



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ**

Μπουζούκης Κωνσταντίνος-Παναγιώτης
(Αριθμός Ειδικού Μητρώου: 2046)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη
2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ**

Μπουζούκης Κωνσταντίνος-Παναγιώτης
(Αριθμός Ειδικού Μητρώου: 2046)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Θεοδουλίδης Θεόδωρος

Κοζάνη
2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2020-2021.

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας Θεοδουλίδη Θεόδωρο για την παρότρυνση και την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των μη καταστροφικών ελέγχων μέσω δινορρευσμάτων, την άριστη συνεργασία κατά την πραγματοποίηση τόσο της σπουδαστικής όσο και της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και το συμβουλευτικό του ρόλο σε ένα μεγάλο μέρος των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Κυριαζόγλου Αθανάσιο, για τη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφερε κατά την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή στήριξη και εμπιστοσύνη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Μπουζούκης Κωνσταντίνος - Παναγιώτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση της διενέργειας μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στην περιοχή μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικές πληροφορίες για θέματα σχετικά με τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, όπως η διαδικασία διενέργειας αυτής, τα χαρακτηριστικά της ζώνης συγκόλλησης και η επίδραση αυτών επί της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οι ατέλειες που συναντώνται σε αυτή, καθώς επίσης και οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου που δύνανται να εφαρμοστούν στην περίπτωση των συγκολλήσεων αυτών. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο, ο εξοπλισμός, τα πλεονεκτήματα αλλά και οι περιορισμοί του μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης ενός προβλήματος μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων σε αγωγίμο μέσο σταθερής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της διαδικασίας αυτής επί καθιερωμένων benchmarks, τα οποία αποδεικνύουν τη δυνατότητα του COMSOL Multiphysics να παρέχει αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία συνάδουν πλήρως με πραγματικά πειραματικά αποτελέσματα.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην προσομοίωση μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων στην περιοχή μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Αρχικά παρουσιάζεται η διαδικασία μοντελοποίησης των μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης και εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που αφορούν τη μη ύπαρξη ασυνέχειας, την ύπαρξη επιφανειακών ασυνεχειών αλλά και την ύπαρξη υποεπιφανειακών ασυνεχειών στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης. Τέλος πραγματοποιείται επίσης σύγκριση μεταξύ τριών διαφορετικών μεθόδων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση των μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης αλλά και των αποτελεσμάτων στα οποία οι τρεις μέθοδοι αυτές οδηγούν.

ABSTRACT

This thesis aims to simulate the process of eddy current non-destructive testing in the weld area of friction stir welding, where electrical conductivity variations due to the welding process are present, by using the COMSOL Multiphysics finite element software. The First Chapter discusses several aspects of friction stir welding, including the actual process of conducting this type of welding, the features of the weld zone and their impact on electrical conductivity, imperfections that may possibly be encountered in it, as well the non-destructive inspection methods that may be applied in friction stir welding. The Second Chapter presents the relevant theoretical background and equipment, as well as the advantages and limitations of eddy current testing.

The Third Chapter presents the process of modelling a problem of eddy current testing in a medium of constant electrical conductivity, as well as the results of applying this method against established benchmarks, which demonstrate the ability of COMSOL Multiphysics to produce numerical results fully compatible with real experimental results.

The Fourth Chapter is focused on the simulation of eddy current testing in the zone of variable conductivity in friction stir welding. The process of modeling the electrical conductivity changes in the weld zone is first presented. Subsequently, there is a presentation of the results of simulations regarding the nonexistence of discontinuity and the existence of surface and subsurface discontinuities in the middle of the weld zone. Finally, a comparison is made between three different methods that may be used in the modelling of electrical conductivity changes in the weld zone, as well as the results produced by each of these three methods.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	Η ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	1
1.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	1
1.2.	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	1
1.3.	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	4
1.4.	ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΖΩΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	5
1.4.1.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ	6
1.4.2.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	8
1.5.	ΤΥΠΙΚΑ ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΑΤΩΝΤΑΙ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	10
1.6.	Ο ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ	14
2.	Ο ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ	19
2.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ	19
2.2.	ΤΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	20
2.3.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ	21
2.4.	Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΩΓΜΩΝ	25
2.5.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	27
2.6.	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	29
2.7.	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	32
3.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	33
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS	33
3.2.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	34
3.2.1.	ΠΡΩΤΟ BENCHMARK	34
3.2.2.	ΔΕΥΤΕΡΟ BENCHMARK	46

4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	57
4.1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS	58
4.2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	61
4.3.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	66
4.3.1.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 5 mm	68
4.3.2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 1 mm	73
4.3.3.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 0.5 mm	77
4.4.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	81
4.4.1.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 0.1 mm ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	82
4.4.2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 0.2 mm ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	85
4.5.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΚΑΘΕΤΑ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ	86
4.5.1.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 5 mm	88
4.5.2.	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 1 mm	89
4.6.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	92
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση (Friction Stir Welding) είναι μια καινοτόμος μέθοδος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, η οποία κατοχυρώθηκε το 1991 από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων TWI (The Welding Institute). Πρόκειται για μια τεχνική συγκόλλησης, κατά την οποία, ένα μη καταναλισκόμενο περιστρεφόμενο εργαλείο (Tool), το οποίο διαθέτει ειδικά σχεδιασμένο πείρο (Pin ή Probe) και κατάλληλο περιουχένιο (Shoulder), βυθίζεται στις εφαιπόμενες ακμές, καλά συγκρατημένων υπό συγκόλληση τεμαχίων, και κινείται κατά μήκος της επιθυμητής ακμής σύνδεσης (Joint) [1].

Σύμφωνα με το TWI, το εύρος των υλικών που μπορούσαν να συγκολληθούν μέσω της μεθόδου αυτής ήταν αρχικά περιορισμένο σε σχετικά μαλακά υλικά όπως ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο και τα κράματα αλουμινίου. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, το εύρος αυτό έχει επεκταθεί και περιλαμβάνει πλέον υλικά όπως ο χαλκός, το τιτάνιο, χάλυβες (κοινοί αλλά και ανοξείδωτοι), κράματα σιδήρου αλλά και κράματα νικελίου. Σε θεωρητικό επίπεδο, κάθε υλικό το οποίο δύναται να διαμορφωθεί εν θερμό (hot worked) μπορεί να συγκολληθεί μέσω της μεθόδου αυτής.

Οι ιδιότητες και η υψηλή της αξιοπιστία της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση την καθιστούν ιδανική επιλογή για τη ναυπηγική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας όπως η αεροναυπηγική, η διαστημική και η βιομηχανία ηλεκτρονικών συστημάτων, για τη διενέργεια συγκολλήσεων μεταξύ ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [1, 2].

1.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η διαδικασία πραγματοποίησης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση ξεκινά με την έναρξη της περιστροφής ενός κυλινδρικού εργαλείου συγκόλλησης με περιουχένιο και κατάλληλα διαμορφωμένο προφίλ. Καθώς το εργαλείο αυτό περιστρέφεται, ξεκινά σταδιακά να βυθίζεται στη γραμμή συγκόλλησης μεταξύ δύο προς συγκόλληση δοκιμίων, τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Κατά τη διάρκεια της βύθισης του εργαλείου, τόσο το εργαλείο, όσο και τα δοκίμια βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

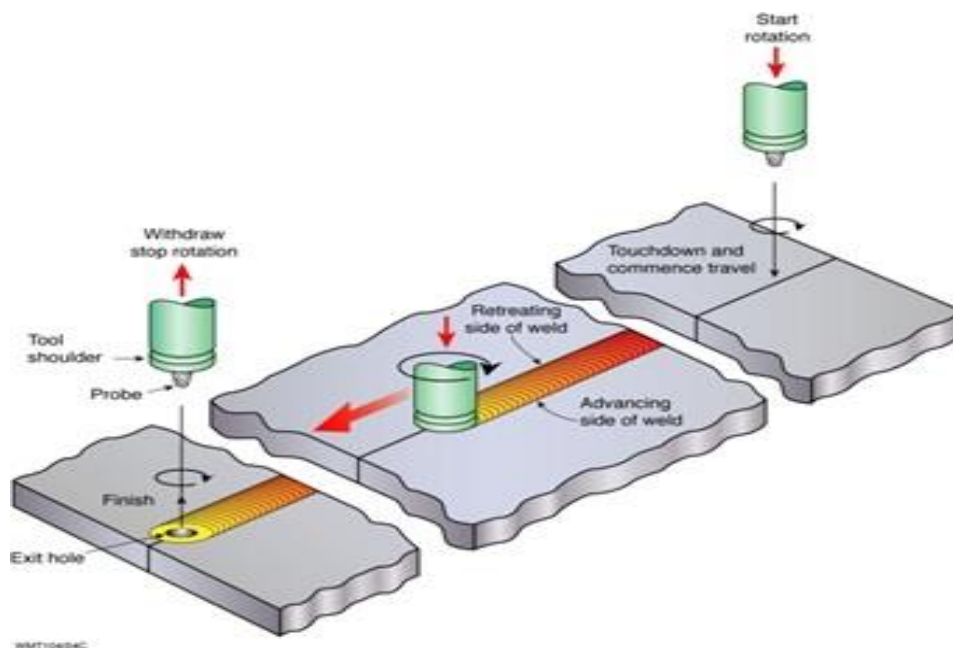
Η φάση βύθισης ολοκληρώνεται όταν πλέον το περιουχένιο βρίσκεται σε επαφή με το υπόστρωμα. Στην περιοχή αυτή, λαμβάνει χώρα παραγωγή θερμότητας λόγω της τριβής και της πλαστικής παραμόρφωσης. Η θερμότητα αυτή οδηγεί τα προς συγκόλληση μέταλλα στο να

μαλακώσουν χωρίς όμως να φτάσουν στο σημείο τήξης τους. Στη συνέχεια, το μέτρο της αναπτυσσόμενης δύναμης μειώνεται καθώς τα δοκίμια φθάνουν στην κρίσιμη για την επίτευξη πλαστικής ροής θερμοκρασία.

Όταν έχει πλέον επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος διείσδυσης του πείρου και το κατάλληλο θερμοκρασιακό επίπεδο, ξεκινά η μετακίνηση του εργαλείου κατά το μήκος της γραμμής συγκόλλησης με την περιστροφική του ταχύτητα να διατηρείται σταθερή. Έτσι, το περιανχένιο και ο πείρος αναδεύουν (αναμειγνύουν) τα μέταλλα κατά μήκος της διαδρομής του εργαλείου. Το πλαστικοποιημένο πλέον υλικό μεταφέρεται από την ακμή προσβολής του εργαλείου στη ακμή φυγής του πείρου του εργαλείου και σφυρηλατείται λόγω της άμεσης επαφής του με το περιανχένιο του εργαλείου, την τράπεζα, αλλά και το προφίλ του πείρου. Έτσι, η διέλευση του εργαλείου αφήνει πίσω της έναν νεοσχηματισμένο, στερεάς φάσης δεσμό μεταξύ των δυο δοκιμίων [2].

Μόλις το εργαλείο συγκόλλησης φτάσει στο πέρας της διαδρομής, αποσύρεται προς τα επάνω από τη γραμμή συγκόλλησης. Κατά την απόσυρση του αφήνει πίσω του μια οπή (exit-hole). Κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης είναι δυνατό να οριστούν διάφορες προς έλεγχο παράμετροι, όπως η ταχύτητα μετακίνησης του εργαλείου, η κάθετη αξονική δύναμη, η ροπή, η καταναλισκόμενη ισχύς, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, κλπ. [3].

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία πραγματοποίησης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση.

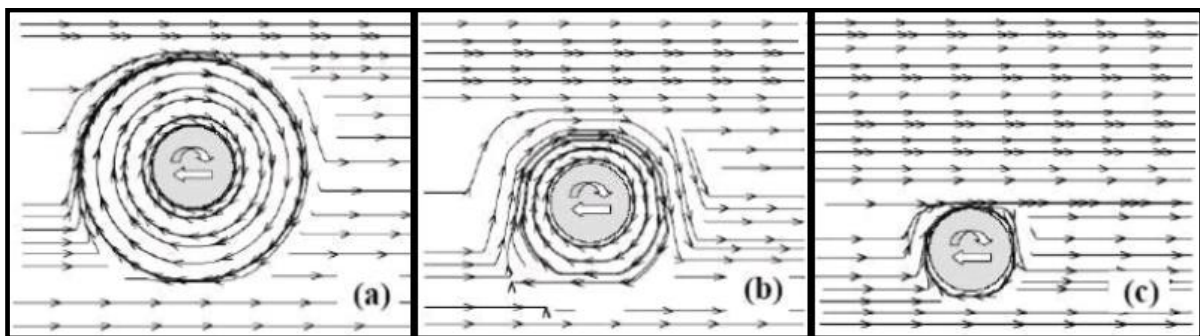


Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας πραγματοποίησης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση. (Πηγή: twi-global.com)

Το υλικό ρέει γύρω από το εργαλείο συγκόλλησης σύμφωνα με τη φορά περιστροφής του δεύτερου και εναποτίθεται υπό τη μορφή ζωνών. Οι ζώνες αυτές είναι εμφανείς σε οποιαδήποτε εγκάρσια τομή

μας συγκόλλησης. Το εύρος των ζωνών είναι συνάρτηση της απόστασης που διήνυσε το εργαλείο κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής γύρω από την άξονα του. Η ροή αυτή του υλικού δεν αποτελεί προϊόν κάποιου κρυσταλλογραφικού μετασχηματισμού, αλλά είναι αποτέλεσμα μεταφοράς μάζας. Τυχόν ασυμμετρίες στη μικροδομή και τη γεωμετρία εντός του πυρήνα αποτελούν προϊόν ασύμμετρης ροής γύρω από τον άξονα του εργαλείου. Η ροή του υλικού κατά την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση μπορεί να περιγραφεί από το κινηματικό μοντέλο Nunes (Nunes Kinematic Model) και το μοντέλο Arbegast (Arbegast Metalworking model) [3].

Το πλαστικοποιημένο υλικό ρέει λόγω της αλληλεπίδρασης του τόσο με το επιφανειακό προφίλ του περιαιχηνίου όσο και του πείρου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πεδίο ροής να μην είναι σταθερό αλλά να μεταβάλλεται συναρτήσει του της απόστασης από την επιφάνεια. Όπως είναι προφανές, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του δοκιμίου, η επίδραση του προφίλ του περιαιχηνίου επί της ροής του υλικού είναι όλο και μικρότερη. Η ροή του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου παρουσιάζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 2.



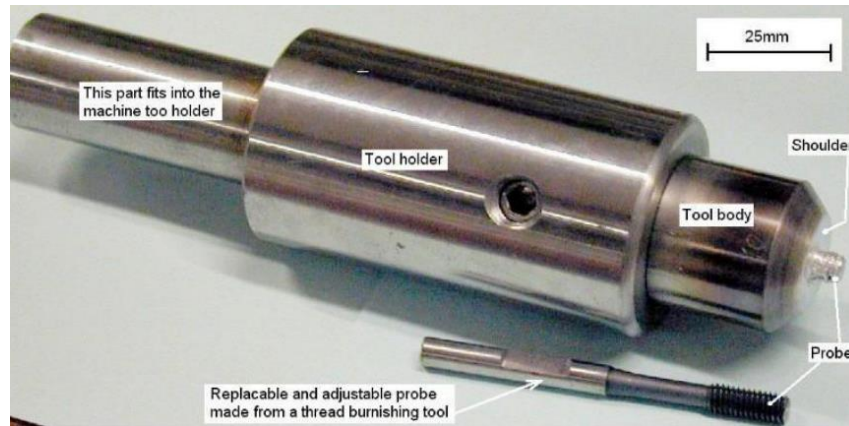
Εικόνα 2. Ροή του πλαστικοποιημένου υλικού γύρω από τον πείρο σε διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου (a: 0.35 mm, b: 1.59 mm, c: 2.28 mm) [2].

Καθόλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, τα προς συγκόλληση δοκίμια θα πρέπει να είναι στερεωμένα επί της τράπεζας εργασίας, με τρόπο που να εμποδίζει τον διαχωρισμό των προσώπων των δοκιμίων εξαιτίας των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης στη διεπιφάνεια εργαλείου/δοκιμίων.

Σε αντίθεση με τις συγκολλήσεις τήξης, στην περίπτωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση δεν λαμβάνει χώρα τήξη του υλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό στη ζώνη συγκόλλησης να παραμένει σε λεπτόκοκκη κατάσταση παρόμοια με αυτή του μετάλλου βάσης.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση είναι το γεγονός πως οι παράμετροι που πρέπει να ελεγχθούν κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης είναι σημαντικά λιγότερες σε σχέση με τις συγκολλήσεις τήξης. Πιο συγκεκριμένα, σε μια συγκόλληση τήξης υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν, όπως η τάση, η ένταση, η παροχή προστατευτικού αερίου, το μήκος του ηλεκτρικού τόξου, η πρόωση του υλικού πλήρωσης, κλπ. Αντιθέτως, στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση υπάρχουν τρεις μόνο παράγοντες προς έλεγχο,

αυτοί είναι η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, ταχύτητα πρόωσης και η πίεση [2]. Ένα τυπικό παράδειγμα εργαλείου που χρησιμοποιείται για τη διενέργεια των συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. Προσαρμοζόμενο εργαλείο συγκόλλησης FSW [1].

1.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση σε σχέση με τις συμβατικές συγκολλήσεις τήξης [1, 2].

Πλεονεκτήματα

- Βασίζεται στην πλαστικοποίηση και την ταυτόχρονη ανάδευση των μετάλλων, το γεγονός αυτό την καθιστά πολύ αποτελεσματική για τη συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων αλλά και μετάλλων, η συγκόλληση των οποίων μέσω συμβατικών μεθόδων είναι δύσκολη (όπως ορισμένα κράματα αλουμινίου).
- Οι ρηγματώσεις που εμφανίζονται σε μεθόδους συγκόλλησης τήξης εξαλείφονται. Εκτός αυτού, δεν υπάρχουν απώλειες υλικού λόγω σχηματισμού αερίων ή σταγονιδίων τήγματος.
- Βελτιωμένη ασφάλεια λόγω της απουσίας τοξικών αερίων αλλά και σταγονιδίων τήγματος.
- Μηδενικές σχεδόν ανάγκες για αναλώσιμα καθώς δεν απαιτείται πληρωτικό μέσο και τα συμβατικά χαλύβδινα εργαλεία συγκόλλησης μπορούν να πραγματοποιήσουν συγκολλήσεις άνω των 1000 m.
- Λόγω του υψηλού βαθμού αυτοματοποίησης της μεθόδου, το κόστος εκπαίδευσης του προσωπικού είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό των συμβατικών μεθόδων.

- Δύναται να αυτοματοποιηθεί και να εφαρμοστεί σε διάφορους προσανατολισμούς, θέσεις, αλλά και επιφάνειες συγκόλλησης.
- Ειδικά στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου, δύναται να επιτευχθούν συγκολλήσεις πολύ ανθεκτικές.
- Δεν απαιτείται (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων) προετοιμασία των άκρων των δοκιμίων.
- Μικρές παραμορφώσεις, ακόμη και σε περιπτώσεις συγκολλήσεων μεγάλου μήκους.
- Η προκύπτουσα κοκκομετρία είναι σε μεγάλο βαθμό ομοιόμορφη, χωρίς πορώδες ή/και ακαθαρσίες από καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια.
- Αποτελεί μια ενεργειακά αποδοτική μέθοδο.
- Δεν απαιτείται προκαταρκτική αφαίρεση τυχών οξειδίων.

Μειονεκτήματα

- Δημιουργία οπής κατά την απομάκρυνση του εργαλείου συγκόλλησης.
- Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της συγκόλλησης αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις, οι οποίες καθιστούν αναγκαία την ύπαρξη ενός ισχυρού συστήματος συγκράτησης των τεμαχίων.
- Η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ευέλικτη από τις συμβατικές χειροκίνητες μεθόδους συγκόλλησης (Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσιάζεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη συγκόλλησης τεμαχίων με διαφορετικά πάχη ή/και τεμαχίων τα οποία απαιτούν την πραγματοποίηση μη-γραμμικών συγκολλήσεων).
- Η ταχύτητα πραγματοποίησης της συγκόλλησης είναι συχνά μικρότερη σε σχέση με ορισμένες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης (αν και το γεγονός αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί αν κατά τη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση απαιτούνται λιγότερα περάσματα για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης).
- Υψηλός ρυθμός φθοράς των εργαλείων συγκόλλησης (Τα συμβατικά χαλύβδινα εργαλεία μπορούν να συγκολλήσουν έως 1000 m αλουμίνιο, ενώ για τη συγκόλληση κραμάτων υψηλής αντοχής όπως κράματα τιτανίου ή νικελίου, η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι πολύ μικρότερη).
- Υψηλό κόστος απόκτησης του κατάλληλου εξοπλισμού.

1.4. ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΖΩΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι μεταβολές που προκαλεί η συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση στη μικροδομή, και κατ'επέκταση στις ηλεκτρικές ιδιότητες των συγκολληθέντων δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δοκιμίων, οι οποίες αποτελούν επακόλουθο των μεταβολών της μικροδομής του υλικού.

1.4.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

Έπειτα από την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, μπορούν να παρατηρηθούν τέσσερις διακριτές ζώνες στη μικροδομή του υλικού. Αυτές είναι οι ακόλουθες [3].

Μέταλλο βάσης (Unaffected base material)

Η συγκεκριμένη ζώνη είναι αυτή που βρίσκεται πιο μακριά από τη συγκόλληση. Έχει την ίδια μικροδομή και μηχανικές ιδιότητες με αυτές που είχε πριν την πραγματοποίηση της συγκόλλησης καθώς, τυχόν θερμοκρασιακές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στη ζώνη αυτή δεν είναι δυνατό να μεταβάλλουν τη μικροδομή ή/και τις ιδιότητες του υλικού.

Θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat affected zone - HAZ)

Καθώς πλησιάζουμε προς το κέντρο της συγκόλλησης συναντάμε τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Στη ζώνη αυτή δεν έχει λάβει χώρα πλαστική παραμόρφωση του υλικού, παρόλα αυτά η αναπτυσσόμενη κατά τη διενέργεια της συγκόλλησης θερμότητα, οδηγεί σε μεταβολές τόσο στη μικροδομή του υλικού, όσο και στις μηχανικές του ιδιότητες.

Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermo-mechanically affected zone - TMAZ)

Εντός της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά σε μια διαδικασία παρόμοια σε μεγάλο βαθμό με την εν θερμώ διαμόρφωση (Hot working) των μεταλλικών υλικών. Στις περιπτώσεις συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου, στη ζώνη αυτή δεν λαμβάνει χώρα ανακρυστάλλωση. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις συγκόλλησης άλλων υλικών όπως τιτανίου, κραμάτων τιτανίου, χαλκού αλλά και ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων είναι δυνατό να υπάρξει ανακρυστάλλωση. Γενικά, υπάρχει ένα ευδιάκριτο σύνορο μεταξύ του πυρήνα και της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης.

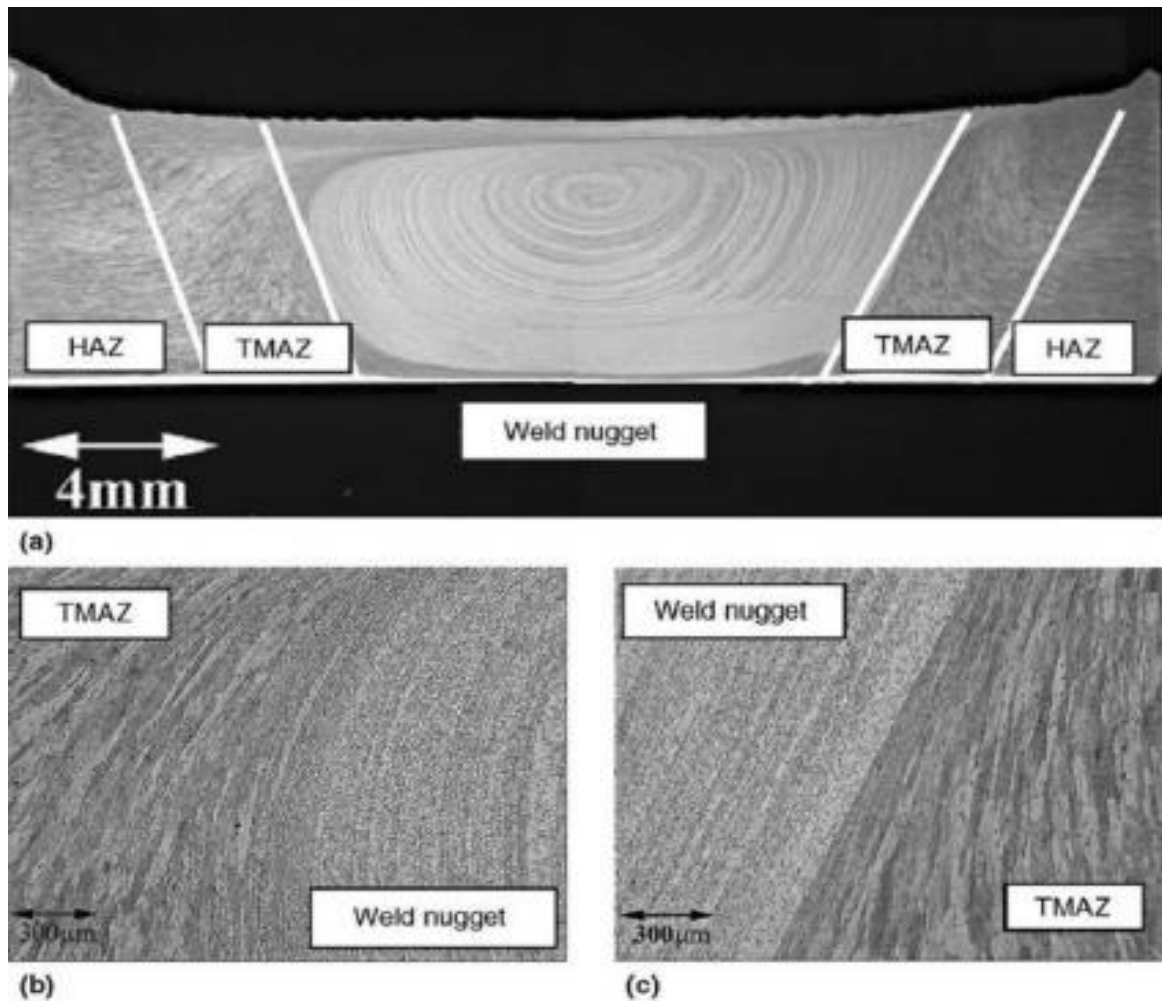
Ζώνη ανάδευσης ή πυρήνας συγκόλλησης (Stir zone ή weld nugget)

Η ζώνη ανάδευσης είναι η περιοχή στην οποία η έντονη πλαστική παραμόρφωση σε συνδυασμό με την παραγόμενη λόγω τριβής θερμότητα κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, οδηγούν σε ανακρυστάλλωση και τη δημιουργία μιας λεπτόκοκκης μικροδομής. Περιβάλλεται από τη Θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη. Είναι η ζώνη η οποία κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης καταλαμβάνεται από τον πείρο του εργαλείου συγκόλλησης. Η λεπτόκοκκη κρυσταλλική δομή προσδίδει στο μέταλλο άριστες μηχανικές ιδιότητες, αντίσταση έναντι κόπωσης, βελτιωμένη διαμορφωσιμότητα και εξαιρετική υπερπλαστικότητα.

Το κεντρικό τμήμα του πυρήνα περιέχει λεπτούς ισοαξονικούς κρυστάλλους και είναι χωρισμένο σε στρώματα η εμφάνιση των οποίων παρομοιάζει κρεμμυδοροδέλες (onion rings). Αυτό το χαρακτηριστικό επαναλαμβανόμενο μοτίβο εμφανίζεται στις εγκάρσιες και πλευρικές τομές τις συγκόλλησης είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει κατά τις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση

αλλά και σε άλλες παρόμοιες μεθόδους συγκόλλησης. Το μοτίβο αυτό δεν παρατηρείται πάντοτε στις προκύπτουσες συγκόλλησης, με την εμφάνιση του να είναι πιο πιθανή σε πιο ψυχρές συγκολλήσεις σε σχέση με τις θερμότερες. Το φαινόμενο το οποίο οδηγεί στην εμφάνιση του μοτίβου αυτού δεν έχει ακόμη κατανοηθεί πλήρως.

Οι τέσσερις διακριτές ζώνες που αναλύθηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 4. Είναι ευδιάκριτα τα όρια που διαχωρίζουν τις γειτονικές ζώνες, καθώς επίσης και τα στρώματα που πυρήνα που παρομοιάζουν *onion rings*.



Εικόνα 4. (a) Μικρογραφία στην οποία απεικονίζονται οι διάφορες ζώνες που απαντώνται στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση επί αλουμινίου, (b) Υποχωρούσα πλευρά, (c) Προπορευόμενη πλευρά [3].

Το μέγεθος του πυρήνα της συγκόλλησης είναι συνάρτηση της παραγόμενης από τη διαδικασία θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο της παραγόμενης θερμότητας, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του πυρήνα που θα προκύψει.

1.4.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία τα ηλεκτρόνια κινούνται εντός του υλικού αναφοράς. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ για ένα υλικό υπό μια συγκεκριμένη θερμοκρασία δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

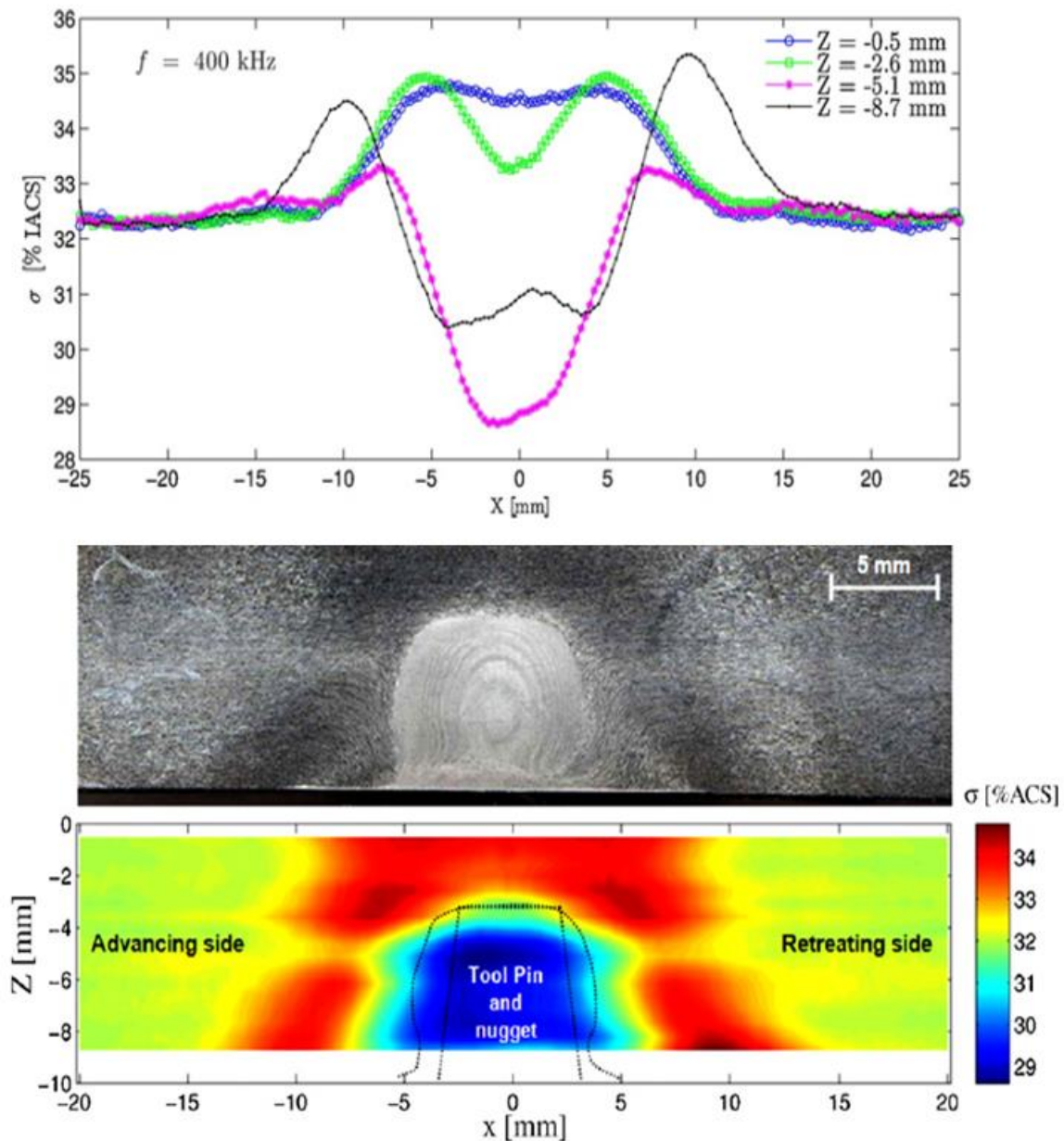
$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (1)$$

Όπου:

- σ_0 : Ο θερμοκρασιακά ανεξάρτητος όρος, ο οποίος είναι συγκεκριμένος για κάθε υλικό.
- α : Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης, ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του υλικού.
- T : Η θερμοκρασία ενδιαφέροντος.
- T_0 : Η θερμοκρασία αναφοράς.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών εξαρτάται από την κινητικότητα των ηλεκτρονίων επί της κρυσταλλικής δομής των υλικών, καθώς επίσης και από τυχόν κρυσταλλικές ατέλειες όπως κενά και γραμμικές μετατοπίσεις. Το μέγεθος των κόκκων του υλικού επίσης επηρεάζει τον συντελεστή σ_0 της ηλεκτρικής αγωγιμότητας καθώς επηρεάζει το λόγο του συνολικού μήκους ορίου κόκκου ανά μονάδα επιφάνειας. Αυτό σημαίνει πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός υλικού είναι ανάλογη του μεγέθους των κόκκων του καθώς όσο μειώνεται το μέγεθος των κόκκων ενός υλικού τόσο αυξάνεται ο λόγος του συνολικού μήκους ορίου κόκκου ανά μονάδα επιφάνειας, επομένως τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση, άρα η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται ενδεικτικά μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας που πραγματοποιήθηκαν σε συγκολληθέντα δοκίμια αλουμινίου AA7075-T6, σε βάθη 0.5, 2.6, 5.1 και 8.7 mm από την πλευρά της ρίζας [4]. Είναι εμφανές πως η καμπύλη που αντιστοιχεί σε βάθος 0.5 mm παρουσιάζει αύξηση στη ζώνη συγκόλλησης. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός πως το βάθος αυτό αντιστοιχεί σε περιοχή που αποτελεί μέρος της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης. Στη ζώνη αυτή, λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων του υλικού, οδηγώντας στη δημιουργία μιας χονδρόκοκκης μικροδομής όπου το μέσο μέγεθος των κόκκων είναι μεγαλύτερο από αυτό των κόκκων του μετάλλου βάσης. Αντίστοιχα, στις καμπύλες που αντιστοιχούν στα τρία υπόλοιπα βάθη παρατηρείται ξανά αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, ακολουθούμενη από απότομη πτώση στην περιοχή του πυρήνα, ως αποτέλεσμα της λεπτόκοκκης κατάστασης του υλικού στην περιοχή αυτή.



Εικόνα 5. Προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκολληθέντα δοκίμια αλουμινίου AA7075-T6 [4].

Γενικά, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υλικών χρησιμοποιείται συχνά ως μια τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου η οποία στοχεύει στην ανίχνευση μικρών επιφανειακών αλλά και μη επιφανειακών ατελειών (όπως ρωγμές, πόροι και εγκλείσματα) σε συγκολλήσεις. Για την επιτυχή όμως ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενός τέτοιου ελέγχου, είναι απαραίτητη η γνώση των δομικών αλλά και ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπό εξέταση υλικού. Οι μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που περιγράφηκαν στην ενότητα αυτή θα αποτελέσουν τη βάση για τις προσομοιώσεις μη καταστροφικού ελέγχου που θα πραγματοποιηθούν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

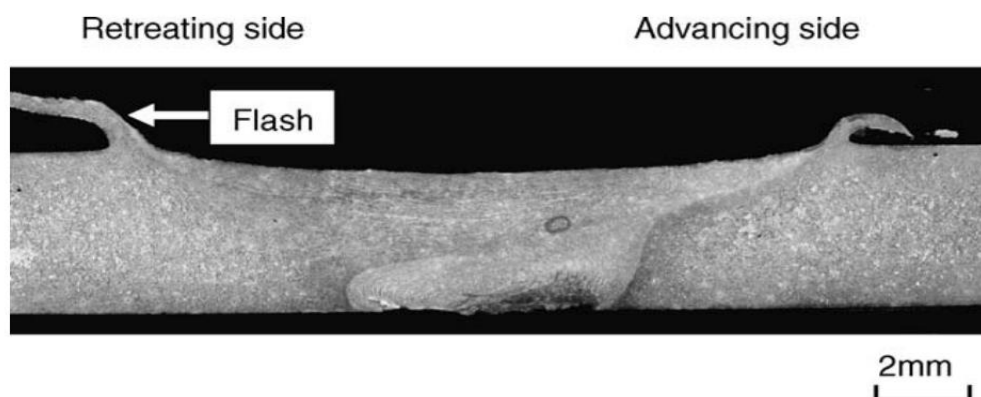
1.5. ΤΥΠΙΚΑ ΕΙΔΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΑΤΩΝΤΑΙ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα τυπικά είδη ατελειών που παρατηρούνται σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Γενικά, μέσω βελτιστοποίησης της διαδικασίας πραγματοποίησης της συγκόλλησης, είναι δυνατή η εξάλειψη ή τουλάχιστον η σημαντική μείωση της πιθανότητας εμφάνισης αρκετών τύπων ατελειών οι οποίες είναι συνυφασμένες με τις συγκολλήσεις τήξεως όπως ρωγμές στερεοποίησης και πόροι.

Παρόλα αυτά, όπως και σε κάθε είδος συγκόλλησης, έτσι και στην περίπτωση της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, υπάρχουν διάφορα είδη ατελειών τα οποία είναι δυνατό να κάνουν την εμφάνιση τους, οι ατέλειες αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Εξώθηση υλικού (Flash defect)

Τυχόν υπέρμετρη παροχή θερμότητας κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει στην εξώθηση υλικού στο άνω μέρος της συγκόλλησης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πάχους στην περιοχή του πυρήνα της συγκόλλησης [1]. Η δημιουργία των ατελειών αυτών μπορεί να αποφευχθεί μέσω προσαρμογής της κάθετης δύναμης αλλά και της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου ώστε οι συνθήκες συγκόλλησης να είναι οι βέλτιστες δυνατές [5].

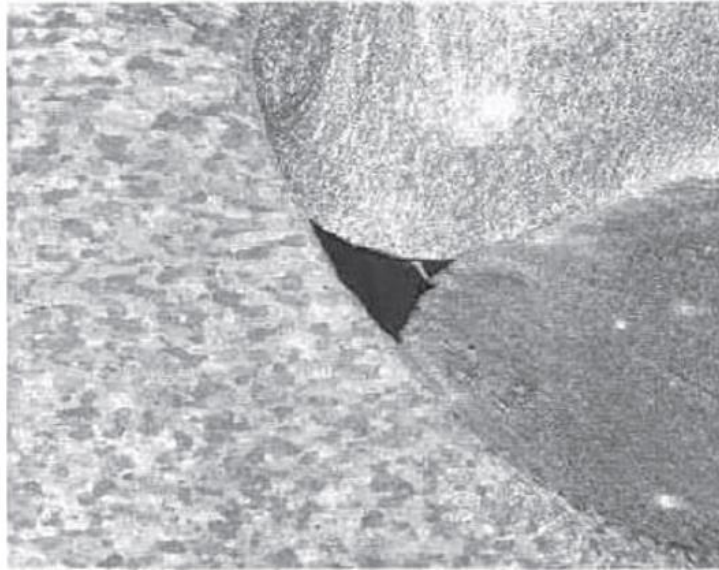


Εικόνα 6. Η εξώθηση υλικού αποτελεί μια τυπική ατέλεια που δημιουργείται εξαιτίας υπέρμετρης παροχής θερμότητας [5].

Ατέλειες τύπου σήραγγας (Tunnel ή Wormhole)

Οι ατέλειες του τύπου αυτού έχουν τη μορφή κενών ή δικτύων συνδεδεμένων κενών τα οποία δημιουργούνται εντός του υλικού έπειτα από τη διαδικασία συγκόλλησης. Προκαλούνται λόγω ανώμαλων συνθηκών ροής του πλαστικοποιημένου υλικού κατά τη διαδικασία πραγματοποίησης της συγκόλλησης οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε μη βέλτιστο συνδυασμό και έλεγχο των παραμέτρων της διαδικασίας συγκόλλησης και μπορούν να έχουν μήκος ακόμη και μερικά μέτρα. Η δημιουργία

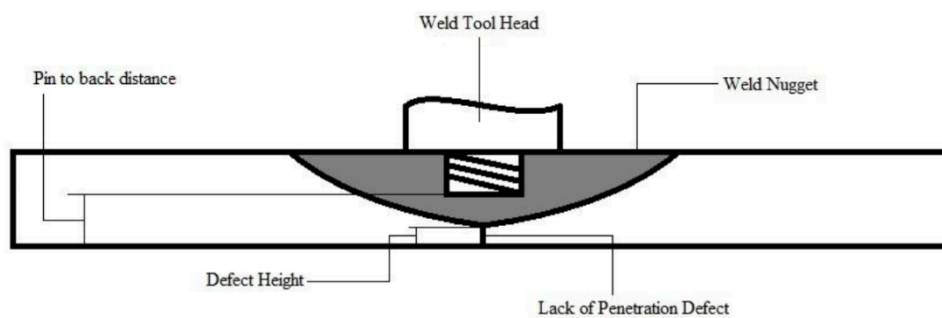
των ατελειών αυτών μπορεί να αποφευχθεί μέσω χρήσης πείρων με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ανάλογα με το υλικό και το πάχος των δοκιμίων ή/και μέσω προσαρμογής των παραμέτρων συγκόλλησης [6, 7]. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται μια τυπική ατέλεια τύπου σήραγγας.



Εικόνα 7. Οπτική μικρογραφία που απεικονίζει μια ατέλεια τύπου σήραγγας [8].

Ατελής διείσδυση ρίζας (Lack of Penetration – LOP)

Ατέλειες του τύπου ατελούς διείσδυσης ρίζας κάνουν την εμφάνιση τους σε επίπεδες κατά μέτωπο ραφές όπου το χαμηλότερο τμήμα της διεπιφάνειας των δοκιμίων προς συγκόλληση δεν αναδεύεται πλήρως, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8. Η συγκεκριμένη ατέλεια εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου το μήκος του πείρου δεν είναι επαρκώς μεγάλο ώστε να επιτευχθεί πλήρης διείσδυση των δοκιμίων. Μπορεί να αποφευχθεί μέσω της επιλογής πείρου με κατάλληλο μήκος [9].



Εικόνα 8. Σχηματική απεικόνιση ατελούς διείσδυσης ρίζας.

Λεσμοί τύπου φιλιού (Kissing bonds)

Οι ατέλειες του τύπου αυτού εμφανίζονται στη ρίζα της συγκόλλησης όταν οι επιφάνειες των δύο προς συγκόλληση δοκιμίων βρίσκονται σε επαφή αλλά δεν σχηματίζουν έναν πλήρη μεταλλουργικό

δεσμό [10]. Ο σχηματισμός της ατέλειας αυτής μπορεί να οφείλεται σε ανεπαρκή πλαστική παραμόρφωση των δοκιμίων κοντά στη διεπιφάνεια τους, ατελή διείσδυση, ανεπαρκή προετοιμασία των επιφανειών, επιμόλυνση, παραμένουσες τάσεις ή συνδυασμό αυτών [11]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μείωση της αντοχής της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, αποτελέσματα μελετών δείχνουν πως η παρουσία δεσμών τύπου φιλιού έχει ελάχιστο αντίκτυπο στην στατική αντοχή μιας συγκόλλησης (ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται), σε περίπτωση δυναμικών φορτίσεων όμως, ανάλογα και με το μέγεθος της ατέλειας η μείωση της διάρκειας ζωής της κατασκευής έναντι κόπωσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλη [12]. Η ανίχνευση της συγκεκριμένης ατέλειας με τυπικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αποδειχθεί αρκετά δύσκολη. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται μια περίπτωση δεσμού τύπου φιλιού, είναι εμφανής η ελλείπει ανάμειξη των υλικών στο κάτω μέρος της εικόνας.



Εικόνα 9. Οπτική μικρογραφία που απεικονίζει μια ατέλεια τύπου φιλιού (Kissing bond) [8].

Δεσμοί τύπου γάντζου (Hooking bonds)

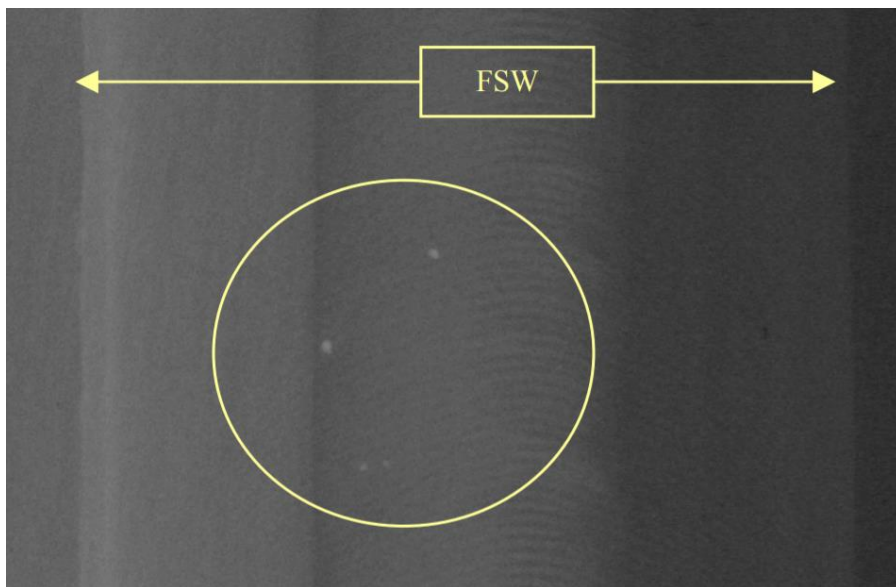
Οι ατέλειες του τύπου αυτού κάνουν την εμφάνισή τους σε συγκολλήσεις επικάλυψης (Lap joints), πιο συγκεκριμένα εμφανίζονται στη διεπιφάνεια των συγκολληθέντων τεμαχίων. Δημιουργούνται όταν κατά την ανάδευση, η διεπιφάνεια που χωρίζει τα δύο τεμάχια δεν αναδεύεται πλήρως και μετακινείται ελαφρώς εντός του επάνω τεμαχίου. Το γεγονός αυτό μειώνει το εμβαδό της διατομής του προκύπτοντος τελικού τεμαχίου. Οι δυο κυριότερες αιτίες πρόκλησης των ατελειών αυτών είναι η χαμηλή ταχύτητα μετακίνησης του εργαλείου και η πολύ υψηλή περιστροφική του ταχύτητα. Η δημιουργία των ατελειών αυτών μπορεί να αποφευχθεί μέσω πολλαπλών περασμάτων του εργαλείου στη ζώνη συγκόλλησης [13].

Ρωγμές (Cracks)

Η εμφάνιση των ρωγμών λαμβάνει χώρα στη ζώνη συγκόλλησης και είναι δυνατό να οφείλεται σε πληθώρα παραγόντων. Μεταξύ των αιτιών πρόκλησης ρωγμών βρίσκεται η υπέρμετρη συγκέντρωση τάσεων στη ζώνη συγκόλλησης εξαιτίας θερμικών τάσεων. Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν επίσης να οδηγήσουν στην δημιουργία ή/και διάδοση ρωγμών επί του υλικού [14]. Επιπλέον, μεταβολές της μικροδομής που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία πραγματοποίησης της συγκόλλησης μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη διαδικασία διάδοσης ρωγμών λόγω κόπωσης και διάβρωσης [15].

Εγκλείσματα (Inclusions)

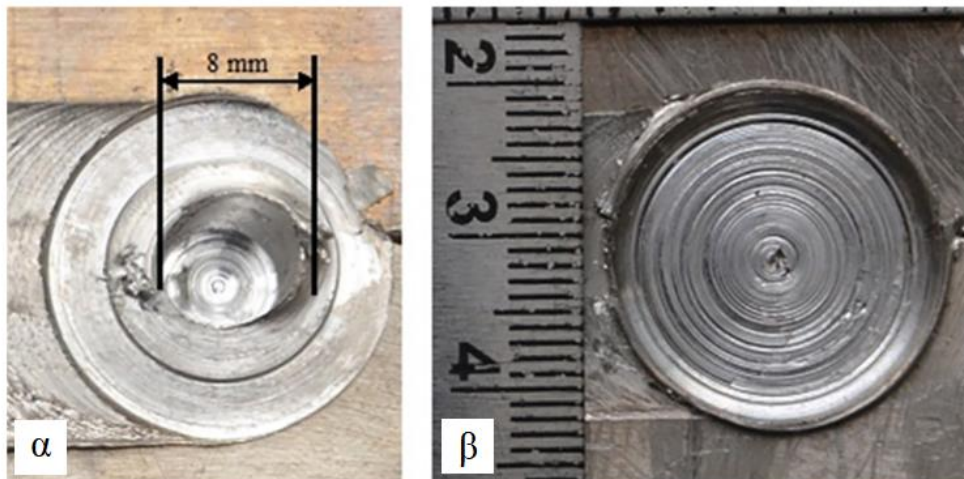
Αν και γενικά στην περίπτωση συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση δεν παρατηρείται η παρουσία εγκλεισμάτων στη ζώνη συγκόλλησης, ορισμένα αρχικά εργαλεία βολφραμίου και βολφραμίου-ρηνίου είχαν την τάση να φθείρονται γρήγορα κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, οδηγώντας έτσι σε μακροσκοπικά εγκλείσματα του υλικού του εργαλείου συγκόλλησης εντός της ζώνης συγκόλλησης. Τα μετέπειτα αναπτυχθέντα εργαλεία είναι πολύ πιο ανθεκτικά στη φθορά και τη δημιουργία εγκλεισμάτων, παρόλα αυτά είναι ακόμη δυνατή η θραύση τμημάτων του εργαλείου ή/και η ανάμειξη τους με το μέταλλο βάσης [8]. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ραδιογραφικός έλεγχος που υποδεικνύει την παρουσία εγκλεισμάτων στη ζώνη συγκόλλησης αλουμινίου 2219 με αλουμίνιο 2195 για την κατασκευή της εξωτερικής δεξαμενής καυσίμου του διαστημικού λεωφορείου. Γενικά τα εγκλείσματα αυτά έχουν μέγεθος από 0.127 έως 0.635 mm και κάνουν την εμφάνιση τους μοναδιάια ή ανά συστάδες [16].



Εικόνα 10. Εγκλείσματα στη ζώνη συγκόλλησης αλουμινίου 2219 με αλουμίνιο 2195 [16].

Οπή εξόδου (Exit hole)

Τέλος, μια ατέλεια η οποία συναντάται πάντοτε στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση είναι η οπή που αφήνει πίσω του το εργαλείο συγκόλλησης καθώς εξέρχεται από το υλικό στη ζώνη συγκόλλησης έπειτα από το πέρας της διαδικασίας συγκόλλησης. Η ασυνέχεια αυτή αποτελεί ένα σημείο σημαντικής μείωσης της ποσότητας υλικού στη ζώνη συγκόλλησης, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει απειλή για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Για την αποφυγή της ασυνέχειας αυτής είναι δυνατή συγκόλληση τμημάτων μεγαλύτερου μήκους από αυτό που απαιτείται για την κατασκευή και η εν συνεχεία κοπή του τμήματος στο οποίο βρίσκεται η οπή. Επιπλέον, μια συνήθης τεχνική επισκευής είναι το γέμισμα της οπής με υλικό σε μεταγενέστερη φάση. Τέλος, είναι δυνατή η ανάδευση της περιοχής της οπής με τη χρήση διαδοχικών εργαλείων με αυξανόμενη διάμετρο μέχρις ότου αυτή εξαφανιστεί. Παράδειγμα οπής εξόδου αλλά και τις όψης της έπειτα από επισκευή μέσω ανάδευσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 11. [17]



Εικόνα 11. (α) Οπή εξόδου, (β) Επισκευασμένη οπή εξόδου [17].

1.6. Ο ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕ ΑΝΑΔΕΥΣΗ

Υπάρχει πληθώρα τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό ατελειών σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση. Σκοπός τους είναι η διασφάλιση της ποιότητας της προκύπτουσας συγκόλλησης με βάση συγκεκριμένα πρότυπα και προτυποποιημένα κριτήρια αποδοχής. Κάθε τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου βασίζεται σε διαφορετικές φυσικές αρχές για τον εντοπισμό ατελειών στην επιφάνεια ή τον όγκο του υπό εξέταση υλικού. Επιπλέον, παράγοντες όπως η γεωμετρία, η επιφανειακή κατάσταση αλλά και οι ιδιότητες του υλικού επηρεάζουν την εφαρμοσιμότητα κάθε μεθόδου. Οι κυριότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου

που εφαρμόζονται στη συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση, σε περιπτώσεις μη σιδηρομαγνητικών υλικών όπως το αλουμίνιο είναι οι ακόλουθες.

Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant testing)

Για την πραγματοποίηση μη καταστροφικού ελέγχου μέσω διεισδυτικών υγρών, ένα ειδικό υγρό το οποίο είναι κόκκινο ή φθορίζον εφαρμόζεται επί της επιφάνειας της συγκόλλησης και παραμένει σε αυτή για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα το οποίο ονομάζεται χρόνος παραμονής. Κατά τη διάρκεια του χρόνου παραμονής, το διεισδυτικό υγρό εισχωρεί σε τυχόν ανοικτές στην επιφάνεια ρωγμές και κοιλότητες. Έπειτα από το πέρας του χρονικού διαστήματος αυτού, η περίσσεια διεισδυτικού υγρού αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται. Εν συνεχεία, εφαρμόζεται επί της καθαρής πλέον επιφάνειας ο εμφανιστής (ο οποίος έχει συνήθως λευκό χρώμα), ο εμφανιστής τραβά το παγιδευμένο στις ρωγμές και κοιλότητες διεισδυτικό υγρό ξανά στην επιφάνεια όπου ο παρατηρητής μπορεί παρατηρώντας τα αποτελέσματα να αντλήσει συμπεράσματα σχετικά με τη θέση και το μέγεθος των ατελειών [18].

Η μέθοδος αυτή μπορεί εύκολα και γρήγορα να οδηγήσει στην ανεύρεση ατελειών ανοικτών στην επιφάνεια όπως ρωγμές πόροι και κοιλότητες. Βασικό της πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος πραγματοποίησης της. Παρόλα αυτά, η επιτυχία της μεθόδου αυτής εξαρτάται από την επιφανειακή κατάσταση του υπό εξέταση δοκιμίου καθώς επιφανειακές επικαθήσεις, βαφές και τραχιές επιφάνειες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη διαδικασία εντοπισμού των ατελειών.

Ραδιογραφία (Radiography)

Ο ραδιογραφικός έλεγχος μέσω ακτινών X ή ακτινών γ χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών βασιζόμενος στις μεταβολές στην ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας από ένα υλικό, που προκαλείται λόγω της ύπαρξης ατελειών σε αυτό. Το τελικό αποτέλεσμα εξάγεται από ένα κατάλληλο αναλογικό φιλμ ή έναν ψηφιακό δέκτη ακτινοβολίας, όπου οι μεταβολές της ροής ακτινοβολίας εμφανίζονται στην τελική εικόνα ως σκουρόχρωμες αν η έκθεση του φιλμ είναι υψηλή ή ανοιχτόχρωμες περιοχές αν η έκθεση του φιλμ είναι χαμηλή. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει περιορισμούς στη διατρητική ικανότητα της ακτινοβολίας στην περίπτωση ελέγχου μεταλλικών αντικειμένων μεγάλου μεγέθους ή/και περίπλοκου σχήματος ανάλογα με τη σταθερά απορρόφησης ακτινοβολίας του μετάλλου. Η διεισδυτική ικανότητα είναι επίσης συνάρτηση τόσο του χρόνου έκθεσης του αντικειμένου στην ακτινοβολία όσο και από την ισχύ αυτής.

Γενικά, ο έλεγχος μέσω ραδιογραφίας ενδείκνυται για τον εντοπισμό ογκομετρικών ατελειών, όμως ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης της ατέλειας δεν είναι πάντοτε εύκολος και ίσως απαιτηθεί έκθεση του αντικειμένου σε ακτινοβολία και από διαφορετική γωνία. Αποτελεί μια ακριβή και δύσκολη στην εφαρμογή μέθοδο η οποία εμπεριέχει κινδύνους για την υγεία του προσωπικού που εκτίθεται στην παραγόμενη ακτινοβολία. [19, 20]. Στην περίπτωση ελέγχου συγκολλητών

κατασκευών, το σχήμα, το μέγεθος αλλά και η επιφανειακή κατάσταση της συγκολλητής κατασκευής είναι δυνατό να επηρεάσουν αρνητικά τη δυνατότητα εντοπισμού τυχών ατελειών.

Δινορρέυματα (Eddy current testing)

Στον μη καταστροφικό έλεγχο μέσω δινορρευμάτων, ένας αισθητήρας/πηνίο διεγείρεται μέσω εναλλασσόμενου ρεύματος, με αποτέλεσμα να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αισθητήρα, το οποίο εναλλάσσεται με συχνότητα ίση με αυτή του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει τον αισθητήρα. Όταν ο αισθητήρας τοποθετηθεί πλησίον αγωγίμου υλικού, δινορρέυματα επάγονται σε αυτό. Στην περίπτωση που υπάρχει στο υλικό ασυνέχεια, η πορεία των δινορρευμάτων διαταρράσσεται, μεταβάλλοντας έτσι την τοπική ισορροπία των μαγνητικών πεδίων η οποία ανιχνεύεται μέσω παρακολούθησης των μεταβολών στην επαγωγική αντίδραση του πηνίου/αισθητήρα, οδηγώντας έτσι στον εντοπισμό της ασυνέχειας.

Η μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου αυτή αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το θεωρητικό της υπόβαθρο θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Έλεγχος μέσω υπερήχων (Ultrasonic Testing)

Ο μη καταστροφικός έλεγχος μέσω υπερήχων περιλαμβάνει μια σειρά μεθόδων ελέγχου κατά τις οποίες υπερηχητικά κύματα διαδίδονται εντός του ελεγχόμενου αντικειμένου μέσω κατάλληλου εξοπλισμού με σκοπό τον χαρακτηρισμό αυτού, τη μέτρηση του πάχους του ή/και τον εντοπισμό τυχών περιεχομένων σε αυτό ατελειών. Συνήθως χρησιμοποιούνται συχνότητες από 0.1 έως 15 MHz, παρόλα αυτά, χρήση συχνοτήτων έως και 50 MHz είναι δυνατή. Ο έλεγχος αυτός, στην πιο απλή του μορφή πραγματοποιείται μέσω ενός πομπού/δέκτη που αποκαλείται κεφαλή ελέγχου και αποτελείται από πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ένα παλμοσκόπιο, για την οπτικοποίηση των ευρημάτων του ελέγχου. Η κεφαλή έρχεται σε επαφή και διατρέχει την επιφάνεια του ελεγχόμενου αντικειμένου έχοντας μεταξύ τους κάποιο κατάλληλο μέσο σύζευξης (νερό, λάδι ή ιδανικά κάποιο gel σύζευξης) το οποίο χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική μετάβαση των ηχητικών κυμάτων από την κεφαλή στο αντικείμενο και αντίστροφα. Η ύπαρξη μέσου σύζευξης δεν είναι απαραίτητη στις μεθόδους μη επαφής όπως η μέθοδος EMAT (ElectroMagnetic Acoustic Transducer) ή η διέγερση μέσω λέιζερ. Έτσι είναι εφικτή η ανίχνευση ατελειών αλλά και άλλων πληροφοριών για το υπό εξέταση αντικείμενο μέσω της λήψης των ανακλώμενων από τυχών ατέλειες ή/και τα όρια του αντικειμένου κυμάτων.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος μέσω υπερήχων αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική εντοπισμού και χαρακτηρισμού αστοχιών σε συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση αλλά και άλλες συγκολλήσεις στερεάς κατάστασης. Για τη διενέργεια των ελέγχων είναι δυνατή η χρήση τόσο διαμηκών όσο και εγκάρσιων κυμάτων. Βασικό περιοριστικό παράγοντα στον έλεγχο μέσω υπερήχων στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση αποτελεί η κατάσταση της επιφάνειας που αφήνει πίσω

του το εργαλείο στην περιοχή του περιουχενίου, έτσι, για τον αξιόπιστο έλεγχο απαιτείται κατεργασία και λείανση της επιφάνειας προ τις διενέργειες του ελέγχου ή πρόσβαση από την πίσω πλευρά της ζώνης συγκόλλησης [21, 22, 23, 24].

Θερμογραφικός έλεγχος (Thermographic inspection)

Μια ακόμη τεχνική μη καταστροφικού ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί στις συγκολλήσεις διατριβής με ανάδευση είναι η θερμογραφία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών μέσω ενός μηχανισμού που παράγει μια εικόνα βάσει των ανιχνεύσιμων μεταβολών στον θερμικών ιδιοτήτων του υλικού εξαιτίας της ύπαρξης γεωμετρικών ανωμαλιών, εγκλεισμάτων και κενών [25]. Εξαιτίας της θερμότητας που παράγεται κατά τη διαδικασία πραγματοποίησης της συγκόλλησης, υπάρχει τη δυνατότητα επιτήρησης της διαδικασίας συγκόλλησης σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας την παραγόμενη θερμότητα αυτή για τον άμεσο εντοπισμό των ατελειών, τη στιγμή που δημιουργούνται. Έτσι είναι εφικτός ο προγραμματισμός μιας διαδικασίας, η οποία μεταβάλλει/βελτιστοποιεί τις παραμέτρους της συγκόλλησης με σκοπό την εξάλειψη τους [26].

Οπτικός έλεγχος (Visual inspection)

Ο οπτικός έλεγχος αποτελεί μια μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου η οποία προηγείται όλων των υπολοίπων, αλλά και συμπληρώνει αυτές. Ως οπτικός έλεγχος, ορίζεται η εξέταση ενός υλικού, αντικειμένου ή προϊόντος για εύρεση δομικών ή άλλων σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τα μάτια αποκλειστικά ή σε συνδυασμό με βοηθήματα. Ο οπτικός έλεγχος αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες την έρευνα (κυρίως έλεγχο) και το συνδυασμό των γνώσεων αλλά και της εμπειρίας του ελεγκτή ως προς τις κατεργασίες και γενικές συνθήκες του υλικού ώστε να αναγνωριστούν οι πραγματικές ασυνέχειες που αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα από τις μη σχετικές ενδείξεις. Για τη διενέργεια του οπτικού ελέγχου είναι δυνατή η χρήση ψηφιακών ανιχνευτών, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό δυνατή την αυτοματοποίηση του ελέγχου (μηχανική όραση) [27].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές του μη καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων, η οποία και αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου στην οποία ρεύματα τα οποία ρέουν σε κυκλικές διαδρομές και έχουν τη μορφή δινών επάγονται στο υπό έλεγχο αντικείμενο.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ασυνεχειών σε αγωγία υλικά, καθώς σε περίπτωση όπου η διαδρομή των δινορρευμάτων συναντήσει μια ασυνέχεια, τότε η διαταραχή της πορείας του ρεύματος και η κατ' επέκταση διαταραχή του παραγόμενου από αυτό μαγνητικού πεδίου υποδηλώνει στον ελεγκτή την ύπαρξη της ασυνέχειας. Πολλές γεωμετρίες δύνανται να ελεγχθούν μέσω της μεθόδου των δινορρευμάτων, όπως πλάκες, φύλλα, κύλινδροι, σωλήνες, σπές (με σπείρωμα ή χωρίς), κοχλίες, έδρανα, καθώς επίσης και συγκολληθείσες κατασκευές.

Η μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου αυτή, εκτός από την ανίχνευση ασυνεχειών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του πάχους αγωγίμων ή μη επικαλύψεων αλλά και για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων αγωγίμων υλικών όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα, χημική σύσταση, σκληρότητα, εφαρμογή ή μη θερμικών κατεργασιών αλλά και τον προσδιορισμό αλλοιώσεων λόγω διάβρωσης. Εξαιτίας της περιορισμένης διείσδυσης των δινορρευμάτων στο υλικό, η μέθοδος περιορίζεται την ανίχνευση επιφανειακών ασυνεχειών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.

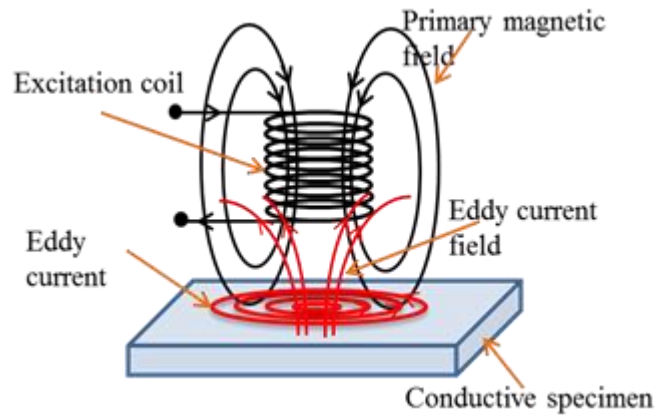
Ο μη καταστροφικός έλεγχος μέσω δινορρευμάτων στις συγκολλήσεις δια τριβής με ανάδευση διέπεται από τα ακόλουθα πρότυπα [3].

- EN ISO 17643:2015 Eddy current examination of welds by complex plane
- ASTM E2261-17 Standard Practice for Examination of Welds Using AC Current Fields Measurement Technique
- NASA PRC-6509D (2011) Process Specification for Eddy Current Inspection

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με δινορρεύματα πραγματοποιείται μέσω της δημιουργίας εξ-επαγωγής ηλεκτρικών ρευμάτων, τα οποία ρέουν σε κυκλικές διαδρομές στο υπό εξέταση υλικό. Για τη δημιουργία των δινορρευμάτων στο υπό εξέταση υλικό χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας ο οποίος έχει τη μορφή πηνίου. Το πηνίο αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) I_p το οποίο αποκαλείται πρωτογενές ρεύμα, το πρωτογενές ρεύμα προκαλεί την ανάπτυξη ενός πρωτογενούς

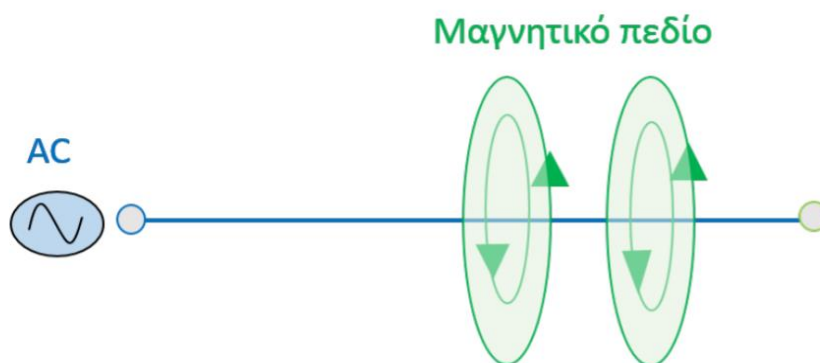
μαγνητικού πεδίου γύρω από το πηνίο. Εν συνεχεία, όταν το πηνίο βρεθεί κοντά στο υπό εξέταση αγώγιμο υλικό, επάγονται σε αυτό δευτερογενή ρεύματα I_s , τα επονομαζόμενα δινορρεύματα. Τα δινορρεύματα παράγουν το δικό τους μαγνητικό πεδίο (δευτερογενές μαγνητικό πεδίο) το οποίο αντιτίθεται στο πρωτογενές μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Τα παραπάνω φαινόμενα απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Επαγωγή δινορρευμάτων σε αγώγιμο μέσο. (Πηγή: www.COMSOL.com)

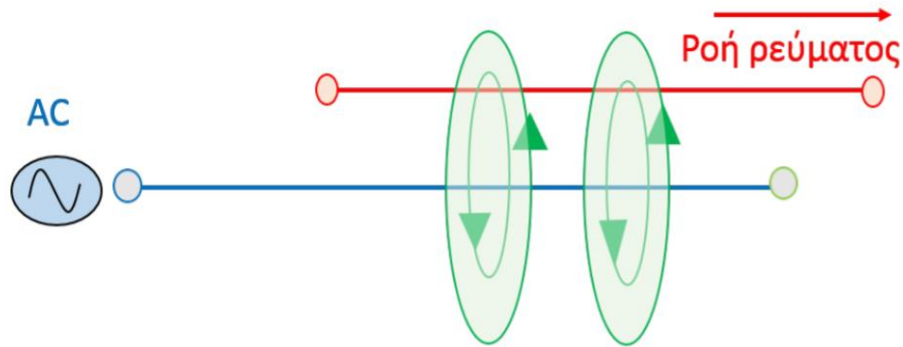
2.2. ΤΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η δημιουργία των δινορρευμάτων εντός του προς έλεγχο δοκιμίου οφείλεται στο φυσικό φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) ρέει εντός ενός αγωγού (πχ. Ένα χάλκινο σύρμα), οδηγεί στην ανάπτυξη ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου γύρω από τον αγωγό όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 13. Το μαγνητικό πεδίο αυτό μεταβάλλεται λόγω των μεταβολών του εναλλασσόμενου ρεύματος, πιο συγκεκριμένα, το μαγνητικό πεδίο επεκτείνεται με αύξηση του μέτρου του ρεύματος και συμπύσσεται με τη μείωση του.



Εικόνα 13. Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου γύρω από ηλεκτροφόρο αγωγό [27].

Σε περίπτωση όπου υπάρξει εισαγωγή ενός δεύτερου ηλεκτρικού αγωγού στο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται γύρω από τον αρχικό αγωγό, τότε το μαγνητικό πεδίο αυτό θα προκαλέσει εξ επαγωγής τη δημιουργία ροών ρεύματος στον δεύτερο αγωγό όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14. Επαγωγή ρεύματος στον δεύτερο αγωγό από το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο [27].

Κατά το μη καταστροφικό έλεγχο μέσω δινορρευμάτων, το ρόλο του πρώτου αγωγού διαδραματίζει το πηνίο/αισθητήρας ενώ το ρόλο του δεύτερου διαδραματίζει το προς έλεγχο αγωγίμο δοκίμιο.

2.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ

Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα ρέει εντός ενός πηνίου υπάρχουν δυο παράγοντες που αντιτίθενται στη ροή του ρεύματος, η ωμική αντίσταση R η οποία εκφράζει την αντίσταση στη ροή του ρεύματος δια του αγωγού του πηνίου και η επαγωγική αντίδραση X_L η οποία εκφράζει την αντίσταση λόγω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που λαμβάνει χώρα στο ίδιο το πηνίο (αυτεπαγωγής). Επομένως, το πηνίο χαρακτηρίζεται από τη λεγόμενη σύνθετη αντίσταση Z η οποία είναι ο συνδυασμός της ωμικής αντίστασης με την επαγωγική αντίδραση.

$$Z = R + iX_L \quad (2)$$

Επομένως, το μέτρο της σύνθετης αντίστασης θα είναι ίσο με:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (3)$$

Αλλά, η επαγωγική αντίδραση είναι ίση με το γινόμενο της αυτεπαγωγής του πηνίου L με τη γωνιακή συχνότητα ω . Άρα θα έχουμε:

$$X_L = \omega L \quad (4)$$

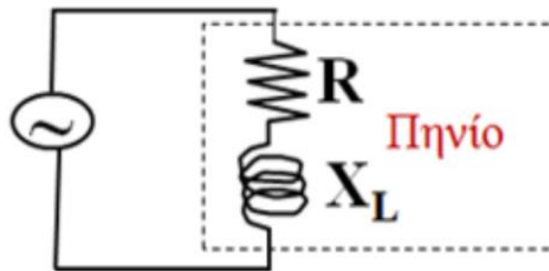
Όπου: $\omega = 2\pi f$

Όπου f η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε Hz.

Άρα, από τις σχέσεις (3) και (4) καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση.

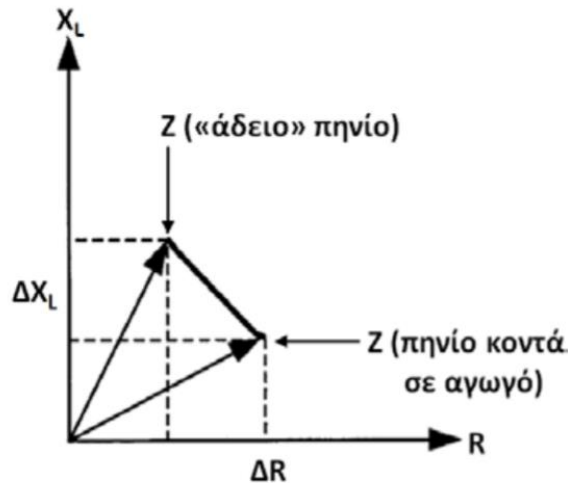
$$|Z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (5)$$

Για όλες τις παραπάνω σχέσεις θεωρήθηκε πως αναφερόμαστε σε ένα πηνίο το οποίο δεν επηρεάζεται από τυχόν παρασιτική χωρητικότητα. Επομένως, στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του πηνίου.



Εικόνα 15. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πηνίου [27].

Στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας/πηνίο ενεργοποιηθεί στον αέρα, μακριά από κάποιο αγωγίμο δοκίμιο, στα άκρα του θα υπάρχει μια σταθερή ένδειξη. Καθώς το πηνίο πλησιάζει στο δοκίμιο, η ένδειξη αυτή θα αρχίσει να μεταβάλλεται μέχρις ότου το πηνίο έρθει σε επαφή με τον επιφάνεια του δοκιμίου. Η μεταβολή αυτή της σύνθετης αντίστασης ΔZ αποκαλείται ανύψωση (Lift off) και μπορεί να αναλυθεί ως μεταβολή της ωμικής αντίστασης ΔR και μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης ΔX_L και να αποτυπωθεί σε ένα επίπεδο με τετμημένη την ωμική αντίσταση και τεταγμένη την επαγωγική αντίδραση όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Το επίπεδο αυτό ονομάζεται επίπεδο σύνθετης αντίστασης και αποτελεί βασικό στοιχείο του μη καταστροφικού ελέγχου μέσω δινορρευμάτων καθώς σε αυτό παρουσιάζονται συνήθως οι ενδείξεις που ανιχνεύονται κατά τη διενέργεια του ελέγχου.



Εικόνα 16. Ένδειξη ανύψωσης (Lift off) στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης [27].

Γενικά, έχουν αναγνωριστεί αρκετοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τα δινορρέυματα, άρα και τις ενδείξεις του ελέγχου που διενεργείται μέσω αυτών. Οι παράγοντες αυτοί διαχωρίζονται σε παράγοντες που σχετίζονται με το δοκίμιο και σε παράγοντες που σχετίζονται με το σύστημα που χρησιμοποιείται για τη διενέργεια του ελέγχου. Οι παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με το δοκίμιο είναι οι ακόλουθοι [28].

- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του δοκιμίου (Electrical conductivity).
- Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του δοκιμίου (Magnetic permeability).
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου.
- Η σκληρότητα του υλικού του δοκιμίου.
- Οι παραμένουσες τάσεις.
- Η ύπαρξη ή μη ασυνεχειών στο δοκίμιο, η γεωμετρία και το μέγεθος αυτών.
- Η ύπαρξη ή μη επικαλύψεων στην επιφάνεια του δοκιμίου, οι ιδιότητες και το πάχος αυτών.

Ενώ οι παράγοντες που σχετίζονται με το σύστημα είναι οι ακόλουθοι τρεις.

- Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει το πηνίο/αισθητήρα.
- Το σχήμα και το μέγεθος του πηνίου/αισθητήρα.
- Η απόσταση μεταξύ του πηνίου και του προς έλεγχο δοκιμίου (Lift off).

Μια πολύ κρίσιμη παράμετρος στον μη καταστροφικό έλεγχο μέσω δινορρευμάτων είναι το πρότυπο βάθος διείσδυσης (Standard depth of penetration). Συμβολίζεται με το γράμμα δ και αντιπροσωπεύει την απόσταση κάτω από την επιφάνεια του αγωγίμου δοκιμίου στην οποία η πυκνότητα των δινορρευμάτων είναι ίση με το $1/e$ (ή 36.788%) της πυκνότητας τους στην επιφάνεια αυτού [29].

Η πυκνότητα των δινορρευμάτων επηρεάζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, τη μαγνητική του διαπερατότητα και την ποσότητα υλικού στην επηρεαζόμενη από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου περιοχή. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το βάθος διείσδυσης είναι συνάρτηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει τον αισθητήρα. Το μέτρο του βάθους διείσδυσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση [29].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (6)$$

Όπου:

- μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε H/m.
- σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού σε S/m.
- f η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος σε Hz.

Αλλά, η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού μπορεί να αναλυθεί ως εξής.

$$\mu = \mu_0\mu_r \quad (7)$$

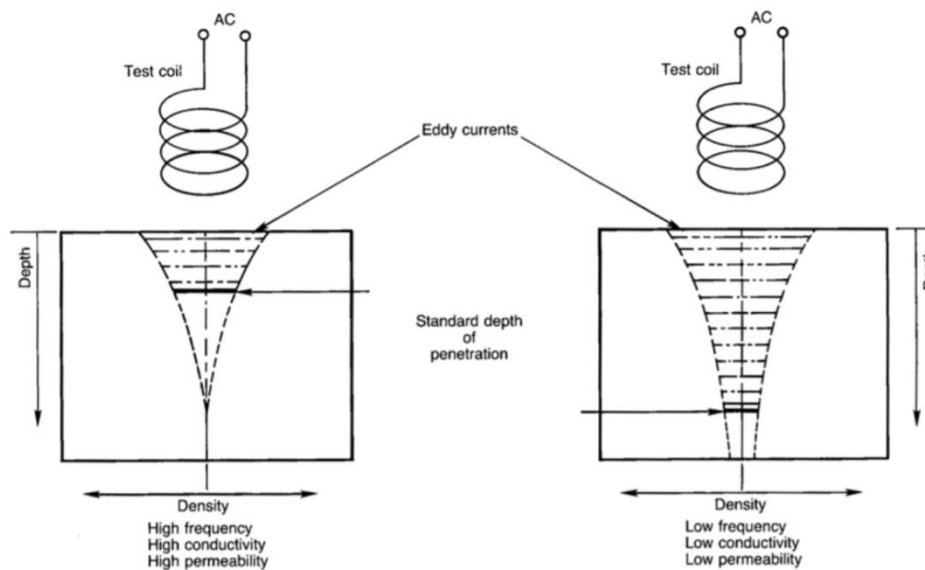
Όπου:

- μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η οποία ισούται με $4\pi 10^{-7}$ H/m.
- μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Άρα, από τις σχέσεις (6) και (7) καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu_r\sigma f}} \quad (8)$$

Επομένως, από τη σχέση (8) γίνεται αντιληπτό πως το βάθος διείσδυσης έχει σχέση αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού και τη μαγνητική του διαπερατότητα. Η σχέση αυτή αποτυπώνεται ενδεικτικά και στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17. Συσχέτιση βάθους διείσδυσης με τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική του διαπερατότητα του υλικού [30].

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όλες οι προσομοιώσεις που θα πραγματοποιηθούν αφορούν κράματα αλουμινίου. Το αλουμίνιο εμπίπτει στην κατηγορία των μη μαγνητικών υλικών, έχει δηλαδή σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με τη μονάδα ($\mu_r=1$). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος για τον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών σε μη μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες ελέγχου. Για τον αξιόπιστο εντοπισμό υποεπιφανειακών ατελειών, η συχνότητα ελέγχου θα πρέπει να ελαττωθεί ώστε να αυξηθεί το πρότυπο βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων, η ενέργεια όμως αυτή θα έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ακρίβεια του ελέγχου.

2.4. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΩΓΜΩΝ

Μια από τις κατ'εξοχήν εφαρμογές της μεθόδου των δινορρευμάτων είναι η ανίχνευση ρωγμών. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην παρουσία επιφανειακών ρωγμών (δηλαδή ρωγμών ανοικτών στην επιφάνεια του ελεγχόμενου αντικειμένου). Για υποεπιφανειακές ρωγμές η ευαισθησία αυτή φθίνει εκθετικά με αύξηση του βάθους παρόλα αυτά, ακόμη και υποεπιφανειακές ρωγμές μπορούν να ανιχνευθούν μέσω της μεθόδου αυτής εφόσον βρίσκονται επαρκώς κοντά στην επιφάνεια του αντικειμένου.

Η παρουσία ρωγμών διαταράσσει την κυκλική ροή των δινορρευμάτων, τα οποία την προσπερνούν ακολουθώντας τη διαδρομή της ελάχιστης ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό σημαίνει πως τμήμα των δινορρευμάτων παρακάμπτει τη ρωγμή περνώντας από το πλάι της, ενώ ένα άλλο τμήμα

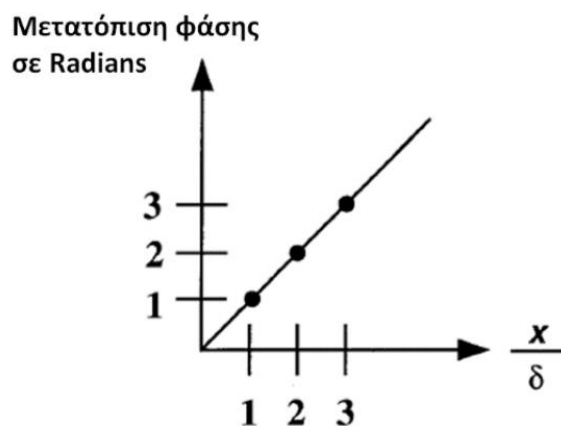
τους περνά από κάτω της. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει μεταβολή στην ισχύ των δινορρευμάτων κοντά στη ρωγμή η οποία είναι ανιχνεύσιμη από τον αισθητήρα/τηνίο.

Γενικά, οι επιφανειακές ρωγμές οδηγούν τα δινορρεύματα στο να διεισδύουν βαθύτερα στο υλικό του εξεταζόμενου αντικειμένου. Έχει αποδειχθεί πως η αλλαγή βάθους αυτή προκαλεί μεταβολή της φάσης των ρευμάτων. Η αλλαγή φάσης αυτή έχει γραμμική συσχέτιση με το βάθος στο οποίο φθάνει η ρωγμή κάτω από την επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο της αλλαγής φάσης αυτής αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται το βάθος στο οποίο τα δινορρεύματα διεισδύουν εντός του υλικού. Επομένως, η συσχέτιση του βάθους διείσδυσης των δινορρευμάτων κάτω από την επιφάνεια (δηλαδή το βάθος στο οποίο φθάνει η επιφανειακή ρωγμή) με τη μεταβολή της φάσης θα δίνεται από τη σχέση (9). Η συσχέτιση αυτή παρουσιάζεται επίσης σχηματικά στην Εικόνα 18.

$$\theta = \frac{x}{\delta} \quad (9)$$

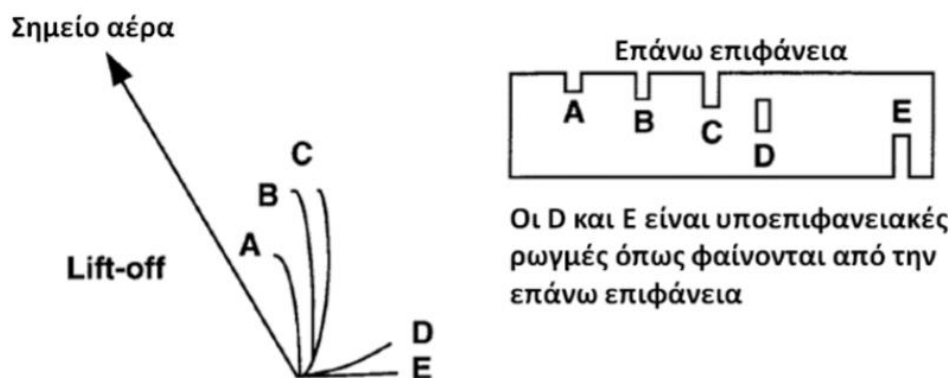
Όπου:

- θ η μεταβολή της φάσης σε rad.
- x το βάθος των δινορρευμάτων σε m.
- δ το επιδερμικό βάθος σε m.



Εικόνα 18. συσχέτιση βάθους διείσδυσης με τη μεταβολή της φάσης [27].

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται ενδεικτικά τυπικές ενδείξεις επιφανειακών και υποεπιφανειακών ρωγμών επί του επιπέδου εμπέδησης.



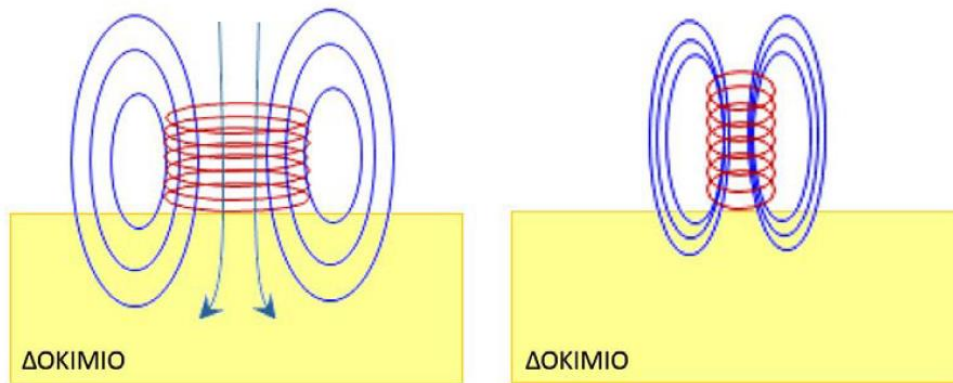
Εικόνα 19. Τυπικές ενδείξεις ρωγμών [27].

Γενικά, όσο στενότερες και βαθύτερες είναι οι ρωγμές τόσο ευκολότερη είναι η ανίχνευση τους καθώς το παραγόμενο στο επίπεδο εμπέδησης σήμα είναι ξεκάθαρο. Αντίθετα, για ρηχές και αμβλείες ρωγμές, το παραγόμενο σήμα είναι δύσκολο να διαχωριστεί από το lift-off.

2.5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ

Παρά το γεγονός πως η ευαισθησία της μεθόδου σε επιφανειακές ασυνέχειες είναι πολύ μεγάλη, η ευαισθησία της σε βαθιές υποεπιφανειακές ασυνέχειες είναι πολύ μικρή, για την ακρίβεια, μια ασυνέχεια η οποία βρίσκεται μόλις 5mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου θεωρείται πως βρίσκεται πολύ βαθειά για τον αξιόπιστο εντοπισμό της μέσω δινορρευμάτων.

Δυο είναι οι κύριοι παράγοντες που ευθύνονται για τον περιορισμό αυτό. Ο πρώτος είναι το γεγονός πως το επιδερμικό φαινόμενο οδηγεί σε εξασθένηση τα δινορρευμάτα με αύξηση του βάθους και εξαρτάται από τη συχνότητα ελέγχου, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ελεγχόμενου υλικού, αλλά και τη σχετική μαγνητική του διαπερατότητα, το φαινόμενο αυτό μπορεί να μετριαστεί σε έναν μικρό βαθμό με την μείωση της συχνότητας ελέγχου. Ο δεύτερος, και βασικότερος παράγοντας είναι η ελάττωση της μαγνητικής ροής (η οποία οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας των δινορρευμάτων) με την αύξηση του βάθους κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Γενικά, η χρήση πηνίων μεγαλύτερης διαμέτρου βοηθά στην εισχώρηση της μαγνητικής ροής βαθύτερα στο υλικό, έχει όμως αρνητικό αντίκτυπο στην ευαισθησία του ελέγχου. Το φαινόμενο της αύξησης του βάθους διείσδυσης της μαγνητικής ροής με αύξηση της διαμέτρου του πηνίου παρουσιάζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20. Σύγκριση πηνίων μεγάλης και μικρής διαμέτρου σχετικά με τη διείσδυση της μαγνητικής ροής στο υλικό [27].

Επιπλέον, πολύ σημαντική είναι και η μείωση της ευαισθησίας με αύξηση της απόστασης μεταξύ του πηνίου/αισθητήρα και του δοκιμίου (αύξηση του Lift-off). Γενικά τα μεγαλύτερης διαμέτρου πηνία επηρεάζονται λιγότερο σε σχέση με τα μικρότερης από την αύξηση του Lift-off, λόγω του ότι στην περίπτωση των μεγαλύτερων αισθητήρων η μαγνητική ροή διεισδύει βαθύτερα στο υλικό.

Θα πρέπει επίσης να τονιστεί η σημασία του μήκους της ασυνέχειας αλλά και του μεγέθους του πηνίου στην ευαισθησία του ελέγχου. Αποτελεί γενικό κανόνα να επιλέγεται πηνίο/αισθητήρας με διάμετρο μικρότερη ή ίση του μήκους τις μικρότερης ρωγμής που επιθυμούμε να ανιχνευθεί κατά τον έλεγχο. Γενικά η ροή των δινορρευμάτων περιορίζεται στην περιοχή του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου, το μέγεθος της οποίας είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του πηνίου, επομένως η περιοχή ροής των δινορρευμάτων είναι η περιοχή ακριβώς κάτω από το πηνίο, προσαυξημένη κατά τέσσερα επιδερμικά βάθη, εξαιτίας της διασποράς του μαγνητικού πεδίου γύρω από το πηνίο. Άρα, η ενεργή διάμετρος του πηνίου θα δίνεται από τη σχέση:

$$D_{eff} = D_C + 4\delta \quad (10)$$

Όπου:

- D_C η διάμετρος του πηνίου.
- δ το επιδερμικό βάθος.

Όπως είναι προφανές, για υψηλές συχνότητες ελέγχου, το δ είναι τόσο μικρό που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε πως είναι πρακτικά μηδενικό, άρα και η ενεργή διάμετρος του πηνίου θα είναι ίση με τη φυσική του διάμετρο. Αντιθέτως, σε χαμηλές συχνότητες, η διασπορά του μαγνητικού πεδίου είναι σημαντική, για το λόγο αυτό είναι συχνή η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών για κάλυψη του αισθητήρα, με σκοπό την εστίαση του μαγνητικού πεδίου σε μια μικρότερη περιοχή.

2.6. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί ο απαραίτητος για την πραγματοποίηση μη καταστροφικών ελέγχων μέσω δινορρευμάτων εξοπλισμός. Γενικά, υπάρχει πληθώρα οργάνων και αισθητήρων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν και η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού εξαρτάται πάντοτε από παράγοντες όπως το υλικό του ελεγχόμενου δοκιμίου, η γεωμετρία του, τα είδη των ατελειών που αναζητούμε, κλπ. Παρόλα αυτά, ο μη καταστροφικός έλεγχος μέσω δινορρευμάτων θα περιλαμβάνει σε κάθε περίπτωση τουλάχιστον τα ακόλουθα στοιχεία [27].

Αισθητήρες-πηνία

Ο αισθητήρας/ πηνίο αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα του εξοπλισμού διενέργειας του ελέγχου και η σωστή επιλογή του έχει σημαντικό αντίκτυπο στην επιτυχία/αξιοπιστία του ελέγχου. Για την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες που σχετίζονται με ζητήματα όπως:

- Το επιθυμητό βάθος διείσδυσης (επιφάνεια ή εσωτερικό του υλικού).
- Η επιθυμητή ευαισθησία.
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου αντικειμένου.
- Το μέγεθος του αισθητήρα (Οι μικρότεροι αισθητήρες διεισδύουν λιγότερο, ενώ οι μεγαλύτεροι περισσότερα)
- Τον τύπο αισθητήρα (πχ. απόλυτος, ανάκλασης, διαφορικός ή υβριδικός)
- Τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με τον τρόπο σύνδεσης του αισθητήρα με το όργανο μέτρησης δινορρευμάτων αλλά και η αντιστοιχία της σύνθετης αντίστασης του αισθητήρα με τη σύνθετη αντίσταση του οργάνου μέτρησης.

Γενικά, ένας από τους πιο κοινούς τρόπους ταξινόμησης των αισθητήρων είναι ο διαχωρισμός τους σε αισθητήρες επιφανείας, αισθητήρες εσωτερικής διαμέτρου και αισθητήρες εξωτερικής διαμέτρου.

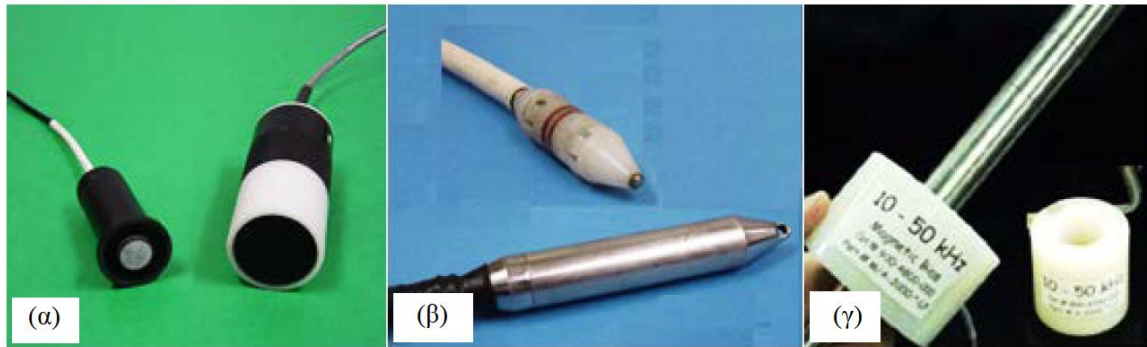
Οι αισθητήρες επιφανείας αποτελούνται από πηνία, τα οποία είναι τοποθετημένα πλησίον του άκρου ενός πλαστικού περιβλήματος. Έτσι, ο αισθητήρας μπορεί να μετακινείται επί της επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου.

Οι αισθητήρες εσωτερικής διαμέτρου αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πηνία, τα οποία είναι περιελιγμένα γύρω από ένα περίβλημα το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από πλαστικό ή από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο σωλήνων με πρόσβαση από το εσωτερικό τους.

Οι αισθητήρες εξωτερικής διαμέτρου αποτελούνται από ένα ή περισσότερα πηνία τα οποία είναι περιελιγμένα γύρω από ένα κοίλο περίβλημα και είναι σχεδιασμένοι ώστε το υπό έλεγχο δοκίμιο

να διέρχεται από τη μέση του αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο δοκών, ράβδων, καθώς και σωλήνων.

Οι τρεις βασικοί τύποι αισθητήρων που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21. (α) Αισθητήρες επιφανείας, (β) Αισθητήρες εσωτερικής διαμέτρου, (γ) Αισθητήρες εξωτερικής διαμέτρου [27].

Γενικά οι αισθητήρες που έχουν μικρή διάμετρο, έχουν υψηλή ευαισθησία και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μικρών ρωγμών και λοιπών ελαττωμάτων, παρόλα αυτά, η διείσδυση που επιτυγχάνεται μέσω αυτών είναι μικρή. Αντιθέτως καλύτερη διείσδυση επιτυγχάνεται μέσω χρήσης αισθητήρων μεγάλης διαμέτρου, μειώνοντας όμως την ευαισθησία του ελέγχου, οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση διάβρωσης ή/και για τον εντοπισμό υποεπιφανειακών ατελειών μεγάλου μεγέθους.

Όργανα μέτρησης

Τα όργανα μέτρησης των δινορρευμάτων μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες, τα ψηφιακά και τα αναλογικά. Τα όργανα αυτά είναι συνήθως φορητά, προκειμένου να είναι εύκολη η μεταφορά τους στην περιοχή διενέργειας του ελέγχου και δεν απαιτούν σύνδεση με εξωτερική πηγή ενέργειας. Αν και είναι δυνατό τα όργανα αυτά να απεικονίζουν μια σειρά χαρακτηριστικών όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα, διαφορά δυναμικού κλπ, για την περίπτωση ελέγχου που στοχεύει στην εύρεση ασυνεχειών είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται απεικόνιση της σύνθετης αντίστασης του πηνίου/αισθητήρα υπό τη μορφή επιπέδου/διαγράμματος σύνθετης ανάλυσης.

Τα σύγχρονα όργανα δινορρευμάτων είναι συνήθως ψηφιακά και δύνανται να λειτουργήσουν με μια, δύο αλλά και περισσότερες συχνότητες διέγερσης (τόσο διαδοχικά όσο και ταυτόχρονα), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης και ελέγχου περισσότερων του ενός αισθητήρες ταυτόχρονα για τη διενέργεια του ελέγχου. Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα φορητό όργανο δινορρευμάτων.



Εικόνα 22. Όργανο δινορρευμάτων NORTEC 600 (Πηγή: www.olympus-ims.com).

Πρότυπα δοκίμια

Όπως και σε άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, έτσι και στην περίπτωση των δινορρευμάτων κρίνεται απαραίτητη η χρήση πρότυπων δοκιμίων. Τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των σημάτων που λαμβάνονται από τον έλεγχο του υπό εξέταση αντικειμένου. Είναι κατασκευασμένα από υλικό παρόμοιο με το υπό εξέταση αντικείμενο και η κατασκευή και η γεωμετρία τους καθορίζονται από διεθνή πρότυπα.

Υπάρχει πληθώρα τύπων δοκιμίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το είδος του απαιτούμενου προς εκτέλεση ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν πρότυπα δοκίμια πάχους, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση τυχόν λέπτυνσης λόγω διάβρωσης, δοκίμια με εγκοπές οι οποίες προσομοιάζουν ρωγμές και πολλά άλλα είδη δοκιμίων. Παραδείγματα πρότυπων δοκιμίων απεικονίζονται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Παραδείγματα πρότυπων δοκιμίων μη-καταστροφικού ελέγχου μέσω δινορρευμάτων (Πηγή: nde-solutions.com).

2.7. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η χρήση επαγόμενων δινορρευμάτων ως μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ανταγωνιστικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, παρουσιάζει όμως και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία περιορίζουν την εφαρμοσιμότητα της. Ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκύπτουν έπειτα από έρευνα σε σχετική βιβλιογραφία παρουσιάζονται στη συνέχεια [27, 29].

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ταχύτητα πραγματοποίησης του ελέγχου (μέχρι και 1 m/sec).
- Παρέχει ακριβείς μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός υλικού.
- Ασυνέχειες κοντά στην επιφάνεια μπορούν να εντοπιστούν γρήγορα και αξιόπιστα.
- Η μέθοδος έχει πολύ υψηλή ευαισθησία ακόμη και σε πολύ μικρές ασυνέχειες.
- Δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων του πάχους επικαλύψεων (αγώγιμων ή μη).
- Δεν απαιτείται φυσική επαφή του αισθητήρα με το ελεγχόμενο αντικείμενο.
- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού πραγματοποίησης του ελέγχου.
- Δεν υπάρχει ανάγκη για αναλώσιμα υλικά ελέγχου.
- Πλήρης φορητότητα του απαραίτητου για τη διενέργεια του ελέγχου εξοπλισμού.
- Δεν απαιτείται προετοιμασία στις επιφάνειες των δοκιμίων για την πραγματοποίηση του ελέγχου (πχ καθαρισμός ή αφαίρεση επικαλύψεων).

Μειονεκτήματα

- Μικρό βάθος διείσδυσης στο υλικό λόγω του επιδερμικού φαινομένου.
- Απαιτείται υψηλό επίπεδο επιδεξιότητας από τον ελεγκτή για την ορθή πραγματοποίηση του ελέγχου.
- Οι παρεχόμενες από τον εξοπλισμό ενδείξεις εξαρτώνται από πληθώρα παραγόντων, η αναγνώριση των οποίων μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι δύσκολη.
- Η μέθοδος των δινορρευμάτων εφαρμόζεται μόνο επί ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών.
- Είναι πιθανή η εμφάνιση ψευδών ενδείξεων λόγω της γεωμετρίας του ελεγχόμενου αντικειμένου ή του edge effect.
- Η επιφανειακή τραχύτητα του αντικειμένου μπορεί να οδηγήσει σε μη-σχετικές ενδείξεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS

Η αναπαράσταση των φυσικών νόμων για χωρικά και χρονικά εξαρτημένα προβλήματα εκφράζεται συνήθως υπό τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αδυναμία αναλυτικής επίλυσης των ΜΔΕ αυτών για την πλειοψηφία των σύνθετων γεωμετριών που αφορούν τις επιστήμες μηχανικού. Ακόμη όμως και σε περιπτώσεις που η αναλυτική επίλυση των ΜΔΕ είναι εφικτή, δεν παύει να είναι χρονοβόρα και να απαιτεί άριστες μαθηματικές γνώσεις. Για το λόγο αυτό, ένας εναλλακτικός τρόπος επίλυσης των ΜΔΕ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η κατασκευή προσεγγιστικών των ΜΔΕ αυτών εξισώσεων μέσω διαφόρων μεθόδων διακριτοποίησης οι οποίες προσεγγίζουν τις ΜΔΕ με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων εξισώσεων. Οι προκύπτουσες προσεγγιστικές εξισώσεις δύνανται στη συνέχεια να επιλυθούν μέσω αριθμητικών μεθόδων. Τέλος, οι προκύπτουσες της αριθμητικής επίλυσης λύσεις, θα αποτελούν προσεγγίσεις των αναλυτικών λύσεων των ΜΔΕ. Η μεθοδολογία επίλυσης αυτή ονομάζεται μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite element method - FEM).

Έτσι, καθίσταται δυνατή για τον μελετητή η γρήγορη μοντελοποίηση και επίλυση φυσικών προβλημάτων, η αναλυτική επίλυση των οποίων είναι δύσκολη ή και αδύνατη σε ορισμένες περιπτώσεις. Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ελευθερία που παρέχει κατά τη διακριτοποίηση του προβλήματος, τόσο σε σχέση με τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για τη διακριτοποίηση του χώρου όσο και στις συναρτήσεις βάσης που θα χρησιμοποιηθούν [31].

Ιστορικά, η χρησιμότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση μαθηματικών και φυσικών προβλημάτων αναγνωρίστηκε αρχικά από τον μαθηματικό Richard Courant κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1940, με τη μέθοδο να χρησιμοποιείται συστηματικά κατά τις επόμενες δεκαετίες στο πεδίο της δομικής ανάλυσης κατασκευών. Παρόλα αυτά χρειάστηκε να παρέλθουν αρκετές δεκαετίες προκειμένου να εφαρμοστεί και σε άλλα πεδία πέραν της δομικής μηχανικής [31].

Σήμερα, υπάρχουν διαθέσιμα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν πληθώρα φυσικών φαινομένων, όπως ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε μηχανικές κατασκευές, προβλήματα ακουστικής, προβλήματα μηχανικής ρευστών και μετάδοσης θερμότητας, προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού, χημικές αντιδράσεις, κλπ. Επιπλέον, υπάρχουν πλέον λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων τα οποία επιτρέπουν την πραγματοποίηση πολυφυσικών (multiphysic) προσομοιώσεων, δηλαδή, προσομοιώσεων οι οποίες απαιτούν την ταυτόχρονη επίλυση

διαφορετικών φυσικών φαινομένων (πχ τη θέρμανση ενός αγωγού λόγω της ροής ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω αυτού) Παράδειγμα τέτοιου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί το COMSOL Multiphysics, το οποίο και αποτελεί το λογισμικό μέσω του οποίου θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας [31].

Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί η ενότητα (Module) AC/DC του COMSOL Multiphysics, η ενότητα αυτή αποτελεί ένα περιβάλλον το οποίο ενδείκνυται για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση AC και DC ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων τόσο σε δυο αλλά και σε τρεις διαστάσεις. Με την ενότητα αυτή είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν στατικές, οιονεί στατικές, μεταβατικές και χρονικά αρμονικές προσομοιώσεις. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης πληθώρας υλικών, ακόμη και ανισοτροπικών ή μη ομογενών υλικών [31].

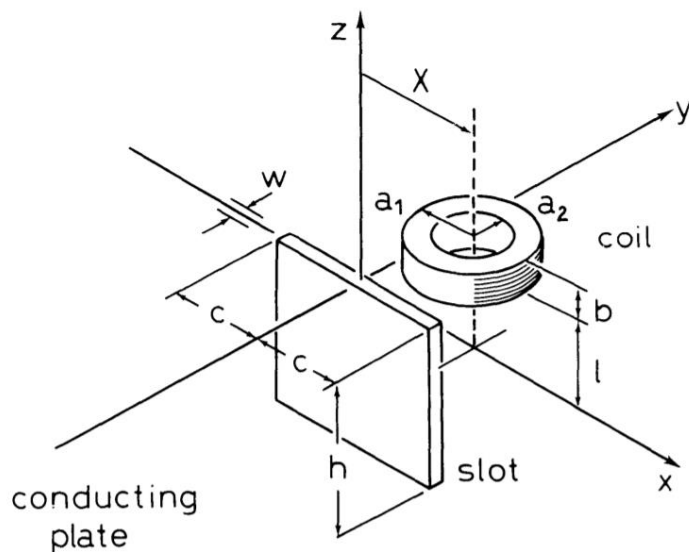
Όλα τα παραπάνω συμπληρώνονται από ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον εργασίας που καθιστά εύκολη τη δημιουργία των γεωμετρικών οντοτήτων, τη δημιουργία και διαχείριση του πλέγματος, τον καθορισμό ιδιοτήτων, αλλά και την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Προτού προχωρήσουμε στην προσομοίωση μη καταστροφικού ελέγχου μέσω δινορρευμάτων επί μέσου μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας, είναι χρήσιμο να ξεκινήσουμε προσομοιώνοντας τη διαδικασία αυτή σε μέσο σταθερής αγωγιμότητας και στη συνέχεια να συγκρίνουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα στα οποία θα καταλήξουμε, με υφιστάμενα θεωρητικά αλλά και πειραματικά αποτελέσματα, προκειμένου να εξετάσουμε τη δυνατότητα του COMSOL Multiphysics να παρέχει αποτελέσματα τα οποία ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Για το λόγο αυτό, θα προσομοιωθούν με τη βοήθεια του COMSOL Multiphysics δυο πρότυπα προβλήματα (Benchmarks) τα οποία καθιερώθηκαν από τον Dr. Steve Burke. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται για τη μοντελοποίηση του υπό εξέταση φυσικού προβλήματος.

3.2.1. ΠΡΩΤΟ BENCHMARK

Το πρώτο Benchmark με το οποίο θα ασχοληθούμε αφορά την κίνηση ενός πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x πάνω από μια αγωγίμη πλάκα μεγάλου πάχους, η οποία περιέχει μια ορθογωνική ασυνέχεια όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Το πηνίο παραμένει παράλληλο προς την επιφάνεια καθ'όλη τη διάρκεια της κίνησης του. Οι παράμετροι του προβλήματος αντίστοιχα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 24. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρώτου Benchmark.

Πίνακας 1. Βασικές παράμετροι του πρώτου Benchmark.

Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος (a_2)	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος (a_1)	18.4 mm
Μήκος (b)	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου (N)	408
Ανύψωση (Lift-off) (l)	2.03 mm
Συχνότητα ρεύματος πηνίου	7000 Hz
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	$3.06 \cdot 10^7$ S/m
Πάχος	12.22 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος ($2c$)	12.6 mm
Βάθος (h)	5 mm
Πλάτος (w)	0.28 mm

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που συνοδεύουν το benchmark αυτό (μεταβολή των συνιστωσών της σύνθετης αντίστασης του πηνίου) συναρτήσει της θέσης του πηνίου επάνω από την πλάκα. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν στη συνέχεια με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την προσομοίωση του προβλήματος που θα πραγματοποιήσουμε.

Πίνακας 2. Πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου Benchmark.

X_c [mm]	ΔL [μH]	ΔR [Ω]	X_c [mm]	ΔL [μH]	ΔR [Ω]
0.0	0.5	0.02	15.0	9.1	0.18
1.0	0.2	0.02	16.0	8.4	0.18
2.0	0.5	0.02	17.0	7.3	0.16
3.0	0.7	0.04	18.0	6.4	0.14
4.0	1.4	0.05	19.0	5.0	0.12
5.0	2.0	0.06	20.0	4.1	0.10
6.0	3.0	0.08	21.0	3.0	0.08
7.0	3.9	0.11	22.0	2.3	0.07
8.0	5.2	0.13	23.0	1.6	0.05
9.0	6.6	0.15	24.0	1.1	0.04
10.0	7.5	0.17	25.0	0.7	0.03
11.0	8.6	0.18	26.0	0.5	0.02
12.0	9.3	0.19	27.0	0.5	0.02
13.0	9.5	0.19	29.0	0.2	0.01
14.0	9.5	0.19	31.0	0.0	0.00

Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος θα χρησιμοποιήσουμε την ενότητα AC/DC του COMSOL Multiphysics, και το μοντέλο που θα δημιουργήσουμε μέσω αυτού θα είναι τριών διαστάσεων. Η προσομοίωση που θα πραγματοποιήσουμε θα αφορά το πεδίο της συχνότητας (Frequency Domain).

Το πρώτο βήμα της κατασκευής του μοντέλου είναι ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων του προβλήματος. Το COMSOL Multiphysics λειτουργεί παραμετρικά και μας δίνει τη δυνατότητα να αποθηκεύουμε παραμέτρους με διακριτά ονόματα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να χρησιμοποιούμε μόνο το όνομα της κάθε παραμέτρου σε μεταγενέστερα βήματα, έτσι γίνεται πιο φιλική προς το χρήστη η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, αφού για τυχόν αλλαγές μπορούν να πραγματοποιηθούν απλά και μόνο μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων από τον σχετικό πίνακα στον οποίο είναι αποθηκευμένες. Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται ο πίνακας στον οποίο αποθηκεύονται οι παράμετροι του προβλήματος. Πρόκειται για τις παραμέτρους που υποδεικνύονται από το benchmark και παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1.

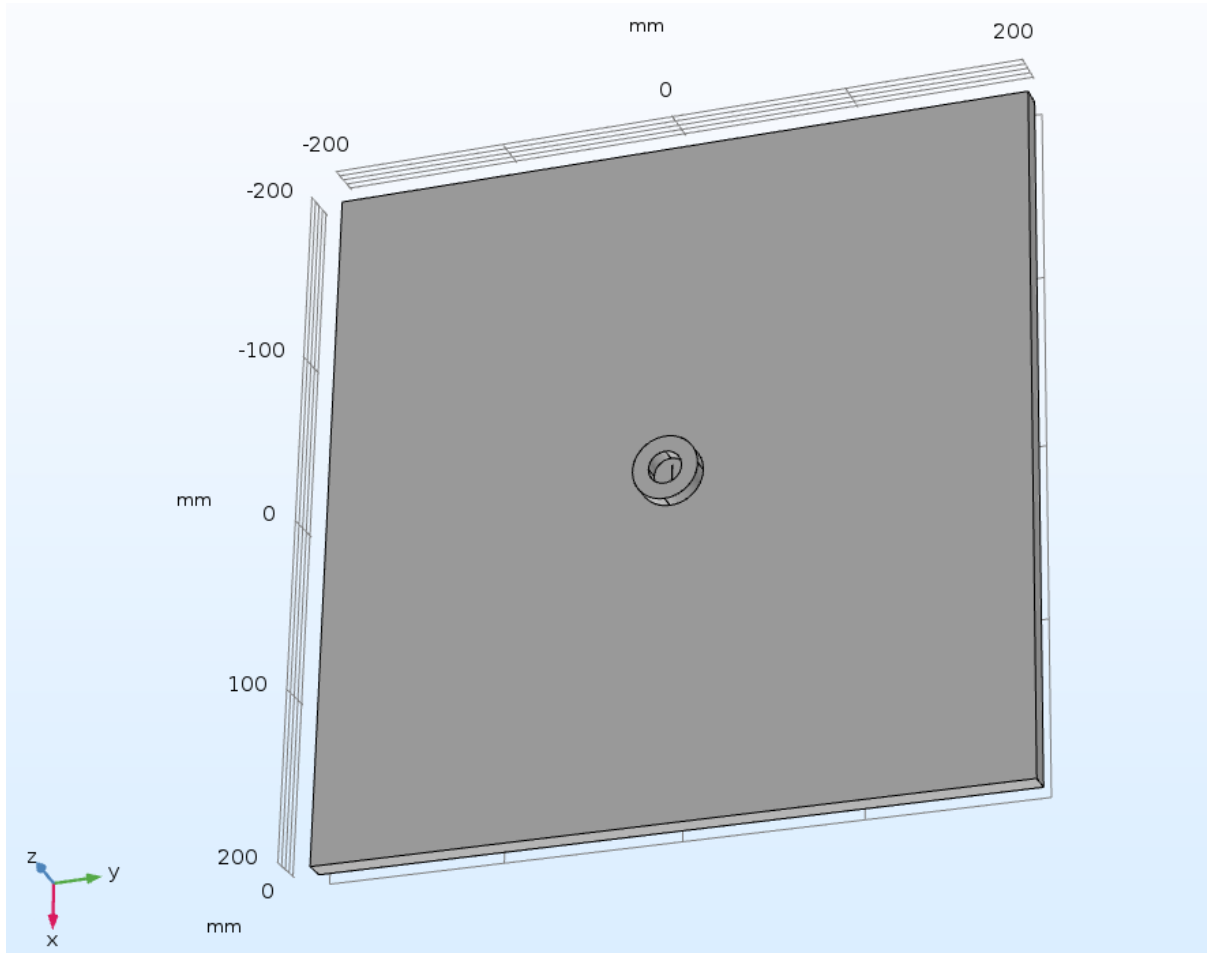
Properties		Settings	
Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
R	18.4[mm]	0.0184 m	
r	9.34[mm]	0.00934 m	
hr	9[mm]	0.009 m	
N	408	408	
lo	2.03[mm]	0.00203 m	
cond	30.6[MS/m]	3.06E7 S/m	
Sx	400[mm]	0.4 m	
Sy	400[mm]	0.4 m	
Sz	12.22[mm]	0.01222 m	
dx	12.6[mm]	0.0126 m	
dy	0.28[mm]	2.8E-4 m	
dz	5[mm]	0.005 m	
fr	7[kHz]	7000 Hz	
mv	0[mm]	0 m	

Εικόνα 25. Πίνακας παραμέτρων του μοντέλου.

Έχοντας καταχωρήσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους μπορούμε πλέον να κατασκευάσουμε τη γεωμετρία του προβλήματος. Με τη χρήση των κατάλληλων σχεδιαστικών εργαλείων που περιλαμβάνονται εντός του λογισμικού σχεδιάζουμε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο Domain το οποίο συμβολίζει την προς έλεγχο αγώγιμη πλάκα. Επίσης, σχεδιάζουμε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο Domain κατάλληλων διαστάσεων το οποίο συμβολίζει την ασυνέχεια που βρίσκεται στο κέντρο του αγώγιμου μέσου. Θα πρέπει να τονιστεί πως δεν προχωράμε σε αφαίρεση του δευτέρου Domain από το πρώτο η οποία θα μας έδινε ένα νέο Domain το οποίο θα ήταν μια πλάκα με μια ασυνέχεια, αντιθέτως διατηρούμε τα δυο διακριτά Domains με σκοπό σε μεταγενέστερο στάδιο της μοντελοποίησης να δοθούν στο Domain που συμβολίζει την πλάκα οι ιδιότητες του αγώγιμου μέσου, ενώ στο Domain που συμβολίζει την ασυνέχεια θα δοθούν διαδοχικά οι ιδιότητες του αέρα και οι ιδιότητες του αγώγιμου μέσου, με σκοπό τον προσδιορισμό της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου (ΔR) αλλά και της επαγωγικής του αντίδρασης (ΔX_L) λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.

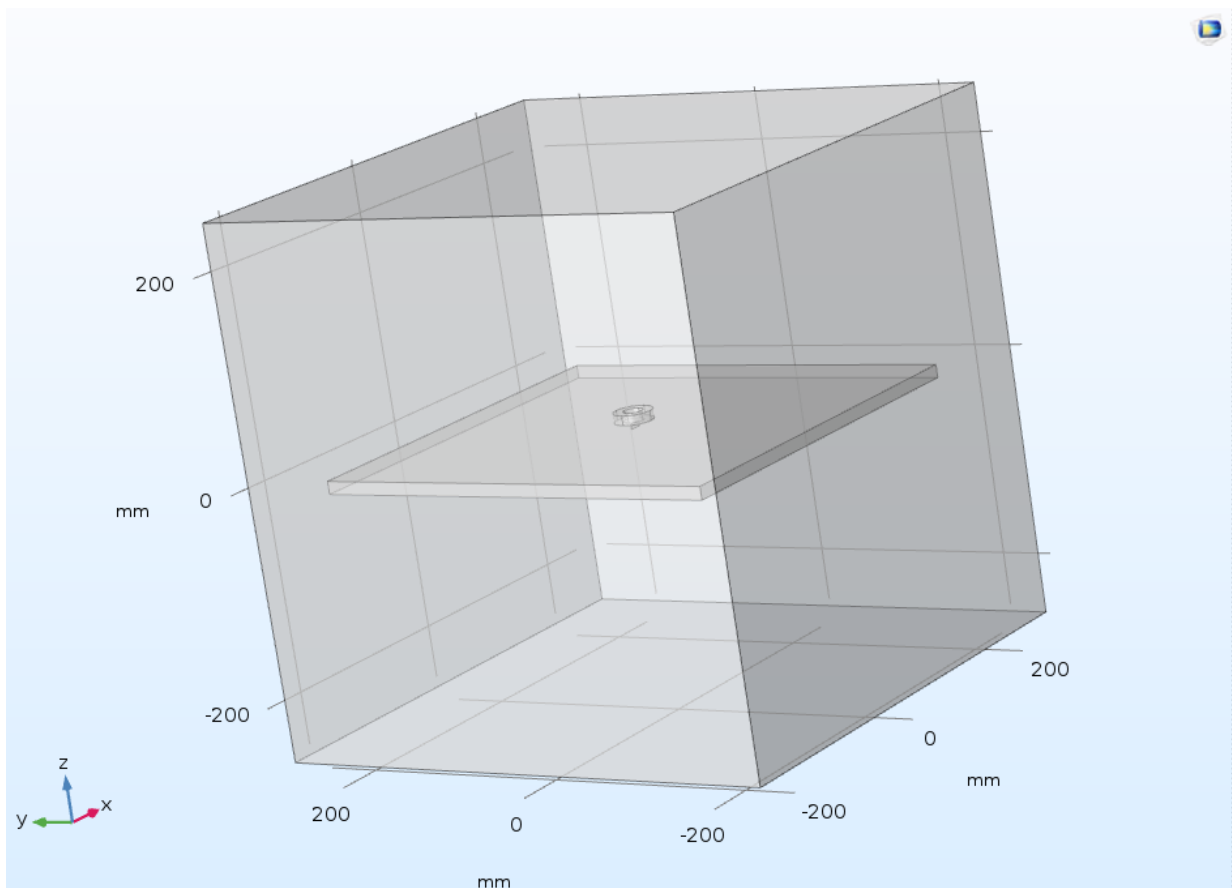
Τέλος, κατασκευάζουμε το Domain το οποίο αντιστοιχεί στο πηνίο/αισθητήρα, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της πλάκας, σε απόσταση ίση με το lift-off που προσδιορίζεται από το

Benchmark, επάνω από τη ρωγμή. Το τελικό αποτέλεσμα των παραπάνω ενεργειών παρουσιάζεται στην Εικόνα 26. Επιπλέον, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η απαραίτητη κίνηση του πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x, χρησιμοποιούμε τον γεωμετρικό μετασχηματισμό Move.



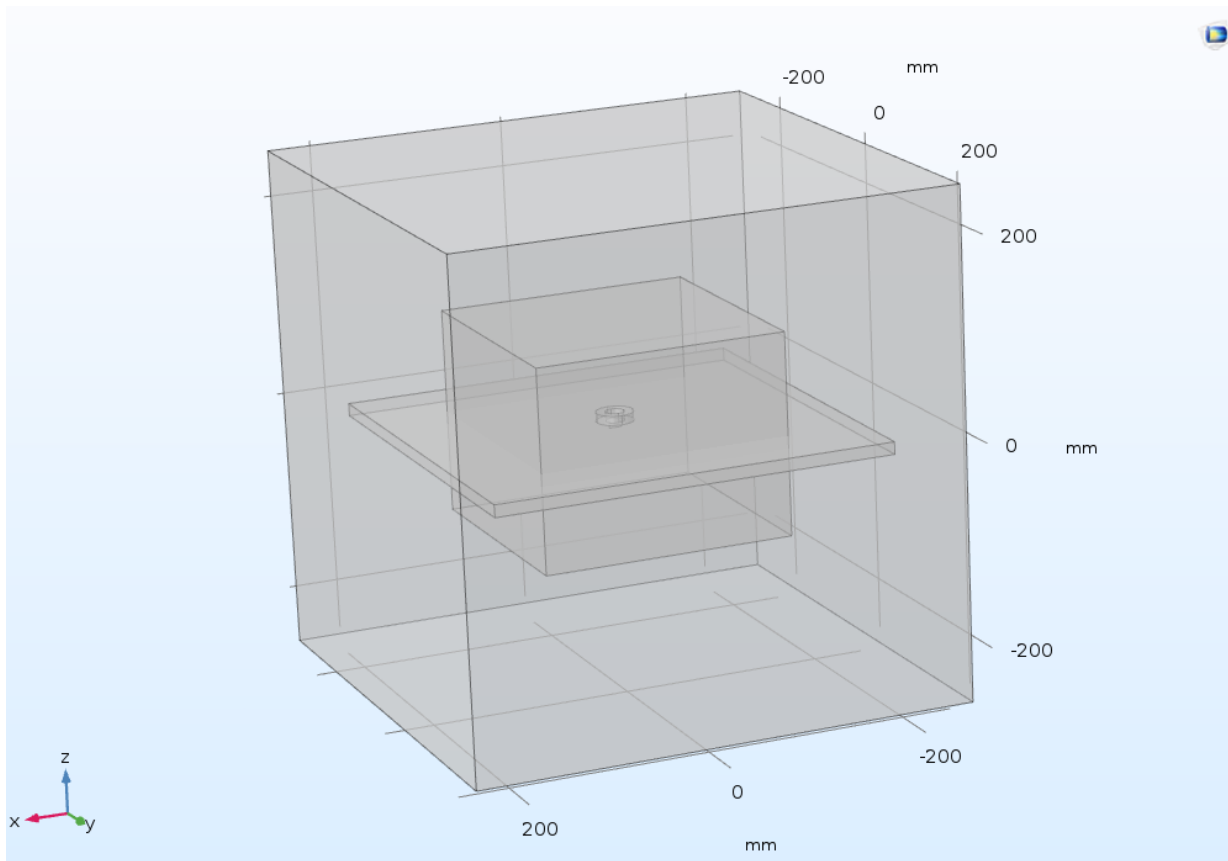
Εικόνα 26. Απεικόνιση της γεωμετρίας του προβλήματος.

Θα πρέπει επίσης να δημιουργήσουμε τον χώρο (Domain) μέσα στην οποίο θα υφίσταται το φυσικό μας πρόβλημα, για το λόγο αυτό θα δημιουργήσουμε ένα νέο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το οποίο θα περιβάλλει όλα τα υπόλοιπα στερεά. Προκειμένου να μην επηρεαστούν τα τελικά αποτελέσματα από το γεγονός πως ο χώρος θα είναι πεπερασμένος, θα πρέπει το νέο αυτό Domain να έχει διαστάσεις κατ'ελάχιστο δέκα φορές μεγαλύτερες από την εξωτερική διάμετρο του πηνίου και αυτό διότι σε αυτές τις αποστάσεις η πυκνότητα της μαγνητικής ροής του πηνίου είναι τόσο μικρή ώστε να μπορεί να θεωρηθεί μηδενική. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27. Απεικόνιση του Domain που οριοθετεί τον φυσικό χώρο μέσα στον οποίο υφίσταται το φυσικό πρόβλημα προς προσομοίωση.

Εν συνεχεία μπορούμε να προβούμε σε ένα προαιρετικό βήμα. Λαμβάνοντας υπόψη πως μόνο η περιοχή κοντά στο πηνίο και την ασυνέχεια θα έχει σημαντική επιρροή στα τελικά αποτελέσματα, είναι επιθυμητό το πλέγμα που θα δημιουργηθεί στη συνέχεια να είναι επαρκώς πυκνό την περιοχή αυτή, αντιθέτως, οι περιοχές του προβλήματος που βρίσκονται πιο μακριά δεν θα έχουν σημαντική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα εξαιτίας της εξασθένησης του μαγνητικού πεδίου και των δινορρευμάτων μακριά από το πηνίο. Έτσι, μπορούμε με τον ίδιο τρόπο να δημιουργήσουμε ένα νέο Domain το οποίο να περιβάλλει μόνο την περιοχή ενδιαφέροντος, το οποίο και θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια προκειμένου να οριοθετήσουμε μια περιοχή με πυκνότερο πλέγμα στοιχείων στο εσωτερικό της και αραιότερο στο εξωτερικό της με σκοπό τον περιορισμό του συνολικού αριθμού πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου, άρα και μείωσης του χρόνου επίλυσης του, δίχως να απολέσουμε σημαντική ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 28.

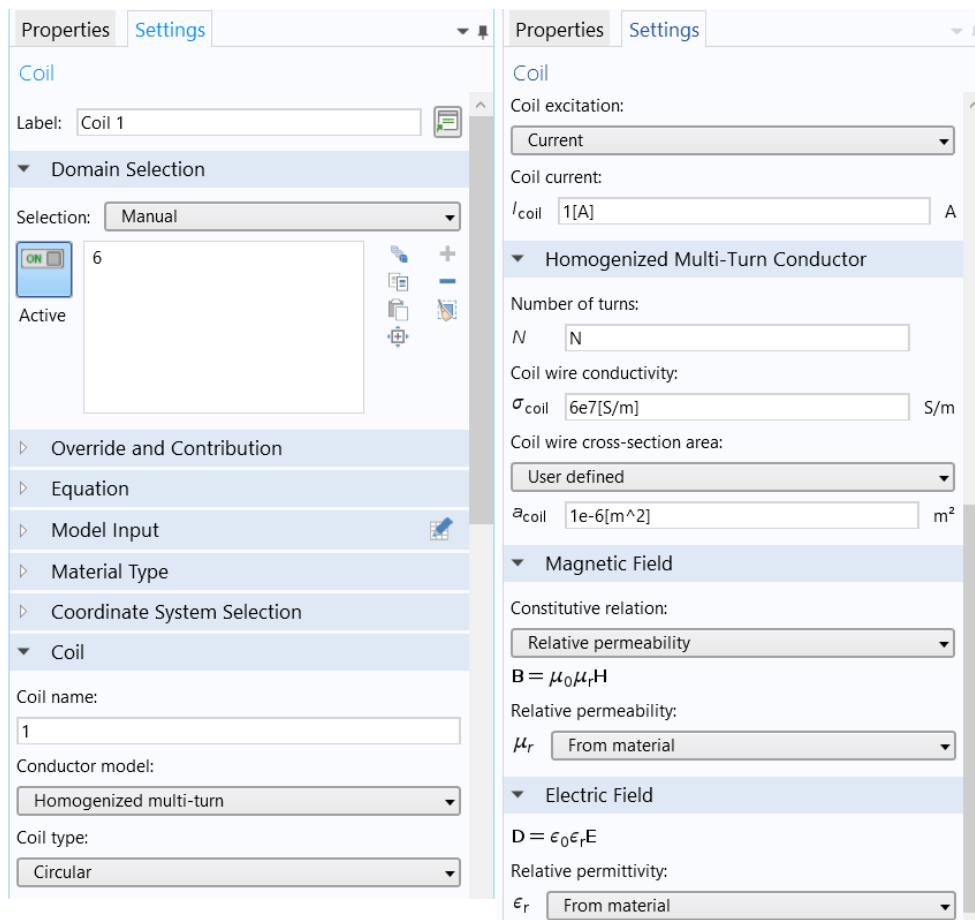


Εικόνα 28. Απεικόνιση του βοηθητικού Domain που περιέχει την περιοχή ενδιαφέροντος.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των υλικών που θα περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Τα υλικά αυτά, στην περίπτωση μας είναι δυο, ο αέρας και το μη-μαγνητικό αγωγίμο υλικό της πλάκας. Έπειτα από τη δημιουργία και καταχώρηση των υλικών στο Model Builder, ακολουθεί η ανάθεση τους στα κατάλληλα Domains.

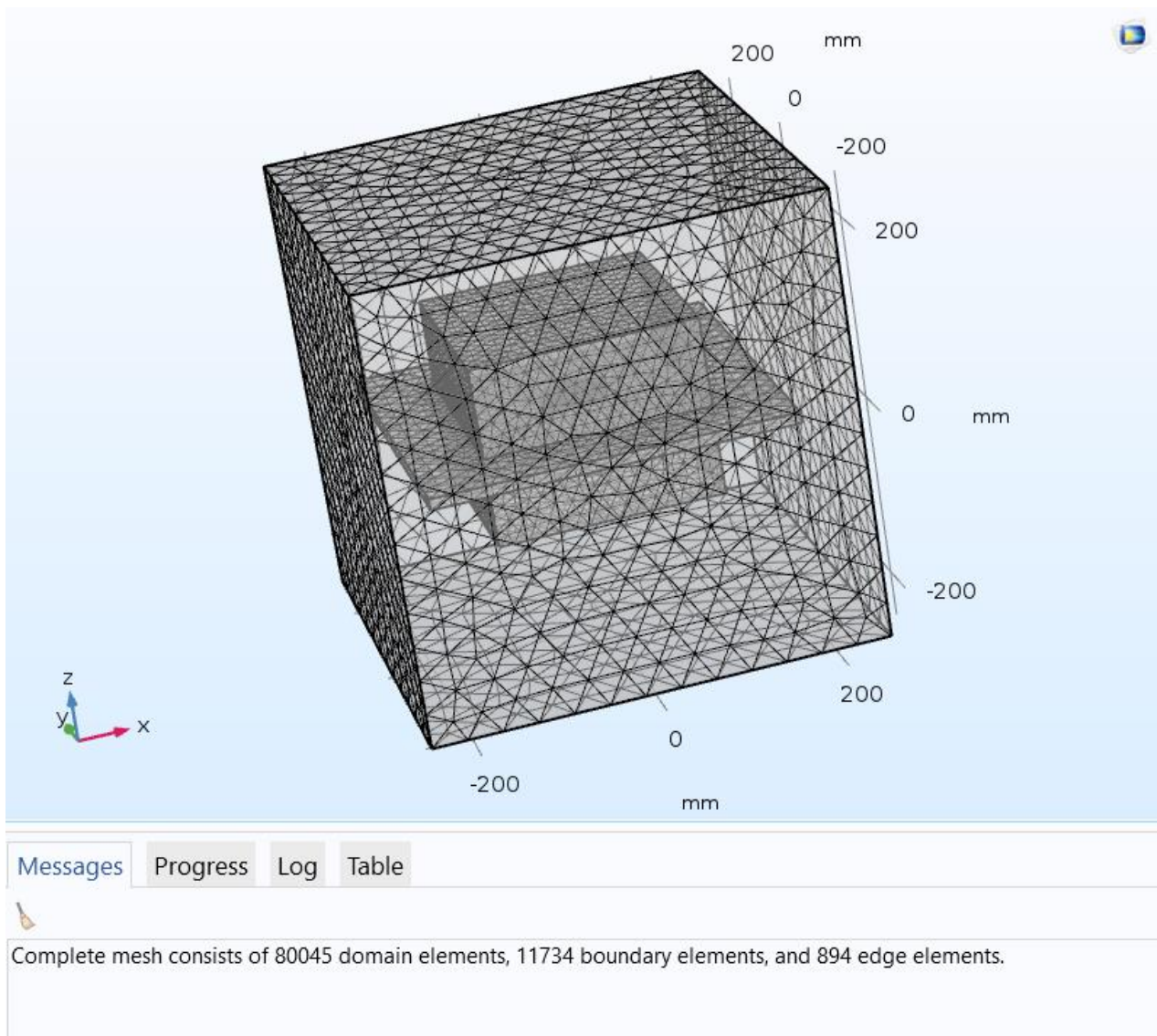
Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου (ΔR) αλλά και της επαγωγικής του αντίδρασης (ΔX_L) θα πρέπει να δοθούν διαδοχικά στο Domain που συμβολίζει την ασυνέχεια οι ιδιότητες του αέρα και οι ιδιότητες του αγωγίμου μέσου προκειμένου να υπολογιστεί η σύνθετη αντίσταση του πηνίου τόσο για την ύπαρξη ασυνέχειας όσο και δίχως την ύπαρξη αυτής. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η αλλαγή υλικού αυτή χρησιμοποιούνται οι λειτουργίες Material Sweep και Switch.

Ακολουθεί ο καθορισμός των ιδιοτήτων του πηνίου. Επιλέγουμε το Domain που αντιπροσωπεύει το πηνίο, προσδιορίζουμε πως πρόκειται για έναν Homogenized multi-turn αγωγό και πως το πηνίο είναι κυκλικό (Circular). Στα πεδία που παρουσιάζονται στο δεξιό τμήμα της Εικόνας 29 θα αφήσουμε τις τιμές του συστήματος, με μόνη εξαίρεση το πεδίο Number of turns, στο οποίο και θα εισάγουμε την παράμετρο N, η οποία συμβολίζει τον αριθμό περιελίξεων του πηνίου. Αμέσως μετά, προσδιορίζουμε τη φορά του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και τη διατομή μέσω της οποίας ρέει το ρεύμα.



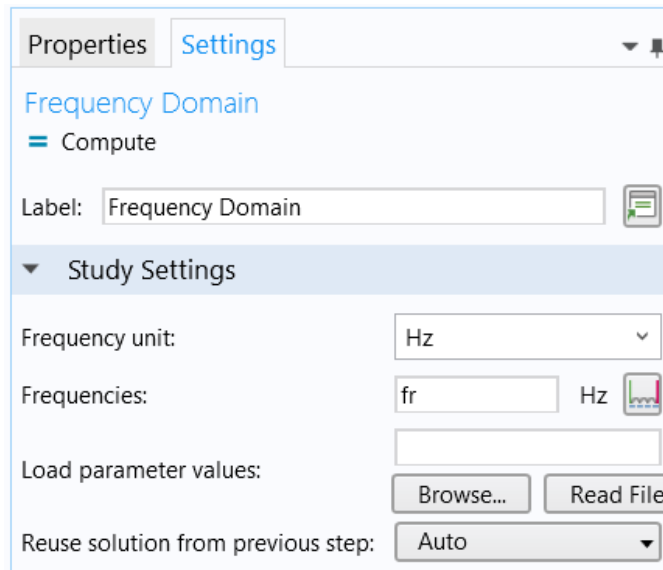
Εικόνα 29. Καθορισμός των ιδιοτήτων του πηνίου.

Επομένως, έχοντας πλέον ορίσει πλήρως και το πηνίο ήμαστε πλέον σε θέση να προχωρήσουμε στη δημιουργία του πλέγματος. Βασική μας στρατηγική είναι να μεγιστοποιήσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τον μικρότερο δυνατό αριθμό στοιχείων. Γνωρίζουμε πως τη σημαντικότερη συνεισφορά στα τελικά αποτελέσματα έχει η γεωμετρία του πηνίου και η περιοχή γύρω από την ασυνέχεια επομένως θα πρέπει να φροντίσουμε το πηνίο και η ασυνέχεια να έχουν το πυκνότερο πλέγμα στοιχείων, επιπλέον, όπως εξηγήσαμε και πρωτύτερα, και η περιοχή κοντά στη ρωγμή και το πηνίο (η περιοχή αυτή που οριοθετήσαμε μέσω του βοηθητικού Domain) θα έχει σχετικά σημαντική συνεισφορά, έτσι στην περιοχή αυτή θα έχουμε ένα αρκετά πυκνό πλέγμα, όχι όμως εξίσου πυκνό με το πηνίο και την ασυνέχεια. Τέλος, στις απομακρυσμένες από την περιοχή ενδιαφέροντος περιοχές, θα δημιουργήσουμε ένα σημαντικά αραιότερο πλέγμα. Το τελικό πλέγμα του προβλήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 30.



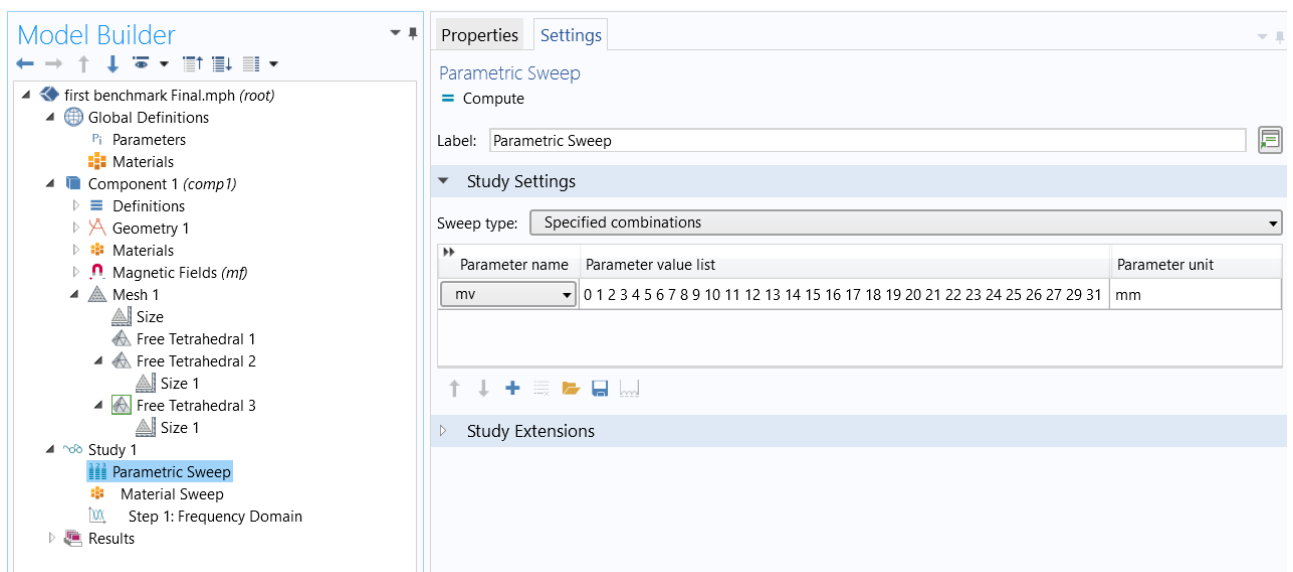
Εικόνα 30. Απεικόνιση του τελικού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Ως επόμενο βήμα, ορίζουμε στην καρτέλα Model Builder/Frequency Domain, στο πεδίο Frequencies την παράμετρο f_r , η οποία περιέχει τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 31.



Εικόνα 31. Καθορισμός της συχνότητας ελέγχου.

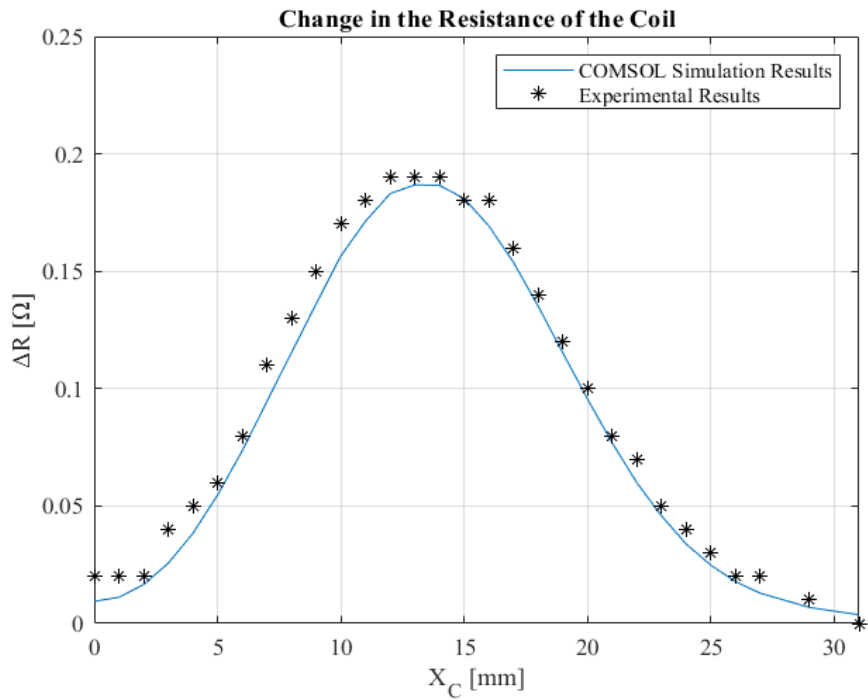
Τέλος, μένει πλέον να ορίσουμε το διάνυσμα το οποίο θα περιέχει τις διαδοχικές θέσεις μετακίνησης του πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της εντολής Parametric Sweep στην οποία θα εισάγουμε την παράμετρο mv και θα την αντιστοιχήσουμε με ένα διάνυσμα τιμών από 0 έως 31 mm όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.



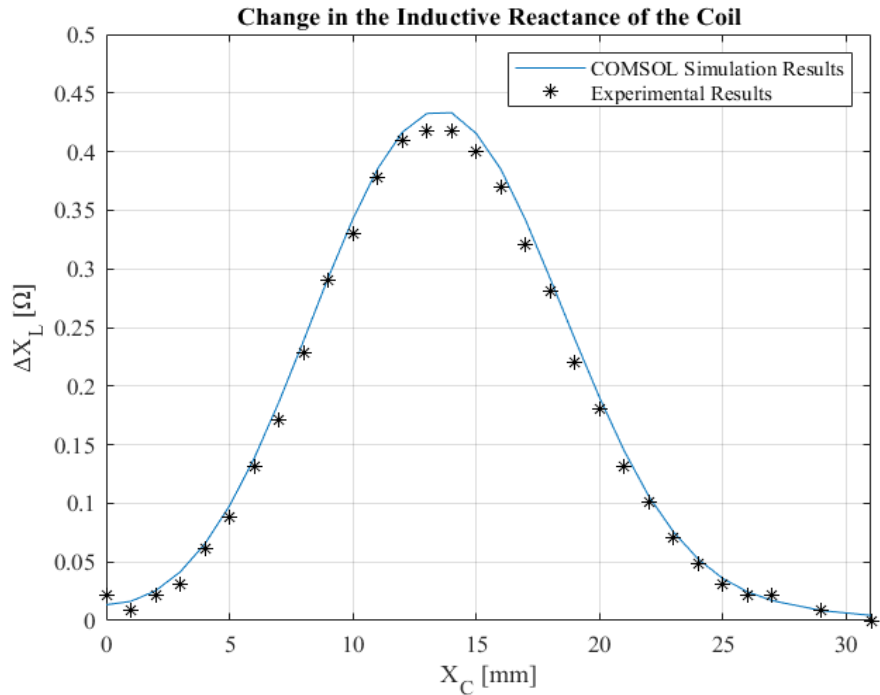
Εικόνα 32. Καθορισμός των διαδοχικών θέσεων στις οποίες θα μετακινείται το πηνίο.

Άρα, είμαστε πλέον σε θέση να εκκινήσουμε τη διαδικασία αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου. Έπειτα από το πέρας της επίλυσης του προβλήματος, εξάγουμε σε έναν πίνακα την σύνθετη αντίσταση του πηνίου για κάθε θέση υπολογισμού στον άξονα x, τόσο για την περίπτωση ύπαρξης της ασυνέχειας όσο και για την περίπτωση μη ύπαρξης αυτής. Άρα, αφαιρώντας τα δυο πραγματικά μέλη μεταξύ τους, αλλά και τα δύο φανταστικά μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολής της ωμικής

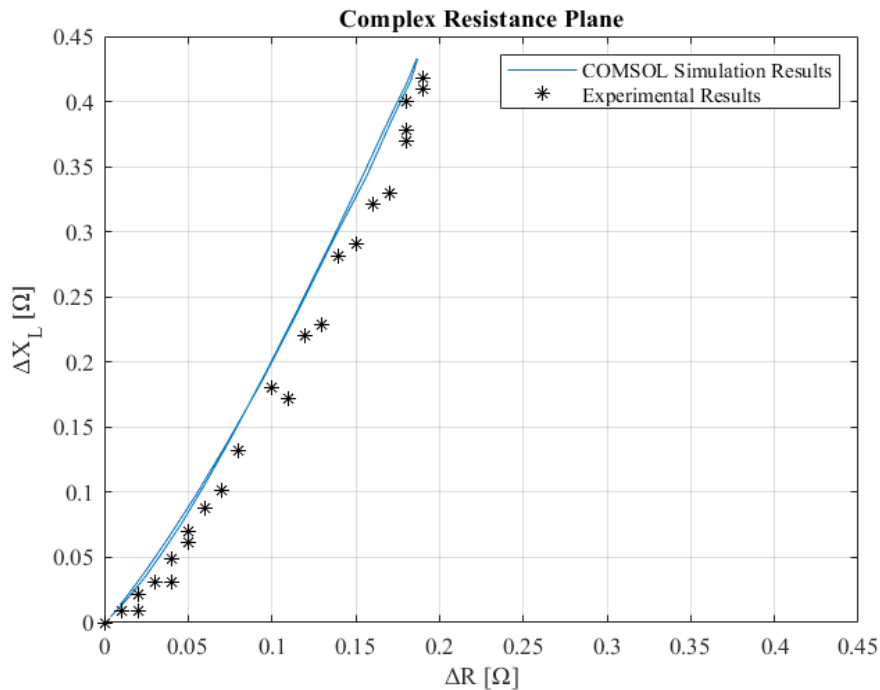
αντίστασης του πηνίου (ΔR) αλλά και της επαγωγικής του αντίδρασης (ΔX_L) που προκαλούνται λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στις Εικόνες 33, 34 και 35, σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2, τα οποία αναπαρίστανται με τη βοήθεια αστερίσκων. Παρατηρούμε πως η συμφωνία των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα είναι πολύ καλή.



Εικόνα 33. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου, συναρτήσει της θέσης αυτού, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.



Εικόνα 34. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου, συναρτήσει της θέσης αυτού, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.



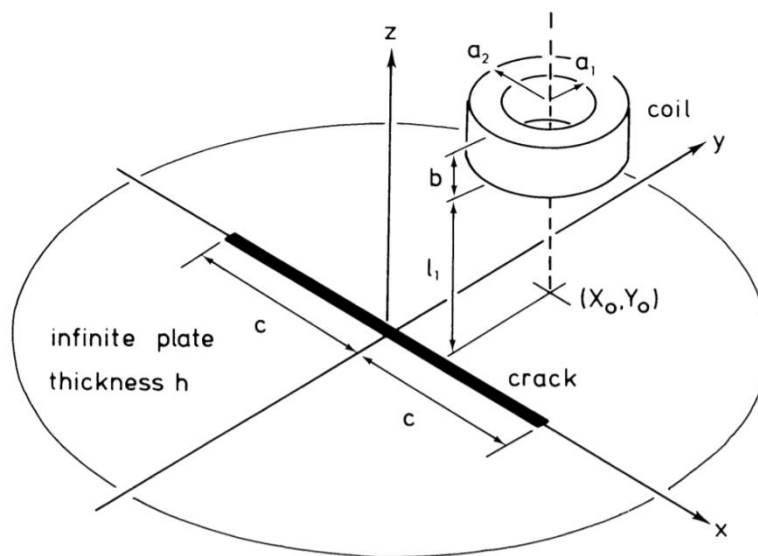
Εικόνα 35. Απεικόνιση αποτελεσμάτων στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης.

Η διαδικασία που περιγράφηκε στην υποενότητα αυτή αποτελεί τη βάση της διαδικασίας μοντελοποίησης που ακολουθούμε σε όλα τα ακόλουθα προβλήματα που θα παρουσιαστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία, επομένως για λόγους συντομίας δεν θα γίνει ξανά αναφορά σε αυτή.

Παρόλα αυτά, θα αναφερθούν όπου είναι απαραίτητο επιπρόσθετα βήματα μοντελοποίησης τα οποία ανταποκρίνονται στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε προβλήματος.

3.2.2. ΔΕΥΤΕΡΟ BENCHMARK

Το Benchmark με το οποίο θα ασχοληθούμε στην υποενότητα αυτή αφορά την ύπαρξη ενός πηνίου το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από μια αγώγιμη πλάκα μικρού πάχους, παράλληλα ως προς την επιφάνεια της, η οποία περιέχει μια διαμπερή ορθογωνική ασυνέχεια μεγάλου μήκους όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 36. Οι βασικές παράμετροι του προβλήματος αντίστοιχα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 36. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δεύτερου Benchmark.

Πίνακας 3. Βασικές παράμετροι του δεύτερου Benchmark.

Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος (a_1)	9.33 mm
Εξωτερική διάμετρος (a_2)	18.04 mm
Μήκος (b)	10.05 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου (N)	1910
Ανύψωση (Lift-off) (l)	1.87 mm
Συχνότητα ρεύματος πηνίου	1000 Hz
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	$1.65 \cdot 10^7$ S/m
Πάχος	0.89 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος ($2c$)	44.40 mm
Βάθος (h)	0.89 mm (Διαμπερής)
Πλάτος (w)	0.30 mm

Στην περίπτωση του προβλήματος αυτού έχουμε δυο διαφορετικές περιπτώσεις προς προσομοίωση. Αρχικά έχουμε την περίπτωση όπου το πηνίο μετακινείται κατά τη διεύθυνση του άξονα x ξεκινώντας από την αρχή των αξόνων, παραμένοντας παράλληλο προς την επιφάνεια του δοκιμίου, ενώ η δεύτερη περίπτωση αφορά μεταβολή της συχνότητας ελέγχου καθώς το πηνίο παραμένει σταθερό επάνω από το μέσο της ασυνέχειας (αρχή των αξόνων).

Τα πειραματικά αποτελέσματα των δυο αυτών περιπτώσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 και 5, μαζί με τις θεωρητικές τους λύσεις.

Πίνακας 4. Πειραματικά αποτελέσματα του δεύτερου Benchmark για την περίπτωση μετακίνησης του πηνίου.

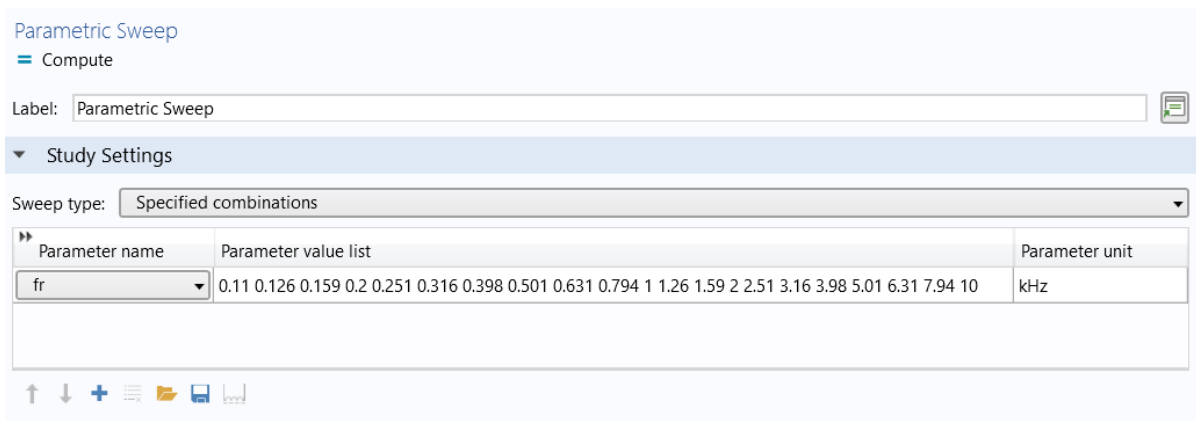
X_C [mm]	Πειραματικά αποτελέσματα		Θεωρητικά αποτελέσματα	
	ΔL [mH]	ΔR [Ω]	ΔL [mH]	ΔR [Ω]
0.0	1.91	-14.2	1.8954	-13.442
2.0	1.91	-14.3	1.9014	-13.524
4.0	1.93	-14.5	1.9204	-13.736
6.0	1.97	-14.9	1.9602	-14.172
8.0	2.05	-15.6	2.0280	-14.870
10.0	2.13	-16.5	2.1281	-15.811
12.0	2.25	-17.5	2.2561	-16.866
14.0	2.39	-18.5	2.3997	-17.906
16.0	2.54	-19.5	2.5388	-18.673
18.0	2.65	-19.7	2.6522	-19.016
20.0	2.72	-19.5	2.7205	-18.834
22.0	2.74	-18.9	2.7286	-18.081
24.0	2.66	-17.2	2.6682	-16.764
26.0	2.53	-15.3	2.5349	-14.938
28.0	2.34	-13.1	2.3321	-12.699
30.0	2.07	-10.6	2.0706	-10.199
32.0	1.79	-8.1	1.7683	-7.642
34.0	1.49	-5.8	1.4507	-5.264
36.0	1.20	-3.8	1.1450	-3.269
38.0	0.92	-2.1	0.8742	-1.772
40.0	0.66	-0.8	0.6503	-0.767
45.0	0.29	+0.3	0.2925	+0.264
50.0	0.12	+0.4	0.1258	+0.387
55.0	0.04	+0.3	0.0519	+0.300
60.0	0.01	+0.2	0.0199	+0.198
70.0	-0.01	+0.1	0.0116	+0.073
80.0	0.00	+0.0	-0.0118	+0.024

Πίνακας 5. Πειραματικά αποτελέσματα του δεύτερου Benchmark για την περίπτωση μεταβολής της συχνότητας ελέγχου.

f [kHz]	Πειραματικά αποτελέσματα		Θεωρητικά αποτελέσματα	
	ΔL [mH]	ΔR [Ω]	ΔL [mH]	ΔR [Ω]
0.110	0.04	-0.3	0.04453	-0.2874
0.126	0.06	-0.4	0.05799	-0.3756
0.159	0.09	-0.6	0.09081	-0.5922
0.200	0.13	-0.9	0.14004	-0.9235
0.251	0.20	-1.4	0.21420	-1.424
0.316	0.30	-2.2	0.32493	-2.187
0.398	0.46	-3.4	0.48576	-3.315
0.501	0.71	-5.1	0.71146	-4.927
0.631	1.01	-7.5	1.01793	-7.144
0.794	1.42	-10.5	1.41192	-10.00
1.000	1.91	-14.1	1.89313	-13.44
1.260	2.48	-18.3	2.43828	-17.12
1.590	3.08	-22.0	3.00399	-20.35
2.000	3.65	-24.2	3.51479	-22.10
2.510	4.08	-23.4	3.90924	-21.34
3.160	4.41	-19.4	4.14761	-17.18
3.980	4.51	-10.8	4.20842	-9.264
5.010	4.46	+2.2	4.11421	+1.987
6.310	4.27	+19.0	3.91192	+15.71
7.940	4.00	+38.1	3.65432	+30.67
10.000	3.72	+59.5	3.38314	+45.90

Για τη μοντελοποίηση του προβλήματος αυτού, τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα ίδια με αυτά που περιγράφηκαν κατά τη μοντελοποίηση του προηγούμενου προβλήματος. Σημείο διαφοροποίησης αποτελεί μόνο η χρήση της εντολής Parametric Sweep. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις του Benchmark θα μοντελοποιηθεί σε ξεχωριστό αρχείο. Για την περίπτωση μετακίνησης του πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x θα χρησιμοποιηθεί ξανά η εντολή Move και μέσω της εντολής Parametric Sweep ορίζουμε το διάνυσμα που περιέχει τις μετατοπίσεις του πηνίου ακριβώς όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη μοντελοποίηση.

Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου έχουμε μεταβολή της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, ενώ αυτό βρίσκεται ακίνητο επάνω από το μέσο της ασυνέχειας δεν θα κάνουμε χρήση της εντολής Move, παρά μόνο θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή Parametric Sweep, μέσω της οποίας θα καθορίσουμε τις διαδοχικές τιμές που θα λαμβάνει η παράμετρος f η οποία συμβολίζει τη συχνότητα ελέγχου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 37. Όλα τα υπόλοιπα βήματα της μοντελοποίησης παραμένουν ως γνωστών.

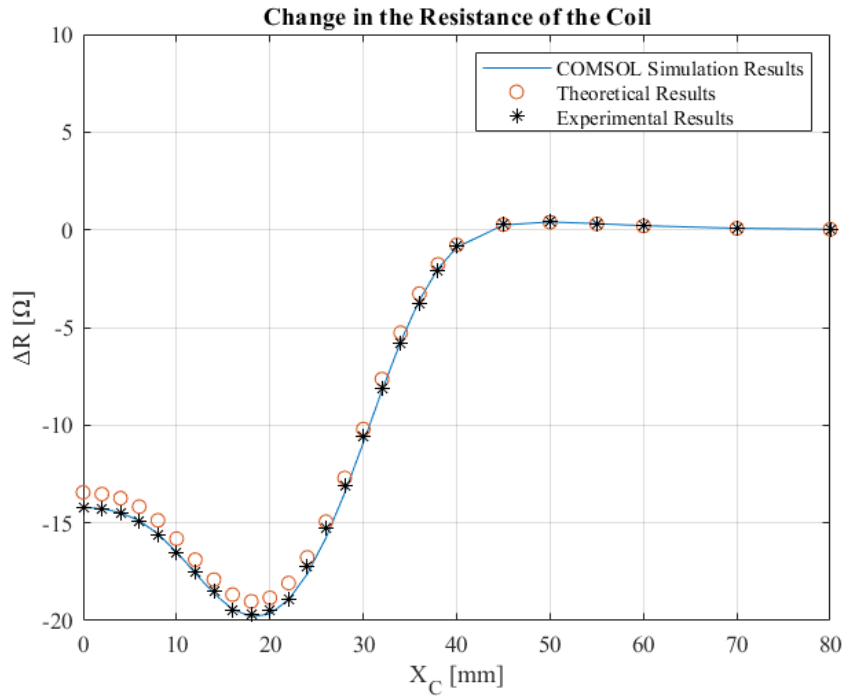


Εικόνα 37. Καθορισμός των διαδοχικών συχνοτήτων ελέγχου.

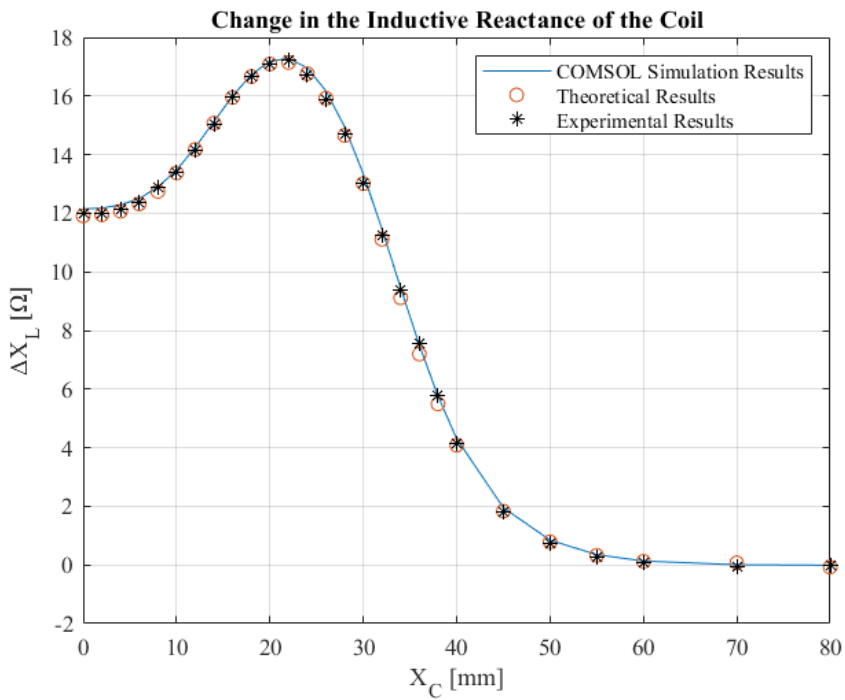
Έπειτα από το πέρας της επίλυσης του προβλήματος μετατόπισης του πηνίου εξάγεται σε έναν πίνακα η σύνθετη αντίσταση του πηνίου για κάθε θέση υπολογισμού στον άξονα x , τόσο για την περίπτωση ύπαρξης της ασυνέχειας όσο και για την περίπτωση μη ύπαρξης αυτής. Αντίστοιχα, και στην περίπτωση του προβλήματος μεταβολής της συχνότητας του πηνίου εξάγεται σε έναν πίνακα η σύνθετη αντίσταση του πηνίου για κάθε συχνότητα ελέγχου, τόσο για την περίπτωση ύπαρξης της ασυνέχειας όσο και για την περίπτωση μη ύπαρξης αυτής.

Άρα, για κάθε πρόβλημα ξεχωριστά, αφαιρώντας τα δυο πραγματικά μέλη μεταξύ τους, αλλά και τα δύο φανταστικά υπολογίζουμε τη μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου (ΔR) αλλά και της επαγωγικής του αντίδρασης (ΔX_L) που προκαλούνται λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.

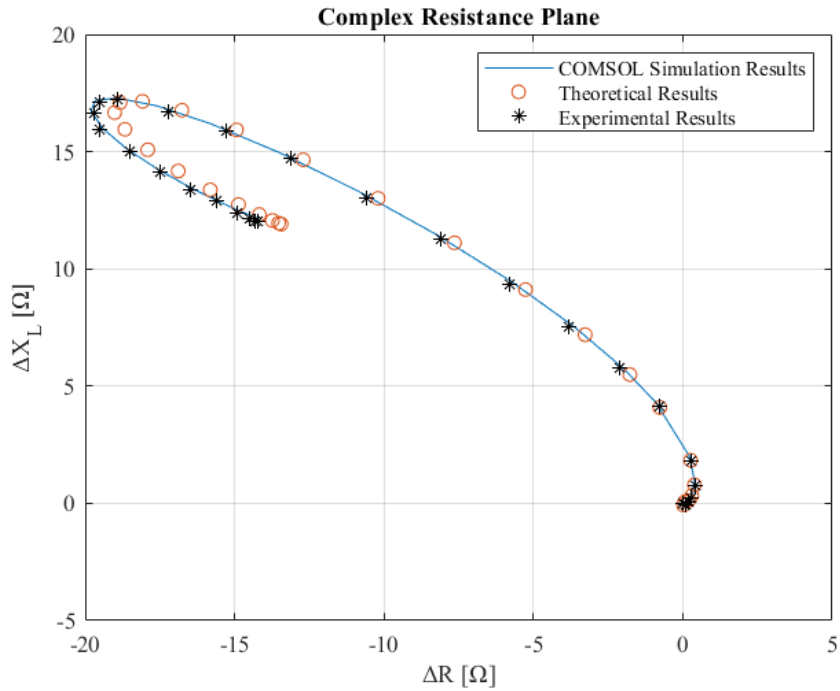
Στις Εικόνες 38, 39 και 40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μετακίνησης του πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x , σε αντιπαραβολή με τα πειραματικά αλλά και τα θεωρητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.



Εικόνα 38. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου, συναρτήσει της θέσης αυτού, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.

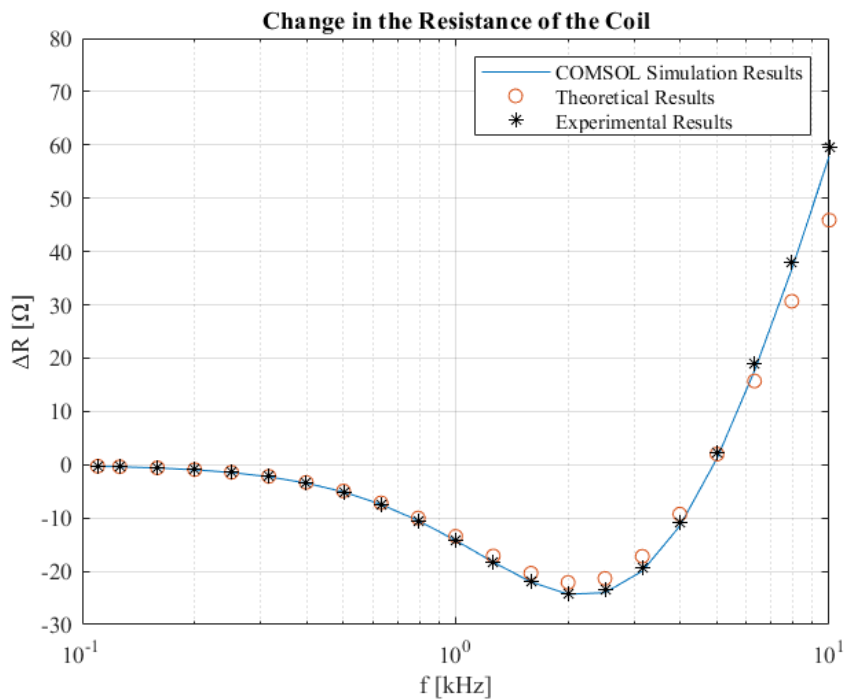


Εικόνα 39. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου, συναρτήσει της θέσης αυτού, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.

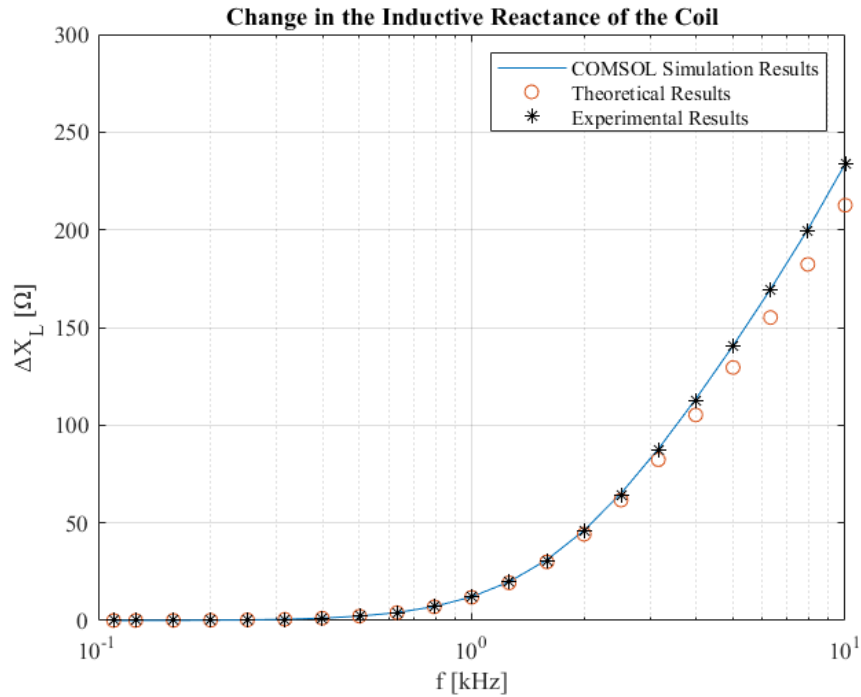


Εικόνα 40. Απεικόνιση αποτελεσμάτων στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης.

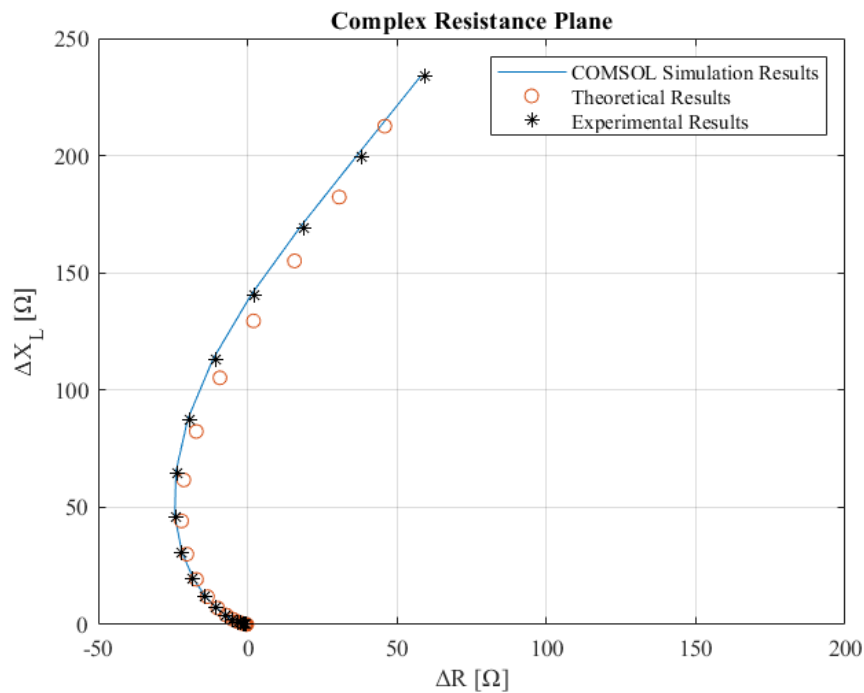
Αντιστοίχως, στις Εικόνες 41, 42 και 43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μεταβολής της συχνότητας του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, σε αντιπαράβολή με τα πειραματικά αλλά και θεωρητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5.



Εικόνα 41. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου, συναρτήσει της Συχνότητας ελέγχου, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.



Εικόνα 42. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου, συναρτήσει της Συχνότητας ελέγχου, λόγω της ύπαρξης της ασυνέχειας.



Εικόνα 43. Απεικόνιση αποτελεσμάτων στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των δυο προβλημάτων του δεύτερου Benchmark, είναι άμεσα εμφανές πως τόσο η προσομοίωση που πραγματοποιήσαμε μέσω του COMSOL Multiphysics, όσο και τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου συμπίπτουν σε πολύ καλό βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα, κάτι το οποίο μας υποδεικνύει πως και οι δυο μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων σχετικά με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την πραγματική διενέργεια ενός μη-καταστροφικού ελέγχου με τη μέθοδο των δινορρευμάτων.

Παρόλα αυτά, με μία αρχική ματιά είναι εμφανές πως τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης βρίσκονται σε ορισμένες περιοχές σημαντικά πιο κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με τα θεωρητικά. Αξίζει λοιπόν να εξετάσουμε πιο αναλυτικά την σύγκλιση των δυο μοντέλων (θεωρητικού και αριθμητικού) σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό θα υπολογιστεί και θα συγκριθεί το απόλυτο σφάλμα των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα αλλά και το απόλυτο σφάλμα των θεωρητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Τα δύο αυτά σφάλματα για τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$(E_{Numerical})_{\Delta R} = |\Delta R_{Numerical} - \Delta R_{Experimental}| \quad (11)$$

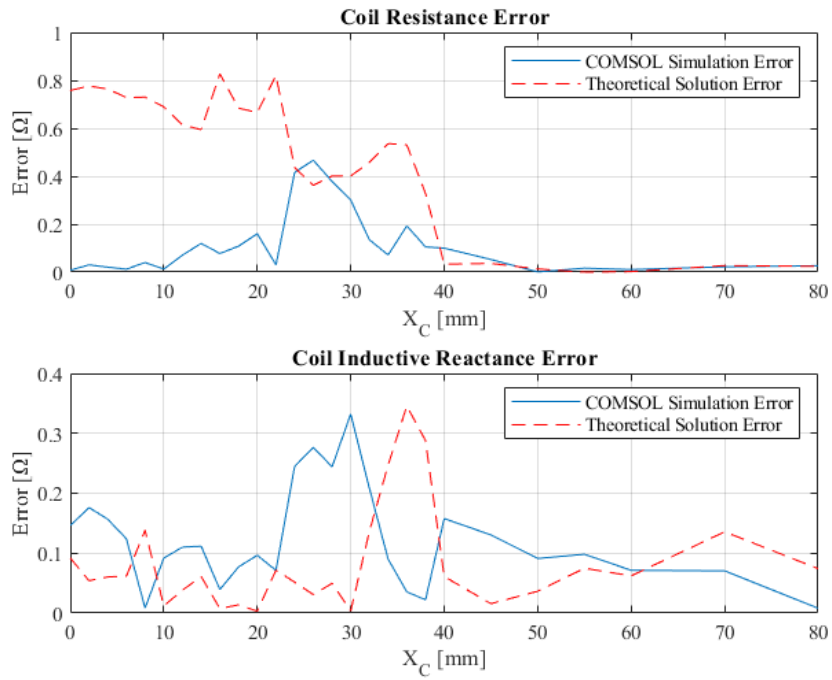
$$(E_{Theoretical})_{\Delta R} = |\Delta R_{Theoretical} - \Delta R_{Experimental}| \quad (12)$$

Ενώ για τη μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου δίνονται από τις σχέσεις:

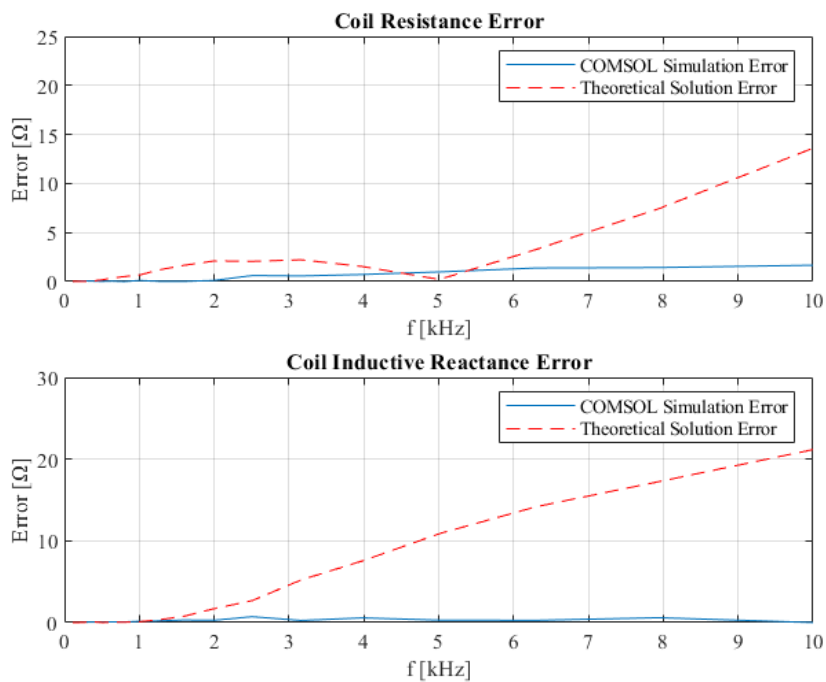
$$(E_{Numerical})_{\Delta X_L} = |\Delta X_{L,Numerical} - \Delta X_{L,Experimental}| \quad (13)$$

$$(E_{Theoretical})_{\Delta X_L} = |\Delta X_{L,Theoretical} - \Delta X_{L,Experimental}| \quad (14)$$

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των σφαλμάτων για την περίπτωση κίνησης του πηνίου κατά τη διεύθυνση του άξονα x παρουσιάζονται στην Εικόνα 44. Ενώ για την περίπτωση της μεταβολής της συχνότητας του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, τα αποτελέσματα της σύγκρισης των σφαλμάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 44. Απόκλιση των αριθμητικών και των θεωρητικών λύσεων από τα πειραματικά δεδομένα για την περίπτωση μετακίνησης του πηνίου.



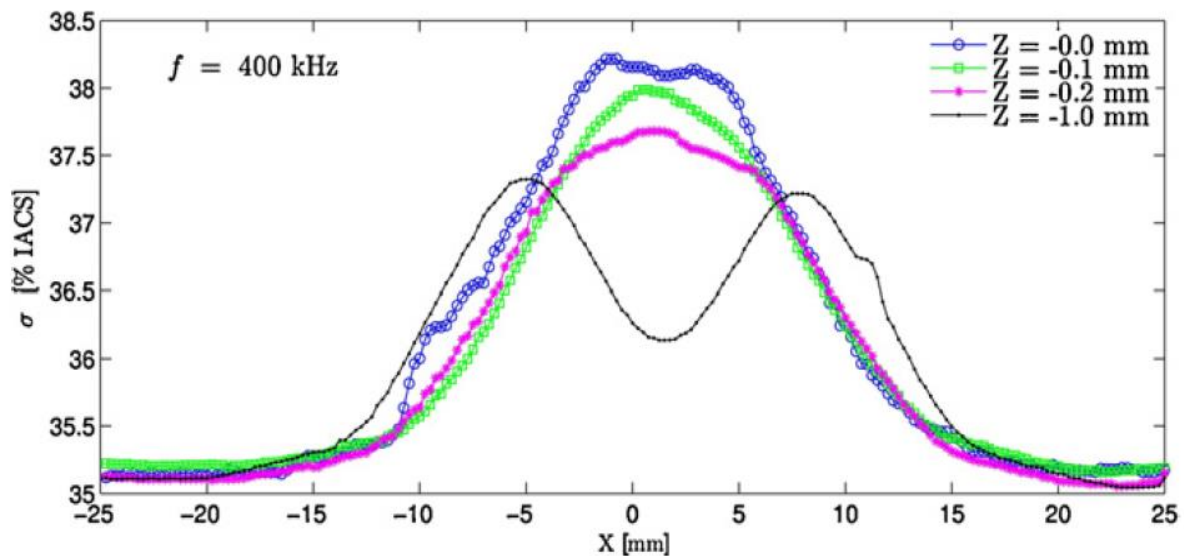
Εικόνα 45. Απόκλιση των αριθμητικών και των θεωρητικών λύσεων από τα πειραματικά δεδομένα για την περίπτωση μεταβολής της συχνότητας ελέγχου.

Από τα διαγράμματα της Εικόνας 45 είναι άμεσα εμφανές πως η αύξηση της συχνότητας οδηγεί γρήγορα σε αύξηση του σφάλματος των θεωρητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα, αντιθέτως τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης παραμένουν πρακτικά ανεπηρέαστα, με το σφάλμα τους σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα να είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο από αυτό των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Η απόκλιση αυτή των θεωρητικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά αποτελέσματα οφείλεται στο γεγονός πως τα θεωρητικά αποτελέσματα του benchmark αυτού αποτελούν προϊόν του Generalized Current Vortex Formalism, το οποίο αποτελεί ένα μοντέλο το οποίο δημιουργήθηκε για προσομοιώσεις χαμηλών συχνοτήτων, στο οποίο γίνεται η σύμβαση πως το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων στο υλικό δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας ελέγχου. Έτσι η αύξηση της συχνότητας ελέγχου οδηγεί σε όλο και αυξανόμενη απόκλιση των θεωρητικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά δεδομένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΕΠΙ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Έχοντας επικυρώσει τη δυνατότητα του λογισμικού COMSOL Multiphysics να παράσχει ακριβή αποτελέσματα σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις σε αγωγή μέσα σταθερής αγωγιμότητας, μπορούμε να προβούμε στο επόμενο βήμα, το οποίο είναι η προσομοίωση του μη καταστροφικού ελέγχου μέσω δινορρευμάτων σε αγωγίμο μέσο, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του οποίου δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται. Στην περίπτωση μας, το μέσο αυτό θα είναι η περιοχή της ζώνης συγκόλλησης σε μια συγκόλληση διατριβής με ανάδευση αλουμινίου AA6013-T4. Στην Εικόνα 46 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε % IACS που αντιστοιχούν σε βάθη 0, 0.1, 0.2 και 1.0 mm κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου, από την πλευρά της ρίζας της συγκόλλησης.



Εικόνα 46. Προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκολληθέντα δοκίμια αλουμινίου AA6013-T4 [4].

Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων που θα ακολουθήσουν θα θεωρηθεί πως το προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δοκιμίου θα είναι αυτό που συμβολίζεται με μπλε χρώμα στην παραπάνω εικόνα, το οποίο αντιστοιχεί σε βάθος 0 mm. Η επιλογή αυτή γίνεται καθώς από τις διαθέσιμες μετρήσεις αγωγιμότητας, αυτή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση από την αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης.

Στις αρχικές προσομοιώσεις θα θεωρηθεί πως δεν υπάρχει κάποια ασυνέχεια στο υπο έλεγχο δοκίμιο, ενώ στις υπόλοιπες θα θεωρηθεί πως στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης βρίσκεται μια ορθογωνική ασυνέχεια που προσομοιάζει μια διαμήκη επιφανειακή ρωγμή. Για την ασυνέχεια αυτή

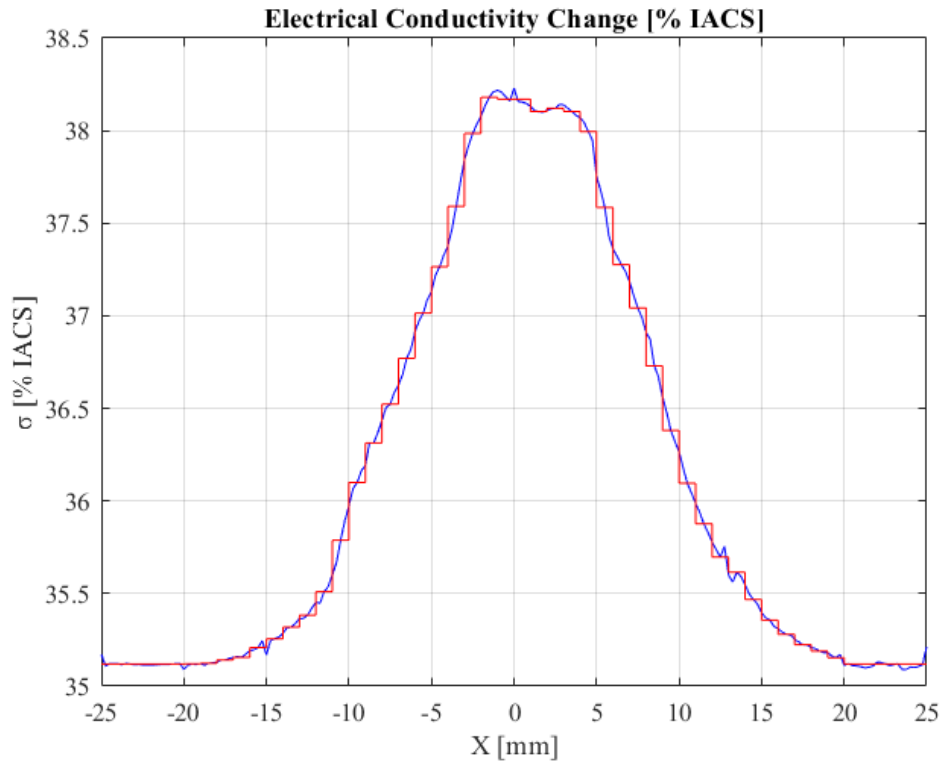
θα προσομοιωθούν διαφορετικές περιπτώσεις αναφορικά με το βάθος στο οποίο αυτή φτάνει. Θα προσομοιωθεί επίσης η περίπτωση ύπαρξης υποεπιφανειακής ασυνέχειας. Τέλος, όλα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις προσομοιώσεις που αφορούν τη ζώνη συγκόλλησης θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από προσομοιώσεις που αφορούν τις ίδιες παραμέτρους (πηνίο, συχνότητα ελέγχου, διαστάσεις ανέχειας) στο μέταλλο βάσης προκειμένου να εξεταστεί το πως και σε ποιο βαθμό, η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης επηρεάζει τις ενδείξεις του ελέγχου.

4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΕΣΟΥ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη μοντελοποίηση ενός μέσου μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας στο COMSOL Multiphysics είναι εν πολλοίς τα ίδια με αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2. Μοναδικό σημείο διαφοροποίησης της διαδικασίας μοντελοποίησης αποτελεί η ανάγκη μοντελοποίησης των μεταβολών της αγωγιμότητας στο υπό έλεγχο αγωγίμο μέσο.

Η μοντελοποίηση της μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης θα πραγματοποιηθεί χωρίζοντας το υλικό σε νοητά στρώματα πάχους 1 mm, τα οποία θα είναι παράλληλα με το διαμήκη άξονα της συγκόλλησης, και τα οποία θα έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με τη μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του προφίλ που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 46, στο φάσμα του 1 mm αυτού. Επιπλέον, σε περιοχές όπου η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν είναι τόσο αισθητή, όπως σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 20 mm από το κέντρο της ζώνης συγκόλλησης, στρώματα μεγαλύτερα του 1 mm μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οδηγώντας έτσι σε σημαντικά οικονομικότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, με μηδενικές πρακτικά απώλειες σε ακρίβεια. Επιπλέον, στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης αντί δυο στρωμάτων του 1 mm, ένα στρώμα των 2 mm μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το οποίο θα έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με τη μέση τιμή αυτής των δυο στρωμάτων του 1 mm που αντιστοιχούν στη θέση του.

Έτσι, το προφίλ αγωγιμότητας της Εικόνας 46 που αντιστοιχεί σε βάθος 0 mm, μπορεί να προσεγγιστεί από το βηματικό προφίλ που παρουσιάζεται στην εικόνα 47.

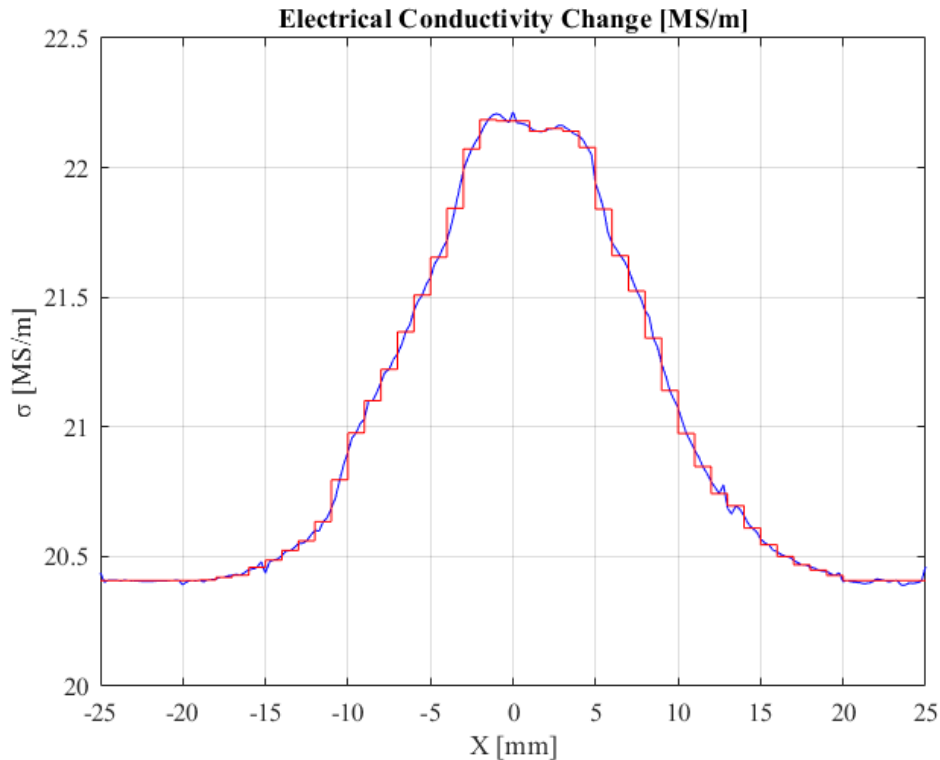


Εικόνα 47. Προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης σε %IACS (μπλε καμπύλη) και προσεγγιστικό βηματικό προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας (με κόκκινο).

Για χρήση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας από το COMSOL Multiphysics, θα πρέπει αυτή να μετατραπεί από [% IACS] σε [MS/m]. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης σχέσης.

$$\sigma_{[\text{MS/m}]} = \frac{58}{100} \sigma_{[\% \text{ IACS}]} \quad (15)$$

Έτσι, το προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάστηκε σε [% IACS] στην Εικόνα 47, Μετατρέπεται στο προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 48 σε [MS/m].



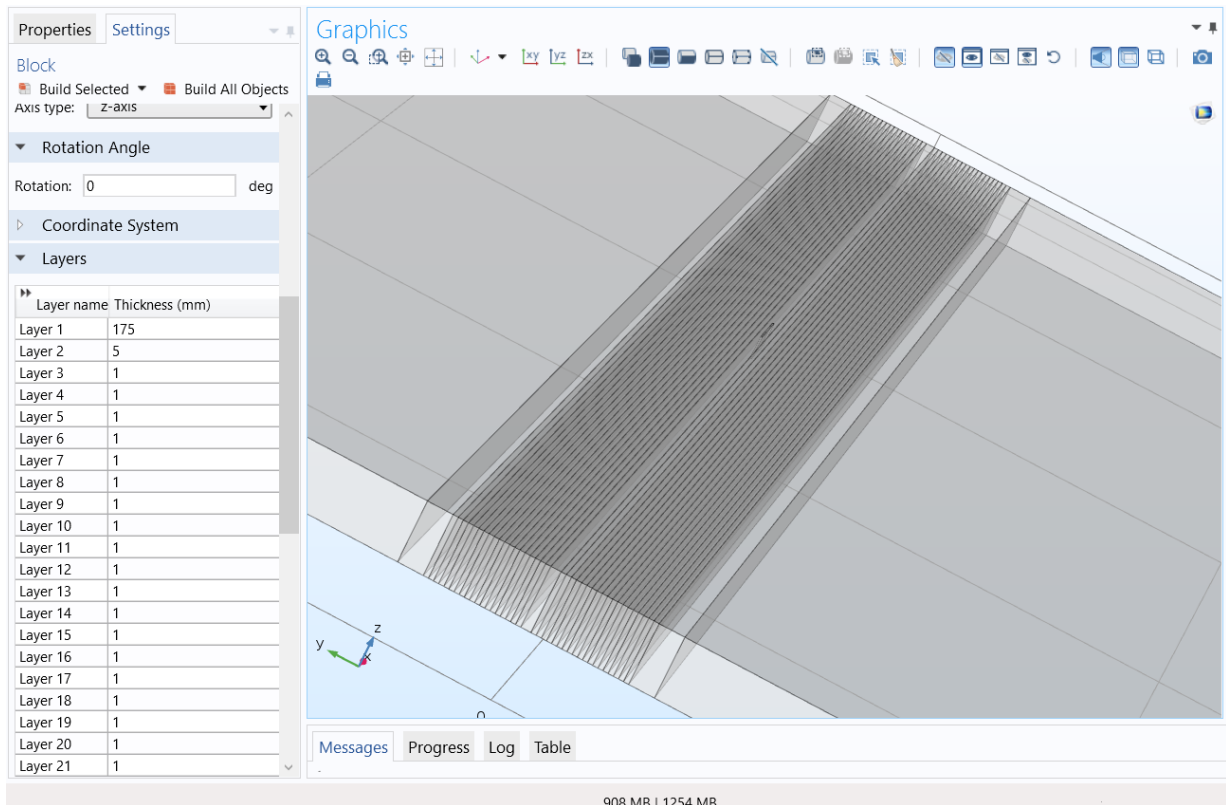
Εικόνα 48. Προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης σε MS/m (μπλε καμπύλη) και προσεγγιστικό βηματικό προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας (με κόκκινο).

Το επόμενο βήμα, είναι η δημιουργία των διακριτών στρωμάτων αυτών στο COMSOL Multiphysics. Το συγκεκριμένο βλήμα λαμβάνει χώρα αμέσως μετά τη δημιουργία του Domain που αντιστοιχεί στο προς έλεγχο μέσο. Μετά τη δημιουργία του Domain αυτού μεταβαίνουμε στην καρτέλα Settings του Domain, και στην επιλογή Layers, δημιουργούμε όλα τα διακριτά στρώματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 49.

Στη συνέχεια, δημιουργούμε μια σειρά υλικών, μέσω της εντολής Blank Materials, τα υλικά αυτά θα έχουν το κάθε ένα την ηλεκτρική αγωγιμότητα που αντιστοιχεί στο εκάστοτε Domain που οριοθετείται από τα Layers που δημιουργήσαμε, κατ αντιστοιχία με την εικόνα 48. Έτσι, ακολουθώντας ξανά τα εναπομείναντα βήματα μοντελοποίησης που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, οδηγούμαστε στη δημιουργία του τελικού μοντέλου.

Μιας και στα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες γίνεται όπως προαναφέρθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προσομοίωση του ελέγχου στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης περιοχής της ζώνης συγκόλλησης με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ελέγχου του μέταλλου βάσης, είναι σημαντικό να εξαιρεθεί η συνεισφορά τυχόν διαφορών του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στη δημιουργία αποκλίσεων των δυο αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, και στην περίπτωση της προσομοίωσης του ελέγχου στο μέταλλο βάσης θα χρησιμοποιηθεί το χωρισμένο σε Layers μοντέλο, με μόνη διαφορά πως στην περίπτωση

αυτή όλα τα Layers θα έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με αυτή του μετάλλου βάσης. Έτσι, τα αποτελέσματα και των δυο προσομοιώσεων θα προέρχονται από το ίδιο ακριβώς πλέγμα στοιχείων και τυχόν μεταξύ τους διαφορές θα οφείλονται εξ ολοκλήρου στις μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης.



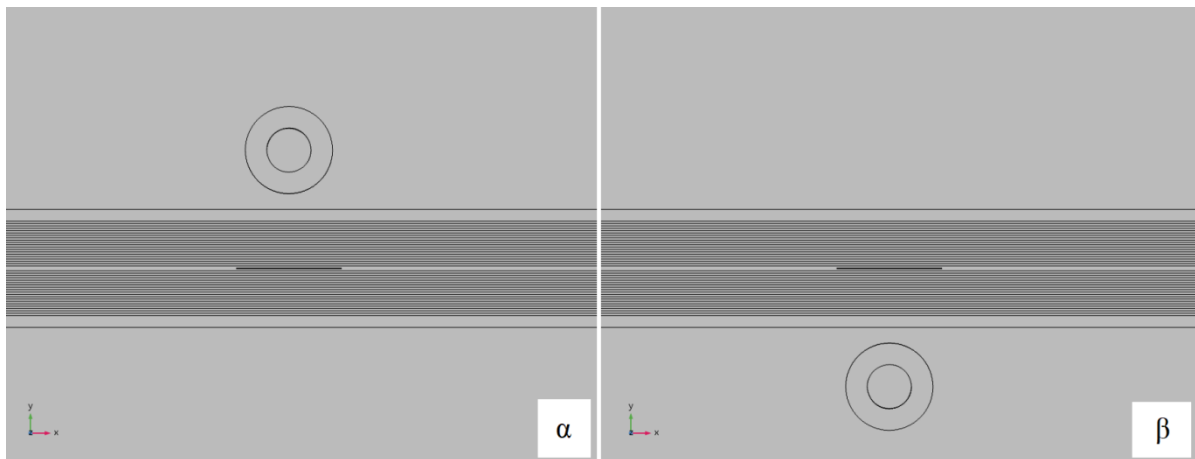
Εικόνα 49. Διακριτά στρώματα (Layers) ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης.

Άρα, έχοντας πλέον δημιουργήσει το τελικό μοντέλο, είναι πλέον δυνατό να προχωρήσουμε στην προσομοίωση πληθώρας σεναρίων, ορισμένα από αυτά παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.

4.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Προτού προχωρήσουμε στην πραγματοποίηση προσομοιώσεων οι οποίες να περιέχουν κάποια ασυνέχεια στο ελεγχόμενο δοκίμιο, θα πρέπει πρώτα να προσομοιώσουμε την περίπτωση όπου δεν θα υφίσταται κάποια ασυνέχεια στο ελεγχόμενο δοκίμιο. Σκοπός της προσομοίωσης αυτής είναι το να διαπιστώσουμε το εάν και κατά πόσο, η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας επηρεάζει από μόνη της τις ενδείξεις της ωμικής αντίστασης αλλά και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου/αισθητήρα, όταν αυτός έχει βαθμονομηθεί μέσω προτύπου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του οποίου είναι ίση με αυτή του μετάλλου βάσης.

Επομένως, το πρώτο πρόβλημα που θα προσομοιωθεί αφορά την μετακίνηση του πηνίου κάθετα, προς την κατεύθυνση κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση, με την κίνηση του πηνίου να ξεκινά από απόσταση -50 mm από το μέσο της ζώνης συγκόλλησης και τερματίζει σε απόσταση 50 mm από αυτό, σε σημείο όπου το πηνίο βρίσκεται πλήρως επάνω από το μέταλλο βάσης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 50. Είναι επίσης αναμενόμενο πως και η συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο θα έχει κάποια επίδραση επί των ενδείξεων του, επομένως, η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για έναν αριθμό συχνοτήτων ελέγχου. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι του μοντέλου που θα προσομοιωθεί.



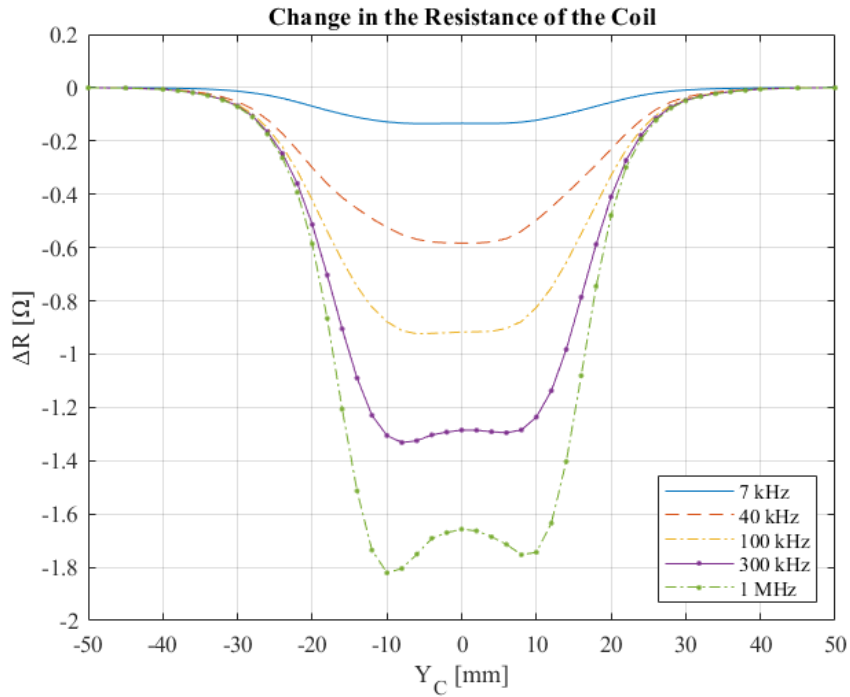
Εικόνα 50. (α) Αρχική θέση πηνίου ($Y_C = 50$ mm), (β) Τελική θέση πηνίου ($Y_C = -50$ mm).

Πίνακας 6. Βασικές παράμετροι προβλήματος.

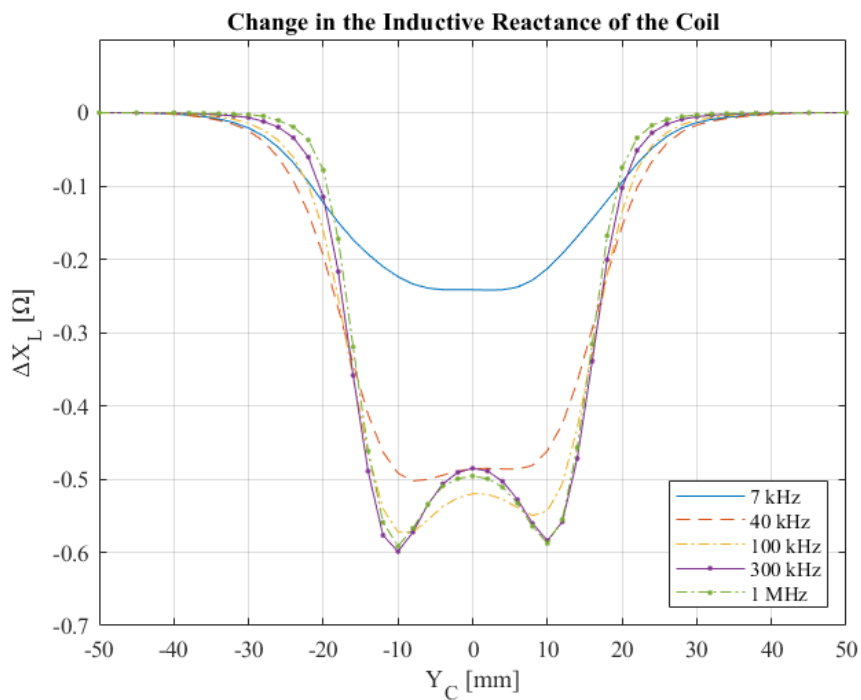
Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος	18.04 mm
Μήκος	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου	408
Ανύψωση (Lift-off)	1 mm
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα μετάλλου βάσης	20.358 MS/m
Πάχος	12.22 mm

Τα τελικά αποτελέσματα που αφορούν τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου λόγω της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δοκιμίου στη ζώνη συγκόλλησης παρουσιάζονται στις Εικόνες 51 και 52.

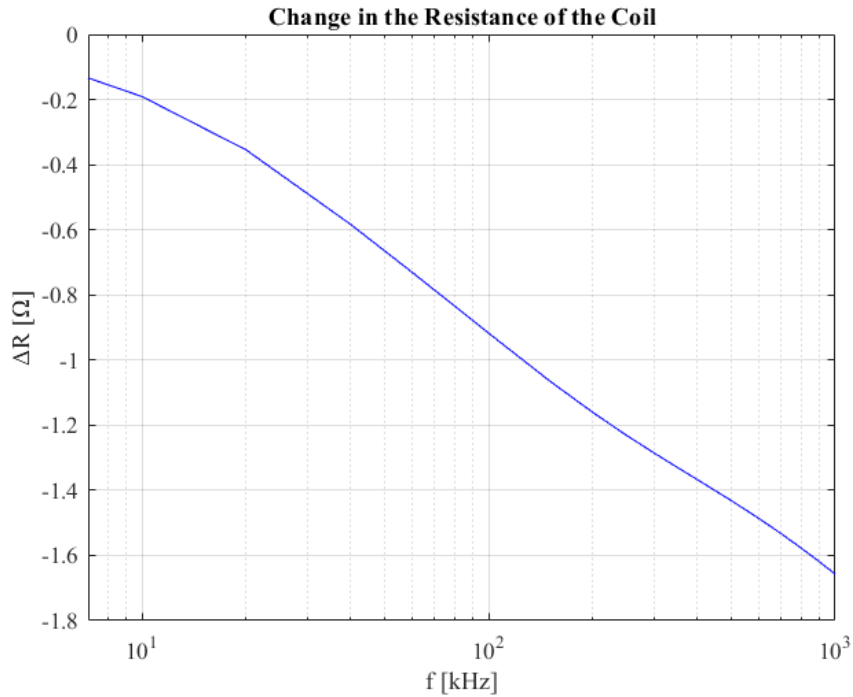
Αντίστοιχα, τα διαγράμματα των Εικόνων 53 και 54, απεικονίζουν τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου/αισθητήρα, όταν αυτό βρίσκεται ακίνητο επάνω από το μέσο της ζώνης συγκόλλησης δίχως την ύπαρξη ασυνέχειας, σε σχέση με τις ενδείξεις του, επάνω από το μέταλλο βάσης, για διαδοχικές τιμές της συχνότητας ελέγχου.



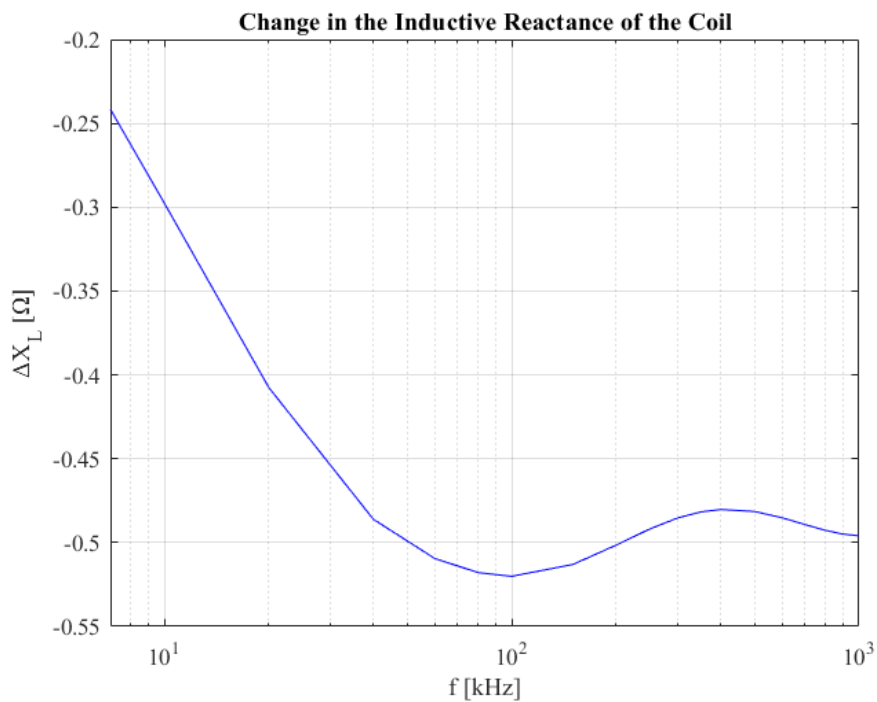
Εικόνα 51. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου συναρτήσει της απόστασης του από τη ζώνη συγκόλλησης για κάθε συχνότητα ελέγχου.



Εικόνα 52. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της απόστασης του από τη ζώνη συγκόλλησης για κάθε συχνότητα ελέγχου.



Εικόνα 53. Μεταβολή της διαφοράς της ωμικής αντίστασης του πηνίου στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου.



Εικόνα 54. Μεταβολή της διαφοράς της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των Εικόνων 51 και 52, είναι εμφανής μια ελαφρά ασυμμετρία των ενδείξεων του αισθητήρα, η οποία οφείλεται στο γεγονός πως το προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στη ζώνη συγκόλλησης δεν είναι πλήρως συμμετρικό, με μικρές διαφορές να παρατηρούνται μεταξύ της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς της ζώνης συγκόλλησης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 51, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου συναρτήσει της θέσης του, είναι άμεσα εμφανές πως η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση της ωμικής αντίστασης του πηνίου. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, μιας και ως φυσικά μεγέθη, η ωμική αντίσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχουν μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογη σχέση.

Παρατηρώντας παράλληλα και το διάγραμμα της Εικόνας 53, είναι επίσης εμφανής η εξάρτηση της μεταβολής της ωμικής αντίστασης από τη συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πως για συχνότητα μέτρου 7 kHz η μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης είναι μόλις -0.13 Ω, και μειώνεται με αύξηση της συχνότητας μέχρι την τιμή των -1.66 Ω για συχνότητα ελέγχου ίση με 1 MHz.

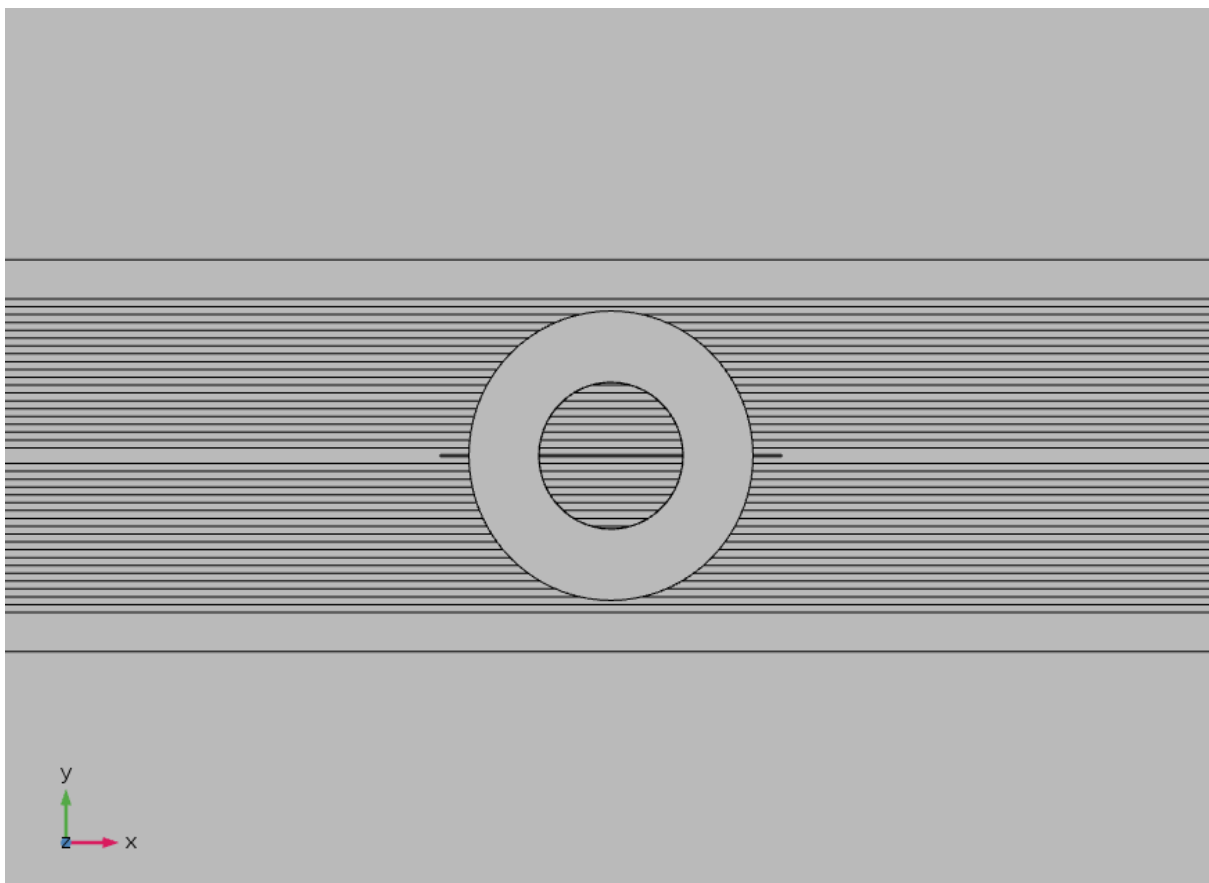
Παρατηρώντας αντίστοιχα το διάγραμμα της Εικόνας 52, το οποίο απεικονίζει τη μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της θέσης του, βλέπουμε πως η αύξηση της αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου σε σχέση με το μέταλλο βάσης. Επιπλέον, παρατηρώντας επίσης το διάγραμμα της Εικόνας 54, είναι εμφανές πως με αύξηση της συχνότητας ελέγχου, η μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου στο μέσο της ασυνέχειας φτάνει γρήγορα σε τιμές περίξ των -0.5 Ω.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης επηρεάζει κατά μέτρο την ωμική αντίσταση του πηνίου περισσότερο από την επαγωγική του αντίδραση. Εγείρεται έτσι το ερώτημα του κατά πόσο οι μεταβολές των ενδείξεων του πηνίου/αισθητήρα που αναγνωρίστηκαν στην ενότητα αυτή και που οφείλονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης μπορούν να επηρεάσουν την ανιχνευσιμότητα ασυνεχειών οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή αυτή λόγω πιθανής διαστρέβλωσης των ενδείξεων του ελέγχου.

Επομένως, έχοντας πλέον προσδιορίσει το βαθμό στον οποίο η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης επηρεάζει τις ενδείξεις του ελέγχου, μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση προβλημάτων τα οποία περιέχουν ασυνέχειες προκειμένου να διαπιστώσουμε το κατά πόσο η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας θα επηρεάσει τις ενδείξεις του ελέγχου στη ζώνη συγκόλλησης. Θα εξεταστεί επίσης το κατά πόσο η βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης και όχι αυτή του μετάλλου βάσης μπορεί να αποτελέσει μια μέθοδο βελτίωσης της ακρίβειας των ενδείξεων στη ζώνη συγκόλλησης.

4.3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Το δεύτερο είδος προβλήματος που θα προσομοιώσουμε αφορά την ύπαρξη μιας μεγάλης σε μήκος επιφανειακής ασυνέχειας στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης. Θα προσομοιωθεί τόσο η περίπτωση που το πηνίο θα βρίσκεται ακίνητο πάνω από το μέσο της ασυνέχειας και η συχνότητα του θα μεταβάλλεται διαδοχικά, λαμβάνοντας τιμές από 7 kHz έως 1 MHz όσο και η περίπτωση όπου το πηνίο μετακινείται κατά μήκος της ασυνέχειας (κατά μήκος δηλαδή του άξονα x), διαρρεόμενο από ρεύμα συχνότητας 300 kHz. Θα προσομοιωθούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις του προβλήματος, με μοναδική διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων να είναι το βάθος στο οποίο φτάνει η ασυνέχεια εντός του αγωγίμου μέσου. Το πρόβλημα απεικονίζεται ενδεικτικά στην Εικόνα 55.

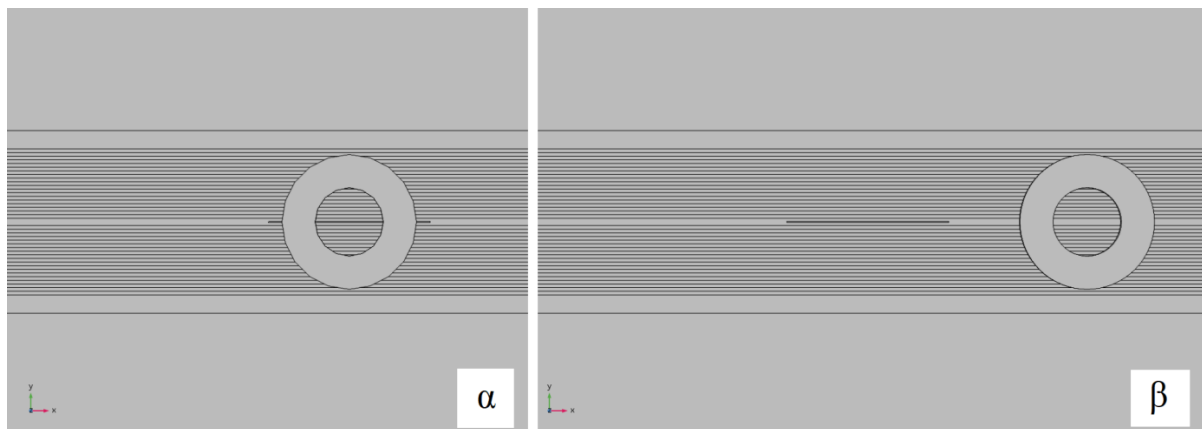


Εικόνα 55. Πηνίο επάνω από την ασυνέχεια στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης.

Οι παράμετροι που αφορούν το πηνίο, την ασυνέχεια αλλά και το αγωγίμο μέσο παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7, Ενώ μια σχηματική αναπαράσταση του πηνίου/αισθητήρα στην αρχική και την τελική του θέση απεικονίζεται στην Εικόνα 56.

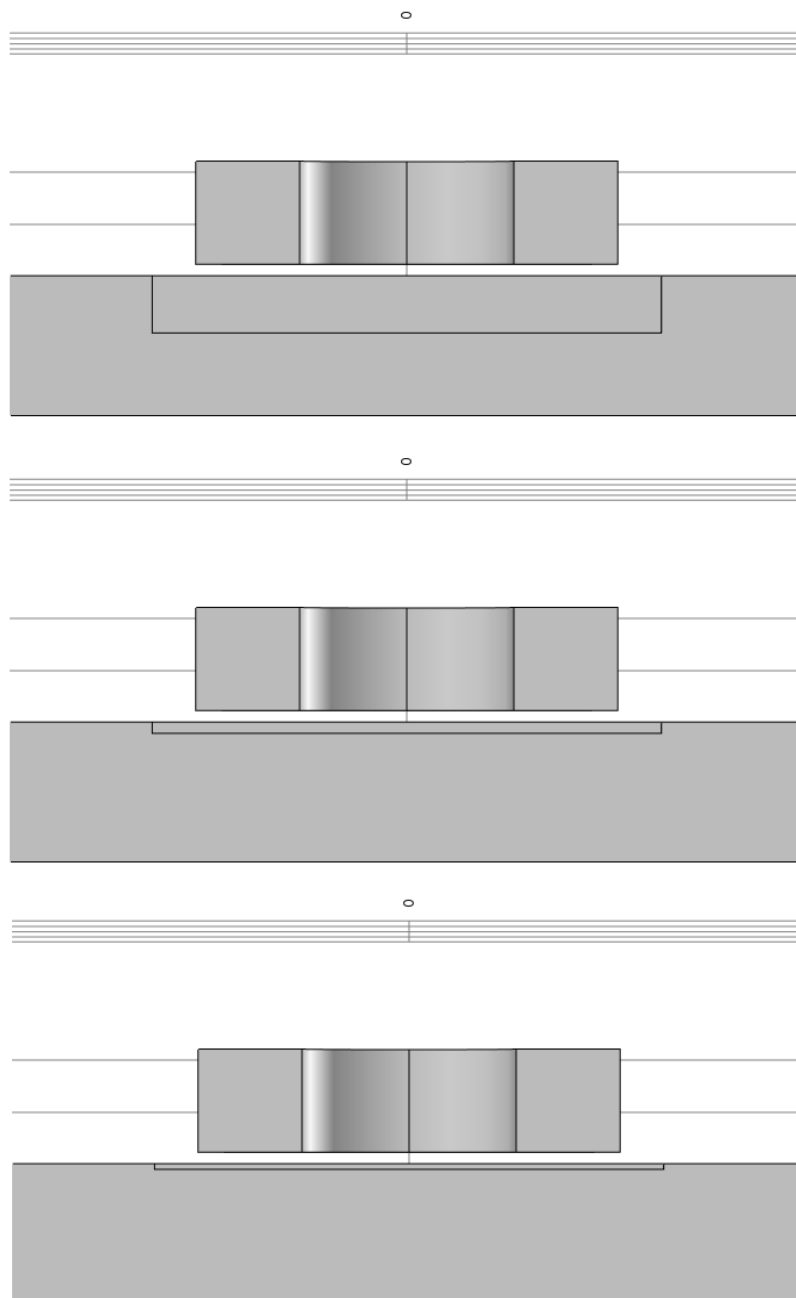
Πίνακας 7. Βασικές παράμετροι προβλήματος.

Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος	18.04 mm
Μήκος	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου	408
Ανύψωση (Lift-off)	1 mm
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα μετάλλου βάσης	20.358 MS/m
Πάχος	12.22 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος	44.40 mm
Βάθος	5, 1, 0.5 mm (Διαδοχικές τιμές)
Πλάτος	0.28 mm



Εικόνα 56. Μετακίνηση του πηνίου επάνω από την ασυνέχεια στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης.
(α) Αρχική θέση, (β) Τελική θέση.

Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, θα παρουσιαστεί η μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου στην περίπτωση αλληλεπίδρασης με την ασυνέχεια όταν αυτή βρίσκεται στο μέταλλο βάσης, το οποίο και έχει σταθερή ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με 20.358 MS/m. Επιπλέον, θα παρουσιαστεί η μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου για την περίπτωση όπου το πηνίο/αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, αλλά και για την περίπτωση όπου έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης. Σκοπός αυτού είναι διερευνηθεί το κατά πόσο η βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ενδείξεων συγκρίσιμων με αυτές που παράγονται κατά την ανίχνευση ασυνεχειών στο μέταλλο βάσης. Στην Εικόνα 57 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα τρία είδη ασυνέχειας για τα οποία θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις.



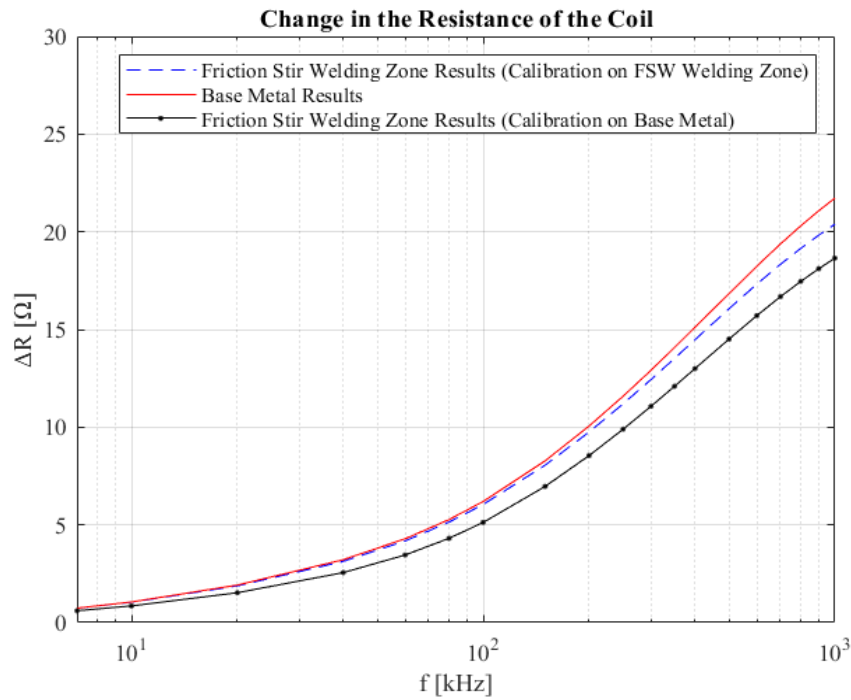
Εικόνα 57. Επιφανειακές ασυνέχειες με βάθος 5 mm, 1 mm και 0.5 mm αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών, για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ασυνεχειών παρουσιάζονται στις ακόλουθες σελίδες.

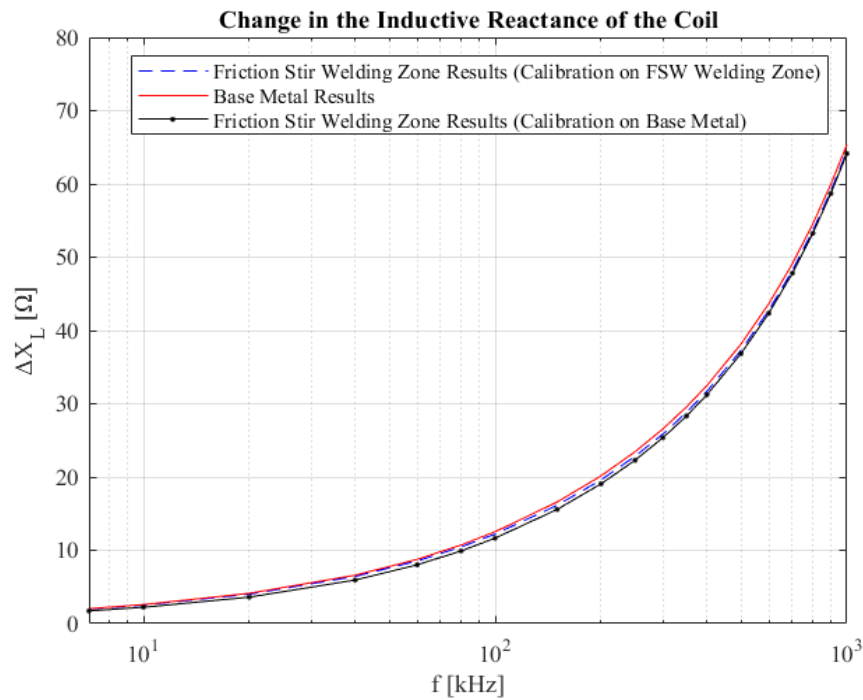
4.3.1. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 5 mm

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούν την ύπαρξη επιφανειακής ασυνέχειας, η οποία φτάνει σε βάθος 5 mm εντός του αγωγίμου δοκιμίου. Στα διαγράμματα των Εικόνων 58, 59 και 60 παρουσιάζονται η μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου

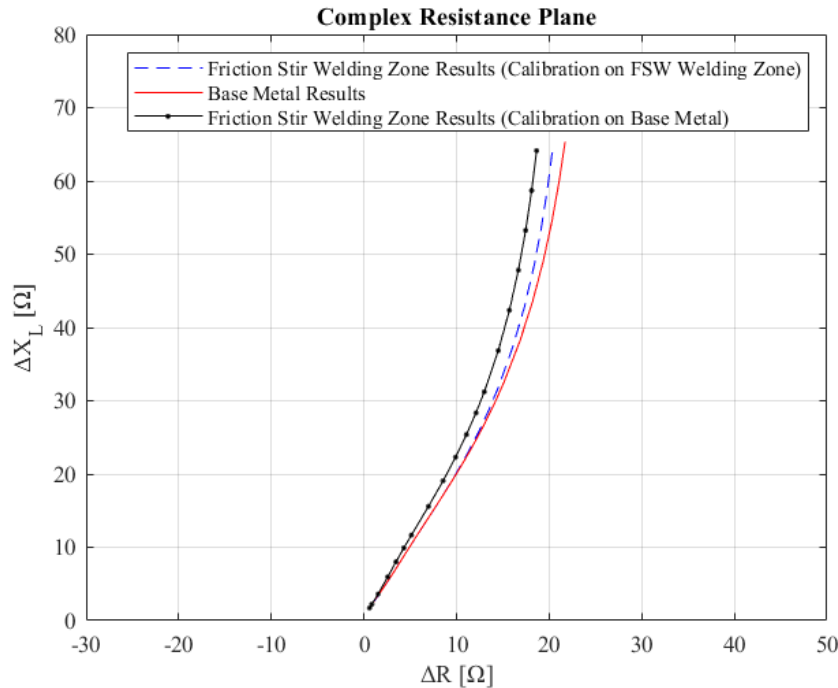
συναρτήσει της μεταβολής της συχνότητας ελέγχου, του ακίνητου επάνω από το μέσο της ασυνέχειας πηνίου για την περίπτωση ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 58. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 59. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.

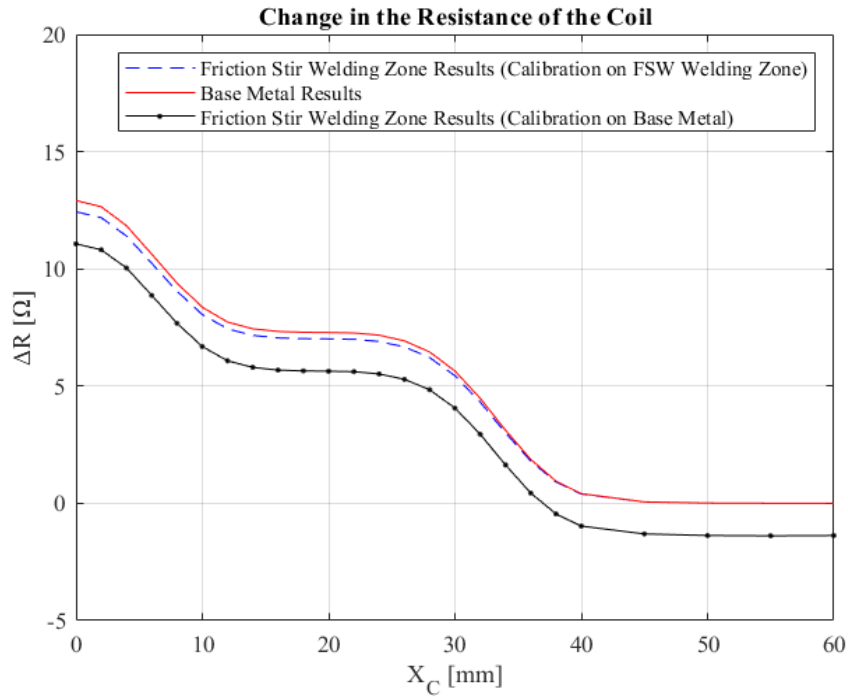


Εικόνα 60. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 5 mm για μεταβολή της συχνότητας ελέγχου στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

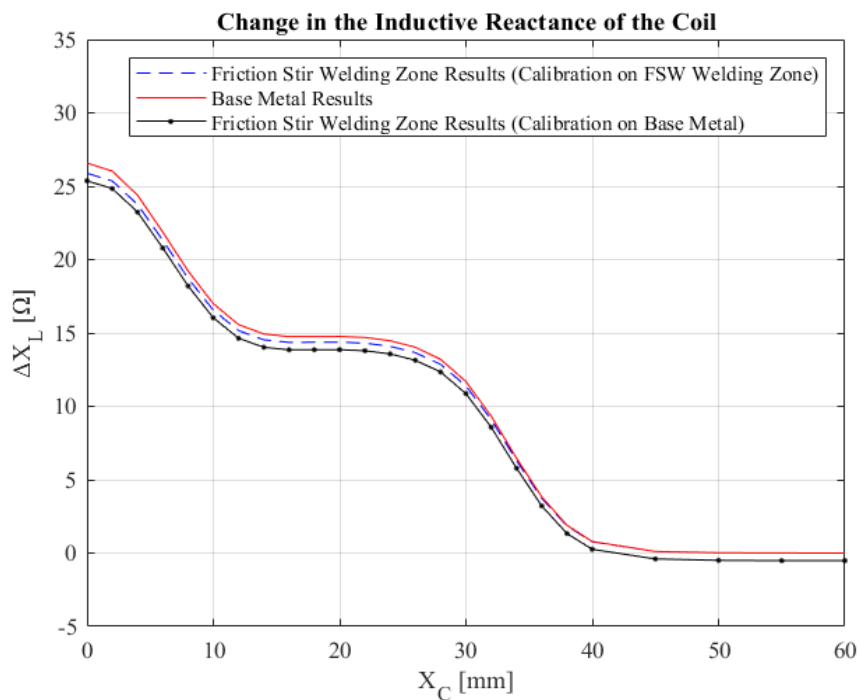
Παρατηρώντας τα τρία αυτά διαγράμματα, είναι εμφανές πως η επιρροή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας επί της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου είναι πρακτικά μηδενική, με τις τρεις καμπύλες της Εικόνας 59 σχεδόν να ταυτίζονται. Αντιθέτως, η επιρροή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι πολύ πιο αισθητή στη μεταβολή της ωμικής αντίδρασης του πηνίου όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 58. Από το διάγραμμα της Εικόνας 58 είναι εμφανές πως η καμπύλη η οποία αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης βρίσκεται πιο κοντά στην καμπύλη του αντιστοιχεί την ανίχνευση ασυνέχειας στο μέταλλο βάσης σε σχέση με την μαύρη καμπύλη, η οποία και αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης.

Μια πιο προσεκτική ματιά στην Εικόνα 58, αποκαλύπτει επίσης πως η διαφορά μεταξύ της καμπύλης που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης και της καμπύλης που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της του μετάλλου βάσης, είναι ακριβώς ίση με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου λόγω της μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.

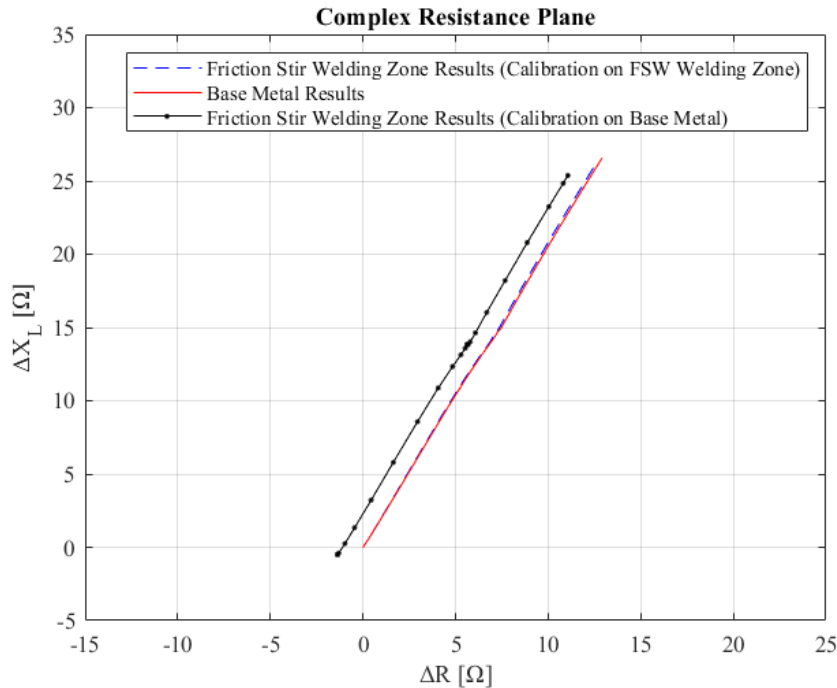
Εν συνεχεία, στις Εικόνες 61, 62 και 63 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετακίνηση του πηνίου κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης καθώς αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 300 kHz για την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 61. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 62. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.



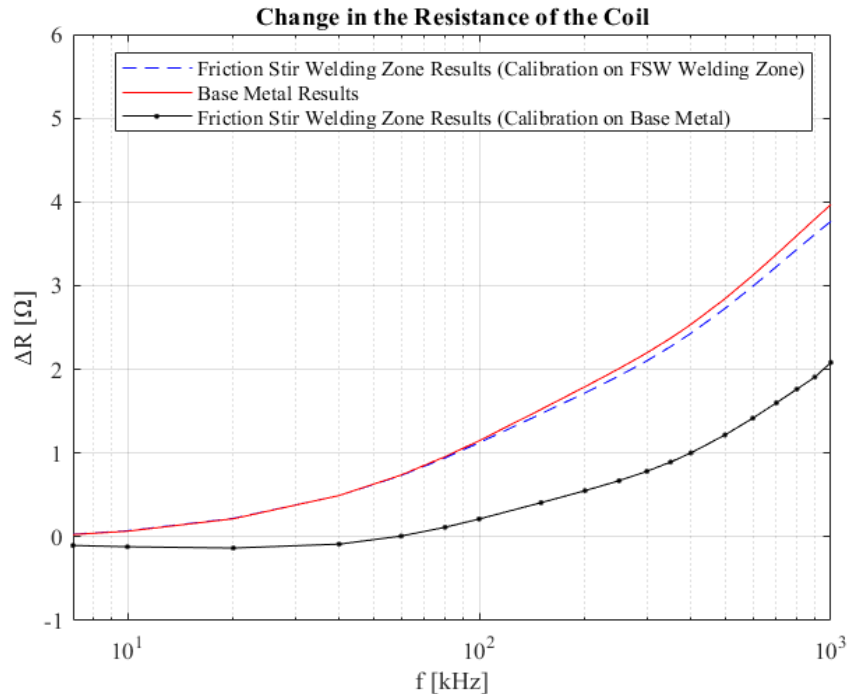
Εικόνα 63. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 5 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 61, είναι αρχικά εμφανές πως η βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης θα μας δώσει μια ένδειξη πολύ κοντινή με την ένδειξη που θα λαμβάναμε κατά την ανίχνευση της ασυνέχειας εάν αυτή βρισκόταν επί του μετάλλου βάσης. Αντιθέτως, η καμπύλη η οποία αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, είναι μετατοπισμένη, απέχοντας από την καμπύλη που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης απόσταση ίση περίπου με 1.3 Ω καθ όλη τη διαδρομή του πηνίου. Η διαφορά των 1.3 Ω αυτή είναι ίση με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης για συχνότητα ελέγχου 300 kHz, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.

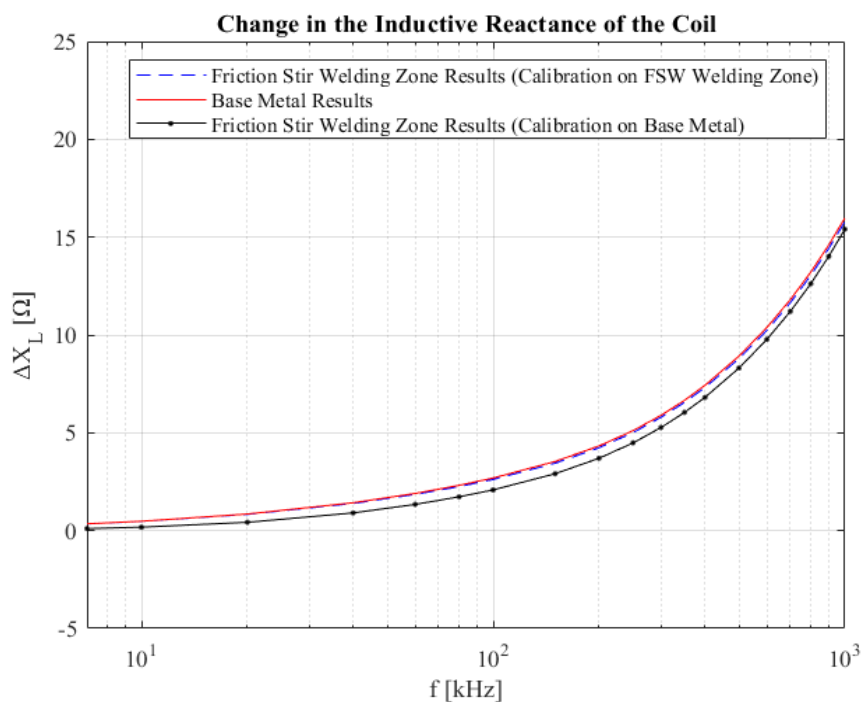
Κατ'αντιστοιχία, τα ίδια ακριβώς συμπεράσματα εξάγονται από την παρατήρηση του διαγράμματος της Εικόνας 62, με μόνη διαφορά πως στην περίπτωση αυτή, η καμπύλη η οποία αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης απέχει από την καμπύλη που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης απόσταση περίπου ίση με 0.5 Ω καθ όλη τη διαδρομή του πηνίου, διαφορά η οποία είναι ίση με τη μεταβολή της επαγωγικής αντίδραση του πηνίου που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης για συχνότητα ελέγχου 300 kHz, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές πως η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή κατά μέτρο σε σχέση με το μέτρο της ένδειξης, οδηγώντας έτσι και τις τρεις καμπύλες στο να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα τις ενδείξεις που παρουσιάζονται στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης της Εικόνας 63.

4.3.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 1 mm

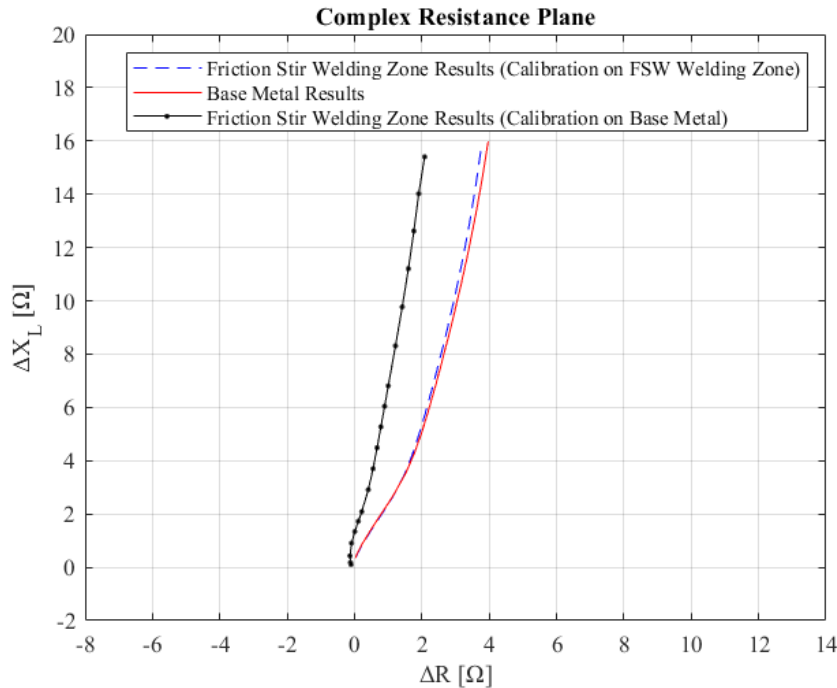
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη μεταβολή της συχνότητας ελέγχου, του ακίνητου επάνω από το μέσο της ασυνέχειας πηνίου για την περίπτωση ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 64. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 65. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



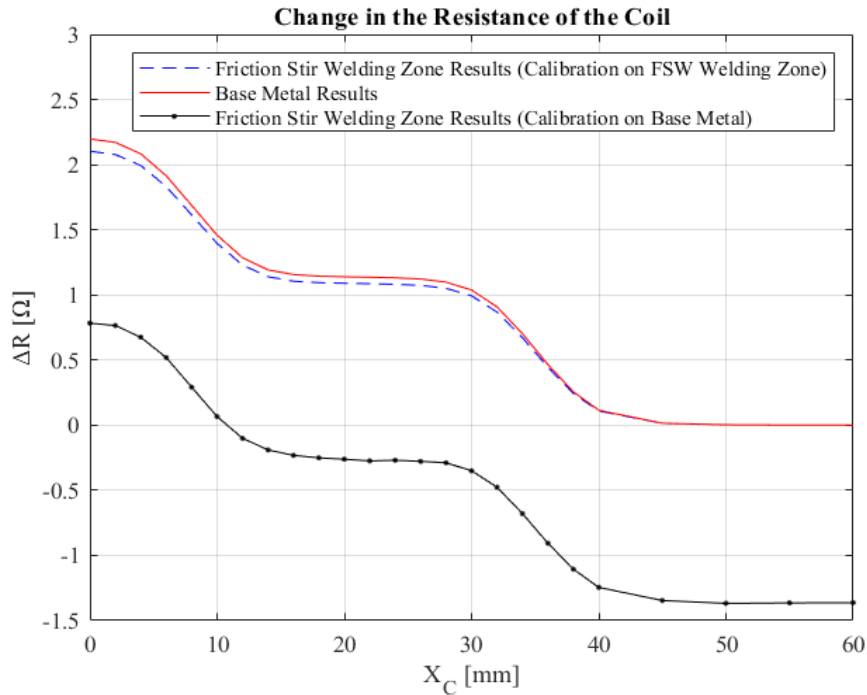
Εικόνα 66. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 1 mm για μεταβολή της συχνότητας ελέγχου στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με βάση τα διαγράμματα των Εικόνων 64, 65 και 66 είναι σε μεγάλο βαθμό οι ίδιες με αυτές που πραγματοποιήθηκαν για την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm. Πιο συγκεκριμένα, και στην περίπτωση αυτή είναι εμφανές πως η επιρροή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας επί της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου είναι πρακτικά μηδενική, με τις τρεις καμπύλες της Εικόνας 65 σχεδόν να ταυτίζονται.

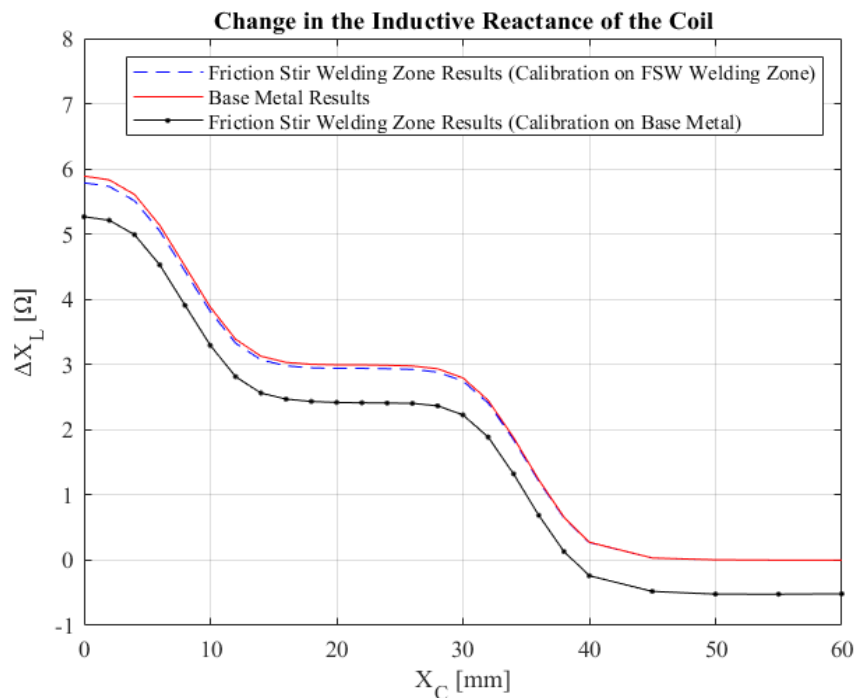
Και στην περίπτωση αυτή, η επιρροή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνεχίζει να είναι σημαντικά πιο αισθητή στη μεταβολή της ωμικής αντίδρασης του πηνίου όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 64, από το οποίο και είναι εμφανές πως και στην περίπτωση ασυνέχειας βάθους 1 mm, η διαφορά μεταξύ της καμπύλης που αντιστοιχεί σε βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης και της καμπύλης που αντιστοιχεί σε βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης είναι περίπου ίση με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου λόγω της μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2. με μικρές αποκλίσεις οι οποίες οφείλονται σε διαφορές στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων μεταξύ των δυο μοντέλων.

Σε σχέση με την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm, είναι εμφανές πως στην περίπτωση αυτή (ασυνέχειας βάθους 1 mm), η καμπύλη η οποία αφορά τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου στην περίπτωση βαθμονόμησης του με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης βρίσκεται αναλογικά σημαντικά πιο κοντά στην καμπύλη του αντιστοιχεί την ανίχνευση ασυνέχειας στο μέταλλο βάσης, σε σχέση με την καμπύλη που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης.

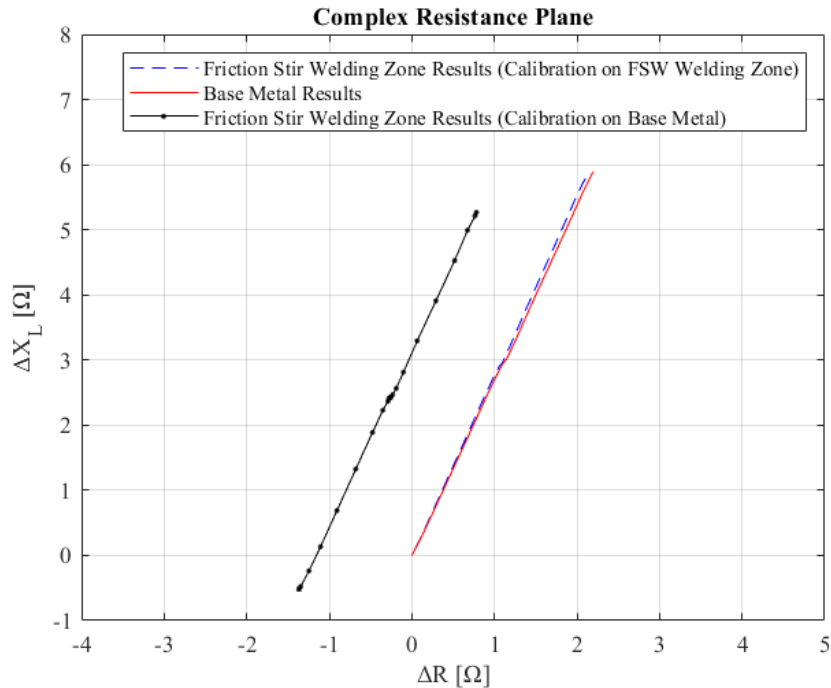
Εν συνεχεία, στις Εικόνες 67, 68 και 69 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετακίνηση του πηνίου κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης καθώς αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 300 kHz για την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 67. Μεταβολή ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 68. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



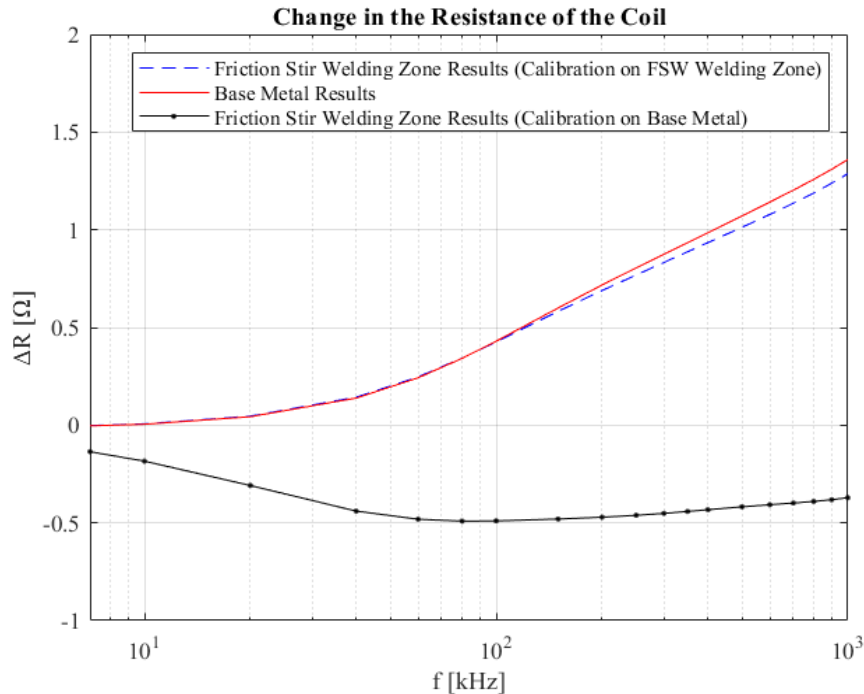
Εικόνα 69. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 1 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 67, είναι και στην περίπτωση αυτή εμφανές πως η βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης θα μας δώσει μια ένδειξη η οποία συνάδει σε σημαντικό βαθμό με την ένδειξη που θα λαμβάναμε κατά την ανίχνευση της ασυνέχειας εάν αυτή βρισκόταν επί του μετάλλου βάσης όπως φαίνεται από τη μπλε και την κόκκινη καμπύλη. Αντιθέτως, η καμπύλη η οποία αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, απέχει από την καμπύλη που αφορά τη βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης απόσταση ίση περίπου με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης κατά 1.3 Ω που προβλέπεται εξαιτίας της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης, για συχνότητα ελέγχου 300 kHz, καθ'όλη τη διαδρομή του πηνίου. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από την παρατήρηση του διαγράμματος μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου της Εικόνας 68, ξανά με μόνη διαφορά το γεγονός πως στην περίπτωση αυτή, οι δυο καμπύλες απέχουν μεταξύ τους απόσταση περίπου ίση με 0.5 Ω καθ'όλη τη διαδρομή του πηνίου, διαφορά η οποία είναι ίση με τη μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης για συχνότητα ελέγχου 300 kHz, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.

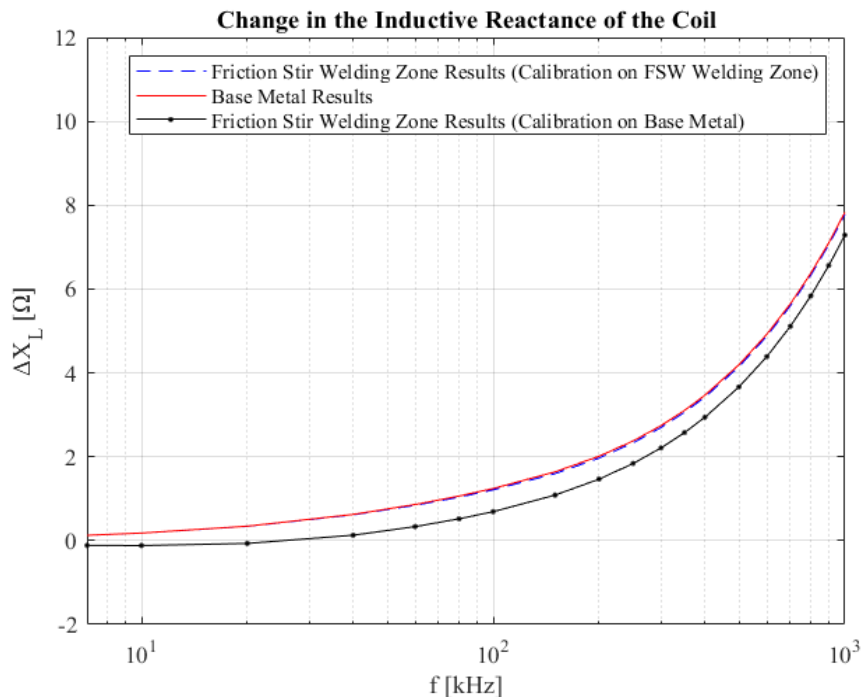
Όπως και στην περίπτωση ασυνέχειας βάθους 5 mm, έτσι και στην περίπτωση αυτή, τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα τις ενδείξεις που παρουσιάζονται στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης της Εικόνας 69. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά των ενδείξεων στο επίπεδο στις σύνθετης αντίστασης είναι πιο αισθητή, λόγω του ότι το μικρότερο βάθος ασυνέχειας οδηγεί σε ασθενέστερες κατά μέτρο ενδείξεις.

4.3.3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 0.5 mm

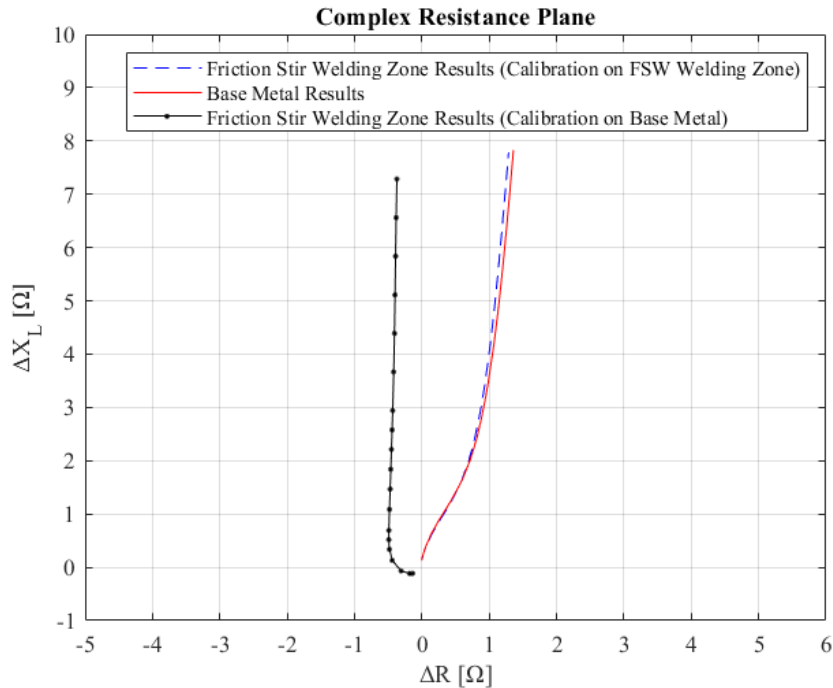
Εν συνεχεία, στις εικόνες 70, 71 και 72 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τη μεταβολή της συχνότητας ελέγχου, του ακίνητου επάνω από το μέσο της ασυνέχειας πηνίου για την περίπτωση ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



Εικόνα 70. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



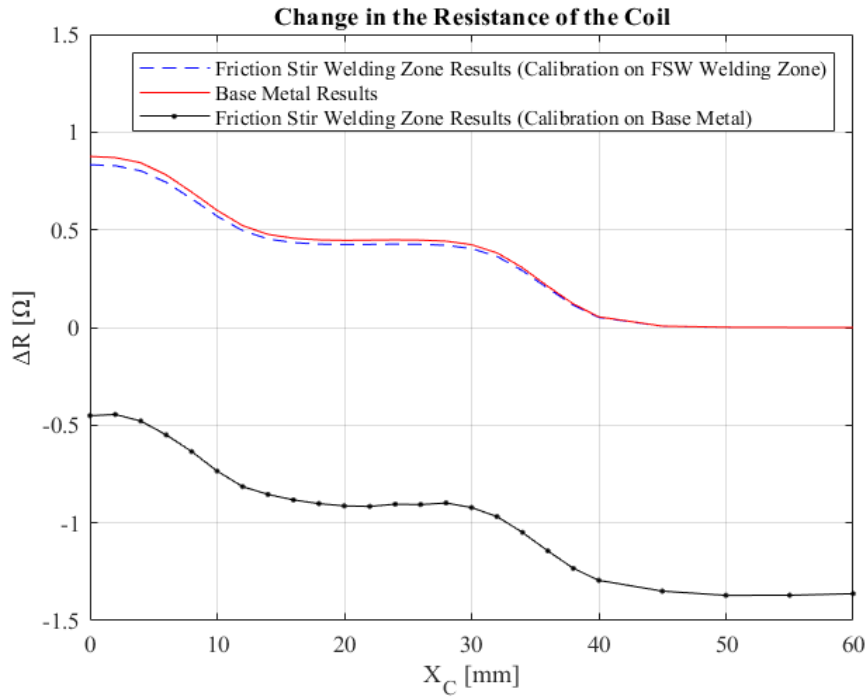
Εικόνα 71. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας ελέγχου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



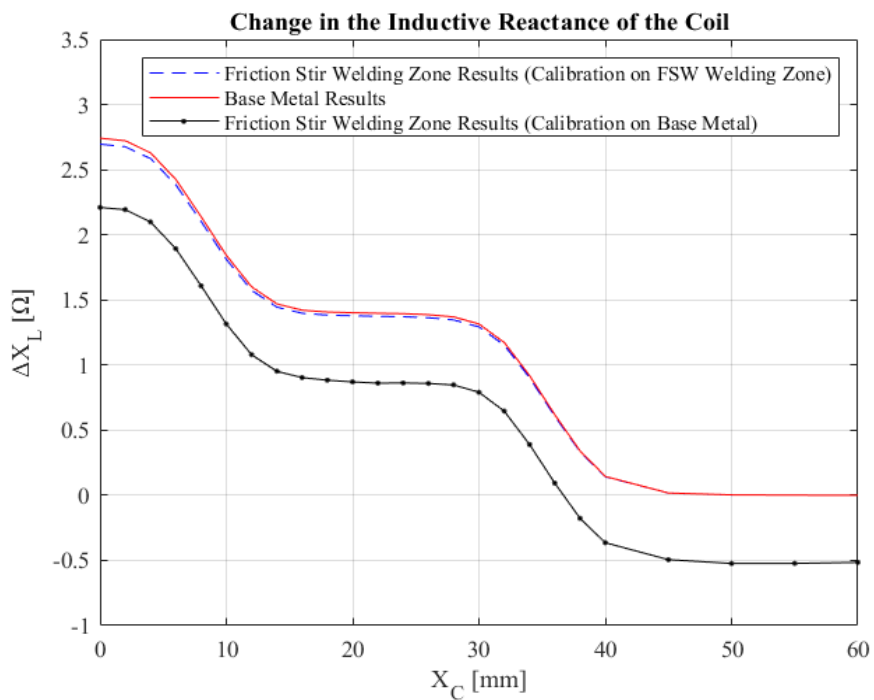
Εικόνα 72. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 0.5 mm για μεταβολή της συχνότητας ελέγχου στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες 70, 71 και 72, τα συμπεράσματα που αντλούνται είναι σε μεγάλο βαθμό τα ίδια με τα συμπεράσματα που αφορούν τις ασυνέχειες βάθους 5 mm και 1 mm. Σημείο διαφοροποίησης αποτελεί η ένδειξη στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης που αφορά την ανίχνευση ασυνέχειας στη ζώνη συγκόλλησης, με τη βαθμονόμηση του πηνίου να έχει πραγματοποιηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, η μορφή της οποίας διαφέρει σημαντικά σε σχέση με τις άλλες δυο καμπύλες, το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ένδειξη της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου είναι πιο ασθενής σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, εξαιτίας του μικρότερου βάθους της ασυνέχειας, με αποτέλεσμα να βρίσκεται πλέον σε επίπεδα συγκρίσιμα με το μέτρο της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου εξαιτίας της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

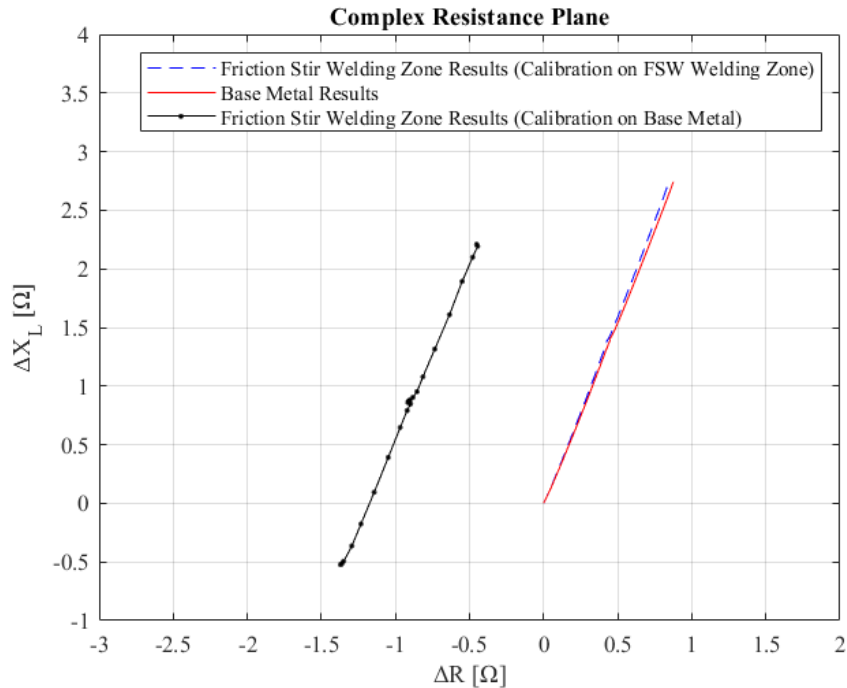
Τέλος, παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετακίνηση του πηνίου κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης καθώς αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 300 kHz για την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



Εικόνα 73. Μεταβολή ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



Εικόνα 74. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 0.5 mm.



Εικόνα 75. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 0.5 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα των Εικόνων 73, 74 και 75 επιβεβαιώνουν την τάση που παρατηρήθηκε και στα αντίστοιχα διαγράμματα των υποενοτήτων 4.3.1. και 4.3.2. Δηλαδή το γεγονός πως όσο το βάθος της ασυνέχειας μειώνεται, οι μεταβολές της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου που οφείλονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης επηρεάζουν αναλογικά περισσότερο τις παραγόμενες κατά τον έλεγχο ενδείξεις, οδηγώντας σε μετατοπισμένες καμπύλες.

Έχοντας παρατηρήσει τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, μπορεί να καταλήξει κανείς στα ακόλουθα συμπεράσματα. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε πως στην περίπτωση πραγματοποίησης ελέγχου στη ζώνη συγκόλλησης, η βαθμονόμηση του πηνίου/αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης θα οδηγήσει στην παραγωγή μιας ένδειξης η οποία σχεδόν ταυτίζεται με την ένδειξη που θα παραγόταν από την αλληλεπίδραση του πηνίου με την ασυνέχεια σε περίπτωση ελέγχου στο μέταλλο βάσης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο μιας και βαθμονομώντας τον αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης κανονικοποιούμε κατά μια έννοια την ένδειξη του, αφού δεν θα λαμβάνει υπόψη του τη μεταβολή τόσο της ωμικής αντίστασης αλλά και της επαγωγικής αντίδρασης που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Με τον τρόπο αυτό, η ένδειξη που λαμβάνουμε οφείλεται εξολοκλήρου στην αλληλεπίδραση των δινορρευμάτων με την υφιστάμενη ασυνέχεια. Παρόλα αυτά, σε όλες τις περιπτώσεις συνεχίζει να παρατηρείται μια μικρή απόκλιση μεταξύ κόκκινων και μπλε των καμπυλών. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός πως δεδομένου του γεγονότος ότι το μέταλλο βάσης και η ζώνη συγκόλλησης έχουν διαφορετική ηλεκτρική

αγωγιμότητα, η κατανομή των δινορρευμάτων θα είναι ελαφρώς διαφορετική σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, η υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης οδηγεί στην ελάττωση του επιδερμικού βάθους, δηλαδή συγκέντρωση των δινορρευμάτων πιο κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου στην περίπτωση της συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης, αλλάζοντας έτσι σε ένα βαθμό τον τρόπο αλληλεπίδρασης των δινορρευμάτων με την ασυνέχεια.

Σε ότι αφορά την περίπτωση πραγματοποίησης ελέγχου στη ζώνη συγκόλλησης, με τον αισθητήρα να έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, παρατηρείται πως οι ενδείξεις που αφορούν τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου διαφέρουν από αυτές που αφορούν τη βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης κατά μέτρο περίπου ίσο με τις μεταβολές της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου λόγω της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης, όπως αυτές παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2. (δηλαδή 1.3Ω περίπου για την ωμική αντίσταση και 0.5Ω για την επαγωγική αντίδραση στην περίπτωση χρήσης συχνότητας ελέγχου ίσης με 300 kHz). Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό όσο το βάθος της ασυνέχειας μειώνεται μιας και το μέτρο των ενδείξεων ελαττώνεται με ελάττωση του βάθους της ασυνέχειας, ενώ οι μεταβολές των ενδείξεων που οφείλονται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παραμένουν αμετάβλητες. Επιπλέον το φαινόμενο αυτό δείχνει να επηρεάζει αναλογικά περισσότερο την ένδειξη που αφορά τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου και λιγότερο την ένδειξη που αφορά τη μεταβολή της επαγωγικής του αντίδρασης, μιας και η δεύτερη έχει σημαντικά μεγαλύτερο μέτρο από την πρώτη.

4.4. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΑΡΞΗΣ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Το επόμενο είδος προβλήματος που θα προσομοιωθεί αφορά την ύπαρξη μιας μεγάλης σε μήκος υποεπιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm , η οποία βρίσκεται στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης και έχει φορά παράλληλη με αυτή. Το πηνίο θα μετακινηθεί ξανά κατά μήκος της ασυνέχειας, ξεκινώντας από το μέσο αυτής και διανύοντας απόσταση 60 mm . Θα προσομοιωθούν δυο διαφορετικές περιπτώσεις του προβλήματος, με μοναδική διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων να είναι η απόσταση του άνω άκρου της ασυνέχειας κάτω από την επιφάνεια του ελεγχόμενου δοκιμίου. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι του μοντέλου που θα προσομοιωθεί.

Πίνακας 8. Βασικές παράμετροι του προβλήματος.

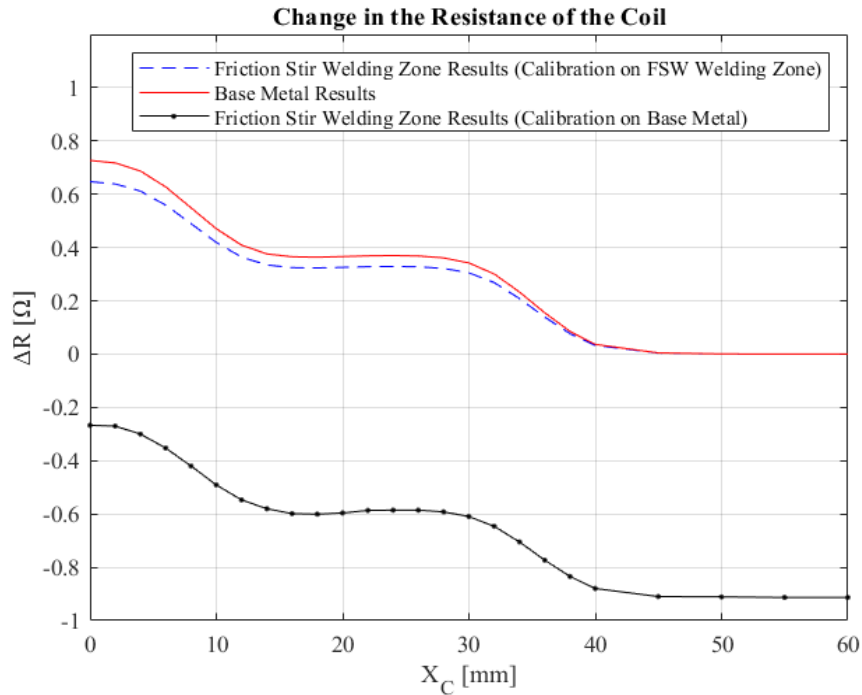
Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος	18.04 mm
Μήκος	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου	408
Ανύψωση (Lift-off)	1 mm
Συχνότητα ρεύματος πηνίου	100 kHz
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα μετάλλου βάσης	20.358 MS/m
Πάχος	12.22 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος	44.40 mm
Βάθος	5 mm
Απόσταση από την επιφάνεια	0.1, 0.2 mm (Διαδοχικές τιμές)
Πλάτος	0.28 mm

Στην περίπτωση των προσομοιώσεων αυτών θα χρησιμοποιηθεί συχνότητα ελέγχου ίση με 100 kHz, τιμή μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της επιφανειακής ασυνέχειας. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός πως για την αναζήτηση μιας υποεπιφανειακής ασυνέχειας απαιτείται η επίτευξη μεγαλύτερου βάθους διείσδυσης των δινορρευμάτων, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται μέσω μείωσης της συχνότητας ελέγχου.

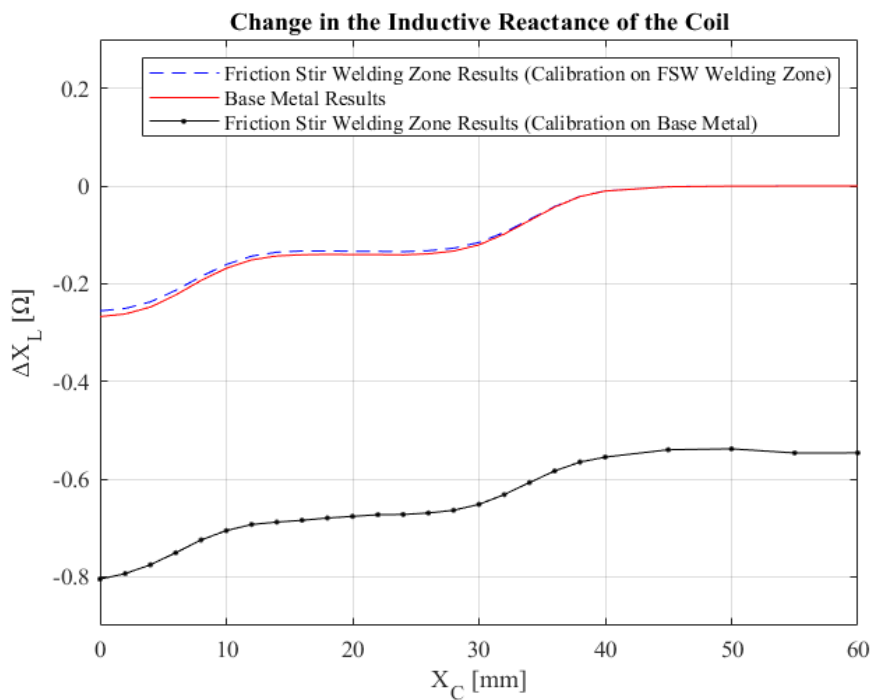
Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, και στην περίπτωση αυτή θα παρουσιαστεί η μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου τόσο για την περίπτωση όπου το πηνίο/αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, όσο και για την περίπτωση όπου έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης. Για λόγους σύγκρισης των ενδείξεων, θα παρουσιαστούν επίσης τα αποτελέσματα του μη καταστροφικού ελέγχου στο μέταλλο βάσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται τις ακόλουθες σελίδες.

4.4.1. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 0.1 mm ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

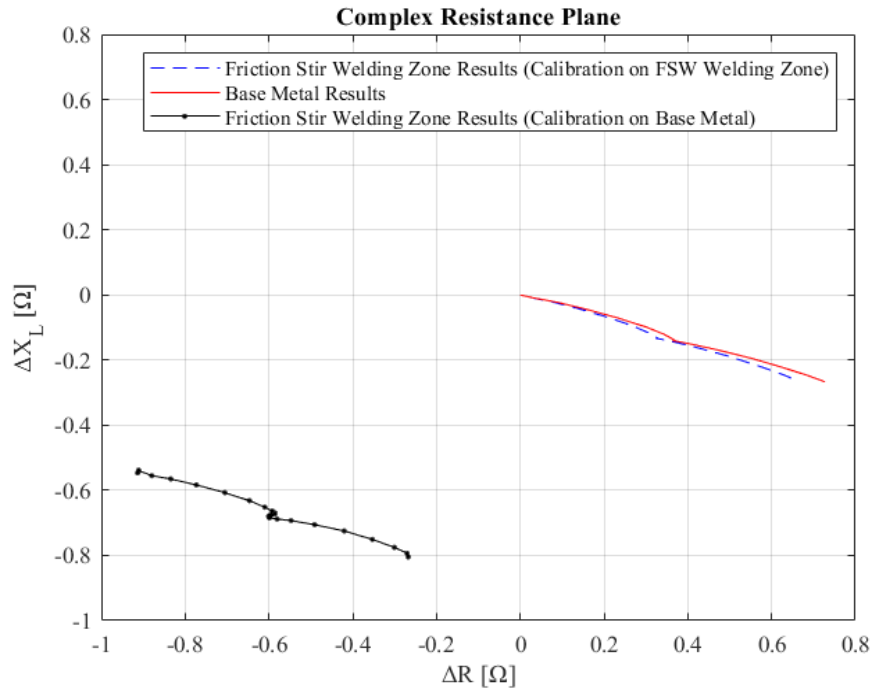
Στις Εικόνες 76, 77 και 78 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την ύπαρξη υποεπιφανειακής ασυνέχειας η οποία φτάνει σε απόσταση 0.1 mm από την επιφάνεια του αγωγίμου μέσου.



Εικόνα 76. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας σε βάθος 0.1 mm κάτω από την επιφάνεια.



Εικόνα 77. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας σε βάθος 0.1 mm κάτω από την επιφάνεια.



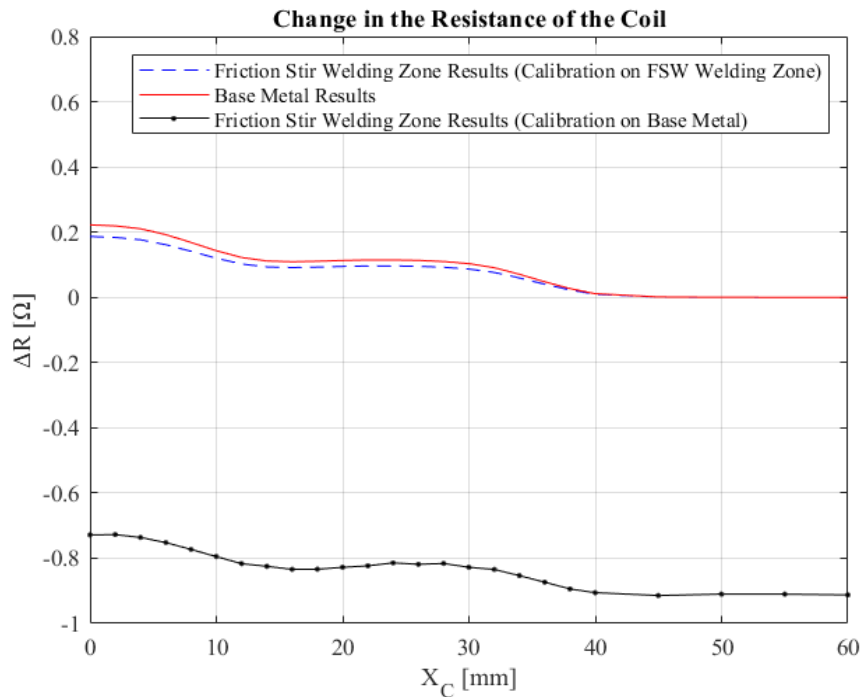
Εικόνα 78. Ένδειξη ασυνέχειας η οποία βρίσκεται σε βάθος 0.1 mm υπό της επιφάνειας στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της Εικόνας 76, είναι εμφανές πως η βαθμονόμηση του αισθητήρα με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης θα μας δώσει μια ένδειξη (μπλε καμπύλη) πολύ κοντινή με την ένδειξη που θα λαμβάναμε κατά την ανίχνευση της ασυνέχειας εάν αυτή βρισκόταν επί του μετάλλου βάσης (κόκκινη καμπύλη). Αντιθέτως, η μαύρη καμπύλη, η οποία αφορά βαθμονόμηση του πηνίου με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, είναι μετατοπισμένη, απέχοντας από την μπλε καμπύλη απόσταση ίση περίπου με 0.92 Ω καθ όλη τη διαδρομή του πηνίου. Η διαφορά των 0.92 Ω αυτή είναι ίση με τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης για συχνότητα ελέγχου 100 kHz, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2. Επομένως και στην περίπτωση της υποεπιφανειακής ασυνέχειας, η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης επηρεάζει τις ενδείξεις ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζει τις ενδείξεις των επιφανειακών ασυνεχειών.

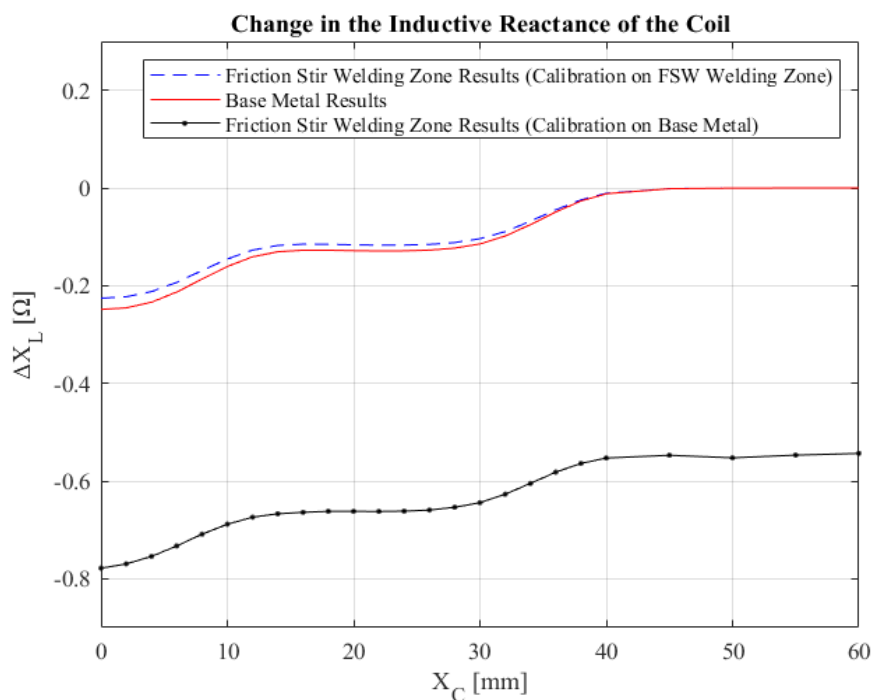
Παρόμοια είναι η επιρροή της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και επί των ενδείξεων της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου, με μονή διαφορά το γεγονός πως στην περίπτωση αυτή, η ένδειξη είναι τόσο ασθενής ώστε η μεταβολή που οφείλεται στη ύπαρξη της ασυνέχειας να είναι σημαντικά μικρότερη κατά μέτρο από τη μεταβολή που οφείλεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, η οποία έχει μέτρο 0.5 Ω (ενότητα 4.2. για 100 kHz) οδηγώντας έτσι σε μια σημαντικά μετατοπισμένη ένδειξη καθ όλη τη διαδρομή του πηνίου.

4.4.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΟΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 0.2 mm ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

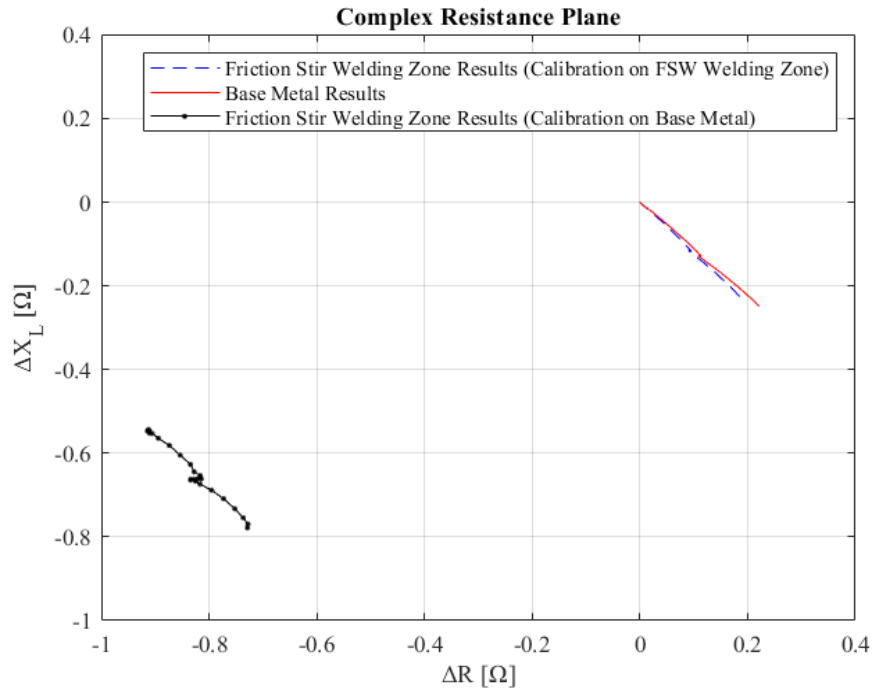
Στις Εικόνες 79, 80 και 81 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την ύπαρξη υποεπιφανειακής ασυνέχειας η οποία φτάνει σε απόσταση 0.2 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου.



Εικόνα 79. Μεταβολή της ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας σε βάθος 0.2 mm κάτω από την επιφάνεια.



Εικόνα 80. Μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας σε βάθος 0.2 mm κάτω από την επιφάνεια.

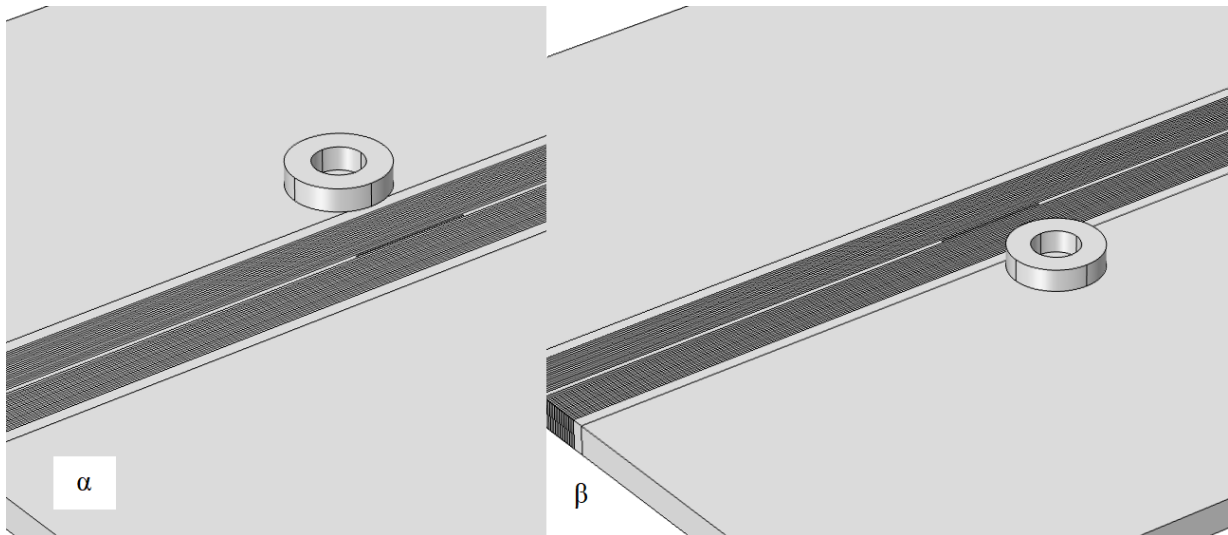


Εικόνα 81. Ένδειξη ασυνέχειας η οποία βρίσκεται σε βάθος 0.2 mm υπό της επιφάνειας στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Τέλος, παρατηρώντας τις ενδείξεις που αφορούν την υποεπιφανειακή ασυνέχεια η οποία φτάνει σε βάθος 0.2 mm κάτω από την επιφάνεια, οι παρατηρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι οι ίδιες με αυτές που πραγματοποιούνται για την υποεπιφανειακή ασυνέχεια η οποία φτάνει σε βάθος 0.1 mm κάτω από την επιφάνεια του αγωγίμου μέσου, με μόνη διαφορά πως στην περίπτωση αυτή οι παραγόμενες λόγω της ύπαρξης ασυνέχειας ενδείξεις είναι ακόμη ασθενέστερες, οδηγώντας έτσι σε ακόμη μεγαλύτερη αναλογικά με το μέγεθος των ενδείξεων μετατόπιση των καμπυλών εξαιτίας της η μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης.

4.5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΚΑΘΕΤΑ ΠΡΟΣ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και η προσομοίωση της κίνησης του πηνίου κάθετα προς τη διεύθυνση της ασυνέχειας που βρίσκεται στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό θα προσομοιωθεί η κίνηση του πηνίου από τη θέση που απέχει +40 mm από το μέσο της ζώνης συγκόλλησης έως τη θέση που απέχει -40 mm από το μέσο της ζώνης συγκόλλησης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 82. Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί τόσο για την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm όσο και για την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm και η συχνότητα ελέγχου θα είναι ίση με 300 kHz.



Εικόνα 82. (α) Αρχική θέση πηνίου ($Y_C = 40$ mm), (β) Τελική θέση πηνίου ($Y_C = -40$ mm).

Οι παράμετροι που αφορούν το πηνίο, την ασυνέχεια αλλά και το αγωγίμο μέσο για τις ακόλουθες προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 9.

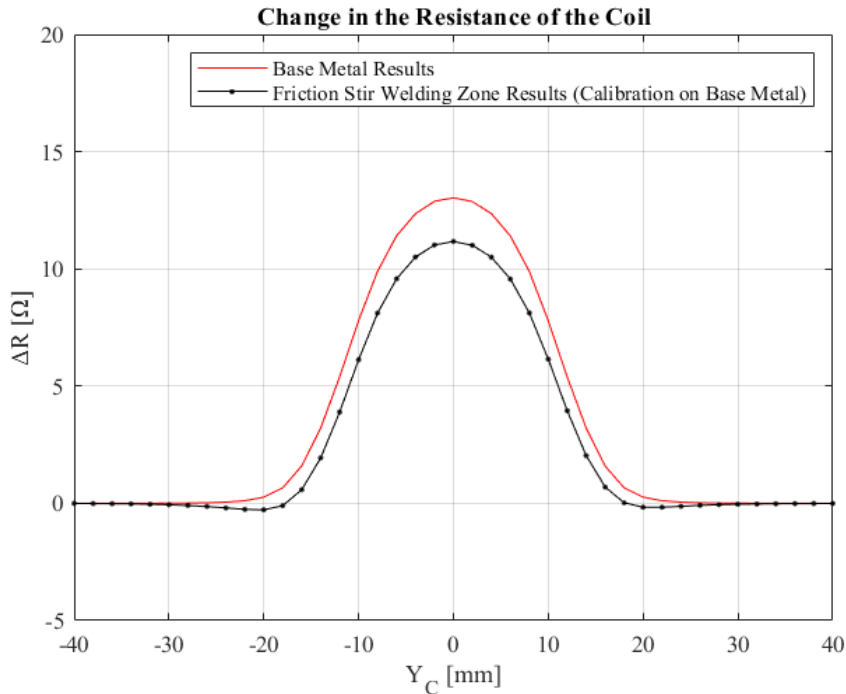
Πίνακας 9. Βασικές παράμετροι προβλήματος.

Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος	18.04 mm
Μήκος	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου	408
Ανύψωση (Lift-off)	1 mm
Συχνότητα ρεύματος πηνίου	300 kHz
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα μετάλλου βάσης	20.358 MS/m
Πάχος	12.22 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος	44.40 mm
Βάθος	5, 1 mm (Διαδοχικές τιμές)
Πλάτος	0.28 mm

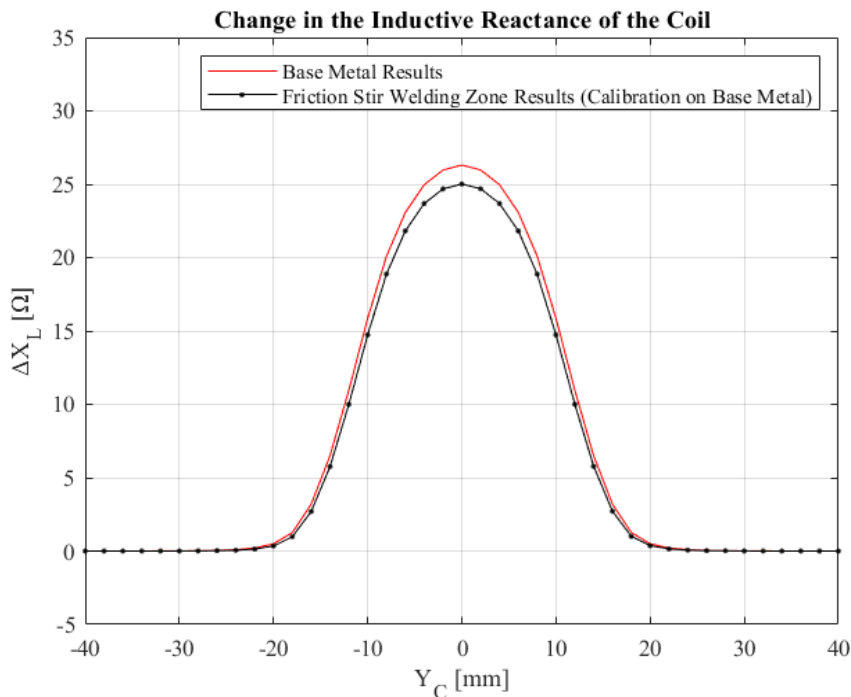
Στις ακόλουθες υποενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του ελέγχου τόσο για την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm όσο και για την περίπτωση επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm. Για κάθε ασυνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου για την περίπτωση όπου ο έλεγχος πραγματοποιείται επί του μετάλλου βάσης αλλά και για την περίπτωση όπου πραγματοποιείται επί της ζώνης συγκόλλησης. Και στις δυο περιπτώσεις, το πηνίο/αισθητήρας είναι βαθμονομημένο με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης.

4.5.1. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 5 mm

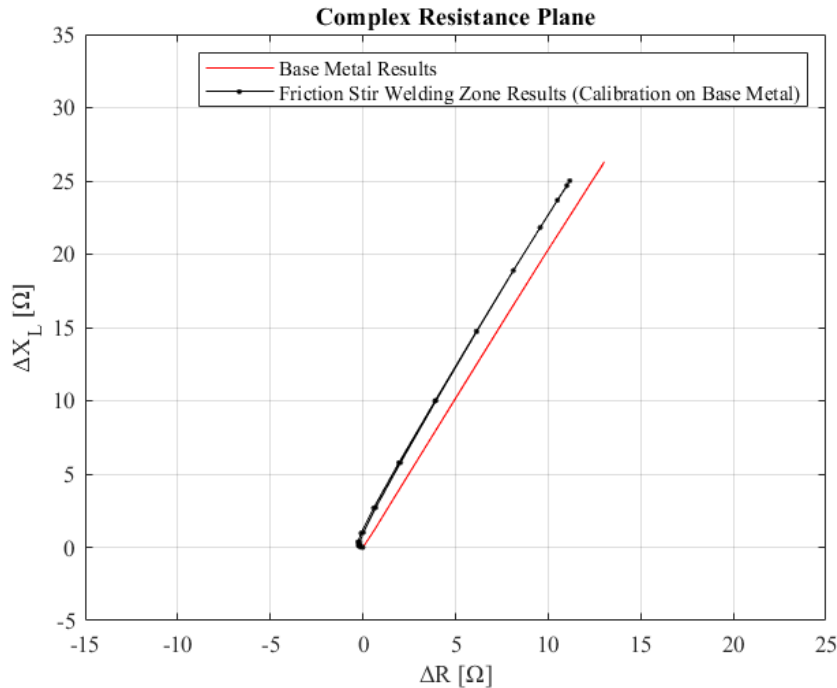
Στις Εικόνες 83, 84 και 85 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετακίνηση του πηνίου κάθετα προς τη ζώνης συγκόλλησης καθώς αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 300 kHz για την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 83. Μεταβολή ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.



Εικόνα 84. Μεταβολή επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 5 mm.

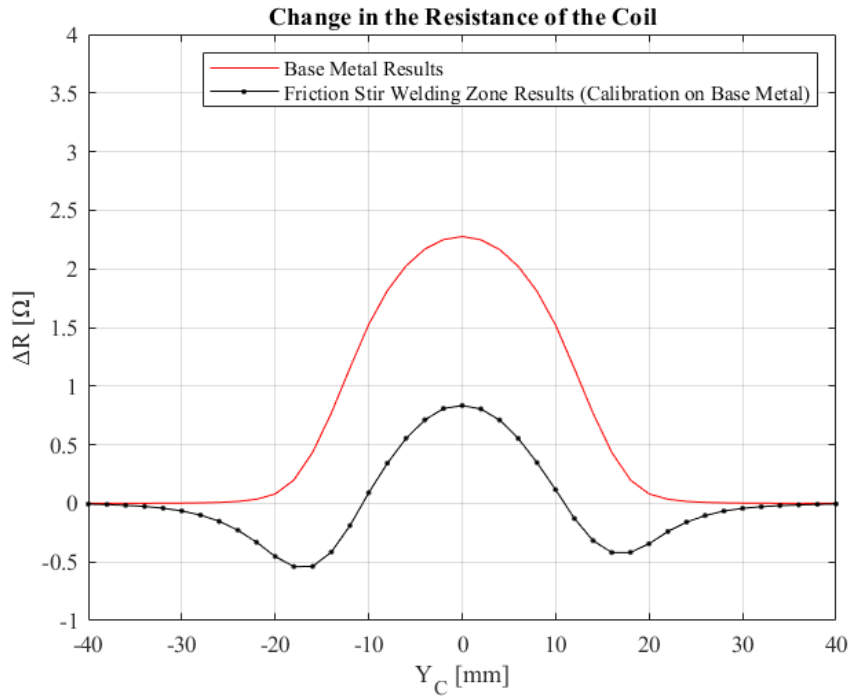


Εικόνα 85. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 5 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

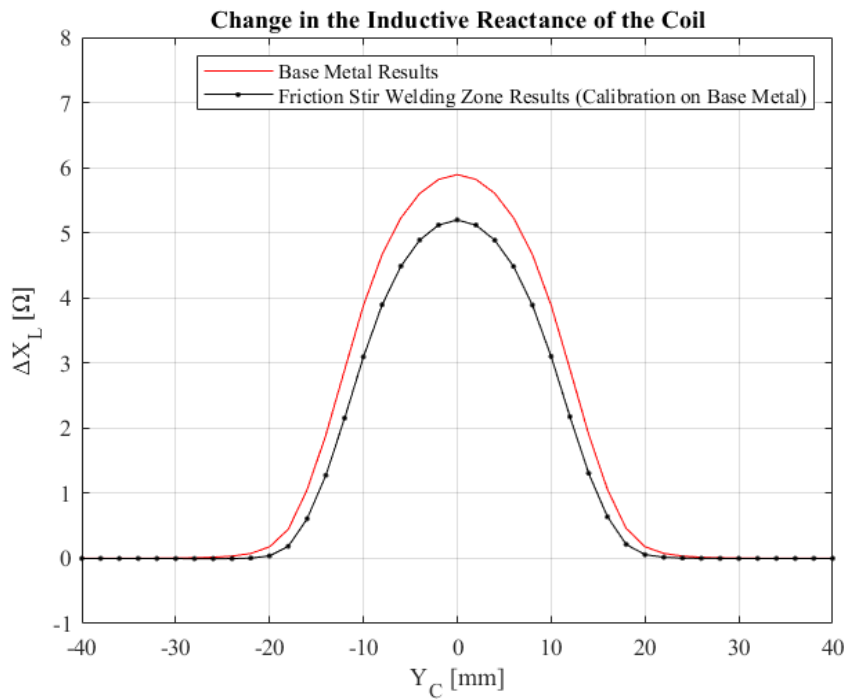
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων είναι εμφανές πως η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση του μέτρου των ενδείξεων της μεταβολής της ωμικής αντίστασης και της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου σε σχέση με την περίπτωση του μετάλλου βάσης κατά τρόπο παρόμοιο με τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων. Επιπλέον, σε ότι αφορά τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου παρατηρείται μια ελαφρά ασυμμετρία της ένδειξης κοντά στις θέσεις $Y_C = -20$ mm και $Y_C = 20$ mm. Η ασυμμετρία αυτή οφείλεται στο γεγονός πως το προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στη ζώνη συγκόλλησης δεν είναι πλήρως συμμετρικό, με μικρές διαφορές να παρατηρούνται μεταξύ της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς της ζώνης συγκόλλησης.

4.5.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΑΘΟΥΣ 1 mm

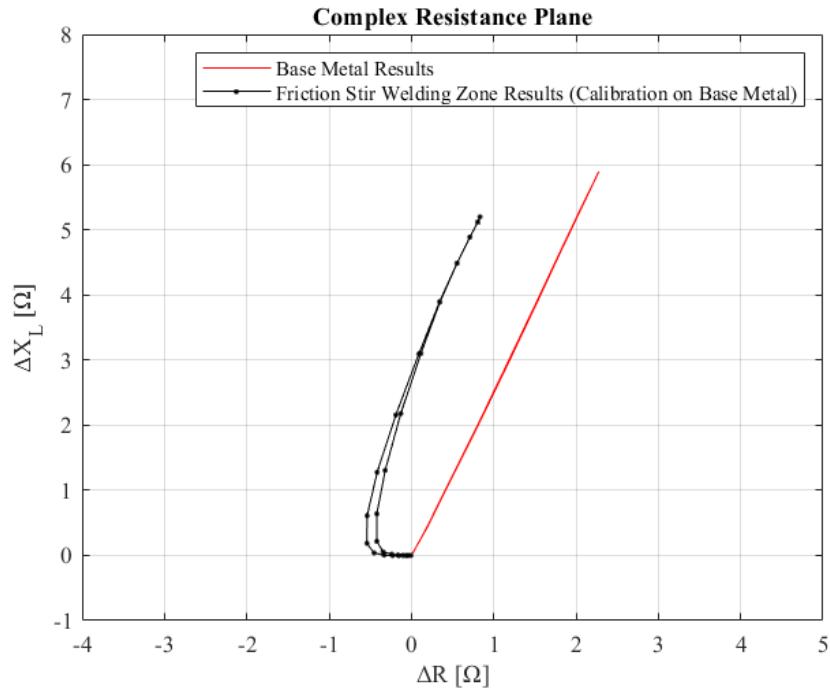
Στις Εικόνες 86, 87 και 88 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη μετακίνηση του πηνίου κάθετα προς τη ζώνη συγκόλλησης καθώς αυτό διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 300 kHz για την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 86. Μεταβολή ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 87. Μεταβολή επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 88. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 1 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στην περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ξανά πως η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης οδηγεί σε μείωση του μέτρου των ενδείξεων της μεταβολής της ωμικής αντίστασης και της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου σε σχέση με την περίπτωση του μετάλλου βάσης, με τη μείωση να είναι αναλογικά περισσότερο αισθητή στην περίπτωση αυτή σε σχέση με την περίπτωση ύπαρξης επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 5 mm λόγω του μικρότερου μέτρου του σήματος που παράγει η ρηχότερη ασυνέχεια.

Επιπλέον, το ασθενέστερο σήμα της επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm καθιστά περισσότερο εμφανή τη μείωση της ένδειξης της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου στα διαστήματα από $Y_C = -30$ mm έως $Y_C = -10$ mm και $Y_C = 30$ mm έως $Y_C = 10$ mm, η οποία οφείλεται στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης. Τέλος, είναι επίσης ξεκάθαρα εμφανής η ασυμμετρία της ένδειξης της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου, η οποία οφείλεται στο γεγονός πως το προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στη ζώνη συγκόλλησης δεν είναι πλήρως συμμετρικό, καθώς μικρές διαφορές παρατηρούνται μεταξύ της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς της ζώνης συγκόλλησης.

Τέλος, σε σύγκριση με τις περιπτώσεις όπου το πηνίο κινείται παράλληλα με την ασυνέχεια, στην περίπτωση αυτή (κίνησης του πηνίου κάθετα προς την ασυνέχεια), η παραγόμενη ένδειξη στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης διαστρεβλώνεται σημαντικά όσο το βάθος στο οποίο φτάνει η ασυνέχεια μειώνεται, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε εσφαλμένη ερμηνεία των

ενδείξεων του ελέγχου. Έτσι, για την αξιόπιστη αναγνώριση μιας ασυνέχειας μικρού βάθους που βρίσκεται στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης, είναι επιβεβλημένη η προσπέλαση της ζώνης συγκόλλησης από το πηνίο τόσο με φορά κάθετη όσο και παράλληλη προς αυτή.

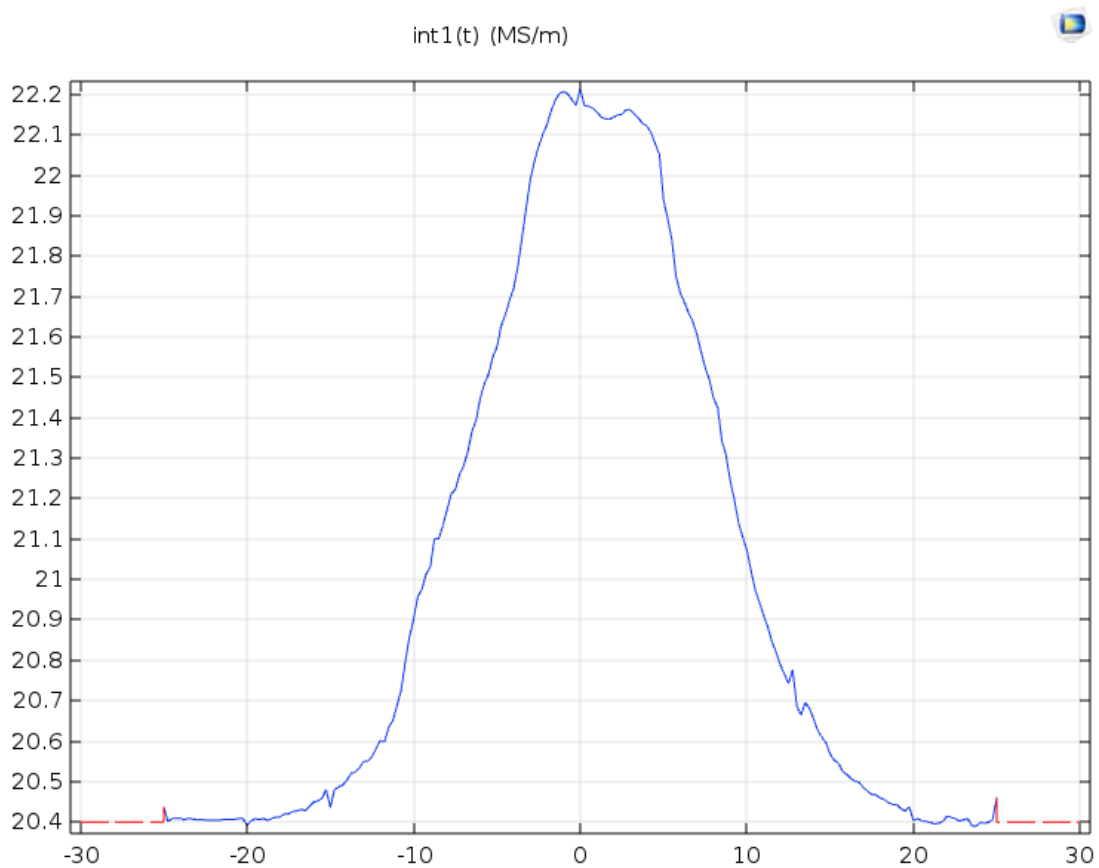
4.6. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί μια εναλλακτική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης και θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρέχει η εναλλακτική μέθοδος αυτή, με τα αποτελέσματα που παρέχονται από τη μέθοδο που ακολουθήθηκε στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου.

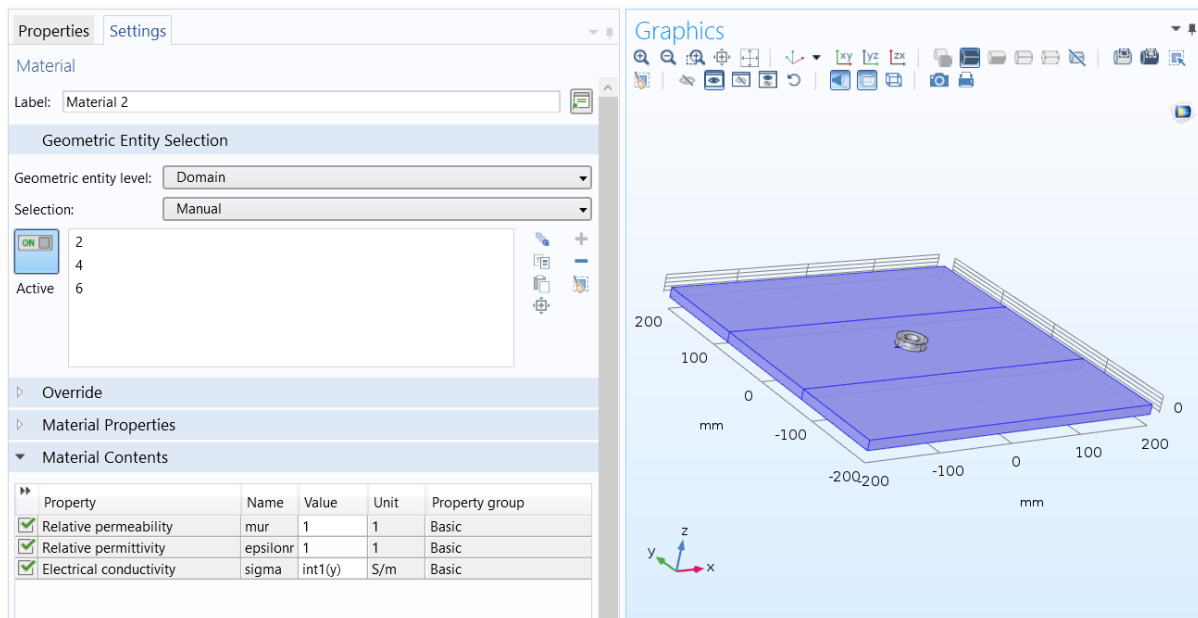
Η βάση με την οποία θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση θα είναι η μέθοδος κατά την οποία η ζώνη συγκόλλησης χωρίζεται σε στρώματα πάχους 1 mm, με κάθε στρώμα να λαμβάνει ως ηλεκτρική αγωγιμότητα τη μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο ίδιο διάστημα (όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 4.1.).

Παρόλα αυτά, το COMSOL Multiphysics παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης φυσικών μεγεθών με τη χρήση συναρτήσεων διαφόρων ειδών. Έτσι, είναι δυνατή η μοντελοποίηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υλικού χρησιμοποιώντας κάποιο από τα υποστηριζόμενα είδη συναρτήσεων. Επομένως επιλέγουμε να μοντελοποιήσουμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αγωγίμου μέσου χρησιμοποιώντας μια Global συνάρτηση του τύπου Interpolation. Άρα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού κατά τη διεύθυνση y (δηλαδή κάθετα προς τη ζώνη συγκόλλησης) θα διέπεται στην περίπτωση αυτή από τη συνάρτηση Interpolation αυτή, η οποία ονομάζεται int1 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 89.

Έτσι, εν συνεχεία ορίζουμε πως η ηλεκτρική αγωγιμότητα των Domains που αποτελούν το προς έλεγχο δοκίμιο θα προκύπτει από τη συνάρτηση αυτή εισάγοντας την έκφραση int1(y) στο πεδίο Electrical conductivity του υλικού που έχει αντιστοιχηθεί με τα Domains αυτά όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 90.

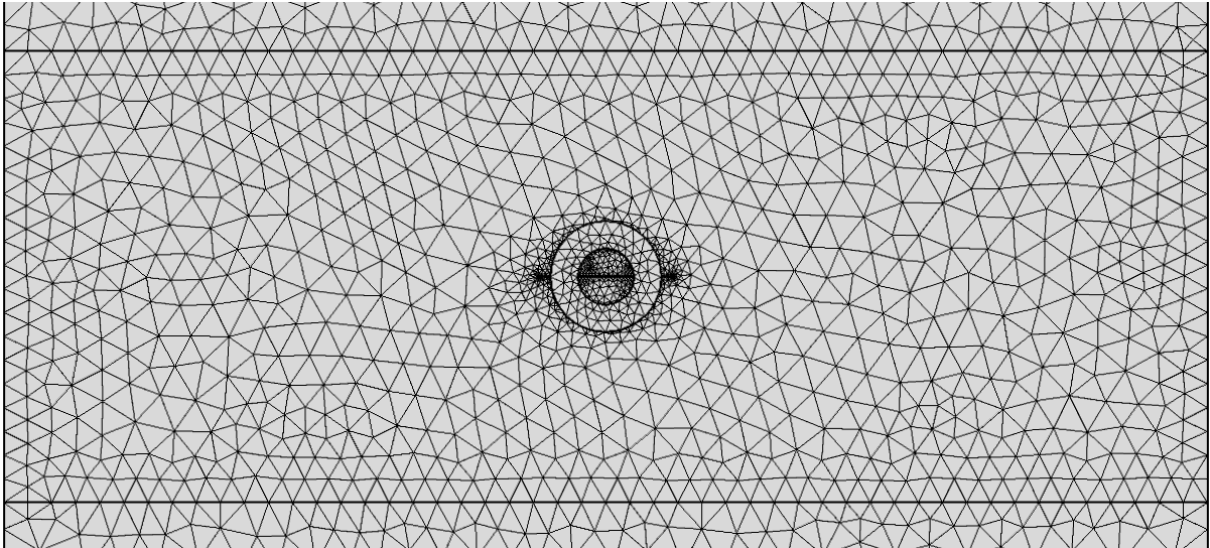


Εικόνα 89. Διαγραμματική απεικόνιση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως αυτή καθορίζεται από τη συνάρτηση int1.



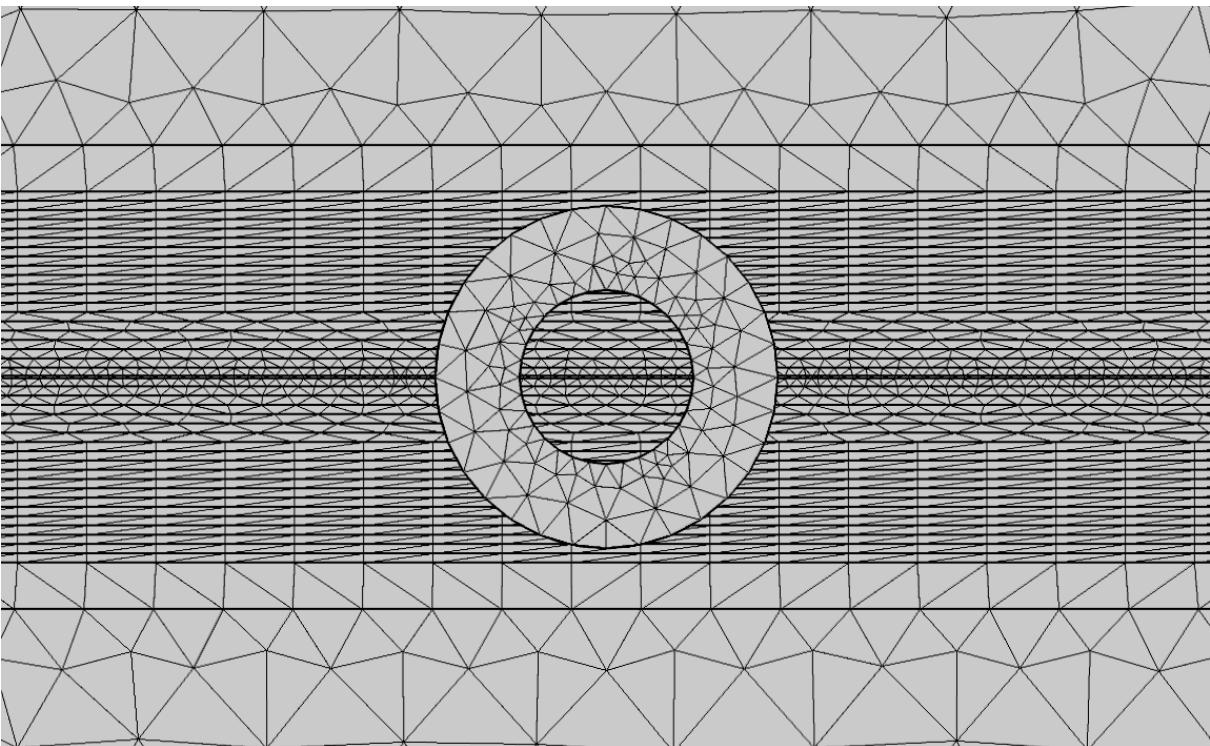
Εικόνα 90. Ορισμός της συνάρτησης int1 ως ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ελεγχόμενου αγωγίμου δοκιμίου.

Στην Εικόνα 91 παρουσιάζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στα οποία έχει χωριστεί το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 90 (Το τμήμα του πλέγματος που αντιστοιχεί στον αέρα δεν παρουσιάζεται).



Εικόνα 91. Πλέγμα στοιχείων στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται χωρισμός του αγωγίμου μέσου σε στρώματα (Layers).

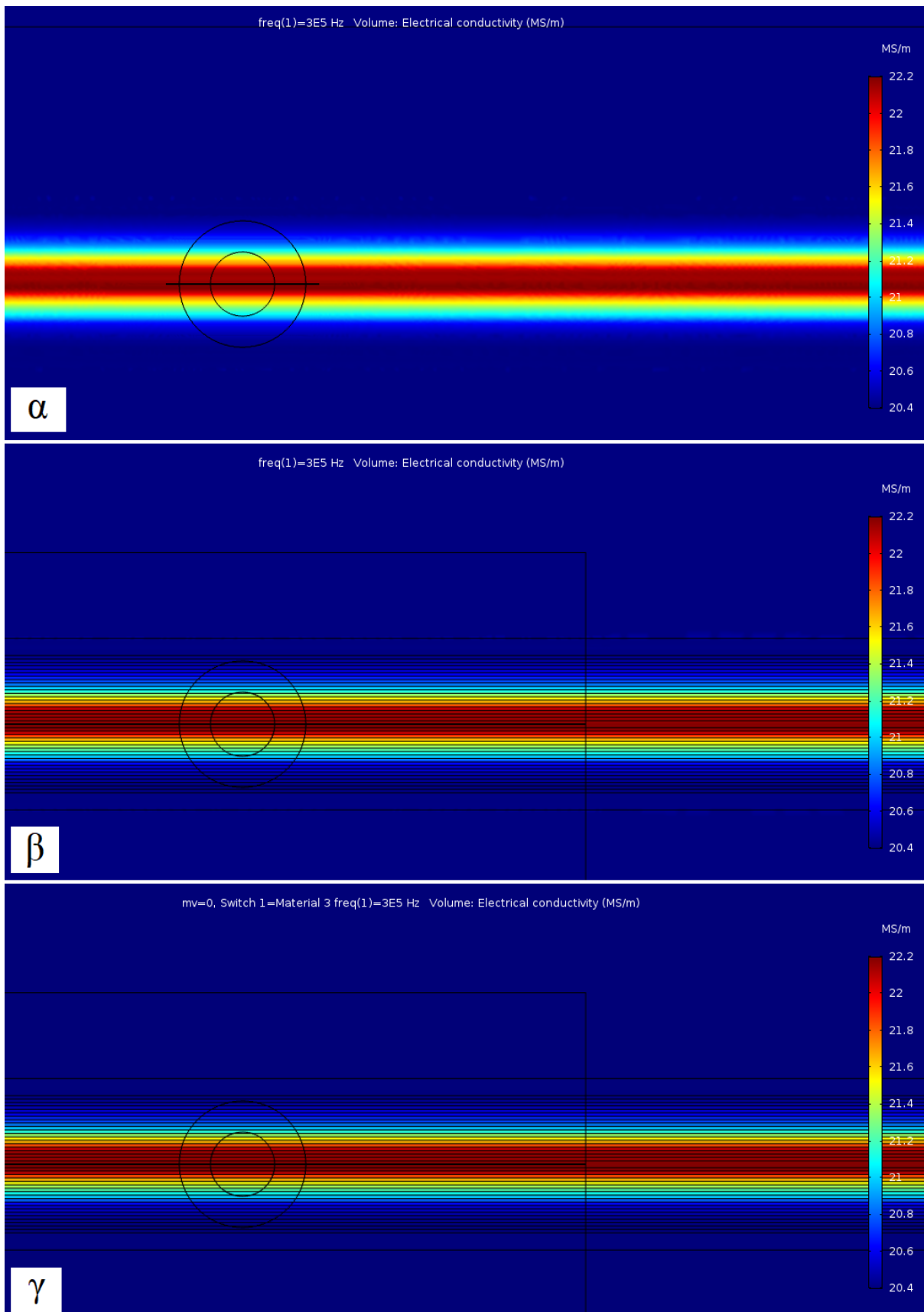
Για λόγους σύγκρισης, το πλέγμα που αντιστοιχεί στην περίπτωση χωρισμού του αγωγίμου μέσου σε στρώματα παρουσιάζεται στην Εικόνα 92 (και στην περίπτωση αυτή, το τμήμα του πλέγματος που αντιστοιχεί στον αέρα δεν παρουσιάζεται).



Εικόνα 92. Πλέγμα στοιχείων στην περίπτωση χωρισμού του αγωγίμου μέσου σε στρώματα (Layers).

Παρατηρώντας τα δυο πλέγματα αυτά είναι εμφανές πως η κατανομή, το σχήμα και το μέγεθος των στοιχείων τους στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης είναι σημαντικά διαφορετικά, παρά το γεγονός πως ο συνολικός αριθμός των στοιχείων των δυο μοντέλων είναι περίπου ο ίδιος (πέριξ των 140000 στοιχείων). Επομένως, είναι αναμενόμενο πως οι πλεγματικές διαφορές θα έχουν σημαντική επιρροή επί των τελικών αποτελεσμάτων.

Για το λόγο αυτό θα προσομοιωθεί μια ακόμη εκδοχή του προβλήματος. Στην εκδοχή αυτή το ηλεκτρικά αγώγιμο μέσο θα είναι ξανά χωρισμένο σε στρώματα πάχους 1 mm κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης αλλά αντί κάθε στρώμα να έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με τη μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην ίδια ζώνη, θα έχει την ηλεκτρική αγωγιμότητα που καθορίζει η συνάρτηση int1 για την αντίστοιχη θέση. Ο ορισμός της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε κάθε στρώμα γίνεται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή εισάγοντας την έκφραση $\text{int1}(y)$ στο πεδίο Electrical conductivity του υλικού που έχει αντιστοιχηθεί σε κάθε στρώμα. Στην Εικόνα 93 παρουσιάζονται οι τελικοί χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις μοντελοποίησης της.



Εικόνα 93. Χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας ζώνης συγκόλλησης. (α) Περίπτωση μοντελοποίησης μέσω της συνάρτησης int1, (β) Περίπτωση μοντελοποίησης μέσω της συνάρτησης int1 και τη βοήθεια στρωμάτων, (γ) Περίπτωση μοντελοποίησης μέσω χωρισμού σε στρώματα σταθερής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

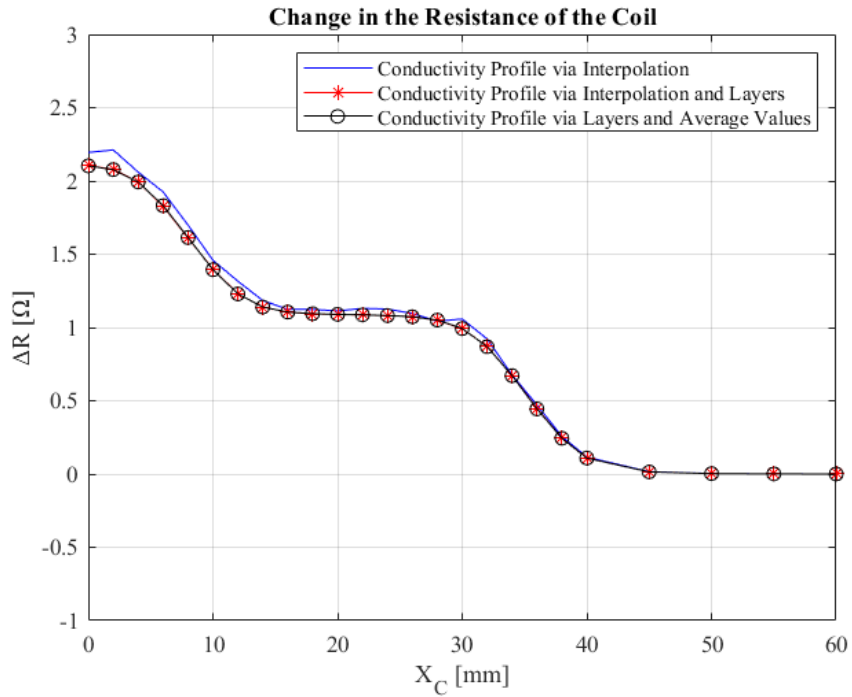
Παρατηρώντας τους χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 92 είναι εμφανές πως οι δυο περιπτώσεις στις οποίες γίνεται χωρισμός του υλικού σε στρώματα παρέχουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα στην καθορισμένη χρωματική κλίμακα, τα οποία είναι συνεχή καθ' όλο το μήκος της ζώνης συγκόλλησης. Αντιθέτως, στη περίπτωση όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης μοντελοποιείται μέσω ελεύθερου πλέγματος και τη βοήθεια της συνάρτησης int1 (Περίπτωση α) είναι εμφανές πως υπάρχουν μικρές διακυμάνσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης όπως αποκαλύπτει η χρωματική κλίμακα. Οι διακυμάνσεις αυτές πιθανότατα οφείλονται σε ασυμμετρίες του ελεύθερου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες οδηγούν σε μη ομαλή διακριτοποίηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων στα οποία θα οδηγήσει η κάθε μέθοδος για την περίπτωση μετακίνησης του πηνίου κατά μήκος επιφανειακής ασυνέχειας βάθους 1 mm η οποία βρίσκεται στο μέσο της ζώνης συγκόλλησης. Για κάθε μέθοδο θα παρουσιαστεί η μεταβολή της ωμικής αντίστασης του πηνίου, η μεταβολή της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου, καθώς επίσης και η ένδειξη στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης για την περίπτωση όπου το πηνίο/αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης.

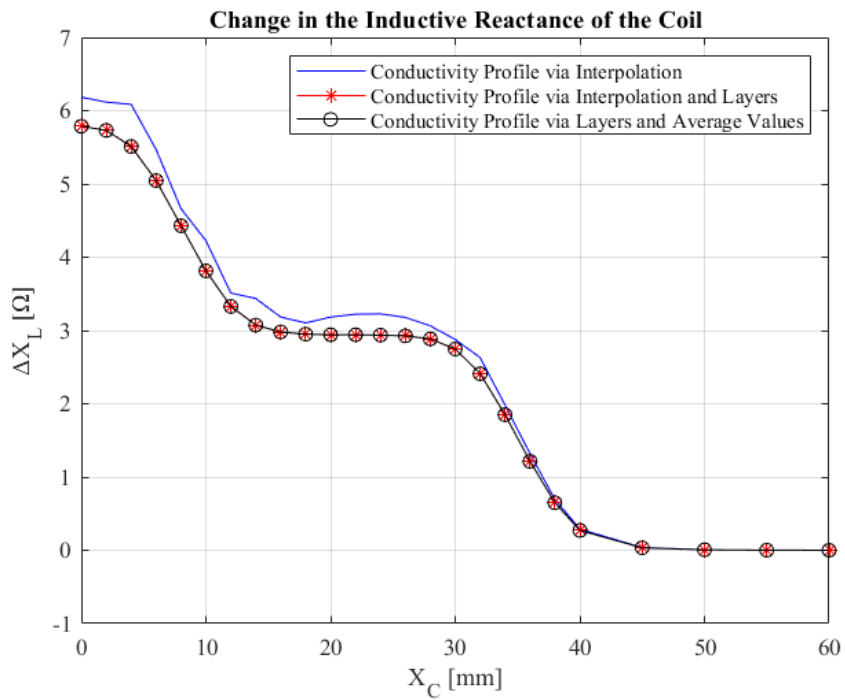
Οι παράμετροι που αφορούν το πηνίο, την ασυνέχεια αλλά και το αγώγιμο μέσο για τις ακόλουθες προσομοιώσεις παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 10, ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 94, 95 και 96.

Πίνακας 10. Βασικές παράμετροι προβλήματος.

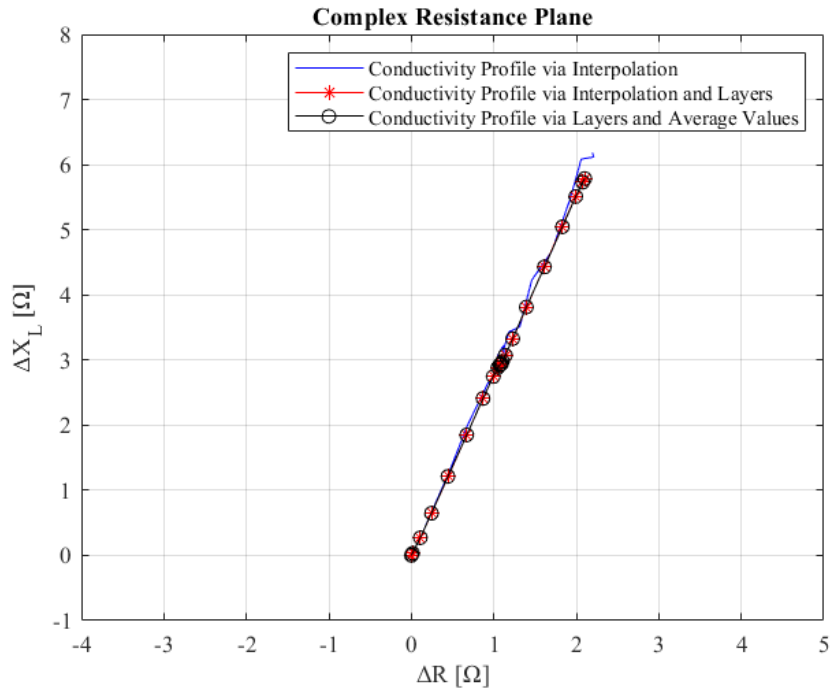
Παράμετροι πηνίου	
Εσωτερική διάμετρος	9.34 mm
Εξωτερική διάμετρος	18.04 mm
Μήκος	9 mm
Αριθμός περιελίξεων (στροφών) πηνίου	408
Ανύψωση (Lift-off)	1 mm
Συχνότητα ρεύματος πηνίου	300 kHz
Παράμετροι δοκιμίου	
Ηλεκτρική αγωγιμότητα μετάλλου βάσης	20.358 MS/m
Πάχος	12.22 mm
Παράμετροι ασυνέχειας	
Μήκος	44.40 mm
Βάθος	1 mm
Πλάτος	0.28 mm



Εικόνα 94. Μεταβολή ωμικής αντίστασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 95. Μεταβολή επαγωγικής αντίδρασης συναρτήσει της θέσης του πηνίου στην περίπτωση ύπαρξης ασυνέχειας βάθους 1 mm.



Εικόνα 96. Ένδειξη ασυνέχειας βάθους 1 mm στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι άμεσα εμφανές πως οι καμπύλες των μεθόδων μοντελοποίησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που εμπλέκουν τον χωρισμό του δοκιμίου σε στρώματα ταυτίζονται απόλυτα, με τη διαφορά μεταξύ τους να είναι της τάξης του τέταρτου δεκαδικού ψηφίου. Αντιθέτως, Στην περίπτωση όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης μοντελοποιείται μέσω ελεύθερου πλέγματος και με τη βοήθεια της συνάρτησης `int1`, τα αποτελέσματα διαφέρουν ελαφρώς από αυτά των δυο άλλων μεθόδων. Επίσης είναι εμφανής και μια έλλειψη ομαλότητας των αποτελεσμάτων αυτών, παρουσιάζοντας απότομες διακυμάνσεις κατά την αλλαγή θέσης του πηνίου. Οι διακυμάνσεις αυτές πιθανότατα οφείλονται σε ατέλειες κατά τη διακριτοποίηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της συνάρτησης.

Ελλείψει σχετικών πειραματικών δεδομένων είναι αδύνατο να αποφανθούμε για το ποια μέθοδος μοντελοποίησης των μεταβολών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα, παρόλα αυτά, η ομαλότητα των αποτελεσμάτων που παρέχονται από το χωρισμό της ζώνης συγκόλλησης σε στρώματα υποδεικνύει πως η μέθοδος αυτή αποτελεί ίσως καλύτερη επιλογή σε σχέση με τη χρήση ελεύθερου πλέγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του τέταρτου κεφαλαίου καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Αρχικά, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2., οι μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης μπορούν να επηρεάσουν αισθητά τις ενδείξεις του αισθητήρα στην περίπτωση μη ύπαρξης ασυνέχειας, με το μέγεθος των ενδείξεων να συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα ελέγχου, καθώς βρέθηκε πως η αύξηση της συχνότητας ελέγχου οδηγεί σε αύξηση του μέτρου της ένδειξης της μεταβολής της ωμικής αντίστασης του πηνίου με φθίνοντα ρυθμό, αλλά και αύξηση του μέτρου της ένδειξης της μεταβολής της επαγωγικής αντίδρασης, προτού σταθεροποιηθεί σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των -0.47Ω και των -0.52Ω .

Επιπλέον, στην περίπτωση όπου κατά μήκος του μέσου της ζώνης συγκόλλησης υφίσταται μια επιφανειακή ασυνέχεια και το πηνίο/αισθητήρας μετακινείται κατά μήκος αυτής, βρέθηκε πως στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης, η προκύπτουσα από τον έλεγχο ένδειξη είναι σε μεγάλο βαθμό παρόμοια με την παραγόμενη ένδειξη στην περίπτωση όπου η ίδια ασυνέχεια βρισκόταν στο μέταλλο βάσης. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου βάσης, η παραγόμενη ένδειξη διαφέρει από αυτή που προκύπτει στην περίπτωση όπου ο αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ζώνης συγκόλλησης κατά μέτρο ίσο με τις μεταβολές της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης που οφείλονται στις μεταβολές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης, για την ίδια συχνότητα ελέγχου. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο αισθητό αναλογικά με το εύρος της ένδειξης, όσο το βάθος της ασυνέχειας ελαττώνεται.

Παρόμοια συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο βαθμονόμησης του πηνίου εξάγονται και στην περίπτωση όπου κατά μήκος του μέσου της ζώνης συγκόλλησης υφίσταται μια υποεπιφανειακή ασυνέχεια και το πηνίο/αισθητήρας μετακινείται κατά μήκος αυτής. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνεται η απόσταση του άνω άκρου της ασυνέχειας από την επιφάνεια του δοκιμίου, η ισχύς της ένδειξης μειώνεται, με αποτέλεσμα η μετατόπιση του σήματος εξαιτίας της μεταβολής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης να αυξάνεται αναλογικά με το εύρος της ένδειξης, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 4.4.

Κατά την προσομοίωση της μετακίνησης του πηνίου κάθετα προς επιφανειακή ασυνέχεια (Ενότητα 4.5.) παρατηρήθηκε πως σε σύγκριση με το μέταλλο βάσης, στην περίπτωση της ζώνης συγκόλλησης οι ενδείξεις τόσο της μεταβολής της ωμικής αντίστασης, όσο και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου είναι πιο αδύναμες, με τη διαφορά να αυξάνεται με τη μείωση του βάθους της ασυνέχειας. Παρατηρείται επίσης μια ασυμμετρία των ενδείξεων μεταξύ της προωθούμενης και της υποχωρούσας πλευράς της ζώνης συγκόλλησης, η οποία οφείλεται στο μη συμμετρικό προφίλ ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Τέλος, σε ότι αφορά τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ εναλλακτικών μεθόδων μοντελοποίησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στη ζώνη συγκόλλησης (Ενότητα 4.6.), παρατηρήθηκε πως ο χωρισμός του δοκιμίου σε στρώματα στην περιοχή αυτή βοηθά στη δημιουργία ενός συμμετρικού και ομαλότερα στοιχισμένου πλέγματος στοιχείων σε σχέση με ένα ελεύθερο πλέγμα στοιχείων, οδηγώντας έτσι σε ομαλότερα αποτελέσματα σε ότι αφορά τις μεταβολές της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης του πηνίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δημήτριος Ι. Παντελής, Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Επιστήμη και τεχνολογία των συγκολλήσεων», Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [2] P. B. R. Singh, *A Hand Book on Friction Stir Welding*. 2012. doi: 10.13140/RG.2.1.5088.6244.
- [3] FSW-Tech, “Friction Stir Welding Handbook”.
- [4] T. Santos, P. Vilaca, and R. M. Miranda, “Electrical conductivity field analysis for evaluation of FSW joints in AA6013 and AA7075 alloys,” *Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL*, vol. 211, pp. 174–180, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.08.030.
- [5] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, and K. Nakata, “Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 415, no. 1–2, pp. 250–254, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.msea.2005.09.072.
- [6] E. Boldsai Khan, E. Corwin, A. Logar, J. McGough, W. Arbegast, “Detecting Wormholes in Friction Stir Welds from Welding Feedback Data,” *In Proceedings of the 42nd Midwest Instruction and Computing Symposium (MICS 2009)*, Rapid City, SD, USA, 17–18 Apr. 2009.
- [7] H. Shirazi, Sh. Kheirandish, and M. A. Safarkhanian, “Effect of process parameters on the macrostructure and defect formation in friction stir lap welding of AA5456 aluminum alloy,” *Measurement*, vol. 76, pp. 62–69, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.08.001.
- [8] R.S. Mishra and M.W. “Mahoney Friction Stir Welding and Processing,” Jan. 2007.
- [9] C. Mandache, D. Levesque, L. Dubourg, and P. Gougeon, “Non-destructive detection of lack of penetration defects in friction stir welds,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 17, no. 4, pp. 295–303, May 2012, doi: 10.1179/1362171812Y.0000000007.
- [10] A. Oosterkamp, L. Oosterkamp, and A. Nordeide, “‘Kissing Bond’ Phenomena in Solid-State Welds of Aluminium Alloys,” *Welding journal*, vol. 83, Aug. 2004.
- [11] S. Delrue, M. Tabatabaeipour, J. Hettler, and K. Van Den Abeele, “Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds,” *Ultrasonics*, vol. 68, pp. 71–79, May 2016, doi: 10.1016/j.ultras.2016.02.012.
- [12] R. Ruzek and M. Kadlec, “Friction stir welded structures: Kissing bond defects,” *Journal of Terraspace Science and Engineering*, vol. 6, pp. 77–83, Jan. 2014.
- [13] L. Dubourg, A. Merati, and M. Jahazi, “Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin,” *Materials & Design*, vol. 31, no. 7, pp. 3324–3330, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.02.002.
- [14] G. Bussu and P. E. Irving, “The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints,” *International Journal of Fatigue*, vol. 25, no. 1, pp. 77–88, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00038-5.
- [15] P. S. Pao, S. J. Gill, C. R. Feng, and K. K. Sankaran, “Corrosion-fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050,” *Scripta Materialia*, vol. 45, pp. 605–612, Sep. 2001, doi: 10.1016/S1359-6462(01)01070-3.
- [16] Ward W. Rietz, Jr., “Friction-Stir Welding – Heavy Inclusions in Bi-metallic welds of Al 2219/2195,” Lockheed Martin Michoud Space Systems Department 4610, P.O. Box 29304, New Orleans, LA USA 70189.

- [17] K. P. Mehta, R. Patel, H. Vyas, S. Memon, and P. Vilaça, “Repairing of exit-hole in dissimilar Al-Mg friction stir welding: Process and microstructural pattern,” *Manufacturing Letters*, vol. 23, pp. 67–70, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.mfglet.2020.01.002.
- [18] N. A. Tracy, P. O. Moore, and American Society for Nondestructive Testing, Eds., *Liquid penetrant testing*. Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1999.
- [19] Y. Morisada, T. Imaizumi, and H. Fujii, “Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding,” *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 20, no. 2, pp. 130–137, Feb. 2015, doi: 10.1179/1362171814Y.0000000266.
- [20] V. Joshi, K. Balasubramaniam, R. V. Prakash, “Study of Defects in Friction StirWelded Aa 5083 By Radiography, Ultrasonic and Phased Array Ultrasonic Technique,” *In Proceedings of the National Seminar& Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, Chennai, India, 8–10 December 2011; p. 7.
- [21] P. B. Nagy and L. Adler, “Ultrasonic evaluation of solid-state bonds,” *Materials Evaluation*, vol. 50, pp. 1328–1337, Nov. 1992.
- [22] B. R. Tittmann and B. H. Hosten, “A self-calibrating technique for the ultrasonic discrimination of solid-state welds,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 7, no. 3–4, pp. 191–197, Dec. 1988, doi: 10.1007/BF00566002.
- [23] M. Tabatabaeipour, J. Hettler, S. Delrue, and K. Van Den Abeele, “Nondestructive Ultrasonic Inspection of Friction Stir Welds,” *Physics Procedia*, vol. 70, pp. 660–663, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.071.
- [24] G. H. Thomas and J. R. Spingarn, “Ultrasonic Model for Solid State Weld Evaluation,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 8, Part A and B*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Eds. Boston, MA: Springer US, 1989, pp. 1941–1948. doi: 10.1007/978-1-4613-0817-1_246.
- [25] H. Schmidt, J. Hattel, and J. Wert, “An analytical model for the heat generation in friction stir welding,” *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, vol. 12, pp. 143–157, Jan. 2004, doi: 10.1088/0965-0393/12/1/013.
- [26] Rubtsov, V.E.; Kolubaev, E.A.; Tarasov, S.Y.; Vasilyev, P.A.; Bakshaev, V.A. “Thermography inspection of friction stir welding,” *AIP Conf. Proc.* 2014, 1623, 535–538.
- [27] T. Matikas, D. Aggelis, Θ. Ματίκας, and Δ. Αγγέλης, *NONDESTRUCTIVE TESTING*. 2015. Available: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3599>
- [28] NASA, “*PT-TE-1421 EDDY CURRENT TESTING OF AEROSPACE MATERIALS*”.
- [29] V. S. Cecco, G. Van Drunen, and F. L. Sharp, “Eddy current manual: v1,” Atomic Energy of Canada Limited, 1983.
- [30] A. A. Diaz, U.S. Nuclear Regulatory Commission, and Pacific Northwest National Laboratory (U.S.), Eds., *Assessment of eddy current testing for the detection of cracks in cast stainless steel reactor piping components*. Washington, DC: Division of Fuel, Engineering, and Radiological Research, Division of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007. Available: <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS106400>
- [31] www.comsol.com/multiphysics

