



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Μη Καταστροφικός Έλεγχος Σωλήνων Εναλλακτών Θερμότητας με τη Μέθοδο των Δινορρευμάτων

**Επιμέλεια:** Παππούτας Κυριάκος

**Επιβλέπων:** Θεοδουλίδης Θεόδωρος  
Καθηγητής Π.Δ.Μ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μη Καταστροφικός Έλεγχος Σωλήνων Εναλλακτών Θερμότητας με την Μέθοδο των Δινορρευμάτων» εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας κατά τη διάρκεια του έτους 2015.

Γενικά η ενασχόληση μου στο εργαστήριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων του TMM υπήρξε καθοριστική για το ενδιαφέρον μου για στον τομέα της Μηχανολογίας των Μη Καταστροφικών Ελέγχων και την αφετηρία της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας στον απαιτητικό κόσμο των ελέγχων. Μέσα από τη διπλωματική εργασία κατάφερα να αποκομίσω άπειρες γνώσεις και εμπειρίες απαραίτητες για τις μετέπειτα συνεργασίες που είχε το εργαστήριο με τη βιομηχανία.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις άπειρες ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Θεοδουλίδη Θεόδωρο καθώς όλα τα παραπάνω δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν χωρίς τη πολύτιμη καθοδήγησή του, τις υποδείξεις και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το εργαστήριο και να πάρω πολλά από αυτό και από τον ίδιο.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά το συνάδελφο μηχανολόγο μηχανικό κ. Κουσιδη Σάββα για την πολύτιμη βοήθεια και γνώσεις που μου παρείχε, τόσο στη διπλωματική εργασία όσο και στην ενασχόλησή μου με το εργαστήριο.

Θέλω να ευχαριστήσω επίσης το φίλο μου Ρικλαίντ Κλεάνθη Μούτσο για τη στήριξη και την βοήθεια του κατά τη διεξαγωγή της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και όλο το επιστημονικό προσωπικό του τμήματος που φοίτησα όλα αυτά τα χρόνια για τις ανεκτίμητες γνώσεις που μου προσέφεραν.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

Με εκτίμηση και σεβασμό  
Παππούτας Κυριάκος

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	I
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	II
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	VI
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	IX
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	X
ABSTRACT.....	XI
Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή.....	- 1 -
1.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι.....	- 1 -
1.2 Ιστορική αναδρομή Μη Καταστροφικών Ελέγχων.....	- 2 -
1.3 Μέθοδοι και τεχνικές Μη Καταστροφικών Ελέγχων.....	- 4 -
1.3.1 Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection – VI) .....	- 4 -
1.3.2 Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Testing – LT) .....	- 4 -
1.3.3 Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetic Particle Testing – MT).....	- 5 -
1.3.4 Μέθοδοι βασισμένες στον ηλεκτρομαγνητισμό .....	- 5 -
1.3.5 Έλεγχος με χρήση Υπερήχων (Ultrasonic Testing – UT).....	- 5 -
1.3.6 Έλεγχος με Ραδιογραφία (Radiographic Testing – RT) .....	- 6 -
1.3.7 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής (Acoustic emission monitoring) .....	- 6 -
1.3.8 Μηχανικοί Έλεγχοι .....	- 6 -
Κεφάλαιο 2: Μέθοδος των δινορρευμάτων ( ECT ).....	- 7 -
2.1 Ιστορικά στοιχεία .....	- 7 -
2.2 Αρχή Λειτουργίας.....	- 8 -
2.3 Επιδρώσες Παράμετροι.....	- 9 -
2.3.1 Αγωγιμότητα Υλικού.....	- 9 -
2.3.2 Μαγνητική Διαπερατότητα Υλικού .....	- 10 -

2.3.2 Συχνότητα .....	- 10 -
2.3.3 Γεωμετρία .....	- 11 -
2.3.4 Ανύψωση – Lift Off.....	- 11 -
2.3.5 Βάθος Διείσδυσης .....	- 11 -
2.3.6 Παράγοντας Πλήρωσης.....	- 13 -
Κεφάλαιο 3: Τεχνική του Απομακρυσμένου Πεδίου ( RFT ) .....	- 14 -
3.1 Ιστορική αναδρομή .....	- 14 -
3.2 Αρχή λειτουργίας.....	- 15 -
3.3 Επιδρώσες παράμετροι .....	- 16 -
3.3.1 Παράγοντας πλήρωσης.....	- 16 -
3.3.2 Συχνότητα και ρεύμα ελέγχου.....	- 17 -
3.3.3 Ζώνες ανίχνευσης .....	- 17 -
3.3.4 Ευαισθησία .....	- 18 -
Κεφάλαιο 4 : Εναλλάκτες θερμότητας.....	- 19 -
4.1 Αρχή λειτουργίας .....	- 19 -
4.2 Είδη εναλλακτών .....	- 19 -
Κεφάλαιο 5: Όργανο και Κεφαλές Ελέγχου .....	- 23 -
5.1 Olympus Multiscan MS5800 .....	- 23 -
5.1.1 Λογισμικό ελέγχου Multiview και απεικόνισης Carto .....	- 24 -
5.2 Κεφαλές ελέγχου για ECT.....	- 25 -
5.3 Κεφαλές ελέγχου για RFT .....	- 26 -
Κεφάλαιο 6: Πρότυπα και σωλήνες βαθμονόμησης.....	- 27 -
6.1 Πρότυπα βαθμονόμησης .....	- 28 -
6.2 Κατασκευή σωλήνων βαθμονόμησης .....	- 29 -
6.3 Σωλήνες βαθμονόμησης.....	- 32 -
6.3.1 Κατά ASME και επιπρόσθετοι σωλήνες.....	- 32 -
6.3.2 Σωλήνες βαθμονόμησης με ομοιόμορφη απομείωση πάχους .....	- 33 -



Κεφάλαιο 7: Διαδικασία και καμπύλες βαθμονόμησης.....	- 34 -
7.1 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	- 34 -
7.2 Καμπύλες βαθμονόμησης.....	- 37 -
7.2.1 Με φάση (Γωνία).....	- 37 -
7.2.2 Με πλάτος (Volts).....	- 39 -
Κεφάλαιο 8: Πρότυπα και σωλήνες βαθμονόμησης RFT.....	- 40 -
8.1 Πρότυπα βαθμονόμησης.....	- 40 -
8.2 Κατασκευή σωλήνων βαθμονόμησης.....	- 41 -
8.3 Σωλήνες Βαθμονόμησης.....	- 42 -
8.3.1 Κατά ASTM.....	- 42 -
Κεφάλαιο 9: Διαδικασία και καμπύλες βαθμονόμησης RFT.....	- 43 -
9.1 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	- 43 -
9.2 Καμπύλες βαθμονόμησης.....	- 46 -
Κεφάλαιο 10: Έλεγχος εναλλάκτη Μη Σιδηρομαγνητικού Υλικού.....	- 47 -
10.1 Περιγραφή εναλλάκτη.....	- 47 -
10.2 Σήματα από σωλήνες που πάρθηκαν με την καμπύλη Φάσης.....	- 48 -
10.3 Σήματα από σωλήνες που πάρθηκαν με την καμπύλη Πλάτους.....	- 69 -
Κεφάλαιο 11: Έλεγχος εναλλάκτη Σιδηρομαγνητικού Υλικού.....	- 87 -
11.1 Περιγραφή εναλλάκτη.....	- 87 -
11.2 Σήματα Σιδηρομαγνητικού Εναλλάκτη.....	- 88 -
Κεφάλαιο 12: Ανάλυση σημάτων και απεικόνιση με χρήση του Carto για τον Εναλλάκτη(1) -	115 -
12.1 Χάρτης ελέγχου.....	- 115 -
12.2 Χαρακτηρισμός σφαλμάτων.....	- 116 -
12.3 Στατιστικά ελέγχου.....	- 118 -
Κεφάλαιο 13: Ανάλυση σημάτων και απεικόνιση με χρήση του Carto για τον Εναλλάκτη(2) -	119 -
13.1 Χάρτης ελέγχου.....	- 119 -
13.2 Χαρακτηρισμός σφαλμάτων.....	- 120 -

13.3 Στατιστικά ελέγχου.....	- 121 -
Κεφάλαιο 14: Συνεργασίες .....	- 122 -
14.1 Έλεγχος με RFT .....	- 122 -
14.2 Έλεγχος με ECT .....	- 125 -
Κεφάλαιο 15: Συμπεράσματα και θέματα που χρήζουν έρευνας .....	- 128 -
15.1 Συμπεράσματα .....	- 128 -
15.2 Θέματα που χρήζουν έρευνας .....	- 129 -
Βιβλιογραφία.....	- 130 -
Ιστοσελίδες και Link.....	- 130 -
Λογισμικά .....	- 131 -

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος σε αγώγιμη πλάκα.[18] .....	- 8 -
Σχήμα 2: Επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος σε αγώγιμη πλάκα όταν υπάρχει ρωγμή [18] .....	- 8 -
Σχημα 3: Παράλληλες και κάθετες με τη ροή των δινορρευμάτων ρωγμές [16].....	- 8 -
Σχημα 4: Παράλληλες και κάθετες με τη ροή των δινορρευμάτων σε σωλήνα ρωγμές [17] .....	- 9 -
Σχήμα 5: Τυποποιημένο βάθος διείσδυσης [15].....	- 11 -
Σχήμα 6: Επίδραση της συχνότητας στο πρότυπο βάθος διείσδυσης [14].....	- 12 -
Σχήμα 7: Επίδραση της αγωγιμότητας (υλικό) και της συχνότητας στο πρότυπο βάθος διείσδυσης [16] .....	- 13 -
Σχήμα 8: Τυπική κεφαλή ελέγχου με τη μέθοδο RFT [17] .....	- 16 -
Σχήμα 9: Οι ζώνες στην τεχνική του Απομακρυσμένου Πεδιου [8] .....	- 18 -
Σχήμα 10: Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου αντιρροής όπου φαίνονται και οι διαδρομές των ρευστών[7].....	- 20 -
Σχήμα 11: Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου ομορροής όπου παρουσιάζονται οι διαδρομές των ρευστών[7].....	- 20 -
Σχήμα 12: Εναλλάκτης κελύφους με αναστρεφόμενους σωλήνες (σχήματος U)[7] .....	- 21 -
Σχήμα 13: Ειδικός εναλλάκτης κελύφους με τρεις διαδρομές σωληνώσεων, όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών [7].....	- 21 -
Σχήμα 14: Σχηματική παράσταση πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας με πλάκες πλαισίου όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών[7] .....	- 21 -
Σχήμα 15: Συμπαγής εναλλάκτης ατμού – αέρα, που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας σε μονάδες παραγωγής ατμού[7] .....	- 22 -
Σχήμα 16: Olympus Multiscan MS5800 .....	- 23 -
Σχήμα 17: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Multiview [12].....	- 24 -
Σχήμα 18: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Carto [13] .....	- 24 -
Σχήμα 19: Κωδικοποίηση κεφαλής ECT.....	- 25 -
Σχήμα 20: Κεφαλή bobbin probe για εσωτερικό έλεγχο σωληνώσεων μη σιδηρομαγνητικού υλικού.....	- 25 -
Σχήμα 21: Κεφαλή ελέγχου ECT μαζί με καλώδιο ελέγχου για τη σύνδεση με το όργανο .....	- 26 -
Σχήμα 22: Κωδικοποίηση κεφαλής RFT.....	- 26 -
Σχήμα 23: Κεφαλή μονής διέγερσης για εσωτερικό έλεγχο σωληνώσεων σιδηρομαγνητικού υλικού .....	- 27 -
Σχήμα 24: Κεφαλή ελεγχού RFT μαζί με καλώδιο ελέγχου για τη σύνδεση με το όργανο .....	- 27 -
Σχήμα 25: Asme V Art 8 ET - Appendix I [10].....	- 28 -
Σχήμα 26: Τυπικό σήμα βαθμονόμησης βάσει του προτύπου Asme[10].....	- 28 -
Σχήμα 27: Διάταξη τόννου Alfa machinery-tools AL700x280v.....	- 30 -
Σχήμα 28: Διάταξη σταθερού κολονάτου δραπάνου DF20HM .....	- 30 -
Σχήμα 29: Διάταξη κάθετης φρέζας Ajax .....	- 31 -

Σχήμα 30: Διάταξη πριονιού Alfa cut .....	- 31 -
Σχήμα 31: Σωλήνες βαθμονόμησης κατά Asme και επιπρόσθετοι σωλήνες.....	- 32 -
Σχήμα 32: Σωλήνες βαθμονόμησης με ομοιόμορφη απομείωση πάχους.....	- 33 -
Σχήμα 33: Βαθμονόμηση ECT βήμα 1 [12] .....	- 34 -
Σχήμα 34: Βαθμονόμηση ECT βήμα 2 [12] .....	- 34 -
Σχήμα 35: Βαθμονόμηση ECT βήμα 3 [12] .....	- 35 -
Σχήμα 36: Βαθμονόμηση ECT βήμα 4 [12] .....	- 35 -
Σχήμα 37: Βαθμονόμηση ECT βήμα 5 [12] .....	- 36 -
Σχήμα 38: Βαθμονόμηση ECT βήμα 6 [12] .....	- 36 -
Σχήμα 39: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση D90 [12] .....	- 38 -
Σχήμα 40: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση A90 [12] .....	- 38 -
Σχήμα 41: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση MIX[12] .....	- 38 -
Σχήμα 42: Καμπύλη βαθμονόμησης με πλάτος A90/2 [12] .....	- 39 -
Σχήμα 43: Προτυπο Astm [11] .....	- 40 -
Σχήμα 44: Σήμα πλάκας στήριξης στραμμένο στις 0°(7) [12].....	- 40 -
Σχήμα 45: Σωλήνες βαθμονόμησης κατα ASTM .....	- 42 -
Σχήμα 46 : Βαθμονόμηση RFT βήμα 1 [12] .....	- 43 -
Σχήμα 47 : Βαθμονόμηση RFT βήμα 2 [12] .....	- 43 -
Σχήμα 48: Βαθμονόμηση RFT βήμα 3 [12] .....	- 44 -
Σχήμα 49: Βαθμονόμηση RFT βήμα 4 [12] .....	- 44 -
Σχήμα 50: Βαθμονόμηση RFT βήμα 5 [12] .....	- 45 -
Σχήμα 51: Βαθμονόμηση RFT βήμα 6 [12] .....	- 45 -
Σχήμα 52: Καμπύλη βαθμονόμησης D90 [12] .....	- 46 -
Σχήμα 53: Καμπύλη βαθμονόμησης A90 [12] .....	- 46 -
Σχήμα 54: Εναλλάκτης Μη σιδηρομαγνητικού υλικού .....	- 47 -
Σχήμα 55: Διάταξη ελέγχου εναλλάκτη με ECT .....	- 47 -
Σχήμα 56: Διάταξη ελέγχου με RFT .....	- 87 -
Σχήμα 57: Εναλλάκτης σιδηρομαγνητικού υλικού .....	- 87 -
Σχήμα 58: Χάρτης ελέγχου ECT[13] .....	- 115 -
Σχήμα 59: Χαρακτηρισμός σφαλμάτων με ECT (1)[13] .....	- 116 -
Σχήμα 60: Χαρακτηρισμός σφαλμάτων με ECT (2)[13] .....	- 117 -
Σχήμα 61: Στατιστικά ελέγχου με ECT[13].....	- 118 -
Σχήμα 62: Χάρτης ελέγχου RFT[13] .....	- 119 -
Σχήμα 63: Χαρακτηρισμός σφαλμάτων με RFT[13] .....	- 120 -
Σχήμα 64: Στατιστικά ελέγχου με RFT[13].....	- 121 -

Σχήμα 65: Βιομηχανικός λέβητας υψηλής πίεσης .....	- 122 -
Σχήμα 66: Αυλοί όπως φαίνονται από κάτω ανθρωποθυρίδα .....	- 123 -
Σχήμα 67: Αυλοί όπως φαίνονται από πάνω ανθρωποθυρίδα .....	- 123 -
Σχήμα 68: Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε( TC5700 & MS5800) .....	- 124 -
Σχήμα 69: Βιομηχανικός εναλλάκτης θερμότητας( συμπυκνωτής - ψυγείο).....	- 125 -
Σχήμα 70: Βιομηχανικός εναλλάκτης θερμότητας( συμπυκνωτής - ψυγείο)[9] .....	- 125 -
Σχήμα 71: Καθρέπτης ψυγείου και πλάκες στήριξης[9].....	- 126 -
Σχήμα 72: Αυλοί βαθμονόμησης.....	- 126 -
Σχήμα 73: Εξοπλισμός ελέγχου Multiscan Olympus MS5800 .....	- 127 -
Σχήμα 74: Απεικόνιση σφαλμάτων κάθε σωλήνα μετά από χαρακτηρισμό του με το Carto[9] .....	- 127 -

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΗΜΑΤΩΝ

### ECT - Φάση

1	BR2325A.....	- 48 -
2	BR2325B.....	- 51 -
3	BR2325E.....	- 48 -
4	BR2325I.....	- 54 -
5	BR2325J.....	- 54 -
6	BR2325K.....	- 57 -
7	BR2325L.....	- 57 -

### ECT – Πλάτος

1	BR2325C.....	- 69 -
2	BR2325D.....	- 72 -
3	BR2325F.....	- 75 -
4	BR2325G.....	- 78 -
5	BR2325H.....	- 81 -
6	BR2325M.....	- 84 -

### RFT

1.	CS18145 A.....	- 88 -
2.	CS18145 B.....	- 91 -
3.	CS18145 C.....	- 94 -
4.	CS18145 D.....	- 97 -
5.	CS18145 E.....	- 100 -
6.	CS18145 F.....	- 103 -
7.	CS18145 G.....	- 106 -
8.	CS18145 H.....	- 109 -
9.	CS18145 I.....	- 112 -

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά μιλάμε γενικά για την επιστήμη των Μη Καταστροφικών Ελέγχων και μετέπειτα δείχνουμε πως αξιοποιήσαμε δυο από τις τέσσερις δυνατότητες που έχει ο εργαστηριακός εξοπλισμός (MS5800) για εσωτερικό έλεγχο σωλήνων εναλλακτών θερμότητας. Εξετάζουμε τη μέθοδο των Δινορρευμάτων (ECT) και τη μέθοδο του Απομακρυσμένου Πεδίου (RFT) αναλύοντας, την αρχή λειτουργίας των δυο μεθόδων και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν.

Αναφέρουμε λίγα λόγια για τους εναλλάκτες θερμότητας και τα είδη που υπάρχουν, όπως και για τα πρότυπα ελέγχου που απαιτούνται για τον έλεγχό τους.

Για τις ανάγκες των μετρήσεων κατασκευάστηκαν 2 πανομοιότυποι εναλλάκτες, αποτελούμενοι από 20 σωλήνες έκαστος, ο ένας Μη Σιδηρομαγνητικού Υλικού για την μέθοδο ECT και ο άλλος Σιδηρομαγνητικού Υλικού για την μέθοδο RFT. Σε ορισμένους από τους σωλήνες και στους δυο εναλλάκτες κατασκευάστηκαν διάφορα σφάλματα που ενδέχεται να συναντήσουμε σε ελέγχους στην βιομηχανία αλλά και σωλήνες βαθμονόμησης που είναι απαραίτητοι για τη διεξαγωγή του ελέγχου και την εγκυρότητά του.

Μετέπειτα παρουσιάζονται αναλυτικά τα σήματα που πήραμε από τον κάθε σωλήνα ξεχωριστά στα δυο διαφορετικά κανάλια ( Απόλυτο – Διαφορικό) και στο τέλος παρουσιάζονται σε ένα χάρτη ελέγχου μαζί με στατιστικά στοιχεία για τον κάθε έλεγχο ξεχωριστά.

Επίσης αναφέρουμε τις συνεργασίες που είχαμε με την βιομηχανία στο πλαίσιο της συνεργασίας που έχει το εργαστήριο.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των συμπερασμάτων και την παρουσίαση θεμάτων που χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

## **ABSTRACT**

In this diplomathesis we initially talk about the science of Non-Destructive Testing and later we show how we utilized two of the four capabilities of the laboratory equipment (MS5800) for internal control of heat exchanger tubes. We examine the method of Eddy Current Testing (ECT) and the method of Remote Field Testing (RFT) analyzing the working principle of the two methods and the factors affecting them.

We mention a few words about the heat exchangers and the types that are available, as well as for the control standards required for their control.

For the needs of the measurements two identical heat exchangers were made, consisting of 20 tubes each, the first out of non-ferromagnetic material for the ECT method and the other out of ferromagnetic material for the method RFT. In some of the tubes in both exchangers various errors were constructed that may met in industrial inspections.

Subsequently we are presenting in detail the signals we received from each tube separately on the two different channels (Absolute - Differential) and at the end in a control map are presented with the statistics for each test separately.

Also, we mention the cooperation we had with the industry in the context of the cooperation of the university workshop.

The work concludes with a statement of the findings/conclusions and presentation of issues that need further investigation.



# Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή

## 1.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι

**Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι** (NDI - Non Destructive Inspection) ή **Μη Καταστροφικές Δοκιμές** (NDT - Non Destructive Testing) ή **Μη Καταστροφικές Αξιολογήσεις** (NDE - Non Destructive Evaluation) ονομάζονται οι έλεγχοι που δεν καταστρέφουν το εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας στην κατασκευή και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής [1].

Ο αντικειμενικός σκοπός μας ως μηχανικοί είναι να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα των ΜΚΕ με τη θεωρία της Θραυστομηχανικής ώστε να προβλέψουμε την επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού. Οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των ελαττωμάτων σε μια κατασκευή χωρίς όμως να την καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητά της [1]. Με τη συνδυασμένη χρήση των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου (ΜΚΕ) και της Θραυστομηχανικής μπορούμε να είμαστε συνεχώς ενήμεροι για την καλή «υγεία» μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής και καλής λειτουργίας της (Residual Lifetime) [1].

Οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο (ΚΕ) καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου [1].

Η μεγάλη αξία των ΜΚΕ οφείλεται στο ότι:

- Μπορεί να εφαρμόζεται σε όλες τις φάσεις, δηλαδή του σχεδιασμού, της κατασκευής, του ποιοτικού ελέγχου, της εγκατάστασης και της συντήρησης μιας κατασκευής.
- Μπορεί να ανιχνεύει και να προσδιορίζει ελαττώματα που υπάρχουν στο εσωτερικό ή την επιφάνεια όλων των υλικών, τα οποία αποτελούν τις αιτίες της αστοχίας τους, να υπολογίζουν τις διαστάσεις των κατασκευών και σε πολλές περιπτώσεις, τις μηχανικές, ακουστικές, ηλεκτρικές καθώς και τις μαγνητικές ιδιότητές τους.
- Είναι ακίνδυνος για τα υλικά, για τον άνθρωπο και το περιβάλλον [2].

Οι μέθοδοι ΜΚΕ αναπτύχθηκαν με ραγδαίους ρυθμούς μετά το 2ο παγκόσμιο πόλεμο, έτσι ώστε σήμερα να έχουν φθάσει σε υψηλό επίπεδο. Οι εφαρμογές τους πλέον καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, οι κατασκευές, οι εγκαταστάσεις πετροχημικών, πυρηνικών και παραγωγής ρεύματος, τα ορυχεία, ο σιδηρόδρομος, οι αγωγοί αερίου και πετρελαίου, τα πάρκα αναψυχής καθώς και η ιατρική [2].

## **1.2 Ιστορική αναδρομή Μη Καταστροφικών Ελέγχων**

Κατά τα μέσα του 19ου αιώνα, με την έξαρση της Βιομηχανικής Επανάστασης, άρχισαν να παρατηρούνται πολλές καταστροφές στις πλέον καταπονούμενες κατασκευές, όπως ήταν τα δοχεία πίεσης (σε ατμομηχανές και εργοστάσια), οι άξονες, οι σιδηροτροχιές και οι γέφυρες των σιδηροδρόμων.

Η πρώτη μεγάλη σιδηροδρομική καταστροφή, από την αστοχία ενός άξονα, συνέβη στις Βερσαλλίες (Παρίσι) το Μάιο του 1842 με δεκάδες νεκρούς. Μια άλλη αστοχία υλικού και η θραύση του προκάλεσε την καταστροφή της σιδηροδρομικής γέφυρας Tay.

Εξαιρώντας ορισμένες αστοχίες που οφείλονταν σε σχεδιαστικά λάθη, ο κύριος λόγος της αστοχίας αυτών των κατασκευών ήταν οι ατέλειες στο υλικό τους και η διαρκής καταπόνηση (κόπωση) που είχαν υποστεί.

Ο πολιτικός μηχανικός William Rankine (1820-1872) δημοσίευσε περί τα 1843 τις διαπιστώσεις του σχετικά με τη βαθμιαία φθορά και γήρανση του υλικού και την συσσώρευση τάσεων και εμφάνιση ρωγμών στις αιχμηρές γωνίες, πρότεινε δε μεγαλύτερες καμπυλότητες στα σημεία αυτά. Σαν πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των αστοχιών, βελτιώθηκαν οι μέθοδοι παραγωγής και, κατά συνέπεια, η ποιότητα των υλικών.

Αυτό μείωσε κάπως τη συχνότητα των βλαβών καθώς καθυστερούσε περισσότερο την εμφάνισή τους και βελτίωσε την αξιοπιστία των συγκεκριμένων κατασκευών [3].

Κλείνοντας την ιστορική ανασκόπηση, κρίνουμε απαραίτητο να αναφέρουμε συνοπτικά μερικά αξιοσημείωτα γεγονότα που άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη του Μη Καταστροφικού ελέγχου. Συγκεκριμένα:

- 1854: Δυστύχημα από αστοχία πιεστικού δοχείου με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut. 10 χρόνια μετά ψηφίζεται νόμος για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους.
- 1895: Ο Wilhelm Conrad Röntgen ανακαλύπτει τις γνωστές πλέον Ακτίνες-Χ και στην ανακοίνωσή του αναφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού ελαττωμάτων.
- 1880 – 1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με Διεισδυτικό Υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος (το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παράμεινε σε τυχόν ρωγμές βγαίνει προς τα έξω).
- 1920: Ο Δρ. H. H. Lester αναπτύσσει τη βιομηχανική Ραδιογραφία των μετάλλων.
- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο Δινορρευμάτων που μετρά το πάχος υλικού.
- 1927–1928: Το πρώτο σύστημα Μαγνητικής Επαγωγής εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές.
- 1940 – 1944: Αναπτύσσεται η μέθοδος Υπερήχων από τον Δρ. Floyd Firestone.
- 1950: Ο J. Kaiser εισάγει την μέθοδο ΜΚΕ των Ακουστικών Εκπομπών [3].

## **1.3 Μέθοδοι και τεχνικές Μη Καταστροφικών Ελέγχων**

### **1.3.1 Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection – VI)**

Ο πιο απλός τρόπος ελέγχου μια κατασκευής είναι ο οπτικός έλεγχος. Ο οπτικός έλεγχος καταδεικνύει τα εμφανή ελαττώματα μιας κατασκευής, δηλαδή αυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του υλικού και έχουν ορατό μέγεθος. Τόσο η διαδικασία όσο και ο εξοπλισμός του δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις και μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλα τα υλικά και τις κατασκευές. Οι κατηγορίες οπτικού ελέγχου είναι:

- Οπτικός έλεγχος
- Οπτικός έλεγχος με Μικροσκόπιο
- Οπτικός έλεγχος με Βιντεοσκόπηση
- Οπτικές μέθοδοι με Laser
- Ολογραφία
- Συμβολομετρία
- Δυναμικός έλεγχος Επιφανείας[2]

### **1.3.2 Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Testing – LT)**

Ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά είναι μια παραδοσιακή μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου για την ανίχνευση ατελειών που φθάνουν στην ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου, όπως ρωγμές ή πόροι σε σχετικά μη πορώδη υλικά. Η επιθεώρηση γίνεται με εφαρμογή ενός ρευστού το οποίο διαπερνά τις επιφανειακές ατέλειες του υλικού. Το επιπλέον ρευστό αφαιρείται και μετά την εφαρμογή κατάλληλου διαλύματος παραμένει ποσότητα ρευστού μόνο μέσα στα σημεία των ατελειών, επιτρέποντας τη χάραξη των περιγραμμάτων των ατελειών. Η ανίχνευση των ατελειών πραγματοποιείται είτε οπτικά από τη χρωματική διαφορά είτε με χρήση μαύρου φωτός. Οι κατηγορίες ελέγχου με διεισδυτικά υγρά είναι:

- Έλεγχος με Διεισδυτικά Ορατού Φωτισμού
- Έλεγχος με Φθορίζοντα Διεισδυτικά [2]

### **1.3.3 Μαγνητικές μέθοδοι (Magnetic Particle Testing – MT)**

Ο μαγνητικός έλεγχος βασίζεται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί και περιέχει μια ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται. Οι κατηγορίες με μαγνητικές μεθόδους είναι:

- Έλεγχος Θορύβου Barkhausen
- Έλεγχος Μαγνητικό Μελάني/Σκόνη
- Έλεγχος με Μαγνητικά Σωματίδια
- Μαγνητογραφία
- Μαγνητική Διαρροή (Magnetic Flux Leakage – MFL) [2]

### **1.3.4 Μέθοδοι βασισμένες στον ηλεκτρομαγνητισμό**

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι εκείνες που βασίζονται στην παρατήρηση και μέτρηση των διάφορων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, τα οποία αναπτύσσονται στα δοκίμια με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων. Οι κατηγορίες που βασίζονται στο μαγνητισμό είναι:

- Δινορρεύματα (Eddy - Current)
- Απομακρυσμένου Πεδίου (Remote Field Testing – RFT)
- Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop) [2]

### **1.3.5 Έλεγχος με χρήση Υπερήχων (Ultrasonic Testing – UT)**

Ο ΜΚΕ με υπερήχους βασίζεται στη διαταραχή του εκπεμπόμενου στο υλικό κύματος λόγω της ύπαρξης ατελειών. Τα κύματα των ήχων και υπερήχων διαδίδονται μέσα στα υλικά, υφίστανται απόσβεση και ανακλώνται, διαθλώνται ή σκεδάζονται όταν συναντούν εμπόδια ή ασυνέχειες, ανάλογα με τη συχνότητά τους. Έτσι το ηχητικό κύμα που φτάνει στο δέκτη και ακολούθως μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα έχει σχετικά χαμηλότερη ένταση. Την ιδιότητα αυτή τη χρησιμοποιούμε για να εντοπίσουμε τυχόν ατέλειες στο εσωτερικό ενός σώματος χωρίς να το τεμαχίσουμε. Οι κατηγορίες με χρήση υπέρηχου είναι:

- Τεχνικές Ανάκλασης
- Τεχνικές Περιθλάσης (Time of Flight Diffraction Ultrasonic – TOFD)
- Συστοιχίες Φάσης Υπερήχων (Phased Array Ultrasonic)
- Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System – IRIS)

- Μέθοδοι υπερήχων με Laser (Laser Ultrasonic LUT)
- Καθοδηγούμενα κύματα υπερήχων (Guided Ultrasonic Waves)
- Τεχνικές NEWS (Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy) [2]

### **1.3.6 Έλεγχος με Ραδιογραφία (Radiographic Testing – RT)**

Η μέθοδος βασίζεται στην προσβολή της ελεγχόμενης επιφάνειας με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που διέρχεται δια μέσου της μάζας του δομικού στοιχείου. Έτσι λαμβάνονται ακτινογραφίες του εξεταζόμενου αντικειμένου και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε φίλμ είτε σε άλλο μέσο αποτύπωσης. Οι κατηγορίες ελέγχου με ραδιογραφία είναι:

- Με Ακτίνες Χ (X-Rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma Rays)
- Με Υποατομικά Σωματίδια (Neutron Radiography)
- Ψηφιακή Ραδιογραφία - Τομογραφία (Computed Tomography)
- SCAR (Small Controlled Area Radiography) [2]

### **1.3.7 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής (Acoustic emission monitoring)**

Για τον εντοπισμό εσωτερικών και επιφανειακών ατελειών χρησιμοποιούνται τα μεταβατικά τασικά κύματα που δημιουργούνται στο υλικό λόγω απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Η Ακουστική Εκπομπή, ως μέθοδος ΜΚΕ βασίζεται στη μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα με τη χρήση κατάλληλων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που διεγείρονται σε συχνότητες υπερήχων από 25 ως 1200 kHz. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής και το ηλεκτρικό σήμα που λαμβάνεται ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία [2].

### **1.3.8 Μηχανικοί Έλεγχοι**

Οι κατηγορίες μηχανικών ελέγχων είναι:

- Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic – Impact)
- Θερμογραφικός Έλεγχος (Thermo Graphic Inspection)
- Μέθοδοι Μηχανικής Αντίστασης (Mechanical Impedance)
- Έλεγχοι Ταλαντώσεων (Vibration Monitoring) [2]

## Κεφάλαιο 2: Μέθοδος των δινορρευμάτων ( ECT )

### 2.1 Ιστορικά στοιχεία

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

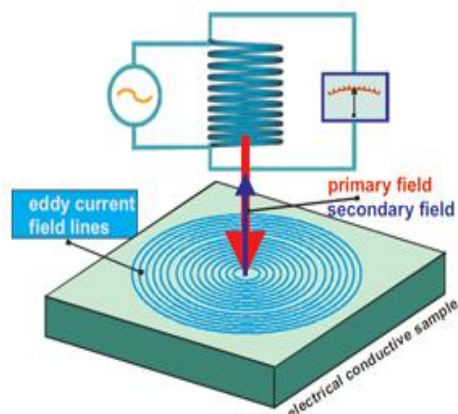
Ο έλεγχος με δινορρεύματα ξεκίνησε, κατά ένα μεγάλο μέρος, με την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής το 1831 από τον Άγγλο επιστήμονα Μάικλ Φάραντεϊ (Michael Faraday). Ο Φάραντεϊ ανακάλυψε ότι όταν ένα μαγνητικό πεδίο περνά μέσα από έναν αγωγό (δηλαδή σε υλικό που είναι εύκολη η κίνηση των ηλεκτρονίων)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

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

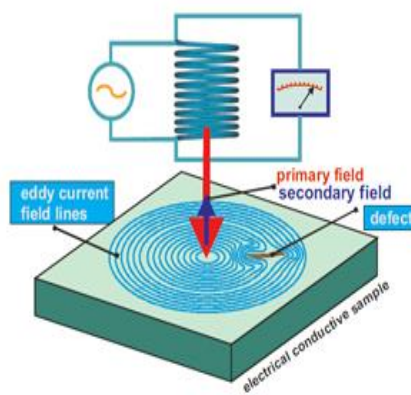
Στις αρχές του 1933, ο Γερμανός καθηγητής Φρίντριχ Φόρστερ (Friedrich Forster), εργαζόμενος για το ίδρυμα Κάιζερ – Γουλιέλμος (Kaiser – Wilhelm), προσάρμοσε την τεχνολογία δινορρευμάτων στη βιομηχανία και ανέπτυξε όργανα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας και για την ταξινόμηση αναμιγμένων σιδηρούχων συστατικών.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

## 2.2 Αρχή Λειτουργίας

Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα περνάει μέσα από ένα πηνίο πολύ κοντά σε ένα αγώγιμο δοκίμιο (Σχήμα 1) το μαγνητικό πεδίο του πηνίου θα προκαλέσει δινορρεύματα σε εκείνο το δοκίμιο. Το μέγεθος και η φάση των δινορρευμάτων θα έχει επιπτώσεις στο φορτίο του πηνίου και κατ' επέκταση στη σύνθετη αντίστασή του. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι υπάρχει μια βαθιά ρωγμή στην επιφάνεια αμέσως κάτω από το πηνίο (Σχήμα 2). Αυτό θα μειώσει τη ροή των δινορρευμάτων, μειώνοντας έτσι τη σύνθετη αντίστασή του πηνίου. Αυτή είναι η βάση του ελέγχου με δινορρεύματα.

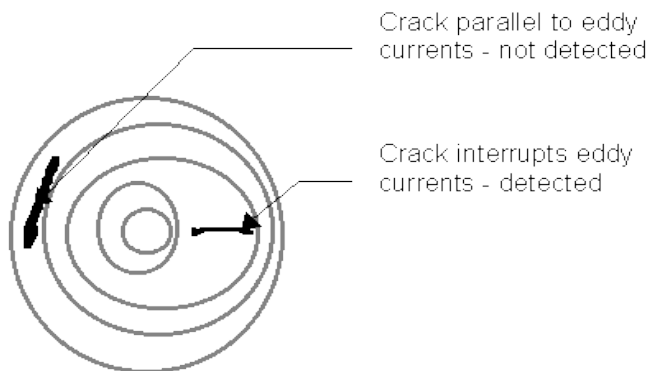


Σχήμα 1: Επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος σε αγώγιμη πλάκα [18].



Σχήμα 2: Επίδραση εναλλασσόμενου ρεύματος σε αγώγιμη πλάκα όταν υπάρχει ρωγμή [18].

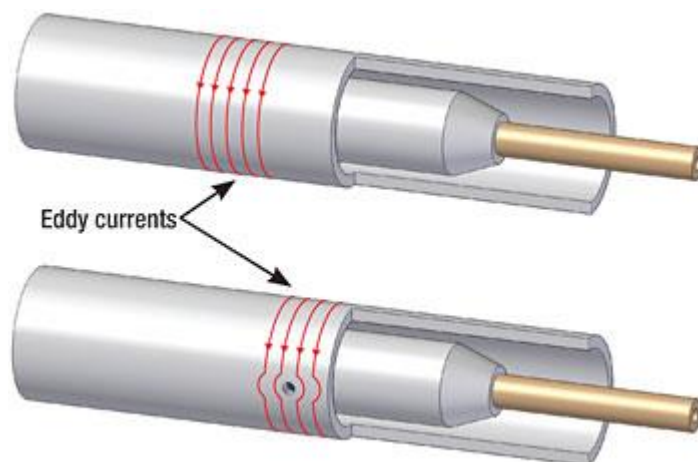
Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ρωγμές πρέπει να διακόψουν τη ροή των δινορρευμάτων στην επιφάνεια για να ανιχνευθούν. Οι ρωγμές που βρίσκονται παράλληλες στην πορεία των δινορρευμάτων δεν θα προκαλέσουν σημαντική διακοπή και δεν μπορούν να ανιχνευθούν ευκολά (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Παράλληλες και κάθετες με τη ροή των δινορρευμάτων ρωγμές [16].



Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο το συναντάμε και σε έλεγχο που κάνουμε σε σωλήνες (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Παράλληλες και κάθετες με τη ροή των δινορρευμάτων σε σωλήνα ρωγμές [17].

## 2.3 Επιδρώσεις Παράμετροι

Διάφοροι παράγοντες, εκτός από τις ρωγμές, έχουν επιπτώσεις στα αποτελέσματα των δινορρευμάτων. Η επιτυχής αξιολόγηση των ρωγμών ή οποιονδήποτε από αυτούς τους παράγοντες στηρίζεται στη σταθεροποίηση τους ή στην εξάλειψη της επίδρασής τους στα αποτελέσματα. Αυτή η καταστολή της ανεπιθύμητης αντίδρασης αποτελεί τη βάση ενός μεγάλου μέρους της τεχνικής ανίχνευσης ρωγμών με δινορρεύματα. Οι κύριοι παράγοντες αναλύονται παρακάτω.

### 2.3.1 Αγωγιμότητα Υλικού

Η αγωγιμότητα ενός υλικού έχει μια πολύ άμεση επίδραση στη ροή των δινορρευμάτων: όσο μεγαλύτερη η αγωγιμότητα ενός υλικού, τόσο μεγαλύτερη η ροή των δινορρευμάτων στην επιφάνεια. Η αγωγιμότητα μετριέται συχνά με μια τεχνική δινορρευμάτων και μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα για τους διαφορετικούς παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην αγωγιμότητα, όπως η σύνθεση του υλικού, η θερμική επεξεργασία, η μέθοδος σκλήρυνσης κλπ.

### 2.3.2 Μαγνητική Διαπερατότητα Υλικού

Το μέγεθος αυτό περιγράφει την ευκολία με την οποία ένα υλικό μπορεί να μαγνητιστεί. Για τα μη σιδηρούχα μέταλλα όπως ο χαλκός, ο ορείχαλκος, το αλουμίνιο κλπ., και για τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες η διαπερατότητα είναι η ίδια με αυτήν του κενού, δηλ. η σχετική διαπερατότητα ( $\mu_r$ ) είναι ίση με τη μονάδα.

Για τα σιδηρούχα μέταλλα εντούτοις η τιμή του ( $\mu_r$ ) μπορεί να είναι αρκετές εκατοντάδες, και αυτό έχει μια πολύ σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα των δινορρευμάτων. Επιπλέον δεν είναι ασυνήθιστο η διαπερατότητα να ποικίλει πολύ μέσα σε ένα μέταλλο λόγω τοπικών τάσεων, αποτελεσμάτων θέρμανσης κλπ.

### 2.3.2 Συχνότητα

Τα δινορρεύματα επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την συχνότητα που επιλέγεται, η οποία είναι μια ιδιότητα που μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί. Γενικά, στον έλεγχο σωλήνων η επιλογή της συχνότητας βασίζεται αφενός στον ικανοποιητικό διαχωρισμό φάσης μεταξύ των ατελειών από άλλες ανεπιθύμητες ενδείξεις (π.χ. σήματα λόγω κλυδωνισμού) και αφετέρου στο διαχωρισμό μεταξύ των σημάτων από εσωτερικές και εξωτερικές ατέλειες. Συνηθίζεται όμως σε μία επιθεώρηση να ακολουθείται κάποια προδιαγεγραμμένη διαδικασία. Για παράδειγμα κατά το πρότυπο ASME ο έλεγχος με διαφορική κεφαλή απαιτεί τέτοια ρύθμιση των παραμέτρων του οργάνου και κατά συνέπεια και της συχνότητας ώστε το σήμα από την κίνηση της κεφαλής (κλυδωνισμός- θόρυβος) να παρίσταται οριζόντια στην οθόνη, η φάση του σήματος από μία διαμπερή σπή να απέχει περίπου 40° από την οριζόντια κατά την ωρολογιακή φορά και η ένδειξη από ένα σφάλμα στο εξωτερικό του σωλήνα βάθους 20% του πάχους του τοιχώματος να απέχει από 50°-90° από το σήμα της σπής κατά την ωρολογιακή φορά.

Η συχνότητα που περιγράφεται πιο πάνω είναι η  $f_{90}$  και υπολογίζεται από τον τύπο

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

όπου

$\sigma$ : αγωγιμότητα του υλικού σε IACS%

$d$ : πάχος τοιχώματος του υπό επιθεώρηση σωλήνα σε mm

### 2.3.3 Γεωμετρία

Σε ένα πραγματικό δοκίμιο, π.χ. κάποιο που δεν είναι επίπεδο ή δεν έχει άπειρο μέγεθος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως η κυρτότητα, οι άκρες, τα αυλάκια κλπ. θα υπάρχουν και θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα των δινορρευμάτων. Οι τεχνικές δοκιμής πρέπει να αναγνωρίσουν το ότι, παραδείγματος χάριν στον έλεγχο για ρωγμές στα άκρα του δοκιμίου, το πηνίο ελέγχου θα πρέπει να κινηθεί παράλληλα και κατά μήκος των ορίων έτσι ώστε οι μικρές αλλαγές να μπορούν να φανούν εύκολα.

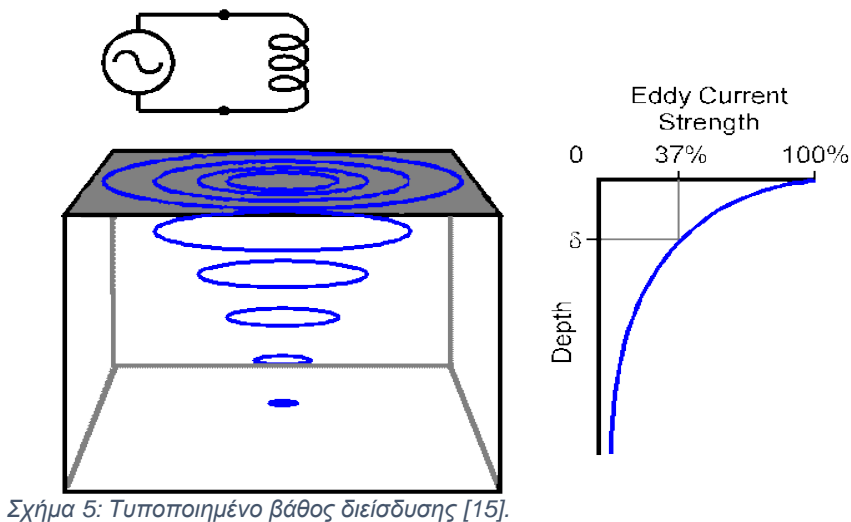
### 2.3.4 Ανύψωση – Lift Off

Όσο πιο κοντά είναι το πηνίο ελέγχου στην επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επίδραση στο πηνίο. Αυτό έχει δύο κύρια αποτελέσματα:

- Το σήμα μεγέθους του lift off καθώς το πηνίο κινείται από και προς την επιφάνεια.
- Παρατηρείται μια μείωση της ευαισθησίας καθώς η απόσταση πηνίου - δοκιμίου αυξάνεται.

### 2.3.5 Βάθος Διείσδυσης

Η πυκνότητα των δινορρευμάτων και έτσι και η αντίδραση από μια ρωγμή, είναι μέγιστες στην επιφάνεια δοκιμής του μετάλλου και μειώνονται με το βάθος. Είναι από μαθηματικής άποψης κατάλληλο να καθοριστεί το τυποποιημένο βάθος της διείσδυσης όπου το δινορρευμα είναι  $1/e$  (37%) της τιμής του στην επιφάνεια (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Τυποποιημένο βάθος διείσδυσης [15].

Το πρότυπο βάθος διείσδυσης σε χιλιοστά δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = 50 \frac{\rho}{f \mu_r}$$

όπου

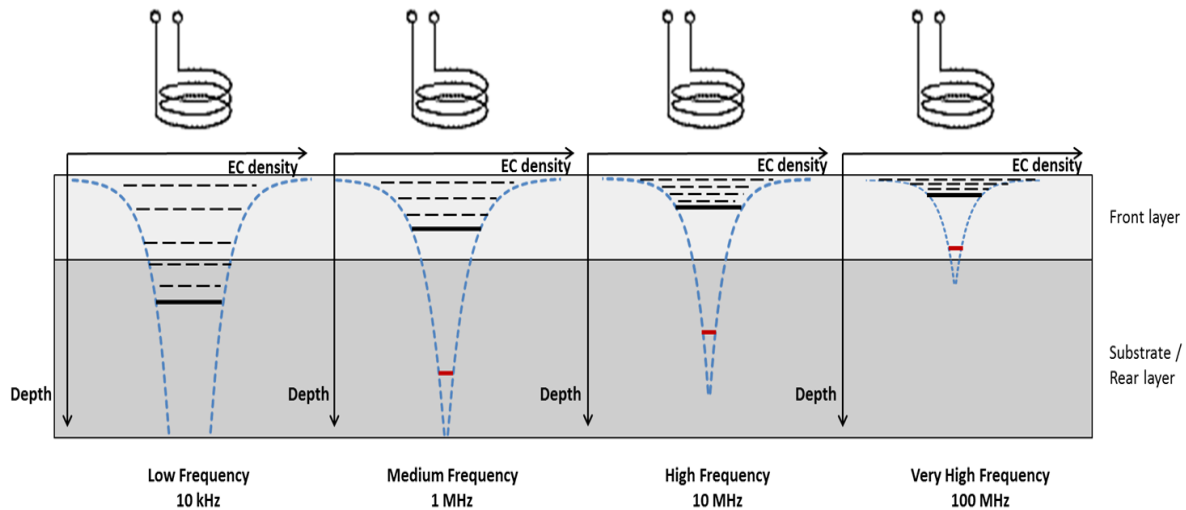
$\rho$  = η ειδική αντίσταση (mΩcm) ( $\rho = 172.41/\text{αγωγιμότητα υλικού}$ )

$f$  = συχνότητα σε Hz

$\mu_r$  = η σχετική διαπερατότητα του υλικού, για μη σιδηρούχα = 1.

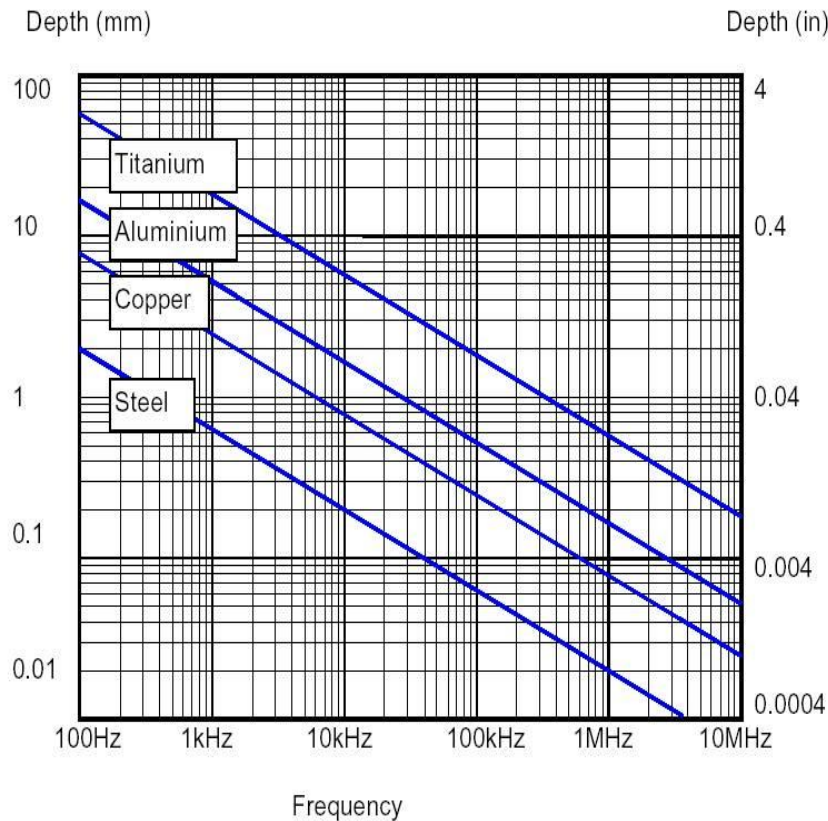
Από αυτό μπορεί να φανεί ότι το βάθος διείσδυσης:

- Μειώνεται με αύξηση της συχνότητας (Σχήμα 6)
- Μειώνεται με μια αύξηση στην αγωγιμότητας (Σχήμα 7)
- Μειώνεται με μια αύξηση στη διαπερατότητα - αυτό μπορεί να είναι σημαντικό - η διείσδυση στα σιδηρούχα υλικά στις πρακτικές συχνότητες είναι πολύ μικρή



Σχήμα 6: Επίδραση της συχνότητας στο πρότυπο βάθος της διείσδυσης [14].

Αναφέρεται συχνά επίσης και το ενεργό βάθος της διείσδυσης που ορίζεται συνήθως ως τρεις φορές το πρότυπο βάθος διείσδυσης, όπου η πυκνότητα των δινορρευμάτων έχει μειωθεί σε περίπου 5% της τιμής τους στην επιφάνεια. Αυτό είναι το βάθος στο οποίο θεωρείται ότι δεν υπάρχει καμία επιρροή από τα δινορρεύματα.



Σχήμα 7: Επίδραση της αγωγιμότητας (υλικό) και της συχνότητας στο πρότυπο βάθος της διείσδυσης [16].

### 2.3.6 Παράγοντας Πλήρωσης

Ο παράγοντας πλήρωσης είναι ένα μέγεθος που υπολογίζεται διαιρώντας την εξωτερική διάμετρο ενός πηνίου της κεφαλής με την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα.

$$0,8 < n = (d/D)^2$$

$d$  = εξωτερική διάμετρος κεφαλής (mm)

$D$  = εσωτερική διάμετρος σωλήνα (mm)

Ο βαθμός πλήρωσης πρέπει να είναι της τάξεως του 80-90%. Ένας μικρότερος βαθμός πλήρωσης επηρεάζει την ευαισθησία για τις μικρότερες ασυνέχειες, οπότε επηρεάζει γενικότερα την ακρίβεια του ελέγχου.

## Κεφάλαιο 3: Τεχνική του Απομακρυσμένου Πεδίου ( RFT )

### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Η τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου (Remote Field Testing – RFT) έχει την δυνατότητα να ελέγχει όχι μόνο κοντά στην αισθητήρια κεφαλή αλλά και διαμέσου όλου του πάχους του υλικού. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ χρήσιμο για τον έλεγχο λεπτών σιδηρομαγνητικών σωλήνων, όπου η τεχνική αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα. Για την τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου συχνά δεν απαιτείται καθαρισμός των σωλήνων και δεν παρουσιάζει ευαισθησία στις εσωτερικές επικαθίσεις. Από το 1970, η τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου έχει εξελιχθεί και πλέον αναγνωρίζεται ως μία από τις τεχνολογίες Μη καταστροφικών Ελέγχων. Το φαινόμενο του απομακρυσμένου πεδίου πρώτη φορά ανακαλύφθηκε την δεκαετία του 1940 και έγινε πατέντα από τον W.R. MacLean το 1951. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, ο Thomas R.Schmidt χρησιμοποίησε ξανά την τεχνική αυτή και δημιούργησε ένα εργαλείο για τον έλεγχο σωλήνων εξόρυξης πετρελαίου [oil well casings]. Η Shell ανέπτυξε την πατέντα του MacLean και είχε εξαιρετική επιτυχία με αυτό το εργαλείο. Εκείνη την περίοδο δεν ήταν διαθέσιμες άλλες ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές στον Μη Καταστροφικό Έλεγχο σωλήνων εξόρυξης πετρελαίου. Έτσι ο Schmidt που ήταν και αυτός που ανέπτυξε την τεχνική, της έδωσε το όνομα Remote Field Eddy Current Testing- RFECT (τεχνική των δινορρευμάτων στο απομακρυσμένο πεδίο) για να το διαχωρίσει από τον συμβατικό έλεγχο με δινορρεύματα (ECT). Η τεχνική αυτή όπως χρησιμοποιείται τώρα στην βιομηχανία αναφέρεται ως Remote Field Testing - RFT (έλεγχος απομακρυσμένου πεδίου). Ο όρος αυτός ελαχιστοποίησε την σύγχυση με το συμβατικό έλεγχο με δινορρεύματα και έδωσε έμφαση στον όρο του απομακρυσμένου πεδίου. Σύντομα αναγνωρίστηκε η σημασία της τεχνικής αυτής για τον έλεγχο εναλλακτών θερμότητας με σιδηρομαγνητικούς σωλήνες και έτσι ξεκίνησε η κατασκευή εξοπλισμού για τον έλεγχο με απομακρυσμένο πεδίο [5].

Εδώ και πάνω από 20 χρόνια ο έλεγχος απομακρυσμένου πεδίου έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των ερευνητών ανά τον κόσμο. Η αρχή έγινε από τον Schmidt με μία δημοσίευσή του το 1984 πάνω στην χρήση των ανιχνευτών με συστοιχία πηνίων περιφερειακά της κεφαλής με διεύθυνση κάθετη στην αξονική διεύθυνση της κεφαλής.

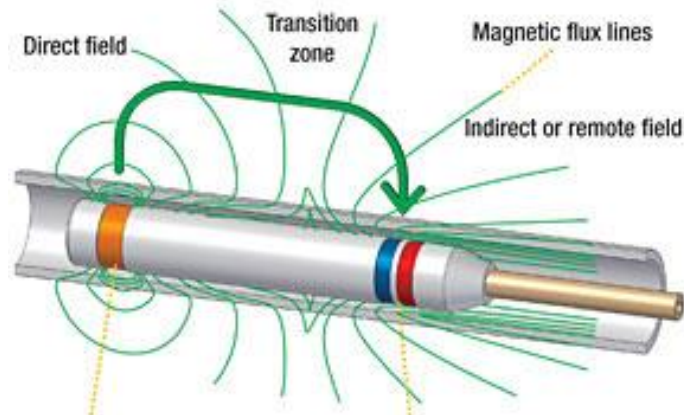
Ο W.Lord και οι συνεργάτες του, έδωσαν στην τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου την βασική θεωρία με την πρώτη σε βάθος δημοσίευση χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία.

Καθώς βελτιωνόταν η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της τεχνικής του απομακρυσμένου πεδίου, αυξανόταν και η αξιοπιστία της αλλά και η αποδοχή της. Μεγάλη ανάπτυξη σημειώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Αναπτύχθηκαν κεφαλές για τον εσωτερικό έλεγχο (internal probes) σωλήνων μεταφοράς αέριων, εναλλακτών θερμότητας και λεβήτων βιομηχανικής χρήσης. Η μετέπειτα εξέλιξη περιλαμβάνει τον έλεγχο επίπεδων πλακών, όπως για παράδειγμα τον δάπεδο σε δεξαμενές αποθήκευσης και χαλύβδινους σωλήνες, με τη χρήση κεφαλών εξωτερικού ελέγχου (external probes) οι οποίες χρησιμοποιούν μία τεχνική παρόμοια με αυτή του απομακρυσμένου πεδίου [5].

### **3.2 Αρχή λειτουργίας**

Στη τεχνική RFT μας ενδιαφέρει να παρατηρήσουμε αποκλειστικά το φαινόμενο της διάχυσης του πεδίου διαμέσου του τοιχώματος του σωλήνα. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να τοποθετήσουμε το πηνίο ανίχνευσης σε μεγάλη απόσταση από το πηνίο διέγερσης. Η απόσταση μεταξύ αυτών των δύο πηνίων εξαρτάται από την εφαρμογή και την κατασκευή της κεφαλής, όμως σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να είναι λιγότερο από δύο φορές την εξωτερική διάμετρο του σωλήνα. Το πεδίο σε αυτή την απόσταση από την διέγερση παρόλο που είναι αρκετά εξασθενημένο εμπεριέχει πληροφορίες για όλο το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα. Αυτή η αξονική απόσταση δίνει και το ξεχωριστό χαρακτηριστικό στον έλεγχο απομακρυσμένου πεδίου. Εάν το πηνίο ανίχνευσης βρισκόταν πολύ κοντά στο πηνίο διέγερσης, τότε θα μετρούσε αποκλειστικά και μόνο το πεδίο που παράγεται από αυτό. Σε αυτή την περίπτωση θα ισοδυναμούσε με ένα τυπικό σύστημα δινορρευμάτων με δύο πηνία, όπου το ένα διεγείρει και το άλλο λαμβάνει.

Η κατασκευή μια κεφαλής ελέγχου με την μέθοδο του απομακρυσμένου πεδίου γίνεται με βάση την πιο πάνω λογική, δηλαδή με ένα πηνίο διέγερσης και ένα πηνίο ανίχνευσης. Και τα δύο πηνία είναι τοποθετημένα κάθετα στον άξονα του σωλήνα [5] (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Τυπική κεφαλή ελέγχου με την μέθοδο RFT [17].

*Direct field*: Συνεχές πεδίο, *Transition zone*: μεταβατική ζώνη, *Magnetic flux line*: Μαγνητικές ροϊκές γραμμές, *Indirect or remote field*: Μη συνεχές ή απομακρυσμένο πεδίο, *Driver coil*: Πηνίο οδηγός (πομπός), *Pickup coils, absolute/ differential*: Πηνία Δέκτες- 1 Πηνίο= Απόλυτο σήμα, 2 Πηνία= Διαφορικό σήμα)

### 3.3 Επιδρώσες παράμετροι

#### 3.3.1 Παράγοντας πλήρωσης

Ο παράγοντας πλήρωσης είναι ένας συντελεστής που υπολογίζεται διαιρώντας την εξωτερική διάμετρο ενός πηνίου της κεφαλής με την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα.

$$0,7 < n = (d/D)^2$$

$d$  = εξωτερική διάμετρος κεφαλής (mm)

$D$  = εσωτερική διάμετρος σωλήνα (mm)

Ο βαθμός πλήρωσης μπορεί να είναι αρκετά μικρός, της τάξεως του 70%. Ωστόσο, συνήθως είναι παρόμοιος με τον βαθμό πλήρωσης των κεφαλών στον έλεγχο με δινορρεύματα, που είναι της τάξεως του 85% και πάνω.

Δεν απαιτείται μεγάλος βαθμός πλήρωσης, ούτε το κεντράρισμα της κεφαλής (όπως πρέπει να γίνεται για τον υπέρηχο, τα δινορρεύματα (ECT) και την τεχνική διαρροής του μαγνητικού πεδίου (MFL). Ωστόσο, ένας μικρός βαθμός πλήρωσης θα οδηγούσε σε μικρή ευαισθησία σε μικρές ασυνέχειες [5].



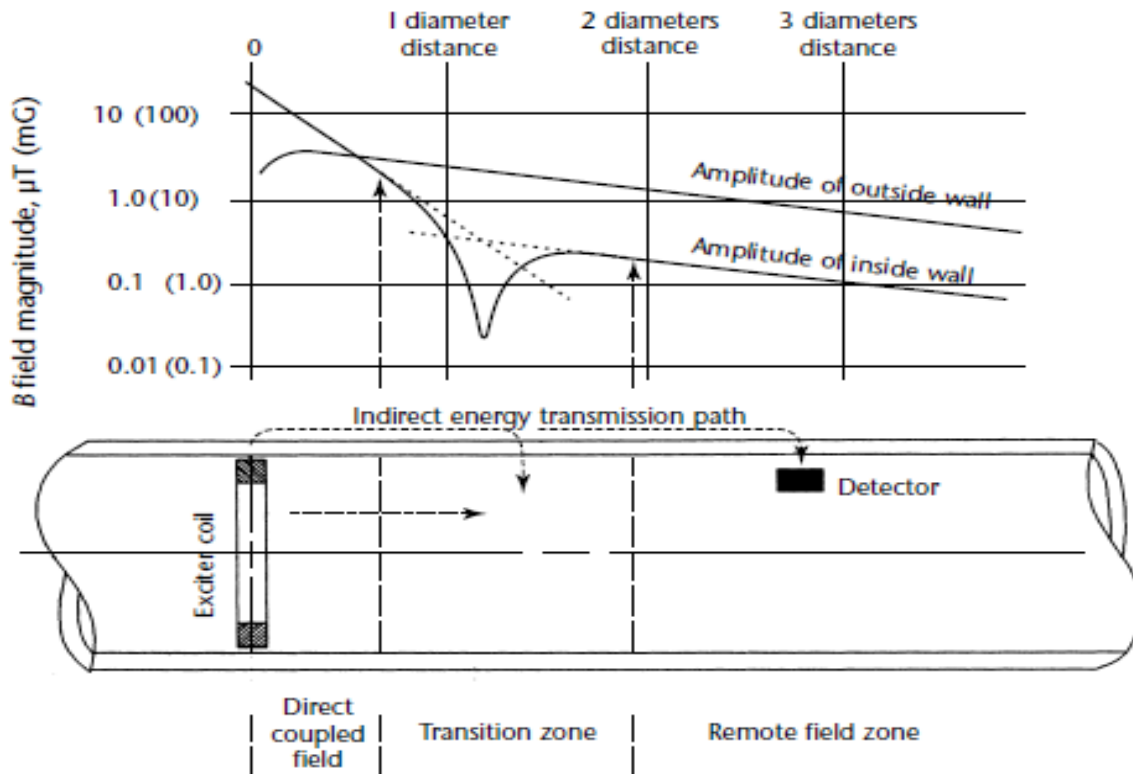
### **3.3.2 Συχνότητα και ρεύμα ελέγχου**

Το πηνίο διέγερσης τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα σε συχνότητες που κυμαίνονται από τα 50 Hz μέχρι το 1 kHz για σιδηρομαγνητικά υλικά. Υψηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για μη σιδηρομαγνητικούς σωλήνες. Το πηνίο διέγερσης φέρει ρεύμα της τάξεως του 0.1 με 1.0 A. Το πόσο ισχυρό θα είναι το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο διέγερσης έχει να κάνει, με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτό και σε ορισμένες κεφαλές, με το μαγνητικό κορεσμό του πυρήνα της κεφαλής. Το σήμα του πηνίου ανίχνευσης επηρεάζεται άμεσα από το ρεύμα και τη συχνότητα του πηνίου διέγερσης. Ακολούθως, το βάθος διείσδυσης μπορεί να επηρεαστεί και αυτό από το ρεύμα και τη συχνότητα στη διέγερση. Σε γενικές γραμμές, σε σωλήνες με μεγάλο πάχος τοιχώματος και υψηλή μαγνητική διαπερατότητα χρησιμοποιούνται μικρές συχνότητες (μέχρι 250 Hz). Για μεγαλύτερη ευαισθησία είτε μεγαλύτερη ταχύτητα δοκιμής συνιστάται η χρήση υψηλότερης συχνότητας [5].

### **3.3.3 Ζώνες ανίχνευσης**

Σε μία κεφαλή απομακρυσμένου πεδίου, το σήμα που λαμβάνουμε από το πηνίο ανίχνευσης χωρίζεται σε ζώνες. Υπάρχουν δύο διακριτές ζώνες ανίχνευσης με μία ζώνη μετάβασης μεταξύ τους. Οι τρεις αυτές ζώνες κατηγοριοποιούνται, στην ζώνη του άμεσου πεδίου (direct field zone), στη ζώνη μετάβασης (transition zone) και στη ζώνη του απομακρυσμένου πεδίου (remote field zone) (Σχήμα 9).

Καθώς η απόσταση μεταξύ του πηνίου διέγερσης και του πηνίου ανίχνευσης αυξάνεται, το κυρίαρχο πεδίο αλλάζει από την ζώνη της άμεσης σύζευξης (μεταξύ των πηνίων διέγερσης και ανίχνευσης, στο εσωτερικό του σωλήνα) στη ζώνη όπου η ενέργεια μεταδίδεται στον ανιχνευτή διαμέσου του τοιχώματος του σωλήνα, την οποία και χαρακτηρίζουμε ως έμμεση σύζευξη. Μεταξύ αυτών των δύο διακριτών ζωνών, υπάρχει μια μεταβατική ζώνη, όπου η άμεση και η έμμεση σύζευξη, είναι συγκρίσιμες σε μέγεθος. Η θέση της μεταβατικής ζώνης επηρεάζεται από τη συχνότητα, το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα, την μαγνητική διαπερατότητα και την αγωγιμότητα.



Σχήμα 9: Οι ζώνες στην τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου [8]

Απεικονίζεται το πεδίο μέσα και έξω από το τοίχωμα του σωλήνα ώστε να γίνει προσδιορισμός της ζώνης του άμεσου πεδίου, της μεταβατικής ζώνης και της ζώνης του απομακρυσμένου πεδίου

### 3.3.4 Ευαισθησία

Η ακρίβεια της μέτρησης στην τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου στο ευθύγραμμο τμήμα ενός σωλήνα, τυπικά κυμαίνεται στο 10% του πάχους του τοιχώματος, στην περίπτωση σφάλματος όπου έχουμε μείωση πάχους. Η ακρίβεια στην περίπτωση όπου στο σωλήνα έχουμε καμπές, είτε βρίσκονται κοντά αγώγιμα αντικείμενα στο εξωτερικό του, είναι γενικά μικρότερη (20% του πάχους τοιχώματος). Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζουν οι μαγνητικές ιδιότητες του σωλήνα κοντά σε μία καμπή αλλά εξαιτίας και του φαινομένου θωράκισης (shielding effect) λόγω της παρουσίας εξωτερικών αντικειμένων. Η ευαισθησία είναι ίδια στην περίπτωση που μετράμε δύο πανομοιότυπα σφάλματα, όπου το ένα βρίσκεται στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα και το άλλο στην εξωτερική. Αυτό κάνει αδύνατη τη διάκρισή τους σε εσωτερικό και εξωτερικό σφάλμα. Ο μόνος τρόπος για να γίνει αυτή η διάκριση είναι με την υποβοήθηση επιπλέον πηνίων. Γενικά η τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου δεν επηρεάζεται από την παρουσία επικαθήσεων στο εσωτερικό του σωλήνα [5].

## Κεφάλαιο 4 : Εναλλάκτες θερμότητας

### 4.1 Αρχή λειτουργίας

Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δυο ρευστών. Οι διεργασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε συσκευές που καλούνται εναλλάκτες θερμότητας (heat exchangers). Ως εναλλάκτης θερμότητας ορίζεται μία συσκευή που διευκολύνει την μετάδοση του θερμικού φορτίου από ένα ρευστό σε ένα άλλο και συναντάται σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, σε συσκευές ανάκτησης θερμότητας, σε χημικές διεργασίες και αλλού.

Στους πιο απλούς εναλλάκτες το θερμό και το ψυχρό ρευστό αναμιγνύονται απευθείας. Πιο συνηθισμένοι ωστόσο είναι οι εναλλάκτες στους οποίους τα δυο ρευστά δεν έρχονται σε επαφή εξαιτίας της ύπαρξης κάποιου παρεμβαλλόμενου τοιχώματος. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη μπορεί να φέρει είτε ένα απλό επίπεδο τοίχωμα ώστε να επιτυγχάνεται η απομόνωση των δυο ρευστών, είτε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες με πολλαπλές διαδρομές, όπως πτερύγια (fins) και ανακλαστήρες (baffles) [6].

Γενικά στους ΜΚΕ μας ενδιαφέρουν οι εναλλάκτες που αποτελούνται από σωλήνες και μπορούν να ελεγχθούν.

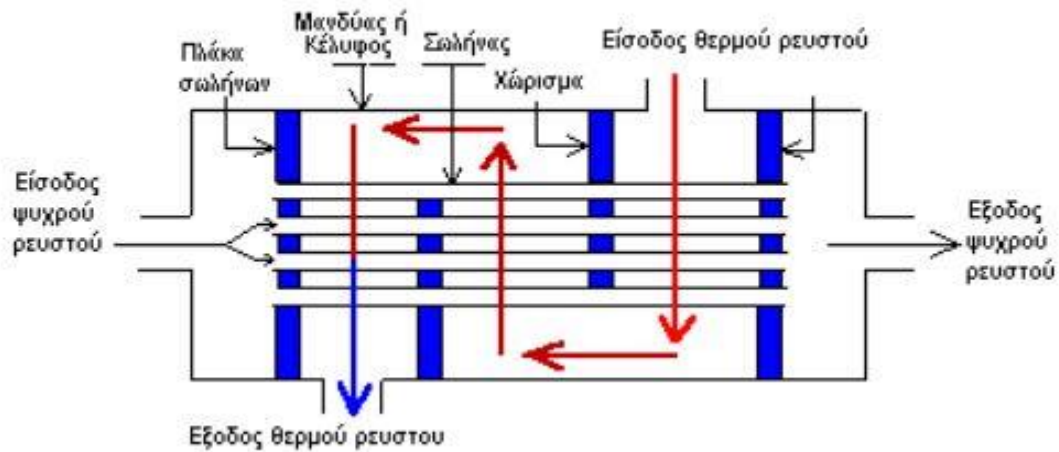
### 4.2 Είδη εναλλακτών

Ανάλογα με το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας οι εναλλάκτες χωρίζονται σε:

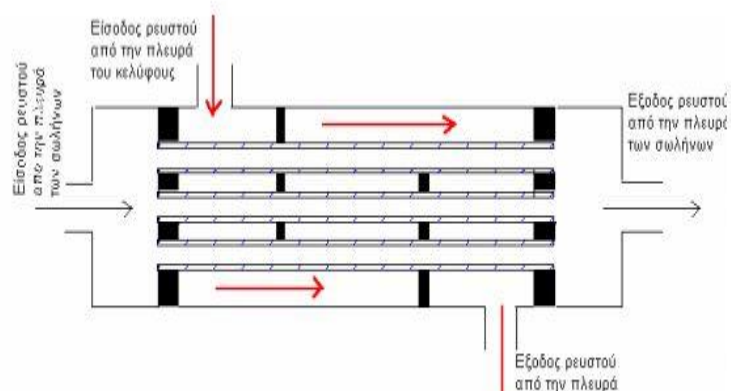
- α) συναγωγής μίας φάσης και από τις δύο πλευρές,
- β) συναγωγής μίας φάσης από τη μία πλευρά και συναγωγής δύο φάσεων από την άλλη,
- γ) συναγωγής δύο φάσεων και από τις δύο πλευρές
- δ) συνδυασμένης συναγωγής και μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία. [7]

Οι εναλλάκτες, ανάλογα με την κατασκευή τους, διακρίνονται σε:

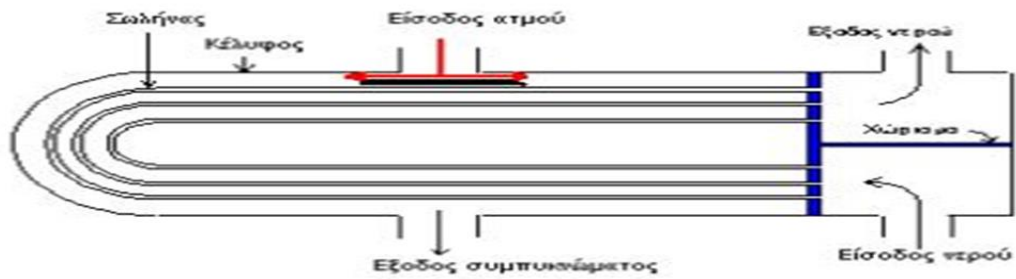
- α) Ομοκεντρικούς κυκλικής διατομής.
- β) Εναλλάκτες κελύφους (Σχήματα 10 έως 14).



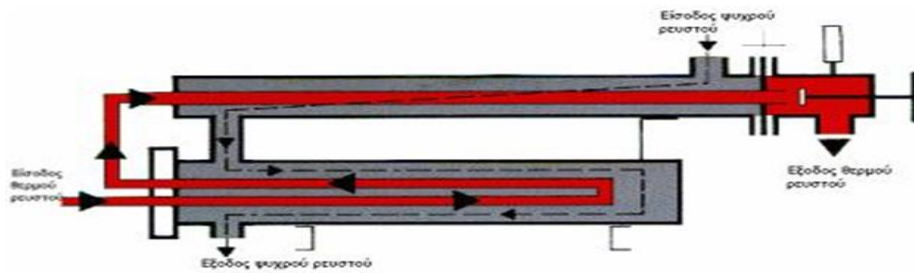
Σχήμα 10: Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου αντιρροής, όπου φαίνονται και οι διαδρομές των ρευστών [7].



Σχήμα 11: Εναλλάκτης κελύφους με σωληνώσεις, τύπου ομορροής, όπου παρουσιάζονται οι διαδρομές των ρευστών [7].

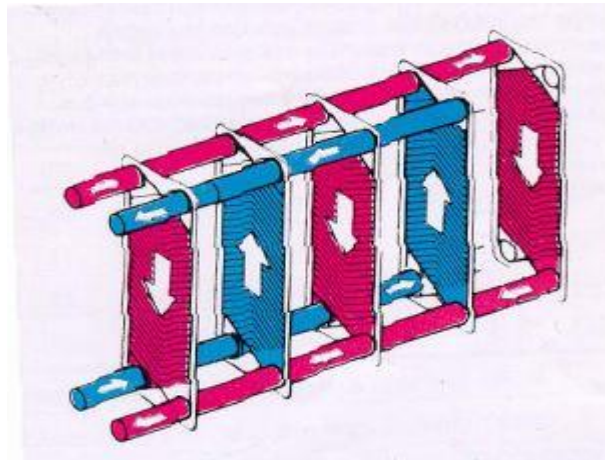


Σχήμα 12: Εναλλάκτης κελύφους με αναστρεφόμενους σωλήνες (σχήματος U) [7].



Σχήμα 13: Ειδικός εναλλάκτης κελύφους με τρεις διαδρομές σωληνώσεων, όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών [7].

γ) Πλακοειδείς (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Σχηματική παράσταση πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας, με πλάκες πλαισίου, όπου παρουσιάζονται και οι διαδρομές των ρευστών [7].

δ) Προεκτεταμένης επιφάνειας, με πτερύγια (τα πτερύγια αυξάνουν την επιφάνεια συναλλαγής από την πλευρά του αέρα και, επομένως, το συντελεστή συναγωγής (Σχήμα 15).



Σχήμα 15: Συμπαγής εναλλάκτης ατμού – αέρα, που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση θερμότητας σε μονάδες παραγωγής ατμού[7]

ε) Εναλλάκτες αναγέννησης (Αναγεννητές) [7]

Ανάλογα με το είδος της ροής μέσα στους εναλλάκτες, αυτοί διακρίνονται σε:

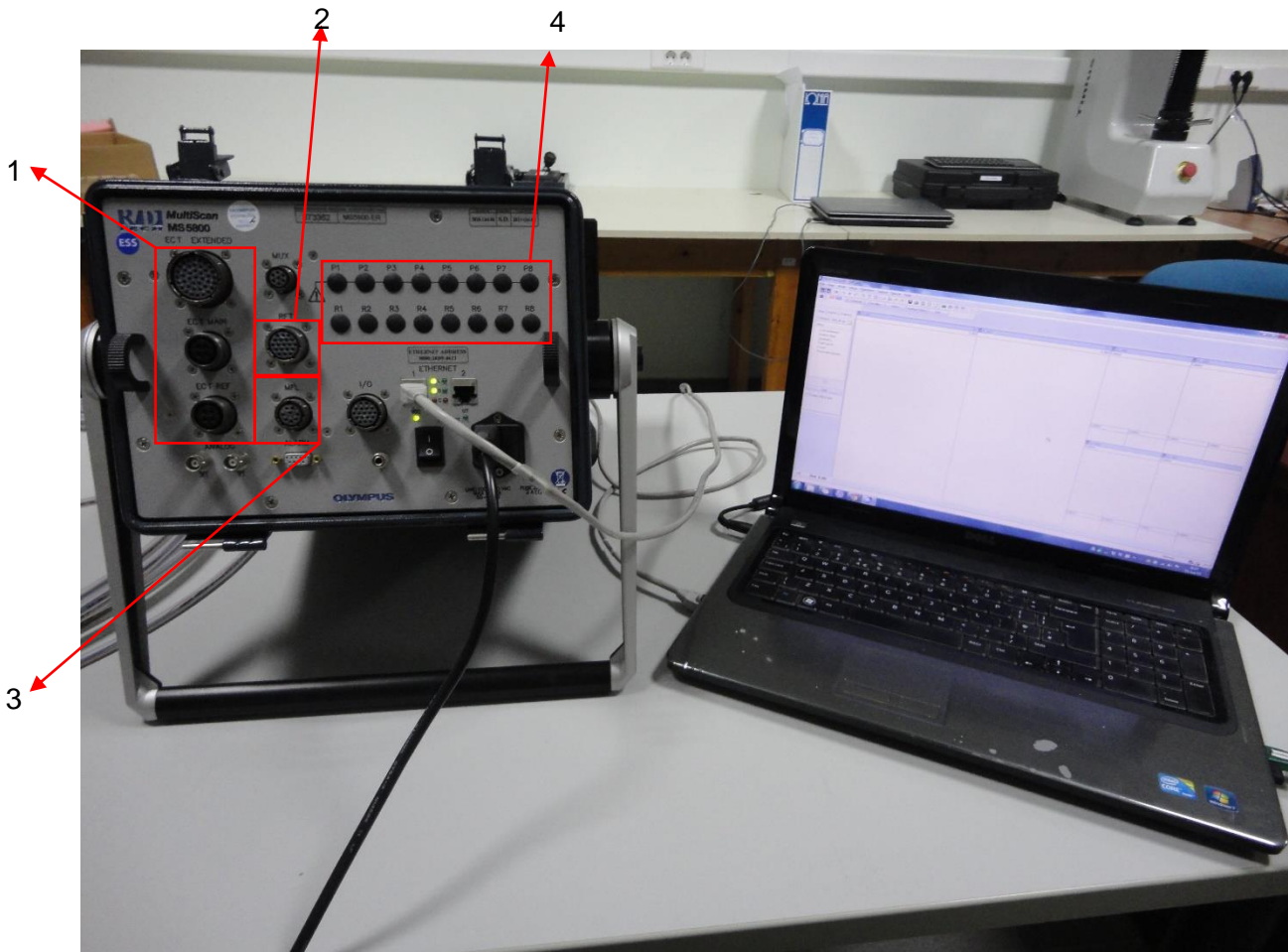
- α) Εναλλάκτες ομοροής. (Σχήμα 11).
- β) Εναλλάκτες αντιροής. (Σχήματα 10 και 13).
- γ) Εναλλάκτες σταυροροής.
- δ) Σύνθετους [7].

## Κεφάλαιο 5: Όργανο και Κεφαλές Ελέγχου

### 5.1 Olympus Multiscan MS5800

Το όργανο ελέγχου που χρησιμοποιήσαμε είναι το όργανο Multiscan MS5800 της Olympus με τις πιο κάτω δυνατότητες ελέγχου:

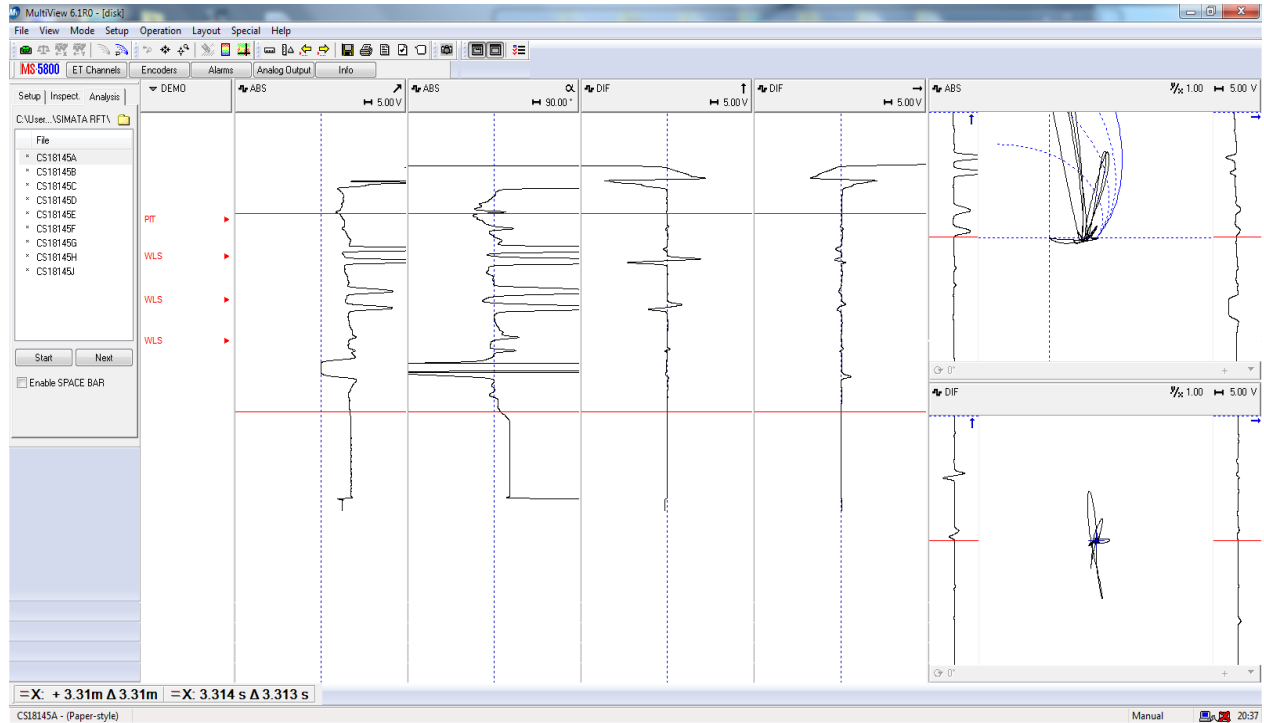
- Έλεγχος με δινορρέυματα (ECT) (1)
- Έλεγχος απομακρυσμένου πεδίου (RFT) (2)
- Έλεγχος μαγνητικής διαρροής( MFL) (3)
- Εσωτερικός περιφερειακός έλεγχος με υπέρηχο (IRIS ULTRASOUND) (4)



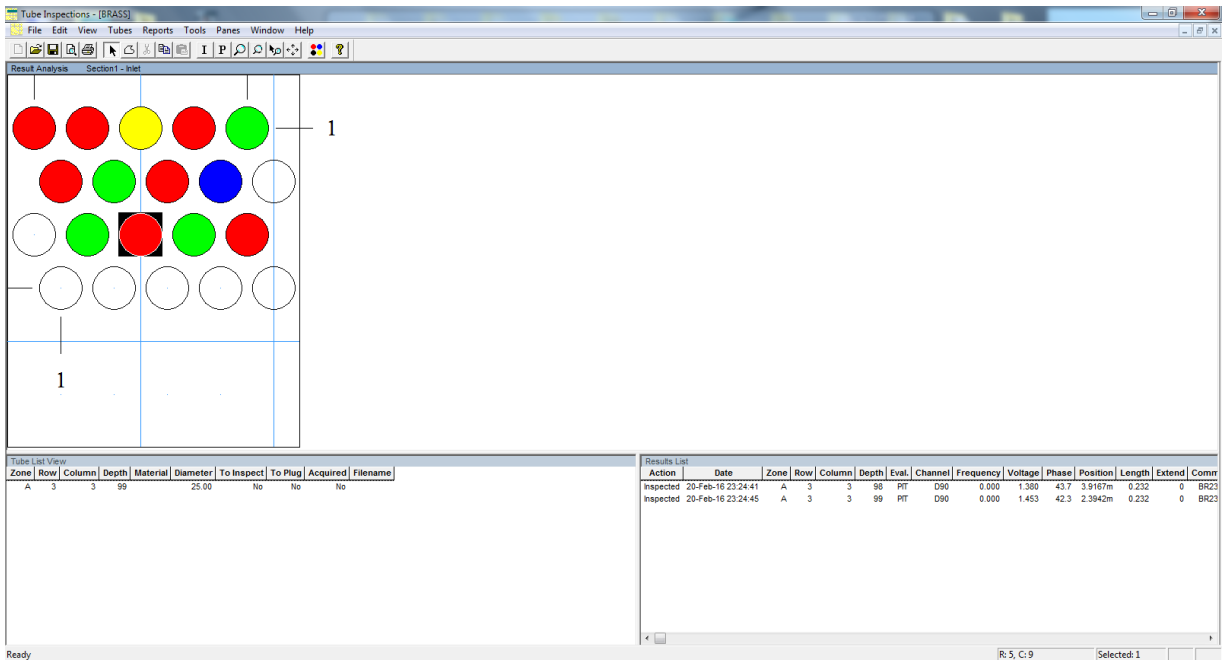
Σχήμα 16: Olympus Multiscan MS5800

### 5.1.1 Λογισμικό ελέγχου Multiview και απεικόνισης Carto

Το λογισμικό ελέγχου που χρησιμοποιήσαμε είναι το MultiView και το λογισμικό απεικόνισης Carto επίσης της Olympus.



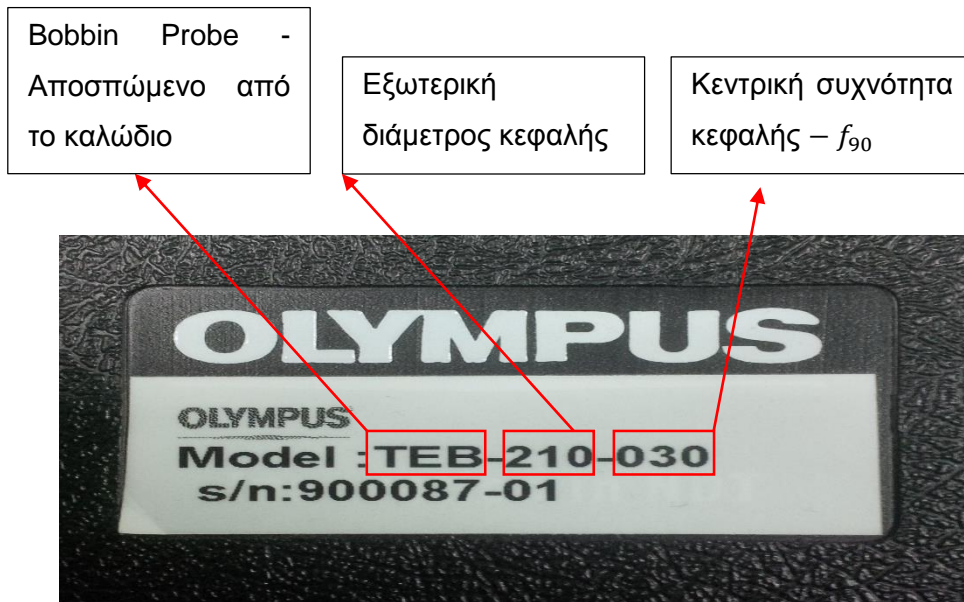
Σχήμα 17: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Multiview [12].



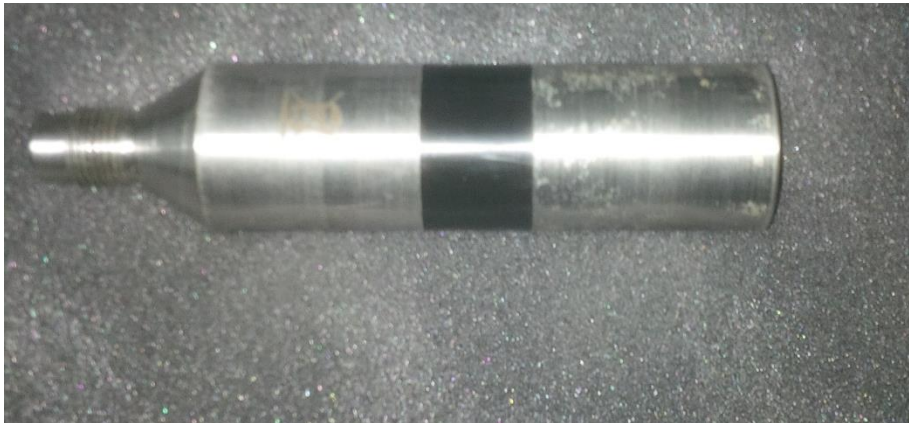
Σχήμα 18: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Carto [13].



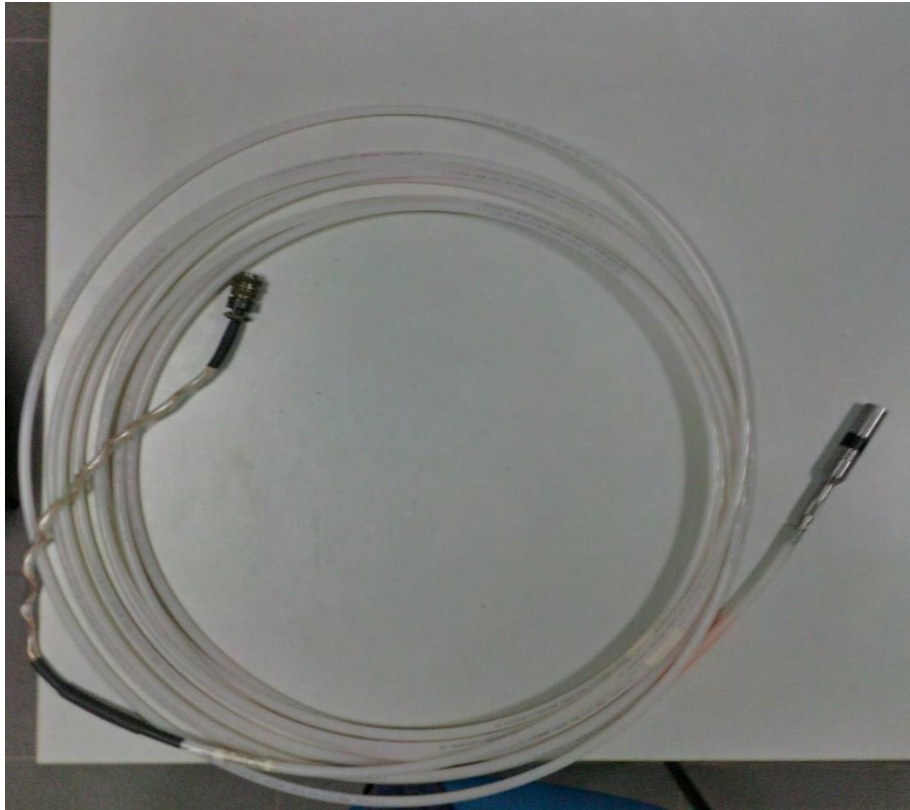
## 5.2 Κεφαλές ελέγχου για ECT



Σχήμα 19: Κωδικοποίηση κεφαλής ECT

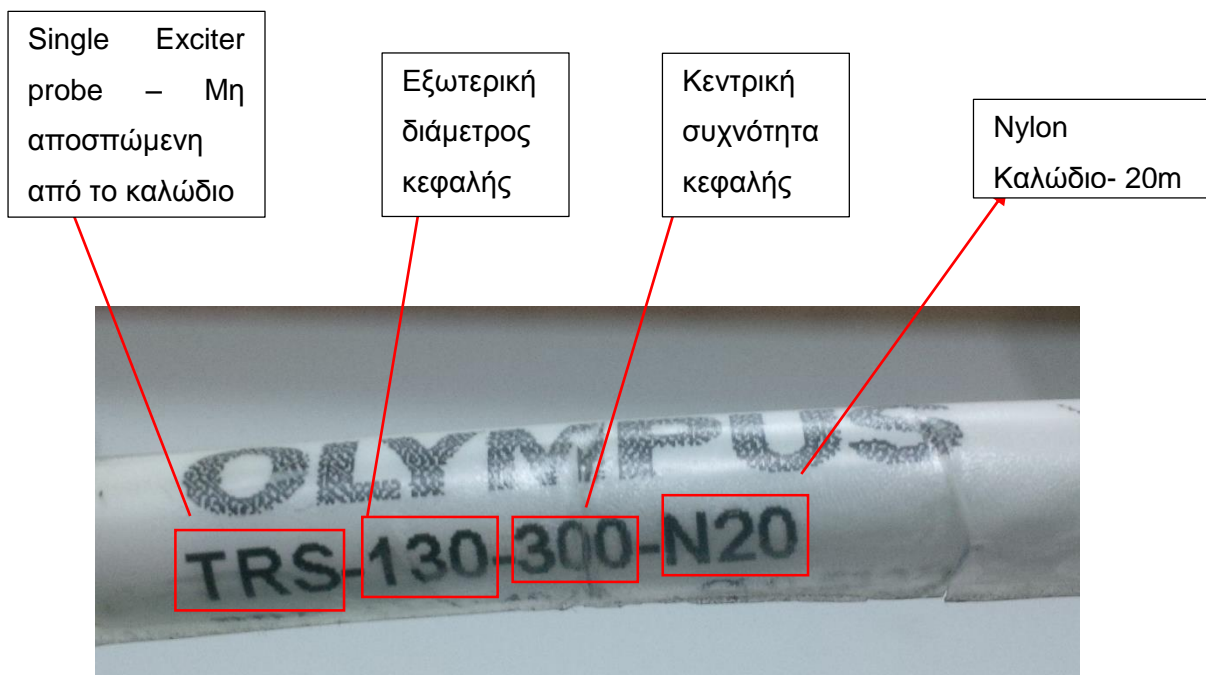


Σχήμα 20: Κεφαλή Bobbin Probe για εσωτερικό έλεγχο σωληνώσεων μη σιδηρομαγνητικού υλικού



Σχήμα 21: Κεφαλή ελέγχου ECT μαζί με καλώδιο ελέγχου για τη σύνδεση με το όργανο

### 5.3 Κεφαλές ελέγχου για RFT



Σχήμα 22: Κωδικοποίηση κεφαλής RFT



Σχήμα 23: Κεφαλή μονής διέγερσης για εσωτερικό έλεγχο σωληνώσεων σιδηρομαγνητικού υλικού



Σχήμα 24: Κεφαλή ελέγχου RFT μαζί με καλώδιο ελέγχου για τη σύνδεση με το όργανο

## Κεφάλαιο 6: Πρότυπα και σωλήνες βαθμονόμησης

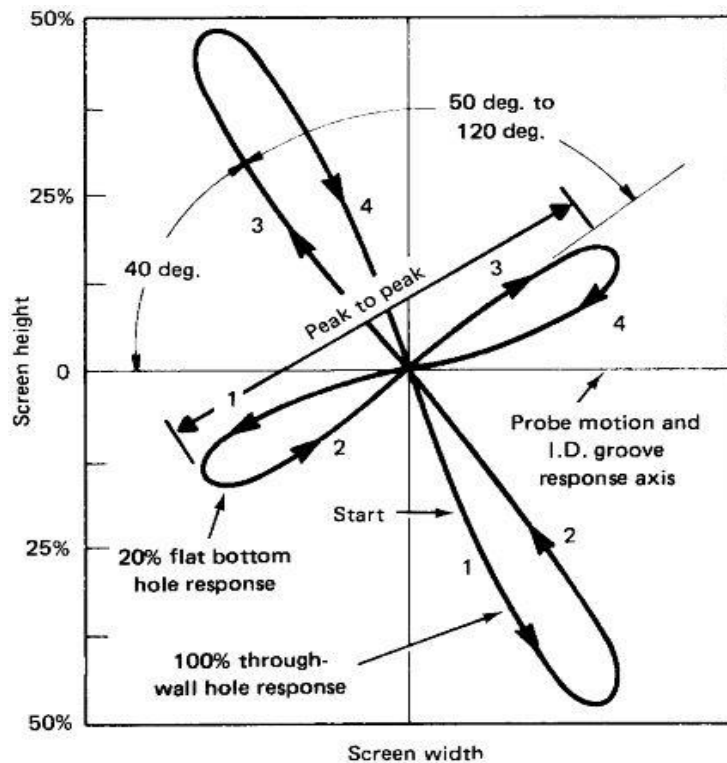
### 6.1 Πρότυπα βαθμονόμησης

Για την επιθεώρηση και την κατασκευή των σωλήνων βαθμονόμησης στη μέθοδο των δινορρευμάτων σε εναλλάκτες θερμότητας μη σιδηρομαγνητικού υλικού ακολουθήθηκε το αμερικανικό πρότυπο ASME V Art 8 ET- APPENDIX I (Σχήμα 24). Το συγκεκριμένο πρότυπο περιγράφει τις βασικές διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για να γίνει εσωτερικός έλεγχος αυλών μη σιδηρομαγνητικού υλικού και και τους σωλήνες βαθμονόμησης που πρέπει να ακολουθήσουμε για τη βαθμονόμηση του οργάνου.

#### ARTICLE 8 — APPENDIX I EDDY CURRENT EXAMINATION METHOD FOR INSTALLED NONFERROMAGNETIC

Σχήμα 25: ASME V Art 8 ET- APPENDIX I [10]

Το πρότυπο μας επιβάλλει κατά την βαθμονόμηση του οργάνου με την χρήση φάσης (γωνίας) να τοποθετήσουμε την οπή ( HOLE) στις 40° ,ότι είναι εσωτερικό (ID GROOVE) 0 – 40°, και ό,τι είναι εξωτερικό 50-120° (OD GROOVE, FBH) (Σχήμα 25).



Σχήμα 26: Τυπικό σήμα βαθμονόμησης βάση του προτύπου ASME [10]

Μέσα από τον έλεγχο του εναλλάκτη διαπιστώσαμε ότι τα σφάλματα που μας έδινε το πρότυπο για τους σωλήνες βαθμονόμησης δεν ήταν επαρκή, έτσι κατασκευάσαμε επιπλέον σφάλματα για πιο σωστή βαθμονόμηση σε περιπτώσεις που μπορεί να συναντήσουμε κατά των ελέγχω εναλλακτών θερμότητας.

Επιπλέον μέσα από την βιβλιογραφία καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως για σφάλματα που έχουνε μεγάλη έκταση (Long) είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά, δηλαδή σφάλματα που προσομοιώνουν την ομαλή απομοίωση πάχους σε εναλλάκτη θερμότητας, είναι καλύτερα η βαθμονόμηση του οργάνου να γίνει με βάση το πλάτος (Volts) και όχι τη φάση (Γωνία).

## **6.2 Κατασκευή σωλήνων βαθμονόμησης**

Η κατασκευή των σωλήνων βαθμονόμησης για τον έλεγχο με δινορρεύματα έγινε με εργαστηριακό εξοπλισμό τόσο στο εργαστήριο μας (εργαστήριο Μη καταστροφικών ελέγχων ΠΔΜ) όσο και σε μηχανολογικό εργαστήριο στο ΤΕΙ Δ.Μ.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριό μας είναι ο μηχανολογικός τόρνος ALFA MACHINERY AL700X280V (Σχήμα 26) για τα εσωτερικά και εξωτερικά σφάλματα και το σταθερό κολονάτο δράπανο DF20HM (Σχήμα 27) για οπές στους αυλούς και τις πλάκες στήριξης.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο του ΤΕΙ είναι η κάθετη φρέζα AJAX (Σχήμα 28) για τις οπές αβαθούς πυθμένα (FBH) και το πριόνι ALFA CUT (Σχήμα 29) για το κόψιμο των πλακών στήριξης.

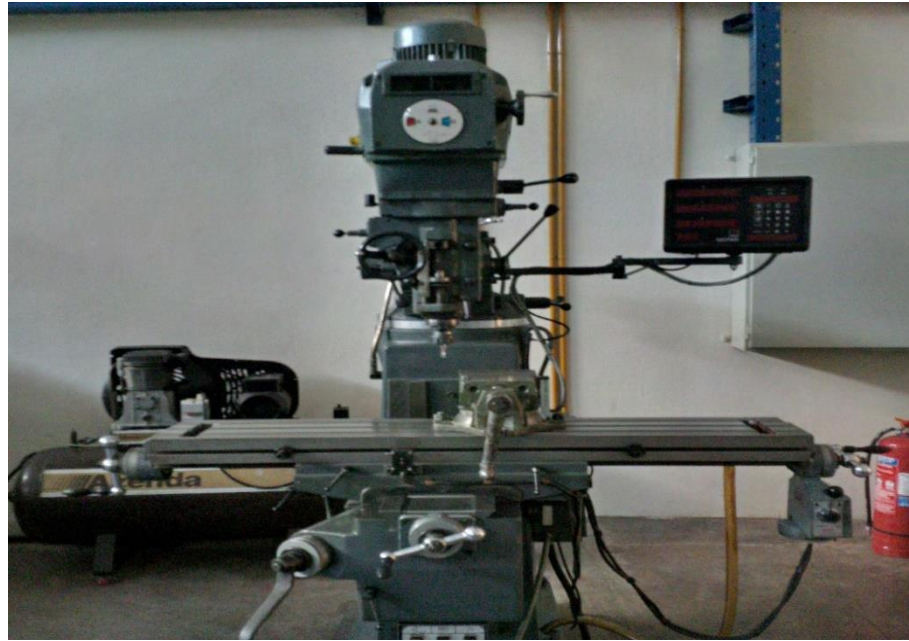




Σχήμα 27: Διάταξη τόρνου ALFA MACHINERY-TOOLS AL700X280V



Σχήμα 28: Διάταξη σταθερού κολονάτου δράπανου DF20HM



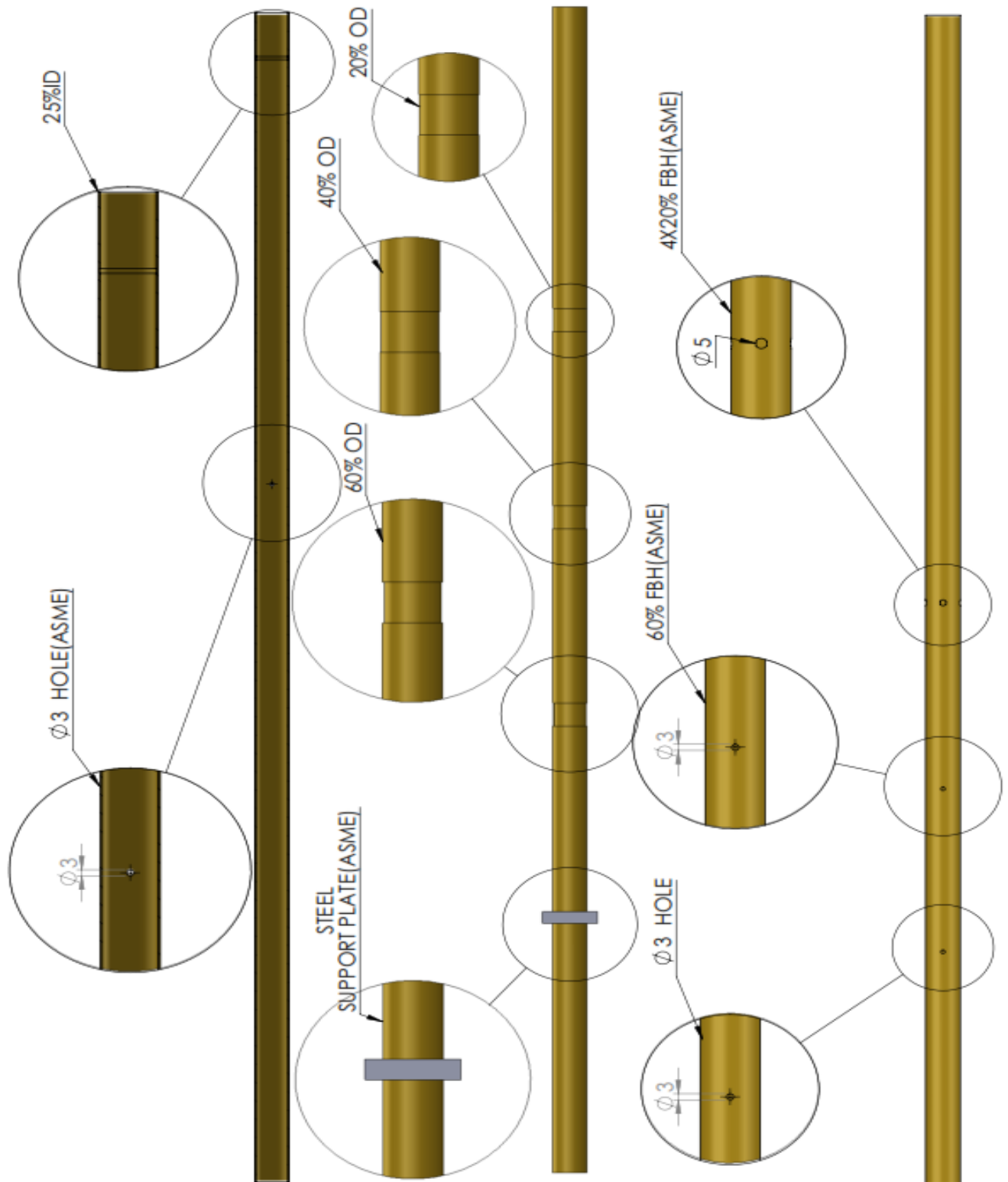
Σχήμα 29: Διάταξη κάθετης φρέζας AJAX



Σχήμα 30: Διάταξη πριονιού ALFA CUT

## 6.3 Σωλήνες βαθμονόμησης

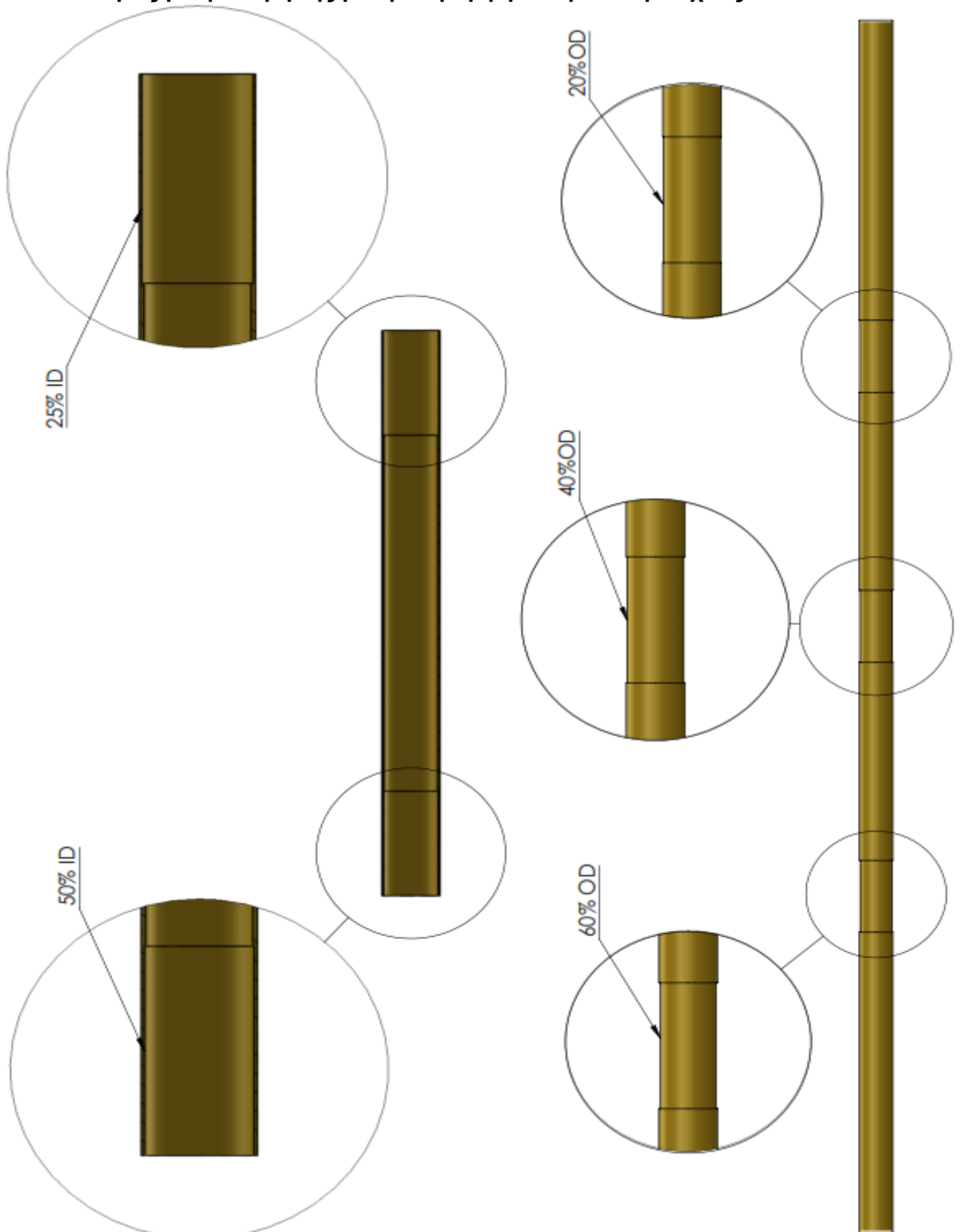
### 6.3.1 Κατά ASME και επιπρόσθετοι σωλήνες



Σχήμα 31: Σωληνες βαθμονόμησης κατά ASME και επιπρόσθετοι σωλήνες



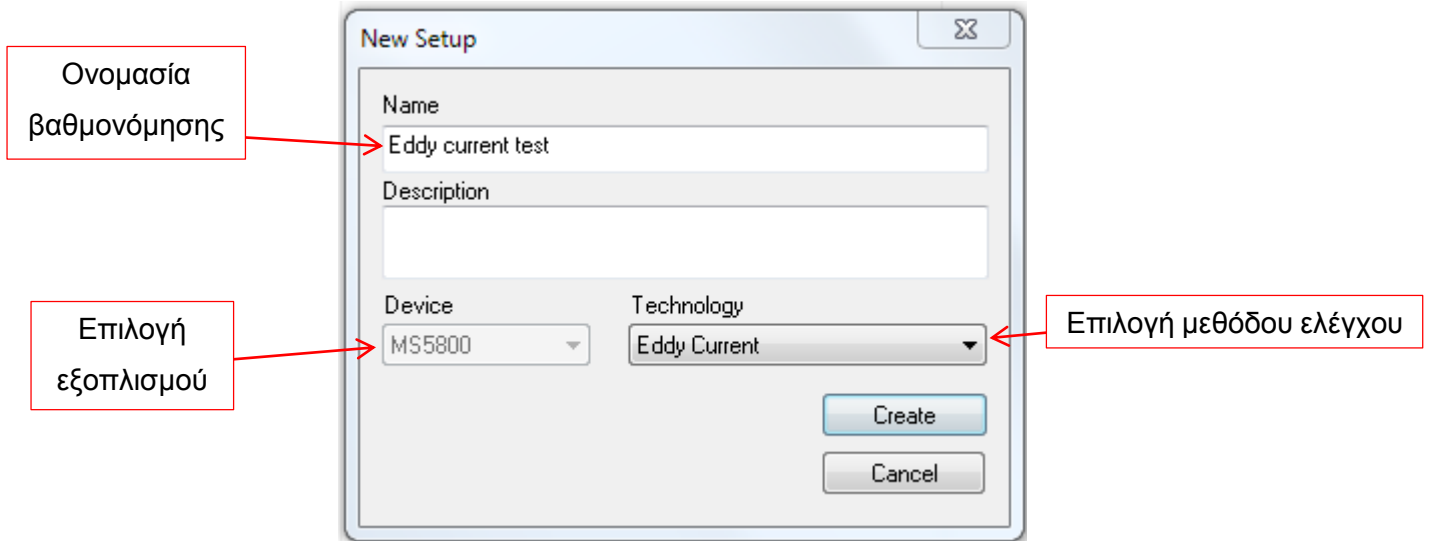
### 6.3.2 Σωλήνες βαθμονόμησης με ομοιόμορφη απομείωση πάχους



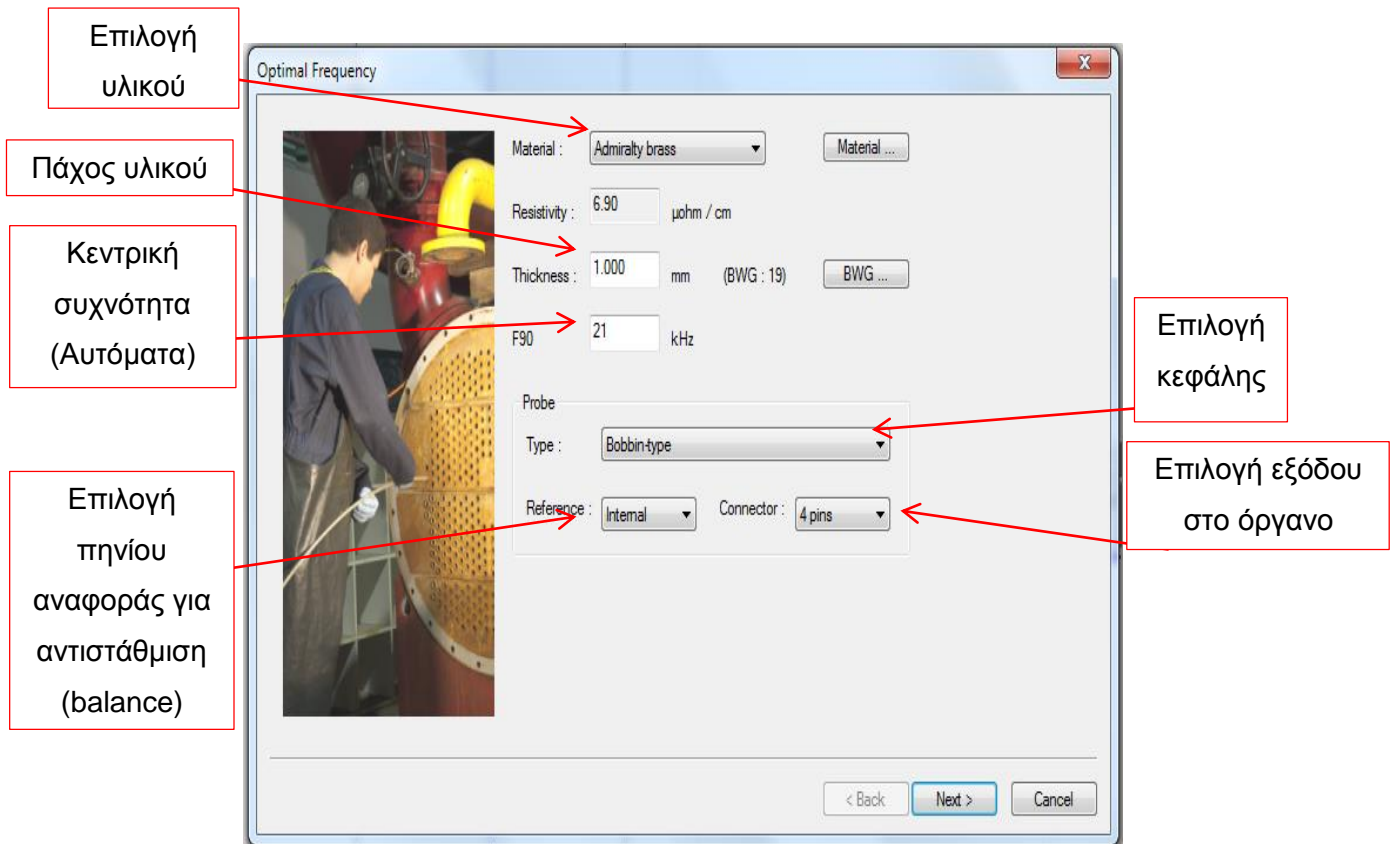
Σχήμα 32: Σωλήνες βαθμονόμησης με ομοιόμορφη απομείωση πάχους

# Κεφάλαιο 7: Διαδικασία και καμπύλες βαθμονόμησης

## 7.1 Διαδικασία βαθμονόμησης



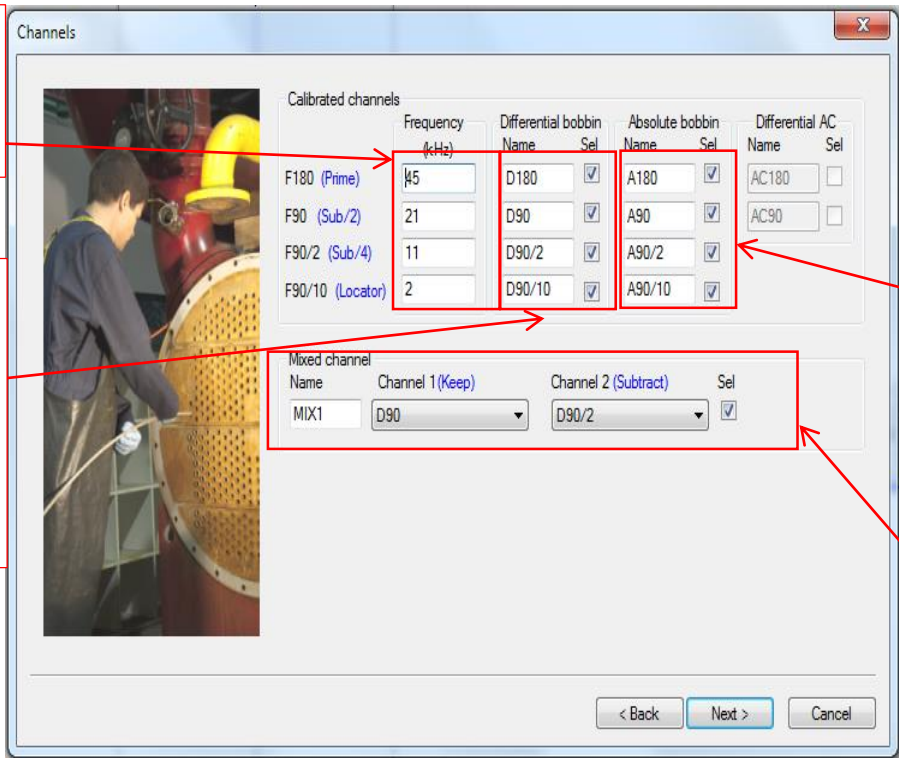
Σχήμα 33: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 1 [12]



Σχήμα 34: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 2 [12]

Επιλογή  
συχνότητων  
βαθμονόμησης

Επιλογή  
συχνότητων που  
θα  
χρησιμοποιήσουμε  
για βαθμονόμηση  
του διαφορικού

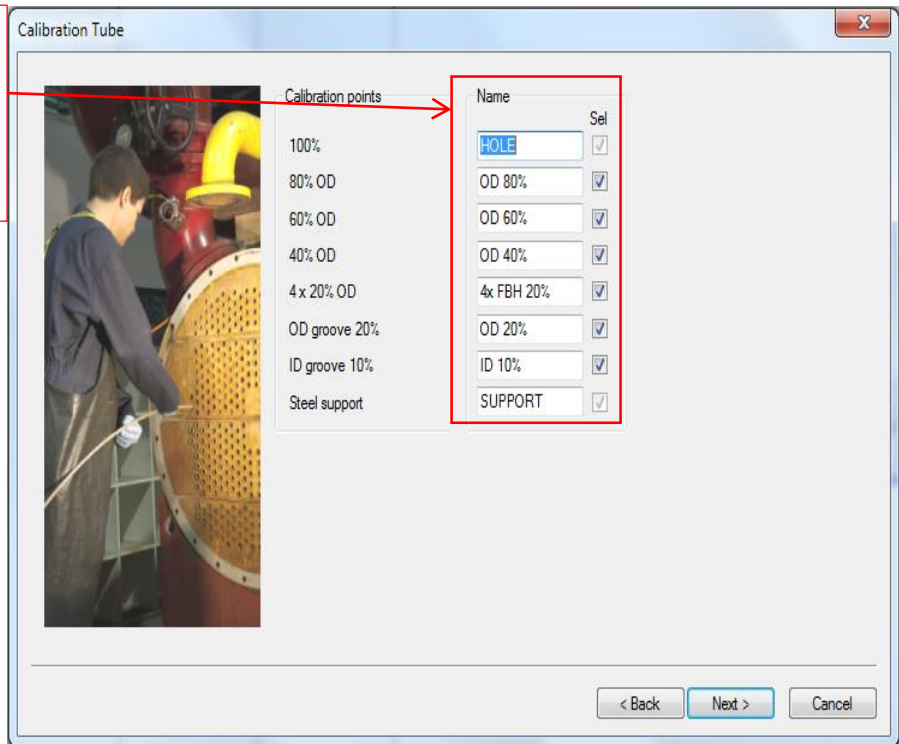


Επιλογή ποιες  
συχνότητες θα  
χρησιμοποιήσουμε  
για βαθμονόμηση  
του απόλυτου  
πηνίου

Επιλογή  
συχνότητων που  
θα  
χρησιμοποιήσουμε  
για το κανάλι μίξης  
για την αφαίρεση  
του σήματος της

Σχήμα 35: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 3 [12]

Επιλογή  
σφαλμάτων για  
βαθμονόμηση  
(Βάση προτύπου)



Σχήμα 36: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 4 [12]

Χαρακτηρισμός των σφαλμάτων

**OBS** = Μη πρόσβαση ελέγχου

**DNT** = Στράβωμα σωλήνα

**PLG** = Ταπωμένος σωλήνας

**PIT** = Μικρά σφάλματα π.χ. τρύπες, διάβρωση κλπ.

**WLL** = Μεγάλα – πλατιά σφάλματα π.χ. απομείωση πάχους

	Name	Channel	Curve	Ext.	Sel
Defect 1	OBS	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 2	DNT	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 3	PLG	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 4	PIT	D90	Ø/depth		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 5	WLL	A90	V/depth		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 6	DSI	MIX1	Ø/depth		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 7		None	None		<input type="checkbox"/>
Defect 8		None	None		<input type="checkbox"/>
Defect 9		None	None		<input type="checkbox"/>
Defect 10		None	None		<input type="checkbox"/>

Σχήμα 37: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 5 [12]

Επιλογή καναλιού και καμπύλης βαθμονόμησης

D90 = Διαφορικό κανάλι με κεντρική συχνότητα και βαθμονόμηση με φάση

A90 = Απολυτό κανάλι με κεντρική συχνότητα και βαθμονόμηση με πλάτος

MIX= κανάλι μίξης δυο συχνοτήτων για αφαίρεση σήματος πλάκας στήριξης

Επιλογή σημείου αναφοράς για βαθμονόμηση διαφορικού καναλιού (Βάσει προτύπου)

Differential channels

Calibration point : HOLE

Angle : 40.00 deg      Amplitude : 0.10 V

Absolute channels

Calibration point : HOLE

Angle : 40.00 deg      Amplitude : 0.10 V

Σχήμα 38: Βαθμονόμηση ECT Βήμα 6 [12]




Επιλογή σημείου αναφοράς για βαθμονόμηση απόλυτου καναλιού (Βάσει προτύπου)

## 7.2 Καμπύλες βαθμονόμησης

Οι καμπύλες βαθμονόμησης δημιουργούνται αυτόματα όταν κάνουμε την πιο πάνω διαδικασία, ο λόγος που δημιουργούνται και μας χρειάζονται είναι όταν ελέγχουμε ένα άγνωστο δοκίμιο, μέσα από τη βάση δεδομένων που αποτελεί την καμπύλη βαθμονόμησης που δημιούργησε μπορεί να μας δείξει, πάντα συγκριτικά τι σφάλματα έχουμε σε ένα σωλήνα. Για αυτό το λόγο πρέπει οι σωλήνες βαθμονόμησης να είναι φτιαγμένοι σωστά και βάσει των σφαλμάτων που αναμένουμε να συναντήσουμε αλλά και του εκάστοτε προτύπου.

### 7.2.1 Με φάση (Γωνία)

Η βαθμονόμηση με φάση γίνεται όταν έχουμε:

- PIT δηλαδή πολύ μικρά σφάλματα πχ σπές διάβρωση κλπ.  Διαφορικό Κανάλι
- WLL δηλαδή μικρές απομειώσεις πάχους όχι μεγάλης έκτασης  Απόλυτο Κανάλι
- DSI δηλαδή όταν έχουμε σφάλματα κάτω από την πλακά στήριξης  Κανάλι Μίξης

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Διαφορικό Κανάλι είναι:

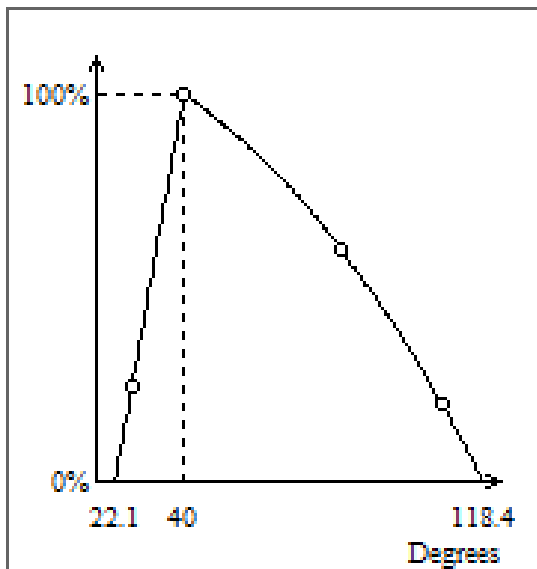
- HOLE
- 60% FBH
- 4 X 20% FBH
- 25% ID GROOVE

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Απόλυτο Κανάλι είναι:

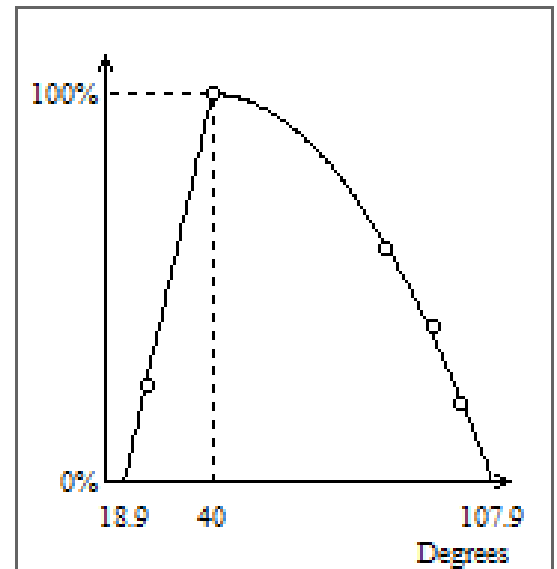
- HOLE
- 60% OD GROOVE
- 40% OD GROOVE
- 20% OD GROOVE
- 25 ID GROOVE

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Κανάλι Μίξης για τον εντοπισμό σφαλμάτων κάτω από τις πλάκες στήριξης είναι:

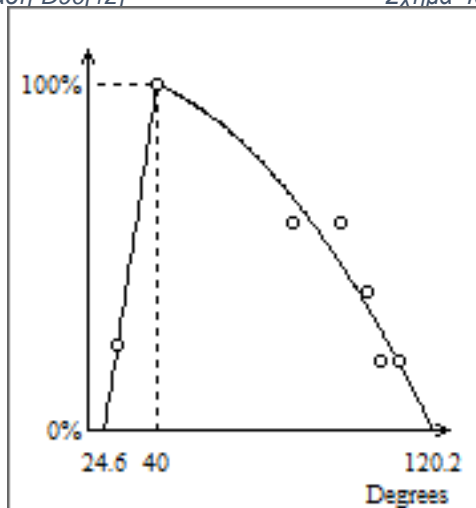
- HOLE
- 60% OD GROOVE
- 40% OD GROOVE
- 20% OD GROOVE
- 25% ID GROOVE
- 60% FBH
- 4 X 20% FBH
- SUPPORT PLATE



Σχήμα 41: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση D90 [12]



Σχήμα 40: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση A90 [12]



Σχήμα 39: Καμπύλη βαθμονόμησης με φάση με MIX [12]

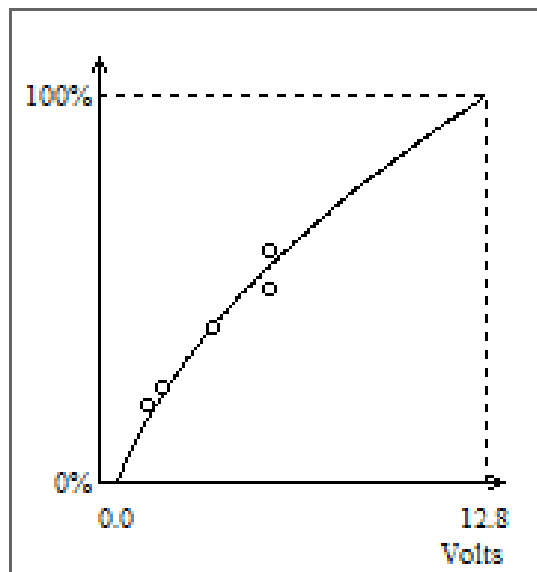
### 7.2.2 Με πλάτος (Volts)

Η βαθμονόμηση με πλάτος γίνεται όταν έχουμε:

1. WLL δηλαδή σφάλματα με ομοιόμορφη απομείωση μεγάλης έκτασης → Απόλυτο κανάλι

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Απόλυτο Κανάλι είναι:

- 20% OD LONG GROOVE
- 40% OD LONG GROOVE
- 60% OD LONG GROOVE
- 25% ID LONG GROOVE
- 50% ID LONG GROOVE



Σχήμα 42: Καμπύλη βαθμονόμησης με πλάτος A90/2 [12]

## Κεφάλαιο 8: Πρότυπα και σωλήνες βαθμονόμησης RFT

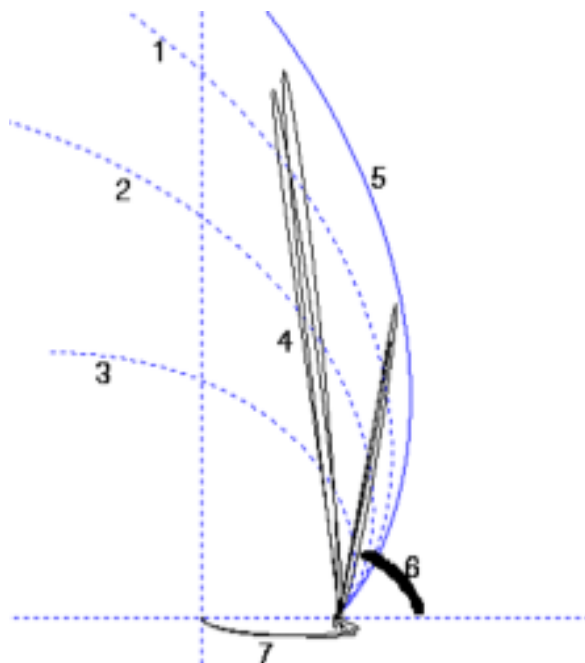
### 8.1 Πρότυπα βαθμονόμησης

Για την επιθεώρηση και την κατασκευή των σωλήνων βαθμονόμησης για την τεχνική του απομακρυσμένου πεδίου σε εναλλάκτες θερμότητας σιδηρομαγνητικού υλικού ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM (Σχήμα 42). Το συγκεκριμένο πρότυπο περιγράφει τις βασικές διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για να γίνει εσωτερικός έλεγχος αυτών σιδηρομαγνητικού υλικού και τους σωλήνες βαθμονόμησης που πρέπει να ακολουθήσουμε για τη βαθμονόμηση του οργάνου.

#### **Standard Practice for In Situ Examination of Ferromagnetic Heat-Exchanger Tubes Using Remote Field Testing<sup>1</sup>**

Σχήμα 43: Πρότυπο ASTM [11]

Το πρότυπο μας επιβάλλει κατά την βαθμονόμηση του οργάνου να χρησιμοποιήσουμε μια μεγάλη πλάκα στήριξης ώστε να μεταφέρουμε το σήμα της στις 0° ούτως ώστε όλα τα σήματα να περιστρέφουν (Σχήμα 43).



Σχήμα 44: Σημα πλάκας στήριξης στραμμένο στις 0°(7)  
[12]

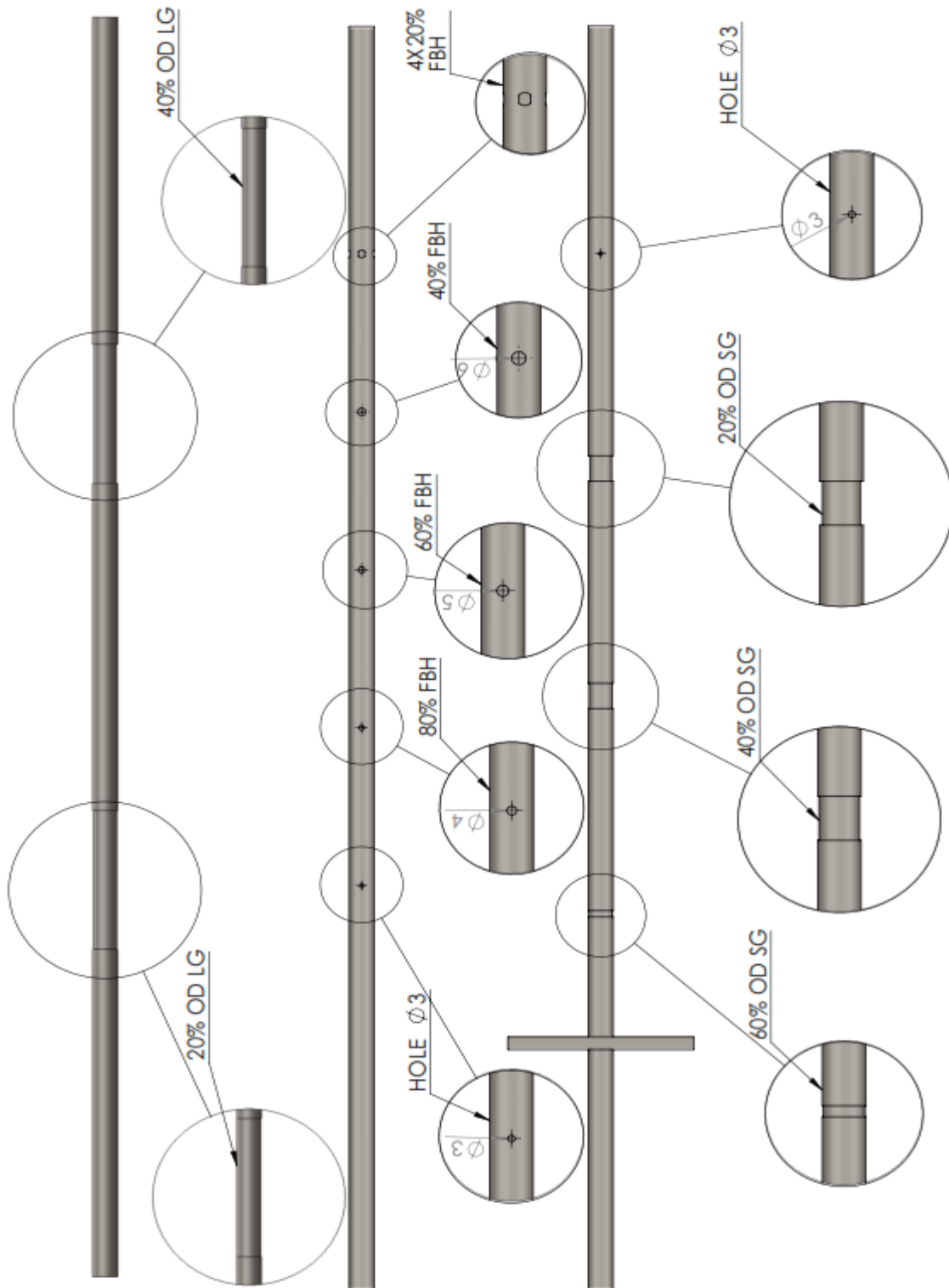


## **8.2 Κατασκευή σωλήνων βαθμονόμησης**

Η κατασκευή των σωλήνων βαθμονόμησης για τον έλεγχο με το RFT έγινε με τον ίδιο εξοπλισμό που κατασκευάστηκαν οι σωλήνες για τη μέθοδο ECT. Χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες από παλαιότερη διπλωματική εργασία [8] που έγινε επίσης στο εργαστήριο ΜΚΕ του ΠΔΜ αλλά κατασκευάστηκαν και νέοι με βάση το πρότυπο που δεν προϋπήρχαν. Κατασκευάστηκε νέα μεγάλη πλάκα στήριξης που είναι απαραίτητη για την βαθμονόμηση του οργάνου και σωλήνας με FBH που απαιτεί το πρότυπο.

## 8.3 Σωλήνες Βαθμονόμησης

### 8.3.1 Κατά ASTM

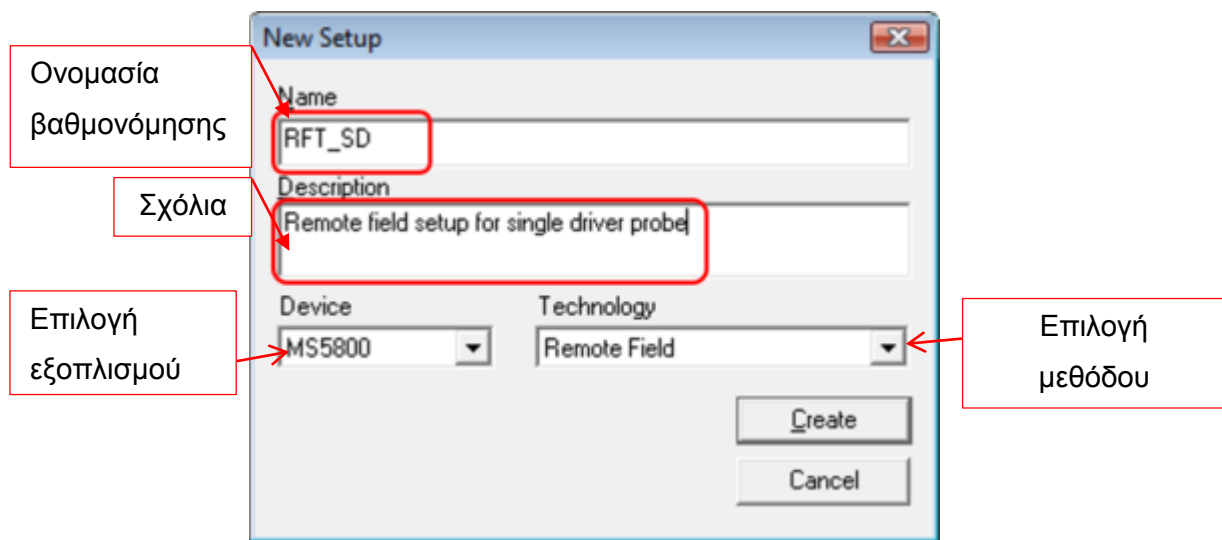


Σχήμα 45: Σωλήνες βαθμονόμησης κατά ASTM

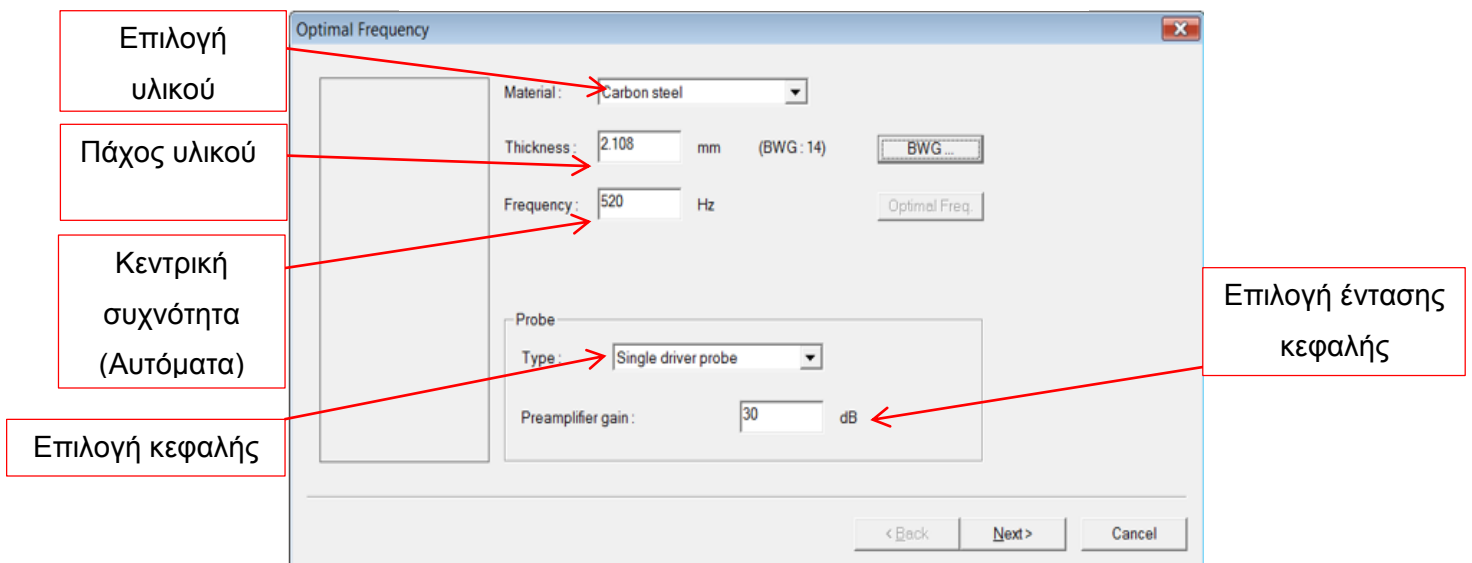
# Κεφάλαιο 9: Διαδικασία και καμπύλες βαθμονόμησης RFT

## 9.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

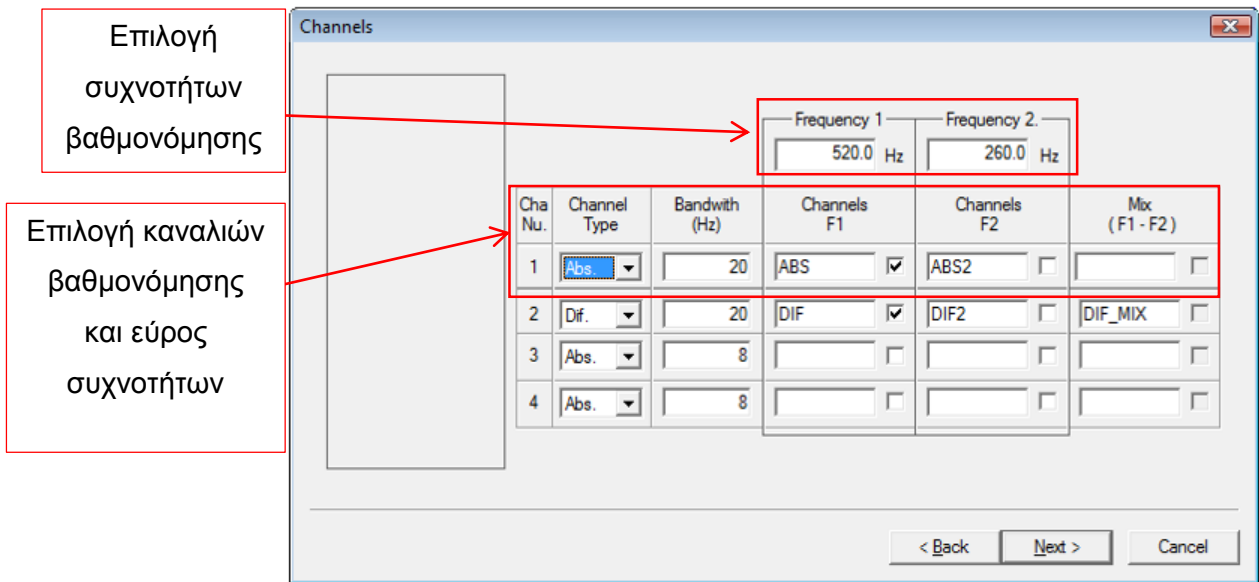
Για να γίνει σωστά η βαθμονόμηση πρέπει το σήμα που πήραμε από μια πλάκα στήριξης να είναι στις 0°. Αυτό δεν γίνεται αυτόματα κατά την πιο κάτω διαδικασία, έτσι πρέπει χειροκίνητα να επιλέξουμε το σήμα της πλάκας και με την εντολή που υπάρχει να περιστρέψουμε την πλάκα στις 0° και παράλληλα θα περιστρέφουν όλα τα σήματα στις αντίστοιχες μοίρες. Μετά ακολουθούμε την διαδικασία όπως είναι.



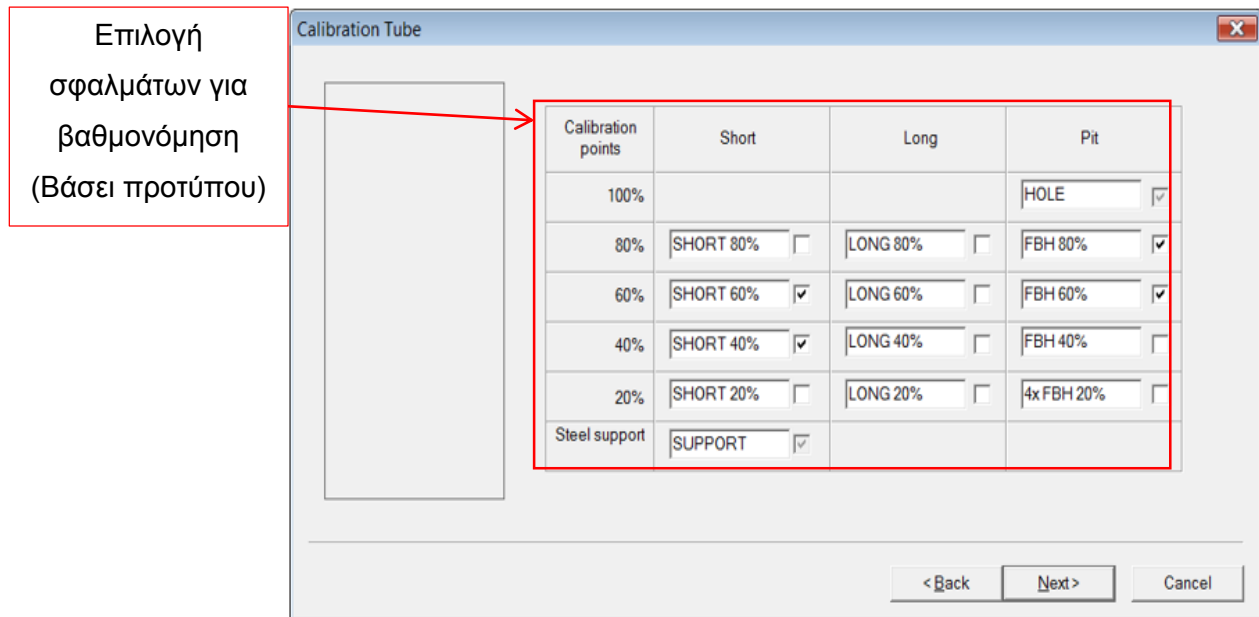
Σχήμα 46 : Βαθμονόμηση RFT Βήμα 1 [12]



Σχήμα 47 : Βαθμονόμηση RFT Βήμα 2 [12]



Σχήμα 48: Βαθμονόμηση RFT Βήμα 3 [12]



Σχήμα 49: Βαθμονόμηση RFT Βήμα 4 [12]

Χαρακτηρισμός των σφαλμάτων

**OBS** = Μη πρόσβαση ελέγχου

**DNT** = Στράβωμα σωλήνα

**PLG** = Ταπωμένος σωλήνας

**PIT** = Μικρά σφάλματα π.χ. τρύπες, διάβρωση κλπ.

**WLS** = Μικρής έκτασης απομείωση

**WLL** = Μεγάλης έκτασης απομείωση

**WLT** = Σταδιακή απομείωση

Defect	Name	Channel	Curve	Ext.	Sel
Defect 1	OBS	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 2	DNT	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 3	PLG	None	None		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 4	PIT	DIF	Ø/depth		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 5	WLS	ABS	Ø/depth	S	<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 6	WLL	ABS	Ø/depth	L	<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 7	WLT	ABS	Ø/depth	T	<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 8	DSI	DIF_MIX	Ø/depth		<input checked="" type="checkbox"/>
Defect 9		None	None		<input type="checkbox"/>
Defect 10		None	None		<input type="checkbox"/>

Σχήμα 50: Βαθμονόμηση RFT Βήμα 5 [12]

Επιλογή καναλιού και καμπύλης βαθμονόμησης

D90 = Διαφορικό κανάλι με κεντρική συχνότητα και βαθμονόμηση με φάση

A90 = Απόλυτο κανάλι με κεντρική συχνότητα και βαθμονόμηση με πλάτος

MIX= κανάλι μίξης δυο συχνοτήτων

Επιλογή σημείου αναφοράς για βαθμονόμηση διαφορικού καναλιού

Differential channels  
Calibration point : HOLE  
Angle : 90.00 deg    Amplitude : 1 V

Absolute channels  
Absolute channels use the reference SUPPORT. They are adjusted to an amplitude of 1 volt with an angle of 0 degree(s).

Σχήμα 51: Βαθμονόμηση RFT Βήμα 6 [12]

Για τη βαθμονόμηση του απόλυτου καναλιού χρειαζόμαστε μεγάλη πλάκα στήριξης

## 9.2 Καμπύλες βαθμονόμησης

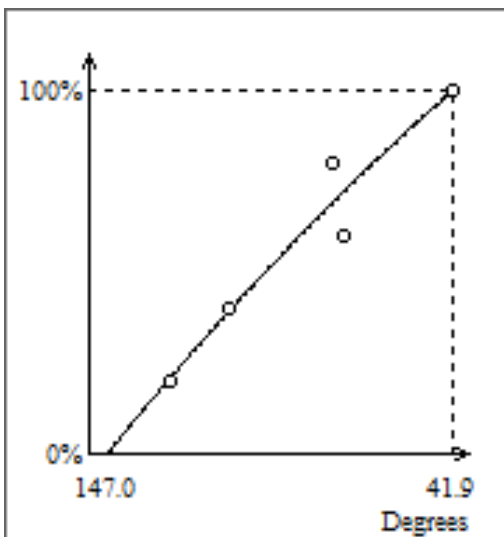
Οι καμπύλες βαθμονόμησης δημιουργούνται αυτόματα όταν κάνουμε την πιο πάνω διαδικασία. Ο λόγος που απαιτούνται είναι όταν ελέγχουμε ένα άγνωστο δοκίμιο, μέσα από την βάση δεδομένων που αποτελεί την καμπύλη βαθμονόμησης που δημιούργησε μπορεί να μας δείξει, πάντα συγκριτικά τι σφάλματα έχουμε σε ένα σωλήνα. Οι σωλήνες βαθμονόμησης πρέπει να είναι φτιαγμένοι σωστά και βάση των σφαλμάτων αναμένουμε να συναντήσουμε αλλά και του εκάστοτε προτύπου.

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Διαφορικό Κανάλι:

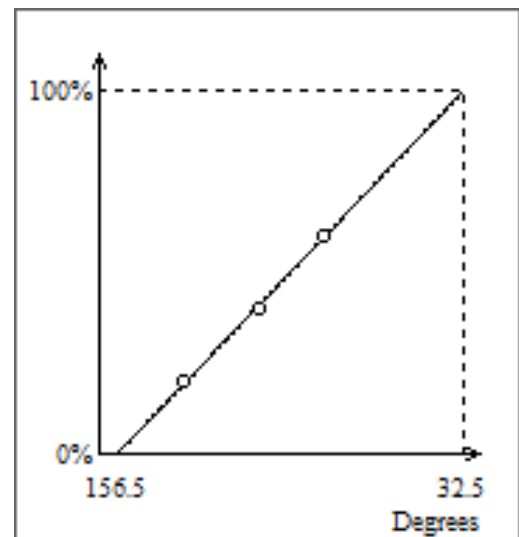
- HOLE
- 80% FBH
- 60% FBH
- 40% FBH
- 4 X 20% FBH

Τα σφάλματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σωλήνες βαθμονόμησης για το Απόλυτο Κανάλι:

- 60% OD GROOVE
- 40% OD GROOVE
- 20% OD GROOVE



Σχήμα 52: Καμπύλη βαθμονόμησης D90 [12]

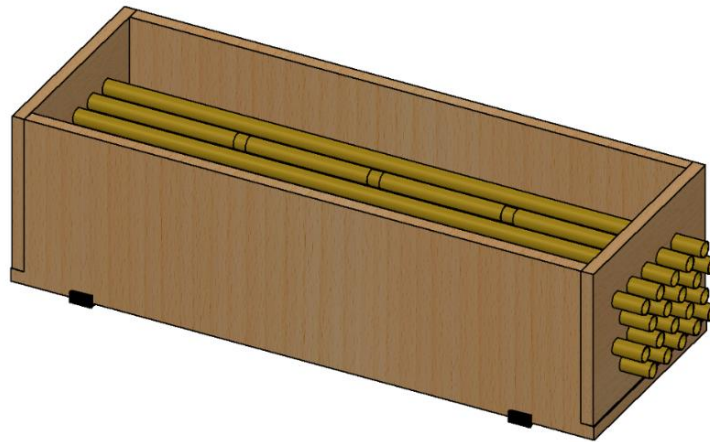


Σχήμα 53: Καμπύλη βαθμονόμησης A90 [12]

# Κεφάλαιο 10: Έλεγχος εναλλάκτη Μη Σιδηρομαγνητικού Υλικού

## 10.1 Περιγραφή εναλλάκτη

Ο εναλλάκτης μη σιδηρομαγνητικού υλικού που φτιάξαμε είναι κατασκευασμένος από ξύλο MDF και οι σωλήνες από ορείχαλκο εξωτερικής διαμέτρου 25mm και πάχους 1mm. Ο εναλλάκτης αποτελείται από 20 σωλήνες από τους οποίους οι 13 έχουν σφάλματα που κατασκευάστηκαν από εμάς παρόμοια με αυτά που ενδέχεται να συναντήσουμε στη βιομηχανία.



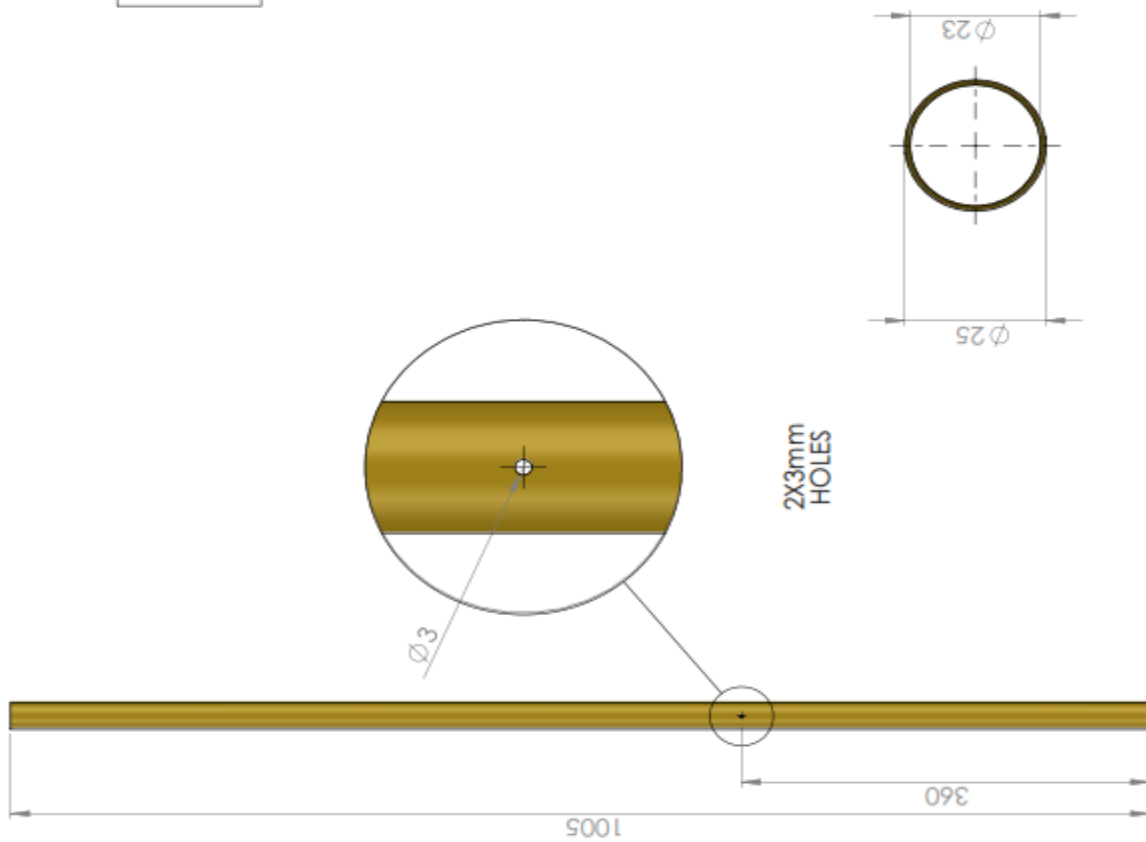
Σχήμα 54: Εναλλάκτης Μη Σιδηρομαγνητικού Υλικού



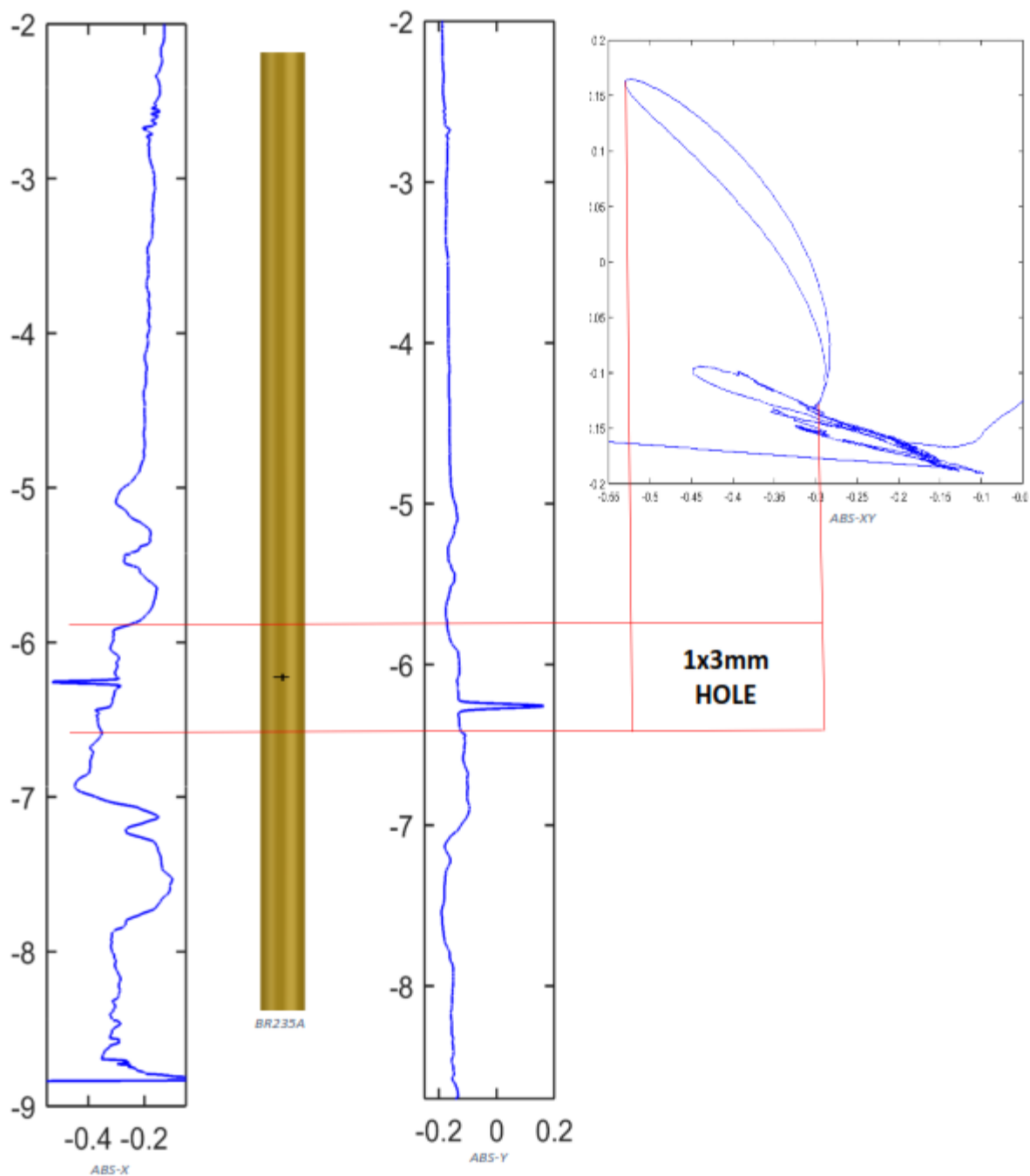
Σχήμα 55: Διάταξη ελέγχου εναλλάκτη με ECT

## 10.2 Σήματα από σωλήνες που πάρθηκαν με την καμπύλη Φάσης

BR2325A

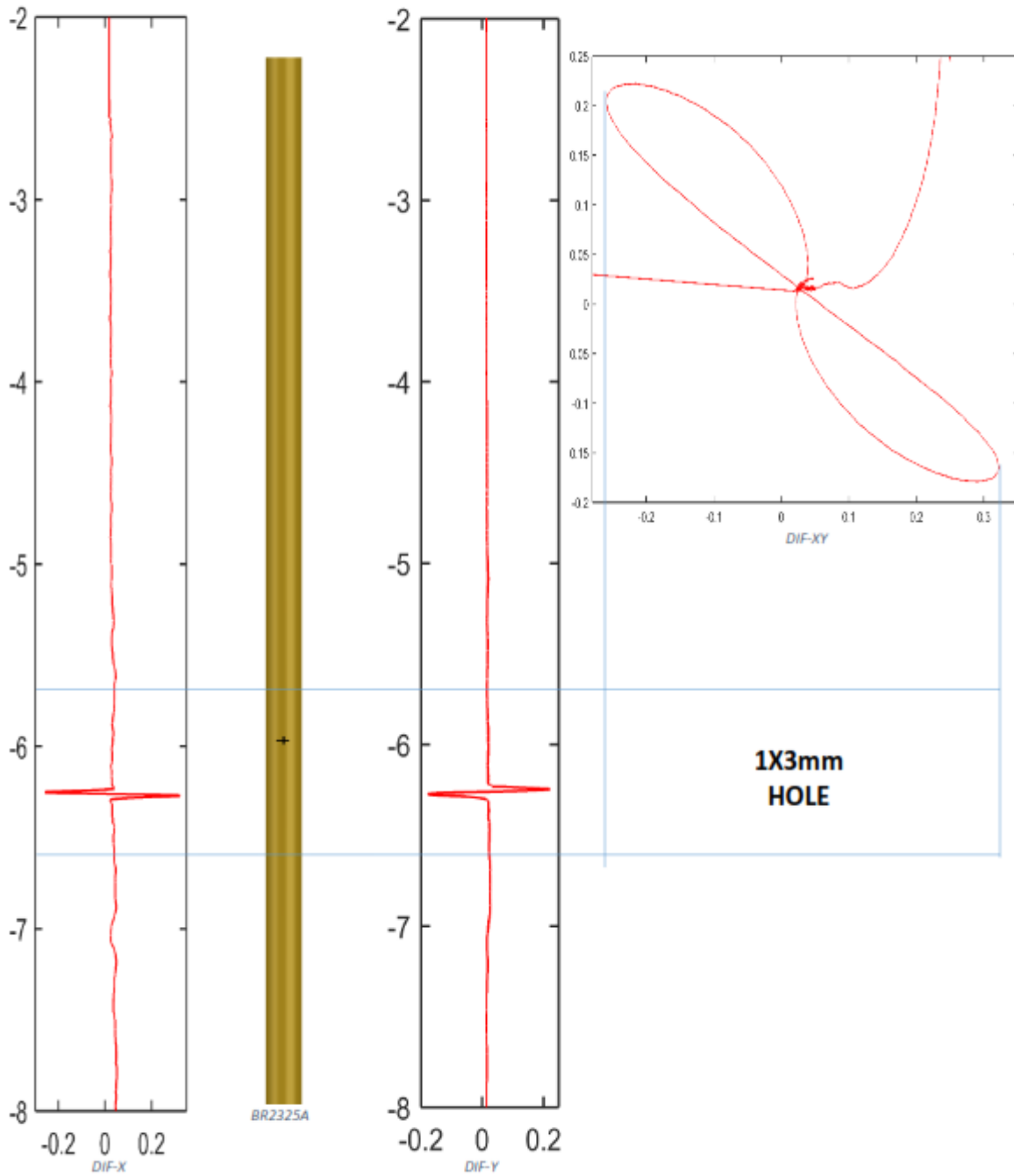






# BR2325A

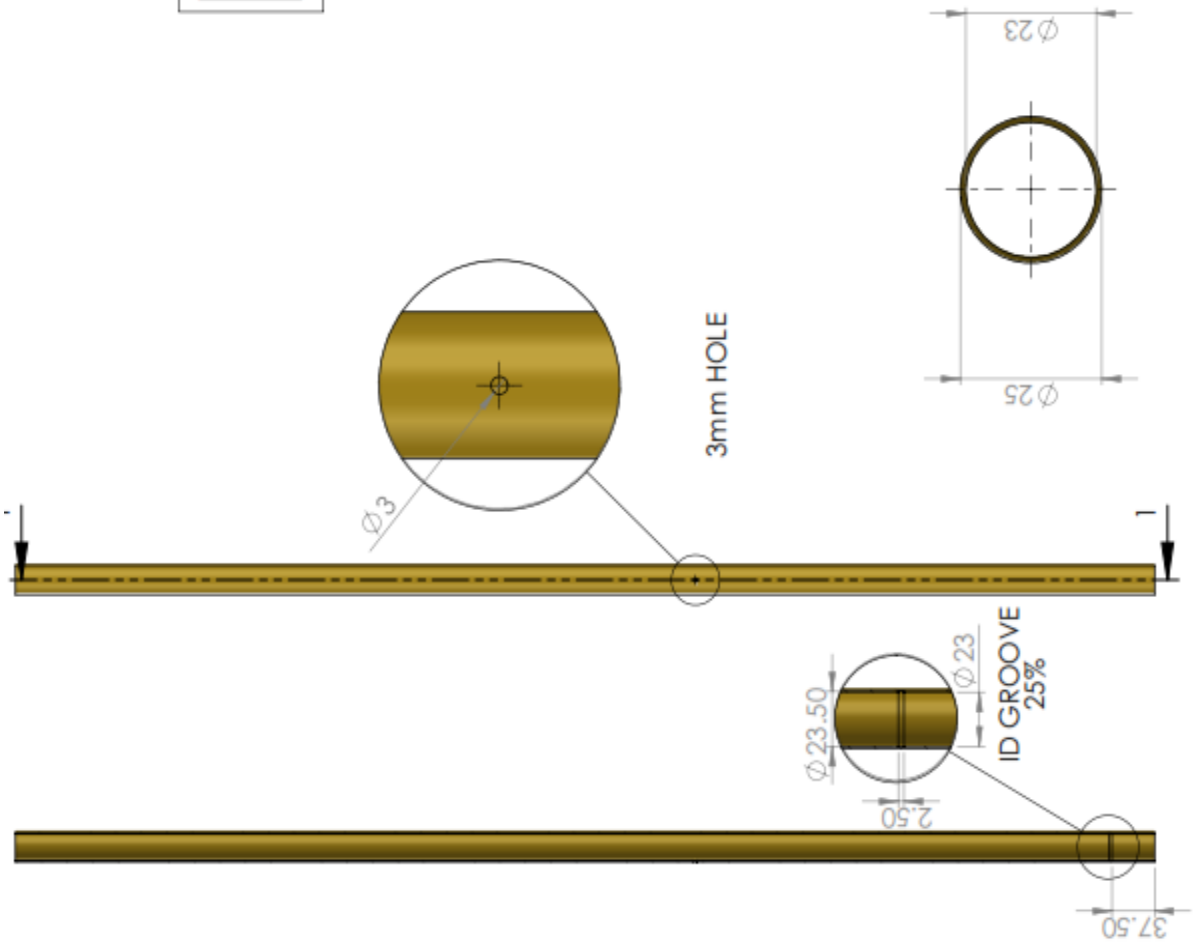
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

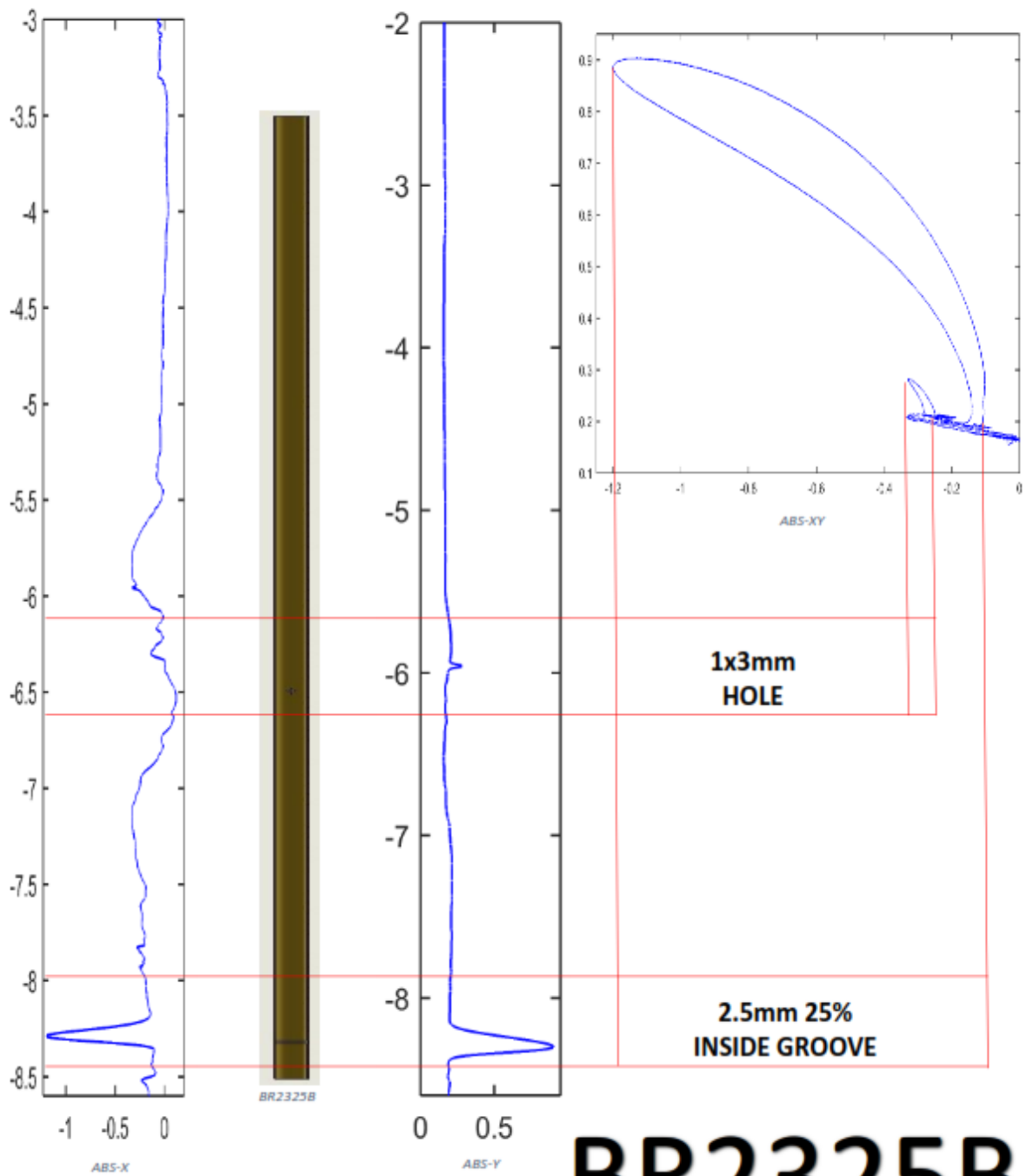


# BR2325A

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

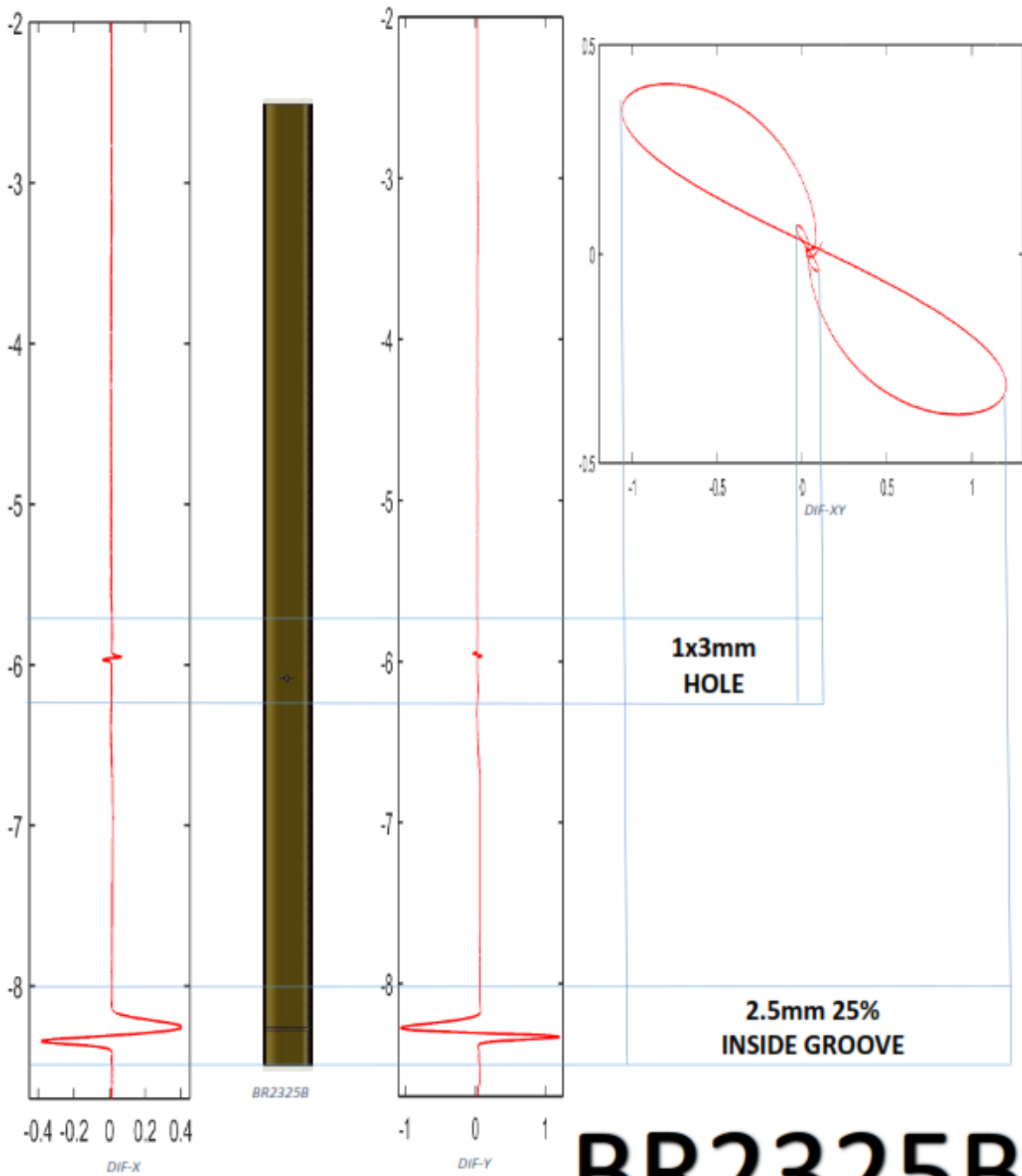
# BR2325B





# BR2325B

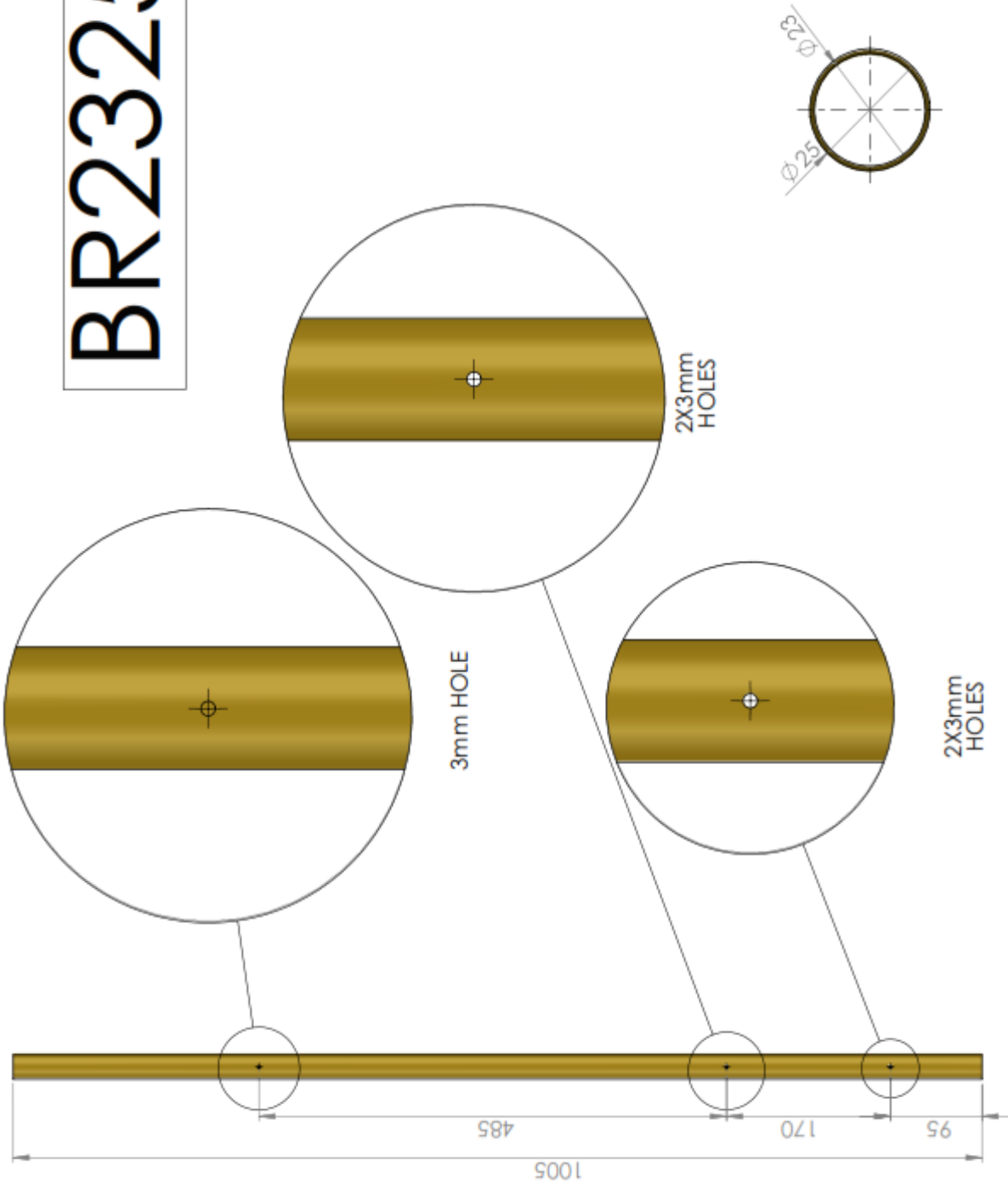
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

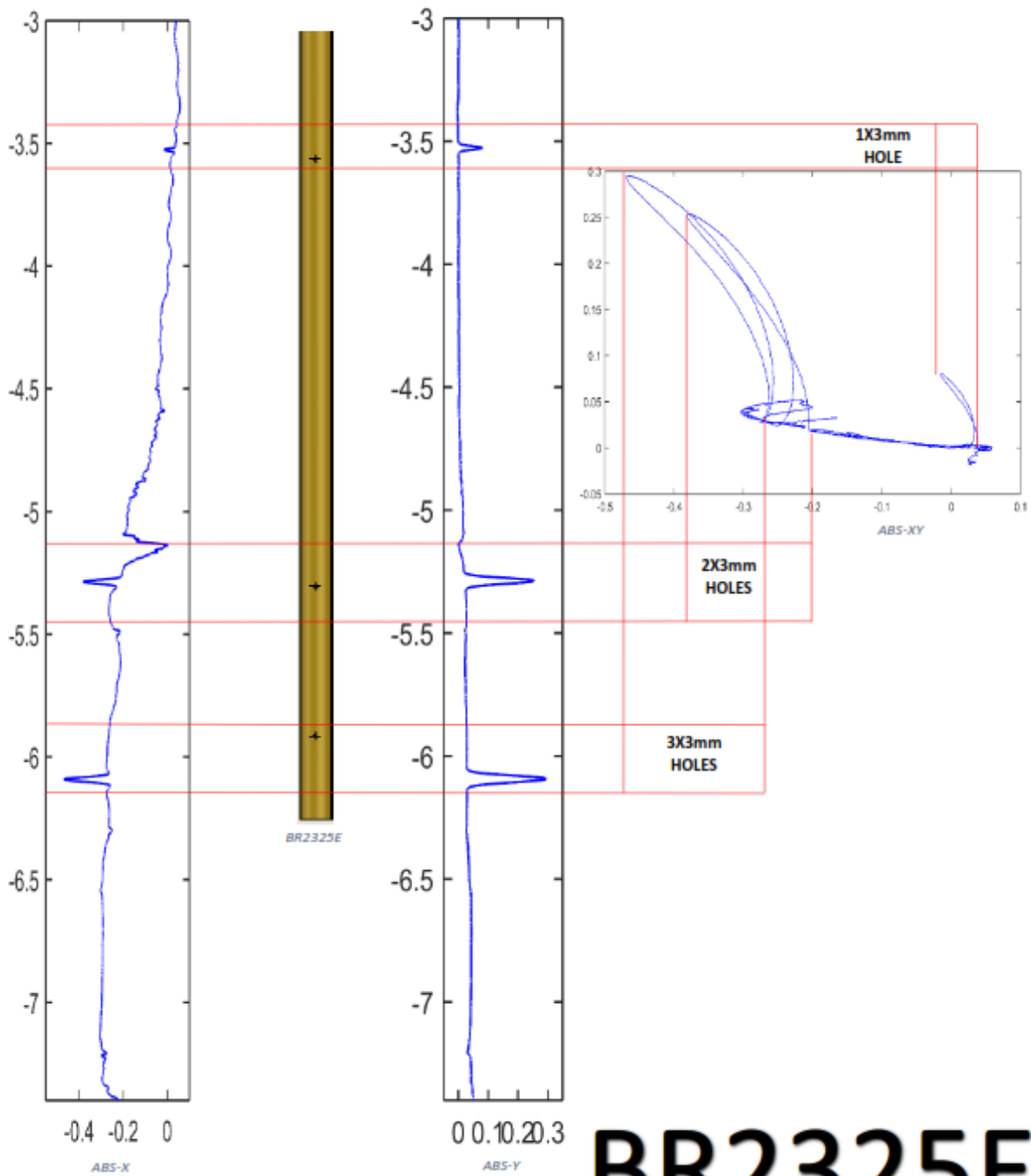


# BR2325B

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

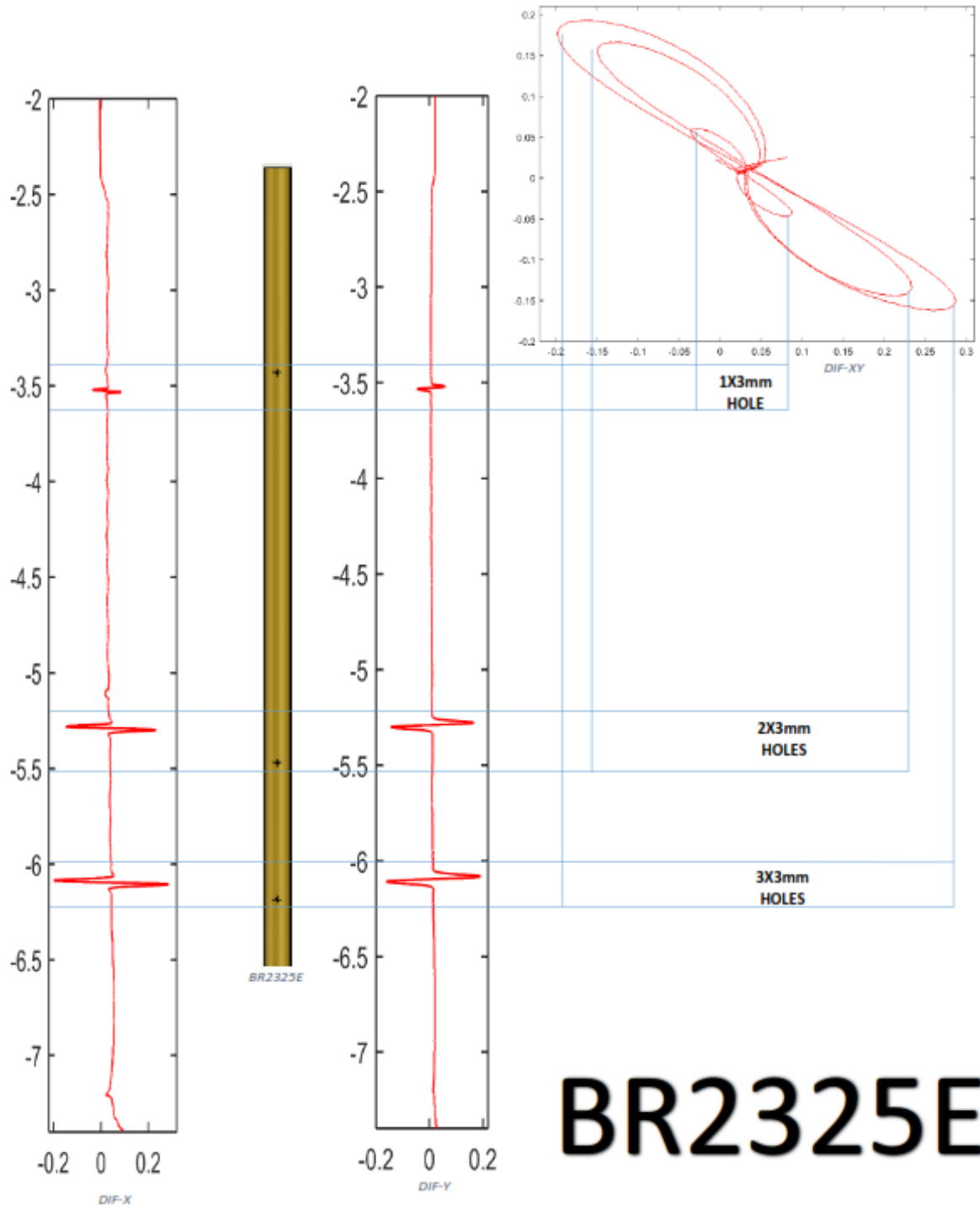
BR2325E





# BR2325E

**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

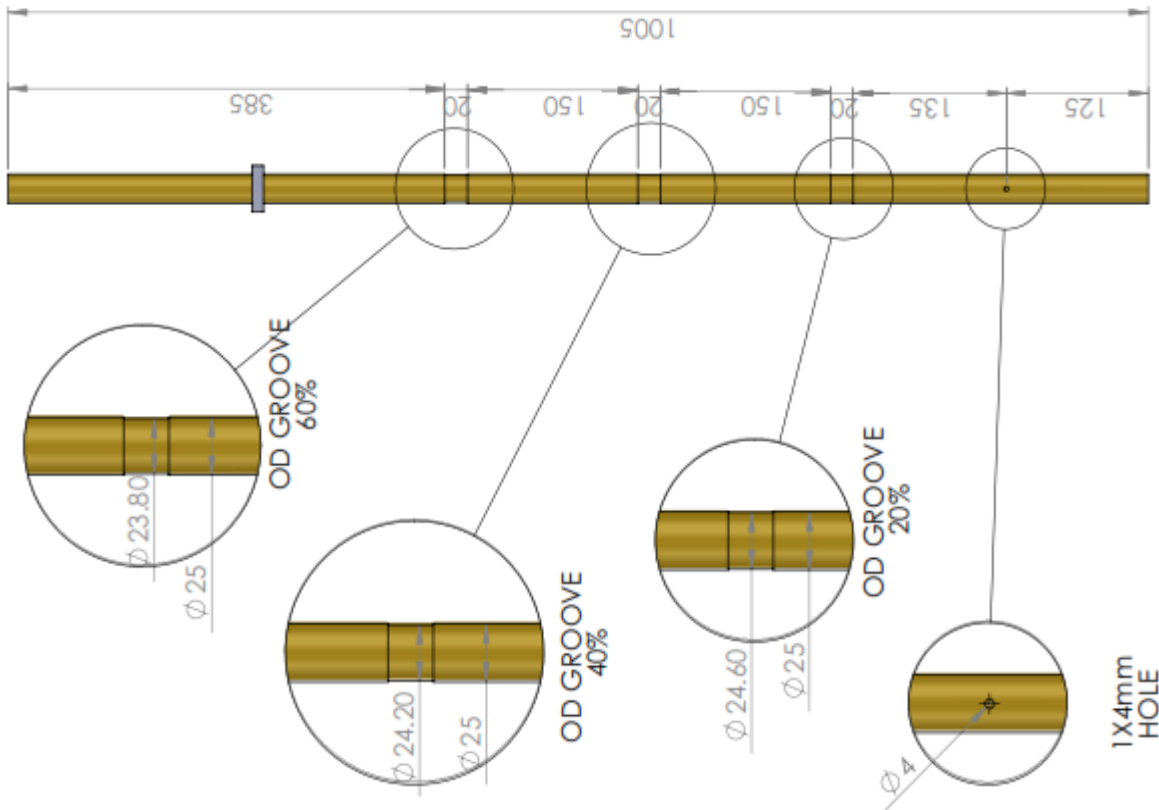
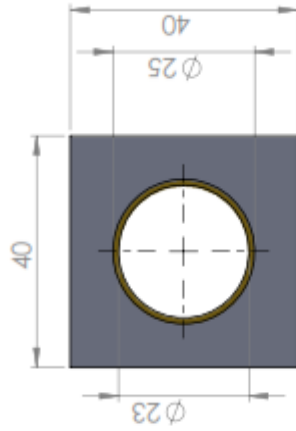


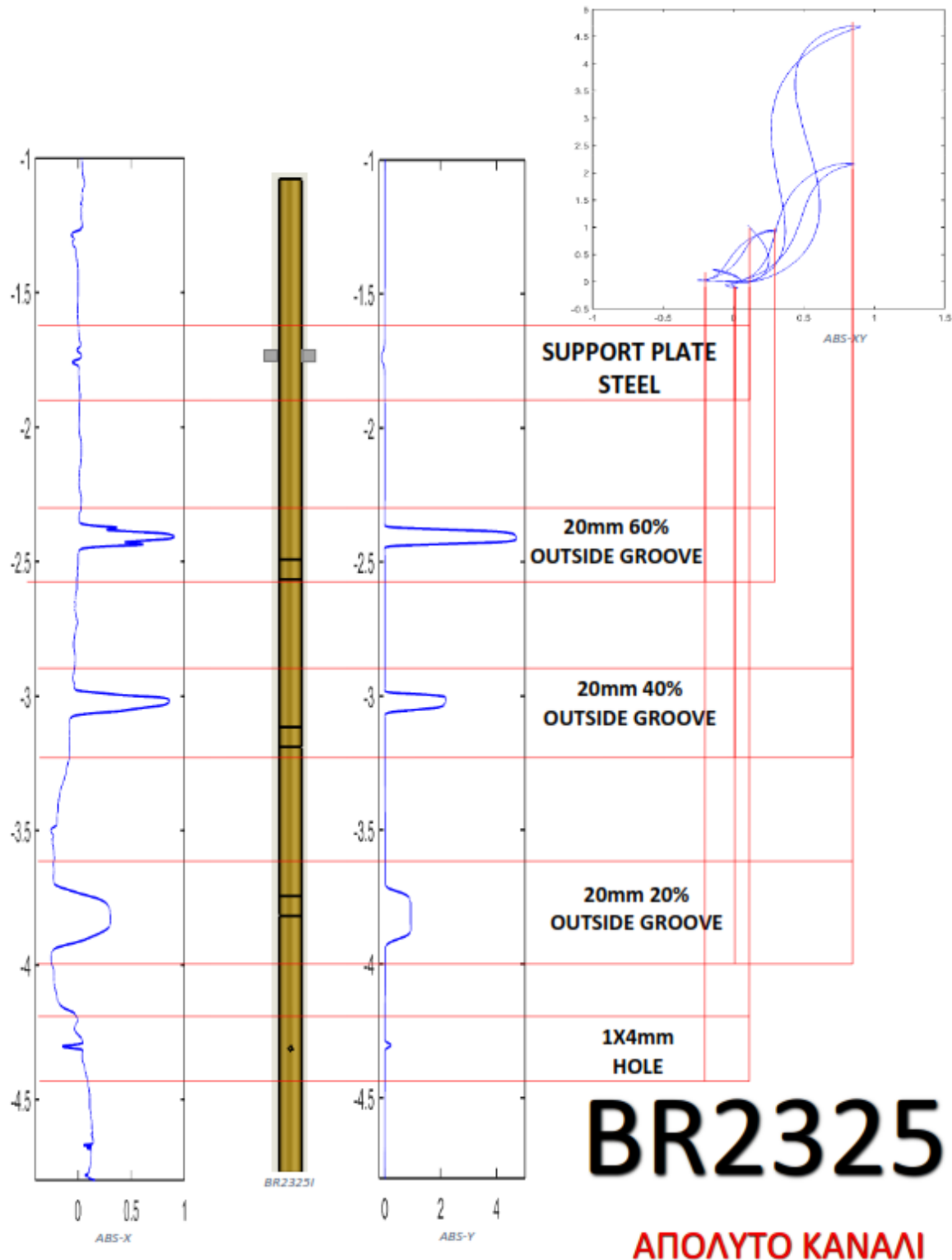
# BR2325E

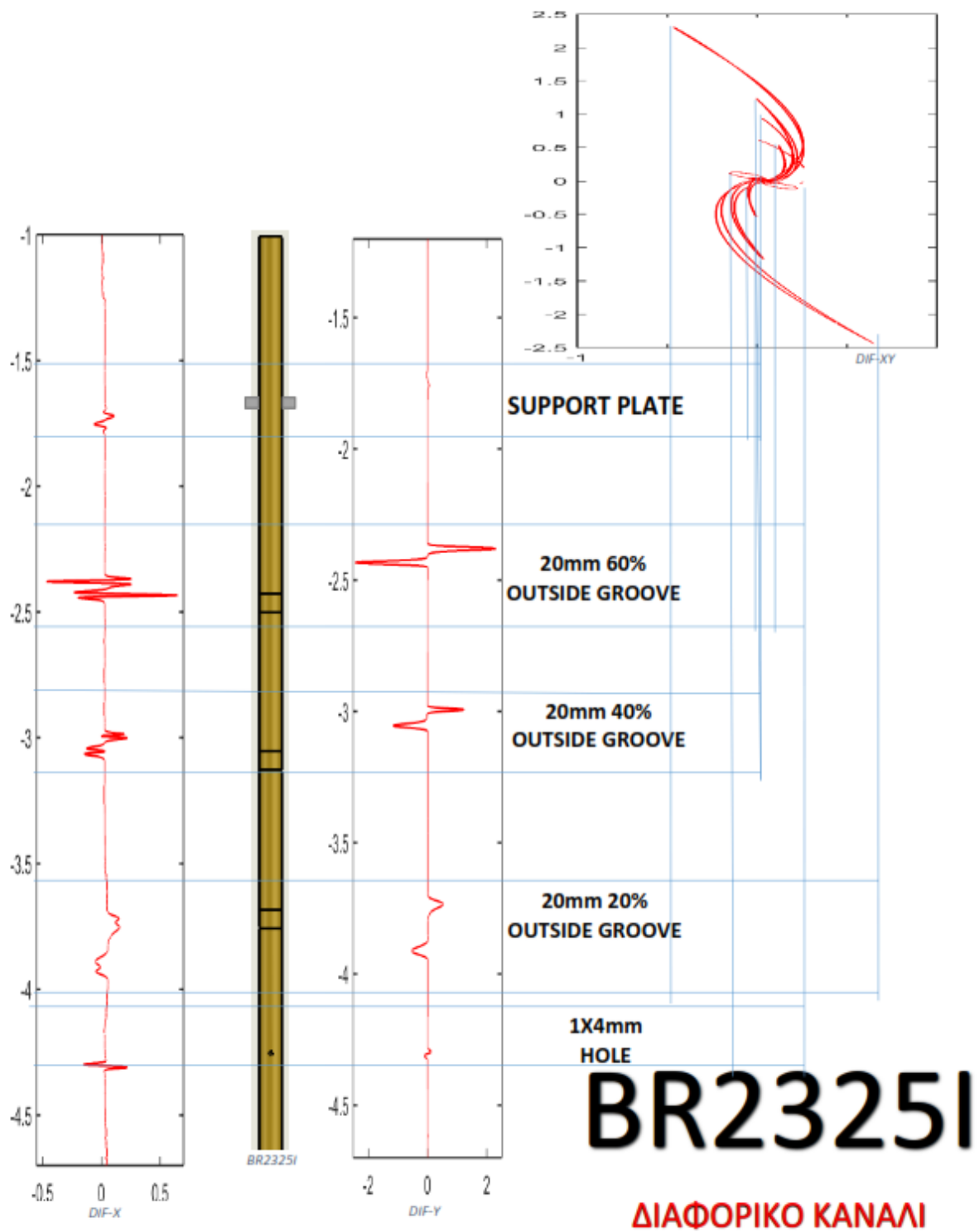
**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**



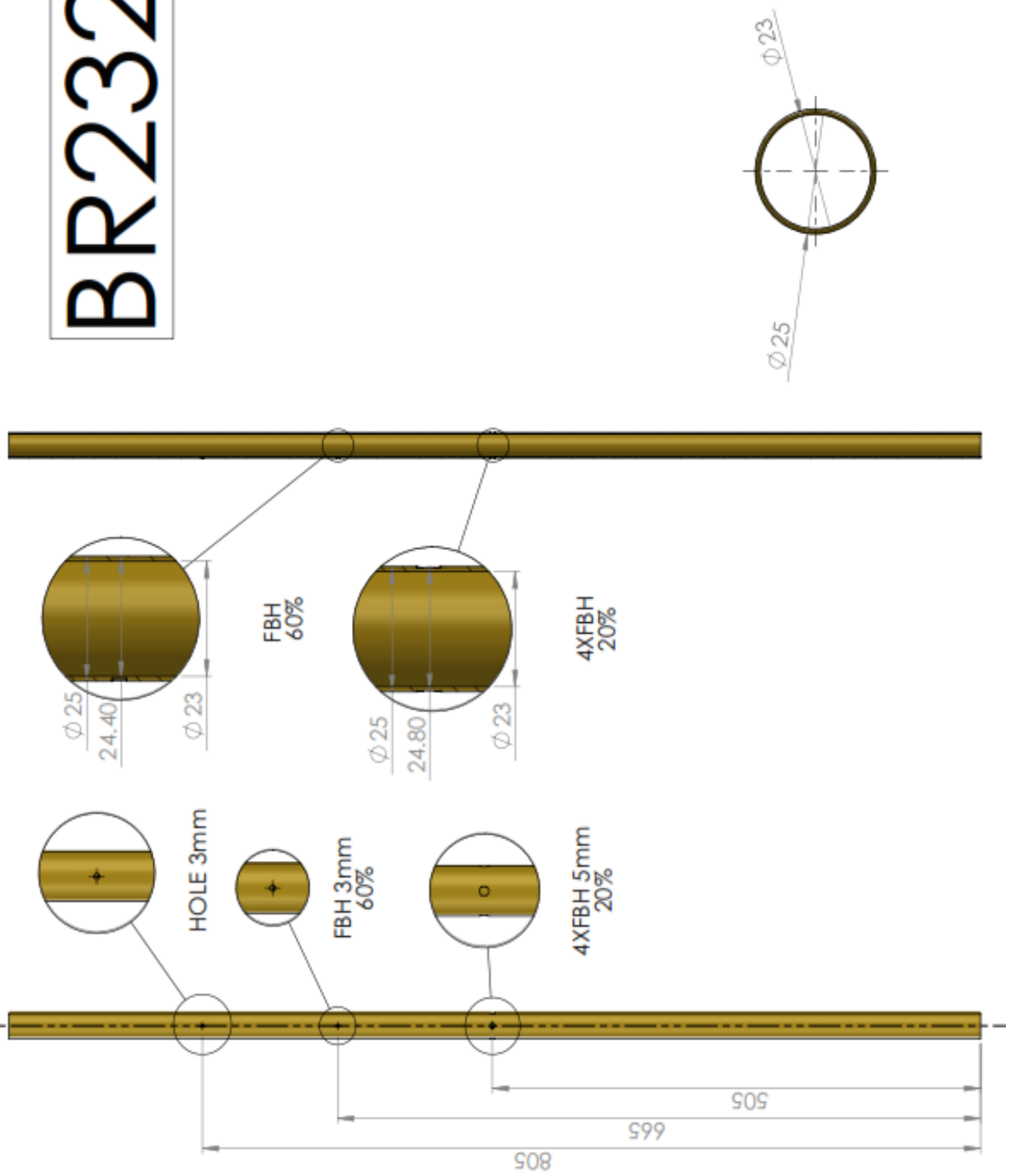
# BR2325I

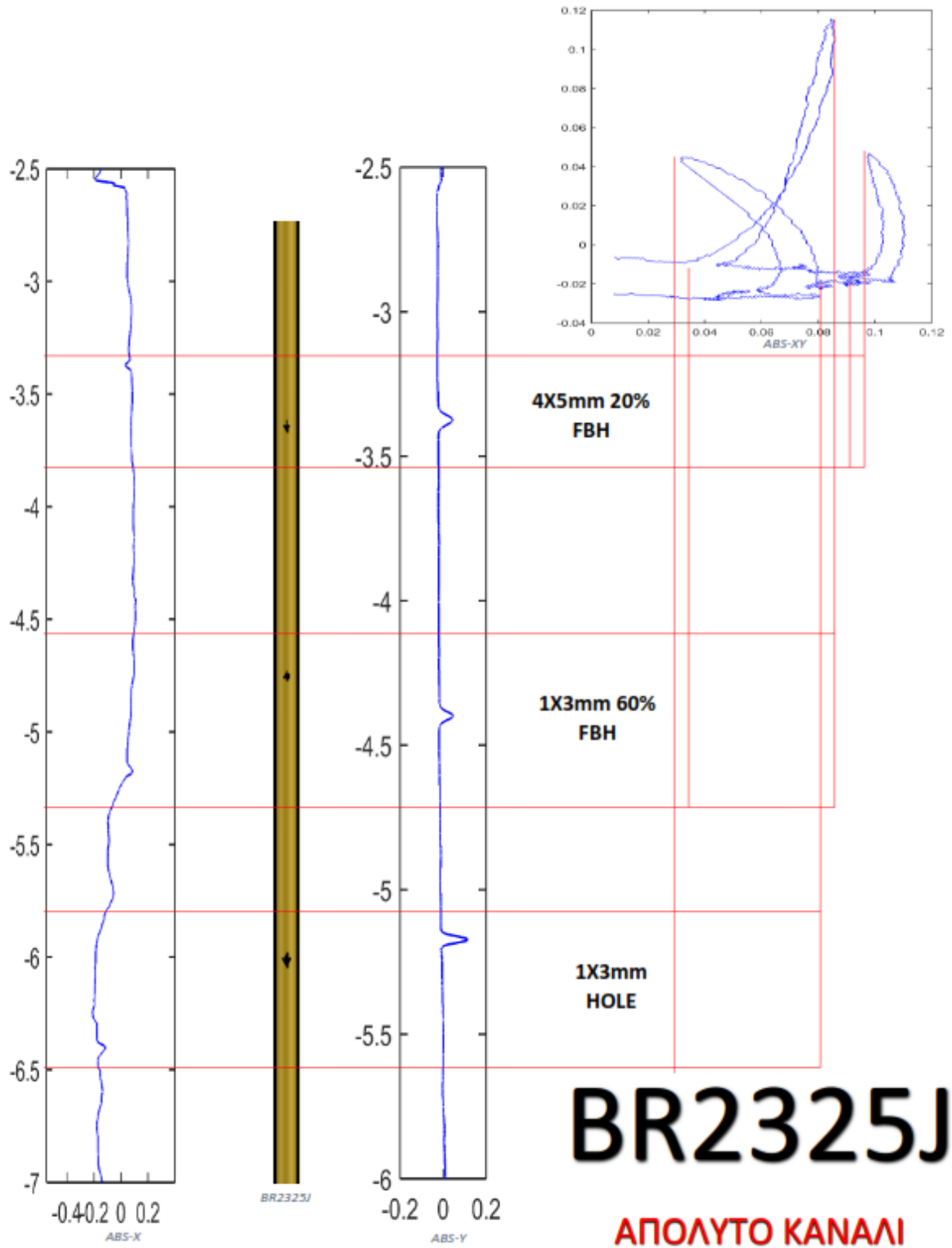


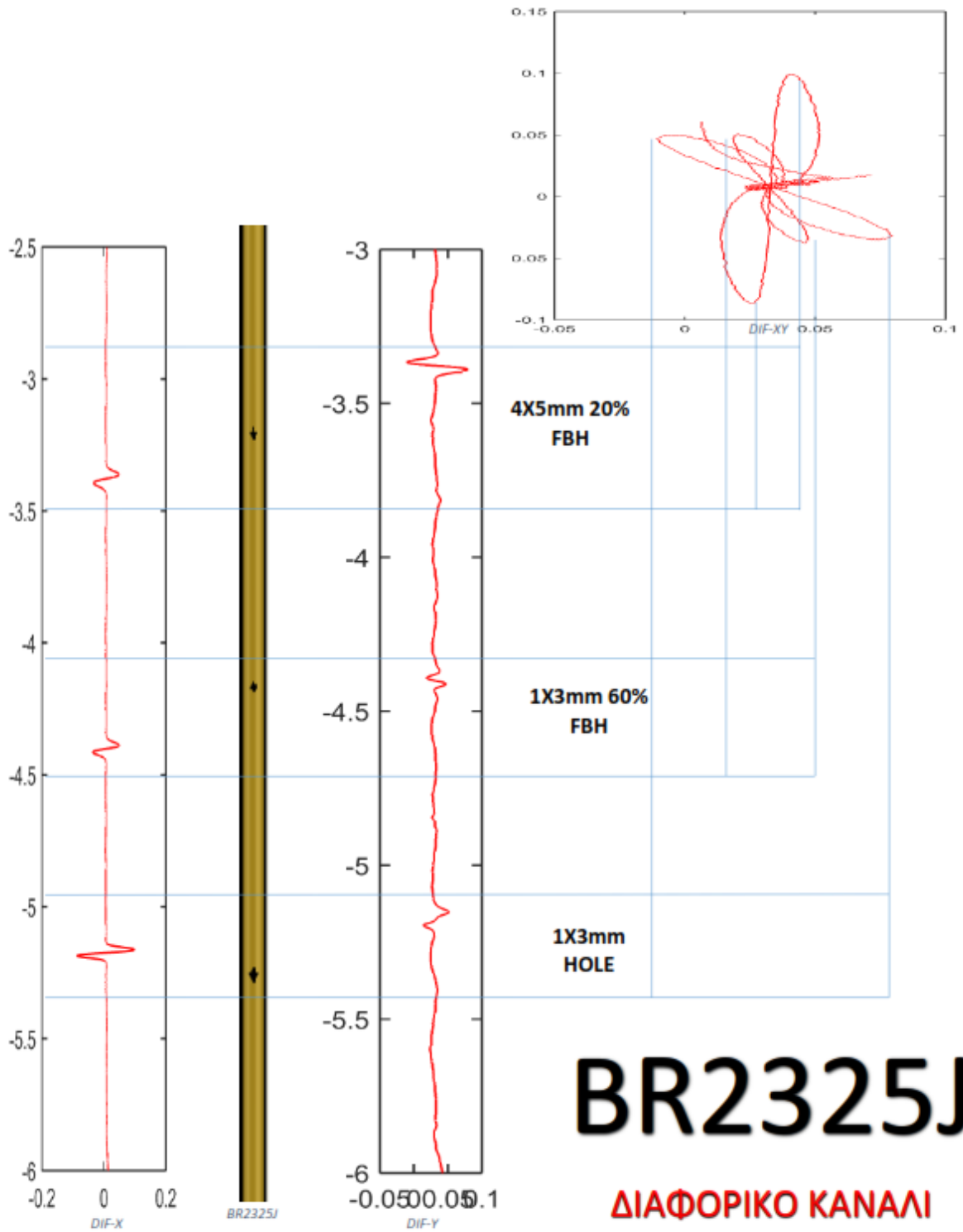




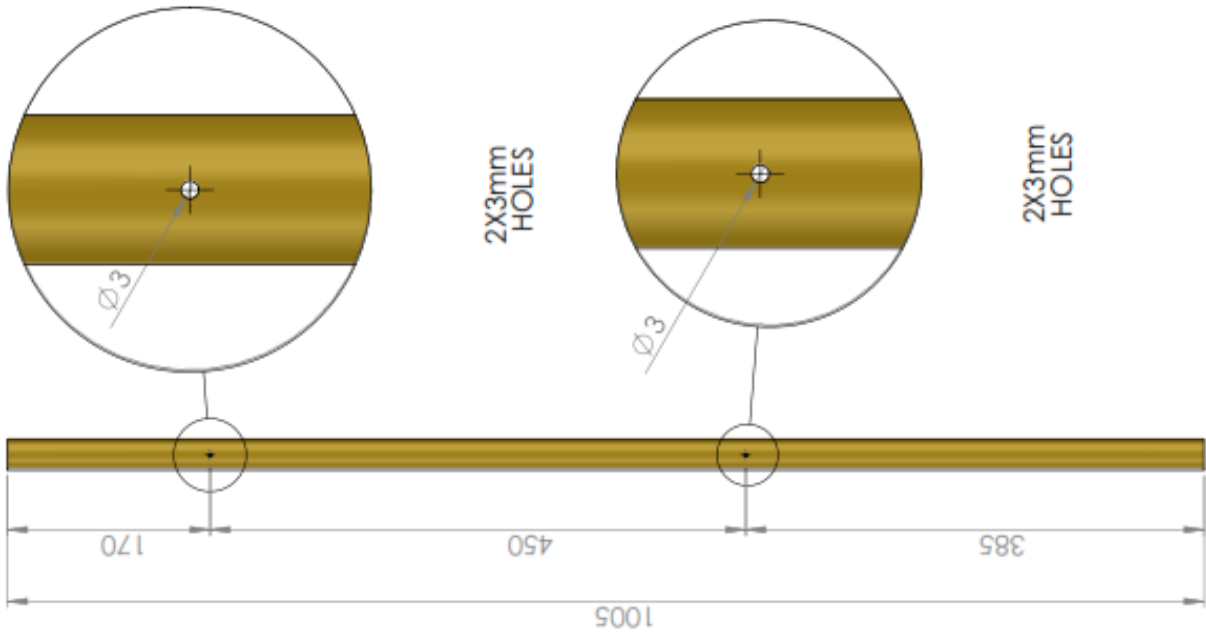
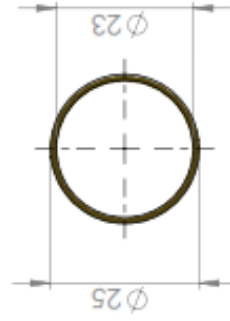
# BR2325J

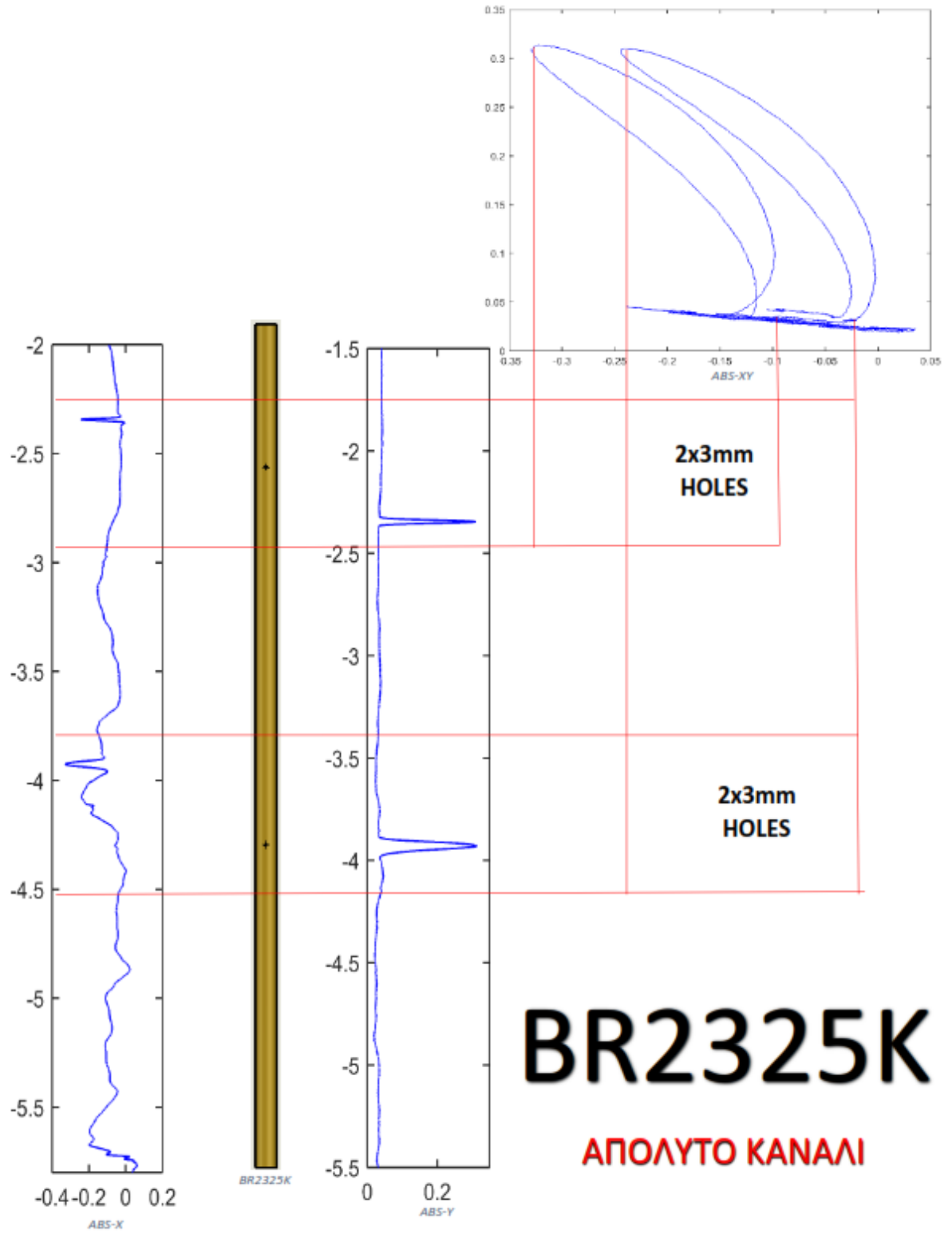






BR2325K

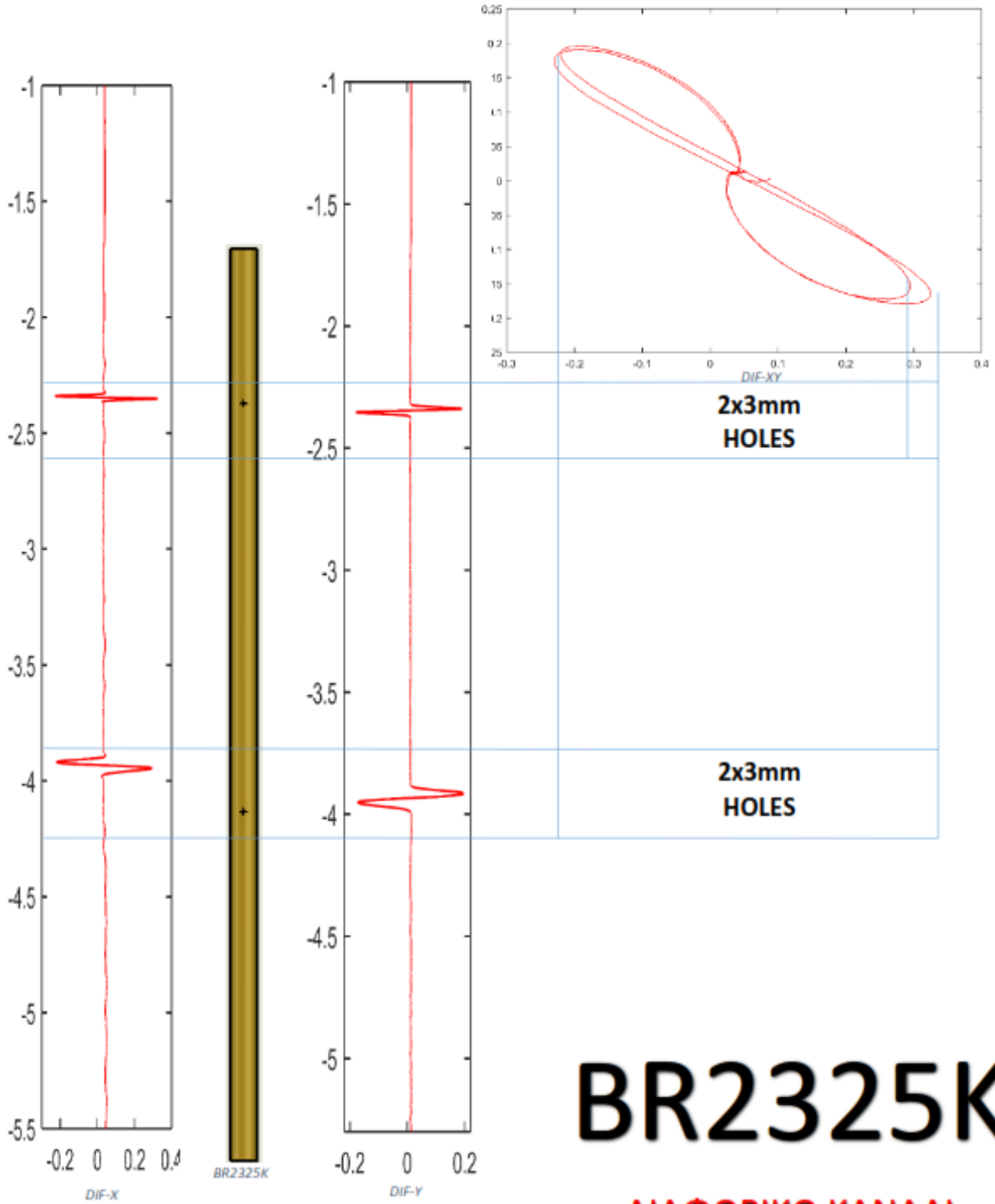




**BR2325K**

**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

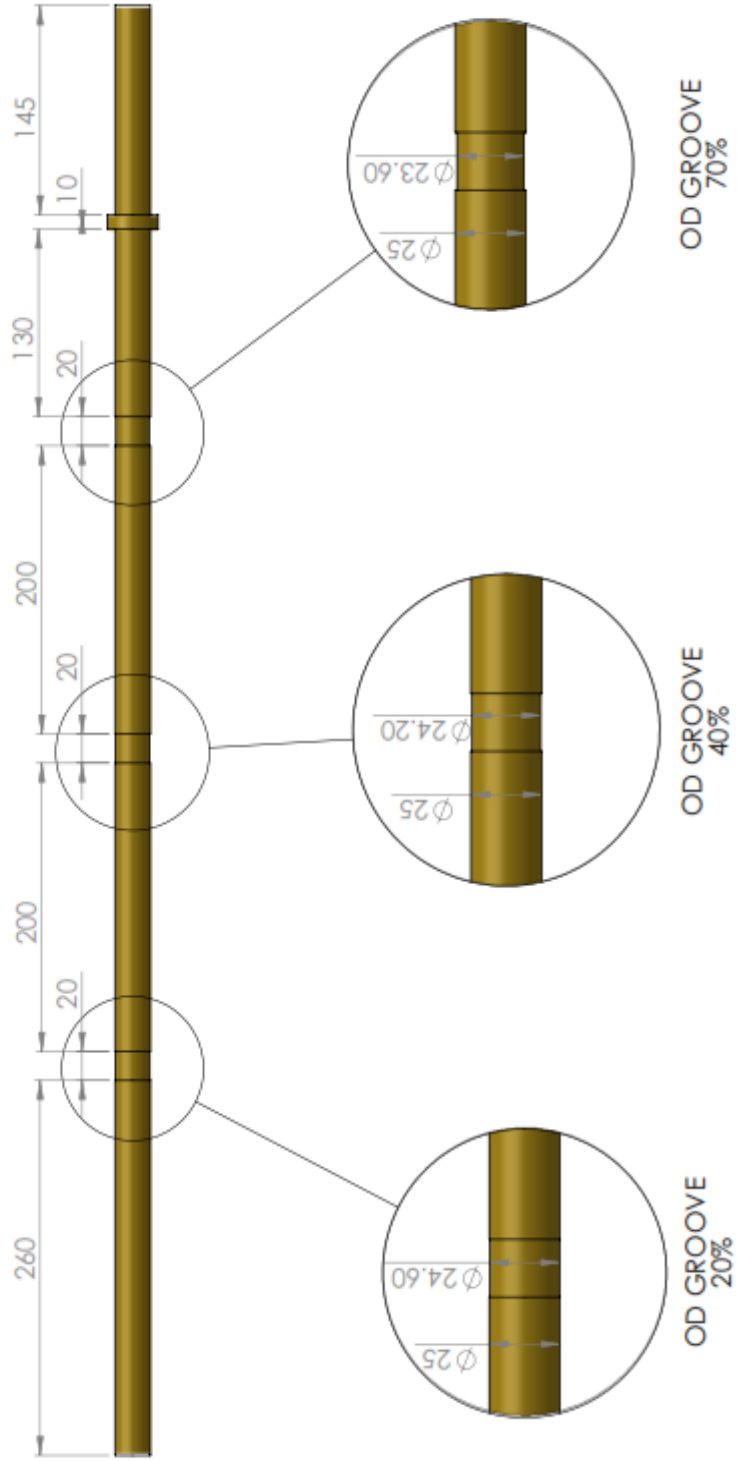
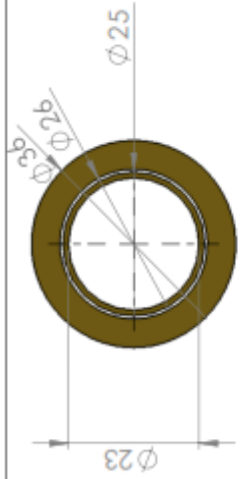


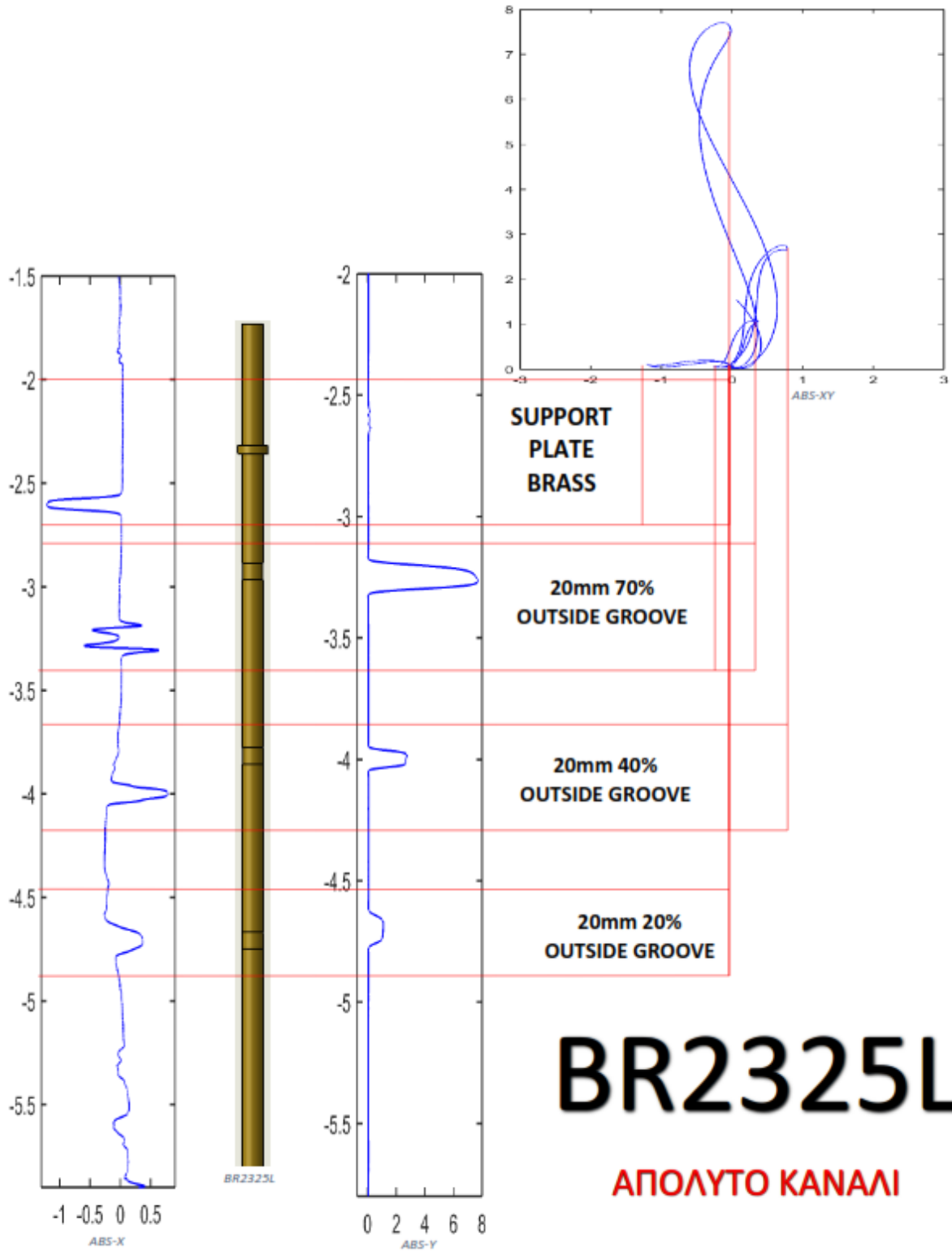


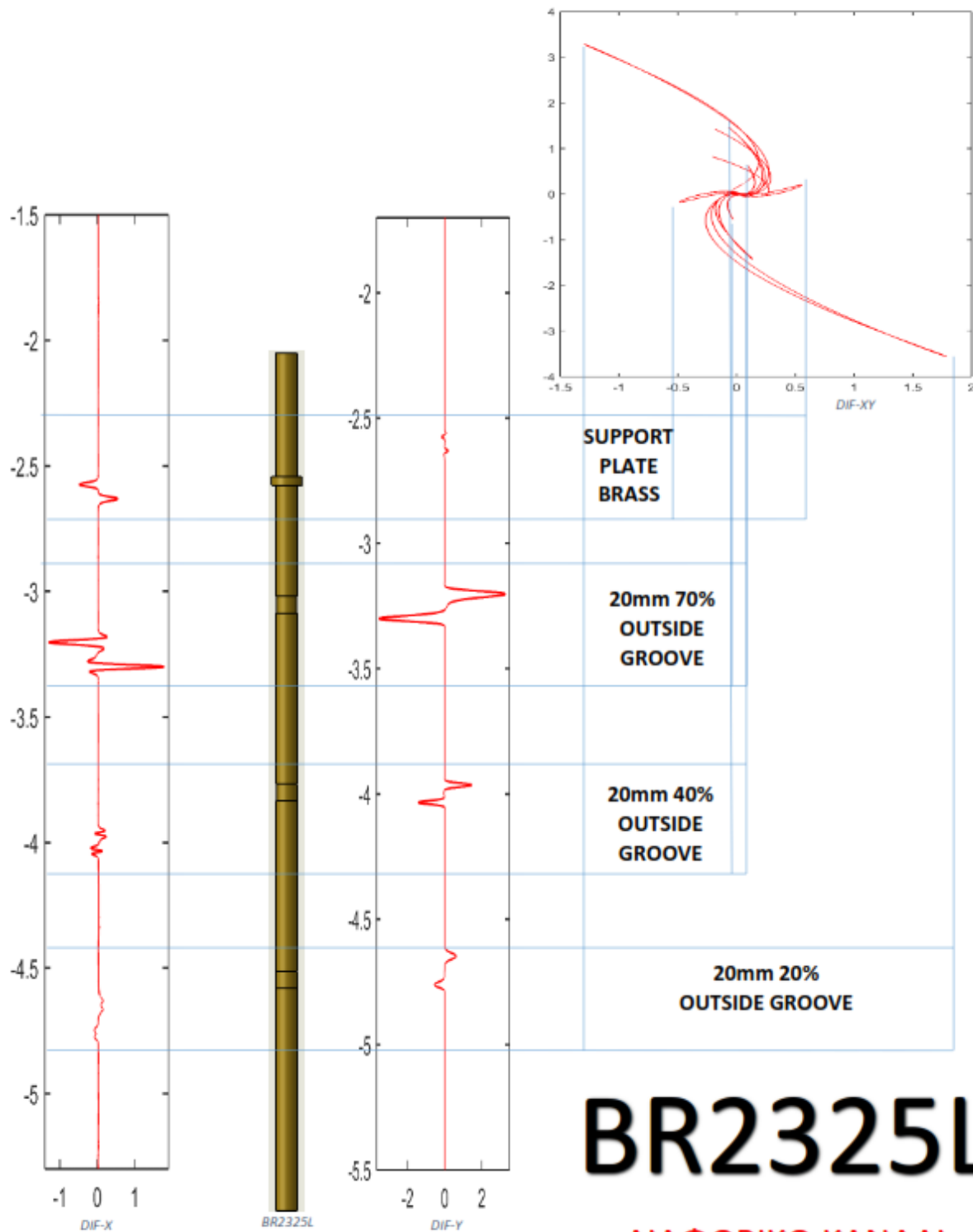
**BR2325K**

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

# BR2325L



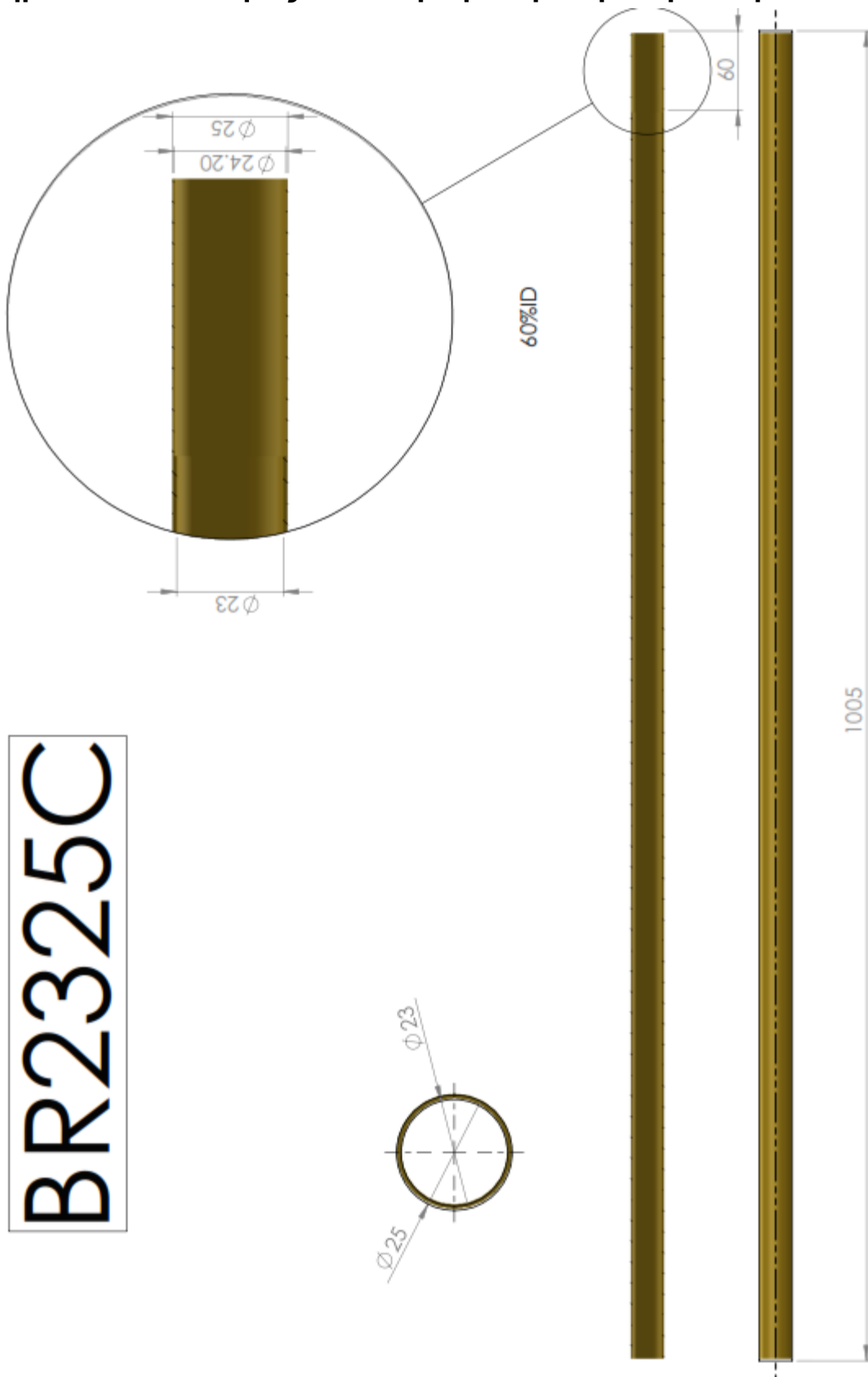


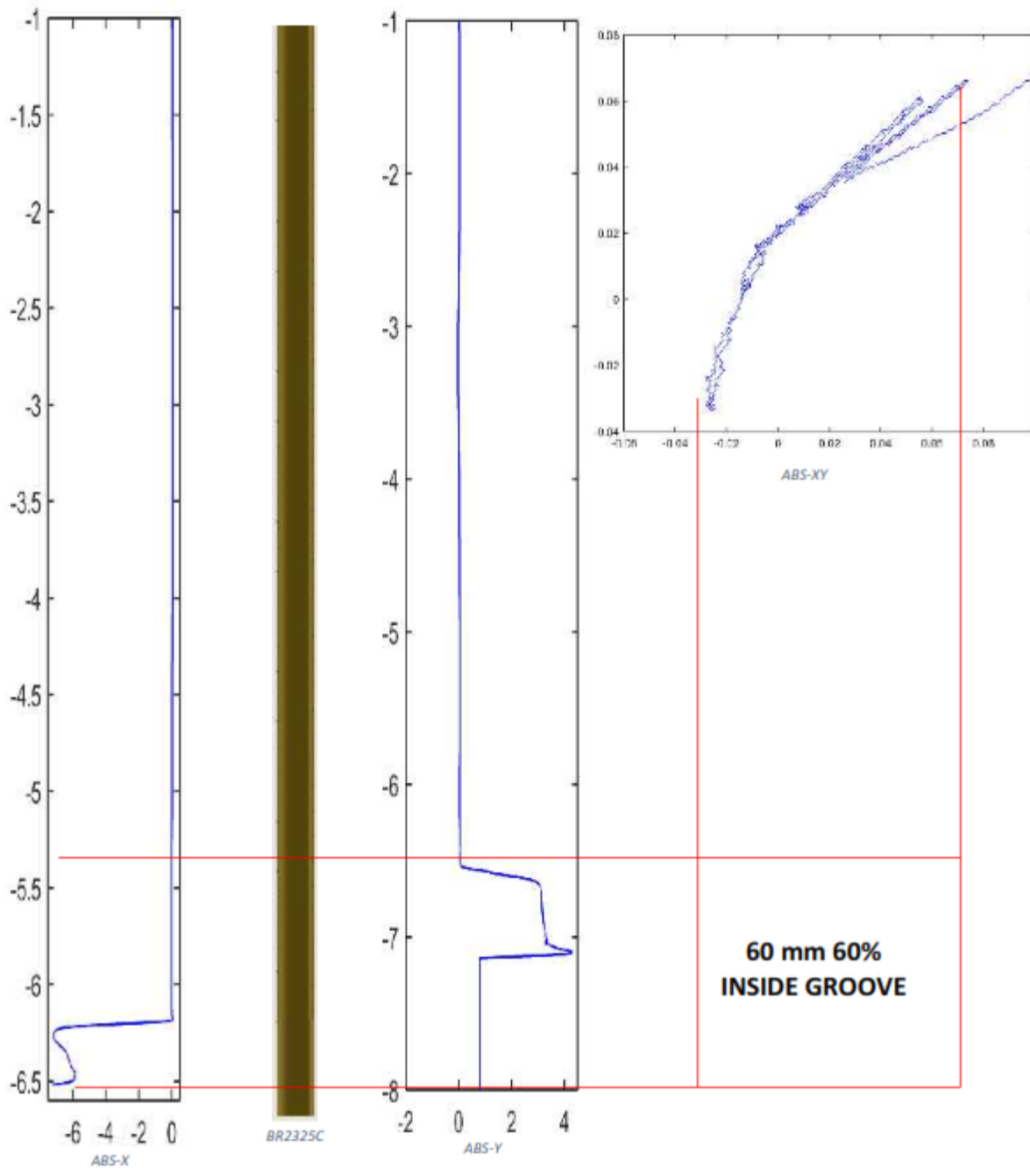


# BR2325L

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

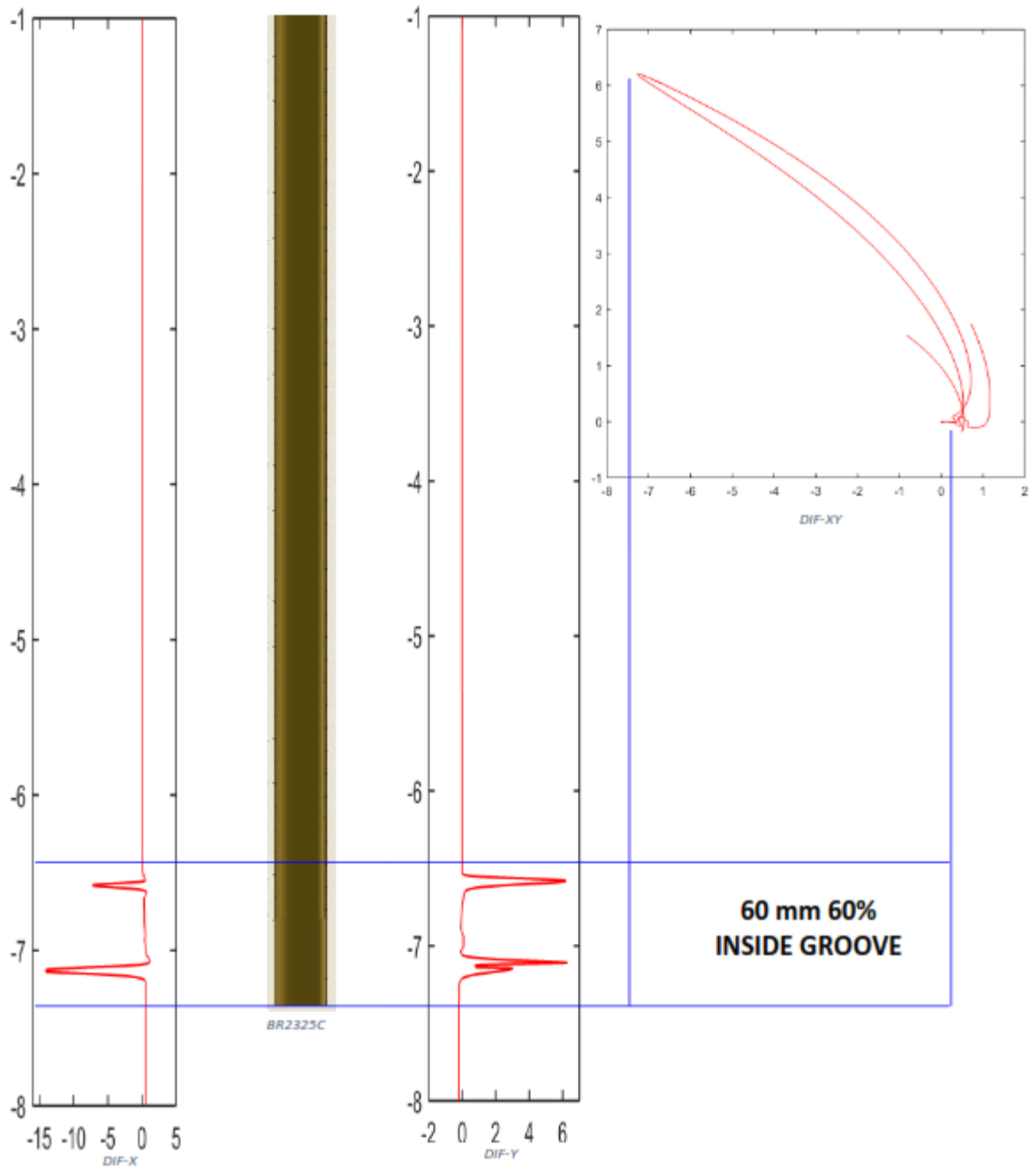
### 10.3 Σήματα από σωλήνες που πάρθηκαν με την καμπύλη Πλάτους





# BR2325C

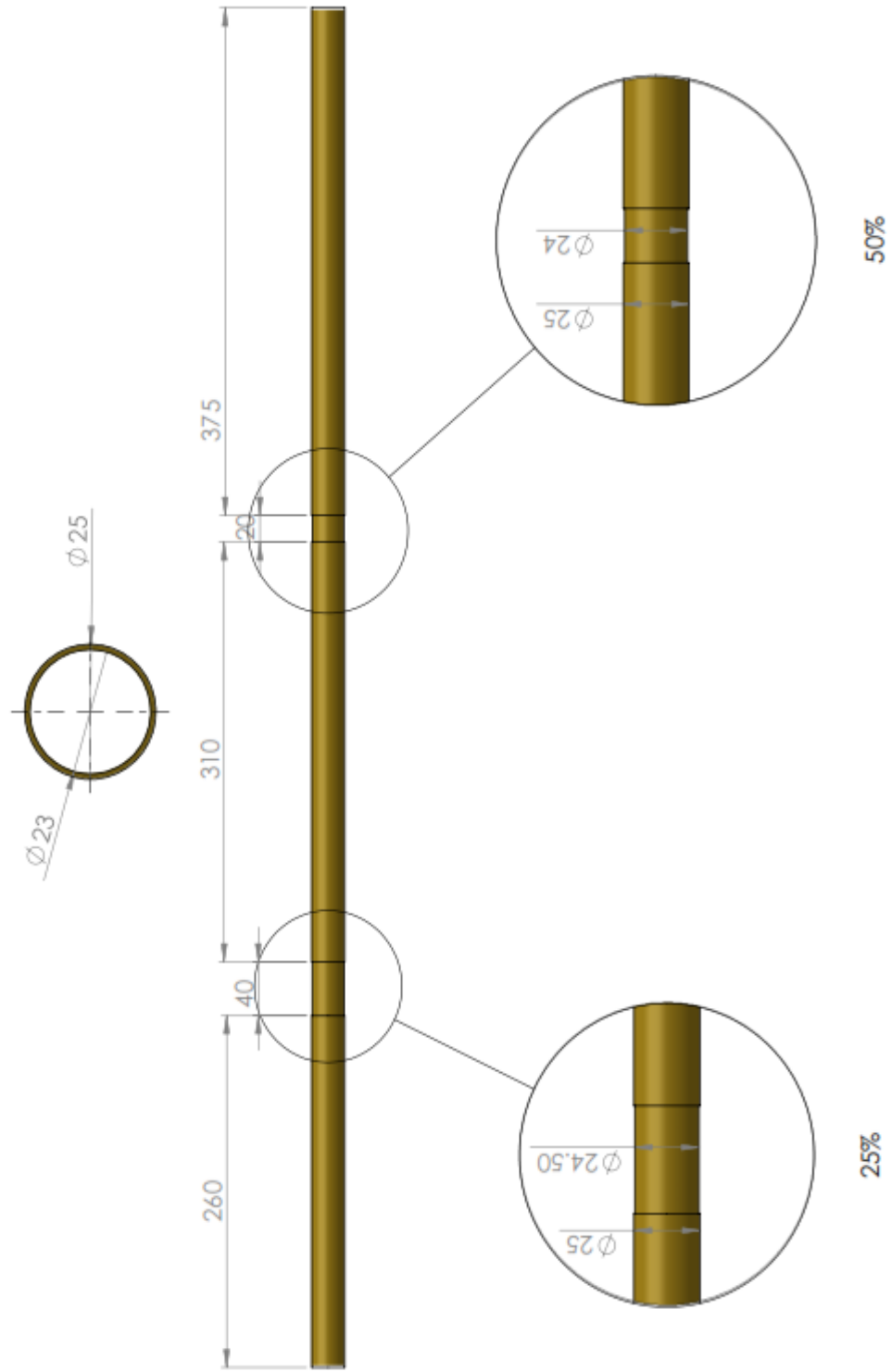
ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ



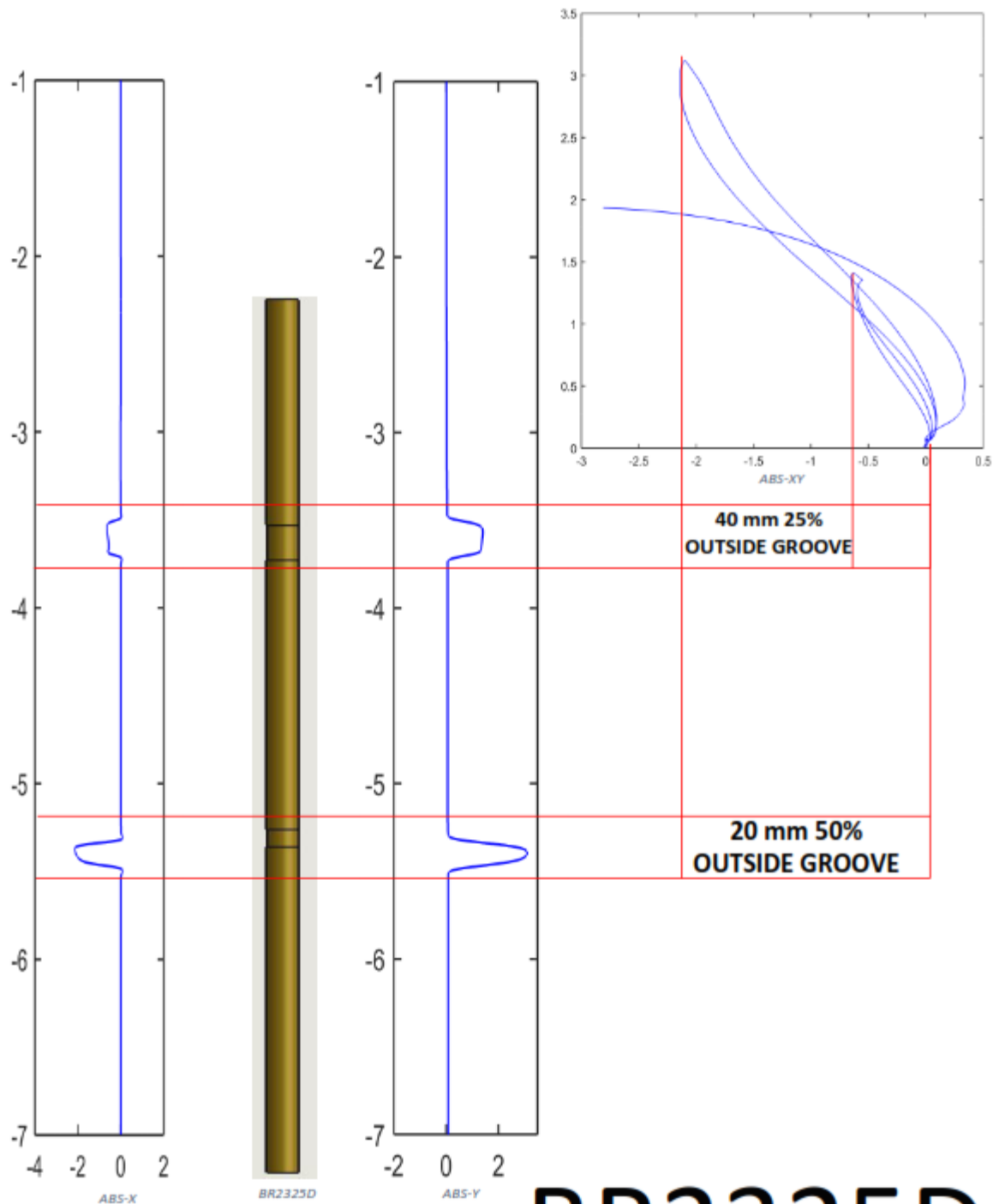
# BR2325C

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

# BR2325D

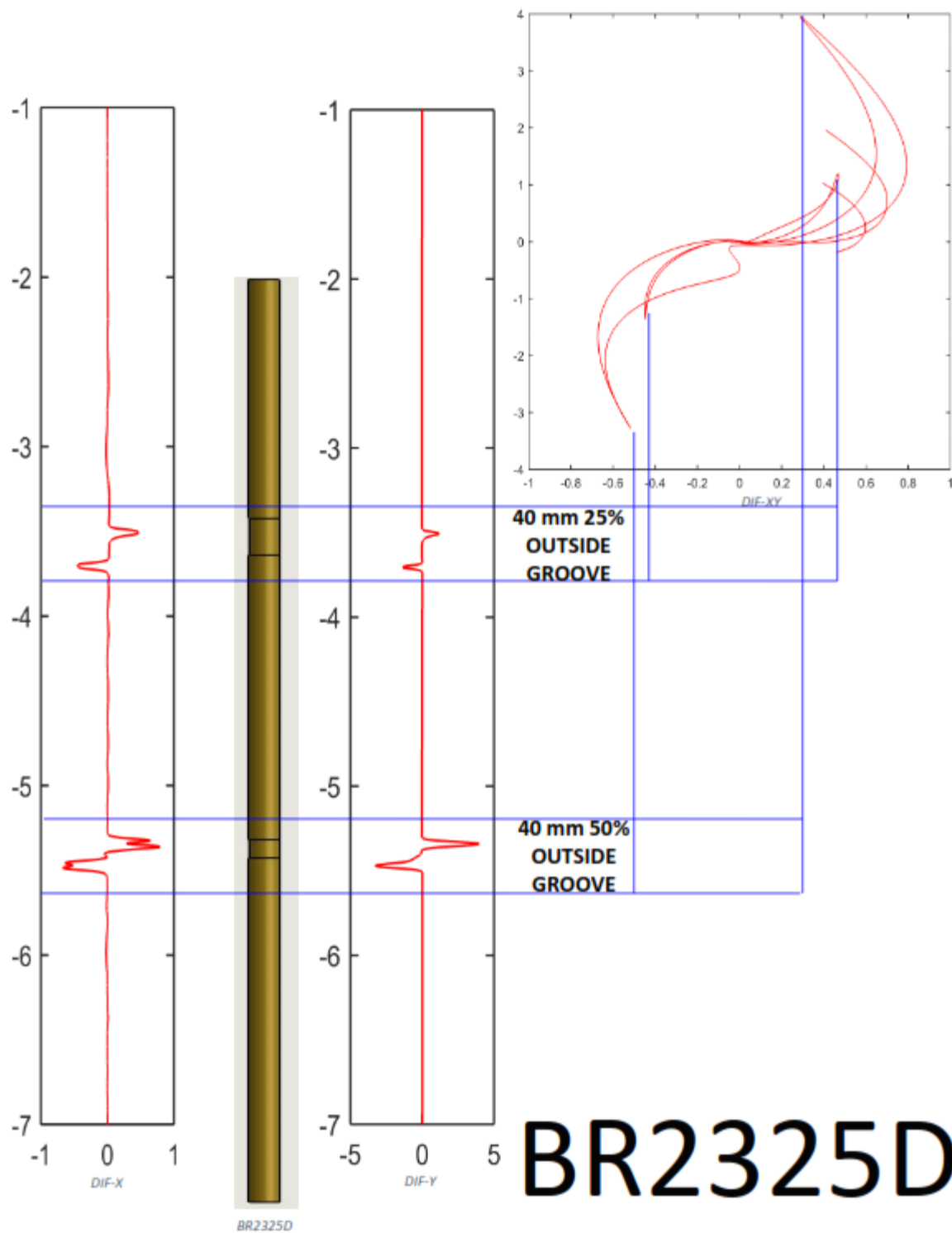






# BR2325D

ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

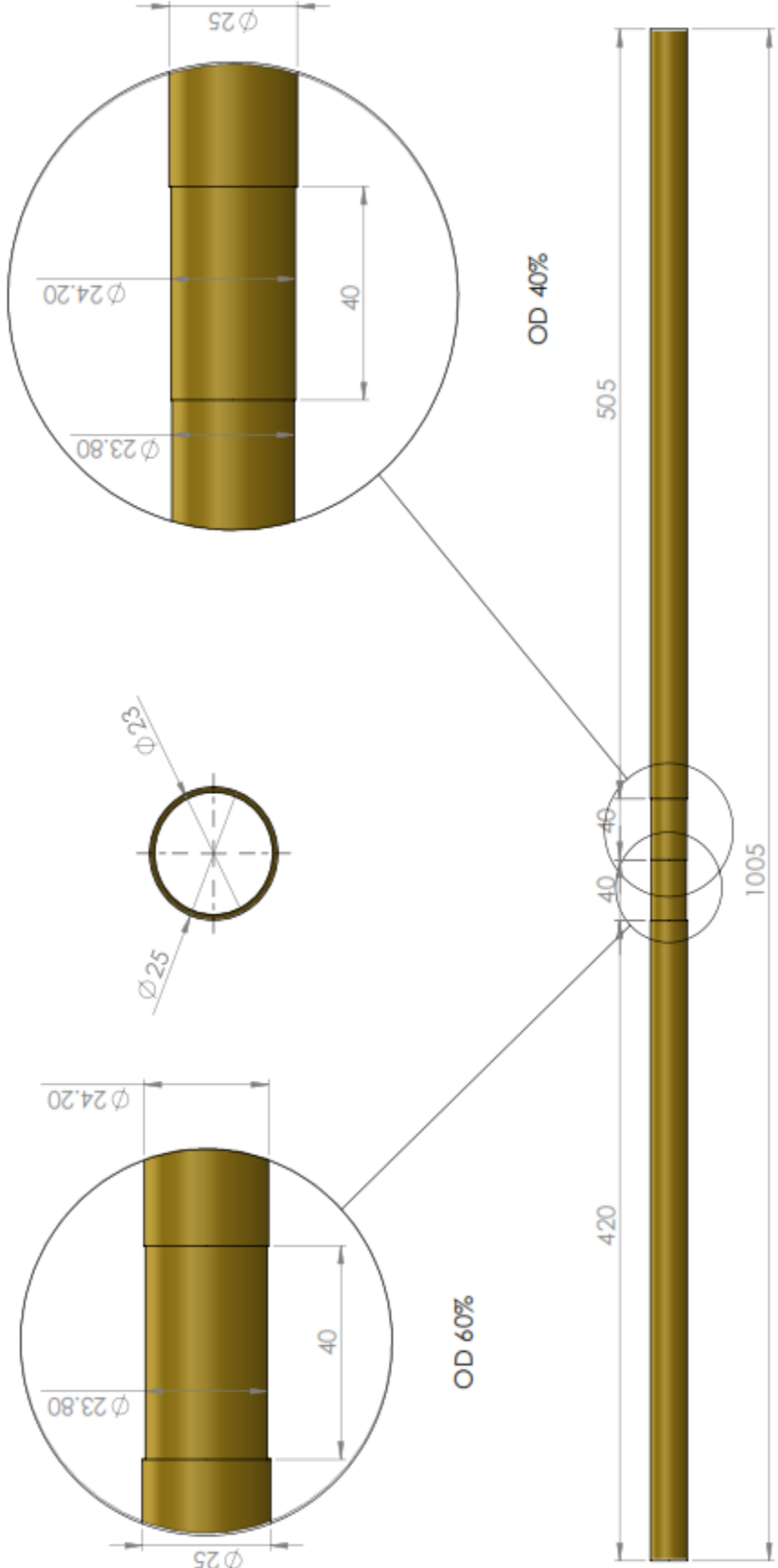


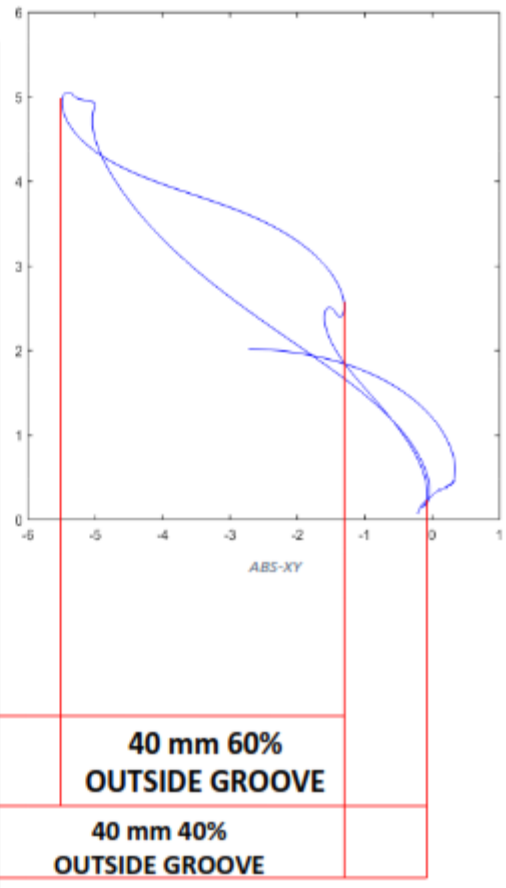
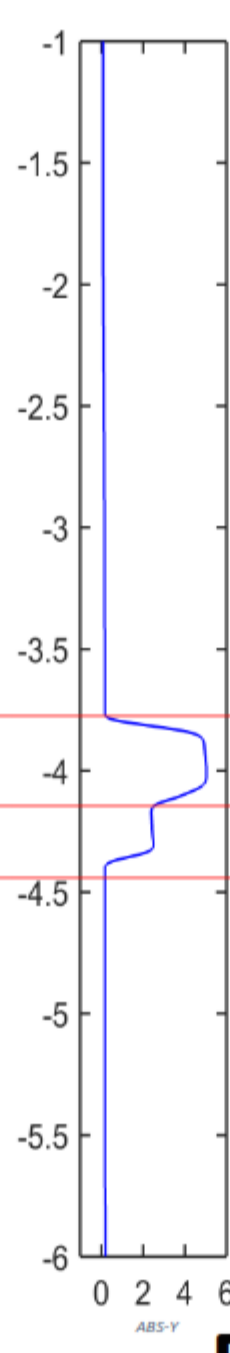
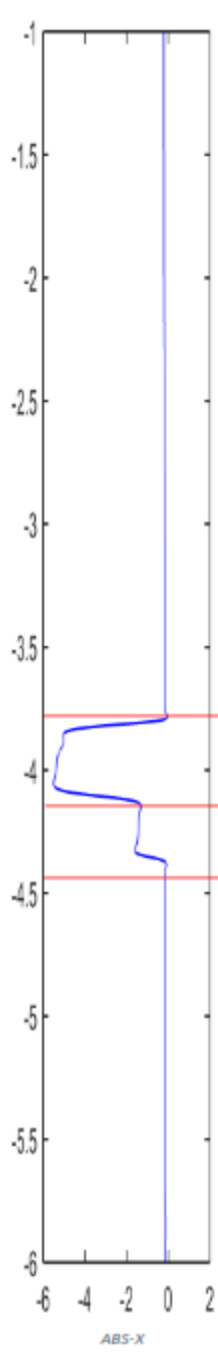
# BR2325D

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

# BR2325F

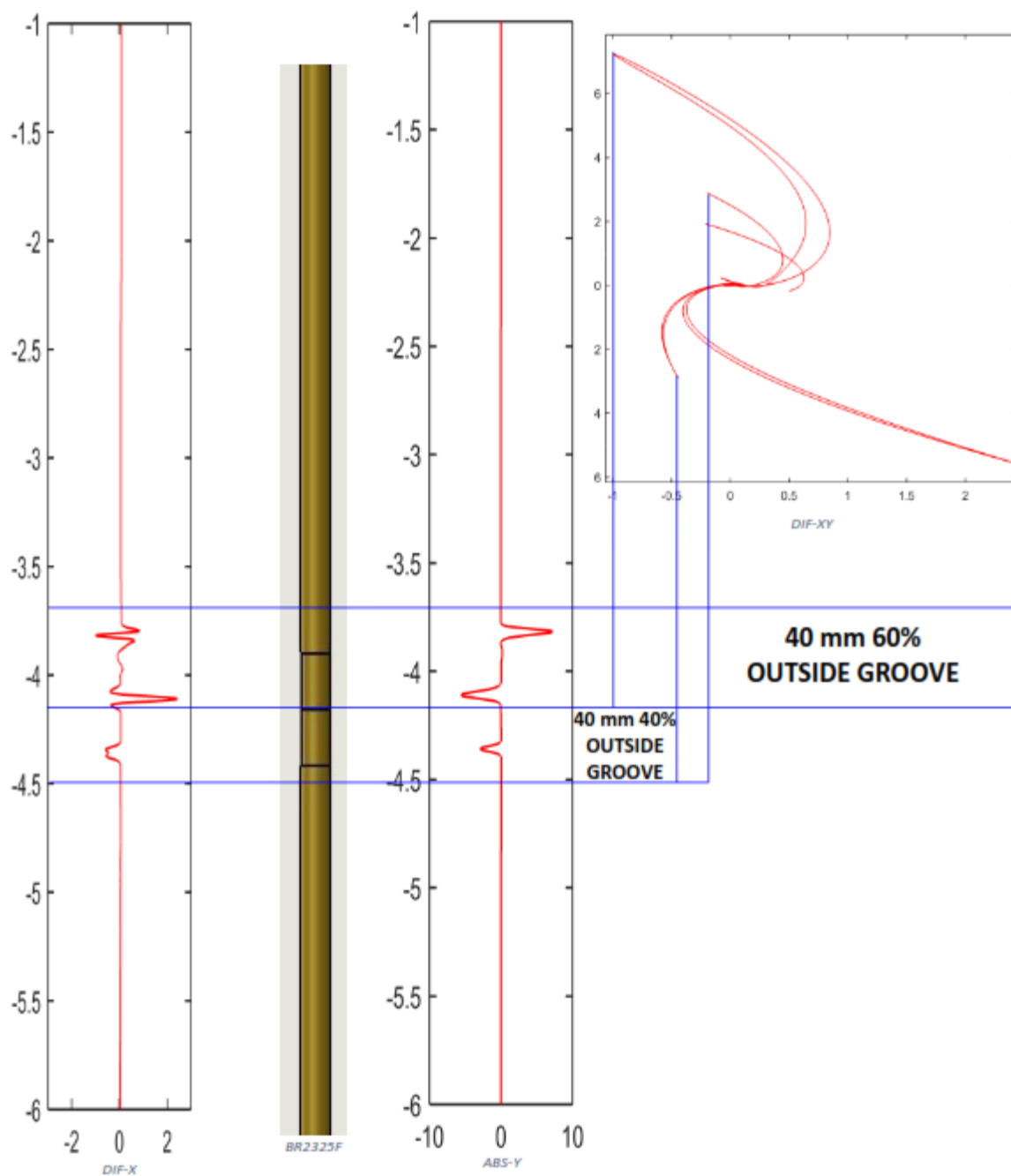
3





# BR2325F

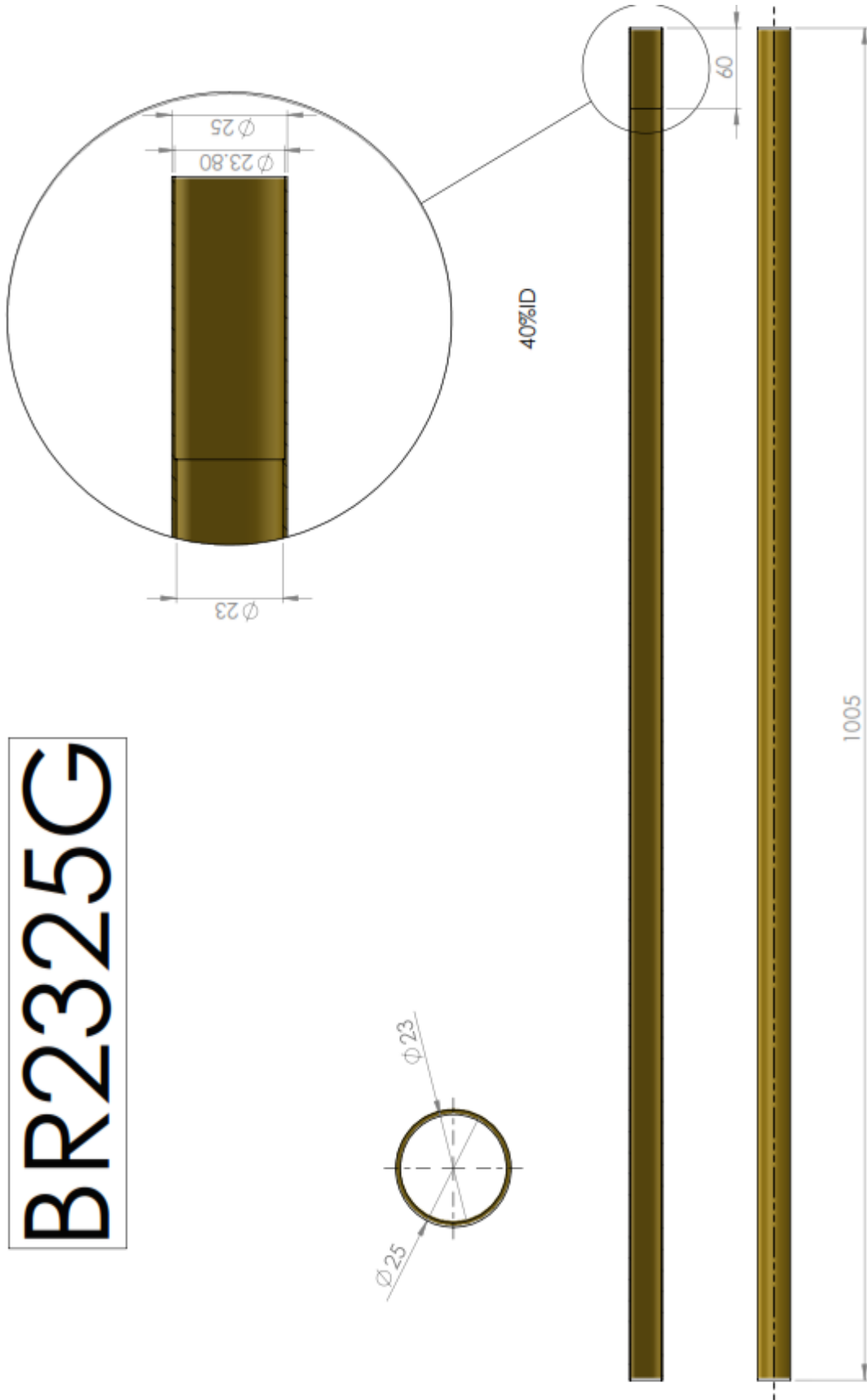
ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

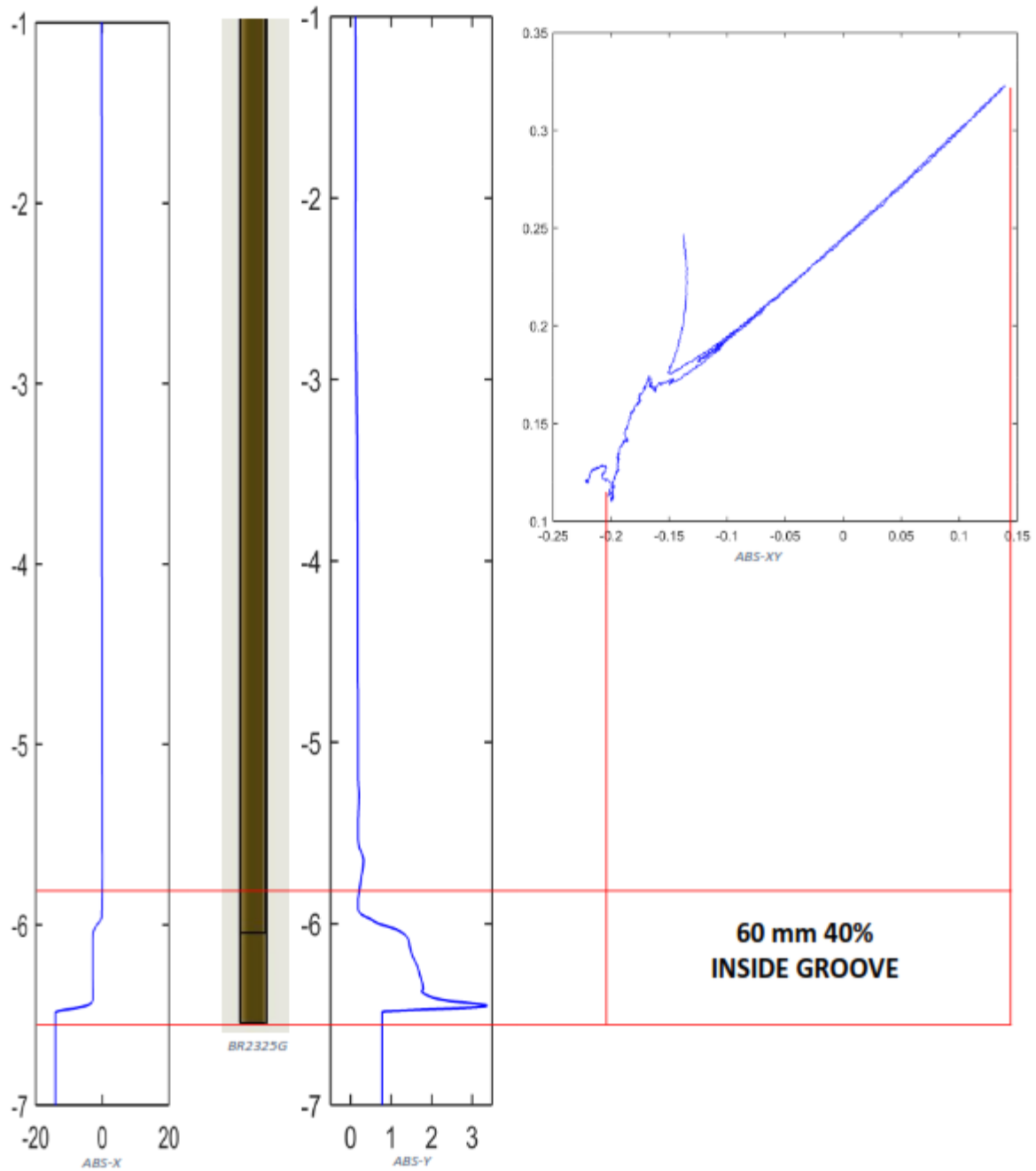


# BR2325F

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

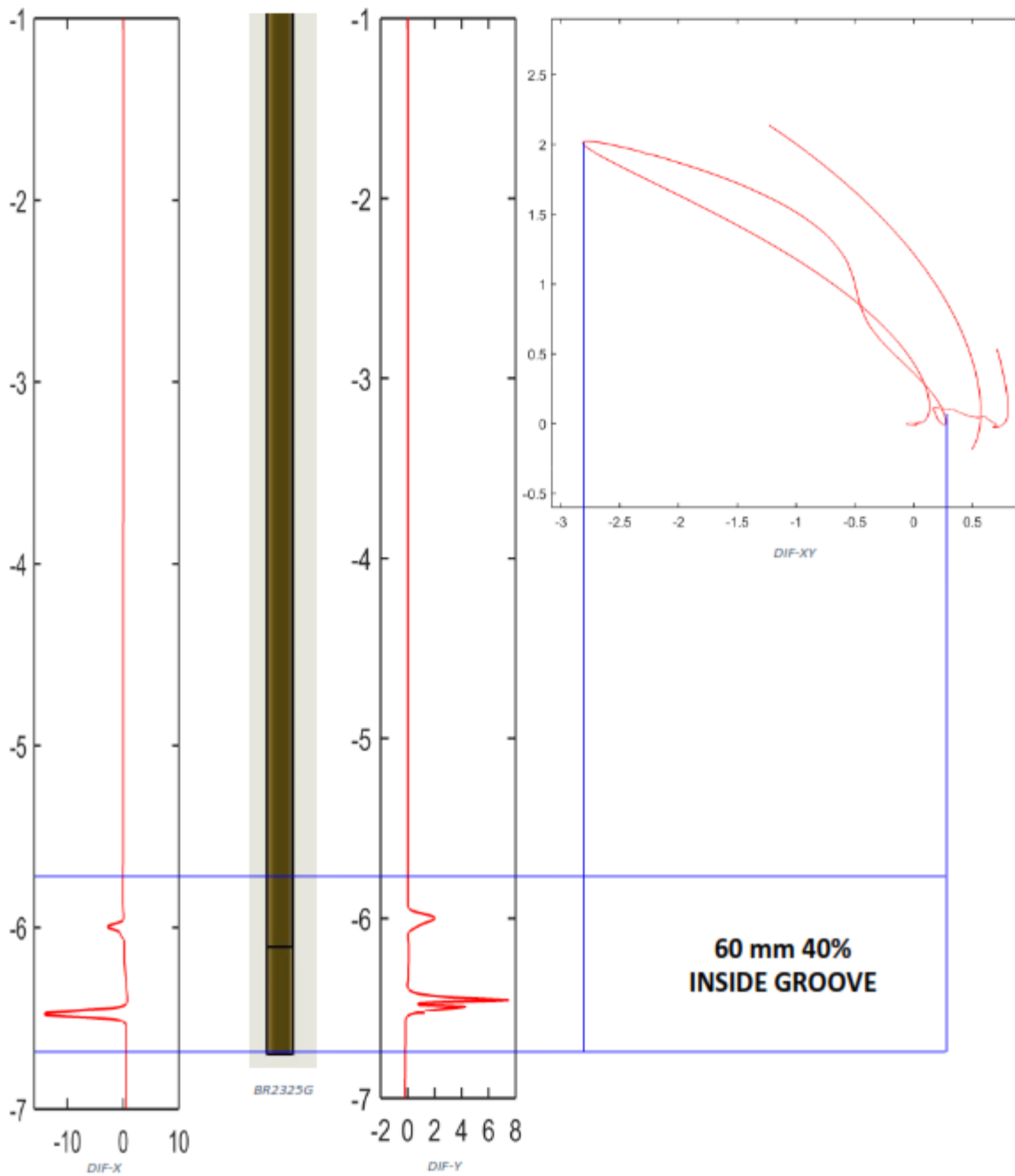
BR2325G





# BR2325G

ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

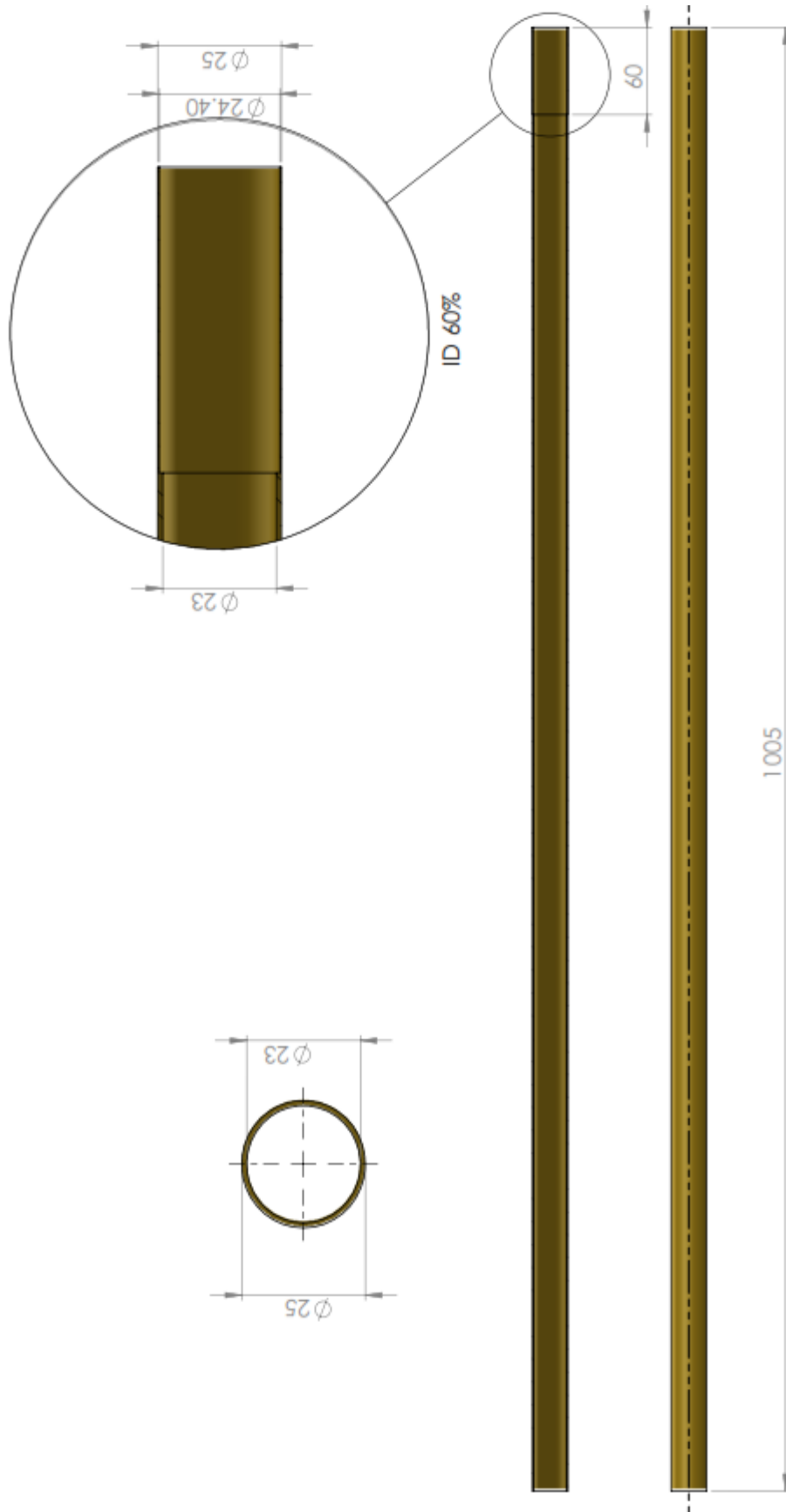


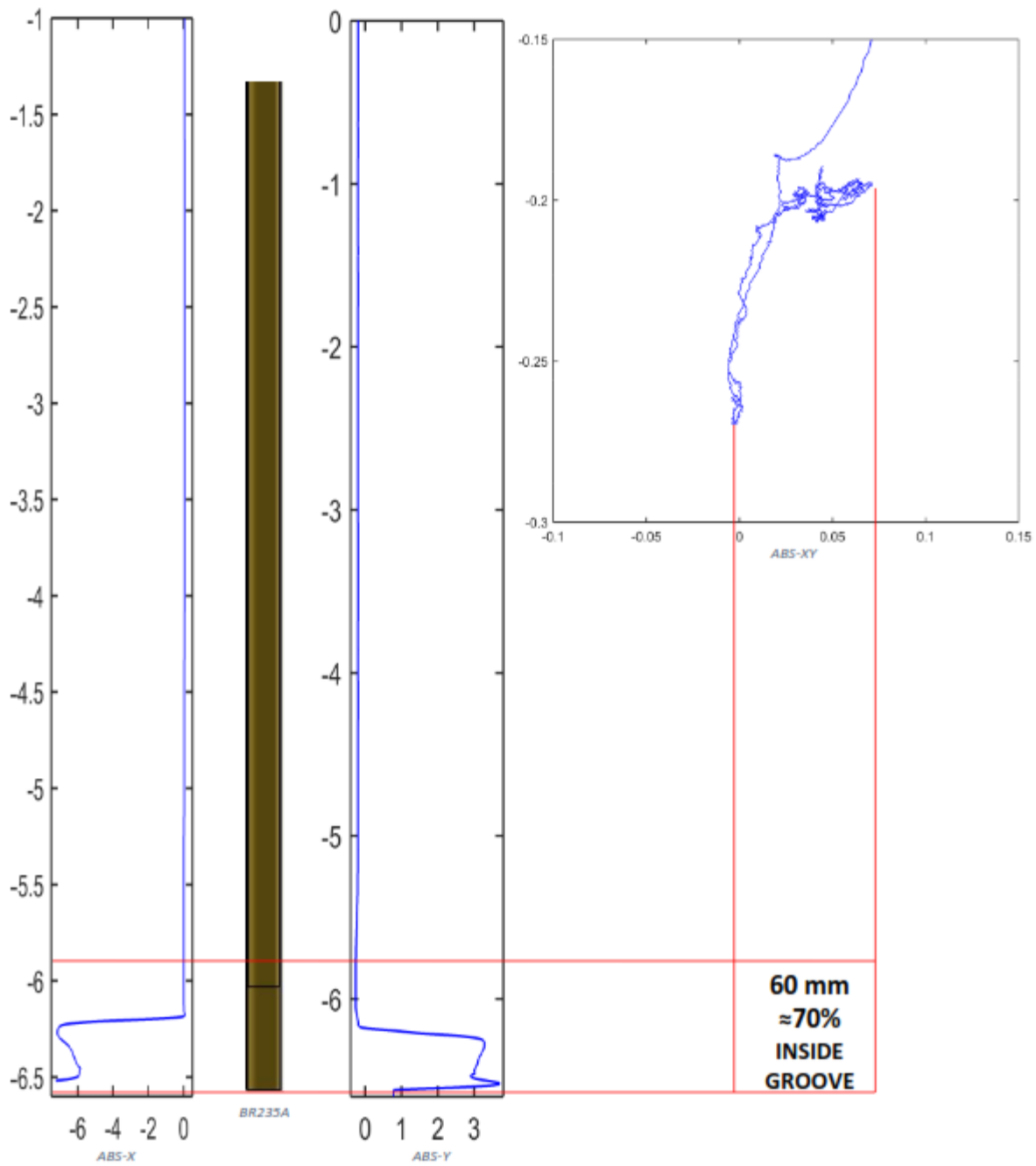
# BR2325G

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ



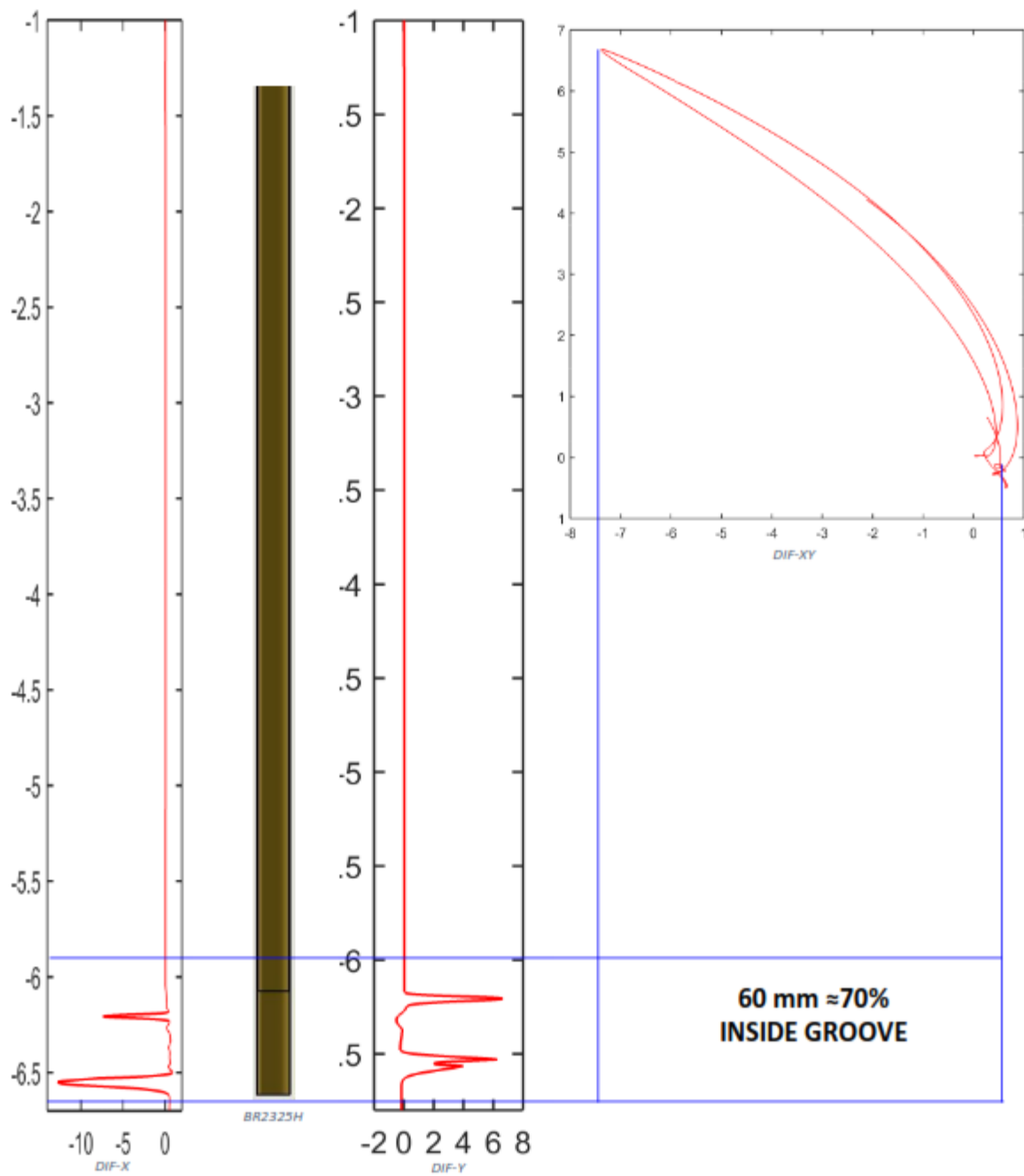
# BR2325H





# BR2325H

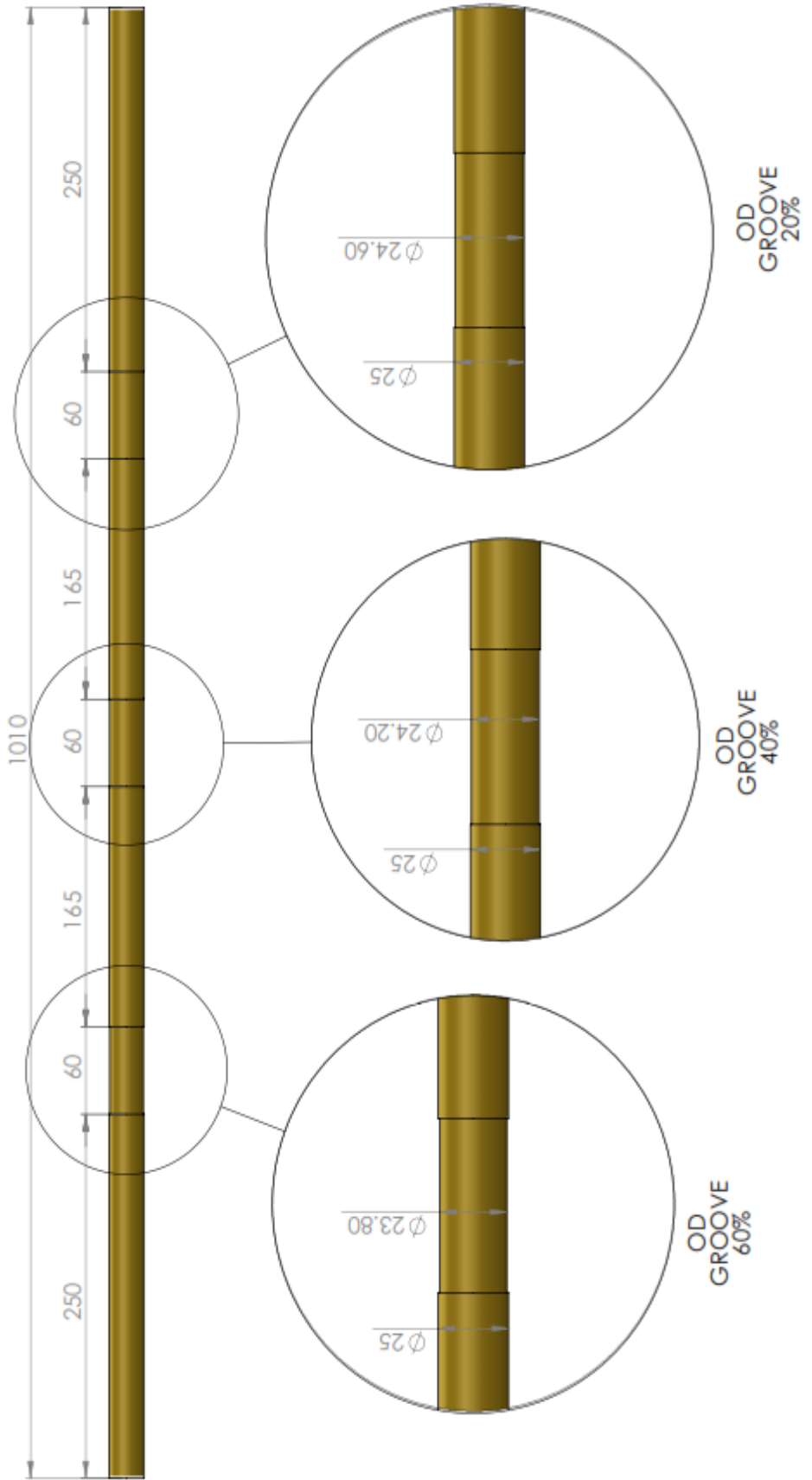
ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ

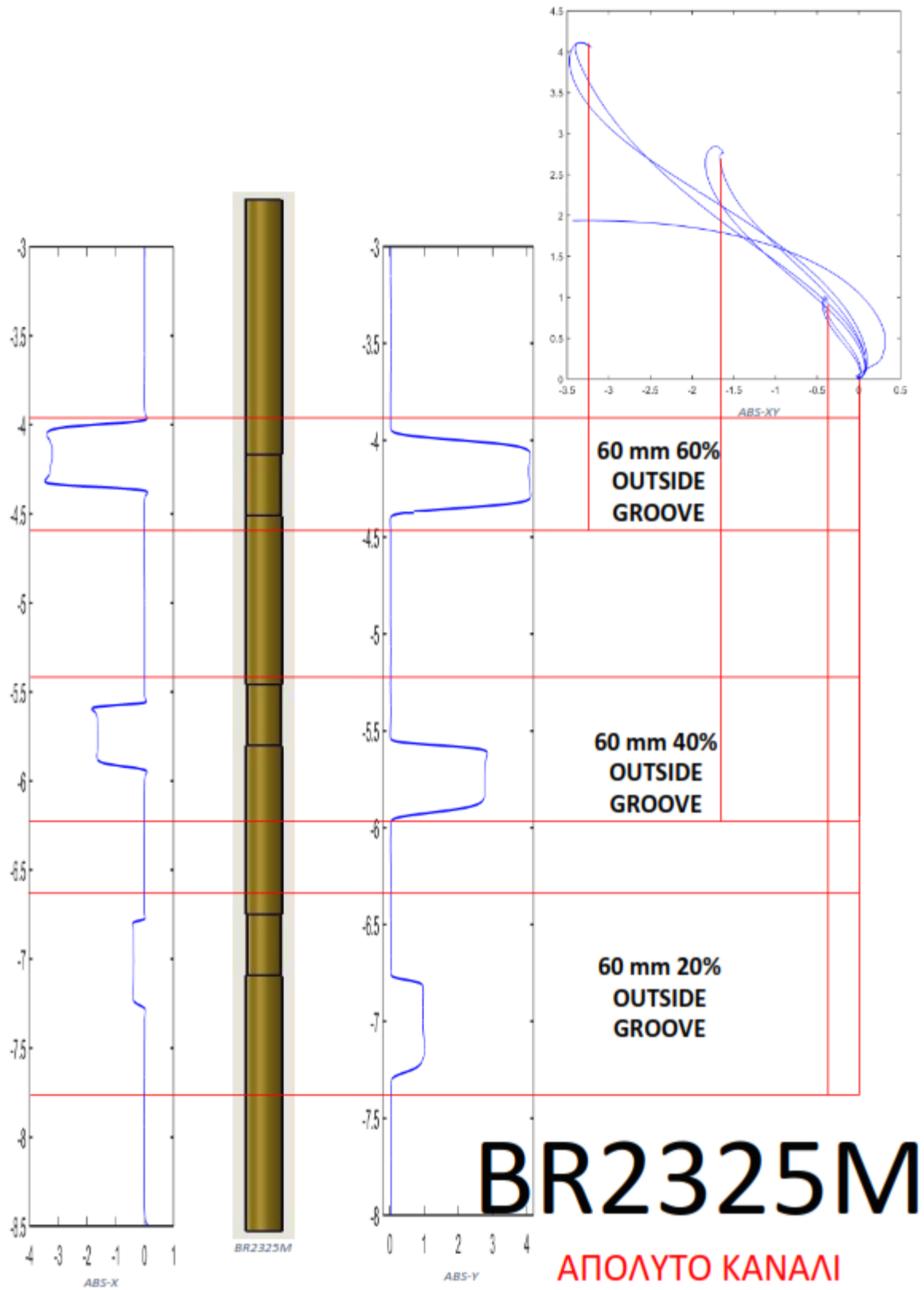


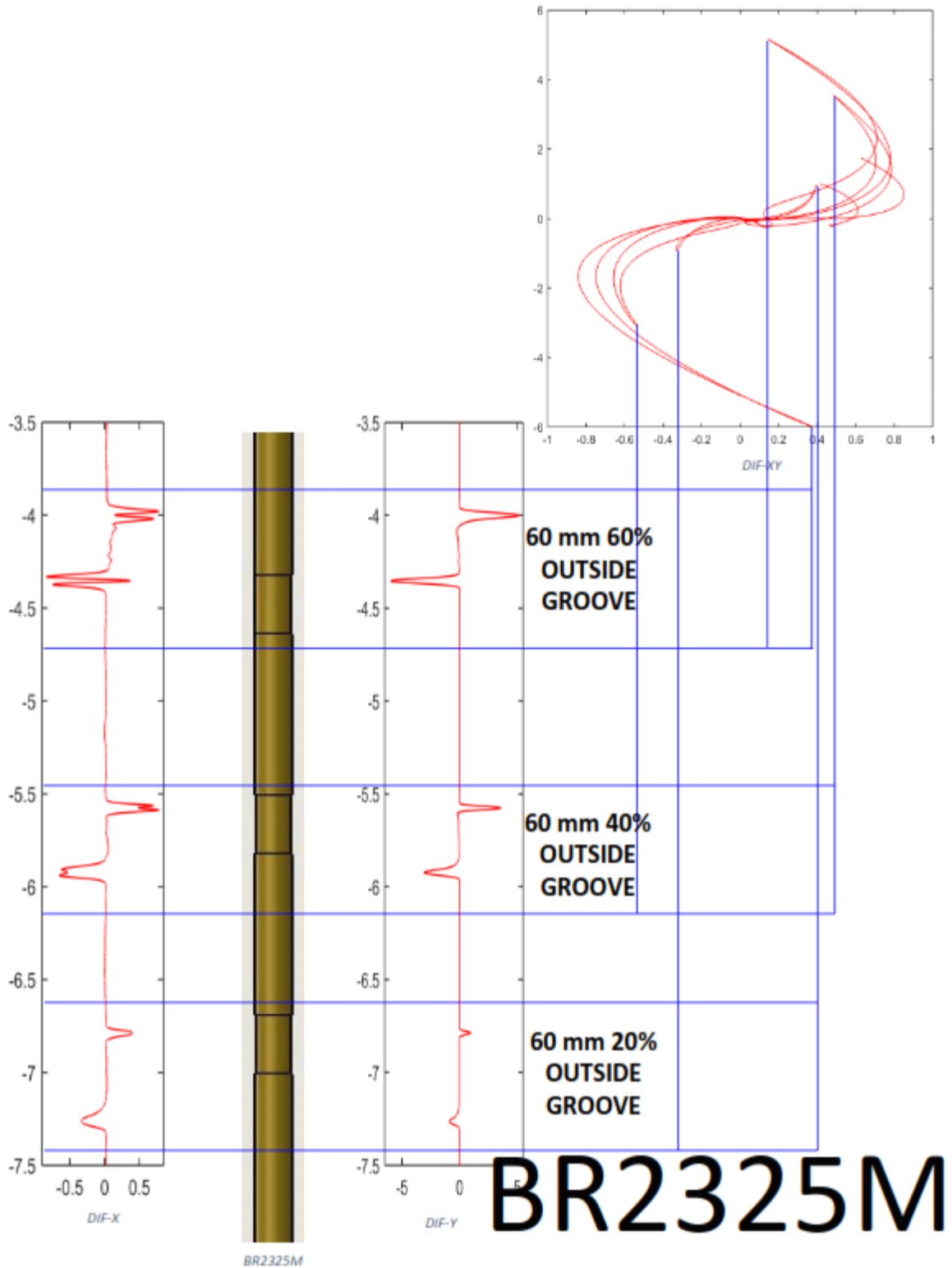
# BR2325H

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

# BR2325M







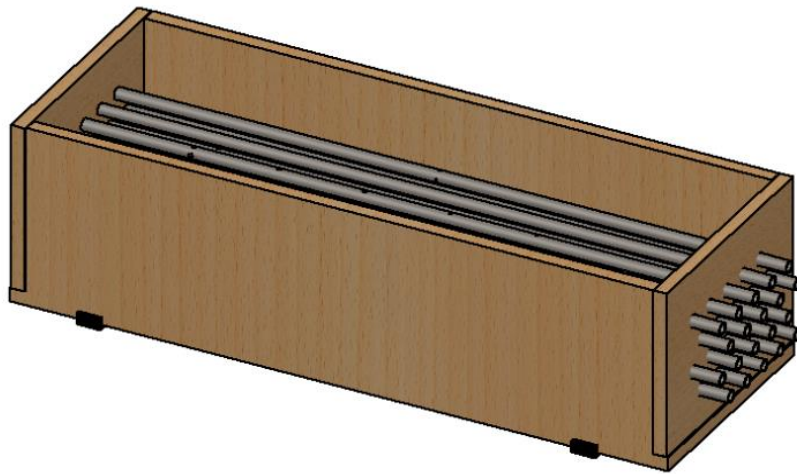
# BR2325M

ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ

# Κεφάλαιο 11: Έλεγχος εναλλάκτη Σιδηρομαγνητικού Υλικού

## 11.1 Περιγραφή εναλλάκτη

Ο εναλλάκτης σιδηρομαγνητικού υλικού που φτιάξαμε είναι κατασκευασμένος από ξύλο MDF και οι σωλήνες από χάλυβα εξωτερικής διαμέτρου 18mm και πάχους 1.75mm. Ο εναλλάκτης αποτελείται από 20 σωλήνες από τους οποίους οι 9 έχουν σφάλματα που κατασκευάστηκαν από εμάς παρόμοια με αυτά που ενδέχεται να συναντήσουμε στη βιομηχανία.

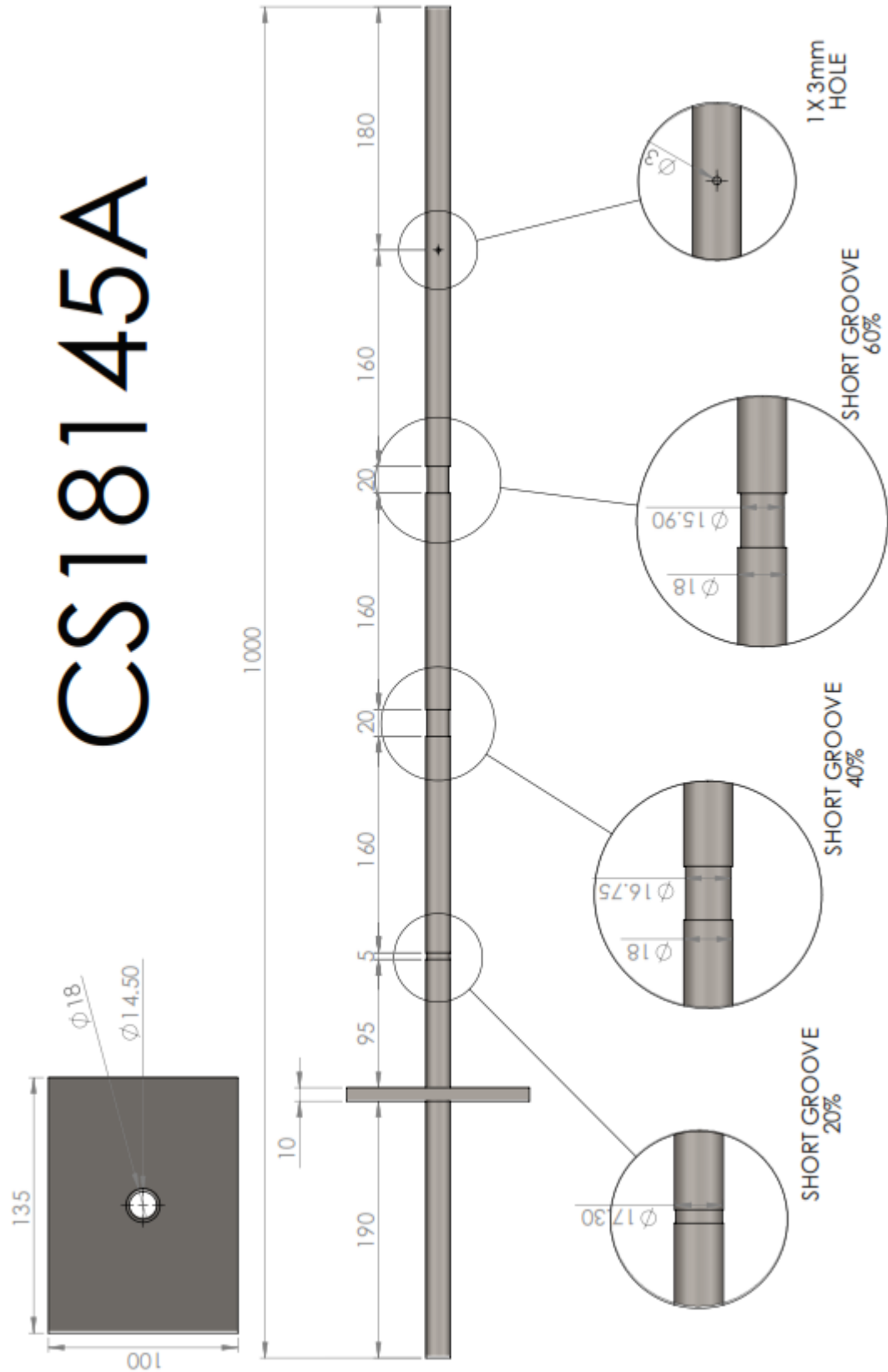


Σχήμα 56: Εναλλάκτης Σιδηρομαγνητικού Υλικού

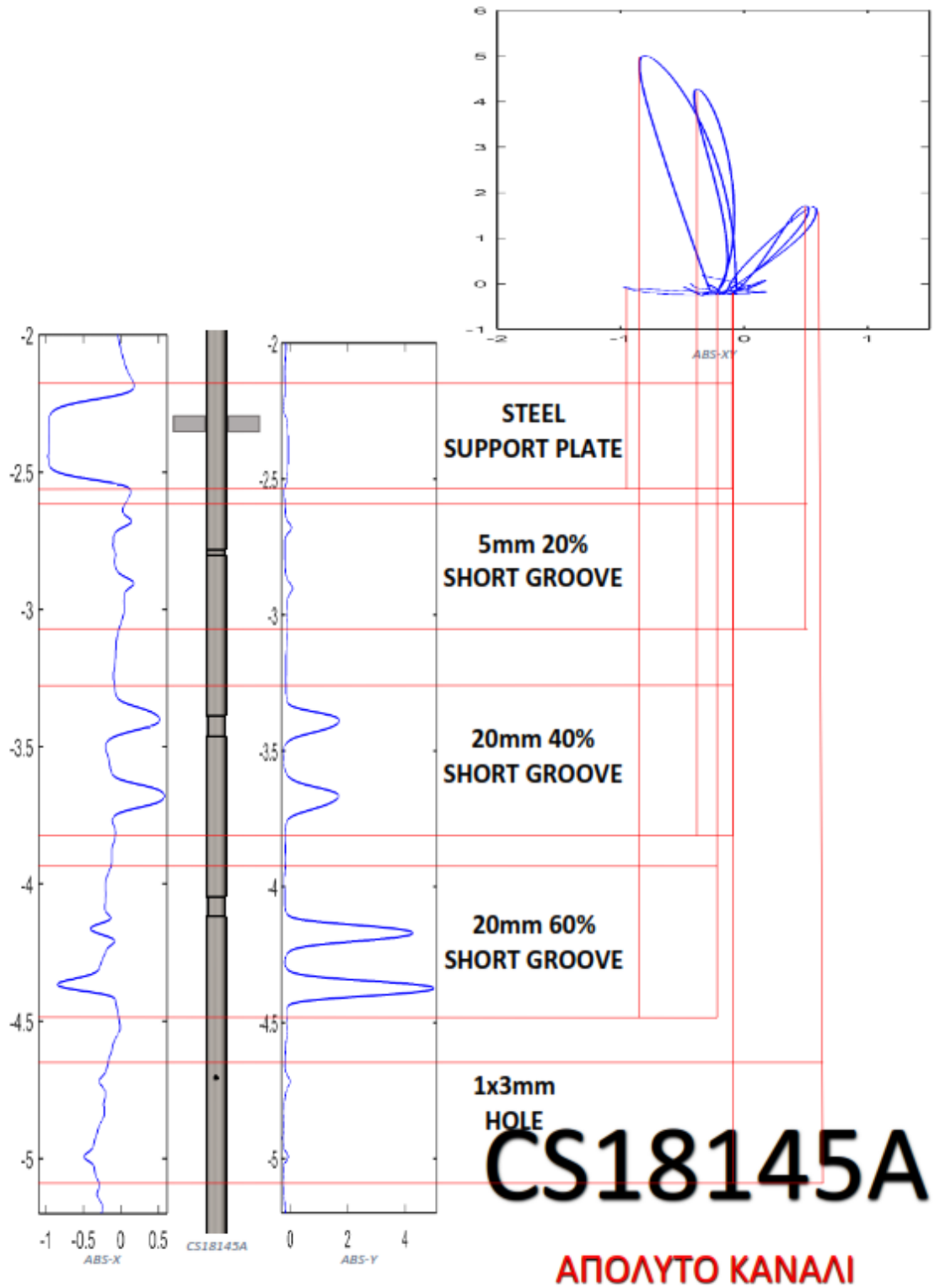


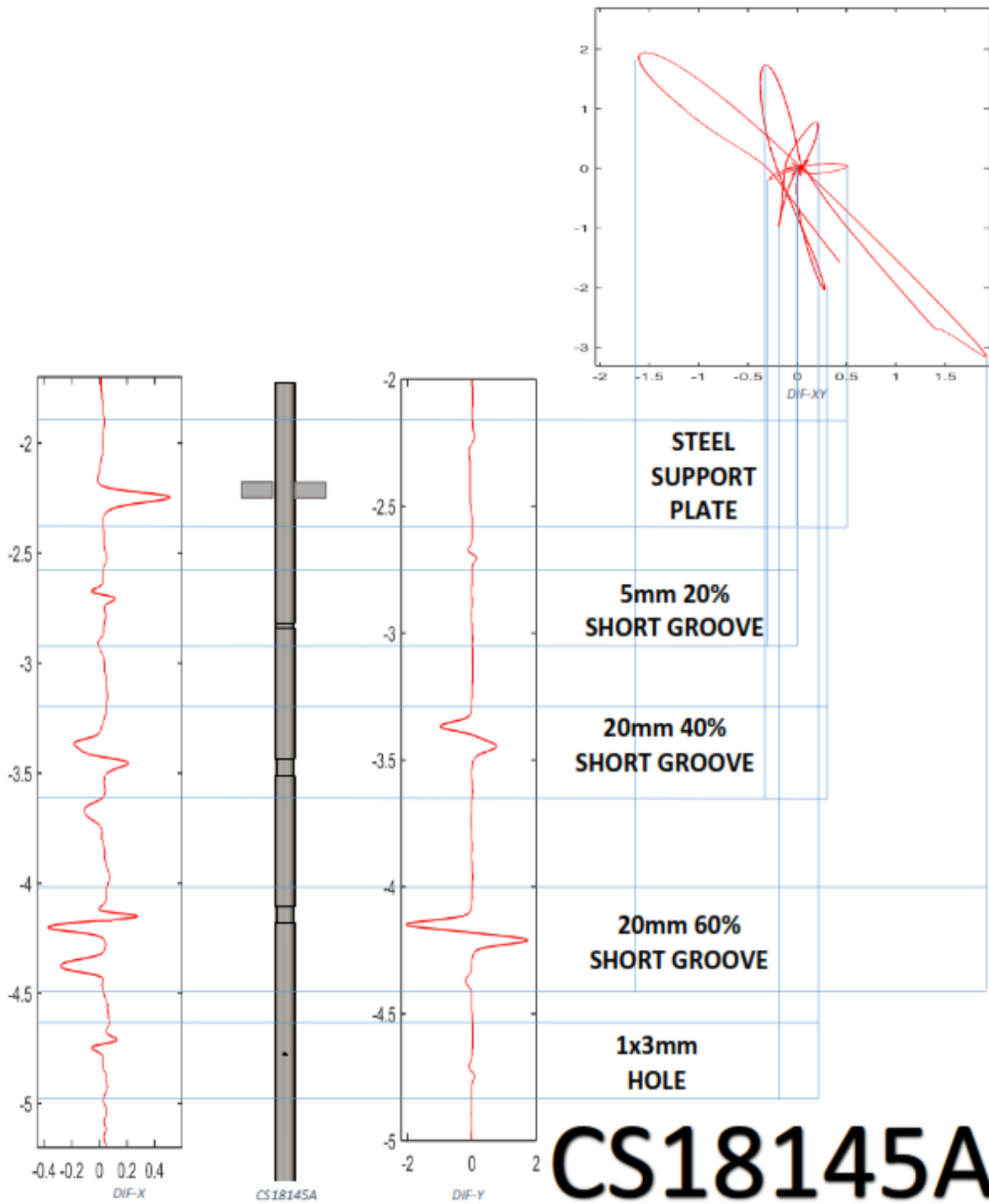
Σχήμα 57: Διάταξη ελέγχου με RFT

## 11.2 Σήματα Σιδηρομαγνητικού Εναλλάκτη





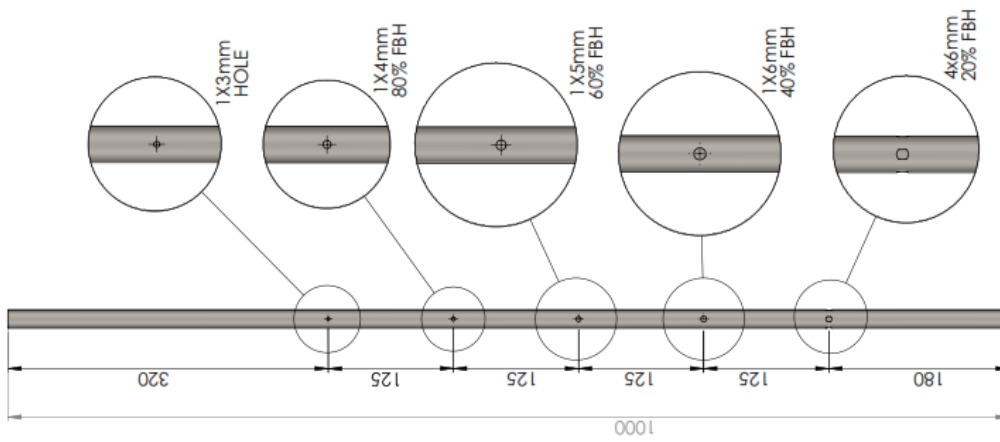
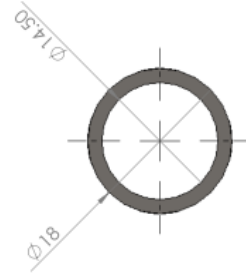


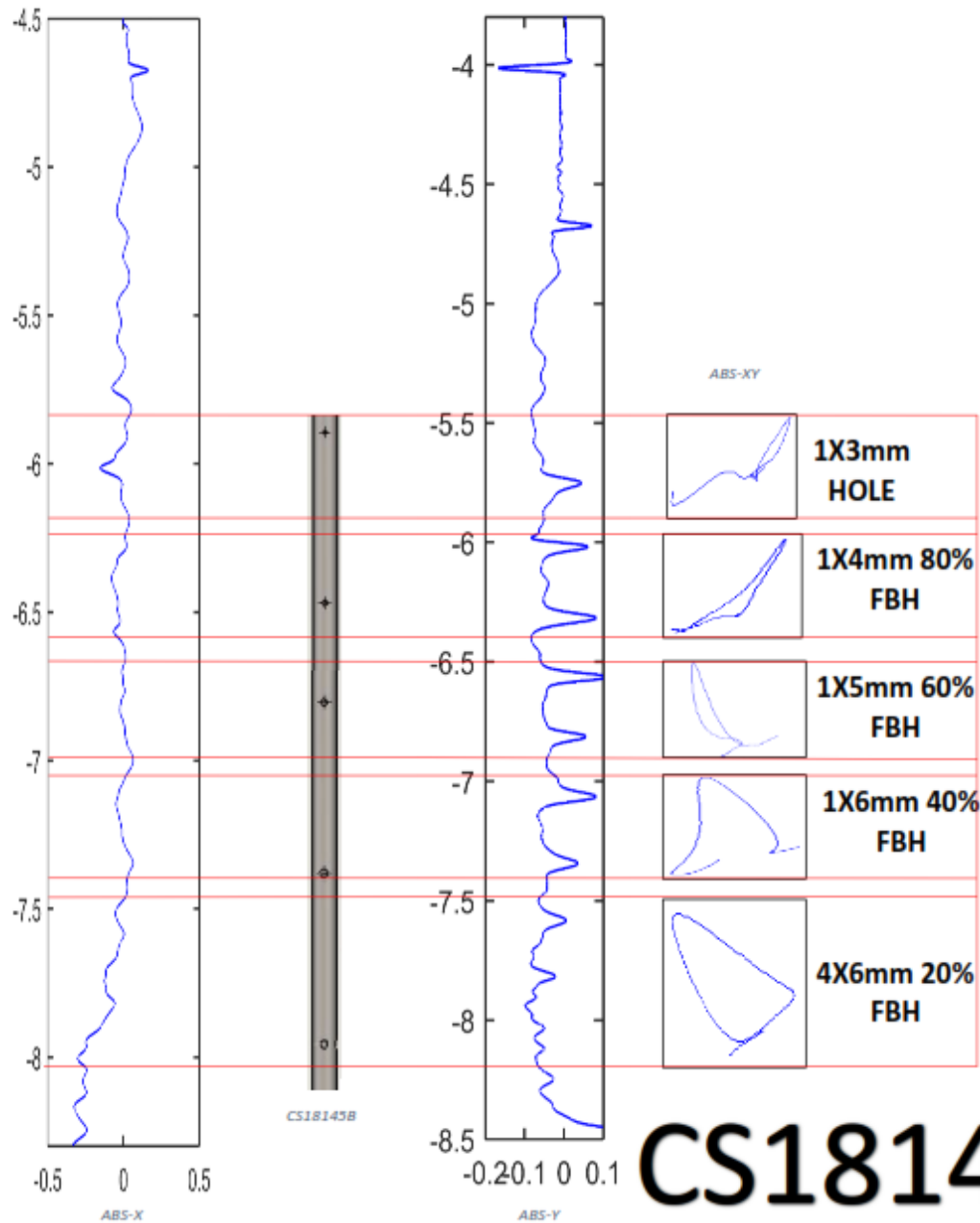


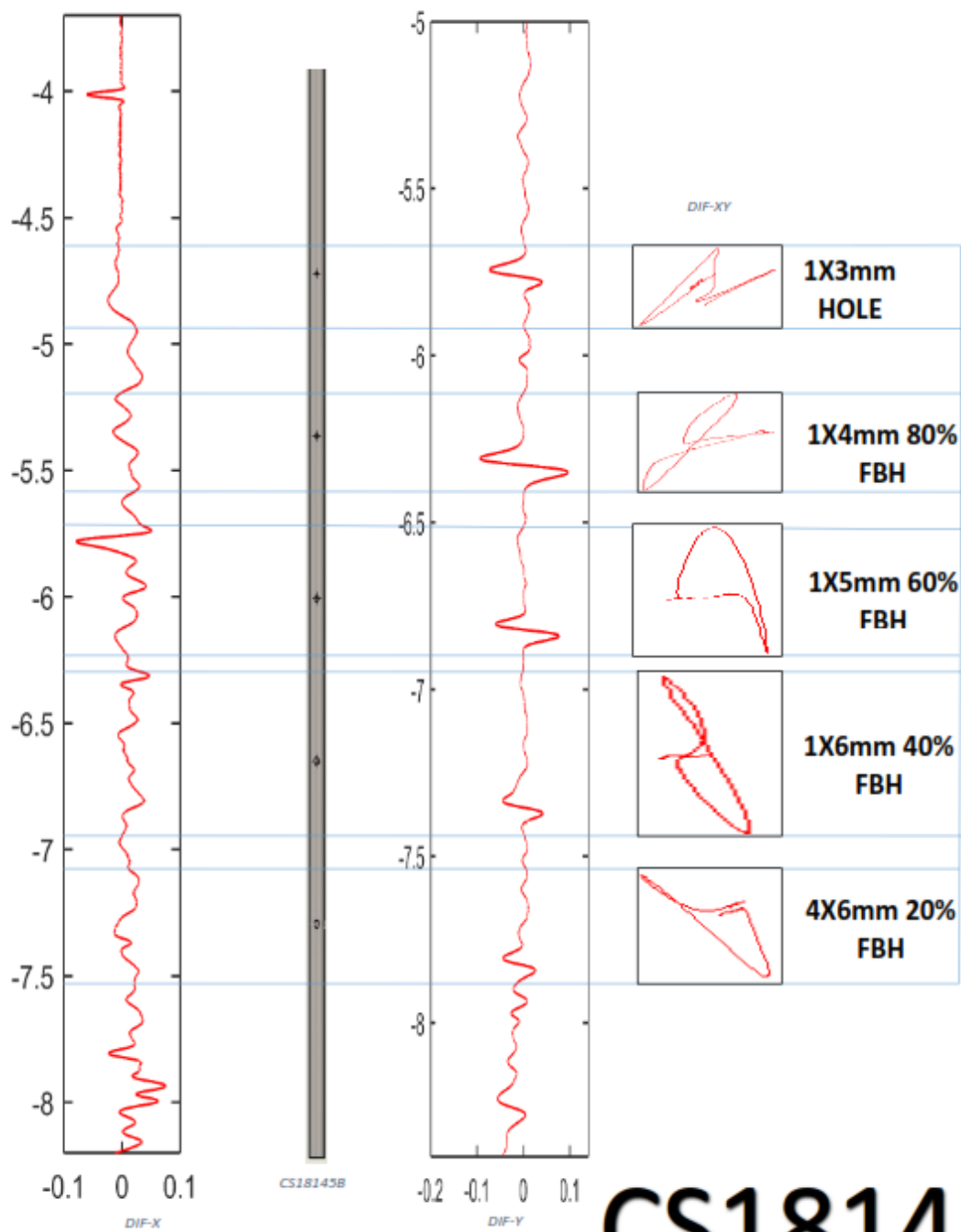
# CS18145A

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

# CS18145B



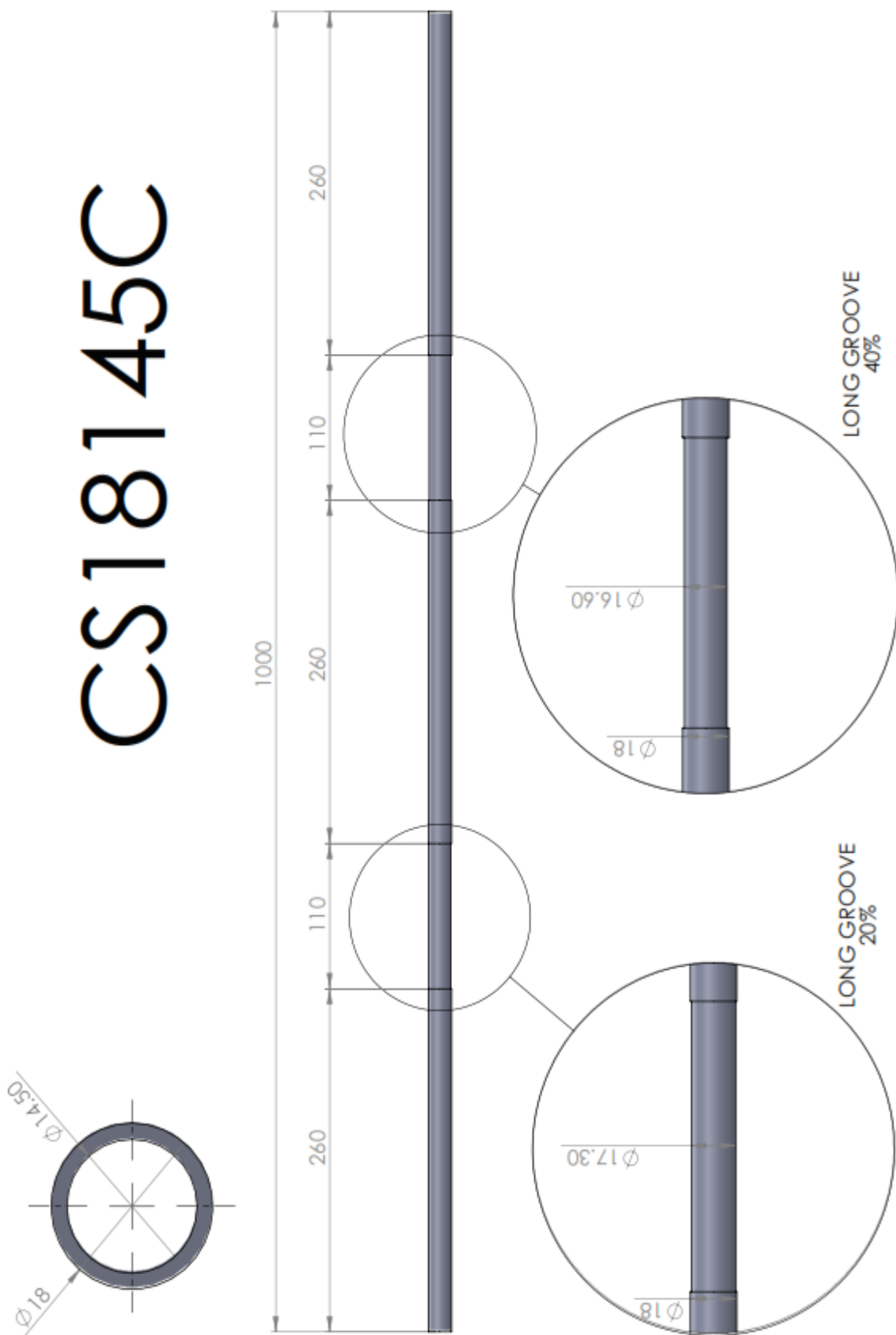


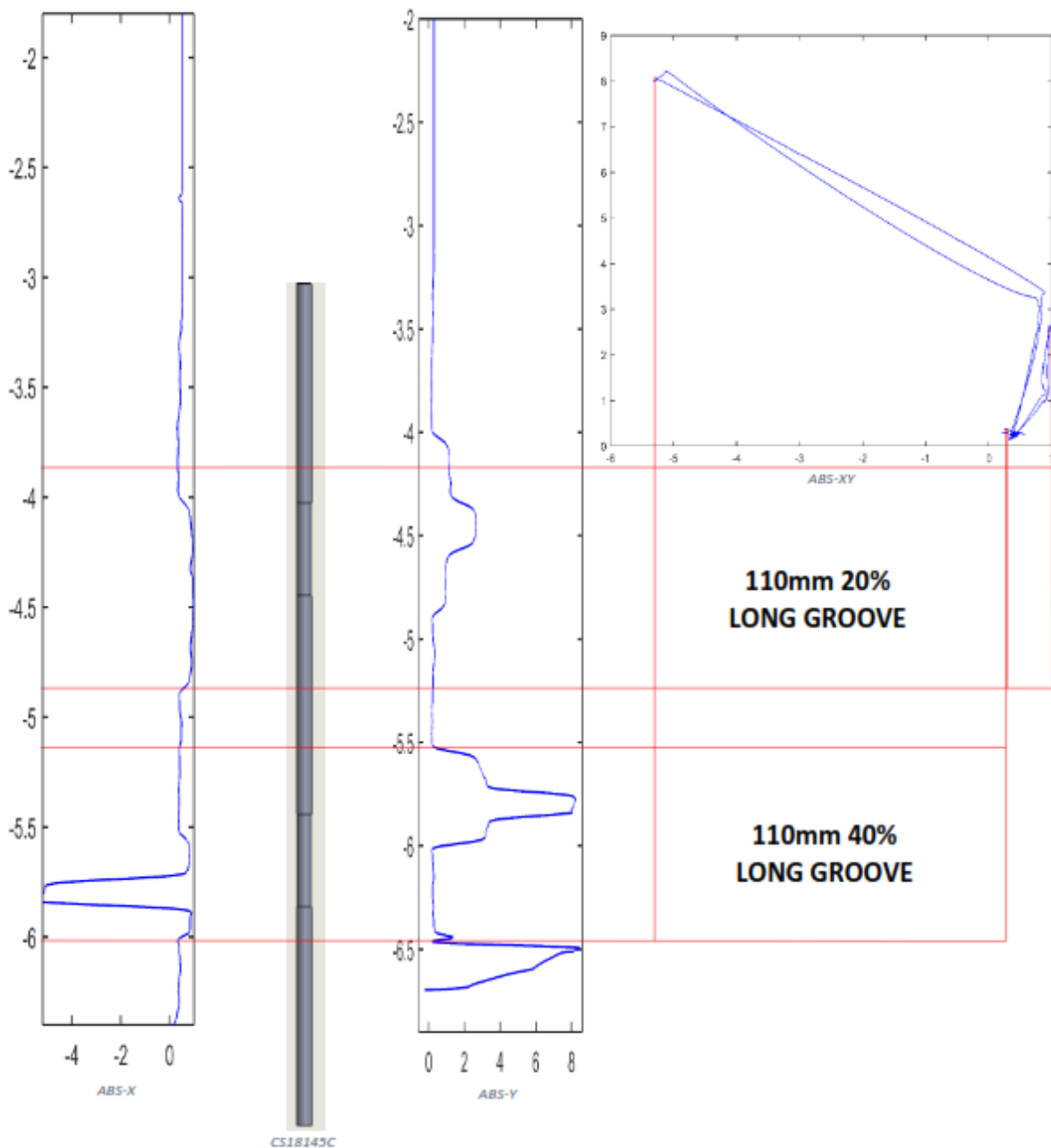


# CS18145B

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

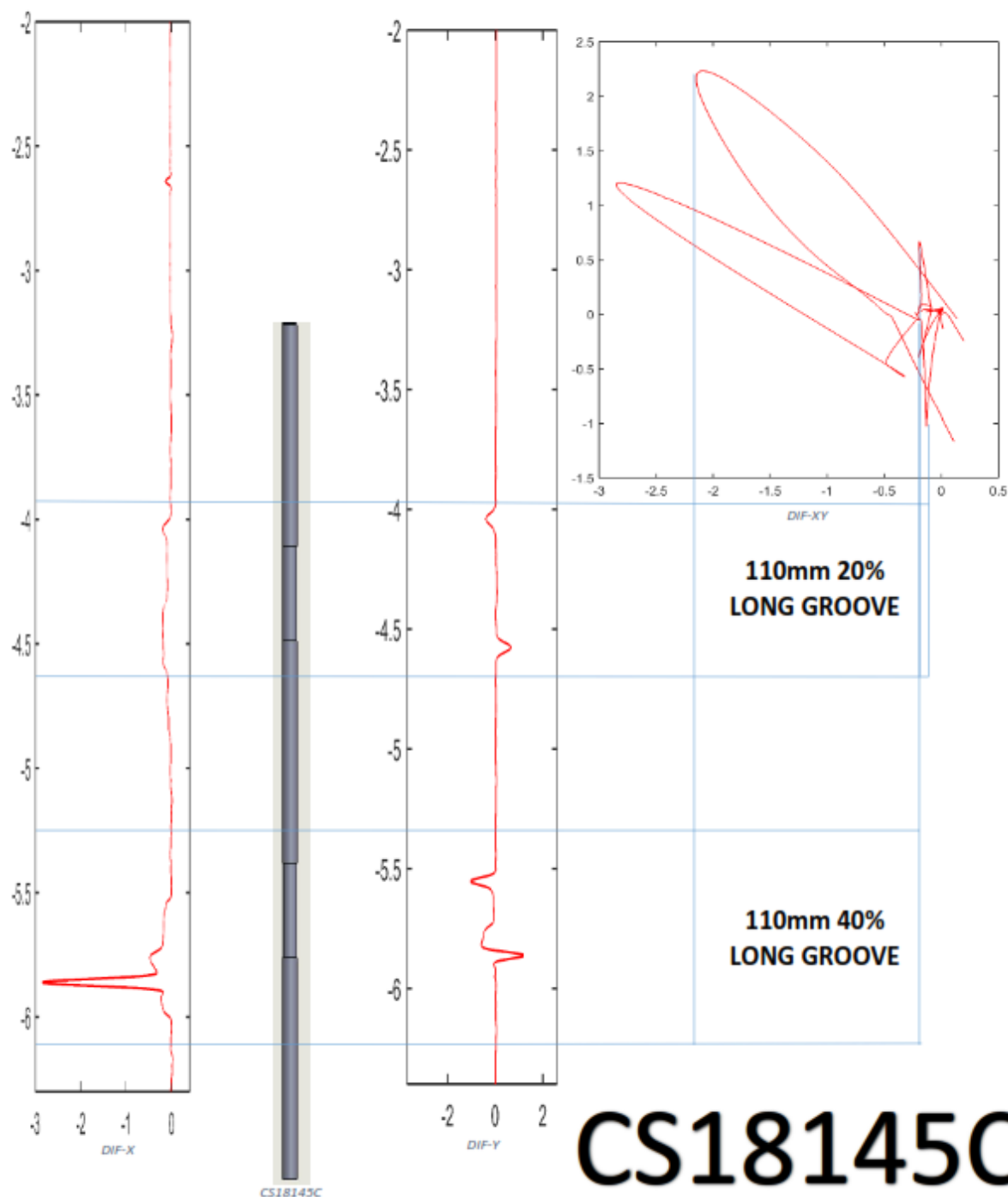
# CS18145C





# CS18145C

**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

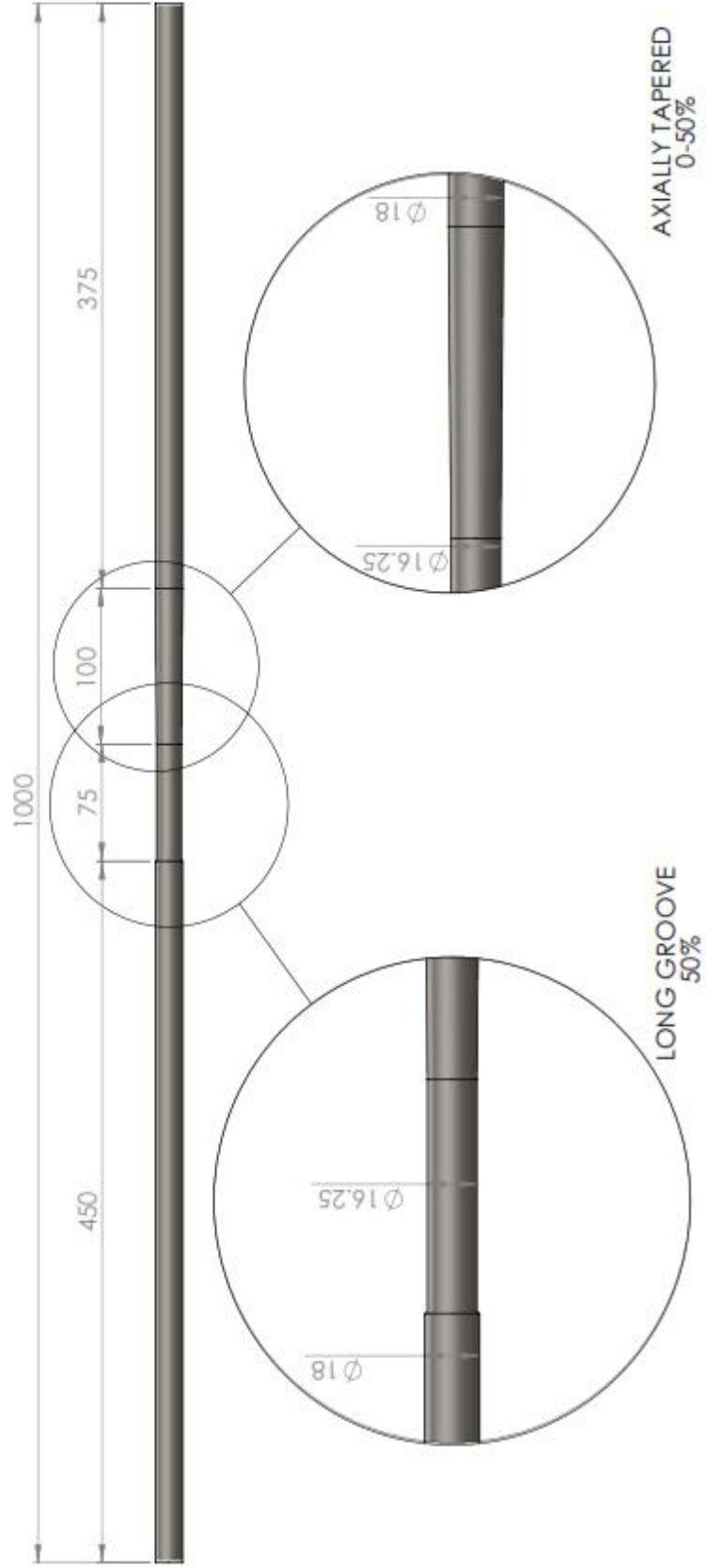


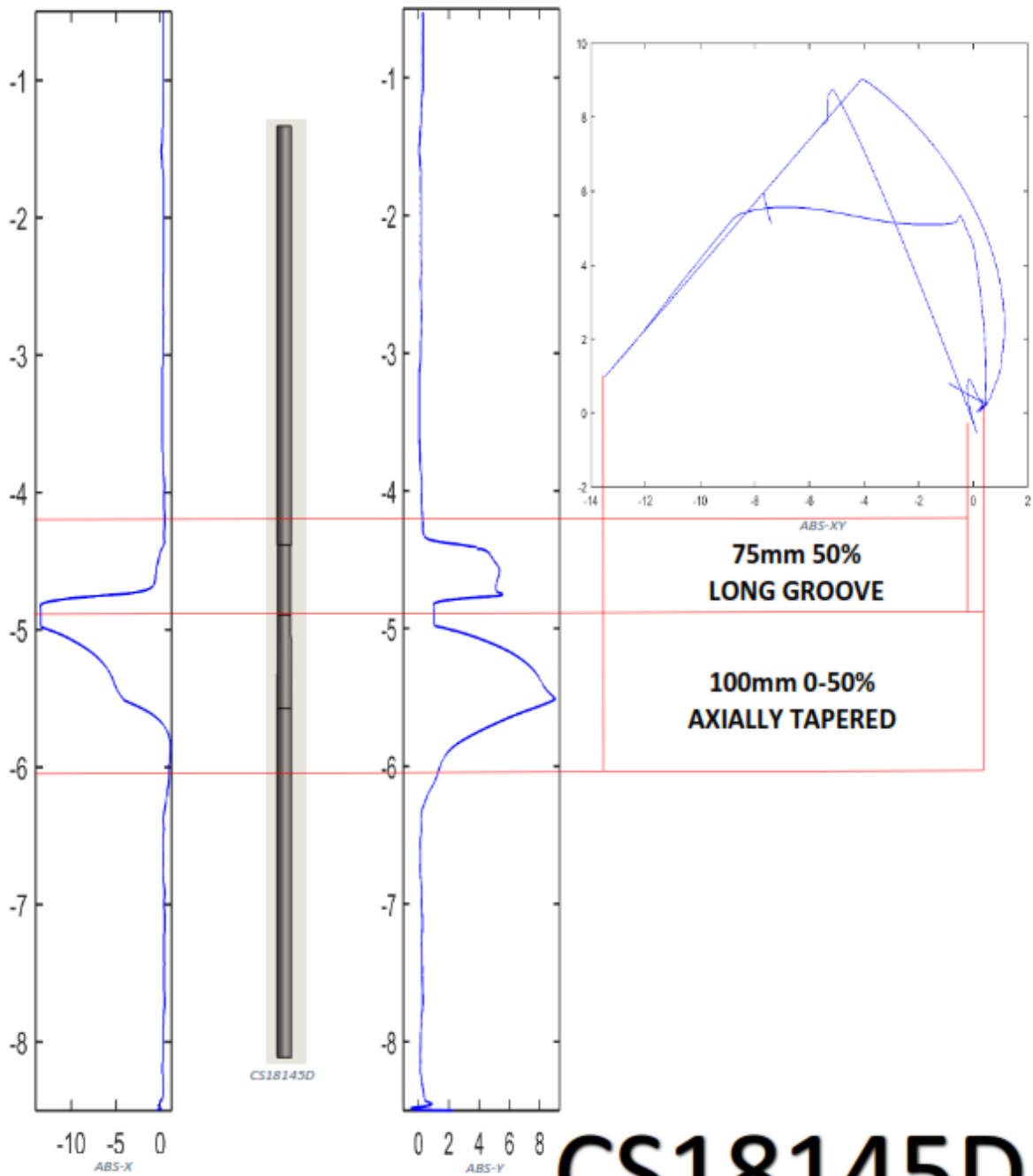
**CS18145C**

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**



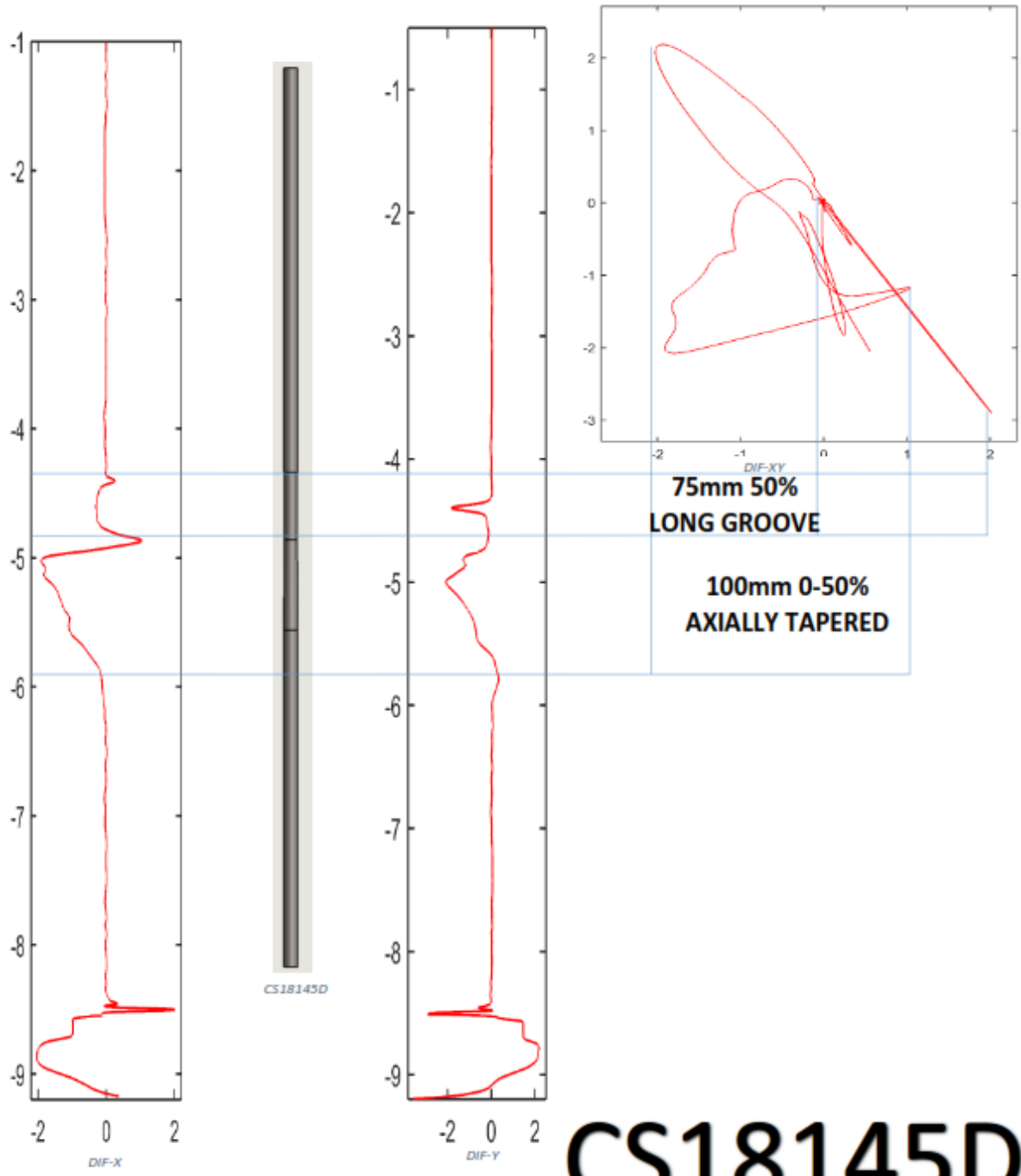
# CS18145D





# CS18145D

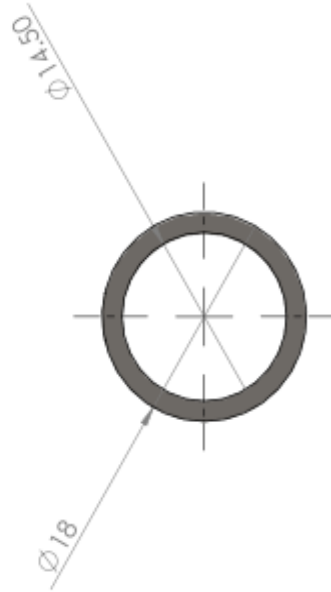
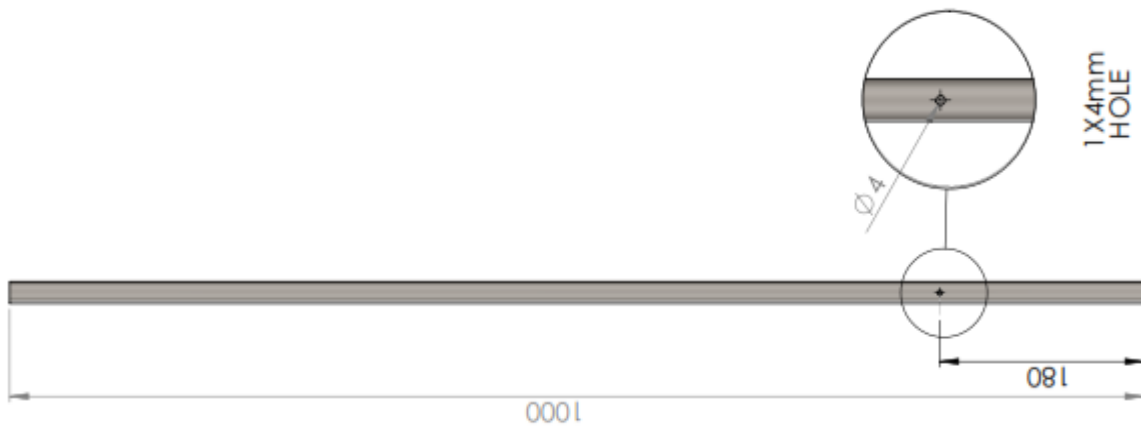
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

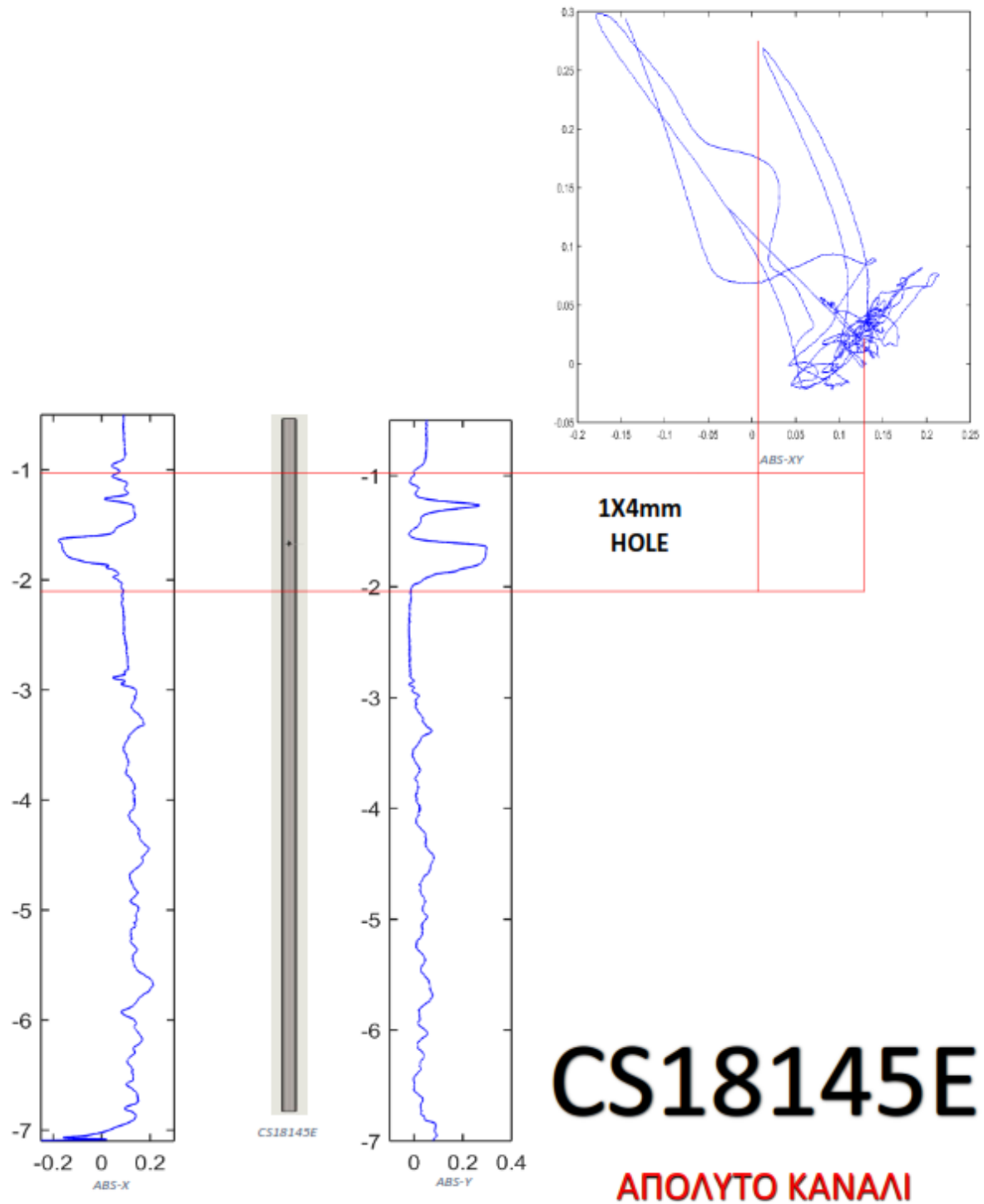


# CS18145D

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

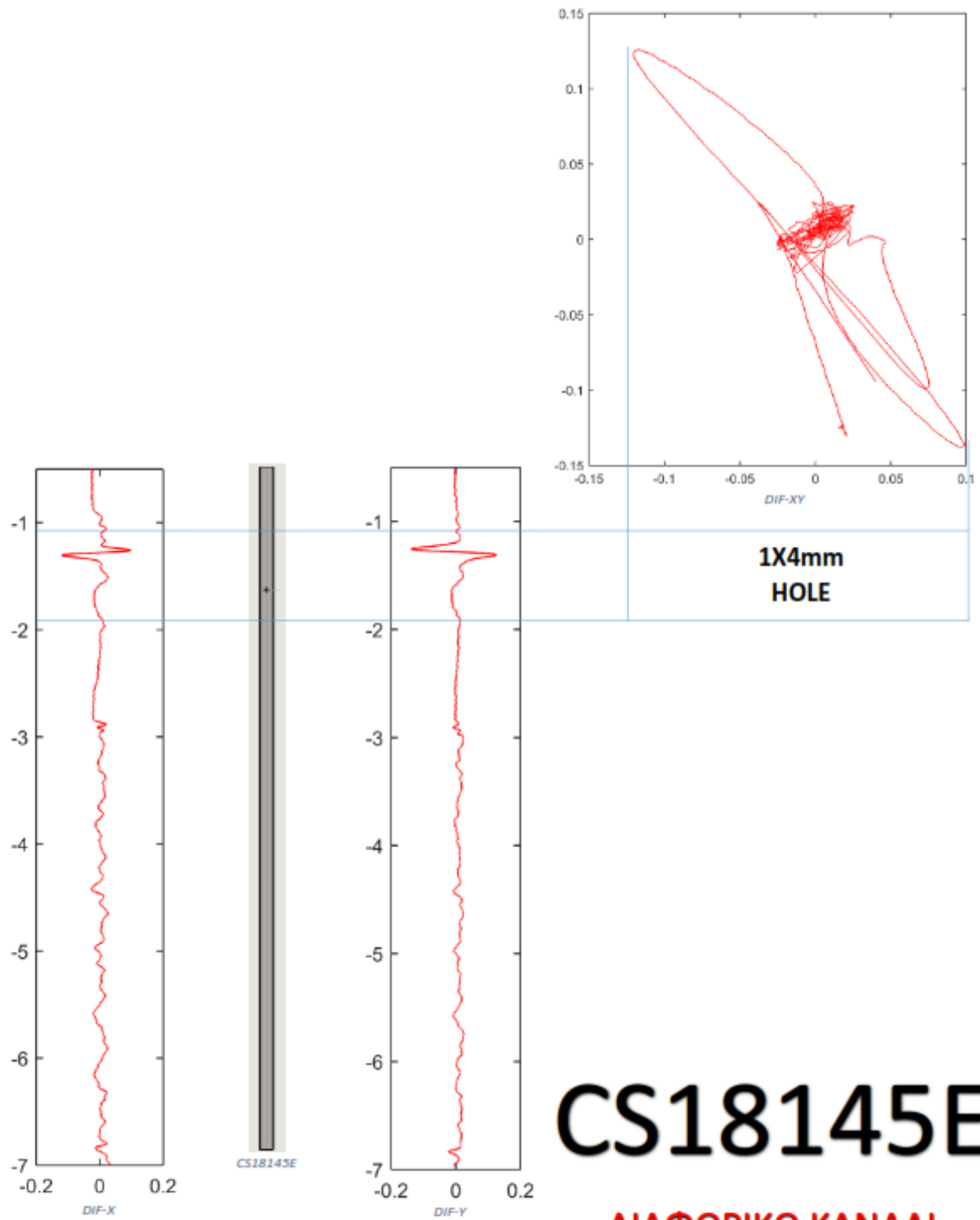
# CS18145E



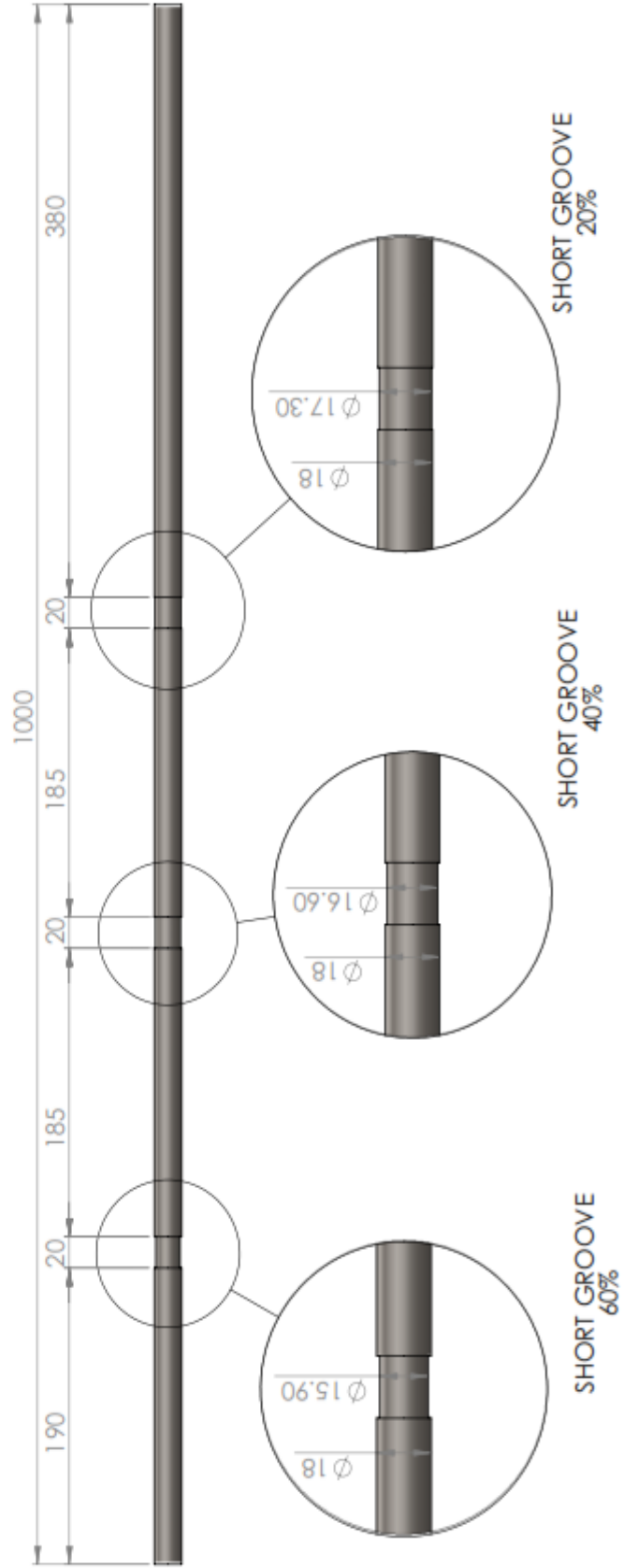


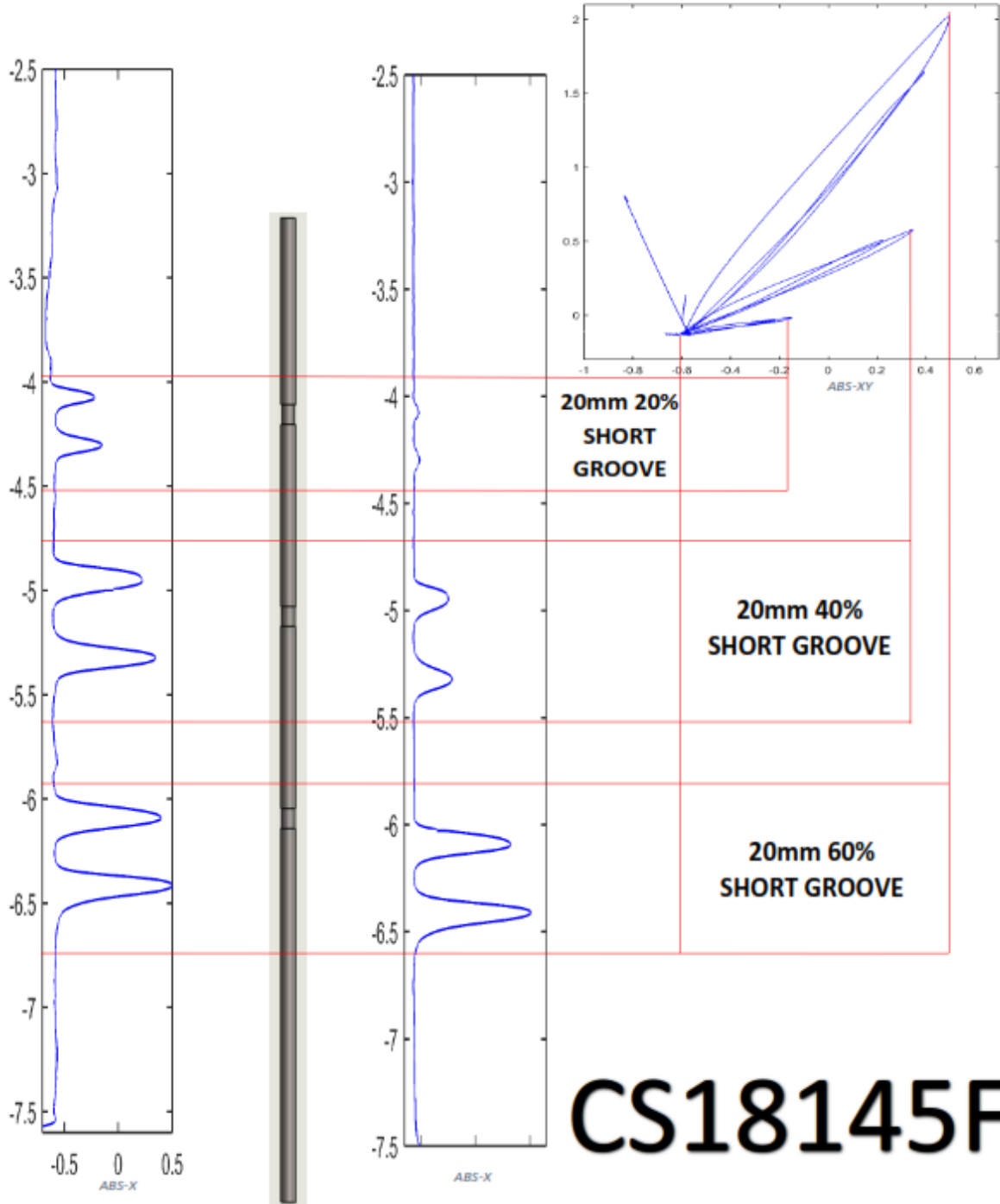
**CS18145E**

**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**



# CS18145F

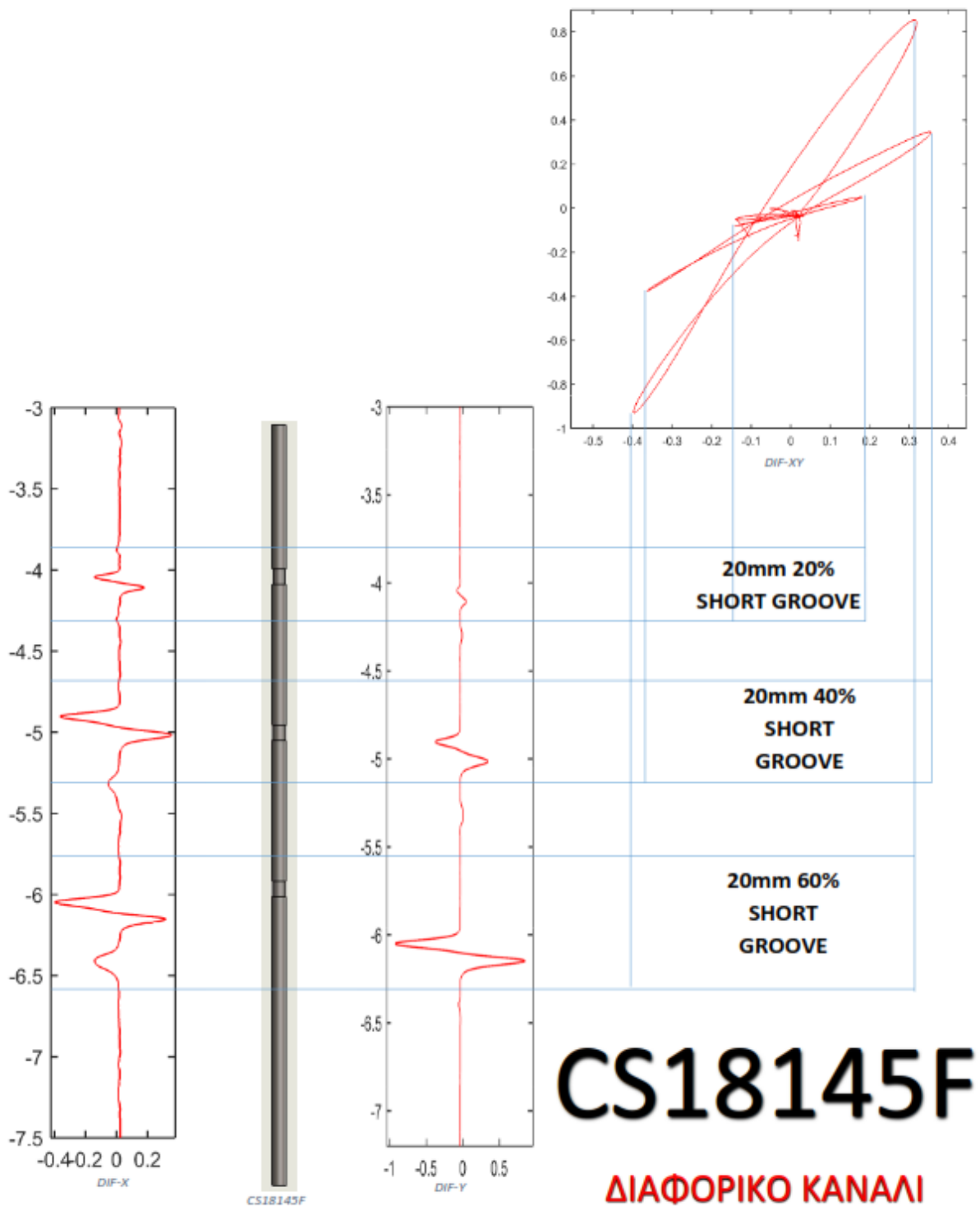




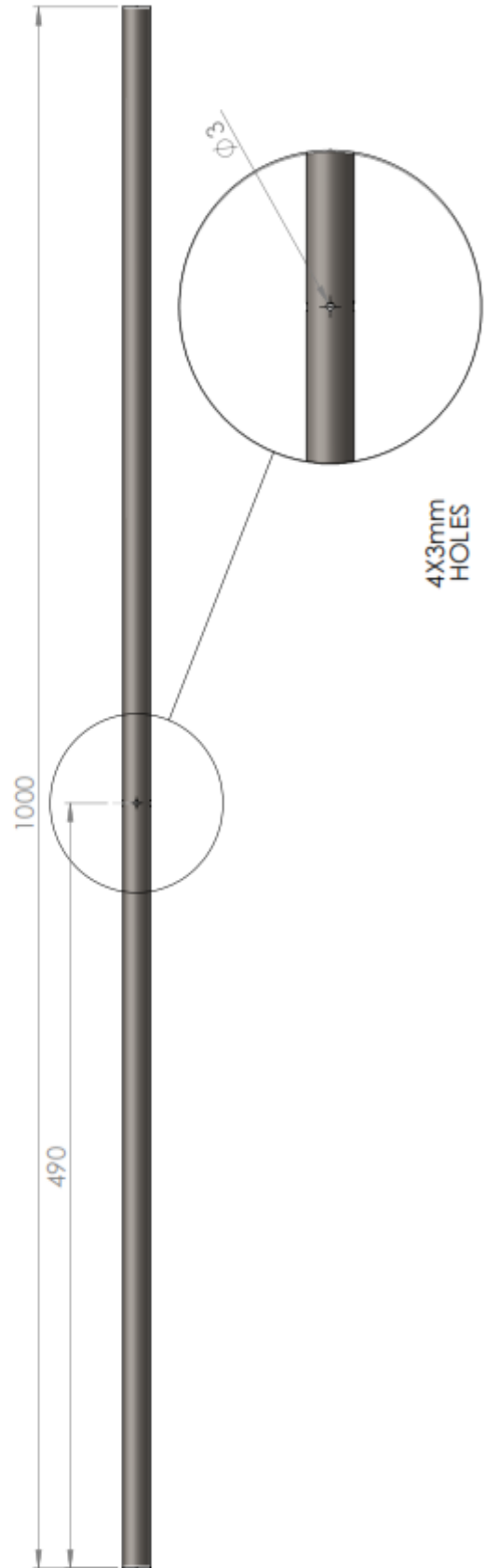
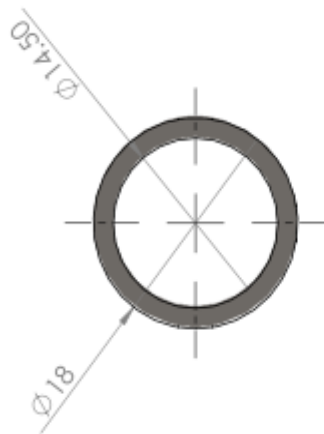
# CS18145F

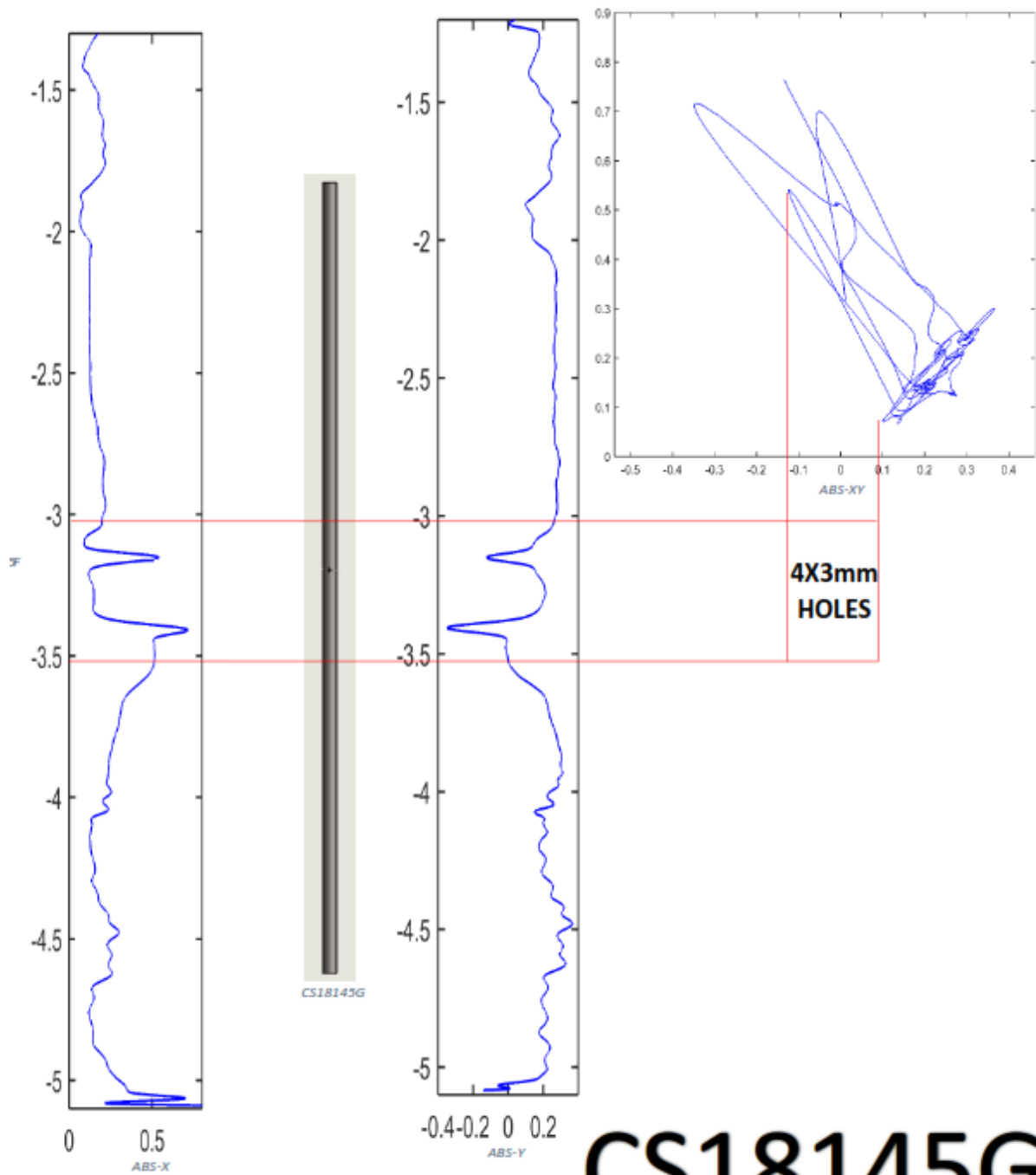
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**





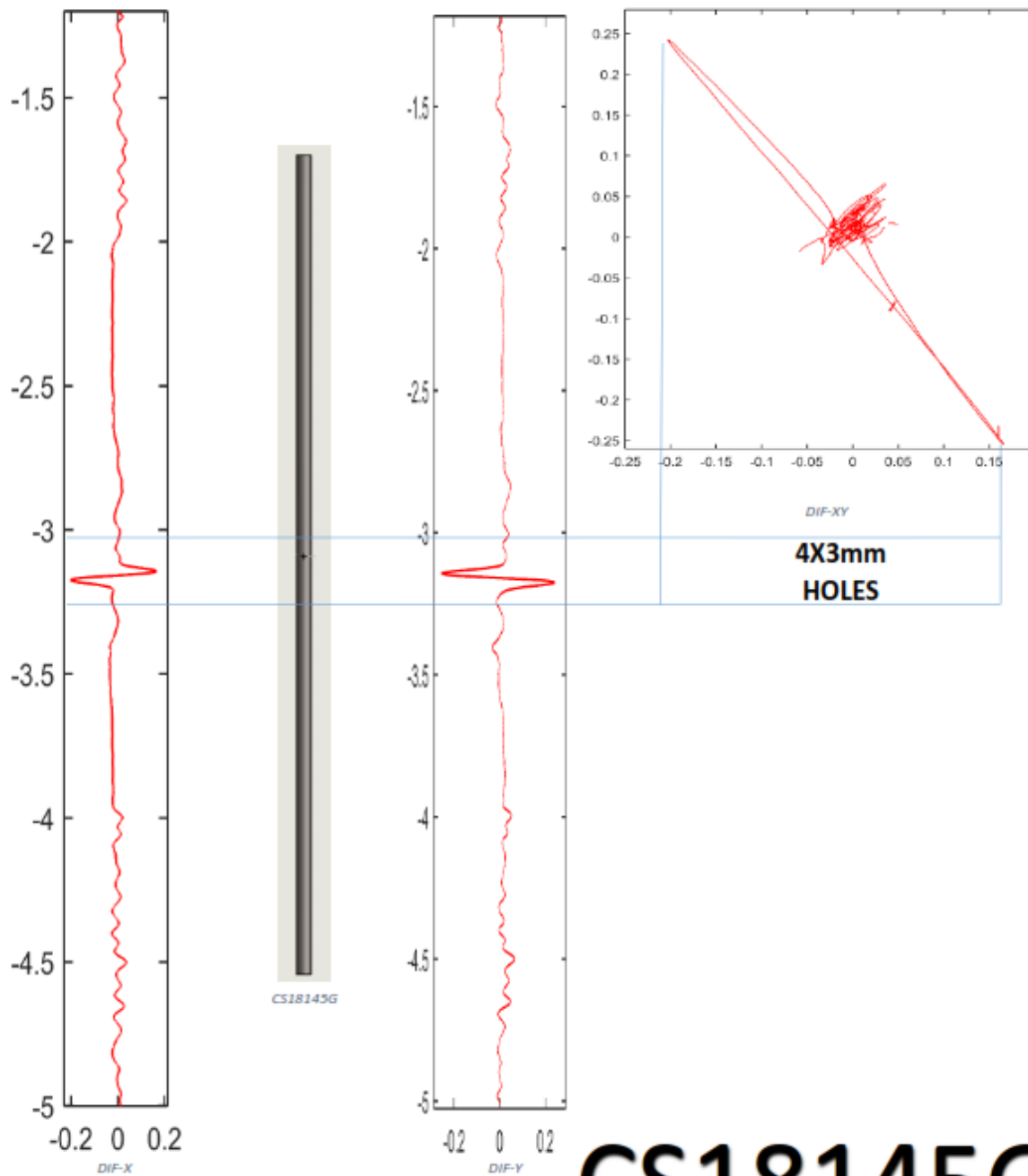
# CS18145G





# CS18145G

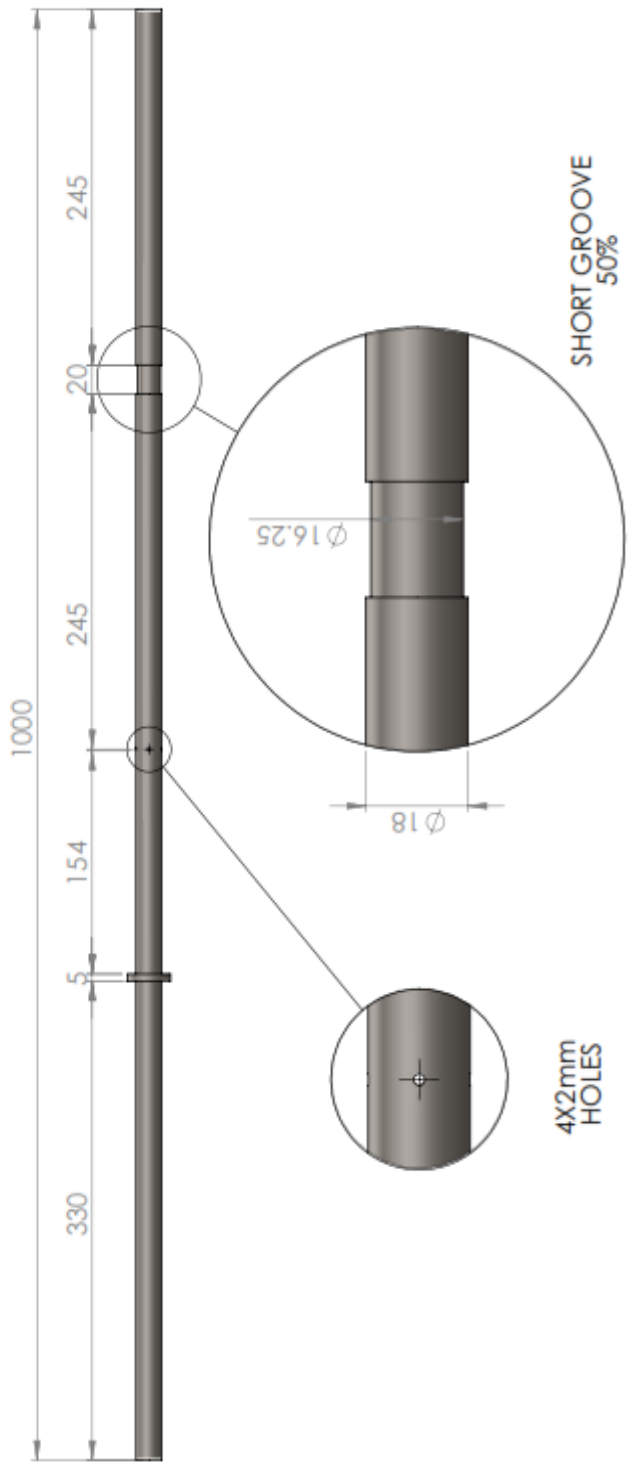
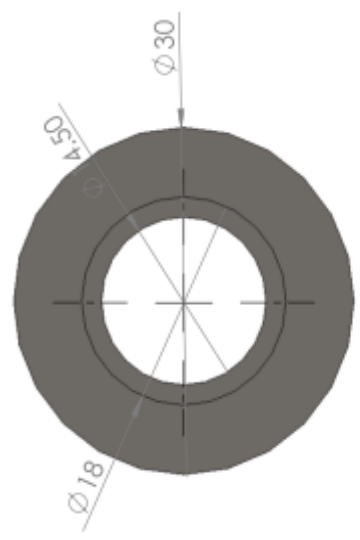
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

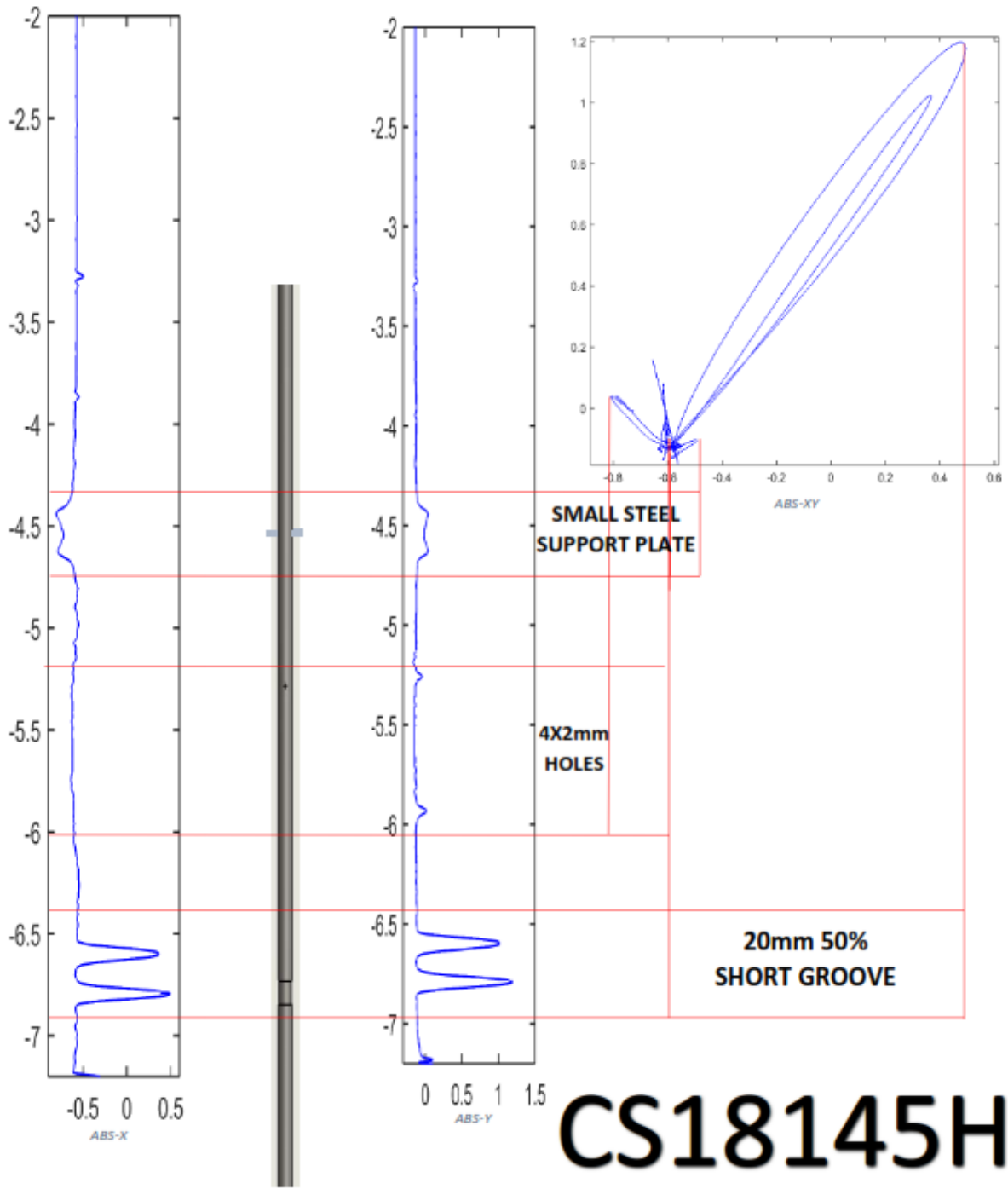


**CS18145G**

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

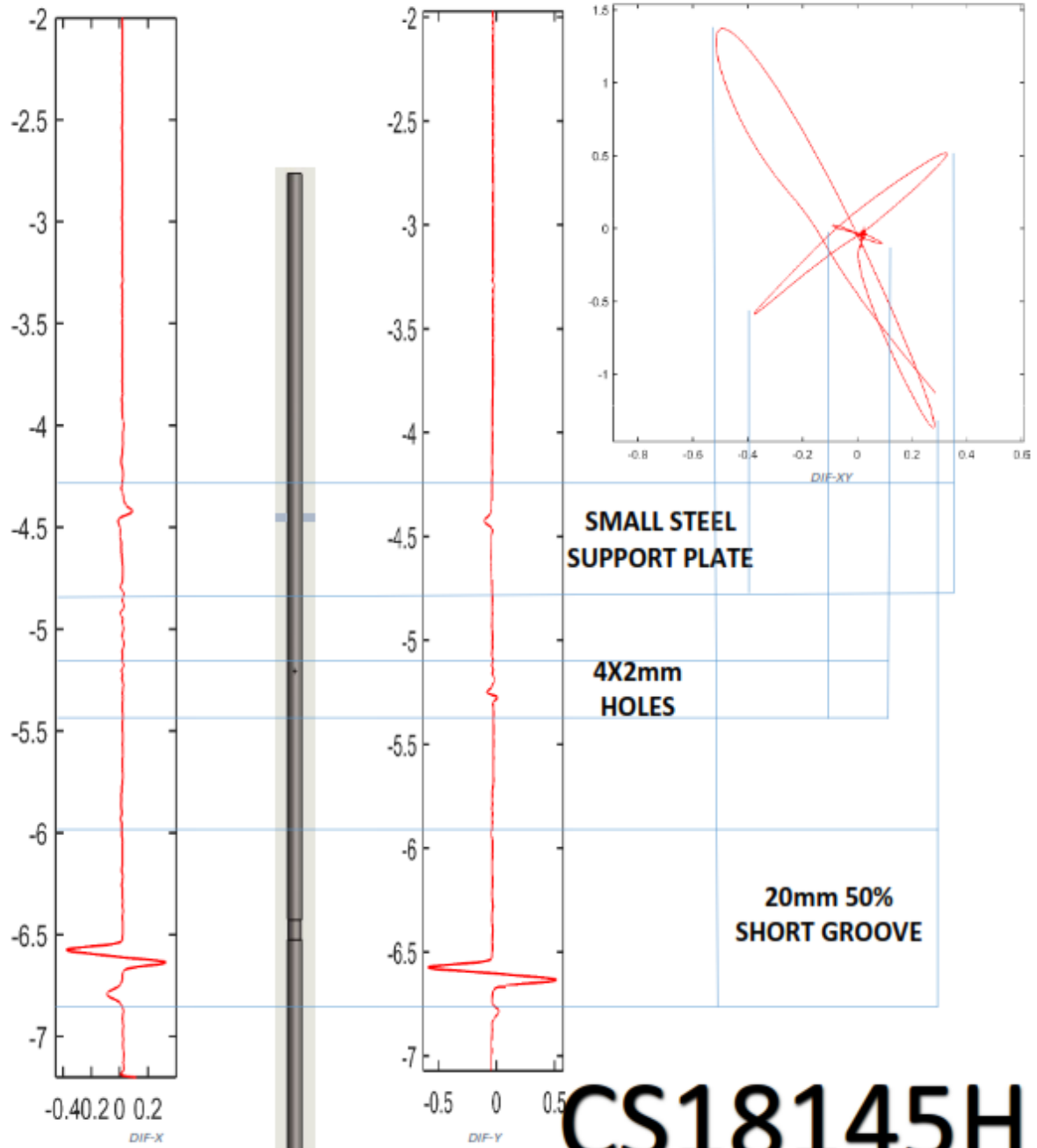
# CS18145H





# CS18145H

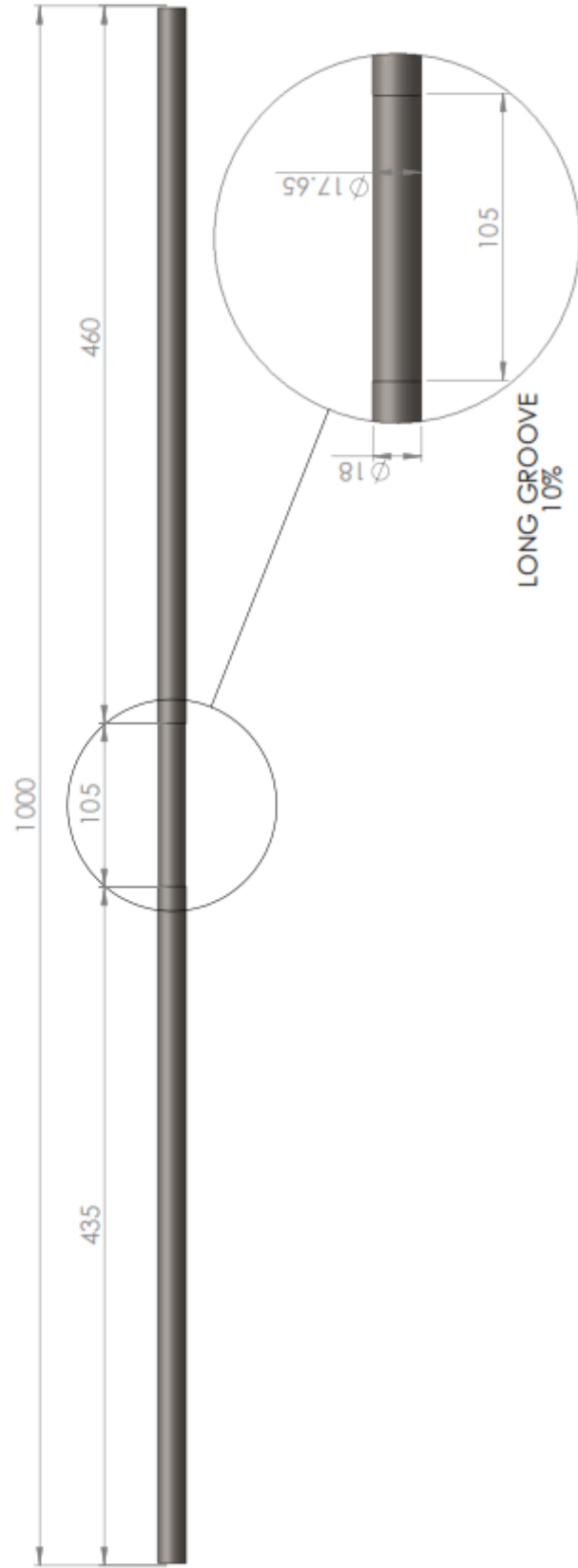
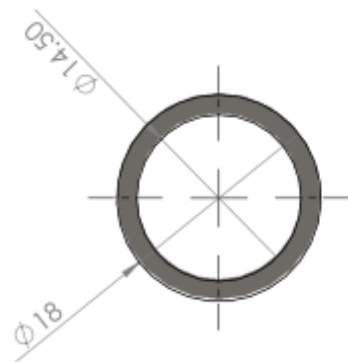
**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**



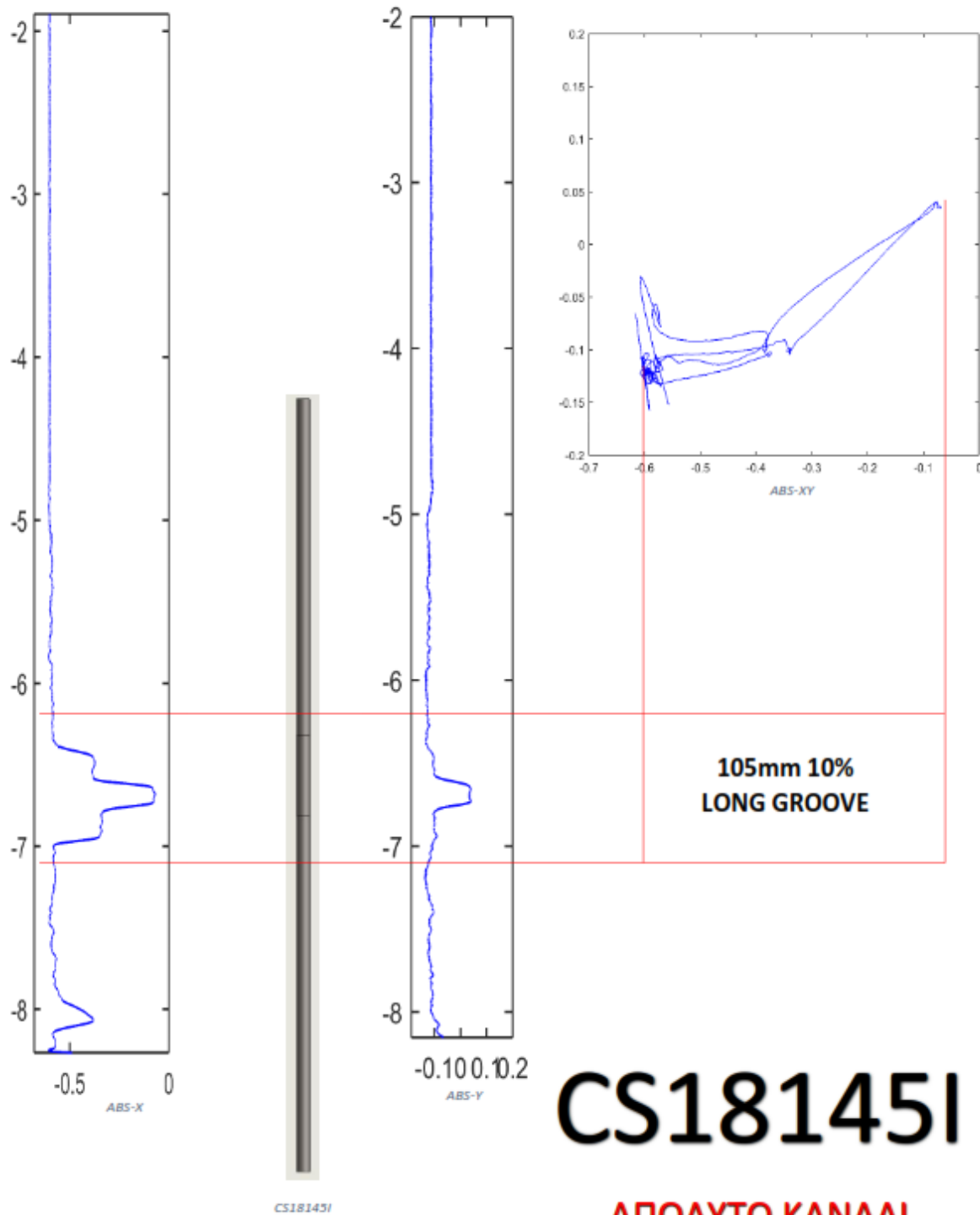
# CS18145H

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

# CS18145I

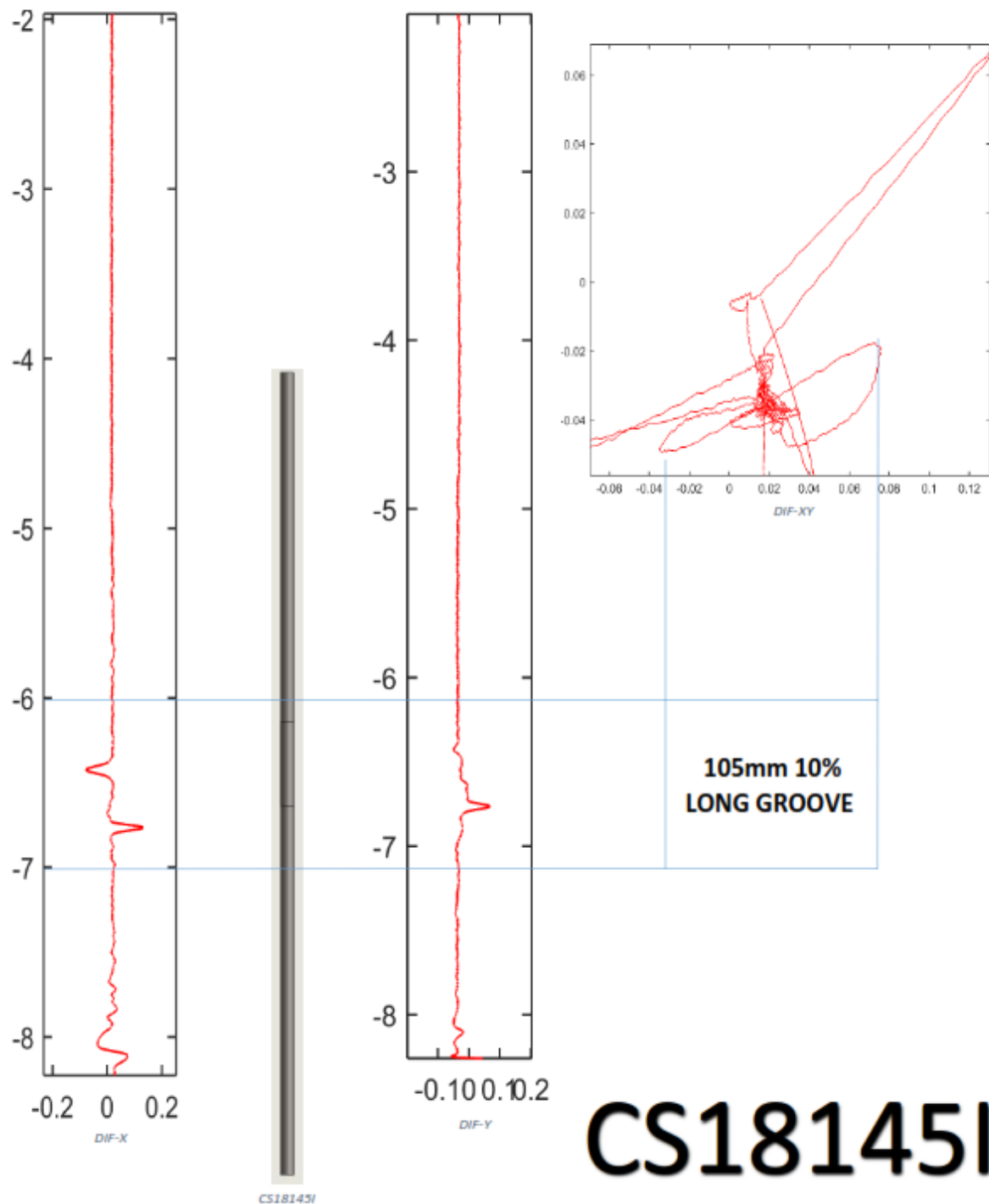






**CS18145I**

**ΑΠΟΛΥΤΟ ΚΑΝΑΛΙ**

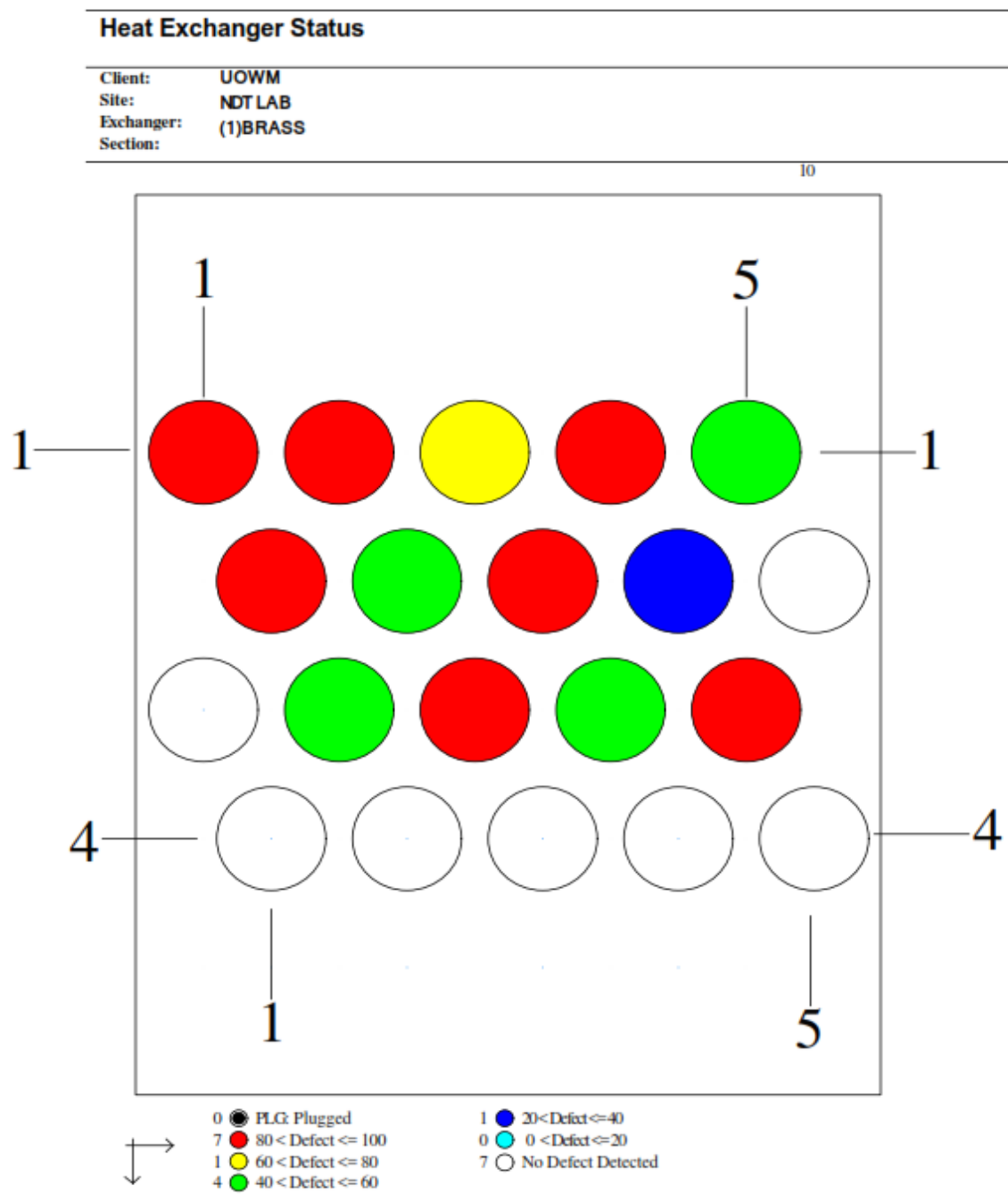


# CS18145I

**ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ**

# Κεφάλαιο 12: Ανάλυση σημάτων και απεικόνιση με χρήση του Carto για τον Εναλλάκτη (1)

## 12.1 Χάρτης ελέγχου



Σχήμα 58: Χάρτης Ελέγχου ECT[13]

## 12.2 Χαρακτηρισμός σφαλμάτων

### Analysis Report

OLYMPUS

#### Inspection Summary

Client:	UOWM	Method:	ECT
Site:	NDT LAB	System:	
Exchanger:	(1)BRASS	Probe:	TEB-210-030 s/n:90073-01
Section:		Comment:	
Outage:			
Operator:			
Analyst:			
Contract:			

#### Results

ID	Zone	Row	Col.	Volts	Deg.	Depth	Side	Eval.	Channel	Location	Extent
1	A	2	3	1.540	43	98.00	Out	PIT	D90	Position: 6.2665m Cursor Length: 0.4640m	END
										Comment: BR2325A	
2	A	2	1	5.250	27	28.00	In	WLL	D90	Position: 8.2400m Cursor Length: 0.5655m	END
										Comment: BR2325B	
3	A	2	1	0.380	47	95.00	Out	PIT	D90	Position: 5.9925m Cursor Length: 0.5655m	END
										Comment: BR2325B	
4	A	3	5	1.310	44	97.00	Out	PIT	D90	Position: 6.0995m Cursor Length: 0.4640m	END
										Comment: BR2325E	
5	A	3	5	1.070	47	95.00	Out	PIT	D90	Position: 5.3310m Cursor Length: 0.4640m	END
										Comment: BR2325E	
6	A	3	5	0.360	50	93.00	Out	PIT	D90	Position: 3.6055m Cursor Length: 0.4640m	END
										Comment: BR23253	
7	A	1	1	0.970	40	100.00	Out	PIT	D90	Position: 4.3057m Cursor Length: 0.2030m	END
										Comment: BR2325I	
8	A	1	1	2.400	126	20.00	Out	WLL	D90	Position: 3.7838m Cursor Length: 0.3770m	END
										Comment: BR2325I	
9	A	1	1	5.370	118	41.00	Out	WLL	D90	Position: 3.0152m Cursor Length: 0.3770m	END
										Comment: BR2325I	
10	A	1	1	10.830	107	62.00	Out	WLL	D90	Position: 2.4207m Cursor Length: 0.3770m	END
										Comment: BR2325I	
11	A	1	2	0.420	107	20.00	Out	PIT	D90	Position: 5.1708m Cursor Length: 0.3190m	END
										Comment: BR2325J	
12	A	1	2	0.200	83	58.00	Out	PIT	D90	Position: 4.4167m Cursor Length: 0.3190m	END
										Comment: BR2325J	
13	A	1	2	0.270	51	92.00	Out	PIT	D90	Position: 3.3728m Cursor Length: 0.3190m	END
										Comment: BR2325J	
14	A	3	3	1.380	44	98.00	Out	PIT	D90	Position: 3.9167m Cursor Length: 0.2320m	END

Σχήμα 59: Χαρακτηρισμός σφαλμάτων με ECT(1)[13]



## 12.3 Στατιστικά ελέγχου

### Distribution Of Tubes By Wall Loss

CARTO Version 2.3R1 - BRASS.mdb

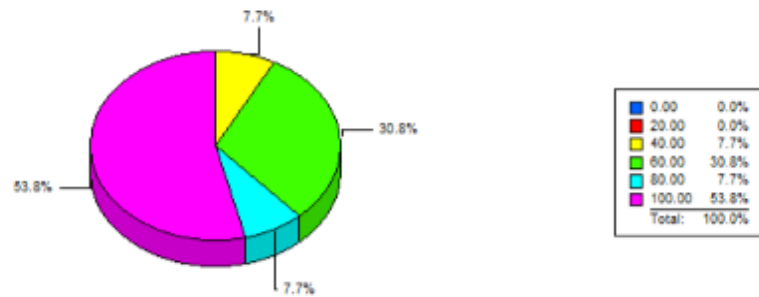
Client: UOWM

Site: NDT LAB

Exchanger: (1)BRASS

Wall Loss	Tubes	Percent
$x = 0\%$	0	.0%
$0\% < x \leq 20\%$	0	.0%
$20\% < x \leq 40\%$	1	5.0%
$40\% < x \leq 60\%$	4	20.0%
$60\% < x \leq 80\%$	1	5.0%
$80\% < x \leq 100\%$	7	35.0%
	13	

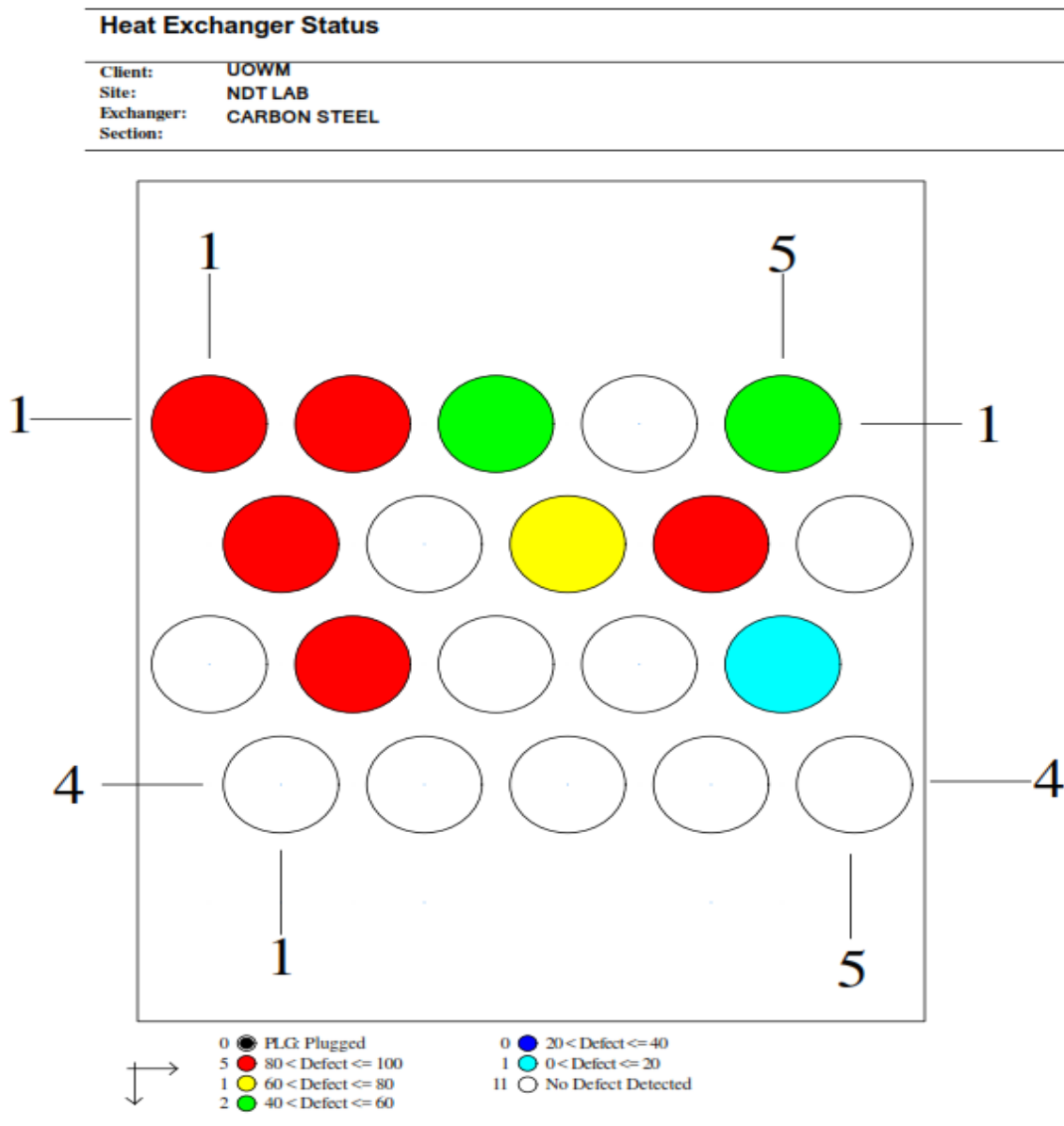
### Distribution of Tubes by Wall Loss



Σχήμα 61: Στατιστικά ελέγχου με ECT[13]

# Κεφάλαιο 13: Ανάλυση σημάτων και απεικόνιση με χρήση του Carto για τον Εναλλάκτη (2)

## 13.1 Χάρτης ελέγχου



Σχήμα 62: Χάρτης Ελέγχου RFT[13]

## 13.2 Χαρακτηρισμός σφαλμάτων

Tube Inspection Results									2016-03-05
CARTO Version 2.3R1 - CARBON STEEL.mdb									Page 1 of 2
Client:		UOWM							
Site:		NDT LAB							
Exchanger:		CARBON STEEL							
Zone	Row	Column	Outage	Defect	ID/OD	Eval.	Position	Length	Comment
A	1	1	1	97%	-	PIT	4.8725m	0.00	CS18145A
A	1	1	1	65%	-	WLS	4.2550m	0.00	CS18145A
A	1	1	1	45%	-	WLS	3.5238m	0.00	CS18145A
A	1	1	1	24%	-	WLS	2.8412m	0.00	CS18145A
				<i>Maximum defect:</i>					
				97%					
A	1	2	1	22%	-	PIT	7.8313m	0.00	CS18145B
A	1	2	1	40%	-	PIT	7.3438m	0.00	CS18145B
A	1	2	1	67%	-	PIT	6.8238m	0.00	CS18145B
A	1	2	1	70%	-	PIT	6.3362m	0.00	CS18145B
A	1	2	1	100%	-	PIT	5.7512m	0.00	CS18145B
				<i>Maximum defect:</i>					
				100%					
A	1	3	1	47%	-	WLL	5.7562m	0.00	CS18145C
A	1	3	1	31%	-	WLL	4.4400m	0.00	CS18145C
				<i>Maximum defect:</i>					
				47%					
A	1	5	1	54%	-	WLL	4.3900m	0.00	CS18145D
A	1	5	1	21%	-	WLL	5.1537m	0.00	CS18145D
				<i>Maximum defect:</i>					
				54%					
A	2	1	1	92%	-	PIT	1.2112m	0.00	CS18145E
				<i>Maximum defect:</i>					
				92%					
A	2	3	1	61%	-	WLS	6.2787m	0.00	CS18145F
A	2	3	1	42%	-	WLS	5.1575m	0.00	CS18145F
A	2	3	1	19%	-	WLS	4.2312m	0.00	CS18145F
				<i>Maximum defect:</i>					
				61%					
A	2	4	1	89%	-	PIT	3.1813m	0.00	CS18145G
				<i>Maximum defect:</i>					
				89%					
A	3	2	1	22%	-	WLS	6.6663m	0.00	CS18145H
A	3	2	1	87%	-	PIT	5.2525m	0.00	CS18145H
				<i>Maximum defect:</i>					
				87%					
A	3	5	1	9%	-	WLL	6.6900m	0.00	CS18145I
				<i>Maximum defect:</i>					
				9%					

Σχήμα 63: Χαρακτηρισμός σφαλμάτων με RFT[13]

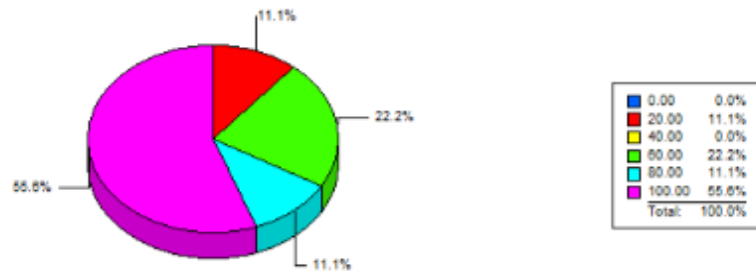


### 13.3 Στατιστικά ελέγχου

<b>Distribution Of Tubes By Wall Loss</b>	
CARTO Version 2.3R1 - CARBON STEEL.mdb	
Client:	UOWM
Site:	NDT LAB
Exchanger:	CARBON STEEL

Wall Loss	Tubes	Percent
x = 0%	0	.0%
0% < x <= 20%	1	5.0%
20% < x <= 40%	0	.0%
40% < x <= 60%	2	10.0%
60% < x <= 80%	1	5.0%
80% < x <= 100%	5	25.0%
	9	

**Distribution of Tubes by Wall Loss**



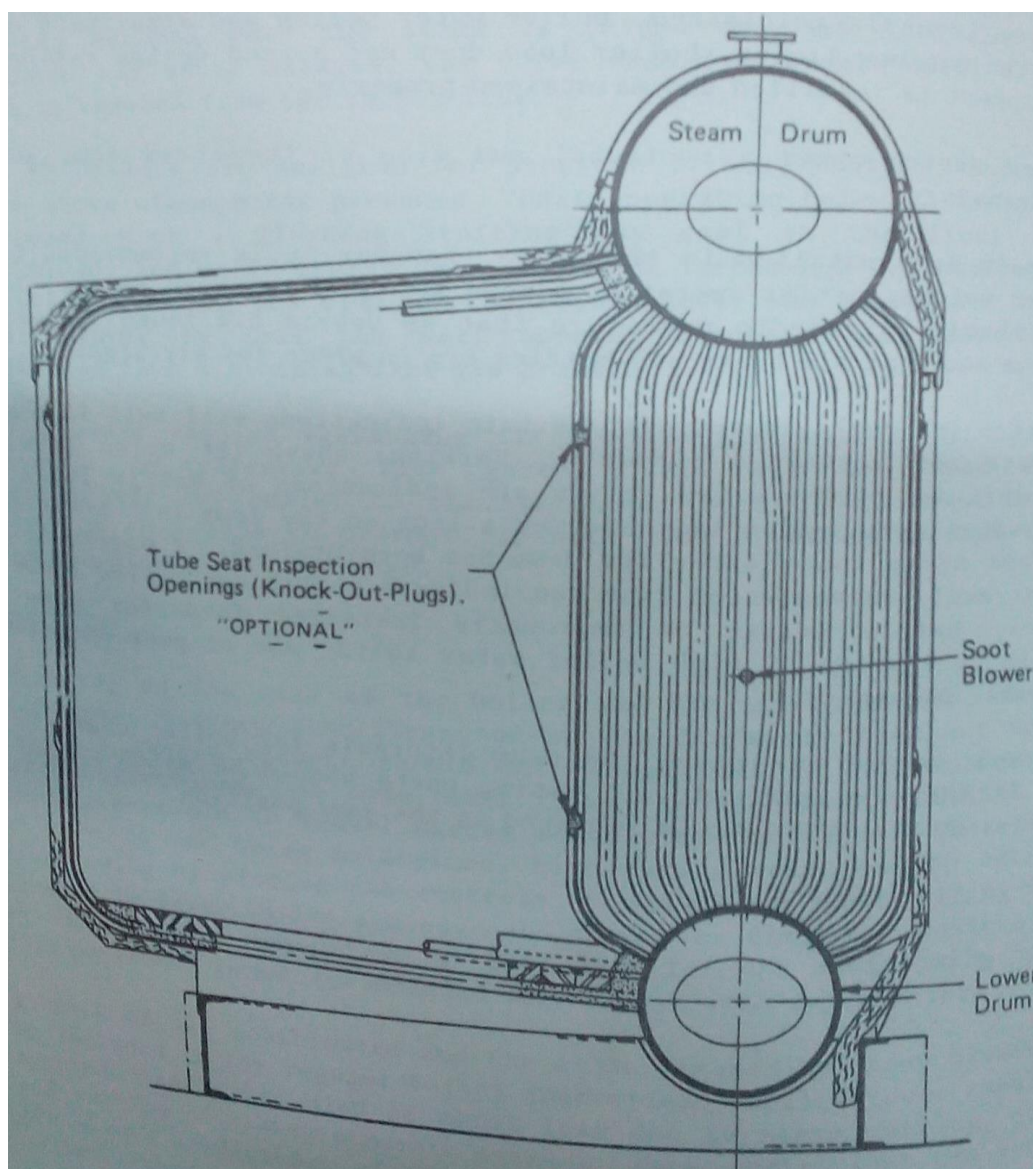
Σχήμα 64: Στατιστικά ελέγχου με RFT[13]

## Κεφάλαιο 14: Συνεργασίες

Έχοντας αποκτήσει τεχνογνωσία και έχοντας επιτύχει εξοικείωση με τον τεχνικό εξοπλισμό και στο πλαίσιο της συνεργασίας που έχει το εργαστήριο με εταιρεία που διενεργεί ελέγχους, αλλά και συνεργασία με το ΚΔΕΠ (ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ-ΔΕΗ) συμμετείχαμε σε δύο ελέγχους.

### 14.1 Έλεγχος με RFT

Ο πρώτος έλεγχος σε συνεργασία με την ιδιωτική εταιρία έγινε σε βιομηχανικό λέβητα υψηλής πίεσης (18bar) και έγινε για έκδοση πιστοποιητικού ασφάλειας.



Σχήμα 65: Βιομηχανικός λέβητας υψηλής πίεσης

Οι **1400** αυλοί (τούμπα) διαμέτρου 35mm που ελέγχθηκαν ήταν σιδηρομαγνητικού υλικού έτσι που χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του Απομακρυσμένου Πεδίου (RFT).



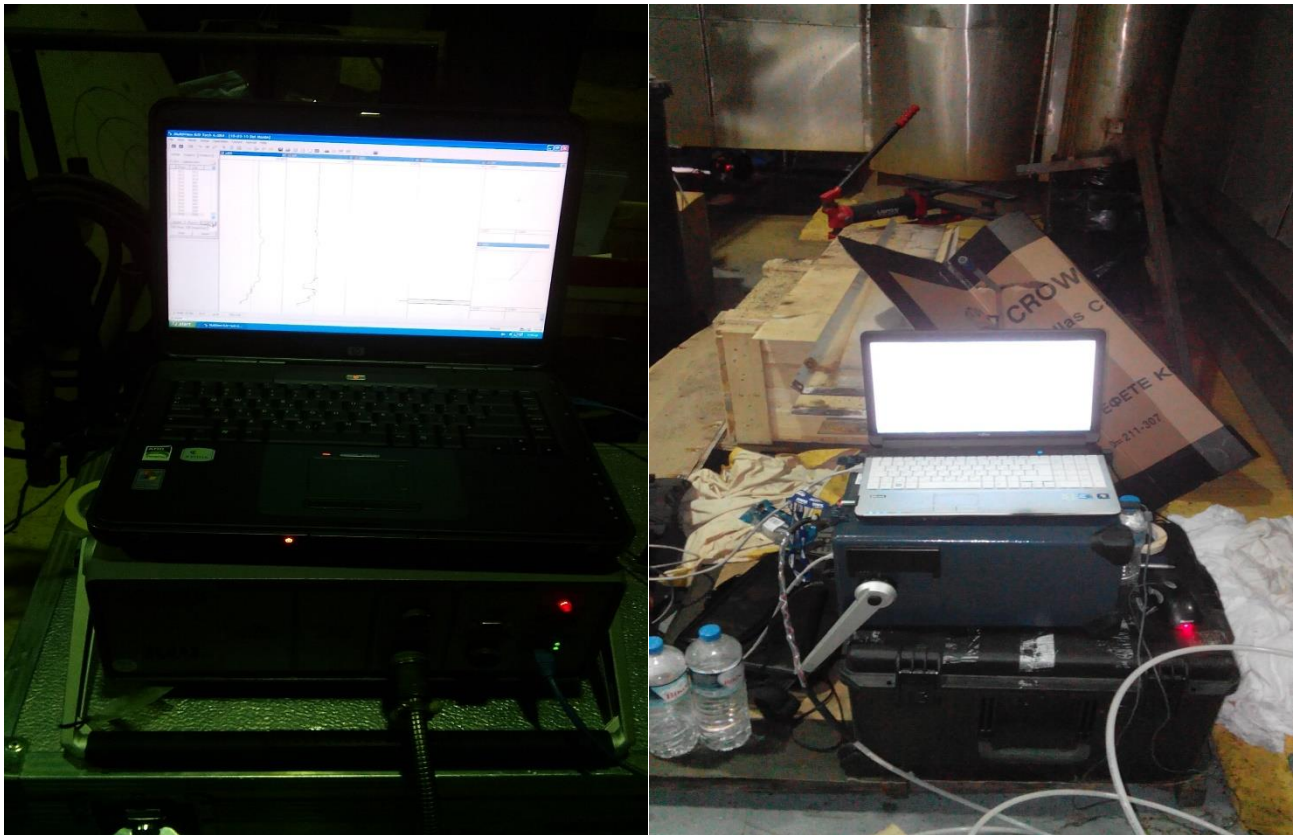
Σχήμα 66: Αυλοί όπως φαίνονται από κάτω ανθρωποθυρίδα



Σχήμα 67: Αυλοί όπως φαίνονται από πάνω ανθρωποθυρίδα

Στο πλαίσιο της συμφωνίας με την εταιρεία, η συμμετοχή του εργαστήριου ήταν:

- Βαθμονόμηση του εργαστηριακού εξοπλισμού (Olympus MS5800) αλλά και του εξοπλισμού της εταιρίας που χρησιμοποιήθηκε κατά τον έλεγχο (Olympus TC5700)
- Επίβλεψη στον έλεγχο διάρκειας 2 ημερών.

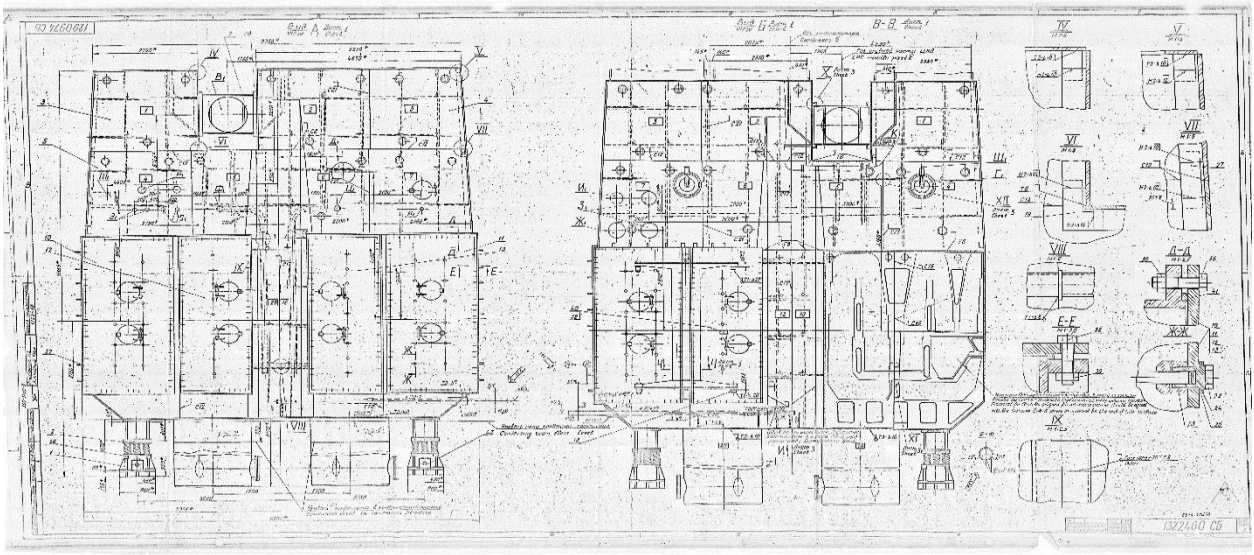


Σχήμα 68: Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε (TC5700 & MS5800)

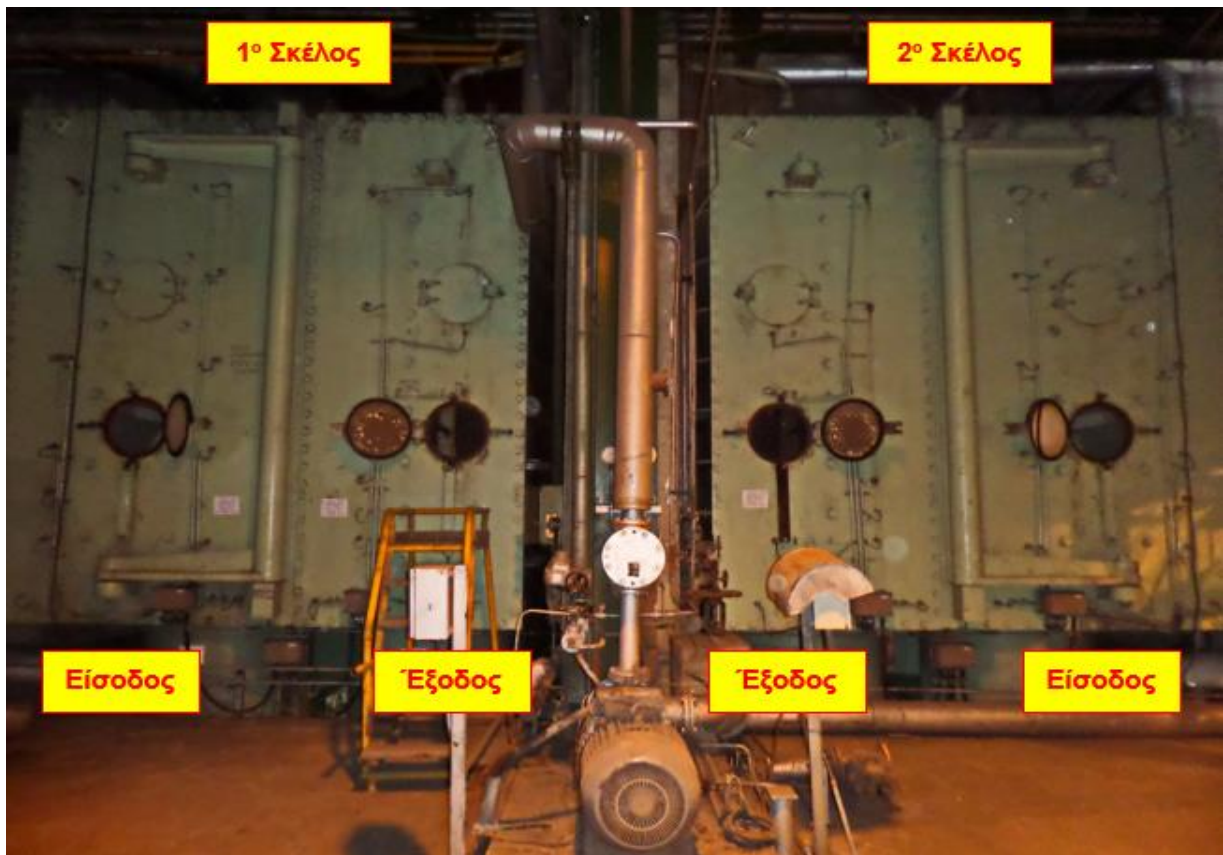


## 14.2 Έλεγχος με ECT

Ο δεύτερος έλεγχος σε συνεργασία με το ΚΔΕΠ έγινε σε βιομηχανικό εναλλάκτη θερμότητας (συμπυκνωτής - ψυγείο) στον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό Αγίου Δημητρίου (4<sup>η</sup> μονάδα) κατά διάρκεια της συντήρησης της μονάδας.

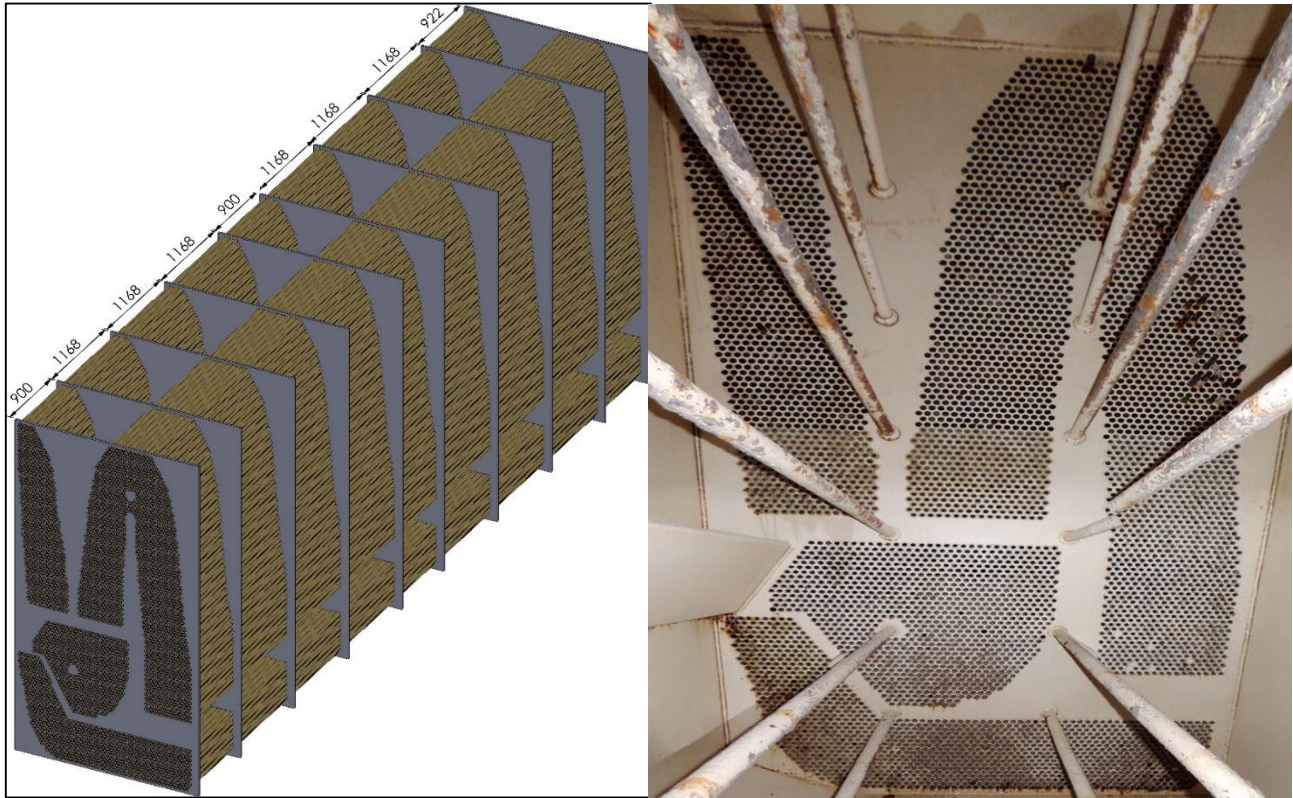


Σχήμα 69: Βιομηχανικός εναλλάκτης θερμότητας( συμπυκνωτής - ψυγείο)



Σχήμα 70: Βιομηχανικός εναλλάκτης θερμότητας (συμπυκνωτής – ψυγείο ) [9]

Οι αυλοί (τούμπα) που ελέγχθηκαν ήταν διαμέτρου 25mm, και **23350** στον αριθμό, με μήκος 10m και υλικού **CuNi5**.



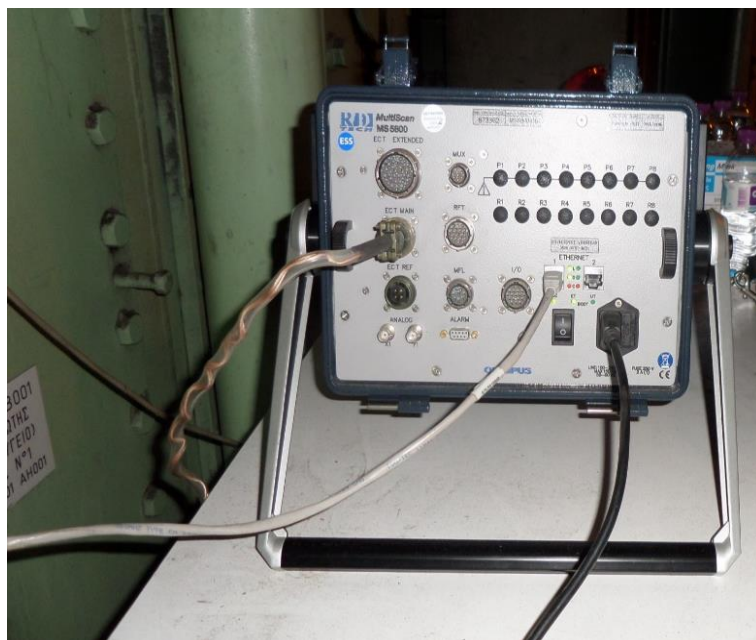
Σχήμα 71: Καθρέπτης ψυγείου και πλάκες στήριξης [9]

Ο έλεγχος έγινε με τη μέθοδο των Δινορρευμάτων (ECT) και για τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού ακολουθήθηκε το πρότυπο: 2010 ASME Boiler & Pressure Vessel Code V Non-Destructive Examination.



Σχήμα 72: Αυλοί βαθμονόμησης

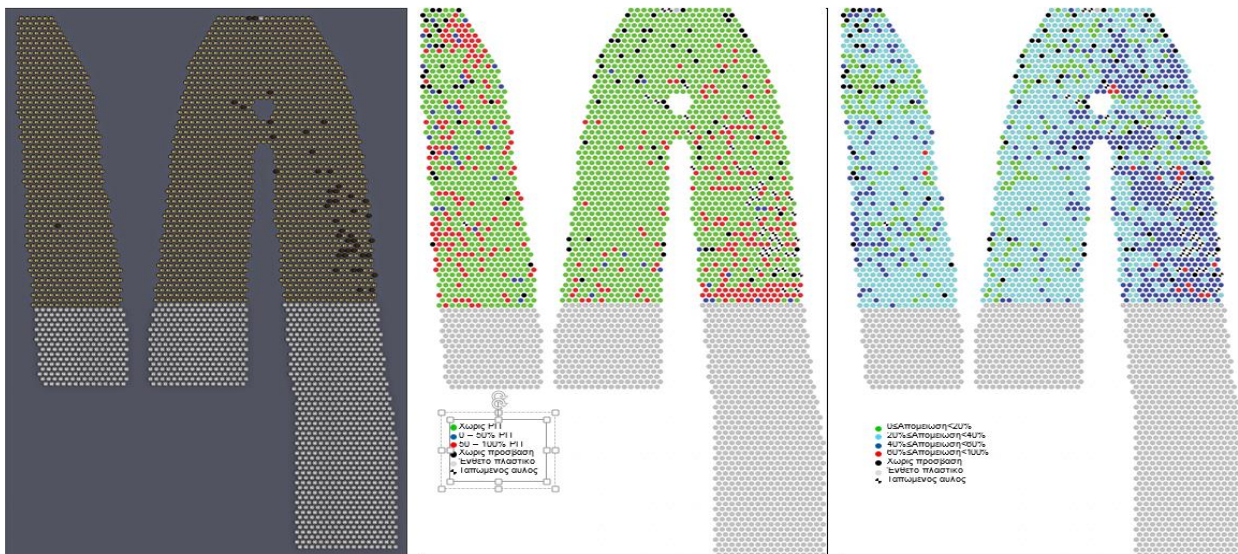




Σχήμα 73: Εξοπλισμός Ελέγχου MultiScan Olympus MS5800

Στο πλαίσιο της συμφωνίας με το ΚΔΕΠ, η συμμετοχή του εργαστηρίου ήταν:

- Κατασκευή των αυλών βαθμονόμησης
- Βαθμονόμηση του εργαστηριακού εξοπλισμού (MultiScan Olympus MS5800)
- Επίβλεψη στο 10ήμερο έλεγχο
- Συμμετοχή στην αξιολόγηση των σημμάτων και το χαρακτηρισμό τους



Σχήμα 74: Απεικόνιση σφαλμάτων κάθε σωλήνα μετά από χαρακτηρισμό του με το Carto[9]

# Κεφάλαιο 15: Συμπεράσματα και θέματα που χρήζουν έρευνας

## 15.1 Συμπεράσματα

Από το περιεχόμενο των παραπάνω κεφαλαίων και τη λήψη των μετρήσεων αλλά και τις συνεργασίες που είχαμε με την βιομηχανία μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι για την επιτυχία ενός ΜΚΕ και με τις δυο μεθόδους που αναλύονται θα πρέπει:

- Πριν από κάθε έλεγχο να έχει προηγηθεί έλεγχος καλής λειτουργίας του εξοπλισμού, ώστε να έχει απόδοση στο 100% των προδιαγραφών του.
- Πριν από κάθε έλεγχο είναι απαραίτητη η κατασκευή σωλήνων βαθμονόμησης και σωστή διαδικασία βαθμονόμησης, για να γίνεται όμως αυτό πρέπει απαραίτητα να γνωρίζουμε:
  1. Υλικό
  2. Διάμετρο
  3. Πάχος
  4. Σφάλματα που ενδέχεται να συναντήσουμε
  5. Κατάσταση εναλλάκτη ( καθαρός, επικαθήσεις, παρουσία ενθέτων προστατευτικών κλπ.)
- Η αξιολόγηση των σημάτων απαιτεί την καλή γνώση της εκάστοτε μεθόδου και εμπειρία

Επίσης διαπιστώνουμε ότι για τον έλεγχο δεν επαρκούν πάντα οι σωλήνες βαθμονόμησης που απαιτεί το πρότυπο.

Με τις μετρήσεις που πάρθηκαν τόσο στο εργαστήριο αλλά και στους δυο εξωτερικούς ελέγχους που έγιναν διαπιστώνεται πως αν τηρηθούν και οι τρεις πιο πάνω προϋποθέσεις η ακρίβεια των ελέγχων είναι πολύ ψηλή. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των σημάτων με τα προκατασκευασμένα από μας σφάλματα με μια απόκλιση τις τάξεως του 5% επαληθεύει την υψηλή ακρίβεια των ελέγχων. Ακόμα αυτό αποδείχθηκε και με την υδραυλική δοκιμή που έγινε σε εναλλάκτη μετά από διενέργεια ελέγχου με ECT με παρατήρηση διαρροής σε σημεία που από την αξιολόγηση των σημάτων χαρακτηρίστηκαν ως σφάλματα.



## 15.2 Θέματα που χρήζουν έρευνας

Τα θέματα που διαπιστώνουμε πως χρήζουν περαιτέρω έρευνας είναι :

- Μη καταστροφικός έλεγχος με τη χρήση της τρίτης δυνατότητας του οργάνου, της μέθοδο της Μαγνητικής Διαρροής (MFL)
- Μη καταστροφικός έλεγχος σε εναλλάκτες με εξωτερικά πτερύγια με την χρήση κεφάλων Κοντινού Πεδίου (NFL)
- Μελέτη του σήματος που λαμβάνουμε κατά την εκτόνωση του σωλήνα στις αυλοφώρες πλάκες (καθρέπτες)

## Βιβλιογραφία

- [1] Β. Γράφας, ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ, Acucert, Αθήνα (2009)
- [2] Κ.Ντώβας, Κ.Κώστογλου, ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΥΠΕΡΗΧΟΥ, ΑΠΘ (2010)
- [3] Β. Τζίρας, Ι. Χατζηνικολάου, ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ, ΑΠΘ (2011)
- [4] Δ. Τσαλκίδης, Π. Χατζηλίδης, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΗ-ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ, ΠΔΜ (2010)
- [5] Patrick O Moore, NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, Vol.5, (American Society for Nondestructive Testing, Columbus Ohio, 2004)
- [6] Θ.Καραπάντσιος, ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, ΑΠΘ
- [7] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ΟΔΗΓΟΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, Υπουργείο Εργασίας Δ/ση κοινοτικών πρωτοβουλιών.
- [8] Μαντέλης Νίκος, ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (RFT) ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ, ΠΔΜ, (2013 )
- [9] ΚΔΕΠ, ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟΝ ΚΥΡΙΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ IV ΤΟΥ ΑΗΣ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, ΔΕΗ, (2016)
- [10] ASME V Art 8 ET, ARTICLE 8 — APPENDIX I EDDY CURRENT EXAMINATION METHOD FOR INSTALLED NONFERROMAGNETIC HEAT EXCHANGER TUBING, (1998)
- [11]ASTM, STANDARD PRACTICE FOR IN SITU EXAMINATION OF FERROMAGNETIC HEAT-EXCHANGER TUBES USING REMOTE FIELD TESTING, (2000)
- [12] Olympus MultiView
- [13] Olympus Carto

## Ιστοσελίδες και Link

- [14][http://www.suragus.com/de/unternehmen/Qualit%C3%A4tspr%C3%BCfung\\_mittels\\_Wirbelstromverfahren](http://www.suragus.com/de/unternehmen/Qualit%C3%A4tspr%C3%BCfung_mittels_Wirbelstromverfahren)
- [15]<http://joe.buckley.net/papers/eddyc.pdf>
- [16]<http://www.joe.buckley.net/papers/eddyc/ectek3.htm>
- [17]<http://www.olympus-ims.com/sv/ms-5800-tube-inspection/>
- [18]<http://www.kontrolltechnik.de/index.php/methods/eddy-current-principle>

## **Λογισμικά**

1. MultiView 6.1
2. Carto 2.3R1
3. MATLAB R2014b
4. SolidWorks 2014 x64 Edition
5. Microsoft Office 2013
6. Nitro Pro 9