

# Έλεγχος σωλήνων εναλλακτών θερμότητας με τη μέθοδο δινορρευμάτων

Απόστολος Μ.Μ. Κωτούζας

Επιβλέπων Καθηγητής: Θεόδωρος Θεοδουλίδης

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Κοζάνη, Ιούλιος 2015

*Στον πατέρα μου...*

# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Θεοδουλίδη, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε συνεχώς και απλόχερα. Τους Κυριάκο Παππούτα και Σάββα Κουσίδη για τη βοήθεια τους, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση αυτής της εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ όλους τους εργαζόμενους στην ΤQCC. Δημήτρη, Αθηνά, Πασχάλη και Κωνσταντίνε σας ευχαριστώ για όλη σας την βοήθεια και συμπαράσταση. Ευχαριστώ, επίσης, την μητέρα μου για την αμέριστη συμπαράσταση της.

Τη διπλωματική μου εργασία την αφιερώνω στη μνήμη του πατέρα μου Μιχαήλ-Μαρίνου Κ. Κωτούζα, γιατί μέσα από τη ζωή του μου έμαθε να είμαι ολοκληρωμένος άνθρωπος.

# Περιεχόμενα

<b>I</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>2</b>
1.1	Ορολογία ΜΚΕ . . . . .	2
1.2	Δινορρεύματα . . . . .	3
1.2.1	Φυσική της μεθόδου . . . . .	5
1.3	Έλεγχος εναλλακτών θερμότητας . . . . .	7
<b>2</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ</b>	<b>9</b>
2.1	Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων . . . . .	9
2.2	Η μέθοδος Fourier . . . . .	12
2.3	Η μέθοδος Chebyshev . . . . .	14
<b>II</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>17</b>
3.1	Σκοπός . . . . .	17
3.2	Πειραματική διάταξη . . . . .	17
3.3	Μεθοδολογία στατιστικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων . . . . .	18
<b>4</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>21</b>
4.1	Αποτελέσματα πειράματος με δαχτυλίδι αναφοράς μικρότερου μήκους	22
4.1.1	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	22
4.1.2	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	24
4.1.3	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	25
4.1.4	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	26
4.1.5	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή ( $\Delta$ . 2) . . . . .	27
4.1.6	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή ( $\Delta$ . 2) . . . . .	28
4.1.7	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	29
4.1.8	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	30
4.1.9	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	31
4.1.10	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	32
4.1.11	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή ( $\Delta$ . 2) . . . . .	33
4.1.12	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή ( $\Delta$ . 2) . . . . .	34
4.1.13	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	35
4.1.14	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	36
4.1.15	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	37
4.1.16	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2) . . . . .	38

4.1.17	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 2) . . . . .	39
4.1.18	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2) . . . . .	40
4.1.19	Συνολικά Αποτελέσματα . . . . .	41
4.2	Αποτελέσματα πειράματος με δαχτυλίδι αναφοράς μεγαλύτερου μήκους . . . . .	42
4.2.1	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	42
4.2.2	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	44
4.2.3	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	45
4.2.4	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	46
4.2.5	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3) . . . . .	47
4.2.6	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3) . . . . .	48
4.2.7	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	49
4.2.8	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	50
4.2.9	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	51
4.2.10	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	52
4.2.11	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3) . . . . .	53
4.2.12	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3) . . . . .	54
4.2.13	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	55
4.2.14	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	56
4.2.15	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	57
4.2.16	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3) . . . . .	58
4.2.17	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3) . . . . .	59
4.2.18	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3) . . . . .	60
4.2.19	Συνολικά Αποτελέσματα . . . . .	61
4.3	Αποτελέσματα πειράματος με μισό δαχτυλίδι αναφοράς . . . . .	62
4.3.1	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	62
4.3.2	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	64
4.3.3	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	65
4.3.4	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	66
4.3.5	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1) . . . . .	67
4.3.6	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1) . . . . .	68
4.3.7	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	69
4.3.8	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	70
4.3.9	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	71
4.3.10	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	72
4.3.11	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1) . . . . .	73
4.3.12	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1) . . . . .	74
4.3.13	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	75
4.3.14	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	76
4.3.15	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	77
4.3.16	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1) . . . . .	78
4.3.17	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1) . . . . .	79
4.3.18	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1) . . . . .	80
4.3.19	Συνολικά Αποτελέσματα . . . . .	81
5	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89

# Κατάλογος σχημάτων

1.1	Απλουστευμένη διάταξη ελέγχου με δινορρέυματα <sup>1</sup> . . . . .	4
1.2	Κύκλωμα τύπου γέφυρας Wheatstone <sup>2</sup> . . . . .	4
1.3	Απεικόνιση φυσικών φαινομένων σε έλεγχο με δινορρέυματα <sup>3</sup> . . . . .	5
1.4	Εναλλάκτης θερμότητας με σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης <sup>4</sup> . . . . .	7
1.5	Παραδείγματα σημάτων δινορρευμάτων από έλεγχο μη σιδηρομαγνητικού σωλήνα με σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης. . . . .	8
2.1	Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε σήματα: (α) πλάκας στήριξης (2.21), (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια (2.22). . . . .	12
2.2	Ανασύνθεση σήματος πλάκας στήριξης με αριθμό συντελεστών $C_n$ ίσο με (α) 5, (β) 11 και (γ) 21. . . . .	13
2.3	Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο Fourier σε σήματα: (α) πλάκας στήριξης, (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια. . . . .	14
2.4	Ανασύνθεση σήματος πλάκας στήριξης με αριθμό συντελεστών $a_k$ : (α) 5, (β) 10, (γ) 20. . . . .	15
2.5	Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο Chebyshev σημάτων: (α) πλάκας στήριξης, (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια. . . . .	15
3.1	(α)Σωλήνας που περιέχει και τα τρία είδη σφαλμάτων.(β)Τα τρία σιδηρομαγνητικά δαχτυλίδια ( $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ ). . . . .	18
4.1	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	22
4.2	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	24
4.3	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. . . . .	25
4.4	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	26
4.5	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή ( $\Delta. 2$ ). . . . .	27
4.6	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή ( $\Delta. 2$ ). . . . .	28
4.7	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	29
4.8	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	30
4.9	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	31
4.10	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	32
4.11	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή ( $\Delta. 2$ ). . . . .	33
4.12	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή ( $\Delta. 2$ ). . . . .	34
4.13	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	35
4.14	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	36
4.15	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	37
4.16	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 2$ ). . . . .	38

4.17	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 2).	39
4.18	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).	40
4.19	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	42
4.20	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	44
4.21	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π.	45
4.22	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	46
4.23	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3).	47
4.24	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).	48
4.25	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	49
4.26	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	50
4.27	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	51
4.28	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	52
4.29	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3).	53
4.30	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).	54
4.31	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	55
4.32	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	56
4.33	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	57
4.34	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).	58
4.35	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3).	59
4.36	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).	60
4.37	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	62
4.38	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	64
4.39	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π.	65
4.40	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	66
4.41	Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1).	67
4.42	Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).	68
4.43	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	69
4.44	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	70
4.45	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	71
4.46	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	72
4.47	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1).	73
4.48	Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).	74
4.49	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	75
4.50	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	76
4.51	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	77
4.52	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).	78
4.53	Μισό δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1).	79
4.54	Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).	80
5.1	Καμπύλη ΝοΕ με $\max_1 = 92\%$ .	83
5.2	Καμπύλη ΝοΕ με $\max_1 = 70\%$ .	83
5.3	Καμπύλη ΝοΕ με $\max_1 = 60\%$ .	84
5.4	Καμπύλη ΝοΕ με $\max_1 = 50\%$ .	84
5.5	Καμπύλη PoD με $\min(p) = -180^\circ$ και $\max(p) = 180^\circ$ .	85
5.6	Καμπύλη PoD με $\min(p) = -90^\circ$ και $\max(p) = 145^\circ$ .	86
5.7	Καμπύλη PoD με $\min(p) = 0^\circ$ και $\max(p) = 90^\circ$ .	86
5.8	Καμπύλη PoD με $\min(w) = w_q$ .	87
5.9	Καμπύλη PoD με $\min(w) = 2 \cdot w_q$ .	88
5.10	Καμπύλη PoD με $\min(w) = 3 \cdot w_q$ .	88

# Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο ελέγχονται οι σωλήνες εναλλακτών θερμότητας με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Ειδικότερα, εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν θεωρητικά, πειραματικά και στατιστικά οι υπάρχουσες μέθοδοι με τις οποίες είναι δυνατός ο εντοπισμός σφαλμάτων κάτω από σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης μαζί μία πρωτότυπη μέθοδο μίξης που εμείς προτείνουμε.



Μέρος Ι  
ΑΝΑΛΥΣΗ

# Κεφάλαιο 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ορολογία ΜΚΕ

Οι Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές (ΜΚΔ) ή Μη Καταστρεπτικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) είναι μέθοδοι αξιολόγησης της κατάστασης ενός δοκιμίου (υλικό, εξάρτημα ή κατασκευή), χωρίς να βλαπτεί η λειτουργικότητά του, δηλαδή η ικανότητα μελλοντικής χρησιμοποίησης του.

Οι βασικές μέθοδοι ΜΚΕ είναι οι εξής:

1. ο οπτικός έλεγχος (VT),
2. τα μαγνητικά σωματίδια (MT),
3. τα διεισδυτικά υγρά (PT),
4. τα δινορρέυματα (ET),
5. ο υπέρηχος (UT),
6. η ραδιογραφία (RT).

Άλλες μέθοδοι ΜΚΔ είναι: η ακουστική εκπομπή (ΑΕΤ), η θερμογραφία υπεράυθρων (ΙΡΤ) και η δοκιμή διαρροής (LT). Στα σύγχρονα πρότυπα οι μέθοδοι των Δινορρευμάτων (ET), η Μέτρηση Πεδίου Εναλλασσόμενου Ρεύματος (alternating current field measurement - ACFM) ο Έλεγχος Απομακρυσμένου Πεδίου (remote field testing – RFT) και ο έλεγχος μαγνητικής διαρροής (magnetic flux leakage-MFL) εντάσσονται στην ίδια γενική κατηγορία των Ηλεκτρομαγνητικών Μεθόδων (Electromagnetic methods - EM). Οι τεχνικές Phased Array (PA) και Time Of Flight Diffraction (TOFD) συμπεριλαμβάνονται στην γενική κατηγορία του ελέγχου μέσω υπερήχων [1].

Το αποτέλεσμα εφαρμογής ενός ΜΚΔ ονομάζεται ένδειξη (indication) και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας ασυνέχειας στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Αυτή μπορεί να είναι, ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη μέθοδο: διαφορά πυκνότητας στο ραδιογράφημα, διεισδυτής, σήμα ανακλώμενων υπερήχων, σήμα μεταβολής σύνθετης αντίστασης, συσσώρευση μαγνητικών σωματιδίων κ.α. .

Μια ένδειξη μπορεί να είναι αληθής (true) ή ψευδής (false). Μη ψευδής ένδειξη σχηματίζεται από αίτια άσχετα με τις φυσικές αρχές μιας μεθόδου ΜΚΔ, σε αντίθεση με μια αληθή. Μια αληθής ένδειξη μπορεί να είναι σχετική (relevant) ή μη σχετική

(non relevant). Οφείλεται σε γνωστή και συνήθως προσχεδιασμένη ασυνέχεια, όπως π.χ. αλλαγή διατομής, συγκόλληση διαφορετικών υλικών, ύπαρξη σφηνοδρόμων και οπών ή φαινόμενο άκρου.

Μια αληθής και σχετική ένδειξη αποτελούν μια προς ερμηνεία ασυνέχεια (discontinuity), η οποία εάν, μετά την αξιολόγηση (evaluation) της, είναι απορριπτέα με βάση την εφαρμοζόμενη προδιαγραφή χαρακτηρίζεται ως ατέλεια (flaw), ενώ εάν δεν απορριπτεται χαρακτηρίζεται ως ελάττωμα (defect). Στόχος των ΜΚΔ είναι η ανίχνευση ατελειών και -κυρίως- σφαλμάτων.

Τα αντικείμενα που ελέγχονται με ΜΚΔ είναι συνήθως μεταλλικά (π.χ. χάλυβας), σπανιότερα κεραμικά (π.χ. τσιμέντο), ενώ έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζει η όλο και πιο έντονη χρήση τους στο έλεγχο σύνθετων υλικών. Η ύπαρξη ασυνεχειών σε ένα δοκίμιο και ειδικότερα άμα αυτό είναι όλκιμο οδηγεί σε πειραματικές τιμές αντοχής σε θραύσης πολύ κατώτερες της θεωρητικής συνεκτικής αντοχής του, αυξάνοντας έτσι κατά πολύ την πιθανότητα αστοχίας του. Με βάση αυτό το σκεπτικό οι ΜΚΔ έχουν χαρακτηριστεί και ως επιστήμη της ασφάλειας, καθώς η εφαρμογή τους μειώνει κατά πολύ την πιθανότητα αστοχίας υλικού [2].

Αποτελεί γεγονός, ότι δεν είναι όλες οι μέθοδοι ΜΚΕ το ίδιο αποτελεσματικές, ευαίσθητες και οικονομικές για την ίδια εφαρμογή. Ανάλογα με τον τύπο υλικού που πρέπει να ελεγχθεί, την γεωμετρία του, την προσβασιμότητά του, τη λειτουργία του και το είδος των αναμενόμενων ασυνεχειών, η καταλληλότερη μέθοδος ΜΚΕ διαφέρει. Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η οικονομία χρόνου και χρημάτων, πρέπει δηλαδή ο ΜΚΕ στην πράξη να είναι παραγωγικός και να εξοικονομεί πόρους.

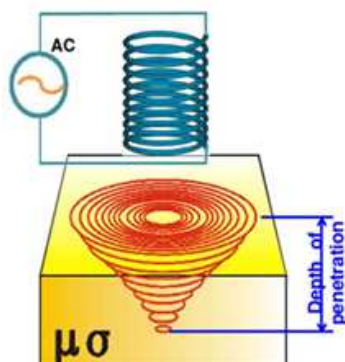
## 1.2 Δινορρέυματα

Τα δινορρέυματα (Eddy Current Testing) επάγοντας ρεύμα στο εξεταζόμενο δοκίμιο μετρούν τη μεταβολή της σύνθετης αντίστασής του και δίνουν αντίστοιχες ενδείξεις, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ασυνεχειών. Είναι εξαιρετικά ποικιλόμορφη μέθοδος και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο χυτών, σφυρήλατων, συγκολλήσεων και σωλήνων. Η κυριότερη εφαρμογή τους είναι ο έλεγχος σωλήνων καθώς οι κεφαλές δινορρευμάτων έχουν εύκολη πρόσβαση στο υπό έλεγχο δοκίμιο και ο έλεγχος είναι γρήγορος.

Καθώς τα επαγόμενα δινορρέυματα διεισδύουν σε μικρό εν γένει βάθος, ο έλεγχος με δινορρέυματα χρησιμοποιείται στον έλεγχο λεπτών δοκιμίων ή για την ανίχνευση επιφανειακών και ελαφρώς υποεπιφανειακών ασυνεχειών, σε παχύτερα δοκίμια. Επίσης, αφού ο σχηματισμός ενδείξεων στηρίζεται στη επαγωγή, η κεφαλή ελέγχου δεν είναι απαραίτητο να είναι σε απευθείας επαφή με το υπό εξέταση δοκίμιο, γεγονός που καθιστά τα δινορρέυματα πολύ χρήσιμα στον έλεγχο επιφανειών με επικάλυψη ή βαφή. Άλλωστε, μια άλλη συνήθης χρήση της μεθόδου είναι η μέτρηση της επικάλυψης ενός δοκιμίου, είτε είναι αγωγίμη είτε όχι. Μια άλλη χρήση των δινορρευμάτων είναι η ταξινόμηση υλικών, μέσα από την μέτρηση της αγωγιμότητάς τους.

*Απαραίτητη προϋπόθεση για να διεξαχθεί έλεγχος με δινορρέυματα είναι το υπό εξέταση δοκίμιο να είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού.*

Ο έλεγχος με δινορρέυματα εξαρτάται από πολλές μεταβλητές και αυτό αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημα και ταυτόχρονα μειονέκτημα της μεθόδου. Ακριβώς



Σχήμα 1.1: Απλουστευμένη διάταξη ελέγχου με δινορρεύματα<sup>1</sup>.

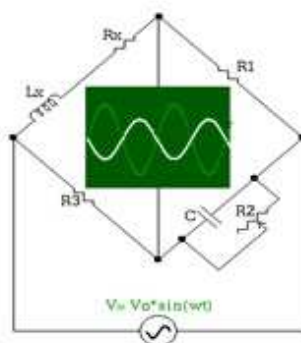
για αυτό το λόγο η αξιοπιστία ενός ελέγχου ET εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο του χειριστή.

Μια απλουστευμένη διάταξη ελέγχου με δινορρεύματα περιλαμβάνει τα εξής:

1. μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος,
2. ένα πηνίο και
3. μια μετρητική συσκευή (αμπερόμετρο ή βολτόμετρο).

Επειδή το επαγόμενο στο δοκίμιο ρεύμα έχει την μορφή δίνης, όπως δείχνει και το σχήμα 1.1<sup>1</sup>, προκύπτει η ονομασία των δινορρευμάτων [3].

Οι μεταβολές που μετρά η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι ιδιαίτερα μικρές, οπότε χρησιμοποιείται το ηλεκτρικό κύκλωμα τύπου γέφυρας Wheatstone (σχήμα 1.2)<sup>2</sup>.



Σχήμα 1.2: Κύκλωμα τύπου γέφυρας Wheatstone<sup>2</sup>.

<sup>1</sup><http://www.engineersgarage.com/>

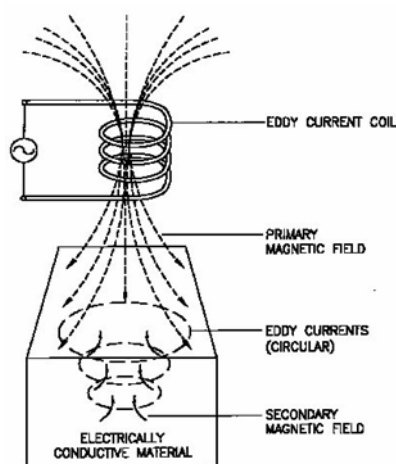
<sup>2</sup><http://www.nde-ed.org/>

### 1.2.1 Φυσική της μεθόδου

Ο έλεγχος με δινορρέυματα στηρίζεται στα εξής φαινόμενα:

- Εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα πηνίο.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πρωτεύοντος (μεταβαλλόμενου) μαγνητικού πεδίου.
- Το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο διαπερνάει το υπό εξέταση δοκίμιο έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δινορρευμάτων μέσα σε αυτό.
- Τα δινορρέυματα δημιουργούν με τη σειρά τους ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο, μικρότερου μέτρου και αντίθετης φοράς σε σχέση με αυτή του πρωτεύοντος.
- Το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται σε μέτρο, άρα το ίδιο και η μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.
- Η μεταβολή της ροής των δινορρευμάτων μέσα στο δοκίμιο επηρεάζει, άρα, τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος.
- Η παρουσία ασυνέχειας μέσα στο δοκίμιο, μειώνει την πυκνότητα ρεύματος σε αυτό, ενδυναμώνοντας το τελικό μαγνητικό πεδίο, αφού ελαττώνει το δευτερεύον (σχήμα 1.3)<sup>3</sup>.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άρση της ισορροπίας στο κύκλωμα γέφυρας της συσκευής, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ένδειξης στον μετρητή.

Οι φυσικές αρχές σε εφαρμογή είναι οι Νόμοι των Faraday, Ohm και Lenz. Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέγιστη ευαισθησία στον έλεγχο με δινορρέυματα επιτυγχάνεται όταν η διεύθυνση των δινορρευμάτων είναι κάθετη στην ασυνέχεια, καθώς τότε μειώνεται μέγιστα η ροή των δινορρευμάτων στο δοκίμιο.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση φυσικών φαινομένων σε έλεγχο με δινορρέυματα<sup>3</sup>.

<sup>3</sup><http://onlinetutoring.zohosites.com/>

Το επίπεδο που απεικονίζει την επαγωγική αντίδραση ( $X_L$ ), σε σχέση με την αντίσταση ( $R$ ), ονομάζεται επίπεδο σύνθετης αντίστασης ( $Z$ ). Ένας έλεγχος που χρησιμοποιείται με βάση την απεικόνιση των μεταβολών σε αυτό το επίπεδο ονομάζεται έλεγχος στο επίπεδο της σύνθετης αντίστασης. Παλαιότερα υπήρχαν όργανα δινορρευμάτων ευαίσθητα μόνο στο πλάτος της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης αλλά πλέον έχουν σχεδόν πλήρως επικρατήσει τα ευαίσθητα (και) στη φάση όργανα.

Το πηνίο ελέγχου μπορεί να είναι είτε απόλυτο είτε διαφορικό. Τα διαφορικά πηνία συγκρίνουν δύο διαφορετικές περιοχές του ίδιου δοκιμίου ή το ελεγχόμενο δοκίμιο με ένα πρότυπο. Τα απόλυτα πηνία ανιχνεύουν «απόλυτες» τιμές στην κάθε θέση του δοκιμίου. Τα διαφορικά πηνία είναι πιο ευαίσθητα σε απότομες μεταβολές, ενώ τα απόλυτα πηνία είναι πιο ευαίσθητα σε βαθμιαίες μεταβολές και αντίθετα.

Επίσης, τα πηνία χωρίζονται σε επιφανειακά (surface), εσωτερικά (ID ή hobbin) και περιβάλλοντα (OD). Τα εσωτερικά και περιβάλλοντα πηνία χρησιμοποιούνται στον έλεγχο σωλήνων. Τα επιφανειακά έχουν αρκετές υποκατηγορίες, αφού χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο διάφορων πολύπλοκων συχνά διατομών (π.χ. κεφαλή ελέγχου συγκολλήσεων, ραγών).

Οι ιδιότητες ενός υλικού που επηρεάζουν τον έλεγχο με δινορρεύματα ενός υλικού, εκτός φυσικά από την ύπαρξη ασυνεχειών σε αυτό, είναι οι εξής:

1. Η γεωμετρία του,
2. η μαγνητική του διαπερατότητα και
3. η αγωγιμότητά του.

Χαρακτηριστικά του συστήματος ελέγχου που επηρεάζουν τον διεξαγόμενο έλεγχο είναι τα εξής:

1. η συχνότητα ελέγχου,
2. το σχήμα, είδος και μέγεθος του πηνίου και
3. η απόσταση πηνίου-αντικειμένου που αποκαλείται ανύψωση (lift-off) στα επιφανειακά πηνία και καθορίζεται από τον παράγοντα πλήρωσης (fill factor) στα εσωτερικά (ID) και περιβάλλοντα (OD) πηνία.

Το κύριο πρόβλημα σε έναν έλεγχο είναι η καταστολή των ανεπιθύμητων παραγόντων. Αυτό γίνεται με την επιλογή της κατάλληλης κεφαλής (πηνίου) και συχνότητας λειτουργίας.

Η ροή των δινορρευμάτων μειώνεται εκθετικά ως προς το βάθος του δοκιμίου. Το πρότυπο βάθος διείσδυσης  $\delta$ , ορίζεται αυθαίρετα ως η απόσταση από την επιφάνεια στην οποία η πυκνότητα των δινορρευμάτων είναι ίση με το 37% αυτής στην επιφάνεια. Δίνεται από τον εξής τύπο [3]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} [m] \quad (1.1)$$

όπου:

1.  $\mu$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (H/m),
2.  $\sigma$  η αγωγιμότητα του (σε S/m) και
3.  $f$  η συχνότητα ελέγχου (σε Hertz).

### 1.3 Έλεγχος εναλλακτών θερμότητας

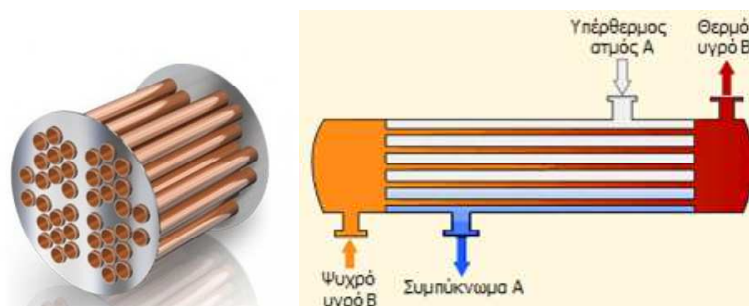
Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση θερμότητας από ένα ρευστό σε κάποιο άλλο (σχήμα 1.4)<sup>4</sup>. Χρησιμοποιούνται σε μια σειρά από βιομηχανίες, όπως η Ηλεκτροπαραγωγική, η Πετρελαϊκή και η Πετροχημική. Εξαιτίας της εξαιρετικής τους θερμικής αγωγιμότητας και του χαμηλού τους κόστους, τα κράματα Μπρούτζου και Χαλκού χρησιμοποιούνται εκτενώς στην κατασκευή σωλήνων εναλλακτών θερμότητας. Ο έλεγχος σωλήνων εναλλακτών θερμότητας γίνεται με τη χρήση εσωτερικών κεφαλών δινορρευμάτων (ID probe ή bobbin coil) [4].

Ένα από τα συνήθη προβλήματα των σωλήνων εναλλακτών θερμότητας είναι η ανάπτυξη ρωγμών κοπώσεως στα σημεία στήριξης τους. Τα στηρίγματα αυτά είναι σιδηρομαγνητικά (σχήμα 1.4)<sup>4</sup>. Η ύπαρξη σιδηρομαγνητικού υλικού εξωτερικά ενός σωλήνα προκαλεί ένδειξη, όταν γίνεται έλεγχος με δινορρεύματα. Η ταυτόχρονη συνύπαρξη ασυνέχειας και πλάκας στήριξης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μικτού σήματος (ασυνέχειας - πλάκας στήριξης), οδηγώντας σε πολλές παρερμηνείες. Προς αποφυγή αυτού του φαινομένου, είναι θεμιτή η επεξεργασία του μικτού σήματος, με στόχο την καταστολή των σημάτων που προέρχονται από τα σημεία στήριξης και την ανάδειξη των ασυνεχειών.

Η μέθοδος των δινορρευμάτων χρησιμοποιείται ευρέως στον έλεγχο σωλήνων εναλλακτών θερμότητας, επειδή είναι ακριβής, γρήγορη και ιδιαίτερος ευαίσθητη. Ακριβώς αυτή η τελευταία ιδιότητα είναι που δημιουργεί κάποια δυσκολία στην ερμηνεία των ενδείξεων καθώς τα δινορρεύματα δεν ανιχνεύουν μόνον ασυνέχειες όπως ρωγμές ή διάβρωση αλλά και μια σειρά από μη σχετικούς παράγοντες όπως την παρουσία σιδηρομαγνητικού υλικού (π.χ. πλακών στήριξης) στο εξωτερικό του υπό έλεγχο σωλήνα ή στραβώματα (dents). Οι σχετικές ενδείξεις διαχωρίζονται από τις μη σχετικές μέσω της φάσης (γωνίας) των λαμβανόμενων σημάτων [5]. Ασυνέχειες όπως η απομείωση πάχους εμφανίζονται συχνά ακριβώς κάτω από τις πλάκες στήριξης, λόγω της ταλάντωσης του σωλήνα, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία ενός σύνθετου σήματος πλάκας στήριξης-ασυνέχειας του οποίου η ερμηνεία είναι δύσκολη έως αδύνατη.

Ο πολυσυχνотικός έλεγχος, που χρησιμοποιείται για την καταστολή των ανεπιθύμητων παραγόντων, είναι απαραίτητος για την ερμηνεία τέτοιων μικτών σημάτων. Η συνηθέστερη μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση της συχνότητας  $f_{90}$  (σχέση 1.2) ως κεντρικής συχνότητας ελέγχου όπου τα σφάλματα απεικονίζονται με φάση 0° έως

<sup>4</sup><http://www.frigohellas.gr/>, <http://www.chem.uoa.gr/>



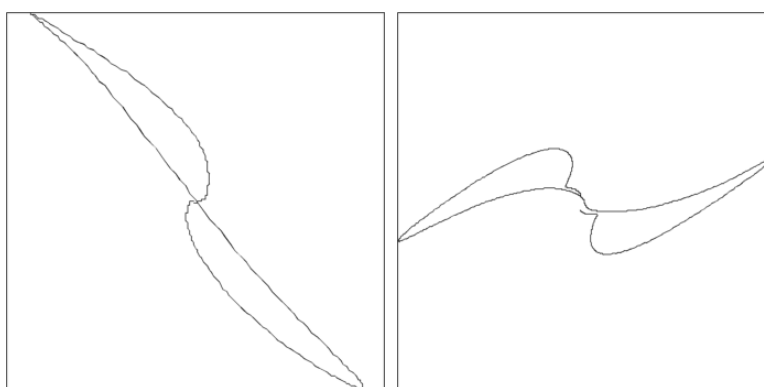
Σχήμα 1.4: Εναλλάκτης θερμότητας με σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης<sup>4</sup>.

$90^\circ$  και το βάθος διείσδυσης  $\delta$  είναι περίπου ίσο με το πάχος του σωλήνα και της  $f_{90/2}$  ή  $f_{90/3}$  της  $\omega$ ς δευτερεύουσας. Οι δύο συχνότητες συνδυάζονται (mixing) με τέτοιο τρόπο ώστε να κατασταλούν οι ανεπιθύμητοι παράγοντες.

$$f_{90} = \frac{516}{\sigma t^2} [kHz], f_{90/n} = \frac{f_{90}}{n} \quad (1.2)$$

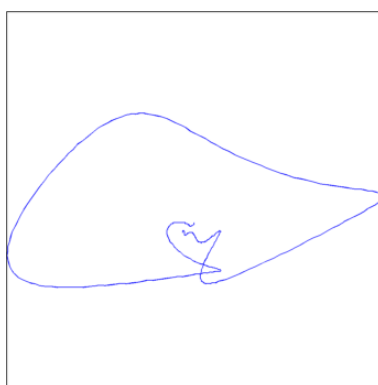
όπου  $\sigma$  η αγωγιμότητα του υλικού σε %IACS (International Annealed Copper Standard) και  $t$  το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα σε mm.

Για τη μίξη σημάτων με στόχο την καταστολή του σήματος σιδηρομαγνητικής πλάκας στήριξης και την ανάδειξη της ασυνέχειας, που μπορεί να υπάρχει από κάτω, έχουν προταθεί δύο κυρίως τρόποι: α) η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, που είναι μέθοδος στο πεδίο του χρόνου [6] και β) η μέθοδος Fourier [7, 8], που είναι μέθοδος στο πεδίο της συχνότητας. Σε αυτή την εργασία προτείνουμε μία εναλλακτική μέθοδο στο πεδίο της συχνότητας, τη μέθοδο των πολυωνύμων Chebyshev.



(α) Σήμα ασυνέχειας.

(β) Σήμα πλάκας στήριξης.



(γ) Σύνθετο σήμα πλάκας στήριξης-ασυνέχειας.

Σχήμα 1.5: Παραδείγματα σημάτων δινορευμάτων από έλεγχο μη σιδηρομαγνητικού σωλήνα με σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης.



## Κεφάλαιο 2

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

### 2.1 Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων είναι μέθοδος στο πεδίο του χρόνου [6].

Ένα σήμα δινορρευμάτων μπορεί να απεικονιστεί ως ένα σύνολο σημείων στο Καρτεσιανό επίπεδο. Άρα, εάν  $\mathbf{S}$  είναι ένα σήμα δινορρευμάτων με  $n$  σημεία:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

και κάθε γραμμή του  $\mathbf{S}$  είναι μία τιμή της μεταβολής της σύνθετης αντίστασης του πηνίου.

Έστω  $\mathbf{S}_1$  ένα σήμα μιας πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_1$  και  $\mathbf{S}_2$  το σήμα της ίδιας πλάκας στη συχνότητα  $f_2$ :

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n \end{bmatrix}, \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Θέλουμε να επεξεργαστούμε τα δύο σήματα έτσι ώστε η αφαίρεσή τους να είναι ίση με μηδέν. Για να επιτευχθεί αυτό, θα χρησιμοποιήσουμε ομοπαράλληλο μετασχηματισμό, δηλαδή θα υποβάλλουμε τα σήματα μας σε μετατόπιση, κλιμάκωση και περιστροφή.

Πρώτα πραγματοποιούμε τη μετατόπιση:

$$x' = x + T_x, y' = y + T_y \quad (2.3)$$

Η 2.3 μπορεί να γραφεί και σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Η δεύτερη διαδικασία είναι η περιστροφή (με κατεύθυνση ανθωρολογιακή):

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta, y' = y \cos \theta + x \sin \theta \quad (2.5)$$

Σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Η τελική διαδικασία είναι η κλιμάκωση:

$$x' = xS_x, y' = yS_y \quad (2.7)$$

Σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Καθώς και οι τρεις μετασχηματισμοί 2.4, 2.6, 2.8 είναι πίνακες  $3 \times 3$  μπορούμε να τους πολλαπλασιάσουμε για να μας δώσουν ένα πίνακα μετασχηματισμού:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} S_x \cos\theta & S_y \sin\theta \\ -S_x \sin\theta & S_y \cos\theta \\ S_x(T_x \cos\theta - T_y \sin\theta) & S_y(T_x \sin\theta + T_y \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Και τελικά προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \mathbf{A} \quad (2.10)$$

Όμως, όπως φαίνεται και από τη (2.2) έχουμε ένα σύνολο σημείων. Για να κάνουμε το σήμα  $S_2$  όμοιο με το  $S_1$  πρέπει να βρούμε τις βέλτιστες παραμέτρους  $T_x, T_y, \theta, S_x, S_y$ . Για να τις βρούμε χρησιμοποιούμε μια μέθοδο εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων.

Θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε δηλαδή τη συνάρτηση σφάλματος:

$$\mathbf{E} = \|\mathbf{S}_2 \mathbf{A} - \mathbf{S}_1\|_2^2 \quad (2.11)$$

Οι παράμετροι που ελαχιστοποιούν τη (2.11) προκύπτουν από την επίλυση ενός συστήματος 5 μη γραμμικών εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial T_x} = 0 \Rightarrow \\ 2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos\theta) + (y_i S_x \sin\theta) - (S_x T_x \cos\theta) + (S_x T_y \sin\theta) \right] [-S_x \cos\theta] \right] \right. \\ \left. + \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin\theta) - (y_i S_y \cos\theta) - (S_y T_x \sin\theta) - (S_y T_y \cos\theta) \right] [-S_y \sin\theta] \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial T_y} = 0 \Rightarrow \\ 2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos\theta) + (y_i S_x \sin\theta) - (S_x T_x \cos\theta) + (S_x T_y \sin\theta) \right] [S_x \sin\theta] \right] \right. \\ \left. + \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin\theta) - (y_i S_y \cos\theta) - (S_y T_x \sin\theta) - (S_y T_y \cos\theta) \right] [-S_y \cos\theta] \right] \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos \theta) + (y_i S_x \sin \theta) - (S_x T_x \cos \theta) + (S_x T_y \sin \theta) \right] \right. \right. \\ \cdot \left. \left[ (x_i S_x \sin \theta) + (y_i S_x \cos \theta) + (S_x T_x \sin \theta) + (S_x T_y \cos \theta) \right] \right. \\ \left. + \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin \theta) - (y_i S_y \cos \theta) - (S_y T_x \sin \theta) - (S_y T_y \cos \theta) \right] \right. \right. \\ \left. \cdot \left[ -(x_i S_y \cos \theta) + (y_i S_y \sin \theta) - (S_y T_x \cos \theta) + (T_y \sin \theta) \right] \right] = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial S_x} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos \theta) + (y_i S_x \sin \theta) - (S_x T_x \cos \theta) + (S_x T_y \sin \theta) \right] \right. \right. \\ \left. \cdot \left[ -(x_i \cos \theta) + (y_i \sin \theta) - (T_x \cos \theta) + (T_y \sin \theta) \right] \right] = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial S_y} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin \theta) - (y_i S_y \cos \theta) - (S_y T_x \sin \theta) - (S_y T_y \cos \theta) \right] \right. \right. \\ \left. \cdot \left[ -(x_i \sin \theta) - (y_i \cos \theta) - (T_x \sin \theta) - (T_y \cos \theta) \right] \right] = 0 \quad (2.16)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποιείται εάν απαλείψουμε τους παράγοντες  $T_x, T_y$ , μετατοπίζοντας τα δύο σήματα με ξεχωριστή ρουτίνα. Πλέον έχουμε ένα σύστημα τριών απλούστερων εξισώσεων:

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos \theta) + (y_i S_x \sin \theta) \right] \left[ (x_i S_x \sin \theta) + (y_i S_x \cos \theta) \right] \right. \right. \\ \left. + \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin \theta) - (y_i S_y \cos \theta) \right] \left[ -(x_i S_y \cos \theta) + (y_i S_y \sin \theta) \right] \right] \right] = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial S_x} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ x'_i - (x_i S_x \cos \theta) + (y_i S_x \sin \theta) \right] \left[ -(x_i \cos \theta) + (y_i \sin \theta) \right] \right] \right] = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial E}{\partial S_y} = 0 \Rightarrow$$

$$2 \sum_{i=1}^n \left[ \left[ \left[ y'_i - (x_i S_y \sin \theta) - (y_i S_y \cos \theta) \right] \left[ -(x_i \sin \theta) - (y_i \cos \theta) \right] \right] \right] = 0 \quad (2.19)$$

Επιλύουμε το σύστημα και αντικαθιστούμε τις βέλτιστες παραμέτρους στον πίνακα μετασχηματισμού  $\mathbf{A}$  (2.9) ο οποίος απαλείφοντας τους παράγοντες  $T_x, T_y$  έχει τη μορφή:

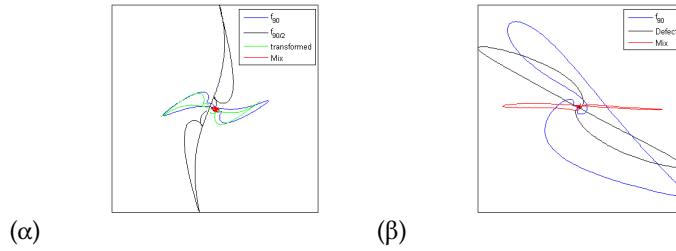
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} S_x \cos \theta & S_y \sin \theta \\ -S_x \sin \theta & S_y \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Άρα, το τελικό αποτέλεσμα είναι:

$$\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2 \mathbf{A} \approx \mathbf{0} \Rightarrow \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 \\ \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_x \cos \theta & S_y \sin \theta \\ -S_x \sin \theta & S_y \cos \theta \end{bmatrix} \approx \mathbf{0} \quad (2.21)$$

Έστω δύο σύνθετα σήματα πλάκας στήριξης-ασυνέχειας  $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$  στις συχνότητες  $f_1, f_2$ . Χρησιμοποιώντας τον πίνακα μετασχηματισμού  $\mathbf{A}$ , εάν  $\mathbf{D}_1$  το σήμα της ασυνέχειας που βρίσκεται κάτω από την πλάκα στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ , θα έχουμε ότι:

$$\mathbf{D}_1 \approx \mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A} \quad (2.22)$$



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σε σήματα: (α) πλάκας στήριξης (2.21), (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια (2.22).

## 2.2 Η μέθοδος Fourier

Η ανάλυση Fourier είναι το πιο διαδεδομένο εργαλείο ανάλυσης σημάτων [9].

Στην ανάλυση Fourier ένα σήμα αναλύεται σε αρμονικές δονήσεις. Τα πλάτη και οι συχνότητες των ημιτόνων διαφόρων συχνοτήτων σχηματίζουν το συχνοτικό φάσμα του σήματος [10].

*Τα σήματα που υπόκεινται σε μετασχηματισμό Fourier πρέπει να είναι περιοδικά.*

Καθώς τα σήματα των δινορρευμάτων είναι κλειστές καμπύλες, μπορούν να θεωρηθούν ως περιοδικές μιγαδικές συναρτήσεις  $u$  του μήκους τόξου της καμπύλης  $l$ , με περίοδο το συνολικό μήκος τόξου  $L$  [7, 8]:

$$u(l) = u(L + l), \quad u(l) = x(l) + y(l)j \quad (2.23)$$

Η περιοδική αυτή συνάρτηση μπορεί να επεκταθεί σε μια σειρά Fourier:

$$u(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi nl/L} \quad (2.24)$$

όπου οι συντελεστές Fourier  $C_n$  ορίζονται ως εξής:

$$C_n = \frac{1}{L} \int_0^L u(l) e^{-j2\pi nl/L} \quad (2.25)$$

Οι (2.24) και (2.25) συνιστούν ένα ζευγάρι μετασχηματισμού Fourier. Με τη χρήση ενός αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT) [11] μπορούμε να υπολογίσουμε τους συντελεστές  $C_n$  και να ανασυνθέσουμε το σήμα μέσω αυτών. Χρησιμοποιούμε μια αποκομμένη μορφή της (2.24):

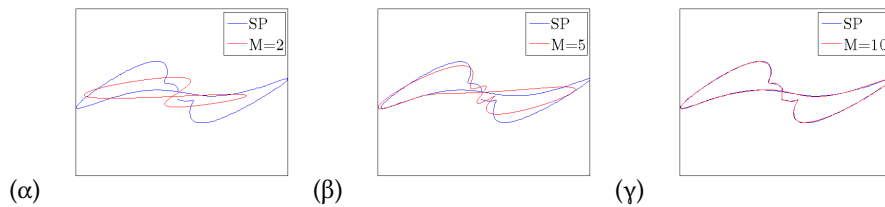
$$u(l) = \sum_{n=-M}^M C_n e^{j2\pi nl/L} \quad (2.26)$$

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται με μπλε χρώμα το σήμα μιας σιδηρομαγνητικής πλάκας στήριξης και με κόκκινο η ανασύνθεση του με τη (2.26).

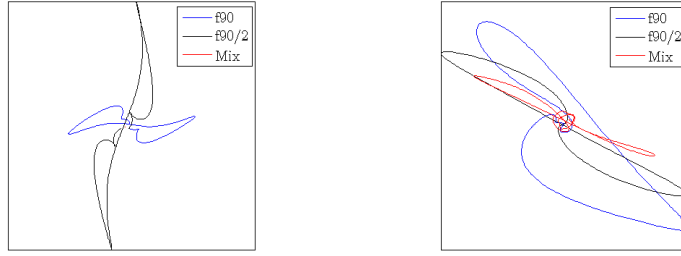
Έστω:

- $C_n(f_1)$  οι συντελεστές Fourier του σύνθετου σήματος ασυνέχειας-πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ ,
- $C_n(f_2)$  οι συντελεστές Fourier του σύνθετου σήματος ασυνέχειας-πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_2$ ,
- $C_n^{SP}(f_1)$  οι συντελεστές Fourier του σήματος της πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ ,
- $C_n^{SP}(f_2)$  οι συντελεστές Fourier του σήματος της πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_2$ ,
- $C_n^D(f_1)$  οι συντελεστές Fourier του σήματος της ασυνέχειας που βρίσκεται κάτω από την πλάκα στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ .

Δεδομένου ότι οι αρχές των αξόνων των σημάτων είναι ίδιες, για τους συντελεστές αυτούς θα πρέπει να ισχύει:



Σχήμα 2.2: Ανασύνθεση σήματος πλάκας στήριξης με αριθμό συντελεστών  $C_n$  ίσο με (α) 5, (β) 11 και (γ) 21.



(α)

(β)

Σχήμα 2.3: Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο Fourier σε σήματα: (α) πλάκας στήριξης, (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια.

$$C_n^D(f_1) \approx C_n(f_2) \frac{C_n^{SP}(f_1)}{C_n^{SP}(f_2)} - C_n(f_2) \quad (2.27)$$

Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές της (2.27) στην (2.26) αποκαλύπτεται το σήμα της ασυνέχειας και καταστέλλεται το σήμα της πλάκας στήριξης (σχήμα 2.3).

### 2.3 Η μέθοδος Chebyshev

Τα πολυώνυμα:

$$T_n(x) = \cos [n \cos^{-1}(x)], \quad x \in [-1, 1], \quad n \in \mathbb{N}_0 \quad (2.28)$$

ονομάζονται πολυώνυμα Chebyshev πρώτου είδους [9, 12]. Θεωρούμε ότι τα σήματα των δινορρευμάτων είναι μιγαδικές συναρτήσεις  $z$  οι οποίες μπορούν να προσεγγιστούν από μία αποκομμένη σειρά Chebyshev :

$$z(x) = \sum_{k=0}^{m-1} [a_k T_k(x)] - \frac{a_0}{2} \quad (2.29)$$

Παίρνουμε σαν σημεία παρεμβολής τις  $N$  ρίζες του  $T_n$  στο διάστημα  $[-1, 1]$ :

$$x = \cos \left[ \left( k - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{N} \right], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2.30)$$

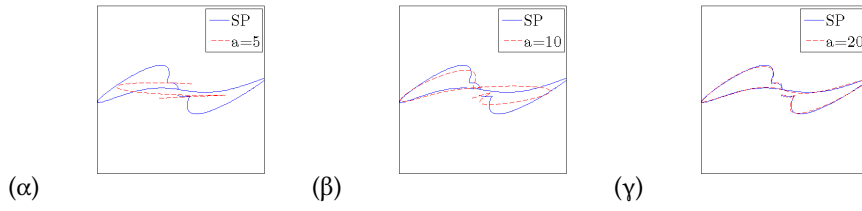
Οι  $m \ll N$  συντελεστές  $a_j$  υπολογίζονται από τη σχέση:

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N [f(x_k) T_j(x_k)] \Rightarrow$$

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N f \left[ \cos \left[ \left( k - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{N} \right] \right] \cos \left[ \left( k - \frac{1}{2} \right) \frac{j\pi}{N} \right], \quad j = 0, 1, \dots, m-1 \quad (2.31)$$

Άρα, βρίσκοντας τους συντελεστές  $a_k$  ενός σήματος μέσω της (2.31) και αντικαθιστώντας τους στη (2.29) είναι δυνατόν να το ανασυνθέσουμε (σχήμα 2.4).

Έστω:



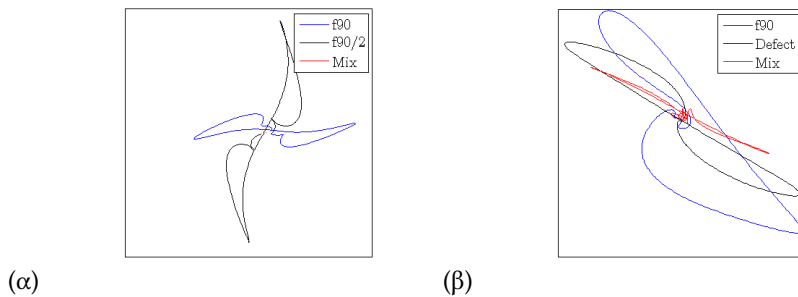
Σχήμα 2.4: Ανασύνθεση σήματος πλάκας στήριξης με αριθμό συντελεστών  $a_k$ : (α) 5, (β) 10, (γ) 20.

- $a_k(f_1)$  οι συντελεστές Chebyshev του σύνθετου σήματος ασυνέχειας-πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ ,
- $a_k(f_2)$  οι συντελεστές Chebyshev του σύνθετου σήματος ασυνέχειας-πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_2$ ,
- $a_k^{SP}(f_1)$  οι συντελεστές Chebyshev του σήματος της πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ ,
- $a_k^{SP}(f_2)$  οι συντελεστές Chebyshev του σήματος της πλάκας στήριξης στη συχνότητα  $f_2$ ,
- $a_k^D(f_1)$  οι συντελεστές Chebyshev του σήματος της ασυνέχειας που βρίσκεται κάτω από την πλάκα στήριξης στη συχνότητα  $f_1$ .

Δεδομένου ότι οι αρχές των αξόνων των σημάτων είναι ίδιες, για τους συντελεστές αυτούς θα πρέπει να ισχύει:

$$a_k^D(f_1) \approx a_k(f_2) \frac{a_k^{SP}(f_1)}{a_k^{SP}(f_2)} - a_k(f_1) \quad (2.32)$$

Αντικαθιστώντας τους συντελεστές της (2.32) στη (2.29) αποκαλύπτεται το σήμα της ασυνέχειας και καταστέλλεται το σήμα της πλάκας στήριξης (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα μίξης με τη μέθοδο Chebyshev σημάτων: (α) πλάκας στήριξης, (β) πλάκας στήριξης με ασυνέχεια.

Μέρος II

**ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΙ  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**



## Κεφάλαιο 3

# ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 3.1 Σκοπός

Σκοπός του πρώτου πειράματος είναι η διερεύνηση της χρήσης της μεθόδου μίξης Chebyshev στη μίξη σύνθετων σημάτων σιδηρομαγνητικής πλάκας στήριξης - ασυνέχειας και η σύγκριση της με τις υπάρχουσες μεθόδους.

### 3.2 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη συσκευή δινορρευμάτων MS 5800 Multiscan της Olympus NDT, διαφορική εσωτερική κεφαλή με κεντρική συχνότητα 30 kHz, ένα δοκίμιο βαθμονόμησης κατά ASME V [1] και σωλήνες που περιέχουν ασυνέχειες.

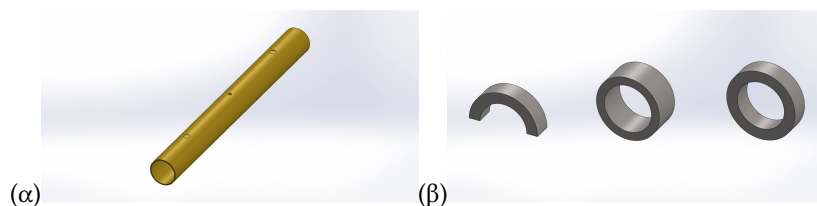
Όλοι οι σωλήνες είναι από το ίδιο υλικό (Admiralty Brass) και έχουν εξωτερική διάμετρο 23 mm και πάχος τοιχώματος 1 mm. Άρα, από την (1.2) προκύπτει ότι η  $f_{90}$  είναι 19 kHz. Για τη μίξη χρησιμοποιήθηκαν τα διαφορικά σήματα των συχνοτήτων  $f_{90}$  και  $f_{90/2}$ .

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν *τρία είδη ασυνεχειών*:

1. Μια ρηχή εξωτερική οπή επίπεδου πυθμένα (E.O.Π.Ε.Π.-FBH) με ονομαστικό βάθος 0.25 mm και διάμετρο 6 mm.
2. Μια βαθιά εξωτερική οπή επίπεδου πυθμένα (E.O.Π.Ε.Π.-FBH) με ονομαστικό βάθος 0.5 mm και διάμετρο 6 mm.
3. Μια οπή διαμέτρου 3 mm.

Τα τρία είδη ασυνεχειών απεικονίζονται σε ένα σωλήνα χάριν απλούστευσης (σχήμα 3.1(α)).

Για την προσομοίωση των σιδηρομαγνητικών πλακών χρησιμοποιήθηκαν *τρία σιδηρομαγνητικά δαχτυλίδια* (σχήμα 3.1(β)):



Σχήμα 3.1: (α) Σωλήνας που περιέχει και τα τρία είδη σφαλμάτων. (β) Τα τρία σιδηρομαγνητικά δαχτυλίδια ( $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ ,  $\Delta 3$ ).

1. Ένα μισό ( $\Delta 1$ ).
2. Ένα μικρότερου μήκους ( $\Delta 2$ ).
3. Ένα μεγαλύτερου μήκους ( $\Delta 3$ ).

Τα δαχτυλίδια τοποθετήθηκαν πάνω και δίπλα στην ασυνέχεια. Χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά και τα τρία ως δαχτυλίδια αναφοράς για τη μίξη. Στον τίτλο του κάθε αποτελέσματος αναγράφεται το ποιο από αυτά χρησιμοποιήθηκε για τη μίξη μέσα σε παρένθεση.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου επεξεργάστηκαν στο MATLAB. Να σημειωθεί ότι το Multiview, το συνοδευτικό λογισμικό του βιομηχανικού οργάνου, δεν εξάγει τα αποτελέσματα της μίξης του και ότι τα σήματα που εξάγει *δεν είναι βαθμονομημένα*. Για τη μίξη Chebyshev χρησιμοποιήθηκε επιπλέον η σουίτα Chebfun [13] για MATLAB. Για τις μίξεις Chebyshev και Fourier ο αριθμός των συντελεστών είναι ίσος με 35.

### 3.3 Μεθοδολογία στατιστικής επεξεργασίας αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των σημάτων γίνεται ως προς τη *μορφή*, τη *γωνία* και το *πλάτος*, αφού η ανάλυση ενός σήματος δινορρευσμάτων περιλαμβάνει και τα τρία αυτά στοιχεία.

Για να συγκρίνουμε τη *μορφή* των σημάτων τα απεικονίζουμε. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται το αρχικό μικτό σήμα ασυνέχειας-πλάκας στήριξης, με μαύρο το σήμα της ασυνέχειας και με κόκκινο τα σήματα των μίξεων.

Για να συγκρίνουμε τα *πλάτη* τους χρησιμοποιούμε το σχετικό σφάλμα:

$$e_w = \left| \frac{w - w^*}{w} \right|$$

όπου  $w$  το πλάτος του σήματος της ασυνέχειας και  $w^*$  το πλάτος του σήματος της αντίστοιχης μίξης.

Για να συγκρίνουμε τη *φάση* τους χρησιμοποιούμε το απόλυτο σφάλμα:

$$e_{ph} = |p - p^*|$$

όπου  $p$  η φάση του σήματος της ασυνέχειας και  $p^*$  η φάση του σήματος της αντίστοιχης μίξης, σε μοίρες.

Το πλάτος και η φάση του κάθε σήματος θεωρούνται ίσα με της ευθείας που ενώνει τα άκρα του κάθε σήματος. Η ευθεία αυτή απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα με μπλε χρώμα, σε όλα τα σήματα εκτός των μικτών. Οι μέσοι όροι των σφαλμάτων προκύπτουν ως εξής [14]:

$$\bar{e}_w = \frac{\sum_{i=1}^N e_w(i)}{N}$$

$$\bar{e}_{ph} = \frac{\sum_{i=1}^N e_{ph}(i)}{N}$$

όπου  $N$  ο αριθμός των σημάτων. Η μέση τετραγωνική απόκλιση των σφαλμάτων προκύπτει ως εξής:

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\bar{e}_w - e_w(i)|^2}{N-1}}$$

$$s_{ph} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |\bar{e}_{ph} - e_{ph}(i)|^2}{N-1}}$$

Στο τέλος κάθε ενότητας αναφέρονται σε πίνακα ο μέσος όρος και η απόκλιση των σφαλμάτων κάθε μίξης. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε μίξης συνολικά.

Επίσης, στο κεφάλαιο 5, για να συγκρίνουμε τις μίξεις, βάζουμε ένα συγκεκριμένο όριο στο μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα πλάτους  $e_w$  και αποτυπώνουμε σε διάγραμμα το πόσα σήματα ανιχνεύει η κάθε μέθοδος μίξης ανά μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα γωνίας  $e_{ph}$ . Ο αριθμός των σφαλμάτων κάτω από ένα όριο ( $NoE$ -Number of Errors) προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{εάν } e_w \leq max_1 \text{ και } e_{ph} \leq max_2 \\ \text{τότε } A(i) = 1 \\ \text{εάν } e_w > max_1 \text{ ή } e_{ph} > max_2 \\ \text{τότε } A(i) = 0 \end{aligned}$$

$$NoE(e_{ph}, e_w) = \frac{\sum_{i=1}^N A(i)}{N} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο, για να συγκρίνουμε την πιθανότητα ανίχνευσης σφάλματος της κάθε μίξης βάζουμε ένα συγκεκριμένο όριο στο ελάχιστο πλάτος  $w$  και δύο όρια στην φάση  $p$ . Η πιθανότητα ανίχνευσης ( $PoD$ -Probability of Detection) προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{εάν } w \geq min(w) \text{ και } p \geq min(p) \text{ και } p \leq max(p) \\ \text{τότε } B(i) = 1 \\ \text{εάν } w < min(w) \text{ ή } p < min(p) \text{ ή } p > max(p) \\ \text{τότε } B(i) = 0 \end{aligned}$$

$$PoD(p, w) = \frac{\sum_{i=1}^N B(i)}{N} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 20

Τα αποτελέσματα της (3.2) αποτυπώνονται σε δύο είδους διαγράμματα: ως προς τη φάση  $p$  και ως προς το πλάτος  $w$ . Για να είναι εφικτή αυτή η αποτύπωση είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση των σημάτων, που την επιτυγχάνουμε περιστρέφοντας όλα τα σήματα έτσι ώστε το σήμα της οπής να έχει φάση ίση με  $40^\circ$ .

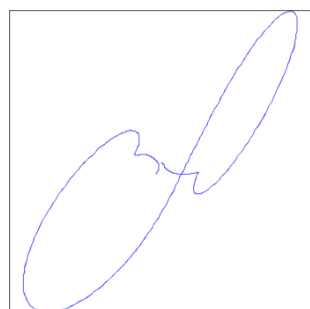
Να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων και στη γενική διάρθρωση του πειράματος δεν ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο MIL-HDBK-1823A [15] και σε ανάλογα συγγράμματα [16], άρα δεν μπορούν να διεξαχθούν και τα ανάλογα συμπεράσματα με αντίστοιχη βεβαιότητα από τις καμπύλες PoD. Παρά ταύτα, μια πρώτη εξαγωγή συμπερασμάτων είναι εφικτή.

## Κεφάλαιο 4

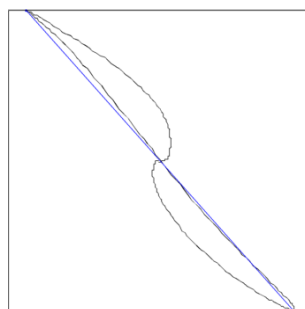
# ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Αποτελέσματα πειράματος με δαχτυλίδι αναφοράς μικρότερου μήκους

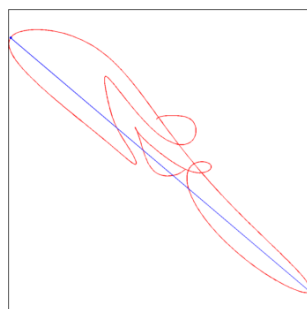
#### 4.1.1 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)



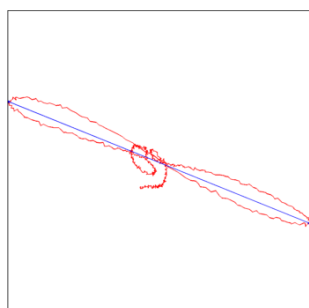
(α') Μικτό Σήμα.



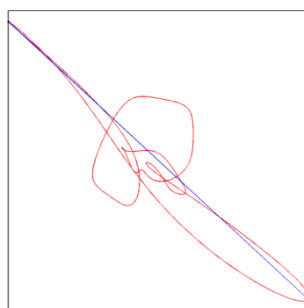
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



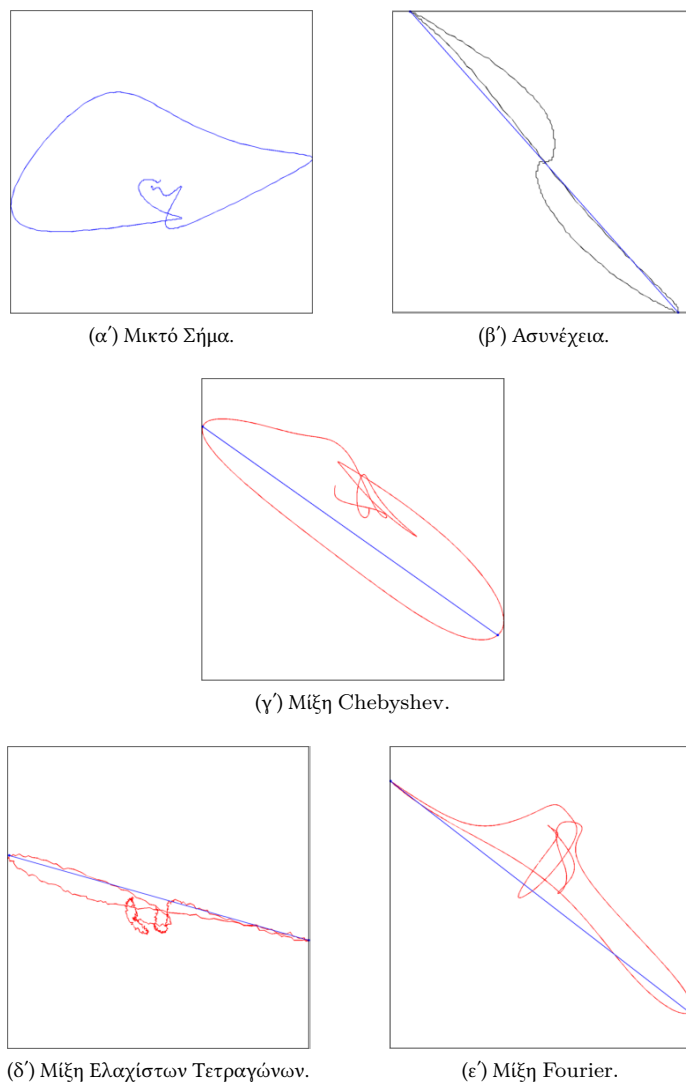
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.1: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.143119	22.0005°	0.441912	26.4773°
Μίξη Fourier	0.164469	42.7392°	0.358657	5.73859°
Μίξη Chebyshev	0.139768	40.217°	0.454979	8.26077°

Πίνακας 4.1: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.2 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)



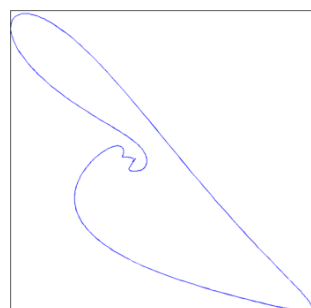
Σχήμα 4.2: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.128359	15.7872°	0.499467	32.6906°
Μίξη Fourier	0.12865	37.7021°	0.498332	10.7757°
Μίξη Chebyshev	0.151118	35.272°	0.410721	13.2057°

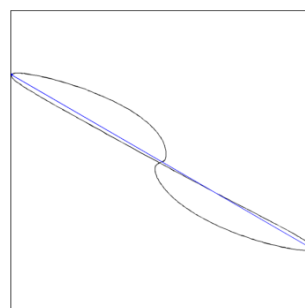
Πίνακας 4.2: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).



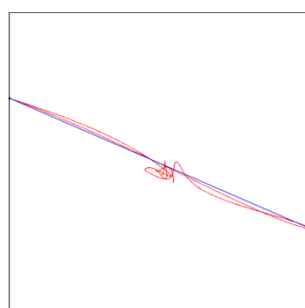
4.1.3 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)



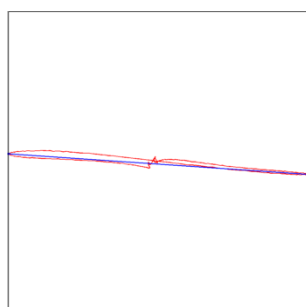
(α') Μικτό Σήμα.



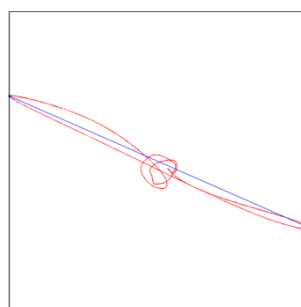
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



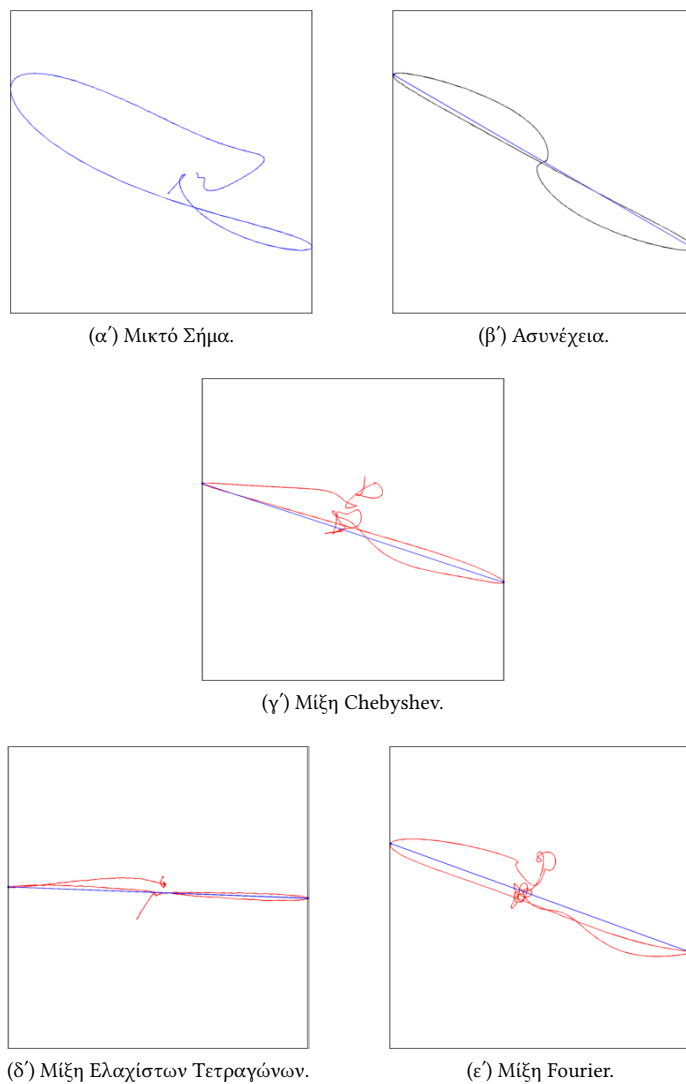
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.3: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.741552	3.88973°	0.325221	26.0815°
Μίξη Fourier	0.767674	23.672°	0.301452	6.29924°
Μίξη Chebyshev	0.790455	23.3693°	0.280722	6.60192°

Πίνακας 4.3: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

4.1.4 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

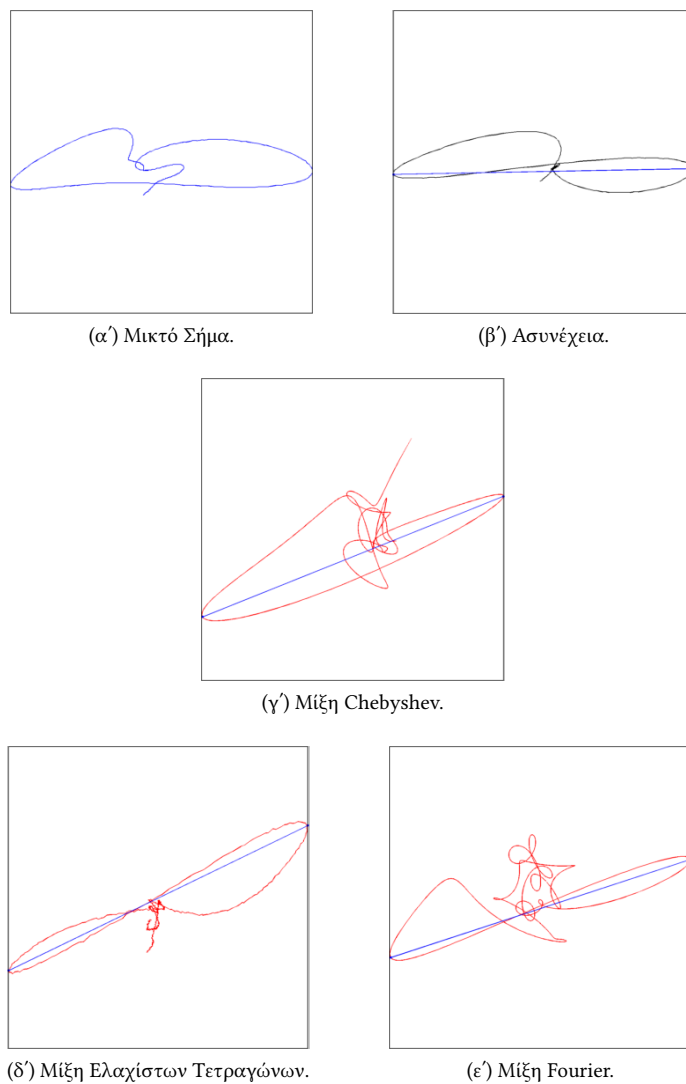


Σχήμα 4.4: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ.2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.593409	2.14554°	0.460025	27.8257°
Μίξη Fourier	0.577528	19.8632°	0.474476	10.108°
Μίξη Chebyshev	0.647288	18.108°	0.410998	11.8632°

Πίνακας 4.4: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.5 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2)

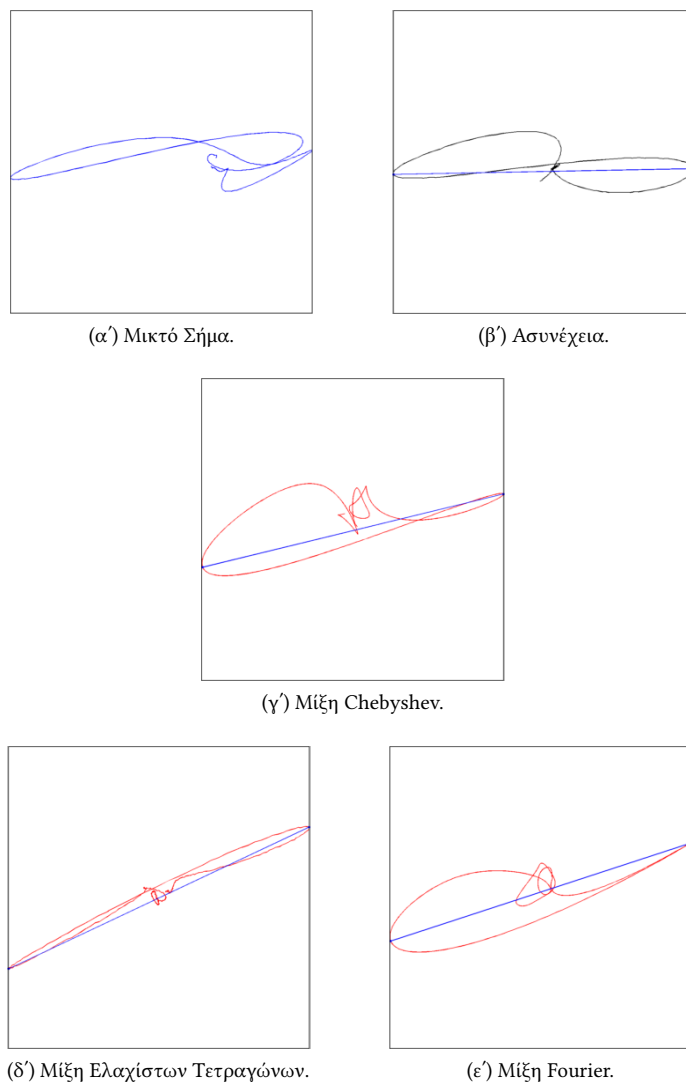


Σχήμα 4.5: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.246653	-25.6978°	0.488361	24.6281°
Μίξη Fourier	0.23705	-18.108°	0.50828	17.0383°
Μίξη Chebyshev	0.211241	-21.8273°	0.561816	20.7576°

Πίνακας 4.5: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2).

4.1.6 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2)

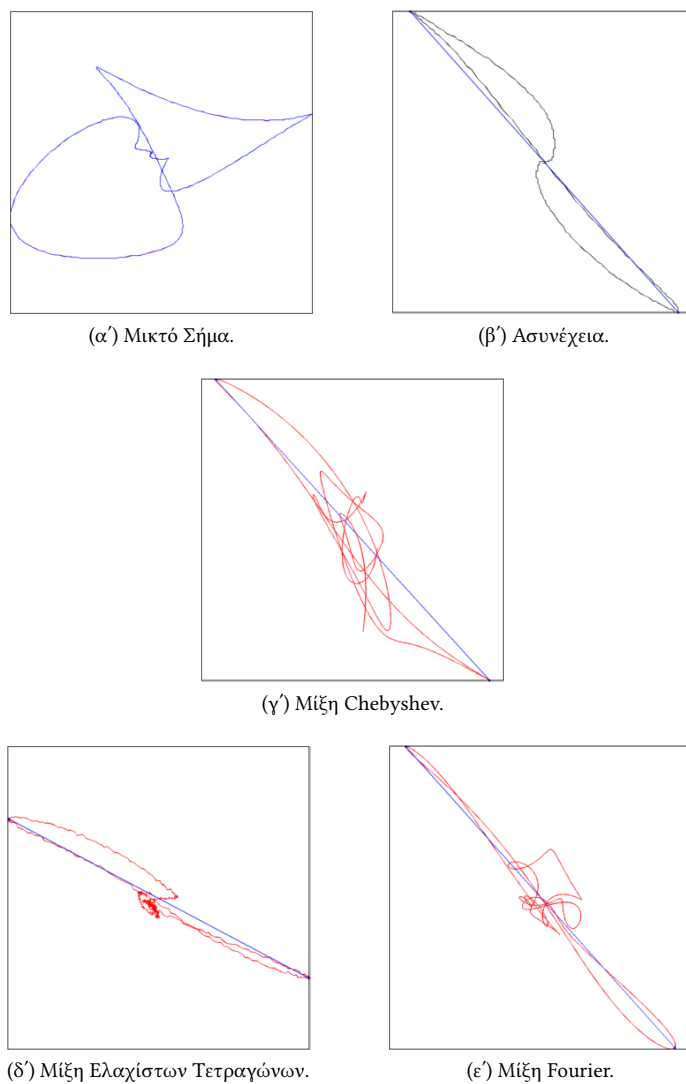


Σχήμα 4.6: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.380654	-25.1784°	0.210398	24.1087°
Μίξη Fourier	0.354163	-18.0611°	0.265349	16.9914°
Μίξη Chebyshev	0.344174	-13.7027°	0.286071	12.633°

Πίνακας 4.6: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ.2).

4.1.7 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

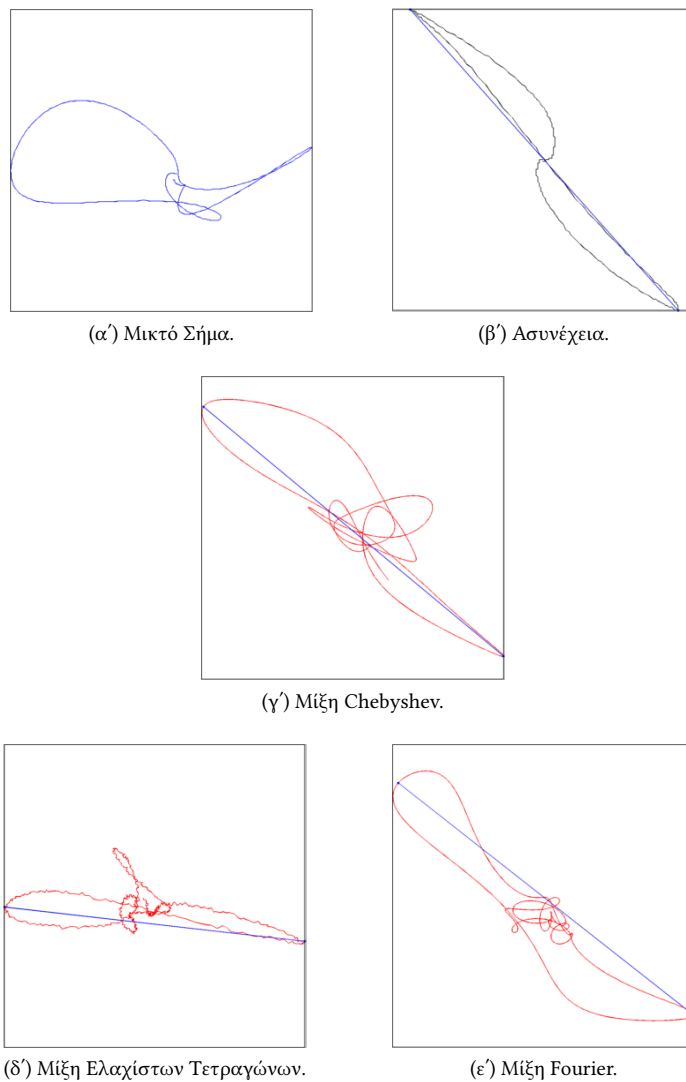


Σχήμα 4.7: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.152704	27.7921°	0.404534	20.6856°
Μίξη Fourier	0.153788	48.1285°	0.400309	0.349299°
Μίξη Chebyshev	0.171694	47.7645°	0.330485	0.713309°

Πίνακας 4.7: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.8 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

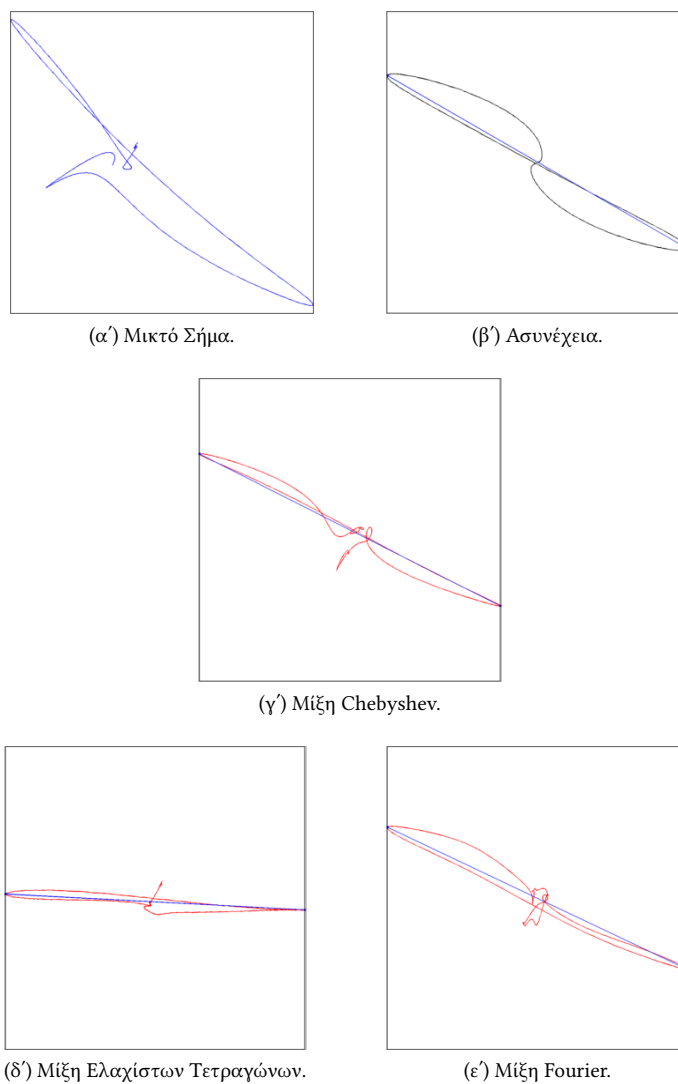


Σχήμα 4.8: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.11454	6.47972°	0.553356	41.9981°
Μίξη Fourier	0.127252	38.1166°	0.503784	10.3612°
Μίξη Chebyshev	0.136126	39.6561°	0.469182	8.82169°

Πίνακας 4.8: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.9 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

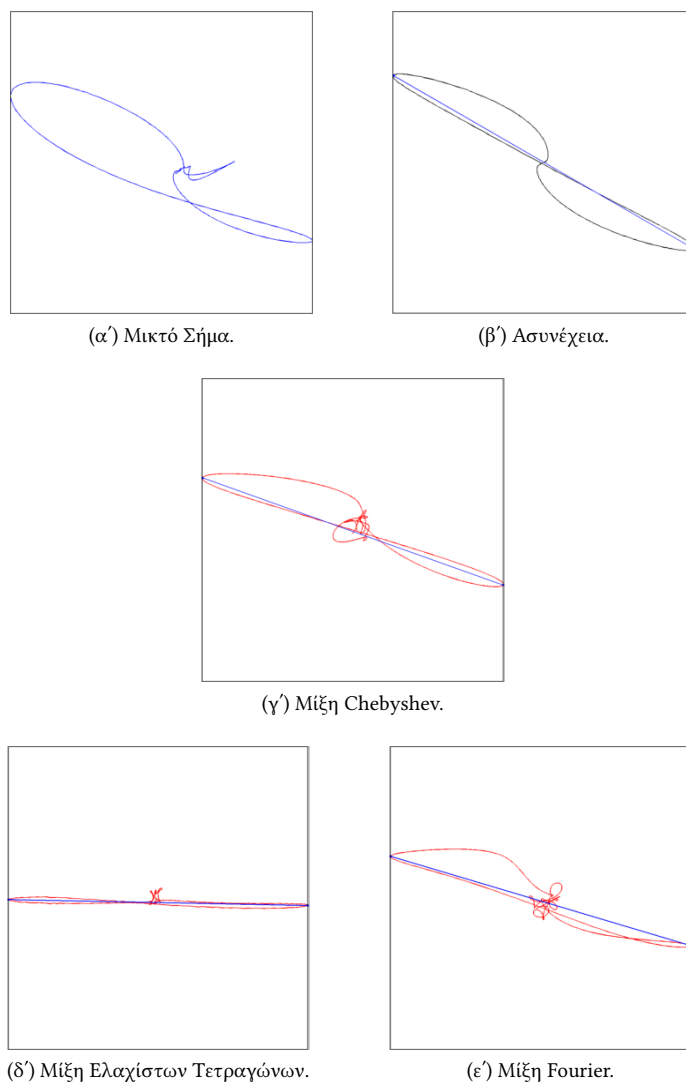


Σχήμα 4.9: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.728696	2.96627°	0.33692	27.0049°
Μίξη Fourier	0.752375	25.2458°	0.315373	4.72545°
Μίξη Chebyshev	0.720743	26.6781°	0.344157	3.29314°

Πίνακας 4.9: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.10 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2)



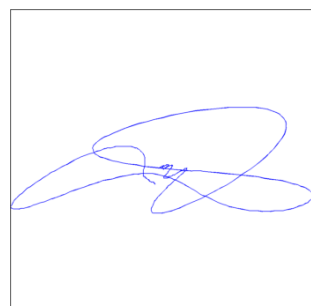
Σχήμα 4.10: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.702641	1.11304°	0.360629	28.8582°
Μίξη Fourier	0.669382	16.4942°	0.390893	13.4771°
Μίξη Chebyshev	0.685817	19.4916°	0.375938	10.4796°

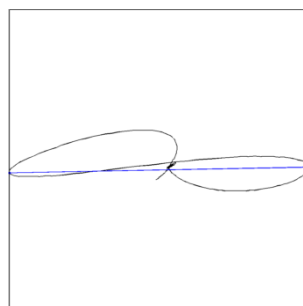
Πίνακας 4.10: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2).



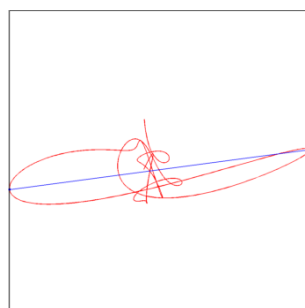
4.1.11 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 2)



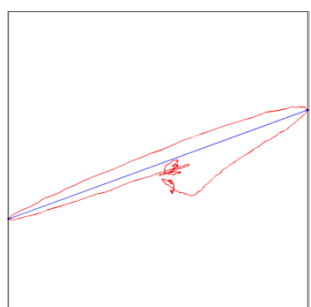
(α') Μικτό Σήμα.



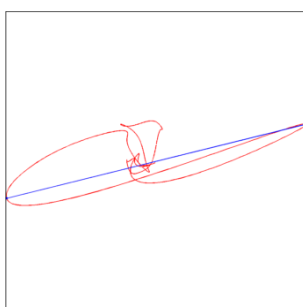
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



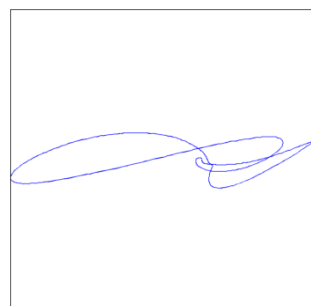
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.11: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 2).

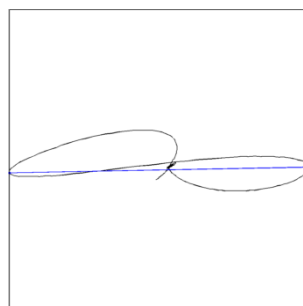
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.299821	-19.7885°	0.378074	18.7188°
Μίξη Fourier	0.260613	-13.8275°	0.459404	12.7578°
Μίξη Chebyshev	0.273761	-7.52541°	0.432131	6.4557°

Πίνακας 4.11: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 2).

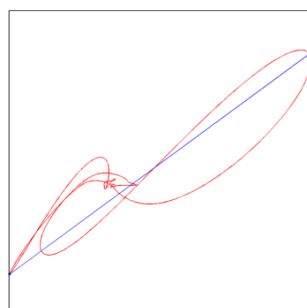
4.1.12 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2)



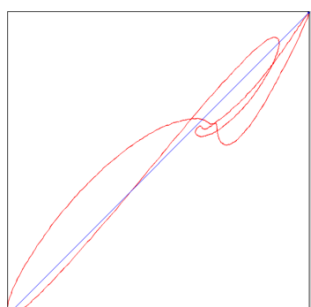
(α') Μικτό Σήμα.



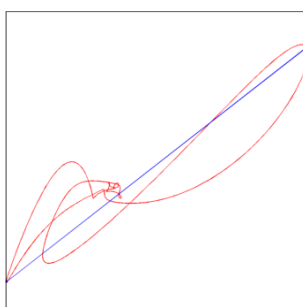
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



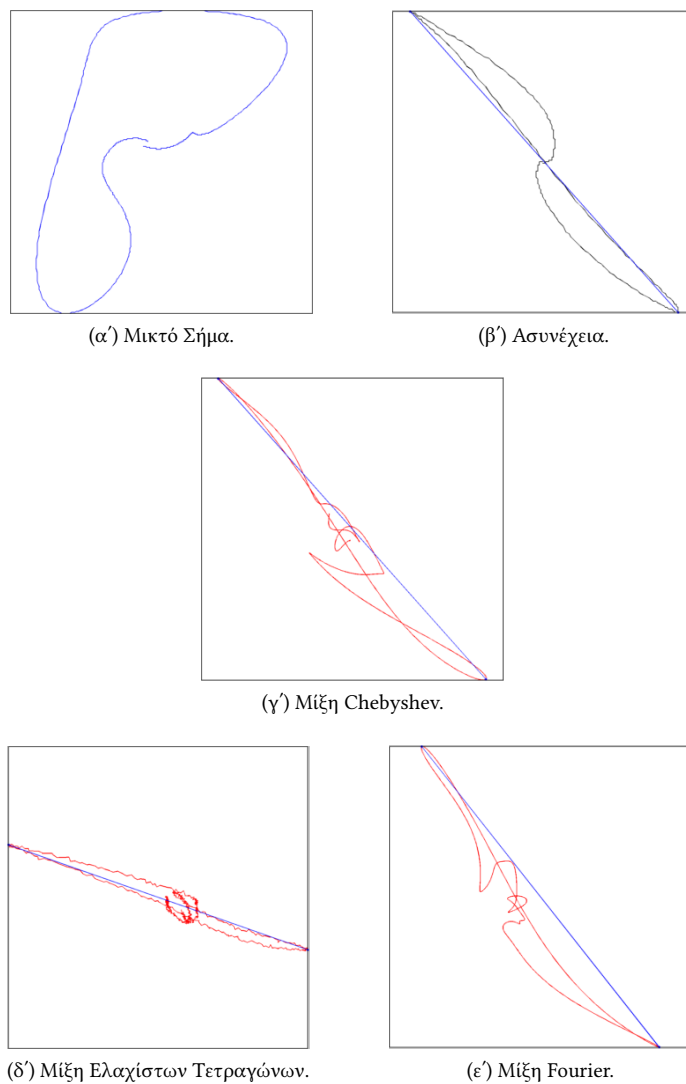
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.12: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.667347	-45.0464°	0.384296	43.9767°
Μίξη Fourier	0.562608	-37.8996°	0.167033	36.8299°
Μίξη Chebyshev	0.5692	-36.2562°	0.180707	35.1865°

Πίνακας 4.12: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).

4.1.13 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

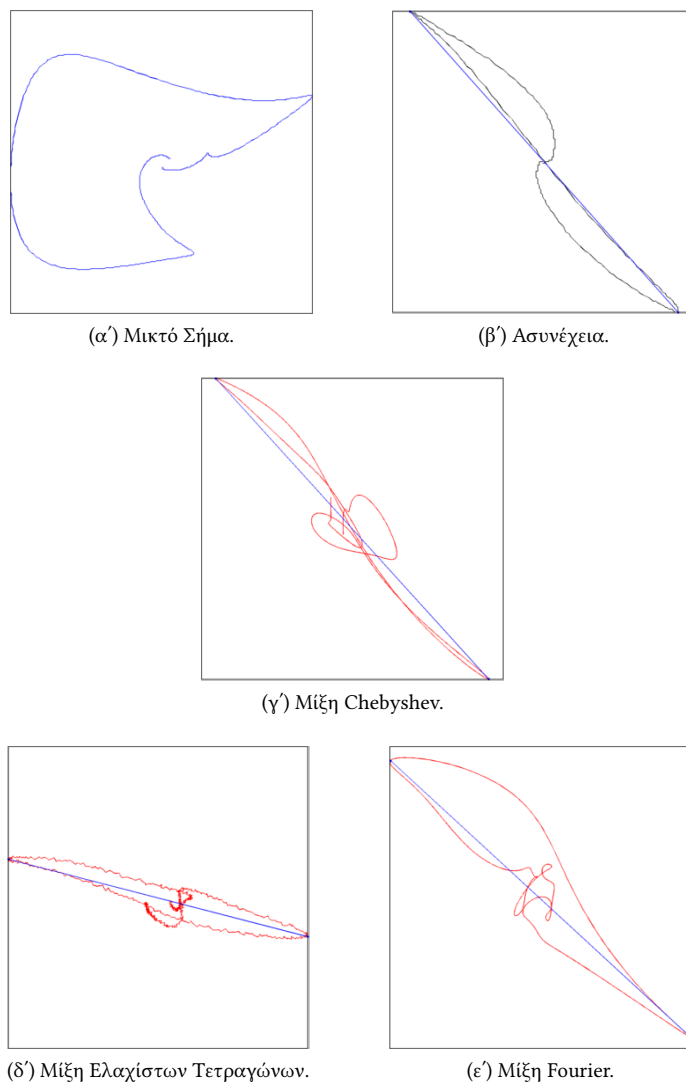


Σχήμα 4.13: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$\epsilon_w$	$\epsilon_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.130575	19.2097°	0.490825	29.2681°
Μίξη Fourier	0.152925	51.7649°	0.403674	3.28715°
Μίξη Chebyshev	0.166195	48.3135°	0.351925	0.164256°

Πίνακας 4.13: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.14 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

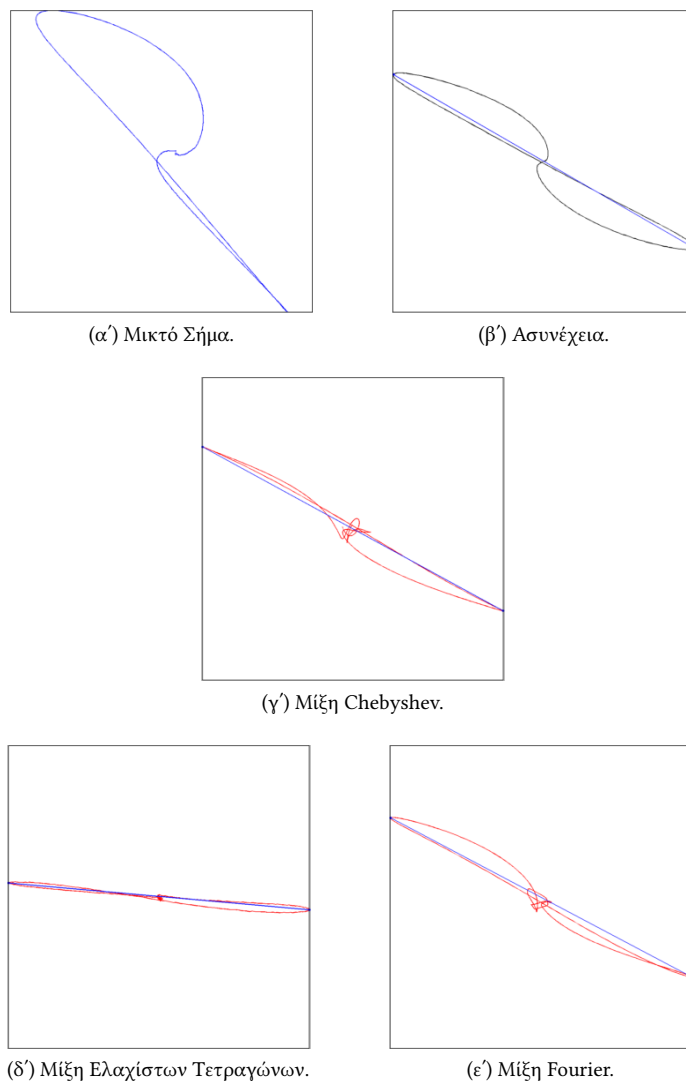


Σχήμα 4.14: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$\epsilon_w$	$\epsilon_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.12293	14.4103°	0.520639	34.0675°
Μίξη Fourier	0.147484	42.6089°	0.424889	5.86884°
Μίξη Chebyshev	0.173394	47.8493°	0.323856	0.628463°

Πίνακας 4.14: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.15 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2)

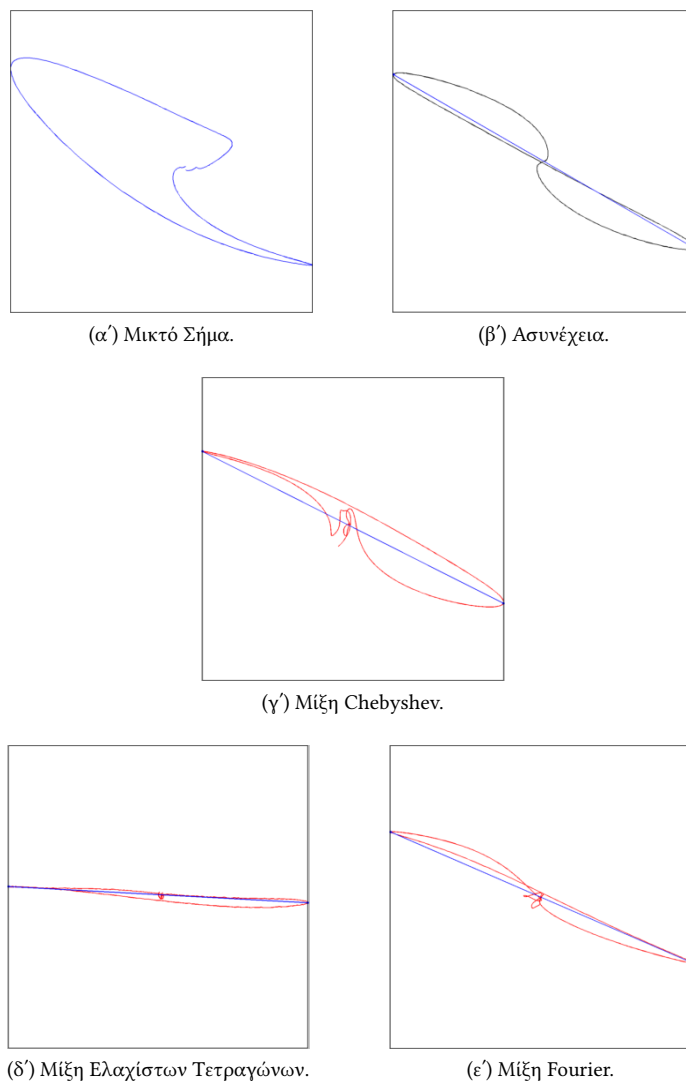


Σχήμα 4.15: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.737658	5.07425°	0.328765	24.897°
Μίξη Fourier	0.755174	27.721°	0.312826	2.25024°
Μίξη Chebyshev	0.784231	28.4711°	0.286386	1.50008°

Πίνακας 4.15: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 2).

4.1.16 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2)

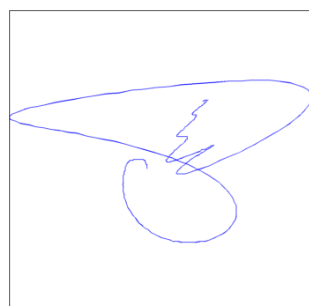


Σχήμα 4.16: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2).

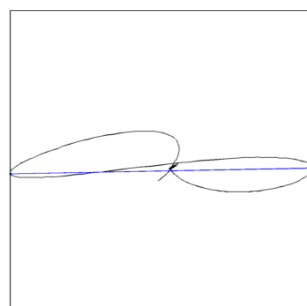
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.706583	3.07123°	0.357042	26.9°
Μίξη Fourier	0.711682	23.3498°	0.352402	6.62138°
Μίξη Chebyshev	0.698023	26.6665°	0.364831	3.30469°

Πίνακας 4.16: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 2).

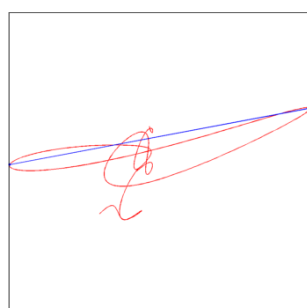
4.1.17 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2)



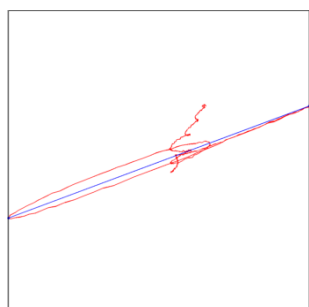
(α') Μικτό Σήμα.



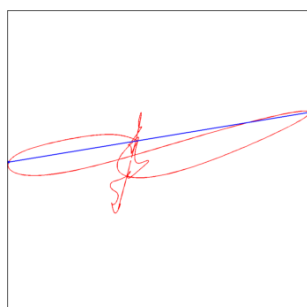
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



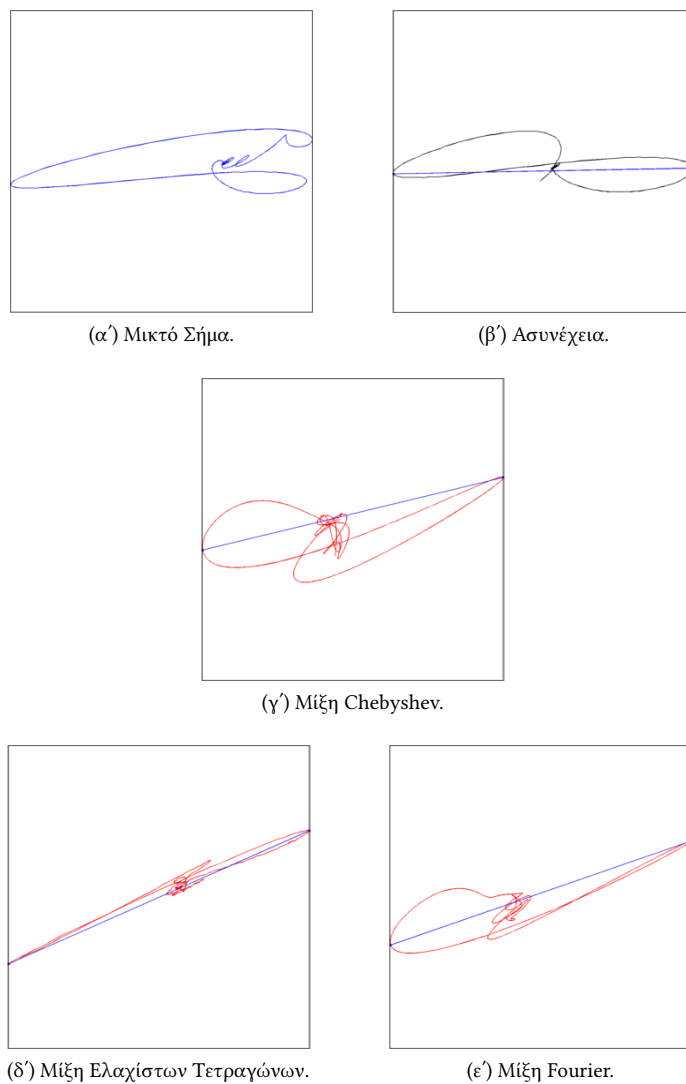
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.17: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.336549	-20.3536°	0.301888	19.2839°
Μίξη Fourier	0.292024	-9.35343°	0.394248	8.28371°
Μίξη Chebyshev	0.284996	-10.6312°	0.408825	9.5615°

Πίνακας 4.17: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 2).

4.1.18 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2)



Σχήμα 4.18: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.398875	-23.778°	0.172604	22.7083°
Μίξη Fourier	0.3299	-18.9824°	0.315679	17.9126°
Μίξη Chebyshev	0.339343	-13.5376°	0.296091	12.4679°

Πίνακας 4.18: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 2).



## 4.1.19 Συνολικά Αποτελέσματα

Σήμα	$\bar{e}_w$	$\bar{e}_{ph}$	$s_w$	$s_{ph}$
Μίξη Ελ. Τετ.	38.97%	27.79°	10.39%	6.86°
Μίξη Fourier	38.04%	10.54°	9.17%	8.35°
Μίξη Chebyshev	36.50%	9.22°	8.75%	8.50°

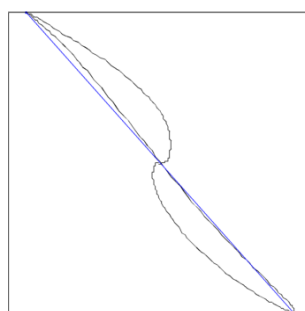
Πίνακας 4.19: Σφάλματα με δαχτυλίδι αναφοράς το Δ2.

## 4.2 Αποτελέσματα πειράματος με δαχτυλίδι αναφοράς μεγαλύτερου μήκους

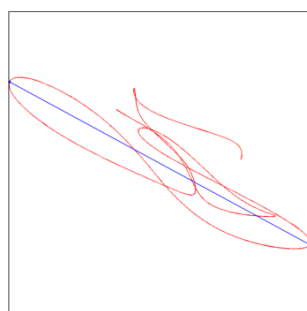
### 4.2.1 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 3$ )



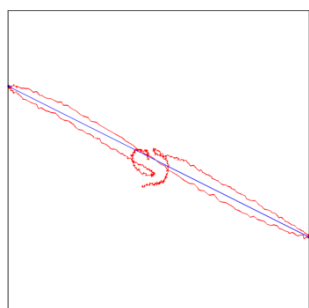
(α') Μικτό Σήμα.



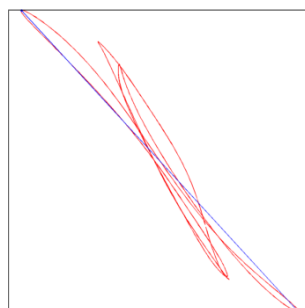
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



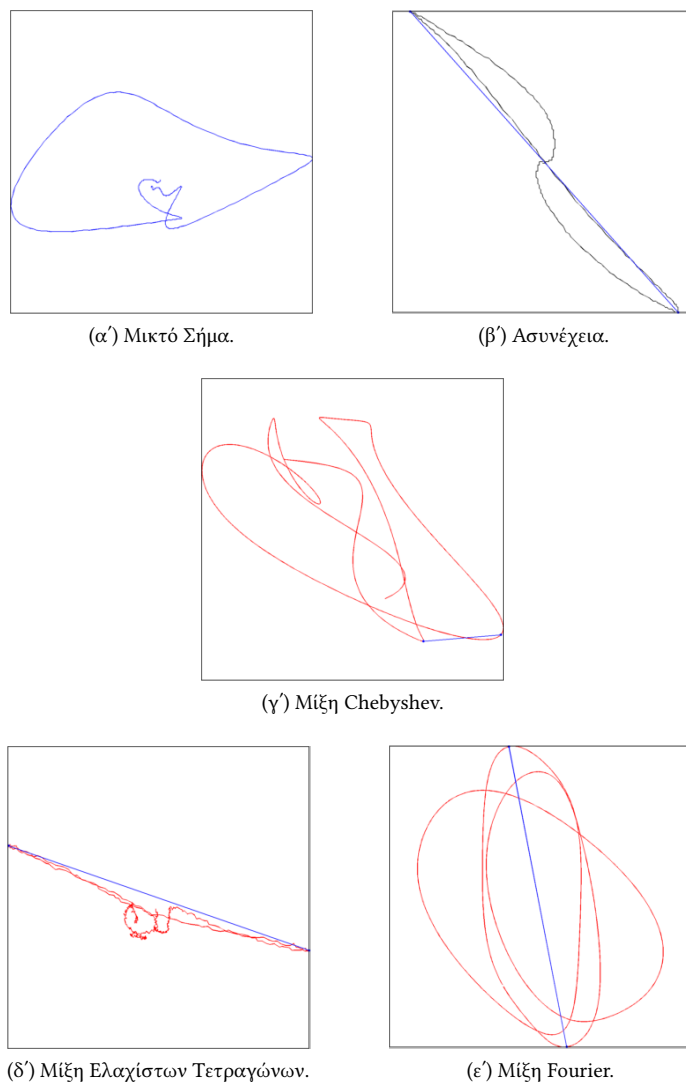
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.19: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 3$ ).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.158537	26.6455°	0.381791	21.8323°
Μίξη Fourier	0.365639	47.4902°	0.425799	0.987609°
Μίξη Chebyshev	0.14693	28.3947°	0.427049	20.0831°

Πίνακας 4.20: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 3).

4.2.2 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

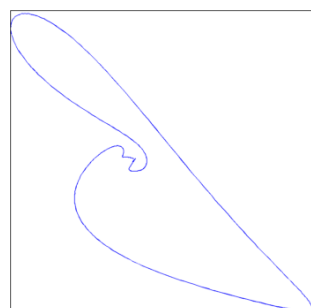


Σχήμα 4.20: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

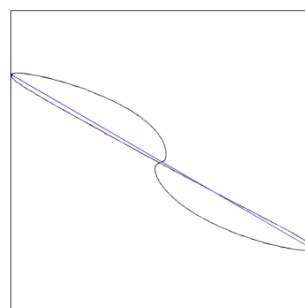
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.134338	19.1833°	0.476154	29.2945°
Μίξη Fourier	0.225053	79.1306°	0.122412	30.6529°
Μίξη Chebyshev	0.0236374	-4.81288°	0.907827	53.2907°

Πίνακας 4.21: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

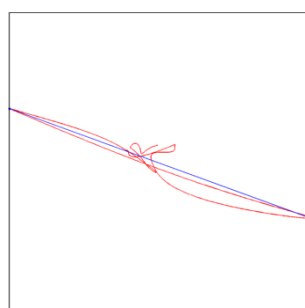
4.2.3 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)



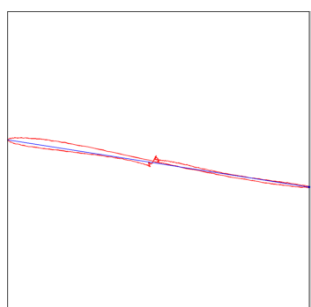
(α') Μικτό Σήμα.



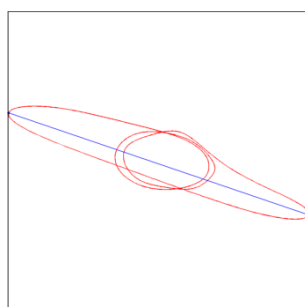
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



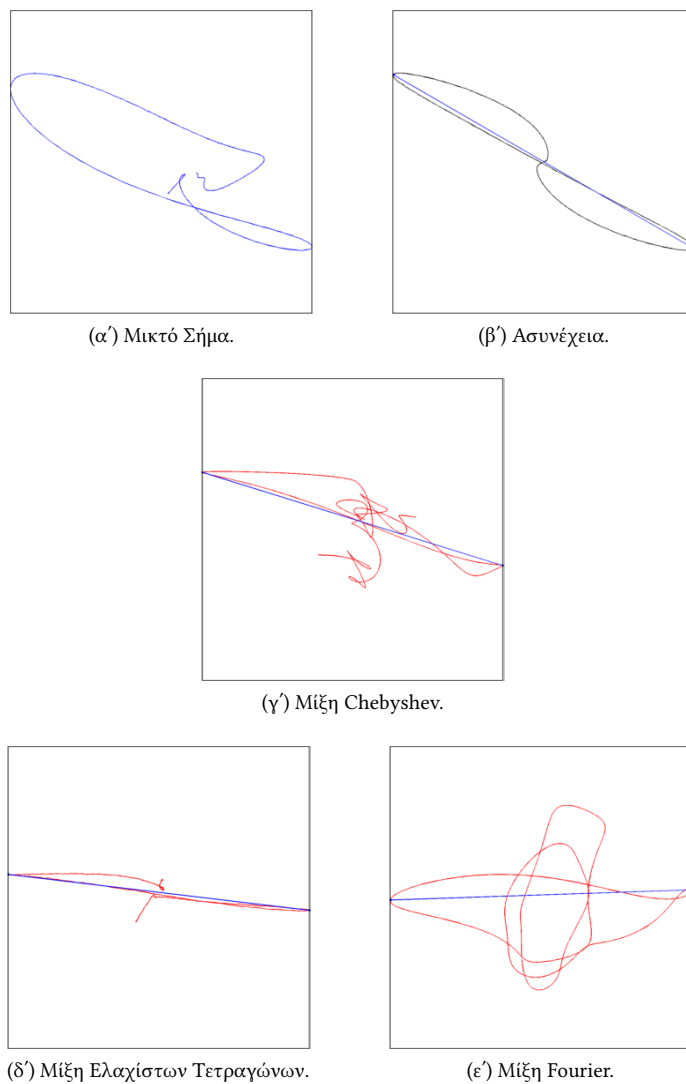
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.21: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.743866	8.9189°	0.323116	21.0523°
Μίξη Fourier	0.975506	18.704°	0.112334	11.2672°
Μίξη Chebyshev	0.686633	19.8877°	0.375196	10.0835°

Πίνακας 4.22: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

4.2.4 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

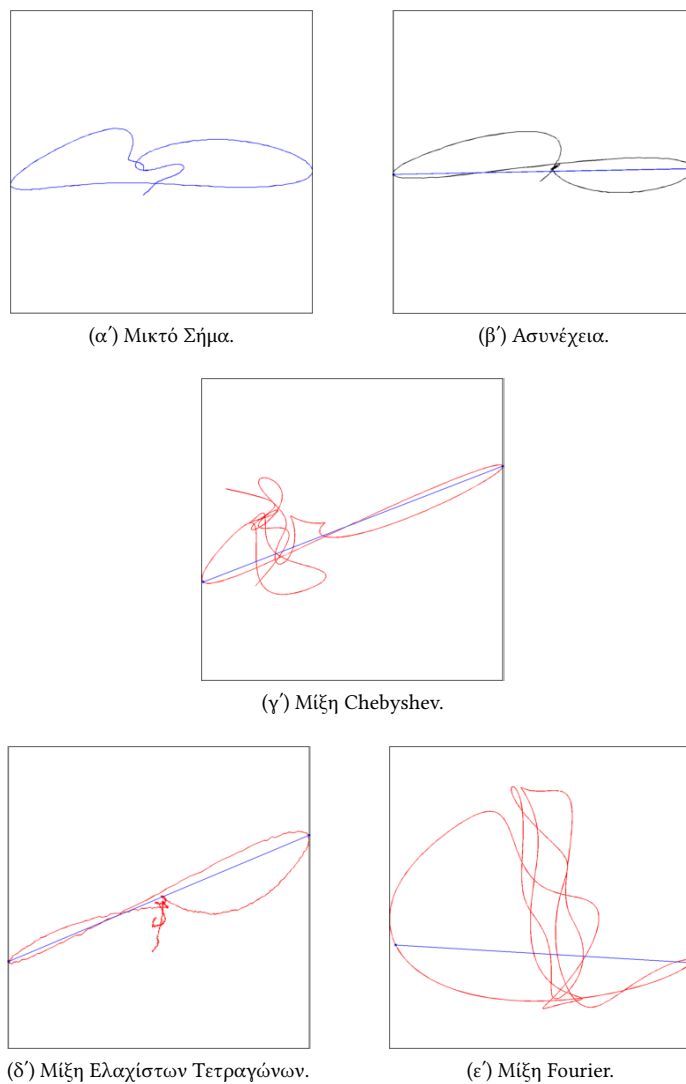


Σχήμα 4.22: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.584903	6.7549°	0.467765	23.2163°
Μίξη Fourier	0.616238	-1.93078°	0.439251	31.902°
Μίξη Chebyshev	0.474083	17.1605°	0.568606	12.8107°

Πίνακας 4.23: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

4.2.5 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3)

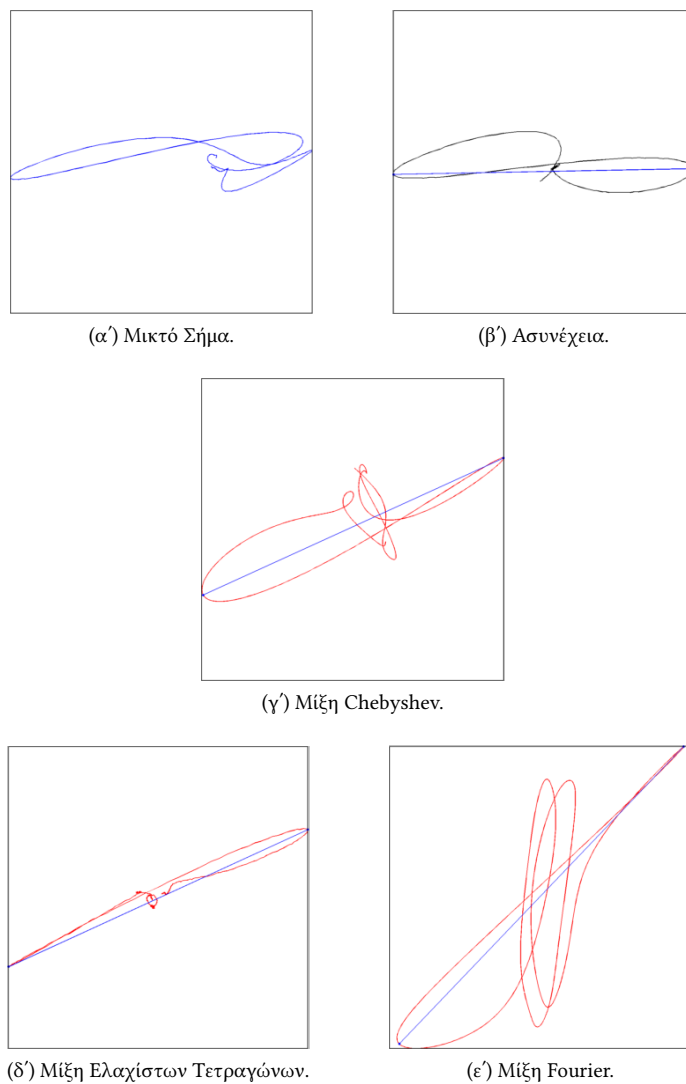


Σχήμα 4.23: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.240776	-22.7333°	0.500551	21.6636°
Μίξη Fourier	0.227272	3.41075°	0.528564	4.48047°
Μίξη Chebyshev	0.249629	-21.0948°	0.482188	20.0251°

Πίνακας 4.24: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3).

4.2.6 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3)



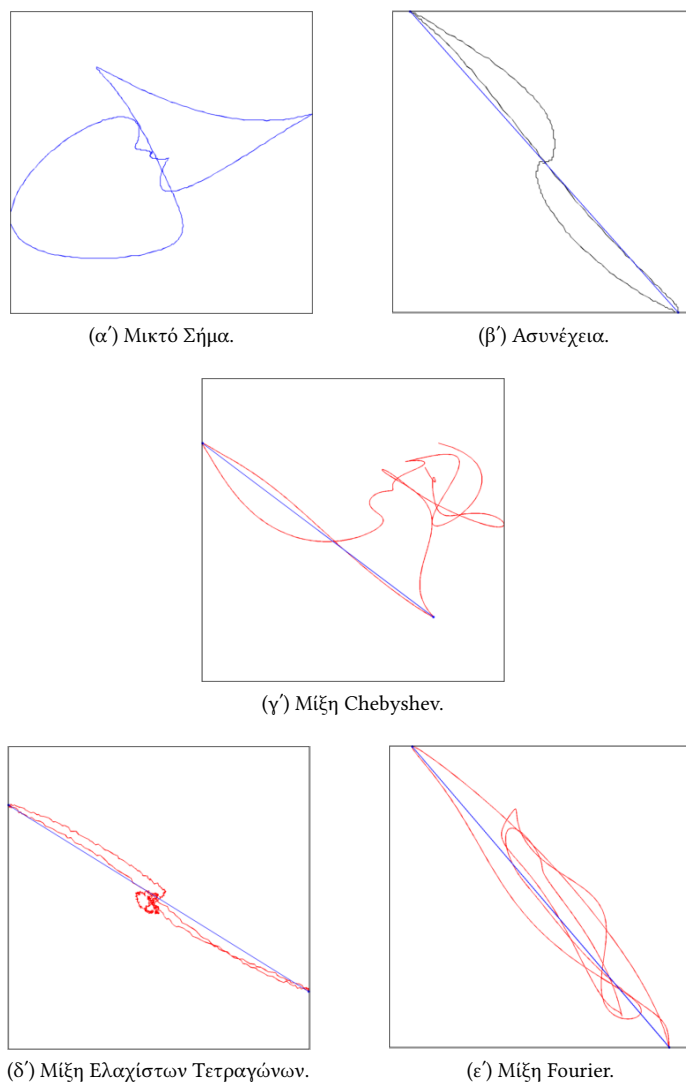
Σχήμα 4.24: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.369131	-24.4627°	0.2343	23.393°
Μίξη Fourier	0.470093	-46.2554°	0.0248739	45.1857°
Μίξη Chebyshev	0.290766	-24.5249°	0.396857	23.4552°

Πίνακας 4.25: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).



4.2.7 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

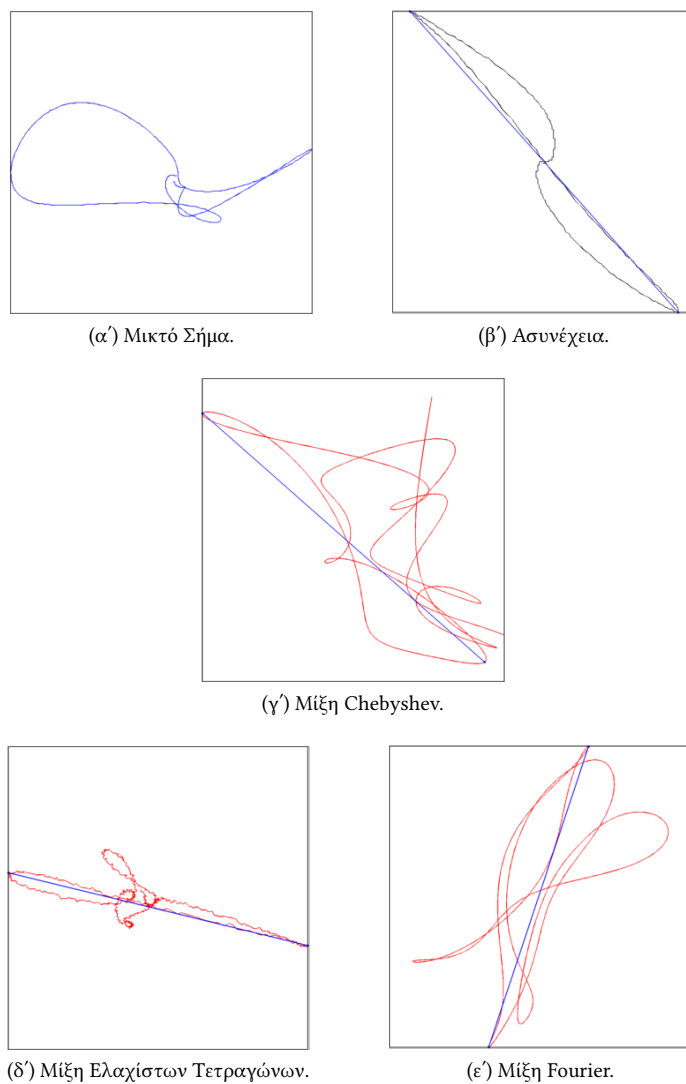


Σχήμα 4.25: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.159742	31.7005°	0.37709	16.7773°
Μίξη Fourier	0.255002	49.5516°	0.00562575	1.07386°
Μίξη Chebyshev	0.132378	36.8781°	0.483796	11.5996°

Πίνακας 4.26: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

4.2.8 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

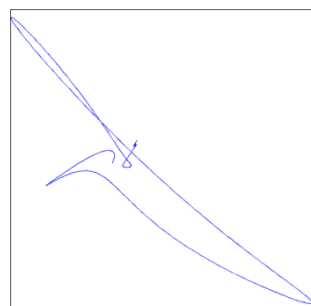


Σχήμα 4.26: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

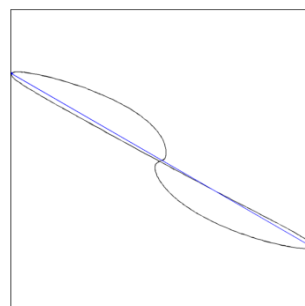
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.112429	13.5296°	0.561587	34.9482°
Μίξη Fourier	0.165984	-71.697°	0.352751	120.175°
Μίξη Chebyshev	0.0999257	41.3535°	0.610343	7.12429°

Πίνακας 4.27: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

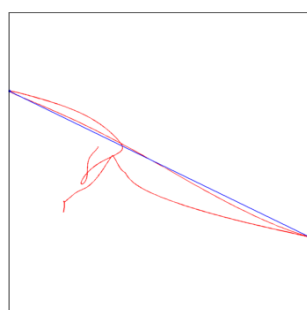
4.2.9 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)



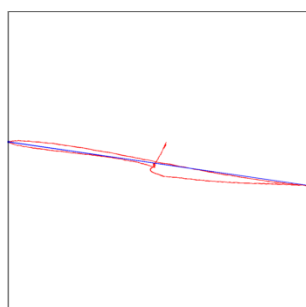
(α') Μικτό Σήμα.



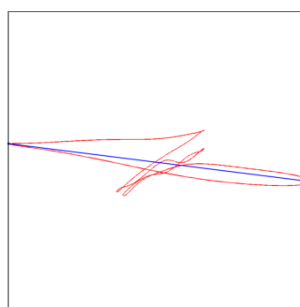
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



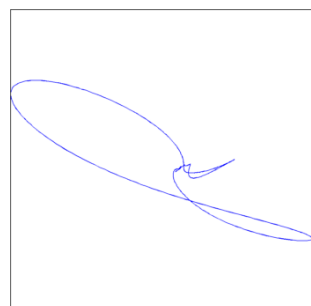
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.27: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

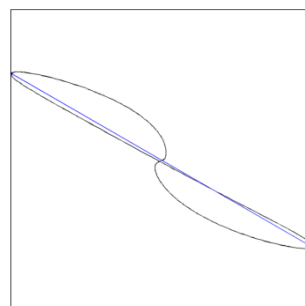
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.728483	8.17392°	0.337114	21.7973°
Μίξη Fourier	0.925443	7.11073°	0.157889	22.8605°
Μίξη Chebyshev	0.71314	25.7817°	0.351075	4.1895°

Πίνακας 4.28: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

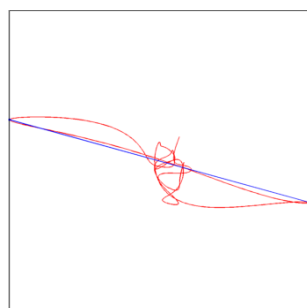
4.2.10 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)



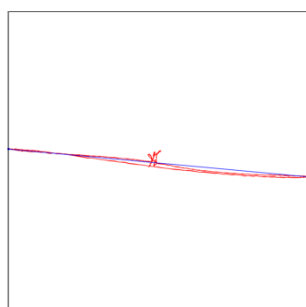
(α') Μικτό Σήμα.



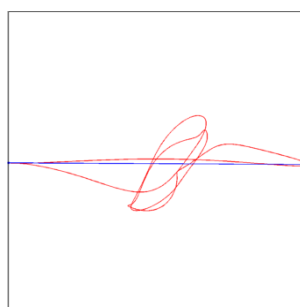
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



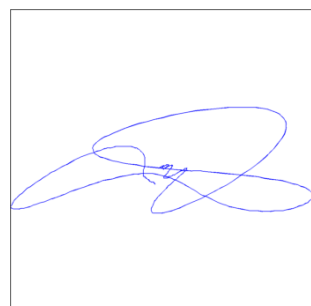
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.28: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

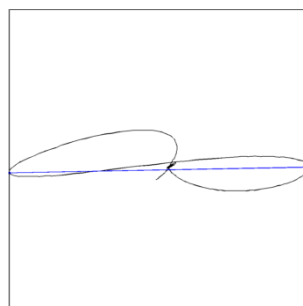
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.69161	5.24827°	0.370667	24.7229°
Μίξη Fourier	0.725045	0.314474°	0.340242	29.6567°
Μίξη Chebyshev	0.570132	15.3219°	0.481206	14.6493°

Πίνακας 4.29: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

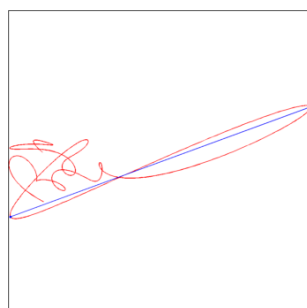
4.2.11 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3)



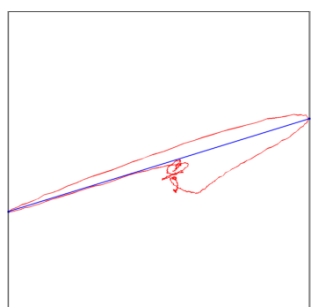
(α') Μικτό Σήμα.



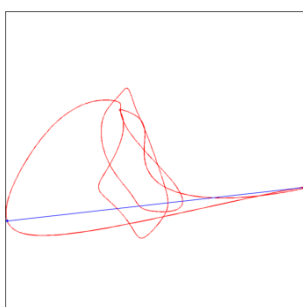
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



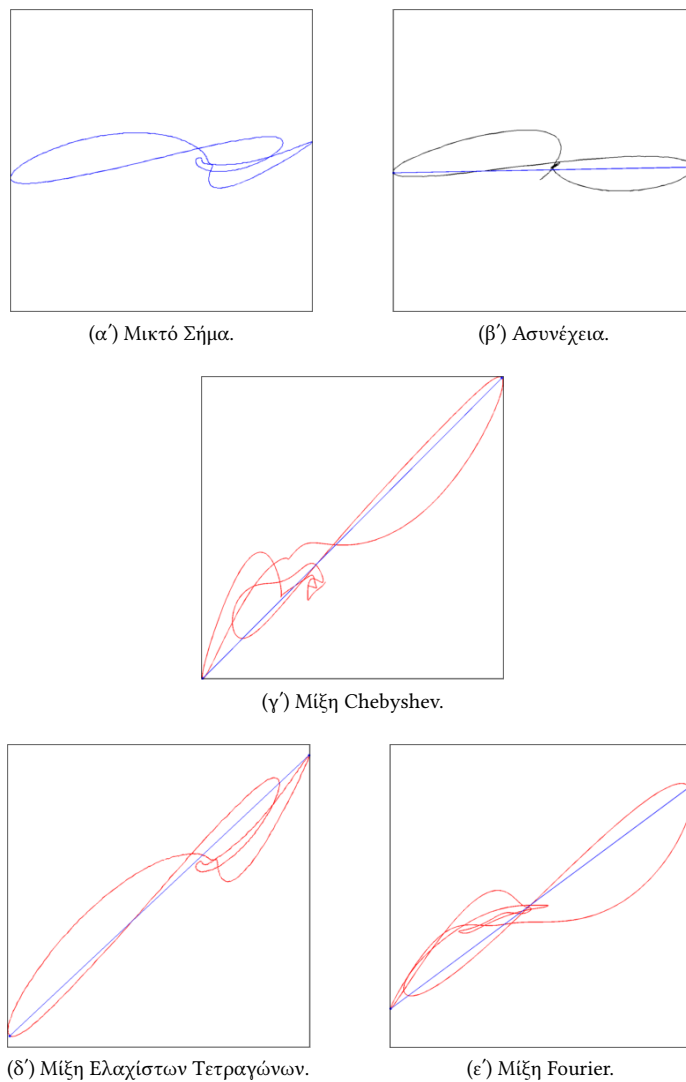
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.29: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.294723	-17.0627°	0.388648	15.993°
Μίξη Fourier	0.305485	-6.41056°	0.366323	5.34085°
Μίξη Chebyshev	0.250877	-20.0866°	0.479599	19.0169°

Πίνακας 4.30: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 3).

4.2.12 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3)

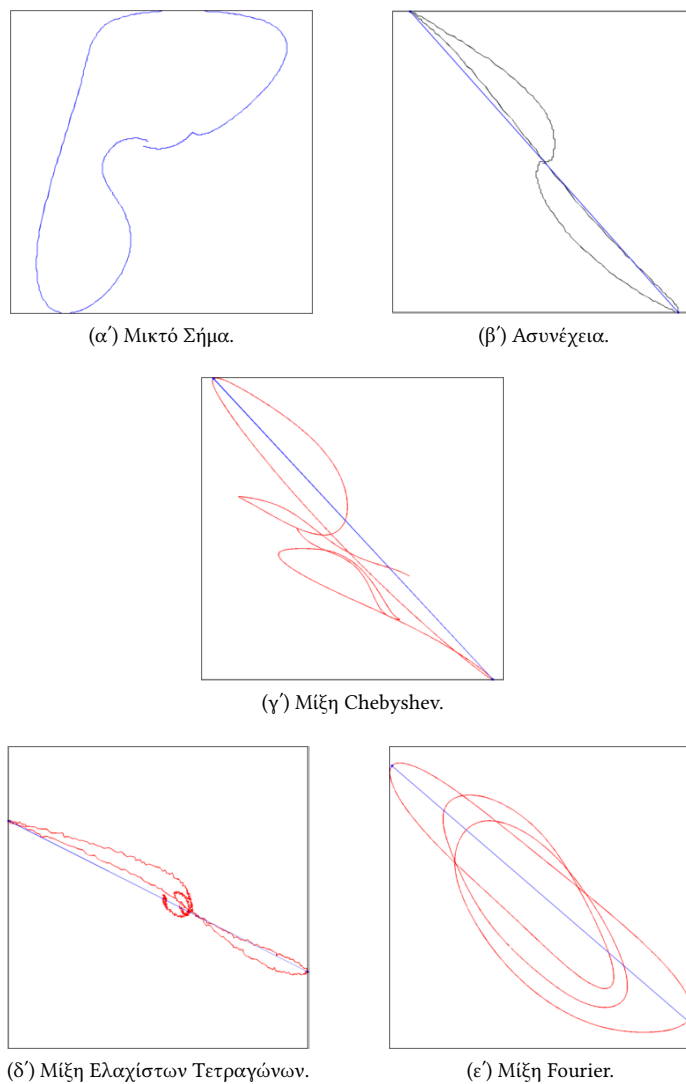


Σχήμα 4.30: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.639545	-43.0845°	0.326625	42.0147°
Μίξη Fourier	0.648092	-36.4829°	0.344355	35.4132°
Μίξη Chebyshev	0.563756	-45.1181°	0.169415	44.0484°

Πίνακας 4.31: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).

4.2.13 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

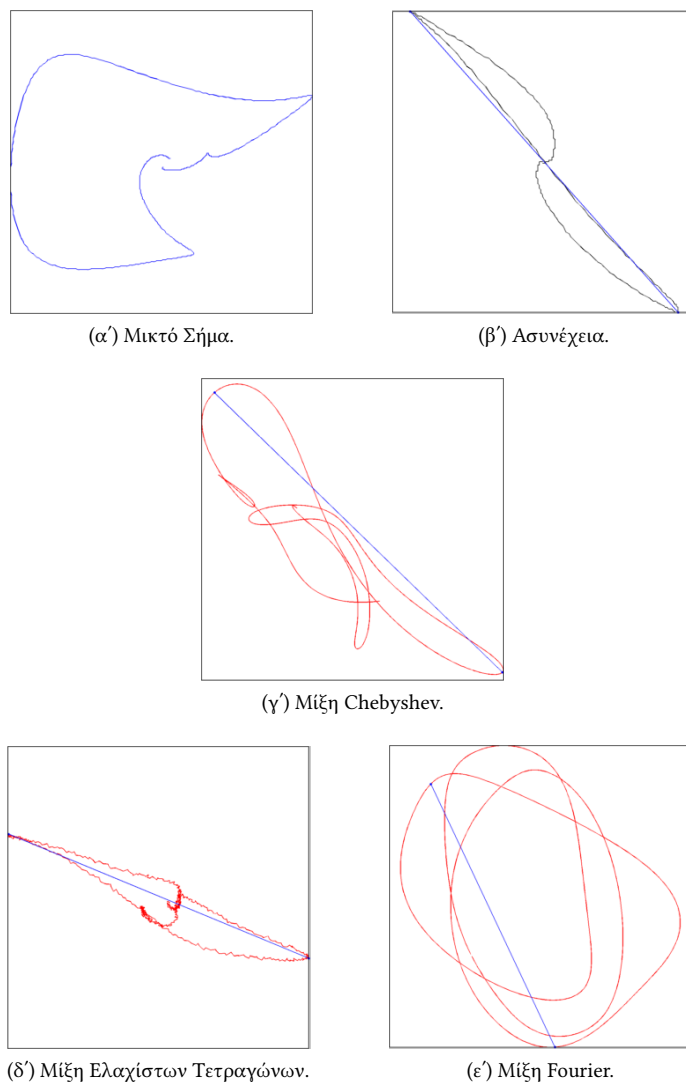


Σχήμα 4.31: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.141654	26.5938°	0.447626	21.884°
Μίξη Fourier	0.262877	40.7611°	0.0250799	7.71671°
Μίξη Chebyshev	0.132135	47.104°	0.484743	1.37374°

Πίνακας 4.32: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

4.2.14 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)



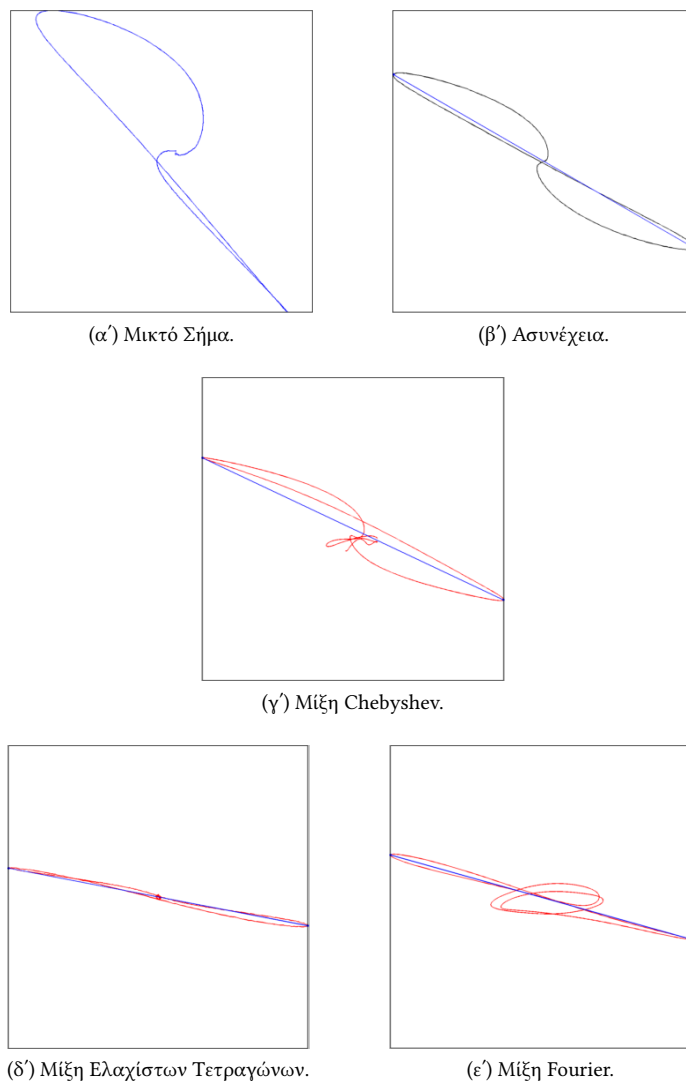
Σχήμα 4.32: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.124084	13.4467°	0.516137	35.0311°
Μίξη Fourier	0.140801	37.0952°	0.450951	11.3826°
Μίξη Chebyshev	0.157809	34.8592°	0.384629	13.6186°

Πίνακας 4.33: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).



4.2.15 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

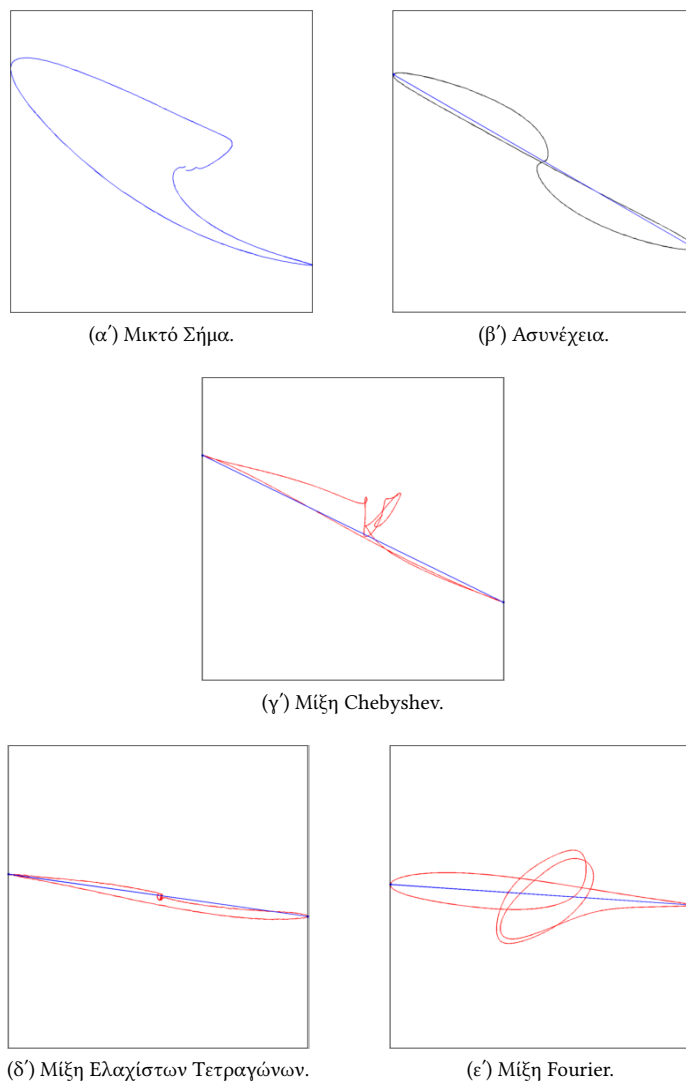


Σχήμα 4.33: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.743171	10.7844°	0.323749	19.1868°
Μίξη Fourier	0.982512	15.581°	0.105959	14.3902°
Μίξη Chebyshev	0.695988	25.1379°	0.366682	4.83327°

Πίνακας 4.34: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

4.2.16 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3)

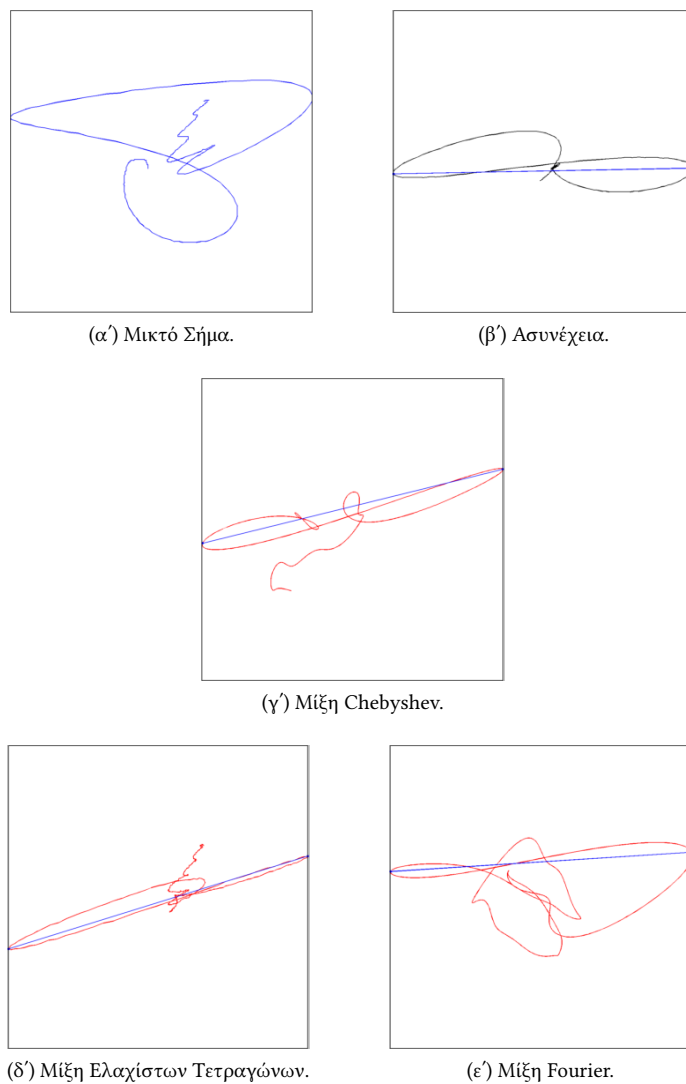


Σχήμα 4.34: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.70058	7.9589°	0.362505	22.0123°
Μίξη Fourier	0.819581	3.86366°	0.254218	26.1076°
Μίξη Chebyshev	0.661853	25.9063°	0.397744	4.06492°

Πίνακας 4.35: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 3).

4.2.17 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3)

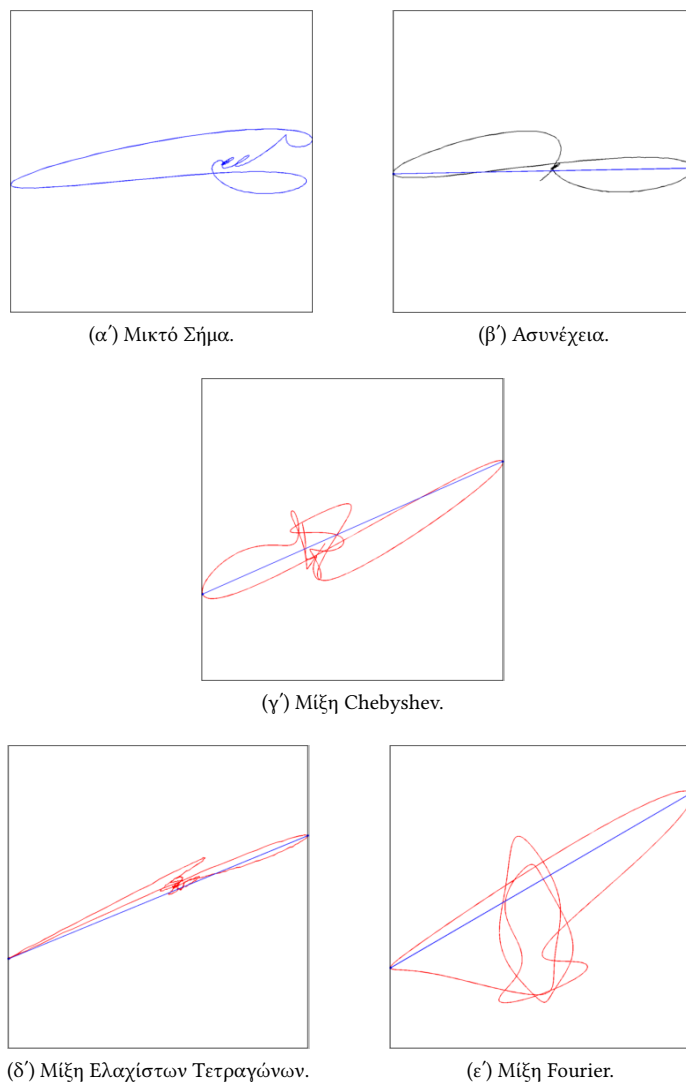


Σχήμα 4.35: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.331281	-17.0551°	0.312815	15.9854°
Μίξη Fourier	0.361816	-3.65872°	0.249474	2.589°
Μίξη Chebyshev	0.334031	-13.7967°	0.30711	12.727°

Πίνακας 4.36: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 3).

4.2.18 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3)



Σχήμα 4.36: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.386154	-22.1406°	0.198991	21.0709°
Μίξη Fourier	0.373977	-30.0999°	0.22425	29.0302°
Μίξη Chebyshev	0.317962	-23.8023°	0.340444	22.7326°

Πίνακας 4.37: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 3).

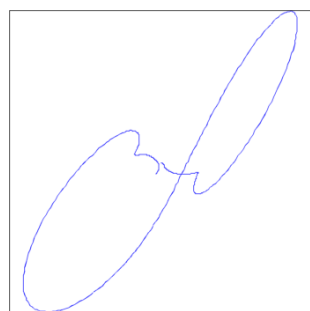
## 4.2.19 Συνολικά Αποτελέσματα

Σήμα	$\bar{e}_w$	$\bar{e}_{ph}$	$s_w$	$s_{ph}$
Μίξη Ελ. Τετ.	38.31%	23.49°	9.53%	6.50°
Μίξη Fourier	24.80%	24.17°	15.90%	27.46°
Μίξη Chebyshev	45.40%	16.13°	15.38%	13.79°

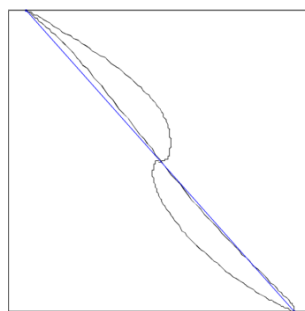
Πίνακας 4.38: Σφάλματα με δαχτυλίδι αναφοράς το  $\Delta 2$ .

### 4.3 Αποτελέσματα πειράματος με μισό δαχτυλίδι αναφοράς

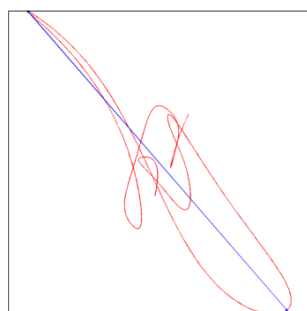
#### 4.3.1 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 1$ )



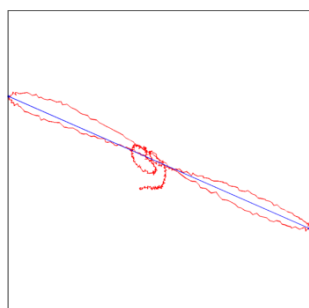
(α') Μικτό Σήμα.



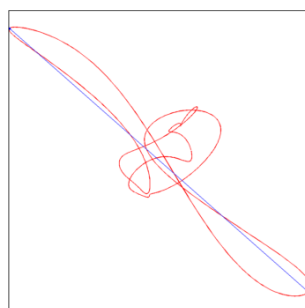
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



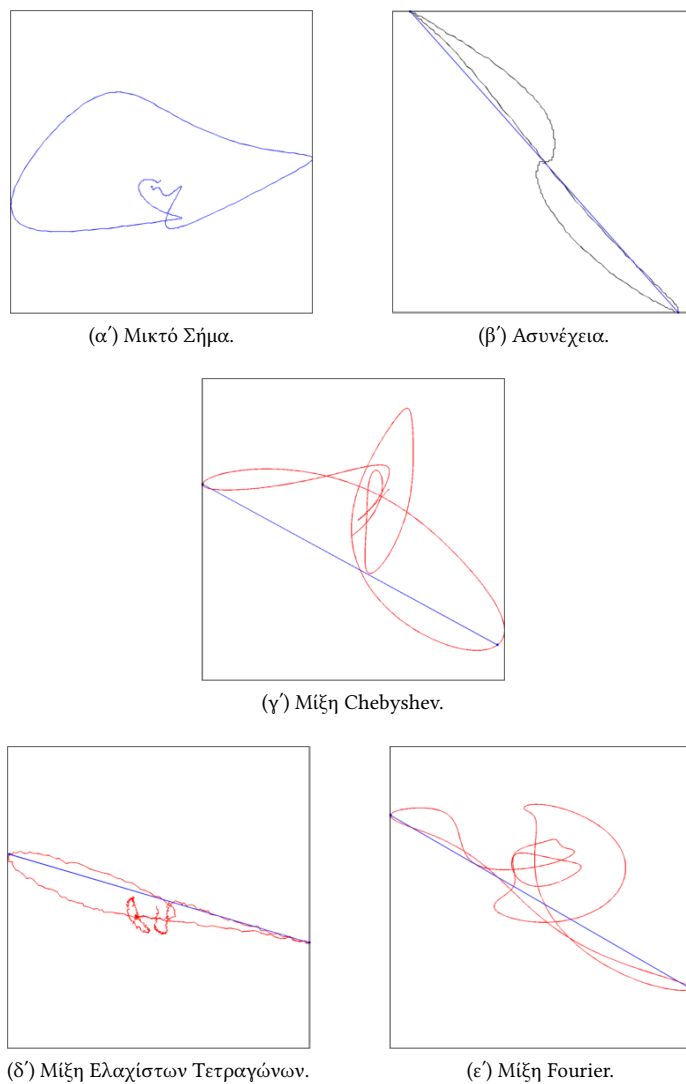
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.37: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta. 1$ ).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.14371	23.7183°	0.439606	24.7595°
Μίξη Fourier	0.166281	41.4049°	0.351592	7.07293°
Μίξη Chebyshev	0.179706	48.9957°	0.299241	0.517963°

Πίνακας 4.39: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. ( $\Delta$ . 1).

4.3.2 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)



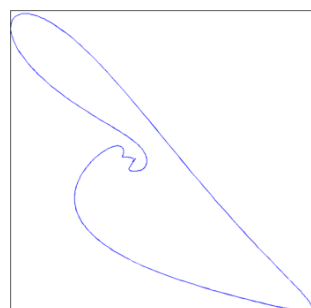
Σχήμα 4.38: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.12852	16.4534°	0.498838	32.0244°
Μίξη Fourier	0.133043	29.9643°	0.481201	18.5135°
Μίξη Chebyshev	0.137654	28.5861°	0.463222	19.8917°

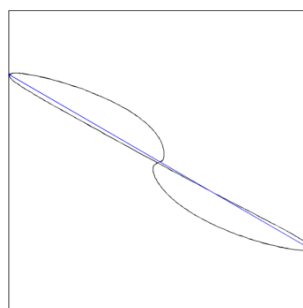
Πίνακας 4.40: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).



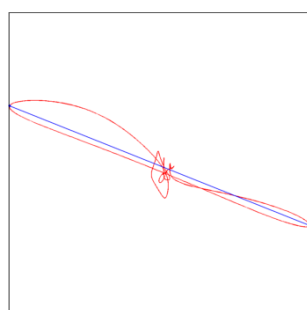
4.3.3 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)



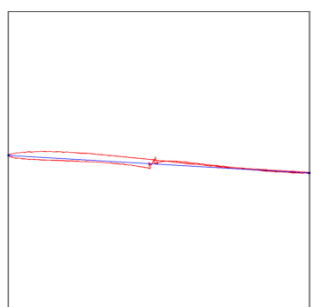
(α') Μικτό Σήμα.



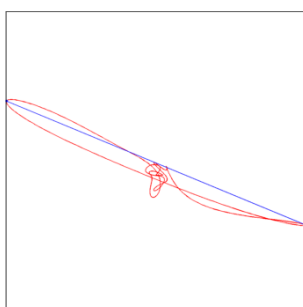
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



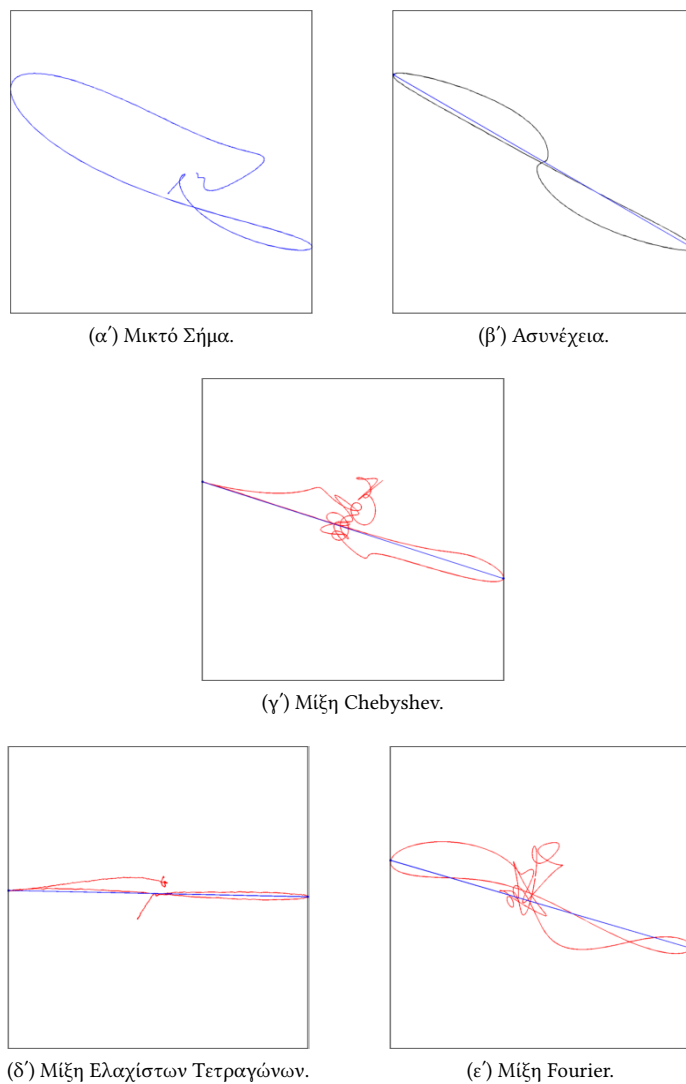
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.39: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.747254	3.35253°	0.320033	26.6187°
Μίξη Fourier	0.76433	22.4384°	0.304495	7.53284°
Μίξη Chebyshev	0.777655	21.6802°	0.29237	8.29102°

Πίνακας 4.41: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π..

4.3.4 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

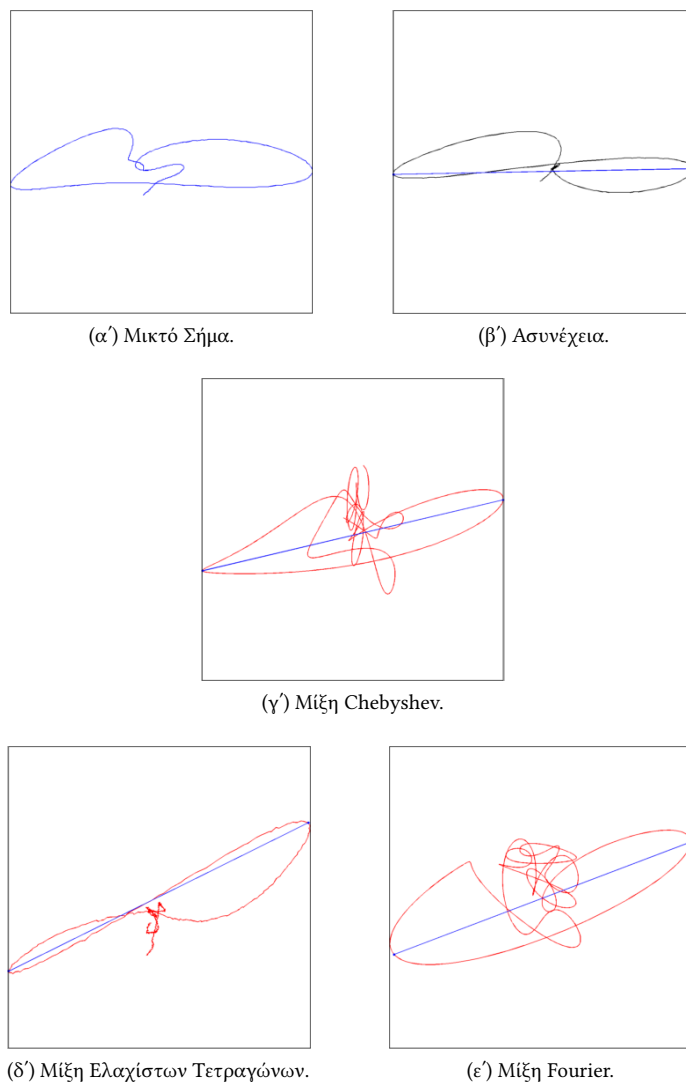


Σχήμα 4.40: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.599898	1.18257	0.45412	28.7886
Μίξη Fourier	0.561165	16.2639	0.489365	13.7074
Μίξη Chebyshev	0.620356	17.7462	0.435505	12.225

Πίνακας 4.42: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.5 Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1)

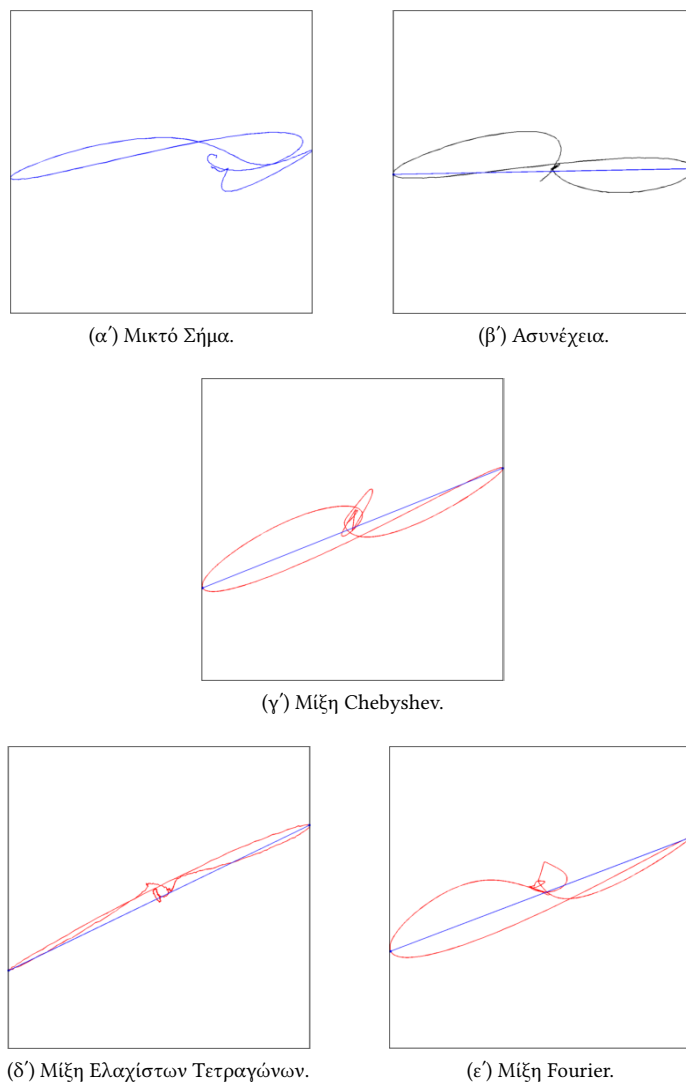


Σχήμα 4.41: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.247628	-26.3465°	0.486339	25.2768°
Μίξη Fourier	0.239391	-20.7542°	0.503425	19.6845°
Μίξη Chebyshev	0.237501	-13.2292°	0.507345	12.1595°

Πίνακας 4.43: Μικρότερο δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1).

4.3.6 Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1)

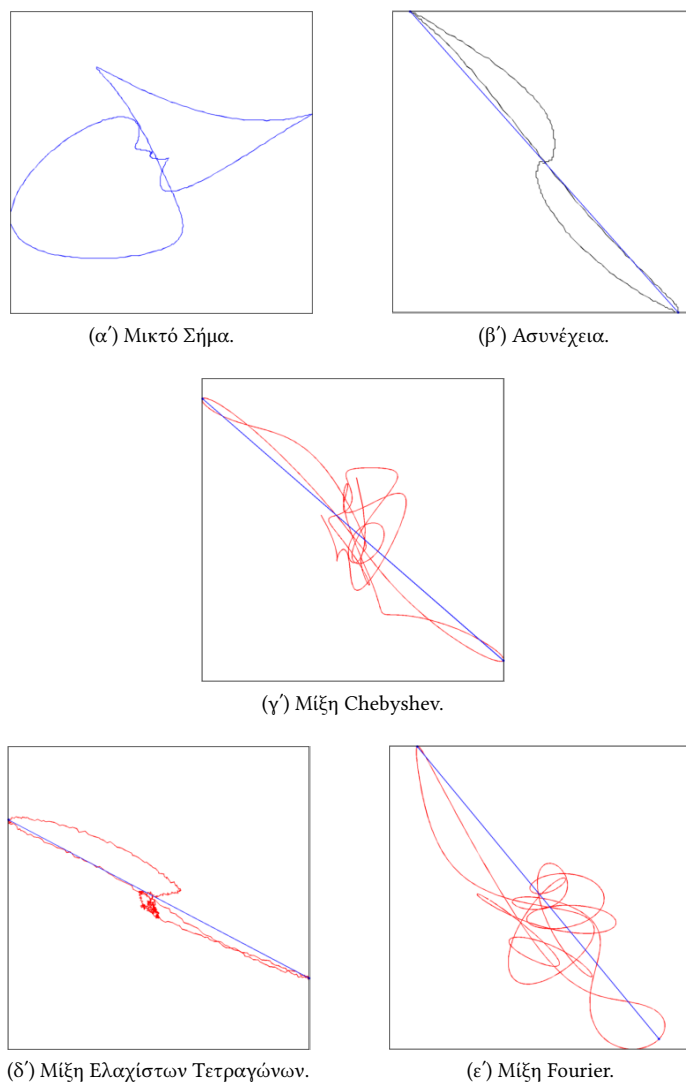


Σχήμα 4.42: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.385771	-25.7343°	0.199784	24.6646°
Μίξη Fourier	0.350207	-20.7693°	0.273557	19.6996°
Μίξη Chebyshev	0.390828	-21.7107°	0.189294	20.641°

Πίνακας 4.44: Μικρότερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).

4.3.7 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

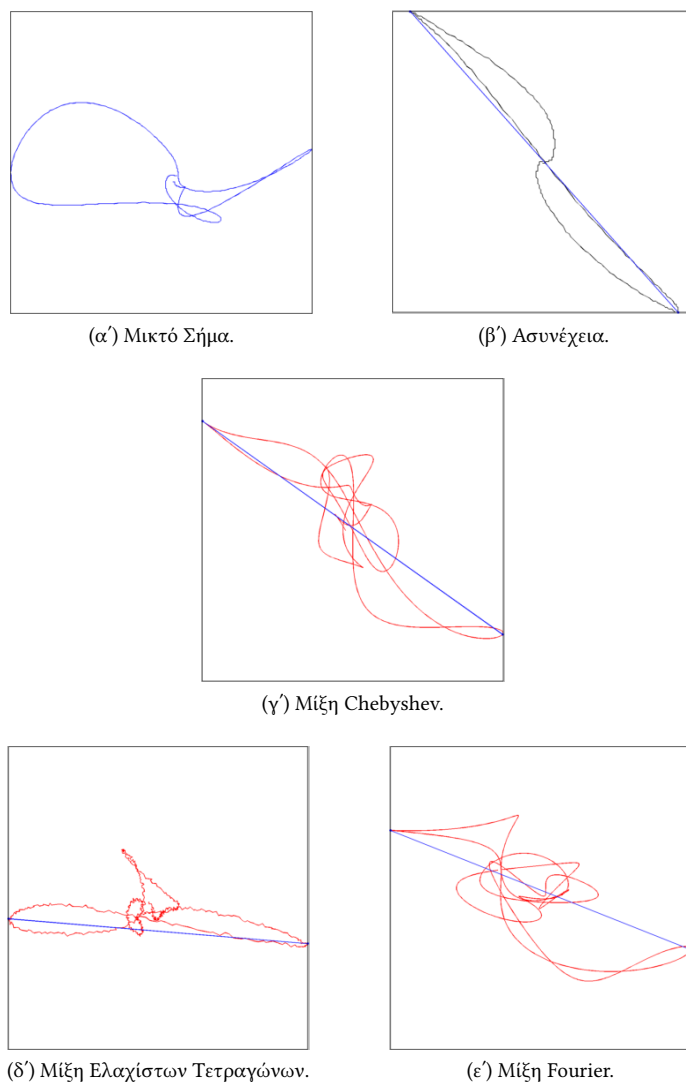


Σχήμα 4.43: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.1532	27.6524°	0.402601	20.8254°
Μίξη Fourier	0.144867	50.3178°	0.435095	1.83999°
Μίξη Chebyshev	0.149957	40.9473°	0.415245	7.53046°

Πίνακας 4.45: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.8 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

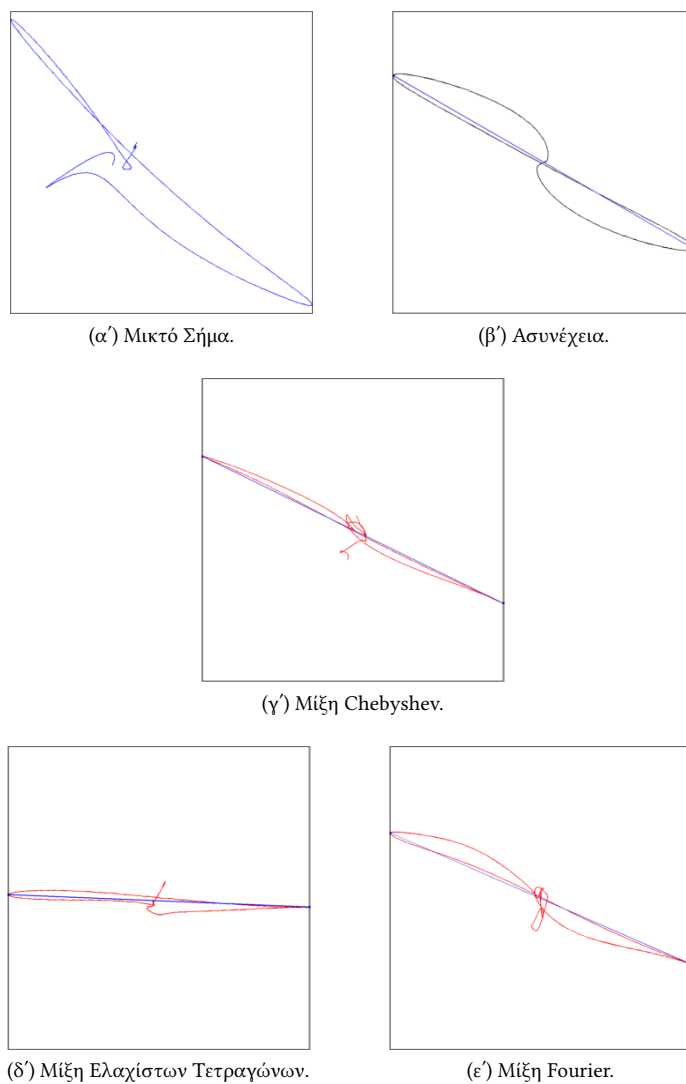


Σχήμα 4.44: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.116423	4.68135°	0.546013	43.7964°
Μίξη Fourier	0.122275	21.5783°	0.523193	26.8995°
Μίξη Chebyshev	0.124119	35.2324°	0.516002	13.2454°

Πίνακας 4.46: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.9 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

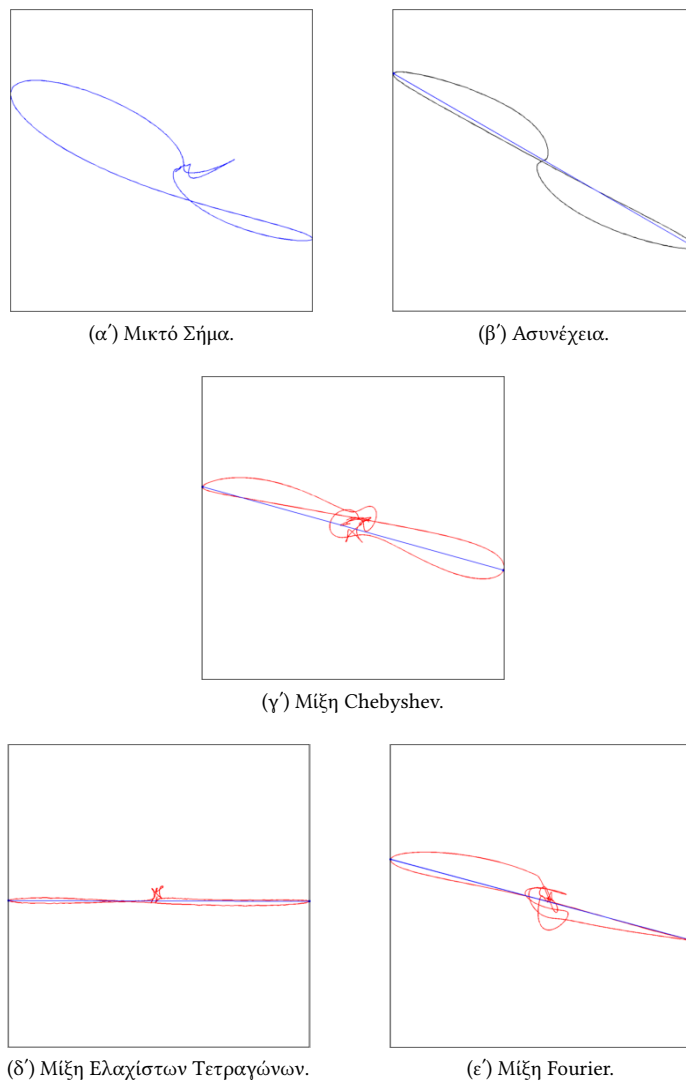


Σχήμα 4.45: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.73499	2.3445°	0.331193	27.6267°
Μίξη Fourier	0.763032	23.4539°	0.305675	6.51732°
Μίξη Chebyshev	0.807035	25.9054°	0.265635	4.06578°

Πίνακας 4.47: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.10 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)



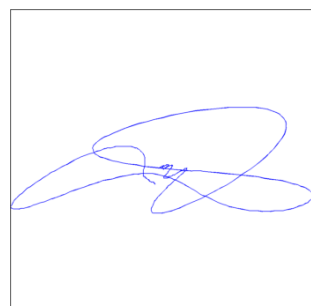
Σχήμα 4.46: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.709991	0.13003°	0.353941	29.8412°
Μίξη Fourier	0.675058	14.9779°	0.385728	14.9933°
Μίξη Chebyshev	0.708466	15.432°	0.355328	14.5392°

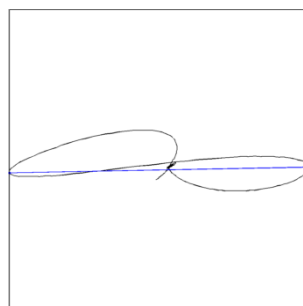
Πίνακας 4.48: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).



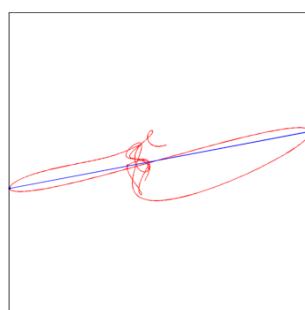
4.3.11 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1)



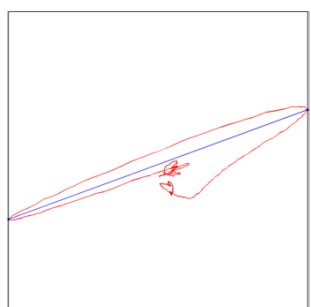
(α') Μικτό Σήμα.



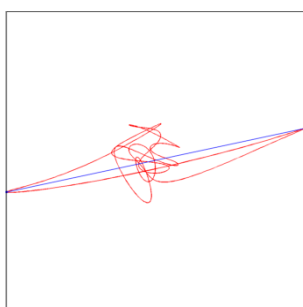
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



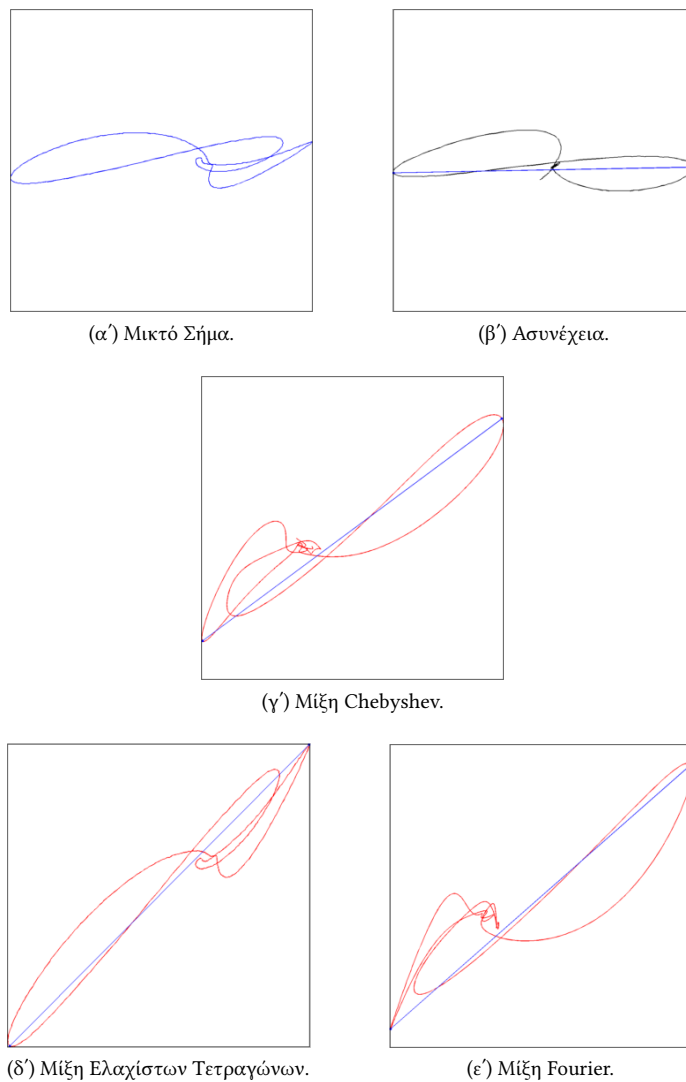
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.47: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.301309	-19.9011°	0.374987	18.8314°
Μίξη Fourier	0.268984	-11.9885°	0.44204	10.9188°
Μίξη Chebyshev	0.281006	-10.6718°	0.417101	9.60208°

Πίνακας 4.49: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι πάνω σε οπή (Δ. 1).

4.3.12 Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1)

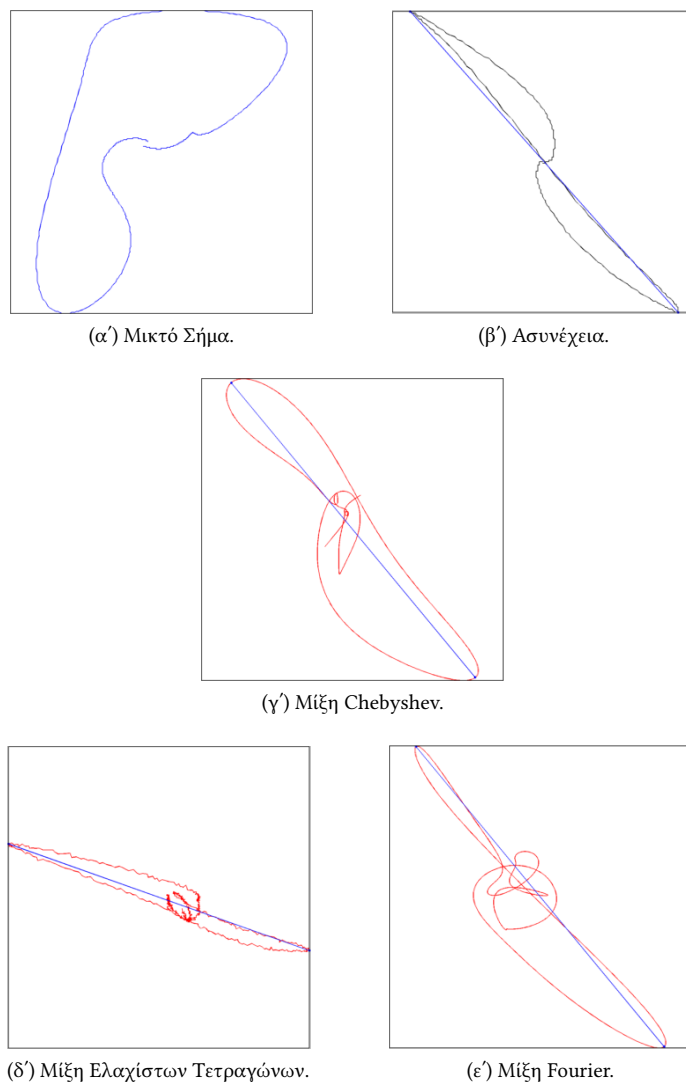


Σχήμα 4.48: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.673304	-45.094°	0.396652	44.0243°
Μίξη Fourier	0.583069	-41.2662°	0.209477	40.1965°
Μίξη Chebyshev	0.579875	-36.5019°	0.20285	35.4322°

Πίνακας 4.50: Μεγαλύτερο δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).

4.3.13 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

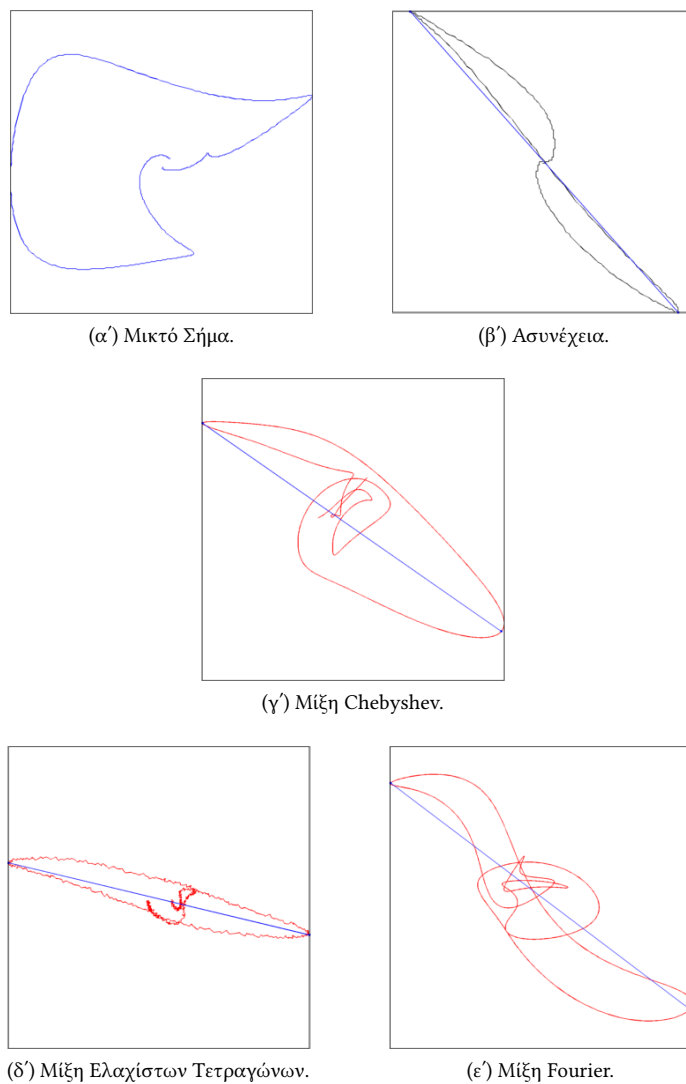


Σχήμα 4.49: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.131386	19.479°	0.487665	28.9987°
Μίξη Fourier	0.161107	50.3959°	0.371769	1.91816°
Μίξη Chebyshev	0.16735	50.3835°	0.347425	1.90572°

Πίνακας 4.51: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.14 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

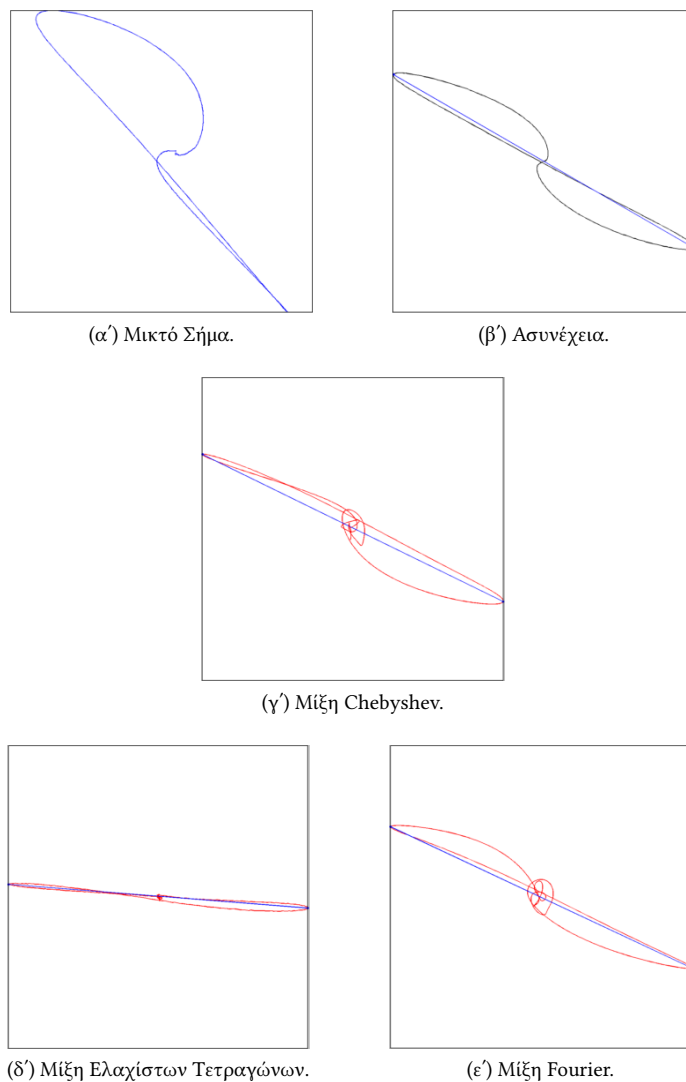


Σχήμα 4.50: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.256445	48.4778°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.124084	13.4467°	0.516137	35.0311°
Μίξη Fourier	0.140801	37.0952°	0.450951	11.3826°
Μίξη Chebyshev	0.157809	34.8592°	0.384629	13.6186°

Πίνακας 4.52: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε ρηχή Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.15 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

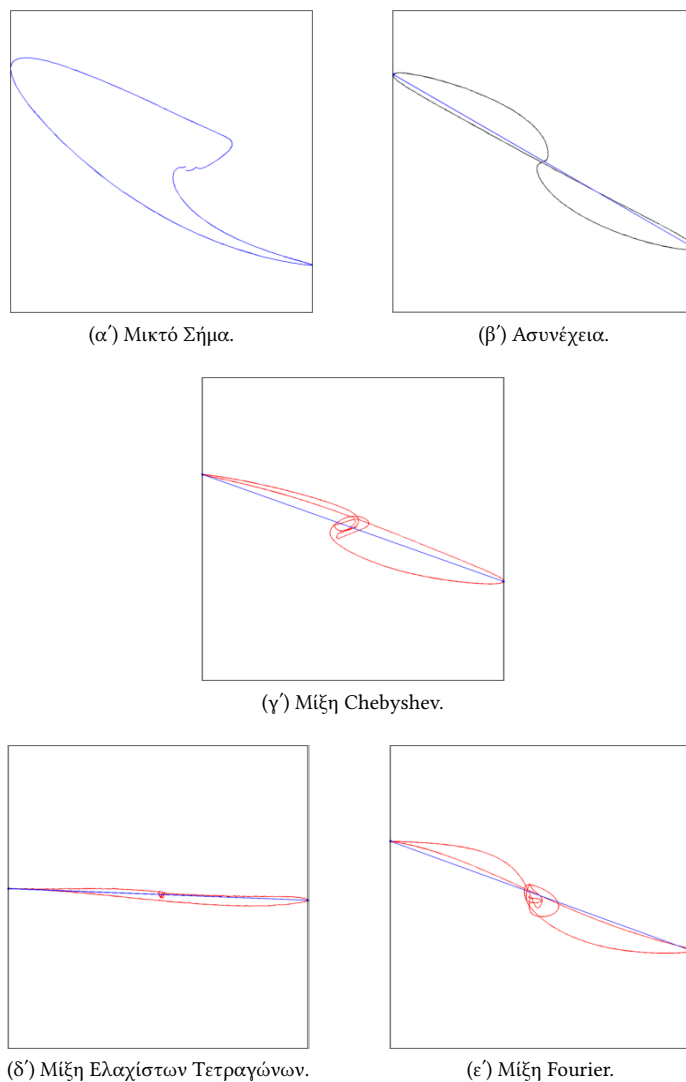


Σχήμα 4.51: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.743759	4.49524°	0.323213	25.476°
Μίξη Fourier	0.771071	25.0169°	0.298361	4.95433°
Μίξη Chebyshev	0.805712	25.9567°	0.266839	4.01451°

Πίνακας 4.53: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

4.3.16 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1)

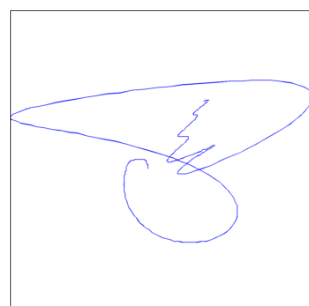


Σχήμα 4.52: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

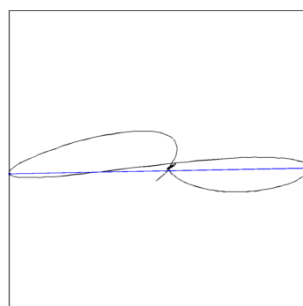
Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	1.09896	29.9712°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.713681	2.21331°	0.350583	27.7579°
Μίξη Fourier	0.702584	19.8916°	0.36068	10.0796°
Μίξη Chebyshev	0.781555	19.4673°	0.288821	10.5039°

Πίνακας 4.54: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε βαθιά Ε.Ο.Ε.Π. (Δ. 1).

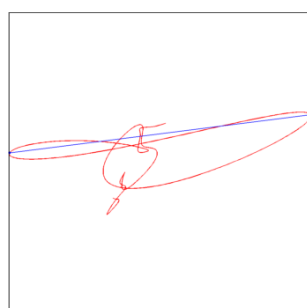
4.3.17 Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1)



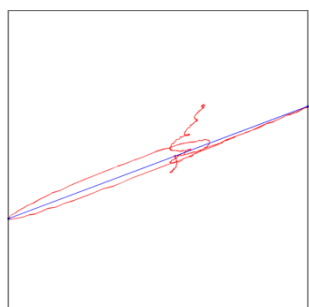
(α') Μικτό Σήμα.



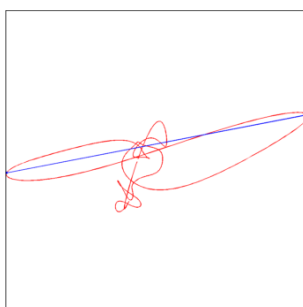
(β') Ασυνέχεια.



(γ') Μίξη Chebyshev.



(δ') Μίξη Ελαχίστων Τετραγώνων.



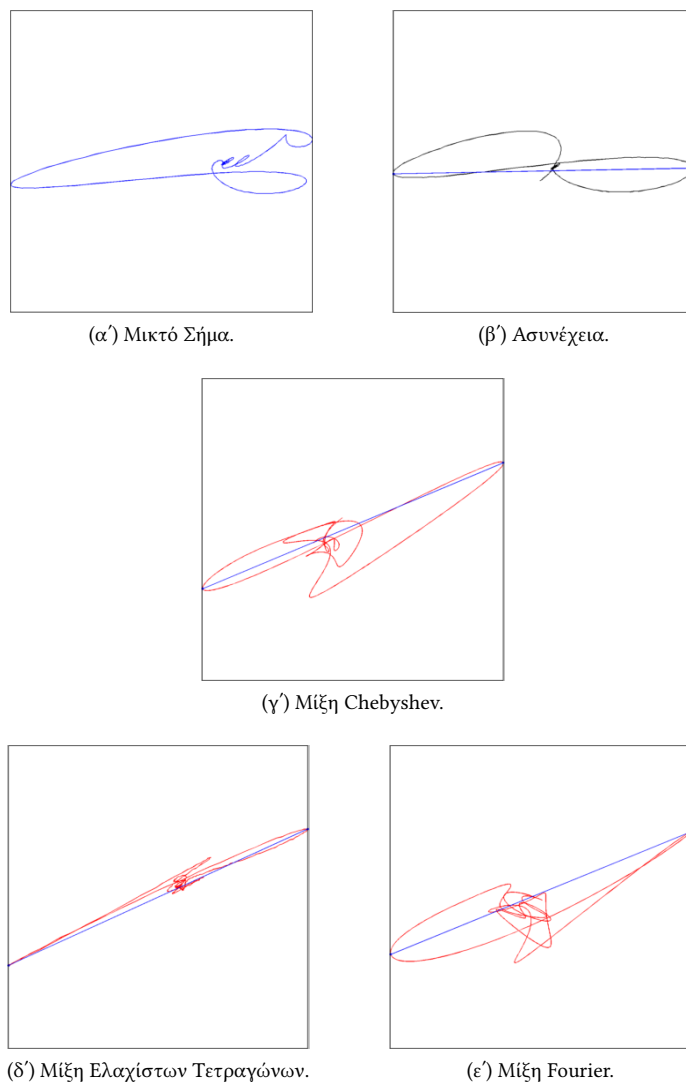
(ε') Μίξη Fourier.

Σχήμα 4.53: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.33775	-20.3536°	0.299395	19.2839°
Μίξη Fourier	0.308947	-10.9147°	0.359142	9.84494°
Μίξη Chebyshev	0.307759	-7.25187°	0.361607	6.18216°

Πίνακας 4.55: Μισό δαχτυλίδι πάνω σε σπή (Δ. 1).

4.3.18 Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1)



Σχήμα 4.54: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).

Σήμα	Πλάτος	Γωνία	$e_w$	$e_{ph}$
Ασυνέχεια	0.482084	-1.06971°	0	0°
Μίξη Ελ. Τετ.	0.40388	-24.275°	0.162221	23.2052°
Μίξη Fourier	0.32397	-22.105°	0.32798	21.0353°
Μίξη Chebyshev	0.375455	-22.6977°	0.221183	21.628°

Πίνακας 4.56: Μισό δαχτυλίδι δίπλα σε οπή (Δ. 1).



## 4.3.19 Συνολικά Αποτελέσματα

Σήμα	$\bar{e}_w$	$\bar{e}_{ph}$	$s_w$	$s_{ph}$
Μίξη Ελ. Τετ.	38.57%	28.16°	10.56%	7.06°
Μίξη Fourier	38.19%	13.71°	8.83%	9.57°
Μίξη Chebyshev	34.61%	12.00°	10.0%	8.49°

Πίνακας 4.57: Σφάλματα με δαχτυλίδι αναφοράς το Δ. 1.

## Κεφάλαιο 5

# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το μέγεθος που μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε μια ασυνέχεια με τη μέθοδο των δινορρευμάτων είναι η φάση του σήματος. Το πλάτος του μας επιτρέπει να τη διαστασιολογήσουμε. Η μορφή του σήματος έχει επίσης σημασία καθώς ένα σήμα σφάλματος μπορεί να μοιάζει με θόρυβο ή μη σχετικό παράγοντα και αντίθετα, ενώ σημαντικό είναι να μπορεί να βρεθεί σχετικά εύκολα το πλάτος και η φάση του.

Από τον πίνακα 5.1 είναι δύσκολο να εξάγουμε ένα καθαρό συμπέρασμα για το ποια μέθοδο μίξης είναι η βέλτιστη. Μικρότερο μέσο όρο σχετικού σφάλματος πλάτους  $\bar{\epsilon}_w$  παρουσιάζει η μίξη Fourier, μικρότερο μέσο απόλυτο σφάλμα γωνίας  $\bar{\epsilon}_{ph}$  η μίξη Chebyshev και μικρότερη τετραγωνική απόκλιση σχετικού σφάλματος πλάτους  $s_w$  και απόλυτου σφάλματος γωνίας  $s_{ph}$  η μίξη των Ελαχίστων Τετραγώνων.

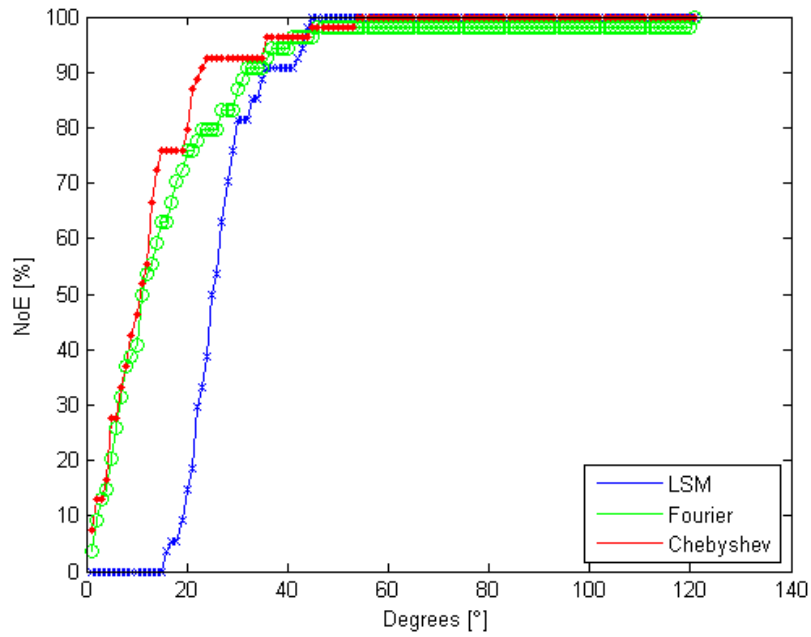
Επειδή μας ενδιαφέρει κυρίως το σφάλμα φάσης και κυρίως η μεταβλητότητά του μπορούμε εξ αρχής να δηλώσουμε ότι η μίξη Fourier είναι η χειρίστη, λαμβάνοντας υπόψιν και τη μορφή σήματος. Μας απομένει άρα η σύγκριση των μεθόδων Chebyshev και των Ελαχίστων Τετραγώνων. Για να τις συγκρίνουμε χρησιμοποιούμε καμπύλες τύπου NoE και PoD.

Για τις καμπύλες τύπου NoE θεωρούμε στην (3.1)  $max_1 = 92\%, 70\%, 60\%, 50\%$  και  $max_2 = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ \dots 121^\circ$ , αφού το σφάλμα πλάτους δεν μας ενδιαφέρει τόσο και αφού το μέγιστο απόλυτο σφάλμα φάσης οποιασδήποτε γωνίας είναι περίπου ίσο με  $120^\circ$ .

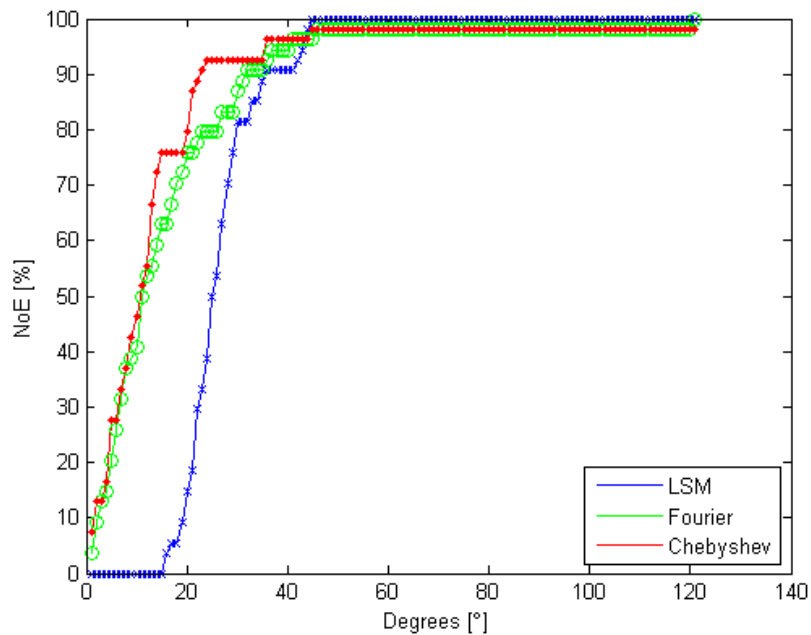
Από τις καμπύλες NoE των σχημάτων 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 διαφαίνεται ότι καλύτερη μίξη είναι μάλλον η μίξη Chebyshev.

Σήμα	$\bar{\epsilon}_w$	$\bar{\epsilon}_{ph}$	$s_w$	$s_{ph}$
Μίξη Ελ. Τετ.	38.62%	26.48°	<b>9.98%</b>	<b>7.01°</b>
Μίξη Fourier	<b>33.68%</b>	16.14°	13.16%	18.12°
Μίξη Chebyshev	38.84%	<b>12.45°</b>	12.45%	10.75°

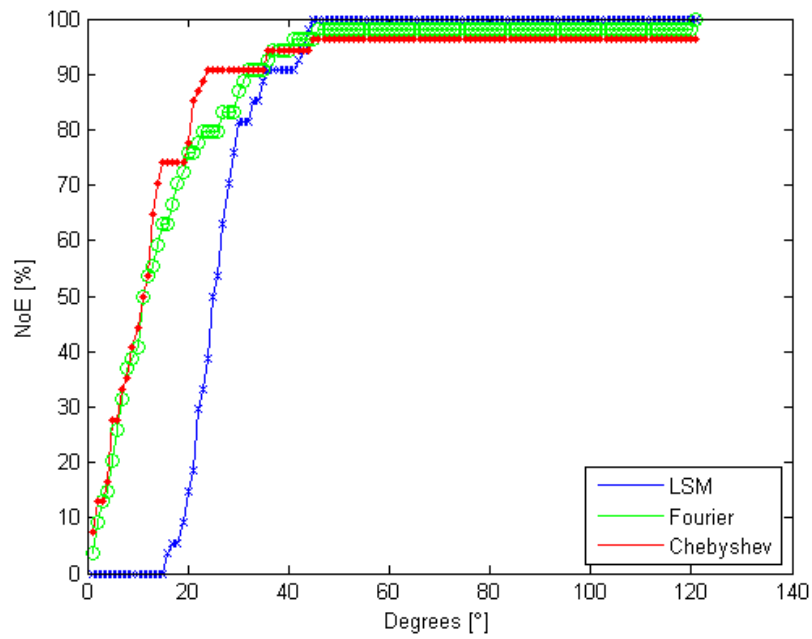
Πίνακας 5.1: Μέσο Σφάλμα και απόκλιση ανά μίξη.



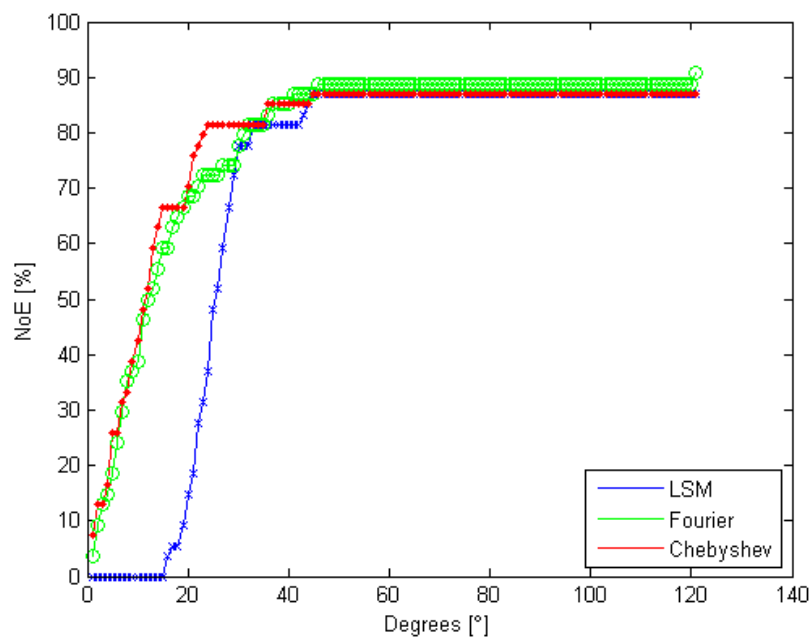
Σχήμα 5.1: Καμπύλη NoE με  $max_1 = 92\%$ .



Σχήμα 5.2: Καμπύλη NoE με  $max_1 = 70\%$ .



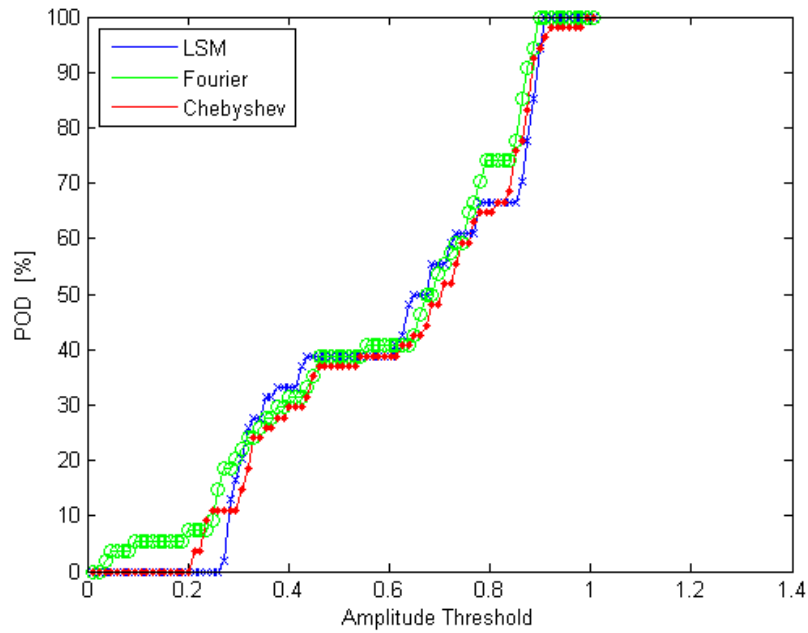
Σχήμα 5.3: Καμπύλη NoE με  $max_1 = 60\%$ .



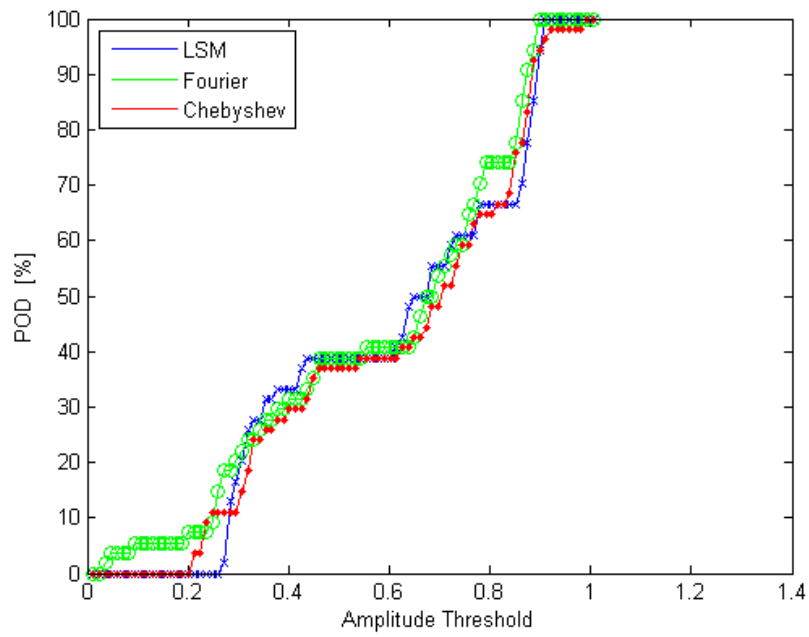
Σχήμα 5.4: Καμπύλη NoE με  $max_1 = 50\%$ .

Για τις καμπύλες τύπου PoD ως προς το πλάτος θεωρούμε στην (3.2):  $\min(p) = -180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, \max(p) = 180^\circ, 145^\circ, 90^\circ$  αντίστοιχα και  $\min(w) = w_q, 2 \cdot w_q, 3 \cdot w_q \dots 85 \cdot w_q$ , όπου  $w_q = 0.01182$ . Το  $w_q$  είναι ίσο με το μισό του μικρότερου πλάτους όλων των μίξεων.

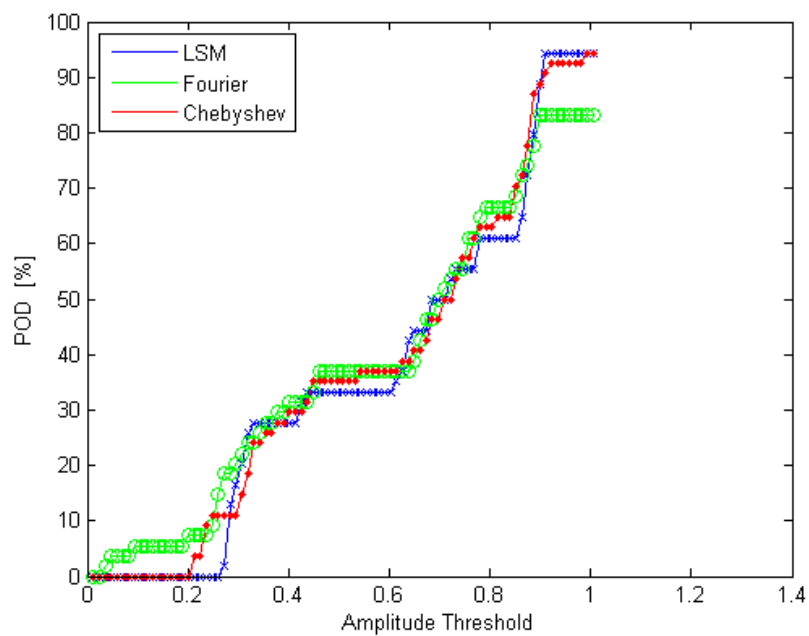
Σημαντικότερη από όλες τις καμπύλες είναι η 5.7, αφού τα σφάλματα στην  $f_{90}$  έχουν φάση από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$  και έτσι προκύπτει ο εντοπισμός τους. Από αυτή προκύπτει ότι χειρότερη είναι μάλλον η μίξη με τη μέθοδο Fourier, αλλά δεν προκύπτει η καλύτερη μέθοδος μίξης καθώς οι άλλες δύο αλληλοεπικαλύπτονται σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 5.5: Καμπύλη PoD με  $\min(p) = -180^\circ$  και  $\max(p) = 180^\circ$ .



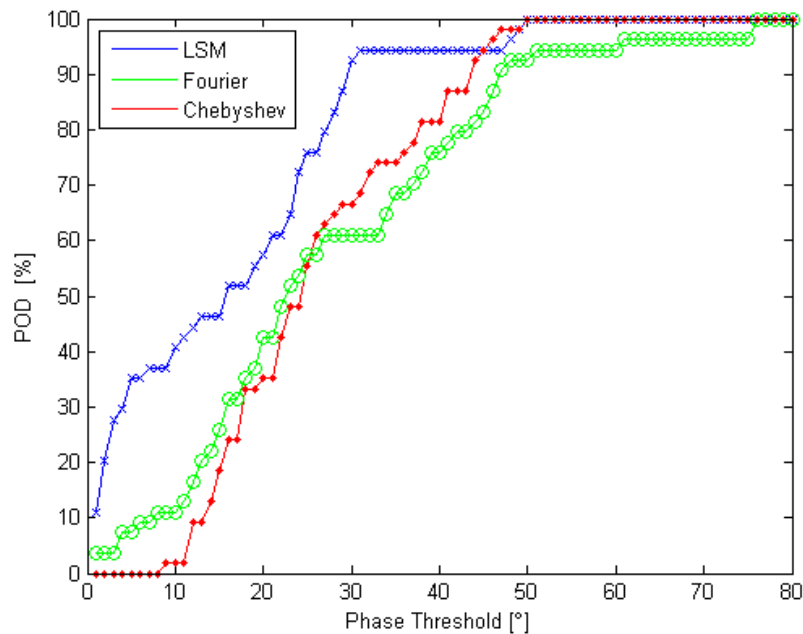
Σχήμα 5.6: Καμπύλη PoD με  $\min(p) = -90^\circ$  και  $\max(p) = 145^\circ$ .



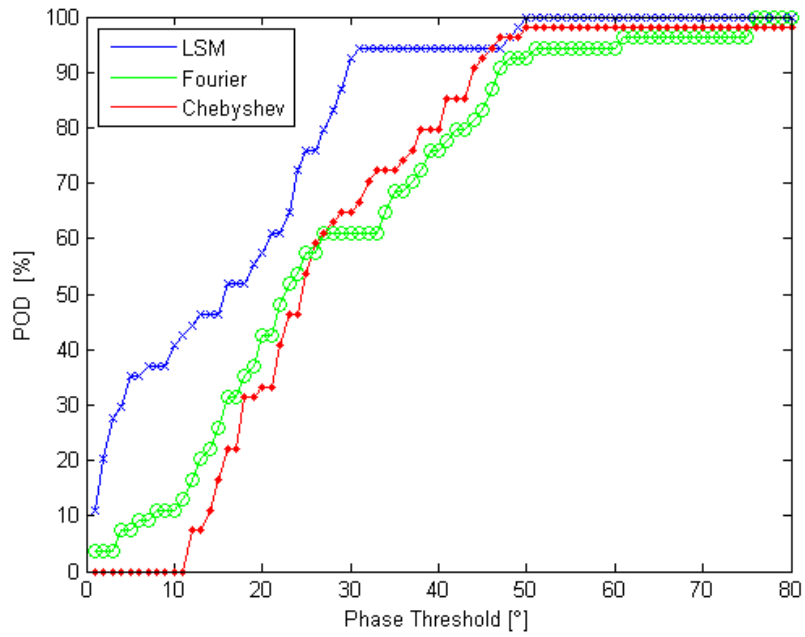
Σχήμα 5.7: Καμπύλη PoD με  $\min(p) = 0^\circ$  και  $\max(p) = 90^\circ$ .

Για τις καμπύλες τύπου PoD ως προς τη φάση θεωρούμε στην (3.2):  $\min(w) = w_q, 2 \cdot w_q, 3 \cdot w_q$ , όπου  $w_q = 0.02364$ ,  $\min(p) = 45^\circ, 44^\circ, 43^\circ, \dots - 35^\circ$  και  $\max(p) = 45^\circ, 46^\circ, 47^\circ, \dots 125^\circ$  αντίστοιχα. Το  $w_q$  είναι ίσο με το μικρότερο πλάτος όλων των μίξεων.

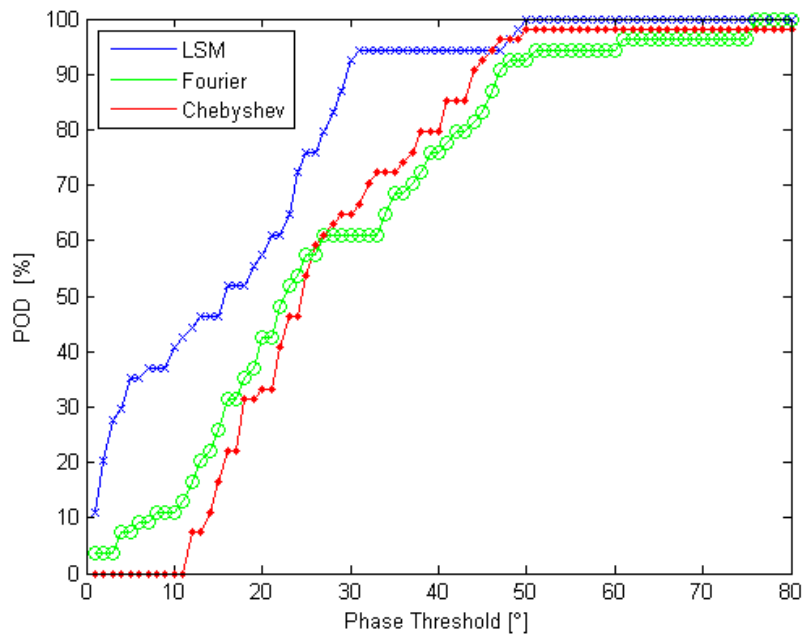
Σημαντικότερη από όλες τις καμπύλες είναι η 5.8, αφού τα σφάλματα στην  $f_{90}$  έχουν φάση από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$  και έτσι προκύπτει ο εντοπισμός τους και το πλάτος μας επιτρέπει μόνο να τα διαστασιολογήσουμε. Από αυτή προκύπτει πάλι ότι χειρότερη είναι μάλλον η μίξη με τη μέθοδο Fourier, αλλά δεν προκύπτει η καλύτερη μέθοδος μίξης. Αν και η καμπύλη της μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων είναι ψηλότερα από αυτή της Chebyshev, σε ένα εύρος γωνιών περίπου ίσο με  $\pm 50^\circ$  από τις  $45^\circ$ , δηλαδή από  $-5^\circ$  έως  $95^\circ$  έχουν και οι δύο 100% πιθανότητα ανίχνευσης.



Σχήμα 5.8: Καμπύλη PoD με  $\min(w) = w_q$ .



Σχήμα 5.9: Καμπύλη PoD με  $\min(w) = 2 \cdot w_q$ .



Σχήμα 5.10: Καμπύλη PoD με  $\min(w) = 3 \cdot w_q$ .



## Κεφάλαιο 6

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος καταστολής του σήματος πλάκας στήριξης στον έλεγχο σωλήνων εναλλακτών θερμότητας με τη μέθοδο των δινορρευμάτων. Η μέθοδος λειτουργεί στο πεδίο της συχνότητας και βασίζεται στη θεωρία των πολυωνύμων Chebyshev.

Η μέθοδος αυτή συγκρίθηκε με τις υπάρχουσες μεθόδους ως προς τη μορφή, το πλάτος, την φάση και τα σφάλματα των σημάτων της σε σχέση με αυτά των υφιστάμενων μεθόδων. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι είναι καλύτερη από τη μέθοδο Fourier και συγκρίσιμη με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων. Προκειμένου να εξαχθεί ένα τελικό συμπέρασμα είναι απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση του θέματος, πιθανώς με την εξαγωγή καμπύλων PoD με την προτεινόμενη μεθοδολογία [15, 16].

Με βάση τα παραπάνω, κρίνουμε ότι η μέθοδος μίξης Chebyshev λειτουργεί επιτυχώς και πιθανώς καλύτερα από την κυρίαρχη μέθοδο που χρησιμοποιείται στο βιομηχανικό όργανο. Προτείνουμε να διερευνηθεί και σε άλλες εφαρμογές, όπως ο έλεγχος μη σιδηρομαγνητικών σωλήνων άλλου υλικού, ο έλεγχος σιδηρομαγνητικών σωλήνων, ο έλεγχος μη σιδηρομαγνητικών σωλήνων με μη σιδηρομαγνητικές πλάκες στήριξης, ο έλεγχος σωλήνων με φυσικές και όχι τεχνητές ασυνέχειες και να χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία για πραγματικούς ελέγχους.

# Βιβλιογραφία

- [1] ASME. *ASME BPVC Section V: Nondestructive Examination*. ASME, 2010.
- [2] Μ. Κ. Κωτούζας. *Ταξινόμηση Ασυνεχειών*. ΤQCC, 1999.
- [3] Τ. Theodoulidis. *Θεωρία Δινορρευμάτων*. ΤQCC, 2010.
- [4] Τ. Theodoulidis. *Eddy Current Inspection of Heat Exchanger Tubing*. ΤQCC, 1999.
- [5] V.S. Cecco, G. Van Drunen, and F.L. Sharp. *Eddy Current Testing*. Atomic Energy of Canada Limited, 1987.
- [6] J. Stolte, L. Udpa, and W. Lord. Multifrequency eddy current testing of steam generator tubes using optimal affine transformation. pages 821--830, 1988.
- [7] I. Martinos and Th. Theodoulidis. Multi-frequency eddy current testing for heat exchanger tubes. In *5th International Conference on NDT of HSNT - IC MINDT*, 2013.
- [8] L. Udpa, W. Lord, and S.S. Udpa. Frequency domain methods for the analysis of multifrequency eddy current data. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pages 329--336. 1989.
- [9] J. P. Boyd. *Chebyshev and Fourier spectral methods*. Courier Corporation, 2001.
- [10] A. Gil, J. Segura, and N. Temme. *Numerical Methods for Special Functions*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [11] D. Disco. A guide to the fast fourier transform. URL: <http://www.mathworks.fr/matlabcentral/fileexchange/5654-a-guide-to-the-fft-2nd-edition-plus>, 2007.
- [12] K. B. Petersen, M. S. Pedersen, et al. The matrix cookbook. *Technical University of Denmark*, 450:7--15, 2008.
- [13] T. A. Driscoll, N. Hale, and L. N. Trefethen. *Chebfun guide*, 2014.
- [14] Γ. Ν. Ταγαράς. *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*. Εκδόσεις Ζήτη, 2001.
- [15] *Nondestructive evaluation system reliability assessment*. US Department of defense, 2009.
- [16] Jacobi Consulting Limited. *Probability of Detection (PoD) Curves*. Health and Safety Executive, 2006.