ.6.1.13) συνετέλεσαν στην επιλογή του βέλτιστου πηνίου (πηνίο B το οποίο θα αντικαταστήσει το A, είναι μικρότερων διαστάσεων), το οποίο είναι το πηνίο 6 καθώς δίνει το καλύτερο σήμα σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις που μελετήθηκαν για τη διάκριση της επιφανειακής ρωγμής στην πλάκα VMT1N (1mm, το ελάχιστο πάχος πλάκας που μελετήθηκε). Επομένως, μετά από τα θεωρητικά αποτελέσματα προέκυψαν οι διαστάσεις του νέου πηνίου (πηνίο B) που είναι 20mm×9.7mm, πάχους 1mm και βάθους 0.1mm, κατάλληλο για την επιθεώρηση. Στην Εικ.6.1.14 απεικονίζεται το πηνίο B.



Εικόνα 6.1.14. Πηνίο B (Νέο διπλό ορθογωνικό πηνίο τυπωμένου κυκλώματος).

Η διερεύνηση του διπλού πηνίου B συνεχίστηκε ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων. Οι αποστάσεις που επιλέχτηκαν ήταν 0.1mm, 0.3mm, 0.9mm, 1.8mm, 3.6mm και 5mm. Η προσομοίωση έγινε σε πλάκα διαστάσεων 300mm×300mm, πάχους 1mm, αγωγιμότητας 17MS/m με ρωγμή 5mm στο κέντρο της πλάκας. Η σάρωση έγινε με το διπλό πηνίο B κατά μήκος της ρωγμής. Όλες οι αποστάσεις έδωσαν σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα (αμελητέες διαφορές) όπως φαίνεται και στην Εικ.6.1.15. Διαπιστώθηκε επομένως ότι η απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων δεν παίζει ρόλο στη συμπεριφορά του διπλού πηνίου. Το διπλό πηνίο B κατασκευάστηκε με απόσταση 1.8mm (ενώ το διπλό πηνίο A είχε απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων 0.9mm).

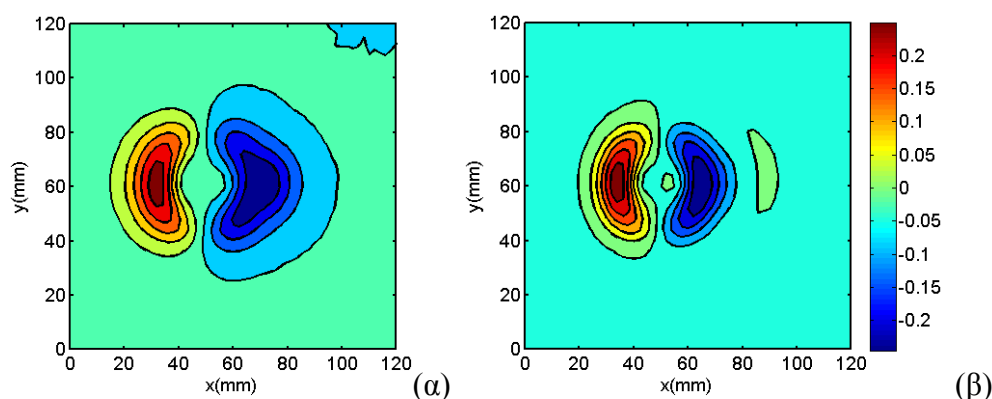


Εικόνα 6.1.15. Απεικόνιση για την επιλογή βέλτιστης απόστασης μεταξύ των δύο πηνίων του διπλού ορθογωνικού πηνίου B, συχνότητα 1575Hz.

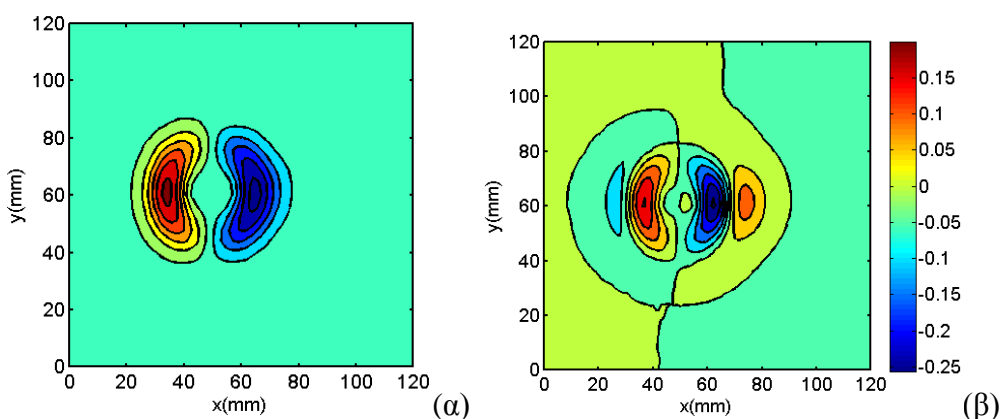
Στη συνέχεια μετά την επιλογή και την κατασκευή του πηνίου B, η τοποθέτησή του έγινε με τον ίδιο τρόπο όπως είχε τοποθετηθεί το πηνίο A. Η σάρωση έγινε κατά μήκος της ρωγμής. Η απόσταση μεταξύ του πηνίου και των υπό εξεταζόμενων πλακών αλουμινίου (VMT1N και VMT1) είναι 2.2mm.

### 6.1.3. Πειράματα με το πηνίο B

Με το βελτιστοποιημένο πηνίο B έγινε επανάληψη κάποιων μετρήσεων για να επιβεβαιωθεί και πειραματικά το θεωρητικό αποτέλεσμα για καλύτερη διακριτική ικανότητα του νέου πηνίου σε σχέση με το παλιό. Αρχικά, οι δύο πλάκες (VMT1N και VMT1) τοποθετήθηκαν η μία πάνω στην άλλη δημιουργώντας ένα σύστημα πλακών, τοποθετώντας την πλάκα με την ρωγμή και οπή στο κάτω μέρος ώστε να δημιουργηθεί υπό-επιφανειακή ρωγμή. Οι συχνότητες στις οποίες έγινε η σάρωση είναι στα 1575Hz και 375Hz.



Εικόνα 6.1.16. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 375Hz με το πηνίο B. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου. Η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του συστήματος πλακών είναι 37.1mm.

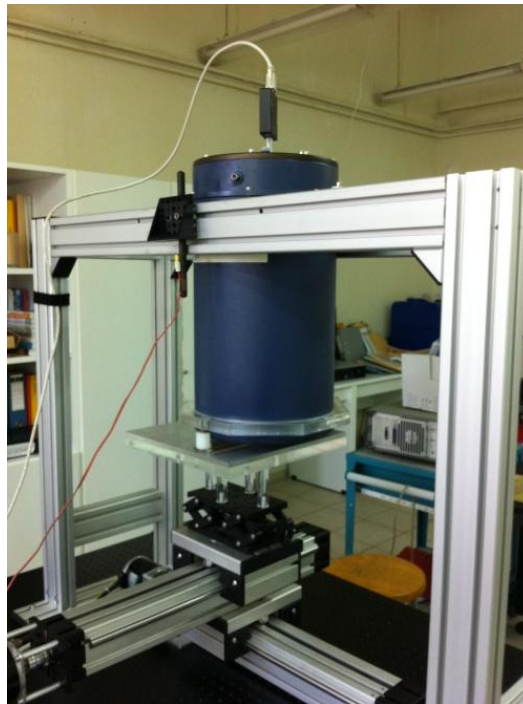


Εικόνα 6.1.17. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε σύστημα δύο πλακών (VMT1 και VMT1N) σε συχνότητα 1575Hz με το πηνίο B. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου. Η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του συστήματος πλακών είναι 37.1mm.

Στις Εικ.6.1.16 και 6.1.17 παρατηρείται ότι η διάκριση του σήματος της ρωγμής από τη συνολική πλάκα με το πηνίο B είναι πιο εμφανής σε σχέση με το σήμα που προέκυψε από το πηνίο A (Εικ.6.1.11). Επίσης, είναι εμφανής η σημασία της χρήσης χαμηλών συχνοτήτων στην ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών (το σήμα στη συχνότητα των 375Hz είναι πιο διακριτό σε σχέση με τη συχνότητα των 1575Hz, Εικ.6.1.16 και Εικ.6.1.17). Επισημαίνεται ότι με τη χρήση του πηνίου B έγιναν προσπάθειες μείωσης της απόστασης μεταξύ του αισθητήρα SQUID και των υπό εξέταση πλακών αλλά αυτό δεν ήταν εφικτό καθώς πάλι το SQUID ερχόταν σε κορεσμό. Επομένως η απόσταση των 37.1mm ήταν η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στο SQUID και τα υπό εξέταση δοκίμια (για τη χρήση του μαγνητομέτρου).

## 6.2. Διεξαγωγή πειραμάτων με το μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο SQUID

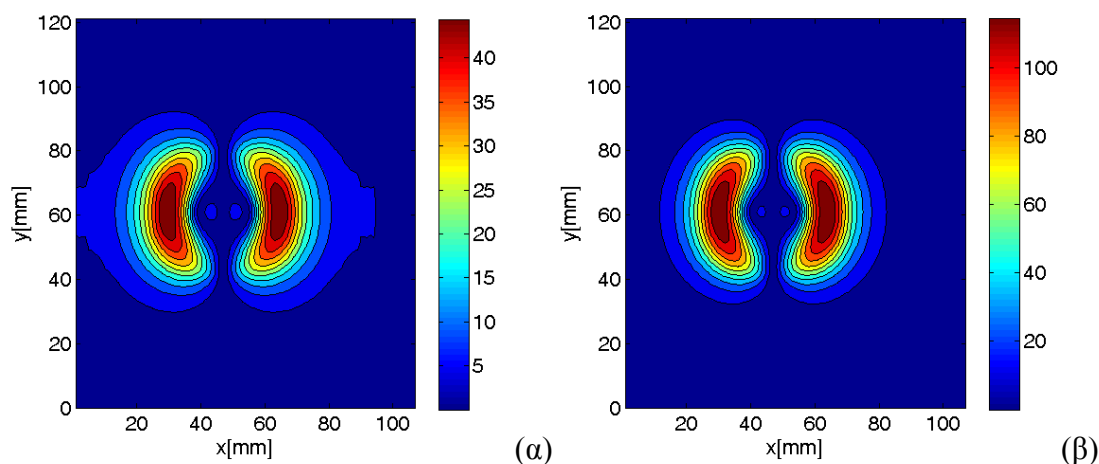
Μετά τη διερεύνηση για την επιλογή βέλτιστης συχνότητας (375 και 1575Hz) και βέλτιστου πηνίου (πηνίο B) ακολούθησαν λεπτομερή πειράματα σε πλάκες αλουμινίου (VMT1, VMT1N, VMT2, VMT2N, τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5) πάχους από 1mm έως και 2mm με οπή, οπή και επιφανειακή ή υπό-επιφανειακή ρωγμή που διεξήχθησαν στο εργαστήριο για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του SQUID. Επίσης ένας ακόμη στόχος ήταν η επίτευξη του διαχωρισμού του σήματος των ρωγμών από το συνολικό σήμα της οπής. Στην προσπάθεια αξιολόγησης των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σειρά προσομοιώσεων της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο CIVA. Η σάρωση τόσο στο εργαστήριο όσο και στην προσομοίωση με το λογισμικό έγινε με το μαγνητόμετρο SQUID κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$  σε περιοχή μικρότερη του εμβαδού πλακών για να αποφύγουμε το φαινόμενο άκρου (όπως και στα διερευνητικά πειράματα, η περιοχή είναι  $120 \times 120\text{mm}$  ή  $120 \times 100\text{mm}$ ). Η βέλτιστη ελάχιστη απόσταση για το μαγνητόμετρο, ανάμεσα στον αισθητήρα και την πλάκα του εξεταζόμενου δοκιμίου είναι το κατασκευαστικό όριο των 37.1mm, η οποία απόσταση διατηρήθηκε σταθερή σε όλα τα πειράματα (Εικ.6.2.1). Η τοποθέτηση του αισθητήρα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μετράει την συνιστώσα  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου. Για κάθε σάρωση, το πραγματικό και φανταστικό κομμάτι της εξόδου τάσης από το βαθμιδόμετρο SQUID καταγράφεται και μεταφράζεται σε μετρήσεις μαγνητικού πεδίου. Η απεικόνιση τόσο των πραγματικών όσο και των φανταστικών συνιστωσών της τάσης εξόδου δίνεται σε nT/A.



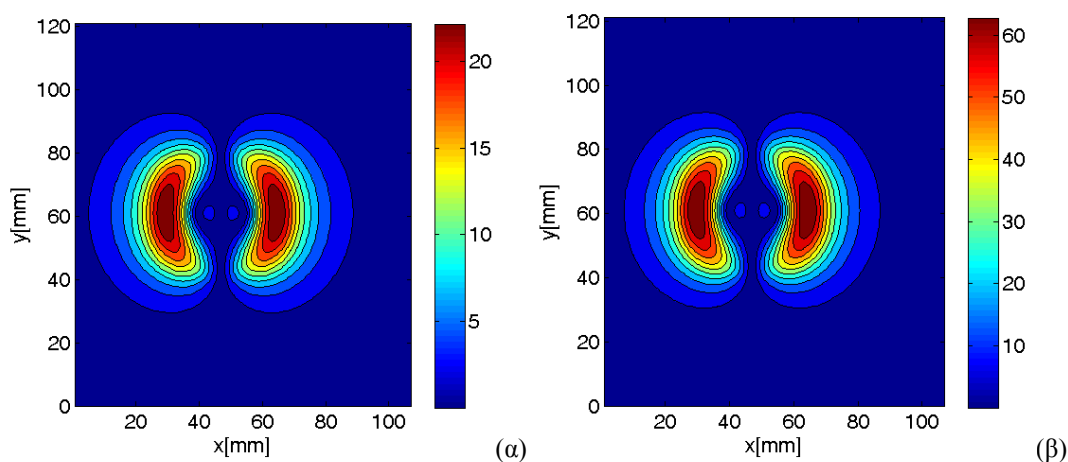
Εικόνα 6.2.1. Το μαγνητόμετρο SQUID που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

### 6.2.1. Πειράματα και προσομοιώσεις στις πλάκες 1mm πάχους

Με τη χρήση του λογισμικού έγιναν οι προσομοιώσεις στην πλάκα VMT1 στις ακόλουθες συχνότητες: 175, 375, 575 και 1575Hz με αντίστοιχα βάθη διείσδυσης 9.2, 6.3, 5.1 και 3.1mm. Τα αποτελέσματα του μαγνητικού πεδίου φαίνονται στις ακόλουθες Εικ.6.2.2-6.2.3.

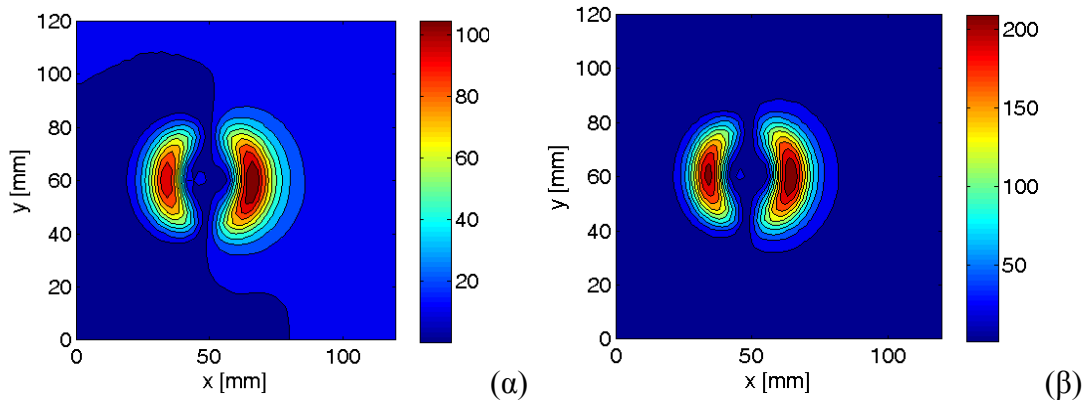


Εικόνα 6.2.2. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου με διαμερή οπή στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) σε συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.



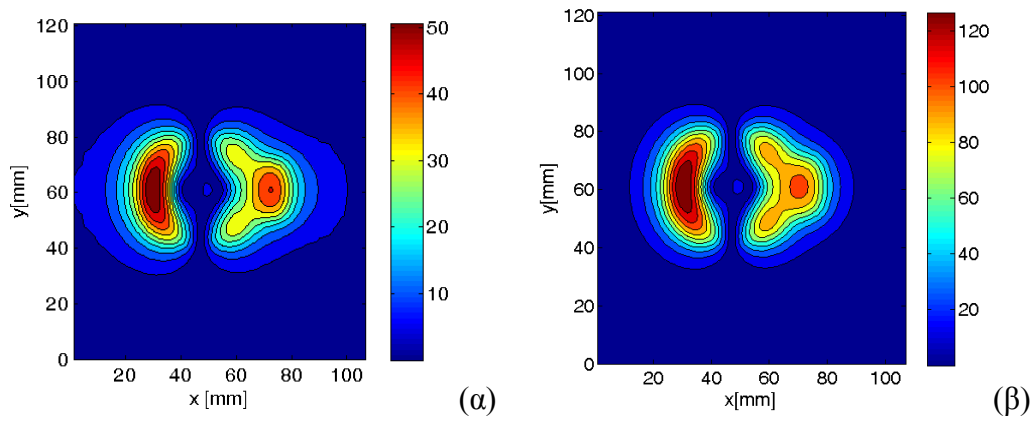
Εικόνα 6.2.3. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου με διαμερή οπή στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) σε συχνότητα 175Hz και (β) συχνότητα 575Hz.

Στις Εικ.6.2.2 και 6.2.3, παρατηρείται η συμμετρία του σήματος της οπής και επίσης είναι φανερό ότι η σάρωση στη συχνότητα των 175Hz δεν έδωσε διαφορετικό σήμα από τη συχνότητα των 375Hz καθώς επίσης και η συχνότητα των 575Hz δεν έδωσε διαφορετικό σήμα από τη συχνότητα των 1575Hz. Επομένως επιλέχθηκαν οι συχνότητες των 375 και 1575Hz ως αντιπροσωπευτικές για τη διεξαγωγή των επόμενων πειραμάτων (οι ίδιες συχνότητες που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες και κατά τα διερευνητικά πειράματα στο εργαστήριο). Ακολούθησαν δύο πειράματα στο εργαστήριο στις πιο αντιπροσωπευτικές συχνότητες των 375Hz και 1575 Hz για να επιβεβαιωθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στην Εικ.6.2.4 είναι εμφανές ότι υπάρχει συμμετρία λόγω της παρουσίας της οπής.

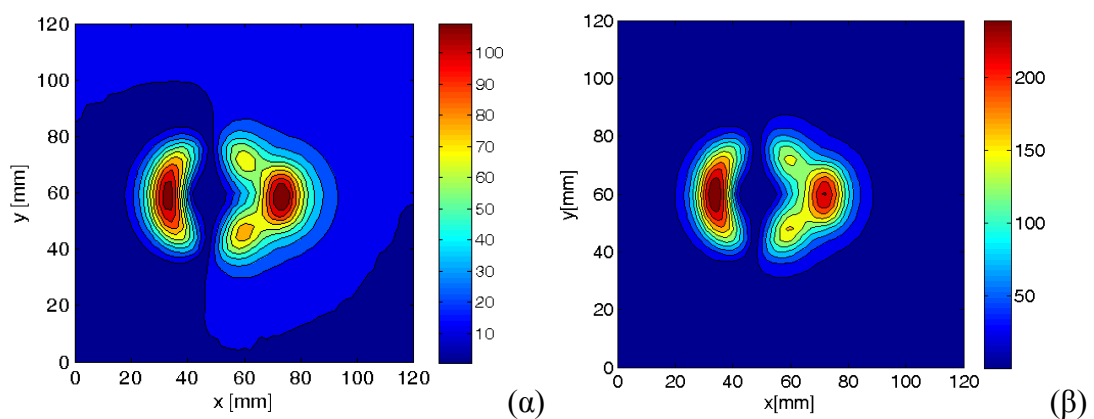


Εικόνα 6.2.4. Σάρωση C-scan του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου με διαμερή οπή στο εργαστήριο. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) σε συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

Στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις στην πλάκα VMT1N (πάχους 1mm με οπή και ρωγμή, Πίνακας 5.1) στις ίδιες αντιπροσωπευτικές συχνότητες (375 και 1575 Hz).



Εικόνα 6.2.5. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου με διαμερή οπή και επιφανειακή διαμερή ρωγμή στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) σε συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

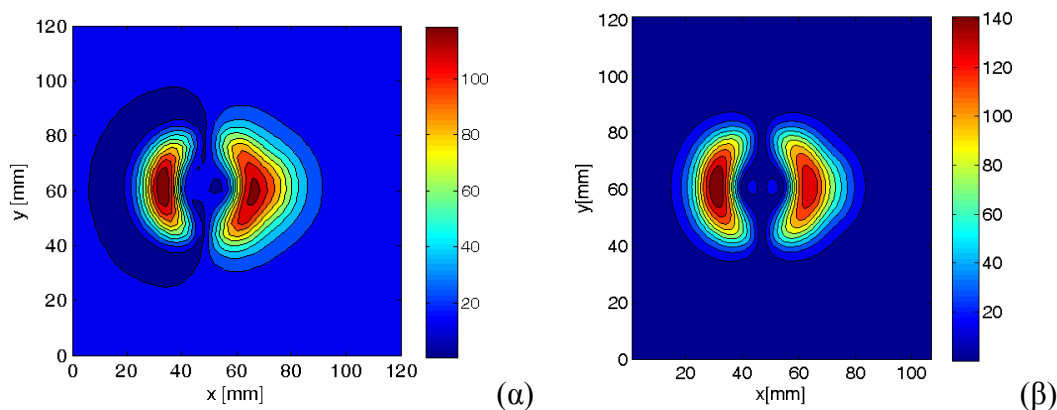


Εικόνα 6.2.6. Σάρωση του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου με διαμερή οπή και επιφανειακή διαμερή ρωγμή στο εργαστήριο. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

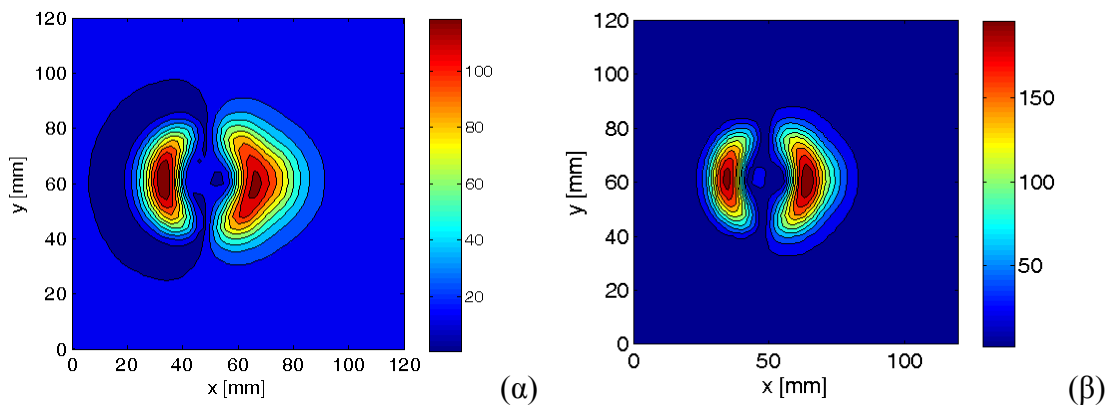


Στις Εικ.6.2.5-6.2.6, η παρουσία της επιφανειακής ρωγμής είναι ξεκάθαρη καθώς υπάρχουν αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που αλλάζουν την συμμετρία του προηγούμενου σήματος. Επίσης παρατηρείται ότι η υψηλότερη συχνότητα παράγει ένα πιο ισχυρό σήμα από τη χαμηλότερη συχνότητα (είναι αναμενόμενο καθώς ελέγχεται επιφανειακή ασυνέχεια). Παρακάτω απεικονίζονται οι προσομοιώσεις και οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου τόσο στο λογισμικό προσομοίωσης CIVA όσο και στο εργαστήριο.

Στις ίδιες συχνότητες πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε σύστημα δυο πλακών αλουμινίου 2mm (πλάκες VMT1 και VMT1N) ώστε να προσομοιωθεί ένα σύστημα διπλού στρώματος. Οι δυο πλάκες (VMT1 και VMT1N) έχουν τις ίδιες διαμπερείς οπές τοποθετημένες η μία ακριβώς πάνω στην άλλη με την κάτω πλάκα (VMT1N) να έχει και ρωγμή δίπλα ακριβώς στην οπή. Ανάμεσα στις δύο πλάκες υπάρχει κενό (0.08mm) το οποίο υπολογίστηκε καλύπτοντας με μονωτική ταινία (karton tape) την κάτω πλάκα και μετρώντας την επικάλυψη με μικρόμετρο. Σημειώνεται ότι έγιναν μετρήσεις στο σύστημα των δύο πλακών με την μονωτική ταινία ανάμεσα στις πλάκες αλλά τα αποτελέσματα ήταν ακριβώς ίδια με τις μετρήσεις στο σύστημα χωρίς την τοποθέτηση μονωτικής ταινίας (για αυτό όλες οι μετρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν χωρίς τοποθέτηση μονωτικής ταινίας). Με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται μια υπό-επιφανειακή ασυνέχεια σαν αυτές που συνήθως εμφανίζονται κοντά στις οπές συναρμογής στις αεροπορικές δομές.



Εικόνα 6.2.7. Προσομοίωση της σάρωσης του μαγνητομέτρου σε σύστημα πλακών αλουμινίου στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

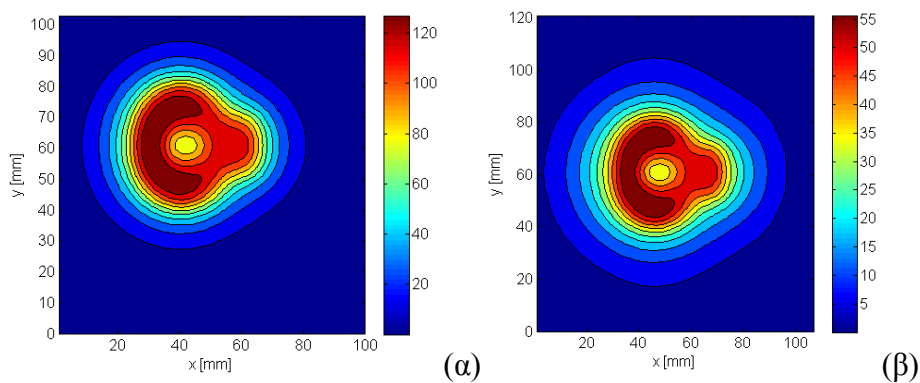


Εικόνα 6.2.8. Σάρωση του μαγνητομέτρου σε σύστημα πλακών αλουμινίου στο εργαστήριο. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

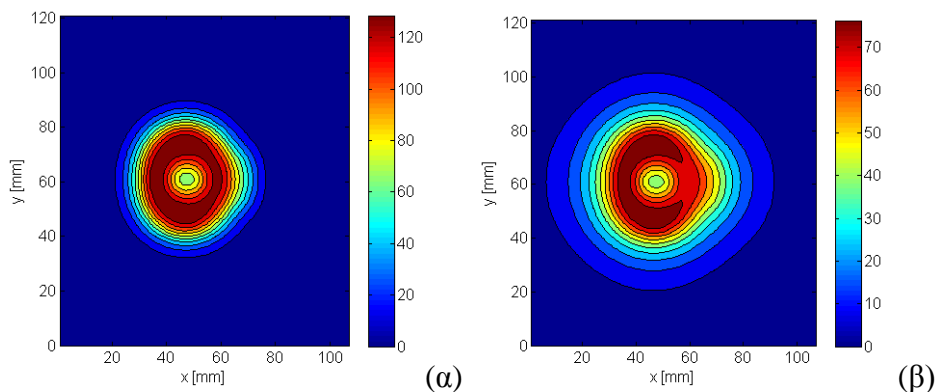
Στις παραπάνω εικόνες παρατηρείται τόσο στο λογισμικό (Εικ.6.2.7) όσο και στο εργαστήριο (Εικ.6.2.8), μια απόκλιση από τη συμμετρία που παρατηρήθηκε στο σήμα της καθαρής οπής αλλά το αποτέλεσμα δεν είναι τόσο ξεκάθαρο όσο ήταν στην παρουσία της επιφανειακής ρωγμής (Εικ.6.2.5 και 6.2.6).

### 6.2.2. Προσομοιώσεις στο λογισμικό CIVA για βελτίωση της πειραματικής διάταξης

Στα πλαίσια βελτίωσης της πειραματικής διάταξης έγιναν προσομοιώσεις στο CIVA με ένα διπλό συμμετρικό πηνίο διέγερσης ορθογωνικού τύπου (οι διαστάσεις του είναι ίδιες με το πηνίο B) και το μαγνητόμετρο SQUID τοποθετημένο έτσι ώστε να εστιάζεται στον άξονα του πηνίου. Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι πλάκες αλουμινίου 1mm (VMT1 με διαμετρική οπή και VMT1N με διαμετρική ρωγμή δίπλα στην οπή) στις δυο αντιπροσωπευτικές συχνότητες 375 Hz και 1575 Hz. Επίσης, διερευνήθηκε και η περίπτωση του συστήματος δύο πλακών αλουμινίου 2mm (όπως περιγράφηκε παραπάνω, οι πλάκες VMT1 και VMT1N τοποθετημένες μαζί). Το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την προσομοίωση προέρχεται μόνο από τη παρουσία της οπής και της ρωγμής. Στις Εικ.6.2.9 και 6.2.10 φαίνεται ότι το μονό πηνίο προκαλεί υψηλό μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργεί κορεσμό στο μαγνητόμετρο SQUID, παρόλο που το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δείχνει ξεκάθαρα την παρουσία της ρωγμής (Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της ευαισθησίας του SQUID, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 5 και καθόρισε την επιλογή διπλού πηνίου στα πειράματα).



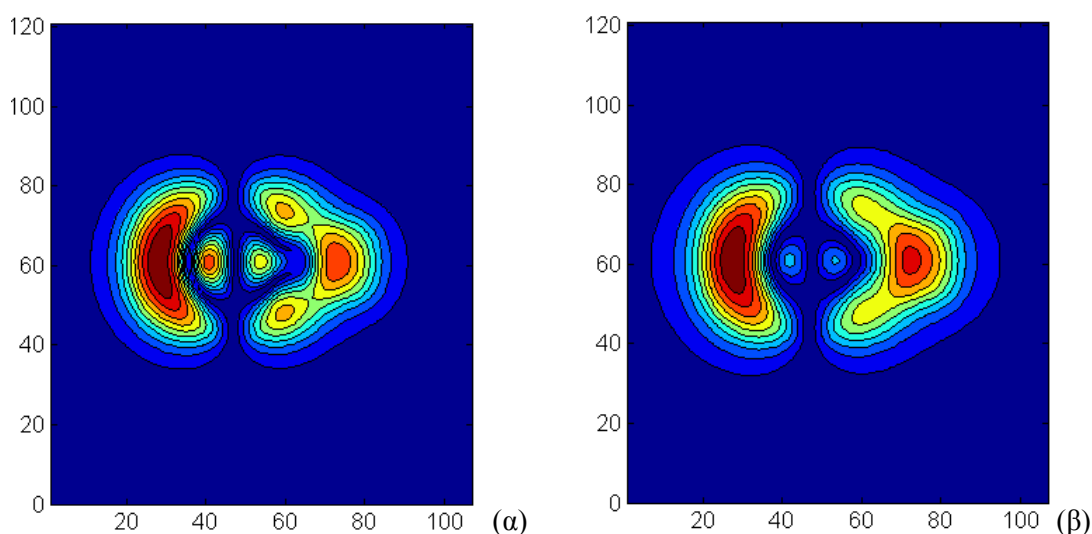
Εικόνα 6.2.9. Προσομοίωση C-scan του μαγνητόμετρου στην πλάκα VMT1N στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 1575Hz και (β) συχνότητα 375Hz.



Εικόνα 6.2.10. Προσομοίωση C-scan του μαγνητόμετρου σε σύστημα πλακών 2mm στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 1575Hz και (β) συχνότητα 375Hz.

Η σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και προσομοιώσεων έδειξε ότι το λογισμικό προσομοίωσης μπορεί να κάνει αξιόπιστες προβλέψεις καθώς τα πειραματικά δεδομένα βρίσκονται σε συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα και το σήμα της ρωγμής μπορεί να διαχωριστεί από το μεγάλο σήμα της οπής χρησιμοποιώντας το μαγνητόμετρο SQUID. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι υψηλές συχνότητες βελτιώνουν την ευαισθησία του συστήματος αλλά μειώνουν το βάθος διείσδυσης περιορίζοντας τον εντοπισμό υπό-επιφανειακών ρωγμών. Το κυρίαρχο ζήτημα όμως δεν είναι η διείσδυση αλλά η παρουσία άλλων δυνατών σημάτων όπως το σήμα από την ίδια την οπή, τα οποία πρέπει να εξαλειφθούν.

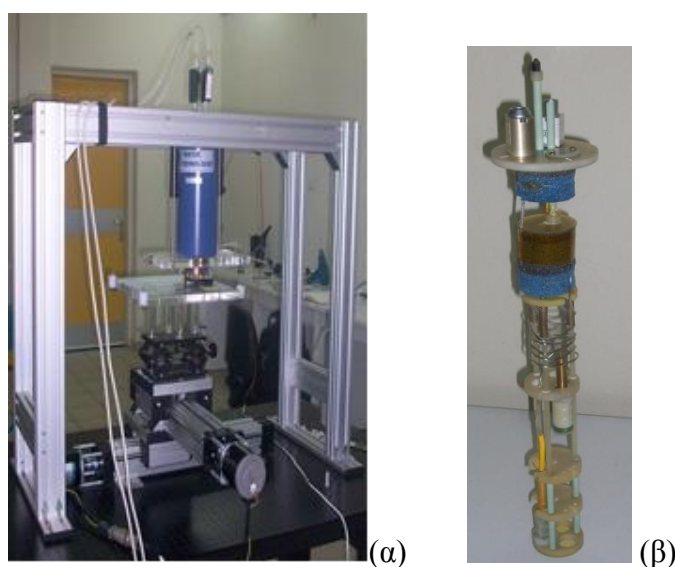
Θέτοντας ως στόχο τη βέλτιστη διάκριση του σήματος της ρωγμής από ένα συνολικά έντονο σήμα μαγνητικού πεδίου έγινε μια διερεύνηση στο λογισμικό προσομοίωσης CIVΑ για το ρόλο που παίζει η απόσταση ανάμεσα στο μαγνητόμετρο και το υπό εξέταση δοκίμιο. Διατηρήθηκαν ίδιες συνθήκες με το πείραμα σε συχνότητα 1575Hz με τη μόνη διαφορά τη μείωση της απόστασης ανάμεσα στο μαγνητόμετρο και την πλάκα αλουμινίου με οπή και επιφανειακή ρωγμή. Η Εικ.6.2.11 απεικονίζει το σήμα του πλάτους του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από τη μείωση της απόστασης μεταξύ μαγνητομέτρου και υπό-εξέταση δοκιμίου σε 10mm καθώς και σε 20mm αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι όσο μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση τόσο αυξάνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου όπως αναμενόταν. Επίσης, είναι προφανές ότι όσο περισσότερο μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση τόσο διακρίνεται καλύτερα η παρουσία της ρωγμής. Η προσομοίωση έδειξε τη σημασία της μείωσης της απόστασης μεταξύ μαγνητομέτρου και υπό-εξέταση δοκιμίου για να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα του μαγνητομέτρου.



Εικόνα 6.2.11. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του μαγνητομέτρου σε πλάκα αλουμινίου 1mm με διαμετρική οπή και ρωγμή στο CIVΑ. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα 1575Hz (α) απόσταση 10mm και (β) απόσταση 20mm.

### 6.2.3. Πειράματα και προσομοιώσεις στις πλάκες πάχους 1mm με το βαθμιδόμετρο

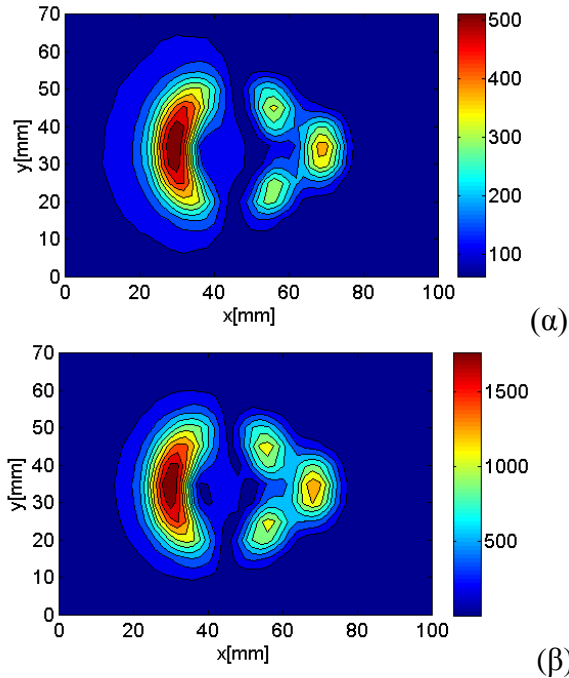
Η μείωση της απόστασης ανάμεσα στο μαγνητόμετρο και το υπό-εξέταση δοκιμίου επιτεύχθηκε στο εργαστήριο με τη χρήση διπλού μαγνητομέτρου SQUID με δυο αισθητήρες (dual SQUID), το οποίο ονομάζεται βαθμιδόμετρο (Εικ.6.2.12). Συγκεκριμένα, έγινε η σύγκριση δυο υπεραγώγιμων συστημάτων υψηλής θερμοκρασίας SQUID που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθούν δυο ολοκληρωμένες πειραματικές διατάξεις. Το απλό μαγνητόμετρο SQUID (simple SQUID, Εικ.6.2.1) που περιλαμβάνει έναν αισθητήρα, του οποίου οι μετρήσεις απεικονίστηκαν στις εικόνες, Εικ.6.2.4-6.2.6 και Εικ.6.2.8 και το βαθμιδόμετρο SQUID με δυο αισθητήρες (dual SQUID) του οποίου οι μετρήσεις παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες Εικ.6.2.13-6.2.14. Το πραγματικό επίπεδο θορύβου του απλού μαγνητομέτρου σε μαγνητικά θωρακισμένο περιβάλλον είναι  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  και το αντίστοιχο του βαθμιδομέτρου είναι  $68 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  [pcSQUID™ User's Manual]. Το επίπεδο θορύβου καθορίζει την ευαισθησία του κάθε μαγνητομέτρου SQUID. Ωστόσο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μετρήσεων (συμπεριλαμβανομένου του πεδίου των 50 Hz και των αρμονικών του) ο λόγος σήματος προς θόρυβο βελτιώνεται περίπου 10 φορές σε σχέση με το αν χρησιμοποιήσουμε τους αισθητήρες σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου. Με τη χρήση του διπλού μαγνητομέτρου η αρχική ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα του απλού μαγνητομέτρου και την πλάκα του εξεταζόμενου δοκιμίου από 37.1mm μειώθηκε σε 13.5mm, επιτυγχάνοντας μια μείωση της απόστασης σε ποσοστό 64%. Η αρχική απόσταση 37.1mm δεν μπορούσε να μειωθεί άλλο με το απλό μαγνητόμετρο SQUID καθώς το αναπτυσσόμενο μαγνητικό πεδίο το οδηγούσε σε κορεσμό. Η απόσταση μεταξύ αισθητήρα και επιφάνειας δοκιμίου μειώθηκε μόνο όταν χρησιμοποιήθηκε το βαθμιδόμετρο.



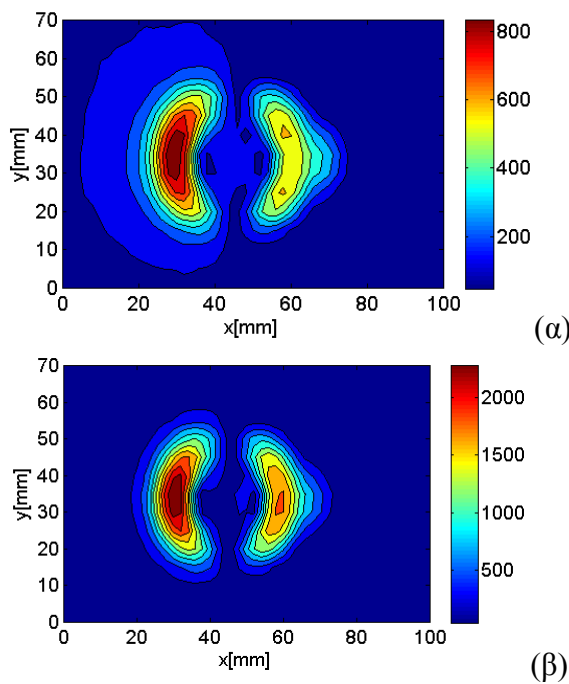
Εικόνα 6.2.12. Το βαθμιδόμετρο SQUID (δυο αισθητήρες) (α) στην πειραματική διάταξη και (β) εσωτερικά.

Πραγματοποιήθηκε επανάληψη των πειραμάτων στις πλάκες αλουμινίου με οπή και επιφανειακή ρωγμή καθώς και στο σύστημα των πλακών με την υπό-επιφανειακή ρωγμή, των οποίων τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στον Πίνακα 5.1 (Κεφάλαιο 5) στις δυο αντιπροσωπευτικές συχνότητες 375Hz και 1.575Hz. Η διαφορά στη νέα διάταξη είναι η χρήση του διπλού μαγνητομέτρου (βαθμιδόμετρο, dual SQUID) και η

νέα απόσταση (13.5mm) ανάμεσα στο βαθμιδομέτρο και στα υπό-εξέταση δοκίμια (οι περιοχές σάρωσης εδώ είναι 70mm × 100mm, αντίστοιχα, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο άκρου). Οι μετρήσεις έγιναν στην πλάκα αλουμινίου VMT1N (Εικ.6.2.13) και στο σύστημα αλουμινίου πάχους 2mm (VMT1 και VMT1N, υπό-επιφανειακή ρωγμή, Εικ.6.2.14) στις συχνότητες των (α) 375 Hz και (β) 1575 Hz.



Εικόνα 6.2.13. Σάρωση του βαθμιδομέτρου στην πλάκα αλουμινίου VMT1N με διαμετρική οπή και επιφανειακή διαμετρική ρωγμή στο εργαστήριο. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

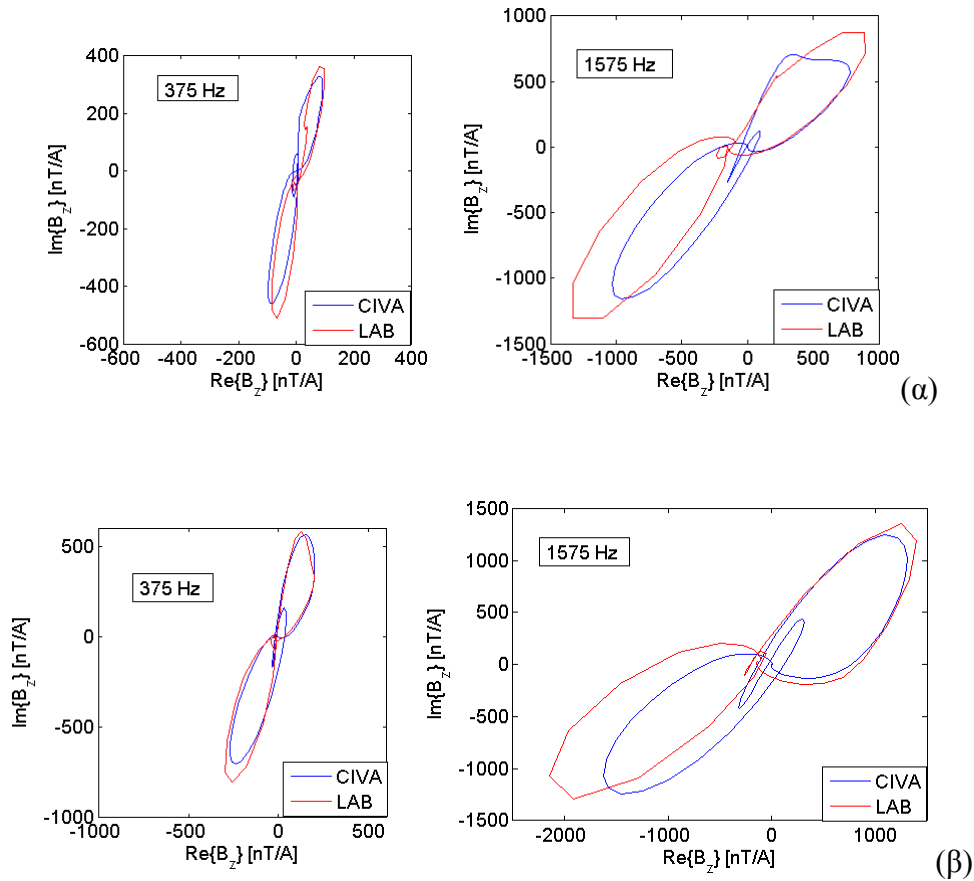


Εικόνα 6.2.14. Σάρωση του βαθμιδομέτρου σε σύστημα αλουμινίου 2mm με διαμετρική οπή και υπό-επιφανειακή ρωγμή στο εργαστήριο. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

Στα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η αξιοσημείωτη ευαισθησία του SQUID, το οδηγούσε συχνά σε κορεσμό ακόμη και όταν οι συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος ήταν βέλτιστες αλλά μεταβαλλόταν η απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και το υπό εξέταση δοκίμιο (έπρεπε η απόσταση να είναι σταθερή και συγκεκριμένη καθώς υπάρχει κατασκευαστικός περιορισμός για το μαγνητόμετρο η ελάχιστη απόσταση των 37.1mm και για το βαθμιδόμετρο 13.5mm).

Επίσης, παρατηρήθηκε και στο εργαστήριο το προσδοκώμενο αποτέλεσμα που προέκυψε από την προσομοίωση ότι η μείωση της απόστασης ανάμεσα στον αισθητήρα και στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου επιτυγχάνει την ενίσχυση του σήματος της ρωγμής και το σχετικά εύκολο διαχωρισμό του από το συνολικό μεγάλο σήμα της οπής συναρμογής. Επομένως, η σύγκριση των δυο SQUID (μαγνητόμετρο και βαθμιδόμετρο) έδειξε την σημασία της μείωσης της απόστασης (lift off) ανάμεσα στον αισθητήρα και των πλακών αλουμινίου που είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διακριτικής ικανότητας του SQUID.

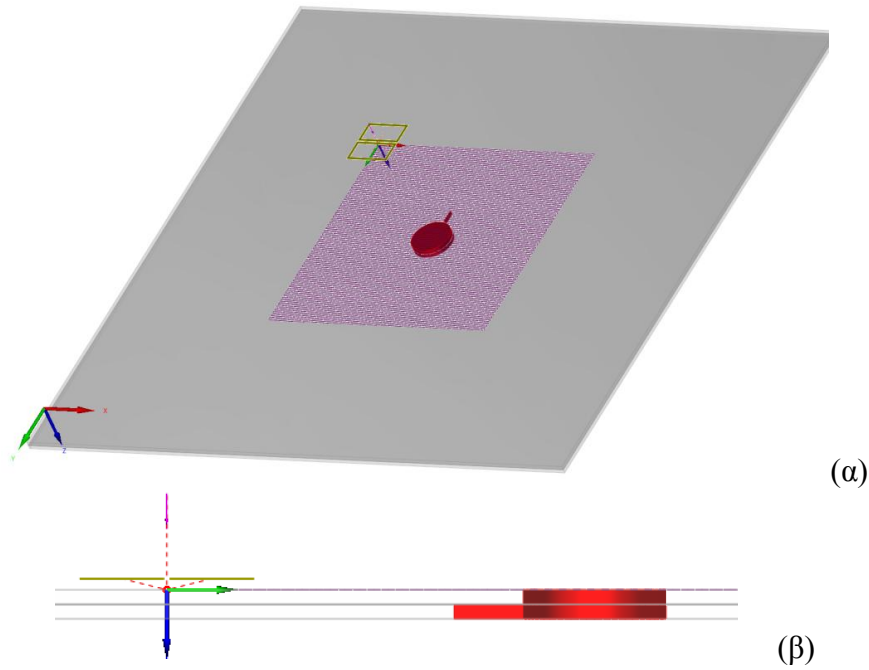
Επιπλέον, έγινε μια άμεση σύγκριση μεταξύ εμπειρικών δεδομένων και θεωρητικών προβλέψεων όταν ένα βαθμιδόμετρο σαρώνει την περιοχή πάνω από τη ρωγμή με στόχο την παρατήρηση της συμπεριφοράς του αισθητήρα σε απόσταση 13.5mm από το υπό-εξέταση δοκίμιο στις δύο συχνότητες 375Hz και 1575Hz. Σημειώνεται ότι στην προσομοίωση της σάρωσης με το βαθμιδόμετρο χρησιμοποιήθηκε ένας μαγνητικός αισθητήρας όπως και στην προσομοίωση του μαγνητομέτρου αλλά σε μικρότερη απόσταση (13.5mm) από τα εξεταζόμενα δοκίμια. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ένας μόνο αισθητήρας (στην προσομοίωση) ενώ το βαθμιδόμετρο αποτελείται από δύο αισθητήρες στηρίζεται στο γεγονός ότι στο εργαστήριο έγινε κανονικοποίηση (περιγραφή λειτουργίας βαθμιδομέτρου σελ.52) του ενός αισθητήρα (πάνω αισθητήρας βαθμιδομέτρου) ως προς τον άλλο (κάτω αισθητήρας βαθμιδομέτρου) ώστε το μαγνητικό πεδίο των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται σε ένα δοκίμιο τοποθετημένο ακριβώς κάτω από τον έναν αισθητήρα (αισθητήρας κάτω) να είναι ισχυρό σε αυτόν και αμελητέο στον άλλο (πάνω αισθητήρας). Η παρακάτω εικόνα (Εικ.6.2.15) δείχνει την ίδια ένδειξη τόσο στο εργαστήριο όσο και στη θεωρία για τη θέση της ρωγμής επιβεβαιώνοντας για μια ακόμη φορά την αξιοπιστία του λογισμικού CIVA. Η καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων επιβεβαιώνει ότι το σήμα της ρωγμής μπορεί να διαχωριστεί από το μεγάλο σήμα της οπής με τη χρήση του βαθμιδομέτρου.



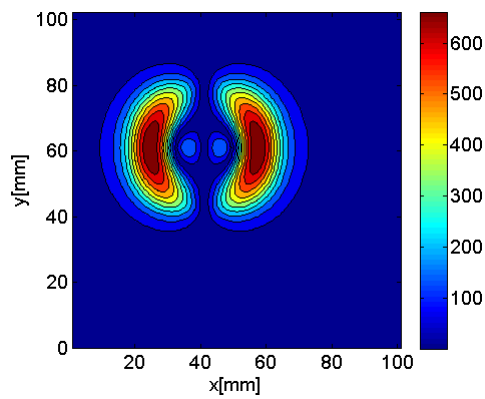
Εικόνα 6.2.15. Το σήμα στο μιγαδικό επίπεδο του μαγνητικού πεδίου (nT/A) καθώς το βαθμιδόμετρο (dual SQUID) μετακινείται κατά μήκος (α) της πλάκας με οπή και επιφανειακή ρωγμή και κατά μήκος (β) του συστήματος με υπό-επιφανειακή ρωγμή σε δυο συχνότητες: 375 και 1575Hz.

#### 6.2.4. Προσομοιώσεις στις πλάκες 2mm πάχους

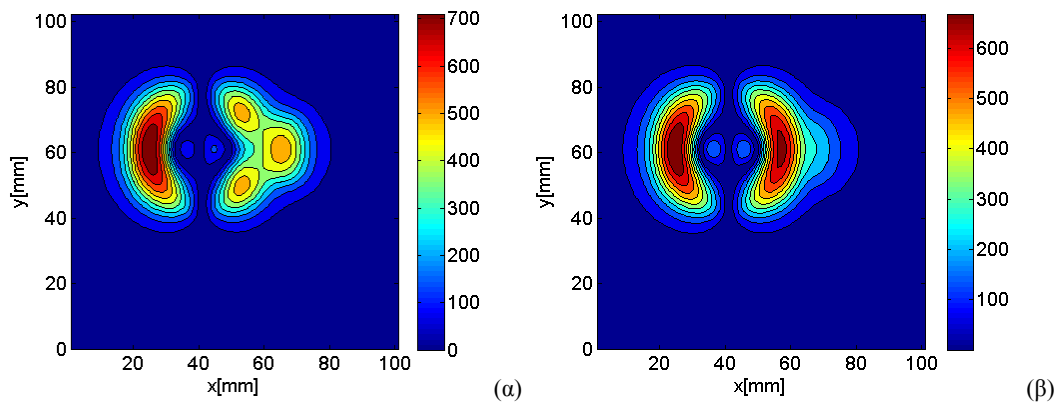
Έγιναν προσομοιώσεις στις δύο συχνότητες των 375 και 1575Hz στις πλάκες VMT2N και VMT2 (τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στο Κεφάλαιο5). Αρχικά επιβεβαιώθηκε η απόλυτη συμμετρία του σήματος της οπής στην πλάκα VMT2 (Εικ.6.2.17) και στη συνέχεια έγινε σάρωση στην πλάκα VMT2N με την οπή και τη ρωγμή των 2mm. Παρατηρείται στην Εικ.6.2.18 ότι το σήμα της ρωγμής διακρίνεται ευκρινώς και στις δύο συχνότητες. Ακολούθησε η σάρωση του συστήματος των 4mm (Εικ.6.2.16) με τοποθέτηση στην κάτω μεριά την πλάκα VMT2N και στην πάνω πλευρά τοποθετήθηκε η VMT2. Η τοποθέτηση των δύο πλακών έγινε ευθυγραμμισμένα ώστε να προκύψει ένα σύστημα 4mm με υπό-επιφανειακή ρωγμή 2mm. Εδώ η συχνότητα των 375Hz υπερτερεί σε σχέση με τη συχνότητα των 1575Hz όπως είναι και αναμενόμενο καθώς οι χαμηλές συχνότητες δημιουργούν μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης στα δινορρέυματα (Εικ.6.2.19).



Εικόνα 6.2.16. Το σύστημα 4mm (VMT2 & VMT2N) (α) σε τρισδιάστατη απεικόνιση και (β)σε πλάγια όψη.

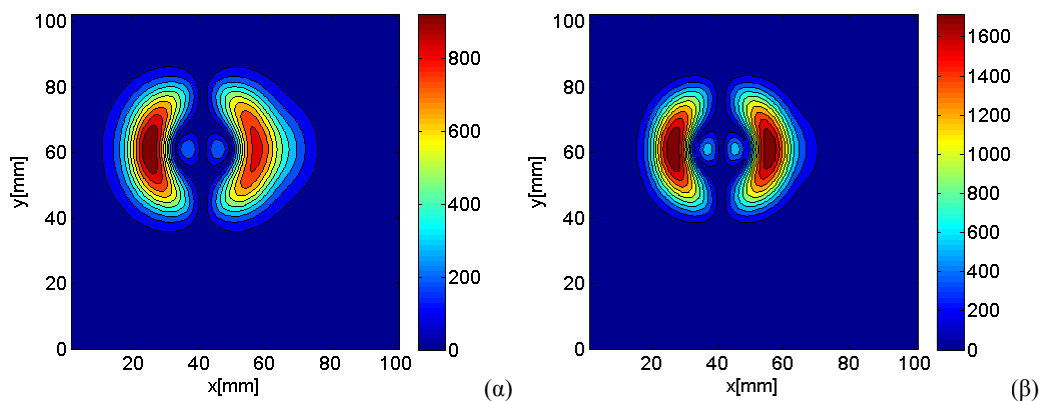


Εικόνα 6.2.17. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του βαθμιδομέτρου σε πλάκα αλουμινίου VMT2mm (με διαμερή σπή) στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίο στη συχνότητα 375Hz (Συμμετρία σήματος).



Εικόνα 6.2.18. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του βαθμιδομέτρου σε πλάκα αλουμινίου VMT2N (2mm με διαμερή σπή και υπό-επιφανειακή ρωγμή) στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

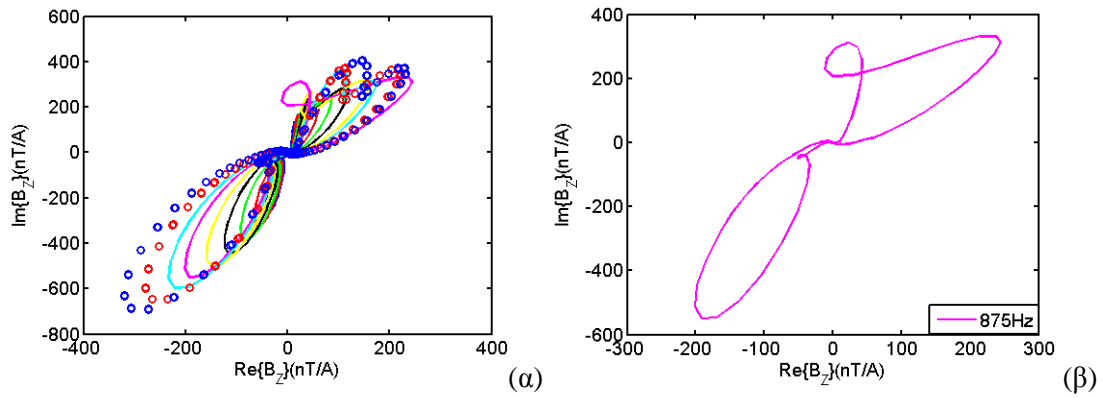




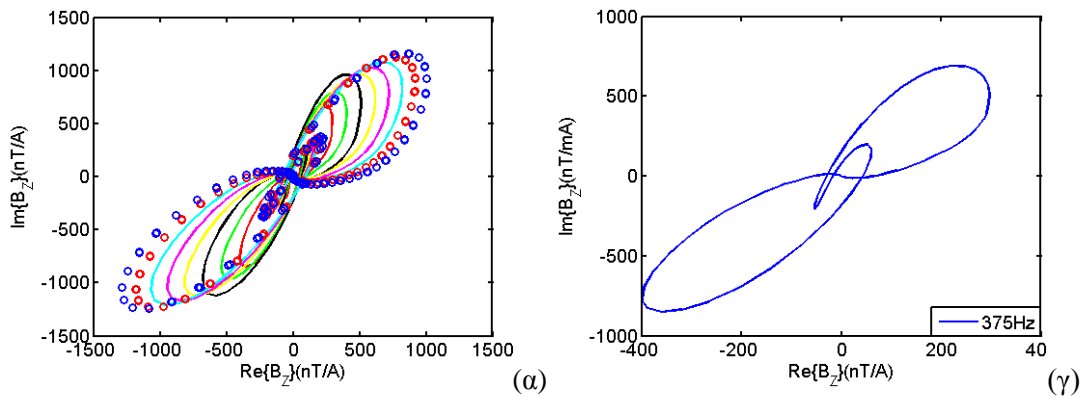
Εικόνα 6.2.19. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του βαθμιδομέτρου σε σύστημα πλακών αλουμινίου 4mm (VMT2 και VMT2N) στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου (α) συχνότητα 375Hz και (β) συχνότητα 1575Hz.

### 6.2.5. Προσομοιώσεις στο λογισμικό CIVA για διερεύνηση βέλτιστης συχνότητας με το βαθμιδόμετρο

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση συχνότητας με το λογισμικό προσομοίωσης CIVA διατηρώντας την ίδια διάταξη, δηλαδή το ίδιο συμμετρικό ορθογωνικό πηνίο B, το βαθμιδόμετρο σε σταθερή απόσταση 13.5mm από την πλάκα αλουμινίου VMT1N (με οπή και επιφανειακή ρωγμή, Κεφάλαιο 5). Στη διερεύνηση αυτή μετρήθηκε το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο κατά τη σάρωση του μαγνητομέτρου πάνω από την πλάκα με τη ρωγμή και οπή σε ένα εύρος συχνοτήτων από 375Hz έως και 1175Hz με βήμα 100Hz. Παρατηρήθηκε ότι το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο στην πλάκα είναι πιο έντονο καθώς αυξάνει η συχνότητα. Η ασυμμετρία του διπλού λοβού φανερώνει την παρουσία ρωγμής και είναι προφανές ότι οι ενδείξεις είναι πολύ πιο έντονες στις επιφανειακές ρωγμές όταν χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες. Η μεγαλύτερη ασυμμετρία και επομένως η βέλτιστη συχνότητα για τη διάκριση μιας επιφανειακής ασυνέχειας από το συνολικό σήμα παρατηρήθηκε στα 875Hz. Αυτό απεικονίζεται στην Εικ.6.2.20α και β, όπου στη α έχουν τοποθετηθεί πολλά χρώματα για να γίνει πιο έντονη η διάκριση του σήματος της επιφανειακής ρωγμής στη συχνότητα των 875Hz (το σήμα με το μωβ χρώμα). Η ίδια προσομοίωση πραγματοποιήθηκε και στο σύστημα των δύο πλακών 2mm (VMT1 και VMT1N) με υπό-επιφανειακή ρωγμή και παρατηρήθηκε το αναμενόμενο ότι όσο αυξάνεται το βάθος, η μεγάλη συχνότητα δεν βελτιώνει την απόκριση του σήματος από τη ρωγμή παρά μόνο επηρεάζει το σήμα του μαγνητικού πεδίου. Εδώ η καλύτερη συχνότητα για το πιο ευδιάκριτο σήμα της ρωγμής είναι η μικρότερη συχνότητα των 375Hz. Αυτό απεικονίζεται στην Εικ.6.2.21α και β, όπου και εδώ έχει χρησιμοποιηθεί ποικιλία χρωμάτων (στην Εικ.6.2.21α) για να γίνει πιο έντονη η διάκριση του σήματος της υπό-επιφανειακής ρωγμής στη συχνότητα των 375Hz (μπλε χρώμα).



Εικόνα 6.2.20. Το σήμα στο μιγαδικό επίπεδο του μαγνητικού πεδίου (nT/A) σε ένα εύρος συχνοτήτων από 375Hz έως και 1175Hz με βήμα 100Hz καθώς το μαγνητόμετρο SQUID μετακινείται κατά μήκος της πλάκας αλουμινίου VMT1N με οπή και επιφανειακή ρωγμή (α) συγκεντρωτική απεικόνιση και (β) το πιο ευδιάκριτο σήμα στη συχνότητα των 875Hz.



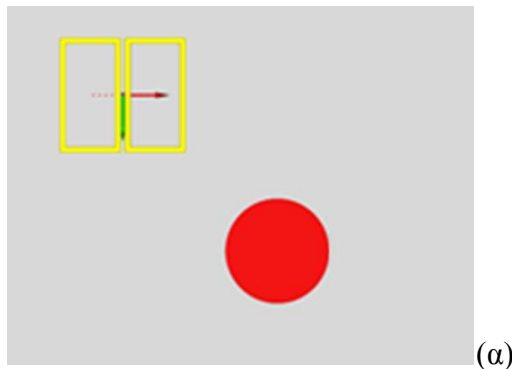
Εικόνα 6.2.21. Το σήμα στο μιγαδικό επίπεδο του μαγνητικού πεδίου (nT/A) σε ένα εύρος συχνοτήτων από 375Hz έως και 1175Hz με βήμα 100Hz καθώς το μαγνητόμετρο SQUID μετακινείται κατά μήκος σύστημα πλακών αλουμινίου 2mm (VMT1 και VMT1N) με υπό-επιφανειακή ρωγμή (α) συγκεντρωτική απεικόνιση και (β) το πιο ευδιάκριτο σήμα στη συχνότητα των 375Hz.

### 6.3.Θεωρητική διερεύνηση πηνίων διαφόρων σχημάτων με το βαθμιδόμετρο

Αρχικά έγινε μία θεωρητική διερεύνηση στο λογισμικό CIVA για την επίδραση που έχει η χρήση πηνίων διαφόρων σχημάτων και κατευθύνσεων στη συμπεριφορά του βαθμιδομέτρου SQUID (HTS) (μαγνητομέτρου dc SQUID με δύο αισθητήρες). Σημειώνεται ότι η απόσταση ανάμεσα στο βαθμιδόμετρο και στα υπό- εξέταση δοκίμια ήταν σταθερή και ίση με 13.5mm.

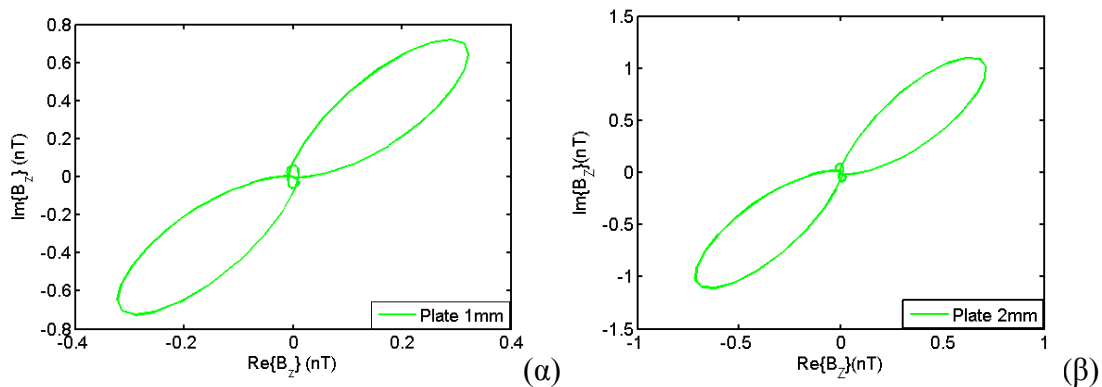
Συγκεκριμένα, έγινε σάρωση με ορθογωνικό πηνίο (πηνίο B, που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα πειράματα) πάνω στην πλάκα αλουμινίου VMT1N, 1mm με διαμπερή οπή διαμέτρου 20mm (τα χαρακτηριστικά της αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5), παρόμοιας γεωμετρίας με τις οπές που συναντώνται στα αεροσκάφη (η ρωγμή είναι δίπλα ακριβώς από την οπή).

Αρχικά, έγινε σάρωση με το ορθογωνικό πηνίο B (Εικ.6.1.14) πάνω στην πλάκα VMT1N, καθώς και στην πλάκα αλουμινίου VMT2N 2mm με διαμπερή οπή διαμέτρου 20mm (Εικ.6.3.1) (τα χαρακτηριστικά της αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5).



Εικόνα 6.3.1. Σάρωση πλάκας αλουμινίου 1mm και 2mm με διαμπερή οπή με το ορθογωνικό πηνίο.

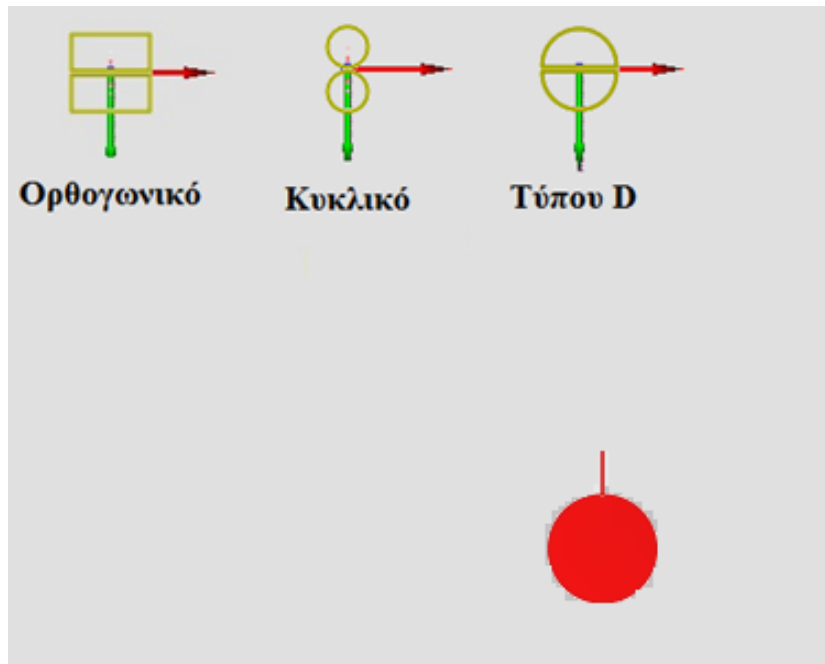
Η προσομοίωση στο CIVA έδωσε συμμετρικό σήμα που προέκυψε από την παρουσία της οπής, όπως και αναμένονταν. Το σήμα από την πλάκα αλουμινίου 2mm είναι πιο ισχυρό από την πλάκα αλουμινίου 1mm, όπως φαίνεται και από την Εικ.6.3.2.



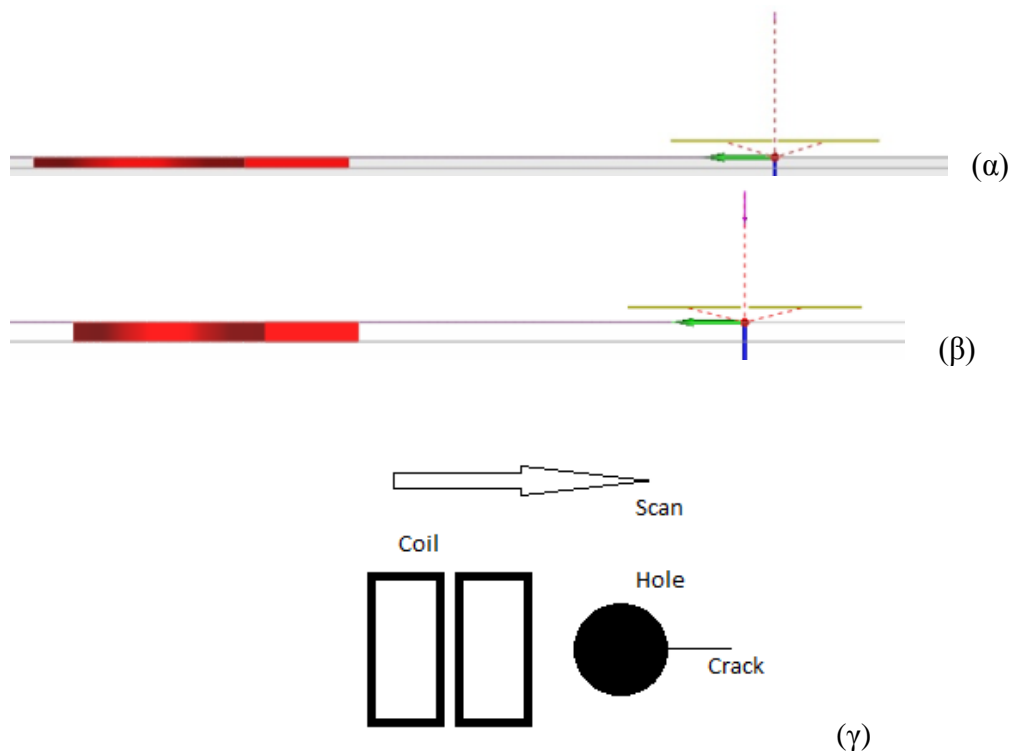
Εικόνα 6.3.2. Το σήμα στο μιγαδικό επίπεδο του μαγνητικού πεδίου της οπής από την πλάκα αλουμινίου (α) πάχους 1mm και (β) πάχους 2mm.

Η θεωρητική διερεύνηση συνεχίστηκε με τη σάρωση τριών πηνίων ίδιων διαστάσεων αλλά διαφορετικών σχημάτων σε συχνότητα 500Hz σε πλάκες αλουμινίου 1mm (VMT1N, Κεφάλαιο 5) και 2mm με διαμπερή οπή και ρωγμή (VMT2N, Κεφάλαιο 5), με τη ρωγμή να βρίσκεται ακριβώς δίπλα από την οπή. Χρησιμοποιήθηκαν το

ορθογωνικό πηνίο B, πηνίο τύπου D καθώς και κυκλικό πηνίο σε συχνότητα 500Hz (Εικ.6.3.3).



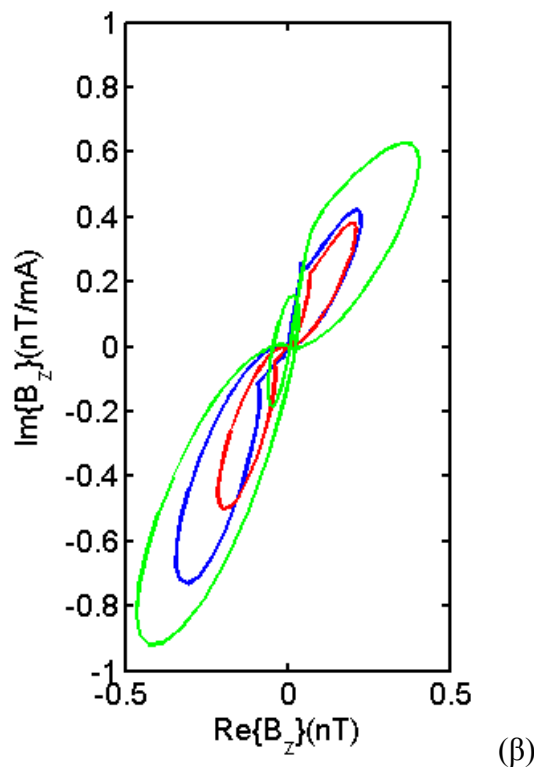
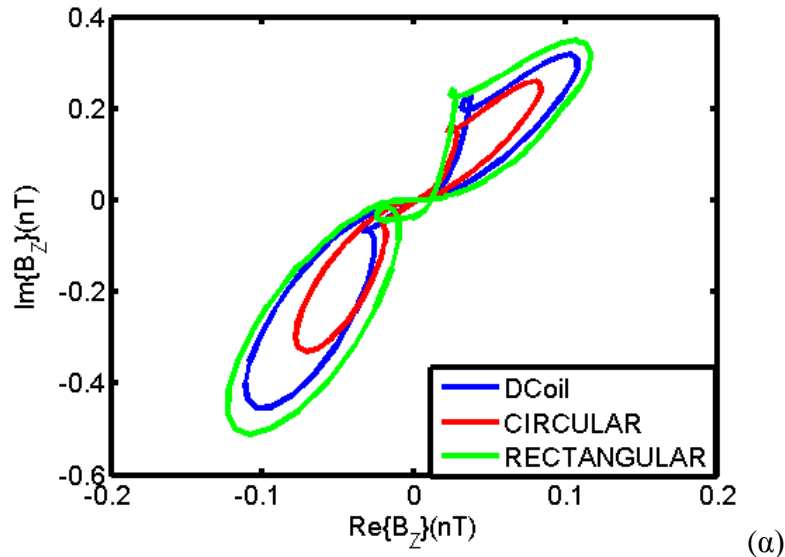
Εικόνα 6.3.3. Τα τρία πηνία που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση στη σάρωση πλάκας αλουμινίου 1mm με επιφανειακή ρωγμή και διαμερή οπή.



Εικόνα 6.3.4. Πλάγια όψη της πλάκας αλουμινίου με διαμερή ρωγμή και οπή (α) 1mm πάχος και (β) 2mm πάχος και (γ) κάτω όψη της σάρωσης στις πλάκες πάχους 1mm και 2mm.

Η παρουσία της ρωγμής στη σάρωση άλλαξε τη συμμετρία του προηγούμενου σήματος και η προσομοίωση έδωσε τις παρακάτω εικόνες, όπου η παρουσία της ρωγμής δίπλα στην οπή είναι εμφανής και στις δύο περιπτώσεις αλλά το σήμα της

ρωγμής είναι ακόμη πιο ισχυρό στην περίπτωση της πλάκας VMT1N. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης έδειξε ότι η σάρωση, με τα τρία πηνία διαφορετικών σχημάτων, έδωσε σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα (Εικ.6.3.5). Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι το σήμα από τα τρία πηνία έχει παρόμοια φάση. Η μόνη μικρή διαφορά που εντοπίστηκε είναι ότι το σήμα από το ορθογωνικό πηνίο Γ είναι λίγο πιο ισχυρό, μετά ακολουθεί το πηνίο τύπου D και τέλος το σήμα από το κυκλικό πηνίο.

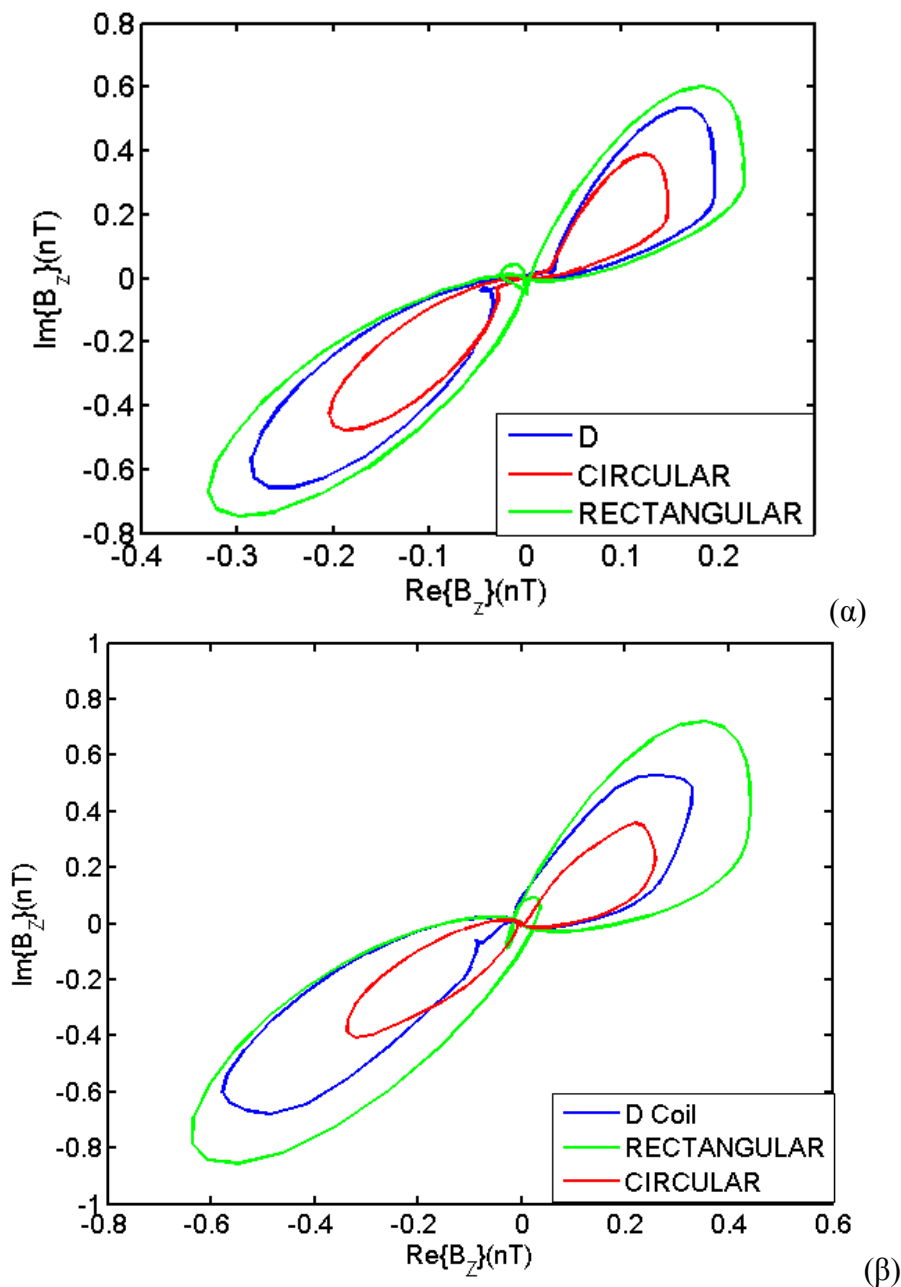


Εικόνα 6.3.5. Σήμα από τη σάρωση με τα τρία πηνία (α) στην πλάκα 1mm και (β) στην πλάκα 2mm.

Στη συνέχεια έγινε σάρωση και με τα τρία πηνία (ορθογωνικό, κυκλικό και τύπου D στην ίδια συχνότητα με πριν (500Hz) σε σύστημα αλουμινίου πάχους 2mm και πάχους 4mm. Το κάθε σύστημα των 2mm και 4mm αποτελείται από δύο πλάκες με διαμπερή οπή και υπό-επιφανειακή ρωγμή 1mm και 2mm αντίστοιχα, και βρίσκονται δίπλα ακριβώς από την οπή. Οι πλάκες αλουμινίου είναι τοποθετημένες με τέτοιο

τρόπο ώστε να έχουν τις ίδιες διαμπερείς οπές τοποθετημένες η μία ακριβώς πάνω στην άλλη με την κάτω πλάκα να έχει και ρωγμή δίπλα ακριβώς στην οπή για να επιτευχθεί η προσομοίωση ενός συστήματος διπλού στρώματος (όπως περιγράφεται και στη σελίδα 87).

Στις Εικ.6.3.6α και β είναι εμφανές ότι η παρουσία της υπό-επιφανειακής ρωγμής στη σάρωση άλλαξε το προηγούμενο σήμα όπου ήταν έντονη η παρουσία της επιφανειακής ρωγμής. Εδώ, είναι εμφανής η επίδραση της υπό-επιφανειακής ρωγμής στο σήμα που προκύπτει. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φανερώνει ότι και σε αυτή την περίπτωση η σάρωση με τα τρία πηνία διαφορετικών σχημάτων, έδωσε σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα (το σήμα από το ορθογωνικό πηνίο είναι λίγο πιο ισχυρό, μετά ακολουθεί το πηνίο τύπου D και τέλος το κυκλικό πηνίο). Επίσης παρατηρήθηκε παρόμοια φάση και στα τρία πηνία (ορθογωνικό, κυκλικό και πηνίο τύπου D).



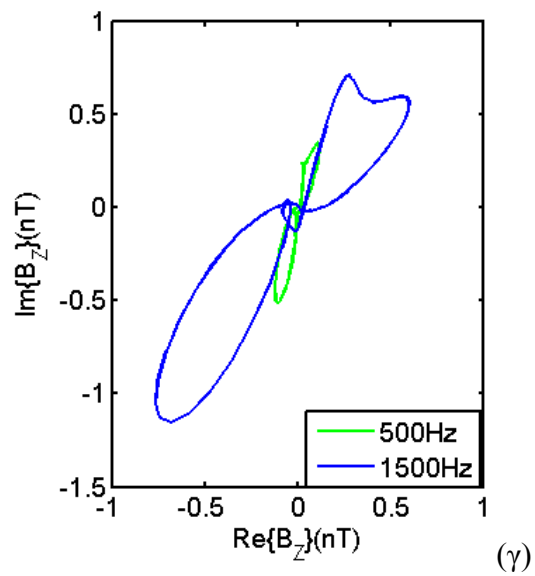
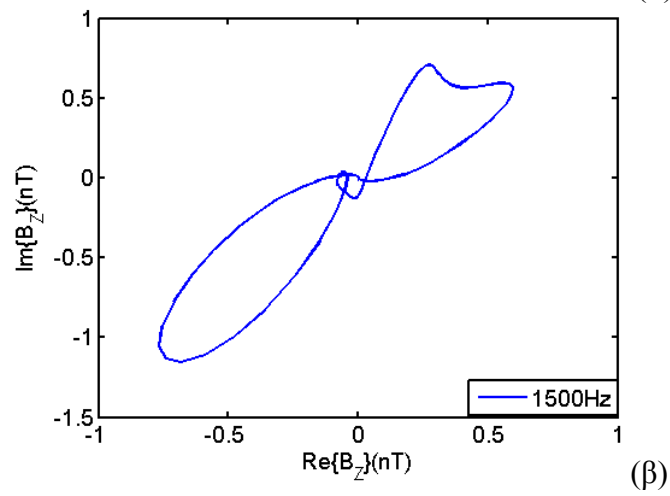
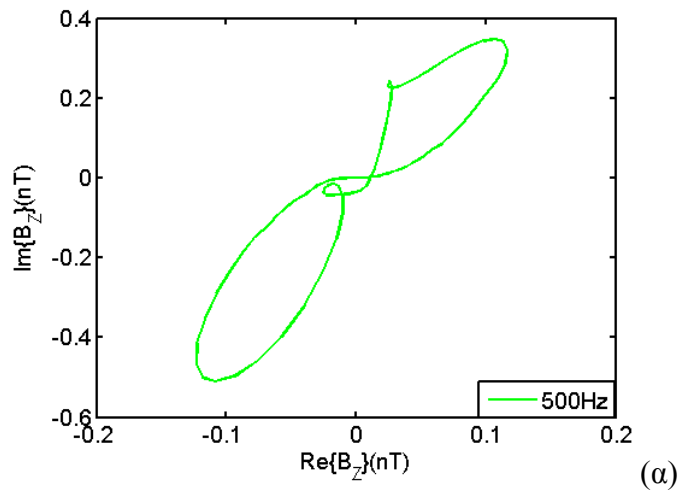
Εικόνα 6.3.6. Σήμα από την σάρωση με τα τρία πηνία (α) σε σύστημα 2mm με υπό-επιφανειακή ρωγμή (β) σε σύστημα 4 mm με υπό-επιφανειακή ρωγμή.

Η σύγκριση των Εικ.6.3.7 και Εικ.6.3.8 δείχνουν ότι η παρουσία της επιφανειακής ρωγμής δίνει πιο έντονη διαταραχή στο σήμα καθώς παρατηρείται ότι η παραμόρφωση είναι πολύ πιο έντονη στην περίπτωση της επιφανειακής ρωγμής σε σχέση με τις υπό-επιφανειακές ρωγμές όπως απεικονίζονται και στις Εικ.6.3.11 - 6.3.12.

Επίσης, διαπιστώθηκε το προσδοκώμενο αποτέλεσμα ότι το σήμα είναι πιο έντονο στην υπό-επιφανειακή ρωγμή στο σύστημα πλακών των 2mm σε σχέση με το σύστημα πλακών των 4mm καθώς τα δινορρέυματα έχουν μεγαλύτερη ένταση όσο πιο κοντά αναπτύσσονται στην επιφάνεια.

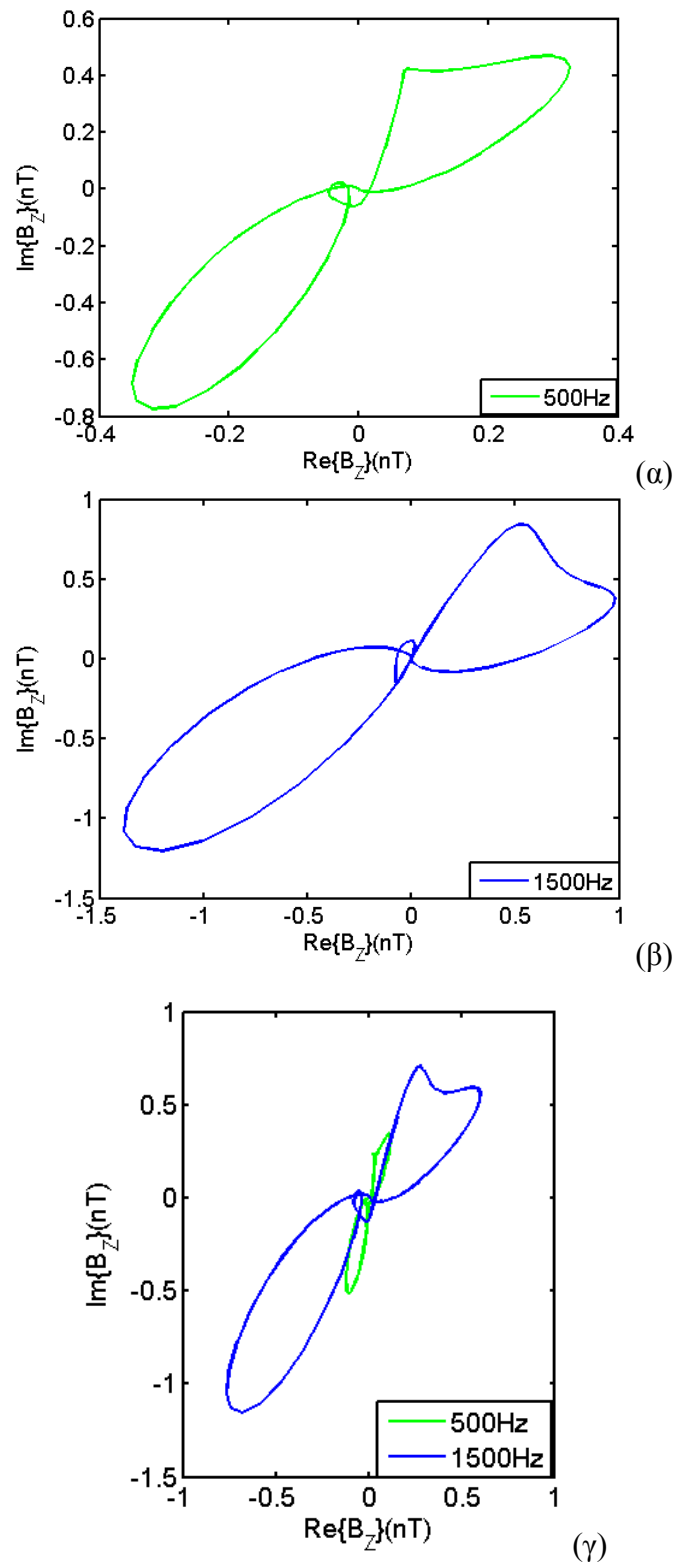
Επιπλέον, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (τόσο στη περίπτωση της επιφανειακής όσο και στην περίπτωση της υπό-επιφανειακής ρωγμής) δείχνουν ότι το σήμα που προκύπτει σε κάθε περίπτωση έχει ίδιο σχήμα με μικρές διαφορές όσον αφορά την έντασή του. Αυτό δείχνει ότι το σχήμα του πηνίου δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του

Στη συνέχεια επιλέχτηκε το ορθογωνικό πηνίο (το οποίο έδωσε το πιο ευδιάκριτο σήμα σε σχέση με τα άλλα δύο πηνία, πηνίο τύπου D και κυκλικό πηνίο) στο οποίο έγινε παραμετρική ανάλυση. Συγκεκριμένα, έγινε σάρωση σε δύο συχνότητες στα 500Hz και στα 1500Hz τόσο στην πλάκα VMT1N όσο και στην πλάκα VMT2N (τα χαρακτηριστικά των πλακών αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5, Πίνακας 5.1.). Η σάρωση πραγματοποιήθηκε όπως απεικονίζεται στην Εικ.6.3.4α και β. Συγκρίνοντας τις Εικ.6.3.8 (απεικονίζονται τα αποτελέσματα της VMT1N) και Εικ.6.3.9 (απεικονίζονται τα αποτελέσματα της VMT2N) παρατηρείται και για τις δύο πλάκες ότι η ένταση του σήματος είναι πιο ισχυρή στη συχνότητα των 1500Hz σε σχέση με τη συχνότητα των 500Hz αλλά στη συχνότητα των 500Hz το σήμα είναι πιο διακριτό.



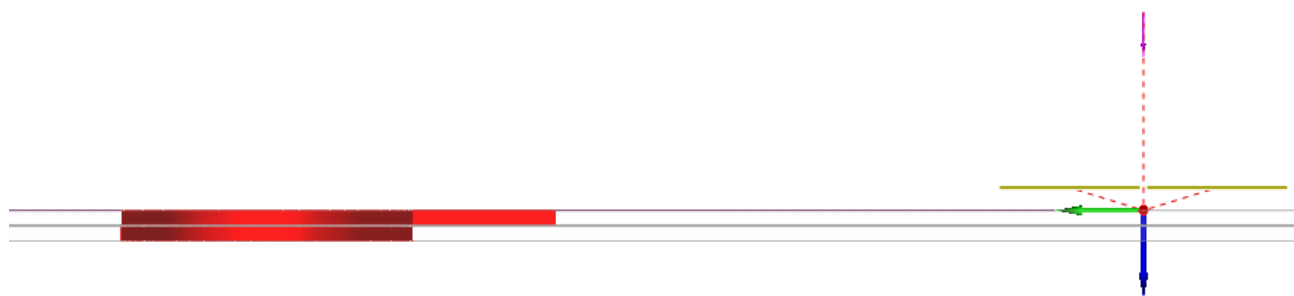
Εικόνα 6.3.7. Σήμα από την σάρωση στην πλάκα VMT1N (α) σε συχνότητα 500Hz (β) σε συχνότητα 1500Hz και (γ) η σύγκριση των δύο συχνοτήτων.



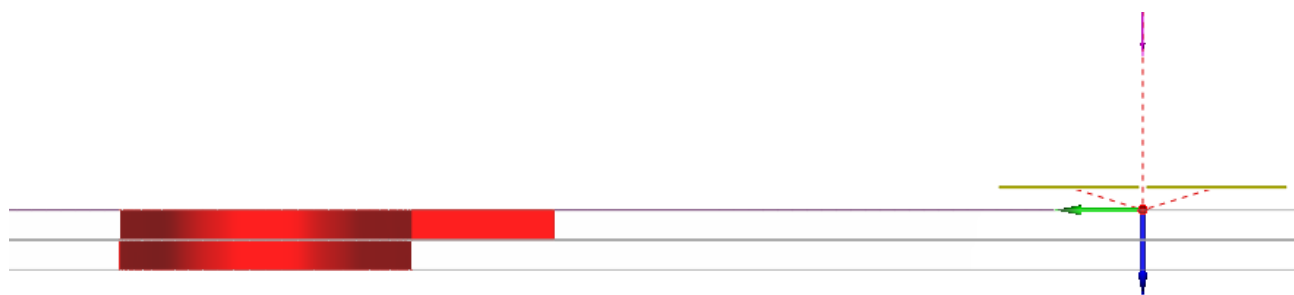


Εικόνα 6.3.8. Σήμα από την σάρωση στην πλάκα VMT2N (α) σε συχνότητα 500Hz (β) σε συχνότητα 1500Hz και (γ) η σύγκριση των δύο συχνοτήτων.

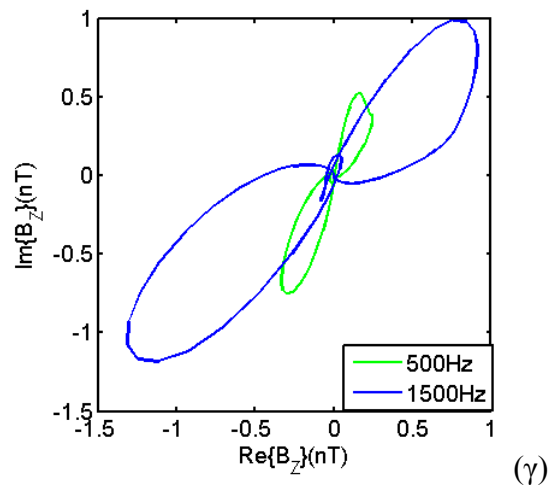
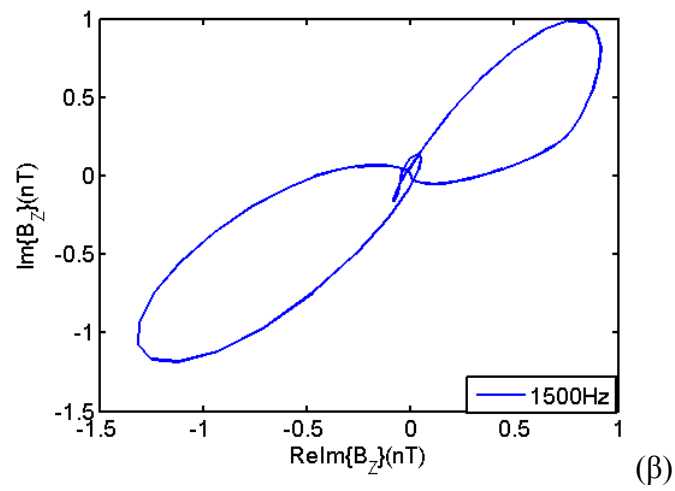
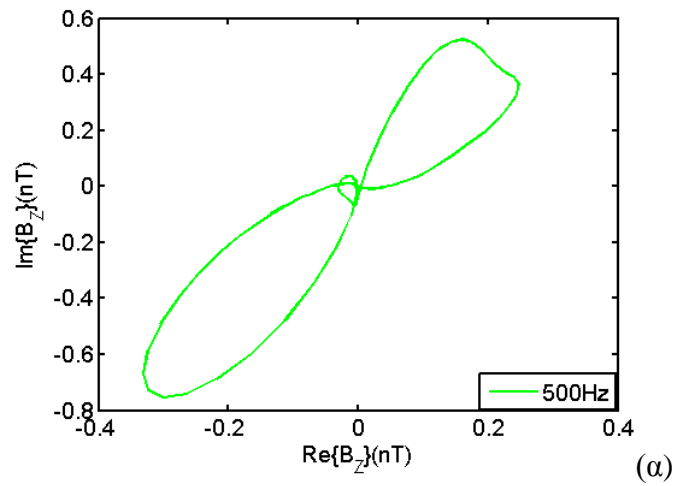
Ακριβώς οι ίδιες προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν με το ίδιο ορθογωνικό πηνίο και στα συστήματα των 2mm και 4mm ( Εικ.6.3.9 και Εικ.6.3.10) (όπως περιγράφονται παραπάνω, σελ.100) με την διαφορά ότι η ρωγμή είναι επιφανειακή και σάρωση όπως απεικονίζεται στην Εικ.6.3.4γ. Στις Εικ.6.3.11-6.3.12, παρατηρείται και για τα δύο συστήματα το αναμενόμενο ότι η ένταση του σήματος είναι πιο ισχυρή στην συχνότητα των 1500Hz σε σχέση με τη συχνότητα των 500Hz καθώς οι ρωγμές είναι επιφανειακές. Επίσης στο σύστημα 4mm είναι πιο δυνατή η παρουσία της εμφάνισης ρωγμής καθώς υπάρχει μεγαλύτερη ασυμμετρία μεταξύ των δύο λοβών. Επομένως παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το συνολικό πάχος (4mm) του συστήματος και επομένως το βάθος της ρωγμής τόσο εντοπίζεται πιο ισχυρό το σήμα της σε σχέση με το πως εμφανιζόταν σε μικρότερα πάχη (π.χ. καλύτερο στην περίπτωση του συστήματος 4mm σε σχέση με το σύστημα 2mm καθώς η ρωγμή στην μία περίπτωση έχει βάθος 2mm ενώ στην άλλη έχει βάθος 1mm). Αυτό παρουσιάστηκε και στην περίπτωση της σάρωσης των πλακών VMT1N και VMT2N (ενίσχυση του σήματος της επιφανειακής ρωγμής με την αύξηση του συνολικού πάχους της πλάκας και συνεπώς αύξηση του βάθους της ρωγμής π.χ. καλύτερο στην περίπτωση της πλάκας 2mm-VMT2N- σε σχέση με την πλάκα 1mm-VMT1N-) και επιβεβαιώθηκε και με τη σάρωση των δύο συστημάτων όπου τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Επίσης συγκρίνοντας τις Εικ.6.3.7 και 6.3.11 παρατηρείται ότι το σήμα της ρωγμής δεν είναι πιο ισχυρό όταν αυξάνεται το συνολικό πάχος του συστήματος χωρίς να αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της ρωγμής, απλώς το σήμα της ρωγμής αλλάζει μορφή. Το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα προκύπτει και από τη σύγκριση των Εικ.6.3.8 και 6.3.12.



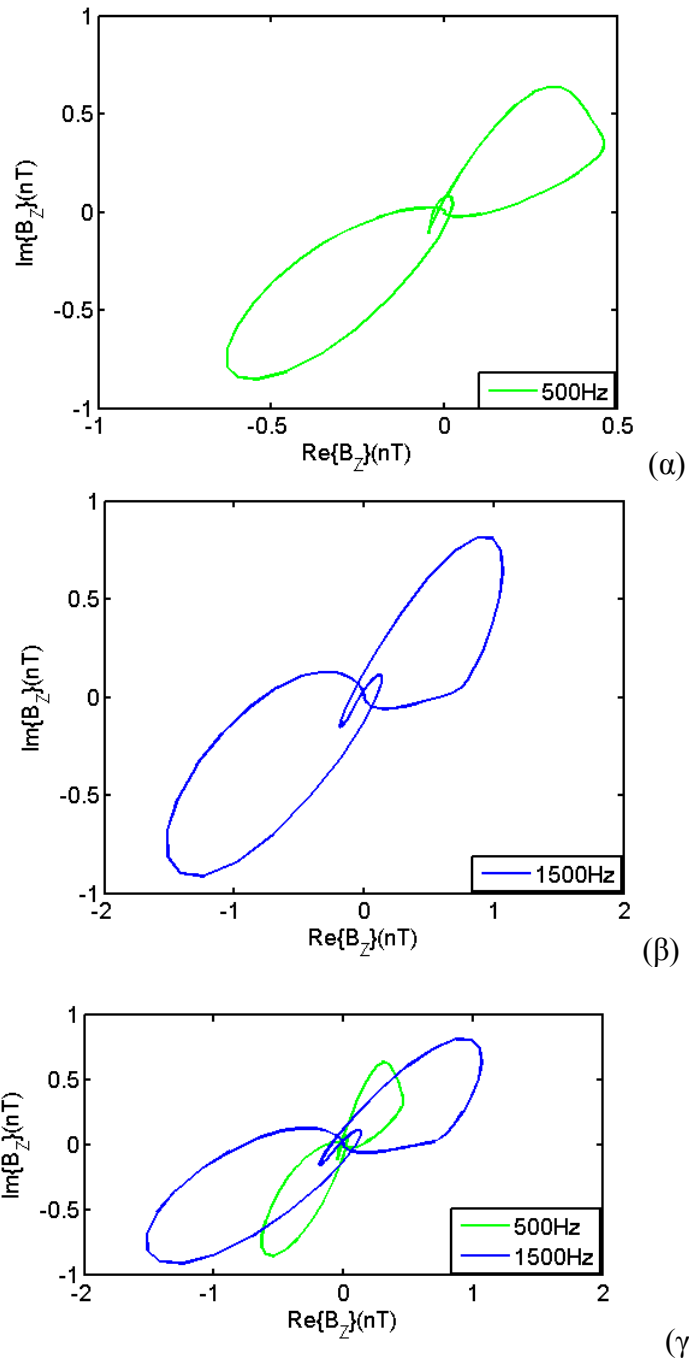
Εικόνα 6.3.9. Το σύστημα πλακών 2mm με επιφανειακή ρωγμή 1mm και διαμετρή οπή.



Εικόνα 6.3.10. Το σύστημα πλακών 4mm με επιφανειακή ρωγμή 2mm και διαμετρή οπή.

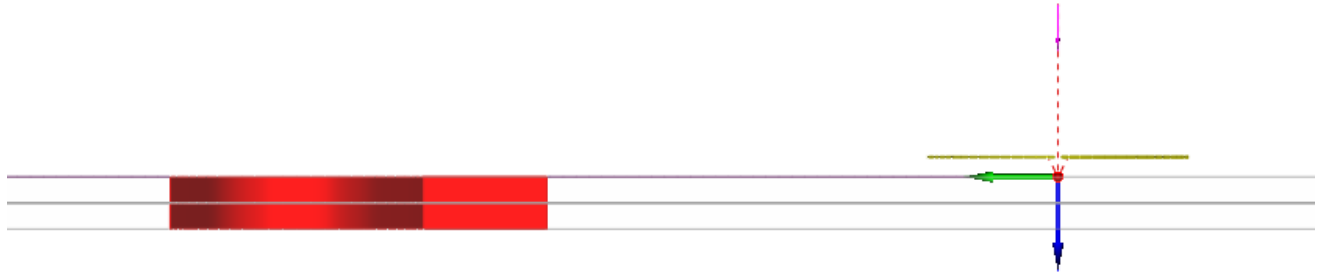


Εικόνα 6.3.11. Σήμα από τη σάρωση στο σύστημα 2mm (α) σε συχνότητα 500Hz (β) σε συχνότητα 1500Hz και (γ) η σύγκριση των δύο συχνοτήτων.



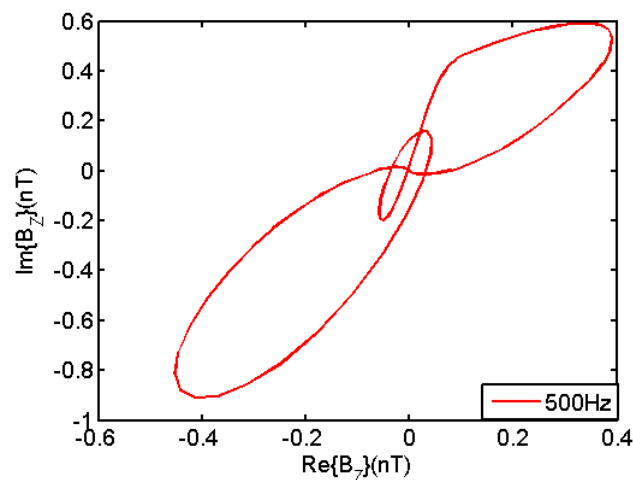
Εικόνα 6.3.12. Σήμα από τη σάρωση στο σύστημα 4mm (α) σε συχνότητα 500Hz (β) σε συχνότητα 1500Hz και (γ) η σύγκριση των δύο συχνοτήτων.

Στη συνέχεια έγινε μια διερεύνηση για τη διακριτική ικανότητα του πηνίου. Αρχικά, η σάρωση έγινε σε σύστημα 2 πλακών 4mm (2mm η κάθε μία πλάκα με διαμπερή οπή και αγωγιμότητα 17MS/m) με δύο διαμπερείς ρωγμές ίδιου μεγέθους (μία επιφανειακή και μία υπό-επιφανειακή) τοποθετημένες από την ίδια πλευρά (Εικ.6.3.13).



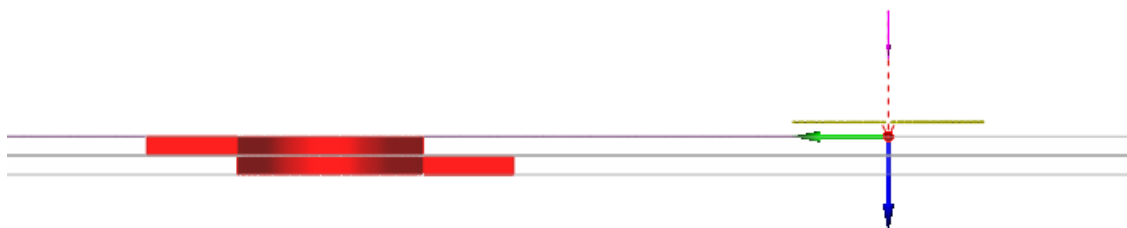
Εικόνα 6.3.13. Το σύστημα πλακών 4mm με δύο ρωγμές (επιφανειακή και υπό-επιφανειακή) ίδιου μεγέθους, τοποθετημένες στην ίδια πλευρά.

Η συχνότητα που επιλέχθηκε ήταν 500Hz και το σήμα που προέκυψε φαίνεται στην Εικ.6.3.14 και είναι διαφορετικό από την προηγούμενη περίπτωση.



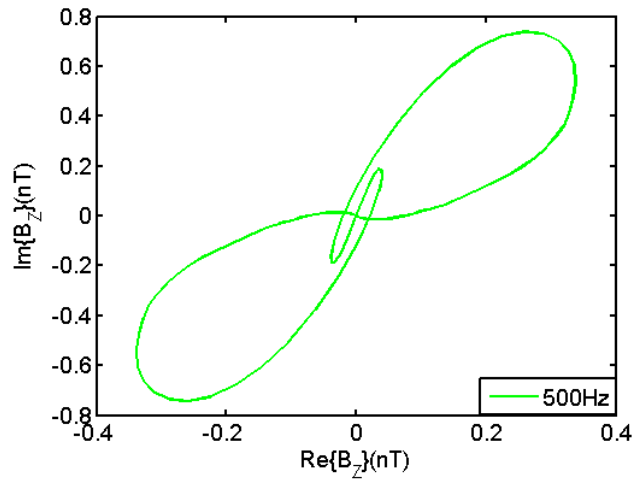
Εικόνα 6.3.14. Σήμα από τη σάρωση σε συχνότητα 500Hz σε σύστημα 4mm με δύο ρωγμές ίδιου μεγέθους, τοποθετημένες στην ίδια πλευρά.

Ακολούθησε η σάρωση σε σύστημα 2 πλακών 4mm (2mm η κάθε μία πλάκα με διαμπερή οπή και αγωγιμότητα 17MS/m) με δύο διαμπερείς ρωγμές ίδιου μεγέθους (μία επιφανειακή και μία υπό-επιφανειακή) τοποθετημένες εκατέρωθεν της οπής (σε διαφορετική πλευρά) (Εικ.3.3.15).



Εικόνα 6.3.15. Το σύστημα πλακών 4mm με δύο ρωγμές. Το σύστημα πλακών 4mm με δύο ρωγμές (επιφανειακή και υπο-επιφανειακή) ίδιου μεγέθους, τοποθετημένες σε διαφορετική πλευρά.

Η συχνότητα που επιλέχθηκε ήταν 500Hz και το σήμα που προέκυψε φαίνεται στην Εικ.6.3.16 και είναι διαφορετικό από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.



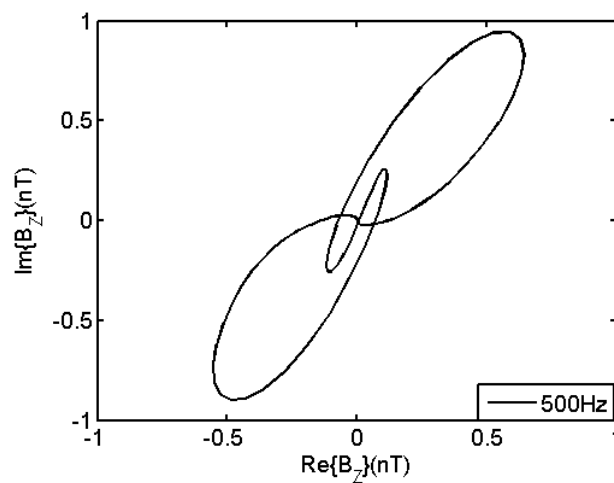
Εικόνα 6.3.16. Σήμα από τη σάρωση σε συχνότητα 500Hz σε σύστημα 4mm με δύο ρωγμές (επιφανειακή και υπό-επιφανειακή) ίδιου μεγέθους, τοποθετημένες σε διαφορετική πλευρά.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σάρωση σε σύστημα 2 πλακών 4mm (2mm η κάθε μία πλάκα με διαμπερή οπή και αγωγιμότητα 17MS/m) με δύο υπό-επιφανειακές ρωγμές διαφορετικού μεγέθους εκατέρωθεν της οπής (Εικ.6.3.17).



Εικόνα 6.3.17. Σήμα από τη σάρωση σε συχνότητα 500Hz σε σύστημα 4mm με δύο υπο-επιφανειακές ρωγμές διαφορετικού μεγέθους, τοποθετημένες εκατέρωθεν της οπής.

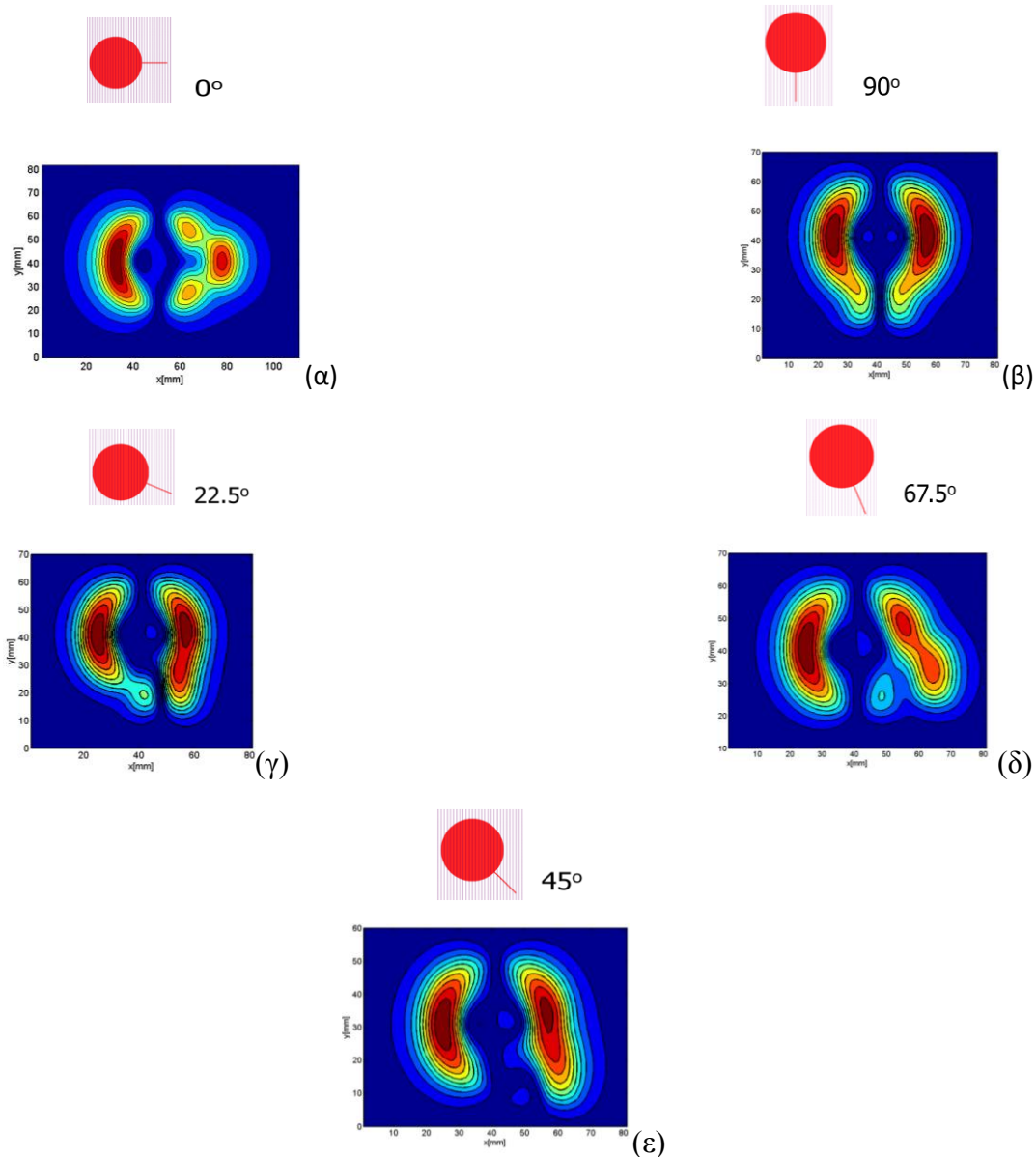
Η σάρωση έγινε σε συχνότητα 500Hz και το σήμα που προέκυψε απεικονίζεται στην Εικ.6.3.18.



Εικόνα 6.3.18. Σήμα από τη σάρωση σε συχνότητα 500Hz σε σύστημα 4mm με δύο υπο-επιφανειακές ρωγμές τοποθετημένες εκατέρωθεν της οπής.

Η σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων ανάμεσα στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν δείχνει την καλή διακριτική ικανότητα του πηνίου καθώς το σήμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση των υφιστάμενων ρωγμών. Συγκεκριμένα, η παρουσία ρωγμών ίδιου μεγέθους που έχουν τοποθετηθεί στην ίδια πλευρά επηρεάζουν το σήμα δημιουργώντας έντονη ασυμμετρία στον ένα λοβό του σήματος. Όταν όμως οι ρωγμές τοποθετηθούν σε αντίθετη πλευρά τότε το σήμα είναι πιο ισχυρό σε σχέση με τοποθέτηση των ρωγμών στην ίδια πλευρά αλλά η ασυμμετρία δεν είναι τόσο έντονη. Επίσης όταν οι ρωγμές τοποθετηθούν δίπλα ακριβώς από την οπή και στις δύο πλευρές το σήμα είναι ισχυρό καθώς επηρεάζεται από το σύνολο των σημάτων οπής και των δύο ρωγμών εκατέρωθεν (τις αντιμετωπίζει σαν μεγάλη συνεχόμενη υπό-επιφανειακή ρωγμή).

Στη συνέχεια ακολούθησε θεωρητική διερεύνηση για τοποθέτηση ρωγμών δίπλα σε οπή σε διάφορες γωνιακές θέσεις ώστε να μελετηθεί η απόκριση του σήματος. Συγκεκριμένα, μελετάται σάρωση c-scan με το βαθμιδόμετρο (συχνότητα 375Hz) σε πλάκα αλουμινίου 1mm με ρωγμή μήκους 9.6mm τοποθετημένη δίπλα σε οπή (διαμέτρου 20mm), (ίδια χαρακτηριστικά με τις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί μέχρι τώρα τόσο εργαστηριακά όσο και θεωρητικά). Η τοποθέτηση της ρωγμής έγινε σε μηδέν ( $0^\circ$ ), είκοσι δύο μισό ( $22.5^\circ$ ), σαράντα πέντε ( $45^\circ$ ), εξήντα επτά μισό ( $67.5^\circ$ ) και ενενήντα μοίρες ( $90^\circ$ ) ως προς το επίπεδο, όπως απεικονίζεται στις ακόλουθες εικόνες (Εικ.6.3.19α- 6.3.19δ). Τα σήματα απεικονίζουν ξεκάθαρα ότι ανάλογα με την κατεύθυνση της ρωγμής οι λοβοί παραμορφώνονται αντίστοιχα. Επομένως, σε περίπτωση επιθεώρησης για εντοπισμό ασυνεχειών σε άγνωστα δοκίμια με σάρωση c-scan, τα σήματα αυτά μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για τον ακριβή εντοπισμό της κατεύθυνσης της ρωγμής.



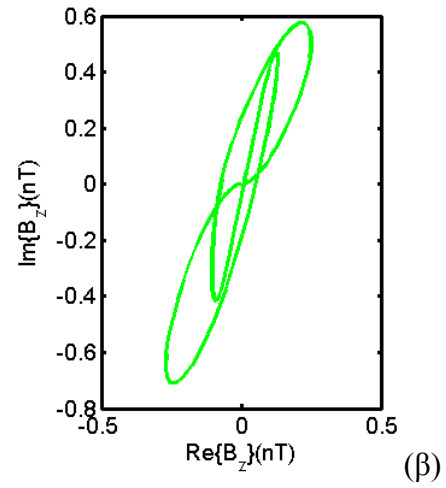
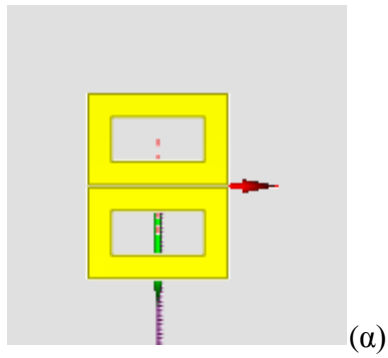
Εικόνα 6.3.19. Προσομοίωση της σάρωσης C-scan του βαθμιδομέτρου σε πλάκα αλουμινίου 1mm με διαμπερή οπή και ρωγή στο CIVA. Απεικόνιση του πλάτους του μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα 375Hz (α) θέση ρωγμής 0°, (β) θέση ρωγμής 90°, (γ) θέση ρωγμής 22.5°, (δ) θέση ρωγμής 67.5° και (ε) θέση ρωγμής 45°.

Η θεωρητική διερεύνηση στο λογισμικό CIVA συνεχίστηκε με αλλαγές στις διαστάσεις του ορθογωνικού πηνίου. Αρχικά μεταβάλλονται οι διαστάσεις του πάχους του (Εικ.6.3.20 έως και Εικ.6.3.22).

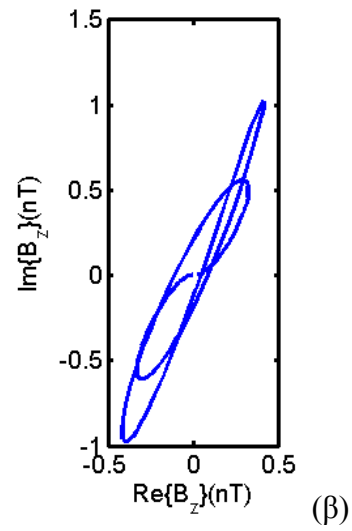
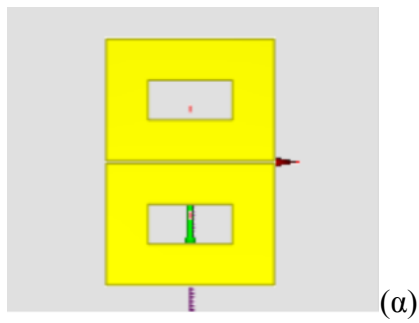
Πίνακας 6.3.1. Διαστάσεις ορθογωνικών πηνίων 1-3, αλλαγές στο πάχος

Διαστάσεις Πηνίου[mm]	Πηνίο1	Πηνίο2	Πηνίο3
Μήκος	9.7	9.7	9.7
Ύψος	0.1	0.1	0.1
Πάχος	5.0	10.0	15.9
Απόσταση πηνίων	0.9	0.9	0.9

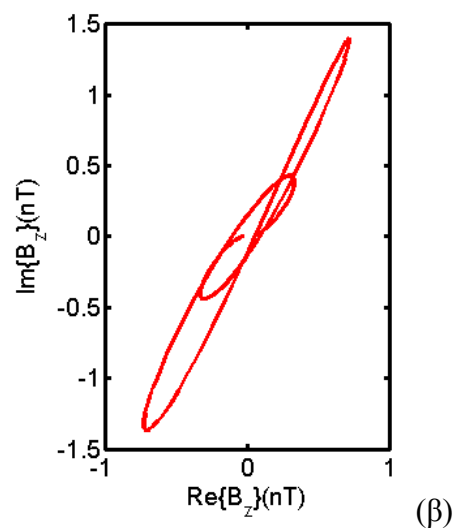
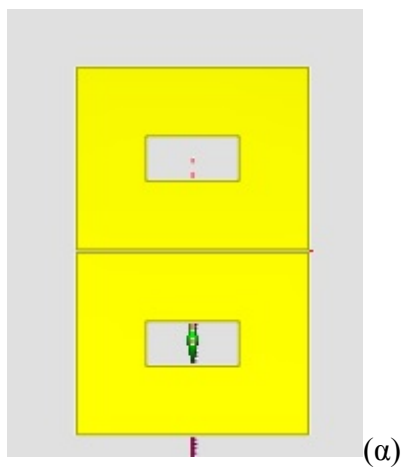




Εικόνα 6.3.20. α) Πηνίο1, συχνότητα 500Hz και β) Σήμα από την προσομοίωση.



Εικόνα 6.3.21. α) Πηνίο2, συχνότητα 500Hz και β) Σήμα από την προσομοίωση.

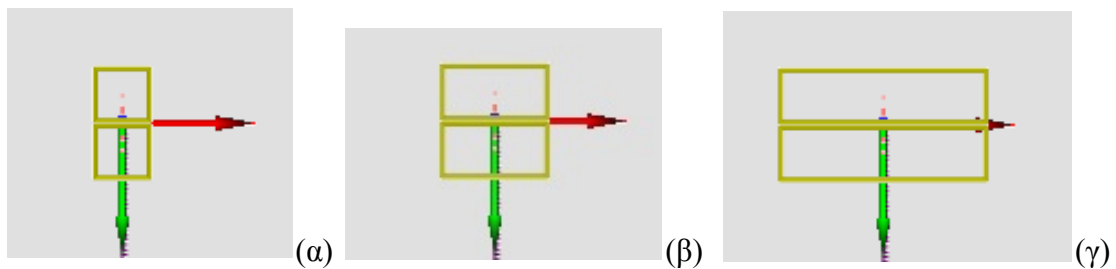


Εικόνα 6.3.22. α) Πηνίο3, συχνότητα 500Hz και β) Σήμα από την προσομοίωση.

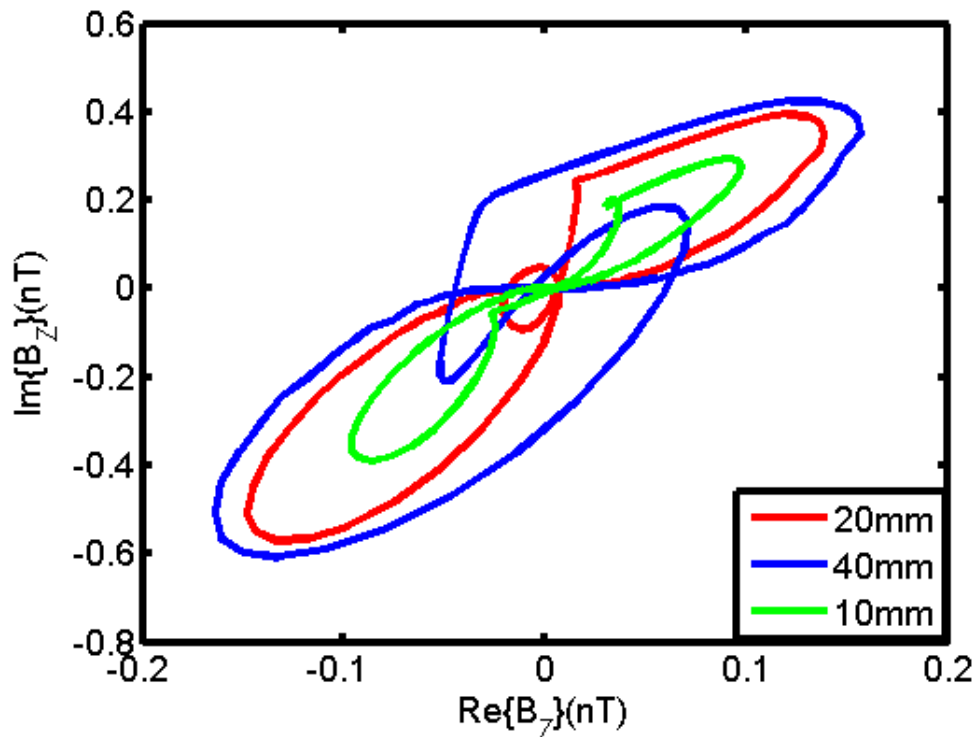
Ακολουθεί η παρουσίαση τριών περιπτώσεων σάρωσης σε πλάκα αλουμινίου 1mm με επιφανειακή ρωγμή και διαμπερή οπή με ορθογωνικό πηνίο όπου αλλάζουν οι διαστάσεις στο μήκος του (Εικ.6.3.23).

Πίνακας 6.3.2. Διαστάσεις ορθογωνικών πηνίων 4-6, αλλαγές στο μήκος

Διαστάσεις Πηνίου[mm]	Πηνίο4	Πηνίο5	Πηνίο6
Μήκος	10.0	20.0	40.0
Ύψος	0.1	0.1	0.1
Πάχος	1.0	1.0	1.0
Απόσταση πηνίων	0.9	0.9	0.9



Εικόνα 6.3.23. α) Πηνίο4, β) Πηνίο5 και γ) Πηνίο6



Εικόνα 6.3.24. Συγκεντρωτική απεικόνιση σήματος που προέκυψε από τη σάρωση με πηνία διαφορετικού μήκους.

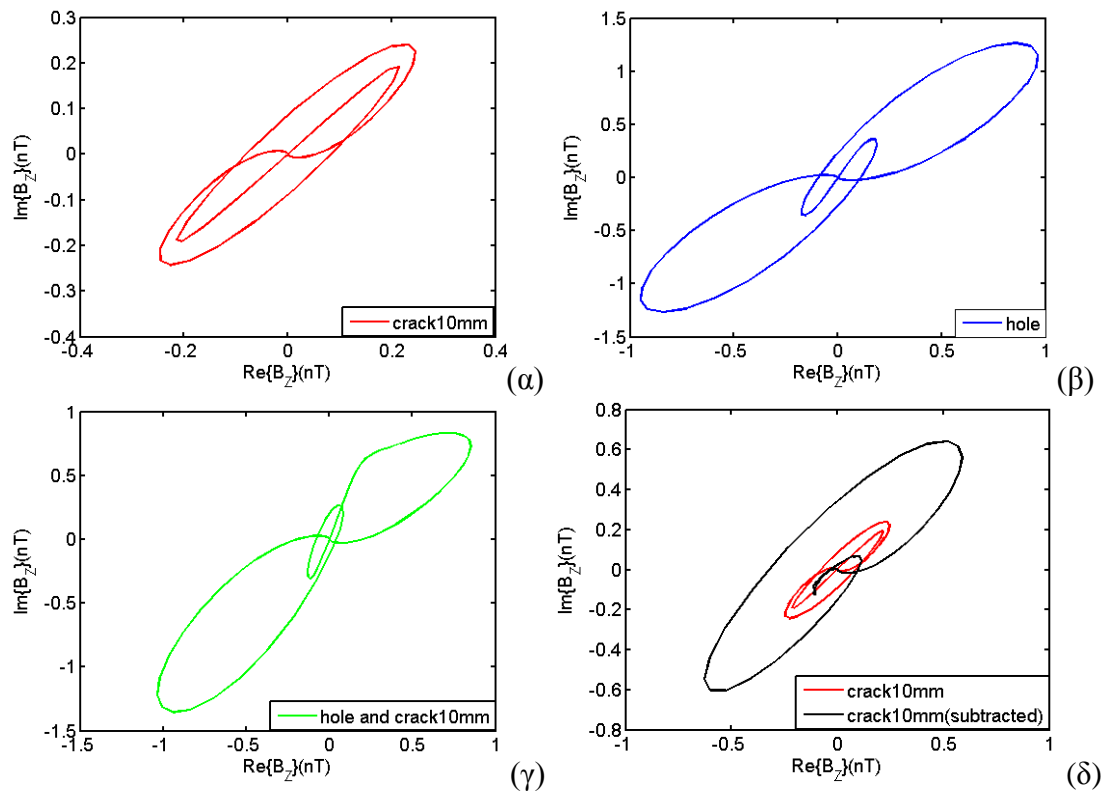
Τα αποτελέσματα όπως φαίνονται από τις Εικ.6.3.20-6.3.22 και Εικ.6.3.24 δείχνουν ότι η αλλαγή των διαστάσεων του πηνίου επηρεάζει το σήμα που προκύπτει από την πλάκα αλουμινίου VMT1N, 1mm με διαμπερή οπή και ρωγμή.

Η παραπάνω μελέτη μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το σήμα που προκύπτει από την ασυνέχεια επηρεάζεται από τις διαστάσεις του πηνίου διέγερσης (πάχος, μήκος) ενώ δεν επηρεάζεται από το σχήμα του πηνίου. Επίσης, η παρουσία της ασυνέχειας είναι ξεκάθαρη είτε χρησιμοποιούμε χαμηλή είτε υψηλή συχνότητα.

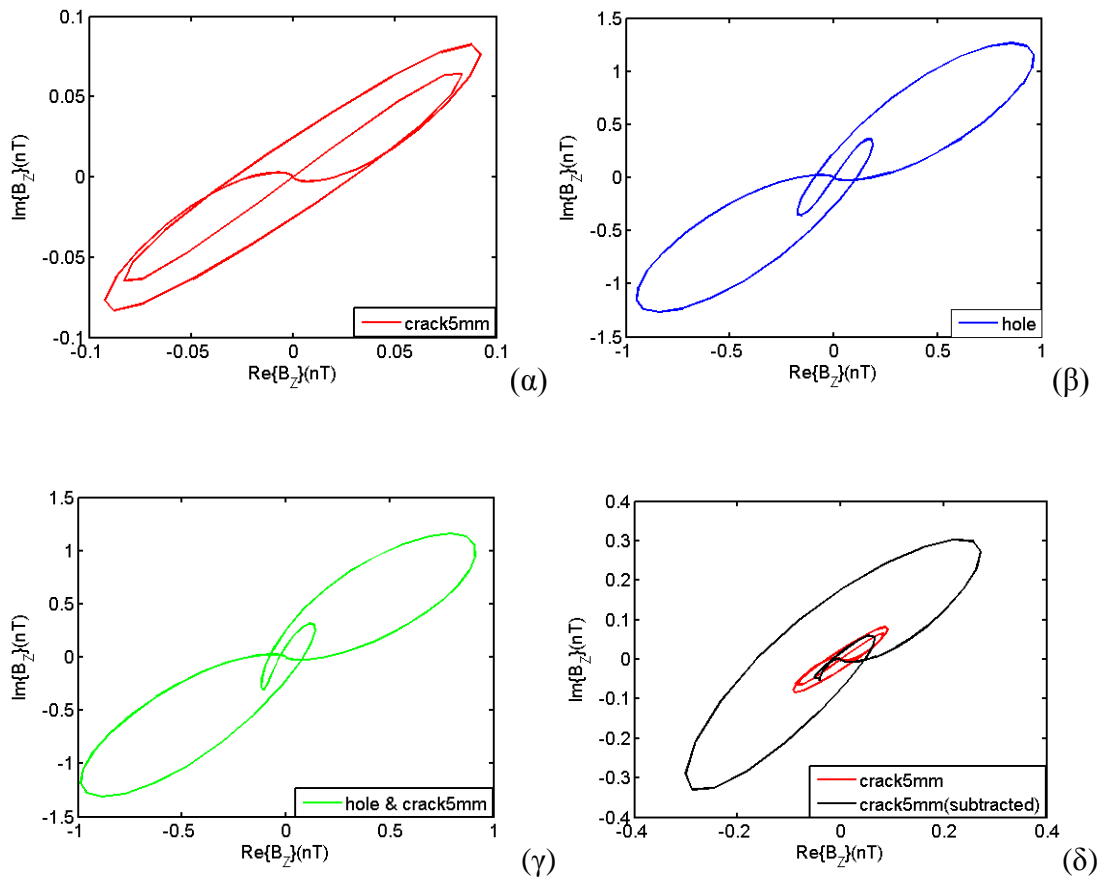
Στη συνέχεια, ακολουθεί διερεύνηση για τον τρόπο που επηρεάζει το μέγεθος της ρωγμής την ένταση του σήματος. Στο CIVA έγιναν προσομοιώσεις με το ορθογωνικό πηνίο Β που έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα και έχει αποδειχθεί τόσο θεωρητικά (λογισμικό) όσο και πειραματικά (εργαστήριο) η καλή του διακριτική ικανότητα. Η προσομοίωση έγινε σε πλάκα αλουμινίου 300mm×300mm, πάχους 1mm, με διαμπερή οπή διαμέτρου 20mm και διαμπερή ρωγμή δίπλα ακριβώς από την οπή μήκους 5mm και 10mm (πλάκα Α όταν η ρωγμή έχει μήκος 10mm και πλάκα Β όταν η ρωγμή έχει μήκος 5mm). Επίσης χρησιμοποιήθηκε και πλάκα αλουμινίου ίδιων χαρακτηριστικών (ίδιο πάχος, ίδιες διαστάσεις) με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει οπή αλλά μόνο ρωγμή ώστε να υπολογιστεί η ένταση του σήματος από την παρουσία μόνο της ρωγμής (πλάκα Γ όταν η ρωγμή έχει μήκος 10mm και πλάκα Δ όταν η ρωγμή έχει μήκος 5mm). Επιπλέον, οι προσομοιώσεις έγιναν και σε πλάκα αλουμινίου ίδιων διαστάσεων με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει ρωγμή αλλά μόνο οπή διαμέτρου 20mm (πλάκα Ε) ώστε να υπολογιστεί η ένταση του σήματος από την παρουσία μόνο της οπής. Σε όλες τις περιπτώσεις η σάρωση έγινε κατά μήκος της ρωγμής (όπως φαίνεται στην Εικ.6.1.1β), σε συχνότητα 1575Hz (η συχνότητα είναι μεγάλη καθώς γίνεται έλεγχος σε επιφανειακή ρωγμή). Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της πλάκας Ε (η πλάκα έχει μόνο διαμπερή οπή) η σάρωση πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως απεικονίζεται και στην Εικ.6.1.5.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης (Εικ.6.3.25) για τις πλάκες αλουμινίου Α (πλάκα με οπή και ρωγμή μήκους 10mm), Γ(πλάκα με ρωγμή μήκους 10mm) και Ε (πλάκα με οπή διαμέτρου 20mm). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης (Εικ.6.3.26) για τις πλάκες αλουμινίου Β (πλάκα με οπή και ρωγμή μήκους 5mm), Δ (πλάκα με ρωγμή μήκους 5mm) και Ε (πλάκα με οπή διαμέτρου 20mm).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν σε πλάκα υπάρχει μόνο ρωγμή τότε το σήμα είναι μικρό και ισχυροποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής (Εικ.6.3.25α και 6.3.26α). Στη συνέχεια η διερεύνηση έδειξε ότι όταν η ρωγμή βρίσκεται δίπλα σε οπή τότε το σήμα της ισχυροποιείται (σχεδόν τριπλασιάζεται) και επομένως μπορεί να εντοπιστεί με μεγαλύτερη ευκολία (Εικ.6.3.25δ και 6.3.26δ). Αυτό το συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό στη διεξαγωγή ελέγχου στα αεροσκάφη εφόσον η παρουσία ρωγμών δίπλα από τις οπές με ήλους συναρμογής, ισχυροποιεί το σήμα τους και βοηθάει στον εύκολο εντοπισμό τους.



Εικόνα 6.3.25. Σήμα στο μιγαδικό επίπεδο σε συχνότητα 1575Hz (ρωγμή 10mm) (α) ρωγμή μόνη, (β) οπή, (γ) οπή-ρωγμή μαζί και (δ) σήμα της ρωγμής μετά την αφαίρεση του σήματος της οπής από το σήμα της οπής και της ρωγμής (10mm).



Εικόνα 6.3.26. Σήμα στο μιγαδικό επίπεδο σε συχνότητα 1575Hz (ρωγμή 5mm) (α) ρωγμή μόνη, (β) οπή, (γ) οπή-ρωγμή μαζί και (δ) σήμα της ρωγμής μετά την αφαίρεση του σήματος της οπής από το σήμα της οπής και της ρωγμής (5mm).

# ΚΕΦ.7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL

Η μελέτη της συμπεριφοράς του SQUID οδήγησε στην ανάγκη μελέτης και άλλων αισθητήρων και συγκεκριμένα του μαγνητικού αισθητήρα Hall. Το μαγνητόμετρο SQUID παρά τη θετική του συμπεριφορά κυρίως ως προς την εξαιρετική του ευαισθησία παρουσίασε και σημαντικά προβλήματα όπως ότι έφτανε σε κορεσμό πολύ εύκολα παρόλο που οι συνθήκες ήταν βέλτιστες. Η θεωρητική μελέτη που έγινε για τον αισθητήρα Hall διαφέρει από τη μελέτη διεγέρσεων που χρησιμοποιήθηκε για το μαγνητόμετρο SQUID καθώς ο αισθητήρας Hall ακουμπά πάνω στα υπό-εξέταση δοκίμια ενώ στο SQUID υπάρχει κατασκευαστικός περιορισμός και πρέπει ο αισθητήρας να βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση (για το μαγνητόμετρο τα 37.1mm ενώ για το βαθμιδόμετρο τα 13.5mm) από αυτά. Ο στόχος είναι να πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής μελέτη με τον αισθητήρα Hall για τη διεξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Μελετώντας τους αισθητήρες και τις εργαστηριακές τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου στη μέθοδο των δινορρευμάτων, εξετάζεται η περίπτωση μεταφοράς τους σε βιομηχανικές εφαρμογές ελέγχου μέσα από την ανάπτυξη συναρμολογούμενου οργάνου.

Επίσης, με τον αισθητήρα Hall διεξάγονται μετρήσεις ακριβείας (Παγκόσμιο Κέντρο Μη Καταστροφικού Ελέγχου, World Federation of NDE Centers, πρότυπο πρόβλημα Benchmark 2014) για ανίχνευση επιφανειακών και μη επιφανειακών ρωγμών. Τέλος, η μελέτη ολοκληρώνεται με μετρήσεις σε πραγματικό δοκίμιο (μικρό πολυστρωματικό αλουμινένιο τμήμα πτερυγίου αεροπλάνου) με τον αισθητήρα Hall για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών αναπτυγμένων στην περιφέρεια των οπών των ήλων συναρμογής για να διερευνηθεί η επίδραση που έχει ο ήλος συναρμογής (πιρτσίνι) στο σήμα των ρωγμών.

## **7.1. Σύγκριση βιομηχανικού οργάνου δινορρευμάτων και PXI**

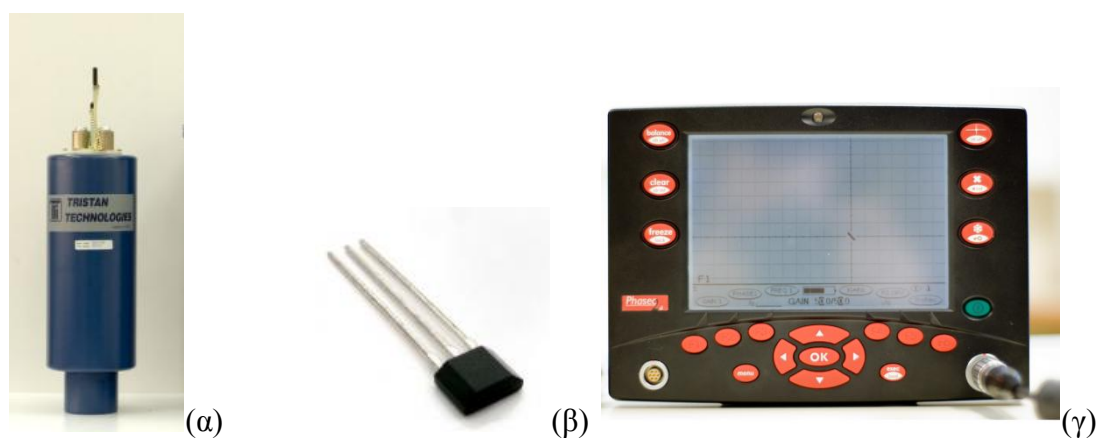
Οι μετρήσεις με τη μέθοδο των δινορρευμάτων πραγματοποιούνται με τη χρήση ερευνητικών και βιομηχανικών οργάνων. Τα ερευνητικά όργανα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις μέσα στο εργαστήριο σε δοκίμια με τεχνητές ασυνέχειες. Είναι είτε όργανα μέτρησης της σύνθετης αντίστασης (LCR meters ή impedance analyzers), αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η κλασική μέθοδος της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης πηνίου, είτε ενισχυτές Lock-in σε συνδυασμό με πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν μαγνητικοί αισθητήρες για τη μέτρηση του πεδίου των δινορρευμάτων. Τα όργανα μέτρησης σύνθετης αντίστασης (LCR meters και impedance analyzers) είναι όργανα ακριβείας, που βασίζονται στην ισορροπημένη γέφυρα Wheatstone για να δίνουν την απόλυτη τιμή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου (σε Ohm) με μεγάλη ακρίβεια. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι είναι ακριβώς όργανα εργαστηρίου, δηλαδή μη φορητά και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πεδίου (σε μετρήσεις δινορρευμάτων σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ανοιχτούς χώρους, κ.λ.π).

Τα βιομηχανικά όργανα βασίζονται στη τεχνική της εκτός ισορροπίας γέφυρας Wheatstone δίνοντας μια (γενικά αβαθμονόμητη) τάση εξόδου (σε Volt) η οποία είναι

ανάλογη της σύνθετης αντίστασης του πηνίου και με αυτό τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές (Κεφάλαιο 3, εφαρμογές δινορρευμάτων).

Τα βιομηχανικά όργανα δινορρευμάτων είναι φορητά, και έχουν αντοχή σε δύσκολες συνθήκες. Ο ακριβής έλεγχος προϋποθέτει μια σειρά από κεφαλές διαφόρων σχημάτων και κατηγοριών, οι οποίες πρέπει να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών για τον έλεγχο όλων των ειδών των μεταλλικών δομών. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, την εκτεταμένη χρήση τους και την ευρεία αποδοχή από όλη την διεθνή κοινότητα του μη καταστροφικού ελέγχου, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα το οποίο περιορίζει τη χρήση τους στις διάφορες εφαρμογές (Hall 2005, Mueller et al. 2000, Lee et al. 1999) και αυτό είναι η περιορισμένη ευαισθησία σε χαμηλές συχνότητες, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρή απόδοση στην ανίχνευση εσωτερικών ασυνεχειών κυρίως κατά τον έλεγχο πολυστρωματικών δομών.

Στο εργαστήριο, στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής έρευνας, έγινε ανάπτυξη ενός φορητού συναρμολογούμενου (modular) οργάνου δινορρευμάτων βασισμένου στην ανάλυση σήματος με τον ενισχυτή Lock-in (Lita et al. 2001). Στη συνέχεια διεξήχθησαν μετρήσεις με το φορητό αυτό όργανο με διέγερση απλής συχνότητας για την ανίχνευση εσωτερικών ασυνεχειών σε πλάκες αλουμινίου με μαγνητικούς αισθητήρες. Οι τύποι των μαγνητικών αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτουν τα δύο άκρα της κλίμακας ευαισθησίας των μαγνητικών αισθητήρων καθώς ο ένας είναι ο αισθητήρας Hall (Εικ.7.1.1β), με τη χαμηλότερη ευαισθησία, ενώ ο άλλος είναι ένα SQUID (Εικ.7.1.1α) με τη μέγιστη ευαισθησία. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν και με βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων (GE Phasec 2d, Εικ.7.1.1γ) για να γίνει η σύγκριση της ευαισθησίας και της χωρικής διακριτικής ικανότητας των δυο οργάνων.



Εικόνα 7.1.1. (α)Μαγνητόμετρο SQUID με δύο αισθητήρες, (β) ο αισθητήρας Hall και (γ) το όργανο Δινορρευμάτων GE Phasec 2d.

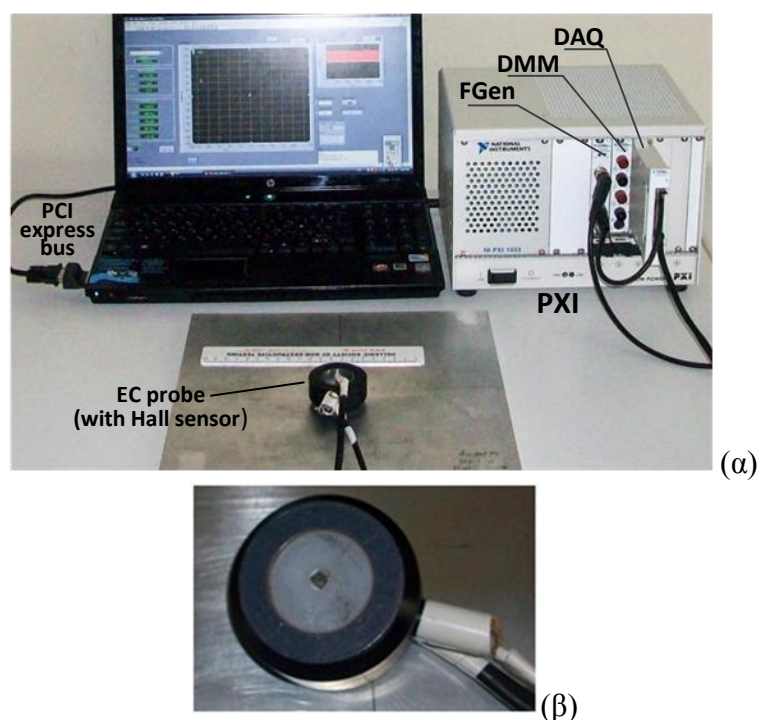
### 7.1.1.Πειραματική διάταξη

Το συναρμολογούμενο όργανο δινορρευμάτων αναπτύχθηκε πάνω σε πλατφόρμα PXI (στο εξής θα αναφέρεται ως 'όργανο PXI'), δημιουργώντας ένα σύστημα μετρήσεων και ελέγχου βασισμένου σε H/Y (Εικ.7.1.2). Η πλατφόρμα PXI χρησιμοποιεί τον υψηλής ταχύτητας PCI διάυλο, ο οποίος είναι το κυρίαρχο πρότυπο σχεδίασης των σημερινών λογισμικών και υλικών υπολογιστών. Ο διάυλος PCI

λειτουργεί με τα βιομηχανικά πρότυπα υπολογιστών που χρησιμοποιούνται στα πλήρη συστήματα μετρήσεων και απόκτησης δεδομένων σε βιομηχανικό επίπεδο (Καλοβρέκτης 2007). Χρησιμοποιήθηκε το αρθρωτό όργανο (NI PXI-1033 της National Instruments) το οποίο αποτελείται από τις ακόλουθες μονάδες (Starkloff et al. 2003):

1. Γεννήτρια συναρτήσεων (μέγιστη συχνότητα εξόδου 20MHz, ανάλυση εξόδου 14-bit, NI PXI-5402).
2. Συσκευή απόκτησης δεδομένων (ανάλυση σήματος εισόδου 16-bit, ταχύτητα δειγματοληψίας 500 kSamples/s, 16 αναλογικά κανάλια ταυτόχρονης δειγματοληψίας, NI PXI-6123).
3. Ψηφιακό πολύμετρο (4½ to 6 ½-digit, NI PXI-4065).

Το ψηφιακό πολύμετρο είναι προαιρετικό και απαιτείται μόνο για τη συνεχή καταγραφή του ρεύματος στο πηνίο κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Αυτό είναι απαραίτητο εάν διεξαχθούν θεωρητικοί υπολογισμοί σε μοντέλο προσομοίωσης. Η πλατφόρμα PXI ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός συνόλου χωριστών σειριακών απευθείας συνδέσεων (PCI Express bus) (Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals, 2014).



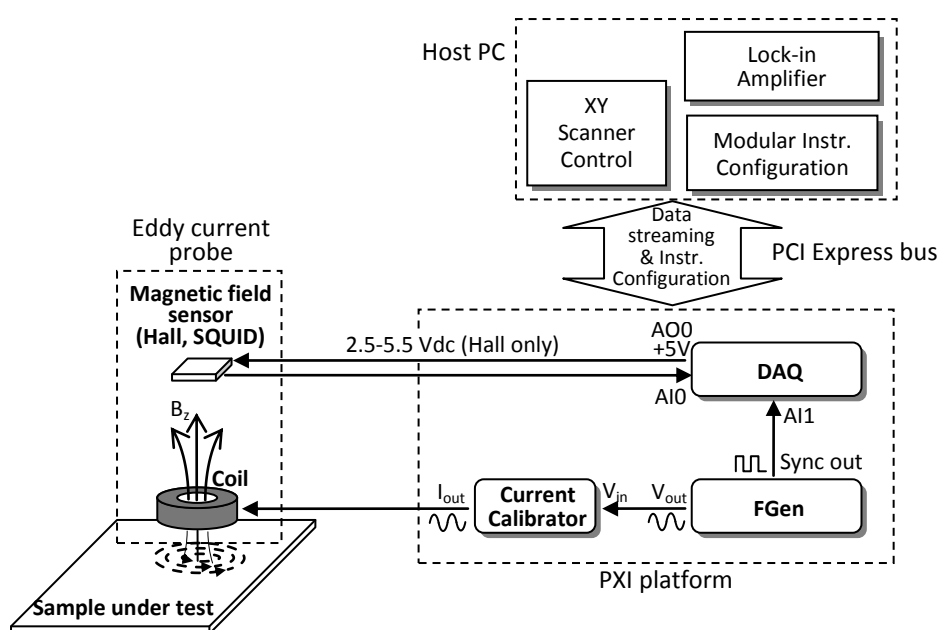
Εικόνα 7.1.2. (α) Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και (β) η κεφαλή με τον αισθητήρα Hall.

Στην Εικ.7.1.3 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα των εξαρτημάτων (hardware) και του λογισμικού (software) για την πειραματική διάταξη. Η διάταξη αποτελείται από τα απαραίτητα στοιχεία που συνθέτουν ένα σύστημα μέτρησης μαγνητικού πεδίου με δινορρεύματα. Η γεννήτρια συχνοτήτων είναι απαραίτητη για την ημιτονοειδή διέγερση του πηνίου που γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα απλής συχνότητας. Η παρεμβολή ενός ρυθμιστή τάσης – ρεύματος είναι απαραίτητη για την αποφυγή μεταβολών του πλάτους του ρεύματος κατά τη διάρκεια της σάρωσης, η οποία προκύπτει από τις αλλαγές της σύνθετης αντίστασης του πηνίου καθώς περνάει από



την περιοχή της ρωγμής. Το σήμα εξόδου των μαγνητικών αισθητήρων (Hall, SQUID) μεταφέρεται με ένα αναλογικό κανάλι της DAQ (AI0). Η έξοδος της γεννήτριας συχνοτήτων οδηγείται σε ένα άλλο κανάλι εισόδου της DAQ (AI1) και αποτελεί το σήμα αναφοράς του ενισχυτή Lock-in.

Η εφαρμογή του λογισμικού που ελέγχει το όργανο PXI, αναπτύχθηκε στο περιβάλλον γραφικής γλώσσας προγραμματισμού Labview εκτελώντας δύο λειτουργίες: 1) τον έλεγχο των στοιχείων του PXI και 2) την ανάλυση των δεδομένων του ενισχυτή Lock-in. Ο ενισχυτής Lock-in που χρησιμοποιήθηκε είναι σε μορφή εικονικού οργάνου (Virtual Instrument) στο πρόγραμμα Labview, είναι δηλαδή μια εφαρμογή (πρόγραμμα) Labview η οποία ‘τρέχει’ στον υπολογιστή αντί να είναι ένα πραγματικό εργαστηριακό όργανο. Το λογισμικό επικοινωνεί με το υλικό του μέσω ενός PCI καναλιού (PCI Express bus), το οποίο μεταφέρει και τα δεδομένα από τα αναλογικά κανάλια της κάρτας DAQ.

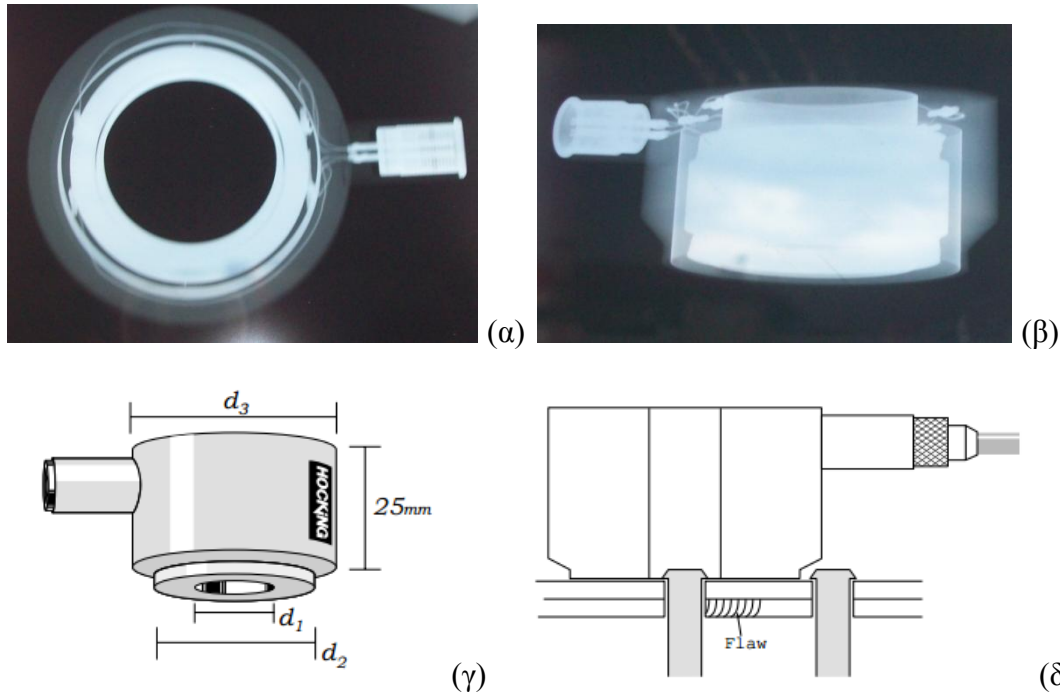


Εικόνα 7.1.3. Σχηματικό διάγραμμα του λογισμικού και του εξοπλισμού για την πειραματική διάταξη του οργάνου PXI (περιλαμβάνεται η κεφαλή δινορρευμάτων, η πλατφόρμα PXI., κ.α.). Ο ενισχυτής Lock-in απαιτείται για την ανάλυση των δεδομένων και αποτελεί μέρος του λογισμικού ενισχύοντας τη φορητότητα του συστήματος.

### 7.1.2. Περιγραφή πειράματος

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα PXI με τον αισθητήρα Hall (Allegro Microsystems UGN3507), ο οποίος τοποθετήθηκε μέσα στην κεφαλή δινορρευμάτων και στη συνέχεια οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν με το βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων (GE Phasec 2d) για να συγκριθεί η μεταξύ τους απόδοση.

Η κεφαλή δινορρευμάτων (κεφαλή Hocking) (Εικ.7.1.4) στηρίζει τη λειτουργία της στο κυλινδρικό πηνίο που λειτουργεί σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων περιλαμβάνοντας και χαμηλές συχνότητες (80Hz – 50kHz) με πολύ καλή αναλογία σήματος προς θόρυβο (Eddy Current Probes & Accessories, 2000-2001). Συνοδεύει το όργανο των δινορρευμάτων Phasec 2d και είναι κατάλληλη για ανίχνευση επιφανειακών και μη επιφανειακών ασυνεχειών γύρω από τις οπές συναρμογής στα αεροσκάφη χωρίς να απαιτείται απομάκρυνση των ήλων συναρμογής.



Εικόνα 7.1.4. (α) και (β) Ακτινογραφία της κεφαλής Reflection που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, (γ) οι διαστάσεις της κεφαλής και (δ) τοποθέτηση της κεφαλής πάνω από οπή με ήλο συναρμογής (παρουσία ρωγμής).

Η κεφαλή είναι «απόλυτου ανάκλασης» (absolute reflection) και μπορεί να επιτύχει διείσδυση δινορρευμάτων σε πολλά στρώματα μη σιδηρομαγνητικών υλικών με μεγάλη ευαισθησία. Περιλαμβάνει δύο πηνία εκ των οποίων το ένα είναι πηνίο εκπομπής και παράγει το πρωτεύον πεδίο και το άλλο είναι πηνίο δέκτης. Οι διαμέτροι του πηνίου όπως απεικονίζονται στο σχήμα είναι εσωτερική διάμετρος  $d_1=28\text{mm}$ , εξωτερική διάμετρος  $d_2=44\text{mm}$  και ύψος  $25\text{mm}$ . Επίσης, η εξωτερική διάμετρος του δαχτυλιδιού που περικλείει το πηνίο είναι  $d_3=52\text{mm}$  (Εικ.7.1.4γ).

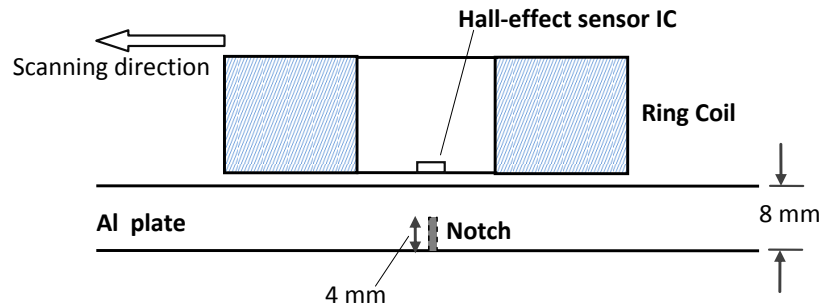
Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένας γραμμικός αισθητήρας Hall έχει τοποθετηθεί μέσα στην κεφαλή δινορρευμάτων (Εικ.7.1.2β) με κατεύθυνση τέτοια ώστε να μετράει τη συνιστώσα  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου, η οποία είναι παράλληλη με τον άξονα του πηνίου. Ο αισθητήρας έχει συγκεκριμένη ευαισθησία ( $2.5\text{mV/G}$ ) και είναι ικανός να μετρήσει εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία σε συχνότητες ως  $10\text{kHz}$ . Για την αποφυγή θορύβου επιλέχθηκε ένα καλώδιο μικρού μήκους STP (Shielded Twisted Pair) το οποίο είναι μονωμένο και προστατεύει από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επίσης για την αποφυγή του θορύβου κατά τη σύζευξη υπάρχουν ξεχωριστές γειώσεις στην τροφοδοσία του αισθητήρα τόσο του υψηλού όσο και του χαμηλού επιπέδου ώστε να διασφαλιστεί το σήμα εξόδου του αισθητήρα στην τιμή που δίνει ο κατασκευαστής ( $2.5\text{mV/G}$ ).

### 7.1.3. Έλεγχος ευαισθησίας

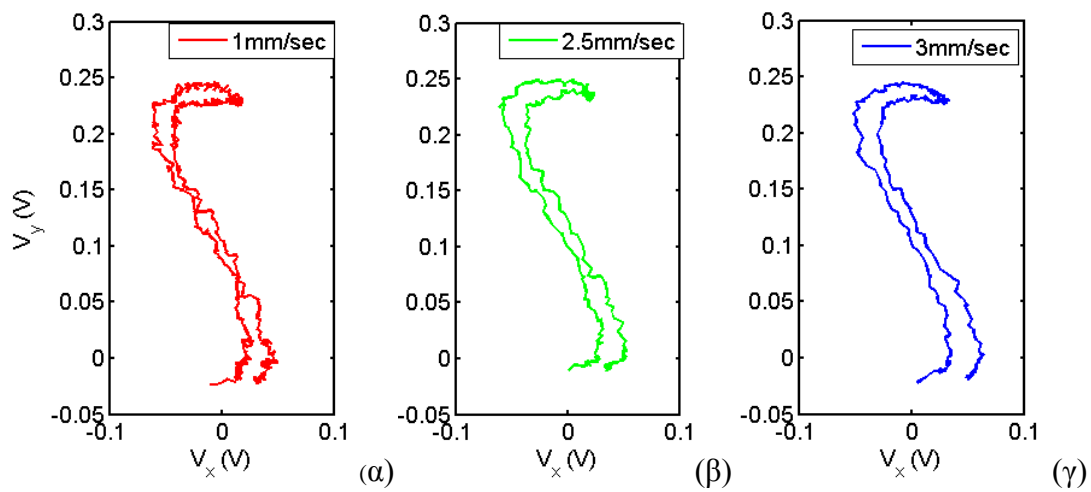
Αρχικά πραγματοποιήθηκε σάρωση στην πλάκα VMT8N (τα χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5), με τη χρήση του οργάνου PXI σε συνδυασμό με τη γεννήτρια FGEN για τη διέγερση του πηνίου σε συχνότητα  $375\text{Hz}$ . Στη συνέχεια η ίδια μέτρηση επαναλήφθηκε στην ίδια συχνότητα με το όργανο δινορρευμάτων Phasesc 2d. Η σάρωση και με τα δύο όργανα έγινε εγκάρσια της ρωγμής και για τη διασφάλιση των ιδανικών συνθηκών (ταχύτητα, εύρος, κ.α.) επιλέχθηκε η μετακίνηση της πλάκας αλουμινίου από αυτόματο σαρωτή ώστε να

είναι συνεχής η κίνηση και όχι βηματική, προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο τη χειροκίνητη σάρωση που πραγματοποιείται στη βιομηχανία με όργανα δινορρευμάτων (στην περίπτωση μας το Phasec 2d).

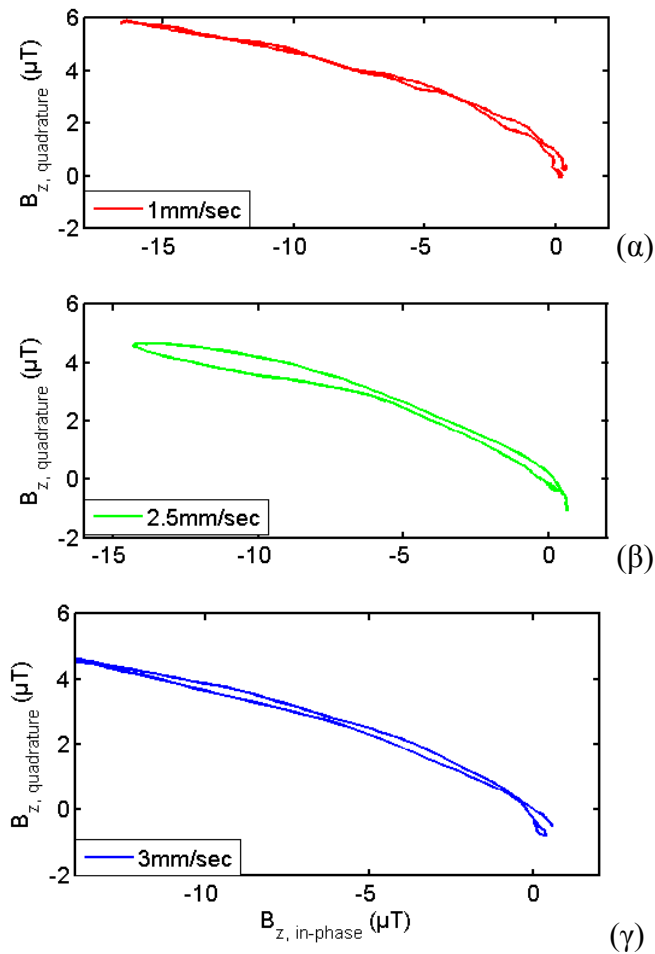
Αρχικά έγινε σάρωση στην πλάκα VMT8N (Εικ.7.1.5) σε συχνότητα 375Hz και στις ταχύτητες των 1mm/sec, 2.5mm/sec και 3mm/sec, τόσο με το όργανο των δινορρευμάτων (Phasec 2d) όσο και με το όργανο PXI. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις Εικ.7.1.6 έως και Εικ.7.1.7. Χαρακτηριστικές παράμετροι της πλάκας VMT8N δίνονται στο Κεφάλαιο 5.



Εικόνα 7.1.5. Σχήμα απεικόνισης του πειράματος στην πλάκα VMT8N.

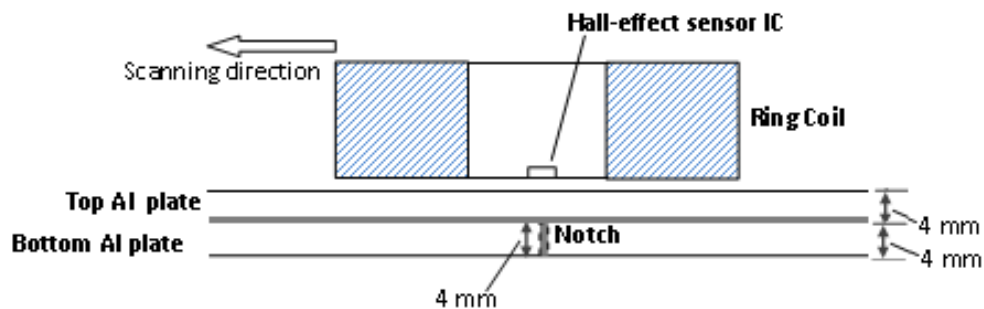


Εικόνα 7.1.6. Μετρήσεις σε πλάκα VMT8N με το όργανο των δινορρευμάτων Phasec 2d σε διάφορες ταχύτητες (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.

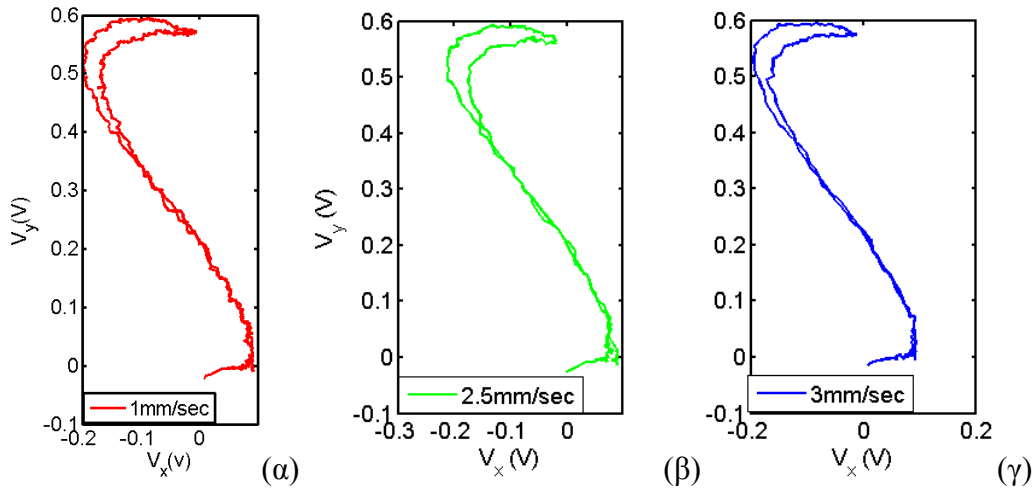


Εικόνα 7.1.7. Μετρήσεις σε πλάκα VMT8N με το όργανο PXI σε διάφορες ταχύτητες (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.

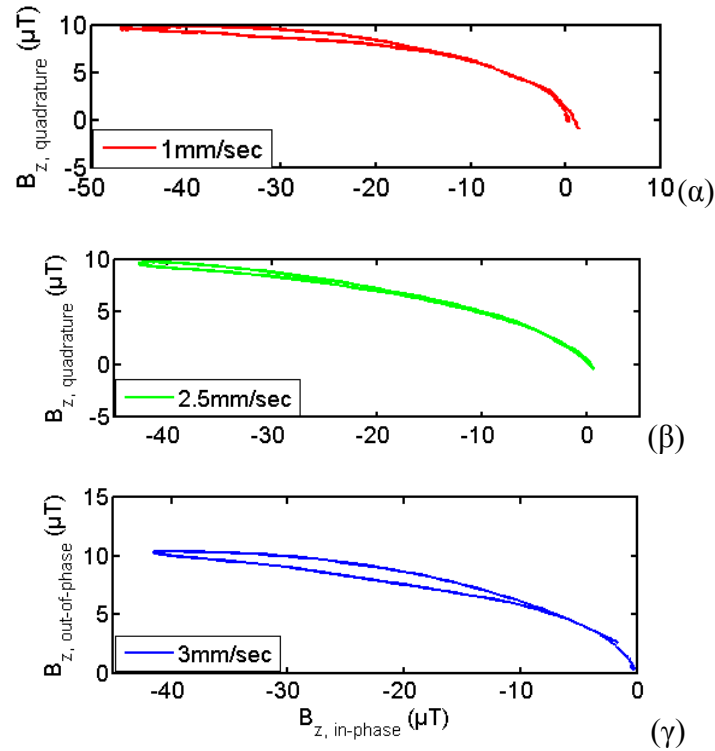
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα και με τα δύο όργανα για τον εντοπισμό υπό-επιφανειακής ασυνέχειας. Επιλέχθηκαν δυο πλάκες η VMT4 και η VMT4N (τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι στο Κεφάλαιο 5) τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη, ώστε να είναι ευθυγραμμισμένες (Εικ.7.1.8). Η σάρωση πραγματοποιήθηκε και με τα δύο όργανα με τον ίδιο τρόπο όπως και στην πλάκα VMT8N (συχνότητα 375Hz και ταχύτητες 1mm/sec, 2.5mm/sec και 3mm/sec). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις Εικ.7.1.9 έως και Εικ.7.1.10.



Εικόνα 7.1.8. Σχήμα απεικόνισης του πειράματος στις πλάκες VMT4 και VMT4N.

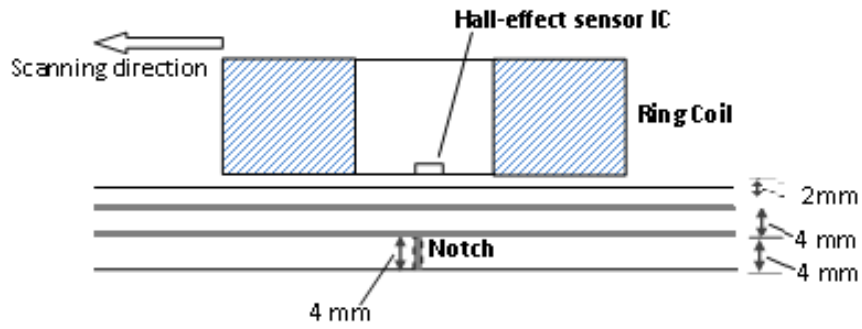


Εικόνα 7.1.9. Μετρήσεις στις πλάκες VMT4 και VMT4N με το όργανο των δινορρευμάτων Phasec 2d σε διάφορες ταχύτητες (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.

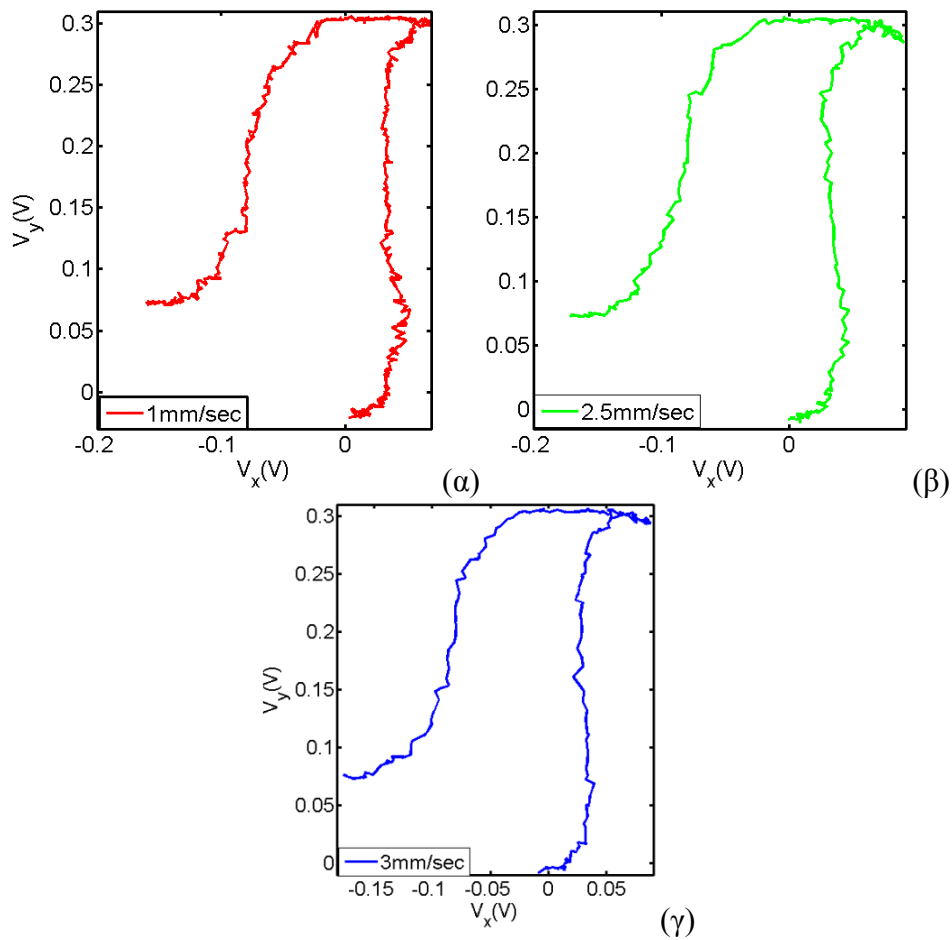


Εικόνα 7.1.10. Μετρήσεις στις δύο πλάκες VMT4 και VMT4N με PXI σε διάφορες ταχύτητες (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.

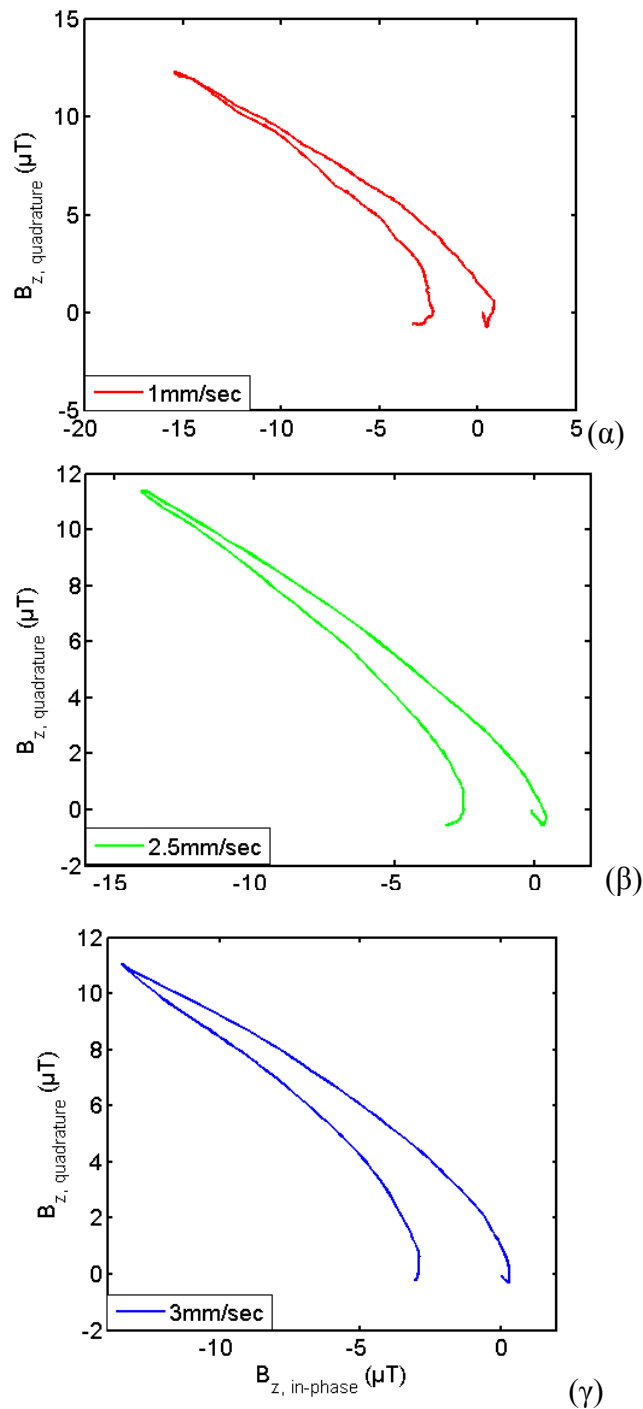
Ακολούθησε σειρά πειραμάτων για τη σύγκριση της ευαισθησίας των δύο οργάνων σε τρεις πλάκες (VMT2, VMT4 και VMT4N, τα χαρακτηριστικά των οποίων είναι στο Κεφάλαιο 5) τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη, ώστε να είναι ευθυγραμμισμένες (Εικ.7.1.11). Η σάρωση πραγματοποιήθηκε και με τα δύο όργανα με τον ίδιο τρόπο όπως και παραπάνω (συχνότητα 375Hz και ταχύτητες 1mm/sec, 2.5mm/sec και 3mm/sec). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις Εικ.7.1.12 έως και Εικ.7.1.13.



Εικόνα 7.1.11. Σχήμα απεικόνισης του πειράματος στις πλάκες VMT2, VMT4 και VMT4N.



Εικόνα 7.1.12. Μετρήσεις στις τρεις πλάκες VMT2, VMT4 και με την πλάκα VMT4N με το όργανο Phasec 2d σε διάφορες ταχύτητες σάρωσης (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.



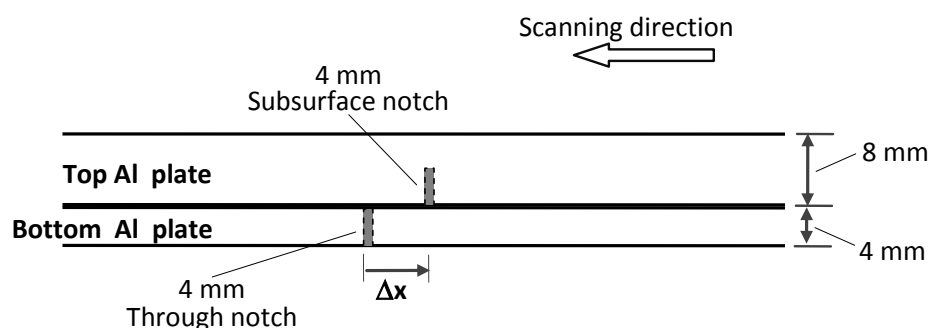
Εικόνα 7.1.13. Μετρήσεις στις τρεις πλάκες VMT2, VMT4 και με την πλάκα VMT4N με το όργανο PXI σε διάφορες ταχύτητες σάρωσης (α) 1mm/sec, (β) 2.5mm/sec, (γ) 3mm/sec.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της σάρωσης με τα δύο όργανα, όπως δείχνεται στις παραπάνω εικόνες (Εικ.7.1.7 ως 7.1.13) την καλύτερη απόδοση του οργάνου PXI. Η σύγκριση στην απόδοση μάλιστα ποσοτικοποιείται με βάση το λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N) στις μετρήσεις με τα δύο όργανα. Ενώ στο όργανο δινορρευμάτων Phasec 2d ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι  $S/N = 10$ , στο όργανο PXI ο λόγος είναι  $S/N=400$ , δηλαδή 40 φορές μεγαλύτερος. Θα πρέπει να διευκρινιστεί εδώ, ο λόγος σήματος προς θόρυβο υπολογίζεται ως ο λόγος της μέσης τιμής προς την τυπική απόκλιση (standard deviation) που προκύπτει από μια σειρά μετρήσεων (συνήθως 10 – 100) σε κάθε σημείο της σάρωσης.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διαφορά στην απόδοση και στις δυνατότητες μεταξύ των δύο οργάνων έχει να κάνει με τη διαφορετική αρχή λειτουργίας του (σύνθετη αντίσταση πηνίου και γέφυρα Wheatstone, το βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων – μαγνητικό πεδίο με αισθητήρα και ενισχυτή Lock-in το όργανο PXI). Για να βελτιώσουμε το πλάτος του σήματος εξόδου στο βιομηχανικό όργανο των δινορρευμάτων, αυξάνουμε την ενίσχυση του σήματος εισόδου, η οποία όμως ενίσχυση προκαλεί και ανάλογη αύξηση του πλάτους του θορύβου, με αποτέλεσμα ο λόγος σήματος προς θόρυβο να μένει σταθερός. Στην περίπτωση του οργάνου PXI, μπορούμε να αυξήσουμε το πλάτος του σήματος των δινορρευμάτων απλά αυξάνοντας το πλάτος του ρεύματος στο πηνίο διέγερσης. Η αύξηση του ρεύματος στο πηνίο, όμως, δεν επηρεάζει καθόλου το θόρυβο που ‘μαζεύει’ το πηνίο και ο οποίος οφείλεται κυρίως στις πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων του περιβάλλοντος χώρου. Αυτό είναι ένα σπουδαίο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς όχι μόνο του οργάνου PXI, αλλά όλων των οργάνων που βασίζονται στην τεχνολογία Lock-in, δίνοντας τη δυνατότητα για (θεωρητικά) απεριόριστη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο αναλογικά με την αύξηση του ρεύματος του πηνίου.

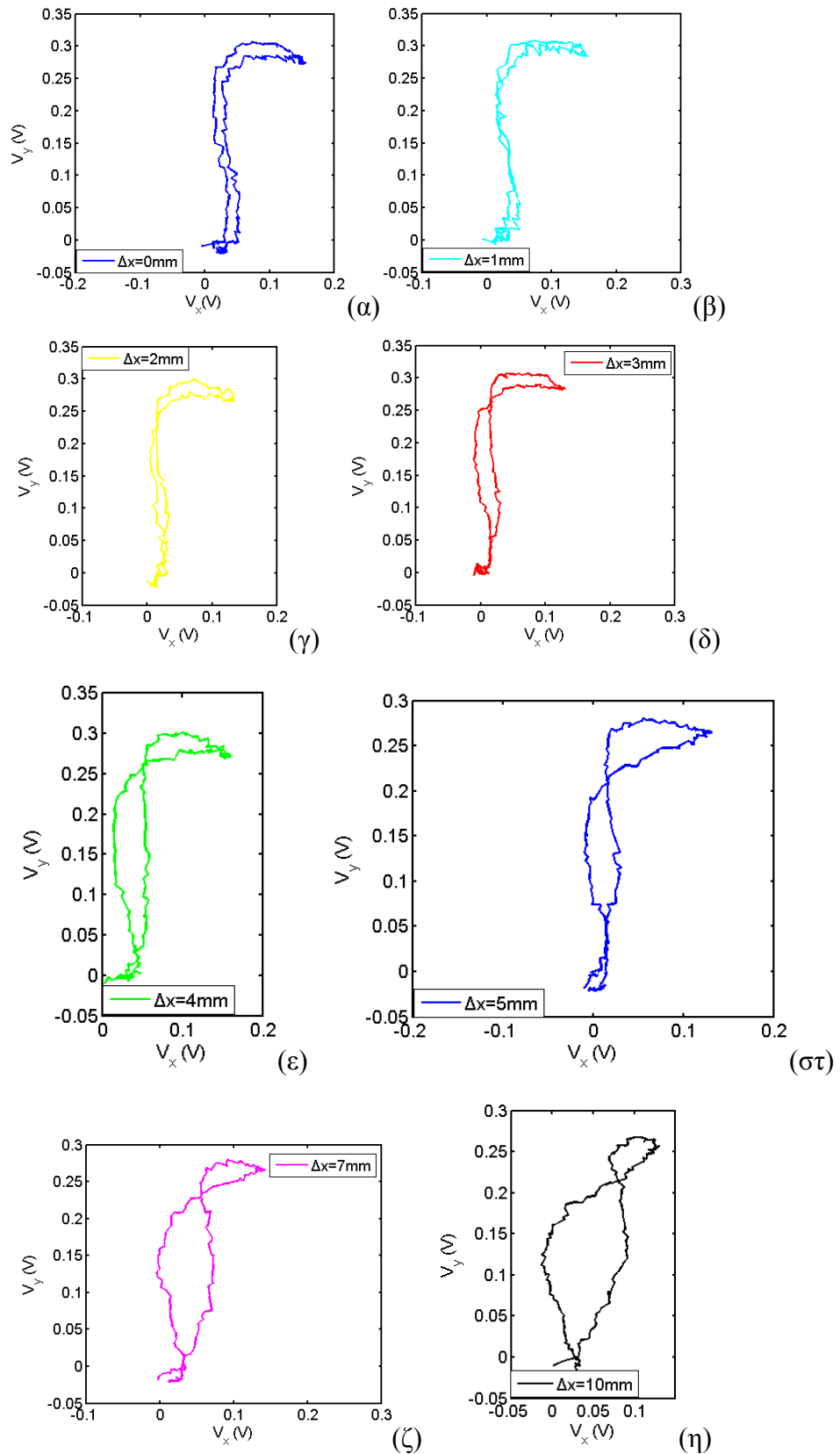
#### 7.1.4.Χωρική διακριτική ικανότητα

Στη συνέχεια ακολούθησαν μετρήσεις και με τα δύο όργανα με στόχο τη σύγκριση της χωρικής διακριτικής τους ικανότητας. Με τον όρο χωρική διακριτική ικανότητα ενός οργάνου δινορρευμάτων εννοούμε την ελάχιστη απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους δύο γειτονικές ατέλειες (ρωγμές) σε μια πλάκα ώστε να μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους. Οι δύο πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν στη σάρωση, για τον έλεγχο της διακριτικής ικανότητας ήταν η VMT8N έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί υπό-επιφανειακή ρωγμή και η VMT4N με διαμπερή ρωγμή (Εικ.7.1.14). Οι δύο πλάκες είναι ευθυγραμμισμένες η μία πάνω στην άλλη και η πρώτη σάρωση πραγματοποιήθηκε με μηδενική αρχική μετατόπιση ( $\Delta x=0$ ) μεταξύ των δύο σχισμών ( $\Delta x=0$ ). Στη συνέχεια ακολούθησε μετατόπιση της πάνω πλάκας (VMT8N) κατά 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 7mm και 10mm με ταχύτητα σάρωσης 6mm/sec. Σημειώνεται ότι η κάτω πλάκα (VMT4N) παραμένει σταθερή. Ο στόχος ήταν να επιβεβαιωθεί από τη μορφή του σήματος των δύο οργάνων η παρουσία, όχι απλής, αλλά δύο ρωγμών και να επιλεγεί το όργανο που κάνει αυτή τη διάκριση στη μικρότερη απόσταση μεταξύ των δύο ρωγμών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται παρακάτω (Εικ.7.1.15 και Εικ.7.1.16).

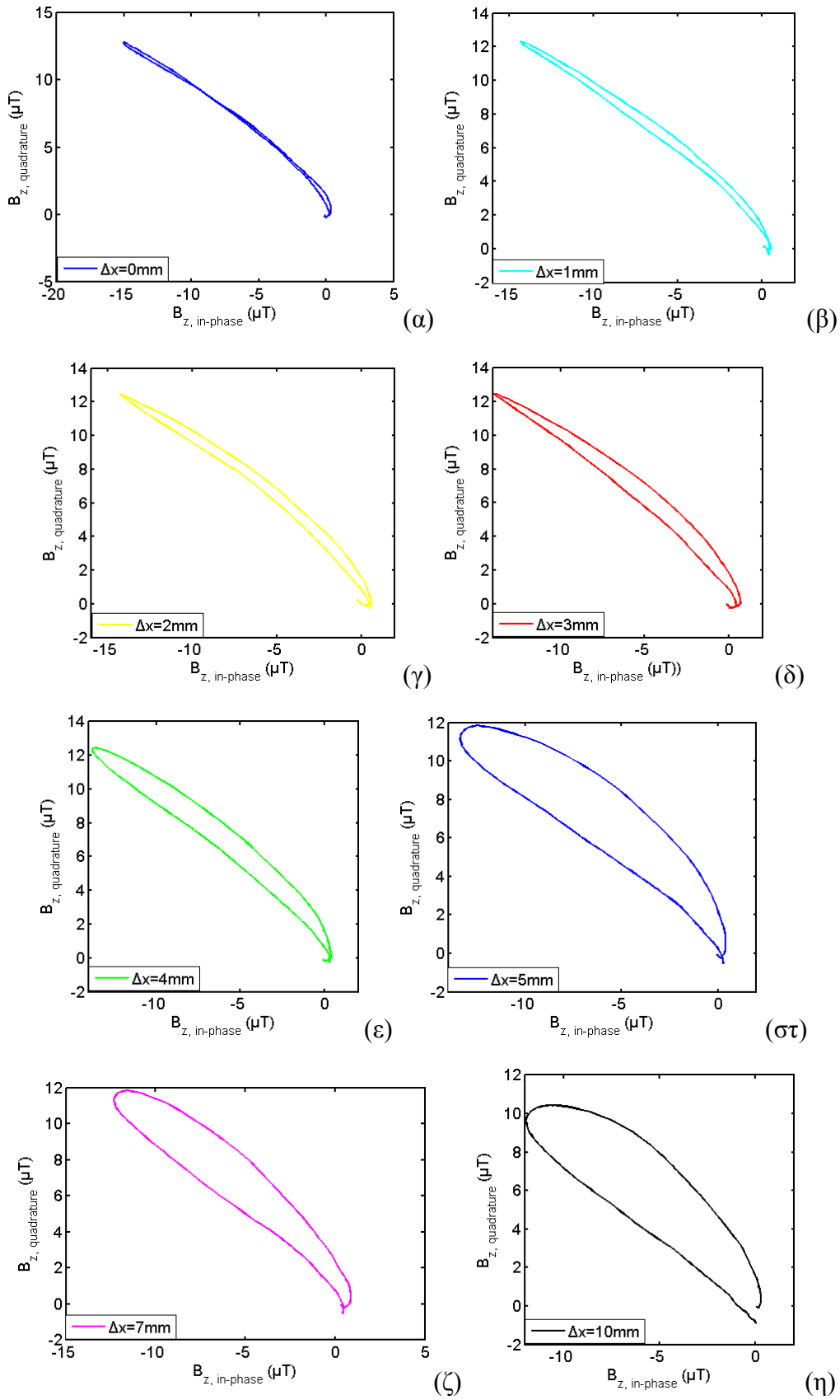


Εικόνα 7.1.14. Σχήμα απεικόνισης του πειράματος στην πλάκα VMT8N και στην πλάκα VMT4N.





Εικόνα 7.1.15. Μετρήσεις στις δύο πλάκες VMT8N και VMT4N με το όργανο Phasec 2d σε διάφορες μετατοπίσεις της VMT8N ως προς την VMT4N ( $\Delta x$  από 0 έως 10mm) με σταθερή ταχύτητα σάρωσης 6mm/sec.



Εικόνα 7.1.16. Μετρήσεις στις δύο πλάκες VMT8N και VMT4N με το όργανο PXI σε διάφορες μετατοπίσεις της VMT8N ως προς την VMT4N ( $\Delta x$  από 0 έως 10mm) σε ταχύτητα σταθερή 6mm/sec.

Οι παραπάνω εικόνες (Εικ.7.1.15-7.1.16) δείχνουν ότι στην περίπτωση του οργάνου PXI ακόμη και η πιο μικρή μετατόπιση  $\Delta x=2\text{mm}$  ανάμεσα στις δύο ρωγμές είναι εμφανώς διακριτή κάνοντας αισθητή την παρουσία και των δυο ρωγμών. Συγκεκριμένα, το άνοιγμα επιφάνειας του λοβού δείχνει την ύπαρξη και άλλων ρωγμών και ανάλογα με το εύρος του γίνεται αντιληπτή και η μεταξύ τους απόσταση. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το βιομηχανικό όργανο Phasac 2d, δείχνουν ότι δεν είναι εύκολος ο διαχωρισμός μεταξύ δύο ασυνεχειών παρά μόνο για απόσταση τουλάχιστον  $\Delta x=4\text{ mm}$ . Η μεγάλη αδυναμία του βιομηχανικού οργάνου δινορρευμάτων στη χωρική διακριτική ικανότητα οφείλεται στα μεγάλα επίπεδα θορύβου τα οποία προκύπτουν από την λειτουργία του μηχανήματος στις χαμηλές σχετικά συχνότητες για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών. Η πολύ καλή διακριτική ικανότητα και ευαισθησία του οργάνου PXI που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα γενικό χαρακτηριστικό όλων των οργάνων που βασίζονται στους μαγνητικούς αισθητήρες και στην τεχνική Lock-in και δεν περιορίζεται μόνο στο συγκεκριμένο όργανο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

### 7.1.5. Ταχύτητα και διάμετρος πηνίου

Στο εργαστήριο έγιναν μετρήσεις για να διαπιστωθεί πώς επηρεάζονται η ταχύτητα σάρωσης και η διάμετρος του πηνίου κυρίως από το χρόνο αποκατάστασης (settle time) του φίλτρου (ως settle time ενός φίλτρου ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το φίλτρο για να φτάσει η τάση εξόδου του φίλτρου στο 99% ή στο 99.9% της τελικής της τιμής) στον ενισχυτή Lock-in σε μια αρθρωτή διάταξη. Ο χρόνος αποκατάστασης του φίλτρου εξαρτάται από τη σταθερά χρόνου του φίλτρου ( $T_c$ ) και από την κλίση του φίλτρου (Roll off). Η σταθερά χρόνου του φίλτρου ( $T_c$ ) είναι το αντίστροφο του εύρους της ζώνης  $\Delta f_R$  συχνοτήτων που επιτρέπει το φίλτρο να διέλθουν. Εύρος του φίλτρου ορίζεται η διαφορά από την κεντρική συχνότητα του φίλτρου στην οποία η τάση εξόδου του μειώνεται στο  $e^{-1}$ , δηλαδή περίπου στο 37% της τάσης εξόδου στην κεντρική. Επισημαίνεται ότι όσο πιο μικρό είναι το  $\Delta f_R$  τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να μπορέσει το φίλτρο να λειτουργήσει και να βγάλει την έξοδό του. Για το (ψηφιακό) φίλτρο τύπου IIR (Infinite Impact Response), που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό Lock-in αυτής της εργασίας, το εύρος δίνεται από τη σταθερά χρόνου με βάση τη σχέση

$$\Delta f_R = \frac{1}{2\pi T_c} \text{ (Hz)}$$

όπου, η σταθερά χρόνου  $T_c$  του φίλτρου δίνεται σε seconds.

Ο χρόνος αποκατάστασης,  $ST$ , του φίλτρου (με την έννοια του χρόνου που χρειάζεται το φίλτρο για να φτάσει η τάση εξόδου του στο 99% της τελικής τιμής) δίνεται, με τη σειρά του, από τη σχέση

$$ST = -T_c \cdot \ln(0.01)$$

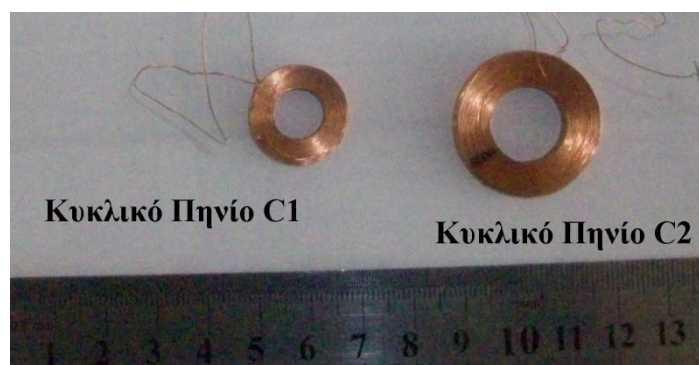
Η παραπάνω σχέση ισχύει για τιμή της παραμέτρου roll-off του φίλτρου 20dB. Για μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου, όπως 40dB, η τιμή του χρόνου αποκατάστασης δίνεται από τη σχέση  $ST = -\ln(0.001)$  δίνει το χρόνο που χρειάζεται το φίλτρο για να φτάσει η τάση εξόδου του στο 99.9% της τελικής τιμής.

Για να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα έγιναν αρκετές σαρώσεις σε διάφορες ταχύτητες πάνω από την πλάκα αλουμινίου VMT4N (τα χαρακτηριστικά της πλάκας στο Κεφάλαιο 5). Χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο δύο διαφορετικών παραμέτρων το οποίο έδωσε τρεις τιμές στο settle time 1.38, 3.68 και 6.63sec.

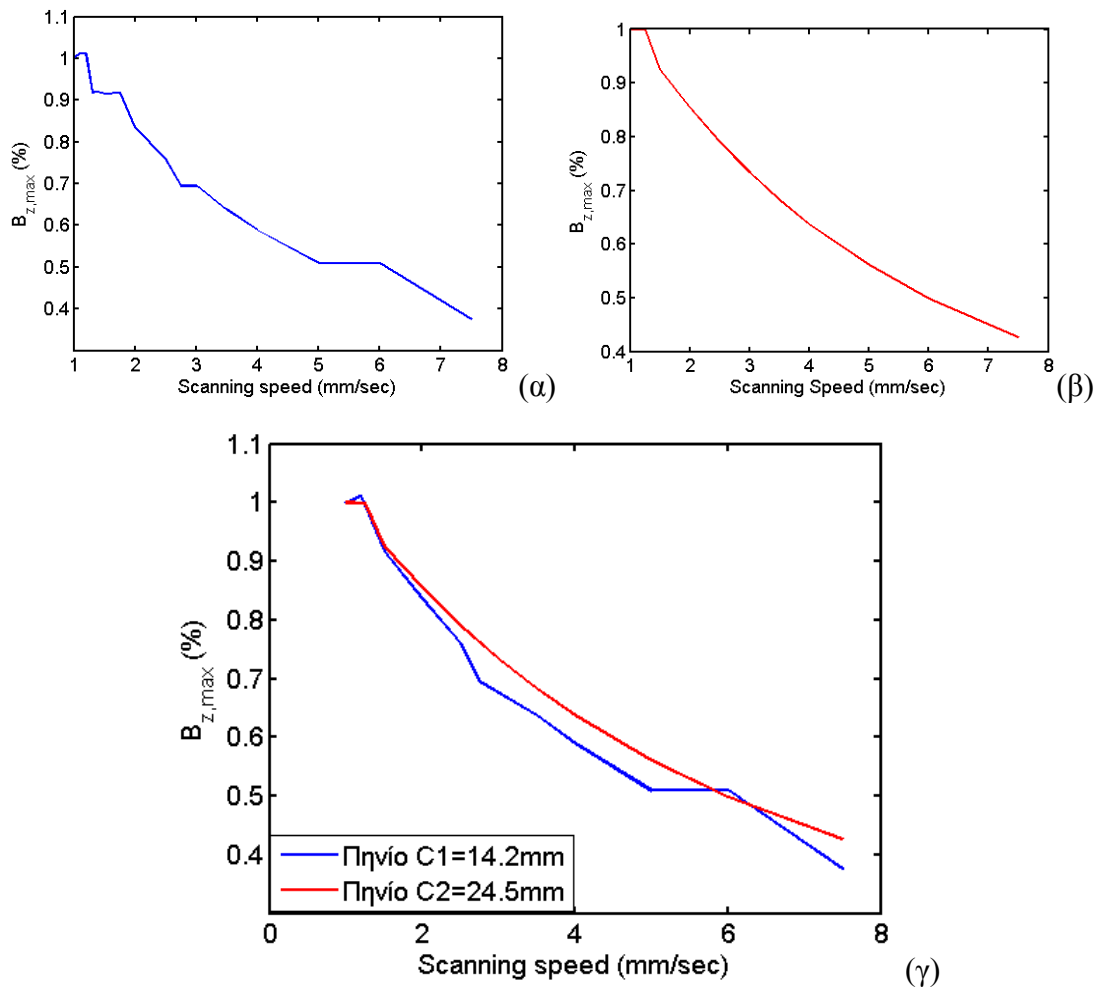
**Πίνακας 7.1.** Οι παράμετροι του φίλτρου για τον ενισχυτή Lock-in.

Tc (sec)	Roll-off (dB)	Settle time (sec)
0.3	20	1.38
0.8	20	3.68
1.0	40	6.63

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά πηνία διαφορετικής διαμέτρου (Εικ.7.1.17). Το κυκλικό πηνίο C1 έχει εξωτερική διάμετρο 14.2mm (εσωτερική διάμετρο 10mm και αριθμό σπειρών 168) ενώ το κυκλικό πηνίο C2 έχει εξωτερική διάμετρο 24.5mm(εσωτερική διάμετρο 14mm και αριθμό σπειρών 450). Στο εσωτερικό και των δύο πηνίων έχει τοποθετηθεί ο ίδιος αισθητήρας Hall. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που προέκυψαν αξιολογήθηκαν ανάλογα με τη μορφή και το πλάτος τους. Παρόλο που οι μετρήσεις έγιναν στην πλατφόρμα PXI τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνουν γενικά συμπεράσματα για κάθε σύστημα μέτρησης δινορρευμάτων που στηρίζεται στον ενισχυτή Lock-in. Οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με ταχύτητα που καθορίστηκε από τον αυτόματο σαρωτή XY. Η ταχύτητα σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο πηνίων είχε ένα εύρος τιμών ξεκινώντας από 0.1mm/sec και φτάνοντας τα 2.5mm/sec. Σημειώνεται ότι οι σαρώσεις και με τα δύο πηνία έγινε στη συχνότητα των 1025Hz αλλά όταν χρησιμοποιήθηκε το κυκλικό πηνίο C1 (εξωτερική διάμετρος 14.2mm) το ρεύμα ήταν 71mA και η τάση 100mV ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε το κυκλικό πηνίο C2 (εξωτερική διάμετρος 24.5mm) το ρεύμα ήταν 54mA και η τάση 70mV Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από τις μετρήσεις στο ίδιο φίλτρο (ST=6.63sec).



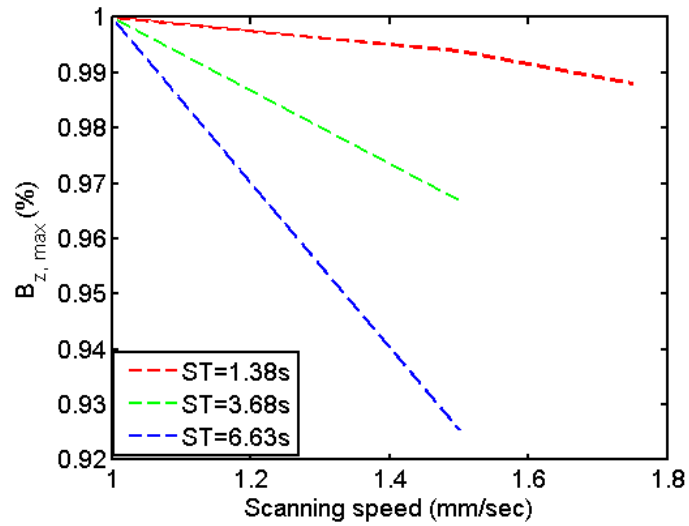
Εικόνα 7.1.17. Τα κυκλικά πηνία C1 και C2.



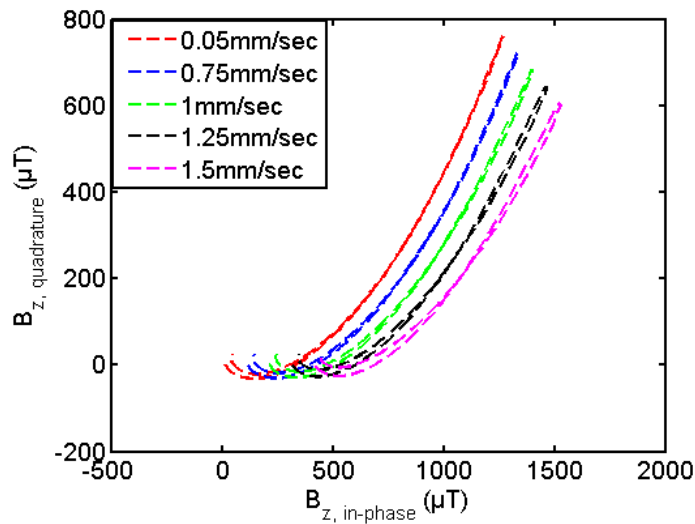
Εικόνα 7.1.18. Μετρήσεις στην πλάκα VMT4N με το όργανο PXI σε διάφορες ταχύτητες σάρωσης από 0.1mm/sec έως και 2.5mm/sec με την ίδια σταθερά χρόνου του φίλτρου (6.63 sec) (α) Πηνίο C1=14.2mm, (β) Πηνίο C2=24.5mm και (γ) Πηνίο C1 και C2.

Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν από τη σάρωση της περιοχής πάνω από τη ρωγμή (Εικ.7.1.18) δείχνουν ότι επηρεάζονται ελάχιστα από τη διάμετρο του πηνίου για ορισμένη τιμή της σταθεράς χρόνου του φίλτρου (6.63 sec). Στη συνέχεια, για την αξιολόγηση της επίδρασης της ταχύτητας σάρωσης στη μορφή του μαγνητικού πεδίου, έγιναν πειράματα με παρόμοιο τρόπο (πλάκα VMT4N) αλλά επιλέχτηκε το κυκλικό πηνίο C2 (εξωτερική διάμετρος 24.5mm), σε συχνότητα 1025Hz, ρεύμα 54mA και τάση 70mV.

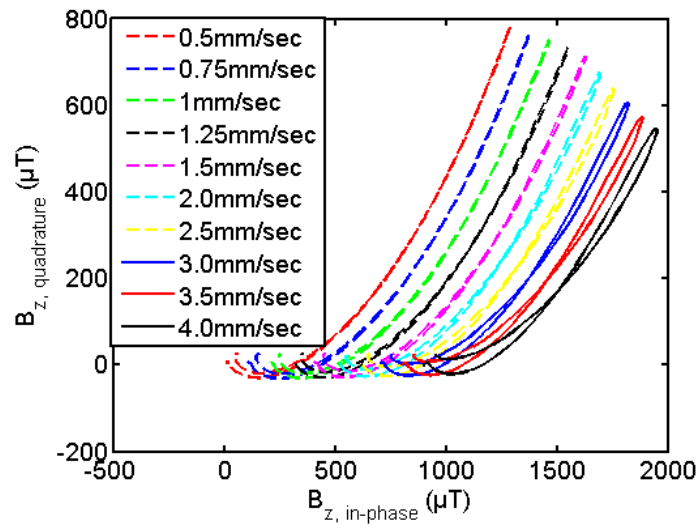
Αρχικά έγιναν μετρήσεις με το κυκλικό πηνίο C2 και για τις τρεις τιμές του χρόνου αποκατάστασης του (Πίνακας 7.1) όπου προέκυψε η Εικ.7.1.19 και, όπως φαίνεται, η ταχύτητα σάρωσης επηρεάζεται καθοριστικά από την τιμή των παραμέτρων του φίλτρου έτσι όπως συνολικά εκφράζονται με το χρόνο αποκατάστασης.



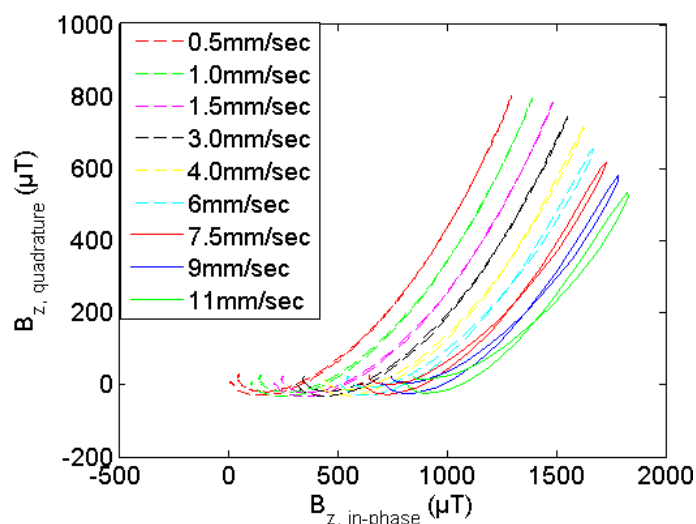
Εικόνα 7.1.19. Μετρήσεις στην πλάκα VMT4N με το PXI σε διάφορες ταχύτητες από 0.1mm/sec έως και 2.5mm/sec στα τρία φίλτρα χρόνου.



Εικόνα 7.1.20. Μετρήσεις στην πλάκα VMT4N με το PXI και το κυκλικό πηνίο C2 σε διάφορες ταχύτητες από 0.1mm/sec έως και 11.0mm/sec στο ST=6.63sec.



Εικόνα 7.1.21. Μετρήσεις στην πλάκα VMT4N με το PXI και το κυκλικό πηνίο C2 σε διάφορες ταχύτητες από 0.1mm/sec έως και 11.0mm/sec στο ST=3.68sec.



Εικόνα 7.1.22. Μετρήσεις στην πλάκα VMT4N με το PXI και το κυκλικό πηνίο C2 σε διάφορες ταχύτητες από 0.1mm/sec έως και 11.0mm/sec στο ST=1.38sec .

Τα αποτελέσματα δείχνουν το μέγιστο πλάτος του μαγνητικού πεδίου ( $B_{Z, \max}$ ) της ρωγμής, μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης και παρατηρείται ότι η καμπύλη που σχηματίζεται για γρήγορες σαρώσεις παρουσιάζει χαρακτηριστικά υστέρησης. Είναι πιθανόν, η μορφή της παραπάνω υστέρησης στις καμπύλες, να οδηγήσει σε λανθασμένη ερμηνεία του σήματος ως ένδειξη ύπαρξης πολλαπλών ρωγμών ή εκτεταμένης ρωγμής. Γι' αυτό είναι πολύ σημαντικό να γίνεται η σάρωση διατηρώντας συγκεκριμένο ανώτερο επίπεδο ταχύτητας ανάλογα με τις ρυθμίσεις που έχουμε κάνει στις παραμέτρους του φίλτρου ( $T_c$  και roll-off) καθώς από τον παράγοντα αυτό επηρεάζεται άμεσα το πλάτος και το σχήμα της καμπύλης.

Στις Εικ.7.1.20-7.1.22 το μέγιστο πλάτος του μαγνητικού πεδίου είναι συνάρτηση της ταχύτητας σάρωσης που επηρεάζεται από το (settle time) του φίλτρου. Από την εικόνα διαπιστώνεται ότι η τιμή της ταχύτητας σάρωσης,  $v_{sc}$  στην οποία η  $B_{Z, \max}$  είναι στο 90% της μέγιστης τιμής, είναι αντιστρόφως ανάλογη με το χρόνο αποκατάστασης (settle time) του φίλτρου,

$$v_{sc} \left( \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \right) = \frac{A}{ST}$$

όπου  $A$  είναι το μήκος του αισθητήρα (σε χιλιοστά mm) και  $ST$  το Settle Time (ο χρόνος αποκατάστασης του φίλτρου σε δευτερόλεπτα sec).

Παρατηρήθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν από τη σάρωση της περιοχής από πάνω από τη ρωγμή επηρεάζονται ελάχιστα από τη διάμετρο του πηνίου για τον ίδιο χρόνο φίλτρου (6.63 sec).

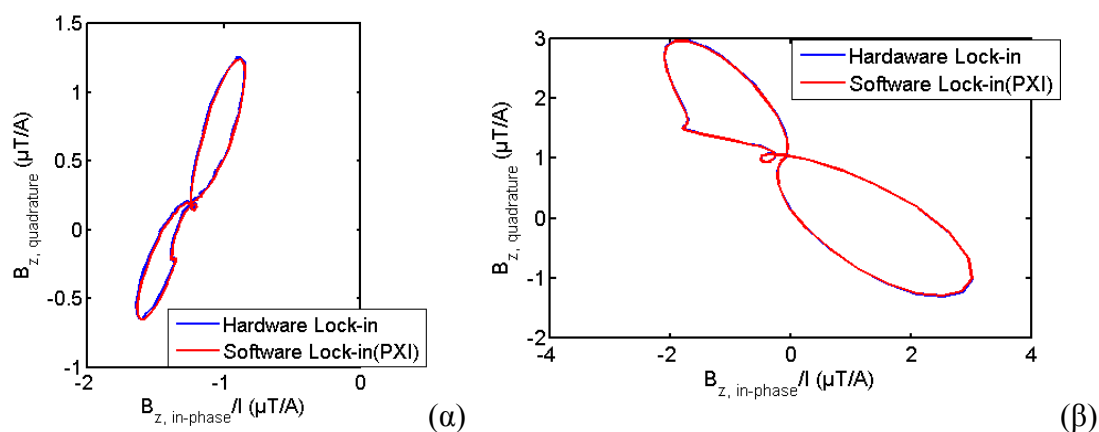
### 7.1.6.Λειτουργία του οργάνου PXI με αισθητήρα SQUID

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από μετρήσεις με το όργανο PXI συνδεδεμένο με το μαγνητόμετρο SQUID με σκοπό να συγκριθεί η απόδοση του εικονικού ενισχυτή Lock-in του οργάνου PXI με την απόδοση ενός εργαστηριακού οργάνου υψηλής ακριβείας και ευαισθησίας, τον ενισχυτή Lock-in SR 830 της εταιρείας επιστημονικών οργάνων Stanford Research Scientific. Στην πειραματική διάταξη, όπως απεικονίζεται και στην Εικ.7.1.2, το SQUID τοποθετείται στη θέση

του αισθητήρα Hall μαζί με ,το διπλό ορθογωνικό πηνίο B (όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.1). Ο παράγοντας μεταφοράς του μαγνητομέτρου SQUID ο οποίος προκύπτει από τη διαδικασία βαθμονόμησης είναι  $66.7\text{mV/nT}$ , δηλαδή είναι έξι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή του αισθητήρα Hall  $2.5 \times 10^{-5}\text{mV/nT}$  ( $2.5\text{mV/G}$ ).

Μια σημαντική διαφορά στην πειραματική διάταξη σε σχέση με την προηγούμενη είναι ότι το σήμα εξόδου του SQUID καθώς και το σήμα αναφοράς από τη γεννήτρια ρεύματος (FGEN) οδηγούνται παράλληλα στο όργανο PXI και στον ενισχυτή Lock-in ώστε να διασφαλιστεί η ταυτόχρονη δειγματοληψία και από τα δύο όργανα στις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Αυτός ο συγχρονισμός είναι εύκολο να επιτευχθεί με το όργανο PXI. Επιπλέον, και στους δύο ενισχυτές Lock-in, οι παράμετροι του φίλτρου ορίστηκαν να έχουν το ίδιο εύρος (300ms και 20dB).

Οι μετρήσεις που προέκυψαν και από τα δύο όργανα απεικονίζονται στην Εικ.7.1.23 Χρησιμοποιήθηκε η πλάκα VMT8N (βλέπε Κεφάλαιο 5.) και ρεύμα έντασης 20mA για τη διέγερση του πηνίου.



Εικόνα 7.1.23. Μετρήσεις στην πλάκα VMT8N με το όργανο PXI που συνδέεται με το μαγνητόμετρο SQUID σε (α) συχνότητα 375Hz και (β) σε συχνότητα 2375Hz.

Η απεικόνιση δείχνει την πλήρη ταύτιση των δύο οργάνων και στις δύο συχνότητες που πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος (375Hz και 2375Hz με αντίστοιχα βάθη διείσδυσης 6.3mm και 2.5mm). Αυτή η απόλυτη συμφωνία του βιομηχανικού οργάνου με το όργανο PXI δείχνει την ευαισθησία και την υψηλή ακρίβεια του οργάνου PXI. Αξίζει να επισημανθεί ότι για την επίτευξη αυτών των πανομοιότυπων σημάτων εξόδου και παρά τη ρύθμιση των φίλτρων των δύο οργάνων στις ίδιες τιμών των παραμέτρων (300ms, 20dB), ο χρόνος αποκατάστασης του ενισχυτή Lock-in SR830 ήταν περίπου 5 sec δηλαδή 4 φορές περίπου μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο χρόνο του οργάνου PXI (1.38sec). Αυτό πρακτικά είχε σαν αποτέλεσμα, όταν χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής Lock-in SR830, την καθυστέρηση στη σάρωση περίπου 4 φορές σε σχέση με τη σάρωση όταν χρησιμοποιήθηκε το όργανο PXI.

### 7.1.7.Συμπεράσματα

Στο εργαστήριο έγινε επιτυχημένη προσπάθεια παρουσίασης και λειτουργίας ενός συναρμολογούμενου οργάνου το οποίο στηρίζεται στην πλατφόρμα PXI και η απόδοσή του αξιολογήθηκε σε εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Το όργανο PXI χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με δυο μαγνητικούς αισθητήρες, έναν αισθητήρα Hall και έναν αισθητήρα SQUID. Η



απόδοσή του συγκρίθηκε με ένα βιομηχανικό όργανο δινορρευμάτων που στηρίζεται στη λειτουργία της γέφυρας Wheatstone (GE Phasec2d) καθώς και με έναν υψηλής ευαισθησίας και ακριβείας ενισχυτή εργαστηριακό Lock-in (SRS SR 830). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων τα οποία περιλαμβάνουν ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ασυνεχειών σε πλάκες αλουμινίου, έδειξαν την υψηλή απόδοση των χαρακτηριστικών του μηχανήματος PXI όπως η ευαισθησία, η χωρική διακριτική ικανότητα καθώς και η ταχύτητα σάρωσης.

Ο στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν να δείξουν την υψηλή απόδοση οργάνων PXI, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν μια πολύ καλή λύση για την κατασκευή φορητών και δυνατών οργάνων που θα χρησιμοποιούνται στις επιθεωρήσεις με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Χάρη στη δυνατότητά τους να δέχονται οποιοδήποτε μαγνητικό αισθητήρα έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών διατηρώντας συγχρόνως σταθερή απόδοση καθώς αυτή εξαρτάται από τον εκάστοτε αισθητήρα και είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα λειτουργίας. Επίσης, η ευελιξία στην επιλογή των εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα όργανο PXI σε συνδυασμό με την ευέλικτη αρχιτεκτονική του λογισμικού επιτρέπει το χρήστη να αναπτύσσει αλγόριθμους ή προγράμματα για να επεξεργαστεί τα δεδομένα σε πλατφόρμες αντίστοιχες με το PXI (National Instruments, What is PXI, 2014) ενισχύοντας την απόδοση και την ευκολία στη μεταφορά τους και συγχρόνως μπορεί να επιτευχθεί διαμόρφωση των μηχανημάτων ανάλογα με τις ανάγκες που προκύπτουν. Επιπλέον, τα όργανα PXI έχουν καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο σε σχέση με τα βιομηχανικά επειδή το σήμα είναι ανάλογο της έντασης του ρεύματος που χρησιμοποιείται άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολύ μεγάλα ρεύματα για ανίχνευση ασθενών ρωγμών καθώς επίσης μπορούν να διεγερθούν τόσο με εναλλασσόμενο ρεύμα μίας συχνότητας όσο και με παλμικά ρεύματα. Ο περιορισμός τους είναι ότι η ένταση του σήματος επηρεάζεται καθοριστικά από την ταχύτητα σάρωσης και συγκεκριμένα το σήμα μειώνεται εάν η ταχύτητα σάρωσης ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή (κυρίως αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται έντονα σε μεγάλες ταχύτητες σάρωσης).

## 7.2. Σύγκριση της απόδοσης των οργάνων LCR meter και Phasec2d στη σάρωση πρότυπων πλακών αλουμινίου

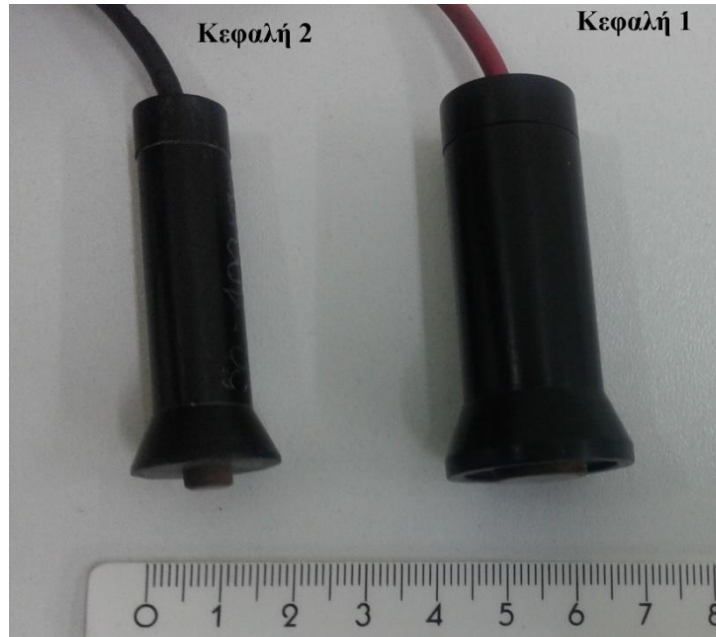
Στο εργαστήριο έγινε μια σύγκριση μεταξύ δύο οργάνων, του βιομηχανικού οργάνου δινορρευμάτων Phasec2d (Εικ.7.1.2) και του οργάνου ακριβείας LCR meter (Agilent 4284A, Εικ.7.2.1), με τη χρήση δύο κεφαλών με διαφορετικά εύρη συχνοτήτων λειτουργίας για τη σάρωση των δύο πρότυπων πλακών αλουμινίου VMT4N και VMT2N (τα χαρακτηριστικά των πλακών αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5).

Η τροφοδοσία των δύο κεφαλών γίνεται από τα όργανα που κάνουν κάθε φορά τη μέτρηση (LCR meter ή το Phasec2d). Η έξοδος του οργάνου Phasec 2d (τάση εξόδου της εκτός-ισορροπίας γέφυρας Wheatstone) καταγράφηκε με χρήση μιας κάρτας DAQ (Data Acquisition Card) ενώ η έξοδος του οργάνου LCR meter (σύνθετη αντίσταση σε  $\Omega$  του πηνίου της κεφαλής) καταγράφηκε με χρήση της θύρας επικοινωνίας GPIB που διαθέτει το όργανο αυτό. Η καταγραφή των δεδομένων της εξόδου αμφοτέρων των οργάνων σε Η/Υ έγινε με χρήση απλών εφαρμογών που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Labview.



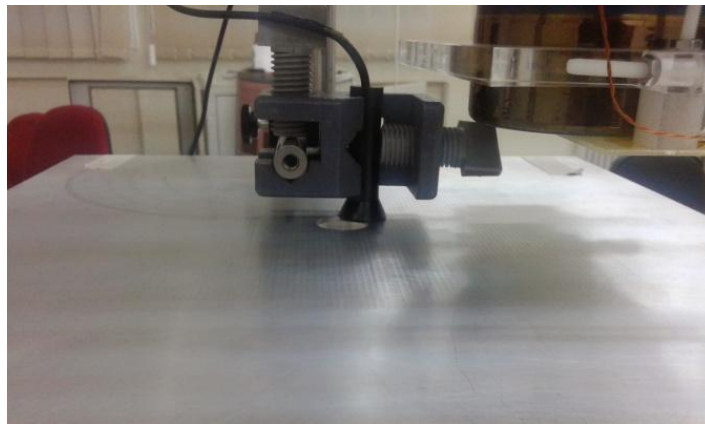
Εικόνα 7.2.1. LCR meter (Agilent 4284A).

Οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαφορετικών συχνοτήτων και διαφορετικής διαμέτρου. Η κεφαλή 1 με εύρος συχνότητας 5-50kHz (διάμετρος 12.5mm) και η κεφαλή 2 με εύρος συχνοτήτων 50-400kHz (διάμετρος 6.1mm). Οι σαρώσεις έγιναν και στις δύο πλάκες με συχνότητες μακριά από τα όρια του εύρους συχνοτήτων της κάθε κεφαλής. Συγκεκριμένα, στην κεφαλή 1 με εύρος 5-50kHz επιλέχτηκε η συχνότητα των 15kHz ( $3 \times 5$ , όπου 5kHz είναι το κατώτερο συχνοτήτων της κεφαλής 1) ενώ στην κεφαλή 2 με εύρος 50-400kHz επιλέχτηκε η συχνότητα των 150kHz ( $3 \times 50$ , όπου 50kHz είναι το κατώτερο όριο συχνοτήτων της κεφαλής 2).



Εικόνα 7.2.2. Η κεφαλή 1 (5-50kHz) και η κεφαλή 2 (50-400kHz).

Η στήριξη των κεφαλών έγινε με ένα σύστημα συγκράτησης όπως φαίνεται και στην Εικ.7.2.3 της πειραματικής διάταξης ώστε η σάρωση στις πρότυπες πλάκες αλουμινίου να γίνεται με σταθερό βήμα για να προκύψουν ακριβείς μετρήσεις. Η σάρωση πραγματοποιείται και εδώ με το σαρωτή XY (Κεφάλαιο 5) που μετακινεί τα υπό-εξέταση δοκίμια κάτω από το σταθερό σύστημα της εκάστοτε κεφαλής.

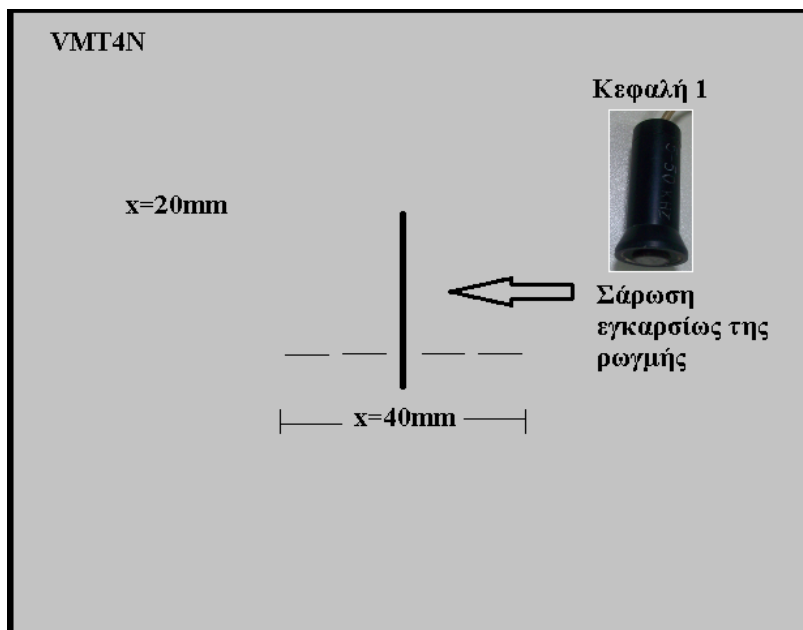


Εικόνα 7.2.3. Πειραματική διάταξη με σύστημα συγκράτησης κεφαλής.

Στις επιθεωρήσεις, και με τα δύο όργανα, οι κεφαλές σαρώνουν τις ασυνέχειες που υπάρχουν στις πρότυπες πλάκες αλουμινίου (VMT2N, VMT4N) σε δύο κατευθύνσεις, εγκάρσιως και κατά μήκος της ρωγμής όπως απεικονίζονται στις Εικ.7.2.4, Εικ.7.2.5, Εικ.7.2.8, Εικ.7.2.9, Εικ.7.2.12, και Εικ.7.2.13)

### 7.2.1.Αποτελέσματα

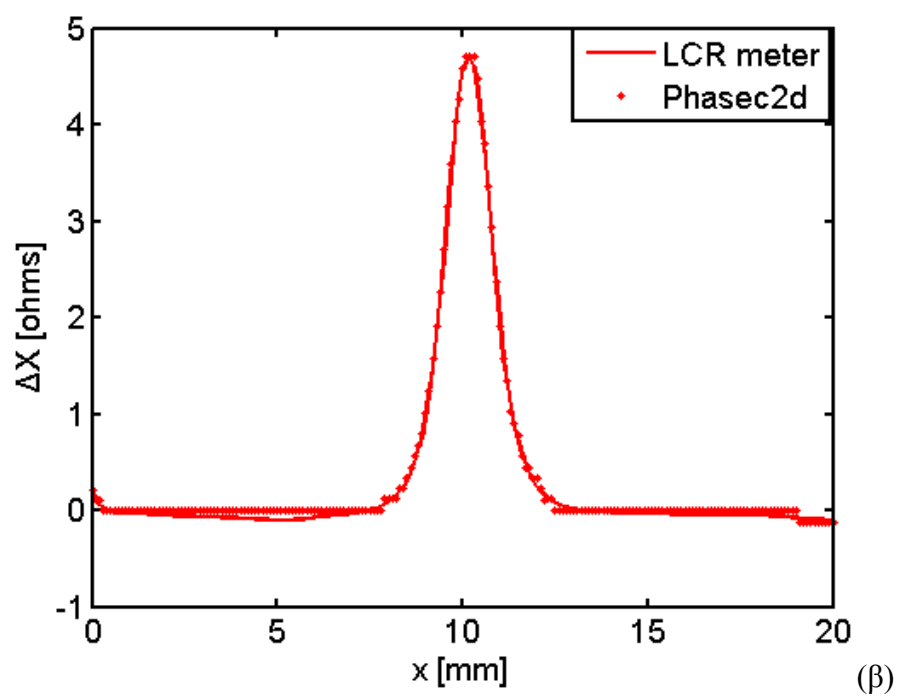
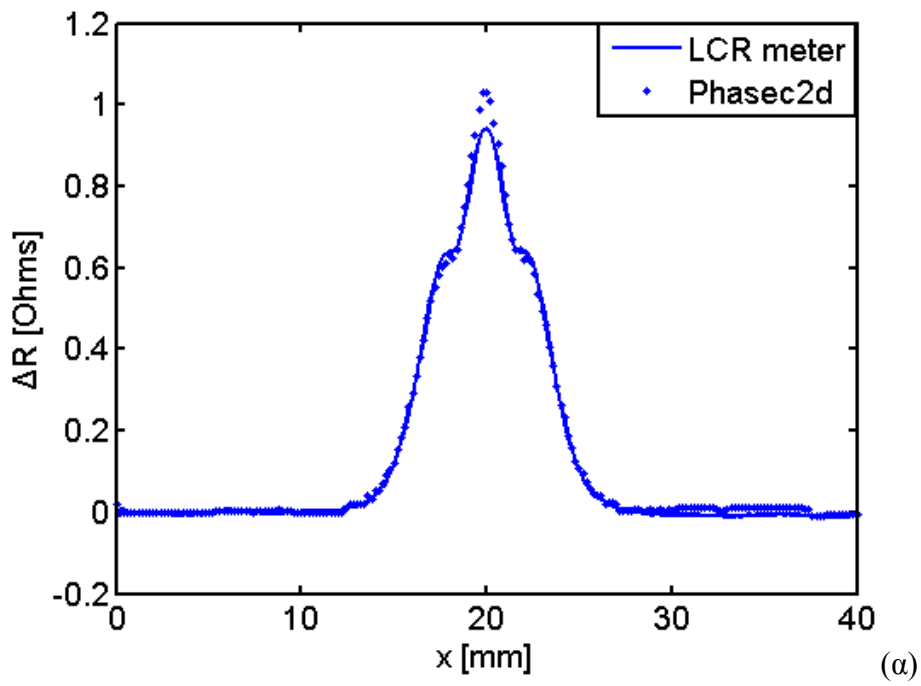
Αρχικά έγινε σάρωση με την κεφαλή 1 σε συχνότητα 15kHz στην πλάκα VMT4N (με τη διαμπερή ρωγμή, Κεφάλαιο 5) με κατεύθυνση εγκάρσιως της ρωγμής (Εικ.7.2.4). Στη συνέχεια με την ίδια κεφαλή και την ίδια συχνότητα στην ίδια πλάκα έγινε σάρωση κατά μήκος της ρωγμής (Εικ.7.2.5). Στην περίπτωση της σάρωσης κατά μήκος της ρωγμής η απόσταση που κινήθηκε η κεφαλή ήταν μεγαλύτερη (από 40mm σε 60mm) καθώς η σάρωση έπρεπε να καλύψει όλο το μήκος της ρωγμής. Όπως παρατηρείται στα αποτελέσματα (Εικ.7.2.6 και 7.2.7) στις σαρώσεις με την κεφαλή 1 τόσο εγκάρσιως όσο και κατά μήκος) υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο οργάνων.



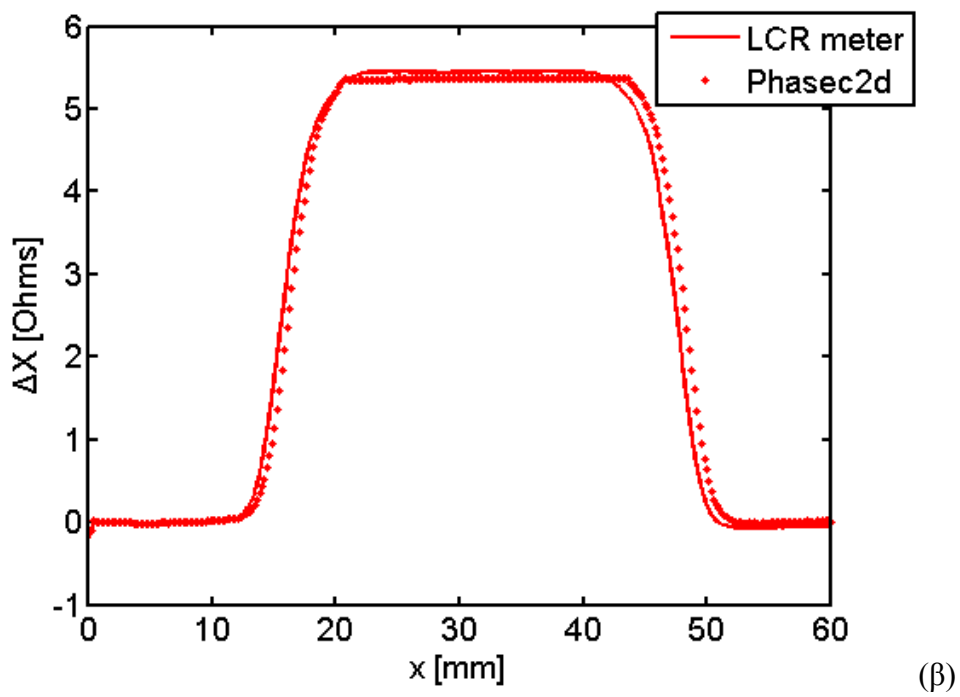
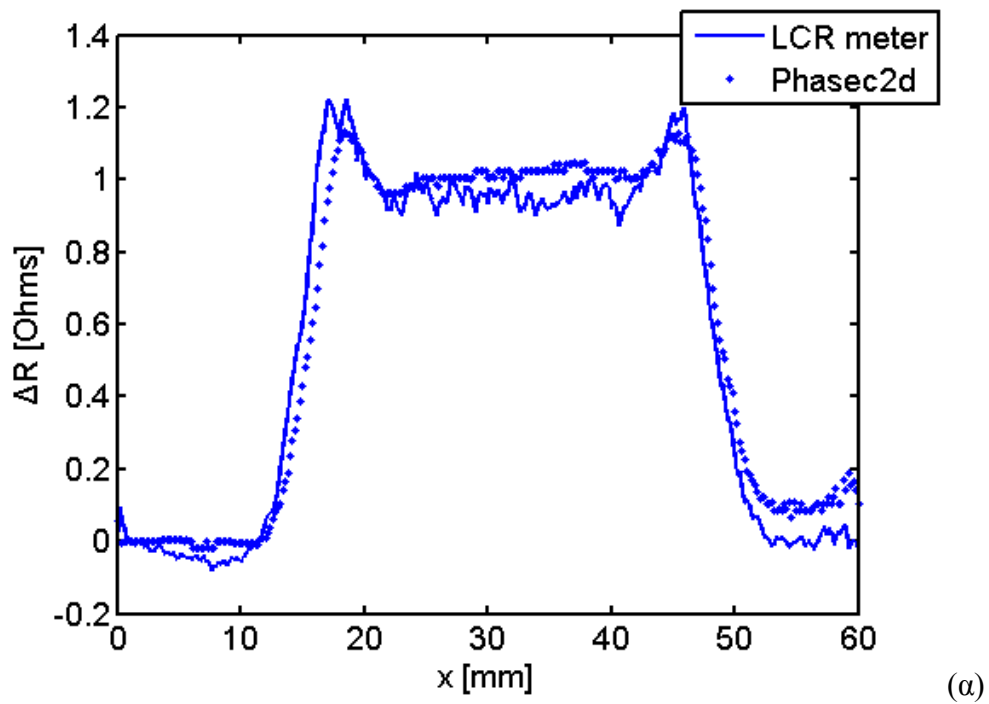
Εικόνα 7.2.4. Εγκάρσια σάρωση της ρωγμής της πλάκας VMT4N, Κεφαλή 1.



Εικόνα 7.2.5. Σάρωση κατά μήκος της ρωγμής της πλάκας VMT4N, Κεφαλή 1.

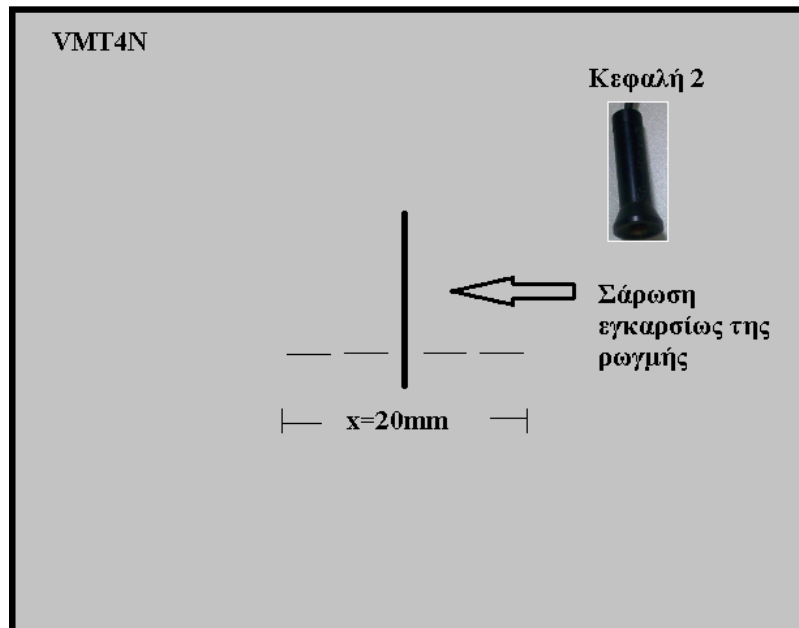


Εικόνα 7.2.6. Σάρωση με την κεφαλή 1 εγκαρσίως της ρωγμής (πλάκα VMT4N) (α) πραγματικό μέρος, και (β) φανταστικό μέρος.

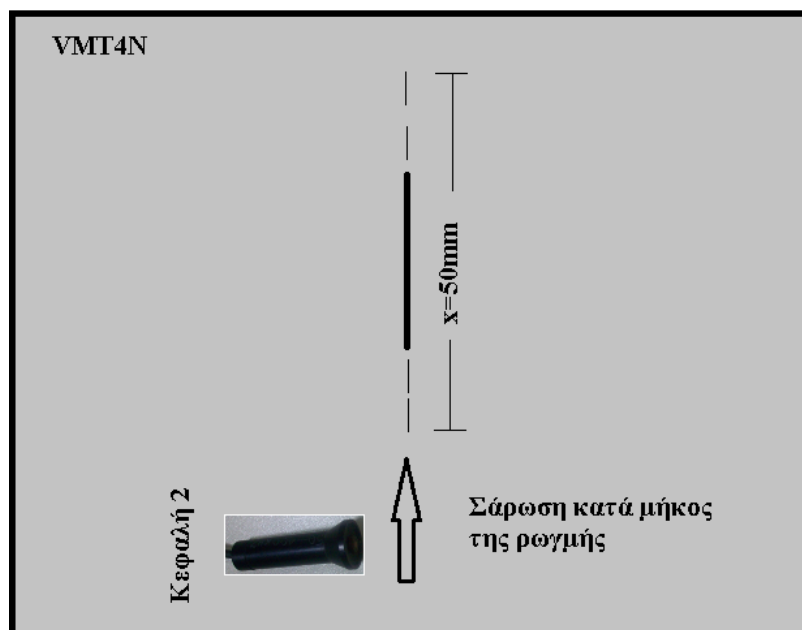


Εικόνα 7.2.7. Σάρωση με την κεφαλή 1 κατά μήκος της ρογμής (πλάκα VMT4N) (α) πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος.

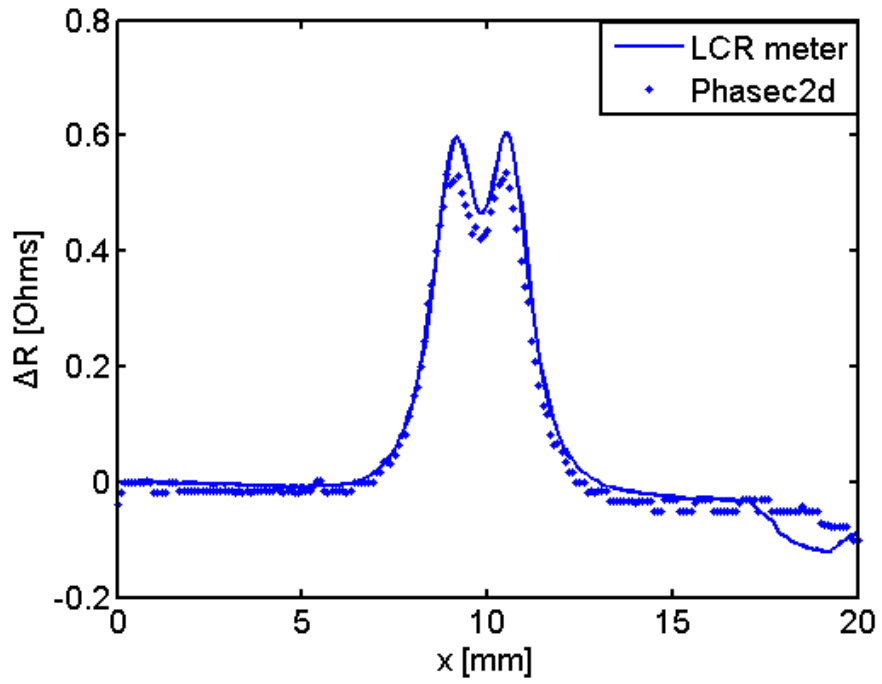
Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν στην ίδια πλάκα με τη διαφορά ότι η κεφαλή που χρησιμοποιήθηκε είναι η κεφαλή 2 και η συχνότητα 150kHz. Επίσης η απόσταση που κινήθηκε η κεφαλή ήταν μικρότερη (στην εγκάρσια σάρωση από 40mm σε 20mm, Εικ.7.2.8, ενώ στην κατά μήκος σάρωση από 60mm σε 50mm, Εικ.7.2.9) καθώς η διάμετρος της κεφαλής έχει αλλάξει (τόρα είναι 6.1mm ενώ στην κεφαλή 1 είναι 12.5mm) και απαιτείται μικρότερη απόσταση και για τις δύο κατευθύνσεις σαρώσεων. Επίσης παρατηρείται στα αποτελέσματα να υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο οργάνων (Εικ.7.2.10 και 7.2.11).



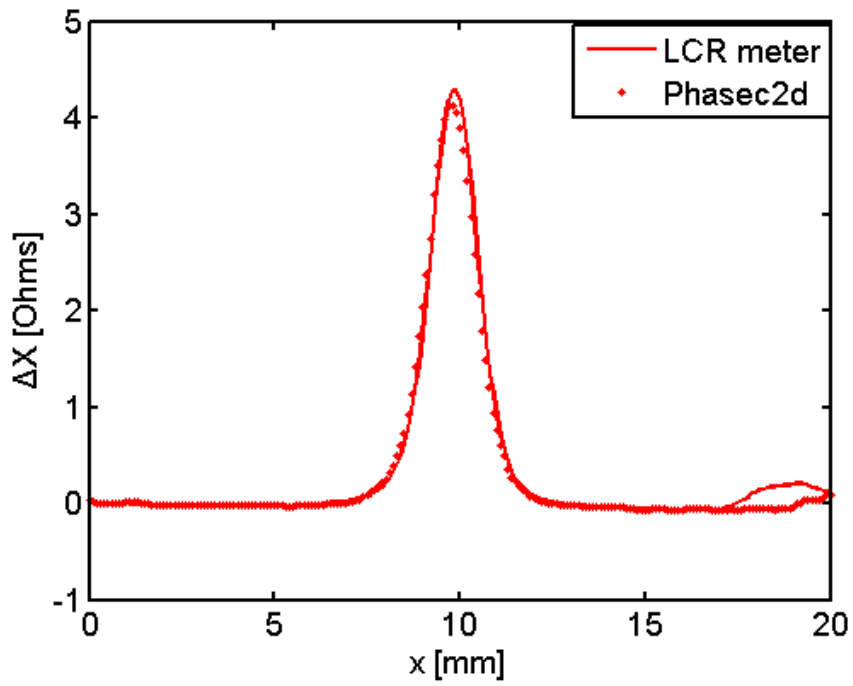
Εικόνα 7.2.8. Εγκάρσια σάρωση της ρωγμής πλάκας VMT4N, Κεφαλή2.



Εικόνα 7.2.9. Σάρωση κατά μήκος της ρωγμής πλάκας VMT4N, Κεφαλή2.



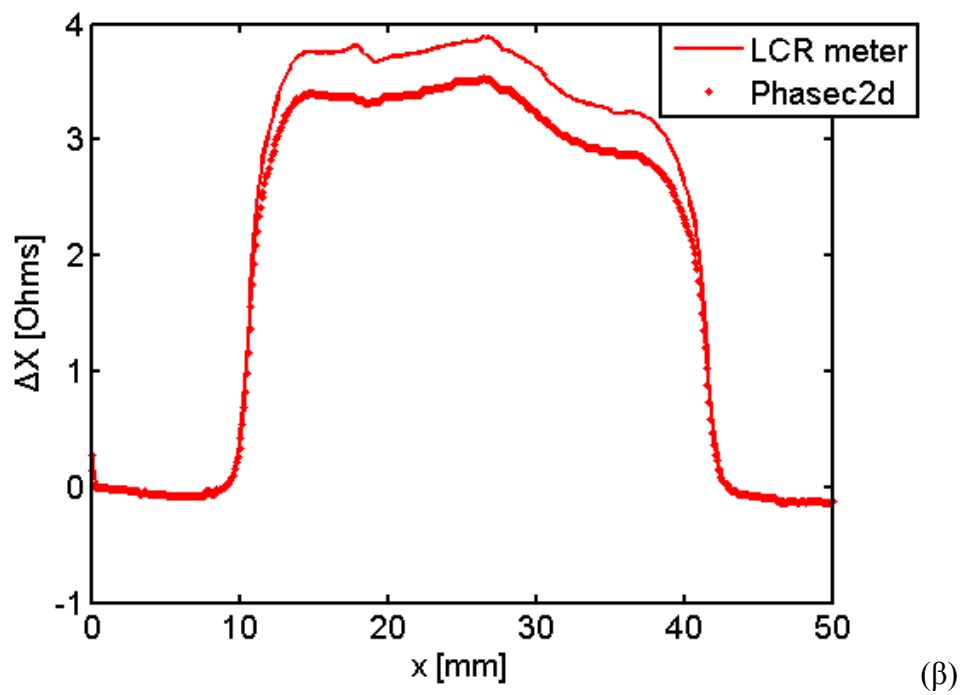
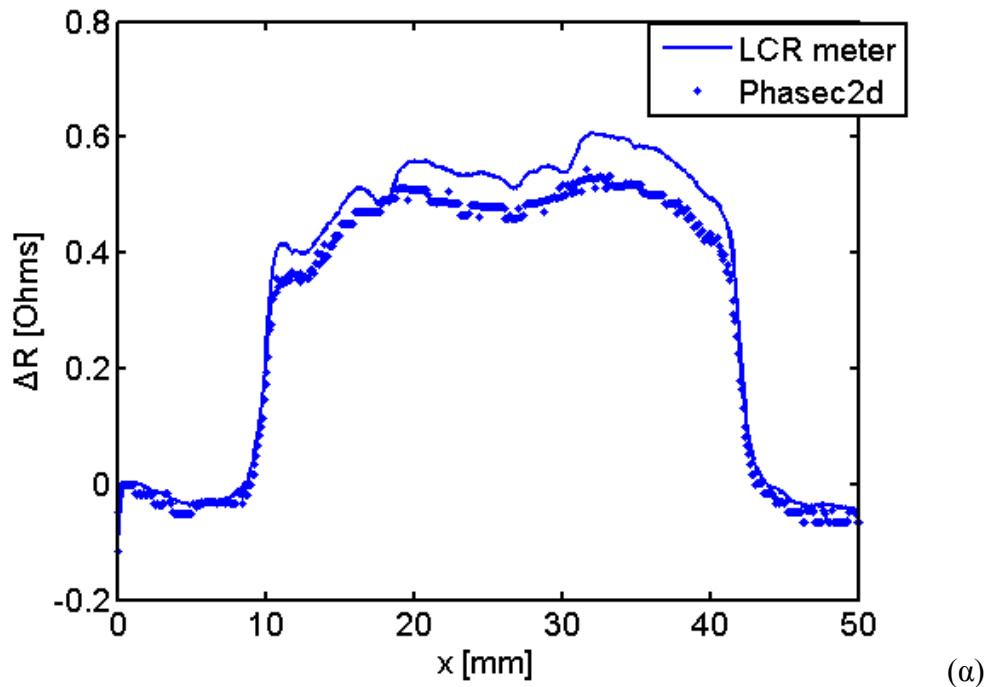
(α)



(β)

Εικόνα 7.2.10. Σάρωση με την κεφαλή 2 εγκαρσίως της ρογμής (πλάκα VMT4N) (α)πραγματικό μέρος και (β)φανταστικό μέρος.

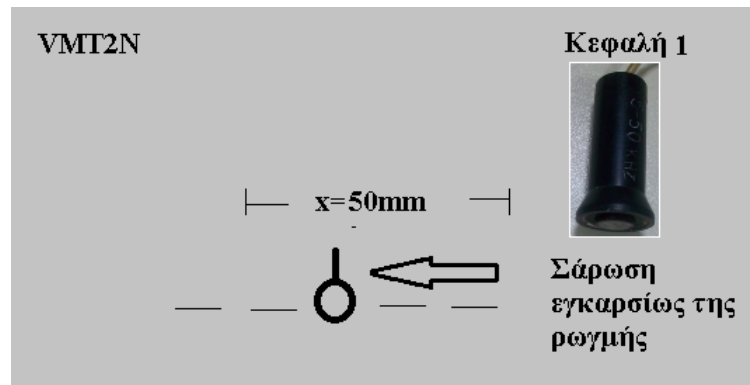




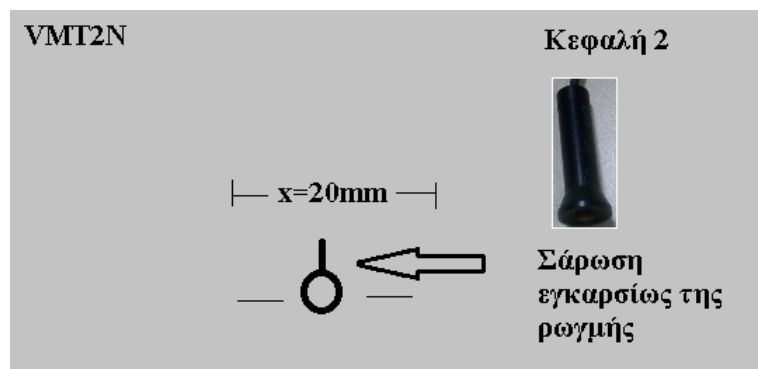
Εικόνα 7.2.11. Σάρωση με την κεφαλή 2 κατά μήκος της ρωγμής (πλάκα VMT4N) (α) πραγματικό μέρος (α), (β) φανταστικό μέρος.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο κεφαλών (κεφαλή 1 και κεφαλή 2) για τη σάρωση της πλάκας VMT4N με διαμπερή ρωγμή έδειξε ότι το πλάτος του σήματος εξόδου με τη χρήση της κεφαλής 1 είναι πιο ισχυρό.

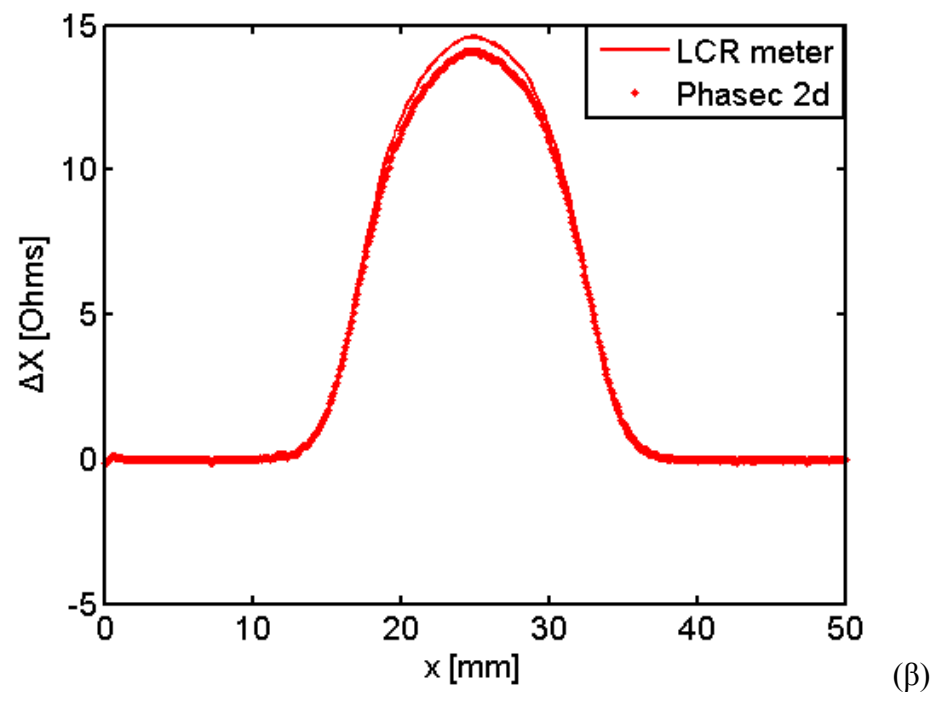
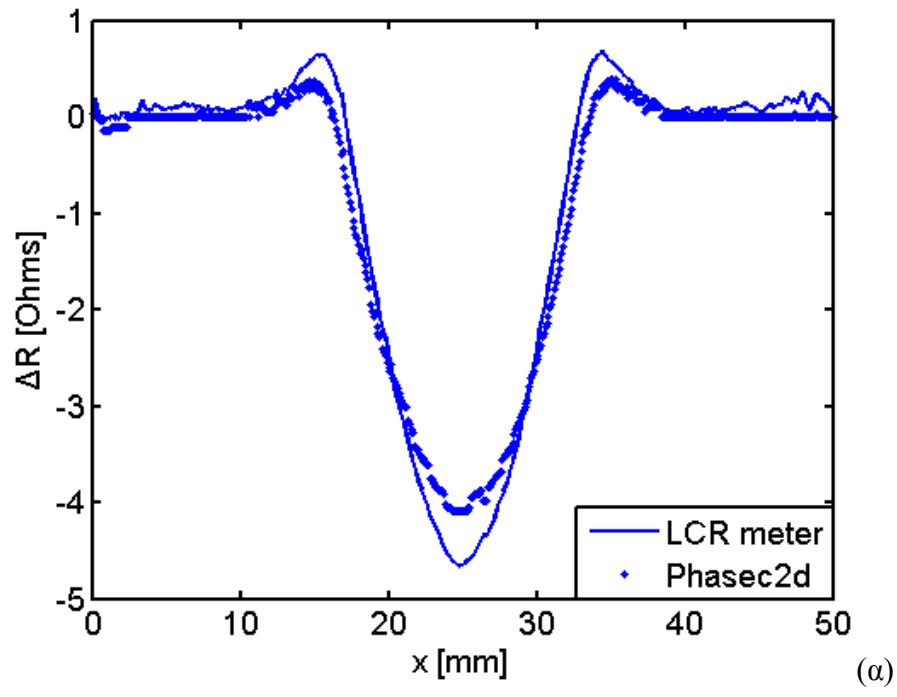
Στη συνέχεια θα διερευνήσουμε τη συμπεριφορά των δύο κεφαλών στην πρότυπη πλάκα VMT2N (Κεφάλαιο 5) με διαμερή ρωγμή και οπή για να εξακριβωθεί πόσο επηρεάζει τη συμπεριφορά των κεφαλών η παρουσία της οπής. Σημειώνεται ότι στον έλεγχο της πλάκας VMT2N έγινε σάρωση μόνο εγκάρσιως της ρωγμής (βρίσκεται ακριβώς δίπλα από την οπή) και το μήκος σάρωσης για την κεφαλή 1 ήταν 50mm ενώ για την κεφαλή 2 ήταν 20mm, όπως και προηγουμένως.



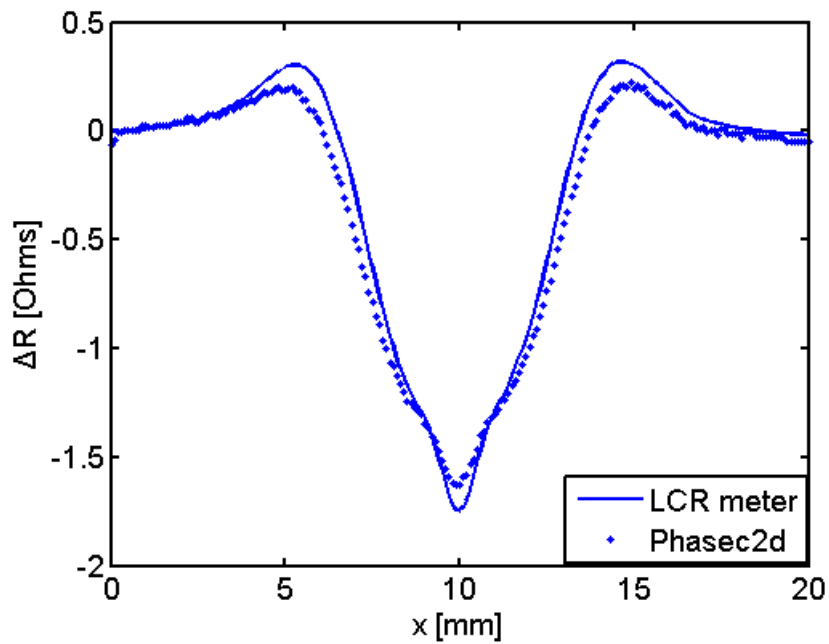
Εικόνα 7.2.12. Εγκάρσια σάρωση της ρωγμής πλάκας VMT2N, Κεφαλή 1.



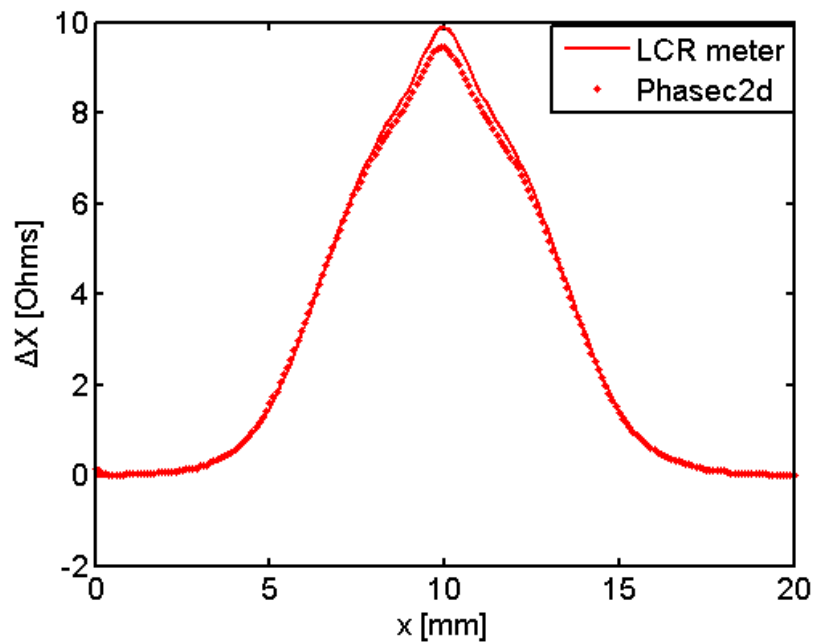
Εικόνα 7.2.13. Εγκάρσια σάρωση της ρωγμής πλάκας VMT2N, Κεφαλή 2.



Εικόνα 7.2.14. Σάρωση με την κεφαλή 1 εγκάρσιως της ρωγμής (πλάκα VMT2N) (α)πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος.



(α)

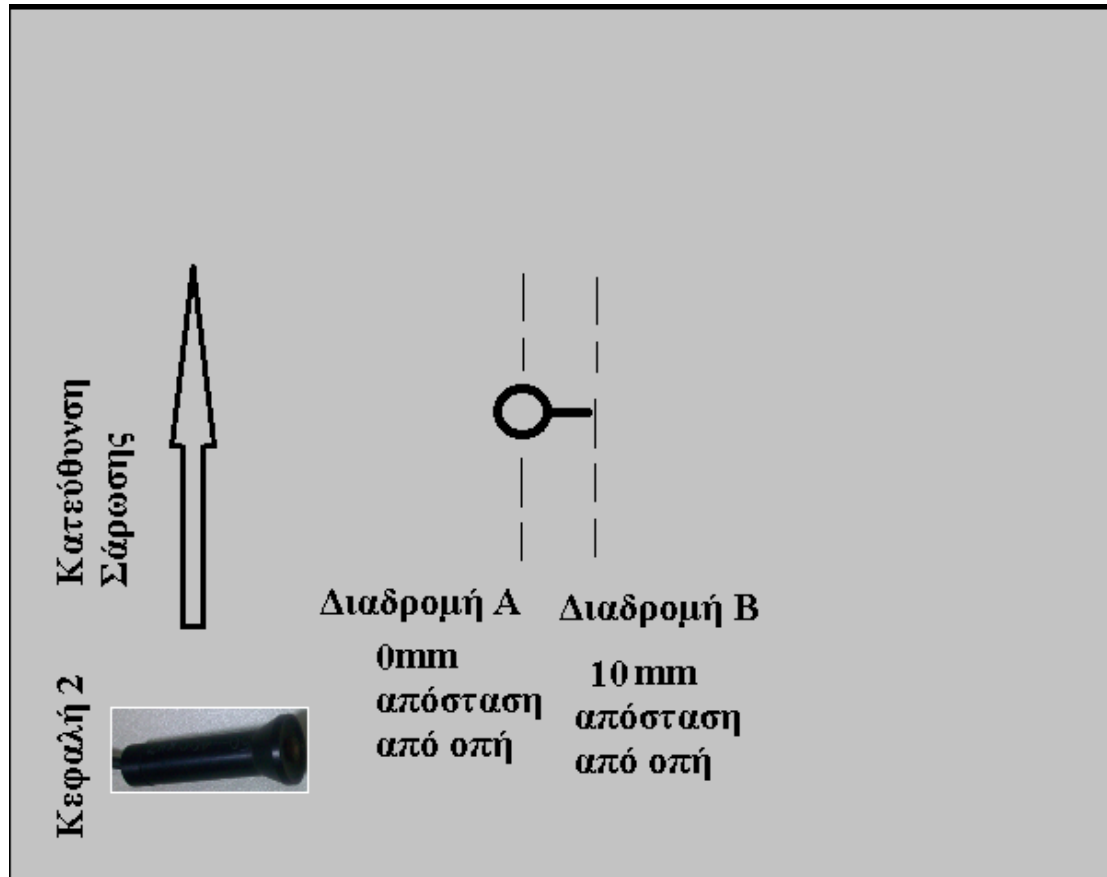


(β)

Εικόνα 7.2.15. Σάρωση με την κεφαλή 2 εγκαρσίως της ρωγμής (πλάκα VMT2N) (α) πραγματικό μέρος και (β) φανταστικό μέρος.

Όπως διαπιστώνεται από τις Εικ.7.2.14 και 7.2.15 η κεφαλή 1 επηρεάζεται πάρα πολύ από το σήμα της οπής ώστε δεν μπορεί να διακρίνει και την παρουσία της ρωγμής ενώ η κεφαλή 2 έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα. Επομένως για την γενική περίπτωση πλάκας που περιλαμβάνει οπή και ρωγμή επιλέγεται κεφαλή με μεγαλύτερη συχνότητα και μικρότερη διάμετρο. Στο εργαστήριο συνεχίστηκαν τα πειράματα με την κεφαλή 2 που αποδείχτηκε ότι είναι καταλληλότερη σε σχέση με την κεφαλή 1 στον έλεγχο πρότυπης πλάκας αλουμινίου VMT2N (οπή και ρωγμή) σε δύο περιπτώσεις.

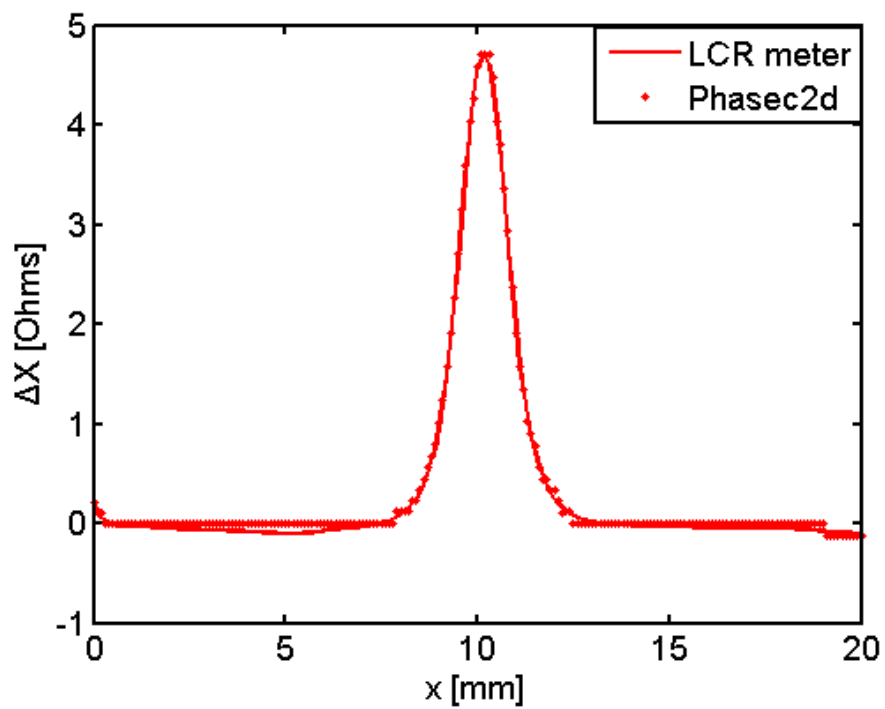
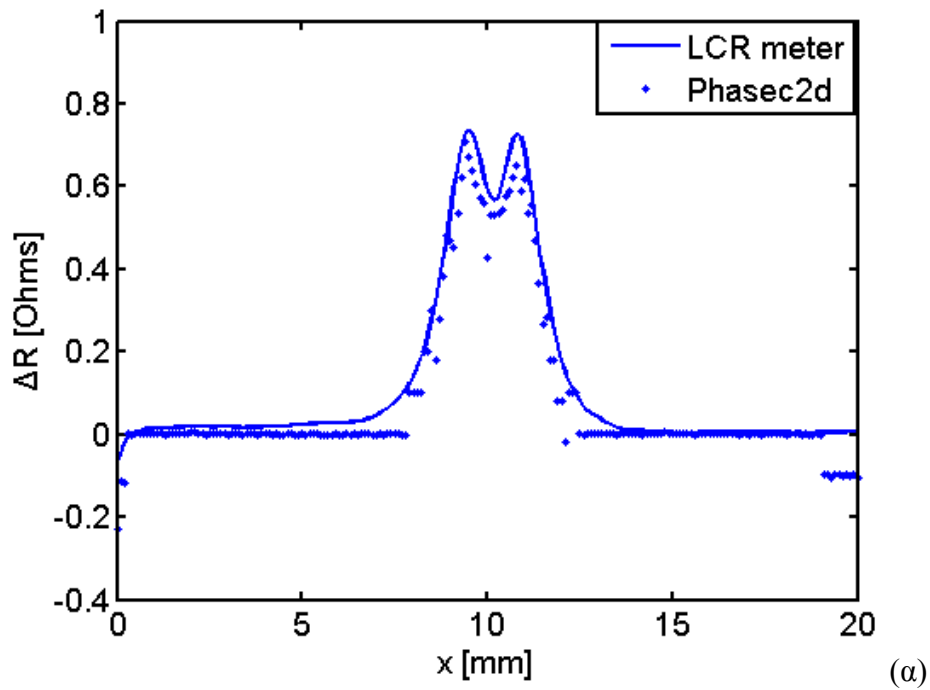
1. Τοποθέτηση της κεφαλής μακριά από την οπή (Διαδρομή Β, 10mm μακριά από την οπή, Εικ.7.2.16).
2. Τοποθέτηση της κεφαλής με τέτοιο τρόπο ώστε η κεφαλή να βρίσκεται μισή μέσα στην οπή και μισή να ακουμπάει στην πλάκα (πάνω στη ρωγμή) (Διαδρομή Α, 0mm μακριά από την οπή, Εικ.7.2.16).



Εικόνα 7.2.16. Σάρωση με την κεφαλή 2 εγκάρσιως της ρωγμής (πλάκα VMT2N) (οι δύο περιπτώσεις).

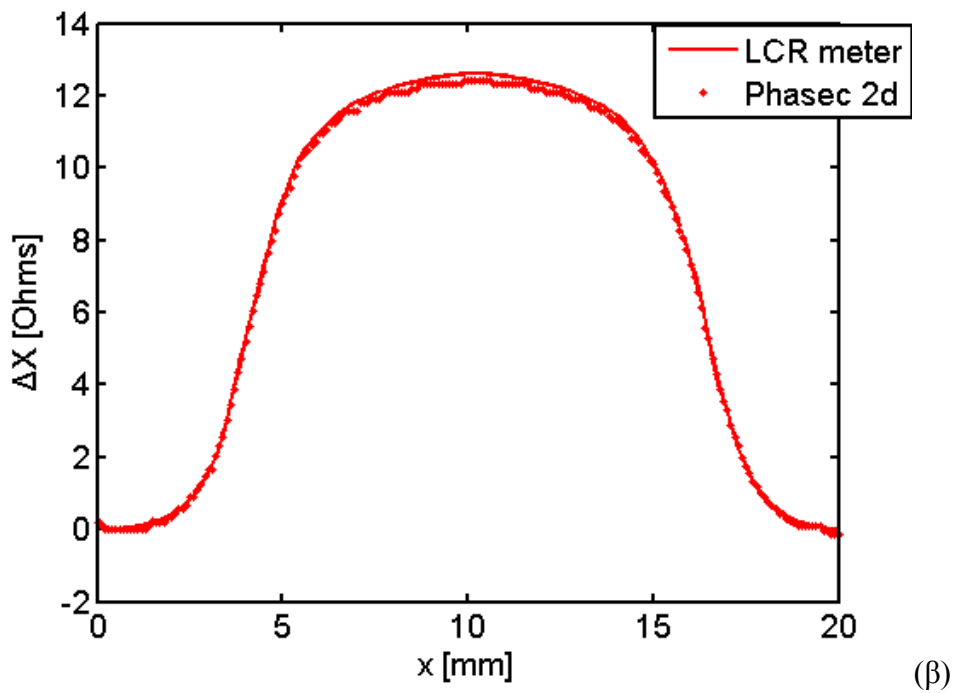
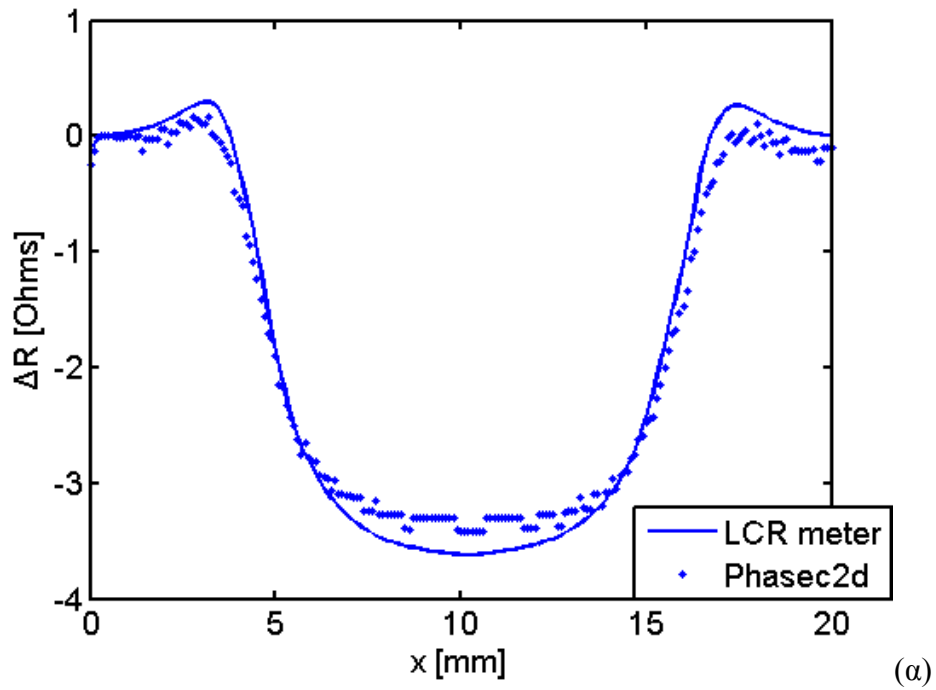
Τα αποτελέσματα παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες (Εικ.7.2.17 και 7.2.18) όπου παρατηρείται ότι στην περίπτωση 1 (Εικ.7.2.17) το σήμα επηρεάζεται από το σήμα της οπής και φυσικά όσο πιο κοντά στην οπή βρίσκεται η κεφαλή τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση με μέγιστη επίδραση την περίπτωση 2 (Εικ.7.2.18). Στην περίπτωση 2 (Εικ.7.2.18), το σήμα από την παρουσία τη οπής είναι τεράστιο και δεν μπορεί να επηρεαστεί από το σήμα της ρωγμής. Αυτό δείχνει την αναγκαιότητα της τοποθέτησης της κεφαλής κατά τη σάρωση, σε περιπτώσεις αντίστοιχων δοκιμίων, σε απόσταση από την τυχόν υφιστάμενη οπή για να υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης του σήματος της ρωγμής. Επιπλέον στις επόμενες εικόνες παρατηρείται συμφωνία αποτελεσμάτων ανάμεσα στα δύο όργανα αλλά η ανωτερότητα του LCR meter σε σχέση με το Phasec2d είναι ξεκάθαρη. Τα αποτελέσματα στο LCR meter είναι πιο ομαλά και συνεχή (δεν επηρεάζονται τόσο από τον θόρυβο) σε σχέση με το Phasec2d.

-Αποτελέσματα περίπτωσης 1 (Η κεφαλή ακολουθεί τη διαδρομή Β, Εικ.7.2.17, σε απόσταση 10mm μακριά από την οπή)



Εικόνα 7.2.17. Περίπτωση σάρωσης 1 (Διαδρομή Β, Εικ.7.2.16), κεφαλή 2 εγκαρσίως της ρωγμής (πλάκα VMT2N) (α) πραγματικό μέρος (α) και (β) φανταστικό μέρος.

-Αποτελέσματα περίπτωσης 2 (Η κεφαλή ακολουθεί τη διαδρομή A, Εικ.7.2.18, μισή μέσα στην οπή και μισή να ακουμπάει την πλάκα πάνω στη ρωγμή, 0mm μακριά από την οπή).



Εικόνα 7.2.18. Περίπτωση σάρωσης 2 (Διαδρομή A, Εικ.7.2.16), κεφαλή 2 εγκαρσίως της ρωγμής (πλάκα VMT2N) (α) πραγματικό μέρος (α) και (β) φανταστικό μέρος.

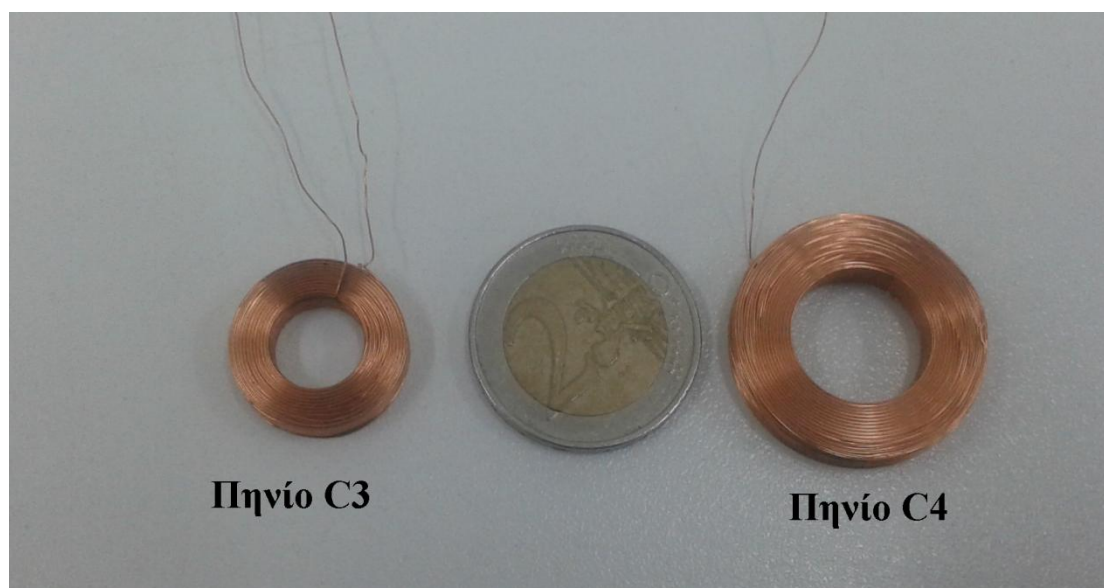
### 7.3.Χρήση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιθεώρηση επίπεδων πρότυπων πλακών με τεχνητές ρωγμές

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακριβείας για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου των δινορρευμάτων σε πρότυπες πλάκες με τεχνητές ρωγμές με χρήση μαγνητικών αισθητήρων και δημοσιεύτηκαν ως πρότυπο πρόβλημα Benchmark 2014 για το Παγκόσμιο Κέντρο Μη Καταστροφικού Ελέγχου World Federation of NDE Centers (WFNDEC). Συγκεκριμένα τα πειράματα έγιναν σε πλάκες με επιφανειακή και υπό-επιφανειακή ρωγμή και χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας μαγνητικού πεδίου τύπου Hall. Οι μετρήσεις συνεχίστηκαν στο εργαστήριο με όργανα ακριβείας και χρήση μαγνητικού αισθητήρα Hall τοποθετημένου μέσα σε κυκλικό πηνίο με στόχο τον υπολογισμό της κάθετης συνιστώσας  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου των δινορρευμάτων για την ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ρωγμών σε επίπεδες πρότυπες πλάκες αλουμινίου.

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε διερεύνηση για τον εντοπισμό των δύο πηνίων που ήταν καταλληλότερα λόγω μεγέθους για την ανίχνευση πλακών αλουμινίου VMT4N (πάχους 4mm, Κεφάλαιο 5) και VMT5N (πάχους 5mm, Κεφάλαιο 5) με διαστάσεις ρωγμών 4mm και 3.85mm αντίστοιχα. Τα πηνία που επιλέχτηκαν (Εικ.7.3.1) έχουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 7.3.1.** Χαρακτηριστικά πηνίων

Όνομα πηνίου	Εσωτερική Διάμετρος[mm]	Εξωτερική Διάμετρος[mm]	Ύψος[mm]	Σπείρες
ΠηνίοC3	15	28.7	5	760
ΠηνίοC4	10	19.4	4	407

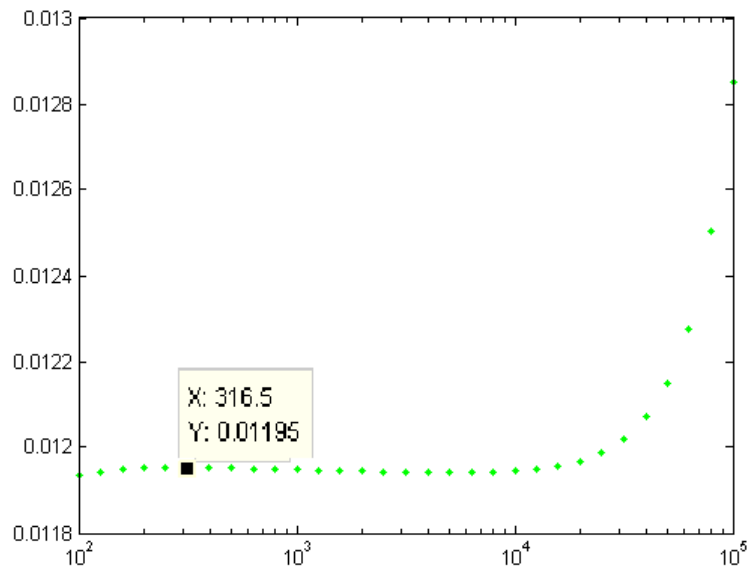


Εικόνα 7.3.1. Πηνίο C3 (α) και πηνίο C4 (β).

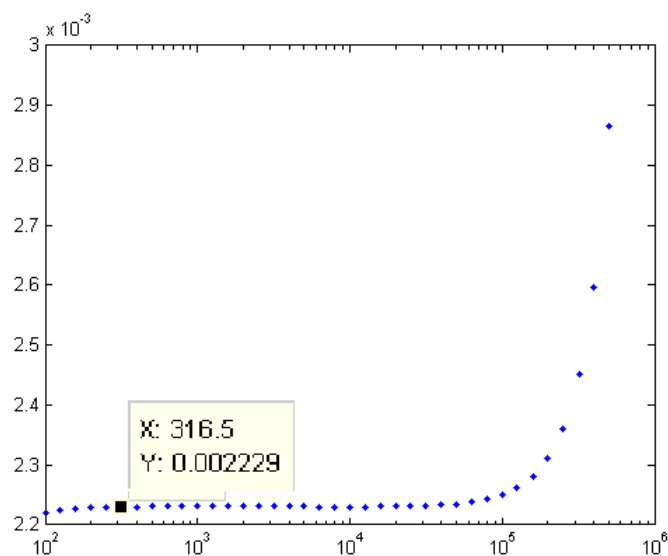


Αρχικά, έγινε μέτρηση της αυτεπαγωγής  $L$  των δύο πηνίων σαν συνάρτηση της συχνότητας σε ένα εύρος συχνοτήτων, από 100Hz έως 500kHz με το όργανο LCR meter (Agilent 4284A, όργανο ακριβείας για τη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης πηνίου Εικ.7.2.1). Η αυτεπαγωγή αυτή συγκρίθηκε με θεωρητικές τιμές από το πρόγραμμα Teddy (Theodoulidis et al 2000). Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα Teddy υπολογίζει την αυτεπαγωγή  $L$  ενός πηνίου που είναι σταθερή, ενώ το όργανο LCR μετράει τη χωρητική αντίσταση  $X_L = \omega L$ .

Παρακάτω παρατίθεται η ημί-λογαριθμική απεικόνιση που προέκυψε με το LCR meter στα δύο πηνία. Στις Εικ.7.3.2 και 7.3.3 φαίνονται οι τιμές της αυτεπαγωγής για το πηνίο C3 και το πηνίο C4, αντίστοιχα.



Εικόνα 7.3.2. Ημί-λογαριθμική απεικόνιση της αυτεπαγωγής ( $L$ ) με τη συχνότητα (μέτρηση στο LCR meter), πηνίο C3.

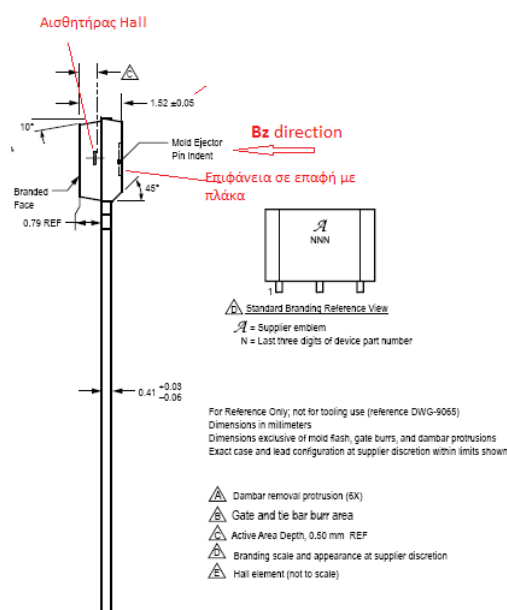


Εικόνα 7.3.3. Ημί-λογαριθμική απεικόνιση της αυτεπαγωγής ( $L$ ) με τη συχνότητα (μέτρηση στο LCR meter), πηνίο C4.

Για το πηνίο C3, η αυτεπαγωγή υπολογίστηκε ίση με 12.27mH (στο θεωρητικό μοντέλο Teddy) ενώ από το LCR meter μετρήθηκε ίση με 11.95mH. Αντίστοιχα, για το πηνίο C4, η αυτεπαγωγή υπολογίστηκε ίση με 22.33mH (στο θεωρητικό μοντέλο Teddy) και μετρήθηκε 22.29mH. Η αυτεπαγωγή των πηνίων έπρεπε να ήταν ίδια τόσο στο θεωρητικό μοντέλο (Teddy) όσο και στη μέτρηση με το LCR meter. Εφόσον το θεωρητικό μοντέλο είναι ακριβές και οι διαστάσεις των πηνίων είναι σωστές καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι διαφορές μεταξύ θεωρητικών τιμών και μέτρησης οφείλεται στο γεγονός ότι ο πραγματικός αριθμός των σπειρών των πηνίων διαφέρουν από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής (Πίνακας 7.3.1).

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η απόκλιση μεταξύ θεωρίας και πειράματος για τα πηνία C3 και C4. Η απόκλιση για το πηνίο C3 υπολογίστηκε ίση με 0.00179% ενώ για το πηνίο C4 ίση με 0.021%. Οι αποκλίσεις και για τα δύο πηνία είναι πάρα πολύ μικρές δείχνοντας “ταύτιση” του πειράματος με τη θεωρία. Επιπλέον, το πηνίο C3 σε όλο το εύρος των τιμών έχει μια πολύ καλή συμπεριφορά και για αυτό επιλέγεται για τις μετρήσεις που ακολουθούν.

Ο μαγνητικός αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες μετρήσεις (δηλαδή είναι ο UGN3507 της εταιρείας Allegro, με ευαισθησία 2.5mV/G, σελ.121).

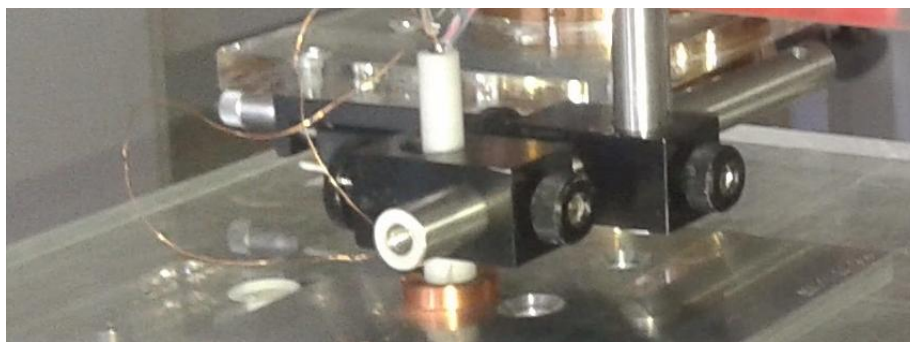


Εικόνα 7.3.4. Σχεδιάγραμμα αισθητήρα (Gilbert et al, Allegro Microsystems UGN3507, 2013).

Σημειώνεται ότι ο μαγνητικός αισθητήρας Hall τοποθετήθηκε στο κέντρο του κυκλικού πηνίου (υπολογισμός  $B_z$ ). Στην περίπτωση μας οι σαρώσεις έχουν δύο διαδρομές, η μία κατά μήκος της ρωγμής (περνάει ο αισθητήρας πάνω από όλη τη ρωγμή) και η άλλη διαδρομή στην οποία ο αισθητήρας διέρχεται εγκάρσιως προς τη ρωγμή.

### 7.3.1. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την κεφαλή του συστήματος (αισθητήρας Hall τοποθετημένος στο εσωτερικό του κυκλικού πηνίου), το σύστημα PXI (NI PXI-1033 by National Instruments) και τον υπολογιστή που συνδέεται με το PXI και όλα μαζί συνθέτουν ένα σύστημα μέτρησης μαγνητικού πεδίου με δινορρεύματα. Η τάση εξόδου του αισθητήρα Hall αναλύεται από έναν ενισχυτή Lock-in που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Labview (περιγραφή στο Κεφάλαιο 7.1.). Στη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε συνεχής μεταβολή του ρεύματος του πηνίου κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Αυτό γινόταν πολύ έντονο όταν το πηνίο σάρωνε την περιοχή της ρωγμής. Αυτό συμβαίνει διότι μεταβάλλεται η αντίσταση του πηνίου πάνω από τη ρωγμή λόγω μεταβολής της αμοιβαίας επαγωγής. Το πρόβλημα αυτό δεν είχε παρουσιαστεί μέχρι τώρα στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου με τη χρήση του μαγνητομέτρου SQUID καθώς χρησιμοποιήθηκαν διπλά ορθογωνικά πηνία, τα οποία είναι πολύ μικρής αντίστασης και αυτεπαγωγής με αποτέλεσμα το ρεύμα στο πηνίο να παραμένει σταθερό. Αυτό αντιμετωπίστηκε με διακοπή της τροφοδοσίας του πηνίου απευθείας από την πηγή τάσης (Fgen) της πλατφόρμας PXI και την παρεμβολή μιας πηγής σταθερού ρεύματος όπως φαίνεται στην Εικ.7.3.5 (χρήση πηγή ρεύματος Valhala-Κεφάλαιο 5-, πειραματική διάταξη).



(α)



(β)

Εικόνα 7.3.5. Πειραματική διάταξη (α) η κεφαλή (και σύστημα στήριξης) και (β) ηλεκτρονική διάταξη που συνδέεται με τον Η/Υ.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες μετρήσεις:

Περίπτωση 1: Σάρωση πλάκας VMT4N (Κεφάλαιο 5), πάχους 4mm με διαμπερή ρωγμή.

Περίπτωση 2: Σάρωση πλάκας VMT5N (Κεφάλαιο 5), πάχους 5mm με επιφανειακή ρωγμή (οι διαστάσεις αναφέρονται στον ίδιο πίνακα με τα χαρακτηριστικά της πλάκας).

Περίπτωση 3: Σάρωση της ίδιας πλάκας VMT5N αλλά η πλάκα τοποθετήθηκε από την άλλη πλευρά ώστε η ρωγμή να είναι υπό-επιφανειακή.

Σε όλες τις επιθεωρήσεις η κεφαλή (αισθητήρας Hall και κυλινδρικό πηνίο) σαρώνει την τεχνητή ρωγμή που υπάρχει στις πρότυπες πλάκες αλουμινίου (VMT4N, VMT5N) σε δύο κατευθύνσεις, κατά μήκος (περνάει πάνω από τη ρωγμή παράλληλα προς τον άξονά της) και εγκάρσιως (περνάει από το κέντρο της ρωγμής κάθετα στον άξονά της) όπως απεικονίζεται στις Εικ.7.3.9 έως και 7.3.11.

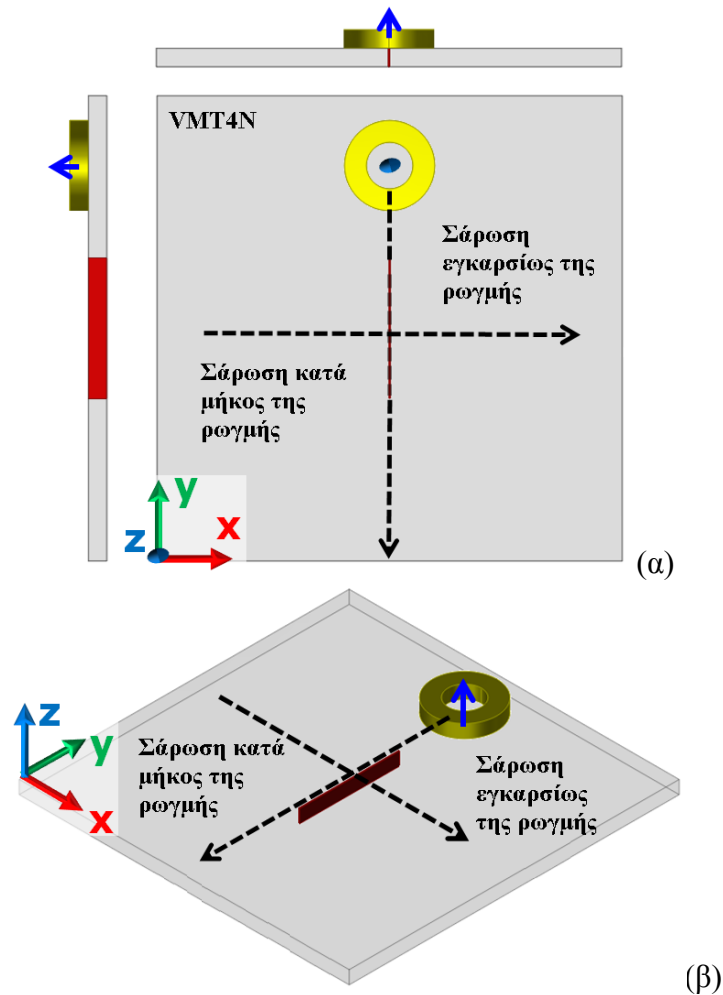
Σημειώνεται ότι σε όλες τις επιθεωρήσεις ο μαγνητικός αισθητήρας δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τις πλάκες αλλά βρίσκεται σε απόσταση 1.3mm. Επίσης, η απόσταση (lift off) του πηνίου από την εκάστοτε πλάκα επιθεώρησης είναι 0.05mm. Οι αποστάσεις αυτές (1.3mm και 0.05mm) υπολογίστηκαν με τη σύγκριση της καμπύλης της μεταβολής της αντίστασης του πηνίου με τη συχνότητα στον αέρα με την αντίστοιχη καμπύλη του πηνίου πάνω στην πλάκα και χρήση του θεωρητικού μοντέλου.

Οι συχνότητες που έγιναν οι σαρώσεις ήταν 1025Hz, 1975Hz και 3025Hz. Σε αμφότερες τις πλάκες VMT4N και VMT5N με παρόμοιες αγωγιμότητες 17.5MS/m και 17MS/m, αντίστοιχα, οι συχνότητες 1025Hz, 1975Hz και 3025Hz, αντιστοιχούν σε βάθη διείσδυσης περίπου 3.8mm, 2.7mm και 2.2mm. Οι τιμές ρεύματος του πηνίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από 50 ως 80mA.

### **7.3.2.Αποτελέσματα επιθεωρήσεων**

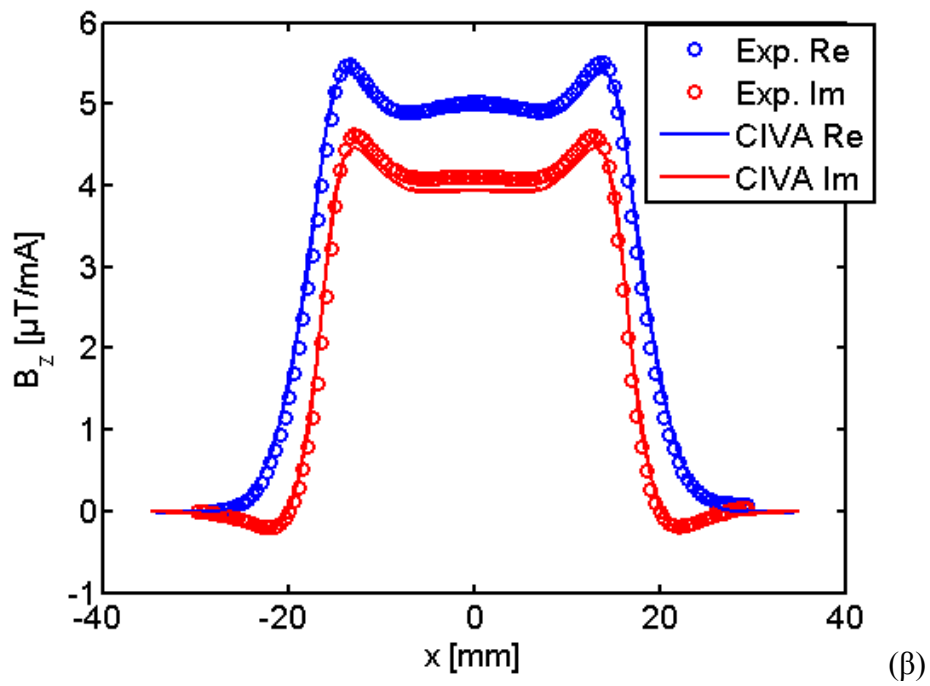
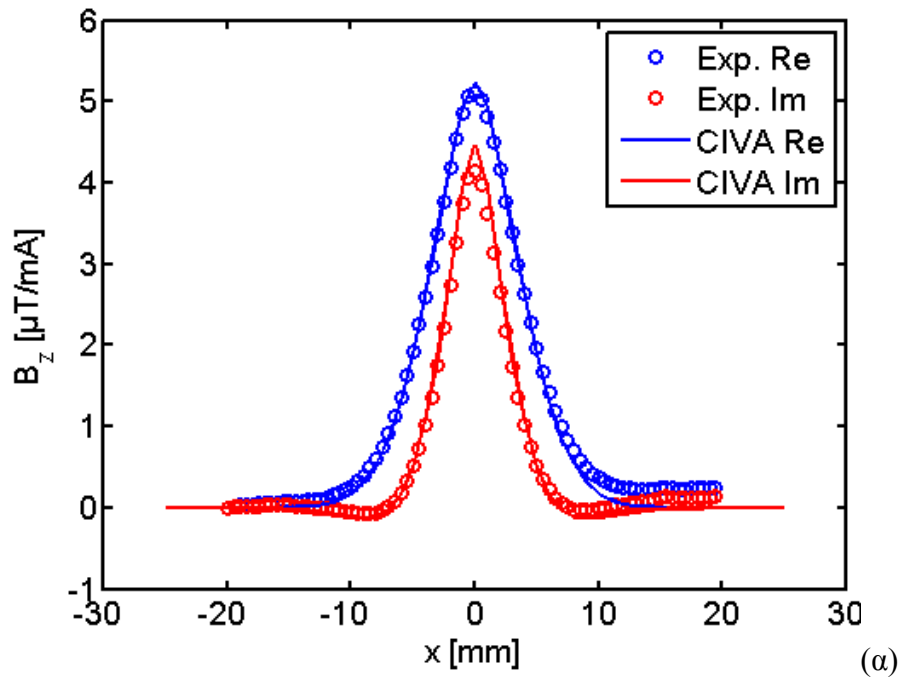
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, από τις σαρώσεις εγκάρσιως και κατά μήκος των τεχνητών ρωγμών στις δύο πλάκες (VMT4N και VMT5N) στις τρεις συχνότητες (1025Hz, 1975Hz και 3025Hz), αντιστοιχούν στη συνιστώσα z του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή στη συνιστώσα την κάθετη στην επιφάνεια των πλακών. Σημειώνεται ότι η σάρωση σε όλες τις περιπτώσεις έγινε σε συνολικό μήκος 40mm σε ίσα διαστήματα εκατέρωθεν των ρωγμών, όπως φαίνεται στις Εικ.7.3.6, 7.3.10 και 7.3.14. Όπως παρατηρείται από τις επόμενες εικόνες (Εικ.7.3.7 –7.3.10, Εικ.7.3.11-7.3.13 και Εικ.7.3.15-7.3.17) η συμπεριφορά του συστήματος επιθεώρησης είναι πολύ ακριβής καθώς υπάρχει πλήρη σχεδόν ταύτιση των θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων σε όλες τις περιπτώσεις και για όλες τις συχνότητες. Είναι σημαντικό ότι η συμπεριφορά του συστήματος δίνει τόσο ακριβείς μετρήσεις εάν συγκριθεί με θεωρητικές προσομοιώσεις στις πιο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις επίπεδων πλακών (περίπτωση διαμπερούς ρωγμής, επιφανειακής και υπό-επιφανειακής ρωγμής) πάχους μεγαλύτερο των 2mm με τεχνητές ρωγμές βάθους μέχρι και 5mm, καθώς τα βιομηχανικά όργανα δινορρευμάτων περιορίζονται στον εντοπισμό ασυνεχειών μικρότερου βάθους.

-Περίπτωση 1. Οι μετρήσεις στην VMT4N (πλάκα 4mm) με διαμπερή ρωγμή (Εικ.7.3.6).

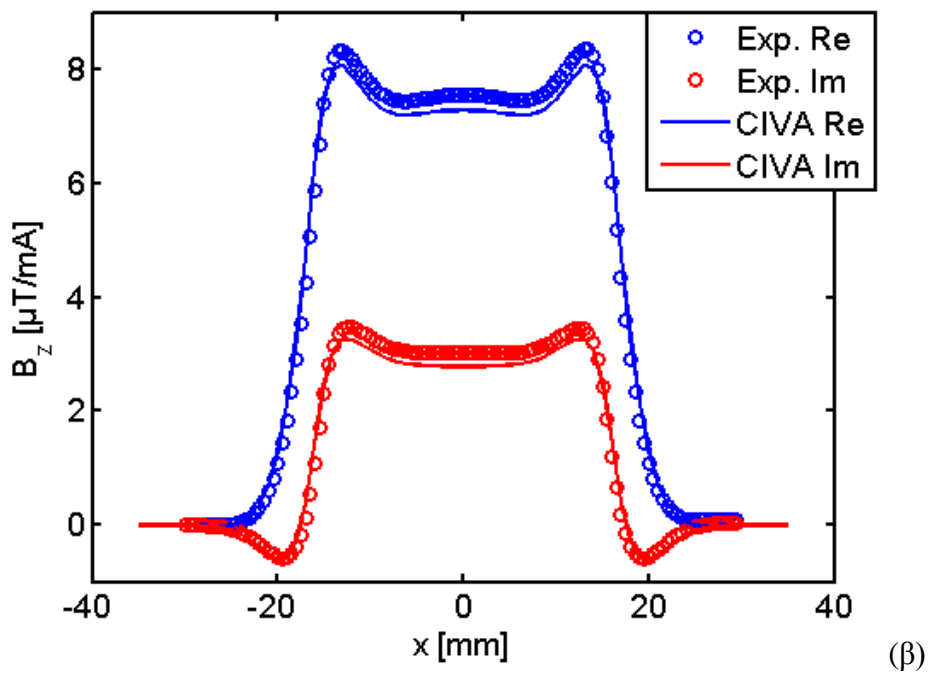
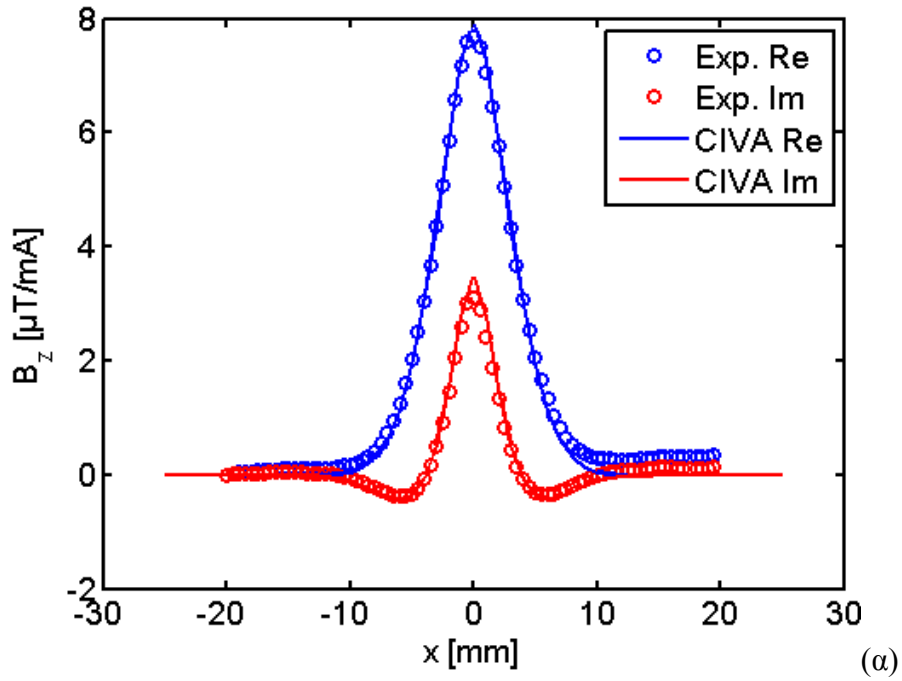


Εικόνα 7.3.6. Σάρωση στην πλάκα VMT4N (α) κάτοψη και (β) τρισδιάστατη απεικόνιση (CIVA).

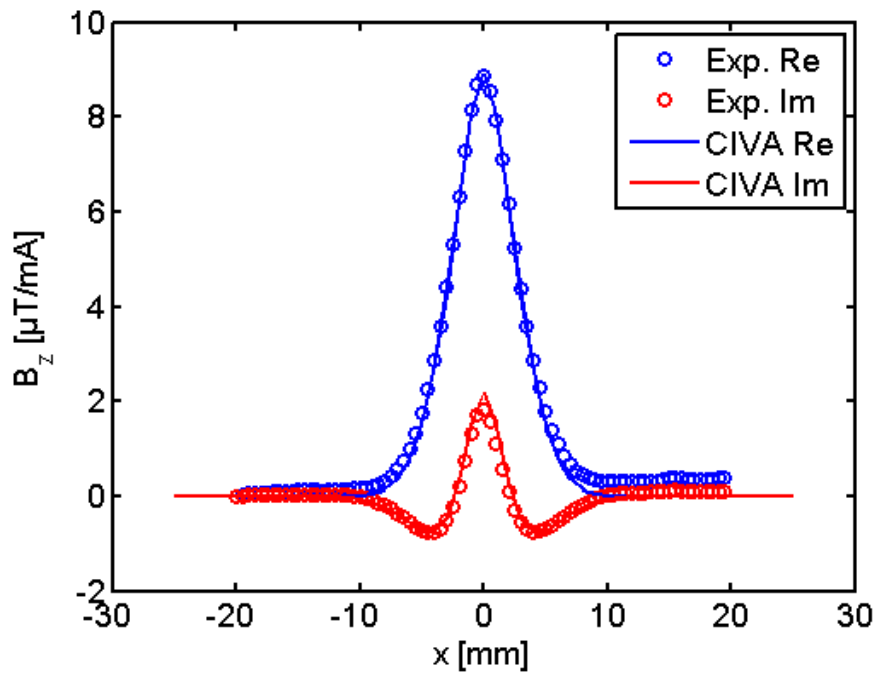
Τα αποτελέσματα των σαρώσεων (εγκάρσια και κατά μήκος) για τις τρεις συχνότητες (1025Hz, 1975Hz, 3025Hz) στην πλάκα VMT4N δίνονται στις Εικ.7.3.7.-Εικ.7.3.9. Οι εικόνες δείχνουν την πολύ καλή συμφωνία θεωρητικών προσομοιώσεων και εργαστηριακών μετρήσεων σε όλες τις συχνότητες. Επίσης παρατηρείται ότι διαφέρει η μορφή του σήματος της ρωγμής ανάλογα με τον άξονα της σάρωσης. Όταν η σάρωση είναι εγκάρσια στη ρωγμή το σήμα είναι πιο στενό ενώ η κατά μήκος σάρωση δίνει εκτεταμένο σήμα. Στις Εικ.7.3.7 ως 7.3.9. για την διαμπερή ρωγμή καθώς και στις αντίστοιχες εικόνες για την επιφανειακή και την υπό-επιφανειακή ρωγμή, ο συμβολισμός Exp. Re και Exp. Im σημαίνει τις πειραματικές μετρήσεις (πραγματικό και φανταστικό μέρος του μαγνητικού πεδίου) ενώ CIVA Re και CIVA Im σημαίνει τους αντίστοιχους θεωρητικούς υπολογισμούς με το πρόγραμμα προσομοίωσης.



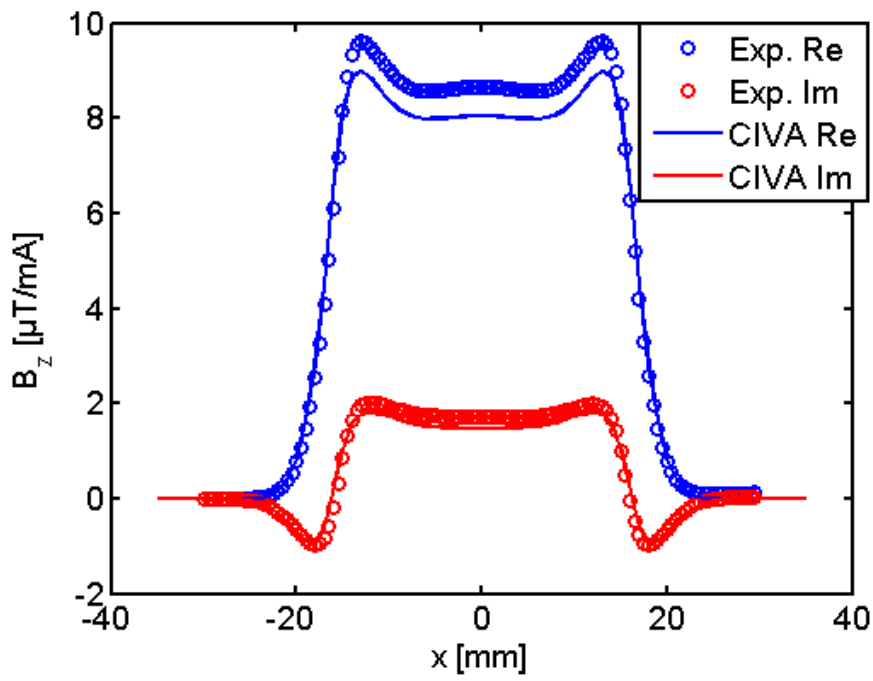
Εικόνα 7.3.7. Σάρωση πλάκας VMT4N (διαμπερή ρογή) στη συχνότητα 1025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.



Εικόνα 7.3.8. Σάρωση πλάκας VMT4N (διαμπερή ρωγμή) στη συχνότητα 1975Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.



(α)

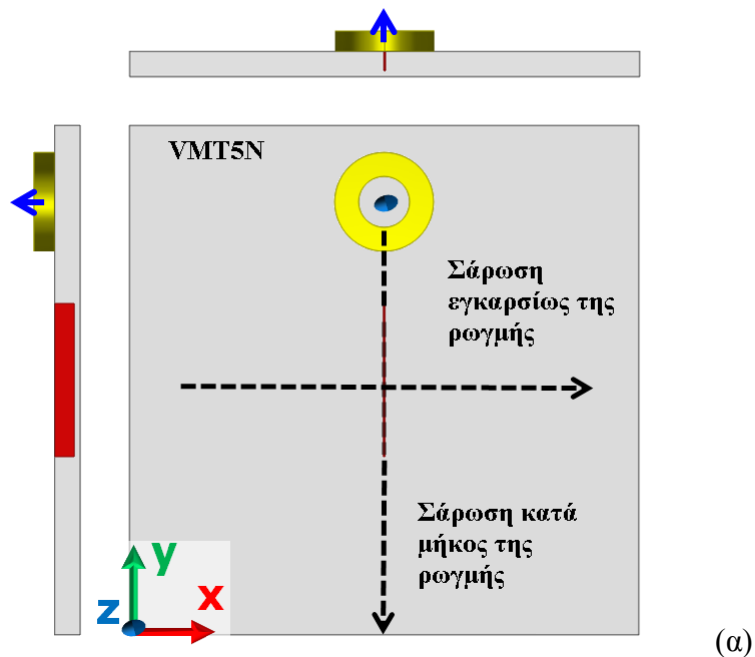


(β)

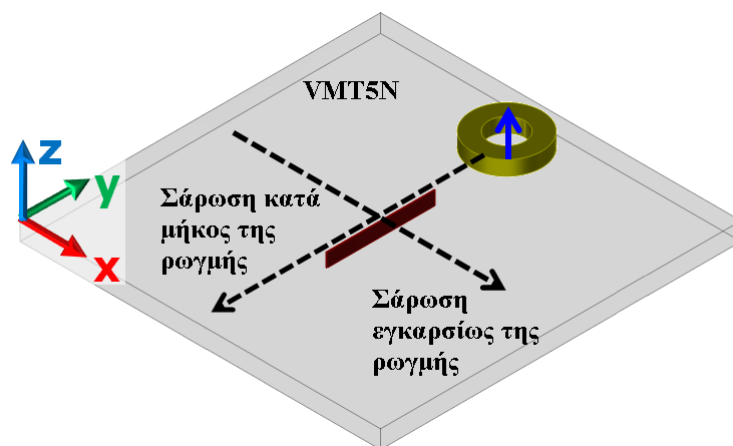
Εικόνα 7.3.9. Σάρωση πλάκας VMT4N (διαμπερής ρογή) στη συχνότητα 3025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.



-Περίπτωση 2.Οι μετρήσεις στην VMT5N (πλάκα 5mm) με επιφανειακή ρωγμή (Εικ.7.3.10).



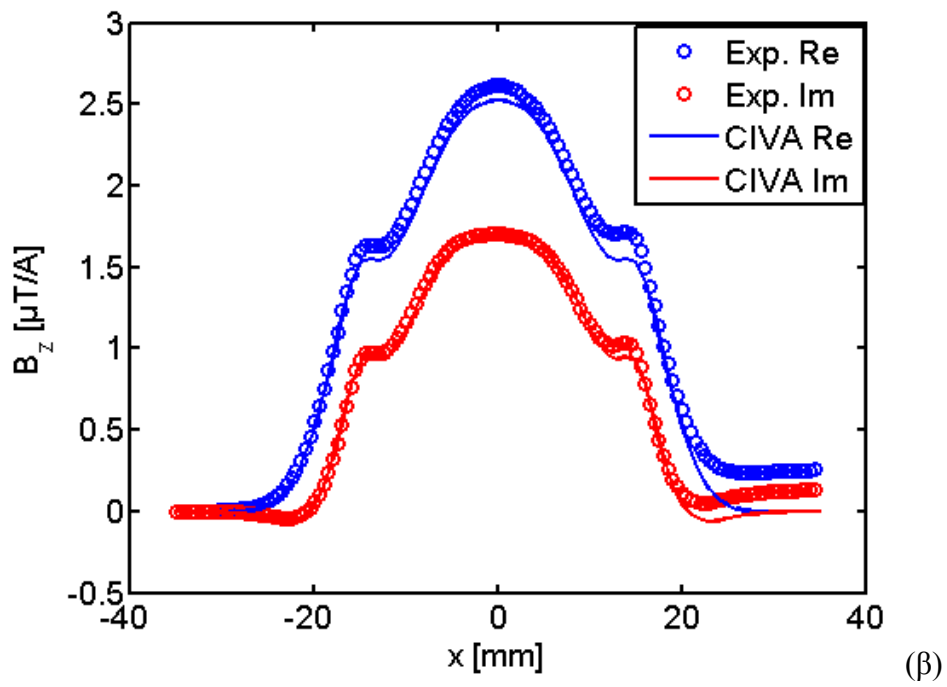
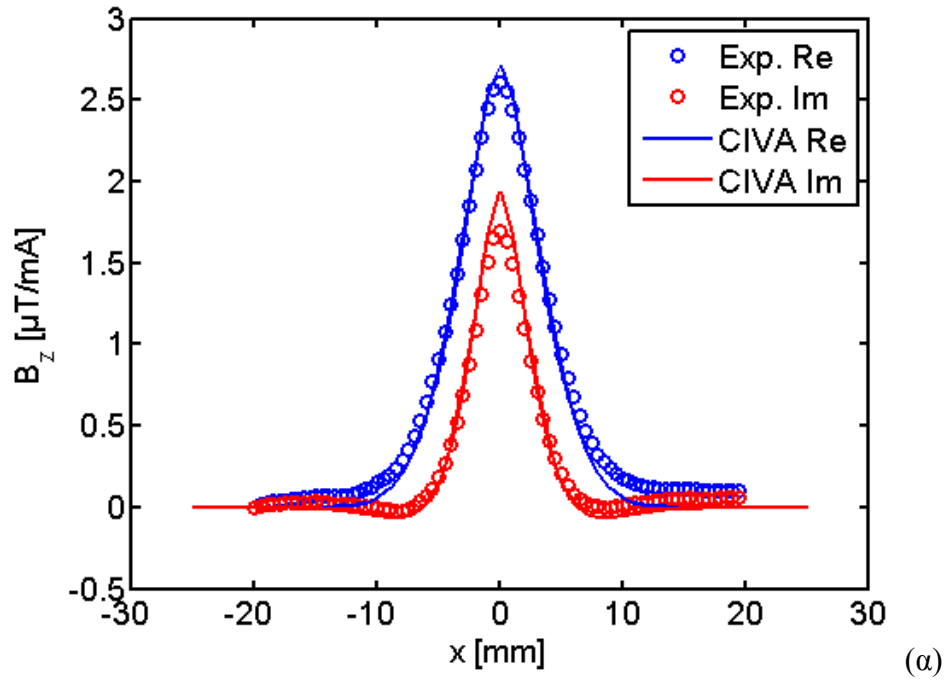
(α)



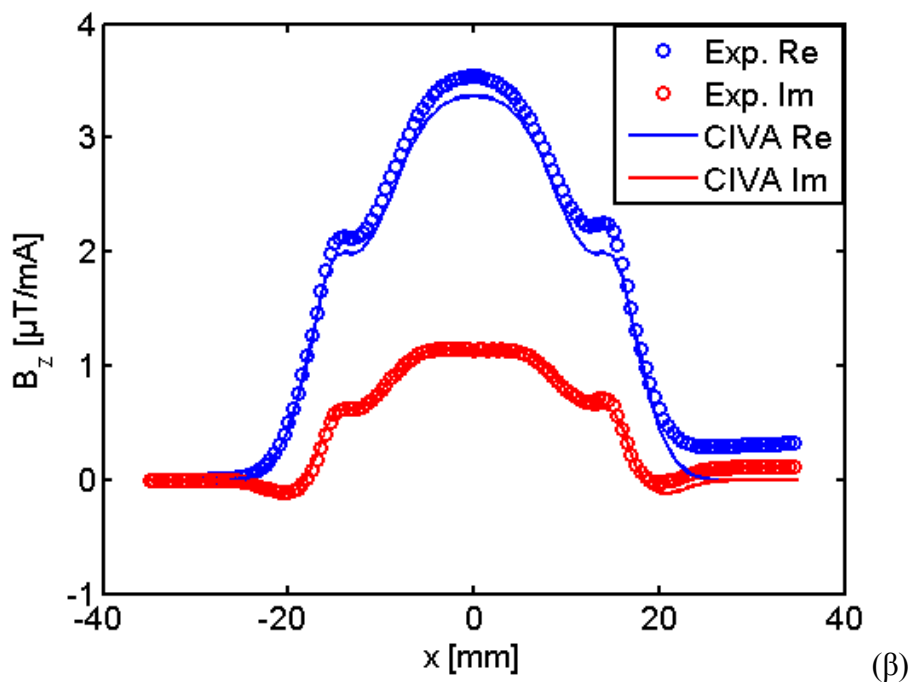
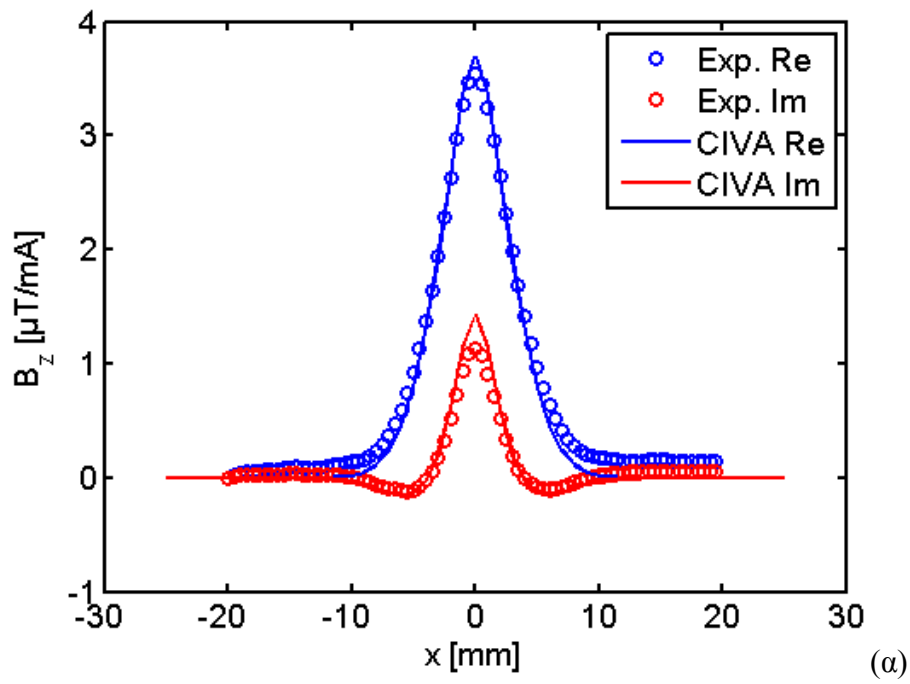
(β)

Εικόνα 7.3.10. Σάρωση στην πλάκα VMT5N (επιφανειακή ρωγμή) (α) κάτοψη και (β) τρισδιάστατη απεικόνιση.

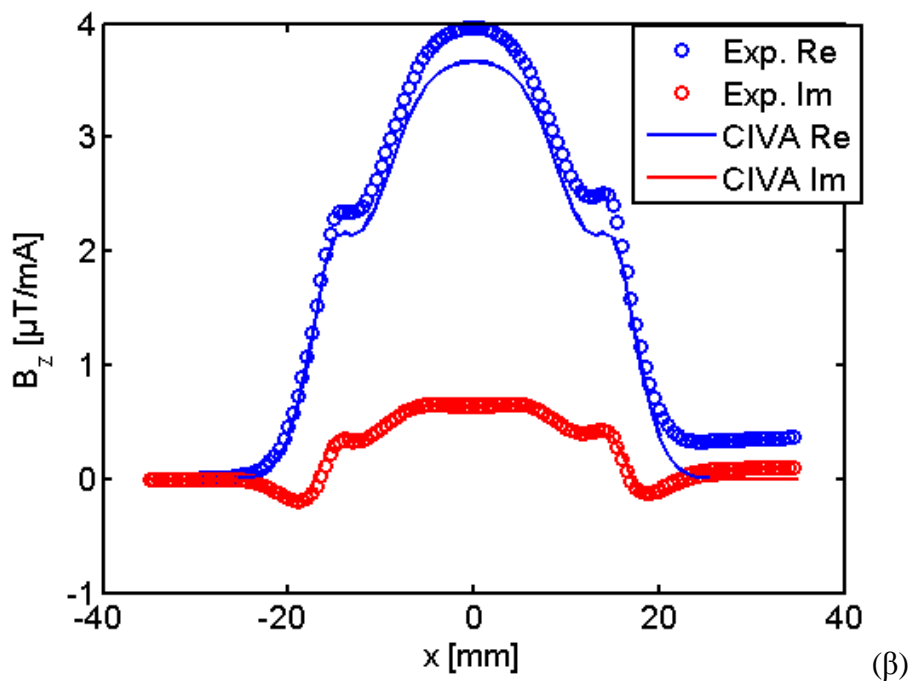
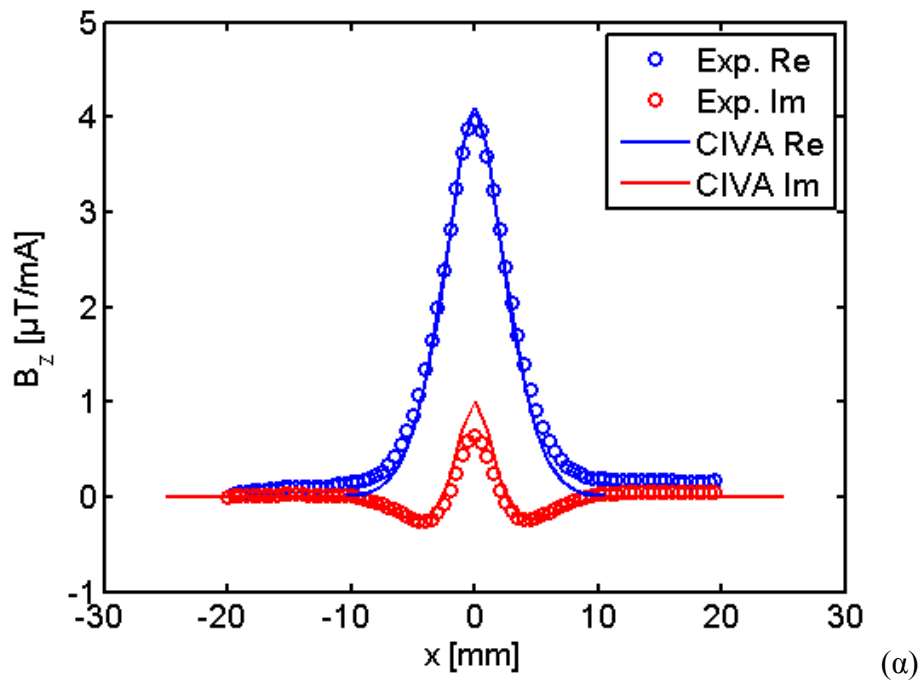
Τα αποτελέσματα των σαρώσεων (εγκάρσια και κατά μήκος) για τις τρεις συχνότητες (1025Hz, 1975Hz, 3025Hz) στην πλάκα VMT5N (επιφανειακή ρωγμή) δίνονται στις Εικ.7.3.11-Εικ.7.3.13. Όπως και στην περίπτωση της διαμερούς ρωγμής της πλάκας VMT4N, υπάρχει πολύ καλή συμφωνία θεωρητικών προσομοιώσεων και εργαστηριακών μετρήσεων σε όλες τις συχνότητες. Επίσης και εδώ παρατηρείται (όπως και στην πλάκα VMT4N) ότι το σήμα της ρωγμής στην περίπτωση της διαμήκουσ σάρωσης είναι πολύ ευρύτερο.



Εικόνα 7.3.11. Σάρωση πλάκας VMT5N (επιφανειακή ρωγμή) στη συχνότητα 1025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.

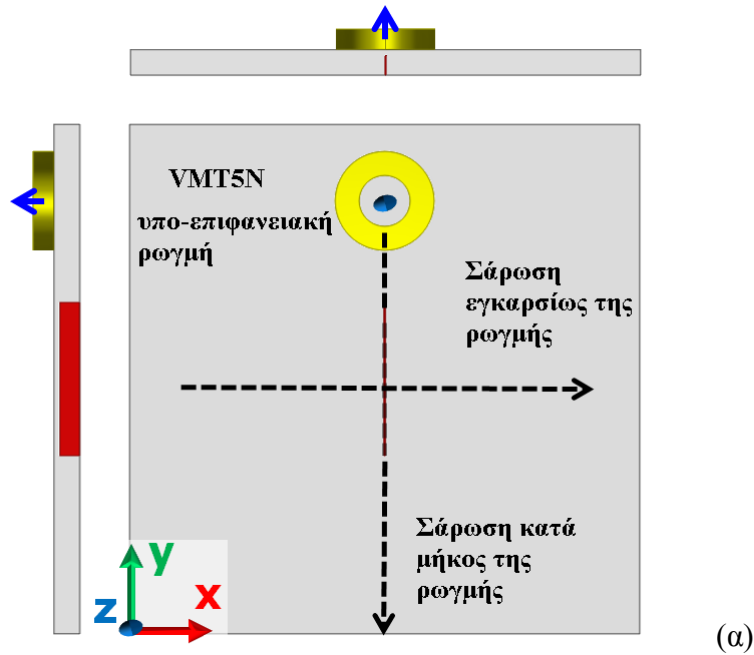


Εικόνα 7.3.12. Σάρωση πλάκας VMT5N (επιφανειακή ρωγμή) στη συχνότητα 1975Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.

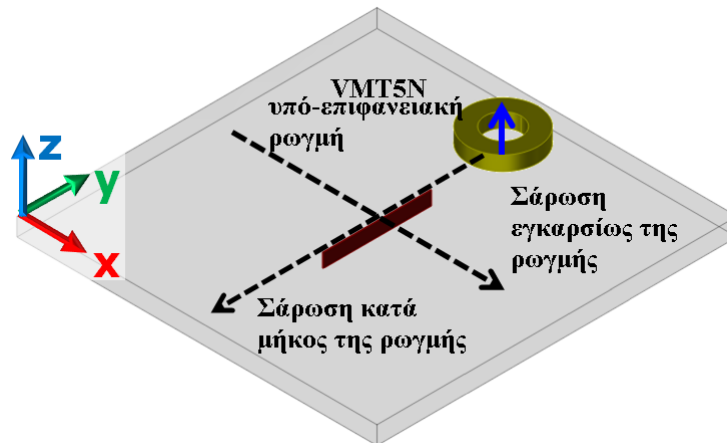


Εικόνα 7.3.13. Σάρωση πλάκας VMT5N (επιφανειακή ρογμή) στη συχνότητα 3025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.

-Περίπτωση 3. Οι μετρήσεις στην VMT5N (πλάκα 5mm) με υπό-επιφανειακή ρωγμή (Εικ.7.3.14).



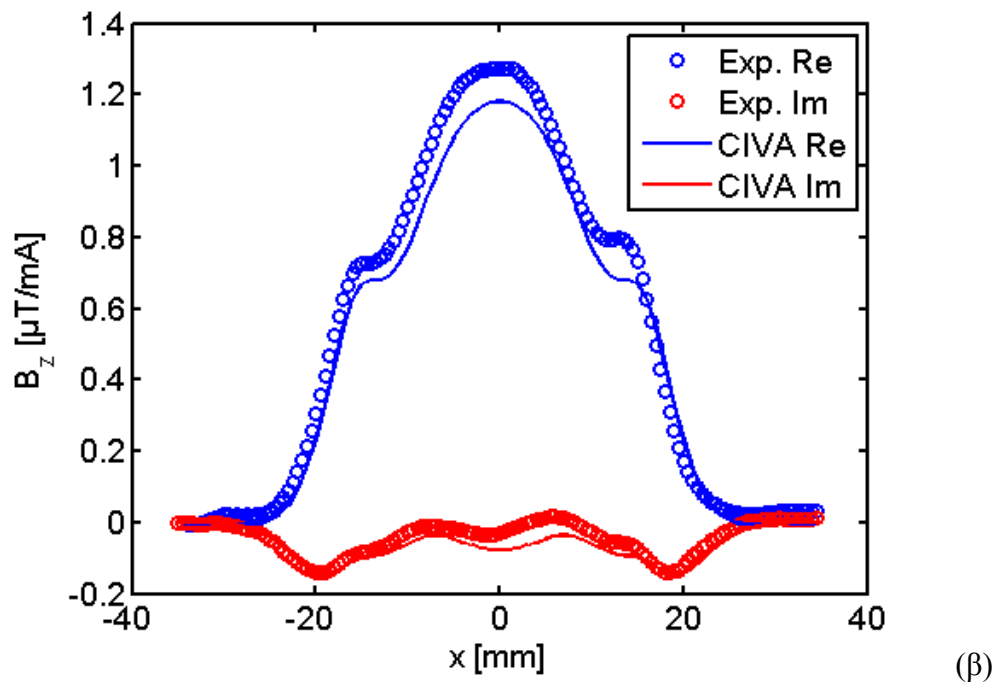
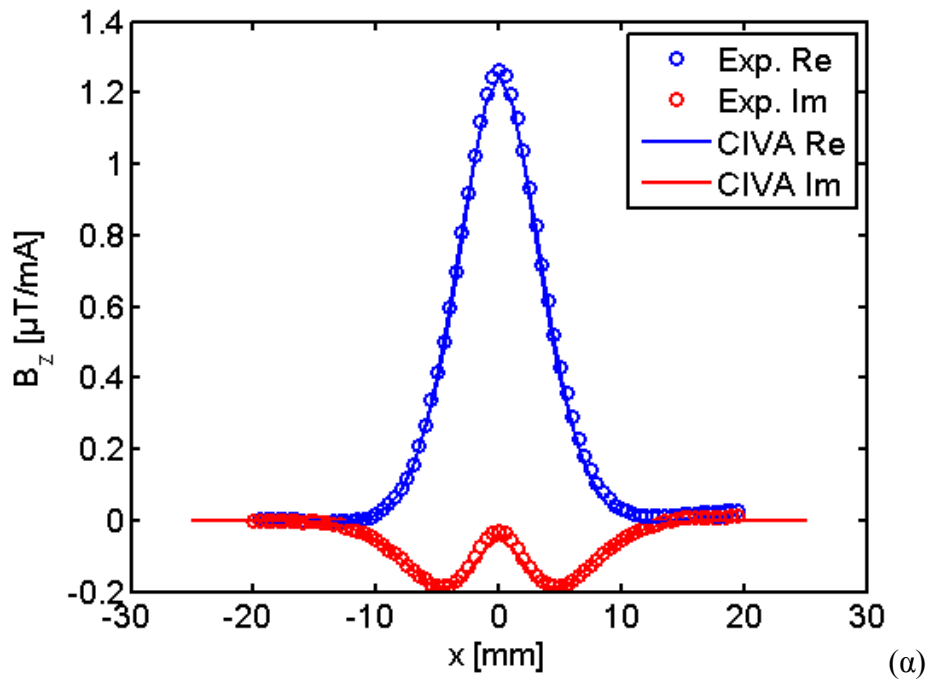
(α)



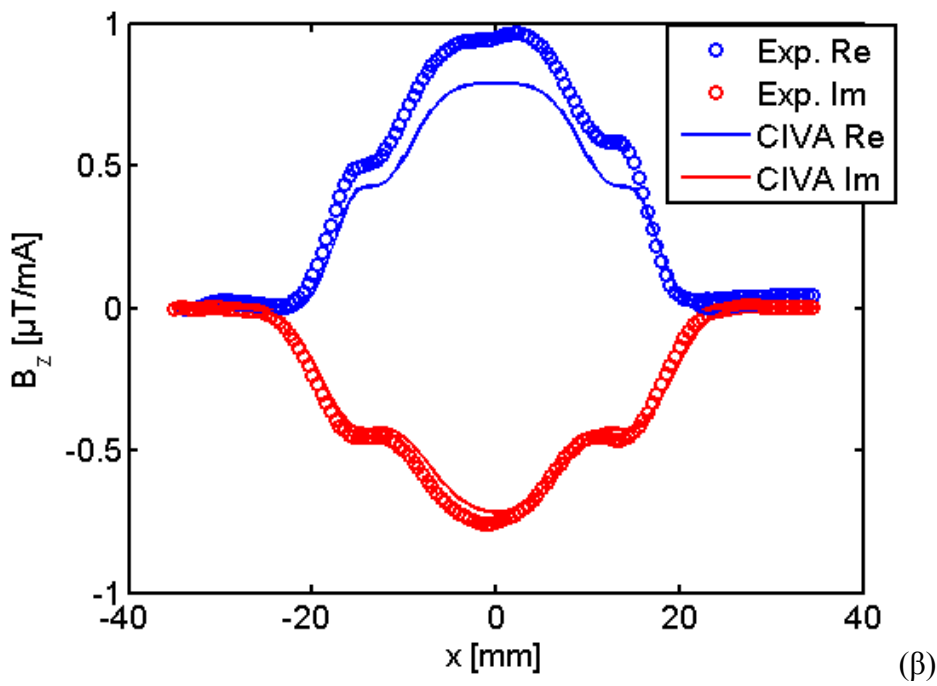
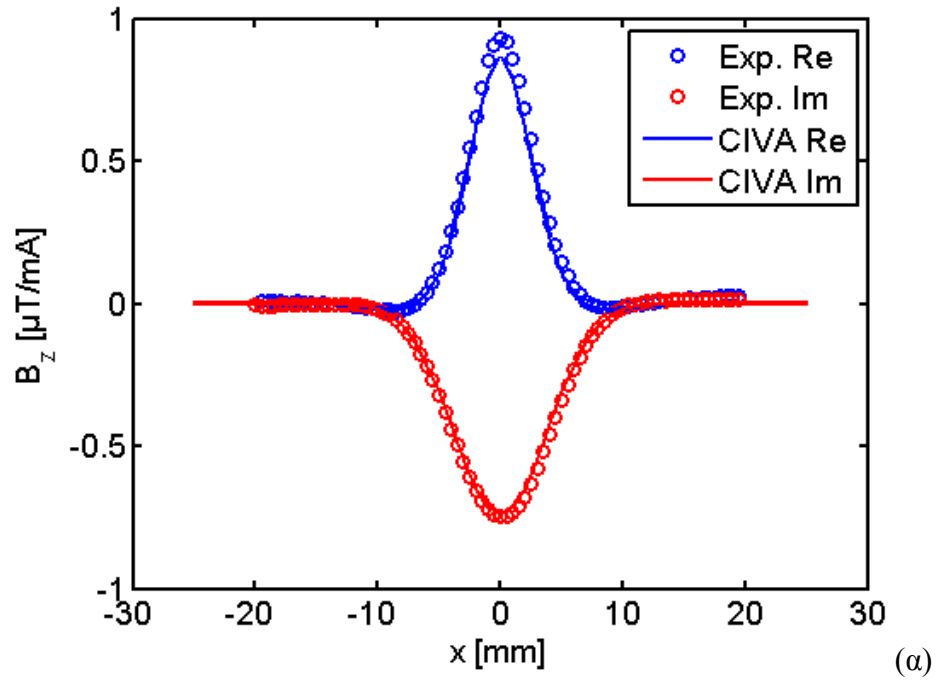
(β)

Εικόνα 7.3.14. Σάρωση στην πλάκα VMT5N (υπό-επιφανειακή ρωγμή) (α) κάτοψη και (β) τρισδιάστατη απεικόνιση.

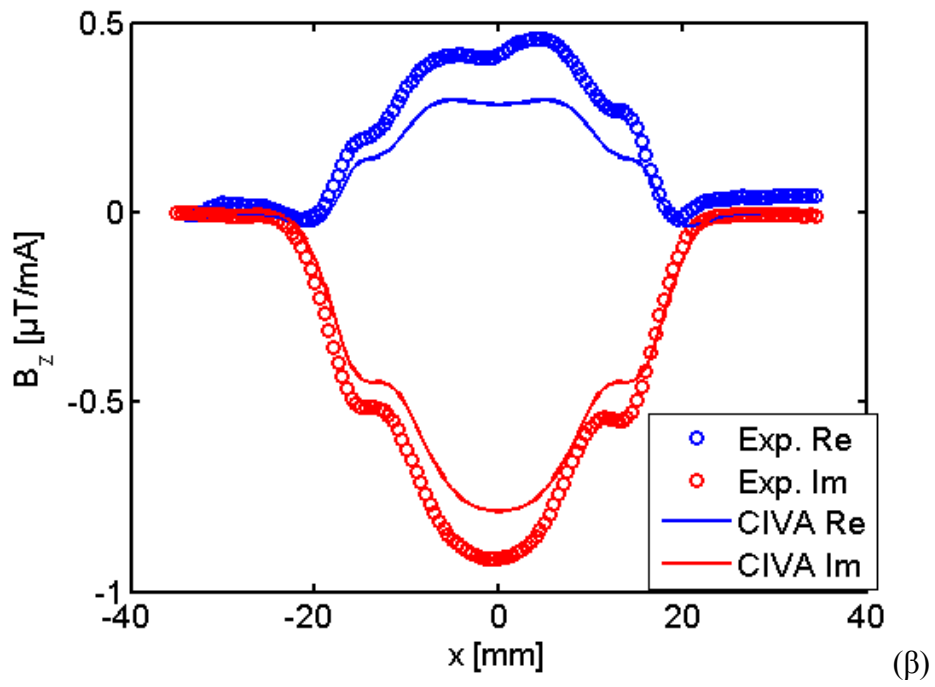
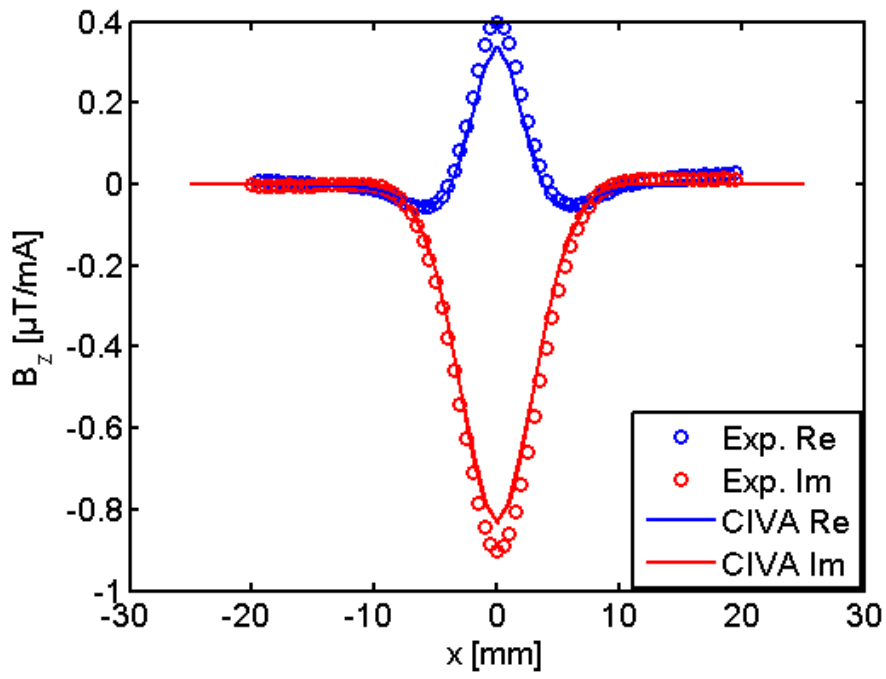
Τα αποτελέσματα των σαρώσεων (εγκάρσια και κατά μήκος) για τις τρεις συχνότητες (1025Hz, 1975Hz, 3025Hz) στην πλάκα VMT5N (υπό-επιφανειακή ρωγμή) δίνονται στις Εικ.7.3.15-Εικ.7.3.17. Όπως παρατηρείται στις ακόλουθες εικόνες το σήμα στην πλάκα VMT5N με υπό-επιφανειακή ρωγμή δίνει τελείως διαφορετική απεικόνιση σήματος σε σχέση με την περίπτωση της επιφανειακής ρωγμής. Η διαφορά οφείλεται στην απόσταση της ρωγμής από την κεφαλή μέτρησης λόγω του βάθους της ρωγμής καθώς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι ίδια. Παρατηρείται, επίσης, αισθητή μείωση της έντασης του σήματος σε σχέση με την επιφανειακή ρωγμή. Για το ίδιο πάχος πλάκας (VMT5N, πάχος πλάκας 5mm) το σήμα από την επιφανειακή ρωγμή ήταν πιο ισχυρό ενώ στην περίπτωση της ίδιας πλάκας (VMT5N, πλάκα πάχους 5mm ίδια με προηγούμενος απλώς έχει αντιστραφεί) με υπό-επιφανειακή ρωγμή η ένταση του σήματος εξασθενεί το οποίο είναι και αναμενόμενο.



Εικόνα 7.3.15. Σάρωση πλάκας VMT5N (υπό-επιφανειακή ρωγμή) στη συχνότητα 1025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.



Εικόνα 7.3.16. Σάρωση πλάκας VMT5N (υπό-επιφανειακή ρωγμή) στη συχνότητα 1975Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.

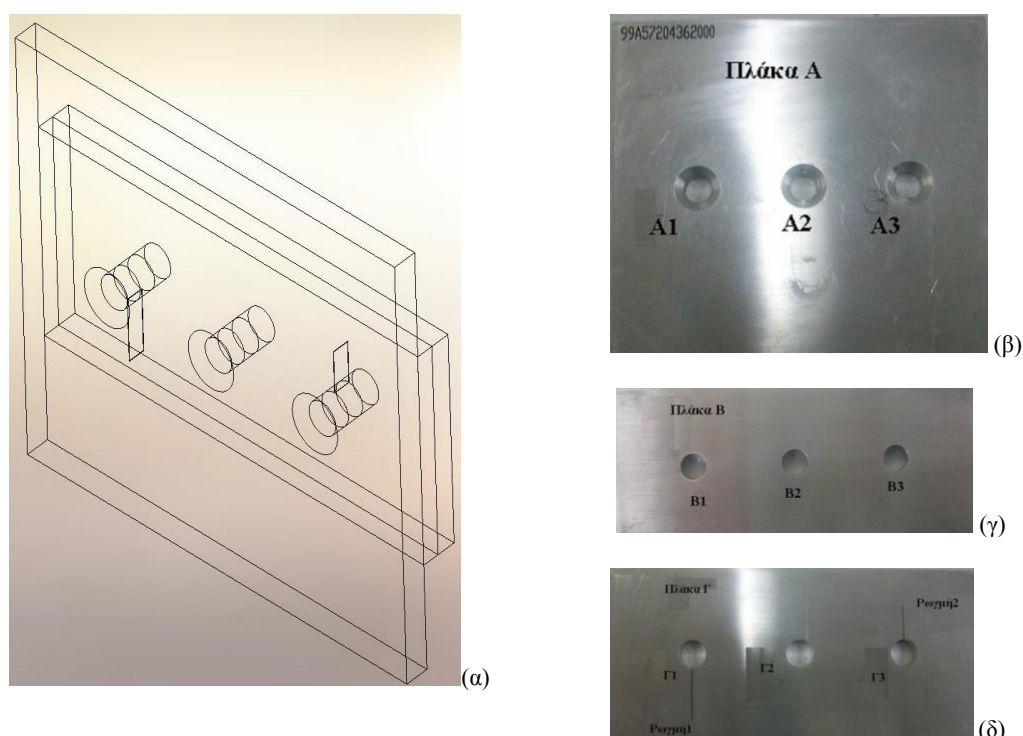


Εικόνα 7.3.17. Σάρωση πλάκας VMT5N (υπό-επιφανειακή ρωγμή) στη συχνότητα 3025Hz (α) εγκάρσια και (β) διαμήκης σάρωση.



#### 7.4.Χρήση μαγνητικού αισθητήρα Hall για την επιθεώρηση πραγματικού δοκιμίου

Μετά τη διερεύνηση σε πρότυπες εργαστηριακές πλάκες με τεχνητές ρωγμές κρίθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί η συμπεριφορά του αισθητήρα Hall τοποθετημένου μέσα σε κυκλικό πηνίο για ανίχνευση ρωγμών σε πραγματικό δοκίμιο. Για τη διερεύνηση επιλέχτηκε μικρό πολυστρωματικό αλουμινένιο τμήμα πτερυγίου αεροπλάνου το οποίο έχει στην περιφέρεια των οπών των ήλων συναρμογής, ρωγμές διαφορετικού μήκους και κατεύθυνσης (Εικ.7.4.1). Το δοκίμιο αυτό αποτελεί πρότυπο δοκίμιο αναφοράς (Reference standard A310) για τους ελέγχους που πραγματοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία και για αυτό αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διατριβής. Στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση που έχει ο ήλος συναρμογής (πιρτσίνι) στο σήμα των ρωγμών (Skorupa et al 2014, Babbar et al 2014).

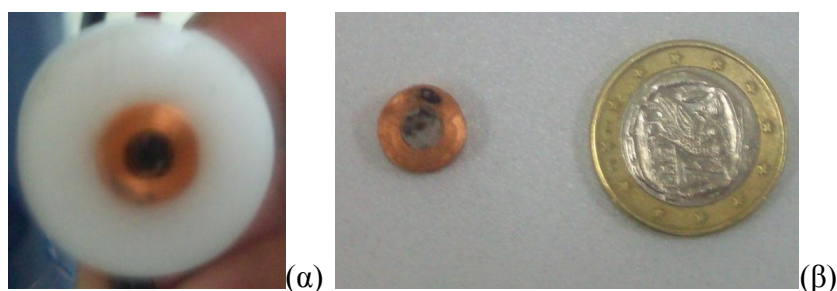


Εικόνα 7.4.1. (α) Σχηματικό διάγραμμα του πραγματικού δοκιμίου και φωτογραφίες από τα τμήματα του (β) πλάκα Α, (γ) πλάκα Β και (δ) πλάκα Γ.

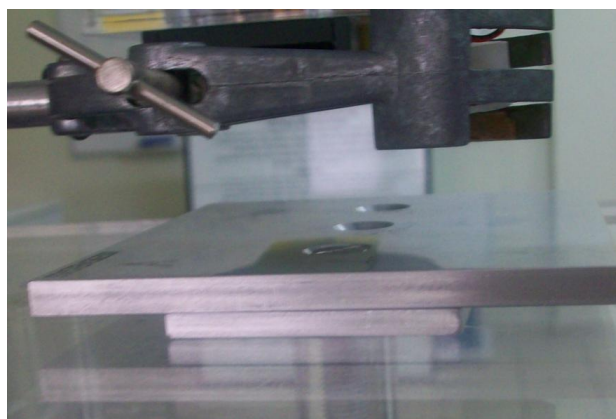
Το πραγματικό δοκίμιο αποτελείται από 3 πλάκες με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μία. Η πλάκα Α 111mm×111mm (Εικ.7.4.1β), η οποία αποτελείται από τρεις κωνικές οπές (Α1, Α2, Α3). Η πλάκα Β 51mm×111mm (Εικ.7.4.1γ), η οποία αποτελείται από τρεις οπές (Β1, Β2, Β3) χωρίς ρωγμή και η πλάκα Γ 51mm×111mm (Εικ.7.4.1δ), η οποία αποτελείται από τρεις οπές (Γ1, Γ2, Γ3), όπου στις 2 οπές υπάρχει και η παρουσία ρωγμών διαφορετικών διαστάσεων και κατευθύνσεων (Ρωγμή 1, 14.2mm και Ρωγμή 2, 9.2mm). Η αγωγιμότητα των τριών πλακών είναι ίση με 17MS/m και μετρήθηκε με το όργανο Phasec2d.

Ο αισθητήρας Hall που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ίδιος με τις άλλες μετρήσεις (UGN3507 της εταιρείας Allegro, με ευαισθησία 2.5mV/G, σελ.5).

Το πηνίο C5 (Εικ.7.4.2), χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της κεφαλής (πηνίο και αισθητήρας Hall τοποθετημένος στη μέση του πηνίου), με εξωτερική διάμετρο 10mm, εσωτερική διάμετρο 5mm, ύψος 3mm και 823 αριθμό σπειρών (N).

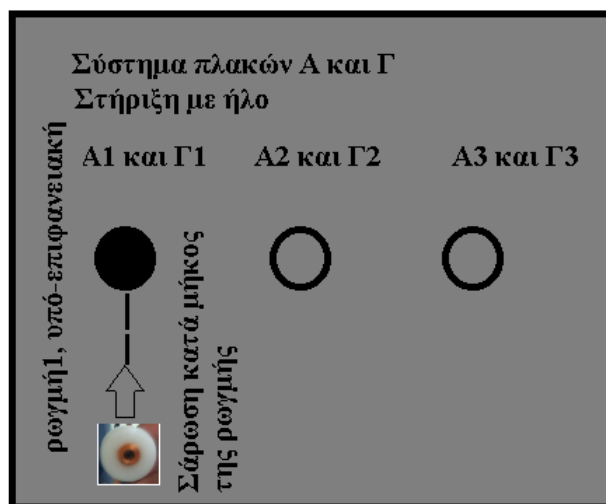


Εικόνα 7.4.2. (α) Η κεφαλή μέτρησης (πηνίο και αισθητήρας Hall) και (β) το πηνίο C5.



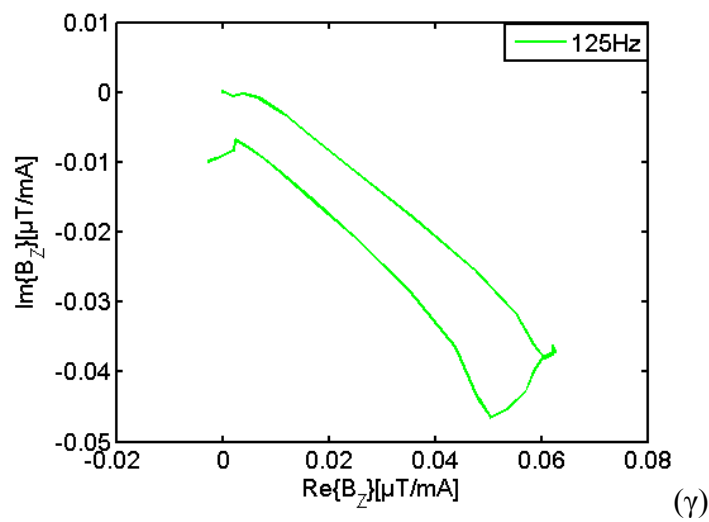
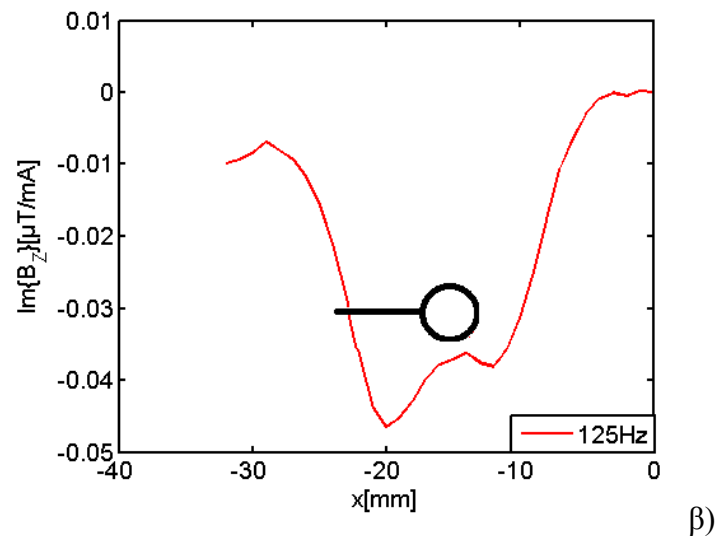
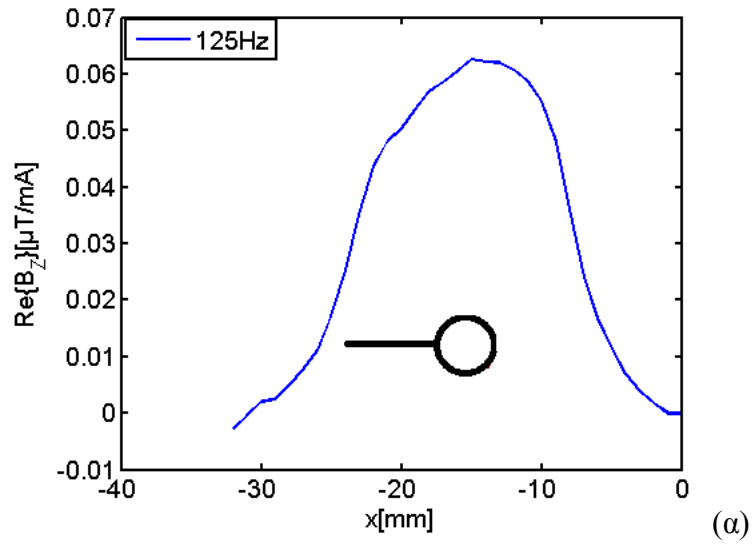
Εικόνα 7.4.3. Το πείραμα στο πραγματικό δοκίμιο (πλάκα A και Γ).

Δημιουργήθηκε ένα σύστημα πλακών με την πλάκα Γ (με τις οπές και τις ρωγμές) να αποτελεί τη βάση και στη συνέχεια πάνω από την πλάκα Γ τοποθετήθηκε η πλάκα A ώστε να είναι ευθυγραμμισμένες, δημιουργώντας υπό-επιφανειακή ρωγμή. Η οπή Γ1 (οπή πλάκας Γ) και η οπή A1 (οπή πλάκας A) συνδέονται με ήλο συναρμογής για να είναι σταθερό το σύστημα πλακών. (Σημειώνεται ότι οι οπές όλων των πλακών είναι διαμέτρου 8mm). Η σάρωση έγινε κατά μήκος της οπής και της υπό-επιφανειακής ρωγμής οι οποίες συνδέονται με τον ήλο συναρμογής, όπως φαίνεται και στην Εικ.7.4.4 σε συνολική απόσταση 32mm (ώστε να καλύπτει πλήρως την περιοχή που μας ενδιαφέρει και να μην επηρεαστεί το σήμα από το φαινόμενο άκρου καθώς το πραγματικό δοκίμιο έχει μικρές διαστάσεις).



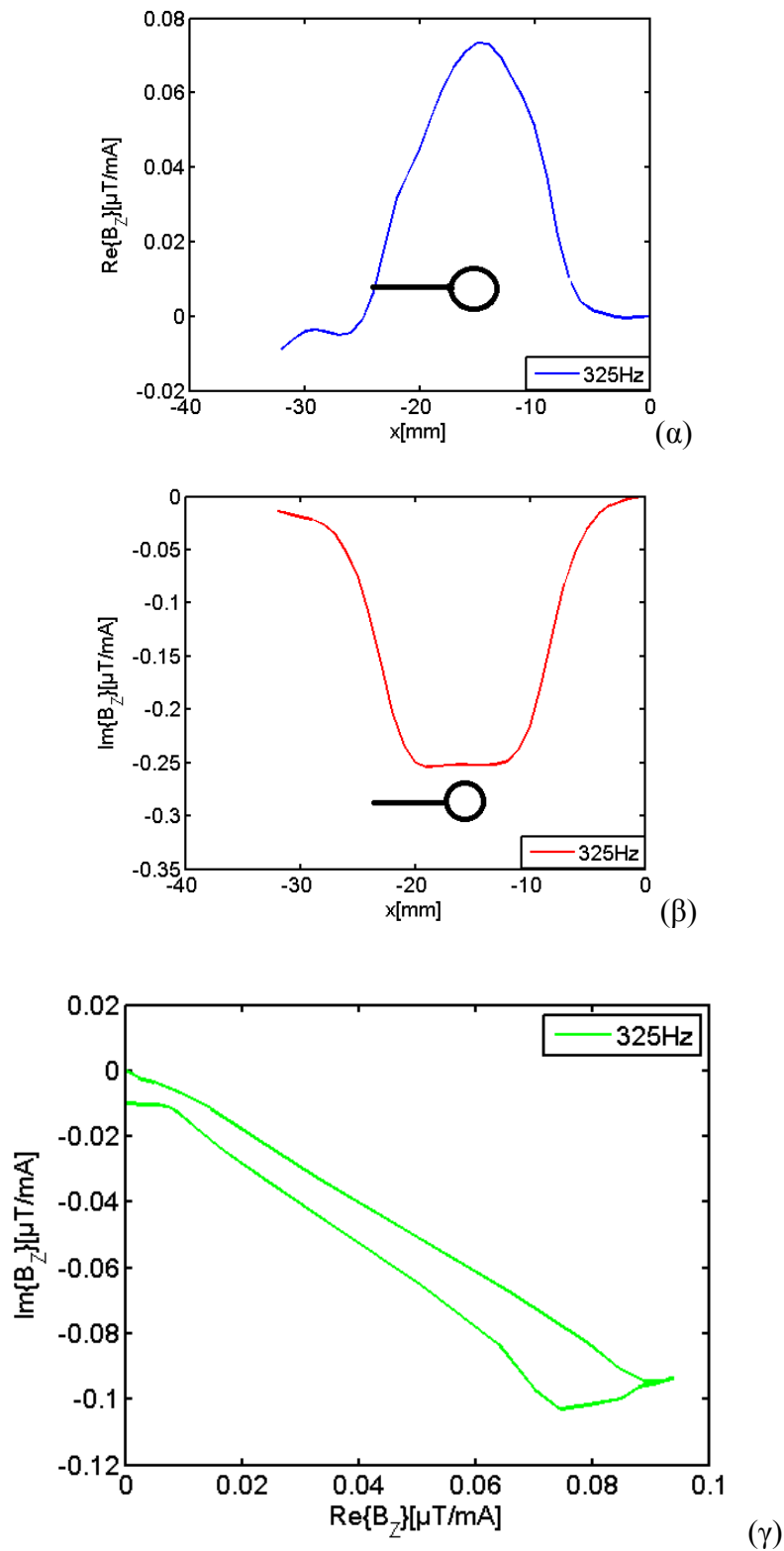
Εικόνα 7.4.4. Σάρωση στο πραγματικό δοκίμιο πλάκα Α και Γ με ήλο συναρμογής κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη σάρωση κατά μήκος των οπών Α1 και Γ1 (Εικ.7.4.4) με την υπό-επιφανειακή ρωγμή σε τρεις συχνότητες 125Hz, 325Hz και 1025Hz. Οι πλάκες έχουν συνολικό πάχος 11mm (πλάκα Α πάχος 6.5mm και πλάκα Γ πάχος 4.5mm) και το αντίστοιχο βάθος διείσδυσης στις τρεις συχνότητες είναι περίπου 11mm, 7mm και 4mm περίπου. Επομένως, η συχνότητα που βοηθά περισσότερο την κατανομή των δινορρευμάτων σε βάθος 11mm είναι η συχνότητα των 125Hz. Στις Εικ.7.4.5-7.4.7 παρατηρείται το αναμενόμενο ότι όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα τόσο καλύτερα διακρίνεται η παρουσία της υπό-επιφανειακής ρωγμής. Το σήμα της υπό-επιφανειακής ρωγμής υποδηλώνεται με το άνοιγμα του λοβού. Εάν δεν υπήρχε ρωγμή, το σήμα από την παρουσία της οπής θα ήταν ένα στενό και κλειστό συμμετρικό σήμα. Το άνοιγμα του λοβού στο μιγαδικό σήμα είναι πιο ανοιχτό στη συχνότητα 125Hz και στη συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα (στη συχνότητα των 1025Hz δεν είναι καθόλου διακριτή η παρουσία της ρωγμής).

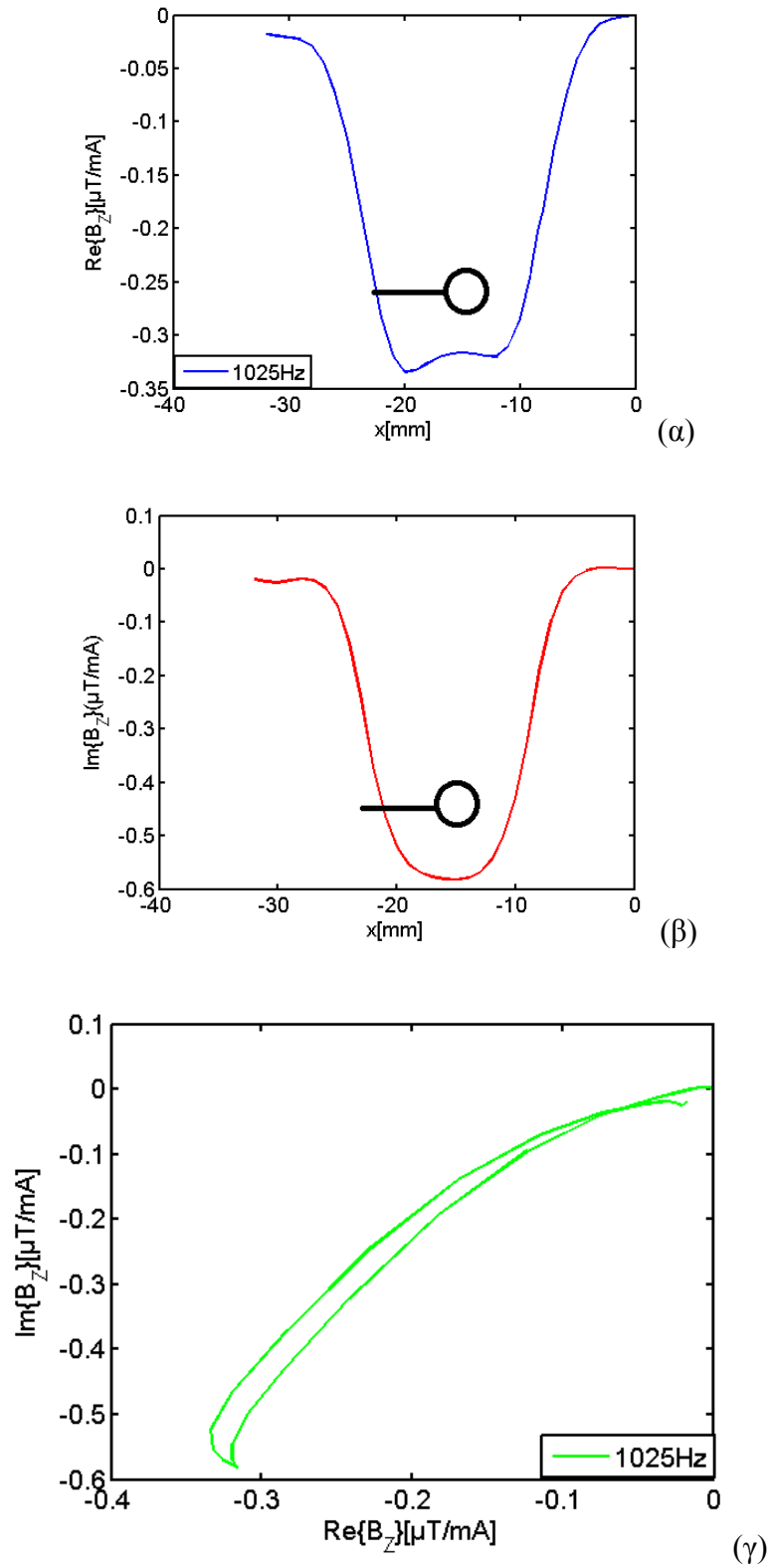


Εικόνα 7.4.5. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 125Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, με ήλο).

Σημειώνεται ότι πάνω στις εικόνες (του Κεφ.7.4) απεικονίζεται η ρωγμή (μήκους 14.2mm) και η οπή (διαμέτρου 8mm) όπως συναντώνται κατά τη σάρωση.



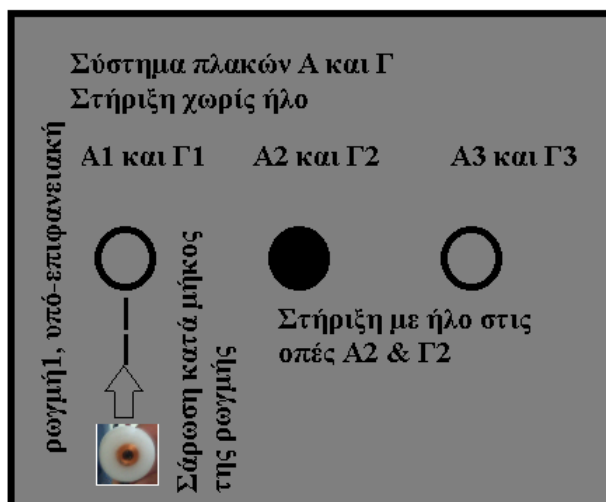
Εικόνα 7.4.6. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 325Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, με ήλο).



Εικόνα 7.4.7. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 1025Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, με ήλο).

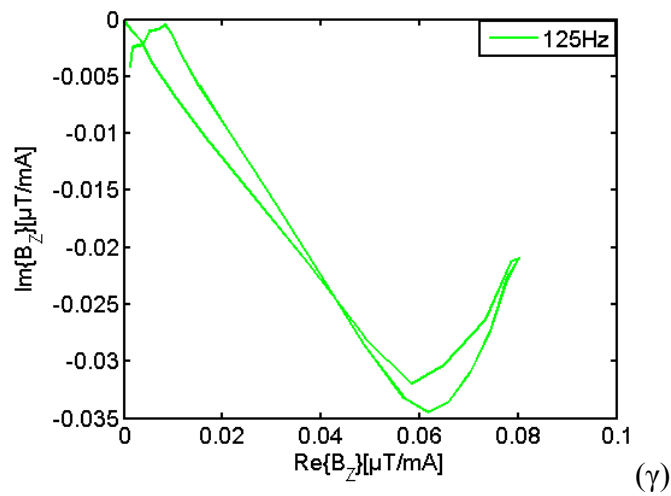
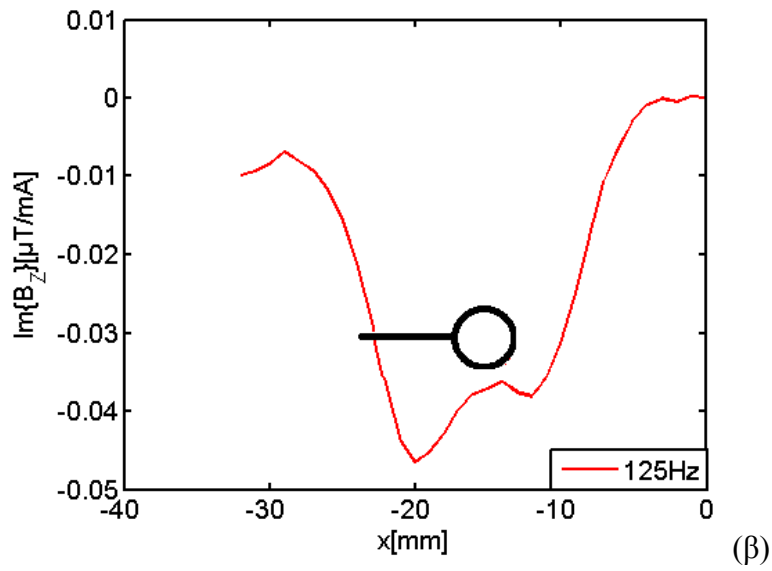
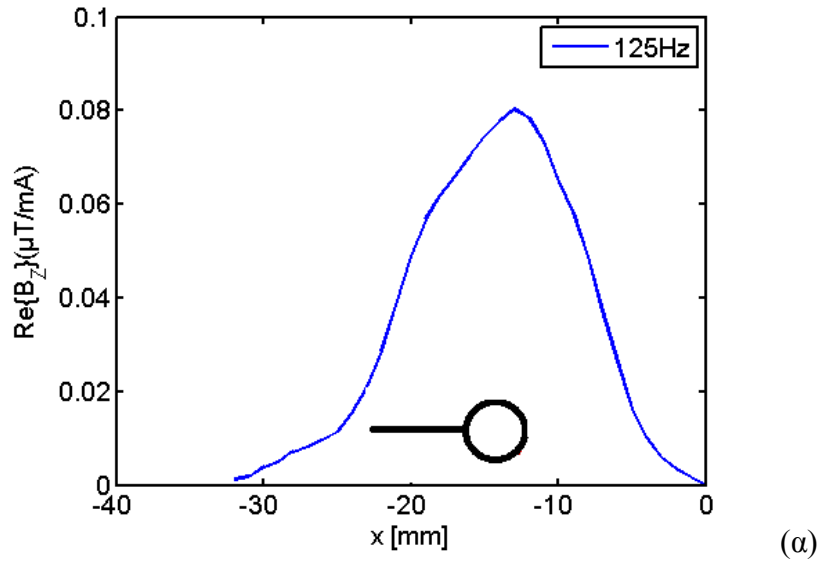
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην ίδια διάταξη και στις ίδιες συχνότητες με τη διαφορά ότι δεν υπήρχε ο ήλος στις οπές που γινόταν η σάρωση. Οι

πλάκες ήταν σταθερές κατά τη διάρκεια της σάρωσης καθώς τις συγκρατούσε ήλος συναρμογής, τοποθετημένος στις οπές A2 και Γ2, όπως φαίνεται και στην Εικ.7.4.8.



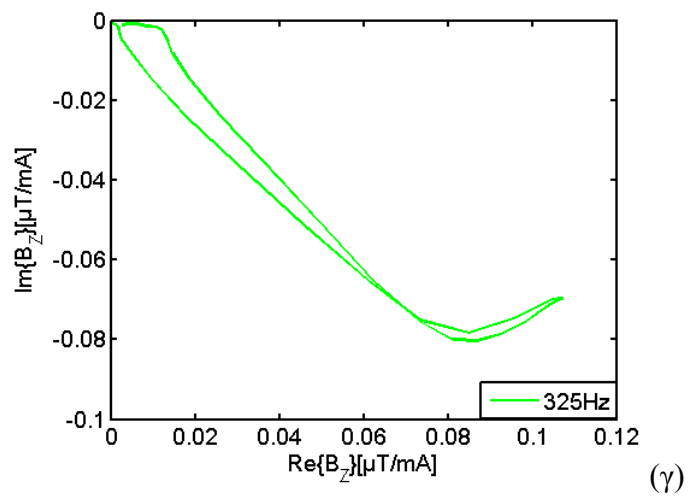
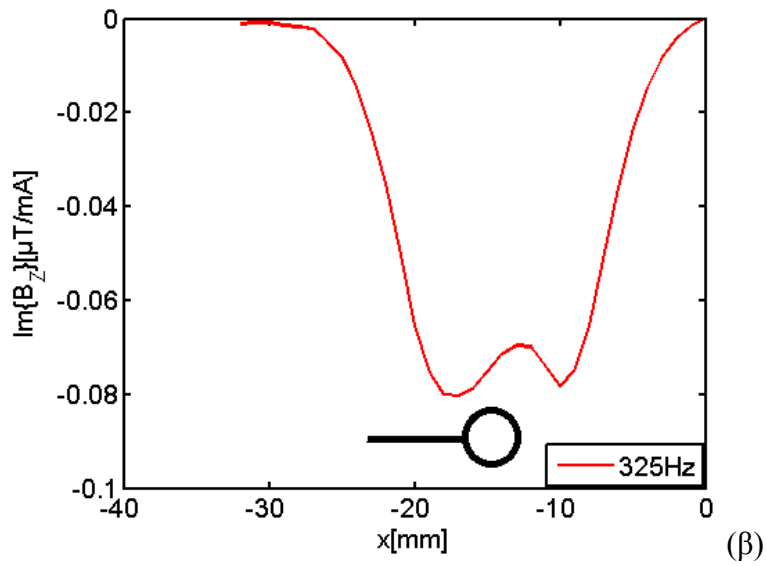
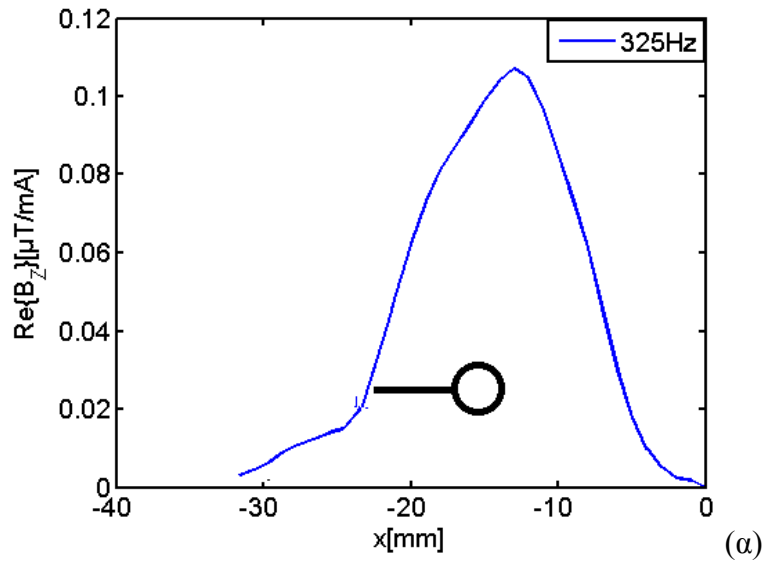
Εικόνα 7.4.8. Σάρωση στο πραγματικό δοκίμιο πλάκα Α και Γ χωρίς ήλο συναρμογής κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής.

Οι Εικ.7.4.9-7.4.11. δείχνουν ότι το σήμα που προκύπτει είναι τελείως διαφορετικό από τις αντίστοιχες προηγούμενες μετρήσεις. Επομένως ο ήλος ενισχύει την παρουσία της υπό-επιφανειακής ρωγμής. Η σάρωση στη συχνότητα 1025Hz και στην περίπτωση αυτή (χωρίς ήλο στην περιοχή της σάρωσης) δεν ανιχνεύει καθόλου την υπό-επιφανειακή ρωγμή. Επομένως η περίπτωση ανίχνευσης της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε μεγάλη συχνότητα (1025Hz) με και χωρίς ήλο έδωσε το ίδιο αποτέλεσμα (δεν μπορεί να ανιχνευτεί ρωγμή). Οι συχνότητες που έδωσαν διαφορετικό αποτέλεσμα στην ανίχνευση υπό-επιφανειακής ρωγμής είναι οι χαμηλές συχνότητες (325Hz και 125Hz) και κυρίως η συχνότητα των 125Hz. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν δύο συνιστώσες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα του σήματος, η επίδραση από το μέγεθος του πηνίου (το πηνίο έχει μικρή διάμετρο σε σχέση με τη διάμετρο των οπών) και η επίδραση από την ίδια τη ρωγμή

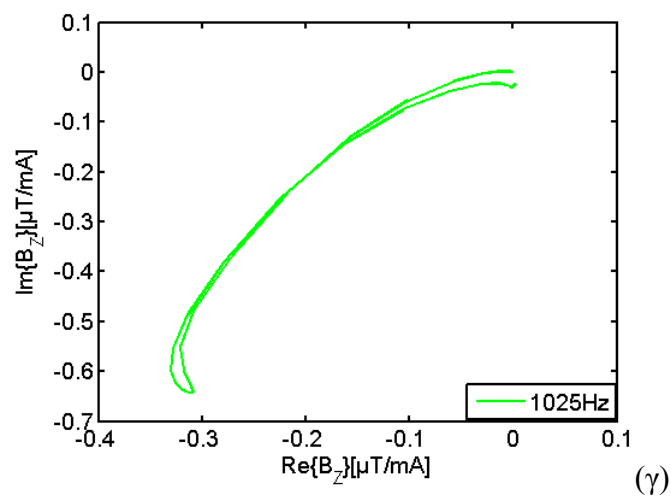
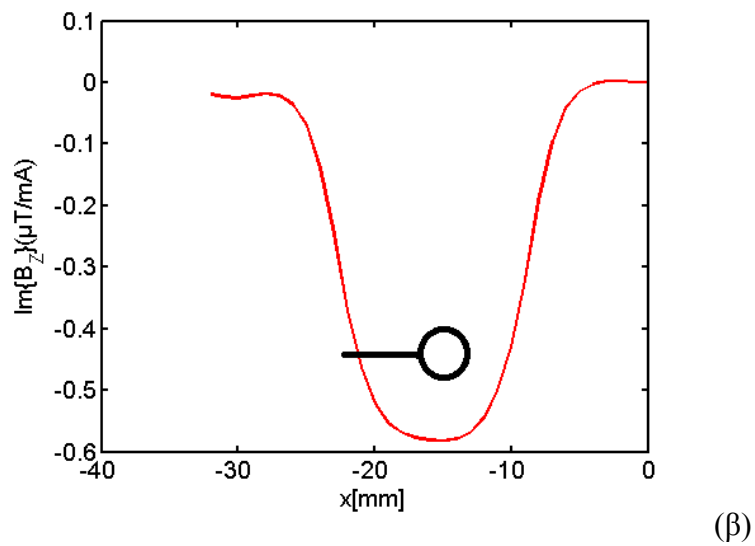
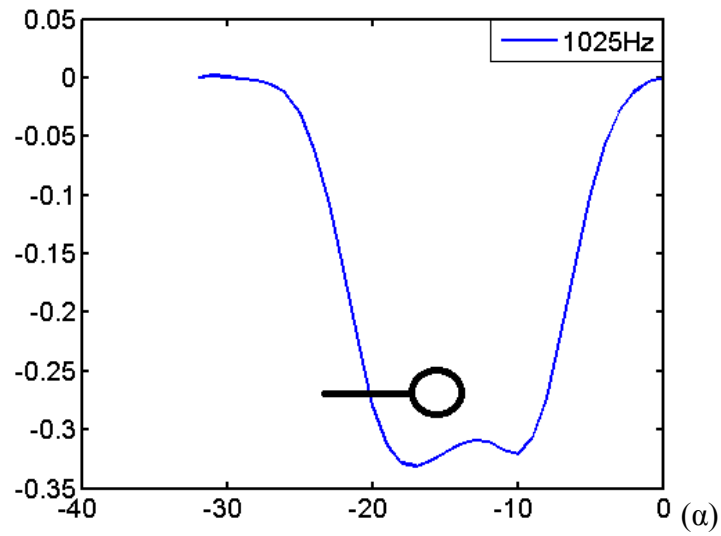


Εικόνα 7.4.9. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 125Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, χωρίς ήλο).





Εικόνα 7.4.10. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 325Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, χωρίς ήλο).



Εικόνα 7.4.11. (α) Πραγματικό μέρος μαγνητικού πεδίου, (β) φανταστικό μέρος μαγνητικού πεδίου και (γ) σήμα στο μιγαδικό επίπεδο. Σάρωση κατά μήκος της υπό-επιφανειακής ρωγμής σε συχνότητα 1025Hz, πραγματικό δοκίμιο (σάρωση κατά μήκος οπής 1, χωρίς ήλο).

#### 7.4.Βιβλιογραφικές αναφορές

Allegro Microsystems UGN3507, Joe Gilbert and Ray Dewey, “Linear Hall-Effect Sensor ICs”, Allegro MicroSystems, LLC, [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com), 2013.

Agilent 4284A/4285A, Precision LCR Meter Family, Technical Overview, 2004.

Babbar V.K., Underhill P.R., Scott C. and Krause T.W., “Finite Element Modeling of Second Layer Crack Detection in Aircraft Bolt Holes with Ferrous Fasteners Present”, NDT&E International, vol.65, pp.64-71, 2014.

Eddy Current Probes & Accessories, Catalogue 2000-2001, <http://www.testima.eu/prilohy/75/Probe%20Catalogue2000.pdf>

Hall B.D., “Propagating Uncertainty in Instrumentation Systems”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.54, no.6, pp.2376-2380, 2005.

Lee K.B. and Schneeman R.D., “Internet-based distributed measurement and control applications”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.2, no.2, pp.23-77, 1999.

Lita I., Visan D. and Teodorescu M.R., “Data acquisition system for noise measurement on magnetic sensors”, 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE Conference Publications, pp.258-262, Romania, 2001.

Mueller J. and Oblad R., “Architecture drives test system standards”, IEEE Spectrum, vol.37, no.9, pp.68-73, 2000.

National Instruments, Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals, White Papers, [www.ni.com/white-paper/3344/en/](http://www.ni.com/white-paper/3344/en/), 2014.

NI PXI-1033 User Manual, National Instruments, February 2011.

PXI National Instruments, “What Is PXI?”, <http://www.ni.com/pxi/whatis/>, 2014.

Skorupa H.A., Skorupa M., Machniewicz T. and Korbel A., “Fatigue Crack Location and Fatigue Life for Riveted Lap Joints in Aircraft Fuselage”, International Journal of Fatigue, vol. 58, pp.209–217, 2014.

Starkloff E., Fountain T. and Black G., “The PXI Modular Instrumentation Architecture”, ITC International Test Conference, pp.156-165, 2003.

Theodoulidis. T. and Kotouzas M., “Eddy current Testing Simulation on a Personal Computer”, Proceedings on 15th WCNDT, Roma, 2000.

Καλοβρέκτης Κ.Π., LABVIEW για Μηχανικούς Προγραμματισμός Συστημάτων DAQ, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, σελ.170-180, 2007.

## ΚΕΦ.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο βασικός στόχος της διατριβής όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή ήταν η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση του μαγνητομέτρου SQUID με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του σε σχέση με τον εντοπισμό σφαλμάτων σε μεταλλικά δοκίμια παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία (εφαρμογή ΜΚΕ).

Μέσα από την μελέτη επιβεβαιώθηκαν τα πλεονεκτήματα του SQUID σε σχέση με τη χρήση συμβατικών τεχνικών της μεθόδου των δινορρευμάτων καθώς η ισχυρά γραμμική συμπεριφορά του, η υψηλή χωρική του διακριτική ικανότητα και η υψηλή ευαισθησία σε όλη την κλίμακα συχνοτήτων το καθιστά ικανό για ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ασυνεχειών σε πλάκες αλουμινίου. Το σύστημα SQUID όμως έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως η απαίτηση για συχνή τροφοδοσία με άζωτο για τη διατήρηση της υπεραγώγιμης κατάστασής του, καθώς και η μεγάλη ευαισθησία του (η οποία αποτελεί συγχρόνως και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του), λόγω της οποίας το μαγνητόμετρο έρχεται εύκολα σε κορεσμό σε περιπτώσεις περιβάλλοντος με πολύ ισχυρές πηγές H/M πεδίου ή πολύ γρήγορων (διακοπτικών) διακυμάνσεων.

Το πρόβλημα της καταστολής του περιβάλλοντος θορύβου και, κατ'επέκταση, της αύξησης της ευαισθησίας του SQUID αντιμετωπίστηκε με τη χρήση του διπλού μαγνητομέτρου ή βαθμιδόμετρου SQUID. Με την εισαγωγή του βαθμιδόμετρου επιτεύχθηκε (α) η απόρριψη του περιβάλλοντος θορύβου, δηλαδή, των H/M πεδίων από μακρινές πηγές, όπως αναπτύχθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο και (β) η μείωση της απόστασης αισθητήρα - δοκιμίου από περίπου 37 σε 13mm. Το αποτέλεσμα είναι τεράστια (>100 φορές) ενίσχυση του λόγου σήματος/θόρυβο και βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας ιδιαίτερα στην ανίχνευση υπό-επιφανειακών ασυνεχειών.

Επιπλέον παρατηρήθηκε τόσο στα πειράματα όσο και στην προσομοίωση ότι οι υψηλές συχνότητες βελτιώνουν την ευαισθησία του συστήματος αλλά παράλληλα περιορίζουν την ροή των δινορρευμάτων σε μεγάλο βάθος με αποτέλεσμα να περιορίζουν και την ικανότητα εντοπισμού υπό-επιφανειακών ρωγμών. Προβλήματα με τη χρήση του SQUID προκύπτουν, επίσης, στις περιπτώσεις ανίχνευσης ρωγμών, κοντά σε ακμές οι οποίες, εν γένει, είναι πηγές ισχυρού σήματος (edge effect). Όσο πιο οξείες είναι οι ακμές ή οι ασυνέχειες σε μια μεταλλική επιφάνεια σάρωσης τόσο πιθανότερο είναι να φέρουν σε κορεσμό το SQUID. Ο λόγος είναι ότι στις οξείες ακμές (ιδιαίτερα δε σε ακίδες), λόγω του περιορισμένου χώρου ανάπτυξης των δινορρευμάτων (confinement effect) υπάρχει μεγάλη αύξηση της πυκνότητάς τους και, κατ'επέκταση, του πεδίου που δημιουργούν.

Η διεξαγωγή της μελέτης στηρίχτηκε στη συνεχή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε τόσο θεωρητικά με το λογισμικό προσομοίωσης CIVA όσο και εργαστηριακά όπου συγκρίνονταν τα θεωρητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η συμβολή του CIVA ήταν καθοριστική στην διερεύνηση που διεξήχθη στο εργαστήριο καθώς αποτέλεσε οδηγό για την ορθή διεκπεραίωση των πειραμάτων έχοντας κατάλληλες συνθήκες όπως η βέλτιστη απόσταση του μαγνητομέτρου από τα υπό-εξέταση δοκίμια, επιλογή βέλτιστης συχνότητας και βέλτιστου πηνίου.

Από τα πρώτα κιάλας πειράματα έγινε διερεύνηση για την εύρεση των σωστών διαστάσεων του πηνίου διέγερσης για τη βελτιστοποίηση του ελέγχου. Διαπιστώθηκε ότι η αλλαγή των διαστάσεων του πηνίου επηρεάζει το σήμα που προκύπτει από την ελεγχόμενη πλάκα αλουμινίου. Συγκεκριμένα, η διάμετρος του πηνίου πρέπει να είναι ανάλογη των διαστάσεων των ασυνεχειών της υπό-εξέταση πλάκας. Για το λόγο αυτό παρατηρήθηκε ότι στον έλεγχο της πλάκας VMT8N με ρωγμή διαστάσεων περίπου 30mm η διάμετρος του πηνίου διέγερσης ήταν 30mm και έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Στη συνέχεια όμως στην ανίχνευση των πλακών VMT1N και VMT2N στις οποίες οι διαστάσεις των ρωγμών ήταν περίπου 10mm και υπήρχε και η παρουσία οπής η διάμετρος του πηνίου έπρεπε να μειωθεί σε 20mm. Οι βέλτιστες αυτές τιμές που προέκυψαν στο λογισμικό προσομοίωσης επιβεβαιώθηκαν και εργαστηριακά. Επιπλέον, έγιναν διερευνήσεις για σάρωση με πηνία παρόμοιων διαστάσεων αλλά διαφορετικών σχημάτων (ορθογωνικό, κυκλικό, τύπου D) και διαπιστώθηκε ότι το διαφορετικό σχήμα δεν επηρεάζει τη μορφή και το πλάτος του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου.

Η διερεύνηση της συχνότητας ήταν επίσης καθοριστική καθώς αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε πρώτα στο λογισμικό προσομοίωσης CIVA και στη συνέχεια τα αποτελέσματα επιβεβαιωνόταν στο εργαστήριο. Οι βέλτιστες και πιο αντιπροσωπευτικές συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ήταν μια χαμηλή συχνότητα της τάξης των 300 – 400 Hz (στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε συχνότητα 375Hz για να αποφύγουμε τις αρμονικές στα 350Hz και 400Hz της ηλεκτρικής εγκατάστασης του εργαστηρίου και των τροφοδοτικών των ηλεκτρικών συσκευών που χρειαζόταν να χρησιμοποιούνται) και μία υψηλή συχνότητα της τάξης των 1500 – 1800Hz (χρησιμοποιήθηκαν για την ακρίβεια 1575Hz).

Το CIVA αποτέλεσε τον οδηγό για τη βελτίωση των παραμέτρων του πειράματος καθώς διαπιστώθηκε ότι η μείωση της απόστασης ανάμεσα στον αισθητήρα και το υπό-εξέταση δοκίμιο είναι καθοριστική. Το μαγνητόμετρο και το βαθμιδόμετρο SQUID, λόγω της πάχους των τοιχωμάτων των δοχείων dewar στα οποία περιείχοντο, είχαν κατασκευαστικά όρια όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορούσαμε να πλησιάσουμε τον αισθητήρα SQUID στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η χρήση του βαθμιδόμετρου κατάφερε να μειώσει πολύ την απόσταση αυτή (13.5mm) και να βελτιωθούν σημαντικά τα εργαστηριακά αποτελέσματα.

Η διερεύνηση στο CIVA συνεχίστηκε και οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι η διαφορετική τοποθέτηση των ρωγμών (επιφανειακές ή υπό-επιφανειακές ρωγμές στην ίδια ή διαφορετική πλευρά) δίνει και διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία πρέπει να αποτελούν οδηγό για την ακριβή «επεξήγηση των σημάτων». Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα ήταν ότι η ένταση του σήματος μιας ρωγμής, δίπλα σε οπή ενισχύεται σημαντικά σε σχέση με το σήμα μιας απλής απομονωμένης ρωγμής πανομοιότυπου σχήματος, διαστάσεων και βάθους. Φαίνεται, δηλαδή, πως η ύπαρξη της οπής, λόγω των οξείων ακμών της οι οποίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιορίζουν χωρικά τα δινορρέυματα και αυξάνουν την πυκνότητά τους, λειτουργεί σαν 'μαγνητικός φακός' ενισχύοντας έτσι και το σήμα μιας παρακείμενης σχισμής. Το πειραματικό και, στη συνέχεια, θεωρητικά προκύπτουν αυτό αποτέλεσμα έχει ιδιαίτερη αξία σε σχέση με μια βασική εφαρμογή των σύγχρονων μη-καταστροφικών ελέγχων με δινορρέυματα, την ανιχνευσιμότητα ρωγμών σε οπές ήλων συναρμογής αεροπλάνων.

Εκτός από το SQUID, με τη μέγιστη ευαισθησία, επελέγη να αξιολογηθεί και η συμπεριφορά άλλων, περισσότερο κοινών αισθητήρων. Συγκεκριμένα, επελέγη ο μαγνητικός αισθητήρας Hall ο οποίος παρουσιάζει τη χαμηλότερη απόδοση στο εύρος ευαισθησίας των μαγνητικών αισθητήρων. Υπήρχε πρόθεση να γίνουν πειράματα και με το μαγνητικό αισθητήρα GMR. Ο λόγος που δεν πραγματοποιήθηκαν ήταν ότι η ευαισθησία που προσφέρει ένας αισθητήρας GMR δεν είναι ουσιαστικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με έναν αισθητήρα Hall (π.χ., ~ 20 mV/G του αισθητήρα GMR μοντέλο AA002, NVE corp. σε σχέση με τα ~ 3 mV/G του αισθητήρα Hall). Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του αισθητήρα Hall είναι ότι είναι γραμμικός στην πλήρη κλίμακα εισόδου του (~ ±70mT), με την έννοια ότι η τάση εξόδου του ακολουθεί την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου. Αντιθέτως, ο αισθητήρας GMR παρουσιάζει μονοπολική συμπεριφορά, δηλαδή, διατηρεί το ίδιο θετικό σημείο τάσης εξόδου ανεξάρτητα από την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου. Για την αντιμετώπιση αυτής της ιδιαιτερότητας, απαιτείται ένα σχετικά πιο σύνθετο σύστημα για την τροφοδοσία του πηνίου και το λογισμικό για τη λήψη της τάσης εξόδου στην περίπτωση του αισθητήρα GMR. Αντιθέτως, ο αισθητήρας GMR πλεονεκτεί ως προς το εύρος συχνοτήτων (bandwidth>1MHz), χαρακτηριστικό όμως που στην περίπτωση της παρούσης ερευνητικής εργασίας δεν έχει πρακτική αξία καθώς η μέγιστη συχνότητα που χρησιμοποιήσαμε, λόγω του μικρού βάθους διείσδυσης των δινορρευμάτων, ήταν 3kHz, αρκετά κάτω από το όριο του εύρους ζώνης των 10kHz του αισθητήρα Hall.

Ο αισθητήρας Hall σε συνδυασμό με τη χρήση κεφαλής (κατάλληλης για ανίχνευση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ασυνεχειών) του βιομηχανικού οργάνου δινορρευμάτων Phasec2d αποτέλεσε το σύστημα για τη σύγκριση μεταξύ του βιομηχανικού οργάνου (Phasec2d) και του συναρμολογούμενου οργάνου PXI που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Η σύγκριση των δύο οργάνων ανέδειξε την ανωτερότητα του οργάνου PXI σε ευαισθησία και διακριτική ικανότητα, η οποία και επιβεβαιώθηκε, επίσης, με την άριστη συμπεριφορά του στη χρήση του με το βαθμιδόμετρο SQUID. Αυτό ήταν ένα πολύ σημαντικό πειραματικό δεδομένο καθώς αποδεικνύει ότι μπορεί να αξιοποιηθεί γενικά χρησιμοποιώντας έναν οποιοδήποτε μαγνητικό αισθητήρα και να αποτελέσει μια πολύ καλή λύση για την κατασκευή φορητών οργάνων μεγάλης ακρίβειας που θα χρησιμοποιούνται στις επιθεωρήσεις με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Ο μόνος περιορισμός των συναρμολογούμενων οργάνων είναι η εξάρτησή τους από την ταχύτητα σάρωσης στην ένταση του σήματος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ορίζεται μια μέγιστη τιμή στην ταχύτητα σάρωσης.

Στη συνέχεια ακολούθησε η σύγκριση μεταξύ του βιομηχανικού οργάνου (Phasec2d) και ενός εργαστηριακού οργάνου ακριβείας του LCR meter. Τα πειράματα έδειξαν ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο οργάνων αλλά όταν το σήμα από την ασυνέχεια είναι πολύ ισχυρό (όπως στην περίπτωση οπής δίπλα σε ρωγμή) το LCR meter υπερτερεί. Αυτό επιβεβαιώνει την πολύ υψηλή απόδοση των εργαστηριακών οργάνων σε σχέση με τα βιομηχανικά και δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στο προηγούμενο επίτευγμα της έρευνας (τη δυνατότητα κατασκευής οργάνων μεγάλης ακρίβειας).

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακριβείας για το Παγκόσμιο Κέντρο Μη Καταστροφικού Ελέγχου, World Federation of NDE Centers (WFNDEC), οι οποίες αποτέλεσαν και το πρότυπο πρόβλημα Benchmark 2014. Έγινε η ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου που περιλαμβάνει αισθητήρα Hall τοποθετημένου μέσα σε

κυκλικό πηνίο με στόχο τον υπολογισμό της κάθετης συνιστώσας  $B_z$  του μαγνητικού πεδίου για ανίχνευση επιφανειακών και μη επιφανειακών ρωγμών. Οι επιφανειακές ρωγμές ήταν διαμπερείς και μη διαμπερείς (έφταναν μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος) ενώ η υπό-επιφανειακή ρωγμή που ανιχνεύτηκε με επιτυχία είναι πάχους 3.85mm και απέχει από την επιφάνεια 1.15mm. Η συμπεριφορά του συστήματος μέτρησης είναι απόλυτα ικανοποιητική καθώς υπάρχει πλήρης σχεδόν ταύτιση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το λογισμικό προσομοίωσης CIVA. Επισημαίνεται ότι το σύστημα χρησιμοποιήθηκε, επίσης, σε πάχη 4mm και 5mm με ακριβή εντοπισμό των ρωγμών αποδεικνύοντας για μια ακόμη φορά την ανωτερότητα των εργαστηριακών οργάνων σε σχέση με τα βιομηχανικά (καθώς στα δινορρέυματα η μέγιστη ανίχνευση γίνεται σε βάθος 1-2mm από την επιφάνεια).

Τέλος, η μελέτη ολοκληρώθηκε με μετρήσεις σε πραγματικό δοκίμιο (μικρό πολυστρωματικό αλουμινένιο τμήμα πτερυγίου αεροπλάνου) με τον αισθητήρα Hall τοποθετημένο μέσα σε κυκλικό πηνίο για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών αναπτυσσόμενων στην περιφέρεια των οπών των ήλων συναρμογής των στρωμάτων αλουμινίου. Στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση που έχει ο ήλος συναρμογής (πιρτσίνι) στο σήμα των ρωγμών. Κατά τη διερεύνηση παρατηρήθηκε ότι ο ήλος ενισχύει το σήμα από τις ρωγμές (ακόμη και στην περίπτωση υπό-επιφανειακής ρωγμής). Τα αποτελέσματα στο εργαστήριο δεν ήταν πολύ ενθαρρυντικά καθώς, λόγω των μικρών διαστάσεων του δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε πηνίο πολύ μικρών διαστάσεων ( $d < 10\text{mm}$  σε σύγκριση με τα 40mm της τυπικής διαμέτρου των αντίστοιχων πηνίων που διαθέτουν τα βιομηχανικά όργανα δινορρευμάτων). Η διερεύνηση θα συνεχιστεί με νέα κεφαλή (αντικατάσταση υφιστάμενου πηνίου με πηνίο μεγαλύτερης διάστασης) και πιθανή χρήση παλμικής διέγερσης.

### **8.1.Θέματα προς διερεύνηση**

Η παρούσα διατριβή μπορεί να αποτελέσει το έναυσμα για επόμενα πειράματα με το μαγνητόμετρο SQUID σε παλμική διέγερση. Στην παλμική διέγερση, αντί της απλής συχνότητας, περιέχεται ένα ολόκληρο εύρος συχνοτήτων και επομένως η δειγματοληψία στο χρόνο και η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας υπερτερεί σε πληροφορίες σε σχέση με τις μετρήσεις απλής συχνότητας. Στην πραγματοποίηση της παραπάνω μελέτης θα διεξαχθούν θεωρητικές προσομοιώσεις στο CIVA (το οποίο περιλαμβάνει και δυνατότητα μελέτης παλμικής διέγερσης) και στη συνέχεια θα πραγματοποιηθούν και πειράματα στο εργαστήριο για επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Επίσης τα πειράματα δεν πρέπει να περιοριστούν μόνο στη χρήση του μαγνητομέτρου SQUID αλλά θα συμπληρωθούν με αισθητήρες GMR και αισθητήρες fluxgate.

Στα θέματα προς μελλοντική διερεύνηση υπενθυμίζεται ότι θα πρέπει να συνεχιστούν τα πειράματα στο πραγματικό δοκίμιο (όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 7.4.) με χρήση πηνίου μεγαλύτερης διαμέτρου κατάλληλου για την ανίχνευση υπό-επιφανειακών ρωγμών σε μεγαλύτερο βάθος (να τοποθετηθούν όλες οι πλάκες του πραγματικού δοκιμίου). Η διερεύνηση αυτή θα μπορούσε να γίνει και με παλμική διέγερση.

Ένα ζήτημα προς μελλοντική μελέτη είναι η μεταφορά της πλατφόρμας PXI σε σύνδεση με τον ευαίσθητο αισθητήρα SQUID ή όποιον άλλο αισθητήρα μαγνητικού πεδίου για διεξαγωγή επιτόπου έρευνας. Για την πραγματοποίηση του ελέγχου θα

χρειαστούν κάποια όργανα τα οποία μπορούν εύκολα να μεταφερθούν όπως είναι η κεφαλή δινορρευμάτων (SQUID μαζί με πηνίο διέγερσης), η πλατφόρμα PXI και ο υπολογιστής που περιλαμβάνει τον εικονικό ενισχυτή Lock-in. Στη συνέχεια εάν τα αποτελέσματα από τον έλεγχο δοκιμίων σε βιομηχανικούς χώρους είναι ενθαρρυντικά, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένας μικρός σαρωτής για τη διευκόλυνση των επιτόπιων ελέγχων ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η φορητότητα του μαγνητομέτρου SQUID για χρήση σε διάφορες εφαρμογές και κυρίως στο πρόβλημα που μελετήθηκε με επιτυχία (στην αναγνώριση επιφανειακών και υπό-επιφανειακών ασυνεχειών στα αεροσκάφη).

Τέλος, όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πλάκες αλουμινίου και επομένως θα ήταν ενδιαφέρον να πραγματοποιηθούν αντίστοιχα πειράματα σε σιδηρομαγνητικά δοκίμια. Ενδεχομένως το μαγνητόμετρο SQUID θα ήταν δύσκολο να ανταποκριθεί σε έλεγχο παρόμοιων δοκιμίων καθώς θα έρχονταν σε κορεσμό αλλά η χρήση του αισθητήρα Hall μέσα σε κυκλικό πηνίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία (παρόλο τις δυσκολίες που υπάρχουν στην ερμηνεία σημάτων από έλεγχο σιδηρομαγνητικών υλικών).



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

## Abstract

### Study of Excitation for a SQUID Magnetometer in Non Destructive Testing Applications

The aim of this doctoral thesis is to study and examine the feasibility of magnetic field sensors and especially SQUID. Our goal is to evaluate the SQUID performance and compare it with other sensors (Hall) in detecting surface and sub-surface cracks in aluminum samples which are used in aerospace industry.

As an overview: (i) we present theoretical and experimental investigation of excitations taking into account the frequency, the dimensions and excitation the coil shape, (ii) we provide quantitative magnetic field measurements in configurations involving aluminum plates, cracks and holes that simulate the inspection of fasteners in aircraft structures, (iii) we carry out reliable inspections of surface and subsurface discontinuities, (iv) we study an alternative portable eddy current instrument, based on the lock-in amplifier technique, able to adapt to every common magnetic field sensor in order to inspect a wide range of applications with eddy current technique and (v) we provide reference data for eddy current benchmark measurements. More specifically:

In the second chapter, we mention the main characteristics of magnetic sensors, their applications, and their sensitivity. We mainly focus on SQUID magnetometer which is the basic magnetic sensor in our study.

In the third chapter, we present the eddy current method which seems to be suitable for the detection of fastener hole defects. Conventional eddy current techniques can only locate defects up to a certain depth under the surface. In order to detect deep flaws in conductive materials, low excitation frequencies are required to achieve a sufficient penetration depth. Since the sensitivity of normal pick up coils is proportional to the excitation frequency, standard eddy current techniques are sometimes insufficient for subsurface flaw detection. In such cases it is advantageous to measure directly the magnetic field rather than its time rate of change (coil impedance change). Among the available magnetic field sensors, the Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) is by far the most sensitive, thus making it ideal for the measurement of weak magnetic field perturbations resulting from deep lying defects.

In the fourth chapter, regarding modeling of our specific problem, we use the eddy current simulation module of CIVA software (which is based on semi-analytical

calculations). CIVA permits access to advanced sensors such as coils with various shapes, magnetic field sensors, as well as multi-element probes. The advantage of the CIVA solution method is the need to mesh/discretize only the defect area (in our case the hole and crack) and not the whole solution domain. Results are displayed with C-scan colored charts or conventional curves in the complex plane (real and imaginary parts of the signals). The experimental verification of numerical results verifies the reliability of CIVA computational model.

In the fifth chapter, we present the complete measuring unit for experimental investigations with SQUID sensor. We analyze the SQUID magnetometers (single and double) which are integrated to a scanning unit, the aluminum plates that are investigated, the necessity of using “double-D” excitation coil, the scanning system which consists of a XY stage comprising two computer driven step motors and the total electronic layout. The analysis of the experimental layout is important since it is used in the next chapters for the experiments.

In the sixth chapter, in order to optimize our experiments, we study various excitations with CIVA simulation model. Several types of excitation coils have been modeled in order to investigate the SQUID behavior in locating small but deep flaws in aluminum structures. Both theoretical simulations and experimental measurements are performed and useful conclusions are drawn regarding the excitation frequency as well as the coil shape and orientation. In this chapter, we perform measurements in our laboratory for a simplified version of the bolthole configuration, i.e. a borehole and a crack in a two plate system with the excitation coil and SQUID moving freely above the planar surface.

In the seventh chapter, we present an alternative portable eddy current instrument, based on the lock-in amplifier technique, able to adapt to every common magnetic field sensor like Hall, GMR, fluxgate and of course SQUID. The main advantages of the proposed instrument, besides portability, are modularity, flexibility, rigidity, and user configurability thanks to its open code programming. The functionality of the modular instrument is tested on aluminum samples with surface and subsurface notches using Hall and SQUID sensors and its performance is compared to a standard commercial eddy current instrument. Moreover, the standard commercial eddy current instrument is compared with LCR meter on aluminum samples in order to investigate and compare the behavior of a commercial instrument with laboratory instruments with high accuracy. In this chapter we also carry out measurements to provide reference data for eddy current testing configurations involving Hall sensor as receiver, as they present some advantages in terms of resolution and sensitivity propose a solution to the 2014 eddy current testing benchmark (WFNDEC). Finally, we complete our study with measurements on a real aluminum sample (which is used in aerospace industry) in order to study how a fastener influences the signal of a crack adjacent to a fastener hole.