



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗ-  
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Η Διπλωματική Εργασία  
υποβάλλεται  
στην εξεταστική επιτροπή του Τμήματος  
από την  
Κόρογλου Δήμητρα  
Αριθμός Μητρώου 609

Επιβλέπων:  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη  
Μάρτιος 2013

# ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου για την εμπιστοσύνη και την υπομονή τους κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Παρ' όλες τις δυσκολίες που περάσατε αυτά τα χρόνια καταφέρατε να μου δώσετε τη δυνατότητα στη γνώση.

Σας ευχαριστώ πολύ.

Κόρογλου Δήμητρα

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία αυτή ήταν μία πρόκληση και μία διερεύνηση όχι μόνο της μεθόδου των δινορρευμάτων αλλά και της επαγγελματικής σταδιοδρομίας. Αποτέλεσε ένα σημαντικό σημείο ενδιαφέροντος.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω τον κ.Θ. Θεοδουλίδη, καθηγητή και καθοδηγητή αυτής της διερεύνησης, αφενός για την υπομονή και την κατανόηση κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας και αφετέρου για το ανθρώπινο και συμβουλευτικό χαρακτήρα.

Σημαντική βοήθεια υπήρξε και ο διδακτορικός του τμήματος Ι. Μαρτίνος τόσο στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας όσο και στο θεωρητικό.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή Γ. Καραμανίδη για την ψυχολογική και πρακτική υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας.

Με εκτίμηση και σεβασμό,  
Κόρογλου Δήμητρα

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ .....	1
1.2 Η ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΣΗΜΕΡΑ .....	3
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ .....	4
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>7</b>
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	7
2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ.....	8
2.2.1 Βασικές Έννοιες .....	8
2.2.2 Λειτουργικές Μεταβλητές .....	10
2.3 ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ .....	21
2.3.1 Πηνία – Μετρητικές κεφαλές .....	21
2.3.2 Θεωρία Οργάνων ECT .....	23
2.3.3 Ελέγχου ECT Όργανα .....	25
2.3.4 Όργανα Ανάγνωσης ή Απεικόνισης Μετρήσεων.....	30
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ (ECT) .....	31
<b>3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ COMSOL .....</b>	<b>35</b>
3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD - FEM).....	35
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ 2D ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ .....	36
3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ 3D ΓΙΑ ΟΠΕΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ.....	41
<b>4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>45</b>
4.1 ΠΗΝΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	45
4.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	47
4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ AGILENT .....	48
4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ OLYMPUS MULTISCAN 5800 .....	49
4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ .....	50
4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>55</b>

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Μη-καταστροφικός έλεγχος με δινορρεύματα έχει λάβει μία ευρεία διάδοση στο βιομηχανικό και τον κατασκευαστικό χώρο και έχει φτάσει να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι τους. Η ανάγκη για ανάλυση και βελτιστοποίηση της μεθόδου των δινορρευμάτων (Eddy Current Testing - ECT) οδήγησε στη χρήση πακέτων προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων για την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων σε πρότυπα προβλήματα ECT.

Στην παρούσα εργασία εμβαθύνουμε στον τρόπο λειτουργίας του ECT με χρήση της εφαρμογής Comsol, που αναλύει ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με πεπερασμένα στοιχεία. Έπειτα είμαστε σε θέση να ελέγξουμε την ορθότητα και την αξιοπιστία των μοντέλων προσομοίωσης μέσω σύγκρισης με πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων από το βιομηχανικό όργανο Olympus Multiscan MS 5800 καθώς και από το εργαστηριακό όργανο της Agilent.

Ο αναγνώστης έχει την ευκαιρία να γνωρίσει την ιστορία των μη-καταστροφικών ελέγχων και της μεθόδου των δινορρευμάτων, όπου αποτυπώνεται η αναγκαιότητα για την πρόληψη ανεπιθύμητων ατυχημάτων είτε στη βιομηχανία είτε στις κατασκευές. Ακόμη, να μελετήσει τη βασική θεωρία πίσω από τη μέθοδο και να παρακολουθήσει την εφαρμογή μετρήσεων 2D και 3D στο Comsol καθώς και των οργάνων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, του εργαστηρίου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών (ΠΔΜ-Κοζάνη).

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ

Μη-καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) ονομάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν ένα μέρος ενός υλικού ή ενός συστήματος χωρίς να αλλοιωθεί η χρησιμότητά του. Ερευνούν συγκεκριμένα τις ιδιότητες ενός υλικού ή την ακεραιότητα ενός δοκιμίου, χωρίς να προκαλούν μερική ή ολική καταστροφή στο υπό δοκιμή υλικό. Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου υλικών [1].

Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή κατά τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, παρατηρείται πως με την έξαρση της βιομηχανικής επανάστασης άρχισαν να σημειώνονται πολλές καταστροφές στις καταπονούμενες πλέον κατασκευές, όπως σε πιεστικά δοχεία ατμομηχανών και εργοστασίων, σε άξονες και σιδηροτροχιές. Κύριος λόγος της αστοχίας αυτών των κατασκευών, εάν εξαιρέσουμε τις αστοχίες που οφείλονται σε σχεδιαστικά λάθη, ήταν οι ατέλειες και η κόπωση που είχε υποστεί το εκάστοτε υλικό. Ο όρος κόπωση άρχισε να χρησιμοποιείται μετά το 1840 για να περιγράψει τις αστοχίες που οφείλονταν στη διαρκή καταπόνηση από επαναλαμβανόμενες τάσεις. Ο πολιτικός μηχανικός Γουίλιαμ Ράνκιν (William Rankine 1820-1872) δημοσίευσε περί το 1843 τις διαπιστώσεις του σχετικά με τη βαθμιαία φθορά και γήρανση του υλικού υπό τη συσσώρευση τάσεων και εμφάνιση ρωγμών στις αιχμηρές γωνίες,

προτείνοντας μεγαλύτερες καμπυλότητες ώστε να προληφθούν ανεπιθύμητες ατέλειες [2].

Το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των αστοχιών ήταν η βελτίωση της ποιότητας των υλικών. Αυτό μείωσε τη συχνότητα των βλαβών και βελτίωσε την αξιοπιστία των κατασκευών ανοίγοντας ταυτόχρονα και το δρόμο για την ανάπτυξη των μη-καταστροφικών ελέγχων, όπου από το 1920 περίπου και μετά οι έλεγχοι έχουν γίνει αναντικατάστατο εργαλείο των διεργασιών παραγωγής, κατασκευής και συντήρησης [2].

Αναφέρονται συνοπτικά μερικά αξιοσημείωτα γεγονότα [2]:

- 1855: Ψηφίζεται νόμος στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους σε πιεστικά δοχεία.
- 1895: Ο Γουλιέλμος Κόνραντ Ρέντγκεν (Wilhelm Conrad Röntgen) ανακαλύπτει τις ακτίνες-X και αναφέρει σε σχετική του ανακοίνωση τη δυνατότητα εντοπισμού σφαλμάτων.
- 1880-1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με διεισδυτικό υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος κατά την οποία το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα, το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παρέμεινε σε τυχόν ρωγμές βγει προς τα έξω.
- 1920: Ο Λέστερ (H.H.Lester) αναπτύσσει τη βιομηχανική ραδιογραφία των μετάλλων.
- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο δινορρευμάτων που μετρά το πάχος του υλικού.
- 1927-1928: Εφαρμόζεται το πρώτο σύστημα μαγνητικής επαγωγής σε σιδηροδρομικές γραμμές.
- 1940-1944: Ο Φλόυντ Φάϊερστοουν (Floyd Firestone) αναπτύσσει τη μέθοδο υπερήχων.
- 1950: Ο Κάιζερ (J.Kaiser) εισάγει τη μέθοδο ΜΚΕ της Ακουστικής Εκπομπής.

Η εξέλιξη των ΜΚΕ έως και σήμερα έχει δώσει μία μεγάλη ποικιλία μεθόδων που μας επιτρέπει να ανιχνεύουμε μεταβολές που πραγματοποιούνται σε μικρά χρονικά διαστήματα σε μία επιφάνεια. Οι σύγχρονες μέθοδοι τέτοιου είδους χρησιμεύουν [2]:

- στη διασφάλιση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας ενός προϊόντος.
- να αποφευχθούν αστοχίες και ατυχήματα που κοστίζουν, ώστε να σωθούν ακόμα και ανθρώπινες ζωές.
- να αποφέρουν κέρδος στο χρήστη.
- να διασφαλίσουν την ικανοποίηση του χρήστη και να υπερασπιστούν τη φήμη του κατασκευαστή.
- να βοηθήσουν στον καλύτερο σχεδιασμό των προϊόντων.
- να μειώσουν το κόστος παραγωγής.
- να διατηρήσουν ομοιόμορφο επίπεδο ποιότητας.
- να εξασφαλίσουν τη λειτουργική ετοιμότητα.
- να ανιχνεύονται εσωτερικά ή εξωτερικά ελαττώματα των υλικών, που είναι και οι κύριες αιτίες αστοχίας τους.

- να προσδιορίζονται αρκετές από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (ελαστικές σταθερές, σκληρότητα των μετάλλων, αντοχές, κ.ά.).

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ τη σημερινή εποχή καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Έτσι, τις συναντάμε [3]:

- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο).
- στην αεροδιαστημική (πλάισιο αεροπλάνων και διαστημόπλοιων, κινητήρες τζετ, πύραυλοι).
- στις κατασκευές (γέφυρες, κτίρια).
- στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες).
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ενέργειας, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, στροβιλομηχανές, σωληνώσεις συγκολλήσεις).
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς.
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας).
- στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες).
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, κλπ.).

## 1.2 Η ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΣΗΜΕΡΑ

Μερικά από τα βασικότερα επιχειρήματα που υπάρχουν ώστε να εντάξει μία επιχείρηση κάποιες από τις μεθόδους ΜΚΕ στον ποιοτικό της έλεγχο είναι η αναβάθμιση της θέσης της στην ελληνική και παγκόσμια αγορά, η εξασφάλιση υψηλής ποιότητας προϊόντος, η συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα τύπου ISO και το δικαίωμα διεκδίκησης συμβολαίου συνεργασίας με πελάτες μεγάλης εμβέλειας που απαιτούν τέτοιους ελέγχους. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται σε κάθε μέθοδο περιγράφονται με τη μορφή αυστηρών οδηγιών, οι οποίες ορίζονται στα πρότυπα που έχει υιοθετήσει κάθε κατασκευαστής-ελεγκτής. Υπάρχουν πάρα πολλά πρότυπα που μπορεί να ακολουθήσει κάποιος και αναγνωρίζονται από τα αρχικά τους, όπως γερμανικά DIN, ευρωπαϊκά EN, παγκόσμια ISO. Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την καλύτερη επιλογή προτύπου είναι η αγορά και οι πελάτες στους οποίους απευθύνεται ο κάθε κατασκευαστής [4].

Οι ΜΚΕ πρέπει να πραγματοποιούνται από εξειδικευμένους τεχνικούς, οι οποίοι έπειτα από την παρακολούθηση κατάλληλης εκπαίδευσης και τη συμμετοχή σε ειδικές εξετάσεις, λαμβάνουν την απαραίτητη πιστοποίηση από οργανισμούς με παγκόσμια αποδοχή και αναγνώριση. Δύο από τους πιο γνωστούς φορείς που χορηγούν πιστοποιήσεις (PCN) είναι η Αμερικανική Ένωση ΜΚΕ ASNT (American Society for Nondestructive Testing) και το Βρετανικό Ινστιτούτο ΜΚΕ BINDT (British Institute of Non-Destructive Testing). Η επιλογή του φορέα πιστοποίησης είναι πολύ σημαντική και πρέπει να συμβαδίζει με τα πρότυπα ελέγχου που έχουν επιλεγεί από την εταιρεία που καλείται να τα εφαρμόσει [4].

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες πιστοποιήσεων για κάθε μέθοδο. Η χαμηλότερη κατηγορία είναι γνωστή ως LEVEL I και δίνει τη δυνατότητα στον τεχνικό να εφαρμόσει σωστά τις μεθόδους, να χρησιμοποιεί τις συσκευές και τα υλικά ΜΚΕ και

να καταγράφει τα αποτελέσματα των μετρήσεων, χωρίς όμως να δίνει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων σχετικά με την καταλληλότητα ή μη του εξεταζόμενου υλικού. Η μεσαία και πιο διαδεδομένη κατηγορία είναι γνωστή ως LEVEL II. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα αυτά που έχει και η πρώτη αλλά επιπλέον δίνει τη δυνατότητα της εκτίμησης των αποτελεσμάτων και της λήψης αποφάσεων, ενώ παράλληλα επιτρέπει την εκπαίδευση των χειριστών της πρώτης κατηγορίας βάσει των προτύπων που ακολουθεί η κάθε επιχείρηση [4].

Τέλος η ανώτερη κατηγορία είναι γνωστή ως LEVEL III. Περιλαμβάνει ότι και η μεσαία, δίνοντας επιπλέον το δικαίωμα εκπαίδευσης στους ελεγκτές LEVEL II, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μεθόδου σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα και τον καθορισμό όλων των λεπτομερειών που θα πρέπει να ακολουθήσουν για να εφαρμοστεί σωστά [4].

Τα παραπάνω πιστοποιητικά αποδεικνύουν ότι ο ελεγκτής έχει λάβει την εκπαίδευση που αναλογεί στο καθένα από αυτά και παράλληλα ότι έχει την πρακτική εμπειρία πάνω στη μέθοδο που ορίζουν. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο απαιτείται η ανανέωσή τους σε τακτά χρονικά διαστήματα, όχι του τίτλου σπουδών γιατί δεν έχει ημερομηνία λήξης, ώστε να εξασφαλίζεται πως ο ελεγκτής είναι ενεργός και γνώστης του αντικειμένου του. Ο ευρωπαϊκός τίτλος σπουδών είναι ο EN473 και μερικές από τις κυριότερες μεθόδους που καλύπτει είναι [4]:

- Μαγνητικά σωματίδια (MT-Magnetic Particle Testing).
- Διεισδυτικά υγρά (PT-Penetrant Testing).
- Δινορρέυματα ( ET-Electromagnetic Testing).
- Ραδιογραφία (RT-Radiography Testing).
- Υπέρηχοι (UT-Ultrasonic Testing).
- Οπτικός έλεγχος (VT-Visual Testing).

### 1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ

Στους ΜΚΕ χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, κάθε μία από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και μπορεί ακόμα να διακρίνεται σε περισσότερες από μία τεχνικές. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος, γεγονός που σημαίνει πως μία τεχνική ανάλογα με τη φύση και τη λειτουργία της μπορεί να είναι ιδανική ή και εντελώς άχρηστη. Αυτός είναι και ο λόγος που η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση των ΜΚΕ [2].

Η κατηγοριοποίηση των ελέγχων γίνεται με βάση πέντε βασικούς παράγοντες [1]:

1. την πηγή ενέργειας ή το μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του αντικειμένου.
2. τη φύση των σημάτων ή της εικόνας που είναι αποτέλεσμα της διάδρασης με το αντικείμενο.
3. τα μέσα ανίχνευσης των σημάτων.
4. τα μέσα ένδειξης ή καταγραφής των σημάτων.
5. τη βάση ερμηνείας των ενδείξεων (ποιοτική, ποσοτική).



Σύμφωνα με τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτουν οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων και οι τεχνικές τους [2].

#### **Οπτικές Μέθοδοι (Visual Inspection):**

- Οπτικός έλεγχος (Visual Testing), αποτελεί το αρχικό βήμα για την επιθεώρηση του υπό έλεγχο αντικειμένου διότι γίνεται με απλή παρατήρηση (π.χ. τυχόν διαρροές από σωληνώσεις ή δεξαμενές)
- Οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο
- Οπτικός έλεγχος με βιντεοσκόπηση (Video Testing)
- Οπτικός έλεγχος με λέιζερ (Laser)
  - ολογραφία (Holography)
  - συμβολομετρία (ESP Interferometry)
  - δυναμικός έλεγχος επιφάνειας (Dynamic Surface-Inspection)

#### **Ραδιογραφικές Μέθοδοι (Radiographic Inspection):**

- Ακτίνες X (X-rays) και ακτίνες Γάμμα (Gamma rays)
- Ψηφιακή τομογραφία (Computed Tomography)
- Υποατομικά σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια) (Neutron Radiography)

#### **Μέθοδοι Υπερήχων (Ultrasonic Inspection):**

- Τεχνικές ανάκλασης
- Τεχνικές περίθλασης (Time of Flight Diffraction Ultrasonics-TOFD)
- Συστοιχίες φάσης υπερήχων (Phased Array Ultrasonics)
- Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System-IRIS)
- Μέθοδοι υπερήχων με λέιζερ (Laser Ultrasonics-LUT)
- Καθοδηγούμενα κύματα υπερήχων (Guided Ultrasonic Waves)
- Τεχνικές NEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy-Φασματοσκοπία μη Γραμμικών Ελαστικών Κυμάτων)

#### **Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Flaw Testing):**

- Διεισδυτικά ορατού φωτισμού
- Φθορίζοντα διεισδυτικά

#### **Μέθοδοι Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission-AE)**

#### **Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)**

#### **Ηλεκτρικές Μέθοδοι (Electric Inspection):**

- Μέθοδος πτώσης δυναμικού (Potential Drop)

#### **Μαγνητικές Μέθοδοι (Magnetic Inspection):**

- Μαγνητικό μελάνι ή σκόνη (Magnetic ink/powder)
- Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles)
- Μαγνητογραφία (Magnetography)
- Απώλεια μαγνητικής ροής (Magnetic Flux Leakage, MFL)
- Θόρυβος Barkhausen

### **Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι (Electromagnetic Inspection)**

- Μέθοδος Δινορρευμάτων (Eddy Current Testing, ECT & Remote Field Testing, RFT)

### **Μηχανικοί Έλεγχοι (Mechanic Testing):**

- Μέθοδος ακουστικής πρόσκρουσης (Acoustic Impact-Ηχητικό Φάσμα)
- Θερμογραφικός έλεγχος (Thermographic Inspection)
- Μέθοδοι μηχανικής αντίστασης (Mechanical Impedance)
- Έλεγχοι ταλαντώσεων (Vibration Monitoring)

### **Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection and Testing)**

### **Μικροκυματικές Μέθοδοι (Microwave Testing)**

## 2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Οι έλεγχοι με τη χρήση δινορρευμάτων (Eddy Current Testing, ECT) ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με τις άλλες μεθόδους και οι εφαρμογές τους είναι αναρίθμητες και χρησιμοποιούνται ευρέως [1].

Οι σύγχρονες τεχνικές ECT προσφέρουν χαμηλό κόστος εξοπλισμού, υψηλή ταχύτητα διεξαγωγής του ελέγχου, ελάχιστη προετοιμασία των εξαρτημάτων και μεγάλη ποικιλία στη δοκιμή μεταλλικών υλικών. Σε γενικές γραμμές, οι δοκιμές με δινορρεύματα προσφέρουν στιγμιαίες μετρήσεις. Η ταχύτητα στην ανάλυση των σημάτων μας επιτρέπει να έχουμε αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο. Για αυτό το λόγο είναι μέθοδος που χρησιμοποιείται σε γραμμές παραγωγής σε συνδυασμό με αυτοματισμούς για τον έλεγχο προϊόντων σε κάθε στάδιο [1].

### 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το φαινόμενο των δινορρευμάτων ανακαλύφθηκε από το Γάλλο φυσικό Λεόν Φουκώ (Leon Foucault) το 1851 και γι' αυτό άλλωστε αποκαλούνται συχνά και ρεύματα Φουκώ. Ο Φουκώ κατασκεύασε μια συσκευή που χρησιμοποιούσε έναν δίσκο χαλκού που κινείται σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο για να δείξει ότι τα δινορρεύματα παράγονται όταν κινείται ένα υλικό μέσα σε ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο [4].

Η δοκιμή των δινορρευμάτων ξεκίνησε, κατά ένα μεγάλο μέρος, με την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής το 1831 από τον Άγγλο επιστήμονα Μάικλ Φάραντεϊ (Michael Faraday). Ο Φάραντεϊ ανακάλυψε ότι όταν ένα μαγνητικό πεδίο περνά μέσα από έναν αγωγό (δηλαδή σε υλικό που είναι εύκολη η κίνηση των ηλεκτρονίων) ή όταν ένας αγωγός διέρχεται μέσα από μαγνητικό πεδίο, ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα διατρέξει τον αγωγό εάν υπάρχει μία κλειστή πορεία για να κυκλοφορήσει το ρεύμα [4].

Το 1879, μία άλλη σημαντική ανακάλυψη έγινε όταν ο επιστήμονας Ντέιβιντ Χιουζ (David Hughes), κατέδειξε πως οι ιδιότητες ενός πηνίου αλλάζουν όταν τοποθετείται σε επαφή με μέταλλα διαφορετικής αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας. Εντούτοις, δεν ήταν πριν από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο που αυτές οι εξελίξεις στη διαβίβαση και τη λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τέθηκαν σε πρακτική χρήση για δοκιμή υλικών [4].

Στις αρχές του 1933, ο Γερμανός καθηγητής Φρίντριχ Φόρστερ (Friedrich Forster), εργαζόμενος για το ίδρυμα Κάιζερ-Γουλιέλμος (Kaiser-Wilhelm), προσάρμοσε την τεχνολογία δινορρευμάτων στη βιομηχανία και ανέπτυξε όργανα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας και για την ταξινόμηση αναμιγμένων σιδηρούχων συστατικών. Το 1948, ο Φόρστερ ίδρυσε την επιχείρησή του στο Ρόιτλιγκεν (Reutlingen) βασισμένη στη μέθοδο των δινορρευμάτων, η οποία υπάρχει μέχρι σήμερα. Σύντομα ακολούθησαν και άλλες επιχειρήσεις [4].

## 2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

### 2.2.1 Βασικές Έννοιες

#### Ηλεκτρομαγνητισμός

Η ενέργεια σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ο νόμος του Φάραντεϊ ορίζει ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει μία ηλεκτροκινητική δύναμη, δηλαδή μία **πηγή τάσης** [9] :

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

$$\text{όπου } \Phi = BS\cos(\theta) \quad (2)$$

$\Phi$ : **μαγνητική ροή** σε μονάδες Weber [W]

$S$ : εμβαδόν της επιφάνειας [ $m^2$ ]

$\theta$ : γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου

$B$ : **μαγνητική επαγωγή**, δηλαδή η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών ή η ένταση του μαγνητικού πεδίου, σε μονάδες [T]

$$B = \mu H \quad (3)$$

$\mu$ : **μαγνητική διαπερατότητα** του υλικού [9]

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (4)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{mkg}{c^2} \right]$ : μαγνητική διαπερατότητα του κενού

$\mu_r$ : σχετική μαγνητική διαπερατότητα για υλικά με  $\mu > \mu_0$  (αδιάστατο μέγεθος)

Το μείον στον τύπο (1) δηλώνει ότι η τάση αντιτίθεται στο ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής. Εάν ένα **εναλλασσόμενο ρεύμα** διαρρέει ένα πηνίο τότε η μαγνητική ροή θα εναλλάσσεται και αυτή μαζί του και ο νόμος του Φάραντεϊ θα γίνει [9]:

$$E = -\frac{N \Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5)$$

$N$ : αριθμός των σπειρών του πηνίου

και για το εναλλασσόμενο ρεύμα ισχύει :

$$i = I_0 \sin(\varphi) = I_0 \sin(\omega t) = I_0 \sin(2\pi f t) = I_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (6)$$

$i$ : στιγμιαία ένταση ρεύματος, δηλαδή σε ορισμένη χρονική στιγμή  $t$ , [A]

$I_0$ : πλάτος, δηλαδή η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος, [A]

$T$ : περίοδος, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται για μια ολόκληρη μεταβολή της έντασης του ρεύματος, σε [sec]

$f$  : συχνότητα, δηλαδή ο αριθμός των πλήρων μεταβολών της έντασης του ρεύματος στη μονάδα του χρόνου, σε [Hz]  
 $\omega$  : **κυκλική συχνότητα** σε [rad/sec]

$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

$\varphi$  : **στιγμιαία φάση**, δηλαδή η γωνία σε ορισμένη χρονική στιγμή  $t$

$$\varphi = \omega t \quad (8)$$

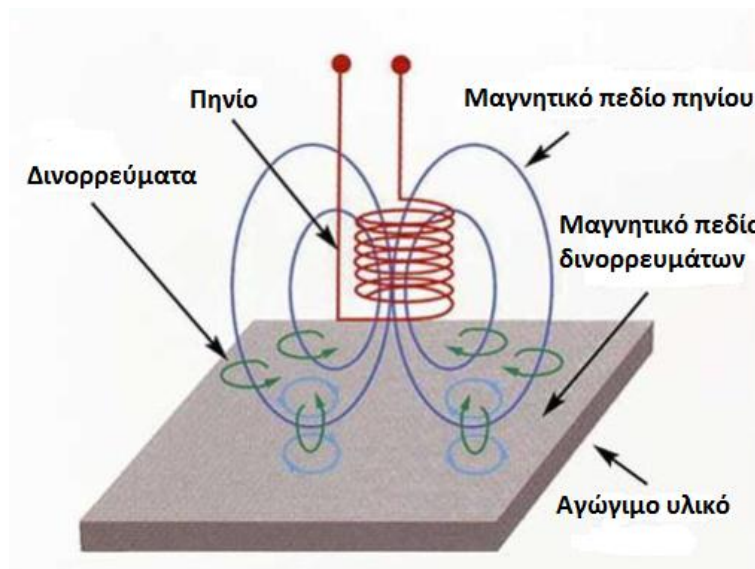
Όταν ένα πηνίο τώρα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και ένα δεύτερο πηνίο τέμνει πολλές από τις δυναμικές γραμμές του, τότε στο δεύτερο πηνίο θα εμφανιστεί εναλλασσόμενη τάση εξ επαγωγής. Όλα τα πηνία έχουν την ιδιότητα της επαγωγής, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με τη συγκέντρωση του μαγνητικού πεδίου στο πηνίο. Και πάλι από το **νόμο του Φάραντεϊ** προκύπτει [9]:

$$E = -\frac{N \Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \Rightarrow L = \frac{N\Phi}{I} \quad (9)$$

$L$ : **αυτεπαγωγή του πηνίου** σε μονάδες [H]

### Δινορρεύματα

Τα δινορρεύματα προκαλούνται από ένα πρωτεύον μαγνητικό πεδίο που τέμνεται από μία αγώγιμη επιφάνεια. Η αγώγιμη αυτή επιφάνεια δρα σαν ένα βραχυκυκλωμένο δευτερεύον πηνίο μιας σπείρας και το ρεύμα εξ επαγωγής που εμφανίζεται σε αυτήν είναι το δινορρευμα. Η φορά των δινορρευμάτων είναι τέτοια ώστε να προκαλεί δευτερεύον μαγνητικό πεδίο που να αντιτίθεται στο πρωτεύον μαγνητικό πεδίο που το προκάλεσε. Τα δινορρεύματα είναι δηλαδή βρόχοι ρεύματος που κινούνται κάθετα προς τη μαγνητική ροή ( $\Phi$ ) [1].



Σχήμα 2.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα σε πηνίο πάνω από αγώγιμη πλάκα δημιουργεί δινορρεύματα [7].

Καθώς αυξάνεται η συχνότητα δοκιμής ( $f$ ) η διείσδυση μειώνεται ενώ η κατανομή των ρευμάτων γίνεται πιο πυκνή κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Τόσο η μαγνητική ροή όσο και τα δινορρεύματα εξασθενούν στα πιο βαθιά στρώματα λόγω του

επιδερμικού φαινομένου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των δινορρευμάτων είναι η διαφορά φάσης που παρατηρείται καθώς προχωράμε πιο βαθιά. Η διαφορά φάσης είναι πολύ σημαντική παράμετρος για την ανάλυση των σημάτων και πολύ χρήσιμη στην ταυτοποίηση των ατελειών. Η εξίσωση που περιγράφει τη **ροή των επαγόμενων ρευμάτων** είναι [1]:

$$\nabla^2 \cdot J = \sigma \mu \frac{\partial J}{\partial t} \quad (10)$$

$J$ : πυκνότητα ρεύματος σε μονάδες  $\left[\frac{A}{m^2}\right]$

$\sigma$ : ηλεκτρική αγωγιμότητα σε μονάδες  $\left[\frac{S}{m}\right]$

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα** των υλικών φανερώνει την ευκολία διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (11)$$

$\rho$ : **ειδική αντίσταση**, εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία, σε μονάδες  $[\Omega m]$

Η επίλυση της προηγούμενης σχέσης για ημι-άπειρο υλικό μας δίνει την παρακάτω εξίσωση [1]:

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-\beta} \sin(\omega t - \theta) \quad (12)$$

$J_x$ : πυκνότητα ρεύματος για βάθος  $x$

$J_0$ : πυκνότητα ρεύματος για την επιφάνεια

$$\theta = \frac{x}{\delta} \quad (13)$$

$\theta$ : **καθυστέρηση φάσης** σε μονάδες  $[rad]$

$\delta$ : πρότυπο βάθος διείσδυσης  $[m]$

Το σήμα το οποίο παράγεται από την ατέλεια εξαρτάται και από το πλάτος και από τη διαφορά φάσης των δινορρευμάτων. Έτσι μία μικρή ατέλεια στην επιφάνεια και μία στο εσωτερικό μπορούν να έχουν παρόμοια επίδραση στο μέγεθος της σύνθετης αντίστασης του πηνίου. Η ειδοποιός διαφορά για τις δύο ατέλειες είναι η διαφορά φάσης και για αυτό το λόγο η μελέτη της σύνθετης αντίστασης είναι αναγκαία [1].

## 2.2.2 Λειτουργικές Μεταβλητές

### Σύνθετη Αντίσταση Πηνίου

Όταν ένα συνεχές ρεύμα ρέει σε ένα πηνίο, το μαγνητικό πεδίο φτάνει σε ένα σταθερό επίπεδο και η ηλεκτρική αντίσταση του σύρματος περιέλιξης ( $R$ ) είναι ο μόνος περιορισμός ως προς τη ροή του ρεύματος. Ωστόσο, όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει σε ένα πηνίο, υπάρχουν δύο περιορισμοί: η αντίσταση του σύρματος και μια ποσότητα γνωστή ως επαγωγική άεργη αντίσταση, δηλαδή η αντίδραση ( $X_L$ ). Η αντίδραση είναι ένα μέτρο της μείωσης της ροής του ρεύματος που προκαλείται από την αυτεπαγωγή των ρευμάτων. Η ολική αντίσταση στη ροή του εναλλασσόμενου

ρεύματος σε ένα πηνίο ονομάζεται **σύνθετη αντίσταση** ( $Z$ ) και περιλαμβάνει τόσο την **άμεση αντίσταση** ( $R$ ) όσο και την **αντίδραση** ( $X_L$ ).

$$Z = R + jX_L \quad (14)$$

Η **αντίσταση**, που είναι η δυσκολία που συναντάει το ρεύμα να περάσει μέσα από ένα υλικό, εξαρτάται από τον τύπο και τις διαστάσεις του σύρματος και ισχύει [9]:

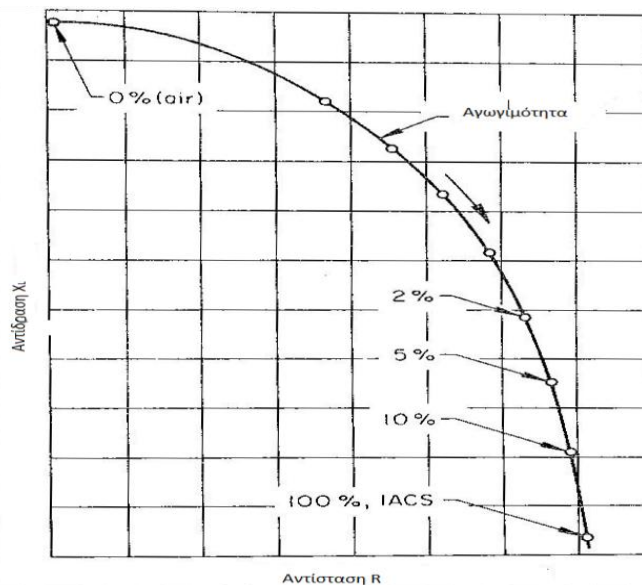
$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (15)$$

$l$ : μήκος σύρματος σε μονάδες [ $m$ ]

$R$ : αντίσταση σε μονάδες [ $\Omega$ ]

$A$ : εμβαδό της διατομής του σύρματος [ $m^2$ ]

Η σύνθετη αντίσταση συνήθως απεικονίζεται σε ένα συμμετρικό διάγραμμα. Στο διάγραμμα, η αντίσταση ( $R$ ) βρίσκεται κατά μήκος του άξονα  $x$  και η αντίδραση ( $X_L$ ) κατά μήκος του άξονα  $y$ . Κάθε κατάσταση στο υλικό που επιθεωρείται θα οδηγήσει σε συγκεκριμένη τιμή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου και έτσι κάθε όρος θα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο του επιπέδου στο διάγραμμα σύνθετης αντίστασης. Για παράδειγμα, εάν ένα πηνίο τοποθετηθεί διαδοχικά σε μια σειρά από χοντρά κομμάτια μετάλλου, το καθένα έχοντας μικρότερη αντίσταση από την προηγούμενη, κάθε κομμάτι θα παράγει μία διαφορετική σύνθετη αντίσταση στο πηνίο και θα αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό σημείο στο διάγραμμα. Η καμπύλη που παράγεται θα μοιάζει με εκείνη που φαίνεται στο Σχήμα 2.2, η οποία βασίζεται στην αγωγιμότητα σε βαθμούς IACS% (International Annealed Copper Standard - Διεθνές Πρότυπο Ανοπημένου Χαλκού).



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μεταλλικές πλάκες του ίδιου πάχους αλλά διαφορετικής αγωγιμότητας.

Το πηνίο υποτίθεται ότι έχει αυτεπαγωγή ( $L_0$ ) και αμελητέα αντίσταση. Το μέρος που επιθεωρείται συνίσταται σε ένα πολύ λεπτό σωλήνα που έχει αγωγιμότητα ( $G$ ) στενά

συνδεδεμένο με το πηνίο. Όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει διαμέσου του συστήματος υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης για κάθε κύκλο, ένα τμήμα της ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα επιστρέφει στη γεννήτρια και κάποια ενέργεια διαχέεται ή χάνεται ως θερμότητα. Η αντίδραση ( $X_L$ ) της σύνθετης αντίστασης ( $Z$ ) του κυκλώματος είναι ανάλογη προς την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά κύκλο και η αντίσταση ( $R$ ) είναι ανάλογη με την ενέργεια που καταναλώνεται ανά κύκλο. Η **σύνθετη αντίσταση** είναι ίση με τη σύζευξη της εφαρμοζόμενης τάσης ( $E$ ) και του ρεύματος ( $I$ ) σύμφωνα με το νόμο του Ohm:

$$Z = \frac{E}{I} \quad (16)$$

$I$ : ρεύμα σε μονάδες [A]

$E$ : πηγή τάσης σε μονάδες [V]

Ο όρος σύζευξη χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το εναλλασσόμενο ρεύμα και η πηγή τάσης δεν έχουν συνήθως την ίδια γωνία φάσης. Εάν χρησιμοποιείται μόνο το πηνίο, η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι καθαρά επαγωγική:

$$Z = X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (17)$$

Όταν είναι παρούσα μόνο η αγωγιμότητα αυτού του ισοδύναμου κυκλώματος η σύνθετη αντίσταση είναι καθαρά ωμική:

$$Z = R = \frac{1}{G} \quad (18)$$

Όταν αμφότερα το πηνίο και η αγωγιμότητα είναι συνδεδεμένα, η σύνθετη αντίσταση έχει τη γενική μορφή:

$$\text{μέτρο } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (19)$$

$$\text{φάση } \theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_L}{R}\right) \quad (20)$$

Τα σημεία και οι θέσεις στο διάγραμμα σύνθετης αντίστασης μπορούν να εμφανιστούν χρησιμοποιώντας τη διανυσματική αναπαράσταση εξαιτίας της στενής σχέσης μεταξύ των δύο διαγραμμάτων. Σε ένα δεδομένο κύκλωμα με αντίσταση εισόδου ( $Z$ ), εφαρμόζοντας ένα σταθερό ρεύμα ( $I$ ) θα παράγουμε ένα σήμα τάσης ( $E$ ), σύμφωνα με το νόμο του Ohm ( $E = IZ$ ). Αυτή η τάση μπορεί να εμφανιστεί ως ένα διάνυσμα και είναι ευθέως ανάλογη προς τη σύνθετη αντίσταση  $Z$ . Έτσι, το επίπεδο σύνθετης αντίστασης μπορεί εύκολα να παρασταθεί και με την τεχνική των διανυσμάτων.

### Κανονικοποίηση

Για να ξεπεραστεί η αναγκαιότητα να σχεδιάζουμε διαγράμματα σύνθετης αντίστασης για κάθε πηνίο ξεχωριστά κανονικοποιούμε τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου και έτσι μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση του δοκιμίου ανεξάρτητα από τις ιδιότητες του πηνίου. Η επαγωγική αντίδραση κανονικοποιείται διαιρώντας με το γινόμενο της κυκλικής συχνότητας και της αυτεπαγωγής όταν το πηνίο βρίσκεται μακριά από το δοκίμιο, δηλαδή στον αέρα, και δίνεται από τον τύπο [1]:



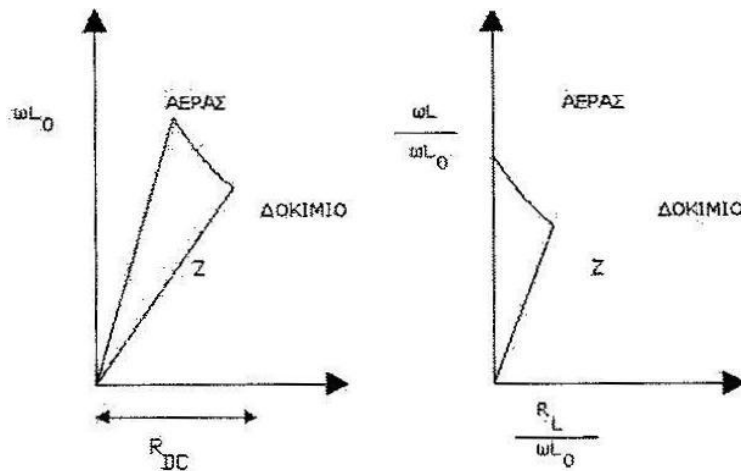
$$\frac{X_L}{X_{L0}} = \frac{\omega L}{\omega L_0} \quad (21)$$

Ο δείκτης μηδέν αναφέρεται στις τιμές του πηνίου στον αέρα.

Αντίστοιχα το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης (ωμικής) κανονικοποιείται αφαιρώντας από αυτήν την αντίσταση του καλωδίου ( $R$ ) και του σύρματος του πηνίου ( $R_{DC}$ ) και διαιρώντας με το γινόμενο  $\omega L_0$  [1].

$$\frac{R_L}{X_{L0}} = \frac{R - R_{DC}}{\omega L_0} \quad (22)$$

$R_L$ : ωμικό φορτίο λόγω των δινορρευμάτων που δημιουργούνται στο δοκίμιο.



Σχήμα 2.3. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης πριν και μετά την κανονικοποίηση.

Τα κανονικοποιημένα στοιχεία είναι αδιάστατα μεγέθη και ανεξάρτητα από την αντίδραση και την αντίσταση του πηνίου. Επηρεάζονται από τις εξής παραμέτρους [1]:

- Με μία μικρή μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας παίρνουμε μία μεγάλη μεταβολή στη σύνθετη αντίσταση. Οι μικρές μεταβολές της διαπερατότητας μπορούν να επισκιάσουν όλες τις υπόλοιπες.
- Οποιαδήποτε παράμετρος προκαλεί αύξηση στην αντίσταση της ροής των δινορρευμάτων (ρωγμές, προσμίξεις κραμάτων, θερμοκρασία) κινεί το σημείο που προσδιορίζει τη σύνθετη αντίσταση προς τα πάνω και προς το μέρος της τιμής της σύνθετης αντίστασης του πηνίου στον αέρα.
- Όσο η συχνότητα του ρεύματος είναι μεγάλη τα δινορρεύματα διεισδύουν στα επιφανειακά στρώματα. Για βαθύτερους ελέγχους χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες συχνότητες.
- Η διάμετρος του πηνίου λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τη συχνότητα. Αυτό μας είναι χρήσιμο όταν είμαστε αναγκασμένοι να χρησιμοποιούμε χαμηλή συχνότητα πρέπει να επιλέξουμε μεγαλύτερη διάμετρο πηνίου.

### Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Όλα τα υλικά έχουν μια χαρακτηριστική αντίσταση στη ροή του ηλεκτρισμού. Εκείνα με την υψηλότερη αντοχή ονομάζονται μονωτές ενώ μια ενδιάμεση κλάση των υλικών, στα οποία μόνο μία πολύ μικρή ποσότητα του ρεύματος μπορεί να ρέει, ταξινομούνται ως ημιαγωγοί. Μια τρίτη κατηγορία υλικών, στα οποία ρέουν μεγάλες ποσότητες ρεύματος, ονομάζονται αγωγοί. Οι αγωγοί, που είναι και τα περισσότερα μέταλλα, έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην επιθεώρηση δινορρευμάτων. Η σχετική αγωγιμότητα των κοινών μετάλλων και κραμάτων ποικίλει σε μία ευρεία περιοχή τιμών.

Η ικανότητα του υλικού να άγει ρεύμα μπορεί να μετρηθεί είτε με τον όρο αγωγιμότητα είτε με τον όρο αντίσταση. Στην επιθεώρηση δινορρευμάτων γίνεται συχνά χρήση της μέτρησης με βάση IACS%. Σε αυτό το σύστημα, η αγωγιμότητα του ανοπτημένου, μη κραματωμένου χαλκού έχει αξιολογηθεί αυθαίρετα σε 100% και οι αγωγιμότητες των άλλων μετάλλων και κραμάτων εκφράζονται ως ποσοστό του εν λόγω προτύπου. Έτσι, η αγωγιμότητα του μη κραματωμένου αλουμινίου βαθμολογείται 61% IACS ή 61% εκείνης του μη κραματωμένου χαλκού.

Παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα ενός μετάλλου είναι κυρίως η χημική σύνθεση, η θερμική επεξεργασία, η προκύπτουσα μικροδομή, το μέγεθος κόκκου, η σκληρότητα και οι παραμένουσες τάσεις. Έτσι τα δινορρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της χημικής σύνθεσης και διάφορων μεταλλουργικών χαρακτηριστικών που έχουν επιρροή στην αγωγιμότητα.

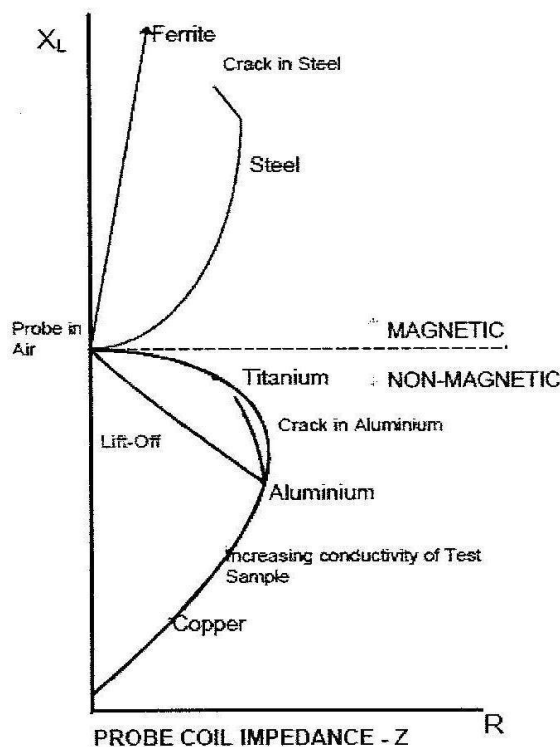
### Μαγνητική Διαπερατότητα

Σιδηρομαγνητικά μέταλλα και κράματα, όπως ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni), το κοβάλτιο (Co) και ορισμένα από τα κράματά τους, καταφέρνουν να συγκεντρώνουν τη ροή του μαγνητικού πεδίου. Έλκονται έντονα από ένα μαγνήτη ή έναν ηλεκτρομαγνήτη και έχουν εξαιρετικά υψηλές και μεταβλητές διαπερατότητες.

Η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι σταθερή για ένα δεδομένο υλικό αλλά εξαρτάται από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου που ενεργεί πάνω του. Για παράδειγμα, θεωρήστε ένα δείγμα χάλυβα που έχει απομαγνητιστεί τελείως και στη συνέχεια τοποθετείται σε ένα πηνίο. Καθώς το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται, το μαγνητικό πεδίο που σχετίζεται με το ρεύμα θα αυξηθεί. Η μαγνητική ροή εντός του χάλυβα, ωστόσο, θα αυξηθεί ταχέως αρχικά και στη συνέχεια θα σταθεροποιηθεί έτσι ώστε μία πρόσθετη αύξηση στην ισχύ του μαγνητικού πεδίου να οδηγήσει μόνο σε μια μικρή αύξηση στη μαγνητική ροή εντός του χάλυβα. Το δείγμα χάλυβα στη συνέχεια θα έχει φτάσει σε μια κατάσταση γνωστή ως μαγνητικός κορεσμός. Η καμπύλη που δείχνει τη σχέση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της έντασης της μαγνητικής ροής μέσα στον χάλυβα είναι γνωστή ως καμπύλη μαγνήτισης. Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού είναι η αναλογία μεταξύ της δύναμης του μαγνητικού πεδίου και του ποσού της μαγνητικής ροής εντός του υλικού.

Επειδή τα δινορρεύματα επάγονται από ένα κυμαινόμενο μαγνητικό πεδίο, η διαπερατότητα του υλικού που επιθεωρείται επηρεάζει έντονα την απόκριση των δινορρευμάτων. Κατά συνέπεια, οι τεχνικές και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση μαγνητικών υλικών διαφέρουν από εκείνες για την επιθεώρηση μη μαγνητικών υλικών. Ωστόσο, οι ίδιοι παράγοντες που επηρεάζουν την αγωγιμότητα του υλικού, η χημική σύνθεση, η σκληρότητα, οι παραμένουσες τάσεις

και οι ρωγμές, επηρεάζουν επίσης και τη μαγνητική διαπερατότητα. Έτσι, η επιθεώρηση με δινορρεύματα μπορεί να εφαρμοστεί σε μαγνητικά και μη μαγνητικά υλικά. Αν και οι μαγνητικοί αγωγοί έχουν και αυτοί μία ηλεκτρική αγωγιμότητα που μπορεί να αλλάξει με αλλαγή των συνθηκών του υλικού, οι μεταβολές διαπερατότητας έχουν γενικά μια πολύ μεγαλύτερη επίδραση στα δινορρεύματα.



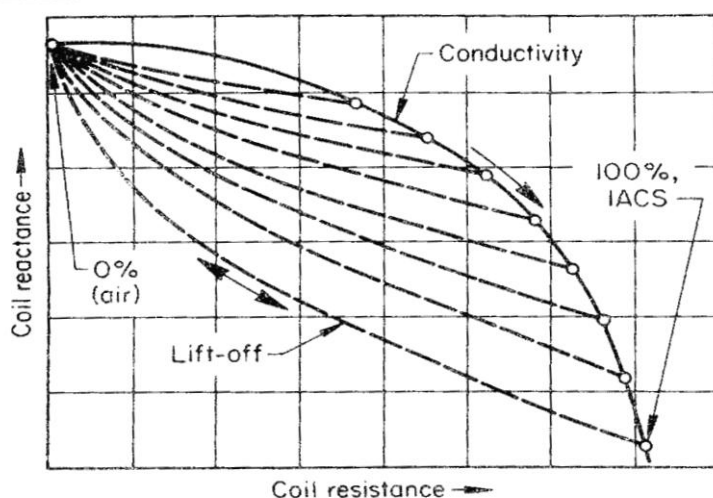
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μαγνητικά και μη μαγνητικά υλικά.

### Παράγοντας Ανύψωσης (Lift-off factor)

Όταν ένα πηνίο ελέγχου, που είναι συνδεδεμένο σε ένα κατάλληλο όργανο δινορρευμάτων, ενεργοποιείται στον αέρα, παρατηρείται κάποια απόκριση ακόμη και αν δεν υπάρχει αγωγός υλικό στη γειτονιά του πηνίου. Η αρχική ένδειξη θα αλλάξει καθώς το πηνίο κινείται προς έναν αγωγό. Επειδή το πεδίο είναι ισχυρότερο κοντά στο πηνίο, η απεικονιζόμενη στο όργανο αλλαγή στην πράξη θα εξακολουθήσει να αυξάνεται έως ότου η σπείρα είναι ακριβώς πάνω στον αγωγό. Αυτές οι αλλαγές στην απόκριση σε σχέση με τις μεταβολές στην απόσταση μεταξύ του πηνίου και του αγωγού (ή του τμήματος που πρόκειται να επιθεωρηθεί) καλούνται επίδραση ανύψωσης.

Τα σήματα από την επίδραση ανύψωσης μπορεί να είναι τόσο έντονα ώστε να υπερκαλύπτουν τα σήματα που προσδιορίζουν την ανίχνευση των ατελειών. Αυτό θα μας οδηγούσε σε λανθασμένη λήψη αποτελεσμάτων και συνεπώς, είναι απαραίτητο να διατηρηθεί μια σταθερή απόσταση μεταξύ του πηνίου και του αντικειμένου που επιθεωρείται. Η επίδραση ανύψωσης αντιπροσωπεύει επίσης και την ακραία δυσκολία στην επιθεώρηση τμημάτων που έχουν πολύπλοκα ή ακανόνιστα σχήματα.

Η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης του πηνίου με την ανύψωση μπορεί να φανεί από το διάγραμμα σύνθετης αντίστασης στο Σχήμα 2.5. Όταν το πηνίο αιωρείται στον αέρα μακριά από τον αγωγό, η σύνθετη αντίσταση είναι σε ένα σημείο στο άνω αριστερό άκρο της καμπύλης (0% αέρα). Καθώς το πηνίο πλησιάζει τον αγωγό, η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται στην κατεύθυνση που υποδεικνύεται με τις διακεκομμένες γραμμές ώσπου το πηνίο είναι τελικά σε επαφή με τον αγωγό. Όταν έρθουν σε επαφή, η σύνθετη αντίσταση είναι στο σημείο που αντιστοιχεί στην περιοχή που επιθεωρείται και είναι η αγωγιμότητά του. Το γεγονός ότι η καμπύλη ανύψωσης προσεγγίζει την καμπύλη αγωγιμότητας σε κάποια γωνία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα όργανα για τον διαχωρισμό σημάτων ανύψωσης από εκείνα που προκύπτουν από διακυμάνσεις της αγωγιμότητας ή κάποια άλλη παράμετρος ενδιαφέροντος.



Σχήμα 2.5. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης που δείχνει την αγωγιμότητα και τις καμπύλες ανύψωσης.

Η απόσταση του πηνίου από το δοκίμιο είναι η πιο δύσκολη παράμετρος στους ελέγχους με δινορρεύματα. Τα όργανα μέτρησης και καταγραφής ECT έχουν πεπερασμένη απόκριση συχνότητας η οποία περιορίζει την ταχύτητα ελέγχου σε 0,25m/sec. Τα περισσότερα όργανα έχουν ανοχή στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης πηνίου μεταξύ 10 και 200 Ω. Παρόλο που η ανύψωση μπορεί να προκαλεί προβλήματα σε πολλές εφαρμογές, μπορεί επίσης να είναι και χρήσιμη. Για παράδειγμα, με τη χρήση της επίδρασης ανύψωσης, τα όργανα δινορρευμάτων είναι άριστα για την μέτρηση του πάχους μη αγωγίμων επικαλύψεων, όπως χρωμάτων και ανοδιώμενων επιχρισμάτων, για τα μέταλλα.

#### Παράγοντας Πλήρωσης (Fill factor)

Σε ένα εξωτερικό πηνίο (δηλαδή σε πηνίο που περιβάλλει έναν αγωγό-probe), μια παράμετρος συγκρίσιμη με την επίδραση ανύψωσης είναι γνωστή ως παράγοντας πλήρωσης. Είναι ένα μέτρο του πόσο καλά ο αγωγός που επιθεωρείται «γεμίζει» το πηνίο. Όπως και με την ανύψωση, αλλαγές στον παράγοντα πλήρωσης, που προκύπτουν από μεταβολές στην εξωτερική διάμετρο, θα πρέπει να ελέγχονται γιατί μικρές αλλαγές μπορούν να δώσουν λανθασμένες ενδείξεις. Οι καμπύλες ανύψωσης που φαίνονται στο Σχήμα 2.5 είναι παρόμοιες με εκείνες του παράγοντα πλήρωσης. Για δεδομένο παράγοντα πλήρωσης (ή ανύψωσης), η καμπύλη της αγωγιμότητας θα μετατοπιστεί σε μία νέα θέση όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.5. Ο παράγοντας

πλήρωσης μπορεί μερικές φορές να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για τον έλεγχο διαφοροποιήσεων στην εξωτερική διάμετρο των αγωγών. Συμβολίζεται με  $n$ , πρέπει να είναι πάντα μικρότερος του 1 και δίνεται από τον τύπο [9]:

Για περιβάλλοντα πηνία (probe):

$$n = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (23)$$

$d$ : διάμετρος του μεταλλικού αγωγού σε [m]

$D$ : διάμετρος του πηνίου σε [m]

Για εσωτερικά πηνία, δηλαδή για πηνία που εισέρχονται μέσα σε ένα αγωγό (bobbin coil), ισχύει ο ίδιος τύπος αλλά με  $d$  τη διάμετρο του πηνίου και με  $D$  τη διάμετρο του αγωγού [9].

#### Φαινόμενο άκρου ή πέρατος (Edge effect)

Όταν ένα πηνίο ελέγχου φτάνει κοντά στο άκρο ενός αντικειμένου, τα δινορρέυματα στρεβλώνονται επειδή είναι ανίκανα να ρέουν πέρα από την άκρη του τμήματος. Αυτό το αποτέλεσμα της στρέβλωσης είναι γνωστό ως φαινόμενο πέρατος. Επειδή το μέγεθος της επίδρασης αυτής είναι πολύ μεγάλο, περιορίζεται ο έλεγχος κοντά στα άκρα. Σε αντίθεση με την επίδραση ανύψωσης, λίγα μπορούν να γίνουν για την εξάλειψη των επιπτώσεων του άκρου. Μικρότερα πηνία θα μειώσουν κάπως την επίδραση αλλά υπάρχουν πρακτικά όρια στα μεγέθη των πηνίων. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθεροποιητικός εξοπλισμός για την αποφυγή του φαινομένου καθώς και ανεπιθύμητων κλυδωνισμών του πηνίου. Όμως ο μηχανισμός σταθεροποίησης κοστίζει συχνά πιο πολύ και από τον ίδιο τον εξοπλισμό ελέγχου. Σε γενικές γραμμές δεν είναι σκόπιμο να επιθεωρηθεί ένα τμήμα πιο κοντά από το 1/8 του άκρου του.

#### Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect)

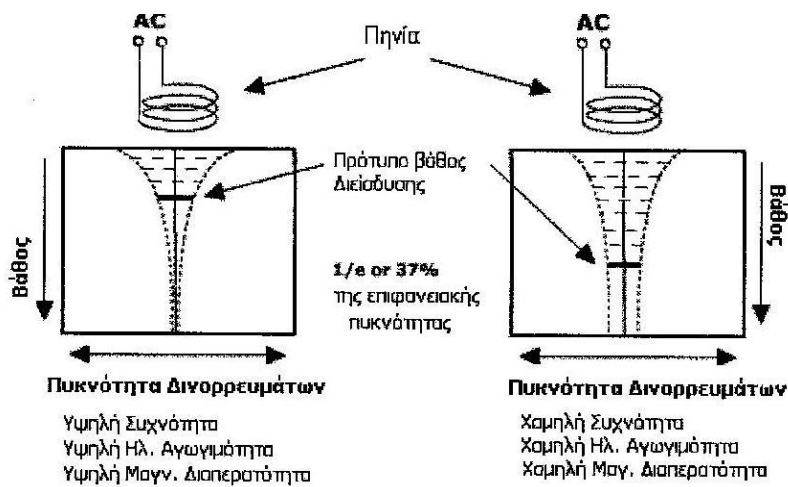
Εκτός από την γεωμετρική σχέση που υπάρχει μεταξύ του πηνίου ελέγχου και του αντικειμένου που πρόκειται να επιθεωρηθεί, το πάχος και το σχήμα του ίδιου του αντικειμένου θα επηρεάσει την απόκριση των δινορρευμάτων. Τα δινορρέυματα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το τμήμα που πρόκειται να επιθεωρηθεί, αντίθετα, είναι πυκνότερα στην επιφάνεια αμέσως κάτω από το πηνίο και γίνονται προοδευτικά λιγότερο πυκνά όσο διεισδύουν μέσα στο υλικό. Αυτό είναι γνωστό ως επιδερμικό φαινόμενο. Σε κάποια απόσταση κάτω από την επιφάνεια του, σε ένα παχύ τμήμα, δε θα υπάρχουν ουσιαστικά καθόλου δινορρέυματα. Η ευαισθησία στην ανίχνευση εξαρτάται από την πυκνότητα των δινορρευμάτων στην περιοχή των ατελειών. Ο μέγιστος βαθμός ευαισθησίας επιτυγχάνεται όταν η διεύθυνση των δινορρευμάτων είναι κάθετη στην ατέλεια ώστε να αναγκαστούν να την παρακάμψουν.

Το Σχήμα 2.6 δείχνει πώς τα δινορρέυματα μεταβάλλονται σε συνάρτηση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια. Το βάθος στο οποίο η πυκνότητα δινορρευμάτων έχει μειωθεί σε ένα επίπεδο περίπου 37% της πυκνότητας της επιφάνειας ορίζεται ως πρότυπο βάθος διείσδυσης ( $\delta$ ). Παρά το γεγονός ότι τα δινορρέυματα εισχωρούν

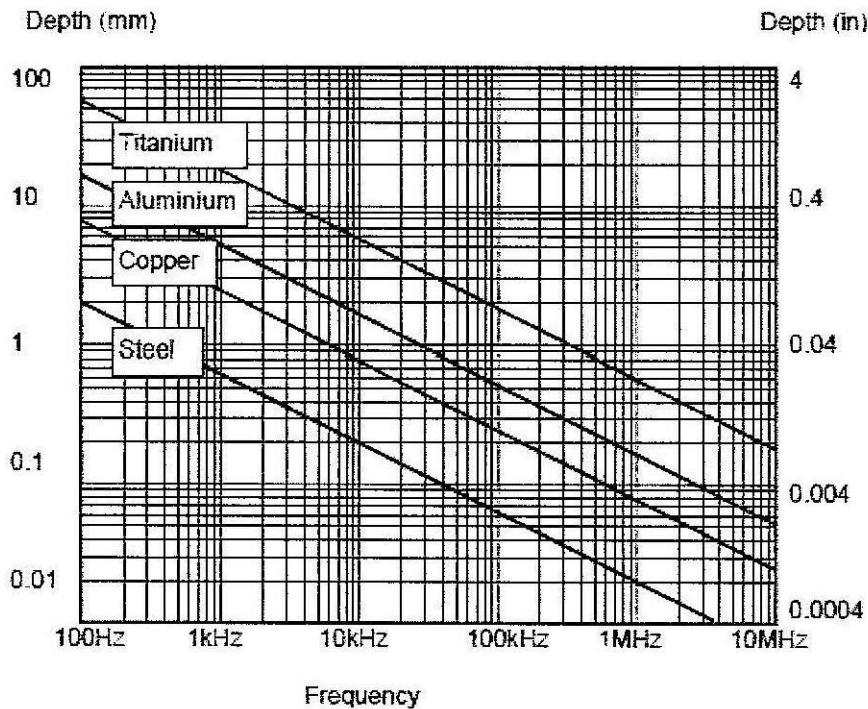
βαθύτερα από το πρότυπο βάθος διείσδυσης, μειώνονται πολύ γρήγορα σε μεγαλύτερα βάθη. Έτσι στο διπλάσιο του βάθους διείσδυσης (2δ) βρισκόμαστε στο 13,5% της επιφανειακής πυκνότητας ενώ στο τριπλάσιο βρισκόμαστε στο 5%. Γενικά τα δινορρέυματα έχουν μεγαλύτερη μείωση από την προβλεπόμενη που περιγράφει το επιδερμικό φαινόμενο. Το πρότυπο βάθος διείσδυσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο [9]:

$$\delta = (\pi f \sigma \mu)^{-\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Αυτό το βάθος εξαρτάται από την αγωγιμότητα, τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (για μη μαγνητικά υλικά το  $\mu$  είναι ίσο με τη μονάδα) και τη συχνότητα του ρεύματος μαγνήτισης. Το βάθος διείσδυσης μειώνεται άμεσα με αυξήσεις στην αγωγιμότητα, στη διαπερατότητα ή στη συχνότητα.



Σχήμα 2.6. Βάθος διείσδυσης σε δύο διαφορετικές καταστάσεις.



Σχήμα 2.7. Πρότυπο βάθος διείσδυσης σε συνάρτηση με την αγωγιμότητα και την επιλεγμένη συχνότητα της επιθεώρησης.

Αν το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο από το πάχος του υλικού που πρόκειται να επιθεωρηθεί, η απόκριση των δινορρευμάτων θα σχετιστεί με το πάχος του υλικού. Όπου αξιολογούνται ιδιότητες εκτός από το πάχος, είναι αναγκαίο να επιλεγεί μία συχνότητα δοκιμής που να περιορίζει τα δινορρεύματα μέσα στο πάχος του τμήματος.

Θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα δινορρεύματα δε σταματούν στο πρότυπο βάθος διείσδυσης αλλά συνεχίζουν για κάποια απόσταση πέρα από αυτό. Κανονικά, ένα μέρος που επιθεωρείται πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον  $2\delta$  ή  $3\delta$  πριν το πάχος του τμήματος σταματήσει να έχει μια επίδραση στην απόκριση των δινορρευμάτων. Με τη σωστή βαθμονόμηση ενός οργάνου δινορρευμάτων, είναι δυνατό να μετρηθεί το πάχος λόγω της σχέσης που έχει με τα δινορρεύματα. Η μέτρηση του πάχους με την μέθοδο δινορρευμάτων είναι περισσότερο ακριβής σε λεπτές τομές από ό,τι σε παχιές τομές.

### Συχνότητα δοκιμής

Οι συχνότητες λειτουργίας του ECT κυμαίνονται από 5Hz έως 10MHz. Γενικά οι χαμηλές συχνότητες χρησιμοποιούνται για μεγάλα βάθη διείσδυσης ενώ οι υψηλές συχνότητες για πολύ λεπτά υλικά με χαμηλή αγωγιμότητα. Στην επιθεώρηση μη μαγνητικών υλικών συνήθως χρησιμοποιούνται συχνότητες μερικών kHz. Σε γενικές γραμμές, οι χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση μαγνητικών υλικών. Ωστόσο, η πραγματική συχνότητα που χρησιμοποιείται σε μια δεδομένη επιθεώρηση θα εξαρτηθεί από το πάχος του υλικού, το επιθυμητό πρότυπο βάθος διείσδυσης, την απαιτούμενη ευαισθησία ή ανάλυση και το σκοπό του ελέγχου.

Η επιλογή της συχνότητας ελέγχου συνήθως περιλαμβάνει συμβιβασμούς. Για παράδειγμα, η διείσδυση θα πρέπει να είναι επαρκής για την επίτευξη τυχόν υπο-

επιφανειακών ελαττωμάτων που πρέπει να ανιχνευθούν. Δυστυχώς, όσο η συχνότητα ελαττώνεται, η ευαισθησία σε μικρές ρωγμές μειώνεται και αυτή. Συνεπώς, σε μια επιθεώρηση επιλέγεται όσο το δυνατόν υψηλότερη συχνότητα που εξακολουθεί να είναι συμβατή με το απαιτούμενο βάθος διείσδυσης. Η επιλογή είναι σχετικά απλή όταν απαιτείται ανίχνευση μόνο επιφανειακών ατελειών, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά MHz. Όταν απαιτείται ανίχνευση σχετικά βαθύτερων ελαττωμάτων, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλές συχνότητες και η ευαισθησία στην ανίχνευση μικρών ρωγμών θυσιάζεται.

Γενικά, στον έλεγχο σωλήνων η επιλογή της συχνότητας βασίζεται αφενός στον ικανοποιητικό διαχωρισμό φάσης μεταξύ των ατελειών από άλλες ανεπιθύμητες ενδείξεις (π.χ. σήματα λόγω κλυδωνισμού) και αφετέρου στο διαχωρισμό μεταξύ των σημάτων από εσωτερικές και εξωτερικές ατέλειες. Συνηθίζεται όμως σε μία επιθεώρηση να ακολουθείται κάποια προδιαγεγραμμένη διαδικασία. Για παράδειγμα κατά ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) ο έλεγχος με διαφορεική κεφαλή απαιτεί τέτοια ρύθμιση των παραμέτρων του οργάνου και κατά συνέπεια και της συχνότητας ώστε το σήμα από την κίνηση της κεφαλής (κλυδωνισμός) να παρίσταται οριζόντια στην οθόνη, η φάση του σήματος από μία διαμετρής οπή να απέχει περίπου 45° από την οριζόντια κατά την ωρολογιακή φορά και η ένδειξη από ένα σφάλμα στο εξωτερικό του σωλήνα βάθους 20% του πάχους του τοιχώματος να απέχει από 50° – 90° από το σήμα της οπής κατά την ωρολογιακή φορά [15].

Η συχνότητα αυτή ονομάζεται  $f_{90}$  και δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο [15]:

$$f_{90} = \frac{516}{(\sigma d^2)} \text{ [kHz]} \quad (25)$$

$\sigma$  : αγωγιμότητα του υλικού σε IACS%

$d$ : πάχος του τοιχώματος του σωλήνα σε [mm]

Για τον έλεγχο με απόλυτο πηνίο απαιτούνται κατά ASME κάποιες ανάλογες ρυθμίσεις αλλά συνήθως αυτό γίνεται στη μισή συχνότητα σε σχέση με το διαφορικό πηνίο. Εάν πρόκειται για σωλήνες εναλλακτών θερμότητας γίνεται συχνά έλεγχος σε πολλαπλές συχνότητες για την καταστολή σημάτων από τις αυλακοφόρες πλάκες στήριξης όπου χρησιμοποιείται το 1/3 ή και τα 2/3 της κύριας συχνότητας ή από κυρτώσεις του σωλήνα όπου χρησιμοποιείται πολύ μεγαλύτερη συχνότητα [15].

#### Τύποι Ατελειών ή Ασυνεχειών

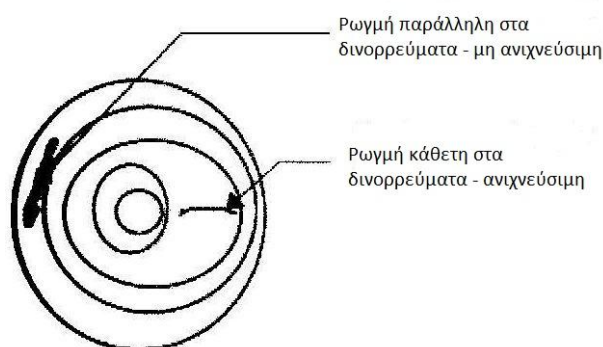
Ανεξάρτητα από τους περιορισμούς, η πλειοψηφία των ατελειών μπορεί να ανιχνευθεί με ECT σε υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Μερικές από τις ασυνέχειες που εύκολα ανιχνεύονται είναι ραφές, περιτυλίξεις, αυλάκια, ρωγμές, ανοιχτές συγκολλήσεις, κακές συγκολλήσεις, ευθυγραμμισμένες συγκολλήσεις, μαύρο ή γκρι διεισδυτικό οξείδιο συγκόλλησης, οπές, επιφανειακά ή εσωτερικά.

Βασικά, οποιαδήποτε ασυνέχεια που μεταβάλλει αισθητά τη φυσιολογική ροή των δινορρευμάτων μπορεί να ανιχνευτεί με ECT (Σχήμα 2.8). Στην επιθεώρηση με εξωτερικό πηνίο είτε στερεών κυλίνδρων είτε σωλήνων, οι επιφανειακές ασυνέχειες που είναι κυρίως διαμήκεις και ακτινικές ανιχνεύονται εύκολα. Όταν οι ίδιες



ασυνέχειες βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου που επιθεωρείται και σε προοδευτικά μεγαλύτερα βάθη τότε γίνονται όλο και πιο δύσκολα ανιχνεύσιμες και μπορούν να ανιχνευθούν με εξειδικευμένης χρήσης εξοπλισμό.

Από την άλλη πλευρά, στρωτές ασυνέχειες οι οποίες συμβαίνουν σε συγκολλήσεις σωλήνων δεν μπορούν να μεταβάλλουν τη ροή των δινορρευμάτων αρκετά ώστε να ανιχνευθούν. Μια παρόμοια δυσκολία θα μπορούσε να προκύψει στην ανίχνευση μιας λεπτής επίπεδης ασυνέχειας που είναι προσανατολισμένη ουσιαστικά κάθετα προς τον άξονα του κυλίνδρου.



Σχήμα 2.8. Πορεία των δινορρευμάτων για παράλληλη και κάθετη σε αυτά ασυνέχεια.

## 2.3 ΒΑΣΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

### 2.3.1 Πηνία – Μετρητικές κεφαλές

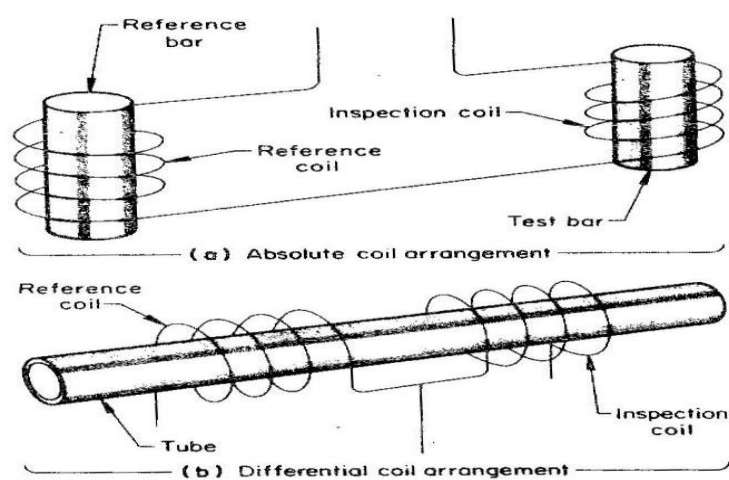
Τα πηνία επιθεώρησης είναι ένα ουσιαστικό μέρος κάθε συστήματος ελέγχου με δινορρεύματα. Το σχήμα του πηνίου ελέγχου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το σκοπό της επιθεώρησης και το σχήμα του αντικειμένου που επιθεωρείται. Κατά την επιθεώρηση ατελειών, όπως ρωγμές ή ραφές, είναι ουσιώδες η ροή των δινορρευμάτων να είναι όσο το δυνατόν κάθετη προς τις ατέλειες προκειμένου να ληφθεί από την ασυνέχεια μία μέγιστη απόκριση (Σχήμα 2.8). Εάν η ατέλεια είναι παράλληλη προς τη ροή των δινορρευμάτων, θα υπάρξει μικρή (ή καθόλου) παραμόρφωση των ρευμάτων και επομένως πολύ μικρή αντίδραση στο πηνίο ελέγχου.

Από τη σχεδόν άπειρη ποικιλία πηνίων που χρησιμοποιούνται στον ECT, τα εξωτερικά πηνία (probe coils) και τα εσωτερικά πηνία (bobbin coils) είναι τα πιο συνήθη. Για την επιθεώρηση σωληνώσεων ή ράβδων, χρησιμοποιούνται σε γενικές γραμμές τα εξωτερικά πηνία τόσο λόγω της συμπληρωματικής διαμόρφωσης όσο λόγω των ταχυτήτων που μπορούν να ληφθούν με αυτόν τον τύπο πηνίου. Ωστόσο, τα εξωτερικά πηνία είναι ευαίσθητα μόνο σε ασυνέχειες που είναι παράλληλες προς τον άξονα του σωλήνα ή της ράβδου. Τα πηνία αυτά είναι γενικά ικανοποιητικά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή διότι, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας κατασκευής, οι περισσότερες ασυνέχειες σε σωληνώσεις είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα. Εάν είναι απαραίτητο να εντοπιστούν ασυνέχειες που δεν είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πηνίο τύπου probe και είτε το πηνίο είτε

το αντικείμενο που επιθεωρείται θα πρέπει να περιστραφεί κατά τη σάρωση. Για την ανίχνευση ατελειών στην εσωτερική επιφάνεια ενός σωλήνα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πηνίο τύπου bobbin. Το πηνίο τύπου bobbin σε συνεργασία με ένα περιβάλλον πηνίο θα ήταν πολύ πιο ευαίσθητα σε ασυνέχειες που είναι παράλληλες προς τον άξονα του σωλήνα.

### Πολλαπλά Πηνία

Σε πολλές εφαρμογές ECT χρησιμοποιούνται δύο πηνία. Τα δύο πηνία είναι κανονικά συνδεδεμένα σε μία διάταξη σε σειρά και απέναντι έτσι ώστε όταν οι αντιστάσεις τους είναι ίδιες να μην υπάρχει έξοδος (απόκριση) από το ζεύγος. Ζεύγη πηνίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε απόλυτες είτε σε διαφορικές διατάξεις (Σχήμα 2.9). Στην απόλυτη διάταξη, ένα δοκίμιο τοποθετείται στο ένα πηνίο έτσι ώστε το δεύτερο πηνίο που είναι σε σειρά και απέναντί του να χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση.



Σχήμα 2.9. Απόλυτη και διαφορική διάταξη πολλαπλών πηνίων.

Με τον τρόπο αυτό τα πηνία συγκρίνουν το πρότυπο με το άγνωστο αντικείμενο που επιθεωρείται. Οι διαφορές μεταξύ των δύο πηνίων υποδεικνύονται με ένα κατάλληλο μέσο. Διατάξεις αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ταξινόμησης.

Σε πολλές εφαρμογές, μία απόλυτη διάταξη πηνίου είναι ανεπιθύμητη. Για παράδειγμα, στην επιθεώρηση σωλήνων, μία απόλυτη διάταξη θα υποδείκνυε μεταβολές διαστάσεων τόσο στην εξωτερική διάμετρο όσο και στο πάχος του τοιχώματος ακόμη και αν οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία διάταξη διαφορικών πηνίων. Εδώ, τα δύο πηνία συγκρίνουν ένα τμήμα του σωλήνα με ένα γειτονικό τμήμα του ίδιου σωλήνα. Όταν τα δύο τμήματα είναι ίδια, δεν υπάρχει έξοδος από το ζεύγος πηνίων και συνεπώς καμία ένδειξη στο όργανο δινορρευσμάτων. Σταδιακές μεταβολές διαστάσεων εντός του σωλήνα ή μεικτές μεταβολές μεταξύ των επιμέρους σωλήνων δεν ενδείκνυνται, ενώ οι ασυνέχειες, που κανονικά συμβαίνουν απότομα, είναι πολύ εμφανείς. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να έχουμε ένα σύστημα ελέγχου το οποίο είναι «ευαίσθητο» σε ρωγμές και σχετικά «αναίσθητο» σε μεταβολές που κανονικά δεν είναι ενδιαφέρουσες.

Γενικά έχουμε τους εξής τύπους μετρητικών κεφαλών [1]:

- *Κεφαλές μονού πηνίου (absolute)*: Αυτές αποτελούνται από έναν ενισχυτή που τροφοδοτεί ένα μονό πηνίο μέσω ενός αντιστάτη. Η μεταβολή στην τάση παρακολουθείται με ενισχυτή ενός άκρου. Έχουν το πλεονέκτημα να ανιχνεύουν και απότομες (τμηματική διάβρωση, πορώδες) και βαθμιαίες μεταβολές (ομοιόμορφη διάβρωση, μείωση πάχους), με μία απλή επισκόπηση να διαχωρίζονται τα συνδυασμένα σήματα και να δείχνουν το συνολικό μήκος της ατέλειας. Είναι όμως ευαίσθητες σε μεταβολές της θερμοκρασίας και στον κλυδωνισμό.
- *Διαφορικές κεφαλές (differential)*: Το σήμα προκύπτει από την αφαίρεση της τάσης του ενός πηνίου από το άλλο. Έχουν το πλεονέκτημα να μην επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και από τον κλυδωνισμό αλλά δεν ανιχνεύουν βαθμιαίες μεταβολές, βλέπουν μόνο την αρχή και το τέλος των ελαττωμάτων μεγάλου μήκους και παράγουν μερικές φορές δύσκολά στην ερμηνεία σήματα.
- *Κεφαλές εκπομπής-λήψης ή ανάκλασης (pickup ή send-receive)*: Εδώ ο μετατροπέας με τον αισθητήρα συνδέονται μέσω μαγνητικού πεδίου. Οι αισθητήρες μπορεί να είναι πηνία ή Hall ή Giant Magneto Resistance (GMR).
- *Διαφορικές κεφαλές εκπομπής-λήψης*: Συνδυασμός των δύο παραπάνω.

### Επιλογή Πηνίου

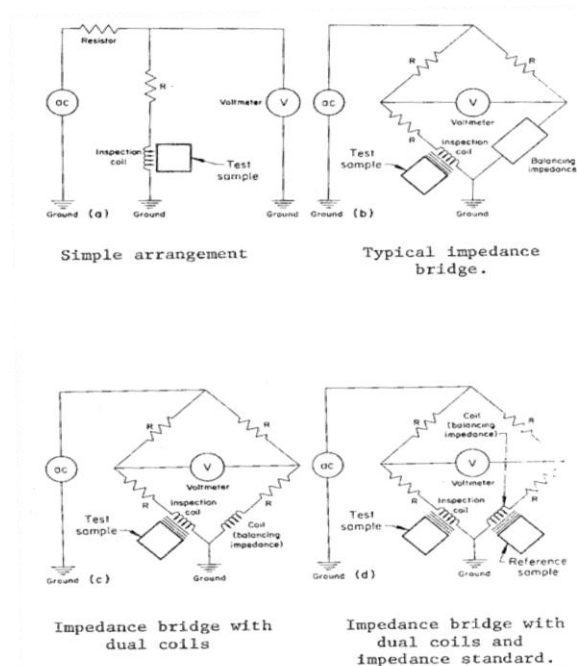
Τα πηνία ελέγχου υπάρχουν σε μια ποικιλία μεγεθών και σχημάτων. Η επιλογή ενός πηνίου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τον τύπο της ασυνέχειας. Για παράδειγμα, όταν ένα εξωτερικό πηνίο χρησιμοποιείται για να επιθεωρήσει μία σωλήνωση για μικρές ασυνέχειες, η καλύτερη ανάλυση επιτυγχάνεται με ένα κοντό πηνίο.

Εναλλακτικά, ένα κοντό πηνίο έχει το μειονέκτημα ότι είναι ευαίσθητο στη θέση που έχει το αντικείμενο προς επιθεώρηση μέσα στο πηνίο. Μεγαλύτερα πηνία δεν είναι τόσο ευαίσθητα στην θέση αυτή, αλλά δεν είναι και τόσο αποτελεσματικά στην ανίχνευση πολύ μικρών ασυνεχειών. Μικρής διαμέτρου πηνία τύπου probe έχουν καλύτερη ανάλυση από αυτά μεγαλύτερης διαμέτρου αλλά είναι πιο δύσκολα στο χειρισμό και πιο ευαίσθητα στις μεταβολές ανύψωσης (lift-off).

### 2.3.2 Θεωρία Οργάνων ECT

Στο Σχήμα 2.10 (a) παρουσιάζεται ένα απλό όργανο δινορρευμάτων του οποίου η τάση στα άκρα του πηνίου παρακολουθείται. Αυτό το κύκλωμα είναι κατάλληλο για τη μέτρηση μεγάλων μεταβολών ανύψωσης, στην περίπτωση που η ακρίβεια της μέτρησης δεν είναι πολύ σημαντική. Ένα κύκλωμα σχεδιασμένο για μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 (b). Το όργανο αυτό αποτελείται από μία πηγή σήματος και μια γέφυρα (που αποτελείται από μία σύνθετη αντίσταση, τρεις αντιστάσεις και ένα πηνίο ελέγχου, το οποίο είναι το ένα σκέλος και η σύνθετη αντίσταση εξισορρόπησης είναι το άλλο σκέλος). Οι διαφορές στην τάση μεταξύ των δύο σκελών της γέφυρας μετράται από ένα βολτόμετρο AC (alternating current - εναλλασσόμενο ρεύμα). Η σύνθετη αντίσταση εξισορρόπησης στο σκέλος απέναντι από το πηνίο ελέγχου μπορεί εναλλακτικά να είναι ένα πανομοιότυπο πηνίο με το πηνίο ελέγχου ή μπορεί να έχει ένα πρότυπο δείγμα κοντά στο πηνίο, σύμφωνα με το

Σχήμα 2.10 (c). Στο τελευταίο, αν όλα τα άλλα συστατικά στη γέφυρα ήταν πανομοιότυπα, θα υπήρχε μόνο ένα σήμα όταν η σύνθετη αντίσταση του πηνίου ελέγχου θα απέκλινε από το πρότυπο.



Σχήμα 2.10. Κυκλώματα από τυπικά όργανα διανορευμάτων.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για την επίτευξη ισορροπίας μίας ηλεκτρονικής γέφυρας. Όπως για παράδειγμα μεταβάλλοντας τις τιμές της αντίστασης του αντιστάτη στο άνω μέρος της γέφυρας και αυτής που είναι σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση εξισορρόπησης. Οι πιο ακριβείς γέφυρες μπορούν να μετρήσουν την απόλυτη τιμή της σύνθετης αντίστασης εντός του 0,01% σφάλματος. Ωστόσο, στον ECT δεν είναι τόσο σημαντικό το πώς μία γέφυρα είναι ισορροπημένη αλλά το πώς μία γέφυρα **δεν** είναι ισορροπημένη. Λόγω της επίδρασης των ανεπιθύμητων μεταβλητών, ο ECT σπάνια πραγματοποιείται με τη γέφυρα ισορροπημένη.

Σε μερικές εφαρμογές είναι περισσότερο επιθυμητό να μετρηθεί η φάση και όχι το μέγεθος της διαφοράς τάσεως. Για παράδειγμα, το μέτρο και η φάση της τάσης μιας μη ισορροπημένης γέφυρας ποικίλει σε συνάρτηση της αγωγιμότητας και της ανύψωσης.

Έτσι, είναι δυνατόν να μετρηθεί η μετατόπιση της φάσης ως συνάρτηση της αγωγιμότητας αλλά θα είναι σχετικά «αναίσθητη» σε αλλαγές της ανύψωσης, που είναι η συνήθης μέθοδος μέτρησης φάσης. Από την άλλη μεριά, το μέτρο μπορεί να μετρηθεί σε συνάρτηση της ανύψωσης αλλά θα είναι σχετικά «αναίσθητο» σε αλλαγές της αγωγιμότητας. Έτσι, η μη-ισορροπημένη γέφυρα μπορεί να λειτουργήσει ως ένα δίκτυο αποκωδικοποίησης για το διαχωρισμό των δύο παραμέτρων.

Η θερμοκρασιακή σταθερότητα είναι επίσης ένα πρόβλημα όταν η γέφυρα δεν είναι ισορροπημένη. Όταν η γέφυρα είναι ισορροπημένη και δύο αντίστοιχα στοιχεία στα αντίθετα σκέλη της γέφυρας επηρεάζονται ακριβώς με τον ίδιο συντελεστή θερμοκρασίας, η γέφυρα παραμένει σε ισορροπία. Αλλά όταν η γέφυρα λειτουργεί σε

μια ανισόρροπη κατάσταση, η θερμική μετατόπιση στα στοιχεία της γέφυρας αποτυγχάνει να τη φέρει σε ισορροπία σε ποσοστό ανάλογο προς το ποσοστό της ανισορροπίας.

Ένας άλλος περιορισμός για τη μη ισορροπημένη γέφυρα είναι η δυσκολία στην εξεύρεση της κατάλληλης ισορροπίας. Υπάρχουν πολλές κακές επιλογές για τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς και οι λίγες καλές επιλογές είναι δύσκολο να εντοπιστούν όταν μόνο ένα μέτρο χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης. Ένας άλλος τύπος γέφυρας είναι η γέφυρα επαγωγής, στην οποία το σήμα ισχύος μετατρέπεται σε μια σύζευξη ενός πηνίου ελέγχου και ενός πηνίου αναφοράς.

Επιπλέον, ολόκληρο το σύστημα ισοζυγίου αυτεπαγωγής τοποθετείται σε πηνίο τύπου probe. Ο ανιχνευτής αποτελείται από ένα μεγάλο πηνίο πομπού ή οδηγό και δύο μικρά πηνία ανιχνευτές ή pickup, τυλίγονται σε αντίθετες κατευθύνσεις ως κατοπτρικά είδωλα η μία στην άλλη. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτεί το μεγάλο πομπού ή πηνίο οδήγησης για να παραχθεί ένα πεδίο. Εάν το πηνίο πομπού δεν είναι στη γειτονιά του αγωγού τότε οι δύο ανιχνευτές ή pickup πηνία ανιχνεύουν την ίδια περιοχή. Δεδομένου ότι τυλίγονται αντίθετα, το καθαρό σήμα θα είναι μηδέν. Εάν ωστόσο το ένα άκρο του πηνίου τύπου probe τοποθετηθεί κοντά σε μια μεταλλική επιφάνεια, το πεδίο θα είναι διαφορετικό στα δύο άκρα του ανιχνευτή και μια καθαρή τάση θα εμφανιστεί κατά πλάτος των δύο πηνίων. Το πεδίο που προκύπτει είναι το άθροισμα του εκπεμπόμενου σήματος, το οποίο είναι συνέχεια παρόν, καθώς και του ανακλώμενου σήματος λόγω της παρουσίας του αγωγού (η μεταλλική επιφάνεια). Η ένταση του εκπεμπόμενου σήματος μειώνεται ταχέως καθώς η απόσταση μεταξύ του πηνίου και του αγωγού αυξάνεται και το ανακλώμενο κύμα κάνει το ίδιο. Ο ανιχνευτής ή το pickup πηνίο που είναι πλησιέστερα του αγωγού ανιχνεύει αυτό το ανακλώμενο κύμα αλλά το άλλο πηνίο εξόδου (το πηνίο αναφοράς) δεν κάνει το ίδιο επειδή το πλάτος του κύματος έχει μειωθεί σημαντικά με την απόσταση από την ανακλαστική επιφάνεια του μετάλλου στον πίσω ανιχνευτή ή πηνίο εξόδου.

Το μέτρο και η φάση που λαμβάνονται για ένα σύστημα όπως αυτό είναι παρόμοια με αυτά του συστήματος μιας γέφυρας αντιστάθμισης με το πηνίο αναφοράς στον αέρα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των μεταβολών της θερμοκρασίας του ανιχνευτή μπορούν να εξαλειφθούν εντελώς από τη μετατόπιση των μετρήσεων φάσης.

Ένα άλλο σύστημα μετρήσεων δινορρευσμάτων είναι μέσω μετάδοσης, στο οποίο ένα σήμα μεταδίδεται από ένα πηνίο μέσω ενός μετάλλου και ανιχνεύεται από ένα πηνίο στην αντίθετη πλευρά του μετάλλου-δοκιμίου. Εάν η απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων είναι σταθερή και τα κυκλώματα οδήγησης και ανίχνευσης έχουν υψηλές σύνθετες αντιστάσεις τότε το ανιχνευόμενο σήμα θα είναι ανεξάρτητο από τη θέση του μετάλλου-δοκιμίου που παραμένει μεταξύ τους. Αυτό το είδος μέτρησης εξαλείφει πλήρως την ανύψωση αλλά απαιτεί την τοποθέτηση δύο πηνίων.

### 2.3.3 Όργανα Ελέγχου ECT

Παρακάτω περιγράφονται ορισμένοι από τους τύπους των οργάνων ECT που διατίθενται στο εμπόριο και οι δυνατότητές τους. Κάθε κατασκευαστής παρέχει πιο ακριβείς προδιαγραφές για τον τύπο του κάθε οργάνου, την απόδοση και τις παραμέτρους του πηνίου [4].

1. Φορητοί ανιχνευτές ρωγμών στο επίπεδο με δινορρεύματα σύνθετης αντίστασης

Γενικά έχουν αρκετά εκτενείς ικανότητες. Τα φάσματα συχνότητας κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες Hz σε μερικά MHz. Έχουν εκτενείς εγκαταστάσεις συναγερμών και ορισμένες μονάδες μπορούν να επιτύχουν κάποιο ποσοστό φιλτραρίσματος. Μερικά όργανα είναι ικανά να λειτουργήσουν σε πολλές συχνότητες, κάτι που επιτρέπει το συνδυασμό αποτελεσμάτων σε δύο ή περισσότερες συχνότητες δοκιμής προκειμένου να μειωθούν ή να εξαλειφθούν συγκεκριμένες επιδράσεις που προέρχονται από παρεμβολές [4].

2. Συστήματα μονάδων δινορρευμάτων

Προορισμένα για εργοστασιακή λειτουργία, συχνά σε αυτόματες ή ημιαυτόματες μηχανές επιθεώρησης. Έχουν παρόμοια λειτουργία με τους ανιχνευτές ρωγμών αλλά έχουν και εκτενείς εγκαταστάσεις εισαγωγής και εξαγωγής όπως φωτοκύτταρα. Μπορεί να είναι ειδικής κατασκευής οπότε τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που δεν απαιτούνται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή παραλείπονται [4].

3. Σταθεροποιητικός μηχανισμός

Έχει αυξημένο κόστος όμως είναι πολύ σημαντικός για την εξάλειψη φαινομένων άκρων και κλυδωνισμών των πηνίων (probe wobble). Το κόστος εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου, τον τύπο, την ταχύτητα, των συνθηκών και το βαθμό ευαισθησίας του ελέγχου [1].

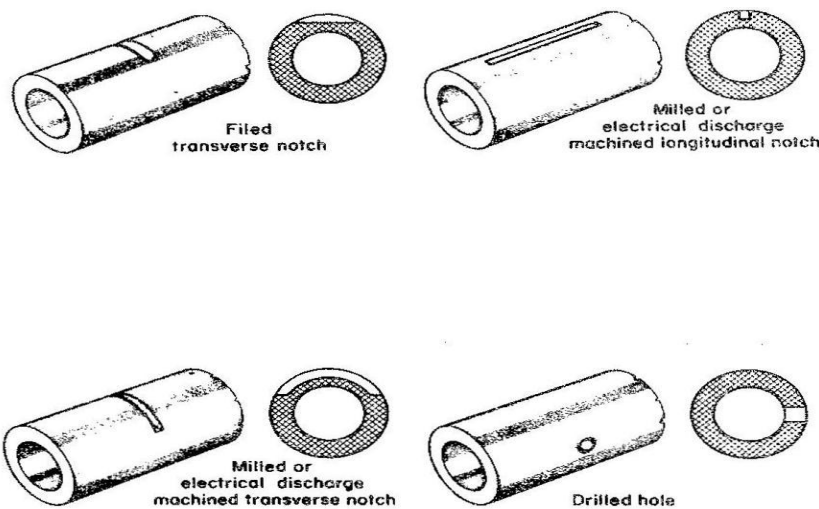
### Βαθμονόμηση οργάνων

Μια βασική απαίτηση για ECT είναι ένα αξιόπιστο και συνεπές όργανο για την ρύθμιση της ευαισθησίας του συστήματος μέχρι το απαραίτητο επίπεδο, κάθε φορά που χρησιμοποιείται.

Για το σκοπό αυτό, πρέπει να προβλέπεται ένα πρότυπο δείγμα βαθμονόμησης. Κατά την επιλογή ενός πρότυπου δείγματος αναφοράς, η συνήθης διαδικασία είναι να επιλεγεί ένα δείγμα του προϊόντος που δεν έχει ακραία ελαττώματα και εκπροσωπεί θεμιτά ένα δείγμα αποδεκτών μονάδων. Σε ένα ή περισσότερα από αυτά τα αποδεκτά δείγματα δημιουργούνται με μηχανικά μέσα ασυνέχειες αναφοράς.

Ο τύπος των ασυνεχειών βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίζεται από τον εκάστοτε κώδικα αναφοράς όπως είναι ο ASME (American Society of Mechanical Engineers), ο ASTM (American Society for Testing and Materials) και ο API (American Petroleum Institute). Για την επιλογή των τεχνητών ασυνεχειών μερικά σημαντικά ζητήματα είναι: α) θα πρέπει να είναι εύκολο να κατασκευαστεί, β) θα πρέπει να μπορούν να αναπαραχθούν, γ) θα πρέπει να παράγουν μία απόκριση δινορρευμάτων που να μοιάζει πολύ με τη φυσική ασυνέχεια που αντιπροσωπεύει.

Αρκετές ασυνέχειες που έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρότυπα αναφοράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.11. Αυτές περιλαμβάνουν μία εγκάρσια εγκοπή, διαμήκη και εγκάρσια εγκοπή, μηχανουργικά κατεργασμένη (ηλεκτρικής εκκένωσης) διαμήκη και εγκάρσια εγκοπή και τέλος οπές.



Σχήμα 2.11. Τεχνητές ασυνέχειες που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα αναφοράς.

Προφανώς σε μία εφαρμογή θα έχουν ελεγχθεί οι απαραίτητες τιμές για τις παραμέτρους δοκιμής. Τα βήματα για τη βαθμονόμηση του οργάνου είναι [4]:

- Συνδέουμε το κατάλληλο πηνίο και θέτουμε τις παραμέτρους διαμόρφωσης (τρόπος λειτουργίας, τύπος κ.λ.π.).
- Θέτουμε τη συχνότητα που απαιτείται για τη δοκιμή.
- Θέτουμε το κέρδος (gain) σε μία ενδιάμεση τιμή.
- Κινούμε το όργανο ελέγχου πάνω στο δοκίμιο βαθμονόμησης και καθορίζουμε την περιστροφή φάσης.
- Βελτιστοποιούμε την περιστροφή φάσης όπως απαιτείται.
- Χρησιμοποιούμε φίλτρα για να βελτιστοποιήσουμε περαιτέρω την αναλογία σήματος.
- Καθορίζουμε τους συναγερούς όπως απαιτείται.
- Εξετάζουμε πάλι το δοκίμιο βαθμονόμησης και ελέγχουμε ότι όλες οι ρωγμές ανιχνεύονται καθαρά.
- Εκτελούμε τη δοκιμή ελέγχοντας τη σωστή λειτουργία σε κανονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας το δοκίμιο βαθμονόμησης.

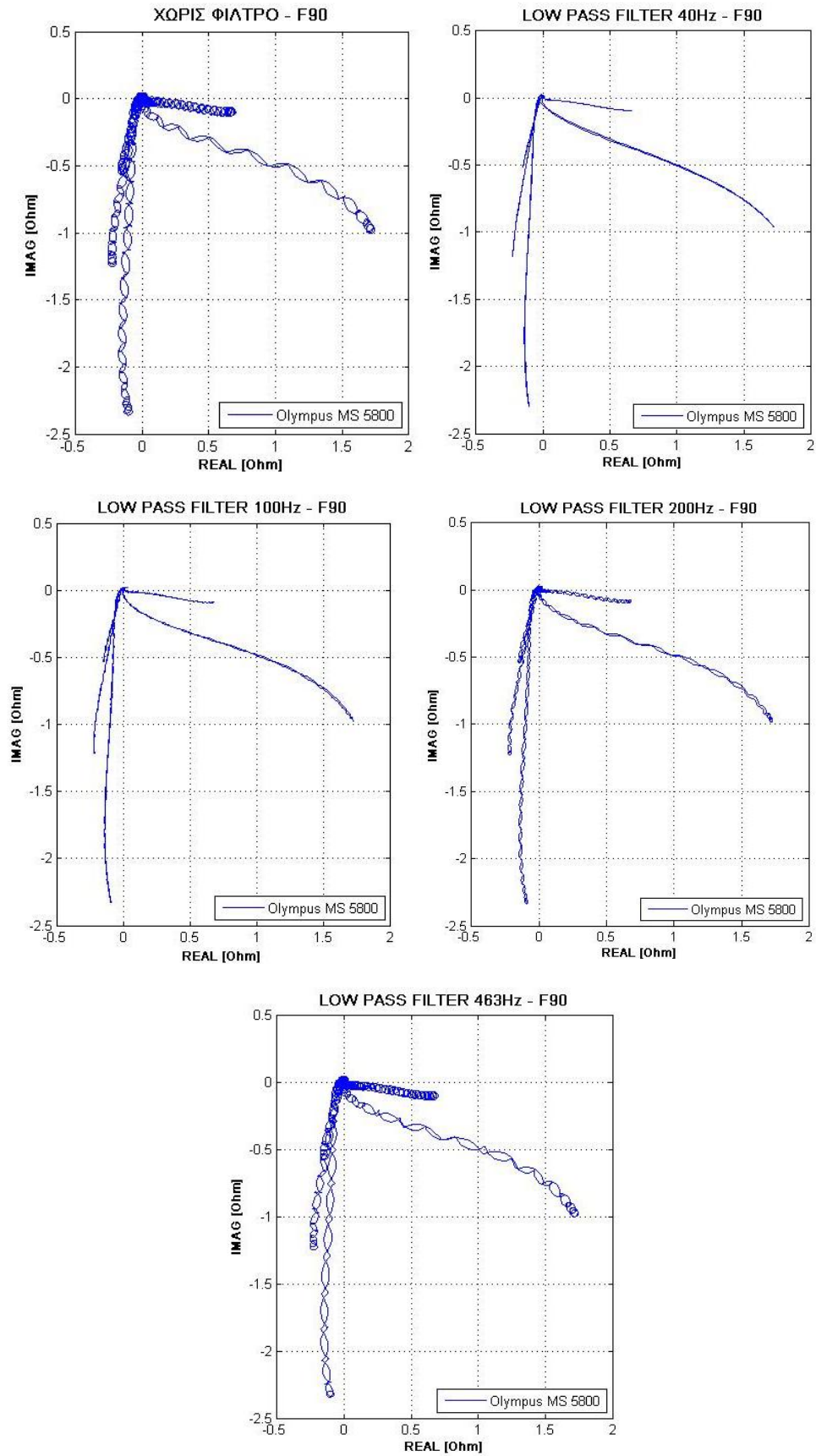
### Φιλτράρισμα

Οι περισσότερες δοκιμές δινορρευμάτων περιλαμβάνουν τη μετακίνηση οπότε και οι ενδείξεις ποικίλουν με το χρόνο. Το σύστημα θα πρέπει να αποκρίνεται στις ρωγμές και όχι σε τυχαίες υλικές αλλαγές. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται κάποιο φίλτρο το οποίο επιτρέπει τα γρήγορα μεταβαλλόμενα σήματα και φιλτράρει τα αργά. Για παράδειγμα, εάν ένα απόλυτο πηνίο με διάμετρο 2mm κινηθεί πάνω από μία στενή ρωγμή με ταχύτητα 1m/sec, η ένδειξη που θα εμφανιστεί στην κατάληξη θα διαρκέσει για περίπου 2mm/sec. εάν η σύσταση των υλικών ή το πάχος ποικίλει βαθμιαία σε μία απόσταση, π.χ. 50cm, η ένδειξη από αυτό θα αλλάξει πολύ πιο αργά. Επομένως αν ένα φίλτρο θέσει μία συχνότητα στα 100Hz θα περάσει το γρήγορα μεταβαλλόμενο σήμα που προέρχεται από τη ρωγμή αλλά όχι και η πιο αργή ένδειξη που προέρχεται από τις υλικές αλλαγές (θα ληφθεί δηλαδή μηδενικό σήμα) [4].

Στους περισσότερους ελέγχους η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται ελάχιστα (περίπου 1%) καθώς το πηνίο σαρώνει μία ατέλεια. Αυτή η μικρή μεταβολή είναι δύσκολο να ανιχνευτεί από τη μέτρηση της απόλυτης τάσης ή σύνθετης αντίστασης. Για την ανίχνευση και την ενίσχυση αυτής της μεταβολής έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τύποι και διατάξεις μετρητικών κεφαλών όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Ας θεωρήσουμε ένα ημιτονοειδές σήμα που παράγεται από μία γεννήτρια με συγκεκριμένη συχνότητα. Εφόσον η σύνθετη αντίσταση των δύο πηνίων της διάταξης δεν είναι ποτέ ακριβώς ίδια, απαιτείται αντιστάθμιση για την αποφυγή δημιουργίας διαφοράς τάσης μεταξύ τους. Αφού γίνει η αντιστάθμιση η εμφάνιση μίας ατέλειας συνοδεύεται με ανισοροπία, η οποία είναι το αρχικό σήμα. Το ημιτονοειδές σήμα της διαταραχής αυτής πρέπει να το ενισχύσουμε. Επειδή όμως δεν είναι πολύ αποδοτικό να το αναλύσουμε το μετατρέπουμε σε συνεχές σήμα. Για να μειώσουμε το θόρυβο των οργάνων χρησιμοποιούμε φίλτρα στην έξοδο του σήματος. Τα φίλτρα μειώνουν την απόκριση της συχνότητας γεγονός που αποτελεί περιορισμό όσον αφορά την ταχύτητα του ελέγχου [1].

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πήραμε από το βιομηχανικό όργανο Olympus MS 5800 κατά την επιθεώρηση του δοκιμιακού σωλήνα με φίλτρο και χωρίς φίλτρο. Τα φίλτρα που ήταν επιλέξαμε από το όργανο ήταν low pass filter 40, 50, 100, 200, 300, 463 Hz. Μπορούμε λοιπόν εύκολα να παρατηρήσουμε τη σπουδαιότητα και την αναγκαιότητα του φίλτρου καθώς καθιστά πιο ευανάγνωστες τις μετρήσεις και πιο ομαλές τις καμπύλες των ατελειών. Όπως φαίνεται και παρακάτω το φίλτρο που τελικά ήταν καταλληλότερο είναι αυτό των 40Hz.





Σχήμα 2.12 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης από μετρήσεις με το όργανο Olympus MS 5800 με και χωρίς φίλτρο.

### 2.3.4 Όργανα Ανάγνωσης ή Απεικόνισης Μετρήσεων

Ένα σημαντικό μέρος του ECT είναι τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση ή απεικόνιση των μετρήσεων. Η συσκευή ανάγνωσης μπορεί να είναι αναπόσπαστο μέρος του συστήματος, μία ενσωματωμένη μονάδα ή μια ξεχωριστή μονάδα συνδεδεμένη με καλώδιο. Η ένδειξη θα πρέπει να έχει την επαρκή ταχύτητα, την ακρίβεια και το εύρος ώστε να μπορέσει να καλύψει τις απαιτήσεις ελέγχου του συστήματος. Συχνά, οι διάφορες συσκευές ανάγνωσης χρησιμοποιούνται σε ένα ενιαίο σύστημα ελέγχου. Παρακάτω περιγράφονται μερικοί τύποι συσκευών ανάγνωσης μετρήσεων σε σειρά αυξανόμενου κόστους και πολυπλοκότητας.

#### 1. Συναγερμός με φωτεινή ένδειξη

Ειδοποιεί τον χειριστή ότι μια συγκεκριμένη παράμετρος έχει ξεπεραστεί.

#### 2. Ηχητικός συναγερμός

Εξυπηρετεί τον ίδιο σκοπό όπως ο φωτεινός συναγερμός αλλά απελευθερώνει την προσοχή του χειριστή έτσι ώστε να μπορεί να χειριστεί τον πηνίο για τη σάρωση.

#### 3. Ηλεκτρονόμος ή ρελέ (kick-out relay)

Ενεργοποιεί ένα μηχανισμό που αυτόματα απορρίπτει ή σηματοδοτεί μία περιοχή όταν μια παράμετρος έχει ξεπεραστεί.

#### 4. Αναλογικός Μετρητής

Δίνει μια συνεχή απεικόνιση σε εκτεταμένο φάσμα. Είναι αρκετά ταχύς (με μια συχνότητα περίπου 1Hz) και η κλίμακα μπορεί να βαθμονομηθεί για την άμεση ανάγνωση μιας παραμέτρου. Η ακρίβεια της συσκευής περιορίζεται περίπου στο 1% της πλήρους κλίμακας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θέσει τα όρια για τις τρεις πρώτες συσκευές ανάγνωσης.

#### 5. Ψηφιακός Μετρητής

Παρέχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και εύρος από τον αναλογικό μετρητή. Η πιθανότητα το σφάλμα του χειριστή να αποτυπωθεί στο όργανο είναι πολύ μικρότερη αλλά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν ταχέως μεταβαλλόμενες τάσεις. Αν και πολλοί ψηφιακοί μετρητές έχουν από δυαδικό κωδικοποίηση σε δεκαδικό σήμα εξόδου (BCD-Binary Coded Decimal) κατά τα άλλα είναι σχετικά αργοί.

#### 6. Απεικόνιση Διαγραμμάτων Σύνθετης Αντίστασης

Είναι πολύ χρήσιμη για το σχεδιασμό και τη δημιουργία μη-ισορροπημένης γέφυρας σε ECT και για τη διάκριση των ανεπιθύμητων μεταβλητών. Είναι επίσης χρήσιμη στην επίλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ελέγχου. Είναι αρκετά ακριβή και παρέχει μόνο ένα αντίγραφο.

#### 7. Απεικόνιση και Αποθήκευση Διαγραμμάτων Σύνθετης Αντίστασης

Μπορούν να δεχθούν σήματα σε υψηλή ταχύτητα. Ωστόσο, τα σήματα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία με μη αυτόματο τρόπο και έτσι η οθόνη μπορεί γρήγορα να γεμίσει. Σε ορισμένα όργανα, x-y πύλες υψηλής ταχύτητας μπορούν να εμφανιστούν και να οριστούν στην οθόνη.

## 8. Ταινίες Καταγραφής Διαγραμμάτων

Παρέχουν μια αρκετά ακριβή (περίπου 1% της πλήρους κλίμακας) καταγραφή σε εύλογα υψηλή ταχύτητα (περίπου 200 Hz). Τα δεδομένα πρέπει να διαβάζονται από ένα χειριστή. Αρκετά κανάλια μπορούν να εγγραφούν ταυτόχρονα και η εγγραφή είναι μόνιμη.

## 9. Μαγνητικός καταγραφέας

Είναι αρκετά ακριβή και μπορεί να καταγράψει σε πολύ υψηλή ταχύτητα (10MHz). Επιπλέον, τα δεδομένα μπορούν να υποβάλλονται σε επεξεργασία με αυτοματοποιημένες τεχνικές.

## 10. Υπολογιστές

Τα δεδομένα από διάφορα κανάλια μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας σε υψηλής ταχύτητας υπολογιστή, είτε αναλογικό είτε ψηφιακό, για την απευθείας σύνδεσης (online) επεξεργασία. Ο υπολογιστής μπορεί να διαχωρίσει τις παραμέτρους, να υπολογίσει τη μεταβλητή που μας ενδιαφέρει, να πινακοποιήσει τα δεδομένα, να εκτυπώσει τα τελικά αποτελέσματα και να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα σε μέσο αποθήκευσης για αναφορά σε μελλοντικές σαρώσεις.

## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΕΥΜΑΤΩΝ (ECT)

Με την εξέλιξη της μεθόδου των δινορρευμάτων άνοιξε και ένας μεγάλος κύκλος εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα αναπτύσσονται παρακάτω [4].

### 1. Ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών

Συνήθως πραγματοποιούνται με σωλήνες μολύβδου ή με επίπεδα όργανα μέτρησης στα σιδηρομαγνητικά ή μη-σιδηρομαγνητικά μέταλλα. Οι συχνότητες κυμαίνονται από 100kHz έως μερικά MHz. Ανάλογα με τις επιφάνειες είναι συνήθως δυνατό να βρεθούν μικρές ρωγμές της τάξης του 0,1mm ή σε μεγάλο βάθος. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται διαφορετικά πηνία, ιδιαίτερα σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές, όπου πρέπει να ληφθεί προσοχή για να εξασφαλιστεί ότι ο προσανατολισμός των ρωγμών είναι σωστός για την ανίχνευση [4].

### 2. Ανίχνευση ρωγμών κάτω από την επιφάνεια

Χρησιμοποιούνται συνήθως για την επιθεώρηση πλαισίων αέρα. Με τη χρήση μιας χαμηλής συχνότητας και κατάλληλων πηνίων, υπάρχει η δυνατότητα να διαπεραστεί το αλουμίνιο ή παρόμοιες δομές, σε βάθος περίπου 10mm, επιτρέποντας την ανίχνευση μιας ρωγμής που είναι αόρατη από την επιφάνεια [4].

### 3. Ταξινόμηση μη-σιδηρομαγνητικών μετάλλων

Αυτό είναι ουσιαστικά ο έλεγχος της αγωγιμότητας. Για ειδικές εφαρμογές ένας μετρητής αγωγιμότητας μπορεί να είναι καλύτερη επιλογή. Θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι διαφορετικά μέταλλα μπορεί να έχουν παρόμοια αγωγιμότητα με κράματα επικάλυψης. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέτρηση αγωγιμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως ένδειξη ότι ένα μέταλλο είναι της σωστής σύνθεσης ή θερμικής επεξεργασίας [4].

#### 4. Επιθεώρηση σωλήνων εναλλακτών θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για τια εφαρμογές πετροχημικής ή ηλεκτρικής παραγωγής μπορεί να έχουν πολλές χιλιάδες σωλήνες, κάθε ένας με μήκος μέχρι και 20m. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου οι σωλήνες αυτοί μπορούν να εξετασθούν σε υψηλές ταχύτητες, μέχρι και 1m/sec με αυτοματοποιημένη ανάλυση στοιχείων και με τη χρήση της ανάλυσης φάσης, ατέλειες όπως η διάβρωση, μπορούν να αξιολογηθούν με ακρίβεια περίπου 5% του πάχους των τοιχωμάτων των σωλήνων. Αυτό επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση της υπόλοιπης ζωής του σωλήνα και δίνει τη δυνατότητα στους χειριστές να αποφασίσουν για συγκεκριμένες ενέργειες, όπως η σύνδεση, η αντικατάσταση ή η πλήρης αντικατάσταση των σωλήνων εναλλακτών θερμότητας. Η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από το πάχος του υλικού και των τοιχωμάτων των σωλήνων και κυμαίνεται από μερικά kHz για παχιά τοιχώματα χαλκού έως 600kHz για λεπτά τοιχώματα τιτανίου. Οι σωλήνες μέχρι τη διάμετρο των 50mm επιθεωρούνται συνήθως με αυτήν την τεχνική.

Η επιθεώρηση σιδηρομαγνητικών ή μαγνητικών ανοξειδωτων σωλήνων δεν είναι δυνατή χρησιμοποιώντας τον πρότυπο εξοπλισμό δινορρευμάτων. Οι διπλές ή πολλαπλάσιες επιθεωρήσεις συχνότητας χρησιμοποιούνται για τις επιθεωρήσεις σωλήνων. Ειδικότερα για την καταστολή ανεπιθύμητων αποκρίσεων, λόγω της πλάκας υποστήριξης, αφαιρώντας το αποτέλεσμα ενός ελέγχου χαμηλότερης συχνότητας (που δίνει μία αναλογικά μεγαλύτερη απόκριση από την υποστήριξη) παράγεται ένα μικτό σήμα παρουσιάζοντας ελάχιστη ή καμία ένδειξη πλάκας υποστήριξης. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση των μικρών ατελειών σε αυτήν την περιοχή [4].

#### 5. Εσωτερική επιθεώρηση σωλήνων

Σχεδόν όλοι οι υψηλής ποιότητας σωλήνες χάλυβα επιθεωρούνται με τη μέθοδο των δινορρευμάτων χρησιμοποιώντας εξωτερικά πηνία. Όταν ο σωλήνας αποτελείται από ένα μαγνητικό υλικό υπάρχουν δύο σημαντικά προβλήματα:

1. Λόγω της υψηλής διαπερατότητας υπάρχει ελάχιστη ή καμία διείσδυση των δινορρευμάτων στο σωλήνα στις πρακτικές συχνότητες δοκιμής.
2. Οι παραλλαγές στη διαπερατότητα προκαλούν αποκρίσεις δινορρευμάτων που είναι μεγέθη μεγαλύτερα από αυτά που αντιστοιχούν στις ατέλειες.

Αυτά τα προβλήματα μπορούν να υπερνικηθούν με μαγνητικό κορεσμό του σωλήνα χρησιμοποιώντας ένα ισχυρό πεδίο συνεχούς ρεύματος (DC). Αυτό μειώνει την επιρροή της διαπερατότητας, επιτρέποντας μία αποτελεσματική μέτρηση. Σωλήνες διαμέτρου περίπου 170mm εξετάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας μαγνητικό κορεσμό και εξωτερικά πηνία. Αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται όταν οι σωλήνες είναι

συγκολλημένοι και εξετάζονται εσωτερικά χρησιμοποιώντας πηνία που ελέγχουν μόνο τη ζώνη των συγκολλήσεων [4].

## 6. Επιθεώρηση συγκολλήσεων

Η γεωμετρία και οι υλικές παραλλαγές που προκαλούνται λόγω θερμότητας γύρω από τις συγκολλήσεις, στο χάλυβα θα απέτρεπαν κανονικά την επιθεώρηση με ένα συμβατικό πηνίο, όμως ρωγμές περίπου 1mm βάθους και 6mm μήκους μπορούν να βρεθούν στη ζώνη συγκόλλησης. Ένα ειδικό πηνίο «WeldScan» επιτρέπει αυτή τη συγκόλληση του χάλυβα. Η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δυσμενείς συνθήκες ή και υποβρυχίως [4].

## 7. Κύριες βιομηχανικές εφαρμογές

Οι εφαρμογές των δινορρευμάτων στη βιομηχανία είναι πολυάριθμες, ευρέως διαδεδομένες και ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων και δοκιμών που γίνονται ετησίως με τη μέθοδο των δινορρευμάτων μπορεί να υπερβεί όλων των άλλων τύπων ελέγχου. Αν και τα δινορρεύματα αποκρίνονται μόνο στους όρους που επηρεάζουν την υλική γεωμετρία, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα στην περιοχή που διεγείρεται από το μαγνητισμένο τομέα, είναι ιδιαίτερα ευπροσάρμοστα σε διάφορες λειτουργίες. Έτσι, οι εφαρμογές τους στη βιομηχανία περιλαμβάνουν [4]:

- τη μέτρηση πάχους μεταλλικών ελασμάτων, χαλυβδόφυλλων, πλακών, περίβλημα των αγωγών και εξαρτήματα μηχανών χωρίς επαφή με το δοκίμιο.
- τη μέτρηση πάχους της επίστρωσης πάνω σε υλικά που έχουν μεγάλη διαφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητά τους.
- την ταυτοποίηση και το διαχωρισμό των υλικών σύμφωνα με τη σύσταση και τη δομή τους.
- την ανίχνευση ασυνεχειών σε υλικά που βρίσκονται εγκάρσια με το επίπεδο των δινορρευμάτων όπως π.χ. ρωγμές, χαρακιές, ραφές, περιτυλίξεις, τρύπες από δράπανο, ελασματοποιήσεις στις κομμένες άκρες του φύλλου.
- τον προσδιορισμό του ελέγχου και της εκτίμησης της ζημιάς μεταλλικών κατασκευών εξαιτίας θερμικών καταπονήσεων.
- τον καθορισμό του βάθους στην περίπτωση της σκλήρυνσης του χάλυβα και άλλων σιδηρούχων κραμάτων.
- στον εντοπισμό κρυμμένων μεταλλικών αντικειμένων όπως υπόγειοι αγωγοί, νάρκες αλλά και μεταλλικές συσκευασίες που ενδεχομένως να εισαχθούν σε τροφή.
- τη χρονομέτρηση και τον εντοπισμό κίνησης κρυμμένων μερών μηχανισμών όπως μέτρηση μεταλλικών μερών πάνω σε ταινιόδρομο και εντοπισμό μεταλλικών βλημάτων εν πτήση.
- την ακριβή μέτρηση διαστάσεων συμμετρικών μεταλλικών μερών μηχανών όπως δακτύλιοι και κουζινέτα.

## 8. Κύριες μεταλλουργικές εφαρμογές

Οι ηλεκτρομαγνητικές δοκιμές επαγωγής βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα στάδια της διαμόρφωσης και της θερμικής επεξεργασίας των κραμάτων και των μετάλλων, όπου η αποτελεσματικότητα των βημάτων επεξεργασίας μπορεί να αξιολογηθεί γρήγορα. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, τα χαλασμένα υλικά μπορούν να ανιχνευτούν

και να αφαιρεθούν από την παραγωγή χωρίς περαιτέρω δαπάνες επεξεργασίας. Θερμικές επεξεργασίες, όπως η ανόπτηση, η ομαλοποίηση, η σκλήρυνση κ.α., μπορούν να ελεγχθούν άμεσα σε πολλές περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα της μηχανικής επεξεργασίας μπορούν να μετρηθούν και η ανάπτυξη των ρωγμών ή της ζημιάς στις μηχανικές ιδιότητες μπορούν να αξιολογηθούν. Οι μικρές φορητές μορφές οργάνων των δοκιμών με δινορρεύματα παρέχουν απλά και γρήγορα μέσα για χειρονακτικές ποιοτικές δοκιμές από μεμονωμένους χειριστές, μηχανοποιημένα συστήματα δοκιμής τα οποία διαχωρίζουν μικτά υλικά και επιδείνωση ελέγχου των υλικών και του εξοπλισμού στην υπηρεσία [4].

## 3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ COMSOL

Η χρήση Η/Υ (ηλεκτρονικού υπολογιστή) είναι βασικό μέρος της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, FEM. Καλά αναπτυγμένα, συντηρημένα και υποστηριζόμενα προγράμματα Η/Υ είναι αναγκαία στη λύση προβλημάτων μηχανικής και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι ανάγκες αυτές καλύπτονται από πολλά διαθέσιμα εμπορικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. COMSOL). Επίσης, η γενική τάση είναι να θεωρούνται τα αποτελέσματα αυτά αποδεκτά μόνο όταν τα προβλήματα λύνονται με τη χρήση ορισμένων πρότυπων πακέτων προγραμμάτων [11].

Τα εμπορικά πακέτα παρέχουν φιλικά προς το χρήστη περιβάλλοντα εισαγωγής δεδομένων καθώς και κομψές και ευανάγνωστες μορφές εμφάνισης αποτελεσμάτων. Όμως τα πακέτα δεν αποκαλύπτουν τις μεθόδους εξαγωγής τύπων και λύσεων [11].

### 3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FINITE ELEMENT METHOD - FEM)

#### Ιστορικό της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Οι βασικές ιδέες της FEM προήλθαν από τις εξελίξεις στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Χρένικοφ (Hrenikoff) παρουσίασε μία λύση των προβλημάτων ελαστικότητας με τη χρήση της «μεθόδου των δικτυωμάτων». Το 1943 δημοσιεύτηκε μία εργασία του Κουράντ (Courant), όπου χρησιμοποιούσε κατά τμήματα πολυωνυμική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Ο Τέρνερ (Turner) και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Κλου (Clough) το 1960 σε μία εργασία του [1].

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Ο Αργύρης, το 1955, σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρωϊκές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Ζίνκιβιτς (Zienkiewicz) και Τσουνγκ (Chung) κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και μεγάλες παραμορφώσεις. Το βιβλίο του Όντεν (Oden) για τα συνεχή μη γραμμικά εμφανίστηκε το 1972 [1].

Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν τη δεκαετία του 1970 και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλους σχετικούς τομείς. Σήμερα, οι εξελίξεις στους μεγάλους Η/Υ και η διαθεσιμότητα ισχυρών μικροϋπολογιστών έχουν φέρει τη μέθοδο αυτή στη διάθεση φοιτητών και μηχανικών [1].



## FEM

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αεροπλάνα, αυτοκίνητα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής και άλλων προβλημάτων ροής [11].

Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD (Computer Aided Design) μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα ακόμα και σύνθετα προβλήματα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρωτότυπό τους. Όλα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη να διατηρήσουμε την επαφή μας με αυτές τις εξελίξεις, κατανοώντας τη βασική θεωρία, τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιες της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων [11].

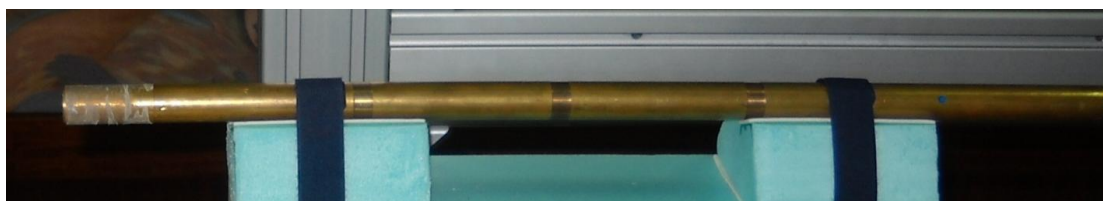
Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία θεωρεί κατάλληλα τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς [11].

## **3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ 2D ΓΙΑ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ**

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας σχεδιάσαμε τρία μοντέλα στην έκδοση Comsol 3.5a Multiphysics, τα οποία θα είναι 2D για μεγαλύτερη σχεδιαστική ευκολία και εξοικονόμηση χρόνου των μετρήσεων. Αυτά τα σχεδιαστικά μοντέλα αντιπροσωπεύουν τον πραγματικό δοκιμακό σωλήνα (Εικόνα 3.1) του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται παρακάτω:

Ιδιότητες Admiralty Brass Ser NoTC2			
Υλικό		Ναυτικός μπρούντζος-ορείχαλκος (admiralty brass)	
Αγωγιμότητα		$\sigma = 14,05 \text{ MS/m}$	
Διαστάσεις			
Μήκος [cm]	Εξωτερική διάμετρος $D_{out}$ [mm]	Εσωτερική διάμετρος $D_{in}$ [mm]	Πάχος $t$ [mm]
	22	20	1
Εξωτερική Μείωση Πάχους (OD)			
	Μήκος [cm]	Εσωτερική διάμετρος $D_{in}$ [mm]	Μείωση πάχους $t$ [mm]
OD1	1	21,8	0,1
OD2	1	21,6	0,2
OD3	1	21,4	0,3
Οπές (HOLES)			
Διάμετρος τεσσάρων οπών, συμμετρικές ανά $90^\circ$ [mm]		4	
Εσωτερική Μείωση Πάχους (ID)			
	Μήκος [cm]	Εσωτερική διάμετρος $D_{in}$ [mm]	Μείωση πάχους $t$ [mm]
ID	1	21,9	0,05

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά δοκιμακού σωλήνα Admiralty Brass Ser NoTC2.



Εικόνα 3.1. Δοκιμακός σωλήνας Admiralty Brass Ser NoTC2- Τοποθετημένος κατάλληλα πάνω στο Scanner.

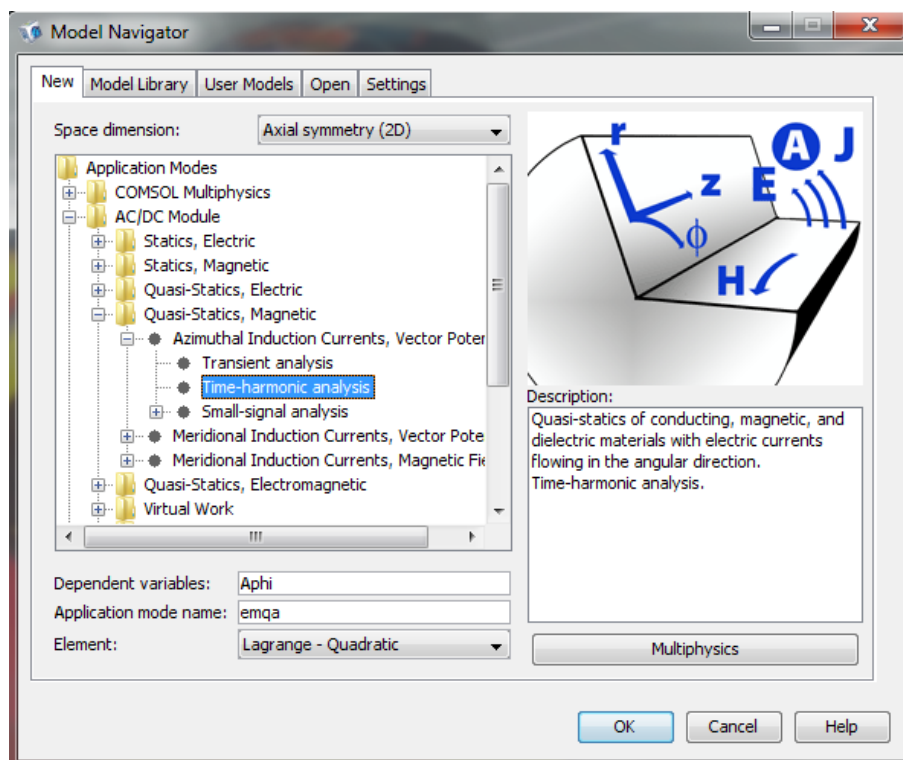
Ακόμα στο περιβάλλον προσομοίωσης του Comsol 3.5a σχεδιάσαμε και το πηνίο. Τα χαρακτηριστικά του πηνίου δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πηνίο				
Υλικό	Polyoxymethylene (POM)-Delrin			
Αυτεπαγωγή $L$ [mH]	2,875			
Σπείρες $N$	450			
Διαστάσεις Αυλάκωσης				
Μήκος [cm]	Εξωτερική διάμετρος $D_{out}$ [mm]	Εσωτερική διάμετρος $D_{in}$ [mm]	Βάθος αυλάκωσης $t$ [mm]	Διάμετρος σύρματος περιέλιξης $d$ [mm]
1,1	19,56	15,56	2	0,2

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά πηνίου.

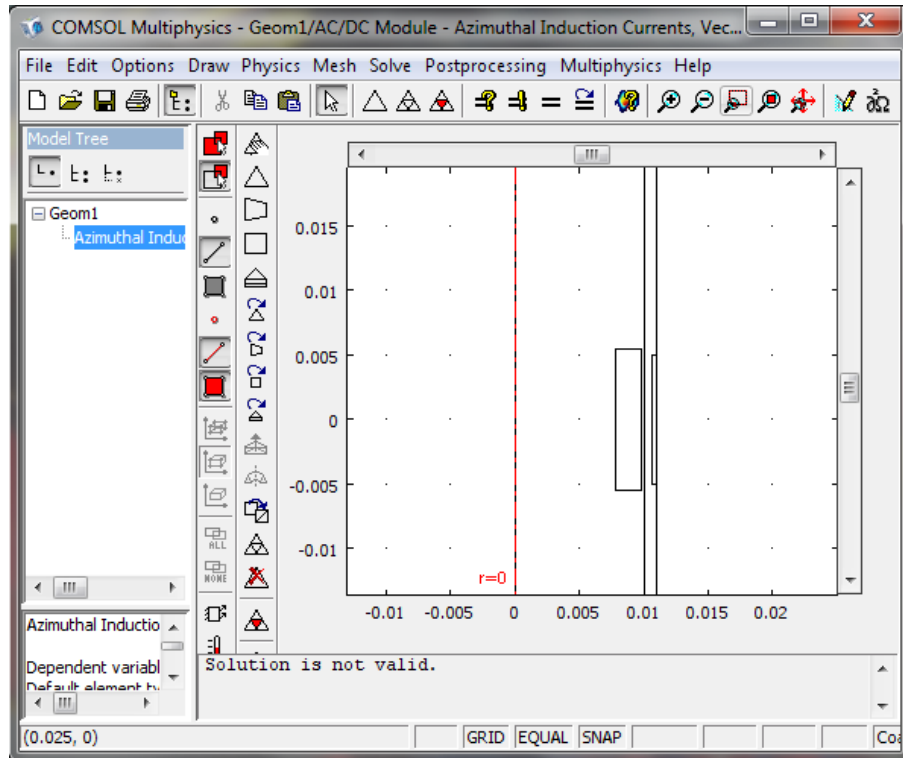
## COMSOL 2D

Πριν εισέλθουμε στο περιβάλλον του Comsol πρέπει να επιλέξουμε το κατάλληλο πρόβλημα που θα προσομοιώσουμε και το οποίο φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.2. Επιλογή προβλήματος 2D.

Έπειτα σχεδιάζουμε το μοντέλο, όπως φαίνεται αντιπροσωπευτικά για το σφάλμα OD3, που είναι αυτό της Εικόνας 3.3. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε πως η περιοχή με αέρα που περιβάλλει το πηνίο και το σωλήνα έγινε περίπου 10πλάσια της εξωτερικής ακτίνας του πηνίου και το μοντέλο το σχεδιάσαμε στο  $\frac{1}{2}$  της γεωμετρίας λόγω συμμετρίας, για υπολογιστική ευκολία του προγράμματος.



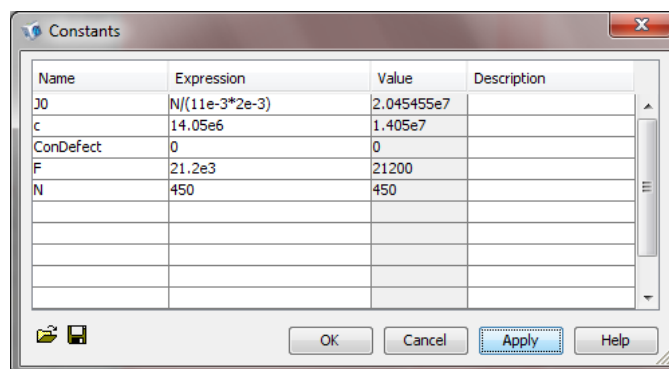
Εικόνα 3.3. Σχεδιασμός Εξωτερικής Ατέλειας OD3.

Ολοκληρώνοντας το σχεδιασμό απαιτείται από το πρόγραμμα ο ορισμός των απαραίτητων σταθερών του προβλήματος. Αυτές είναι :

- πυκνότητα ρεύματος για την επιφάνεια του πηνίου
- $$J_0 = \frac{NI}{\text{μήκος} \times \text{βάθος αυλάκωσης}} \quad [A/m] \quad (26)$$

όπου  $I=1$  [A] το ρεύμα.

- ηλεκτρική αγωγιμότητα σωλήνα  $c$ .
- ηλεκτρική αγωγιμότητα ατέλειας ConDefect.
- συχνότητα δοκιμής  $F$ .
- σπείρες πηνίου  $N$ .

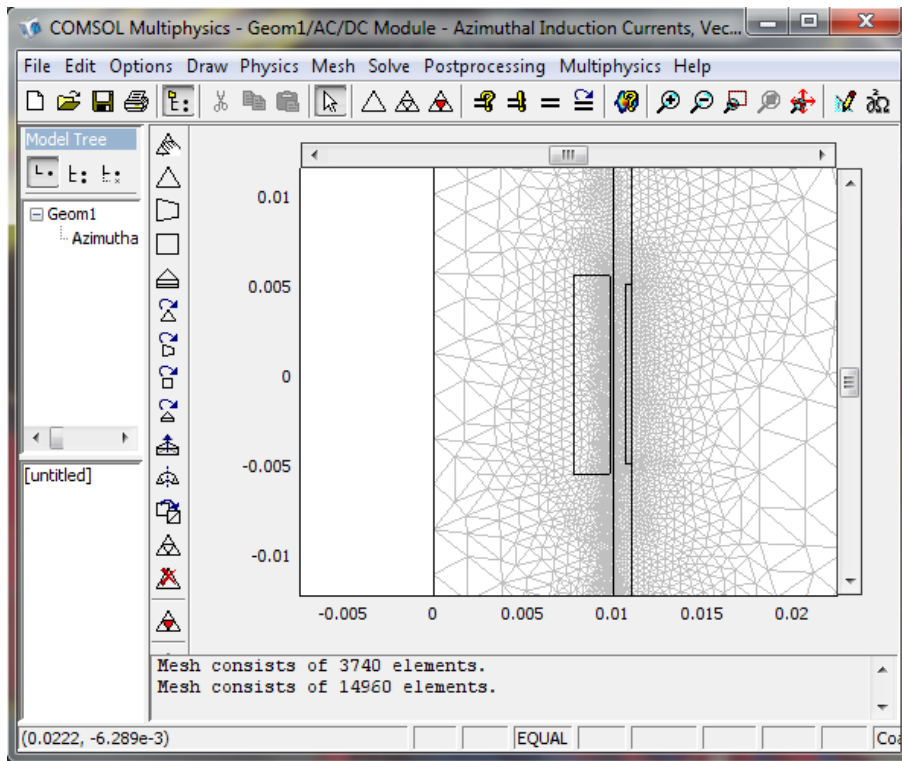


Εικόνα 3.4. Σταθερές του προβλήματος.

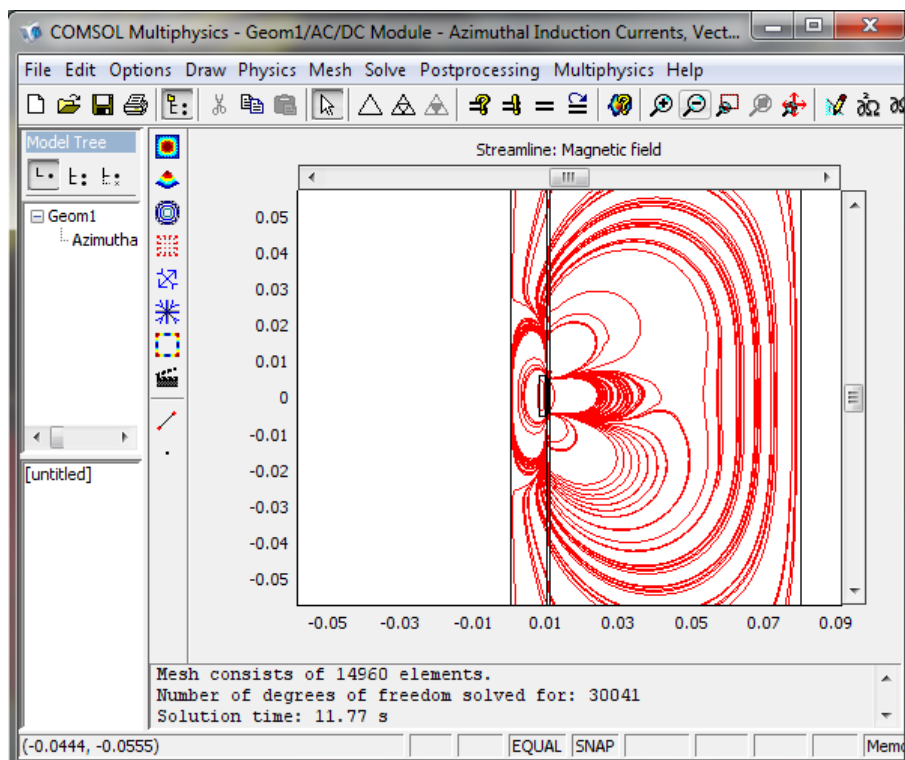
Στη συνέχεια ορίζουμε τις περιοχές σχεδίασης με τις σταθερές που τις αντιπροσωπεύουν ως εξής :

- μαγνητική διαπερατότητα σωλήνα, αέρα και πηνίου ίση με τη μονάδα.
- ηλεκτρική αγωγιμότητα σωλήνα  $\sigma = 14,05 \text{ MS/m}$ , γιατί το πηνίο είναι απομονωμένο και δεν υπάρχει επίδραση επιδερμικού φαινομένου.
- ηλεκτρική αγωγιμότητα αέρα μηδέν, ώστε να μην επηρεάζει το αποτέλεσμα και να επιταχύνουμε έτσι την επίλυση του προβλήματος.
- ηλεκτρική αγωγιμότητα τμηματικής διάβρωσης ConDefect, ώστε να μπορούμε για τις ανάγκες των μετρήσεων να την αλλάζουμε δίνοντάς την τιμές αέρα και σωλήνα για κάθε θέση.

Για να προχωρήσουμε στην επίλυση του προβλήματος θα πρέπει να γίνει το «πλέγμα» ή η διακριτοποίηση. Το «πλέγμα» είναι ουσιαστικά η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία. Διακριτοποιεί τη δισδιάστατη περιοχή σε τρίγωνα και σχηματίζονται με αυτόν τον τρόπο κόμβοι (σημεία συνάντησης των ακμών του τριγώνου). Τα τρίγωνα που σχηματίζονται από τρεις κόμβους αποτελούν τα στοιχεία. Ακάλυπτες περιοχές που ίσως προκύψουν, δίνεται η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας μικρότερο «πλέγμα». Για αυτόν το λόγο τα πεπερασμένα αποτελούν μία προσεγγιστική μέθοδο. Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται η διακριτοποίηση που έγινε στο πρόγραμμα και τέλος, στην Εικόνα 3.6 έχουμε την επίλυσή του.



Εικόνα 3.5. «Πλέγμα» 2D.



Εικόνα 3.6. Επίλυση Προβλήματος 2D – Απεικόνιση των δυναμικών γραμμών.

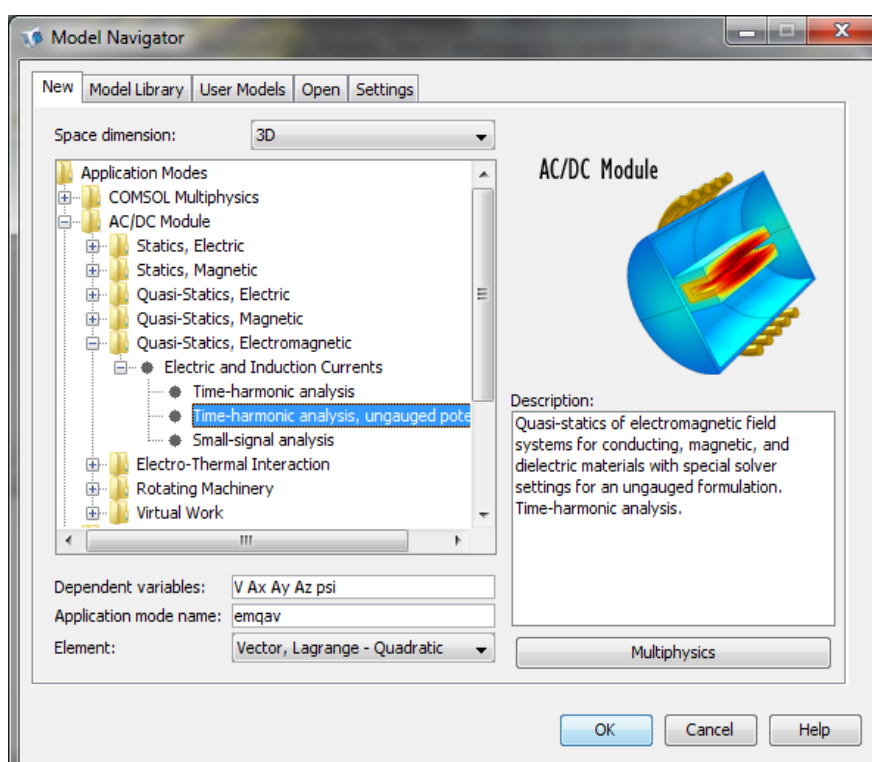
Τέλος μετά την επίλυση επιλέξαμε το πηγίο για να πάρουμε το αποτέλεσμα της μέτρησης, δηλαδή τη σύνθετη αντίστασή του. Τη διαδικασία διακριτοποίησης και

επίλυσης την επαναλάβουμε για κάθε θέση του πηνίου ξεκινώντας από τη θέση που είναι κεντραρισμένο με την ατέλεια και σταματώντας στη θέση όπου η σύνθετη αντίσταση του πηνίου παίρνει την ίδια περίπου τιμή όταν στο σωλήνα δεν υπάρχει ατέλεια. Σημειώνουμε πως το πηνίο πρέπει να είναι μακριά από τα όρια του σωλήνα ή της γεωμετρίας (φαινόμενο άκρου) οπότε αλλάζουμε τη θέση της ατέλειας μακριά από το πηνίο. Αυτό το επαναλάβουμε για όλες τις ατέλειες και για τέσσερις διαφορετικές τιμές συχνότητας.

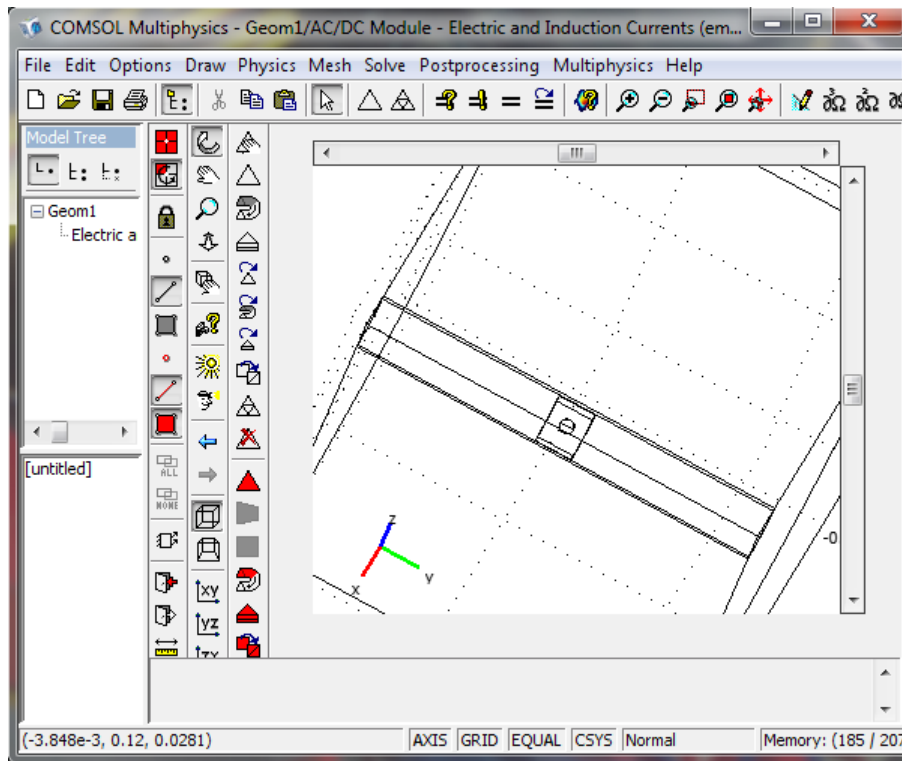
### 3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ 3D ΓΙΑ ΟΠΕΣ ΣΕ ΣΩΛΗΝΑ

#### COMSOL 3D

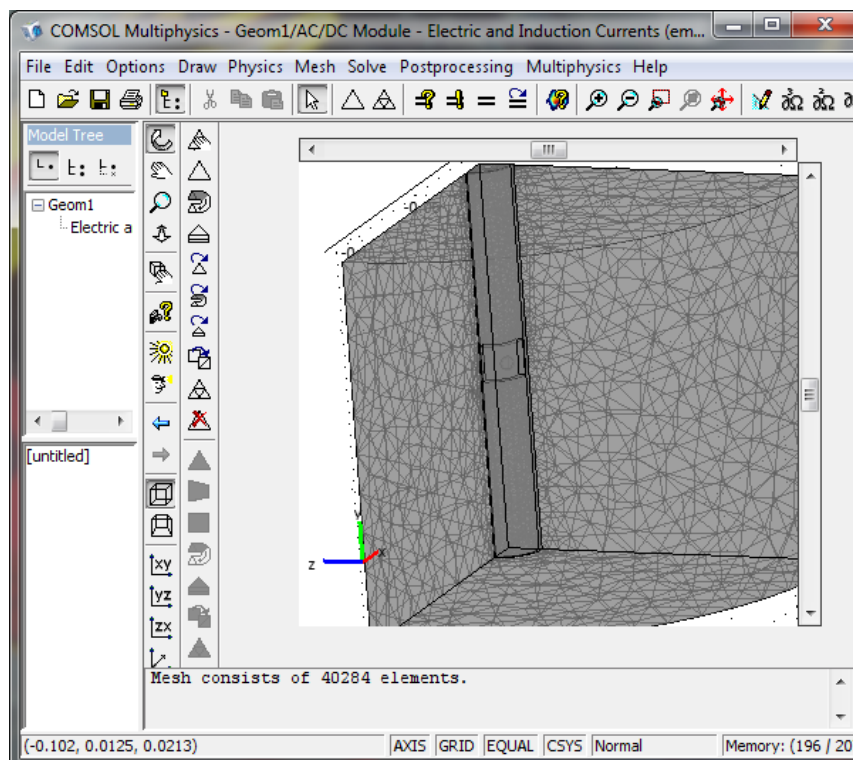
Με έναν παρόμοιο τρόπο με το μοντέλο 2D γίνεται και το μοντέλο 3D. Οι σταθερές που εισάγαμε είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές του 2D μοντέλου. Παρακάτω ακολουθούν διαδοχικά τα βήματα.



Εικόνα 3.7. Επιλογή προβλήματος 3D.

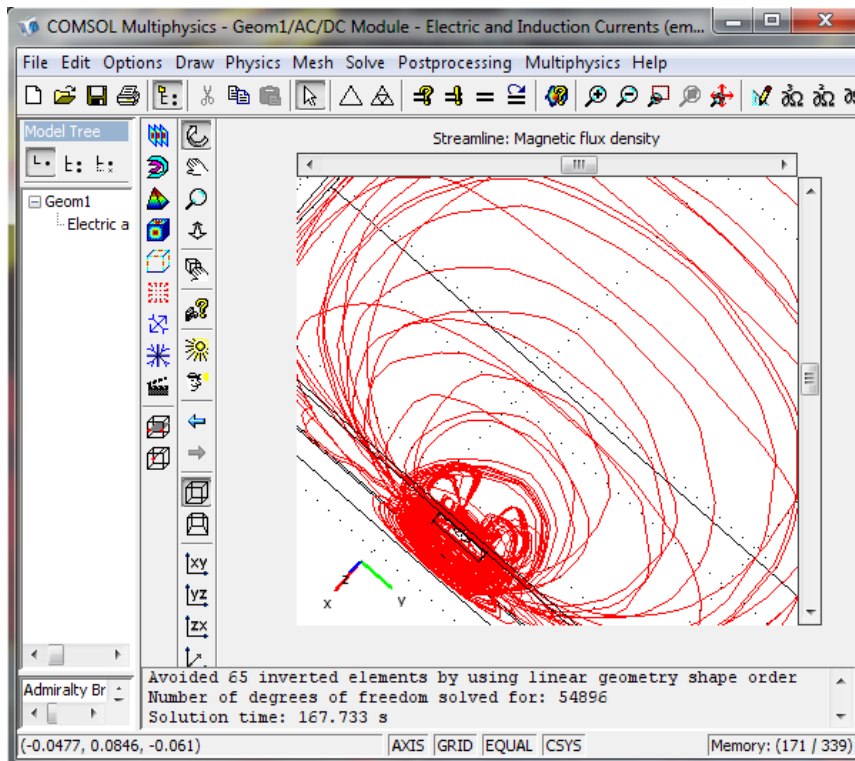


Εικόνα 3.8. Σχεδιασμός Οπής.



Εικόνα 3.9. «Πλέγμα» 3D.





Εικόνα 3.10. Επίλυση Προβλήματος 3D-Απεικόνιση δυναμικών γραμμών.

Επισημαίνουμε στο σημείο αυτό πως στο 3D μοντέλο τοποθετήσαμε τον άξονα του σωλήνα στη διεύθυνση  $y$  οπότε οι συνιστώσες πυκνότητας ρεύματος του πηνίου διέγερσης είναι:

$$J_x = \frac{J_0 \cdot z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (27)$$

$$J_y = \frac{J_0 \cdot x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \quad (28)$$

Η καθιερωμένη μέθοδος για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης οποιασδήποτε πηγής εντός της περιοχής επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να βασιστεί σε υπολογισμούς ενέργειας [13]:

$$Z = R + j\omega L = \frac{1}{I^2} (P + j\omega 2W) \quad (29)$$

όπου το  $P$  αντιπροσωπεύει τις απώλειες Joule και το  $W$  την πυκνότητα της μαγνητικής ενέργειας. Η τελευταία αυτή ποσότητα υπολογίζεται με την ενσωμάτωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε όλη την περιοχή της επίλυσης ενώ η  $P$  υπολογίζεται μόνο πάνω στις περιοχές αγωγιμότητας. Εδώ, θα ακολουθήσει μια εναλλακτική προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει την ενσωμάτωση σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από το πηνίο. Η γενική εξίσωση για τον υπολογισμό της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης του πηνίου δίνεται από [13]:

$$Z = \frac{1}{I^2} \int_{coil} E \cdot J dV = \frac{j\omega}{I^2} \int_{coil} A \cdot J dV \quad (30)$$

Στο Comsol, η παραπάνω εξίσωση γίνεται με δευτερεύουσα ολοκλήρωση (και έχοντας θέσει το ρεύμα διέγερσης  $i$  ίσο με τη μονάδα):

$$4 * i * 2 * \rho_i * f * (J_{e_x\_emqan} * A_x + J_{e_y\_emqan} * A_y + J_{e_z\_emqan} * A_z) \quad (31)$$

όπου το 4 στην αρχή της έκφρασης δηλώνει πως η προσομοίωση έγινε στο ¼ της γεωμετρίας. Η αλλαγή της σύνθετης αντίστασης λόγω της ατέλειας υπολογίζεται αφαιρώντας τη σύνθετη αντίσταση από τις λύσεις με και χωρίς τη ρωγμή.

Ας σημειωθεί εδώ, ότι θεωρούμε το πρόβλημα ως υπολογισμένο αλλά όχι λυμένο. Κατά τη γνώμη μας, τα αριθμητικά αποτελέσματα με πεπερασμένα στοιχεία δεν παρουσιάζουν λύση από τη στιγμή που θεωρούν ως λύση μια αναλυτική ή ημι-αναλυτική έκφραση της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης λόγω της ατέλειας και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά των δύο οργάνων ώστε να διαπιστώσουμε πόσο μεγάλο ή μικρό σφάλμα θα έχουμε από την προσομοίωση αυτή.

## 4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

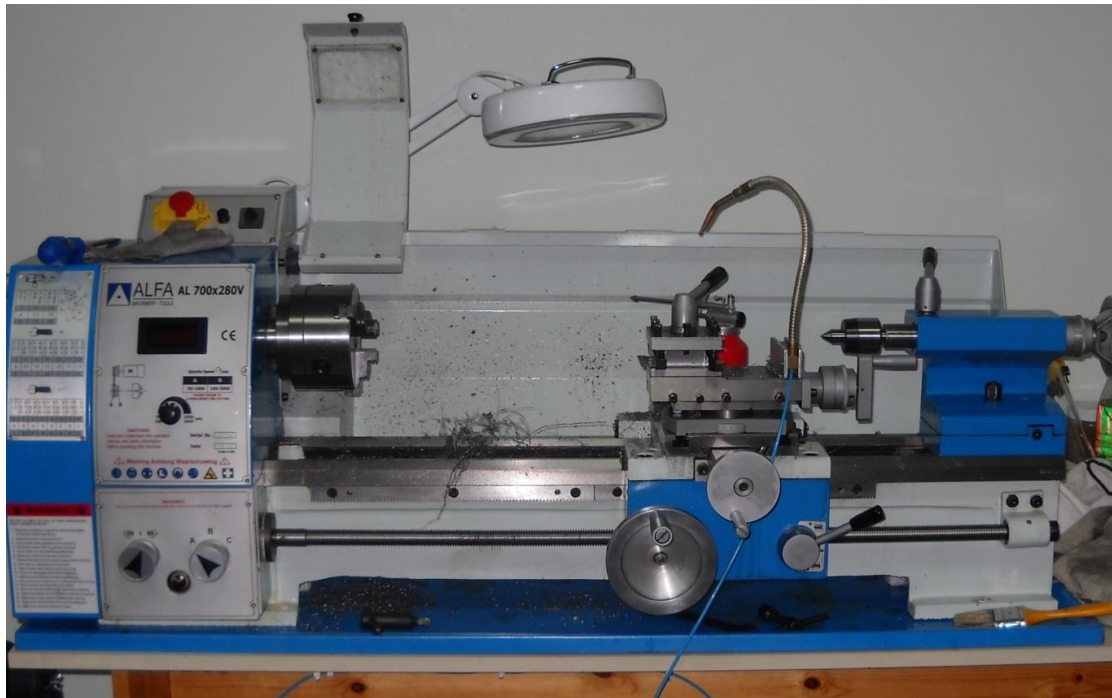
Η θεωρητική διερεύνηση του ECT έγινε στο πρόγραμμα Comsol 3.5a Multiphysics όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Την πειραματική διερεύνηση την κάναμε με το βιομηχανικό όργανο Olympus MS 5800 (Εικόνα 4.5) και με το εργαστηριακό όργανο Agilent (Εικόνα 4.3). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των μετρήσεων τα εισάγαμε στο υπολογιστικό πρόγραμμα MatLab για να τα επεξεργαστούμε πιο εύκολα και να αναπαράγουμε τα τελικά συγκριτικά διαγράμματα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε στο χώρο του εργαστηρίου του τμήματος για να λάβουμε τις μετρήσεις.

### 4.1 ΠΗΝΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ

Το πηνίο ελέγχου που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση και στις μετρήσεις το κατασκευάσαμε στο εργαστήριο και φροντίσαμε να πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές όπως ο λόγος διαμέτρων πηνίου προς σωλήνα  $n$  (ο οποίος κρίνεται σωστό να είναι μεταξύ 80-90% για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις). Εδώ εμείς επιλέξαμε μία πλήρωση του σωλήνα  $n = 95.65 \%$ .

Για τη δημιουργία της εξωτερικής διαμέτρου του πηνίου, του βάθους και του μήκους αυλάκωσης χρησιμοποιήσαμε τον μηχανουργικό τόρνο AL 700x280 Variable Speed του εργαστηρίου, που φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Εξαιτίας των ιδιοτήτων του υλικού του πηνίου επιλέχθηκε μία μικρότερη ταχύτητα περιστροφής για να αποφύγουμε την

υπερθέρμανσή του. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας λάβαμε όλα τα απαραίτητα μέτρα για προστασία και ασφάλεια (γάντια, ειδικά γυαλιά).



Εικόνα 4.1. Τόρνος

Έπειτα, κάναμε την περιέλιξη με τη χειροκίνητη συσκευή, που φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Η λειτουργία της συσκευής μοιάζει με κλωστοϋφαντουργική μηχανή. Έτσι, περιστρέφοντας τον κύλινδρο στα δεξιά το σύρμα τυλίγεται πάνω στο πηνίο και από το στροφόμετρο παίρνουμε την ένδειξη  $N = 450$  που είναι και οι σπείρες του πηνίου.



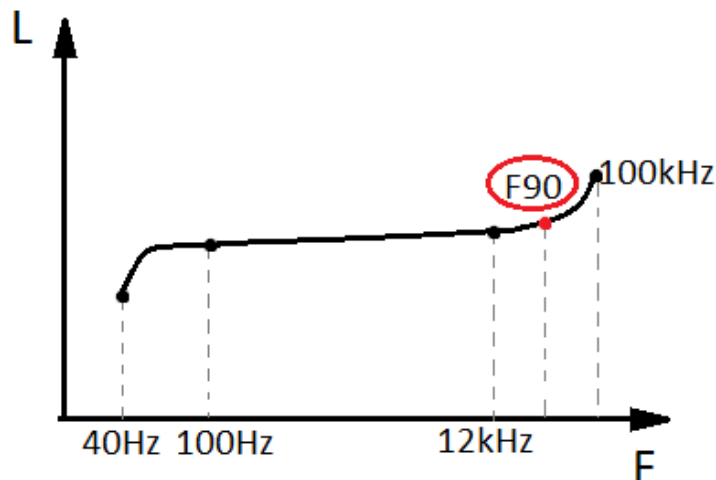
Εικόνα 4.2. Χειροκίνητη Συσκευή Περιέλιξης Πηνίου.

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Teddy V1.2. Τα χαρακτηριστικά του πηνίου δίνονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 3.2 τον οποίο παραθέτουμε και εδώ.

Πηνίο				
Υλικό		Polyoxymethylene (POM)-Delrin		
Αυτεπαγωγή $L$ [mH]		2,875		
Σπείρες $N$		450		
Διαστάσεις Αυλάκωσης				
Μήκος [cm]	Εξωτερική διάμετρος $D_{out}$ [mm]	Εσωτερική διάμετρος $D_{in}$ [mm]	Βάθος αυλάκωσης $t$ [mm]	Διάμετρος σύρματος περιέλιξης $d$ [mm]
1,1	19,56	15,56	2	0,2

## 4.2 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Τη συχνότητα δοκιμής την υπολογίσαμε προσεγγιστικά από τον τύπο (25) και τη βρήκαμε  $f_{90} = 21,2 \text{ kHz}$ . Επομένως οι υπόλοιπες τρεις συχνότητες θα είναι  $f_{180} = 42,4 \text{ kHz}$ ,  $f_{90/2} = 10,6 \text{ kHz}$  και  $f_{90/8} = 2,65 \text{ kHz}$ . Για να επαληθεύσουμε την ορθότητα της επιλογής αυτής αναζητήσαμε το εύρος λειτουργίας που θα λειτουργήσει το πηνίο μέσω του Agilent. Συνδέσαμε το πηνίο με το όργανο και το τοποθετήσαμε ακίνητο και μακριά από αντικείμενα πάνω στον πάγκο. Έπειτα κάναμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο όργανο ώστε να πάρουμε στην οθόνη του το παρακάτω γράφημα (Σχήμα 4.1) με τετημεμένη τη συχνότητα και τεταγμένη την αυτεπαγωγή του πηνίου.



Σχήμα 4.1. Διάγραμμα Συχνότητας-Αυτεπαγωγής Πηνίου Ελέγχου από το εργαστηριακό όργανο Agilent.

Παρατηρούμε πως η αυτεπαγωγή του πηνίου αλλάζει με τη συχνότητα. Το ευθύγραμμο σχεδόν τμήμα της καμπύλης μας δίνει το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του πηνίου και λίγο μετά το ευθύγραμμο τμήμα στην άνοδο της καμπύλης βρίσκεται η  $f_{90}$ . Η επιλογή που κάναμε μέσω του τύπου βρίσκεται σε αυτήν την περιοχή της καμπύλης και δίνει αυτεπαγωγή (μέση τιμή προσεγγιστικά)  $L_A = 3,058 \text{ mH}$ . Από το Teddy V1.2 υπολογίσαμε  $L_T = 2,875 \text{ mH}$  που δείχνει ότι είμαστε σε καλή αντιστοίχιση.

### 4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ AGILENT

Οι μετρήσεις με το εργαστηριακό όργανο Agilent έγιναν στο εργαστήριο του τμήματος και χρειάστηκαν αρκετό χρόνο. Κατά την προετοιμασία, συνδέσαμε το όργανο (Εικόνα 4.3) με το Scanner (Εικόνα 4.4), συνδέσαμε το πηνίο με το Scanner και το σταθεροποιήσαμε σε συγκεκριμένο σημείο, τοποθετήσαμε κατάλληλα (Εικόνα 3.1) το δοκιμακό σωλήνα SerNoTC2 πάνω στο Scanner και τέλος ρυθμίσαμε το όργανο μέσω H/Y ώστε να ξεκινήσει η μέτρηση.



Εικόνα 4.3. Εργαστηριακό Όργανο Agilent.

Το Scanner ήταν απαραίτητο για τη μέτρηση καθώς απαιτείται από το όργανο μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα της μετακίνησης του πηνίου εντός του σωλήνα. Για κάθε χιλιοστό του σωλήνα το όργανο έπαιρνε μετρήσεις για 200 διαφορετικές συχνότητες με εύρος 40Hz-260kHz. Αυτό που τελικά βλέπαμε κατά τη μέτρηση ήταν να μετακινείται σε ράγες ο σωλήνας με ακίνητο το πηνίο. Τα αποτελέσματα της μέτρησης τα φορτώσαμε σε κώδικα στο MatLab για επεξεργασία και εξαγωγή των διαγραμμάτων. Τονίζουμε εδώ, πως δεν χρειάστηκε να γίνει κανονικοποίηση των τιμών των αποτελεσμάτων ούτε περιστροφή ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμες οι τιμές με αυτές της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.4. Scanner.

## 4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ OLYMPUS MULTISCAN 5800

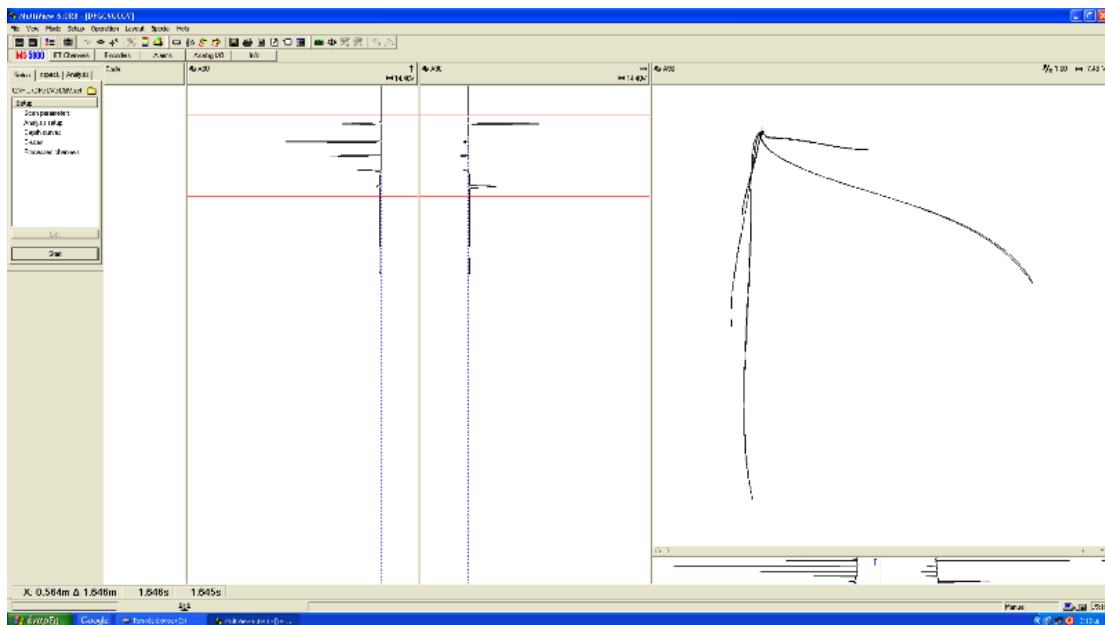
Η μέτρηση στο βιομηχανικό όργανο έγινε πιο γρήγορα και χωρίς ιδιαίτερη προετοιμασία. Συνδέσαμε το όργανο με τον Η/Υ και κάναμε μέσω της εφαρμογής Multiview τις απαραίτητες ρυθμίσεις. Αυτές αποτελούσαν τη βαθμονόμηση του οργάνου, τη ρύθμιση του φίλτρου καθώς και κάποιων παραμέτρων συχνότητας ώστε να μας δώσει αποτελέσματα για τις τέσσερις συχνότητες που μας ενδιέφεραν. Τέλος συνδέσαμε το πηνίο με το όργανο και το μετακινήσαμε σταθερά ώστε να πάρουμε τις μετρήσεις.

Τις μετρήσεις τις φορτώσαμε επίσης σε κώδικα του MatLab για περαιτέρω επεξεργασία. Εδώ χρειάστηκε να κάνουμε μία κανονικοποίηση, διότι το όργανο λειτουργεί με υψηλές τιμές ρεύματος ενώ στο Comsol το ρεύμα ήταν ίσο με  $I = 1[A]$ , καθώς και μία περιστροφή ώστε να μπορούν να γίνουν συγκρίσιμα τα διαγράμματα της προσομοίωσης και των μετρήσεων. Στην Εικόνα 4.6 βλέπουμε την απεικόνιση της σύνθετης αντίστασης άμεσα από το πρόγραμμα Multiview.





Εικόνα 4.5. Olympus Multiscan 5800.

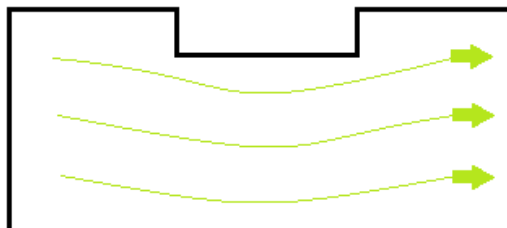


Εικόνα 4.6. Multiview.

## 4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

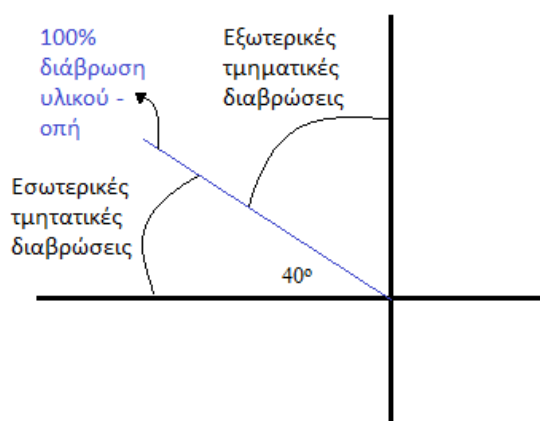
Η κατανόηση της ανάλυσης φάσης στα διαγράμματα σύνθετης αντίστασης είναι σημαντική για την ερμηνεία τους. Όσον αφορά την ανίχνευση ρωγμών, σύμφωνα με τη θεωρία, η μετατόπιση φάσης αυξάνεται γραμμικά με το βάθος των δινορρευμάτων

κάτω από την επιφάνεια. Τα δινορρέυματα περιφέρονται γύρω από τις ρωγμές που συνεπάγεται πως για επιφανειακές τμηματικές διαβρώσεις εξαναγκάζονται να εισχωρήσουν βαθύτερα στο υλικό (Σχήμα 4.7). Το γεγονός αυτό είναι που προκαλεί και την αλλαγή στη φάση.



Σχήμα 4.2. Συμπεριφορά δινορρευμάτων γύρω από επιφανειακή ρωγμή.

Όσον αφορά τη μέτρηση πάχους, η σύνθετη αντίσταση μεταβάλλεται καθώς το πάχος μειώνεται. Έτσι παρατηρούμε στο διάγραμμα πως καθώς το πάχος του υλικού μειώνεται η καμπύλη πλησιάζει το σημείο αέρα. Εκεί δηλαδή που θα υπήρχε μία οπή. Γενικά για την ερμηνεία των διαγραμμάτων η ανάλυση φάσης θα είχε την παρακάτω μορφή για μετρήσεις με τη συχνότητα  $f_{90}$  (Σχήμα 4.3).

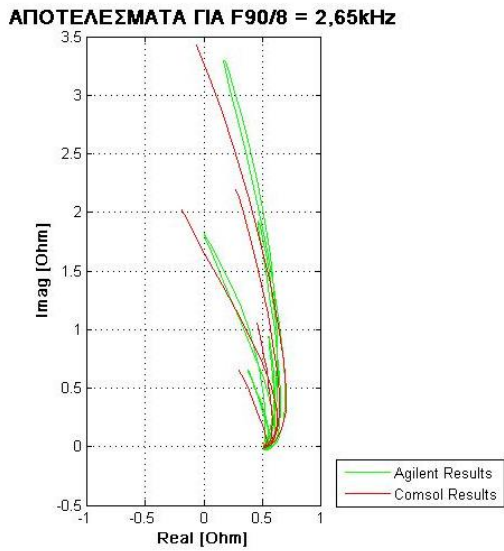
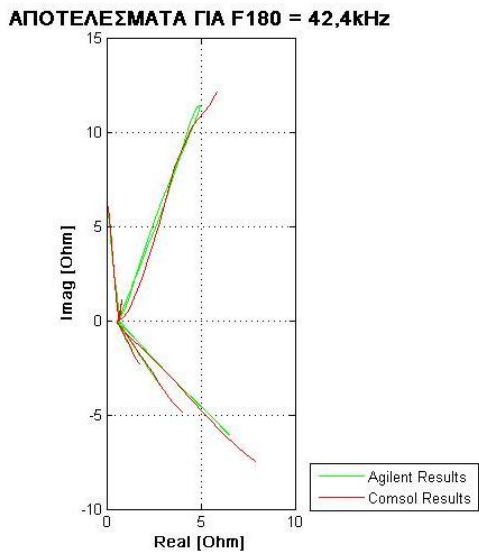
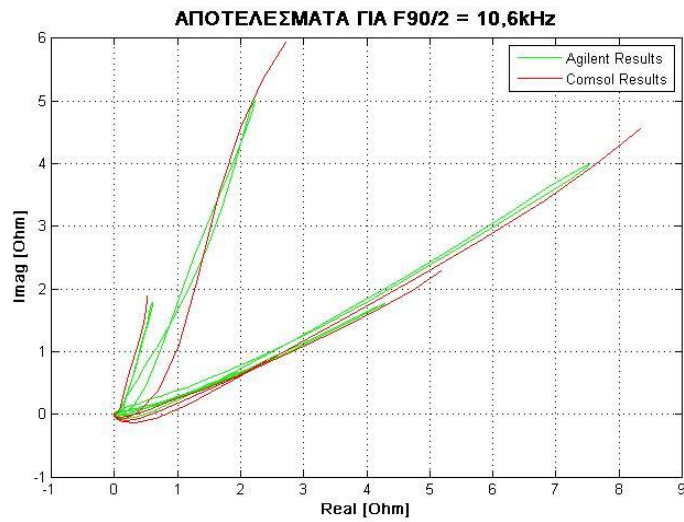
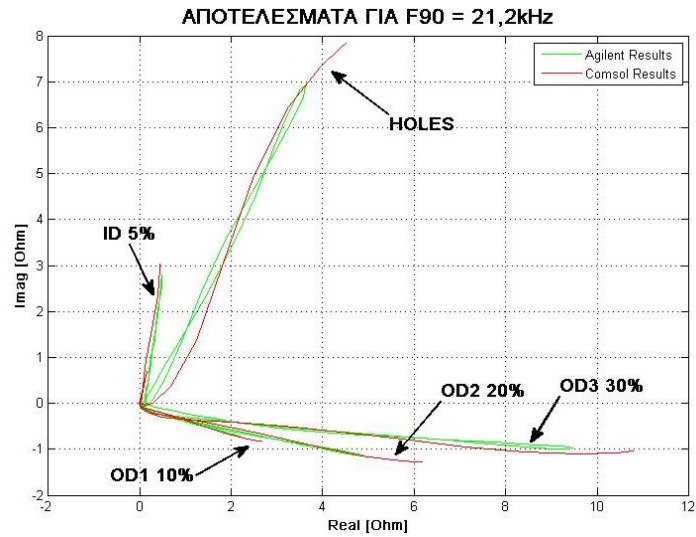


Σχήμα 4.3. Ανάλυση φάσης.

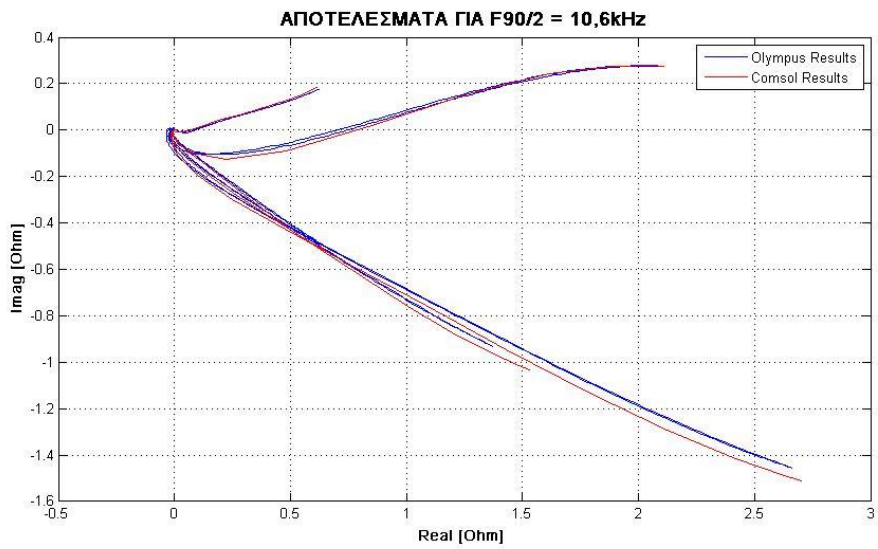
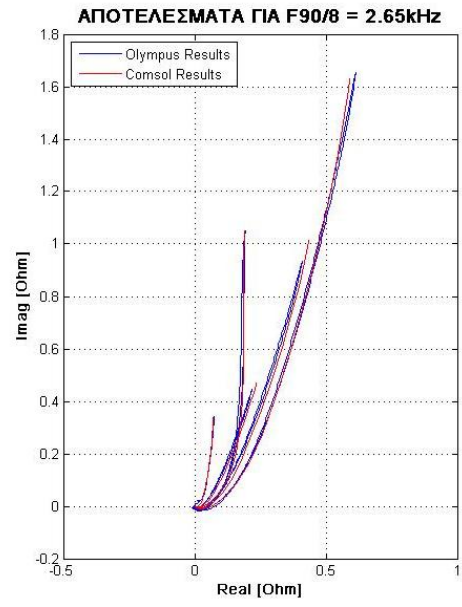
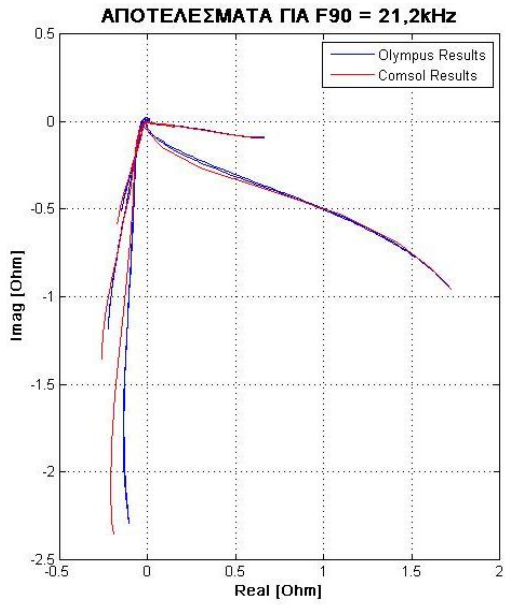
## 4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

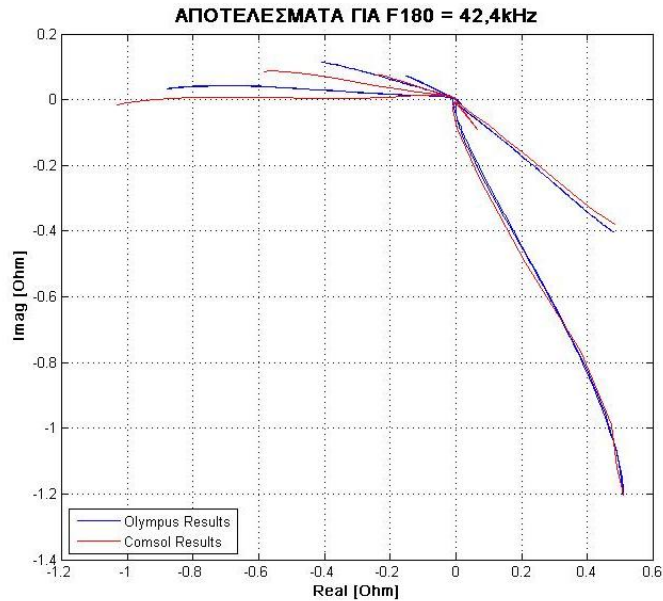
Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα συγκριτικά διαγράμματα σύνθετης αντίστασης της προσομοίωσης και των μετρήσεων.





Σχήμα 4.4. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης Comsol – Agilent.





Σχήμα 4.5. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης Comsol – Olympus MS5800.

Παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα πως έχουμε όντως σωστή ανάλυση φάσης και ικανοποιητική ταύτιση των καμπυλών. Αυτό μας δείχνει τελικά πως είχαμε μία πετυχημένη προσομοίωση.

Ακόμα, είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως στα διαγράμματα Comsol – Olympus MS5800 έχουμε πολύ καλύτερη ταύτιση από ότι στα διαγράμματα Comsol – Agilent. Η αιτία έγκειται στο γεγονός πως το εργαστηριακό όργανο έκανε μετρήσεις σε 200 συχνότητες, από τις οποίες οι τέσσερις αποτελούσαν πρωταρχικό μας ενδιαφέρον. Επειδή όμως ήταν ορισμένες ήδη από το όργανο, χωρίς να μπορούμε να τις αλλάξουμε, υπήρχε μία διαφορά της τάξης του  $\sim 0,4\%$  σε σχέση με τις συχνότητες που υπολογίσαμε (βλέπε ενότητα 4.2). Επίσης, άλλη μία αιτία ήταν ότι στις μετρήσεις του Olympus MS5800 έγινε μία κανονικοποίηση και περιστροφή που είχε ως αποτέλεσμα την «κάλυψη» κάποιων μικροδιαφορών.

Τέλος, η δημιουργία των τμηματικών διαβρώσεων και των οπών στο σωλήνα θα μπορούσε να είχε γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια, έτσι ώστε να έχουμε ακόμα καλύτερη συνέπεια στη σύγκριση των μετρήσεων και της προσομοίωσης. Δηλαδή, με έναν πιο αξιόπιστο δοκιματικό σωλήνα.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Γκάμτζας, Χρήση πεπερασμένων Στοιχείων σε Μη-Καταστρεπτικούς Ελέγχους με Δινορρεύματα, ΠΔΜ (2008).
- [2] Β. Τζιάρας, Ι. Χατζηνικολάου, Μη-Καταστροφικός Έλεγχος με τη Χρήση Μη-Γραμμικών Ακουστικών Τεχνικών, ΑΠΘ (2011).
- [3] Ν. Μαγουλάς, Αναλυτική και Αριθμητική Επίλυση Ειδικών Προβλημάτων Δινορρευμάτων, ΕΜΠ (2011).
- [4] Δ. Τσαλκίδης, Π. Χατζηλίδης, Προσομοίωση Διατάξεων Μη-Καταστροφικού Ελέγχου, ΠΔΜ (2010).
- [5] Edminister, Joseph A., Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία, ΕΣΠΙ Εκδοτική (1998).
- [6] [digitalschool.minedu.gov.gr](http://digitalschool.minedu.gov.gr)
- [7] [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)
- [8] V. Cecco, Van Drunen, F. Sharp, Eddy Current Testing, Vol. 1, Atomic Energy of Canada Limited (1987).
- [9] Θ. Θεοδουλίδης, Θεωρία Δινορρευμάτων, Κέντρο Τεχνολογίας και Ποιοτικού Ελέγχου (1999).
- [10] Χ. Α. Βοζίκης, Φυσική ΙΙ, ΑΤΕΙ Σερρών (2008).
- [11] Tirupathi R. Chandrupalta, Ashok D. Belegundu, Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία για Μηχανικούς, Εκδόσεις Κλειδάριθμος (2005).
- [12] J.Stolte, L. Upda, W. Lord, Multifrequency Eddy Current Testing of Steam Generator Tubes Using Optimal Affine Transformation, Department of Electrical Engineering, Colorado State University.
- [13] T.P. Theodoulidis, J. Martinos, N. Poulakis, Numerical Results for the WFNDEC 2012 Eddy Current Benchmark Problem, University of Western Macedonia, Kozani.
- [14] D.J. Harrison, L.D. Jones, S.K. Burke, Benchmark Problems for Defect Size and Shape Determination in Eddy Current Nondestructive Evaluation.
- [15] Μ.Κ. Κωτούζας & ΣΙΑ Ο.Ε., Έλεγχος Σωλήνων, Κέντρο Τεχνολογίας και Ποιοτικού Ελέγχου.
- [16] William D. Callister, JR., Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 5<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [17] Θ. Θεοδουλίδης, Μ. Κωτούζας, Μη- Καταστροφικοί Έλεγχοι, Τεχνική Επιθεώρηση, Οκτώβριος 2001.

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 2.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα σε πηνίο πάνω από αγωγίμη πλάκα δημιουργεί δινορρέυματα [7] .....	9
Σχήμα 2.2. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μεταλλικές πλάκες του ίδιου πάχους αλλά διαφορετικής αγωγιμότητας.....	11
Σχήμα 2.3. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης πριν και μετά την κανονικοποίηση .....	13
Σχήμα 2.4. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης για μαγνητικά και μη μαγνητικά υλικά.....	15
Σχήμα 2.5. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης που δείχνει την αγωγιμότητα και τις καμπύλες ανύψωσης .....	16
Σχήμα 2.6. Βάθος διείσδυσης σε δύο διαφορετικές καταστάσεις.....	18
Σχήμα 2.7. Πρότυπο βάθος διείσδυσης σε συνάρτηση με την αγωγιμότητα και την επιλεγμένη συχνότητα της επιθεώρησης.....	18
Σχήμα 2.8. Πορεία των δινορρευμάτων για παράλληλη και κάθετη σε αυτά ασυνέχεια.....	20
Σχήμα 2.9. Απόλυτη και διαφορική διάταξη πολλαπλών πηνίων .....	22
Σχήμα 2.10. Κυκλώματα από τυπικά όργανα δινορρευμάτων.....	24
Σχήμα 2.11. Τεχνητές ασυνέχειες που χρησιμοποιούνται ως πρότυπα αναφοράς	27
Σχήμα 2.12 Διαγράμματα σύνθετης αντίστασης από μετρήσεις με το όργανο Olympus MS 5800 με και χωρίς φίλτρο.....	29
Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά δοκιμαστικού σωλήνα Admiralty Brass Ser NoTC2 .....	37
Εικόνα 3.1. Δοκιμαστικός σωλήνας Admiralty Brass Ser NoTC2- Τοποθετημένος κατάλληλα πάνω στο Scanner .....	37
Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά πηνίου.....	37
Εικόνα 3.2. Επιλογή προβλήματος 2D.....	38
Εικόνα 3.3. Σχεδιασμός Εξωτερικής Ατέλειας OD3.....	39
Εικόνα 3.4. Σταθερές του προβλήματος.....	39
Εικόνα 3.5. «Πλέγμα» 2D .....	40
Εικόνα 3.6. Επίλυση Προβλήματος 2D – Απεικόνιση των δυναμικών γραμμών.	41

<b>Εικόνα 3.7. Επιλογή προβλήματος 3D.....</b>	<b>42</b>
<b>Εικόνα 3.8. Σχεδιασμός Οπής .....</b>	<b>42</b>
<b>Εικόνα 3.9. «Πλέγμα» 3D .....</b>	<b>43</b>
<b>Εικόνα 3.10. Επίλυση Προβλήματος 3D-Απεικόνιση δυναμικών γραμμών. ....</b>	<b>43</b>
<b>Εικόνα 4.1. Τόρνος .....</b>	<b>46</b>
<b>Εικόνα 4.2. Χειροκίνητη Συσκευή Περιέλιξης Πηνίου .....</b>	<b>46</b>
<b>Σχήμα 4.1. Διάγραμμα Συχνότητας-Αυτεπαγωγής Πηνίου Ελέγχου από το εργαστηριακό όργανο Agilent .....</b>	<b>47</b>
<b>Εικόνα 4.3. Εργαστηριακό Όργανο Agilent.....</b>	<b>48</b>
<b>Εικόνα 4.4. Scanner .....</b>	<b>49</b>
<b>Εικόνα 4.5. Olympus Multiscan 5800.....</b>	<b>50</b>
<b>Εικόνα 4.6. Multiview .....</b>	<b>50</b>
<b>Σχήμα 4.2. Συμπεριφορά δινορρευμάτων γύρω από επιφανειακή ρωγμή.....</b>	<b>51</b>
<b>Σχήμα 4.3. Ανάλυση φάσης .....</b>	<b>51</b>
<b>Σχήμα 4.4. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης Comsol – Agilent.....</b>	<b>52</b>
<b>Σχήμα 4.5. Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης Comsol – Olympus MS5800.....</b>	<b>53-54</b>