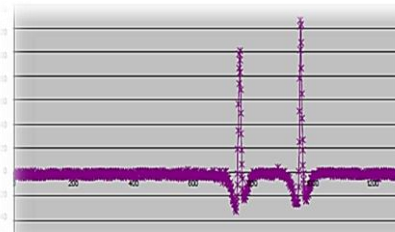
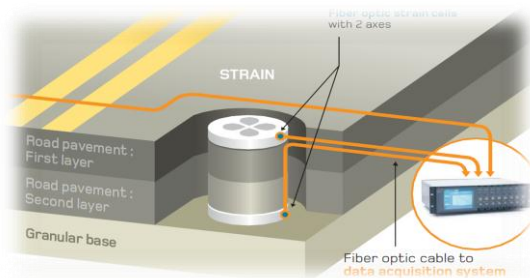
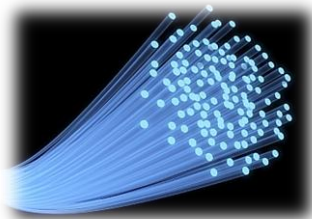




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΝΙΚΗΦΟΡΟΥ-ΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΣΩΤΗΡΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, φτάνοντας έτσι στο τέλος της φοιτητικής μου ζωής, οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και για την καθοδήγησή του, η οποία με βοήθησε να αντιληφθώ πολλά, ιδιαίτερα σε τεχνικά ζητήματα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, για την πολύ καλή συνεργασία μας και για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση που μου παρέιχε καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης και συγγραφής της εργασίας. Επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Παπαβασιλείου για την καθοδήγησή του κατά την έναρξη της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους Brad Cliatt και Τάσο Στεργίου, οι οποίοι με βοήθησαν σημαντικά με τις πολύτιμες πληροφορίες που δεν αρνήθηκαν να μοιραστούν μαζί μου.

Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση που μου παρέχει όλα αυτά τα χρόνια, οικονομική και ψυχολογική, τους φίλους μου και ιδιαίτερα τη Μαρία για τη στήριξή της και για τη σημαντική βοήθεια κατά τη συγγραφή της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η νέα τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών για την μέτρηση των επί τόπου παραμορφώσεων οδοστρώματος λόγω διέλευσης οχήματος, έτσι ώστε να διερευνηθεί η επί τόπου απόκριση του οδοστρώματος αλλά και να συγκριθεί με την αντίστοιχη υπολογισμένη από αναλυτικές μεθόδους. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε επί τόπου πείραμα σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου κατά το οποίο σύστημα αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών εγκαταστάθηκε στα κρίσιμα βάθη ενός οδοστρώματος, αποκατεστημένου με τη μέθοδο της ψυχρής ανακύκλωσης, για τη μελέτη της συμπεριφοράς του σε διαδοχικές διελεύσεις διαξονικού οχήματος. Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση του πειράματος μέσω αναλυτικών μεθόδων με παραμέτρους των στρώσεων που προέκυψαν από επί τόπου δειγματοληπτικούς ελέγχους και περεταίρω εργαστηριακές αναλύσεις. Η εξέταση σύγκλισης των πειραματικών και των αναλυτικών τιμών των παραμορφώσεων μπορεί να οδηγήσει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος καθώς και στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της απόκρισής του υπό τα φορτία κυκλοφορίας.

ABSTRACT

In the present thesis the new technology of fiber optic sensors was studied in the field of in situ pavement strain measurement due to vehicle transit, in order to investigate the actual pavement response, as well as to be compared to the one estimated by analytical methods. For this purpose an in situ experiment in a highway section was performed, in which system of fiber optic strain sensors was installed at the critical depths of the cold in place recycled pavement, so that the pavement behavior due to successive passes of a two-axle vehicle could be studied. Furthermore, the experiment was simulated through analytical methods, using layer parameters obtained by in situ sampling test and further laboratory analysis. The examining of the convergence of experimental and analytical strain values, can lead to better understanding of pavement behavior as well as to the development of models for pavement response prediction under traffic loads.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΑΙ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	3
2.1 Γενικά.....	3
2.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων	5
2.2.1 Ελαστικός ημιχώρος	5
2.1.2 Συστήματα επάλληλων στρώσεων.....	8
2.3 Υπολογισμός τάσεων-παραμορφώσεων	10
2.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι	10
2.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	10
2.4 Δοκιμές επί τόπου ελέγχου	13
2.4.1 Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer).....	13
2.4.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών (fiber optic strain sensors)	15
3. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	18
3.1 Γενικά για αισθητήρες οπτικών ινών	18
3.2 Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών	18
3.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων οπτικών ινών	19
3.4 Εφαρμογές σε θέματα πολιτικού μηχανικού	21
3.5 Αισθητήρες οπτικών ινών για έλεγχο οδοστρωμάτων	23
3.5.1 Γενικά.....	23
3.5.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών	24
3.5.3 Μετρητές παραμόρφωσης οδοστρωμάτων.....	30
3.5.4 Επί τόπου έλεγχος των μετρητών παραμόρφωσης	35
3.5.5 Συμπεράσματα	36
4. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑ	37
4.1 Περιγραφή του πειράματος	37
4.1.1 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος.....	37
4.1.2 Εγκατάσταση συστήματος αισθητήρων οπτικών ινών	39
4.2 Πρώτη σειρά δοκιμών 1K	43
4.3 Δεύτερη σειρά δοκιμών 2K	43
4.4 Χαρακτηριστικά οχήματος	44

4.5 Διεξαγωγή του πειράματος.....	45
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	48
5.1 Κωδικοποίηση παραμορφώσεων ανάλογα με τη θέση.....	48
5.2 Σχηματισμός διαγραμμάτων παραμόρφωσης-χρόνου.....	49
5.3 Διαδικασία αφαίρεσης θορύβου	50
5.4 Απόκλιση οχήματος.....	52
6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΠΡΟΤΥΠΑ.....	54
6.1 Καθορισμός δεδομένων	54
6.2 Υπολογισμός παραμορφώσεων	58
7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	62
7.1 Γραμμική συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων με χρήση του συντελεστή R^2	62
7.1.1 Σειρά δοκιμών 1K	63
7.1.2 Σειρά δοκιμών 2K	86
7.1.3 Συμπεράσματα	108
7.2 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.....	109
7.2.1 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K λόγω έμπροσθεν άξονα.....	110
7.2.2 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K λόγω όπισθεν άξονα.....	110
7.2.3 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 2K λόγω έμπροσθεν άξονα.....	111
7.2.4 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 2 λόγω όπισθεν άξονα.....	111
7.2.5 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειρών δοκιμών 1K και 2 K λόγω όπισθεν και έμπροσθεν άξονα.....	111
7.2.6 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K και 2 K στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	112
7.2.7 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K και 2 K στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης	112
7.2.8 Συμπεράσματα από τις δοκιμασίες t	113
7.3 Γραμμική συσχέτιση πειραματικής διαμήκους και εγκάρσιας παραμόρφωσης.....	113
7.3.1 Γραμμική συσχέτιση διαμήκους και εγκάρσιας επί τόπου παραμόρφωσης στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης	113
7.3.2 Γραμμική συσχέτιση διαμήκους και εγκάρσιας επί τόπου παραμόρφωσης στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	115

7.4 Τελικά συμπεράσματα στατιστικής επεξεργασίας	117
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	125

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος.....	4
Εικόνα 2.2 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ημι-άκαμπτου οδοστρώματος.....	4
Εικόνα 2.3 Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq-Σημειακό φορτίο.....	5
Εικόνα 2.4 Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις από κυκλικό φορτίο στον άξονα συμμετρίας.....	6
Εικόνα 2.5 α) Ακτινικές και β) εφαπτομενικές τάσεις λόγω κυκλικού φορτίου (after Foster and Ahlvin 1954).....	8
Εικόνα 2.6 Κρίσιμη θέση φόρτιση.....	8
Εικόνα 2.7 Επίδραση του λόγου E_1/E_2 στις οριζόντιες και κατακόρυφες τάσεις.....	9
Εικόνα 2.8 Τρισδιάστατη απεικόνιση συστήματος στρώσεων με πεπερασμένα στοιχεία.....	12
Εικόνα 2.9 Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD).....	14
Εικόνα 2.10 Λειτουργία αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών.....	16
Εικόνα 2.11 Κροσσοί συμβολής έντασης στην οθόνη H/Y.....	16
Εικόνα 3.1 Οπτική ίνα.....	19
Εικόνα 3.2 Βασικά στοιχεία ενός αισθητήρα οπτικής ίνας.....	20
Εικόνα 3.3 Κατάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών.....	20
Εικόνα 3.4 α) Επιφανειακά τοποθετημένοι αισθητήρες παραμόρφωσης ίνας στη δοκό μιας γέφυρας και β) ενσωμάτωση αισθητήρα σε πλάκα σκυροδέματος πριν την σκλήρυνση.....	22
Εικόνα 3.5 Αισθητήρας παραμόρφωσης οπτικών ινών Fabry-Perot.....	25
Εικόνα 3.6 Τεχνολογία συμβολομετρίας πόλωσης λευκού φωτός (WLPI).....	27
Εικόνα 3.7 Αποτέλεσμα συμβολόμετρου ανάγνωσης μετρημένο στη διάταξη γραμμικής φωτοανίχνευσης.....	28
Εικόνα 3.7 Προστατευτικό σώμα αισθητήρων.....	32
Εικόνα 3.8 Προστατευτικό σώμα ενσωματωμένο στον πυρήνα.....	32
Εικόνα 3.9 Μετρητές παραμόρφωσης έτοιμοι για εγκατάσταση στη στρώση ασφαλικού σκυροδέματος.....	33
Εικόνα 3.10 Εγκατάσταση του μετρητή παραμόρφωσης στην επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος.....	34
Εικόνα 3.11 Τυπικό σήμα από έναν αισθητήρα παραμόρφωσης τοποθετημένο εκ των υστέρων σε οδόστρωμα υπό τη φόρτιση κινούμενο διαξονικού φορτηγού.....	35
Εικόνα 4.1 Αρχική διατομή υπό μελέτη οδοστρώματος.....	37
Εικόνα 4.2 Επί τόπου ψυχρή ανακύκλωση εις βάθος με αφρώδη άσφαλτο.....	38
Εικόνα 4.3 Τελική διατομή, μετά την ανακύκλωση, υπό μελέτη οδοστρώματος.....	38
Εικόνα 4.4 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας α) πριν και β) μετά την ανακύκλωση.....	39
Εικόνα 4.5 Πυρηνοληψία με ειδικό μηχάνημα (καροτιέρα).....	40
Εικόνα 4.6 Πυρήνας με αισθητήρες οπτικών ινών μέσα σε προστατευτικό σώμα.....	40

<i>Εικόνα 4.7</i> Διάνοιξη αρμών για τα καλώδια των αισθητήρων οπτικών ινών.....	41
<i>Εικόνα 4.8</i> Εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών	42
<i>Εικόνα 4.9</i> Εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών - τομή.....	42
<i>Εικόνα 4.10</i> 1 ^η σειρά δοκιμών 1K.....	43
<i>Εικόνα 4.11</i> 2η σειρά δοκιμών 2	44
<i>Εικόνα 4.12</i> α) Έμπροσθεν και β) όπισθεν άξονας οχήματος	44
<i>Εικόνα 5.1</i> Σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών	49
<i>Εικόνα 5.2</i> Διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου.....	50
<i>Εικόνα 5.3</i> Καμπύλη α) πριν και β) μετά την αφαίρεση του θορύβου	51
<i>Εικόνα 5.4</i> Ακριβής εντοπισμός ίχνους τροχού	52
<i>Εικόνα 6.1</i> Παράμετροι των επί μέρους στρώσεων του υπό μελέτη οδοστρώματος	54
<i>Εικόνα 6.2</i> Στατικό πρότυπο α) έμπροσθεν και β) όπισθεν τροχού	55
<i>Εικόνα 6.3</i> Ανάλυση της δοκιμής 2 της σειράς 1K για φόρτιση του ανατολικού πυρήνα από τον έμπροσθεν άξονα του οχήματος (μονοί τροχοί)	58
<i>Εικόνα 6.4</i> Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του έμπροσθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 105 mm.....	59
<i>Εικόνα 6.5</i> Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του έμπροσθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 355 mm.....	59
<i>Εικόνα 6.6</i> Ανάλυση της δοκιμής 2 της σειράς 1K για φόρτιση του ανατολικού πυρήνα από τον όπισθεν άξονα του οχήματος (δίδυμοι τροχοί).....	60
<i>Εικόνα 6.7</i> Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του όπισθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 105 mm.....	60
<i>Εικόνα 6.8</i> Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του όπισθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 355 mm.....	61
<i>Εικόνα 7.1</i> Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	69
<i>Εικόνα 7.2</i> Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	70
<i>Εικόνα 7.3</i> Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)	71
<i>Εικόνα 7.4</i> Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)	72
<i>Εικόνα 7.5</i> Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	73

Εικόνα 7.6 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	74
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	75
Εικόνα 7.8 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	76
Εικόνα 7.9 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	77
Εικόνα 7.10 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)	78
Εικόνα 7.11 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	79
Εικόνα 7.12 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	80
Εικόνα 7.13 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	81
Εικόνα 7.14 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT)	82
Σχήμα 7.15 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT)	83
Εικόνα 7.16 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	84
Εικόνα 7.17 Ραβδόγραμμα παραμόρφωσης-συντελεστή R^2 σειράς δοκιμών 1K.....	85
Εικόνα 7.18 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	91
Εικόνα 7.19 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	92

Εικόνα 7.20 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)	93
Εικόνα 7.21 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)	94
Εικόνα 7.22 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	95
Εικόνα 7.23 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	96
Εικόνα 7.24 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	97
Εικόνα 7.25 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	98
Εικόνα 7.26 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	99
Εικόνα 7.27 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)	100
Εικόνα 7.28 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	101
Εικόνα 7.29 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB)	102
Εικόνα 7.30 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	103
Εικόνα 7.31 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών εγκάρσιων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT)	104
Εικόνα 7.32 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT)	105

Εικόνα 7.33 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών διαμήκων παραμορφώσεων λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	106
Εικόνα 7.35 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα.....	114
Εικόνα 7.36 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα.....	115
Εικόνα 7.37 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα.....	116
Εικόνα 7.38 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα.....	116

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εικόνα Π5.1 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 1-5).....	126
Εικόνα Π5.2 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-10).....	127
Εικόνα Π5.3 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 1-5).....	128
Εικόνα Π5.4 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-10).....	129
Εικόνα Π5.5 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 1-5).....	130
Εικόνα Π5.6 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 6-10).....	131
Εικόνα Π5.7 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT (δοκιμές 1-5).....	132
Εικόνα Π5.8 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-10).....	133
Εικόνα Π5.9 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 1-5).....	134
Εικόνα Π5.10 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 6-10).....	135
Εικόνα Π5.11 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 1-5).....	136
Εικόνα Π5.12 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 6-10).....	137
Εικόνα Π5.13 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 1-5).....	138
Εικόνα Π5.14 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 6-10).....	139

Εικόνα Π5.15 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 1-5)	140
Εικόνα Π5.16 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 6-10)	141
Εικόνα Π5.18 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-11)	143
Εικόνα Π5.19 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LB (δοκιμές 1-5)	144
Εικόνα Π5.20 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LB (δοκιμές 6-11)	145
Εικόνα Π5.21 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 1-5)	146
Εικόνα Π5.22 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 6-11)	147
Εικόνα Π5.23 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT (δοκιμές 1-5)	148
Εικόνα Π5.24 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT (δοκιμές 6-11)	149
Εικόνα Π5.25 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 1-5)	150
Εικόνα Π5.26 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 6-11)	151
Εικόνα Π5.27 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 1-5)	152
Εικόνα Π5.28 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 6-11)	153
Εικόνα Π5.29 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 1-5)	154
Εικόνα Π5.30 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 6-11)	155
Εικόνα Π5.31 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 1-5)	156
Εικόνα Π5.32 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 6-11)	157

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 4.1</i> Χαρακτηριστικά αξόνων οχήματος	45
<i>Πίνακας 5.1</i> Κωδικοποίηση μετρημένων παραμορφώσεων	48
<i>Πίνακας 5.2</i> Αποκλίσεις όπισθεν τροχού	53
<i>Πίνακας 6.1</i> Χαρακτηριστικά τροχών οχήματος	55
<i>Πίνακας 6.2</i> Αποκλίσεις 1 ^{ης} σειράς δοκιμών 1Κ.....	56
<i>Πίνακας 6.3</i> Αποκλίσεις 2 ^{ης} σειράς δοκιμών 2Κ.....	57
<i>Πίνακας 7.1</i> Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	64
<i>Πίνακας 7.2</i> Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB).....	64
<i>Πίνακας 7.3</i> Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	65
<i>Πίνακας 7.4</i> Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	65
<i>Πίνακας 7.5</i> Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	66
<i>Πίνακας 7.6</i> Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB)	66
<i>Πίνακας 7.7</i> Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	67
<i>Πίνακας 7.8</i> Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	67
<i>Πίνακας 7.9</i> Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	69
<i>Πίνακας 7.10</i> Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	70
<i>Πίνακας 7.11</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB).....	71
<i>Πίνακας 7.12</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB).....	72
<i>Πίνακας 7.13</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	73
<i>Πίνακας 7.14</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT)	74
<i>Πίνακας 7.15</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT).....	75
<i>Πίνακας 7.16</i> Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	76

Πίνακας 7.17 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)	77
Πίνακας 7.18 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	78
Πίνακας 7.19 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	79
Πίνακας 7.20 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	80
Πίνακας 7.21 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	81
Πίνακας 7.22 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT)	82
Πίνακας 7.23 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	83
Πίνακας 7.24 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	84
Πίνακας 7.25 Παραμόρφωση-συντελεστής R^2 σειράς δοκιμών 1K	85
Πίνακας 7.26 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	86
Πίνακας 7.27 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB).....	87
Πίνακας 7.28 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	87
Πίνακας 7.29 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT).....	88
Πίνακας 7.30 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	88
Πίνακας 7.31 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB)	89
Πίνακας 7.32 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	89
Πίνακας 7.33 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	90
Πίνακας 7.34 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	91
Πίνακας 7.35 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB).....	92
Πίνακας 7.36 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)	93
Πίνακας 7.37 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB).....	94

Πίνακας 7.38 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT).....	95
Πίνακας 7.39 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT)	96
Πίνακας 7.40 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT).....	97
Πίνακας 7.41 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)	98
Πίνακας 7.42 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)	99
Πίνακας 7.43 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB).....	100
Πίνακας 7.44 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	101
Πίνακας 7.45 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB).....	102
Πίνακας 7.46 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT).....	103
Πίνακας 7.47 Πειραματικές-αναλυτικές εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT)	104
Πίνακας 7.48 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	105
Πίνακας 7.49 Πειραματικές-αναλυτικές διαμήκεις παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT).....	106
Πίνακας 7.50 Παραμόρφωση-συντελεστής R^2 σειράς δοκιμών 2K	107

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π6.1 Αναλυτικές παραμορφώσεις σειράς δοκιμών 1K	158
Πίνακας Π6.2 Αναλυτικές παραμορφώσεις σειράς δοκιμών 2K	159
Πίνακας Π7.1 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού.....	160
Πίνακας Π7.2 Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν τροχού	162
Πίνακας Π7.3 Κατά ζεύγη πειραματικές και θεωρητικές παραμορφώσεις λόγω όπισθεν τροχού	162
Πίνακας Π7.4 Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω όπισθεν τροχού.....	164
Πίνακας Π7.5 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις λόγω έμπροσθεν τροχού	165
Πίνακας Π7.6 Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω έμπροσθεν τροχού.....	167

Πίνακας Π7.7 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις λόγω όπισθεν τροχού.....	168
Πίνακας Π7.8 Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω όπισθεν τροχού.....	170
Πίνακας Π7.9 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις.....	171
Πίνακας Π7.10 Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων.....	178
Πίνακας Π7.11 Σειρά δεδομένων 1Κ - Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	179
Πίνακας Π7.12 Σειρά δεδομένων 1Κ - Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	181
Πίνακας Π7.13 Σειρά δεδομένων 2Κ - Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	182
Πίνακας Π7.14 Σειρά δεδομένων 2Κ -Αποτελέσματα t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.....	184
Πίνακας Π7.15 Σειρά δεδομένων 1Κ - Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης.....	185
Πίνακας Π7.16 Σειρά δεδομένων 1Κ - Αποτελέσματα t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης.....	187
Πίνακας Π7.17 Σειρά δεδομένων 2Κ - Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης.....	188
Πίνακας Π7.18 Σειρά δεδομένων 2Κ - Αποτελέσματα t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης.....	190
Πίνακας Π7.19 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα.....	191
Πίνακας Π7.20 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα.....	192
Πίνακας Π7.21 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα.....	193
Πίνακας Π7.22 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα.....	194

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οδόστρωμα υπό την πίεση των αξονικών φορτίων της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών αναπτύσσει θλιπτικές και εφελκυστικές καταπονήσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αντίστοιχων παραμορφώσεων και υποχωρήσεων. Ο υπολογισμός των τάσεων-παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε ένα ασφαλτικό οδόστρωμα, επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες, όπως η θεωρία του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημιχώρου (Boussinesq) καθώς και η θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων εδραζόμενων επί ελαστικού εδαφικού ημιχώρου (Burmister). Εντούτοις, εύλογο είναι το ερώτημα κατά πόσο τα αποτελέσματα αυτών των υπολογιστικών μεθόδων συμπίπτουν με τις επί τόπου παραμορφώσεις του οδοστρώματος. Το ιδεώδες θα ήταν να ερευνώνται οι ιδιότητες των υλικών επί τόπου όπου υφίσταται ο συνδυασμός της επιβολής των τάσεων, όμως λόγω δυσκολιών στην εγκατάσταση και την παρακολούθηση και του υψηλού κόστους οι έρευνες περιορίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές ομοιωμάτων οδοστρώματων. Επομένως επιτακτική είναι η ανάγκη μέτρησης των επί τόπου (in situ) παραμορφώσεων του οδοστρώματος με όργανα υψηλής τεχνολογίας, ώστε να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε τις αντίστοιχες υπολογισμένες με αναλυτικές μεθόδους.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα νέο είδος αισθητήρα παραμόρφωσης βασισμένο στην τεχνολογία των οπτικών ινών το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί εκ των υστέρων σε ήδη υπάρχον οδόστρωμα, για την ακριβή μέτρηση των παραμορφώσεων των στρώσεων του οδοστρώματος υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Το σύστημα αυτό έχει προσαρμοσθεί για μετρήσεις οριζόντιας παραμόρφωσης σε ασφαλτικές και ανακυκλωμένες στρώσεις οδοστρώματος με πολλή μικρή διαταραχή του πεδίου των τάσεων. Επίσης, εκμηδενίζει τις τάσεις που επιβάλλονται στους αισθητήρες παραμόρφωσης κατά την κατασκευή του οδοστρώματος μεγιστοποιώντας έτσι το βαθμό επιτυχίας της μέτρησης.

Στα πλαίσια των ευρύτερων ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου πραγματοποιήθηκε επί τόπου πείραμα σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου, κατά το οποίο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών εγκαταστάθηκε σε διαφορετικά βάθη ήδη υπάρχοντος οδοστρώματος. Το οδόστρωμα είχε αποκατασταθεί με τη μέθοδο της ψυχρής ανακύκλωσης με αφρώδη ασφαλτο. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές διελεύσεις οχήματος προκειμένου να μετρηθεί η απόκριση της ασφαλτικής και της ανακυκλωμένης στρώσης στη συγκεκριμένη φόρτιση μέσω του συστήματος των αισθητήρων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η νέα τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών, η αρχή λειτουργίας τους και οι εφαρμογές τους στον τομέα του πολιτικού μηχανικού και ιδιαίτερα στην αξιολόγηση της εντατικής κατάστασης της ασφαλικής και της ανακυκλωμένης στρώσης ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Το τελευταίο αναλύεται στην περιγραφή του επί τόπου πειράματος του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. για τον έλεγχο της παραμόρφωσης υπάρχοντος οδοστρώματος μέσω εγκατεστημένου συστήματος αισθητήρων οπτικών ινών. Τέλος με δειγματοληπτικούς ελέγχους από το επί τόπου πείραμα προσδιορίστηκαν οι παράμετροι της εκάστοτε στρώσης και έγινε προσπάθεια προσομοίωσης του πειράματος μέσω αναλυτικών προτύπων, ώστε να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

Πέραν του παρόντος κεφαλαίου, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από:

- Το δεύτερο κεφάλαιο όπου αναφέρονται μέθοδοι πρόβλεψης και υπολογισμού των παραμορφώσεων σε εύκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα.
- Το τρίτο κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται η λειτουργία και οι εφαρμογές των οπτικών ινών στο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού με έμφαση στα οδοστρώματα.
- Το τέταρτο κεφάλαιο όπου περιγράφεται το επί τόπου πείραμα μέτρησης της παραμόρφωσης ενός συγκεκριμένου οδοστρώματος με αισθητήρες οπτικών ινών.
- Το πέμπτο κεφάλαιο όπου γίνεται επεξεργασία των επί τόπου μετρημένων παραμορφώσεων.
- Το έκτο κεφάλαιο όπου προσομοιώνεται το επί τόπου πείραμα με τη βοήθεια λογισμικών ηλεκτρονικού υπολογιστή και υπολογίζονται οι αναλυτικές τιμές των παραμορφώσεων του υπό μελέτη οδοστρώματος.
- Το έβδομο κεφάλαιο όπου γίνεται στατιστική σύγκριση των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων.
- Το όγδοο κεφάλαιο όπου αναφέρονται κάποια γενικά συμπεράσματα για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων μέσω των αισθητήρων οπτικών ινών.
- Το παράρτημα το οποίο περιλαμβάνει τα διαγράμματα και τους πίνακες του επί τόπου πειράματος, των αναλυτικών υπολογισμών και της στατιστικής επεξεργασίας.

2. ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΑΙ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Γενικά

Έχει καθιερωθεί η διάκριση των οδοστρωμάτων σε δύο κατηγορίες, τα εύκαμπτα και δύσκαμπτα (άκαμπτα). Σήμερα όμως με τη σημαντική αύξηση της χρησιμοποίησης στρώσεων από σταθεροποιημένα ή κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες υλικά μπορεί να θεωρηθεί μία ενδιάμεση κατηγορία, αυτή των ημι-άκαμπτων (ημι-εύκαμπτων) οδοστρωμάτων.

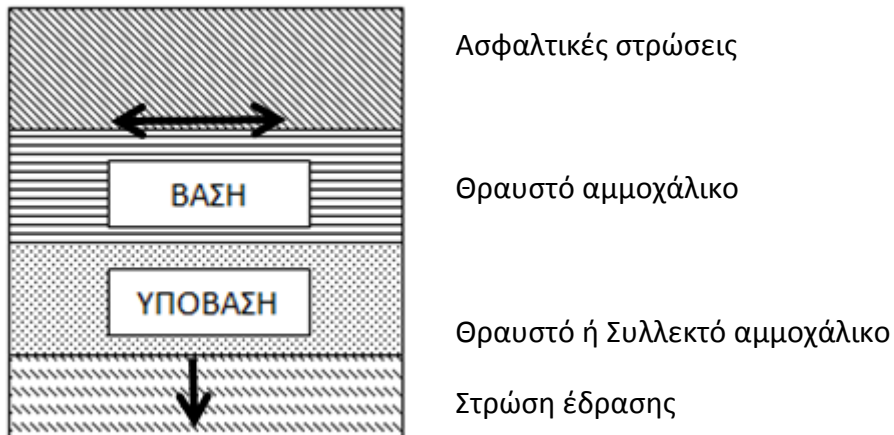
Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από [Λοΐζος 2008]:

- Την ασφαλτική επίστρωση, που κατασκευάζεται από στρώσεις ασφαλτομίγματος
- Τη στρώση βάσης που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό ή φυσικό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης
- Τη στρώση έδρασης

Τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από [Λοΐζος 2008]:

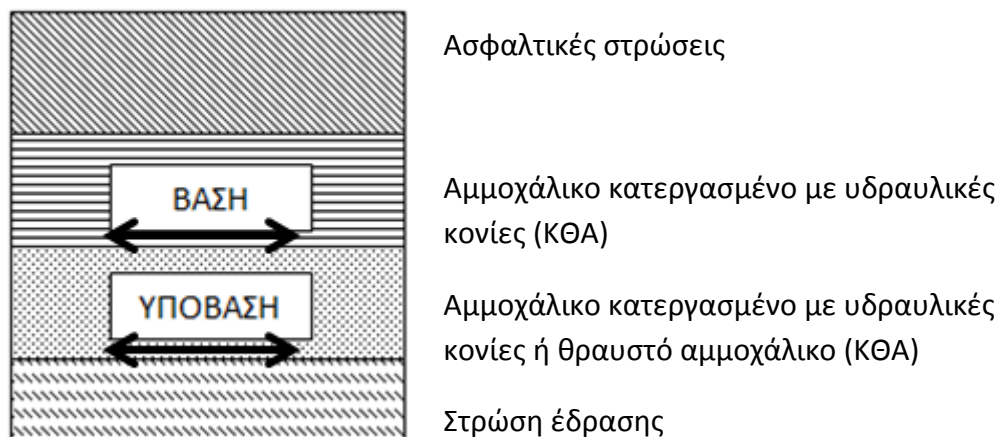
- Την επίστρωση, που κατασκευάζεται από μία ή περισσότερες στρώσεις ασφαλτομίγματος
- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από αμμοχάλικο κατεργασμένο (σταθεροποιημένο) με υδραυλικές κονίες (π.χ. τσιμέντο)
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης ή από κατεργασμένο (σταθεροποιημένο) αμμοχάλικο ή εδαφικό υλικό

Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στις παραπάνω κρίσιμες θέσεις είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις αντίστοιχα (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Σε αντίθεση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι κρίσιμες θέσεις του ημι-άκαμπτου οδοστρώματος όπου αναπτύσσεται εντατική κατάσταση που θα επιφέρει αστοχία δεν είναι η κατώτερη επιφάνεια των ασφαλτικών στρώσεων ούτε η επιφάνεια της στρώσης έδρασης, αλλά η κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων με κρίσιμο μέγεθος την εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ημι-άκαμπτου οδοστρώματος

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπό την επίδραση φορτίου P , ακτίνας a , εξαρτώνται από τους λόγους των μέτρων ελαστικότητας και τους λόγους του Poisson. Οι παραμορφώσεις εξαρτώνται από το φορτίο, την ακτίνα του φορτίου, τα πάχη των στρώσεων, τα μέτρα ελαστικότητας και το λόγο του Poisson.

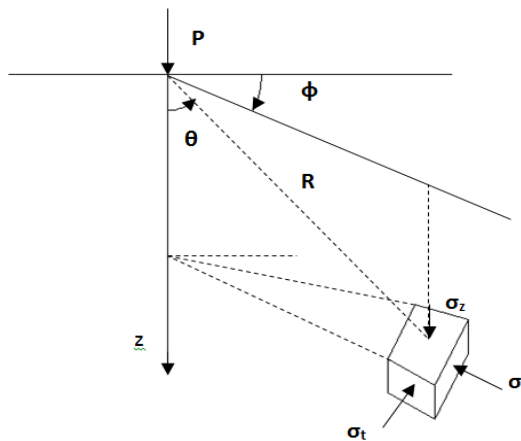
Επομένως ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα αποτελεί βασική προϋπόθεση και επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιείται κυρίως η θεωρία του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημιχώρου (Boussinesq), καθώς και η θεωρία των πολλαπλών ελαστικών

στρώσεων εδραζόμενων επί ελαστικού εδαφικού ημιχώρου (Burmister) [Λοΐζος 2008].

2.2 Διερεύνηση συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων

2.2.1 Ελαστικός ημιχώρος

Η θεωρία Boussinesq αναπτύχθηκε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα. Η θεωρία αυτή αποτελεί τη βάση ανάπτυξης όλων των μεταγενέστερων θεωριών για κατανομές τάσεων. Σύμφωνα με τον Boussinesq για ανελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό, του οποίου η μάζα εκτείνεται στο άπειρο και κατά τις δύο διευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη), οι τάσεις που εξασκούνται σε οποιοδήποτε σημείο υπό την επίδραση σημειακού φορτίου μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω θεμελιώδεις εξισώσεις [Λοΐζος 2008]:



Εικόνα 2.3 Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq-Σημειακό φορτίο

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \theta \quad \text{για } \theta=0 \quad \sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (R = z) \quad (2.1)$$

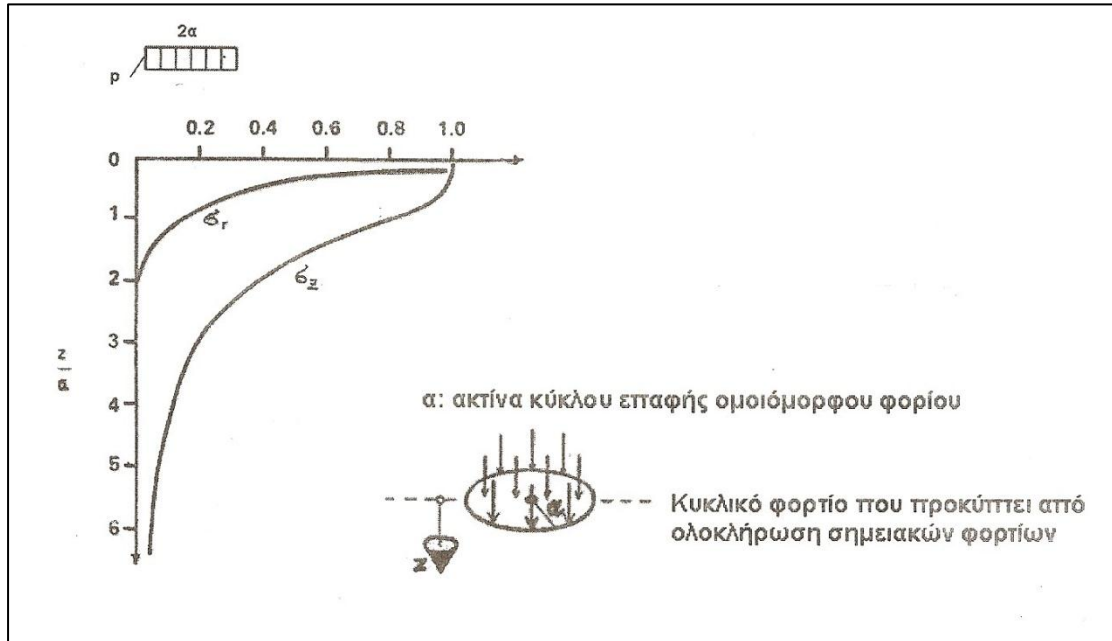
$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R} \left(\frac{3\cos\theta \sin^2\theta - (1-2\nu)}{1+\cos\theta} \right) \quad (2.2)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{2\pi R^2} (1 - 2\nu) \left(\frac{-\cos\theta + 1}{1+\cos\theta} \right) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} (3\cos^3\theta - 2\nu\cos\theta) \quad \text{για } \theta=0 \quad \varepsilon_z = (1 + \nu)(3 - 2\nu) \frac{P}{2\pi z^2 E} \quad (2.4)$$

$$w_z = (1 + \nu) \frac{P}{2\pi R E} (2(1 - \nu) + \cos^2\theta) \quad (2.5)$$

Στην περίπτωση που εξασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο οι αντίστοιχες τάσεις εξάγονται από ολοκλήρωση των παραπάνω σχέσεων. Για την ειδική περίπτωση επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου κυκλικής διατομής (η διατομή που λαμβάνεται σε φορτίσεις οδοστρωμάτων), οι τάσεις σε οποιοδήποτε βάθος z πάνω στον άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν)[Λοΐζος 2008]:



Εικόνα 2.4 Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις από κυκλικό φορτίο στον άξονα συμμετρίας

Στον κατακόρυφο άξονα διά του κέντρου του φορτίου:

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right)^{3/2}} \right] \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{p(1+\nu)}{E} \left[\frac{z/a}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{3/2}} - (1 - 2\nu) \left[\frac{z/a}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2}} - 1 \right] \right] \quad (2.7)$$

$$\sigma_t = \sigma_r = p \left[\frac{1+2\nu}{2} - \frac{1+\nu}{\left[1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right]^{1/2}} + \frac{1}{2\left[1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \right] \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[\frac{1-\nu}{2\nu} (\sigma_z - E\varepsilon_z) - \nu\sigma_z \right] \quad (2.9)$$

$$w_z = \frac{(1+\nu)pa}{E} \left[\frac{1}{\left[1+\left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2}} + (1-2\nu) \left\{ \left(1+\left(\frac{z}{a}\right)^2\right)^{1/2} - \frac{z}{a} \right\} \right] \quad (2.10)$$

όπου:

σ_z : η κατακόρυφη τάση

ϵ_z : η κατακόρυφη παραμόρφωση

σ_r : η ακτινική οριζόντια τάση

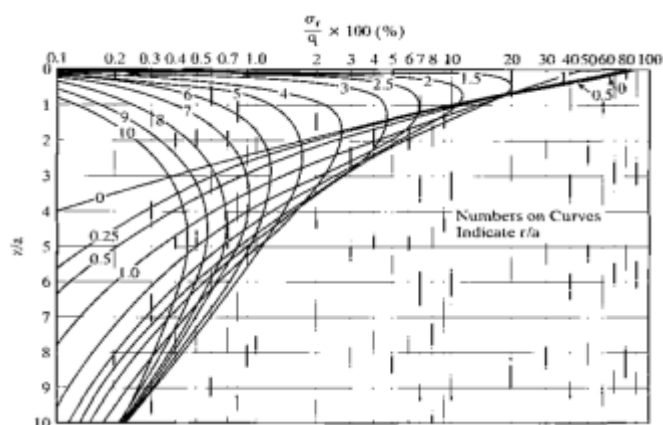
ϵ_r : η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση

σ_t : η εφαπτομενική οριζόντια τάση

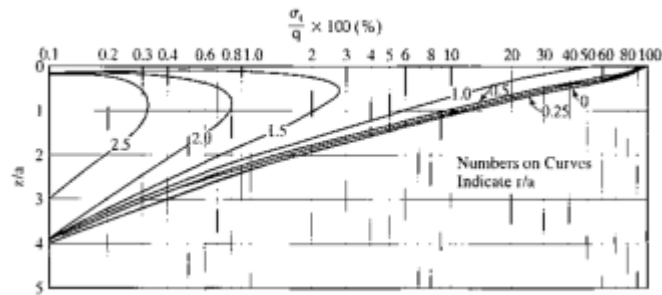
ϵ_t : η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση

w_z : η υποχώρηση

Οι Foster and Ahlvin (1954) παρουσίασαν διαγράμματα για τον καθορισμό της κατακόρυφης, της ακτινικής, της εφαπτομενικής και της διατμητικής τάσης και της κατακόρυφης υποχώρησης. Το φορτίο q εφαρμόζεται σε μία κυκλική επιφάνεια με ακτίνα a . Λόγω του ότι ο λόγος του Poisson έχει σχετικά μικρή επιρροή στις τάσεις και τις υποχωρήσεις, οι Foster and Ahlvin υπέθεσαν ότι ο ημιχώρος είναι ασυμπίεστος με λόγο Poisson 0.5 και επομένως αρκεί μία ομάδα διαγραμμάτων αντί για μία για κάθε λόγο του Poisson. Στη συνέχεια αυτό το έργο τελειοποιήθηκε από τους Ahlvin and Ulery (1962) οι οποίοι παρουσίασαν μία σειρά από εξισώσεις και πίνακες έτσι ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι υποχωρήσεις για κάθε λόγο του Poisson [Huang 2004].



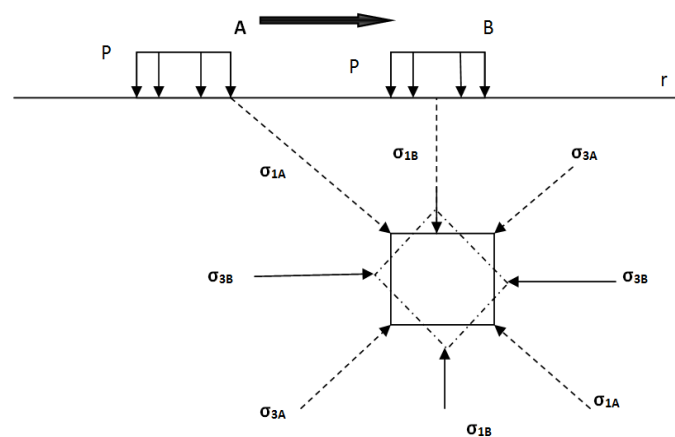
α)



β)

Εικόνα 2.5 α) Ακτινικές και **β)** εφαπτομενικές τάσεις λόγω κυκλικού φορτίου (after Foster and Ahlvin 1954)

Η κρίσιμη θέση φόρτισης για το κινούμενο φορτίο A είναι η χαρακτηριστική θέση B (κατακόρυφος άξονας, $r=0$) (εικόνα 2.5). Στη θέση αυτή οι ορθές τάσεις μετατρέπονται σε κύριες (σ_1, σ_3) [Λοΐζος 2008].



Εικόνα 2.6 Κρίσιμη θέση φόρτισης

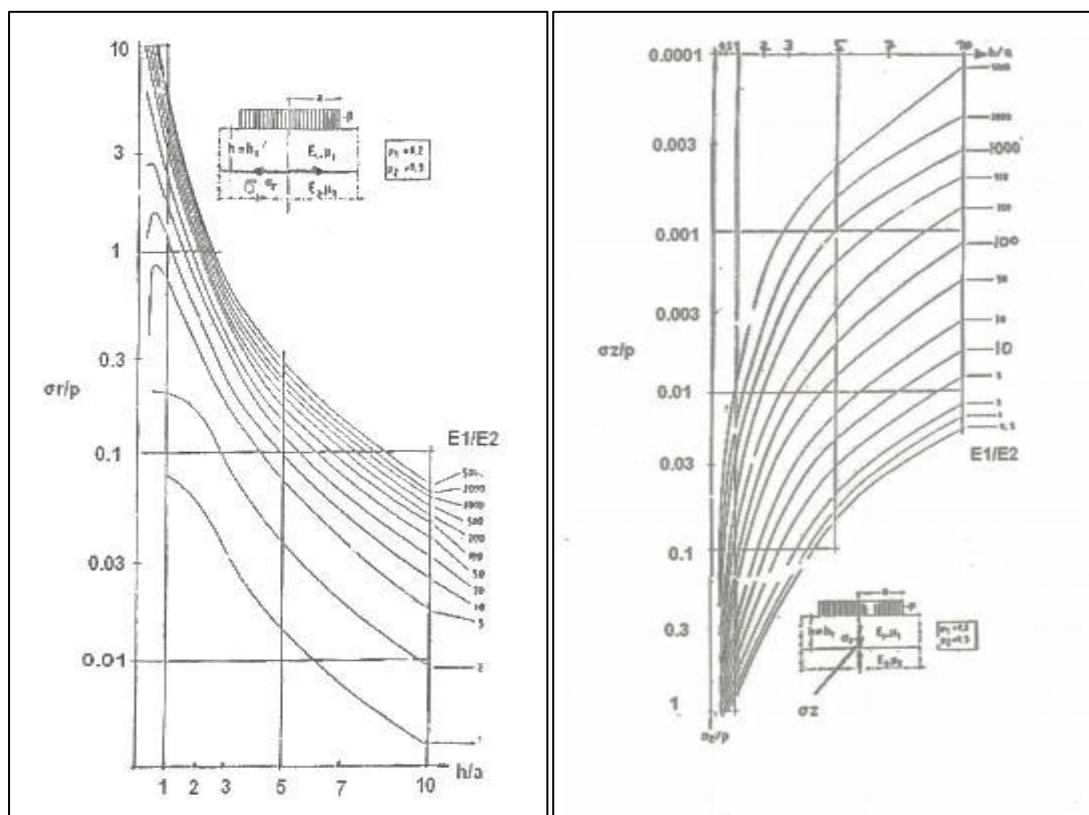
2.1.2 Συστήματα επάλληλων στρώσεων

Η μετάβαση από τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου (Boussinesq) στη θεωρία δύο ή τριών επάλληλων στρώσεων ενός οδοστρώματος βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή των γραμμικώς ελαστικών μέσων (Burmister).

Τα συνηθισμένα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από στρώσεις ώστε τα μέτρα ελαστικότητας να ελαττώνονται με το βάθος. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των τάσεων και των υποχωρήσεων στο υπέδαφος σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν σε ιδεατό ομοιογενές μέσο.

Λύσεις του προβλήματος με συνθήκες που προσεγγίζουν τις πραγματικές έχουν επιτευχθεί από τον Burmister. Κατά τη λύση του προβλήματος δύο στρώσεων γίνονται ορισμένες αναγκαίες παραδοχές σχετικά με τις οριακές συνθήκες και τις συνθήκες συνέχειας. Τα υλικά των στρώσεων υποτίθεται ότι είναι ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά. Η επιφανειακή στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο. Η υποκείμενη στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο πλευρικά και κατακόρυφα.

Οι οριακές συνθήκες και οι συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση να μην υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός περιοχής φόρτισης.



Εικόνα 2.7 Επίδραση του λόγου E_1/E_2 στις οριζόντιες και κατακόρυφες τάσεις

Σύμφωνα με την εικόνα 2.7, παρατηρούμε ότι αύξηση του λόγου E_1/E_2 , όπου το E_1 είναι το μέτρο ελαστικότητας της υπερκείμενης στρώσης και το E_2 το μέτρο ελαστικότητας της υποκείμενης στρώσης, η κατακόρυφη τάση μειώνεται ενώ η οριζόντια τάση σ_r αυξάνεται. Η εύρεση της βέλτιστης επίλυσης είναι συνδυασμός πολλών παραμέτρων όπως θέματα ανάλυσης και διαστασιολόγησης οδοστρώματος, θέματα σχεδιασμού και συνθέσεως μιγμάτων και θέματα τεχνολογίας υλικών και κατασκευών [Λοΐζος 2008].

Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πολλαπλασιάζει τις δυσκολίες προσδιορισμού των τάσεων και παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν

αδύνατη η ύπαρξη νομογραφημάτων ή πινάκων που να καλύπτουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταβολής των χαρακτηριστικών των στρώσεων. Εάν στην παραπάνω δυσκολία προστεθεί και ο πραγματικός τρόπος φόρτισης των οδοστρώματων (περισσότερες από μία επιφανειακές φορτίσεις, δίδυμοι τροχοί, διαξονικοί δίδυμοι τροχοί κλπ) τότε είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις από πίνακες ή νομογραφήματα. Σήμερα με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι υπολογισμοί των τάσεων και των παραμορφώσεων γίνονται με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων που στηρίζονται στη θεωρία πολλαπλών στρώσεων αλλά και στην αρχή των πεπερασμένων στοιχείων [Λοΐζος 2008].

2.3 Υπολογισμός τάσεων-παραμορφώσεων

2.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Στις αναλυτικές μεθόδους χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως λογισμικά ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των στρώσεων του Burmister και χρησιμοποιούνται τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Ένα γνωστό πρόγραμμα για τον υπολογισμό εύκαμπτου οδοστρώματος είναι το KENLAYER. Η βάση του KENLAYER είναι η επίλυση ενός συστήματος πολλαπλών στρώσεων υπό φορτίο κατανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια επαφής. Οι επιλύσεις υπερτίθενται για πολλαπλούς τροχούς, εφαρμόζονται επαναληπτικά για μη γραμμικές στρώσεις και παρατίθενται σε διάφορες χρονικές στιγμές για βισκοελαστικές στρώσεις. Το KENLAYER μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα επάλληλων στρώσεων υπό μονό, δίδυμο ή τρίδυμο άξονα με ένα ή δύο ελαστικούς τροχούς εκατέρωθεν, με κάθε στρώση να συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά, ή μη γραμμικώς ελαστικά, ή βισκοελαστικά. Υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης φθορών (damage analysis) διαιρώντας κάθε χρόνο σε 12 περιόδους το μέγιστο, κάθε μία με διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Κάθε περίοδος μπορεί να έχει το μέγιστο 12 ομάδες φορτίων είτε μονών είτε πολλαπλών. Η φθορά που προκαλείται από ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και μόνιμες παραμορφώσεις σε κάθε περίοδο από όλες τις ομάδες φορτίων, αθροίζεται ώστε να αξιολογηθεί η ζωή σχεδιασμού του οδοστρώματος [Huang 2004].

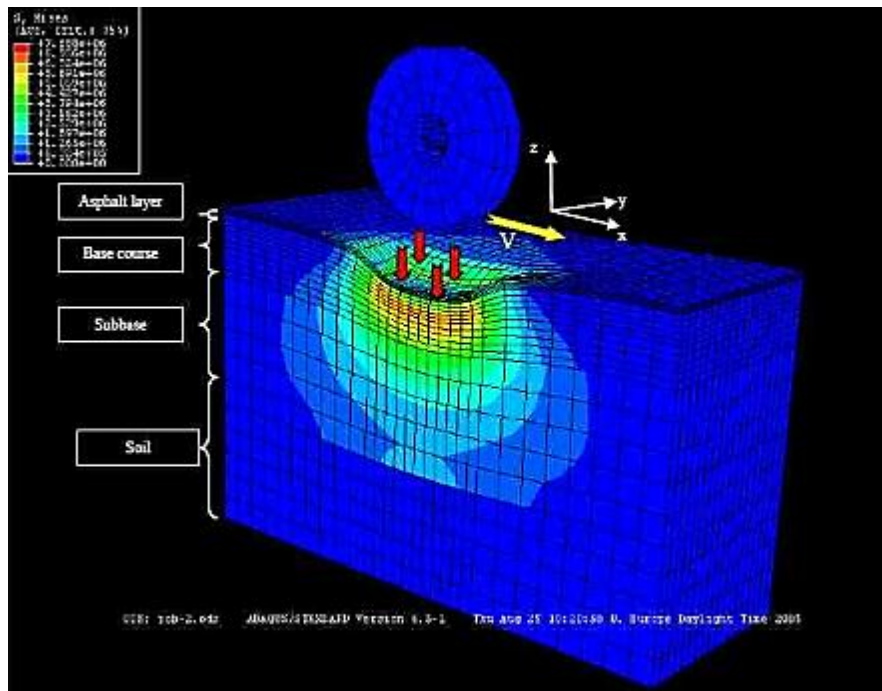
2.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία τεχνική αριθμητικής ανάλυσης για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε μία ποικιλία προβλημάτων του πολιτικού μηχανικού. Σε ένα πρόβλημα που αφορά μία συνεχή μάζα, οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν λαμβάνουν ένα τεράστιο αριθμό τιμών καθότι αποτελούν συναρτήσεις κάθε σημείου στο συνεχές. Επομένως η τάση σε ένα στοιχείο στο

οδόστρωμα δε μπορεί να υπολογιστεί μόνο από μία απλή εξίσωση, επειδή οι συναρτήσεις που περιγράφουν την τάση του αναφέρονται αποκλειστικά στη συγκεκριμένη θέση. Εντούτοις, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαιρέσει το συνεχές, δηλαδή τον όγκο ενός οδοστρώματος, σε έναν αριθμό μικρών διακριτών όγκων προκειμένου να καταλήξουμε σε μία προσεγγιστική αριθμητική λύση για κάθε όγκο, αντί μίας ακριβούς λύσης κλειστού τύπου για όλο το οδόστρωμα.

Στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ενός οδοστρώματος, η περιοχή ενδιαφέροντος, το οδόστρωμα και η στρώση έδρασης, διαιρείται σε έναν αριθμό στοιχείων με τα φορτία των τροχών στην κορυφή της περιοχής (εικόνα 2.8). Τα πεπερασμένα στοιχεία εκτείνονται οριζόντια και κάθετα από τον τροχό, ώστε να συμπεριληφθεί όλη η περιοχή ενδιαφέροντος που βρίσκεται υπό την επιρροή του τροχού [Pavement Interactive 2008].

Η προσέγγιση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιεί ένα πιο περίπλοκο μαθηματικό μοντέλο από τη μέθοδο των ελαστικών στρώσεων και έτσι γίνονται λιγότερες υποθέσεις. Γενικά πρέπει να υποτεθούν ορισμένες περιοριστικές τιμές στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα το πρόγραμμα EverFlex που σχεδιάστηκε από τους Hongyo Wu and George Turkiyyah στο πανεπιστήμιο της Washington (Wu 2001), χρησιμοποιεί στοιχεία θεμελίωσης έξι κόμβων (six-noded) ώστε να προσομοιάσει τη θεμελίωση του Winkler. Επιπλέον, χρησιμοποιεί απλές στηρίξεις στις τέσσερις πλευρές του μοντέλου του εύκαμπτου οδοστρώματος. Η επιλογή της γεωμετρίας του στοιχείου, μέγεθος και σχήμα, όπως και οι συναρτήσεις παρεμβολής επηρεάζουν επίσης την τελική συμπεριφορά του προσομοιώματος.



Εικόνα 2. 8 Τρισδιάστατη απεικόνιση συστήματος στρώσεων με πεπερασμένα στοιχεία

Μία τυπική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα [Huebner et al.,2001]:

- **Διαίρεση του συνεχούς:** Η περιοχή ενδιαφέροντος διαιρείται σε μικρά διακριτά στοιχεία.
- **Επιλογή συναρτήσεων παρεμβολής:** Επιλέγονται οι κόμβοι σε κάθε στοιχείο και στη συνέχεια η συνάρτηση που θα παρεμβάλει την παραλλαγή της μεταβλητής στο διακριτό στοιχείο.
- **Εύρεση των ιδιοτήτων των στοιχείων:** Χρησιμοποιείται το καθορισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (τα στοιχεία και της συναρτήσεις παρεμβολής) για να καθοριστούν οι εξισώσεις των πινάκων που εκφράζουν τις ιδιότητες των ανεξάρτητων στοιχείων.
- **Συγκέντρωση των ιδιοτήτων των στοιχείων ώστε να προκύψουν οι εξισώσεις του συστήματος:** Οι εξισώσεις των πινάκων συνδυάζονται εκφράζοντας τη συμπεριφορά των στοιχείων και σχηματίζουν την εξίσωση πίνακα που εκφράζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος.
- **Ορισμός των συνοριακών συνθηκών:** Ορίζονται τιμές για συγκεκριμένες μεταβλητές σε κομβικές θέσεις ορίων (π.χ. ο πυθμένας και οι πλευρές της περιοχής προς ανάλυση)
- **Επίλυση του συστήματος εξισώσεων:** Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε μία ομάδα ταυτόχρονων εξισώσεων που μπορούν να επιλυθούν.
- **Επιπλέον υπολογισμοί. Οι άγνωστες τιμές είναι οι μετατοπίσεις:** Από αυτές μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.

Τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι τα ίδια με αυτά του ελαστικού μοντέλου στρώσεων, δηλαδή τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Επιπλέον τα πεπερασμένα στοιχεία επιτρέπουν μια εξαιρετική γραφική απεικόνιση αυτών των τιμών [Pavement Interactive 2008].

2.4 Δοκιμές επί τόπου ελέγχου

2.4.1 Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer)

Για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν διάφορα συστήματα συλλογής στοιχείων τα οποία διαφέρουν κυρίως ως προς τον τρόπο επιβολής του φορτίου (δυναμικό ή στατικό) επί του οδοστρώματος και τη μεθοδολογία καταγραφής. Το πιο εξελιγμένο σύστημα αποτελεί το FWD (Falling Weight Deflectometer). Το σύστημα Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD) του Ε.Μ.Π. χρησιμοποιείται για την καταγραφή στοιχείων του οδοστρώματος, με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Αναλυτικότερα, η βασική λειτουργία του συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε έναν κυκλικό δίσκο, ο οποίος είναι σε επαφή με το οδόστρωμα. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού. Για παράδειγμα, η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 msec [Λοΐζος 2008].

Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα εφαρμογής επί τόπου δοκιμών με το FWD. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Οι ελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κ.λ.π) είναι δυνατό να δώσουν μία πλήρη πληροφόρηση για τη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 2.9 Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται μετρήσεις, όπως οποίες και καταγράφει το FWD: 1) όπως θερμοκρασίας του αέρα και 2) όπως θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος με χρήση υπερύθρων. Επιπλέον, απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων, ο οποίος γίνεται με οπή στο οδόστρωμα και θερμόμετρο. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τις σχετικές διερευνήσεις, δεδομένου ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση των οδοστρωμάτων, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις του οδοστρώματος με το FWD μπορούν να συνδυαστούν με άλλα στοιχεία για τον προσδιορισμό της δομικής του κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται ο προσδιορισμός του πάχους των στρώσεων και άλλα στοιχεία, όπως είναι τα υλικά του οδοστρώματος, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και θερμοκρασιακά δεδομένα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των επί μέρους στρώσεων του οδοστρώματος μέσω του ανάστροφου υπολογισμού (backanalysis) με χρήση ειδικών λογισμικών

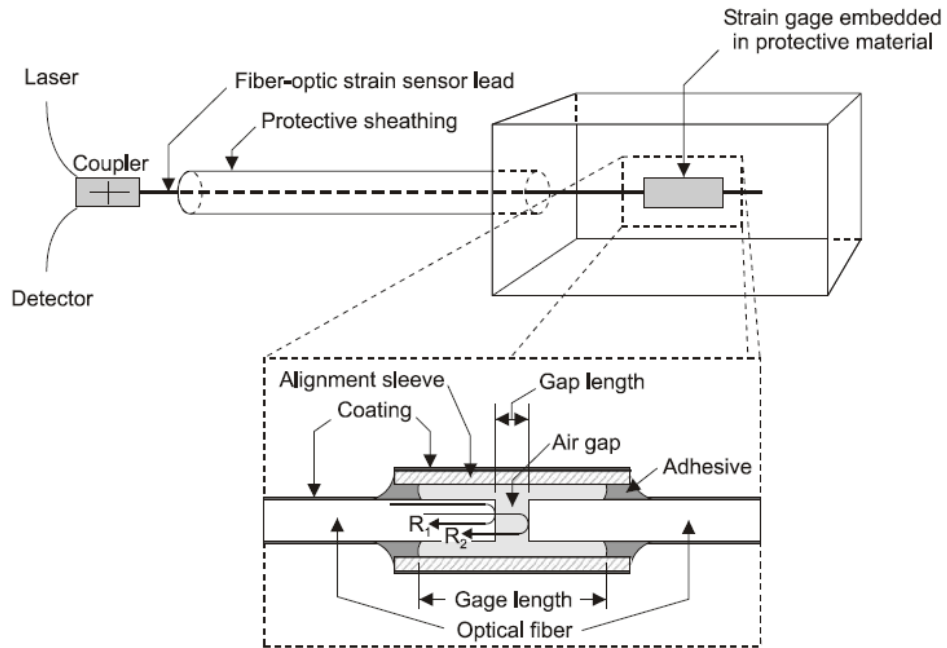
Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το σύστημα FWD αλλά και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίζονται ή μετρούνται επί τόπου (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ) ενεργοποιούνται οι αλγόριθμοι ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών για την εκτίμηση της φέρουσας

ικανότητας. Με την παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής του κατάστασης. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα τα απαιτούμενα στοιχεία ενεργοποίησης των αλγορίθμων ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των επί μέρους στρώσεων του οδοστρώματος, ο προσδιορισμός της δομικής του κατάστασης πραγματοποιείται με βάση τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το σύστημα FWD [Λοΐζος 2008].

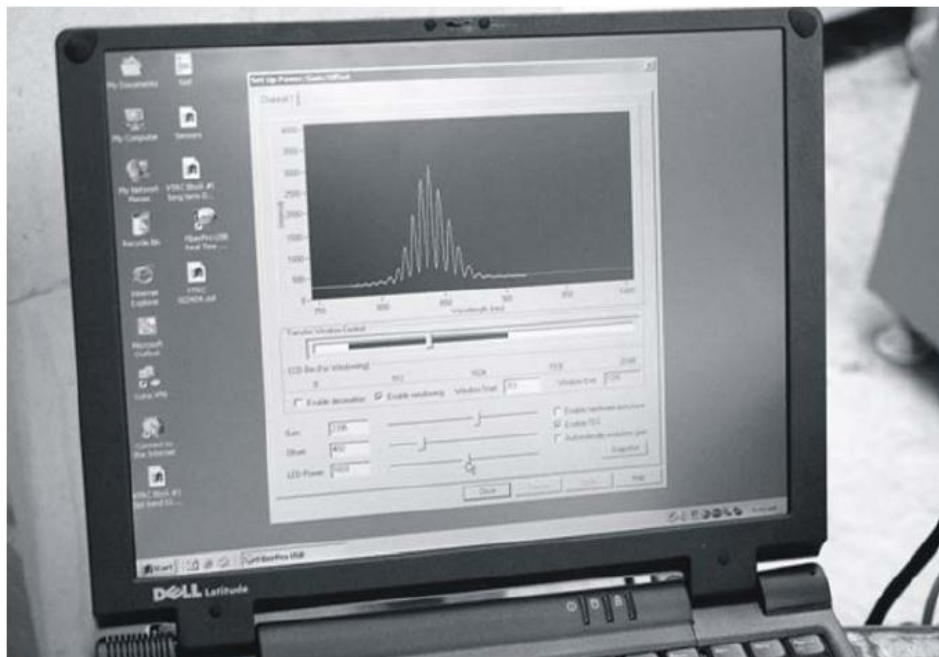
2.4.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών (fiber optic strain sensors)

Οι αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών αποτελούν μία νέα εξελιγμένη τεχνολογία μη καταστρεπτικών δοκιμών. Με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού μπορούν να εγκατασταθούν αισθητήρες οπτικών ινών σε κρίσιμες θέσεις ενός υφιστάμενου οδοστρώματος, οι οποίοι παρέχουν την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Τα βασικά πλεονεκτήματα έναντι των απλών ηλεκτρικών αισθητήρων είναι η ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, οι μικρές διαστάσεις, η μεγάλη ευαισθησία και η δυνατότητα λειτουργίας υπό δυσμενείς συνθήκες.

Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης με αισθητήρες οπτικών ινών, η μονάδα διατήρησης σήματος (signal conditioning unit) μετράει το μήκος του οπτικού δρόμου μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών. Αυτές οι επιφάνειες δημιουργούνται σε κάθε διεπαφή αέρα-γυαλιού στο εσωτερικό του αισθητήρα, που φαίνεται στην εικόνα 2.10 ως R_1 και R_2 . Επομένως, ένα μέρος του αρχικά εκπεμπόμενου φωτός από το λέιζερ στον αισθητήρα ανακλάται πίσω μέσω της ίνας και του οπτικού ζεύκτη (coupler) λόγω ανακλάσεων των R_1 και R_2 . Η αλληλεπίδραση μεταξύ εκπεμπόμενου και ανακλασμένου φωτός δημιουργεί σχέδια κροσσών συμβολής έντασης (εικόνα 2.11), τα οποία καταγράφονται από τον ανιχνευτή (detector). Αυτά τα σχέδια συνδέονται με την απόσταση μεταξύ του άκρου της ίνας και του άκρου της επόμενης, το οποίο είναι γνωστό ως μήκος κενού (gap length). Η αλλαγή στο μήκος κενού συνδέεται με την συνολική αλλαγή στο μήκος του αισθητήρα. Η σύνδεση αυτή καθορίζει μια μαθηματική συνάρτηση η οποία παρέχει την παραμόρφωση στη δομή του οδοστρώματος [Sharp, Galal, Elfino 2007].



Εικόνα 2.10 Λειτουργία αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών



Εικόνα 2.11 Κροσσί συμβολής έντασης στην οθόνη Η/Υ

3. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

3.1 Γενικά για αισθητήρες οπτικών ινών

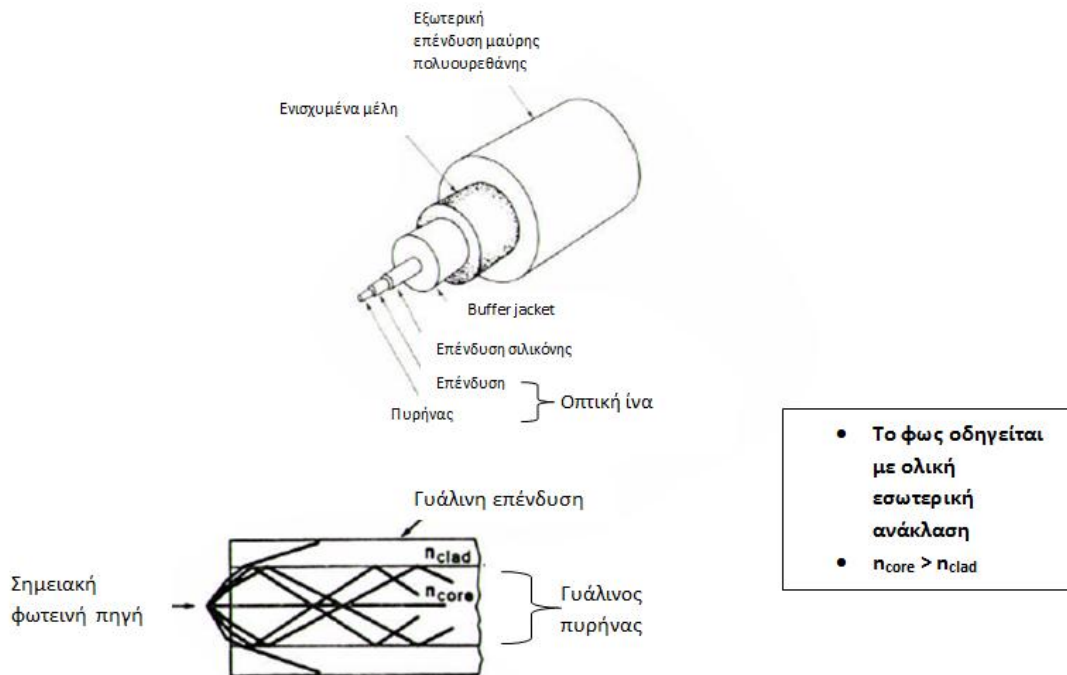
Τα τελευταία χρόνια οι αισθητήρες οπτικών ινών γνωρίζουν μια συνεχώς αυξανόμενη αποδοχή καθώς η χρήση τους διαδίδεται όλο και περισσότερο σε τομείς όπως του πολιτικού μηχανικού, της αεροδιαστημικής, της ναυπηγίας, του πετρελαίου και του αερίου και σε «έξυπνες» εφαρμογές κατασκευών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν μια ελκυστική μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου (NDT) δεδομένου του μικρού τους μεγέθους και βάρους και της κατασκευής τους από διηλεκτρικό γυαλί που τους καθιστά άτρωτους στον ηλεκτρικό θόρυβο και στην ηλεκτρομαγνητική επιρροή, σε αντίθεση με τα περισσότερα συμβατικά συστήματα ηλεκτρονικών αισθητήρων.

Σήμερα οι αισθητήρες οπτικών ινών ενσωματώνονται σε σύνθετα υλικά για να εξετασθεί η σκλήρυνση, οι εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις, όπως και για να ανιχνευθούν πιθανές ρωγμές και αστοχίες. Επιφανειακά τοποθετημένοι αισθητήρες επιτρέπουν την, σε απευθείας σύνδεση, παρακολούθηση των τάσεων και των παραμορφώσεων σε πραγματικό χρόνο, σε μια ποικιλία δοκιμών για έλεγχο. Επιπλέον, κάποιοι συγκεκριμένοι τύποι αισθητήρων οπτικών ινών επιτρέπουν την παρακολούθηση πολλαπλών σημείων σε διαφορετικές τοποθεσίες, χρησιμοποιώντας μια απλή ή μια συνεχή ίνα, διανεμημένου αισθητήρα θερμοκρασίας και τάσεως, βασισμένο στα συστήματα διασποράς Raman and Brillouin (Raman and Brillouin scattering systems) [Mendez, Graver 2007].

3.2 Δομή και χαρακτηριστικά οπτικών ινών

Η τεχνολογία έχει σαν κέντρο την ίδια την οπτική ίνα. Ένα κυλινδρικό νήμα στο πάχος μιας τρίχας κατασκευασμένο από γυαλί, μπορεί να οδηγεί το φως μέσω του ιδίου, περιορίζοντάς το σε περιοχές με διαφορετικούς οπτικούς δείκτες διάθλασης. Η δομή μιας τυπικής ίνας φαίνεται στην εικόνα 3.1. Το κεντρικό κομμάτι, όπου κινείται το περισσότερο φως, ονομάζεται πυρήνας. Γύρω από τον πυρήνα υπάρχει η επένδυση η οποία έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι το παγιδευμένο στον πυρήνα φως, κινείται κατά μήκος της ίνας αναπηδώντας στα όρια με την επένδυση, λόγω της επίδρασης της ολικής εσωτερικής ανάκλασης που συμβαίνει σε αυτά τα όρια. Εντούτοις, στην πραγματικότητα η οπτική ενέργεια διαδίδεται κατά μήκος της ίνας στη μορφή κυματοδηγού που ικανοποιεί τις

εξισώσεις του Μάξγουελ, όπως και τις οριακές συνθήκες και τις εξωτερικές διαταραχές που εμφανίζονται στην ίνα.

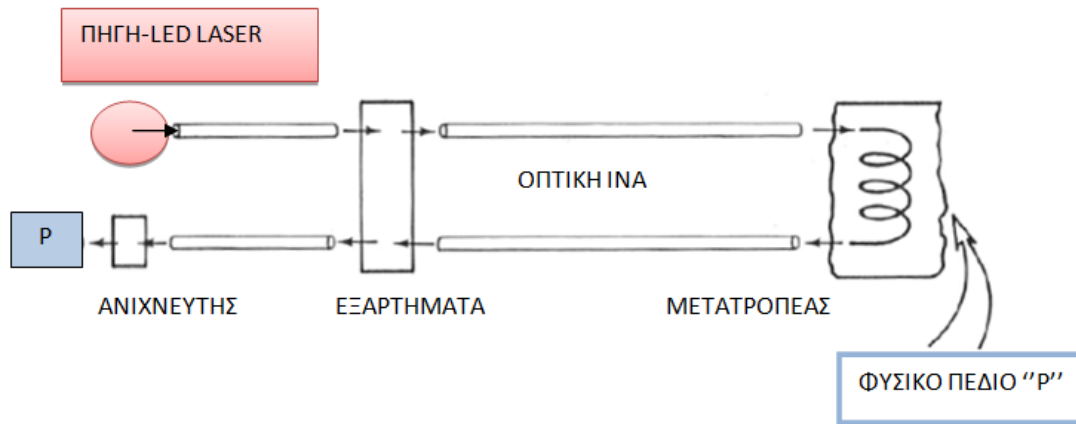


Εικόνα 3.1 Οπτική ίνα

3.3 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες αποτελούν πρακτική λύση και σε άλλες εφαρμογές όπως οι αισθητήρες και ο έλεγχος. Σε αυτούς τους τομείς, οι οπτικές ίνες έχουν ένα σημαντικό αντίκτυπο και είναι το αντικείμενο ουσιαστικής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Γενικά, για αυτές τις εφαρμογές οι ίνες κατασκευάζονται πιο ευπαθείς και πιο ευαίσθητες στους ίδιους εξωτερικούς μηχανισμούς ενάντια στους οποίους κατασκευάζονταν να έχουν προστασία για την αποτελεσματική τους λειτουργία στις τηλεπικοινωνίες. Στην πιο απλή του μορφή, ένας αισθητήρας οπτικής ίνας αποτελείται από την φωτεινή πηγή, την οπτική ίνα, το στοιχείο του αισθητήρα και έναν ανιχνευτή (detector) (εικόνα 3.2). Η αρχή λειτουργίας του οπτικού αισθητήρα βασίζεται στο ότι τα στοιχεία αίσθησης ρυθμίζουν κάποια παράμετρο του οπτικού συστήματος (ένταση, μήκος κύματος, πόλωση, φάση, κ.τ.λ.) η οποία προκαλεί μια

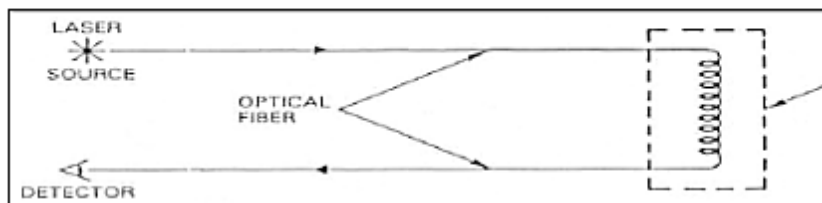
αλλαγή στα χαρακτηριστικά του οπτικού σήματος που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή [Mendez, Graver 2007].



Εικόνα 3.2 Βασικά στοιχεία ενός αισθητήρα οπτικής ίνας

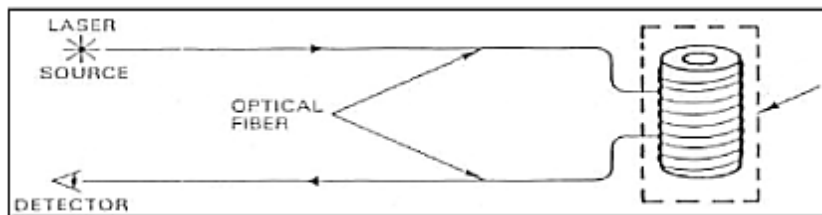
Ο αισθητήρας ίνας μπορεί να είναι είτε εσωτερικός αν η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα κατευθείαν μέσα στην ίνα, ή εξωτερικός αν η διαμόρφωση πραγματοποιείται από κάποιον εξωτερικό μετατροπέα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3

ΑΜΕΣΟΣ
(εσωτερικός)



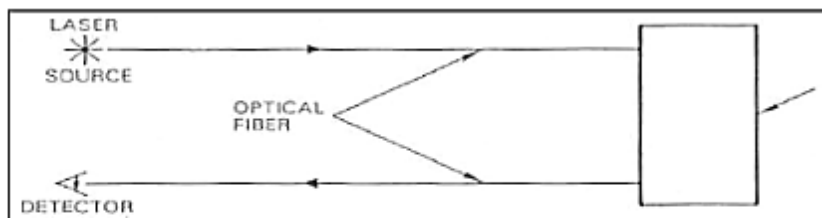
Μετατροπέας είναι ίδια η ίνα

ΕΜΜΕΣΟΣ
(εξωτερικός)



Ο μετατροπέας ενεργεί για την ίνα

ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ



Η ίνα μεταφέρει το φως μέσα και έξω από το σκευή

Εικόνα 3.3 Κατάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών

Οφέλη και πλεονεκτήματα αισθητήρων οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών διαθέτουν κάποια χαρακτηριστικά που τους καθιστούν κατάλληλους και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την μοναδική βιώσιμη λύση. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των οπτικών αισθητήρων είναι :

- Γαλβανική απομόνωση
- Ανοσία στην ηλεκτρομαγνητική επιρροή (EMI)
- Εγγενής ασφάλεια
- Δυνατότητα λειτουργίας χωρίς ηλεκτρική ενέργεια
- Δυνατότητα λειτουργίας εξ αποστάσεως
- Μικρό μέγεθος και βάρος
- Ολοκληρωμένη τηλεμετρία: η ίδια η ίνα αποτελεί σύνδεσμο δεδομένων
- Μεγάλο εύρος ζώνης
- Υψηλή ευαισθησία

3.4 Εφαρμογές σε θέματα πολιτικού μηχανικού

Με δεδομένο ότι οι κατασκευές του πολιτικού μηχανικού βρίσκονται, σε παγκόσμιο επίπεδο, σε μια κατάσταση αλλοίωσης εξαιτίας της γήρανσης των υλικών, της υπερβολικής χρήσης, της υπερφόρτισης, των καιρικών συνθηκών και της ελλειμματικής συντήρησης, έχει γίνει αρκετά σημαντικό τα τελευταία χρόνια να καθοριστεί η ασφάλεια της κατασκευής με μη καταστροφικές μεθόδους αξιολόγησης (NDE) της αντοχής της. Αυτή η αξιολόγηση είναι σημαντική για την επισκευή, την αποκατάσταση, την παράταση ζωής ή την αντικατάσταση της εν λόγω κατασκευής. Επιπλέον, θα ήταν πολλή χρήσιμη η ανάπτυξη μέσων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατάστασης της κατασκευής.

Οι οπτικές ίνες, εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους και βάρους, προσφέρουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο σκυρόδεμα χωρίς να επηρεάζουν τις ιδιότητές του, και λειτουργούν ως αισθητήρια των μηχανικών διαταράξεων των υλικών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η βασική αρχή πίσω από την ενσωμάτωση των οπτικών ινών για να χαρακτηρίσουν την κατάσταση ενός υλικού ή ενός δομικού δοκιμίου, στηρίζεται στο ότι το φως που στέλνεται μέσω της ίνας, υφίσταται μεταβολές στην ένταση, τη φάση, το μήκος κύματος, την πόλωση, εξαιτίας αλλαγών στην μηχανική και θερμική κατάσταση του περιβάλλοντος υλικού. Η πρώτη πρόταση για εφαρμογή αισθητήρων οπτικών ινών ενσωματωμένους σε κτίρια από σκυρόδεμα, έγινε από τον Mendez et al που περιέγραψε τις πιθανές εφαρμογές παράλληλα με μια μελέτη στα βασικά θέματα σχετικά με την εγκατάστασή τους.

Δεδομένων των χαρακτηριστικών τους, οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, πριν την σκλήρυνση, όπως κτίρια, γέφυρες, φράγματα και δεξαμενές για μη καταστροφική αξιολόγηση (NDE) της δομικής κατάστασης και για μέτρηση των εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων. Σε άλλες περιπτώσεις, οι αισθητήρες μπορούν απλά να τοποθετηθούν επιφανειακά στο σκυρόδεμα ή στον χάλυβα. Μετά την εγκατάσταση, οι αισθητήρες είναι σε θέση να παρέχουν υψηλής ανάλυσης μετρήσεις θερμοκρασίας και παραμορφώσεων, να εντοπίσουν πιθανή ανάπτυξη ρωγμών, όπως και ερπυσμού και θερμοκρασιακών τάσεων. Επιπλέον, μπορεί να καθοριστεί η πραγματική θέση μιας αστοχίας, αναλύοντας το σήμα της ίνας που ανακλάται πίσω, χρησιμοποιώντας τεχνικές OTDR (optical time-domain reflectometry) ή με κατανεμημένα συστήματα αίσθησης (distributed sensing systems) βασισμένα στα συστήματα διασποράς Raman και Brillouin.

Όλα αυτά τα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση ενός συγκεκριμένου στοιχείου από σκυρόδεμα ή μιας κατασκευής, από ένα σύστημα που βασίζεται σε ένα πλέγμα αισθητήρων οπτικών ινών, ενσωματωμένο στην κατασκευή κατά τη διάρκεια της ανέγερσης. Κάτι τέτοιο καθιστά την κατασκευή ή το κτίριο πιο "ευφυές" και έτσι οδηγούμαστε στις ονομαζόμενες "έξυπνες κατασκευές", στις οποίες παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου και επιθεώρησης της ίδιας της κατασκευής χάρη στη χρήση των αισθητήρων και ενεργοποιητών (actuators) σε κλειστό βρόγχο. Για παράδειγμα η εικόνα 3.4α) απεικονίζει την εγκατάσταση παραμορφωσιακών αισθητήρων οπτικών ινών στις δοκούς μιας γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ η εικόνα 3.4β) δείχνει έναν αισθητήρα επιμήκυνσης οπτικών ινών κατά τη διαδικασία της ενσωμάτωσης στο σκυρόδεμα πριν την σκλήρυνση.



α)



β)

Εικόνα 3.4 α) Επιφανειακά τοποθετημένοι αισθητήρες παραμόρφωσης ίνας στη δοκό μιας γέφυρας και β) ενσωμάτωση αισθητήρα σε πλάκα σκυροδέματος πριν την σκλήρυνση

Οι βασικές εφαρμογές των αισθητήρων οπτικών ινών στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού μπορούν να τοποθετηθούν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες ονομαστικά είναι:

- *Δομική παρακολούθηση και αξιολόγηση βλαβών*
- *Πειραματική ανάλυση τάσεων*
- *Διαχείριση και έλεγχος συστημάτων και εγκατάσταση υπηρεσιών*

Η πρώτη κατηγορία ερευνά την ενσωμάτωση μονοτροπικών και πολυτροπικών αισθητήρων οπτικών ινών σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος όπως δοκούς, υποστυλώματα, αψίδες, πλάκες και άλλα, έτσι ώστε να μπορούν να μετρηθούν ξεχωριστά οι τάσεις, οι παραμορφώσεις, η κάμψη, η σκλήρυνση, οι ρωγμές και ο ερπυσμός στο σκυρόδεμα, όπως και η μετατόπιση και η κάμψη της κατασκευής ως σύνολο.

Στον τομέα της πειραματικής ανάλυσης τάσεων, οι ίνες καθιστούν τους αισθητήρες ευέλικτους και ευαίσθητους για τη μέτρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των δομικών υλικών σε πειραματικές μελέτες. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε κατασκευές και μέλη που έχουν περίπλοκο σχήμα και για τα οποία δύσκολα εφαρμόζονται οι αναλυτικές μέθοδοι. Ένα άλλο παράδειγμα θα ήταν η χρήση ενός πλέγματος αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών ενσωματωμένους στους διαδρόμους αεροδρομίων ώστε να αξιολογηθούν οι τάσεις στο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της προσγείωσης και της απογείωσης των αεροσκαφών. Η χαρτογράφηση των τάσεων σε δύο διαστάσεις που προκύπτει, θα ήταν χρήσιμη στον ανασχεδιασμό και τη συντήρηση τέτοιων οδοστρωμάτων. Επιπλέον, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες οπτικών ινών επιτρέπουν στους κατασκευαστές μηχανικούς να συγκρίνουν τις μετρημένες με τις σχεδιασμένες τιμές των τάσεων, τις ροπές κάμψεως και τις μετατοπίσεις. Από αυτές τις πληροφορίες μπορούν να καθοριστούν ακριβέστερα οι παράγοντες σχεδιασμού και έτσι οι κατασκευές να γίνουν πιο ασφαλείς και πιο οικονομικές [Mendez, Graver 2007].

3.5 Αισθητήρες οπτικών ινών για έλεγχο οδοστρωμάτων

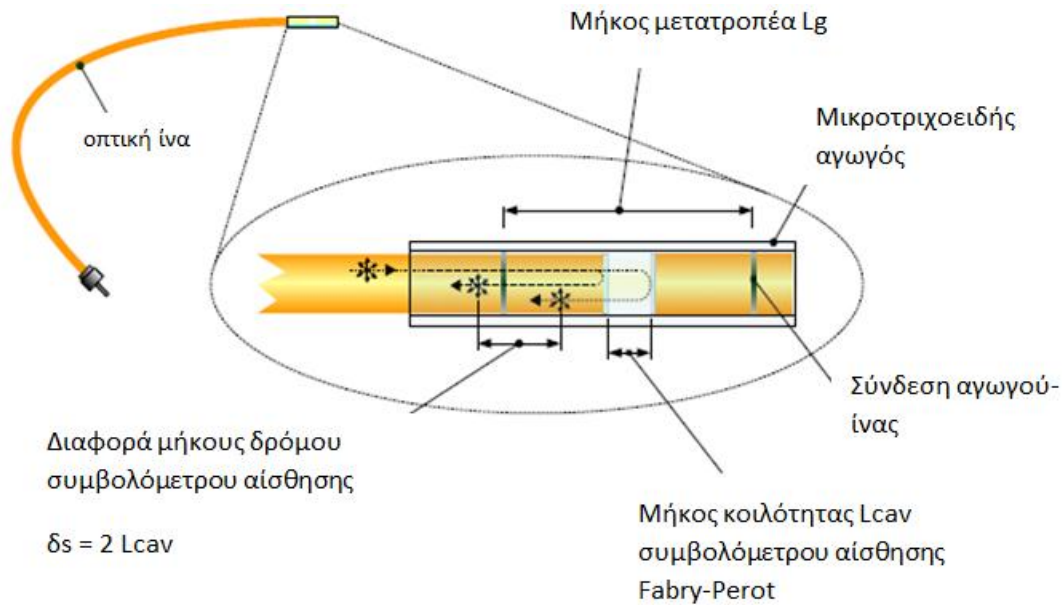
3.5.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της γήρανσης των υποδομών μεταφοράς, η ανάγκη για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος (πριν και κατά την εκδήλωση κινδύνου) απαιτεί καλής ποιότητας δεδομένα για τη μηχανική απόκριση του. Τα όργανα μέτρησης της παραμόρφωσης που τοποθετούνται κατά την κατασκευή του οδοστρώματος, τυπικά έχουν μικρή διάρκεια ζωής και δε μπορούν να

χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα για να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος μετά από μερικά χρόνια. Οι εργασίες που απαιτούνται για την επανατοποθέτηση των οργάνων παραμόρφωσης σε ήδη υπάρχοντα οδοστρώματα τείνουν να διαταράξουν το πεδίο των τάσεων των επάλληλων στρώσεών τους και συνήθως οδηγούν σε αναξιόπιστα δεδομένα παραμορφώσεων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα περιγράψουμε την ανάπτυξη μιας νέα τεχνολογίας αισθητήρων βασισμένη στις οπτικές ίνες, ειδικά σχεδιασμένη ώστε να μπορεί να επανατοποθετηθεί σε ήδη υπάρχον οδόστρωμα με την ελάχιστη δυνατή διατάραξη των στρώσεων. Επίσης θα αναφερθούμε στην διαδικασία εγκατάστασης των οργάνων και στις μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή του πειράματος υπό το βάρος ενός κινούμενου οχήματος[Dore, Duplain, Pierre 2007].

3.5.2 Αισθητήρες παραμόρφωσης οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούν μία πρακτική λύση για πολλούς λόγους. Μεταξύ άλλων, οι μικρές τους διαστάσεις, το γεγονός ότι δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η δυνατότητά τους να λειτουργούν σε οποιοδήποτε περιβάλλον, τους καθιστούν μια ελκυστική εναλλακτική των ηλεκτρικών αισθητήρων για παρακολούθηση της απόκρισης του οδοστρώματος. Οι αισθητήρες οπτικών ινών αποτελούνται από δύο κύρια μέρη: τον μετατροπέα οπτικής ίνας (επίσης ονομάζεται μετρητής οπτικής ίνας ή fiber optic probe) και το διατηρητή σήματος (signal conditioner) που επίσης ονομάζεται readout ή interrogation unit. Ο μετατροπέας οπτικής ίνας, είναι κατασκευασμένος από ένα προστατευτικό σώμα το οποίο περιέχει μια οπτική συσκευή, που είναι ευαίσθητη στο φυσικό μέγεθος προς μέτρηση (τάση, θερμοκρασία, κ.τ.λ.). Για μεμονωμένους αισθητήρες (non-distributed sensors), το αισθητήριο του μετατροπέα είναι συνήθως τοποθετημένο στην άκρη της οπτικής ίνας, που συνδέεται με την μονάδα διατήρησης σήματος. Η τελευταία χρησιμοποιείται για την έγχυση φωτός στην οπτική ίνα, λαμβάνοντας το τροποποιημένο φωτεινό σήμα που επιστρέφεται από τον μετατροπέα, αλλά και για την προώθηση του τροποποιημένου φωτεινού σήματος και την μετατροπή του αποτελέσματος σε φυσικές μονάδες μέτρησης.



Εικόνα 3.5 Αισθητήρας παραμόρφωσης οπτικών ινών Fabry-Perot

Υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι αίσθησης των οπτικών ινών, που βασίζονται σε συγκεκριμένες ιδιότητες της φωτεινής ακτινοβολίας (ένταση, φάση, πόλωση και φάσμα) και στην τροποποίηση αυτών χάριν των μετρήσεων. Μεταξύ αυτών, η οπτική συμβολομετρία, η οποία σχετίζεται με την τροποποίηση της φάσης της φωτεινής ακτινοβολίας, αναγνωρίζεται ως η πιο ευαίσθητη μέθοδος αίσθησης οπτικών ινών.

Το συμβολόμετρο είναι γνωστό ως ένα πολύ ακριβές οπτικό εργαλείο για τη μέτρηση μιας φυσικής ποσότητας, σε όρους μεταβολών της διαφοράς μήκους της συμβολομετρικής διαδρομής, οι οποίες προκαλούνται από το μέγεθος που μετράται. Εντούτοις, όταν χρησιμοποιείται μια στενή ζώνη ηλεκτρικής πηγής (όπως μια πηγή λέιζερ), το μήκος συνοχής της πηγής είναι γενικά μεγαλύτερο από τη διαφορά μήκους της διαδρομής του συμβολόμετρου και για αυτό η μέτρηση έχει μια ασάφεια 2π , εξαιτίας της περιοδικής φύσεως των κροσσών συμβολής (fringes) του συμβολογράμματος. Αυτό το πρόβλημα μπορεί κάλλιστα να περιορίσει τις εφαρμογές μέτρησης καθώς έχει καταστήσει πολλούς συμβολομετρικούς αισθητήρες οπτικών ινών ακατάλληλους για τη βιομηχανία μετρήσεων. Το πρόβλημα της ασάφειας φάσεως αποφεύγεται με τη χρήση μιας φωτεινής πηγής με μικρό μήκος συνοχής, που είναι μια φωτεινή πηγή με ευρυζωνικό φάσμα. Σε αυτήν την περίπτωση, οι κροσσοί συμβολής του συμβολογράμματος εντοπίζονται στενά σε μια περιοχή διαφοράς μήκους διαδρομής, έτσι ώστε η παραλλαγή της διαφοράς μήκους της διαδρομής να μπορεί να καθοριστεί χωρίς την ασάφεια του 2π , εντοπίζοντας την κορυφή του κροσσού συμβολής ή την κορυφή της περιβάλλουσας του συμβολογράμματος. Αυτός ο τύπος συμβολομετρίας είναι γνωστός ως συμβολομετρία λευκού φωτός ή χαμηλής συνοχής.

Η εικόνα 3.5 δείχνει το σχέδιο ενός συμβολομετρικού μετατροπέα παραμόρφωσης οπτικών ινών. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο οπτικές ίνες που είναι ευθυγραμμισμένες με ακρίβεια μέσα σε έναν μικροτριχοειδή σωλήνα ώστε να σχηματιστεί ένα οπτικό συμβολόμετρο αίσθησης Fabry-Perot (FP). Αυτό καθιστά τον μετρητή παραμόρφωσης εντελώς ανθεκτικό σε οποιαδήποτε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή όπως και σε εγκάρσιες τάσεις και θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τους αισθητήρες οπτικών ινών Bragg grating. Οι δύο ίνες δεμένες στο σωλήνα σε ακριβή τοποθεσία και η απόσταση μεταξύ των δύο δεμένων περιοχών ορίζεται ως μήκος του μετρητή L_g . Το κενό ή η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων των οπτικών ινών είναι γνωστή ως μήκος κοιλότητας L_{cav} του αισθητικού συμβολόμετρου Fabry-Perot. Η διαφορά του μήκους διαδρομής δ_s του FP αισθητικού συμβολόμετρου, που ισούται με δύο φορές το μήκος κοιλότητας, ποικίλει ως συνάρτηση της παραμόρφωσης του υλικού πάνω (ή μέσα) στο οποίο τοποθετείται ο αισθητήρας. Η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης δ (δοσμένη σε μm) και της διαφοράς του μήκους διαδρομής δ_s (δοσμένο σε nm) του μετατροπικού αισθητικού συμβολόμετρου, που αναφέρεται ως αποτέλεσμα σήματος μετατροπέα (transducer signal output), μπορεί να παρασταθεί στην επόμενη εξίσωση [Dore, Duplain, Pierre 2007]:

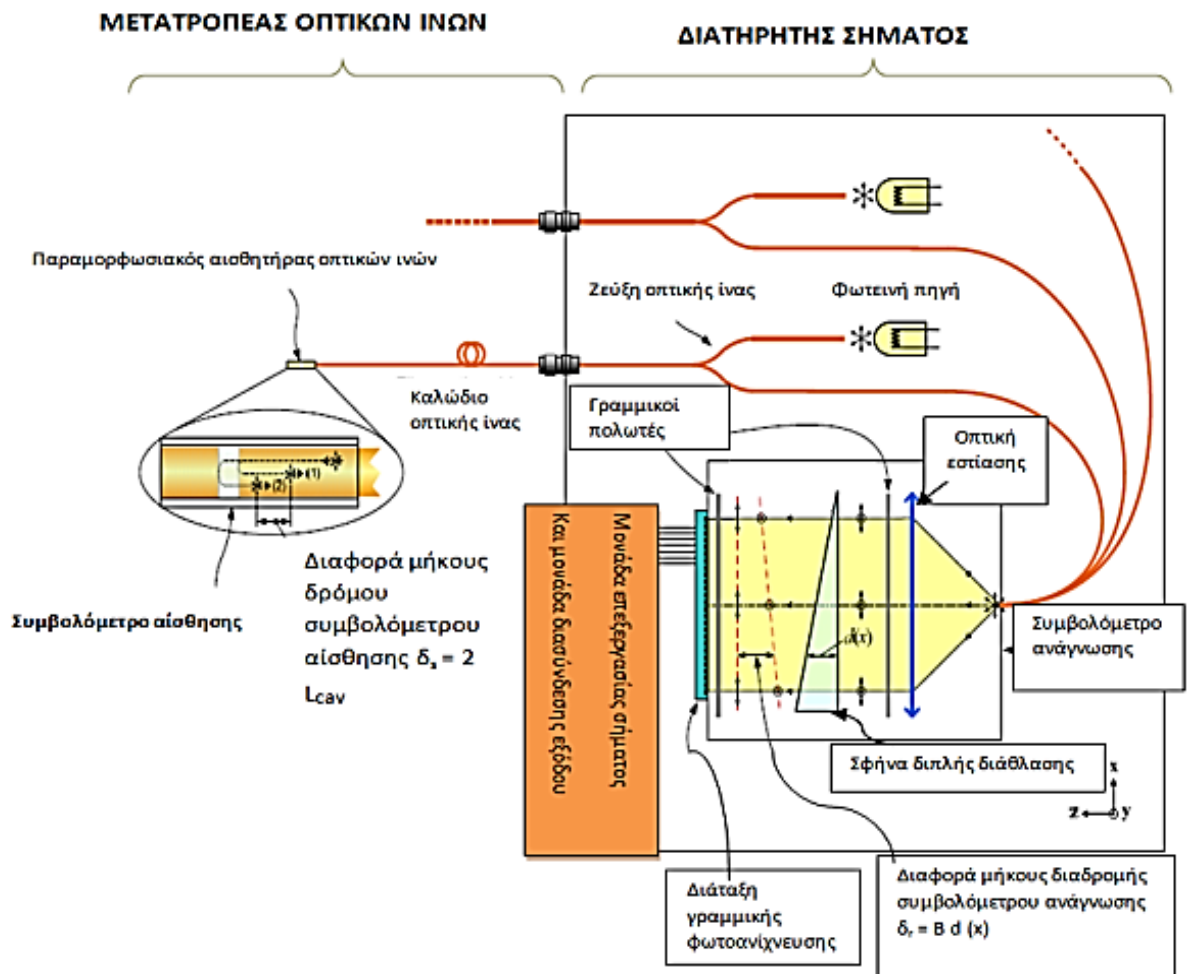
$$\delta_s = 2 \times L_{cav} = 2 \times (L_g \times \epsilon + L_0) \quad (3.1)$$

όπου L_g είναι το μήκος του μετρητή και L_0 είναι το αποτέλεσμα για μηδενική παραμόρφωση, δηλαδή το μήκος κοιλότητας στο οποίο η παραμόρφωση είναι μηδέν.

Η τεχνολογία της συμβολομετρίας λευκού φωτός μας παρέχει ένα μέσο για να πραγματοποιούμε απόλυτες μετρήσεις του μήκους κοιλότητας (ή ισοδύναμα η διαφορά μήκους της διαδρομής) του, βασισμένου στον Fabry-Perot, μετατροπέα παραμόρφωσης. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζεται αυτή η τεχνολογία. Αυτή η συγκεκριμένη τεχνική είναι γνωστή ως συμβολομετρία πόλωσης λευκού φωτός (white light polarization interferometry, WLPI). Ο συμβολομετρικός μετατροπέας παραμορφώσεων οπτικών ινών παρουσιάζεται σχηματικά ως συμβολόμετρο Fabry-Perot, δηλαδή ένα συμβολόμετρο αίσθησης δύο δεσμών (δέσμη (1) και δέσμη (2)). Φως ευρείας ζώνης εκτοξεύεται από τον διατηρητή σήματος προς τον μετατροπέα οπτικής ίνας. Η δέσμη φωτός φτάνει το συμβολόμετρο αίσθησης, όπου διαχωρίζεται σε δύο δέσμες. Η χωρισμένη στα δύο δέσμη κινείται μέσω διαφορετικών διαδρόμων (διάδρομος (1) και (2)). Η διαφορά μήκους μεταξύ των διαδρόμων (1) και (2), δηλαδή η διαφορά μήκους δ_s ποικίλει ως συνάρτηση της παραμόρφωσης.

Οι χωρισμένες δέσμες επανασυνδέονται και ανακλώνται πίσω στον διατηρητή σήματος. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το φωτεινό σήμα

που λαμβάνεται στον διατηρητή σήματος από τον συμβολομετρικό μετατροπέα, δεν εμφανίζει καμία περιοδική διαμόρφωση λόγω επίδρασης των παρεμβολών. Αυτό συμβαίνει διότι το μήκος συνοχής της χρησιμοποιούμενης πηγής, είναι μικρότερο από τη διαφορά μήκους της διαδρομής του συμβολομετρικού μετατροπέα. Εντούτοις, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, το φωτεινό σήμα μεταφέρει ακριβείς και σαφείς πληροφορίες για τη διαφορά μήκους της διαδρομής του συμβολόμετρου αίσθησης που συνδέεται με την παραμόρφωση. Το φως που λαμβάνεται από τον μετατροπέα τροφοδοτείται στο συμβολόμετρο ανάγνωσης του διατηρητή σήματος (η εικόνα 3.6 δείχνει ένα διατηρητή σήματος πολλαπλών καναλιών). Το συμβολόμετρο ανάγνωσης είναι ένα συμβολόμετρο στατικής πόλωσης, βασισμένο στη διαρρύθμιση του συμβολόμετρου δύο δεσμών, έχοντας μια απόκλιση χωρικά διανεμημένης διαφοράς μήκους κατά μήκος μιας διεύθυνσης (διεύθυνση x στην εικόνα 3.6). Περιλαμβάνει μια συμπαγή σφήνα φτιαγμένη από κρύσταλλο διπλής διάθλασης, ειδικά επιλεγμένο για αυτόν τον σκοπό. Η δέσμη φωτός που διέρχεται από το συμβολόμετρο ανάγνωσης, αρχικά διαδίδεται στο πλάτος τη προαναφερθείσας σφήνας.



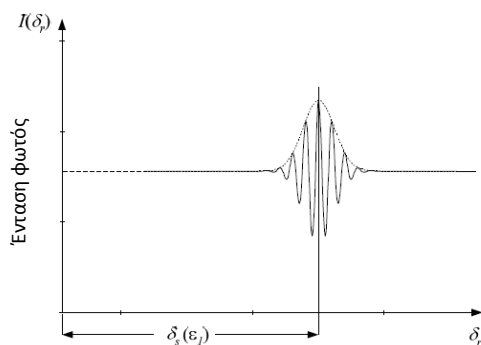
Εικόνα 3.6 Τεχνολογία συμβολομετρίας πόλωσης λευκού φωτός (WLPPI)

Το φως αποσυντίθεται σε δύο συστατικά ορθογωνικής γραμμικής πόλωσης (υποδεικνύεται με ένα διπλό βέλος και έναν διακεκομμένο κύκλο στην εικόνα 3.6) χρησιμοποιώντας έναν γραμμικό πολωτή και στη συνέχεια εισέρχεται στη σφήνα. Εξαιτίας των ανισοτροπικών ιδιοτήτων της κρυσταλλικής σφήνας, τα δύο συστατικά της πόλωσης κινούνται με διαφορετική ταχύτητα στη σφήνα και έτσι στην έξοδο τα δύο συστατικά απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Η διαφορά του μήκους διαδρομής δ_r μεταξύ των δύο συστατικών ορθογωνικής πόλωσης στην έξοδο της σφήνας δίδεται από [Dore, Duplain, Pierre 2007]:

$$\delta_r(\mathbf{x}) = \mathbf{B} \times \mathbf{d}(\mathbf{x}) \quad (3.2)$$

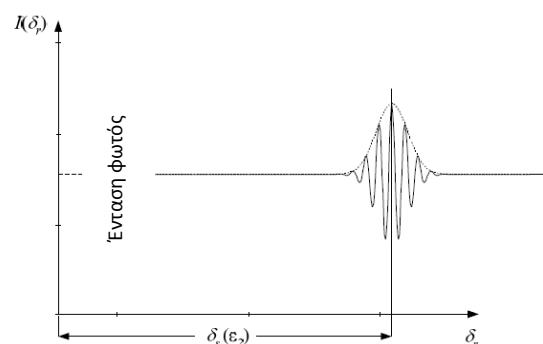
όπου \mathbf{B} είναι ο δείκτης διπλής διάθλασης και $\mathbf{d}(\mathbf{x})$ είναι το πάχος της σφήνας στη θέση \mathbf{x} . Ένας άλλος γραμμικός πολωτής τοποθετείται πίσω από τη σφήνα και επανασυνδέει τα δύο συστατικά ορθογωνικής πόλωσης ώστε να μπορούν να αλληλεπιδρούν.

Η χωρική διανομή της έντασης του φωτός στην έξοδο του συμβολόμετρου ανάγνωσης μετράται χρησιμοποιώντας μια διάταξη γραμμικού φωτοανιχνευτή. Η θεωρία οπτικής συνοχής μας δείχνει ότι το φωτεινό σήμα που καταγράφεται από αυτήν τη διάταξη γραμμικού φωτοανιχνευτή, που αναφέρεται ως συμβολόγραμμα, μπορεί να αντιπροσωπευθεί από ένα τροποποιημένο ημιτονοειδές, που έχει περιβάλλουσα με μέγιστο στο δ_s .



Διαφορά μήκους διαδρομής συμβολόμετρου ανάγνωσης

α)



Διαφορά μήκους διαδρομής συμβολόμετρου ανάγνωσης

β)

Εικόνα 3.7 Αποτέλεσμα συμβολόμετρου ανάγνωσης μετρημένο στη διάταξη γραμμικής φωτοανίχνευσης

Οι **εικόνες 3.7α) και 3.7β)** δείχνουν δύο τυπικά σήματα συμβολογράμματος που μετρήθηκαν από το διατηρητή σήματος για δύο τιμές παραμόρφωσης ε_1 και ε_2 . Κάθε συμβολόγραμμα απεικονίζει τη διανομή της έντασης του φωτός $I_r(\delta_r)$ προς τη διαφορά του μήκους διαδρομής δ_r του συμβολόμετρου ανάγνωσης. Η συμπαγής καμπύλη αντιπροσωπεύει τους ημιτονοειδείς κροσσούς συμβολής (fringes), ενώ η διακεκομμένη καμπύλη αντιπροσωπεύει την περιβάλλουσα των κροσσών συμβολής. Η θέση της διάταξης γραμμικού φωτοανιχνευτή είτε της κορυφής του κροσσού συμβολής είτε της κορυφής της περιβάλλουσας, βρίσκεται όπου η διαφορά του μήκους διαδρομής του συμβολόμετρου ανάγνωσης είναι ίση με αυτή του συμβολόμετρου αίσθησης, δηλαδή όταν $\delta_r = \delta_s$. Επομένως, η μέτρηση του δ_r μας οδηγεί σε αυτήν του δ_s , δηλαδή χρησιμοποιώντας ένα βαθμονομημένο συμβολόμετρο ανάγνωσης, η μέτρησης της θέσης της κορυφής του κροσσού συμβολής ή αυτή της κορυφής της περιβάλλουσας του συμβολογραμμικού σήματος, παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τον ακριβή καθορισμό της τιμής του δ_s και συνεπώς για την παραμόρφωση ε .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας πόλωσης λευκού φωτός είναι προφανή: η τιμή της διαφοράς μήκους διαδρομής δεν εξαρτάται από τις παραμέτρους της κλασσικής συμβολομετρίας, δηλαδή η φάση και το εύρος του σήματος, αλλά μόνο από την θέση της κορυφής του κροσσού συμβολής και της περιβάλλουσας. Αυτή η τεχνική είναι πολύ ισχυρή έναντι πλασματικών επιδράσεων που μπορεί να επηρεάσουν τη μέτρηση ενός ελαφρού σήματος του συμβολογράμματος. Μία αλλαγή της έντασης του φωτός, για παράδειγμα εξαιτίας απωλειών της σύνδεσης ή διακυμάνσεις της φωτεινής πηγής, μεταβάλλει το επίπεδο έντασης του συμβολογράμματος, αλλά δεν επηρεάζει τη θέση της κορυφής του κροσσού συμβολής ή αυτή της περιβάλλουσας και επειδή η μέτρηση του δ_r είναι απόλυτη χωρίς ασάφειες 2π , δεν υπάρχει απώλεια της αναφοράς όταν παύει να λειτουργεί ο διατηρητής σήματος.

Εφόσον ο διατηρητής σήματος έχει μεταποιήσει το σήμα του συμβολογράμματος για να εξάγει την τιμή του δ_r και συνεπώς αυτή του δ_s , χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση ώστε να προκύψει η τιμή της παραμόρφωσης ε [Dore, Duplain, Pierre 2007]:

$$\varepsilon = (L_{cav} - L_0)/L_g \quad (3.3)$$

όπου L_g και L_0 είναι οι παράμετροι μετατροπής βαθμονόμησης που παρέχονται στο διατηρητή του σήματος.

Η τεχνολογία WLPI έχει σχεδιαστεί επίσης για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της πίεσης, της μετατόπισης, της δύναμης και του φορτίου κ.τ.λ. Υπάρχουν πολλοί αισθητήρες και διατηρητές σήματος διαθέσιμοι στο εμπόριο για διαφορετικές εφαρμογές.

3.5.3 Μετρητές παραμόρφωσης οδοστρώματων

Η μέτρηση των παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις στα οδοστρώματα, είναι ουσιαστική για την ανάπτυξη μοντέλων απόκρισης των οδοστρώματων και τον σχεδιασμό τους όπως και για τη μέθοδο ανάλυσης τους. Ο προτεινόμενος μετρητής συνδέεται με τη μέτρηση οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των στρώσεων με συνδετικό υλικό του οδοστρώματος. Η διεπιφάνεια μεταξύ των υλικών των επιφανειακών στρώσεων και των εδαφικών υλικών της βάσης/υπόβασης, είναι από τις πιο σημαντικές στα οδοστρώματα. Οι οριζόντιες τάσεις σε αυτό το επίπεδο θεωρούνται ότι συνδέονται άμεσα με τη συμπεριφορά κόπωσης του οδοστρώματος.

Οι οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα των στρώσεων με συνδετικό υλικό του οδοστρώματος έχουν μετρηθεί για αρκετές δεκαετίες, για να ενισχυθούν η μηχανική ανάλυση και ο σχεδιασμός του οδοστρώματος. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μετρητών παραμόρφωσης. Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός μετρητή τύπου "H" στην επιφάνεια της στρώσης του αμμοχάλικου πριν την τοποθέτηση του συνδεδεμένων στρώσεων (συνήθως ασφαλτικό σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland). Το σχήμα "H" του προστατευτικού σώματος επιτρέπει την κατάλληλη αγκύρωση του μετρητή στο συνδετικό υλικό για αξιόπιστες μετρήσεις των οριζόντιων τάσεων. Οι κύριοι περιορισμοί αυτής της προσέγγισης είναι [Dore, Duplain, Pierre 2007]:

- *Υπερβολικές θερμικές τάσεις που επιβάλλονται στους μετρητές παραμορφώσεων όταν τοποθετείται το ζεστό ασφαλτικό υλικό κατευθείαν πάνω στους μετρητές (στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ζεστά ασφαλτικά μίγματα)*
- *Υπερβολικές μηχανικές τάσεις που επιβάλλονται στα όργανα από συμπαγή υλικά ενώ το ασφαλτικό σκυρόδεμα είναι ακόμα ζεστό και έχει πολλή μικρή ακαμψία. Αυτές οι τάσεις ευθύνονται συχνά για τις μετακινήσεις και τις μη ευθυγραμμίσεις των μετρητών, μειώνοντας έτσι αισθητά την αξιοπιστία των μετρήσεων*
- *Οι μετρητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά μόνο για νέες στρώσεις με συνδετικό υλικό οδοστρώματων.*

Η αυξανόμενη ανάγκη για έρευνα της μηχανική απόκρισης και συμπεριφοράς ενός υπάρχοντος οδοστρώματος, οδήγησε στην ανάπτυξη μίας άλλης προσέγγισης της μέτρησης των παραμορφώσεων σε στρώσεις με συνδετικό υλικό ήδη υπάρχοντων οδοστρώματων. Η προσέγγιση αφορά στην λήψη πυρήνων από ήδη υπάρχοντα οδοστρώματα έτσι ώστε εγκαταστήσουμε στον πυθμένα τους μετρητές παραμόρφωσης και στη συνέχεια να τους τοποθετήσουμε πίσω στην αρχική τους θέση. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία αν και έχει αρκετούς περιορισμούς που μπορεί να επηρεάσουν την αξιοπιστία των μετρήσεων. Το κύριο μέλημα αυτής

της προσέγγισης, είναι η διατάραξη του πεδίου των τάσεων, που προκαλείται από τη διαδικασία πυρηνοληψίας και από την επανατοποθέτηση του πυρήνα στο οδόστρωμα. Αρκετά ερωτηματικά προκύπτουν όσον αφορά στην ικανότητα του παλιού πυρήνα να μεταδώσει αποτελεσματικά τάσεις στον εγκατεστημένο μετρητή.

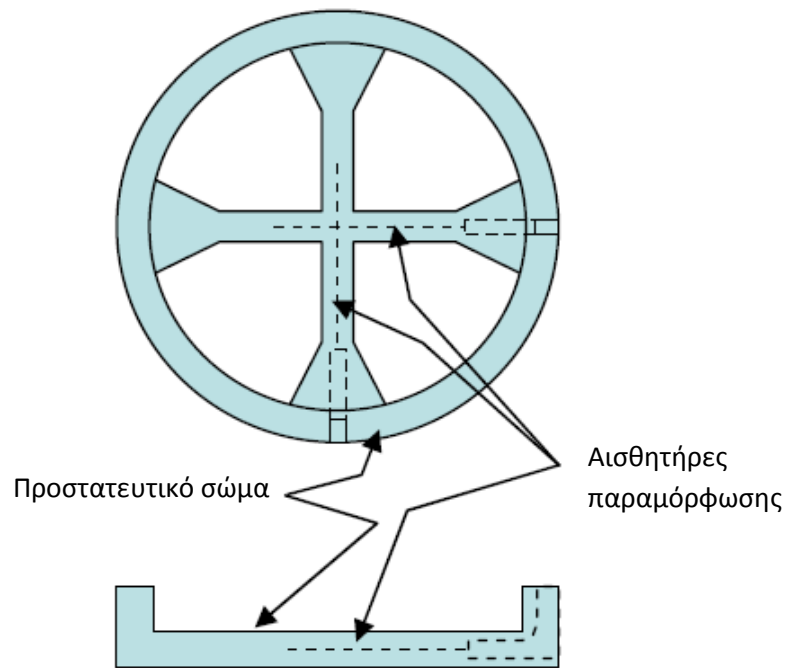
Ο προτεινόμενος μετρητής έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ξεπεραστούν πολλά από τα προβλήματα που εμφανίζει η υπάρχουσα τεχνολογία. Το προστατευτικό σώμα έχει σχεδιαστεί ώστε να φέρει έναν ή δύο κάθετους αισθητήρες παραμόρφωσης, οι οποίοι εφαρμόζουν κατευθείαν στα τοιχώματα της τρύπας του πυρήνα. Προκειμένου να μειωθεί η διατάραξη των τάσεων γύρω από το προστατευτικό σώμα, επιλέγεται πλαστικό με ελαστική παράμετρο παρόμοια του υλικού της επιφανειακής στρώσης του οδοστρώματος. Επίσης, το τμήμα της περιοχής προς μέτρηση του προστατευτικού σώματος μειώνεται στο ελάχιστο, ώστε να αποφύγουμε παρεμβολή με το πεδίο των τάσεων.

Το προστατευτικό σώμα σχεδιάζεται να εφαρμόζει σε έναν πυρήνα κατασκευασμένο στο εργαστήριο, ο οποίος ταιριάζει απόλυτα στην τρύπα του πυρήνα. Στη συνέχεια το προστατευτικό σώμα και ο πυρήνας μπορούν να τοποθετηθούν στην τρύπα στο υπάρχον οδόστρωμα, στην ακριβή θέση και με τον ακριβή προσανατολισμό που απαιτείται για τις μετρήσεις.

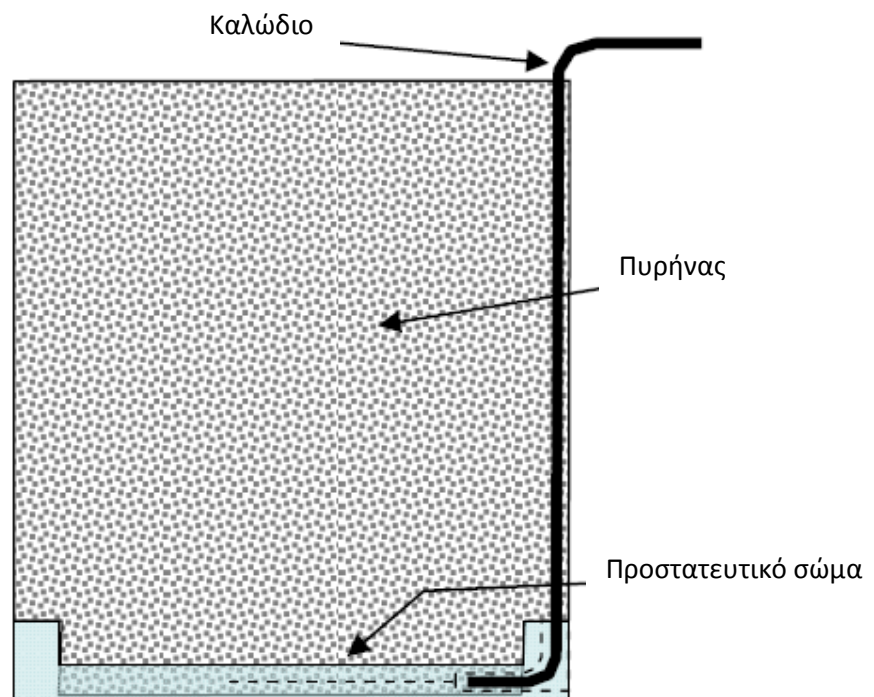
Ο προτεινόμενος μετρητής μας επιτρέπει έτσι την ακριβή εγκατάσταση αισθητήρων παραμόρφωσης σε υπάρχοντα οδοστρώτα, με την ελάχιστη διατάραξη του πεδίου των τάσεων και την ελάχιστη επίδραση στον μετρητή.

Ο προτεινόμενος μετρητής παραμόρφωσης είναι σχεδιασμένος να μετράει οριζόντιες παραμορφώσεις στον πυθμένα στρώσεων με συνδετικό υλικό. Ο μετρητής, ο οποίος μπορεί να συνοδεύεται από ένα ή δύο κάθετους μεταξύ τους αισθητήρες, αποτελείται από τρία μέρη:

- *Αισθητήρες οπτικών ινών (εμπορικής διαθέσιμη τεχνολογία)*
- *Προστατευτικό σώμα από πολυμερή*
- *Συνθετικό πυρήνα από ασφαλικό υλικό, συμβατό με το υλικό που το περιβάλλει*



Εικόνα 3.7 Προστατευτικό σώμα αισθητήρων



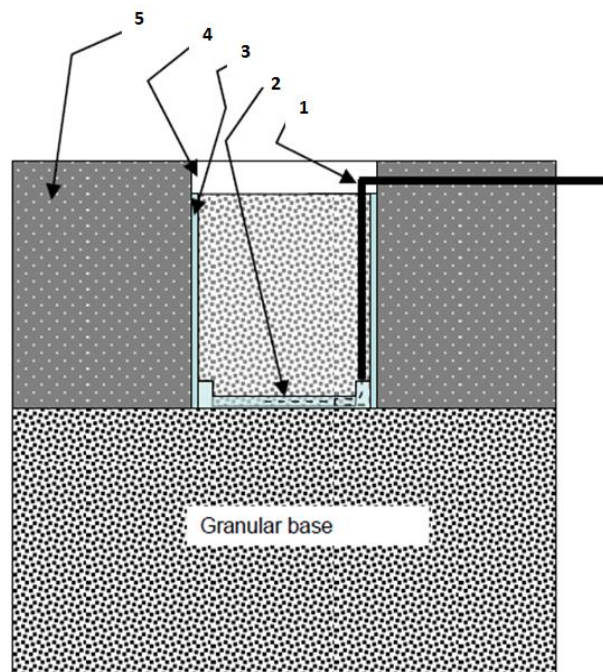
Εικόνα 3.8 Προστατευτικό σώμα ενσωματωμένο στον πυρήνα

Ο μετρητής σχεδιάζεται να τοποθετείται εκ των υστέρων σε υπάρχουσες στρώσεις οδοστρωμάτων (ασφαλτικό σκυρόδεμα, σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland ή άλλο συνδετικό υλικό), μέσω μίας τρύπας πυρήνα μικρής διαμέτρου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διατάραξη στη στρώση του οδοστρώματος προς μέτρηση. Οι αισθητήρες οπτικών ινών τοποθετούνται στο προστατευτικό σώμα από πολυμερές. Παρά το γεγονός ότι ηλεκτρικοί μετρητές παραμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προτεινόμενη εφαρμογή, προτιμούνται οι αισθητήρες οπτικών ινών λόγω της αντοχής τους στο νερό, τον παγετό και στον ηλεκτρισμό. Το προστατευτικό σώμα αποτελείται από πλαστικό πολυμερές, επιλεγμένο να έχει μηχανικές και θερμικές ιδιότητες παρόμοιες με το περιβάλλον υλικό, προκειμένου να μειωθούν οι διαταράξεις στο πεδίο των τάσεων γύρω από τον μετρητή, όταν το οδόστρωμα καταπονείται από φορτία βαρέων οχημάτων. Το υλικό του προστατευτικού σώματος είναι ομογενές και ιστροπικό και χρησιμοποιείται επαρκής ποσότητα ώστε να προστατεύει τους αισθητήρες. Όσον αφορά το σχήμα του προστατευτικού σώματος, είναι τέτοιο ώστε να προσφέρει άμεση αγκύρωση στα τοιχώματα της τρύπας. Επίσης, είναι σχεδιασμένο για την εγκατάσταση δύο κάθετων αισθητήρων παραμόρφωσης, για τη μέτρηση των διαμήκων και των εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των στρώσεων με συνδετικό υλικό. Τα μέρη του προστατευτικού σώματος που φέρουν τους αισθητήρες παραμόρφωσης πρέπει να έχουν μικρό μέγεθος, ώστε να μειώνεται η διατάραξη της μηχανικής απόκρισης του ασφαλτικού υλικού. Στις εικόνες 3.7 και 3.8 φαίνεται το προστατευτικό σώμα σε κάτοψη και πλάγια όψη.



Εικόνα 3.9 Μετρητές παραμόρφωσης έτοιμοι για εγκατάσταση στη στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος

Το προστατευτικό σώμα με τη σειρά του εφαρμόζει στη βάση ενός κατασκευασμένου στον εργαστήριο πυρήνα, ο οποίος έχει σχεδιαστεί να ταιριάζει στην κοιλότητα του πυρήνα στο οδόστρωμα. Προκειμένου να επιτύχουμε ομοιόμορφη απόκριση στη φόρτιση γύρω από τον μετρητή, ο πυρήνας πρέπει να αποτελείται από συνδετικό υλικό συμβατό με το υλικό της στρώσης του οδοστρώματος (ασφαλτικό σκυρόδεμα, σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland ή άλλου τύπους υλικών). Στην εικόνα 3.9 φαίνεται το προστατευτικό σώμα στη βάση του πυρήνα όπως και οι μετρητές έτοιμοι για εγκατάσταση στο οδόστρωμα. Ο μετρητής εγκαθίσταται στο οδόστρωμα, τοποθετώντας τον και κολλώντας τον στην επιθυμητή τοποθεσία στην κοιλότητα του πυρήνα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10.



1 Καλώδιο προς το σύστημα λήψης δεδομένων

2 Αισθητήρας παραμόρφωσης

3 Εποξειδική κολλητική ουσία

4 Τρύπα πυρήνα

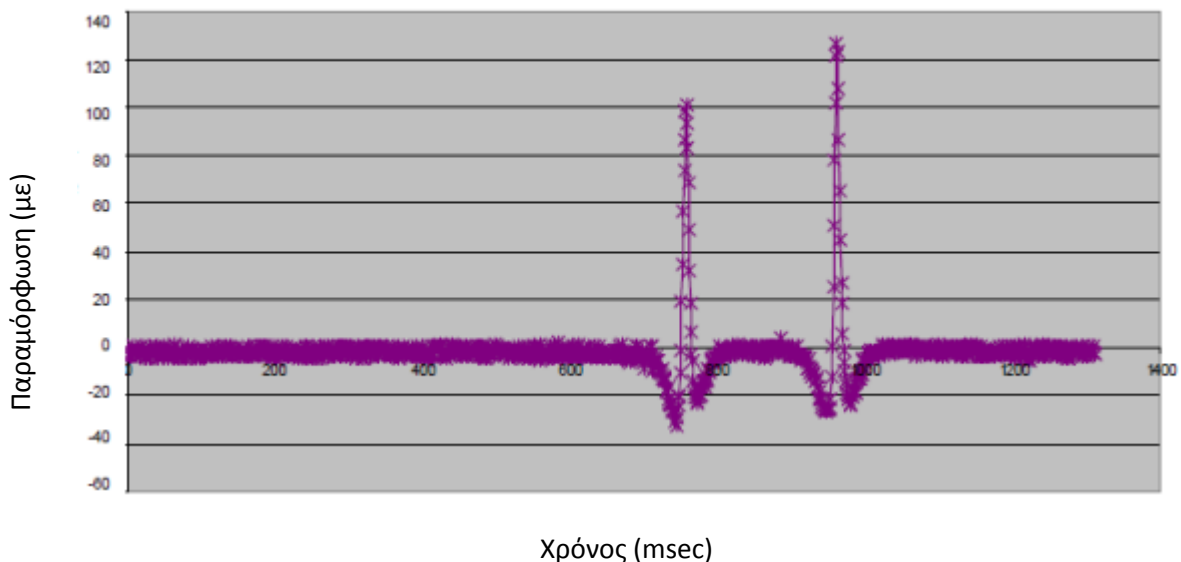
5 Υπάρχουσα ασφαλτική στρώση

Εικόνα 3.10 Εγκατάσταση του μετρητή παραμόρφωσης στην επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος

Μετά την εγκατάσταση στο οδόστρωμα όπως περιγράφηκε, ο μετρητής επιτρέπει ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις των οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της στρώσης. Η απόκριση αυτή συχνά χρησιμοποιείται ως βασικό κριτήριο απόκρισης για το σχεδιασμό και την ανάλυση του οδοστρώματος [Dore, Duplain, Pierre 2007].

3.5.4 Επί τόπου έλεγχος των μετρητών παραμόρφωσης

Οι μετρητές παραμόρφωσης ελέγχθηκαν στο πεδίο ώστε να επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά τους σε υπάρχοντα οδοστρώματα. Οι μετρητές εγκαταστάθηκαν σε αρκετά τμήματα του δρόμου, ως μέρος της έρευνας των μηχανικών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων. Αποδείχθηκε πως η τοποθέτησή τους σε υπάρχοντα οδοστρώματα ήταν εύκολη. Η διαδικασία εγκατάστασης περιλαμβάνει τη λήψη πυρήνων από το οδόστρωμα και τη δημιουργία σε αυτούς λεπτών σχισμών για το καλώδιο της οπτικής ίνας. Μετά τον καθαρισμό της τρύπας του πυρήνα, ο μετρητής προσκολλάται στην επιθυμητή θέση μέσα στην τρύπα, χρησιμοποιώντας ένα ειδικό εποξειδικό συστατικό. Το καλώδιο επίσης προσκολλάται στη σχισμή και καλύπτεται με το εποξειδικό υλικό για σφράγιση ρωγμών για επαρκή προστασία. Η εγκατάσταση μπορεί να γίνει σε χρονικό διάστημα λιγότερο της μιας μέρας. Η εικόνα 3.12 δείχνει ένα τυπικό αποτέλεσμα που δίνει ο μετρητής υπό την φόρτιση ενός κινούμενου διαξονικού φορτηγού.



Εικόνα 3.11 Τυπικό σήμα από έναν αισθητήρα παραμόρφωσης τοποθετημένο εκ των υστέρων σε οδόστρωμα υπό τη φόρτιση κινούμενο διαξονικού φορτηγού

3.5.5 Συμπεράσματα

Η νέα τεχνολογία που αναπτύσσεται για τη μέτρηση των οριζόντιων παραμορφώσεων σε ήδη υπάρχοντα οδοστρώματα, ξεπερνά πολλά προβλήματα της προηγούμενης τεχνολογίας σε αυτόν τον τομέα, μεταξύ των οποίων:

- Υπερβολικές θερμικές τάσεις που επιβάλλονται στους μετρητές παραμόρφωσης όταν τοποθετείται ένα θερμό ασφαλτικό υλικό απευθείας στον μετρητή (στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται θερμά ασφαλτικά μίγματα)
- Υπερβολικές μηχανικές τάσεις που επιβάλλονται στους μετρητές από συμπυκνωμένα υλικά ενόσω το ασφαλτικό σκυρόδεμα είναι ακόμα θερμό και έχει πολλή μικρή ακαμψία. Αυτές οι τάσεις είναι συχνά η αιτία της μετατόπισης των μετρητών, μειώνοντας αισθητά την αξιοπιστία των μετρήσεων.
- Οι μετρητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά μόνο για νέες στρώσεις οδοστρωμάτων.

Τα επί τόπου πειράματα με το νέο είδος μετρητών απέδειξαν πως η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι εύκολη στη εγκατάσταση και προσαρμόζεται εύκολα για μέτρηση οριζόντιων παραμορφώσεων σε υπάρχοντα οδοστρώματα [Dore, Duplain, Pierre 2007].

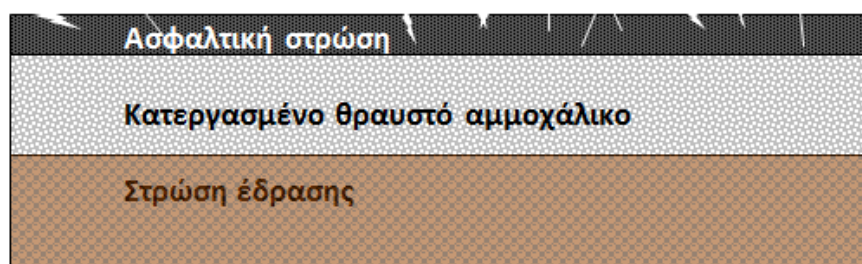
4. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑ

Σκοπός του πειράματος που διεξήχθη στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Ε.Μ.Π. σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου ήταν η μέτρηση της οριζόντιας παραμόρφωσης της ασφαλτικής και της ανακυκλωμένης στρώσης ανακυκλωμένου οδοστρώματος υπό από την φόρτιση ενός κινούμενου οχήματος, με την τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών (fiber optic sensors). Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία προετοιμασίας και εγκατάστασης του συστήματος των αισθητήρων οπτικών ινών, καθώς και ο τρόπος διεξαγωγής του πειράματος.

4.1 Περιγραφή του πειράματος

4.1.1 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος

Το οδόστρωμα που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος ανήκε στην κατηγορία των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Αρχικά αποτελούνταν από τρεις επάλληλες στρώσεις, την ασφαλτική, τη στρώση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο και τη στρώση έδρασης (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Αρχική διατομή υπό μελέτη οδοστρώματος

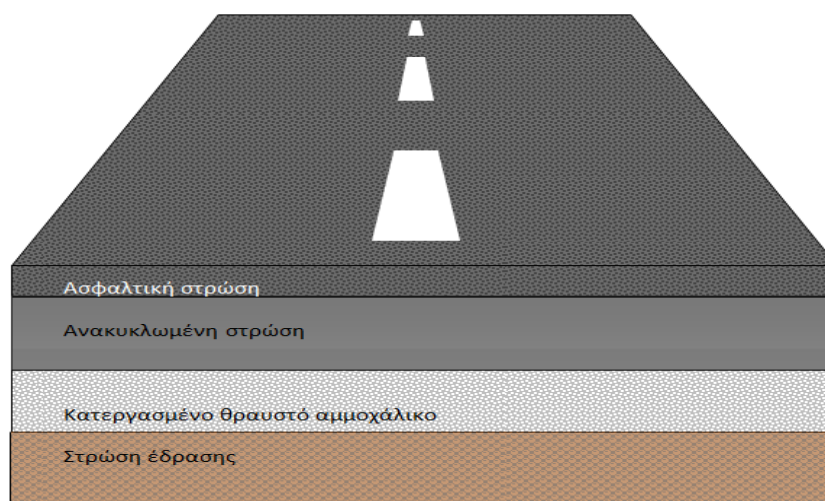
Στη συνέχεια όμως το οδόστρωμα αποκαταστάθηκε με τη μέθοδο της επί τόπου ψυχρής ανακύκλωσης εις βάθος με τη χρήση αφρώδους ασφάλτου. Σκοπός της ανακύκλωσης σε βάθος ήταν η ισχυροποίηση του κατεστραμμένου οδοστρώματος και η βελτίωση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας όπως η αντιολισθηρότητα και το επίπεδο εξυπηρέτησης. Τυπικά, μία ανακύκλωση θεωρείται σε βάθος όταν υπερβαίνει τα 150 mm βάθος. Με την ψυχρή ανακύκλωση σε κανένα στάδιο των εργασιών δεν απαιτείται θέρμανση των υλικών και έτσι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και μικρότερο κόστος κατασκευής λόγω της εξοικονόμησης πρώτων υλών (άσφαλτος και αδρανή) [Λοΐζος 2009]. Όσον αφορά στη διαδικασία ανακύκλωσης, με τη χρήση ενός τυμπάνου φρεζαρίσματος/μίξης η ασφαλτική στρώση και ένα μέρος της στρώσης του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου του αρχικού οδοστρώματος φρεζάρονται και αναμιγνύονται με την

παράλληλη πρόσθεση νερού, κονιωδών σταθεροποιητικών παραγόντων (όπως τσιμέντο Portland) και αφρώδους ασφάλτου (εικόνα 4.2).



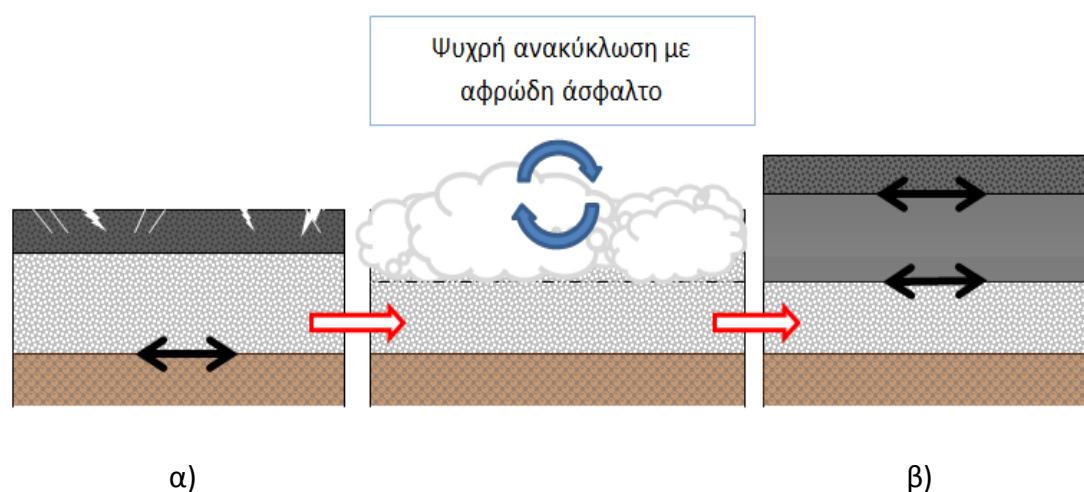
Εικόνα 4.2 Επί τόπου ψυχρή ανακύκλωση εις βάθος με αφρώδη άσφαλτο

Επομένως μετά την ανακύκλωση δημιουργήθηκε μία σταθεροποιημένη στρώση, η ανακυκλωμένη, πάνω από την οποία διαστρώθηκε νέα στρώση κυκλοφορίας ασφαλτικού σκυροδέματος. Συνεπώς, το νέο οδόστρωμα αποτελούνταν πλέον από την ασφαλτική στρώση (ασφαλτικό σκυρόδεμα), την ανακυκλωμένη στρώση, την στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου (Κ.Θ.Α.) και τη στρώση έδρασης (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Τελική διατομή, μετά την ανακύκλωση, υπό μελέτη οδοστρώματος

Η ανακύκλωση, πέρα από την αναμενόμενη αύξηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, επηρεάζει επίσης τις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του νέου οδοστρώματος. Όπως έχει αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο, σε ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα τα κρίσιμα μεγέθη αστοχίας είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα των κατεργασμένων στρώσεων. Μετά την διαδικασία της ανακύκλωσης οι κρίσιμες θέσεις «μεταφέρονται» στον πυθμένα της ασφαλτικής και της ανακυκλωμένης στρώσης, όπου οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις εξακολουθούν να αποτελούν τα κρίσιμα μεγέθη αστοχίας (εικόνα 4.4) [Λοΐζος, Παπαβασιλείου, Πλατή 2007].



Εικόνα 4.4 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας α) πριν και β) μετά την ανακύκλωση

4.1.2 Εγκατάσταση συστήματος αισθητήρων οπτικών ινών

Αρχικά το οδικό τμήμα αποκόπηκε από την κυκλοφορία και στη συνέχεια έγινε λήψη πυρήνων σε διαφορετικές θέσεις ώστε να γίνει προσδιορισμός της στρωματογραφίας του οδοστρώματος αλλά και εκτίμηση των παραμέτρων κάθε στρώσης. Οι πυρήνες, διαμέτρου 10 cm, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για περαιτέρω μελέτη και βάση αυτών κατασκευάστηκαν δύο πυρήνες ίδιων διαστάσεων και με τις ίδιες παραμέτρους, στους οποίους τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών. Συγκεκριμένα, οι πυρήνες κόπηκαν στη διεπιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης και της ανακυκλωμένης στρώσης, σε απόσταση 7.5 cm από το άνω άκρο όπου και τοποθετήθηκε το ένα προστατευτικό σώμα, ενώ το δεύτερο τοποθετήθηκε στη βάση του πυρήνα στο ύψος του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης (instrumentation). Κάθε ένα προστατευτικό σώμα φέρει δύο παραμορφωσιακούς αισθητήρες οπτικών ινών κάθετους μεταξύ τους, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο ένας αισθητήρας μετράει την οριζόντια παραμόρφωση σε διεύθυνση παράλληλη με την κίνηση των οχημάτων ενώ ο άλλος σε διεύθυνση κάθετη. Επομένως κάθε πυρήνας είχε εφοδιαστεί με

τέσσερις συνολικά αισθητήρες για τη μέτρηση διαμήκους και εγκάρσιας παραμόρφωσης σε δύο διαφορετικά βάθη.

Οι νέοι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο οδικό τμήμα απ' όπου είχαν προέλθει οι αρχικοί όπου και έλαβε χώρα η διαδικασία εγκατάστασής τους. Σε περιοχή κοντά στην αρχική πυρηνοληψία πραγματοποιήθηκε νέα, σε δύο θέσεις στην δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας, η μία ανατολικά και η άλλη δυτικά, οι οποίες απέχουν 0.25m και 0.50m από τη διαχωριστική γραμμή της λωρίδας εκτάκτου ανάγκης αντίστοιχα.



Εικόνα 4.5 Πυρηνοληψία με ειδικό μηχάνημα (καροτιέρα)



Εικόνα 4.6 Πυρήνας με αισθητήρες οπτικών ινών μέσα σε προστατευτικό σώμα

Στη συνέχεια έγινε με τη βοήθεια ειδικού μηχανήματος κοπή της στρώσης κυκλοφορίας του οδοστρώματος σε βάθος 1 cm, προκειμένου να ανοιχθούν αρμοί στους οποίους θα τοποθετηθούν τα καλώδια των αισθητήρων έτσι ώστε να οδηγούνται από τη θέση των πυρήνων εκτός του οδοστρώματος στο σύστημα λήψης δεδομένων (data acquisition system) (εικόνα 4.7) .

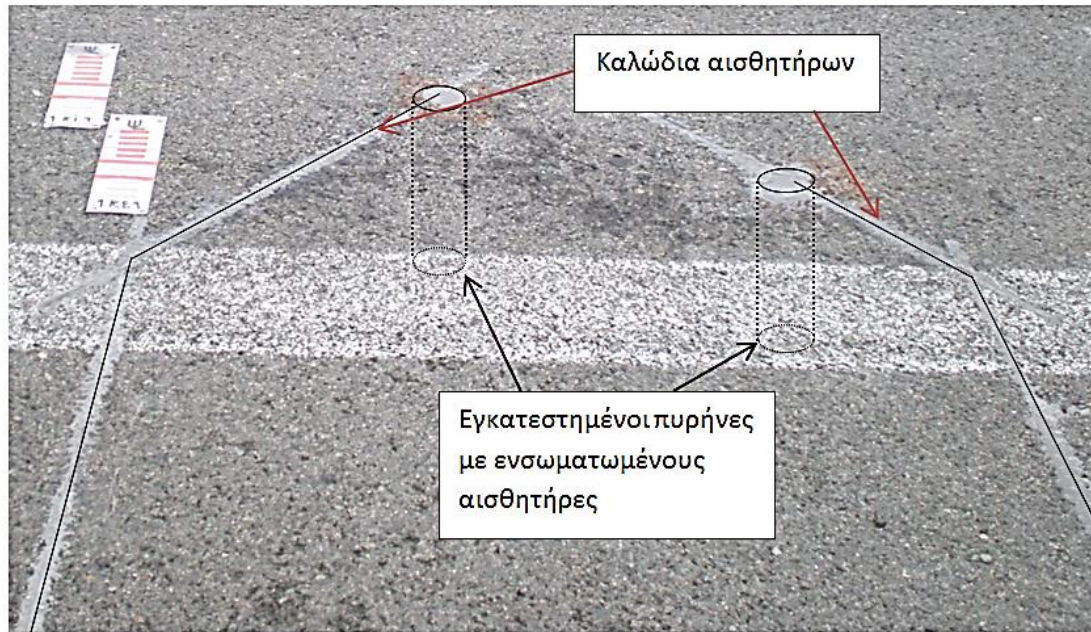


Εικόνα 4.7 Διάνοιξη αρμών για τα καλώδια των αισθητήρων οπτικών ινών

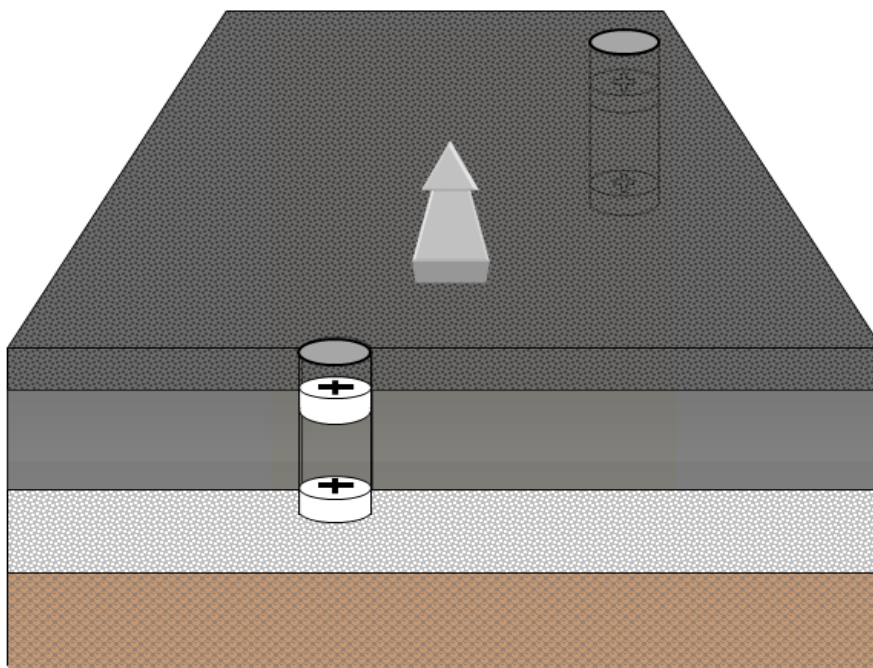
Οι διανοιγμένες οπές των πυρήνων καθαρίστηκαν και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε αυτές οι εφοδιασμένοι με αισθητήρες πυρήνες. Τα προστατευτικά σώματα που φέρουν οι αισθητήρες προσκολλήθηκαν στην οπή με τη χρήση μιας εποξειδικής ρητίνης. Η ίδια ρητίνη χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει τα καλώδια των αισθητήρων που προσκολλούνται στις σχισμές ώστε να υπάρχει επαρκής προστασία. Τα καλώδια των αισθητήρων οδηγούνται μέσω των αρμών εκτός του οδοστρώματος. Στη συνέχεια οι τοποθετημένοι πυρήνες και οι αρμοί των καλωδίων καλύφθηκαν επιφανειακά με υλικό πλήρωσης.

Για τον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος των αισθητήρων οπτικών ινών χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer) του Ε.Μ.Π., το οποίο τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω στις θέσεις των νέων πυρήνων όπου και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές. Καταγράφηκαν οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και έτσι ελέγχθηκαν οι μετρήσεις του συστήματος των εγκατεστημένων αισθητήρων.

Τέλος τοποθετήθηκαν σε κάποια απόσταση όπισθεν των πυρήνων βαθμονομημένα μεταλλικά φύλλα (πιάτα) προκειμένου να διευκολυνθεί ο οδηγός του οχήματος αλλά και να καταστεί δυνατός ο εντοπισμός την ακριβούς θέσης του τροχού του διερχόμενου οχήματος σε σχέση με τις θέσεις των πυρήνων. Συγκεκριμένα οι βαθμονομημένες λωρίδες τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικές θέσεις και έτσι προέκυψαν δύο σειρές δοκιμών.



Εικόνα 4.8 Εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών



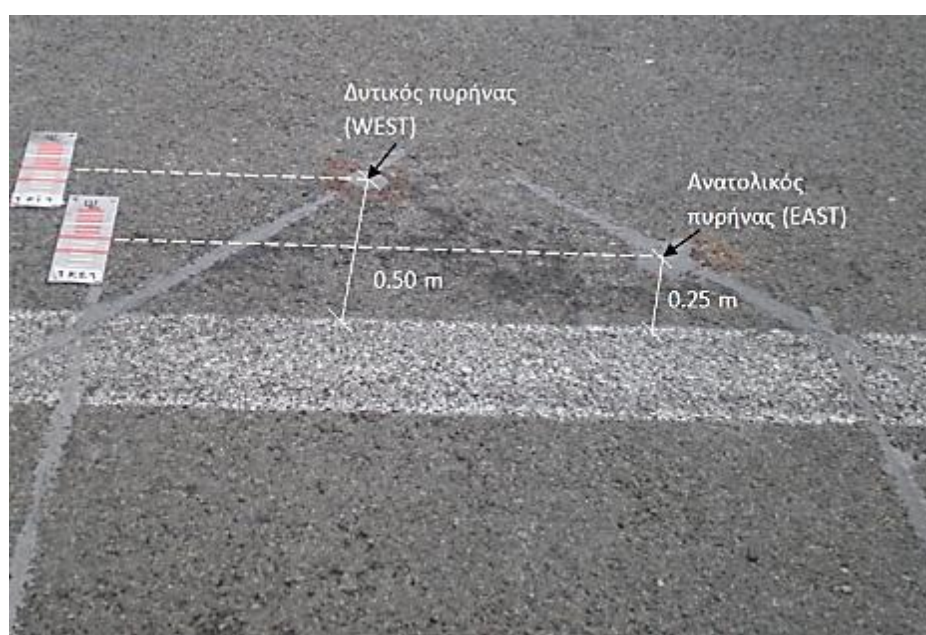
Εικόνα 4.9 Εγκατεστημένο σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών - τομή

4.2 Πρώτη σειρά δοκιμών 1Κ

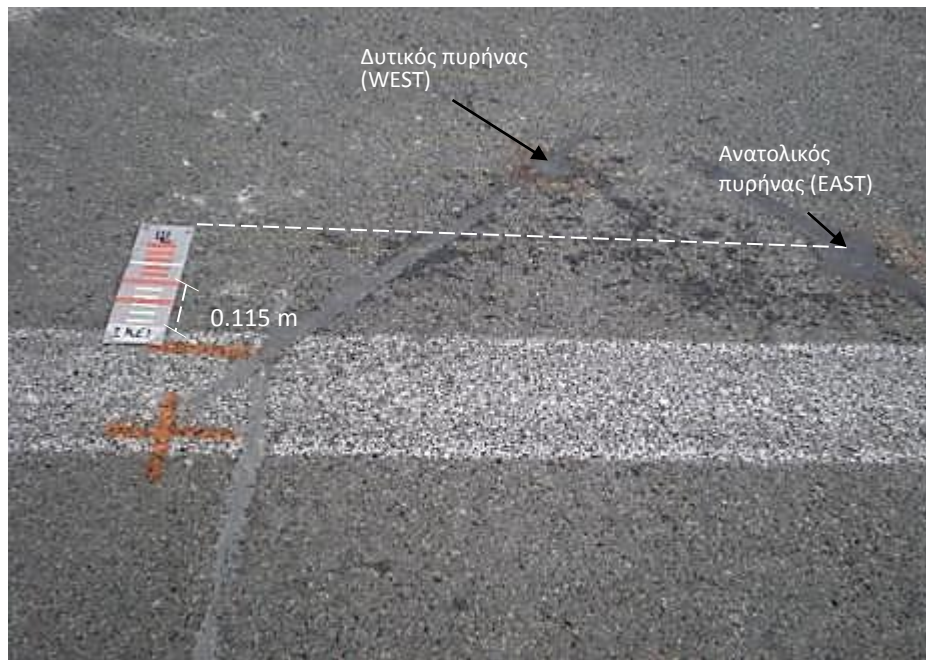
Στην πρώτη σειρά δοκιμών τοποθετήθηκαν δύο βαθμονομημένα μεταλλικά φύλλα σε μικρή απόσταση όπισθεν των πυρήνων. Τα δύο φύλλα τοποθετήθηκαν έτσι ώστε τα κέντρα τους να βρίσκονται στην ίδια ευθεία με τα κέντρα του ανατολικού και του δυτικού πυρήνα αντίστοιχα, τα οποία απέχουν από τη λωρίδα εκτάκτου ανάγκης 0.25m και 0.50m αντίστοιχα. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν 10 διελεύσεις του οχήματος.

4.3 Δεύτερη σειρά δοκιμών 2Κ

Στην δεύτερη σειρά δοκιμών αφαιρέθηκε το ένα φύλλο και το άλλο μετατοπίστηκε έτσι ώστε το δυτικό του άκρο να βρίσκεται στην ίδια ευθεία με το κέντρο του ανατολικού πυρήνα, ενώ το κέντρο του απείχε 0.115m από την εσωτερική γραμμή της λωρίδας εκτάκτου ανάγκης. Στην δεύτερη σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκαν 11 διελεύσεις του οχήματος.



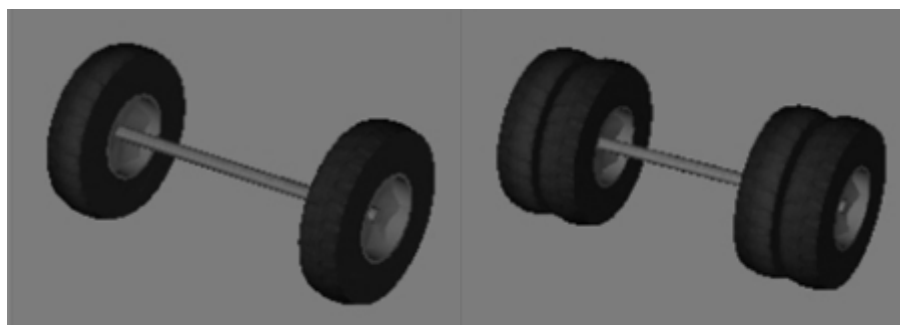
Εικόνα 4.10 1^η σειρά δοκιμών 1Κ



Εικόνα 4.11 2η σειρά δοκιμών 2Κ

4.4 Χαρακτηριστικά οχήματος

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε διαξονικό όχημα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την 1^η σειρά δοκιμών πραγματοποιήθηκαν 10 διελεύσεις του οχήματος ενώ για τη 2^η σειρά δοκιμών 11 διελεύσεις. Συγκεκριμένα ο εμπροσθεν άξονας του οχήματος φέρει φορτίο 6.92 t και μονούς τροχούς με ελαστικά τύπου TOYO 315.80R.22,5 και πίεση 110 psi (=758.42 kra). Ο όπισθεν άξονας φέρει φορτίο 16.65 t και διπλούς τροχούς με ελαστικά τύπου Michelin 315/80R 22,5 και πίεση 120 psi (=827.37 kra). Η διάταξη και τα χαρακτηριστικά των τροχών φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 4.10 και στον πίνακα 4.1.



α)

β)

Εικόνα 4.12 α) Έμπροσθεν και β) όπισθεν άξονας οχήματος

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά αξόνων οχήματος

	Έμπροσθεν άξονας	Όπισθεν άξονας
Τύπος τροχού	Μονός	Διπλός
Τύπος ελαστικών	TOYO 315.80R.22,5	Michelin 315/80R 22,5
Φορτίο	6.92 t	16.65 t
Πίεση ελαστικών	110 psi	120 psi

4.5 Διεξαγωγή του πειράματος

Μετά την εγκατάσταση του συστήματος των αισθητήρων οπτικών ινών, καθώς και των βαθμονομημένων μεταλλικών φύλλων για τον προσδιορισμό της θέσης των τροχών, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές διελεύσεις του οχήματος ώστε να ελεγχθεί η απόκριση της ασφαλτικής και της ανακυκλωμένης στρώσης, όπως αυτή μετρήθηκε από τους αισθητήρες οπτικών ινών. Με την εκκίνηση του οχήματος και την φόρτιση του οδοστρώματος, οι αισθητήρες ενεργοποιούνται και αποστέλλουν με τη μορφή σήματος την παραμόρφωση της θέσης όπου είναι εγκατεστημένοι για κάθε χρονική στιγμή. Καθώς το όχημα προσεγγίζει τους αισθητήρες η παραμόρφωση στις συγκεκριμένες θέσεις μεταβάλλεται, μέχρις ότου να απομακρυνθεί από τους πυρήνες οπότε και η απόκριση του οδοστρώματος λόγω του φορτίου του να θεωρείται μηδενική. Επομένως μετά από κάθε διέλευση του οχήματος, προκύπτει από κάθε αισθητήρα ένα διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου, όπου η καμπύλη παρουσιάζει, κατά κανόνα, δύο μέγιστες κατά απόλυτη τιμή τιμές, σε αντιστοιχία με τις χρονικές στιγμές που ο έμπροσθεν ή ο όπισθεν τροχός βρίσκεται ακριβώς στις θέσεις των πυρήνων. Όπως έχει αναφερθεί, σε κάθε πυρήνα έχουν τοποθετηθεί τέσσερις αισθητήρες με αποτέλεσμα μετά από κάθε διέλευση-δοκιμή να προκύπτουν οκτώ διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές δοκιμών, αρχικά η 1K όπου έγιναν 10 διελεύσεις και στη συνέχεια η 2K όπου έγιναν 11 διελεύσεις.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

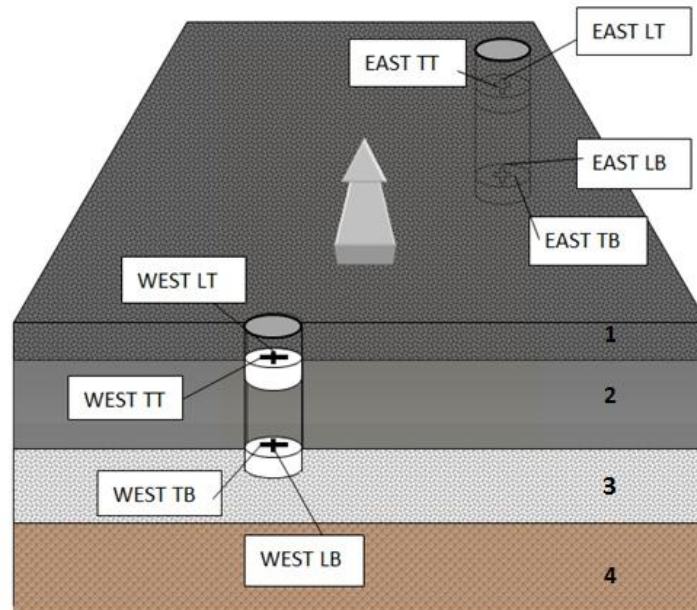
Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε πως έγινε οι συλλογή των τιμών των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου, σε κάθε θέση όπου είχαν εγκατασταθεί οι αισθητήρες οπτικών ινών. Κάθε αισθητήρας παρείχε ένα σύνολο τιμών της παραμόρφωσης για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχούσε σε μία διέλευση του οχήματος. Επομένως σε κάθε θέση εγκατεστημένου αισθητήρα και για κάθε διέλευση αντιστοιχεί ένα διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου. Με αυτόν τον τρόπο για κάθε διέλευση του οχήματος το σύστημα των αισθητήρων μας παρέχει 8 διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά υπόκεινται σε κάποια επεξεργασία προκειμένου να ευνοούν την εξαγωγή συμπερασμάτων.

5.1 Κωδικοποίηση παραμορφώσεων ανάλογα με τη θέση

Όπως έχει αναφερθεί, σε δύο πυρήνες κατασκευασμένους στο εργαστήριο με ίδια χαρακτηριστικά με πυρήνες που προήλθαν από το υπό μελέτη οδικό τμήμα, τοποθετήθηκαν αισθητήρες στο ύψος της επιφάνειας και του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης (instrumentation). Σε κάθε ύψος υπήρχαν δύο αισθητήρες κάθετοι μεταξύ τους. Στη συνέχεια οι πυρήνες τοποθετήθηκαν σε δύο ανοιγμένες οπές με την ίδια διάμετρο στο συγκεκριμένο οδικό τμήμα σε μία ανατολική και μία δυτική θέση. Για διευκόλυνση οι τιμές της παραμόρφωσης από κάθε αισθητήρα κωδικοποιήθηκαν σύμφωνα με τον πυρήνα, τη θέση και τη διεύθυνση στην οποία αναφέρονται. Με βάση τη θέση του πυρήνα οι μετρήσεις διακρίνονται σε ανατολικής (EAST) και δυτικής (WEST) θέσης, με βάση το βάθος σε επιφάνειας (TOP) και πυθμένα (BOTTOM) ανακυκλωμένης στρώσης ενώ με βάση τη διεύθυνση της παραμόρφωσης σε διαμήκη (LONGITUDINAL) και εγκάρσια (TRANSVERSAL). Προκύπτουν έτσι 8 κατηγορίες μετρημένων παραμορφώσεων:

Πίνακας 5.1 Κωδικοποίηση μετρημένων παραμορφώσεων

EAST LT	διαμήκης στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα
EAST TT	εγκάρσια στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα
EAST LB	διαμήκης στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα
EAST TB	εγκάρσια στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα
WEST LT	διαμήκης στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα
WEST TT	εγκάρσια στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα
WEST LB	διαμήκης στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα
WEST TB	εγκάρσια στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα

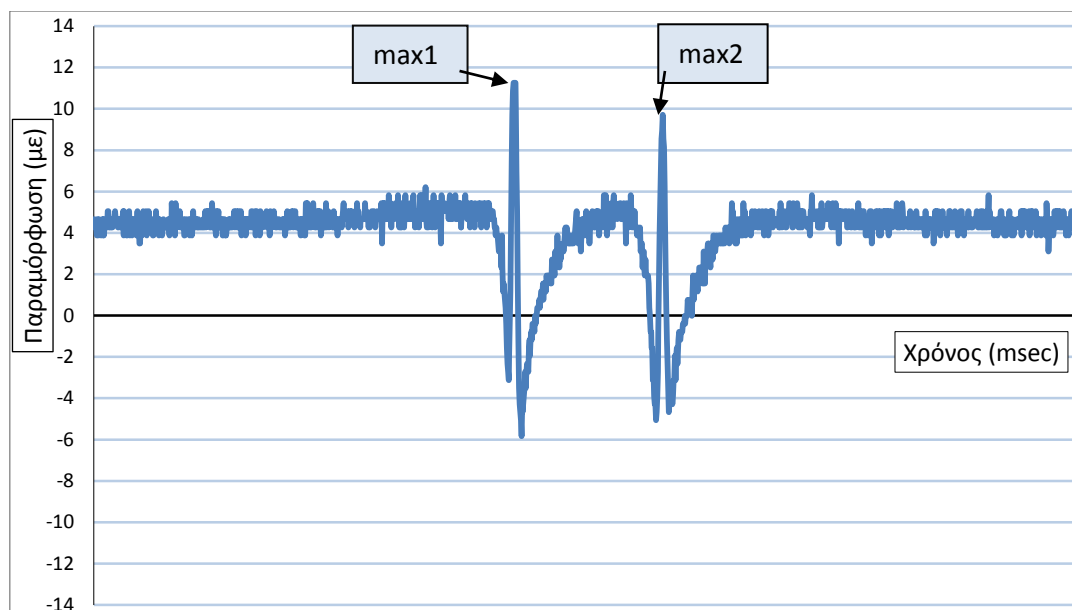


- 1) Ασφαλτική στρώση
- 2) Ανακυκλωμένη στρώση αφρώδους ασφάλτου
- 3) Στρώση κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου
- 4) Στρώση έδρασης

Εικόνα 5.1 Σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών

5.2 Σχηματισμός διαγραμμάτων παραμόρφωσης-χρόνου

Μετά από κάθε διέλευση του οχήματος για το χρονικό διάστημα που διαρκεί, κάθε αισθητήρας παρέχει έναν μεγάλο αριθμό τιμών παραμόρφωσης, οι οποίες αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές της τάξης των msec . Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου, όπου είναι εμφανείς οι δύο μεγαλύτερες τιμές της παραμόρφωσης (κατά απόλυτη τιμή) οι οποίες αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές που ο έμπροσθεν ή ο όπισθεν τροχός βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη θέση που είναι εγκατεστημένος ο αισθητήρας. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου ενός αισθητήρα μετά από τη διέλευση του οχήματος:



Εικόνα 5.2 Διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου

5.3 Διαδικασία αφαίρεσης θορύβου

Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.2, η αρχή της καμπύλης των παραμορφώσεων συναρτήσεως του χρόνου δε βρίσκεται στο μηδέν αλλά έχει κάποια αρχική τιμή (εδώ 4). Αυτό συμβαίνει διότι το σήμα που λαμβάνεται στο σύστημα συγκέντρωσης δεδομένων από το σύστημα των αισθητήρων δεν είναι "καθαρό" καθώς περιέχει και άλλες πληροφορίες, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα η μετρούμενη ποσότητα να εμφανίζεται αυξημένη ή μειωμένη ανάλογα με την περίπτωση. Το σύνολο αυτών των ανεπιθύμητων πληροφοριών που συνοδεύουν το σήμα και υποβαθμίζουν την ορθότητα και την ακρίβεια της μέτρησης ονομάζεται θόρυβος (noise). Ο θόρυβος στα συστήματα οπτικών ινών διακρίνεται σε [Αβραμόπουλος 2007]:

- **Θόρυβος βολής (shot noise)**

Είναι κβαντικό φαινόμενο και οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια δεν παράγονται σε τακτά χρονικά διαστήματα αλλά σε τυχαίες στιγμές (όταν προσπίπτουν φωτόνια).

- **Θερμικός θόρυβος (thermal noise)**

Περιγράφει το θόρυβο λόγω της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων στις ωμικές αντιστάσεις του φωτοφωρατή.

- **Θόρυβος σκότους (dark noise)**

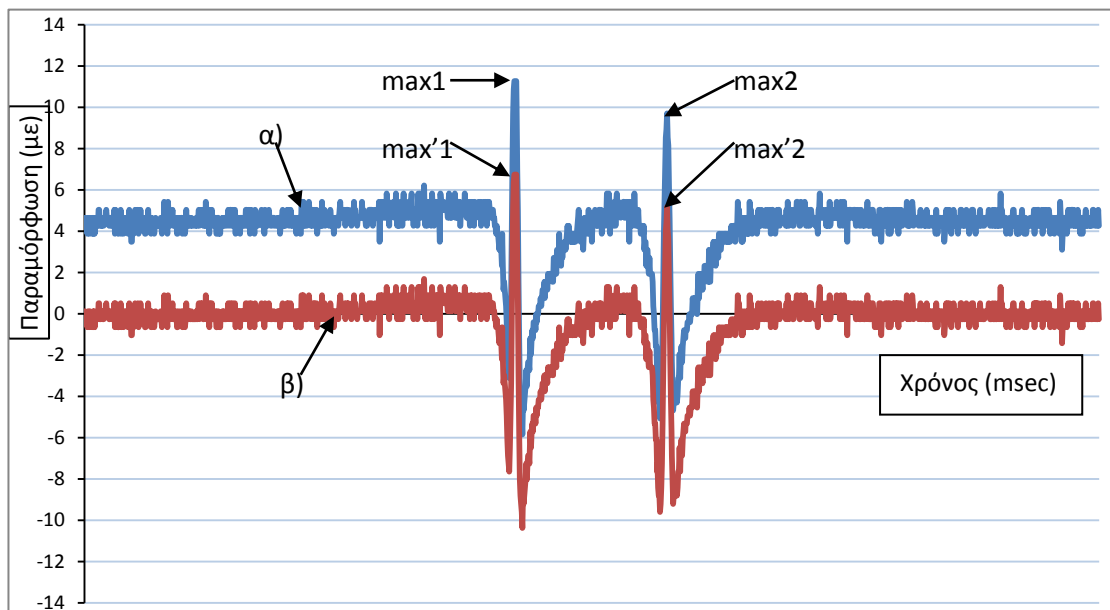
Οφείλεται στο ότι τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται όχι μόνο από την πρόσπτωση των φωτονίων αλλά και με θερμικό τρόπο.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο θόρυβος δρα προσθετικά, επομένως πρέπει από κάθε διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου να αφαιρεθεί ώστε να προκύψουν διαγράμματα "καθαρού" σήματος που θα οδηγούν σε ασφαλή αποτελέσματα.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αφαίρεση του θορύβου στα διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Επιλογή των είκοσι τιμών που προηγούνται του πρώτου μέγιστου (*max1*)
2. Υπολογισμός του μέσου όρου αυτών των τιμών
3. Αφαίρεση του υπολογισμένου μέσου όρου από το σύνολο των τιμών του διαγράμματος

Η μορφή που αποκτά το διάγραμμα μετά την αφαίρεση του θορύβου φαίνεται στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 Καμπύλη α) πριν και β) μετά την αφαίρεση του θορύβου

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε σε όλα τα διαγράμματα παραμορφώσεων-χρόνου που προέκυψαν από το σύστημα των αισθητήρων για τις δύο σειρές δοκιμών 1K και 2K. Τα τροποποιημένα διαγράμματα φαίνονται στο παράρτημα.

5.4 Απόκλιση οχήματος

Στο επί τόπου πείραμα έγιναν, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δύο σειρές δοκιμών του οχήματος (1K και 2K) οι οποίες αποτελούνταν από δέκα και έντεκα διελεύσεις αντίστοιχα. Ο στόχος σε κάθε διεύση ήταν να περάσει το όχημα όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους πυρήνες γίνεται. Όπισθεν των πυρήνων σε μικρή απόσταση από αυτούς τοποθετήθηκαν μεταλλικές βαθμονομημένες λωρίδες (πιάτα), οι οποίες σε συνδυασμό με την μαγνητοσκόπηση κάθε διεύσης, δίνουν τη δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού του ίχνους του τροχού σε κάθε δοκιμή. Με αυτόν τον τρόπο είναι εύκολη η καταγραφή της απόκλισης του τροχού από τα κέντρα των μεταλλικών λωρίδων.



Εικόνα 5.4 Ακριβής εντοπισμός ίχνους τροχού

Γνωρίζοντας τη θέση των κέντρων των δύο πυρήνων σε σχέση με τη θέση των κέντρων των βαθμονομημένων μεταλλικών λωρίδων, μπορεί να γίνει προσαρμογή της απόκλισης του τροχού στα κέντρα των πυρήνων σε κάθε δοκιμή. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αποκλίσεις του όπισθεν εξωτερικού τροχού από τα κέντρα του ανατολικού και του δυτικού πυρήνα για τις δύο σειρές δοκιμών:

Πίνακας 5.2 Αποκλίσεις όπισθεν τροχού

1 ^η Σειρά δοκιμών 1K				2 ^η Σειρά δοκιμών 2K			
Δοκιμή	offset (mm)	offset' (mm)	offset'' (mm)	Δοκιμή	offset (mm)	offset' (mm)	offset'' (mm)
1KE1	150	150	400	2KE1	150	300	550
1KE2	250	250	500	2KE2	100	250	500
1KE3	-50	-50	200	2KE3	-10	140	390
1KE4	250	250	500	2KE4	0	150	400
1KE5	-250	-250	0	2KE5	100	250	500
1KE6	60	60	310	2KE6	150	300	550
1KE7	-50	-50	200	2KE7	200	350	600
1KE8	50	50	300	2KE8	100	250	500
1KE9	25	25	275	2KE9	150	300	550
1KE10	-65	-65	185	2KE10	130	280	530
	M.O.	42,5	292,5	2KE11	-10	140	390
					M.O.	195	445

offset: απόκλιση από το κέντρο της μεταλλικής πλάκας

offset': απόκλιση από το κέντρο του ανατολικού (EAST) πυρήνα

offset'': απόκλιση από το κέντρο του δυτικού (WEST) πυρήνα

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕ ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Τα αναλυτικά αποτελέσματα της απόκρισης της ασφαλτικής και της ανακυκλωμένης στρώσης για τις διελεύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο επί τόπου πείραμα, προέκυψαν με τη βοήθεια των λογισμικών KENLAYER, BISAR 3.0 και mePADS με την παραδοχή της γραμμικής πολυστρωματικής ανάλυσης (MLE). Τα προγράμματα αυτά για τον υπολογισμό των θεωρητικών παραμορφώσεων στηρίζονται, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη θεωρία των στρώσεων του Burmister και έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους κυρίως ως προς την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα το λογισμικό mePADS προσφέρει τη δυνατότητα χρωματικής και διαγραμματικής απεικόνισης τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων στο εύκαμπτο οδόστρωμα. Κατά τα άλλα όλα τα προαναφερθέντα λογισμικά υπολογίζουν τις θεωρητικές τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις σε διαφορετικά βάθη στον όγκο του οδοστρώματος, ενώ δίνεται η δυνατότητα επιλογής ενός μεγάλου αριθμού φορτίων και στρώσεων.

6.1 Καθορισμός δεδομένων

Το στατικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε στα διάφορα λογισμικά περιλαμβάνει παραμέτρους που σχετίζονται τόσο με τις στρώσεις του οδοστρώματος όσο και με τα φορτία που επιβάλλονται σε αυτό.

Από τις διάφορες πυρηνοληψίες που πραγματοποιήθηκαν στο υπό μελέτη οδικό τμήμα και στη συνέχεια από την ανάλυσή τους στο εργαστήριο, προέκυψαν οι παράμετροι των στρώσεων του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα προέκυψαν τα πάχη d_i , τα μέτρα ελαστικότητας E_i και οι λόγοι Poisson ν_i για κάθε στρώση, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.1. Η διάσταση κατά την οριζόντια έννοια των επάλληλων στρώσεων θεωρείται άπειρη, όπως και το πάχος της στρώσης έδρασης.

	E_{EAST} (MPa)	E_{WEST} (MPa)	h (m)	ν	
1	14200	9600	0,105	0,35	1) Ασφαλτική στρώση
2	4960	7140	0,25	0,35	2) Ανακυκλωμένη στρώση
3	4890	5880	0,20	0,25	3) Κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο
4	494	485		0,40	4) Στρώση έδρασης

Εικόνα 6.1 Παράμετροι των επί μέρους στρώσεων του υπό μελέτη οδοστρώματος

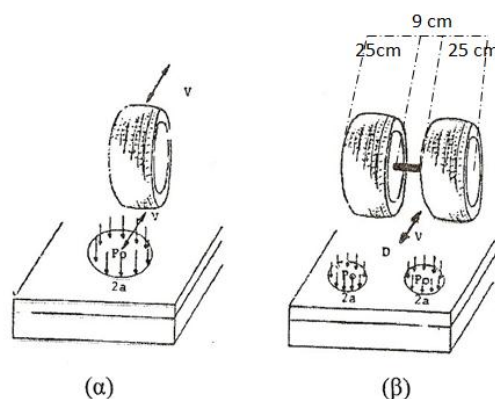
Όσον αφορά στα φορτία που επιβάλλονται στο οδόστρωμα από το όχημα, γίνεται η παραδοχή ότι η πίεση επαφής τροχού επί του οδοστρώματος είναι ίση με την εσωτερική πίεση του ελαστικού καθώς και ότι πρόκειται για ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο σε κυκλική επιφάνεια επαφής τροχού οδοστρώματος. Επομένως η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής r είναι [Λοΐζος 2008]:

$$r = \left(\frac{P}{p\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

όπου P = το φορτίο του τροχού

p = η εσωτερική πίεση του ελαστικού

Με δεδομένο ότι ο όπισθεν άξονας του οχήματος αποτελείται από δίδυμους τροχούς γίνεται η παραδοχή δύο κυκλικών επιφανειών με ομοιόμορφη φόρτιση.



Εικόνα 6.2 Στατικό πρότυπο α) έμπροσθεν και β) όπισθεν τροχού

Επομένως σχετικά με τα χαρακτηριστικά των φορτίων των ελαστικών έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά τροχών οχήματος

Τροχός	Φορτίο τροχού P (KN)	Πίεση ελαστικού p (psi)	Πίεση ελαστικού p (kPa)	Ακτίνα αποτυπώματος r (m)
Έμπροσθεν	34.6	110	758.42	0.1205
Όπισθεν εσωτερικός	41.625	120	827.37	0.1266
Όπισθεν εξωτερικός	41.625	120	827.37	0.1266

Τέλος, στο επί τόπου πείραμα η φόρτιση από το όχημα στους πυρήνες όπου έχει εγκατασταθεί το σύστημα των αισθητήρων εμφανίζει εκκεντρότητα λόγω της απόκλισης των τροχών, η οποία έχει καταγραφεί σε κάθε δοκιμή, όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο . Γίνεται προσαρμογή της απόκλισης αυτής στα κέντρα των δύο πυρήνων για κάθε έναν από τους τρεις τροχούς με δεδομένο για τις μεταξύ τους αποστάσεις, ότι οι δύο δίδυμοι τροχοί απέχουν 34 cm, ενώ ο εμπροσθεν με τον εξωτερικό όπισθεν απέχουν 15 cm (εικόνα 6.2). Επομένως προκύπτουν οι παρακάτω δύο πίνακες αποκλίσεων για την 1K και 2K σειρά δοκιμών αντίστοιχα:

Πίνακας 6.2 Αποκλίσεις 1^{ης} σειράς δοκιμών 1K

Δοκιμή	Τροχός	Απόκλιση από EAST πυρήνα	Απόκλιση από WEST πυρήνα
1K1	Έμπροσθεν	0,00	0,25
1K2	Έμπροσθεν	0,10	0,35
1K3	Έμπροσθεν	-0,20	0,05
1K4	Έμπροσθεν	0,10	0,35
1K5	Έμπροσθεν	-0,40	-0,15
1K6	Έμπροσθεν	-0,09	0,16
1K7	Έμπροσθεν	-0,20	0,05
1K8	Έμπροσθεν	-0,10	0,15
1K9	Έμπροσθεν	-0,125	0,125
1K10	Έμπροσθεν	-0,215	0,035
1K1	Όπισθεν Εξωτ.	0,150	-0,19
1K2	Όπισθεν Εξωτ.	0,25	-0,09
1K3	Όπισθεν Εξωτ.	-0,05	-0,39
1K4	Όπισθεν Εξωτ.	0,25	-0,09
1K5	Όπισθεν Εξωτ.	-0,25	-0,59
1K6	Όπισθεν Εξωτ.	0,06	-0,28
1K7	Όπισθεν Εξωτ.	-0,05	-0,39
1K8	Όπισθεν Εξωτ.	0,05	-0,29
1K9	Όπισθεν Εξωτ.	0,025	-0,315
1K10	Όπισθεν Εξωτ.	-0,065	-0,405
1K1	Όπισθεν Εσωτ.	0,40	0,06
1K2	Όπισθεν Εσωτ.	0,50	0,16
1K3	Όπισθεν Εσωτ.	0,20	-0,14
1K4	Όπισθεν Εσωτ.	0,50	0,16
1K5	Όπισθεν Εσωτ.	0,00	-0,34
1K6	Όπισθεν Εσωτ.	0,31	-0,03
1K7	Όπισθεν Εσωτ.	0,20	-0,14
1K8	Όπισθεν Εσωτ.	0,30	-0,04
1K9	Όπισθεν Εσωτ.	0,275	-0,065
1K10	Όπισθεν Εσωτ.	0,185	-0,155

Πίνακας 6.3 Αποκλίσεις 2^{ης} σειράς δοκιμών 2Κ

Δοκιμή	Τροχός	Απόκλιση από EAST πυρήνα	Απόκλιση από WEST πυρήνα
2Κ1	Έμπροσθεν	0,15	0,40
2Κ2	Έμπροσθεν	0,10	0,35
2Κ3	Έμπροσθεν	-0,01	0,24
2Κ4	Έμπροσθεν	0,00	0,25
2Κ5	Έμπροσθεν	0,10	0,35
2Κ6	Έμπροσθεν	0,15	0,40
2Κ7	Έμπροσθεν	0,20	0,45
2Κ8	Έμπροσθεν	0,10	0,35
2Κ9	Έμπροσθεν	0,15	0,40
2Κ10	Έμπροσθεν	0,13	0,38
2Κ11	Έμπροσθεν	-0,01	0,24
2Κ1	Όπισθεν Εξωτ.	0,30	0,55
2Κ2	Όπισθεν Εξωτ.	0,25	0,50
2Κ3	Όπισθεν Εξωτ.	0,14	0,39
2Κ4	Όπισθεν Εξωτ.	0,15	0,40
2Κ5	Όπισθεν Εξωτ.	0,25	0,50
2Κ6	Όπισθεν Εξωτ.	0,30	0,55
2Κ7	Όπισθεν Εξωτ.	0,35	0,60
2Κ8	Όπισθεν Εξωτ.	0,25	0,50
2Κ9	Όπισθεν Εξωτ.	0,30	0,55
2Κ10	Όπισθεν Εξωτ.	0,28	0,53
2Κ11	Όπισθεν Εξωτ.	0,14	0,39
2Κ1	Όπισθεν Εσωτ.	-0,04	0,21
2Κ2	Όπισθεν Εσωτ.	-0,09	0,16
2Κ3	Όπισθεν Εσωτ.	-0,20	0,05
2Κ4	Όπισθεν Εσωτ.	-0,19	0,06
2Κ5	Όπισθεν Εσωτ.	-0,09	0,16
2Κ6	Όπισθεν Εσωτ.	-0,04	0,21
2Κ7	Όπισθεν Εσωτ.	0,01	0,26
2Κ8	Όπισθεν Εσωτ.	-0,09	0,16
2Κ9	Όπισθεν Εσωτ.	-0,04	0,21
2Κ10	Όπισθεν Εσωτ.	-0,06	0,19
2Κ11	Όπισθεν Εσωτ.	-0,20	0,05

Επομένως, έχοντας εισάγει τα δεδομένα για τις παραμέτρους των στρώσεων του οδοστρώματος, των φορτίων του οχήματος και των θέσεων των φορτίων σε σχέση με τις θέσεις των πυρήνων, τα προγράμματα είναι έτοιμα να ξεκινήσουν την ανάλυση. Λόγω του ότι σε κανένα πρόγραμμα δε δίνεται η δυνατότητα κινούμενης φόρτισης (δυναμική φόρτιση), για κάθε διέλευση του οχήματος πραγματοποιήθηκαν μία ανάλυση για τη φόρτιση από τον έμπροσθεν τροχό και μία για τη φόρτιση από τους δίδυμους όπισθεν τροχούς (στατική φόρτιση). Επίσης, όπως φαίνεται και στη διατομή του οδικού τμήματος, τα μέτρα ελαστικότητας των

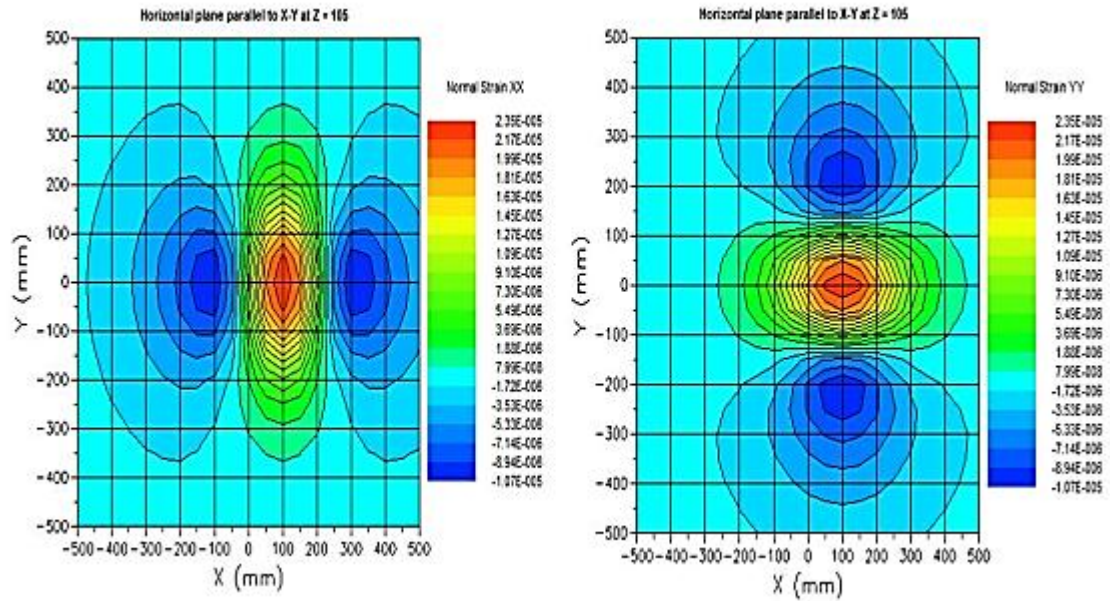
στρώσεων στις δύο χαρακτηριστικές θέσεις των πυρήνων διαφέρουν, άρα κάθε ανάλυση φόρτισης είτε από τον εμπροσθεν είτε από τον όπισθεν άξονα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για το δυτικό και για τον ανατολικό πυρήνα ξεχωριστά, δεδομένης της αδυναμίας των προγραμμάτων να εισάγουν μεταβαλλόμενες παραμέτρους.

6.2 Υπολογισμός παραμορφώσεων

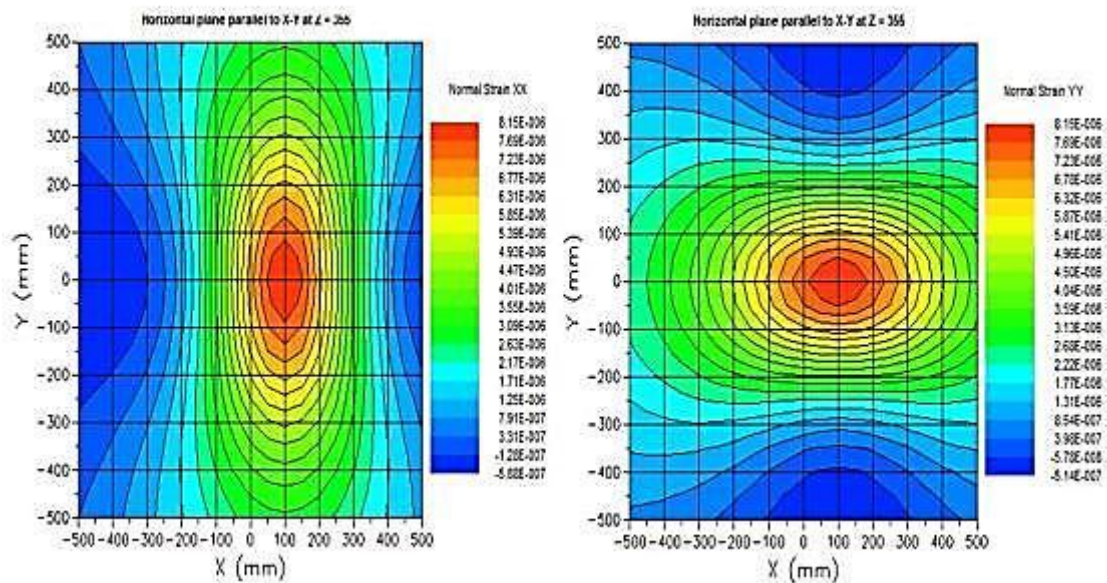
Για τις θεωρητικές επιλύσεις έγινε παράλληλη χρήση των προγραμμάτων BISAR 3.0 και mePADS. Το πρώτο δίνει τη δυνατότητα εμφάνισης των αποτελεσμάτων είτε στη μορφή ενός συνοπτικού πίνακα είτε στη μορφή μιας πιο λεπτομερούς αναφοράς, ενώ το δεύτερο παρέχει χρωματική και διαγραμματική απεικόνιση της κατανομής των παραμορφώσεων σε διαφορετικά βάθη στον όγκο του οδοστρώματος. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά ένας πίνακας αναφοράς για μία ανάλυση φόρτισης του εμπροσθεν και του όπισθεν τροχού στον ανατολικό πυρήνα καθώς και η αντίστοιχη κατανομή των παραμορφώσεων στα δύο βάθη μελέτης για την εκάστοτε φόρτιση. Το κέντρο του πυρήνα σε κάθε χρωματική απεικόνιση ταυτίζεται με το σημείο (0,0). Ο συγκεντρωτικός πίνακας των παραμορφώσεων για όλες τις διελεύσεις και για τις δύο σειρές δοκιμών 1K και 2K παρατίθεται στο παράρτημα.

BISAR 3.0 - Block Report													
1K2-EAST-FRONT													
System 1: (untitled)													
Structure				Loads									
Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal Load (kN)	Horizontal Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)	
1	0.105	1.420E+04	0.35	1	3.460E+01	7.585E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.205E-01	1.000E-01	0.000E+00	0.000E+00	
2	0.250	4.960E+03	0.35										
3	0.200	4.890E+03	0.25										
4		4.940E+02	0.40										
Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX μstrain	Strains YY μstrain	ZZ μstrain	UX (μm)	UY (μm)	UZ (μm)
1	2	0.000E+00	0.000E+00	1.050E-01	-7.376E-02	-3.816E-02	-2.872E-01	7.876E+00	1.838E+01	-5.022E+01	-1.838E+00	0.000E+00	4.059E+01
2	2	0.000E+00	0.000E+00	3.550E-01	1.936E-02	2.322E-02	-6.328E-02	6.728E+00	7.778E+00	-1.576E+01	-7.778E-01	0.000E+00	3.318E+01


Εικόνα 6.3 Ανάλυση της δοκιμής 2 της σειράς 1K για φόρτιση του ανατολικού πυρήνα από τον εμπροσθεν άξονα του οχήματος (μονοί τροχοί)



Εικόνα 6.4 Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του έμπροσθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 105 mm



Εικόνα 6.5 Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του έμπροσθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 355 mm



BISAR 3.0 - Block Report

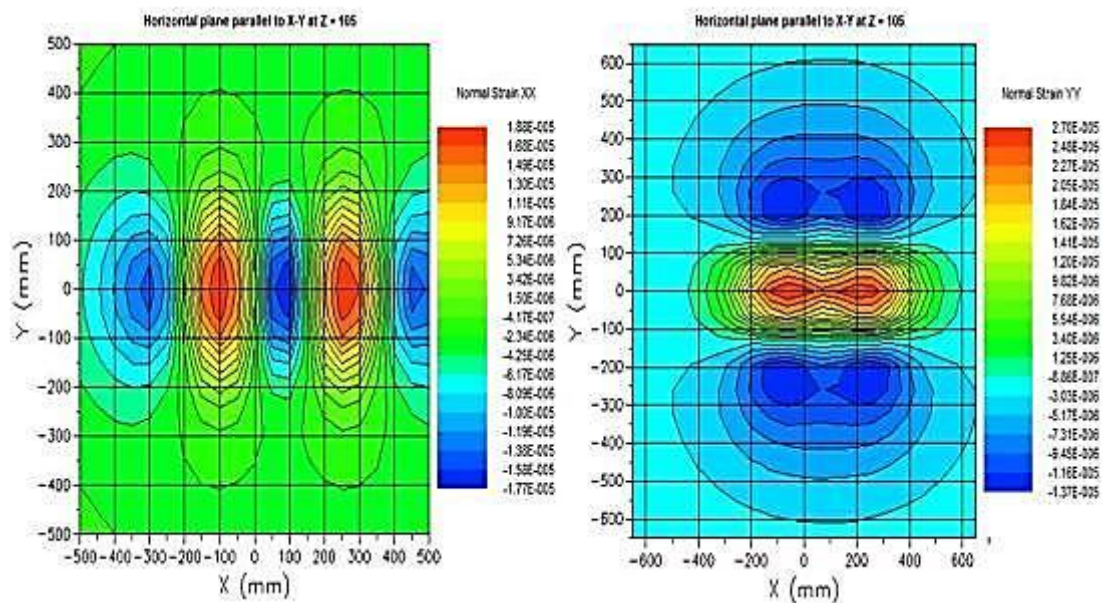
1K2-EAST-BACK

System 1: (untitled)

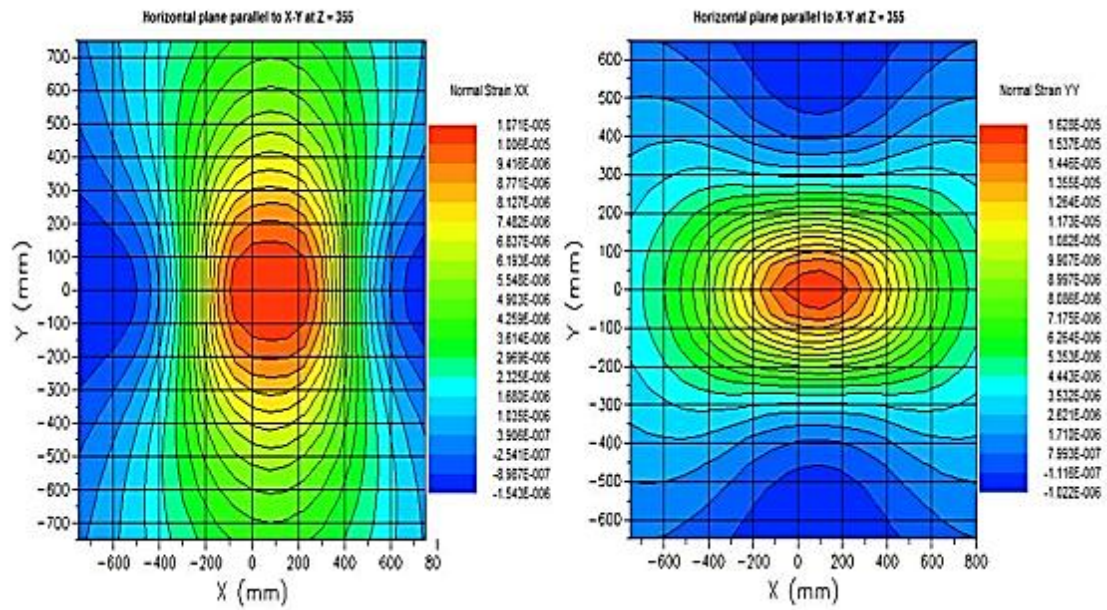
Structure				Loads								
Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)		Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0.108	1.420E+04	0.35	1	4.163E+01	8.267E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.266E-01	2.500E-01	0.000E+00	0.000E+00
2	0.250	4.960E+03	0.35	2	4.163E+01	8.267E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.266E-01	-9.000E-02	0.000E+00	0.000E+00
3	0.200	4.890E+03	0.25									
4		4.940E+02	0.40									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (µstrain)			Displacements (µm)		
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
1	2	0.000E+00	0.000E+00	1.050E-01	-1.888E-01	-6.910E-02	-4.080E-01	1.649E+00	2.608E+01	-6.617E+01	8.115E-01	0.000E+00	8.788E+01
2	2	0.000E+00	0.000E+00	3.850E-01	3.268E-02	5.220E-02	-1.133E-01	1.090E+01	1.621E+01	-2.893E+01	-8.651E-01	0.000E+00	7.680E+01

Εικόνα 6.6 Ανάλυση της δοκιμής 2 της σειράς 1K για φόρτιση του ανατολικού πυρήνα από τον όπισθεν άξονα του οχήματος (δίδυμοι τροχοί)



Εικόνα 6.7 Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του όπισθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 105 mm



Εικόνα 6.8 Χρωματική απεικόνιση παραμορφώσεων λόγω φόρτισης του όπισθεν τροχού της δοκιμής 2 της σειράς 1K σε βάθος 355 mm

7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκριθούν οι τιμές των παραμορφώσεων της ασφαλικής και της ανακυκλωμένης στρώσης όπως μετρήθηκαν στο πείραμα από τους αισθητήρες οπτικών ινών με τις τιμές των παραμορφώσεων όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των αναλυτικών μεθόδων. Η σύγκριση αυτή θα γίνει με τη βοήθεια δύο στατιστικών ελέγχων. Αρχικά θα εξεταστεί η ύπαρξη ή μη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεθόδων με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συνέχεια θα ελεγχθούν οι πιθανές διαφορές στις μετρούμενες με τις δύο μεθόδους τιμές, κάνοντας χρήση του στατιστικού t-test κατά ζεύγη. Τέλος θα γίνει μια προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και ιδιαίτερα τυχόν αποκλίσεων που μπορεί να προκύψουν από τη σύγκριση ώστε να γίνει εξαγωγή κάποιων χρήσιμων συμπερασμάτων.

7.1 Γραμμική συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων με χρήση του συντελεστή R^2

Μία μέθοδος σύγκρισης είναι να εξετάσουμε τη γραμμική συσχέτιση της μετρημένης παραμόρφωσης με αισθητήρες οπτικών ινών με την υπολογιστική μέθοδο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της γραμμική παλινδρόμησης. Ο έλεγχος γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων θα γίνει με τη χρήση του συντελεστή R^2 , για κάθε μία από τις σειρές δοκιμών 1K και 2K. Από όλες τις δυνατές καμπύλες παλινδρόμησης, η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων (χ^2) έχει το μικρότερο «τυπικό σφάλμα εκτίμησης» $s_{y,x}$, της y από τη x . Το σφάλμα αυτό αποτελεί ένα μέτρο του πόσο διασπαρμένα είναι τα σημεία γύρω από την καμπύλη και είναι η ποσότητα:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (7.1)$$

όπου $\hat{y} = \alpha + \beta x$ η τιμή εκτίμησης του y για δεδομένο x από την καμπύλη παλινδρόμησης των δεδομένων x, y . Αποδεικνύεται ότι, ειδικά για την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, το $s_{y,x}^2$ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διασποράς s_y^2 και του «δειγματικού συντελεστή συσχέτισης» r , ως ακολούθως:

$$s_{y,x}^2 = s_y^2 (1 - r^2) \quad (7.2)$$

όπου το r , ορίζεται από τη σχέση:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (7.3)$$

όπου s_x και s_y είναι οι διασπορές του x και y (δεδομένων) αντίστοιχα, ενώ s_{xy} η συνδιασπορά τους. Στην πράξη, το r υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\left[n \sum x^2 - (\sum x)^2 \right] \cdot \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 \right]} \quad (7.4)$$

Το μέγεθος αυτό εκφράζει το βαθμό προσαρμογής της ευθείας παλινδρόμησης στα δεδομένα, ενώ η περιοχή των τιμών του r είναι $-1 \leq r \leq 1$ ή αλλιώς $r^2 \leq 1$. Όσο το r προσεγγίζει τη θετική ή την αρνητική μονάδα, τόσο η ευθεία προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Στην περίπτωση που $r = \pm 1$ (ή $r^2 = 1$), τότε λέμε ότι υπάρχει πλήρης γραμμική συσχέτιση και πλήρης γραμμική παλινδρόμηση. Η απόκλιση του r^2 από την μονάδα, σύμφωνα με την Εξ. 2, συνεπάγεται την ανάλογη αύξηση του τυπικού σφάλματος εκτίμησης [Μαλτέζος 2002].

Περιγραφή της διαδικασίας

Αρχικά σημειώθηκαν στα τελικά διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου, μετά την επεξεργασία για την αφαίρεση του θορύβου (παράρτημα), που παίρνουμε από το σύστημα των αισθητήρων οπτικών ινών, οι μέγιστες τιμές της παραμόρφωσης. Αντιστοιχούν δύο μέγιστες τιμές ανά διάγραμμα μία για κάθε άξονα του οχήματος. Η διαδικασία αυτή έγινε για κάθε δοκιμή και για κάθε μία από τις δύο σειρές δοκιμών 1K και 2K. Οι μέγιστες τιμές κάθε διαγράμματος ταξινομήθηκαν σε $\epsilon_{\max 1}$ και $\epsilon_{\max 2}$, όπου με $\epsilon_{\max 1}$ αναφερόμαστε στην παραμόρφωση λόγω της διέλευσης του έμπροσθεν άξονα του οχήματος και με $\epsilon_{\max 2}$ αναφερόμαστε στην παραμόρφωση λόγω της διέλευσης του όπισθεν άξονα του οχήματος. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικοί πίνακες με τις τιμές της παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές, σε κάθε θέση και για κάθε διεύθυνση παραμόρφωσης. Στη συνέχεια γίνεται η στατιστική επεξεργασία των προαναφερθέντων τιμών με τις αναλυτικές, που προέκυψαν με τη βοήθεια κατάλληλων προτύπων (προγράμματα) όπως είδαμε στο κεφάλαιο 6, έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των δύο μεθόδων και να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα.

7.1.1 Σειρά δοκιμών 1K

Παρακάτω συγκεντρώνονται οι μετρημένες από τους αισθητήρες οπτικών ινών τιμές της παραμόρφωσης για τη σειρά δοκιμών 1K, διαχωρίζονται σε $\epsilon_{\max 1}$ και $\epsilon_{\max 2}$, ανάλογα με τον άξονα του οχήματος που τις προκαλεί, και ομαδοποιούνται

ανάλογα με τη θέση και τη διεύθυνση της παραμόρφωσης στην οποία αναφέρονται. Επίσης για κάθε ομάδα υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Πίνακας 7.1 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST TB)

EAST TB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	74.248000	1	109.418000
2	12.690990	2	11.909490
3	-1.786362	3	3.293738
4	5.318600	4	10.789500
5	-2.902943	5	-4.466043
6	3.237871	6	8.708771
7	-1.711971	7	3.368128
8	0.483848	8	7.517847
9	-0.983400	9	3.705900
10	3.705900	10	9.958300
Μέσος όρος	2.005837	Μέσος όρος	6.087292
Τυπική απόκλιση	4.913069	Τυπική απόκλιση	5.149682

Πίνακας 7.2 Μέγιστες διαμήκειες παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα (EAST LB)

EAST LB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	62.245000	1	126.576000
2	7.556457	2	13.632157
3	3.625057	3	8.985957
4	6.595800	4	11.599400
5	2.876190	5	5.735390
6	6.126848	6	11.130448
7	4.186671	7	9.547671
8	5.190810	8	10.909210
9	4.050430	9	9.054030
10	6.092720	10	11.096320
Μέσος όρος	5.144554	Μέσος όρος	10.187843
Τυπική απόκλιση	1.555572	Τυπική απόκλιση	2.209474

Πίνακας 7.3 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST LT)

EAST LT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	66.002000	1	112.658000
2	6.739300	2	5.184100
3	-1.721829	3	1.777471
4	3.324200	4	8.378600
5	-1.666286	5	-3.610386
6	2.184686	6	7.627886
7	-1.610743	7	2.277257
8	2.750576	8	0.945576
9	-1.518171	9	3.147429
10	2.277257	10	8.498157
Μέσος όρος	1.195443	Μέσος όρος	3.802899
Τυπική απόκλιση	2.995239	Τυπική απόκλιση	4.023391

Πίνακας 7.4 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TB)

EAST TB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	-262.414000	1	-279.193000
2	-9.687581	2	-31.080181
3	-7.909848	3	-23.849448
4	-20.999800	4	-26.033300
5	-4.394414	5	-9.847414
6	-17.597533	6	-27.664633
7	-9.547800	7	-25.487400
8	-14.681180	8	-26.426180
9	-9.979000	9	-25.918600
10	-19.035670	10	-29.522270
Μέσος όρος	-12.648092	Μέσος όρος	-25.092158
Τυπική απόκλιση	5.648642	Τυπική απόκλιση	6.119141

Πίνακας 7.5 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)

WEST LB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	72.150000	1	138.869000
2	4.877724	2	11.942124
3	7.512895	3	12.222495
4	7.025300	4	13.304700
5	4.278000	5	10.165000
6	6.240300	6	12.519800
7	7.025300	7	10.557500
8	7.025300	8	12.519800
9	7.226100	9	11.150800
10	7.226100	10	12.328100
Μέσος όρος	6.493002	Μέσος όρος	24.5579319
Τυπική απόκλιση	1.148057	Τυπική απόκλιση	40.176415

Πίνακας 7.6 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST TB)

WEST TB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	60.587000	1	142.935000
2	1.125276	2	7.927976
3	9.667029	3	11.815229
4	7.177852	4	13.622452
5	3.749300	5	9.835900
6	9.477900	6	13.058200
7	10.193900	7	11.626100
8	10.332000	8	12.122000
9	11.107900	9	11.466000
10	9.317700	10	13.256100
Μέσος όρος	13.2735857	Μέσος όρος	11.636662
Τυπική απόκλιση	16.9309109	Τυπική απόκλιση	1.798627

Πίνακας 7.7 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST TT)

WEST TT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	24.266000	1	-44.177000
2	-2.298567	2	5.986733
3	-5.592090	3	-5.592090
4	4.459933	4	-5.986667
5	-8.250990	5	-9.691890
6	4.528610	6	-13.482890
7	-5.883740	7	-6.244040
8	4.359000	8	-12.932100
9	-4.528643	9	-6.689943
10	4.923190	10	-10.566810
Μέσος όρος	-0.920366	Μέσος όρος	-7.244411
Τυπική απόκλιση	5.428801	Τυπική απόκλιση	5.798495

Πίνακας 7.8 Μέγιστες διαμήκειες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT)

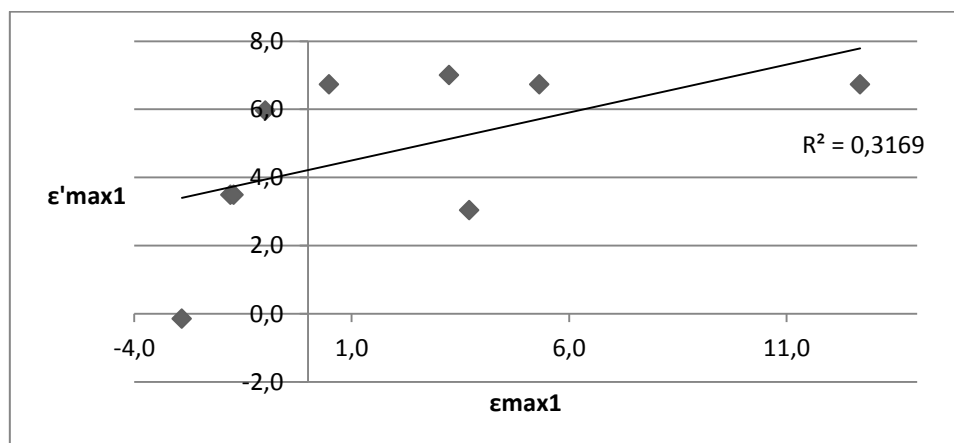
WEST LT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	40.772000	1	33.552000
2	-2.148810	2	1.46129048
3	1.736338	3	1.736338
4	1.873771	4	1.151771
5	-0.309429	5	0.05157143
6	2.699005	6	1.615905
7	1.048619	7	2.492719
8	3.094386	8	1.289386
9	0.928300	9	2.011300
10	2.870910	10	1.787810
Μέσος όρος	1.310343	Μέσος όρος	1.510899
Τυπική απόκλιση	1.690020	Τυπική απόκλιση	0.676668

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι τιμές της παραμόρφωσης που προκύπτουν από την πρώτη δοκιμή της σειράς δοκιμών 1K, είναι αρκετά μεγάλες συγκριτικά με τις τιμές των υπόλοιπων δοκιμών, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ύπαρξης σφάλματος στη συγκεκριμένη δοκιμή. Μία πιθανή εξήγηση είναι η απότομη μετάβαση του υπό μελέτη οδικού τμήματος από την αφόρτιστη στην φορτισμένη κατάσταση με την πρώτη διέλευση του οχήματος, με τους αισθητήρες να αντιλαμβάνονται το φορτίο πολύ μεγαλύτερο από ότι είναι στην πραγματικότητα και επομένως να παρουσιάζουν την απόκριση του οδοστρώματος αρκετά αυξημένη. Για αυτόν το λόγο έχουν εξαιρεθεί οι τιμές των παραμορφώσεων της πρώτης δοκιμής και δεν έχουν ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του μέσου όρου και της τυπικής αποκλίσεως. Στους παραπάνω πίνακες οι προαναφερθείσες τιμές έχουν σημειωθεί με χρωματισμένο κελί.

Στο επόμενο βήμα θα αντιπαραθέσουμε στις παραπάνω τιμές των παραμορφώσεων που προέκυψαν πειραματικά τις αναλυτικές τιμές των παραμορφώσεων, οι οποίες έχουν υπολογιστεί όπως έχουμε δείξει στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη βοήθεια των προγραμμάτων BISAR 3.0 και mePADS και τις οποίες συμβολίζουμε με $\epsilon'_{\max 1}$ ή $\epsilon'_{\max 2}$ ανάλογα με τον άξονα του οχήματος στον οποίον οφείλονται. Με τη χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 γίνεται στατιστική σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Σε κάθε θέση και διεύθυνση παραμόρφωσης σχεδιάζεται το διάγραμμα διασποράς θεωρητικών και πειραματικών τιμών παραμόρφωσης. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίζεται και παρουσιάζεται η γραμμή τάσης, η οποία μας υποδεικνύει το κατά πόσο υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο διαφορετικών ειδών δεδομένων. Η αξιοπιστία της γραμμής τάσης ελέγχεται με την τιμή του συντελεστή R^2 .

Πίνακας 7.9 Πειραματικές-αναλυτικές **εγκάρσιες** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TB)

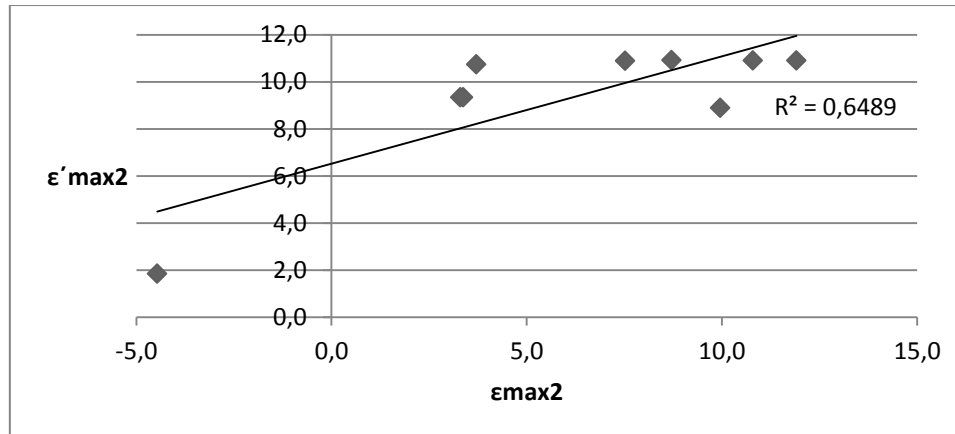
EAST TB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	74.248000	8.338000
2	12.690990	6.728000
3	-1.786362	3.492000
4	5.318600	6.728000
5	-2.902943	-0.149100
6	3.237871	7.008000
7	-1.711971	3.492000
8	0.483848	6.728000
9	-0.983400	5.960000
10	3.705900	3.034000
Μέσος όρος	2.005837	4.780100
Τυπική απόκλιση	4.913069	2.459749



Εικόνα 7.1 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών **εγκάρσιων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TB)

Πίνακας 7.10 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

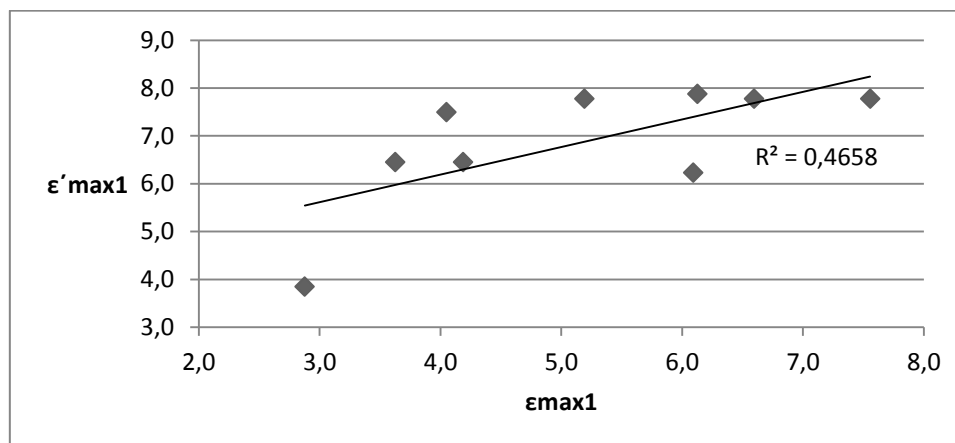
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	109.418000	10.770000
2	11.909490	10.900000
3	3.23738	9.337000
4	10.789500	10.900000
5	-4.466043	1.840000
6	8.708771	10.910000
7	3.368128	9.337000
8	7.51747	10.880000
9	3.705900	10.730000
10	9.958300	8.880000
Μέσος όρος	6.087292	9.301556
Τυπική απόκλιση	5.149682	2.917279



Εικόνα 7.2 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

Πίνακας 7.11 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

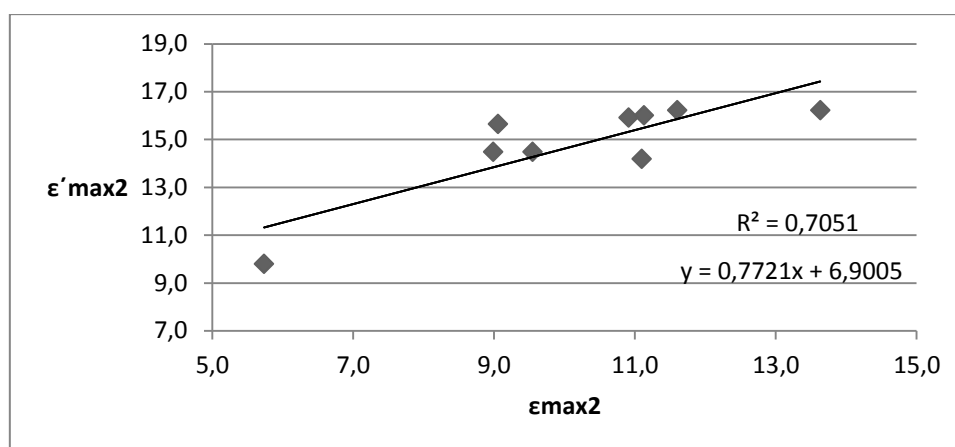
EAST LB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	62.245000	8.338000
2	7.556457	7.778000
3	3.625057	6.452000
4	6.595800	7.778000
5	2.876190	3.844000
6	6.126848	7.879000
7	4.186671	6.452000
8	5.190810	7.778000
9	4.050430	7.493000
10	6.092720	6.230000
Μέσος όρος	5.144554	6.853778
Τυπική απόκλιση	1.555572	1.313057



Εικόνα 7.3 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

Πίνακας 7.12 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

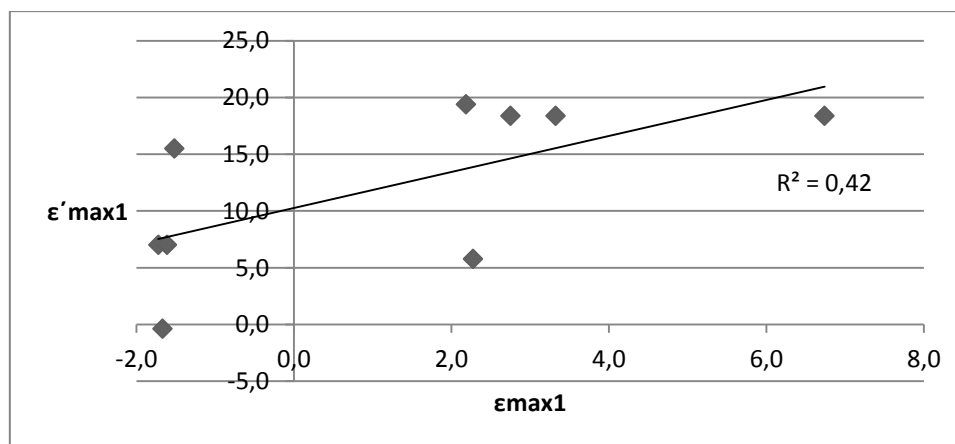
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	126.576000	16.430000
2	13.632157	16.210000
3	8.985957	14.480000
4	11.599400	16.210000
5	5.735390	9.791000
6	11.130448	16.000000
7	9.547671	14.480000
8	10.909210	15.910000
9	9.054030	15.640000
10	11.096320	14.180000
Μέσος όρος	10.187843	14.766778
Τυπική απόκλιση	2.209474	2.031725



Εικόνα 7.4 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

Πίνακας 7.13 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

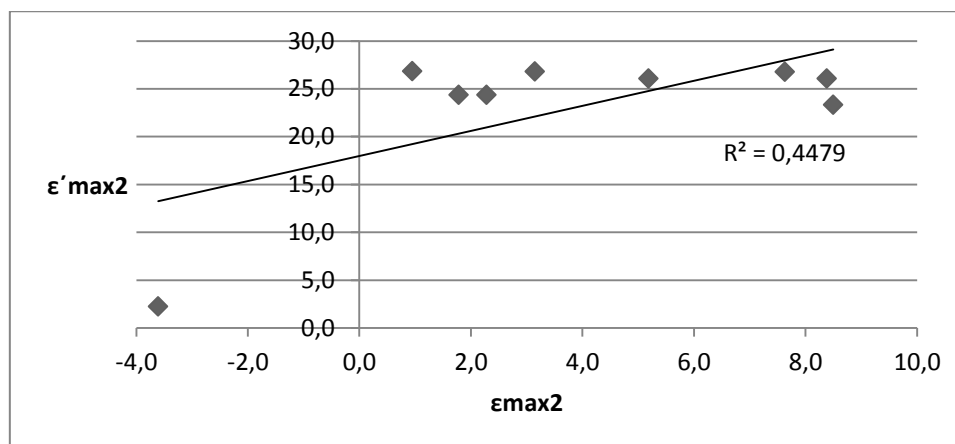
EAST LT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	66.002000	23.400000
2	6.739300	18.380000
3	-1.721829	7.012000
4	3.324200	18.380000
5	-1.666286	-0.389100
6	2.184686	19.380000
7	-1.610743	7.012000
8	2.750576	18.380000
9	-1.518171	15.500000
10	2.277257	5.770000
Μέσος όρος	1.195443	12.158322
Τυπική απόκλιση	2.995239	7.337106



Εικόνα 7.5 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

Πίνακας 7.14 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

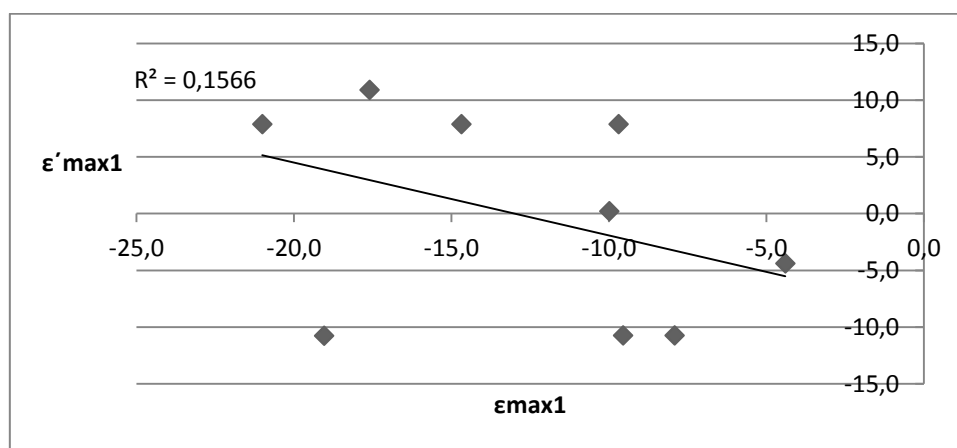
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	112.658000	23.900000
2	5.184100	26.060000
3	1.777471	24.350000
4	8.378600	26.060000
5	-3.610386	2.221714
6	7.627886	26.740000
7	2.277257	24.350000
8	0.945576	26.830000
9	3.147429	26.800000
10	8.498157	23.320000
Μέσος όρος	3.802899	22.970190
Τυπική απόκλιση	4.023391	7.884322



Εικόνα 7.6 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

Πίνακας 7.15 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TT)

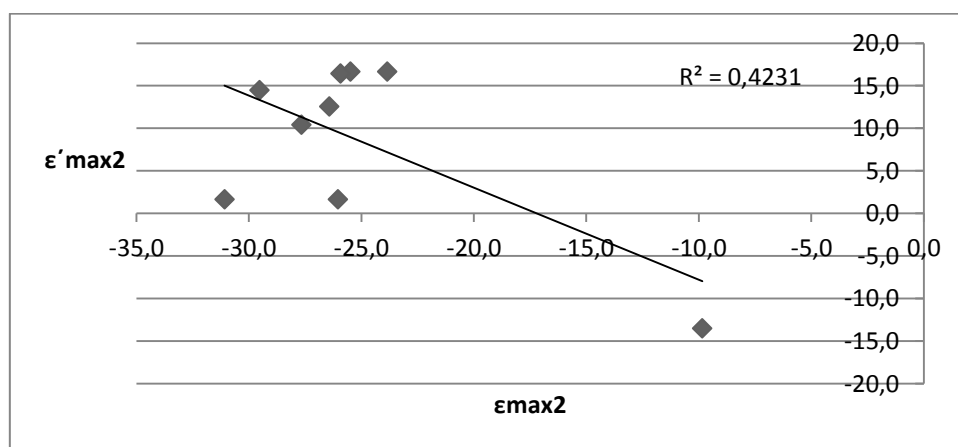
EAST TT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	-262.414000	23.400000
2	-9.687581	7.878000
3	-7.909848	-10.750000
4	-20.999800	7.878000
5	-4.394414	-4.416000
6	-17.597533	10.870000
7	-9.547800	-10.750000
8	-14.681180	7.878000
9	-9.979000	0.191300
10	-19.035670	-10.770000
Μέσος όρος	-12.648092	-0.221189
Τυπική απόκλιση	5.648642	9.155332



Εικόνα 7.7 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **εγκάρσιων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TT)

Πίνακας 7.16 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TT)

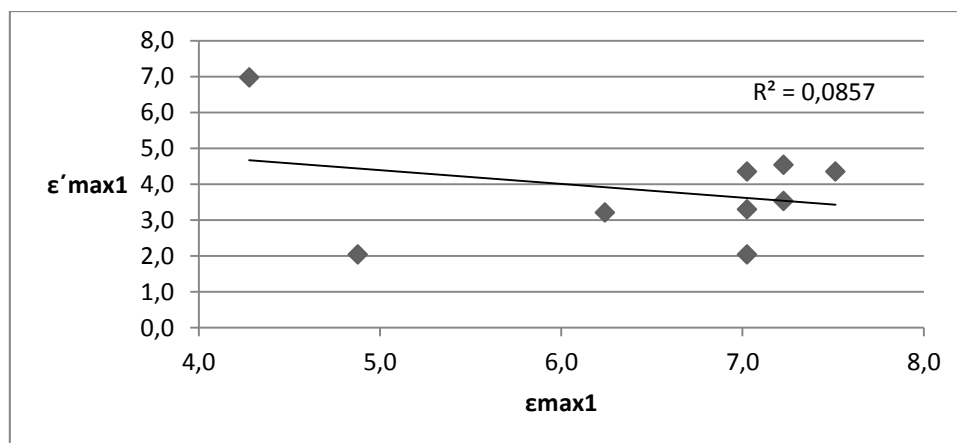
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	-279.193000	-17.700000
2	-31.080181	1.649000
3	-23.849448	16.670000
4	-26.033300	1.649000
5	-9.847414	-13.500000
6	-27.664633	10.400000
7	-25.487400	16.670000
8	-26.426180	12.560000
9	-25.918600	16.410000
10	-29.522270	14.470000
Μέσος όρος	-25.092158	8.553111
Τυπική απόκλιση	6.119141	10.183611



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **εγκάρσιων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST TT)

Πίνακας 7.17 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

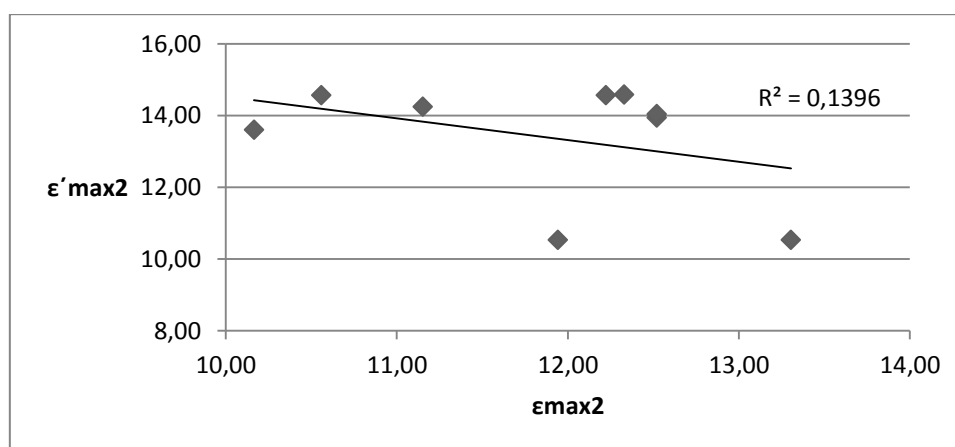
WEST LB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	72.150000	2.558000
2	4.877724	2.043000
3	7.512895	4.354000
4	7.025300	2.043000
5	4.278000	6.975000
6	6.240300	3.212000
7	7.025300	4.354000
8	7.025300	3.299000
9	7.226100	3.531000
10	7.226100	4.541000
Μέσος όρος	6.493002	3.816889
Τυπική απόκλιση	1.148057	1.503503



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

Πίνακας 7.18 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

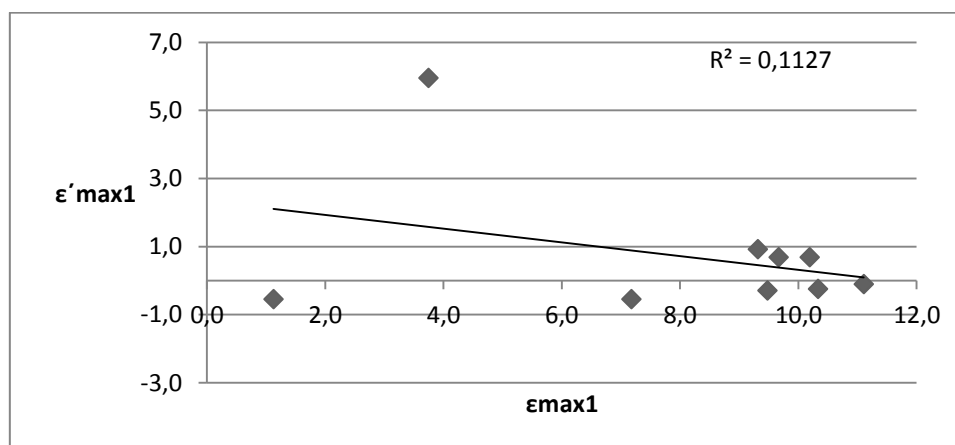
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	138.869000	12.650000
2	11.942124	10.530000
3	12.222495	14.560000
4	13.304700	10.530000
5	10.165000	13.600000
6	12.519800	13.940000
7	10.557500	14.560000
8	12.519800	14.040000
9	11.150800	14.240000
10	12.328100	14.580000
Μέσος όρος	11.856702	13.397778
Τυπική απόκλιση	1.023932	1.658469



Εικόνα 7.10 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών-αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

Πίνακας 7.19 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

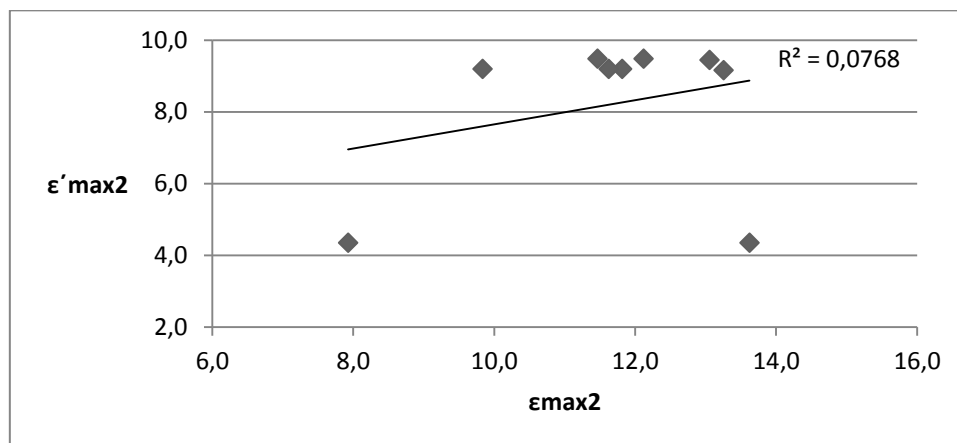
WEST TB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	60.587000	-0.303200
2	1.125276	-0.551300
3	9.667029	0.682100
4	7.177852	-0.551300
5	3.749300	5.950000
6	9.477900	-0.291800
7	10.193900	0.682100
8	10.332000	-0.246200
9	11.107900	-0.102500
10	9.317700	0.921100
Μέσος όρος	8.016540	0.721356
Τυπική απόκλιση	3.402457	2.039068



Εικόνα 7.11 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

Πίνακας 7.20 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

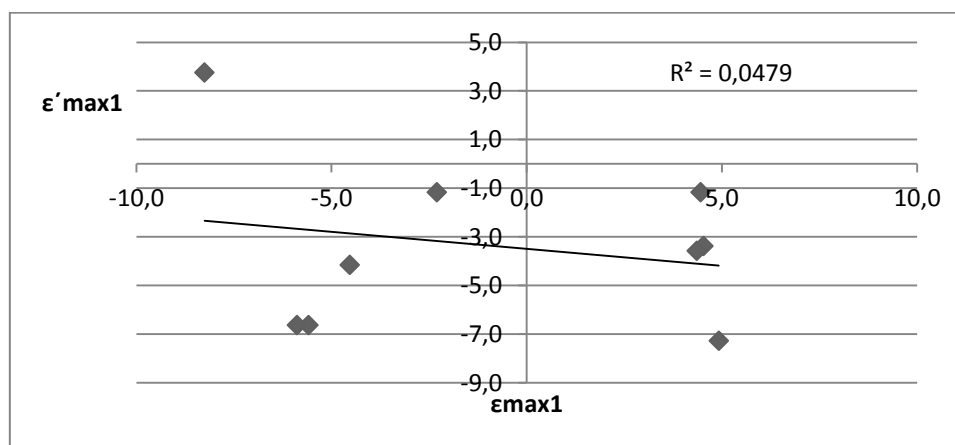
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	142.935000	7.954000
2	7.927976	4.346000
3	11.815229	9.191000
4	13.622452	4.346000
5	9.835900	9.190000
6	13.058200	9.438000
7	11.626100	9.191000
8	12.122000	9.473000
9	11.466000	9.475000
10	13.256100	9.156000
Μέσος όρος	11.636662	8.200667
Τυπική απόκλιση	1.798627	2.189281



Εικόνα 7.12 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

Πίνακας 7.21 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

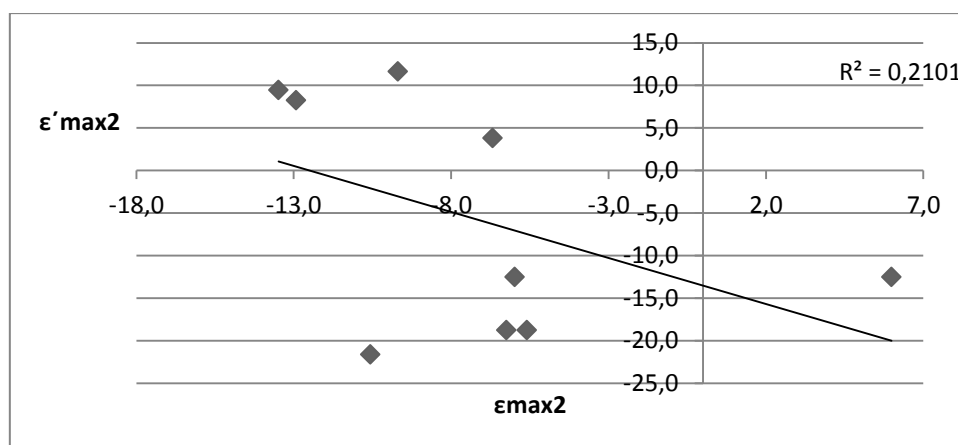
WEST TT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	24.266000	-2.038000
2	-2.298567	-1.176000
3	-5.592090	-6.632000
4	4.459933	-1.176000
5	-8.250990	3.752000
6	4.528610	-3.379000
7	-5.883740	-6.632000
8	4.359000	-3.583000
9	-4.528643	-4.160000
10	4.923190	-7.286000
Μέσος όρος	-0.920366	-3.363556
Τυπική απόκλιση	5.428801	3.493488



Εικόνα 7.13 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

Πίνακας 7.22 Πειραματικές-αναλυτικές **εγκάρσιες** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST TT)

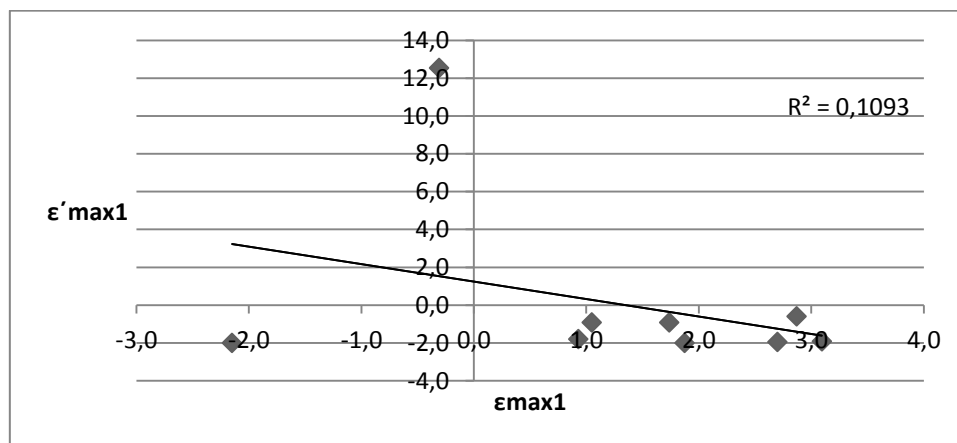
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	-44.177000	9.568000
2	5.986733	-12.510000
3	-5.592090	-18.750000
4	-5.986667	-12.510000
5	-9.691890	11.600000
6	-13.482890	9.448000
7	-6.244040	-18.750000
8	-12.932100	8.230000
9	-6.689943	3.810000
10	-10.566810	-21.630000
Μέσος όρος	-7.244411	-5.673556
Τυπική απόκλιση	5.798495	13.694674



Εικόνα 7.14 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **εγκάρσιων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST TT)

Πίνακας 7.23 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκειες** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

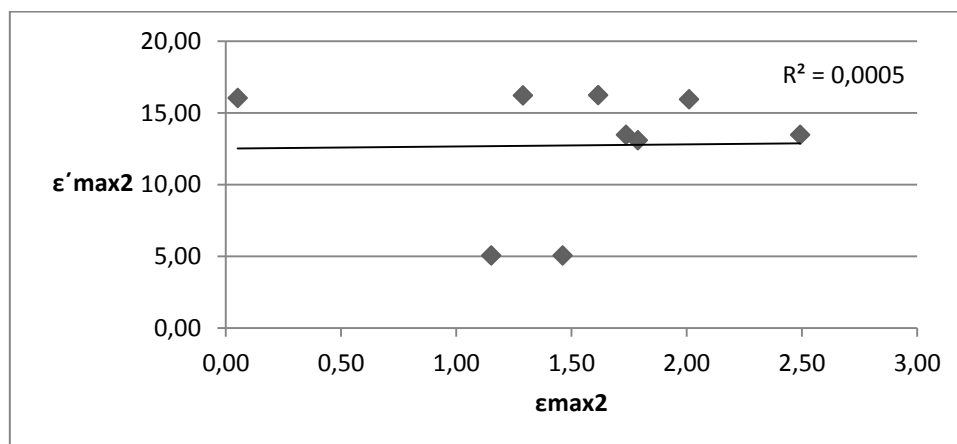
WEST LT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	40.772000	-2.088000
2	-2.148810	-2.002000
3	1.736338	-0.926300
4	1.873771	-2.002000
5	-0.309429	12.530000
6	2.699005	-1.965000
7	1.048619	-0.926300
8	3.094386	-1.928000
9	0.928300	-1.799000
10	2.870910	-0.608800
Μέσος όρος	1.310343	0.041400
Τυπική απόκλιση	1.690020	4.715705



Σχήμα 7.15 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Πίνακας 7.24 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	33.552000	14.280000
2	1.461290476	5.044000
3	1.736338	13.470000
4	1.151771	5.044000
5	0.051571429	16.030000
6	1.615905	16.230000
7	2.492719	13.470000
8	1.289386	16.210000
9	2.011300	15.940000
10	1.787810	13.090000
Μέσος όρος	1.510899	12.725333
Τυπική απόκλιση	0.676668	4.540489

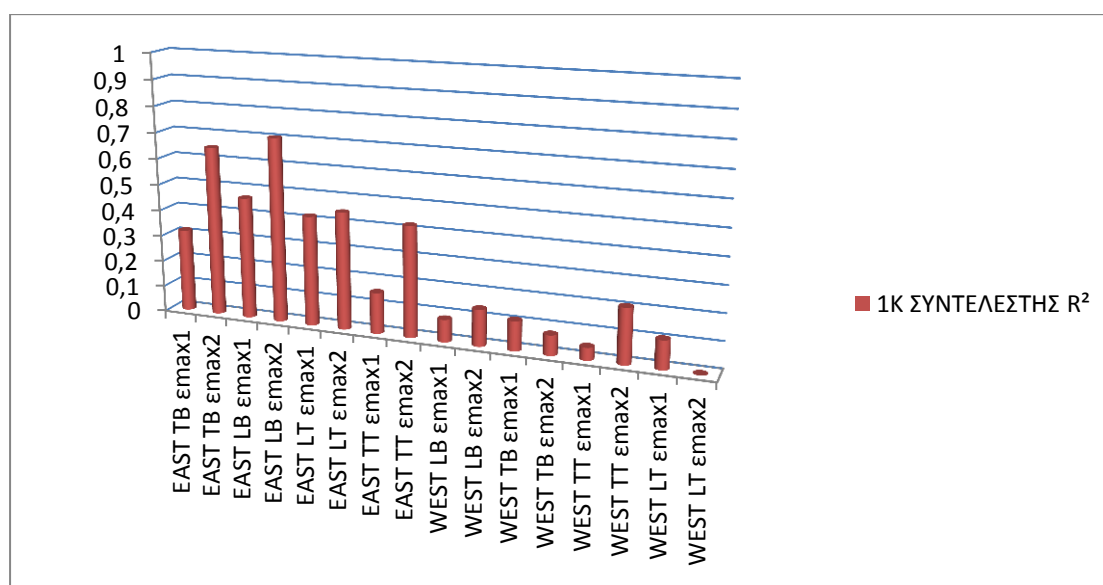


Εικόνα 7.16 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Επομένως, τα παραπάνω διαγράμματα συνοψίζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα παραμόρφωσης-συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που ακολουθεί για παραμορφώσεις οφειλόμενες στον έμπροσθεν και στον όπισθεν άξονα.

Πίνακας 7.25 Παραμόρφωση-συντελεστής R^2 σειράς δοκιμών 1K

Παραμόρφωση	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ R^2
EAST TB $\epsilon_{\max 1}$	0.3169
EAST TB $\epsilon_{\max 2}$	0.6489
EAST LB $\epsilon_{\max 1}$	0.4658
EAST LB $\epsilon_{\max 2}$	0.7051
EAST LT $\epsilon_{\max 1}$	0.4200
EAST LT $\epsilon_{\max 2}$	0.4479
EAST TT $\epsilon_{\max 1}$	0.1566
EAST TT $\epsilon_{\max 2}$	0.4231
WEST LB $\epsilon_{\max 1}$	0.0857
WEST LB $\epsilon_{\max 2}$	0.1396
WEST TB $\epsilon_{\max 1}$	0.1127
WEST TB $\epsilon_{\max 2}$	0.0768
WEST TT $\epsilon_{\max 1}$	0.0479
WEST TT $\epsilon_{\max 2}$	0.2101
WEST LT $\epsilon_{\max 1}$	0.1093
WEST LT $\epsilon_{\max 2}$	0.0005



Εικόνα 7.17 Ραβδόγραμμα παραμόρφωσης-συντελεστή R^2 σειράς δοκιμών 1K

7.1.2 Σειρά δοκιμών 2Κ

Ομοίως και για τη δεύτερη σειρά δοκιμών 2Κ συγκεντρώνονται οι μετρημένες από τους αισθητήρες τιμές της παραμόρφωσης, διαχωρίζοντάς τες αρχικά σε $\epsilon_{\max 1}$ και $\epsilon_{\max 2}$, ανάλογα με τον άξονα του οχήματος που τις προκαλεί, και ομαδοποιούνται ανάλογα με τη θέση και τη διεύθυνση στην οποία αναφέρονται. Όπως προηγουμένως έτσι και εδώ για κάθε ομάδα υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Πίνακας 7.26 Μέγιστες *εγκάρσιες* παραμορφώσεις στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

EAST TB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	11.912200	1	12.693800
2	1.847000	2	6.927100
3	4.191700	3	10.444100
4	4.191700	4	10.053400
5	12.398000	5	12.788800
6	12.788800	6	13.961100
7	10.834900	7	14.351900
8	11.616500	8	11.616500
9	12.788800	9	12.007300
10	12.788800	10	12.398000
11	4.650000	11	10.120900
Μέσος όρος	9.091673	Μέσος όρος	11.578445
Τυπική απόκλιση	4.353622	Τυπική απόκλιση	2.104924

Πίνακας 7.27 Μέγιστες *διαμήκεις* παραμορφώσεις στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST LB)

EAST LB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	7.130880	1	12.491880
2	5.090800	2	9.737000
3	5.448200	3	11.524000
4	5.805600	4	11.166600
5	6.520400	5	12.953600
6	6.877800	6	13.311000
7	6.877800	7	12.596200
8	6.520400	8	13.311000
9	6.877800	9	12.596200
10	6.877800	10	11.881400
11	6.245990	11	10.892190
Μέσος όρος	6.388497	Μέσος όρος	12.041915
Τυπική απόκλιση	0.668719	Τυπική απόκλιση	1.120890

Πίνακας 7.28 Μέγιστες *διαμήκεις* παραμορφώσεις στην *επιφάνεια* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST LT)

EAST LT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	7.313143	1	5.757943
2	1.240457	2	6.683657
3	4.017600	3	10.238400
4	3.036343	4	8.479543
5	9.979200	5	5.313600
6	7.350171	6	5.406171
7	6.498514	7	7.276114
8	9.428800	8	6.318400
9	9.040000	9	5.152000
10	9.040000	10	6.318400
11	4.350886	11	9.405286
Μέσος όρος	6.481374	Μέσος όρος	6.940865
Τυπική απόκλιση	2.922444	Τυπική απόκλιση	1.728315

Πίνακας 7.29 Μέγιστες εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα (EAST TT)

EAST TT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	-7.949830	1	-33.117630
2	-13.100400	2	-26.942700
3	-21.292757	3	-28.423657
4	-20.953160	4	-27.664560
5	-13.682430	5	-30.461030
6	-8.309400	6	-35.574500
7	-5.712730	7	-36.752930
8	-19.614900	8	-30.101500
9	-11.525205	9	-35.015205
10	-9.547800	10	-35.554500
11	-23.749595	11	-29.622095
Μέσος όρος	-14.130746	Μέσος όρος	-31.748210
Τυπική απόκλιση	6.264564	Τυπική απόκλιση	3.555766

Πίνακας 7.30 Μέγιστες διαμήκειες παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα (WEST LB)

WEST LB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	3.756420	1	10.428320
2	7.307320	2	10.447020
3	7.213920	3	12.315920
4	6.335460	4	11.829960
5	3.980700	5	11.045100
6	3.606920	6	10.278820
7	4.616140	7	10.110640
8	4.896460	8	10.783460
9	3.924610	9	9.811610
10	4.223630	10	10.110630
11	6.265720	11	11.367720
Μέσος όρος	5.102482	Μέσος όρος	10.775382
Τυπική απόκλιση	1.412040	Τυπική απόκλιση	0.787182

Πίνακας 7.31 Μέγιστες *εγκάρσιες* παραμορφώσεις στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

WEST TB			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	1.244580	1	7.689280
2	10.672900	2	10.314900
3	7.927938	3	13.656638
4	8.166700	4	12.821200
5	1.721990	5	9.956890
6	1.074170	6	7.518770
7	1.432170	7	6.086670
8	2.676720	8	10.911620
9	1.636720	9	8.439520
10	1.744000	10	8.814560
11	7.856600	11	12.511100
Μέσος όρος	4.195863	Μέσος όρος	9.883741
Τυπική απόκλιση	3.634978	Τυπική απόκλιση	2.430425

Πίνακας 7.32 Μέγιστες *εγκάρσιες* παραμορφώσεις στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

WEST TT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	-1.972743	1	5.952357
2	1.231300	2	-12.817700
3	3.392600	3	-8.855200
4	3.739529	4	-8.868570
5	3.430767	5	3.773833
6	-2.607338	6	5.317662
7	-2.435824	7	3.327876
8	-2.607371	8	3.156329
9	-2.710290	9	4.494310
10	-2.590200	10	5.334895
11	5.462200	11	-8.586800
Μέσος όρος	0.212057	Μέσος όρος	-0.706455
Τυπική απόκλιση	3.249575	Τυπική απόκλιση	7.329733

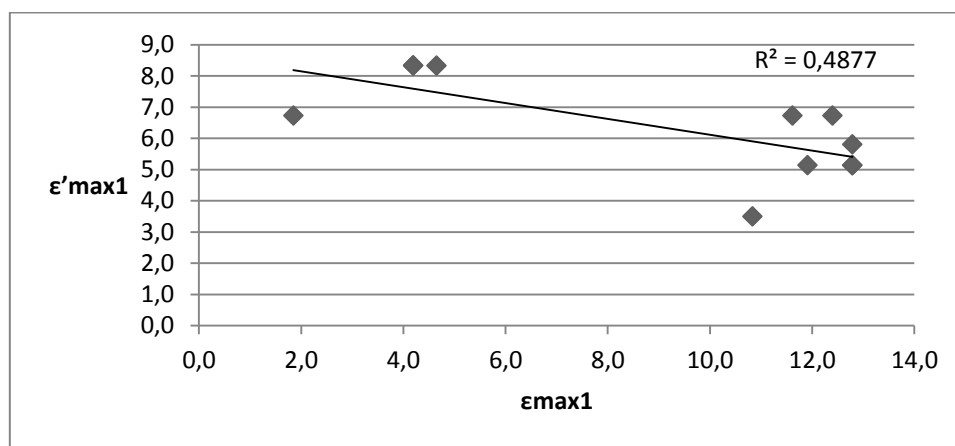
Πίνακας 7.33 Μέγιστες διαμήκεις παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα (WEST LT)

WEST LT			
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$
1	-2.131681	1	1.839419
2	1.409681	2	1.409681
3	2.802062	3	1.719062
4	3.231910	4	1.787810
5	2.131719	5	2.561481
6	-2.080148	6	2.252052
7	-1.890952	7	0.636048
8	1.392529	8	2.114529
9	-2.251990	9	0.997110
10	-2.080110	10	2.251990
11	2.406719	11	1.684719
Μέσος όρος	0.267249	Μέσος όρος	1.750355
Τυπική απόκλιση	2.315580	Τυπική απόκλιση	0.568650

Στη συνέχεια, κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στη σειρά δοκιμών 1K, θα αντιπαραθέσουμε στις παραπάνω τιμές των παραμορφώσεων που προέκυψαν πειραματικά τις αναλυτικές τιμές των παραμορφώσεων ($\epsilon'_{\max 1}$ και $\epsilon'_{\max 2}$), οι οποίες έχουν υπολογιστεί όπως έχουμε δείξει στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη βοήθεια των προγραμμάτων. Ομοίως και σε αυτήν την περίπτωση γίνεται χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 ώστε να γίνει στατιστική σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.34 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

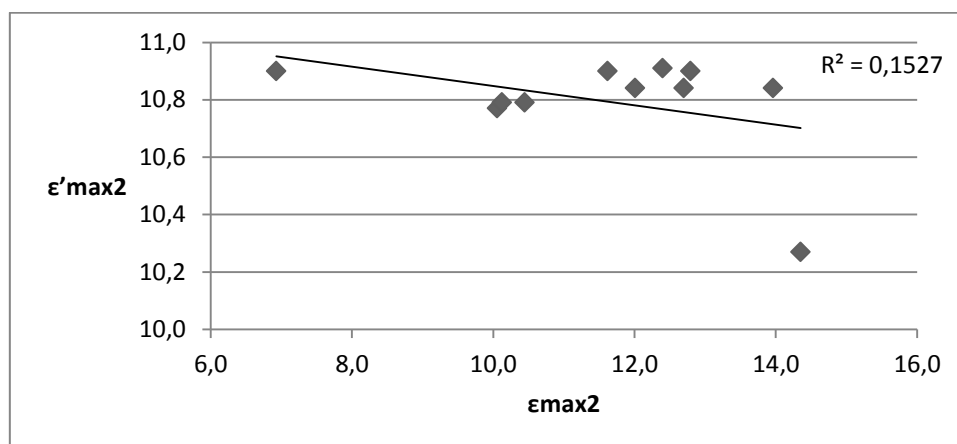
EAST TB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	11.9122000	5.1350000
2	1.8470000	6.7280000
3	4.1917000	8.3220000
4	4.1917000	8.3390000
5	12.3980000	6.7280000
6	12.7888000	5.1350000
7	10.8349000	3.4920000
8	11.6165000	6.7280000
9	12.7888000	5.1350000
10	12.7888000	5.7980000
11	4.6500000	8.3220000
Μέσος όρος	9.0916727	6.3510909
Τυπική απόκλιση	4.35362175	1.583157317



Εικόνα 7.18 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

Πίνακας 7.35 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

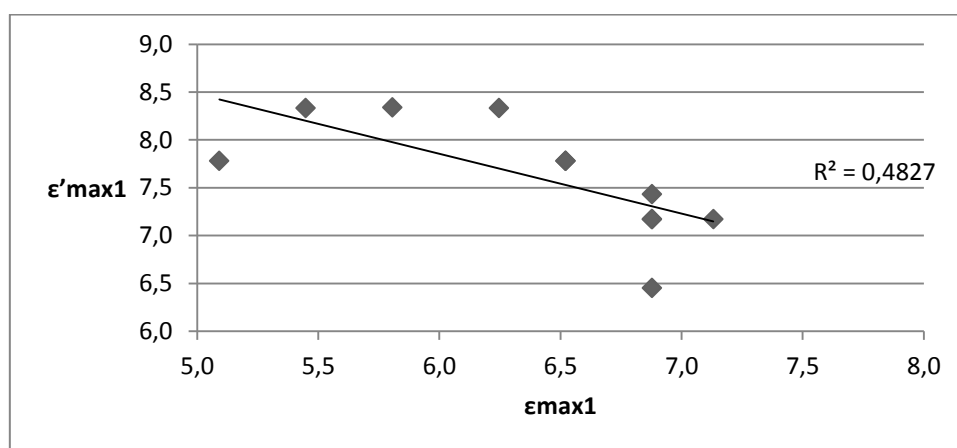
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	12.693800	10.8400000
2	6.927100	10.9000000
3	10.444100	10.7900000
4	10.053400	10.7700000
5	12.788800	10.9000000
6	13.961100	10.8400000
7	14.351900	10.2700000
8	11.616500	10.9000000
9	12.007300	10.8400000
10	12.398000	10.9100000
11	10.120900	10.7900000
Μέσος όρος	11.578445	10.7954545
Τυπική απόκλιση	2.104924161	0.181293333



Εικόνα 7.19 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TB)

Πίνακας 7.36 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

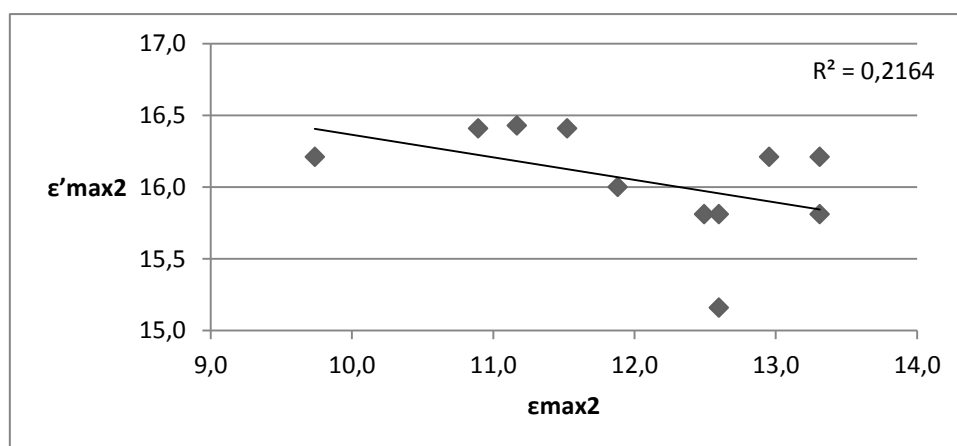
EAST LB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	7.130880	7.1690000
2	5.090800	7.7780000
3	5.448200	8.3320000
4	5.805600	8.3380000
5	6.520400	7.7780000
6	6.877800	7.1690000
7	6.877800	6.4520000
8	6.520400	7.7780000
9	6.877800	7.1690000
10	6.877800	7.4310000
11	6.245990	8.3320000
Μέσος όρος	6.388497	7.6114545
Τυπική απόκλιση	0.668719084	0.601136318



Εικόνα 7.20 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

Πίνακας 7.37 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

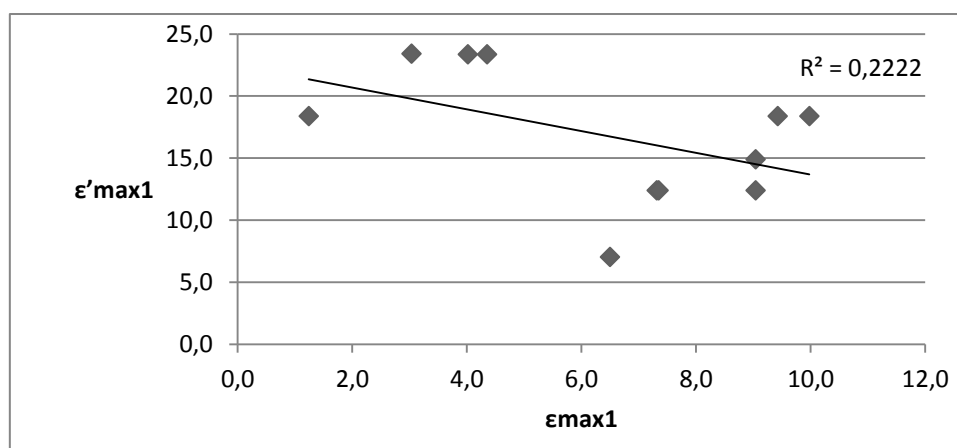
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	12.491880	15.810000
2	9.737000	16.210000
3	11.524000	16.410000
4	11.166600	16.430000
5	12.953600	16.210000
6	13.311000	15.810000
7	12.596200	15.160000
8	13.311000	16.210000
9	12.596200	15.810000
10	11.881400	16.000000
11	10.892190	16.410000
Μέσος όρος	12.041915	16.0427273
Τυπική απόκλιση	1.120889528	0.380423209



Εικόνα 7.21 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LB)

Πίνακας 7.38 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

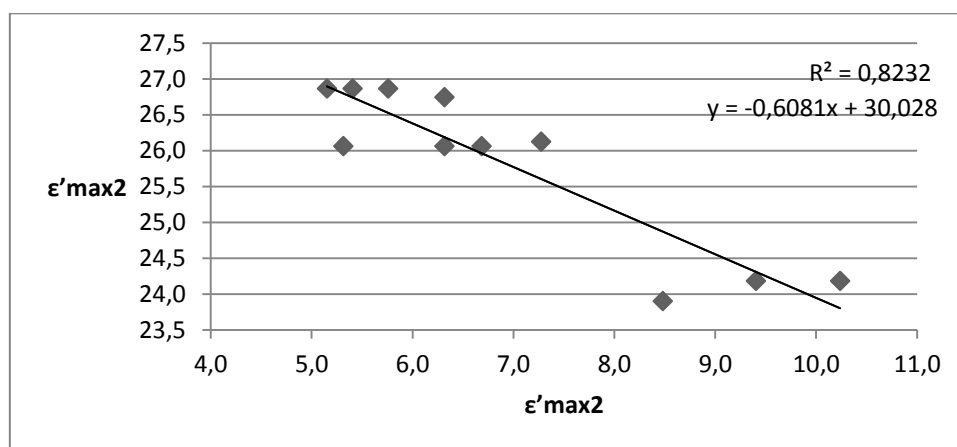
EAST LT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	7.313143	12.400000
2	1.240457	18.380000
3	4.017600	23.360000
4	3.036343	23.400000
5	9.979200	18.380000
6	7.350171	12.400000
7	6.498514	7.012000
8	9.428800	18.380000
9	9.040000	12.400000
10	9.040000	14.890000
11	4.350886	23.360000
Μέσος όρος	6.481374	16.7601818
Τυπική απόκλιση	2.922444092	5.428001507



Εικόνα 7.22 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

Πίνακας 7.39 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

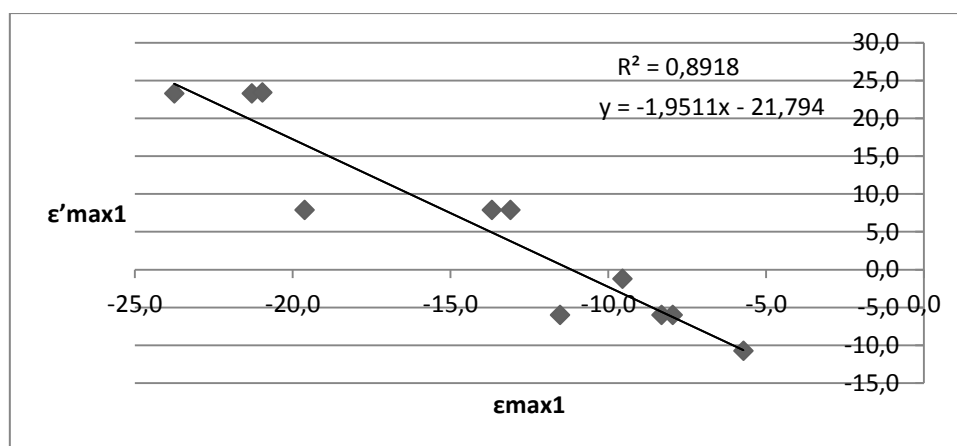
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	5.757943	26.860000
2	6.683657	26.060000
3	10.238400	24.180000
4	8.479543	23.900000
5	5.313600	26.060000
6	5.406171	26.860000
7	7.276114	26.120000
8	6.318400	26.060000
9	5.152000	26.860000
10	6.318400	26.740000
11	9.405286	24.180000
Μέσος όρος	6.940865	25.8072727
Τυπική απόκλιση	1.728315015	1.158353063



Εικόνα 7.23 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **ανατολικού** πυρήνα (EAST LT)

Πίνακας 7.40 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TT)

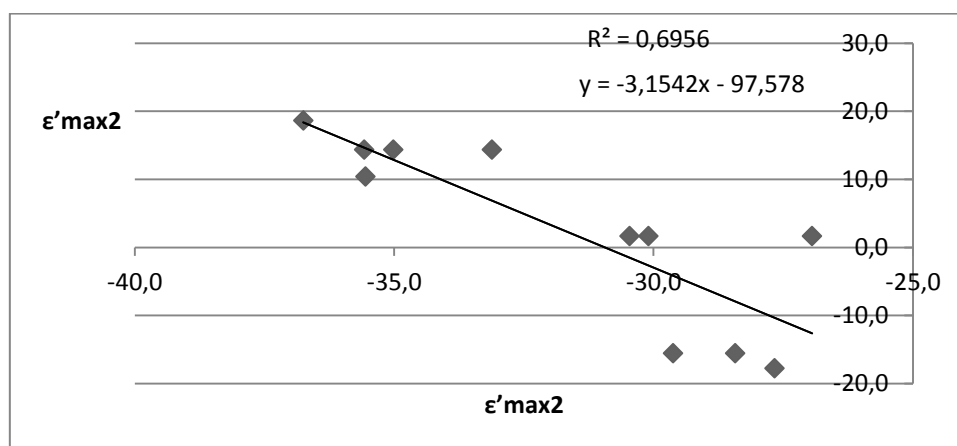
EAST TT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	-7.949830	-6.016000
2	-13.100400	7.878000
3	-21.292757	23.270000
4	-20.953160	23.400000
5	-13.682430	7.878000
6	-8.309400	-6.016000
7	-5.712730	-10.750000
8	-19.614900	7.878000
9	-11.525205	-6.016000
10	-9.547800	-1.231000
11	-23.749595	23.270000
Μέσος όρος	-14.130746	5.7768182
Τυπική απόκλιση	6.264563566	12.94334257



Εικόνα 7.24 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TT)

Πίνακας 7.41 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TT)

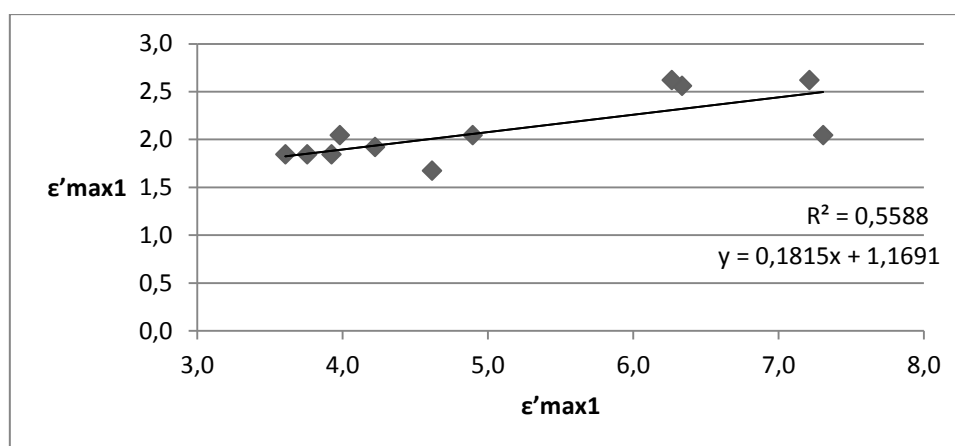
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	-33.117630	14.360000
2	-26.942700	1.649000
3	-28.423657	-15.540000
4	-27.664560	-17.780000
5	-30.461030	1.649000
6	-35.574500	14.360000
7	-36.752930	18.610000
8	-30.101500	1.649000
9	-35.015205	14.360000
10	-35.554500	10.400000
11	-29.622095	-15.540000
Μέσος όρος	-31.748210	2.5615455
Τυπική απόκλιση	3.555766478	13.4469827



Εικόνα 7.25 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *ανατολικού* πυρήνα (EAST TT)

Πίνακας 7.42 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

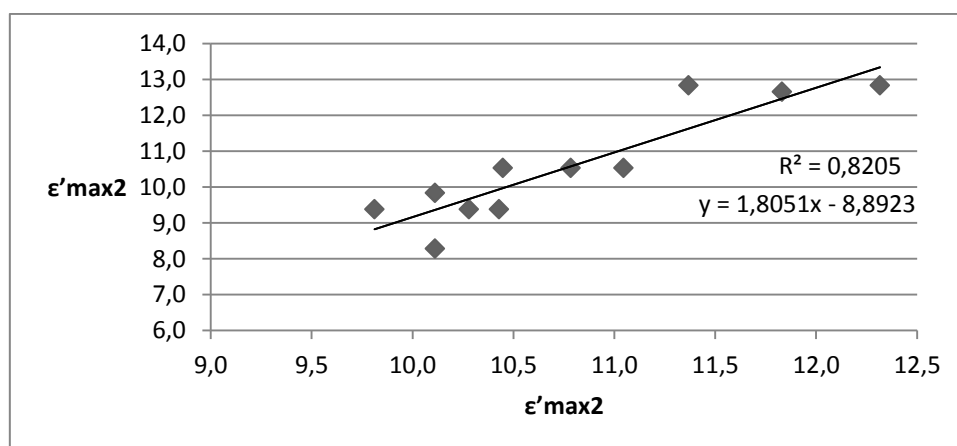
WEST LB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	3.756420	1.843000
2	7.307320	2.043000
3	7.213920	2.620000
4	6.335460	2.558000
5	3.980700	2.043000
6	3.606920	1.843000
7	4.616140	1.671000
8	4.896460	2.043000
9	3.924610	1.843000
10	4.223630	1.919000
11	6.265720	2.620000
Μέσος όρος	5.102482	2.0950909
Τυπική απόκλιση	1.412040	0.342781987



Εικόνα 7.26 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

Πίνακας 7.43 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

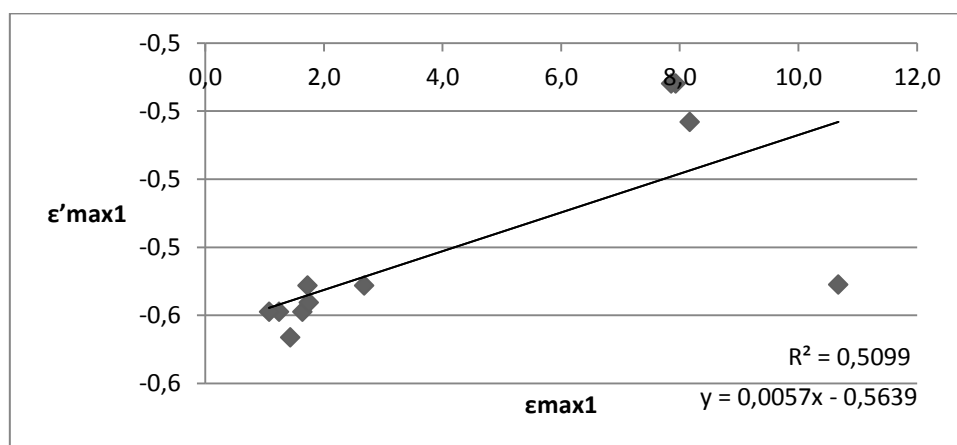
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	10.428320	9.376000
2	10.447020	10.530000
3	12.315920	12.830000
4	11.829960	12.650000
5	11.045100	10.530000
6	10.278820	9.376000
7	10.110640	8.280000
8	10.783460	10.530000
9	9.811610	9.376000
10	10.110630	9.834000
11	11.367720	12.830000
Μέσος όρος	10.775382	10.5583636
Τυπική απόκλιση	0.787181715	1.568681438



Εικόνα 7.27 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στον **πυθμένα** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LB)

Πίνακας 7.44 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

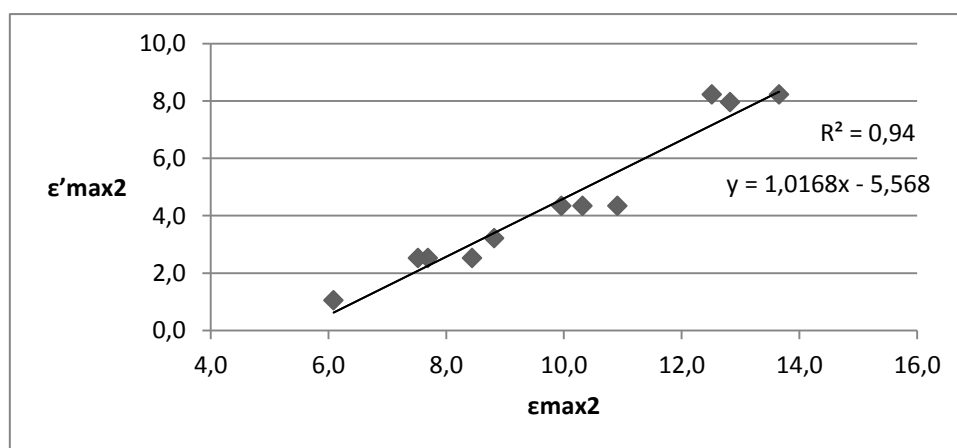
WEST TB		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	1.244580	-0.559000
2	10.672900	-0.551000
3	7.927938	-0.491900
4	8.166700	-0.503200
5	1.721990	-0.551300
6	1.074170	-0.559000
7	1.432170	-0.566500
8	2.676720	-0.551300
9	1.636720	-0.559000
10	1.744000	-0.556200
11	7.856600	-0.491900
Μέσος όρος	4.195863	-0.5400273
Τυπική απόκλιση	3.634978124	0.028992278



Εικόνα 7.28 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

Πίνακας 7.45 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

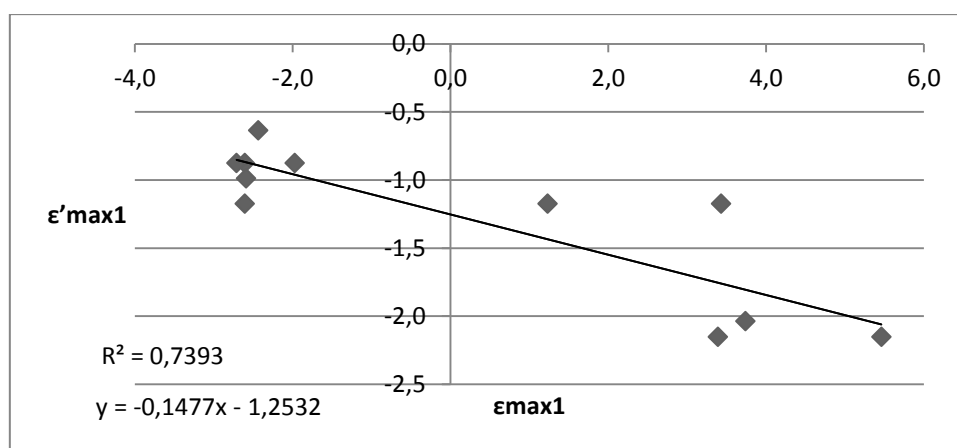
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	7.689280	2.525000
2	10.314900	4.346000
3	13.656638	8.227000
4	12.821200	7.954000
5	9.956890	4.346000
6	7.518770	2.525000
7	6.086670	1.057000
8	10.911620	4.346000
9	8.439520	2.525000
10	8.814560	3.221000
11	12.511100	8.227000
Μέσος όρος	9.883741	4.4817273
Τυπική απόκλιση	2.430425	2.548933388



Εικόνα 7.29 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στον *πυθμένα* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TB)

Πίνακας 7.46 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

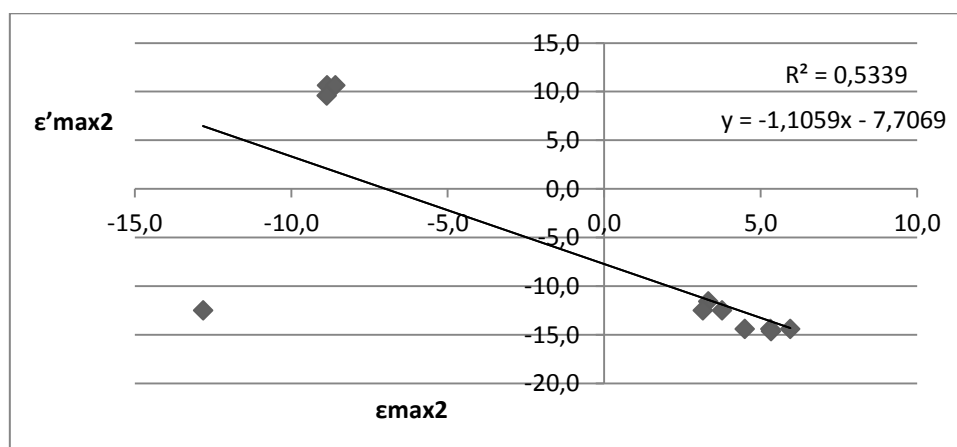
WEST TT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	-1.972743	-0.877400
2	1.231300	-1.176000
3	3.392600	-2.153000
4	3.739529	-2.038000
5	3.430767	-1.176000
6	-2.607338	-0.877400
7	-2.435824	-0.636500
8	-2.607371	-1.176000
9	-2.710290	-0.877400
10	-2.590200	-0.988900
11	5.462200	-2.153000
Μέσος όρος	0.212057	-1.2845091
Τυπική απόκλιση	3.249575	0.558223798



Εικόνα 7.30 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

Πίνακας 7.47 Πειραματικές-αναλυτικές *εγκάρσιες* παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

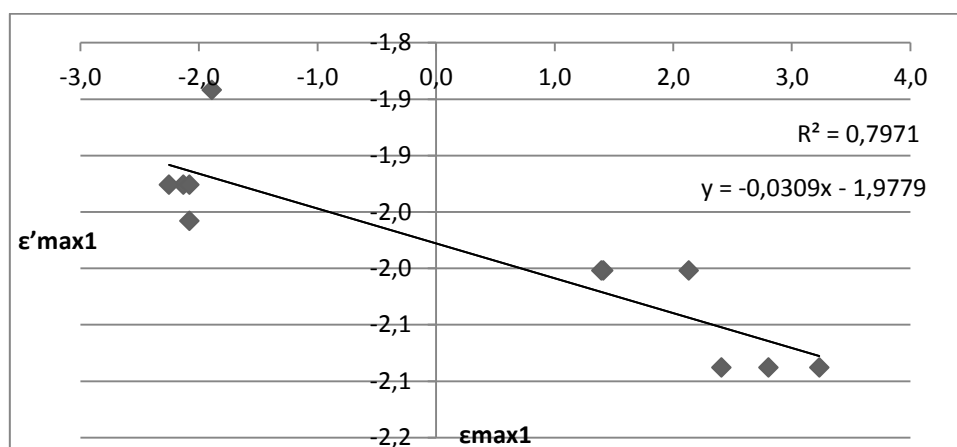
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	5.952357	-14.410000
2	-12.817700	-12.510000
3	-8.855200	10.620000
4	-8.868570	9.568000
5	3.773833	-12.510000
6	5.317662	-14.410000
7	3.327876	-11.570000
8	3.156329	-12.510000
9	4.494310	-14.410000
10	5.334895	-14.660000
11	-8.586800	10.620000
Μέσος όρος	-0.706455	-6.9256364
Τυπική απόκλιση	7.329733	11.09383475



Εικόνα 7.31 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών *εγκάρσιων* παραμορφώσεων λόγω *όπισθεν* τροχού στην *επιφάνεια* του *δυτικού* πυρήνα (WEST TT)

Πίνακας 7.48 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

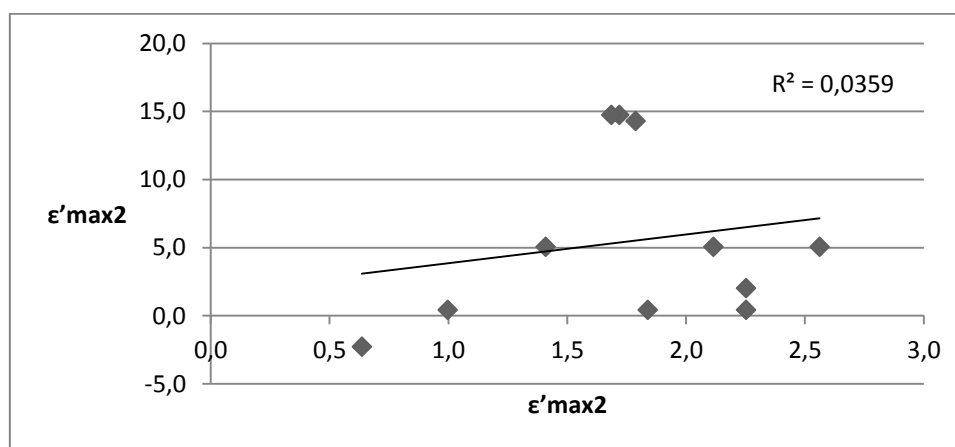
WEST LT		
Δοκιμή	$\epsilon_{\max 1}$	$\epsilon'_{\max 1}$
1	-2.131681	-1.926000
2	1.409681	-2.002000
3	2.802062	-2.088000
4	3.231910	-2.088000
5	2.131719	-2.002000
6	-2.080148	-1.926000
7	-1.890952	-1.842000
8	1.392529	-2.002000
9	-2.251990	-1.926000
10	-2.080110	-1.958000
11	2.406719	-2.088000
Μέσος όρος	0.267249	-1.9861818
Τυπική απόκλιση	2.315579897	0.080187054



Εικόνα 7.32 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **έμπροσθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Πίνακας 7.49 Πειραματικές-αναλυτικές **διαμήκεις** παραμορφώσεις λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Δοκιμή	$\epsilon_{\max 2}$	$\epsilon'_{\max 2}$
1	1.839419	0.414800
2	1.409681	5.044000
3	1.719062	14.740000
4	1.787810	14.280000
5	2.561481	5.044000
6	2.252052	0.414800
7	0.636048	-2.277000
8	2.114529	5.044000
9	0.997110	0.414800
10	2.251990	2.030000
11	1.684719	14.740000
Μέσος όρος	1.750355	5.4444909
Τυπική απόκλιση	0.568650	6.312954303

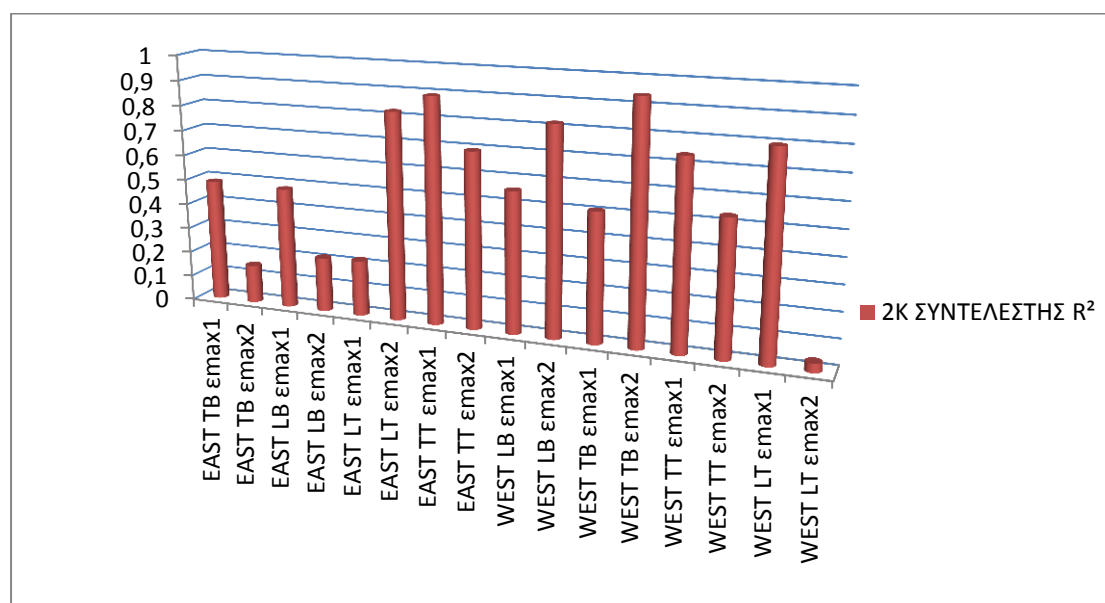


Εικόνα 7.33 Διάγραμμα διασποράς πειραματικών- αναλυτικών **διαμήκων** παραμορφώσεων λόγω **όπισθεν** τροχού στην **επιφάνεια** του **δυτικού** πυρήνα (WEST LT)

Τα παραπάνω διαγράμματα συνοψίζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα παραμόρφωσης – συντελεστή γραμμικής συσχέτισης που ακολουθεί, για παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν και όπισθεν άξονα.

Πίνακας 7.50 Παραμόρφωση-συντελεστής R^2 σειράς δοκιμών 2Κ

Παραμόρφωση	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ R^2
EAST TB $\epsilon_{\max 1}$	0.4877
EAST TB $\epsilon_{\max 2}$	0.1527
EAST LB $\epsilon_{\max 1}$	0.4827
EAST LB $\epsilon_{\max 2}$	0.2164
EAST LT $\epsilon_{\max 1}$	0.2222
EAST LT $\epsilon_{\max 2}$	0.8232
EAST TT $\epsilon_{\max 1}$	0.8918
EAST TT $\epsilon_{\max 2}$	0.6956
WEST LB $\epsilon_{\max 1}$	0.5588
WEST LB $\epsilon_{\max 2}$	0.8205
WEST TB $\epsilon_{\max 1}$	0.5099
WEST TB $\epsilon_{\max 2}$	0.9400
WEST TT $\epsilon_{\max 1}$	0.7393
WEST TT $\epsilon_{\max 2}$	0.5339
WEST LT $\epsilon_{\max 1}$	0.7971
WEST LT $\epsilon_{\max 2}$	0.0359



Εικόνα 7.34 Ραβδόγραμμα παραμόρφωσης- R^2 σειράς δοκιμών 2Κ

7.1.3 Συμπεράσματα

Από την στατιστική επεξεργασία με τη χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 έγινε μια πρώτη σύγκριση των τιμών των παραμορφώσεων, όπως προκύπτουν από το σύστημα των αισθητήρων οπτικών ινών, με τις τιμές των παραμορφώσεων οι οποίες προκύπτουν μέσω αναλυτικών μεθόδων.

- Στην πρώτη σειρά δοκιμών 1K μόνο σε μία από τις μελετούμενες θέσης ο δείκτης R^2 μας επιτρέπει να μιλάμε για επαρκή γραμμική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης. Η θέση αυτή, όπως φαίνεται και από το συγκεντρωτικό πίνακα θέση-συντελεστής R^2 πίνακα 7.25, είναι ο πυθμένας της ανακυκλωμένης στρώσης στον ανατολικό πυρήνα EAST, δηλαδή οι αισθητήρες που δίνουν μία απόκριση της ανακυκλωμένης στρώσης η οποία να συμφωνεί σε ικανοποιητικό βαθμό με την αναλυτική απόκριση είναι οι EAST TB και EAST LB. Συγκεκριμένα η παραπάνω απόκριση αφορά στην διέλευση του όπισθεν άξονα, ο οποίος φέρει μεγαλύτερο φορτίο, οπότε αναφερόμαστε στην ουσία στις παραμορφώσεις EAST TB $\epsilon_{\max 2}$ και EAST LB $\epsilon_{\max 2}$, για τις οποίες ο συντελεστής R^2 είναι 0.65 και 0.71 αντίστοιχα. Επομένως για τις συγκεκριμένες παραμορφώσεις ένα ικανοποιητικό ποσοστό των μετρημένων τιμών (65% για την EAST TB $\epsilon_{\max 2}$ και 71% για την EAST LB $\epsilon_{\max 2}$) μπορεί να συσχετιστεί γραμμικά με τις προσδοκώμενες τιμές.
- Όσον αφορά στη δεύτερη σειρά δοκιμών 2K, έχουμε περισσότερες θέσεις όπου επιτρέπεται να αναφερθούμε σε συσχέτιση πειραματικών – αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης καθώς υπάρχει υψηλός βαθμός γραμμικής συσχέτισης. Συγκεκριμένα στη θέση του δυτικού πυρήνα στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης για τη διέλευση του όπισθεν άξονα, στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης για τη διέλευση του έμπροσθεν άξονα και στη θέση του ανατολικού πυρήνα στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης, ο συντελεστής R^2 λαμβάνει υψηλές τιμές τόσο για την εγκάρσια όσο και για τη διαμήκη παραμόρφωση. Πράγματι από τον πίνακα 7.50 βλέπουμε πως για τις θέσεις WEST LB $\epsilon_{\max 2}$, WEST TB $\epsilon_{\max 2}$, WEST TT $\epsilon_{\max 1}$, WEST LT $\epsilon_{\max 1}$, EAST LT $\epsilon_{\max 2}$ και EAST TT $\epsilon_{\max 2}$, ο δείκτης R^2 παίρνει τιμές 0.82, 0.94, 0.74, 0.8, 0.82, 0.7 αντίστοιχα. Εντούτοις στον ανατολικό πυρήνα στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης για τη διέλευση του έμπροσθεν άξονα, παρόλο που για την εγκάρσια παραμόρφωση υπάρχει υψηλή γραμμική συσχέτιση ($R^2=0,89$), στη διαμήκη παραμόρφωση της ίδιας θέσης δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών ($R^2=0.22$). Γενικά για τη δεύτερη σειρά δοκιμών 2K

μπορούμε να πούμε πως υπάρχει αρκετά καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των υπολογισμένων και των επί τόπου τιμών της εγκάρσιας παραμόρφωσης με εξαίρεση την ανατολική θέση του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης EAST TB $\epsilon_{\max 1}$ και EAST TB $\epsilon_{\max 2}$.

7.2 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

Μετά τη χρήση του συντελεστή R^2 με σκοπό την εύρεση γραμμικής συσχέτισης μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών της παραμόρφωσης, εξετάζονται οι διαφορές των παραπάνω τιμών με τη βοήθεια του στατιστικού t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται στην κατανομή του Student (Student's t distribution) και είναι από τις πλέον απλές στατιστικές δοκιμασίες και οι πλέον συνηθισμένες στην αξιολόγηση αναλυτικών μεθόδων και μετρήσεων.

Δοκιμασία t για παρατηρήσεις κατά ζεύγη

Κατά τη σύγκριση της ισοδυναμίας δύο αναλυτικών μεθόδων συχνά αναλύεται μια σειρά δειγμάτων, που καλύπτουν μία σχετικώς ευρεία περιοχή τιμών, οπότε διατίθεται μια σειρά “ζευγών” αναλυτικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με μία δοκιμασία t που είναι γνωστή και ως **κατά ζεύγη δοκιμασία t** (paired t-test). Η τιμή t_{exp} παρέχεται από τη σχέση:

$$t_{exp} = |\bar{x}_A - \bar{x}_B| \sqrt{\frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}} \quad (7.5)$$

Όπου \bar{x}_A, \bar{x}_B οι μέσες τιμές των δύο ομάδων μετρήσεων, N ο αριθμός των ζευγών, d_i η θετική ή αρνητική διαφορά $x_{iA} - x_{iB}$ και \bar{d} η μέση τιμή των διαφορών αυτών. Η εξίσωση (7.5) γράφεται και ως:

$$t_{exp} = \frac{|\bar{d}| \sqrt{N}}{s_d} \quad (7.6)$$

όπου s_d είναι η τυπική απόκλιση της διαφοράς των τιμών. Η τιμή t_{exp} συγκρίνεται, με τη θεωρητική τιμή t_{theor} που αντιστοιχεί σε $\nu = N-1$ βαθμούς ελευθερίας. Εάν είναι $t_{exp} \geq t_{theor}$ τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται στη δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης. Σε αντίθετη περίπτωση, οι όποιες διαφορές θεωρούνται απλώς τυχαίες [Ευσταθίου 2004].

7.2.1 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1Κ λόγω έμπροσθεν άξονα

Θα γίνει εφαρμογή της δοκιμασίας t του Student κατά ζεύγη, μεταξύ αποτελεσμάτων των παραμορφώσεων από το πείραμα και αυτών που προκύπτουν από την εφαρμογή της αναλυτικής μεθόδου ώστε να γίνει συγκριτική ανάλυση των διαφορών των δύο μεθόδων. Θεωρούμε ως μηδενική υπόθεση το ότι η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της παραμόρφωσης δεν διαφέρει από την πειραματική και όποιες διαφορές είναι τυχαίες. Αρχικά θα αναφερθούμε στις παραμορφώσεις που οφείλονται στον έμπροσθεν τροχό. Έχουμε ήδη αναφέρει πως οι τιμές του 1^{ου} τεστ της σειράς δοκιμών 1Κ εξαιρούνται καθώς προκύπτουν πολύ μεγάλες συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Επομένως δημιουργείται ο πίνακας Π7.1 του παραρτήματος για παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού. Ακολουθεί στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε $N=71(72-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Επομένως έχουμε τον πίνακα αποτελεσμάτων Π7.2 του παραρτήματος από όπου προκύπτει ότι επειδή η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι μικρότερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, επομένως η αναλυτική και η πειραματική μέθοδος δε διαφέρουν. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από το ότι η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι μεγαλύτερη από τα α ($\alpha=0.05$), επομένως για το συγκεκριμένο επίπεδο εμπιστοσύνης η μηδενική υπόθεση φαίνεται να ισχύει.

7.2.2 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1Κ λόγω όπισθεν άξονα

Ομοίως εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία για τις παραμορφώσεις που οφείλονται στον όπισθεν τροχό για την ίδια σειρά δοκιμών 1Κ. Αρχικά δημιουργείται ο πίνακας Π7.3 (βλ. παράρτημα) από τον οποίον έχουν αφαιρεθεί κατά τα γνωστά οι τιμές του 1^{ου} τεστ. Ακολουθεί στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε $72-1=71$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.4 (παράρτημα). Από τον πίνακα βλέπουμε πως η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι αρκετά μεγαλύτερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, άρα για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων. Επομένως η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται.

7.2.3 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 2K λόγω έμπροσθεν άξονα

Ομοίως εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία για τη σειρά δοκιμών 2K για τις παραμορφώσεις που οφείλονται στον έμπροσθεν τροχό . Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας Π7.5 (παράρτημα). Όπως προηγουμένως ακολουθεί στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε 88-1=87 βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.6. Από τον πίνακα βλέπουμε πως η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι οριακά μικρότερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% αποδεχόμαστε τη μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι μεγαλύτερη από τα α ($\alpha=0.05$).

7.2.4 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 2 λόγω όπισθεν άξονα

Ομοίως εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία για τη σειρά δοκιμών 2K για τις παραμορφώσεις που οφείλονται στον όπισθεν τροχό . Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας Π7.7 (παράρτημα). Στη συνέχεια έχουμε το στατιστικό t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε 88-1=87 βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.8 (παράρτημα) από τον οποίον βλέπουμε πως η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι μεγαλύτερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι πολύ μικρότερη από τα α ($\alpha=0.05$).

7.2.5 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειρών δοκιμών 1K και 2 K λόγω όπισθεν και έμπροσθεν άξονα

Ομοίως εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία και για τις δύο σειρές δοκιμών 1K, 2K για παραμορφώσεις οι οποίες οφείλονται τόσο στον έμπροσθεν όσο και στον όπισθεν τροχό. Ακολουθεί ο σχετικός πίνακας Π7.9 (παράρτημα). Ακολουθεί στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά το οποίο θεωρούμε 320-1=319 βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.10 (παράρτημα). Από τον πίνακα βλέπουμε πως η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι αρκετά μεγαλύτερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για

επίπεδο εμπιστοσύνης 95% δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι πολύ μικρότερη από τα α ($\alpha=0.05$).

7.2.6 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K και 2 K στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης

Ομοίως εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία για κάθε μία από τις δύο σειρές δοκιμών 1K, 2K για παραμορφώσεις του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης, οι οποίες οφείλονται τόσο στον εμπροσθεν όσο και στον όπισθεν τροχό. Σχηματίζουμε έτσι τους σχετικούς πίνακες Π7.11 και Π7.13 (παράρτημα) για τις σειρές δοκιμών 1K και 2K αντίστοιχα. Ακολουθεί στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε $N_1=72-1=71$ βαθμούς ελευθερίας για την σειρά δοκιμών 1K και $N_2=88-1=87$ για τη σειρά δοκιμών 2K και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) ίδιο και για τις δύο σειρές δοκιμών. Για τη σειρά δοκιμών 1K προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.12 από τον οποίον βλέπουμε πως η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι πολύ μικρότερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι πολύ μεγαλύτερη από τα α ($\alpha=0.05$). Για τη σειρά δοκιμών 2K προκύπτει ο πίνακας αποτελεσμάτων Π7.14 στον οποίον βλέπουμε πως αντίθετα με την πρώτη σειρά δοκιμών 1K, η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι μεγαλύτερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι μικρότερη από το α ($\alpha=0.05$).

7.2.7 Στατιστικός t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων σειράς δοκιμών 1K και 2 K στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης

Ομοίως εφαρμόζουμε κατά αντιστοιχία με την προηγούμενη παράγραφο την ίδια διαδικασία για κάθε μία από τις δύο σειρές δοκιμών 1K, 2K για παραμορφώσεις της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης, οι οποίες οφείλονται τόσο στον εμπροσθεν όσο και στον όπισθεν τροχό. Αρχικά σχηματίζουμε τους πίνακες Π7.15 και Π7.17 (παράρτημα) για τις δύο σειρές δοκιμών και εν συνεχεία πραγματοποιούμε στατιστικό t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων κατά τον οποίο θεωρούμε $N_1=72-1=71$ και $N_2=88-1=87$ βαθμούς ελευθερίας αντίστοιχα για τις σειρές δοκιμών 1K και 2K και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Οι πίνακες

αποτελεσμάτων είναι ο Π7.16 για τη σειρά 1K και ο Π7.18 (παράρτημα) για τη σειρά 2K. Από τους τελευταίους βλέπουμε πως και για τις δύο σειρές δοκιμών η απόλυτη τιμή του t στατικού είναι μεγαλύτερη από το t κρίσιμο δίπλευρο, επομένως για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων, ή διαφορετικά η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση ($P(T \leq t)$) είναι μικρότερη από το α ($\alpha=0.0$).

7.2.8 Συμπεράσματα από τις δοκιμασίες t

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόστηκαν σε διάφορες ομάδες παραμορφώσεων ο στατιστικός t -test κατά ζεύγη παρατηρήσεων, προκειμένου να συγκρίνουμε τις διαφορές στις τιμές της πειραματικής και της αναλυτικής μεθόδου μέτρησης των παραμορφώσεων της ανακυκλωμένης στρώσης του οδοστρώματος.

Από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσαν οι δοκιμές για παραμόρφωση οφειλόμενη στον έμπροσθεν τροχό και για τις δύο σειρές δοκιμών 1K, 2K, ενώ πολύ καλά αποτελέσματα έδωσαν οι δοκιμές της σειράς 1K για παραμορφώσεις οφειλόμενες τόσο στον έμπροσθεν όσο και στον όπισθεν τροχό, στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης. Στην τελευταία περίπτωση, η μηδενική υπόθεση κατά την οποία οι διαφορές μεταξύ της πειραματικής και της αναλυτικής μεθόδου οφείλονται σε τυχαία και όχι συστηματικά σφάλματα, εμφανίζεται ισχυρότατη.

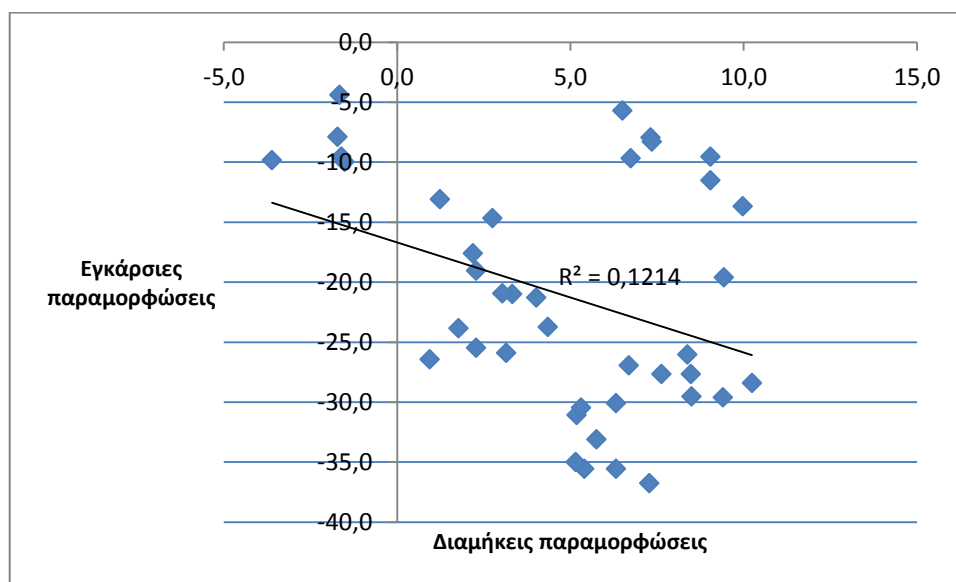
7.3 Γραμμική συσχέτιση πειραματικής διαμήκους και εγκάρσιας παραμόρφωσης

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα ελέγξουμε κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο υποκεφάλαιο 7.1, το αν συνδέονται με κάποια σχέση οι διαμήκεις με τις εγκάρσιες παραμορφώσεις όπως αυτές μετρήθηκαν στο πείραμά μας από το σύστημα των αισθητήρων οπτικών ινών. Ο έλεγχος αυτός θα πραγματοποιηθεί για την επιφάνεια και τον πυθμένα του ανατολικού και του δυτικού πυρήνα.

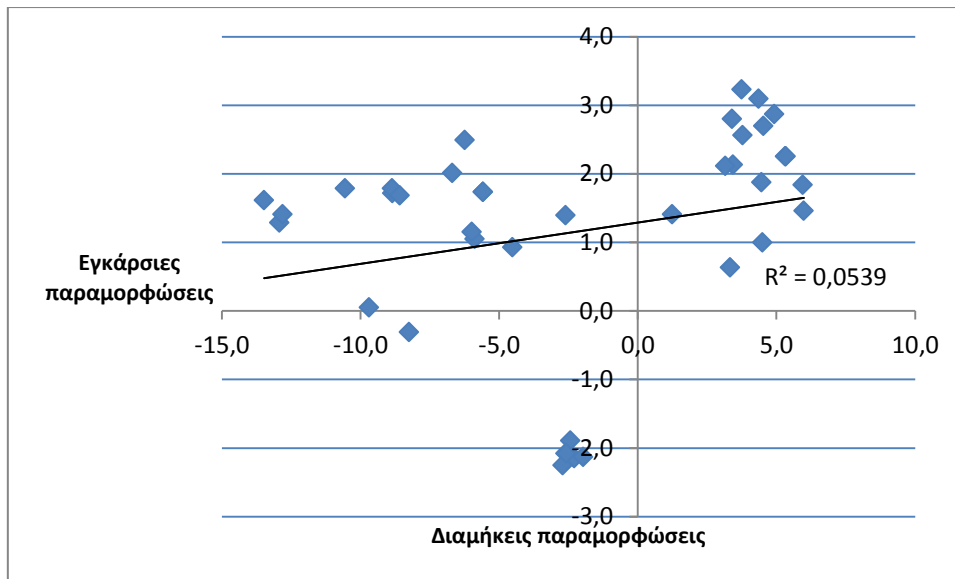
7.3.1 Γραμμική συσχέτιση διαμήκους και εγκάρσιας επί τόπου παραμόρφωσης στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης

Κατά τον ίδιο τρόπο όπως έχει παρουσιαστεί στο πρώτο υποκεφάλαιο, οι μετρημένες πειραματικά διαμήκεις παραμορφώσεις της επιφάνειας της

ανακυκλωμένης στρώσης θα σχηματίσουν μαζί με τις μετρημένες πειραματικά εγκάρσιες παραμορφώσεις της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης ένα διάγραμμα διασποράς στο οποίο θα υπολογιστεί ο συντελεστής R^2 προκειμένου να καταλήξουμε στον αν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παραμορφώσεων στις δύο διευθύνσεις. Προκειμένου να εξεταστούν πιο αναλυτικά, θα γίνει διαχωρισμός των δεδομένων σε αυτά που αναφέρονται στον ανατολικό (EAST) και σε αυτά που αναφέρονται στον δυτικό (WEST) πυρήνα. Αρχικά δημιουργούμε από έναν πίνακα για κάθε πυρήνα με τις διαμήκεις και τις εγκάρσιες παραμορφώσεις στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης. Οι πίνακες φαίνονται στο παράρτημα πίνακας Π7.19 για τον ανατολικό πυρήνα και πίνακας Π7.20 για το δυτικό πυρήνα. Στη συνέχεια δημιουργούνται τα διαγράμματα διασποράς από τις διαμήκεις και τις εγκάρσιες παραμορφώσεις για τους δύο πυρήνες και ελέγχεται αν υπάρχει και αν είναι επαρκής η γραμμική συσχέτιση μέσω του συντελεστή R^2 της γραμμής τάσης.



Εικόνα 7.35 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα

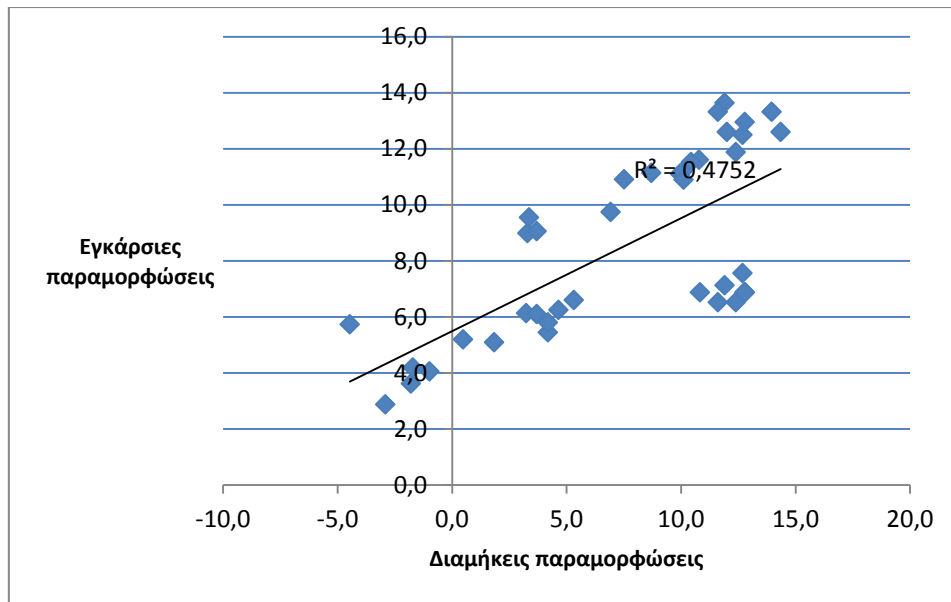


Εικόνα 7.36 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα

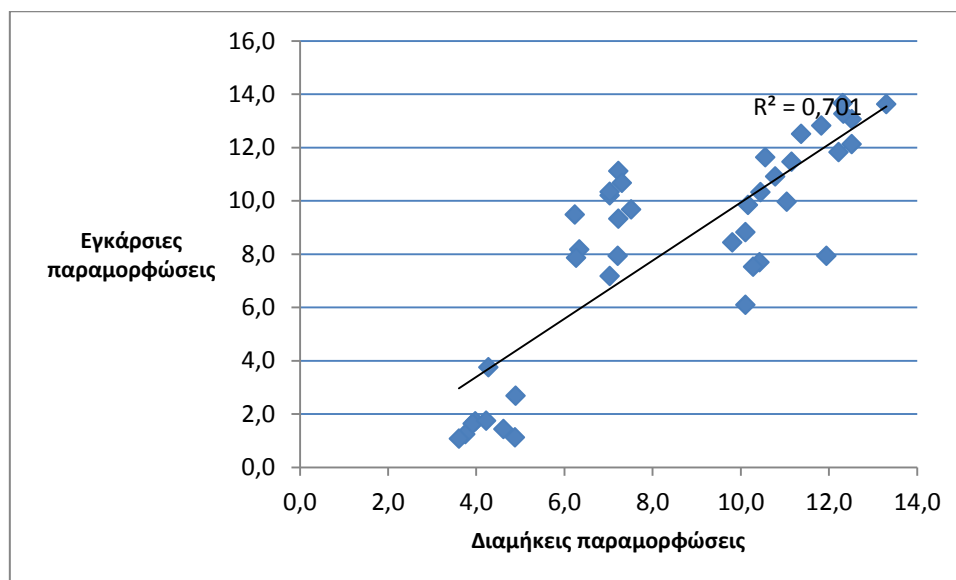
Από τα διαγράμματα εικόνα 7.33 και εικόνα 7.34 φαίνεται πως σε κανέναν από τους δύο πυρήνες στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης δεν υπάρχει επαρκής γραμμική συσχέτιση μεταξύ εγκάρσιας και διαμήκουσ επί τόπου παραμόρφωσης, όπως φαίνεται και από τη χαμηλή τιμή του συντελεστή R^2 .

7.3.2 Γραμμική συσχέτιση διαμήκουσ και εγκάρσιας επί τόπου παραμόρφωσης στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης

Μετά την εξέταση των παραμορφώσεων στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης, ακολουθεί ο έλεγχος της συσχέτισης διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της. Όπως και στη προηγούμενη παράγραφο, οι δύο πυρήνες θα εξεταστούν χωριστά και μετά τη μόρφωση των σχετικών πινάκων Π7.21 για τον ανατολικό και Π7.22 (παράρτημα) για το δυτικό πυρήνα με τις διαμήκεισ και τις εγκάρσιες παραμορφώσεις στους δύο πυρήνες, σχεδιάζονται τα διαγράμματα διασποράς.



Εικόνα 7.37 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα



Εικόνα 7.38 Διάγραμμα διασποράς διαμήκων-εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα

Από την εικόνα 7.37, φαίνεται πως όσον αφορά τον ανατολικό πυρήνα μόνο ένα ποσοστό περίπου 48% των παραμορφώσεων στις δύο διευθύνσεις μπορούν να

συσχετιστούν γραμμικά μεταξύ τους, κάτι που δεν επαρκεί για να χαρακτηριστεί η γραμμική παλινδρόμηση ως επαρκής. Αντιθέτως συνεχίζοντας με τις παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα από την εικόνα 7.38 φαίνεται πως υπάρχει καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ διαμήκων και εγκάρσιων παραμορφώσεων στη συγκεκριμένη θέση, όπως αυτές μετρήθηκαν από το σύστημα των αισθητήρων, καθώς ο συντελεστής R^2 υποδεικνύει μια επαρκώς ισχυρή εξάρτηση μεταξύ τους.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως, με βάση τις επί τόπου μετρημένες παραμορφώσεις στην επιφάνεια και τον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης η μοναδική περίπτωση όπου υπάρχει ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση μεταξύ εγκάρσιας και διαμήκους παραμόρφωσης είναι αυτή του πυθμένα στη δυτική θέση.

7.4 Τελικά συμπεράσματα στατιστικής επεξεργασίας

Από τη σύγκριση της πειραματικής και της αναλυτικής μεθόδου μέσω στατιστικών ελέγχων προέκυψαν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά τη μεταξύ τους συσχέτιση. Συγκεκριμένα στην πρώτη σειρά δοκιμών 1K η περίπτωση που μας επιτρέπει να μιλάμε για επαρκή γραμμική συσχέτιση μεταξύ προβλεπόμενων και επί τόπου τιμών παραμόρφωσης αφορά στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα, για διέλευση του όπισθεν άξονα τόσο για την εγκάρσια όσο και για την κατά μήκος διεύθυνση της παραμόρφωσης. Στη δεύτερη σειρά δοκιμών 2K στον ανατολικό πυρήνα προέκυψε καλή γραμμική συσχέτιση στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης με μοναδική εξαίρεση την κατά μήκος παραμόρφωση λόγω του έμπροσθεν άξονα. Σχετικά με το δυτικό πυρήνα οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν στον πυθμένα μέτρια συσχέτιση για φόρτιση από τον έμπροσθεν άξονα και πολλή καλή για φόρτιση από τον όπισθεν, ενώ στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης η συσχέτιση που υπολογίστηκε ήταν ισχυρή στις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού και ασθενής έως μηδενική λόγω όπισθεν τροχού.

Επιπλέον, ο στατιστικός έλεγχος για ύπαρξη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων συνολικά και για τις δύο σειρές δοκιμών 1K και 2K, προέκυψε θετικός μόνο στην περίπτωση του πυθμένα του δυτικού πυρήνα καθώς στις υπόλοιπες θέσεις δεν εντοπίστηκε καμία αλληλεπίδραση.

Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκαν στατιστικοί t-tests κατά ζεύγη παρατηρήσεων για έλεγχο της τυχαιότητας των διαφορών μεταξύ των υπολογιστικών και των επί τόπου αποτελεσμάτων, από όπου προέκυψε πως στις περιπτώσεις των παραμορφώσεων λόγω έμπροσθεν άξονα στις σειρές δοκιμών 1K και 2K αλλά και στις

παραμορφώσεις λόγω όπισθεν στην 1K, οποιεσδήποτε διαφορές είναι τυχαίες. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι διαφορές που εμφανίζονται στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι στατιστικά σημαντικές.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως οι περιπτώσεις όπου οι αναλυτικές μέθοδοι μπορούν να προβλέψουν τις επί τόπου παραμορφώσεις στην επιφάνεια και στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης με βάση τη συγκεκριμένη φόρτιση και τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος είναι περιορισμένες. Επομένως η αναλυτική μέθοδος δε μπορεί να γενικευθεί για το σύνολο των περιπτώσεων.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την παρακολούθηση και τον έλεγχο της επί τόπου συμπεριφοράς ενός ανακυκλωμένου ημιάκαμπτου οδοστρώματος μέσω της τεχνολογίας των αισθητήρων οπτικών ινών. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η απόκριση της ασφαλικής και της ανακυκλωμένης στρώσης στην φόρτιση από διέλευση οχήματος. Επιπλέον, μέσω δειγματοληπτικών ελέγχων προσδιορίστηκαν οι παράμετροι των στρώσεων του οδοστρώματος για την προσομοίωση του πειράματος με αναλυτικές μεθόδους, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των ευρύτερων εργαστηριακών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. επί τόπου πείραμα σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου, κατά το οποίο εγκαταστάθηκε σύστημα αισθητήρων παραμόρφωσης οπτικών ινών σε δύο γειτονικές θέσεις στο οδόστρωμα (ανατολική και δυτική). Το οδόστρωμα είχε αποκατασταθεί με τη μέθοδο της επί τόπου ψυχρής ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλτο. Σε κάθε θέση τοποθετήθηκαν αισθητήρες στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης και στη διεπιφάνεια της με την επιφανειακή άσφαλτο για τη μέτρηση της οριζόντιας παραμόρφωσης σε εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση. Η φόρτιση του οδοστρώματος έγινε με διαδοχικές διελεύσεις διαξονικού οχήματος (με φορτίο όπισθεν άξονα μεγαλύτερο από του εμπροσθεν) πλησίον της ανατολικής θέσης (πλησιέστερη θέση), οπότε και καταγράφηκαν οι μετρήσεις του κάθε αισθητήρα. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν δέκα διελεύσεις-δοκιμές (1^η σειρά δοκιμών 1K) και στη συνέχεια άλλες έντεκα (2^η σειρά δοκιμών 2K).

Από τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων στις θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της ανακυκλωμένης και της ασφαλικής στρώσης υπό τη φόρτιση του οχήματος:

Πυθμένας ανακυκλωμένης στρώσης

Στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική θέση, η διαμήκεις παραμορφώσεις εμφανίζονται εφελκυστικές, με την πρώτη μέγιστη τιμή (λόγω εμπροσθεν τροχού) να είναι μικρότερη της δεύτερης μέγιστης (λόγω όπισθεν τροχού), ως αναμενόταν, και για τις δύο σειρές δοκιμών.

Στην εγκάρσια διεύθυνση για την πρώτη σειρά δοκιμών, παρότι για τη δυτική θέση (απομακρυσμένη) οι μετρήσεις έδειξαν τον αναμενόμενο εφελκυσμό, στην ανατολική θέση (πλησιέστερη στον τροχό) παρουσιάστηκαν ανά μία δοκιμή μειωμένες εφελκυστικές παραμορφώσεις. Για τη δεύτερη σειρά δοκιμών στην ανατολική θέση η εγκάρσια παραμόρφωση είναι η αναμενόμενη εφελκυστική με

δύο μέγιστες τιμές, ενώ στη δυτική θέση η πρώτη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση παίρνει πολλή μικρή τιμή σε αντίθεση με τη δεύτερη που εμφανίζεται κανονική.

Πυθμένας ασφαλικής στρώσης

Όσον αφορά στη συμπεριφορά της ασφαλικής στρώσης στη στάθμη του πυθμένα της στη διαμήκη διεύθυνση, με μοναδική εξαίρεση τη δεύτερη σειρά δοκιμών στην ανατολική θέση όπου ο εφελκυσμός κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα (αν και όχι πάντα ανάλογα του φορτίου που τον προκαλεί), στις υπόλοιπες δοκιμές και στις δύο θέσεις παίρνει χαμηλές τιμές.

Στην εγκάρσια διεύθυνση η ασφαλική στρώση στην ανατολική θέση καταπονείται μόνο σε θλίψη και επομένως δεν τίθεται θέμα αστοχίας. Στη δυτική θέση για την πρώτη σειρά δοκιμών, παρότι αρχικά φαίνεται να υπάρχει μόνο θλιπτική (και επομένως μηδενική) καταπόνηση, ανά μία δοκιμή η παραμόρφωση λόγω του έμπροσθεν τροχού παίρνει μορφή εφελκυσμού. Για τη δεύτερη σειρά δοκιμών στην ίδια θέση, προκύπτει πως για μικρές αποκλίσεις του οχήματος η μοναδική καταπόνηση οφείλεται στον έμπροσθεν τροχό, ενώ για μεγαλύτερες αποκλίσεις η παραμόρφωση μεταβαίνει απότομα από τη θλιπτική στην εφελκυστική κατάσταση.

Συνοπτικά από τα παραπάνω προκύπτει ότι στην περίπτωση των διαμήκων παραμορφώσεων, εμφανίζονται εφελκυστικές στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης και στις δύο θέσεις, ενώ παίρνουν χαμηλές τιμές εφελκυσμού στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης. Σχετικά με τις παραμορφώσεις σε εγκάρσια διεύθυνση, στον πυθμένα και των δύο θέσεων είναι εφελκυστικές αν και σε αρκετές περιπτώσεις η παραμόρφωση λόγω έμπροσθεν άξονα εμφανίζεται αμελητέα. Στην διεπιφάνεια των δύο στρώσεων η ανατολική θέση δεν εμφανίζει εφελκυσμό, ενώ στη δυτική θέση κατά διαστήματα εμφανίζονται εφελκυστικές παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν άξονα.

Τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων από το επί τόπου πείραμα που προέκυψαν από το σύστημα των αισθητήρων οπτικών ινών υποβλήθηκαν σε στατιστική σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των παραμορφώσεων από τη χρήση αναλυτικών μεθόδων, μέσω της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης από όπου προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα από την πρώτη σειρά δοκιμών εντοπίστηκε επαρκής γραμμική συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων, στην ανατολική θέση του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης για εγκάρσιες και διαμήκεις παραμορφώσεις οφειλόμενες στον όπισθεν τροχό του οχήματος. Στην ίδια θέση στη στάθμη της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης και για τη δεύτερη σειρά δοκιμών προέκυψε καλή αλληλεξάρτηση μεταξύ των δύο μεθόδων, πλην της κατά μήκος παραμόρφωσης λόγω του έμπροσθεν άξονα. Στη δυτική θέση υπό μελέτη, πολλή καλή συσχέτιση

εντοπίστηκε στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης για παραμορφώσεις οφειλόμενες στον όπισθεν τροχό του οχήματος, ενώ οι οφειλόμενες στον έμπροσθεν τροχό παραμορφώσεις έδωσαν μέτρια συσχέτιση. Επίσης, ισχυρή είναι η συσχέτιση στη δυτική θέση για παραμορφώσεις της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης λόγω του έμπροσθεν τροχού. Τέλος η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε στο σύνολο των αποτελεσμάτων από όλες τις δοκιμές, από όπου επαρκής συσχέτιση εντοπίστηκε μόνο στη δυτική θέση του πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης. Η ίδια θέση (πυθμένας δυτικής) ήταν η μοναδική στην οποία εντοπίστηκε ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών παραμορφώσεων σε εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση.

Στο σκέλος της στατιστικής ανάλυσης μεταξύ αποτελεσμάτων πειραματικής και αναλυτικής μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον στατιστικοί t-tests κατά ζεύγη παρατηρήσεων ώστε να διερευνηθεί αν οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων είναι στατιστικά σημαντικές. Από τα αποτελέσματα του ελέγχου δεν εντοπίστηκαν σημαντικές στατιστικές διαφορές στις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν άξονα, τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη σειρά δοκιμών, καθώς επίσης και στις παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν και όπισθεν άξονα στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης για την πρώτη σειρά δοκιμών. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις προέκυψαν σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως η προσομοίωση του επί τόπου πειράματος μέσω των αναλυτικών μεθόδων ελαστικής πολυστρωματικής ανάλυσης(MLE) που χρησιμοποιήθηκαν δεν είναι ακριβής. Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών στο επί τόπου πείραμα ώστε να διαθέτουμε ένα ευρύτερο δείγμα επί τόπου παραμορφώσεων προς σύγκριση με τις αναλυτικές, αλλά και η προσομοίωση του συγκεκριμένου οδικού πειράματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί μια πολλή ακριβή μέθοδο αναλυτικής πρόβλεψης των παραμορφώσεων ειδικά στην περίπτωση δυναμικής φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο πιθανώς να επιτευχθεί καλύτερη σύνδεση μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών μεθόδων κάτι που θα οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο ακριβών και ρεαλιστικών μοντέλων προσομοίωσης και συνεπώς στην καλύτερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Επιπλέον, στα πλαίσια των εφαρμογών στο αισθητήρων οπτικών ινών στα οδοστρώματα, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη εγκατάστασης και λειτουργίας αισθητήρων κατακόρυφης παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια στρώσης έδρασης και υποβάσεως εύκαμπτου οδοστρώματος, καθώς και θερμοκρασιακών αισθητήρων στον όγκο των ασφαλικών στρώσεων προκειμένου, συμπληρωματικά με τους αισθητήρες οριζόντιας παραμόρφωσης, να επιτευχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου και εποπτείας της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ABDEL-MOOTY M., EL-HUSSEIN H. MOHAMED, HADDAD J., “Fiber Optics for Evaluation of Pavement Reinforcement Materials in Resisting Reflection Cracking”, *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1536(1996), pp. 140-145

ΑΒΡΑΜΟΠΟΥΛΟΣ Η. (2007) «Συστήματα Μετάδοσης και Δίκτυα Οπτικών Ινών», Ε.Μ.Π.

[http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies Susthmata metadoshs/Enotita 3 Optika SustimataMetadosis/](http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Susthmata_metadoshs/Enotita_3_Optika_SustimataMetadosis/),(τελευταία πρόσβαση: 15/1/2012)

AL-QADI I.L., SCARPAS T., LOIZOS A. (2008), “Pavement Cracking Mechanism, Modeling, Detection, Testing and Case Histories”, CRC Press/Balkema, London, pp. 519-528

CARTER T.K. (2004), Truck & Trailer Standard 5-Ton Non-Directional Tire Axle. Available from: http://www.oocities.org/ac_mwm_bogeys/,(τελευταία πρόσβαση: 1/2012)

CARTER T.K. (2004), Truck & Trailer Standard Dual 5-Ton Non-Directional Tire Axle. Available from:http://www.oocities.org/ac_mwm_bogeys/,(τελευταία πρόσβαση: 1/2012)

COSENTINO P.J., VON ECKROTH W., GROSSMAN B.G. (2003), “Analysis of Fiber Optic Traffic Sensors in Flexible Pavements”, *Journal of Transportation Engineering*, 129 (5), pp.549-557

DENG L.,CAI C.S. (2006), “Applications of fiber optic sensors in civil engineering”[online]. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisianan State University. Available from:

<http://www.cee.lsu.edu/people/cai/J2007-Application%20of%20fiber%20optic%20sensors.pdf>,(τελευταία πρόσβαση: 15/11/2011)

DORE G., DUPLAIN G., PIERRE P. (2007), “Monitoring mechanical response of in service pavements using retrofitted fibre optic sensors”, In A. Loizos, T. Scarpas & I.L. Al-Qadi (Eds.), *Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials*, Taylor & Francis Group, London, pp. 883-891

ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ Κ.Η., (2002), «ΧΗΜΙΚΗ ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ-ΜΙΚΡΟΪΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ Εισαγωγικά μαθήματα», Αθήνα, σελ.169-170

ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ Κ.Η. (2004), «Στατιστική επεξεργασία αναλυτικών αποτελεσμάτων-Α Ενότητα», Πανεπιστήμιο Αθηνών, σελ. 28-32

http://www.chem.uoa.gr/courses/chemometrics/Unit1_01.pdf,

(τελευταία πρόσβαση 28/12/2011)

HUANG Y.H. (2004), "PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN", Pearson Prentice Hall, New Jersey, pp. 4, 45-47, 94-98

KUNZLER M., UDD E., TAYLOR T. (2003), "Traffic Monitoring Using Fiber Optic Grating Sensors On the I-84 Freeway & Future Uses in WIM"[online]. Blue Road Research. Available from:

http://www.bluerr.com/papers/BRR-2003_SPIE_Vol5278_p122.pdf, (τελευταία πρόσβαση: 3/11/2011)

LI Q. (2004), "Calibration of embedded fiber optic sensor in concrete under biaxial compression", *Measurement*, 35 (3), pp.303-310

LOIZOS A., PAPAVALIIOU V., PLATI C. (2007), "Early life performance of cold in-place pavement recycling with foamed asphalt technique", *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2005, pp. 36-43

ΛΟΪΖΟΣ Α. (2008), «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα 8^ο εξάμηνο», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ 12-20, 21-25

ΛΟΪΖΟΣ Α. (2008), «Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ 5-8

ΜΑΛΤΕΖΟΣ Σ. (2002), «Προσαρμογή της ευθείας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων στο περιβάλλον του excel», Αθήνα,

<http://www.physics.ntua.gr/~maltezos/software.htm>, (τελευταία πρόσβαση: 12/12/2011)

MEASURES R.M. (2001), "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology", Academic Press, Toronto, pp. 233-260, 265-323

MENDEZ A., GRAVER T. (2007), "Overview of fiber optic sensors for NDT applications", IV NDT Panamerican Conference, Buenos Aires, pp. 1-11

OPSENS.INC (2010), "Opsens' pavement and road structure fiber optic monitoring solutions"[online]. Available from:

http://www.opsens.com/en/industries/solutions/civil_engineering/pavement_monitoring/,

(τελευταία πρόσβαση: 5/11/2011)

PAVEMENT INTERACTIVE. (2008), “Flexible pavement mechanistic models”[online]. Available from:

<http://www.pavementinteractive.org/article/flexible-pavement-mechanistic-models/>

, (τελευταία πρόσβαση: 30/1/2012)

PAVEMENT INTERACTIVE. (2008), “Flexible pavement response”[online]. Available from:

<http://www.pavementinteractive.org/article/flexible-pavement-response/>, (τελευταία

πρόσβαση: 15/12/2011)

SHARP S.R., GALAL K.A., ELFINO M.K. (2007), “Using Fiber-Optic Sensors Technology to Measure Strains Under the Asphalt Layer of a Flexible Pavement Structure”, Virginia Transportation Research Council Final report, Charlottesville, Virginia

WALTON M., KADOLPH S. (1993), “Pavement Instrumentation”[online]. Iowa Department of Transportation, Iowa Highway Research Board. Available from:

http://www.iowadot.gov/operationsresearch/reports/reports_pdf/hr_and_tr/reports/hr293.pdf, (τελευταία πρόσβαση: 11/11/2011)

WEINMANN T.L. (2005), “PAVEMENT INSTRUMENTATION-CEAT Technology Transfer Workshop on Airport Pavement Instrumentation & Analysis”[online]. Available from:

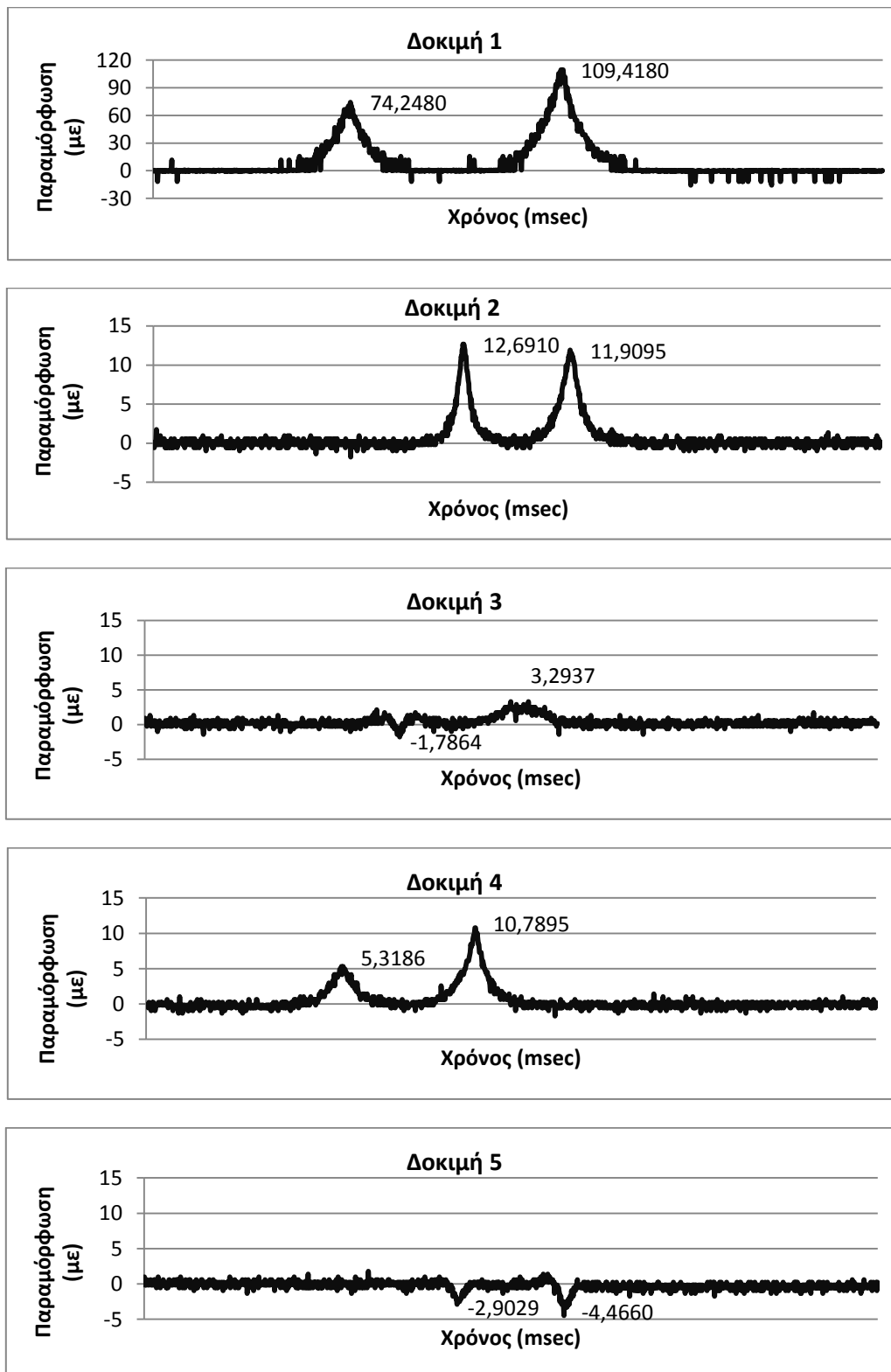
http://www.ceat.uiuc.edu/NEWS/pastnews/CEATworkshop_may/presentations/may05-weinmann.pdf, (τελευταία πρόσβαση: 11/11/2011)

YODER E.J., WITCZAK M.W. (1987), «Αρχές σχεδιασμού οδοστρωμάτων», Μόσχος Γκιούρδας, Αθήνα, σελ.24-76

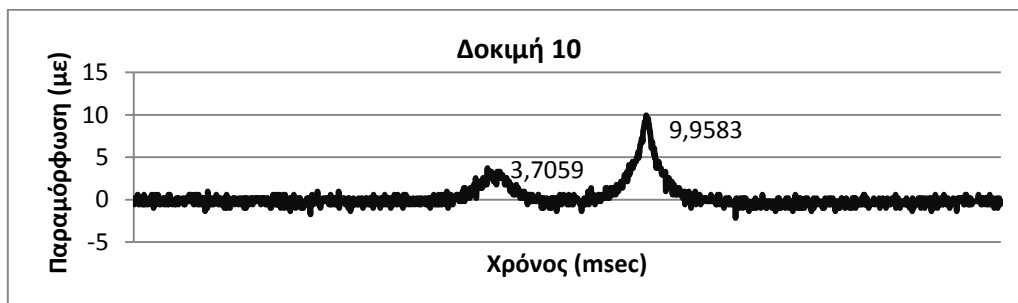
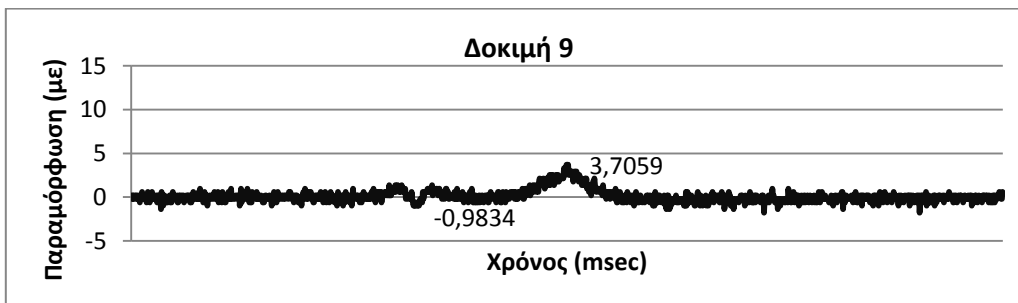
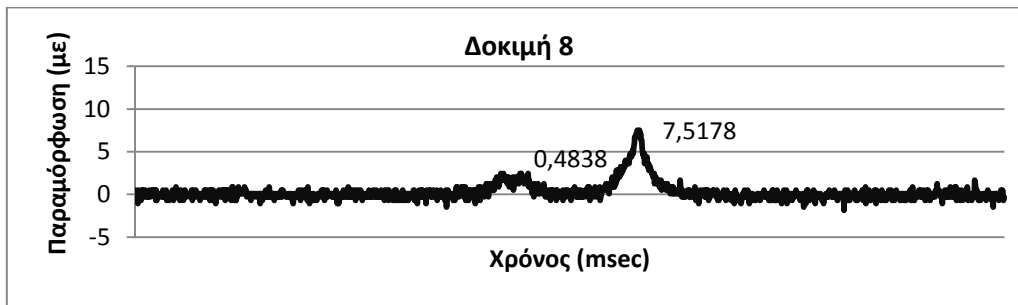
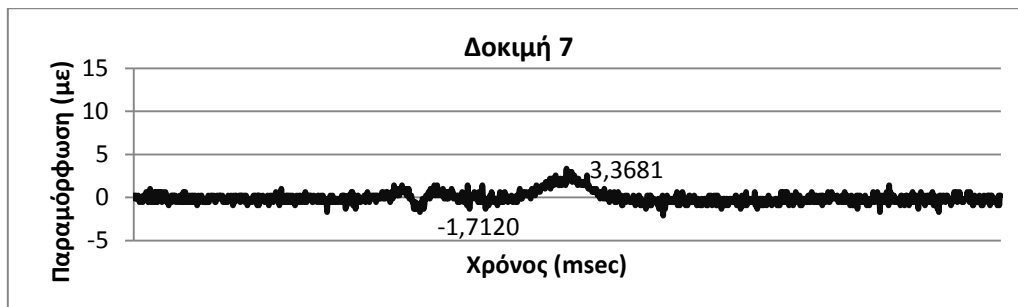
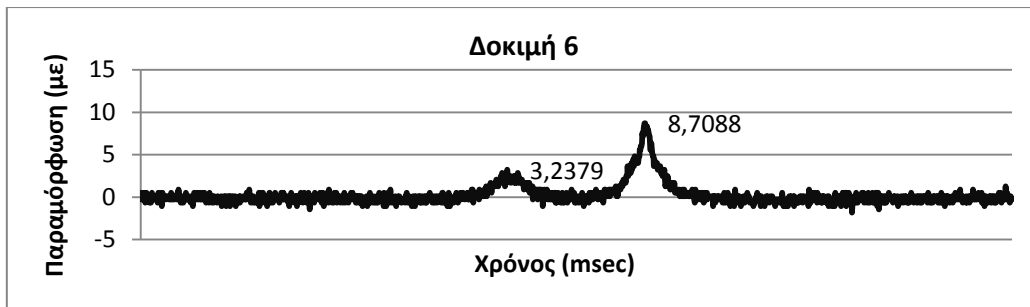
ZAFAR R., NASSAR W., ALBELLA A. (2005), “Interaction between pavement instrumentation and Hot-Mix-Asphalt in flexible pavements”. *Emirates Journal for Engineering Research*, 10 (1), pp.49-55.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

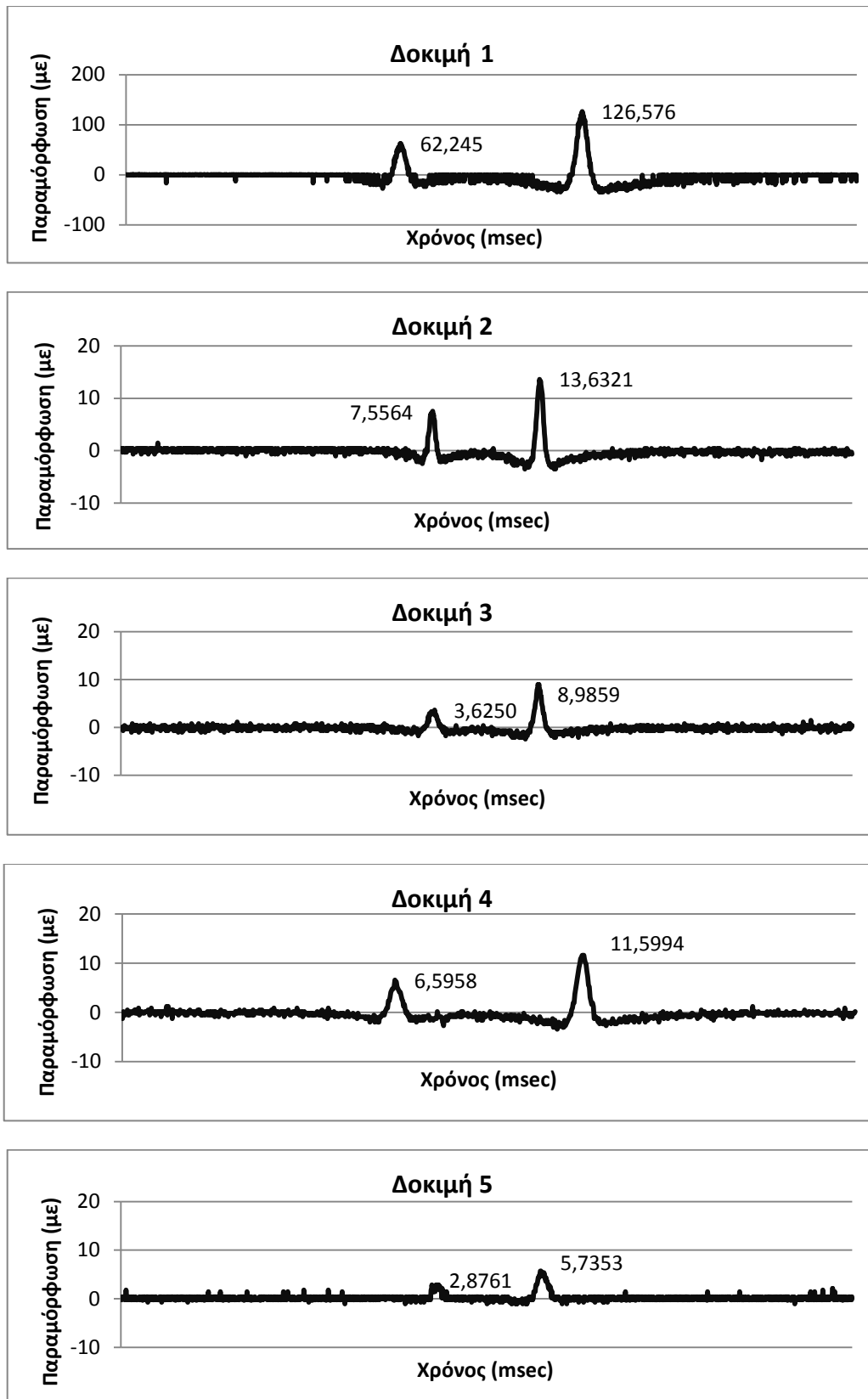
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου από σύστημα αισθητήρων

1^Η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 1Κ

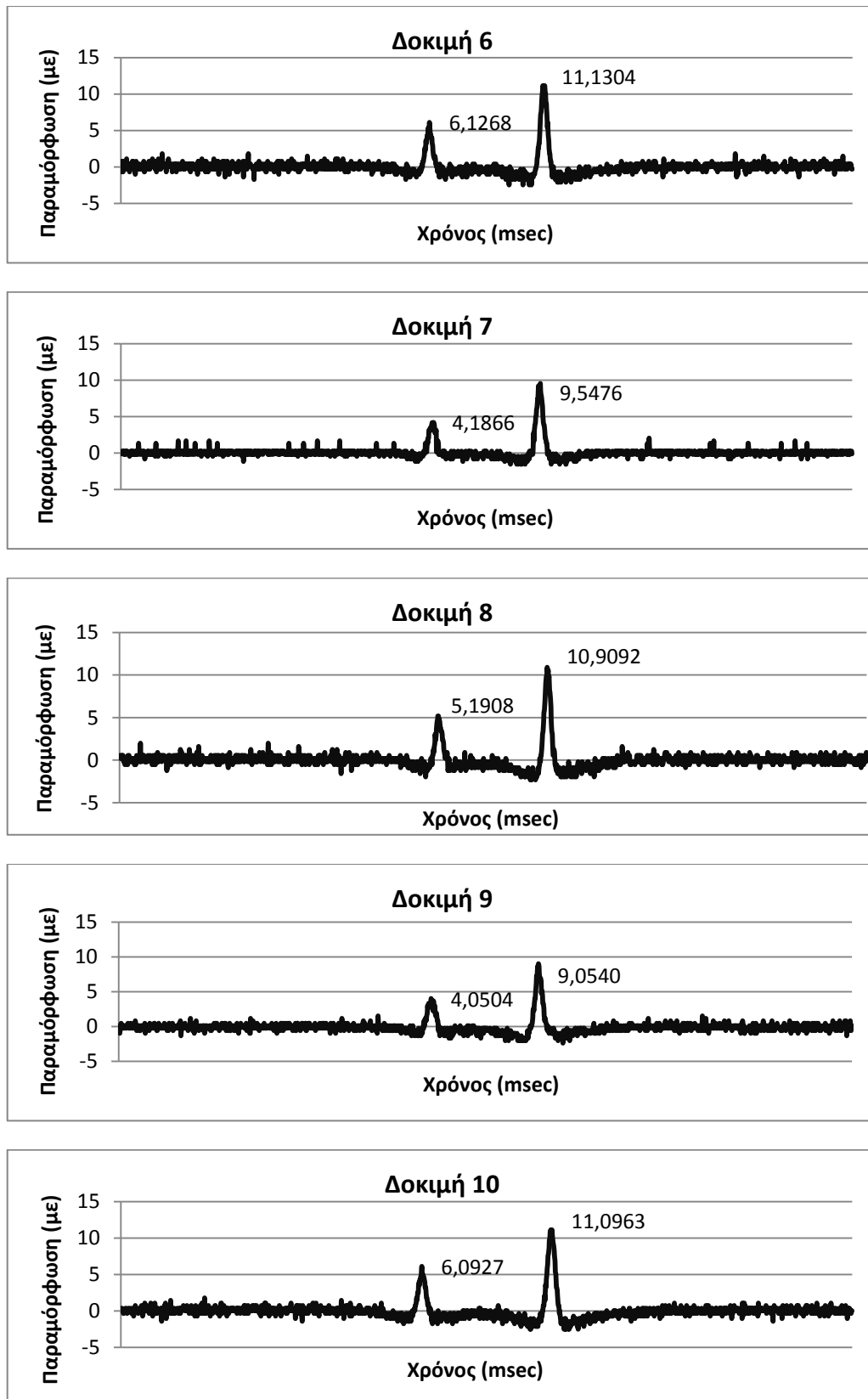
Εικόνα Π5.1 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB
(δοκιμές 1-5)



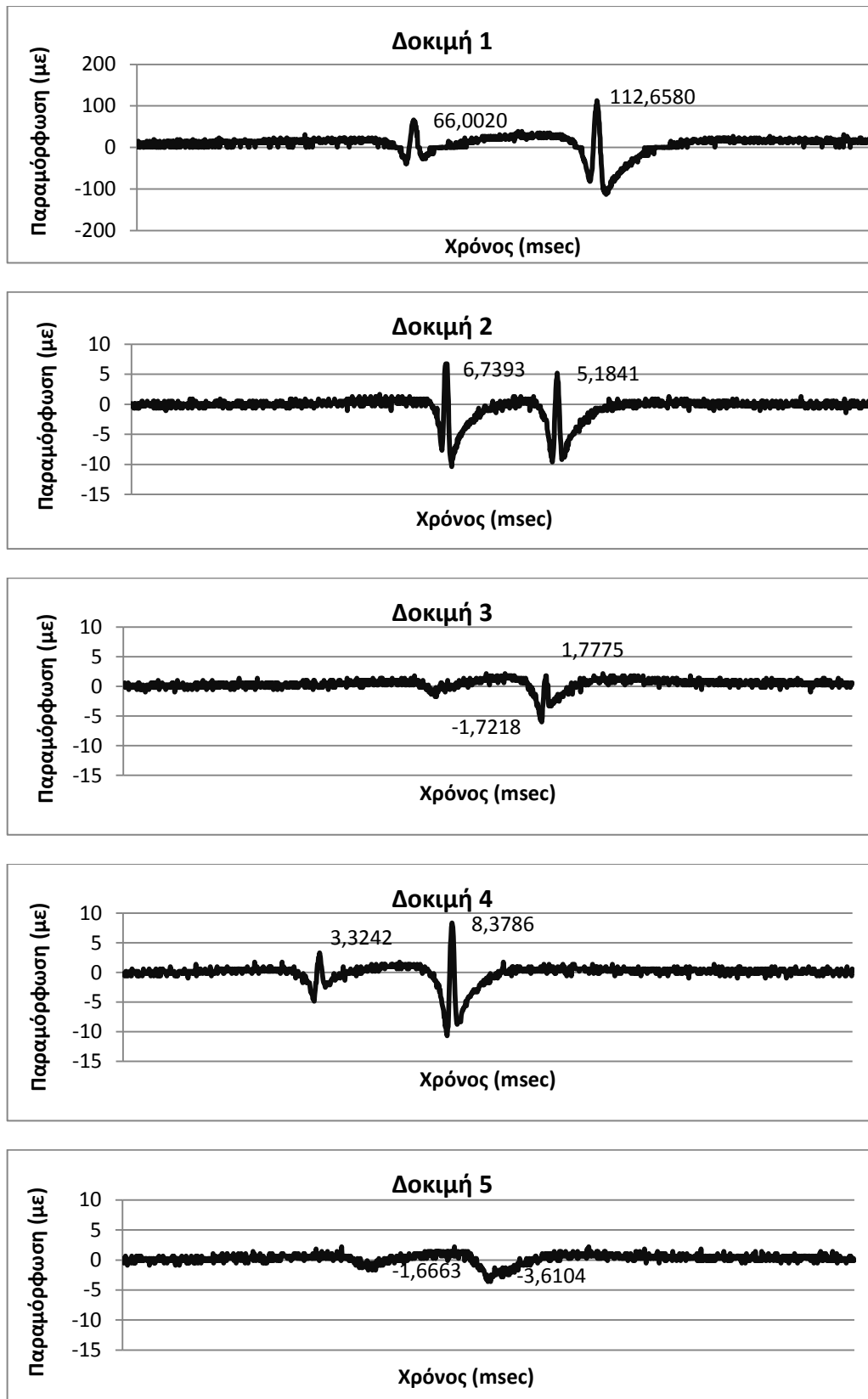
Εικόνα Π5.2 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-10)



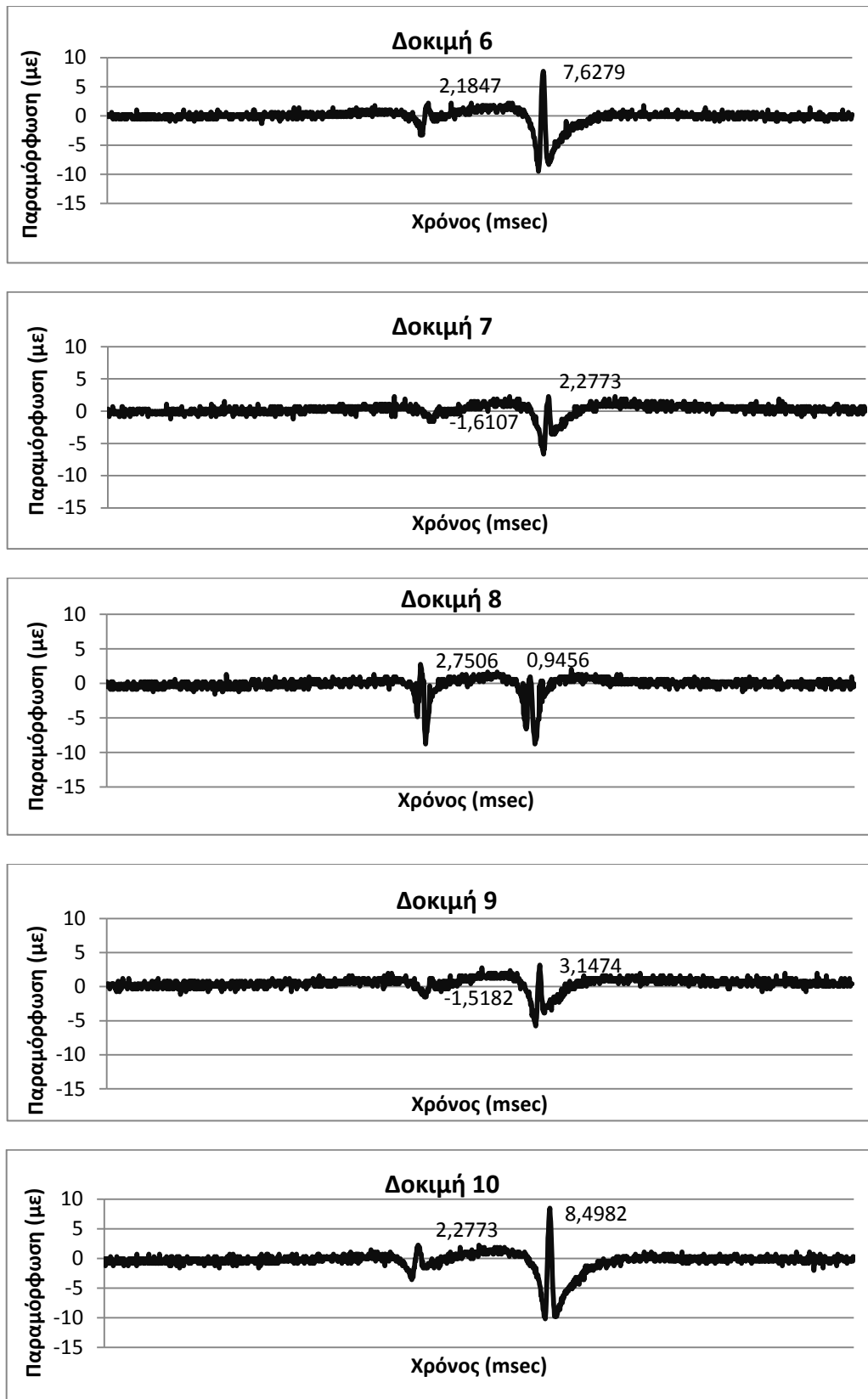
*Εικόνα Π5.3 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB
(δοκιμές 1-5)*



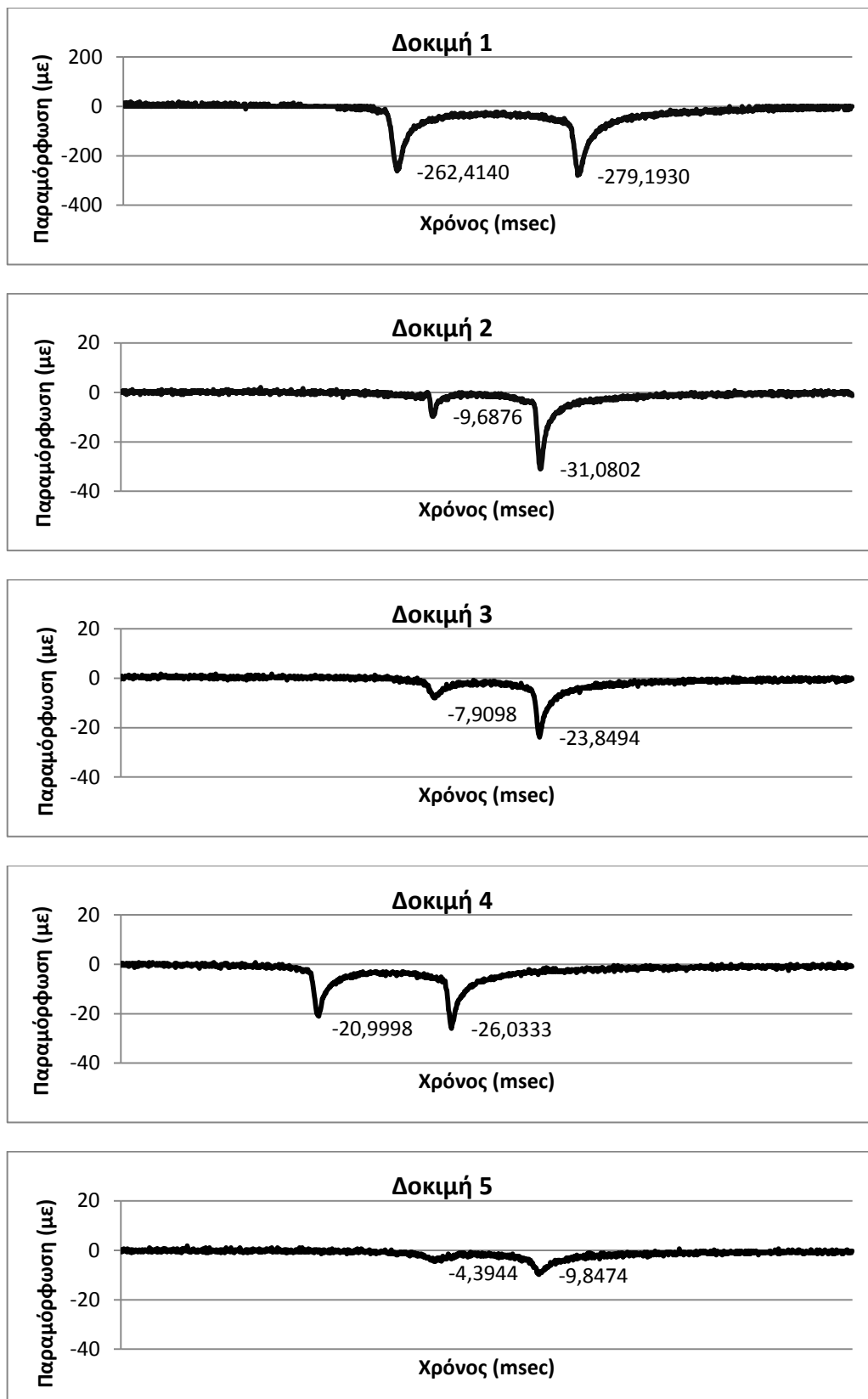
Εικόνα Π5.4 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-10)



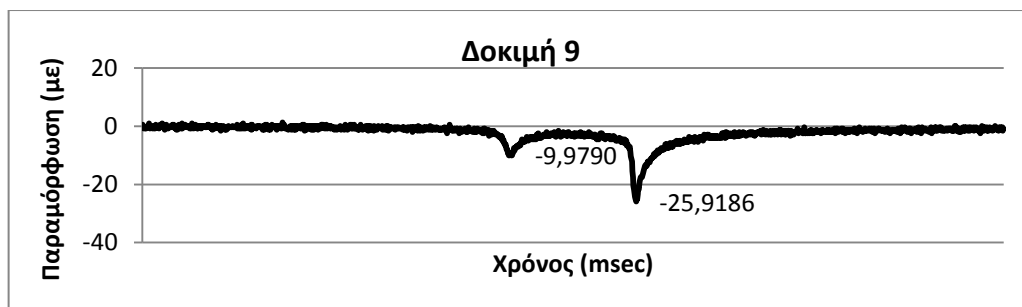
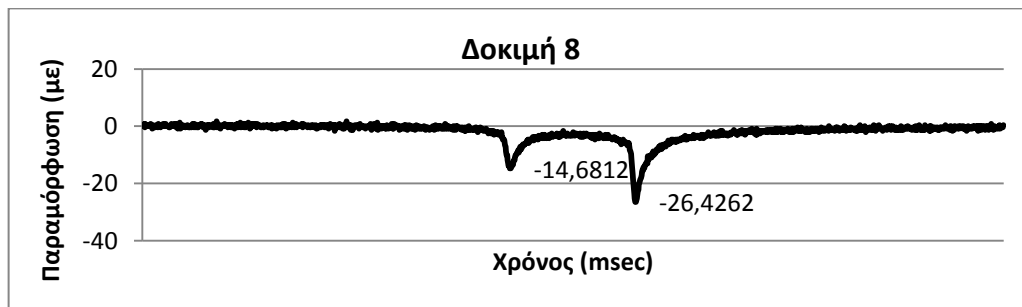
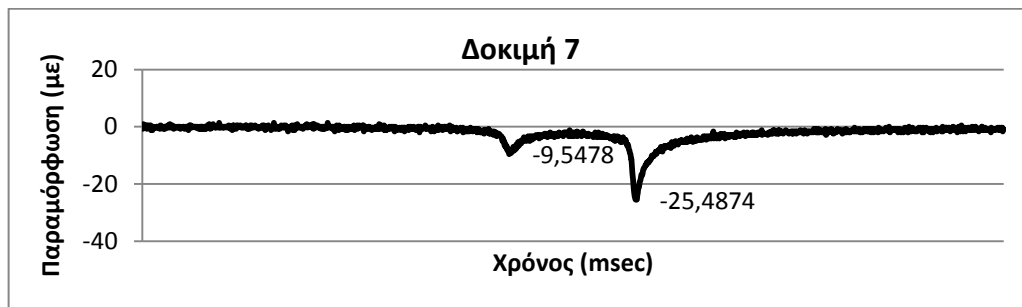
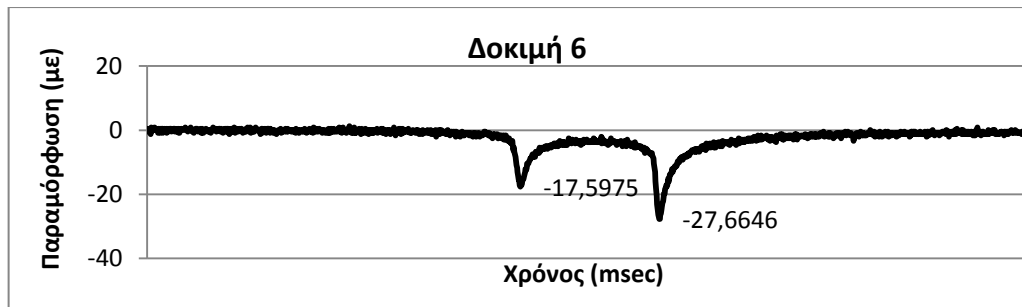
*Εικόνα Π5.5 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT
(δοκιμές 1-5)*



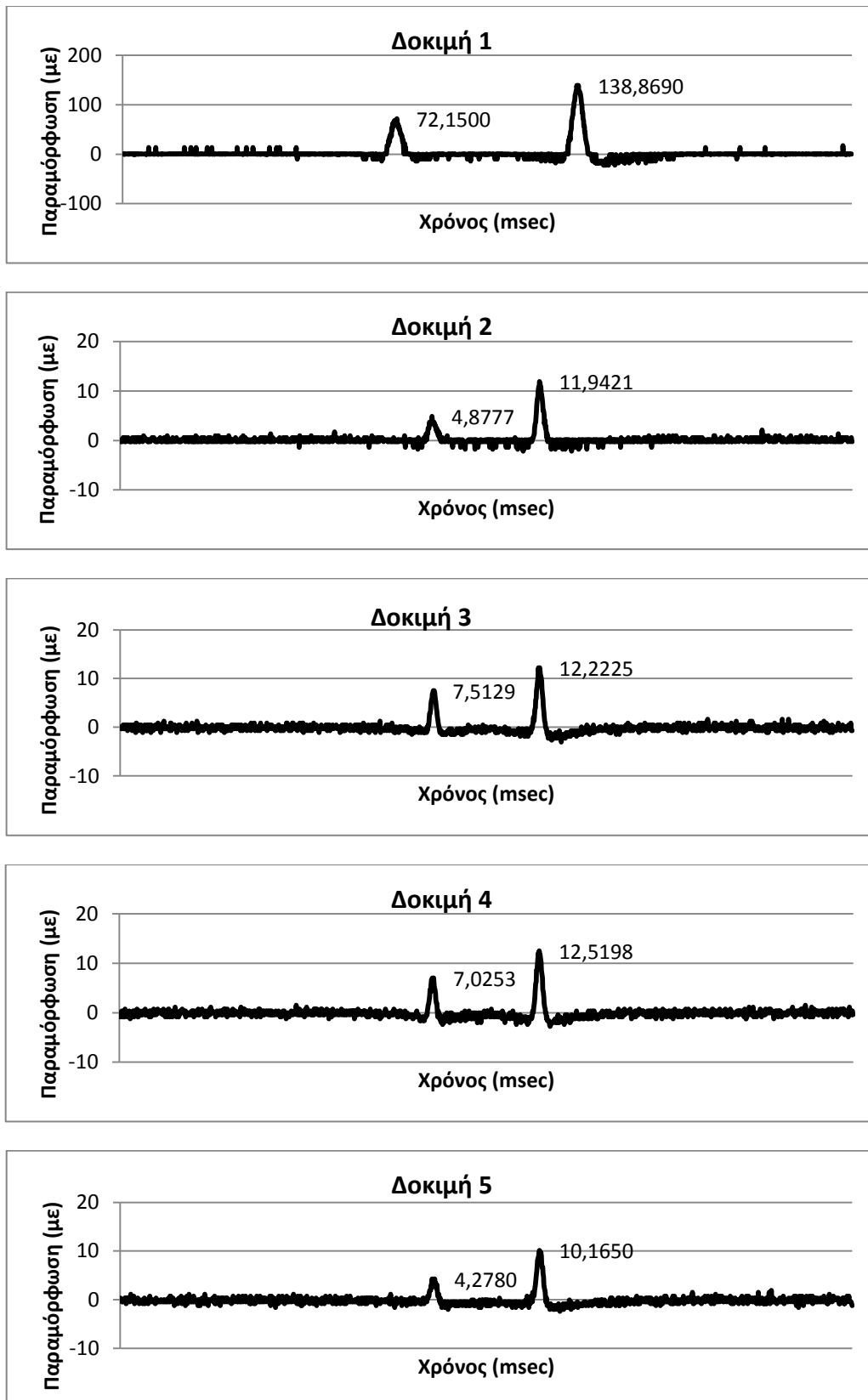
Εικόνα Π5.6 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 6-10)



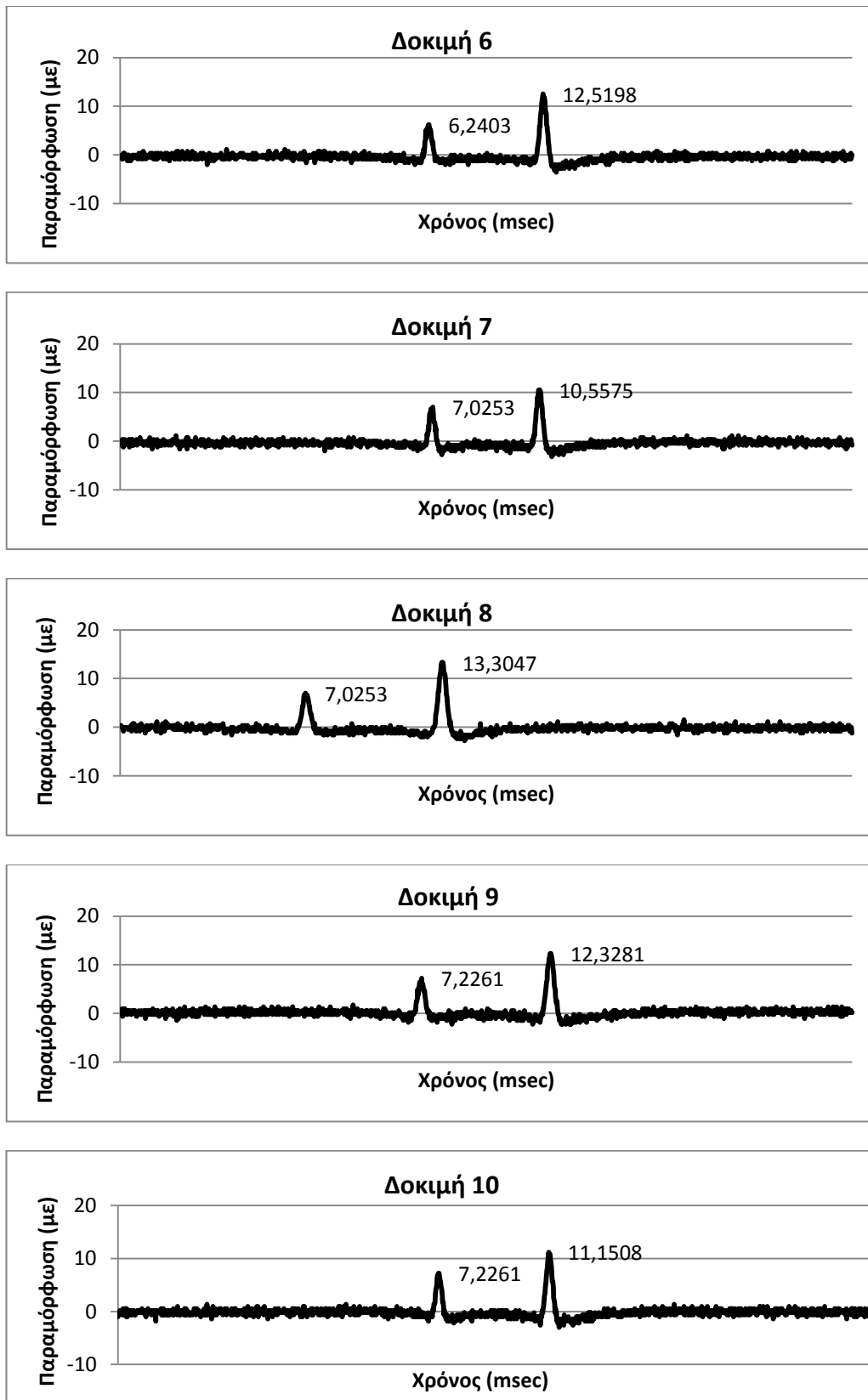
*Εικόνα Π5.7 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT
(δοκιμές 1-5)*



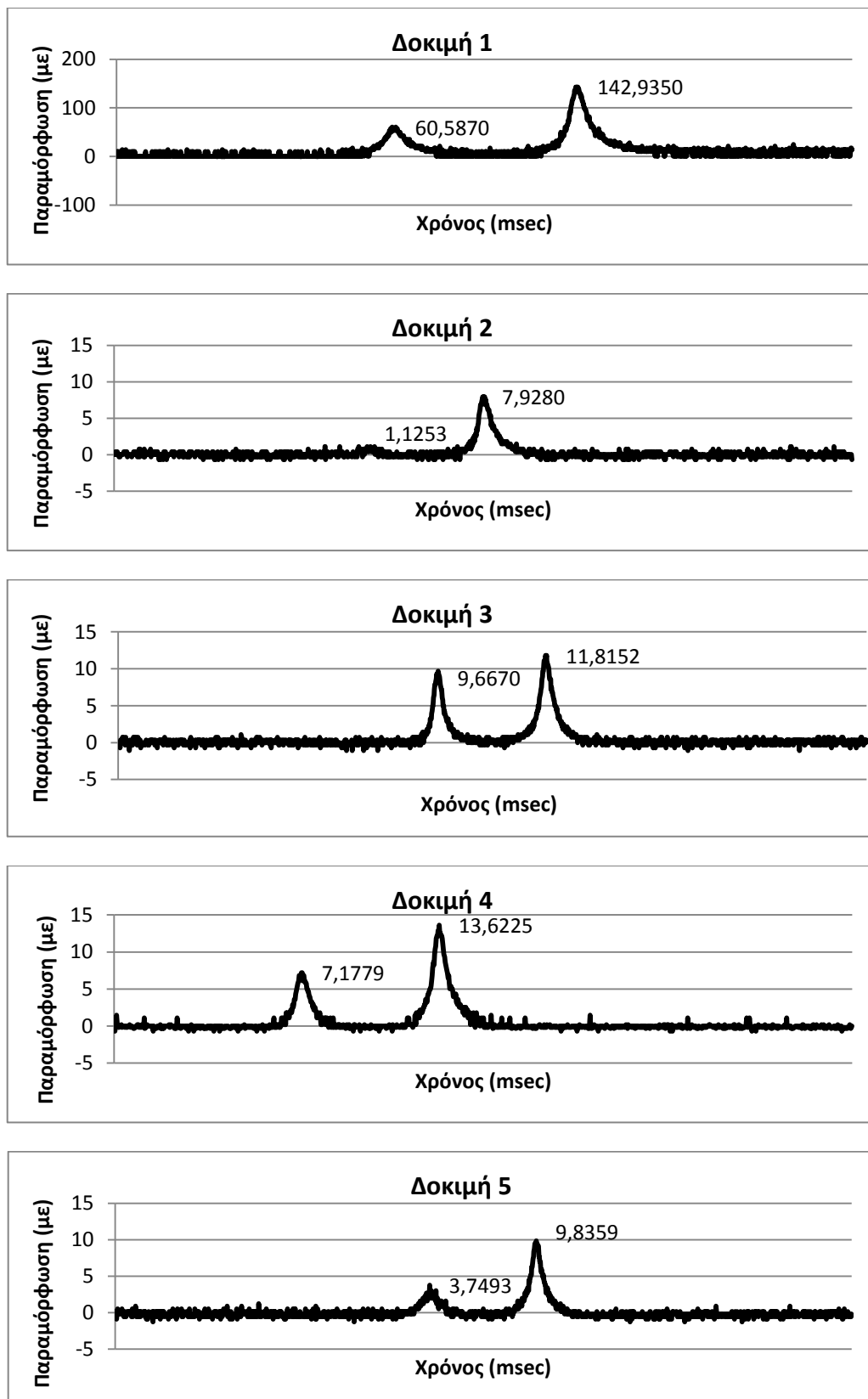
Εικόνα Π5.8 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB
(δοκιμές 6-10)



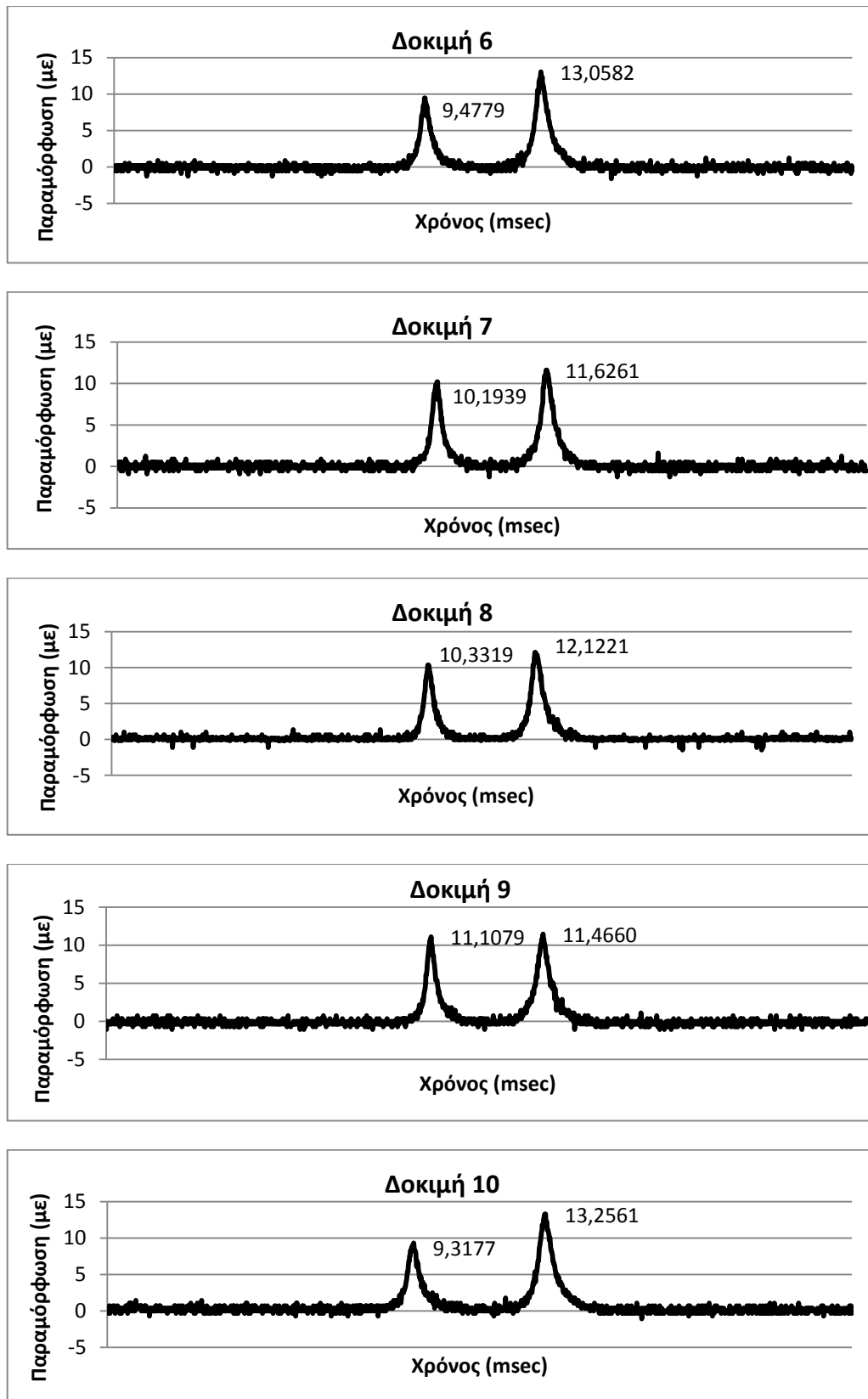
Εικόνα Π5.9 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 1-5)



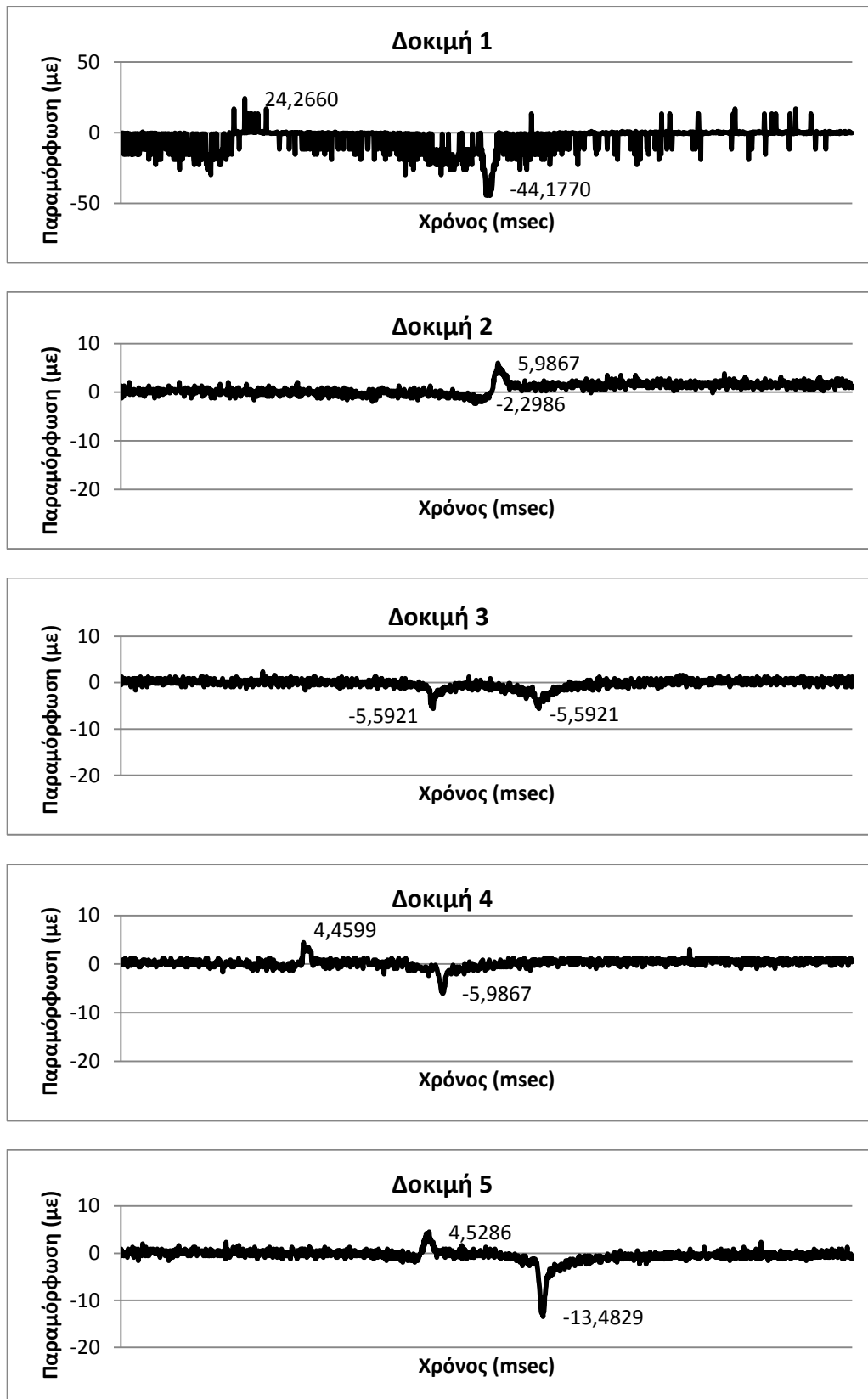
Εικόνα Π5.10 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 6-10)



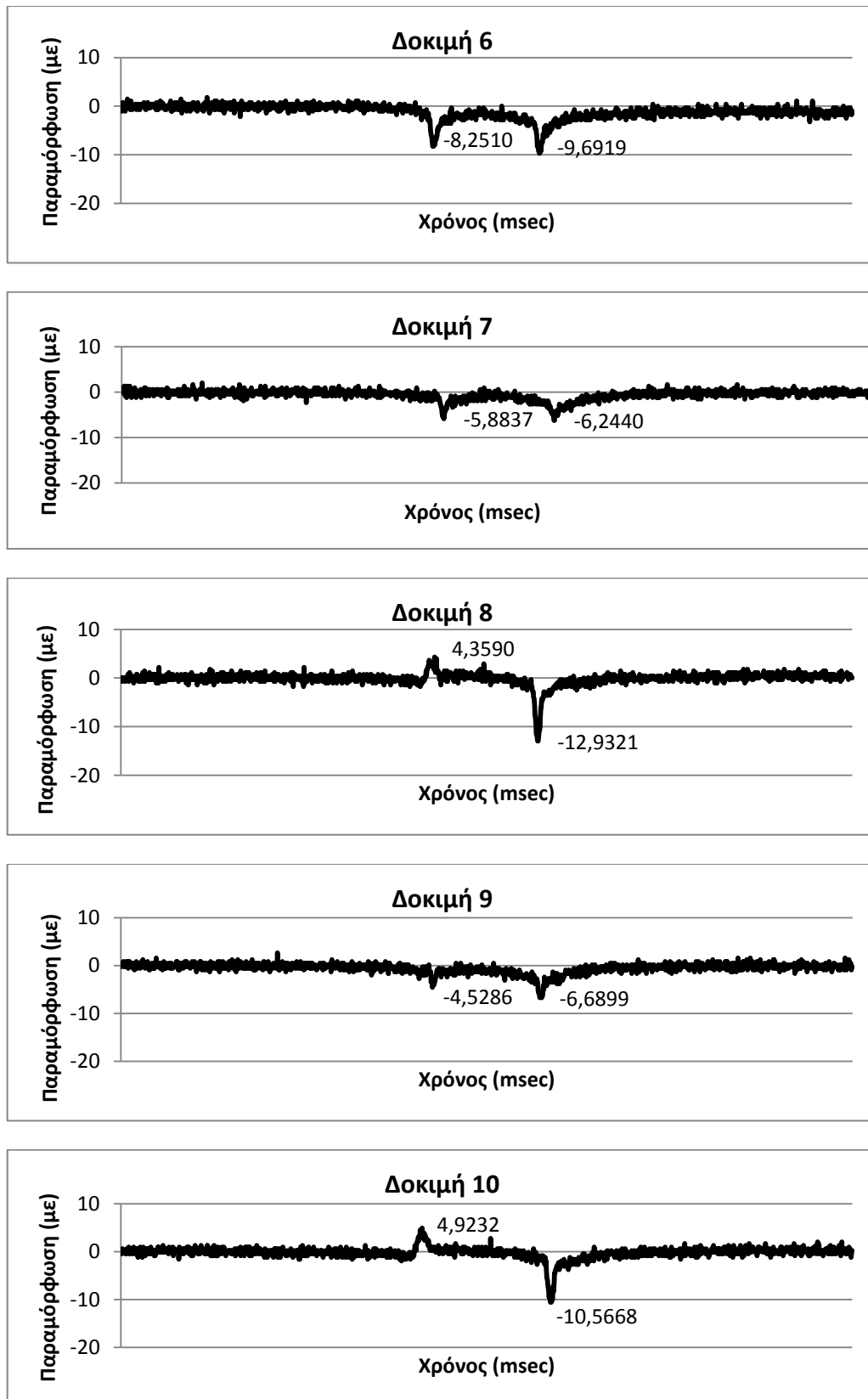
Εικόνα Π5.11 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 1-5)



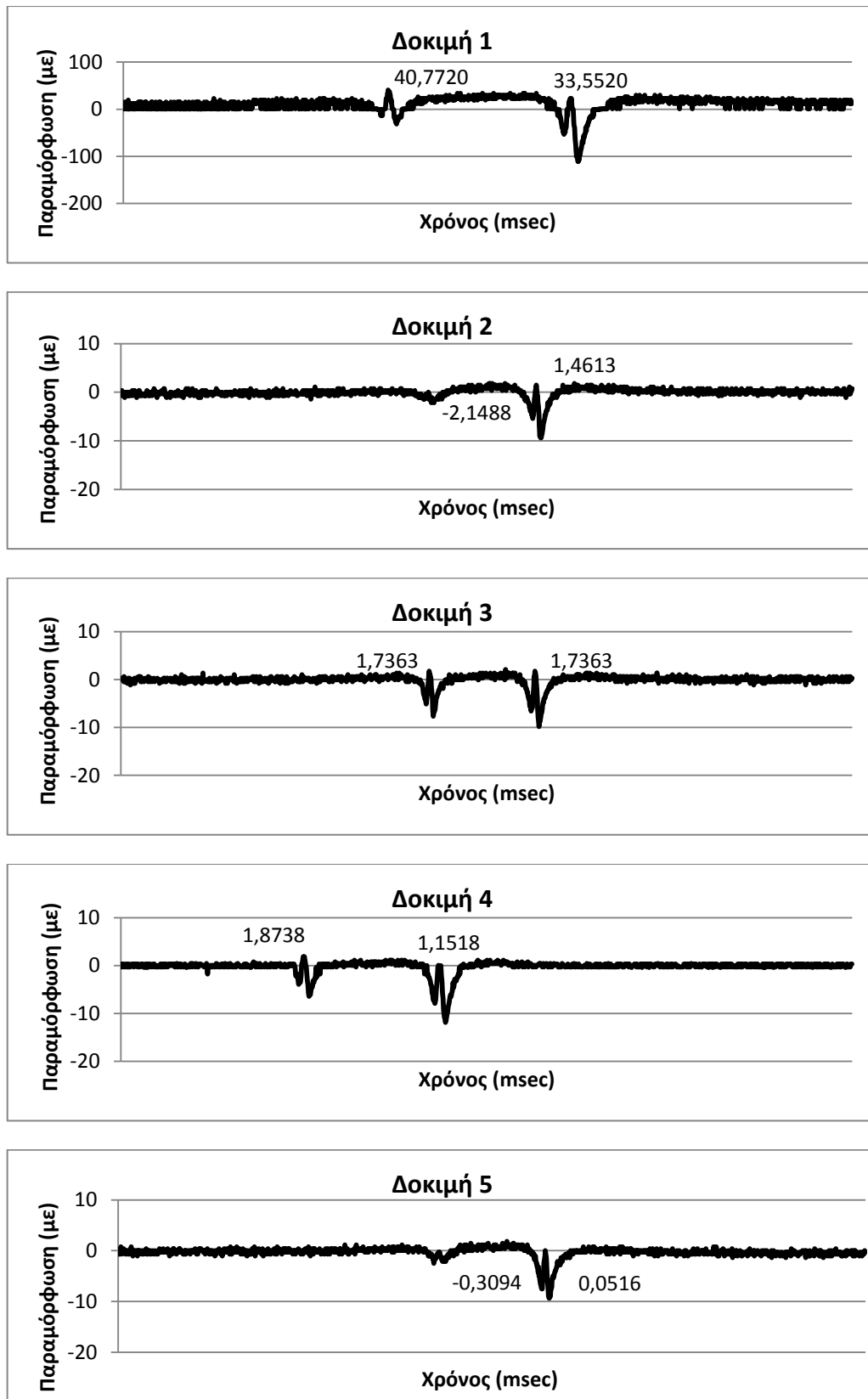
Εικόνα Π5.12 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 6-10)



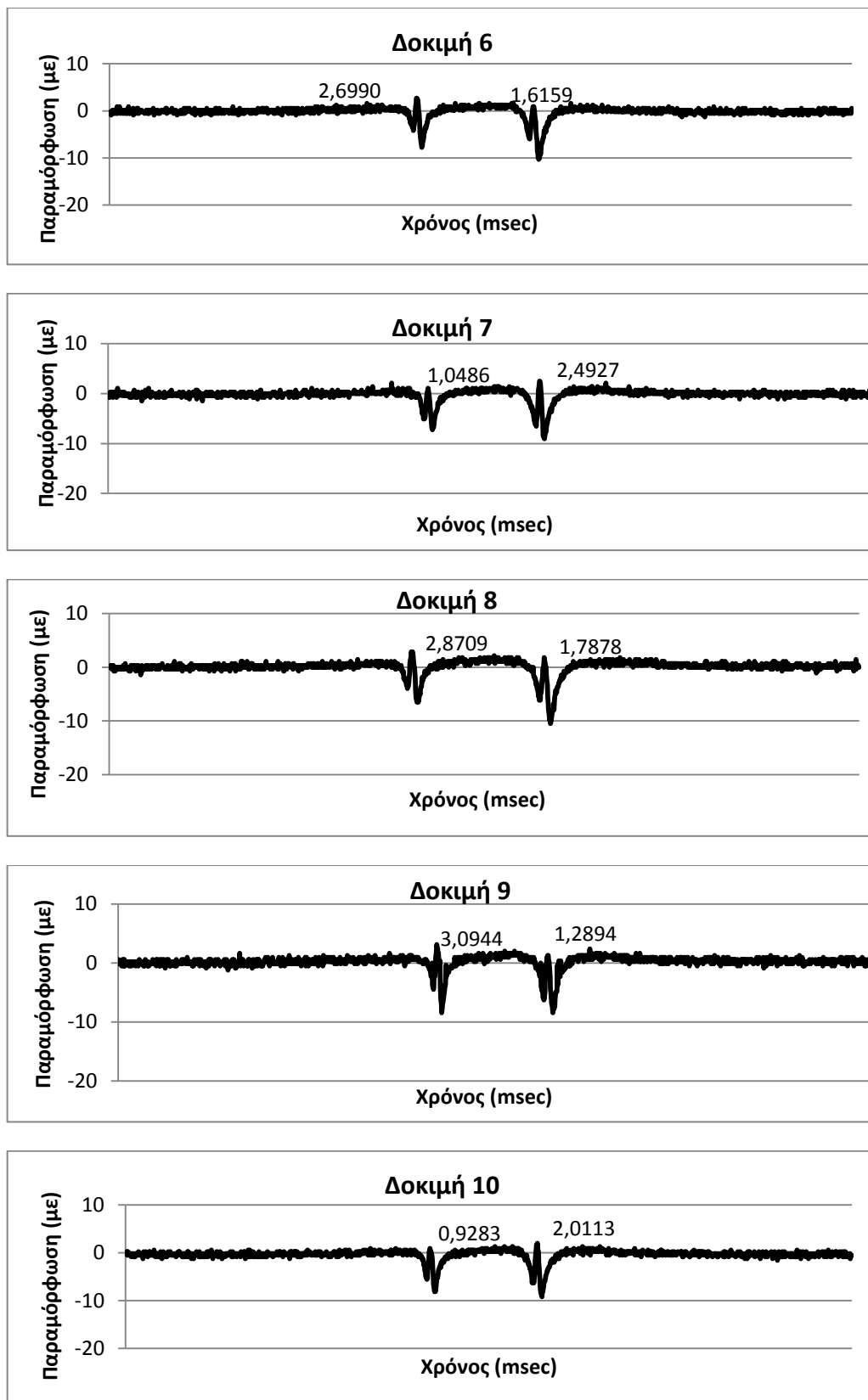
Εικόνα Π5.13 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 1-5)



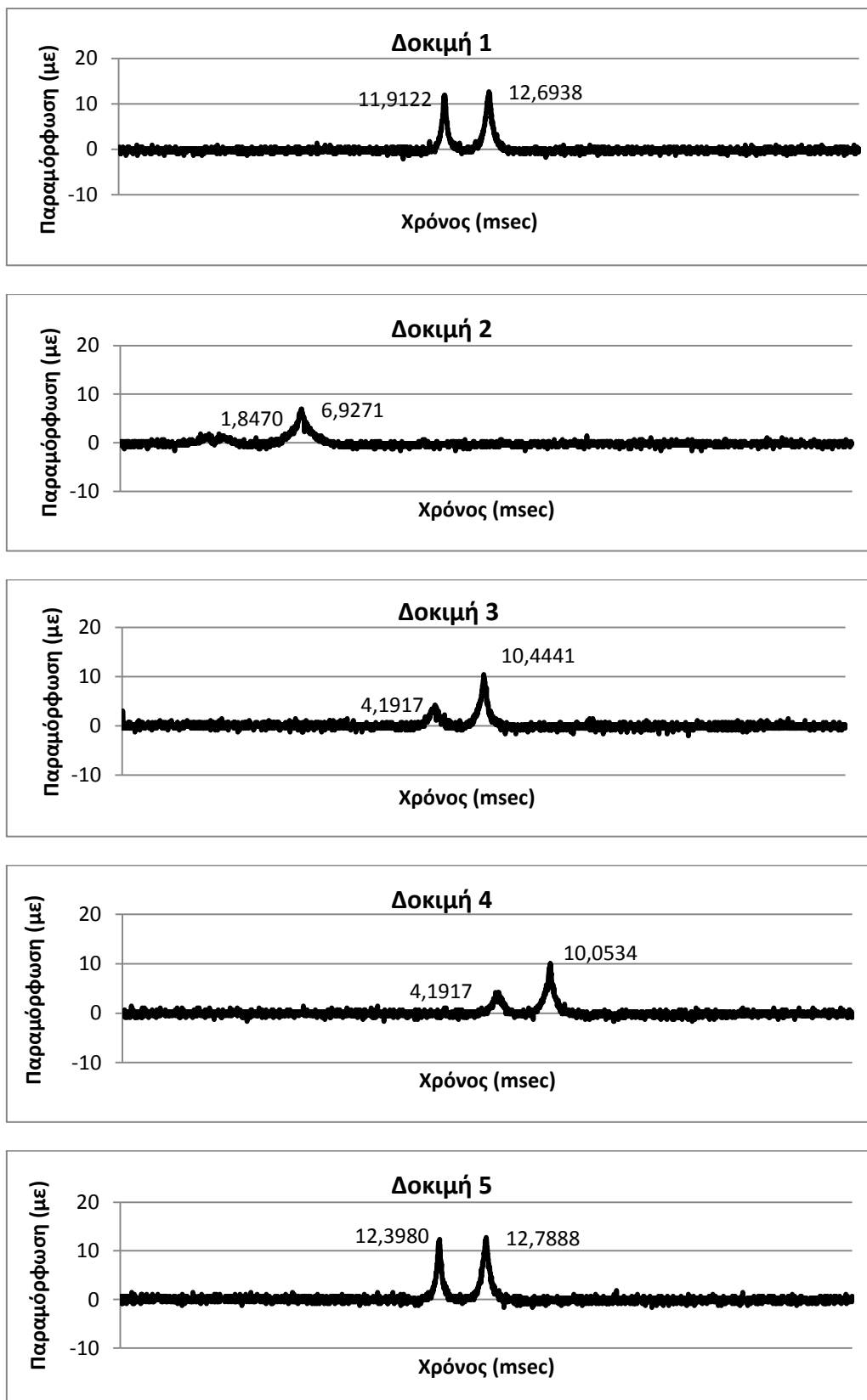
Εικόνα Π5.14 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 6-10)



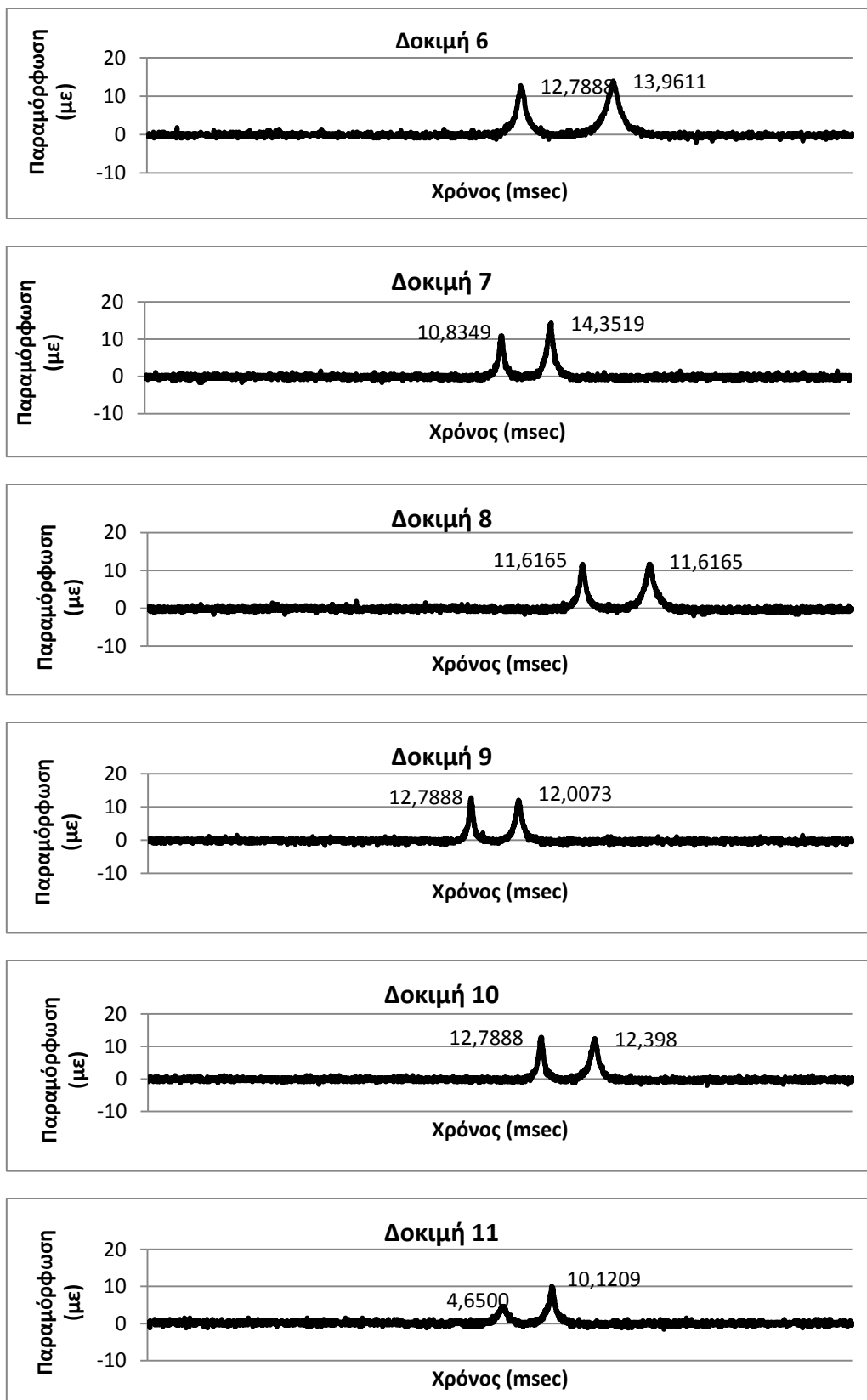
Εικόνα Π5.15 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 1-5)



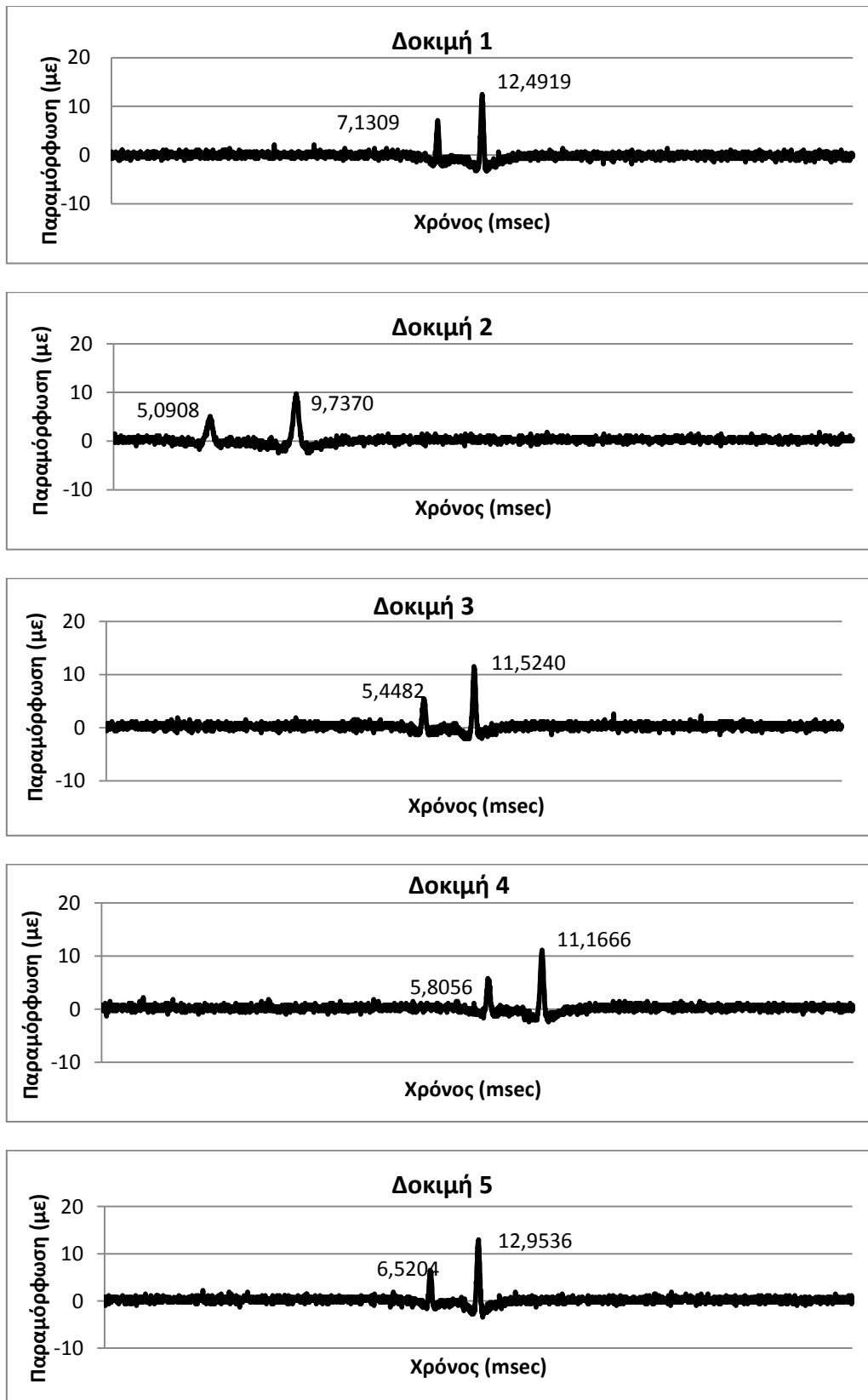
Εικόνα Π5.16 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 6-10)

2^Η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 2Κ

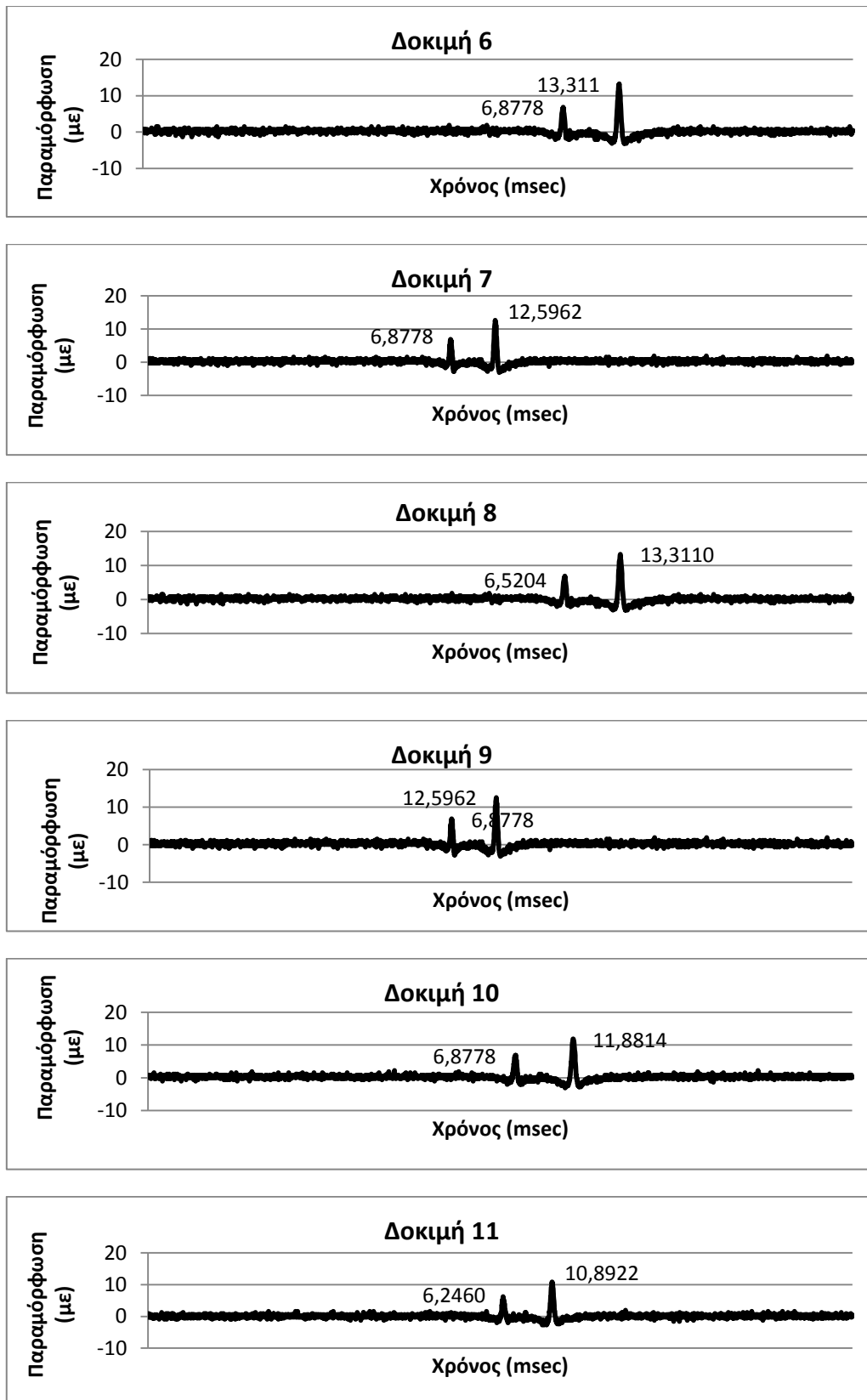
Εικόνα Π5.17 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 1-5)



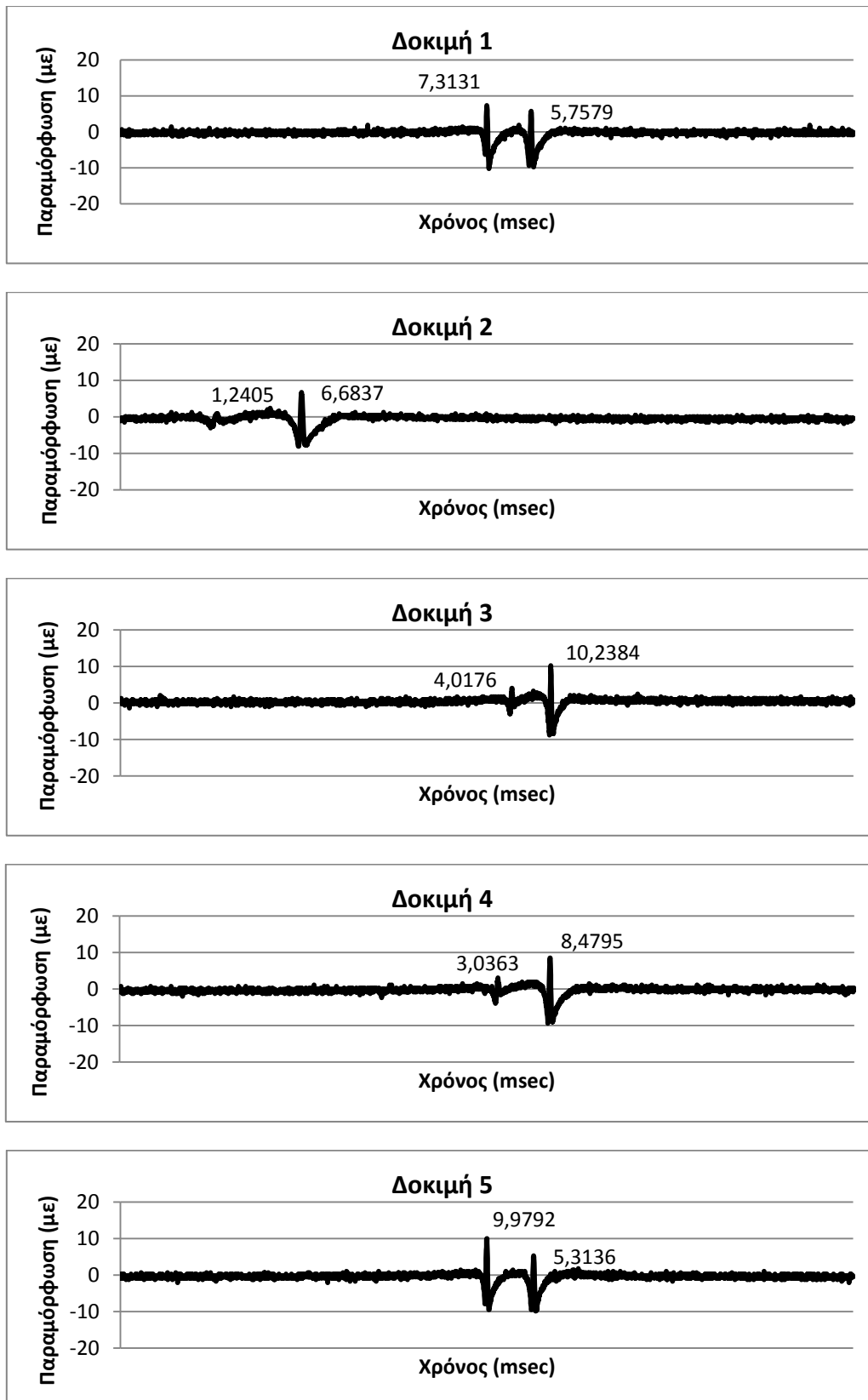
Εικόνα Π5.18 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TB (δοκιμές 6-11)



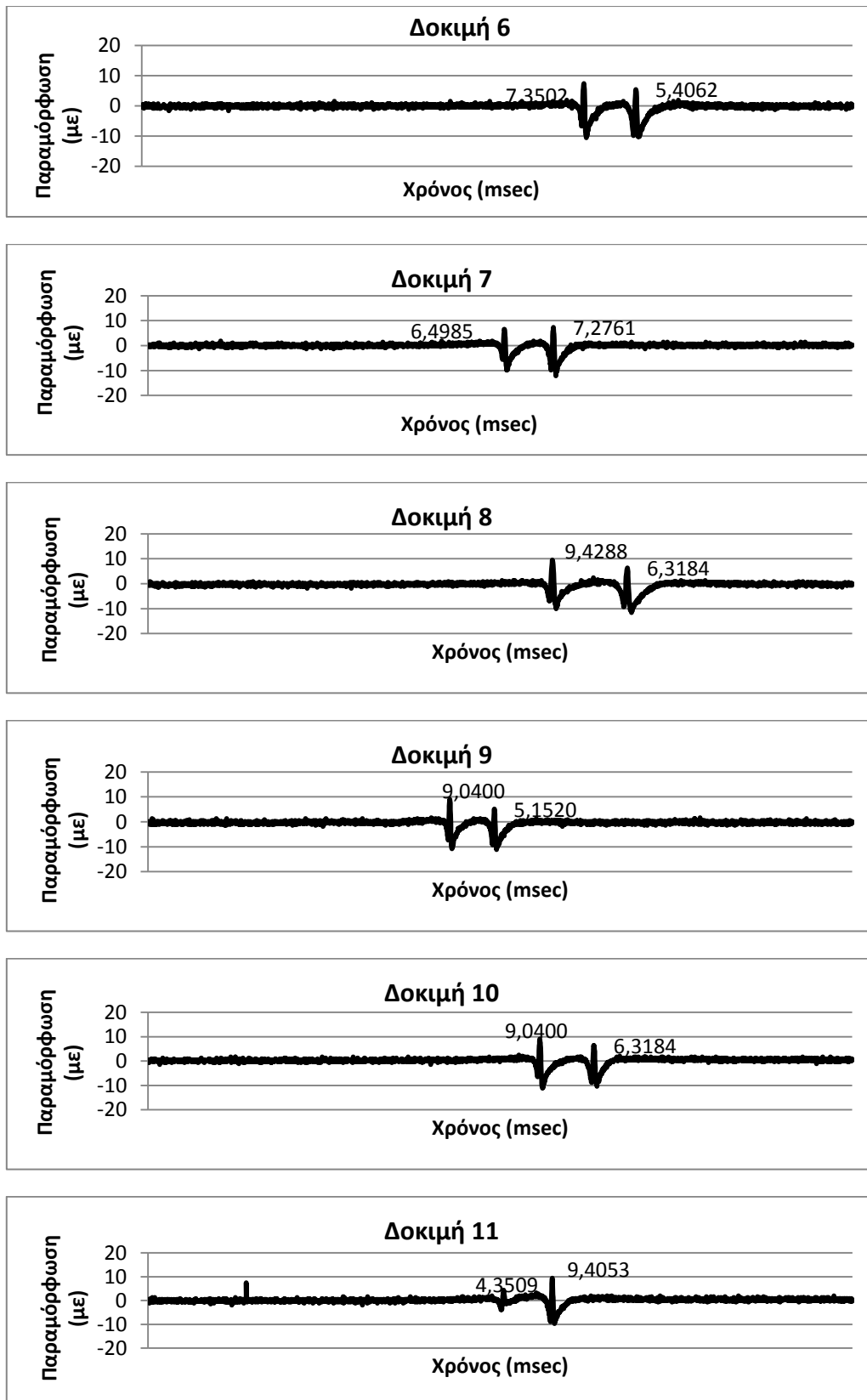
Εικόνα Π5.19 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LB (δοκιμές 1-5)



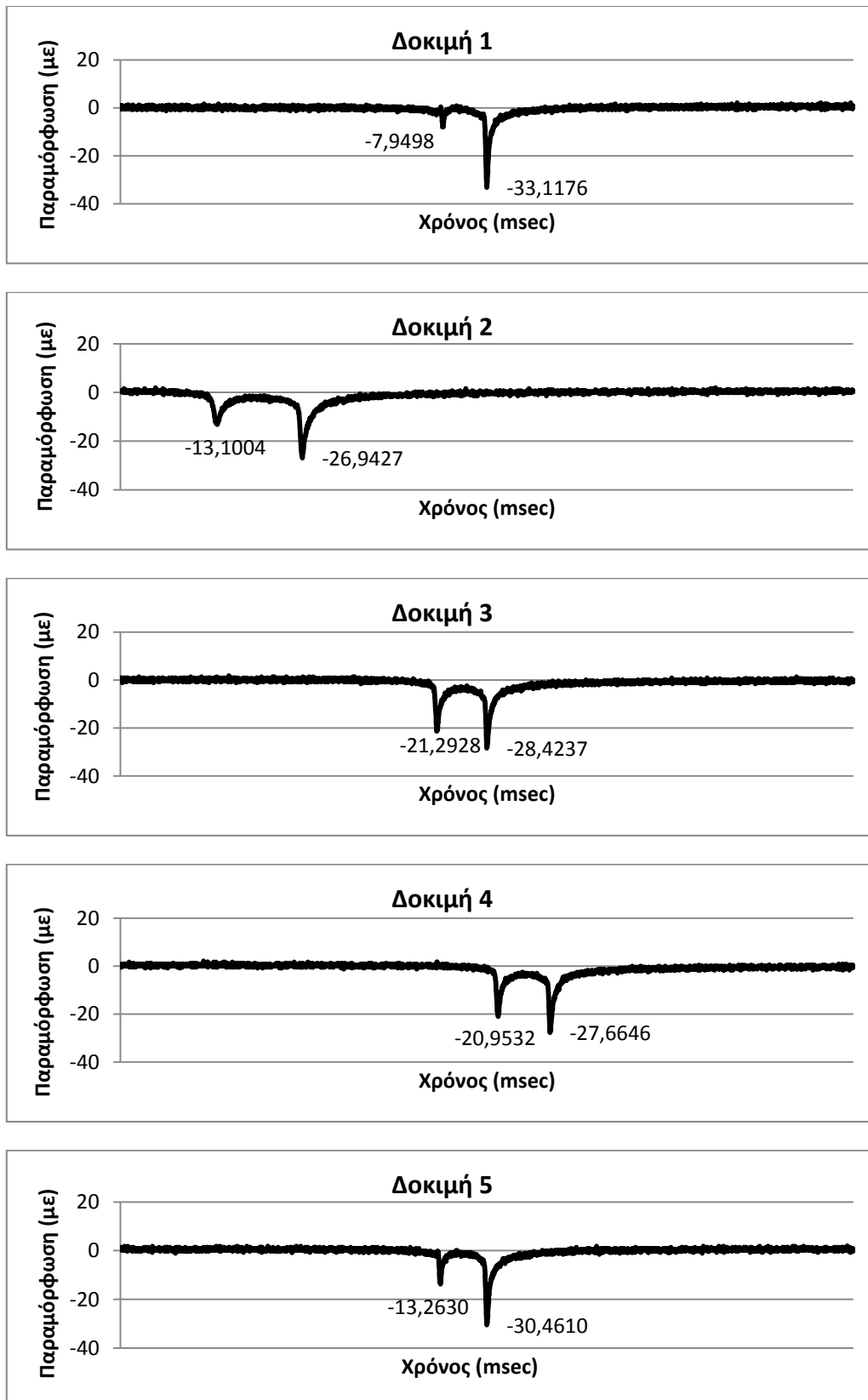
Εικόνα Π5.20 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LB (δοκιμές 6-11)



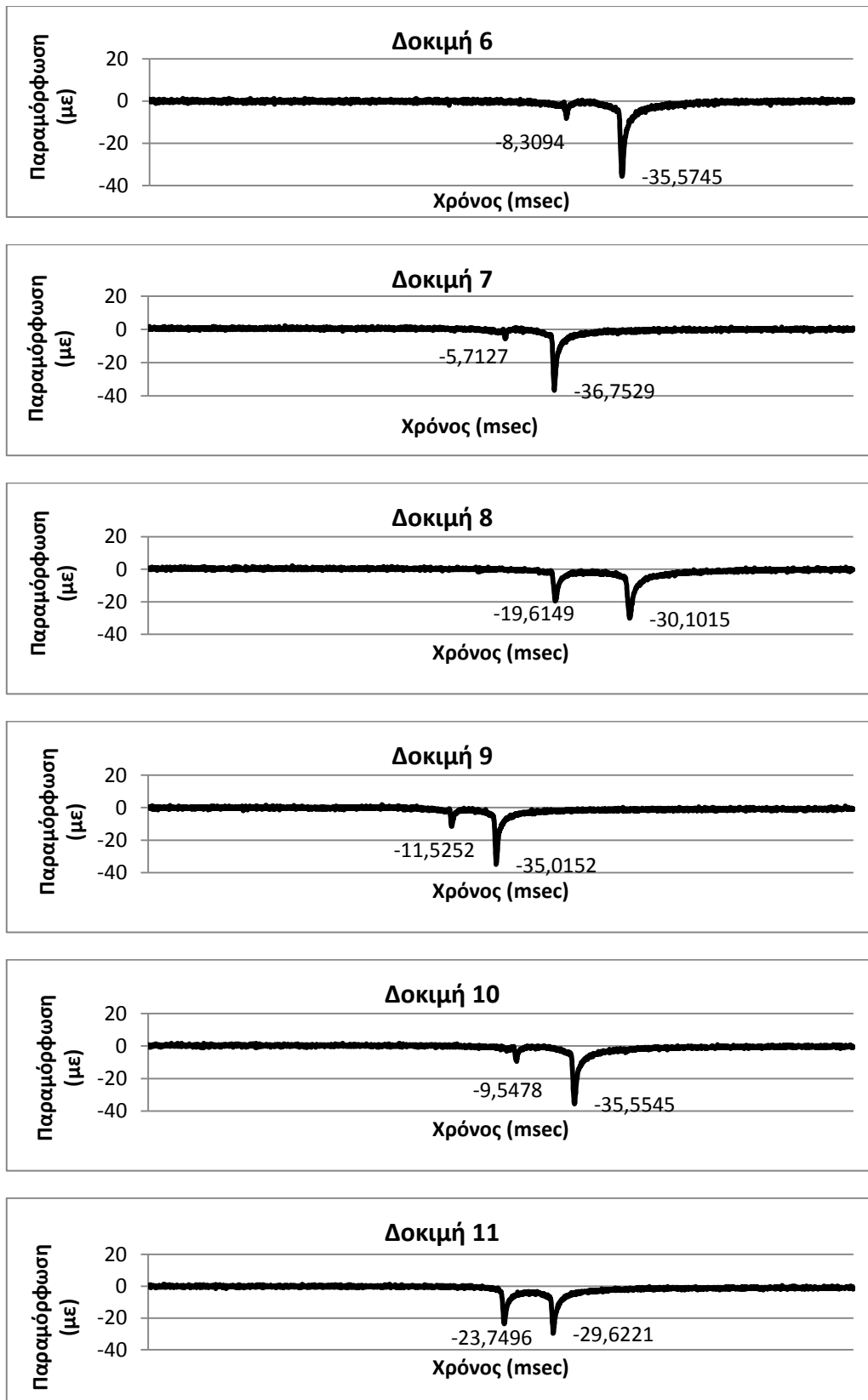
Εικόνα Π5.21 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 1-5)



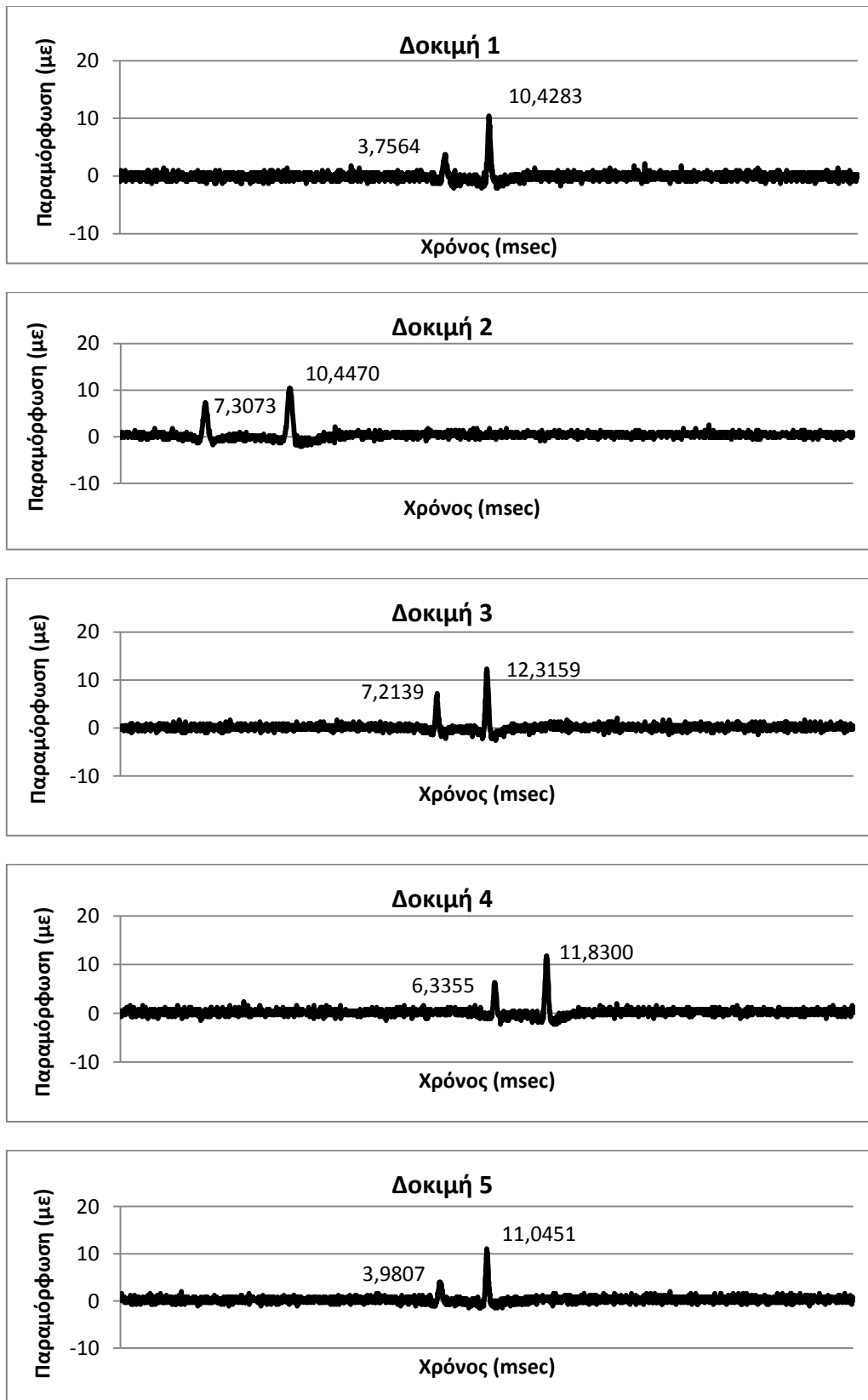
Εικόνα Π5.22 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST LT (δοκιμές 6-11)



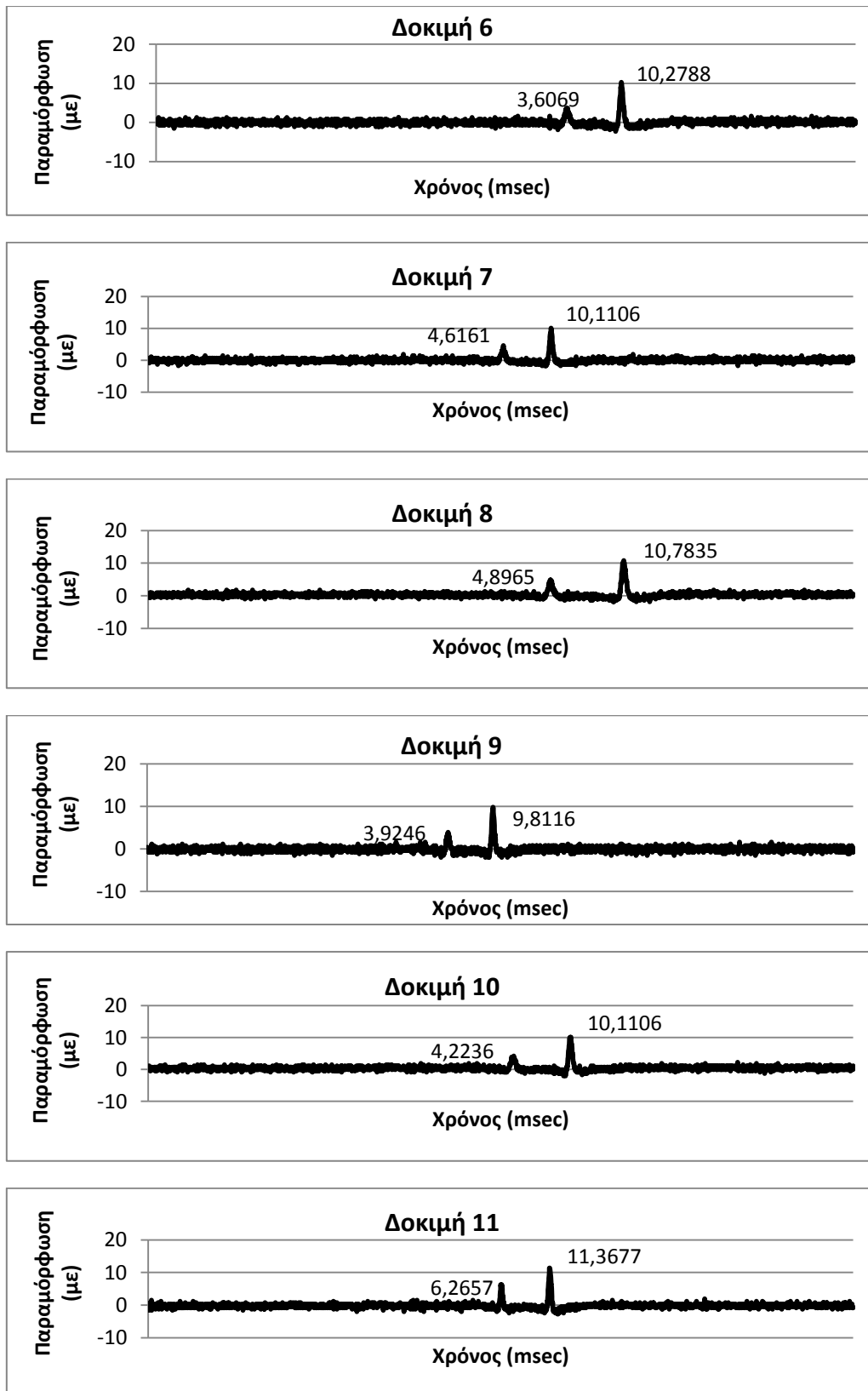
Εικόνα Π5.23 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT (δοκιμές 1-5)



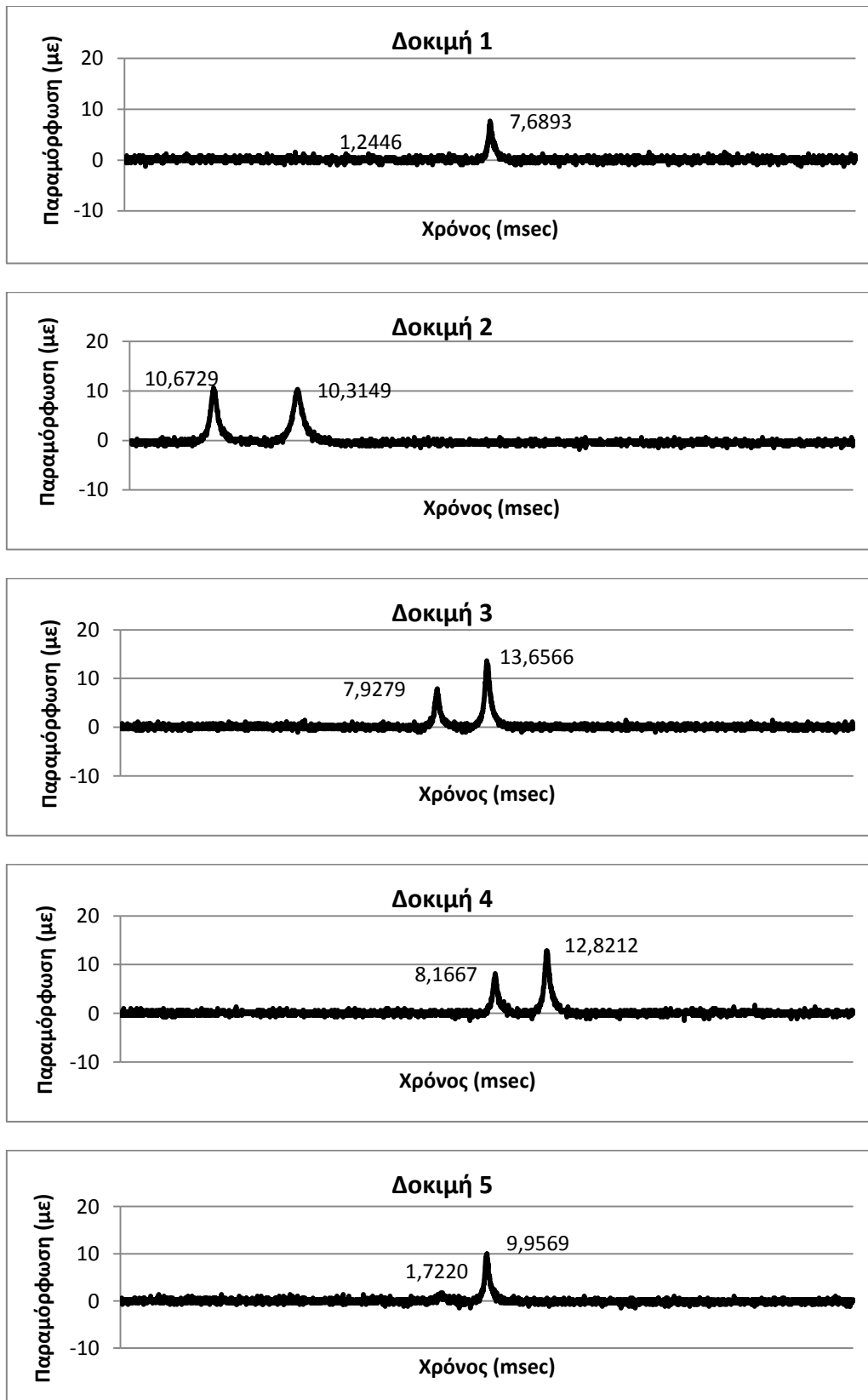
Εικόνα Π5.24 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα EAST TT (δοκιμές 6-11)



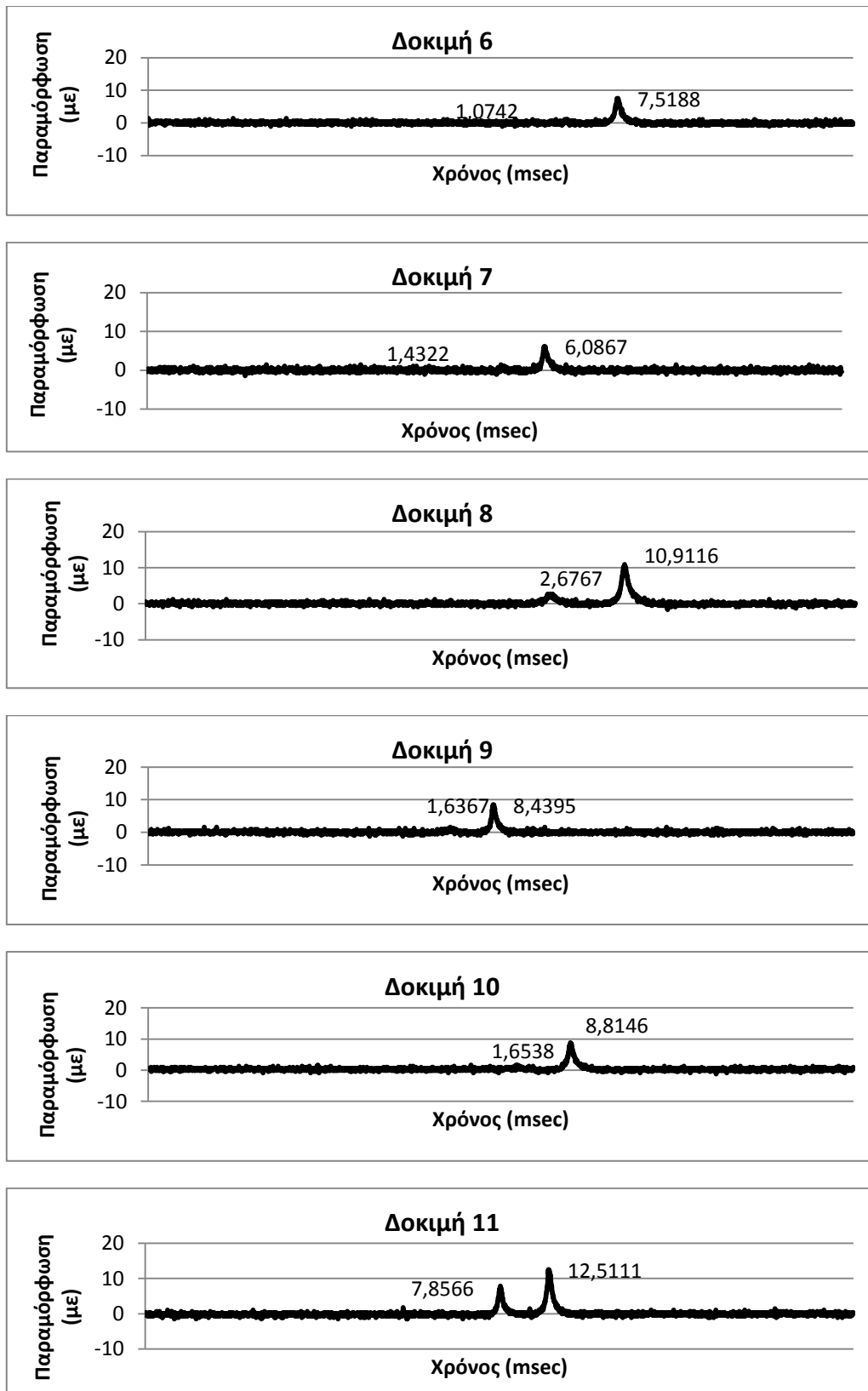
Εικόνα Π5.25 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 1-5)



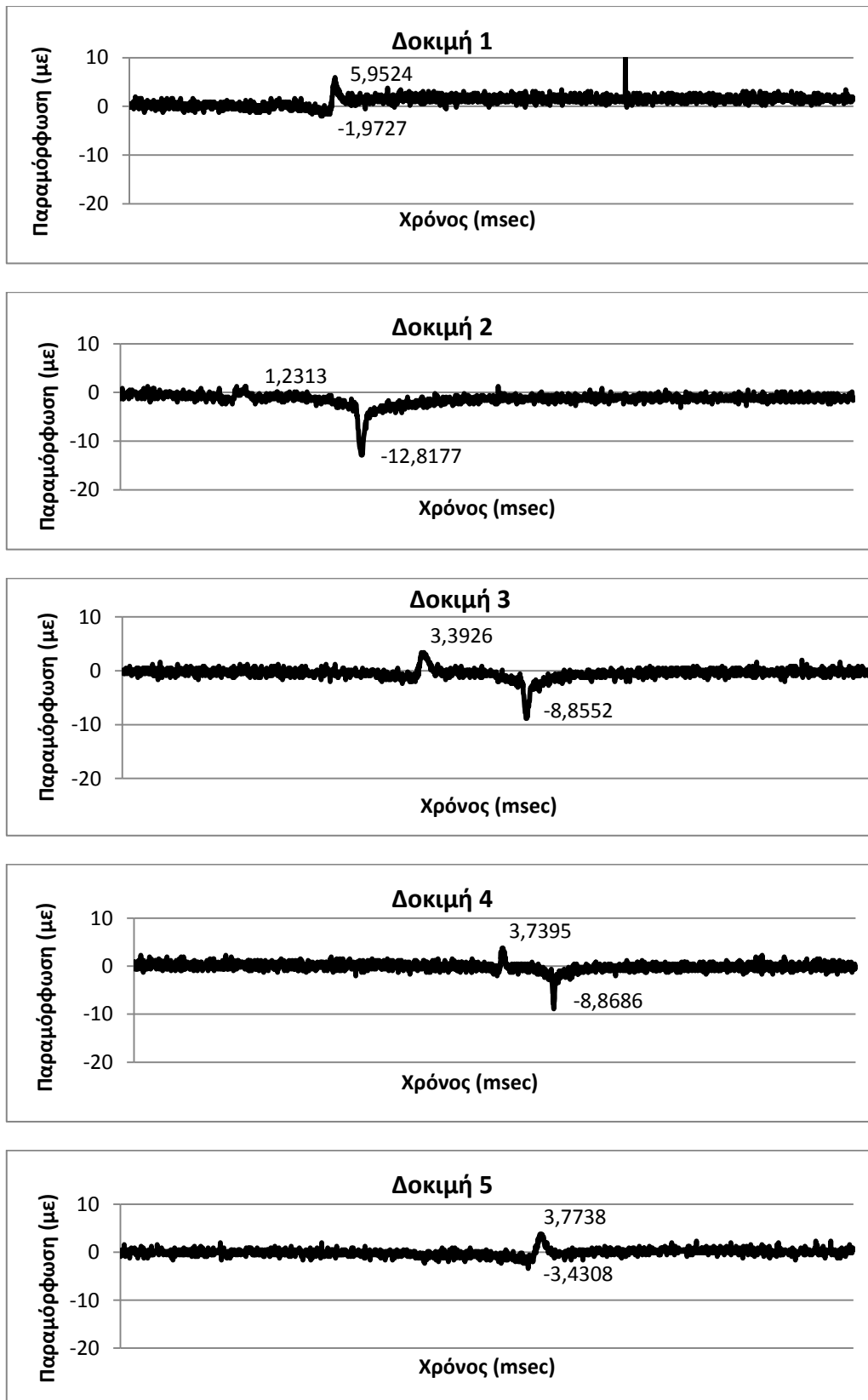
Εικόνα Π5.26 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LB (δοκιμές 6-11)



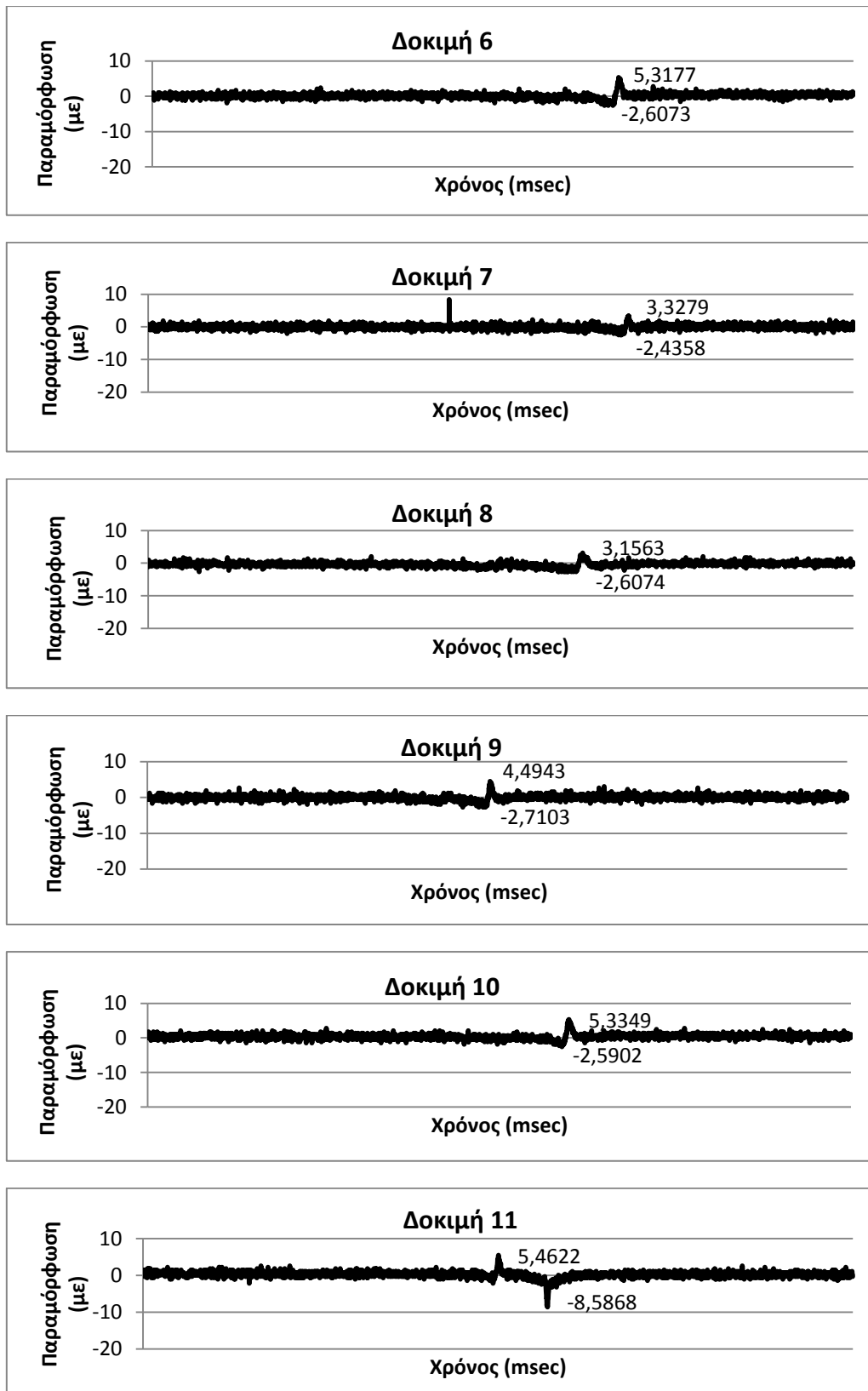
Εικόνα Π5.27 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 1-5)



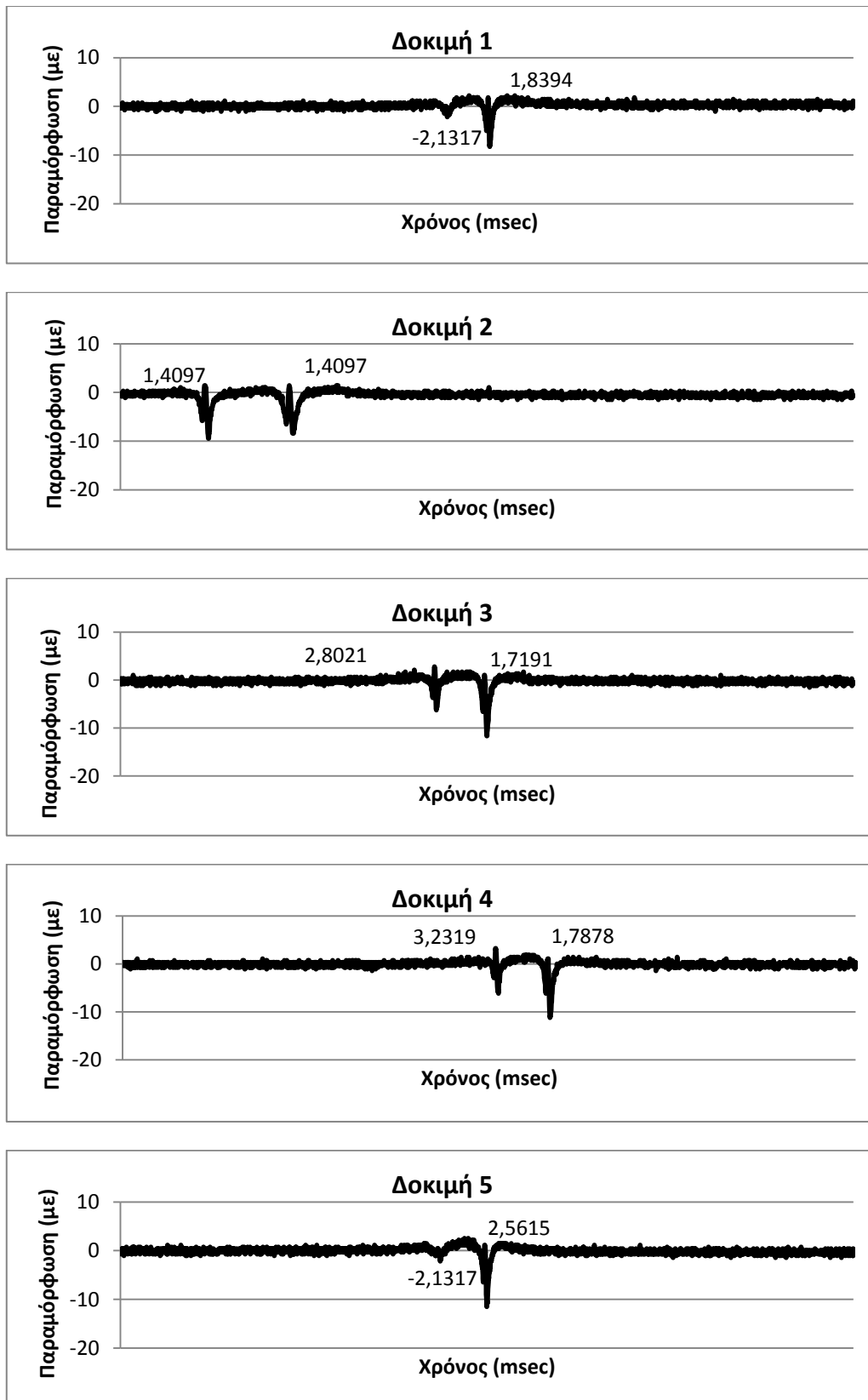
Εικόνα Π5.28 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TB (δοκιμές 6-11)



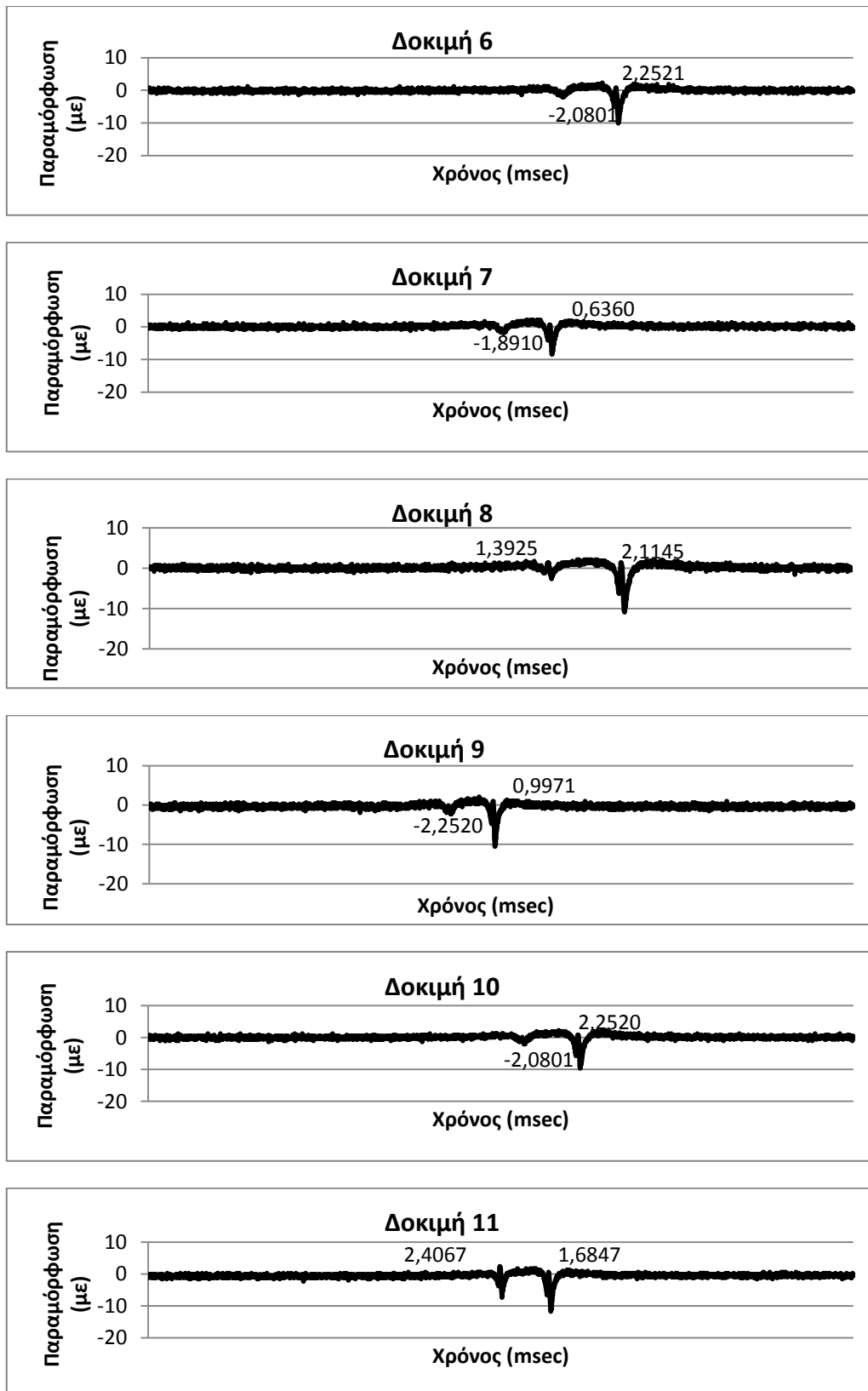
Εικόνα Π5.29 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 1-5)



Εικόνα Π5.30 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST TT (δοκιμές 6-11)



Εικόνα Π5.31 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 1-5)



Εικόνα Π5.32 Διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου αισθητήρα WEST LT (δοκιμές 6-11)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:*Πίνακας Π6.1 Αναλυτικές παραμορφώσεις σειράς δοκιμών 1Κ*

Δοκιμή	EAST TT		EAST LT		EAST TB		EAST LB		WEST TT		WEST LT		WEST TB		WEST LB	
	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν
1Κ1	23,4	-17,7	23,4	23,9	8,339	10,77	8,338	16,43	-2,038	9,568	-2,088	14,28	-0,3032	7,954	2,558	12,65
1Κ2	7,878	1,649	18,38	26,06	6,728	10,9	7,778	16,21	-1,176	-12,51	-2,002	5,044	-0,5513	4,346	2,043	10,53
1Κ3	-10,75	16,67	7,012	24,35	3,492	9,337	6,452	14,48	-6,632	-18,75	-0,9263	13,47	0,6821	9,191	4,354	14,56
1Κ4	7,878	1,649	18,38	26,06	6,728	10,9	7,778	16,21	-1,176	-12,51	-2,002	5,044	-0,5513	4,346	2,043	10,53
1Κ5	-4,416	-13,5	-0,3891	2,855	-0,1491	1,84	3,844	9,791	3,752	11,6	12,53	16,03	5,95	9,19	6,975	13,6
1Κ6	10,87	10,4	19,38	26,74	7,008	10,91	7,879	16	-3,379	9,448	-1,965	16,23	-0,2918	9,438	3,212	13,94
1Κ7	-10,75	16,67	7,012	24,35	3,492	9,337	6,452	14,48	-6,632	-18,75	-0,9263	13,47	0,6821	9,191	4,354	14,56
1Κ8	7,878	12,56	18,38	26,83	6,728	10,88	7,778	15,91	-3,583	8,23	-1,928	16,21	-0,2462	9,473	3,299	14,04
1Κ9	0,1913	16,41	15,5	26,8	5,96	10,73	7,493	15,64	-4,16	3,81	-1,799	15,94	-0,1025	9,475	3,531	14,24
1Κ10	-10,77	14,47	5,77	23,32	3,034	8,88	6,23	14,18	-7,286	-21,63	-0,6088	13,09	0,9211	9,156	4,541	14,58

Πίνακας Π6.2 Αναλυτικές παραμορφώσεις σειράς δοκιμών 2Κ

Δοκιμή	EAST TT		EAST LT		EAST TB		EAST LB		WEST TT		WEST LT		WEST TB		WEST LB	
	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν	Έμπροσθεν	Όπισθεν
2Κ1	-6,016	14,36	12,4	26,86	5,135	10,84	7,169	15,81	-0,8774	-14,41	-1,926	0,4148	-0,559	2,525	1,843	9,376
2Κ2	7,878	1,649	18,38	26,06	6,728	10,9	7,778	16,21	-1,176	-12,51	-2,002	5,044	-0,551	4,346	2,043	10,53
2Κ3	23,27	-15,54	23,36	24,18	8,322	10,79	8,332	16,41	-2,153	10,62	-2,088	14,74	-0,4919	8,227	2,62	12,83
2Κ4	23,4	-17,78	23,4	23,9	8,339	10,77	8,338	16,43	-2,038	9,568	-2,088	14,28	-0,5032	7,954	2,558	12,65
2Κ5	7,878	1,649	18,38	26,06	6,728	10,9	7,778	16,21	-1,176	-12,51	-2,002	5,044	-0,5513	4,346	2,043	10,53
2Κ6	-6,016	14,36	12,4	26,86	5,135	10,84	7,169	15,81	-0,8774	-14,41	-1,926	0,4148	-0,559	2,525	1,843	9,376
2Κ7	-10,75	18,61	7,012	26,12	3,492	10,27	6,452	15,16	-0,6365	-11,57	-1,842	-2,277	-0,5665	1,057	1,671	8,28
2Κ8	7,878	1,649	18,38	26,06	6,728	10,9	7,778	16,21	-1,176	-12,51	-2,002	5,044	-0,5513	4,346	2,043	10,53
2Κ9	-6,016	14,36	12,4	26,86	5,135	10,84	7,169	15,81	-0,8774	-14,41	-1,926	0,4148	-0,559	2,525	1,843	9,376
2Κ10	-1,231	10,4	14,89	26,74	5,798	10,91	7,431	16	-0,9889	-14,66	-1,958	2,03	-0,5562	3,221	1,919	9,834
2Κ11	23,27	-15,54	23,36	24,18	8,322	10,79	8,332	16,41	-2,153	10,62	-2,088	14,74	-0,4919	8,227	2,62	12,83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:**1^H ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 1K****Πίνακας Π7.1** Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παραμορφώσεις λόγω έμπροσθεν τροχού

FRONT		
Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
EAST TB 2	12,69099048	6,728
EAST TB 3	2,121338095	3,492
EAST TB 4	5,3186	6,728
EAST TB 5	-2,902942857	-0,1491
EAST TB 6	3,237871429	7,008
EAST TB 7	1,414228571	3,492
EAST TB 8	2,437647	6,728
EAST TB 9	1,3612	5,96
EAST TB 10	3,7059	3,034
EAST LB 2	7,556457143	7,778
EAST LB 3	3,625057143	6,452
EAST LB 4	6,5958	7,778
EAST LB 5	2,876190476	3,844
EAST LB 6	6,126847619	7,879
EAST LB 7	4,186671	6,452
EAST LB 8	5,19081	7,778
EAST LB 9	4,05043	7,493
EAST LB 10	6,09272	6,23
EAST LT 2	6,7393	18,38
EAST LT 3	1,777471429	7,012
EAST LT 4	3,3242	18,38
EAST LT 5	2,221714286	-0,3891
EAST LT 6	2,184685714	19,38
EAST LT 7	2,277257143	7,012
EASTL LT 8	2,75057619	18,38
EASTL LT 9	1,981028571	15,5
EASTL LT 10	2,277257143	5,77
EAST TT 2	-9,687580952	7,878
EAST TT 3	-7,909847619	-10,75
EAST TT 4	-20,9998	7,878
EAST TT 5	-4,394414286	-4,416
EAST TT 6	-17,59753333	10,87

EAST TT 7	-9,5478	-10,75
EAST TT 8	-14,68118	7,878
EAST TT 9	-9,979	0,1913
EAST TT 10	-19,03567	-10,77
WEST LB 2	4,87772381	2,043
WEST LB 3	7,512895238	4,354
WEST LB 4	7,0253	2,043
WEST LB 5	4,278	6,975
WEST LB 6	6,2403	3,212
WEST LB 7	7,0253	4,354
WEST LB 8	7,0253	3,299
WEST LB 9	7,2261	3,531
WEST LB 10	7,2261	4,541
WEST TB 2	1,12527619	-0,5513
WEST TB 3	9,667028571	0,6821
WEST TB 4	7,177852381	-0,5513
WEST TB 5	3,7493	5,95
WEST TB 6	9,4779	-0,2918
WEST TB 7	10,1939	0,6821
WEST TB 8	10,332	-0,2462
WEST TB 9	11,1079	-0,1025
WEST TB 10	9,3177	0,9211
WEST TT 2	-2,298566667	-1,176
WEST TT 3	-5,592090476	-6,632
WEST TT 4	4,459933333	-1,176
WEST TT 5	-8,250990476	3,752
WEST TT 6	4,52861	-3,379
WEST TT 7	-5,88374	-6,632
WEST TT 8	4,359	-3,583
WEST TT 9	-4,528642857	-4,16
WEST TT 10	4,92319	-7,286
WEST LT 2	0,739190476	-2,002
WEST LT 3	1,736338095	-0,9263
WEST LT 4	1,873771429	-2,002
WEST LT 5	1,134571429	12,53
WEST LT 6	2,699004762	-1,965
WEST LT 7	2,131719048	-0,9263
WEST LT 8	3,094385714	-1,928
WEST LT 9	0,9283	-1,799
WEST LT 10	2,870909524	-0,6088

Πίνακας Π7.2 Αποτελεσμάτα στατιστικού *t*-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παραμορφώσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	1.762461804	3.0983875
Διακύμανση	47.88249644	42.19747336
Μέγεθος δείγματος	72	72
Συσχέτιση Pearson	0.180560884	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	71	
t	-1.319109135	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.095685589	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.666599659	
P(T<=t) δίπλευρη	0.191371179	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.993943341	

Πίνακας Π7.3 Κατά ζεύγη πειραματικές και θεωρητικές παραμορφώσεις λόγω *όπισθεν* τροχού

BACK

Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
EAST TB 2	11.90949048	10.9
EAST TB 3	3.293738095	9.337
EAST TB 4	10.7895	10.9
EAST TB 5	-4.466042857	1.84
EAST TB 6	8.708771429	10.91
EAST TB 7	3.368128	9.337
EAST TB 8	7.517847	10.88
EAST TB 9	3.7059	10.73
EAST TB 10	9.9583	8.88
EAST LB 2	13.63215714	16.21
EAST LB 3	8.985957143	14.48
EAST LB 4	11.5994	16.21
EAST LB 5	5.73539	9.791
EAST LB 6	11.13044762	16
EAST LB 7	9.547671	14.48
EAST LB 8	10.90921	15.91
EAST LB 9	9.05403	15.64
EAST LB 10	11.09632	14.18

EAST LT 2	5.1841	26.06
EAST LT 3	1.777471429	24.35
EAST LT 4	8.3786	26.06
EAST LT 5	2.221714286	2.221714286
EAST LT 6	7.627885714	26.74
EAST LT 7	2.277257143	24.35
EASTL LT 8	0.94557619	26.83
EASTL LT 9	3.147428571	26.8
EASTL LT 10	8.498157143	23.32
EAST TT 2	-31.08018095	1.649
EAST TT 3	-23.84944762	16.67
EAST TT 4	-26.0333	1.649
EAST TT 5	-9.847414286	-13.5
EAST TT 6	-27.66463333	10.4
EAST TT 7	-25.4874	16.67
EAST TT 8	-26.42618	12.56
EAST TT 9	-25.9186	16.41
EAST TT 10	-29.52227	14.47
WEST LB 2	11.94212381	10.53
WEST LB 3	12.22249524	14.56
WEST LB 4	13.3047	10.53
WEST LB 5	10.165	13.6
WEST LB 6	12.5198	13.94
WEST LB 7	10.5575	14.56
WEST LB 8	12.5198	14.04
WEST LB 9	11.1508	14.24
WEST LB 10	12.3281	14.58
WEST TB 2	7.92797619	4.346
WEST TB 3	11.81522857	9.191
WEST TB 4	13.62245238	4.346
WEST TB 5	9.8359	9.19
WEST TB 6	13.0582	9.438
WEST TB 7	11.6261	9.191
WEST TB 8	12.122	9.473
WEST TB 9	11.466	9.475
WEST TB 10	13.2561	9.156
WEST TT 2	5.986733333	-12.51
WEST TT 3	-5.592090476	-18.75
WEST TT 4	-5.986666667	-12.51
WEST TT 5	-9.691890476	11.6
WEST TT 6	-13.48289	9.448
WEST TT 7	-6.24404	-18.75
WEST TT 8	-12.9321	8.23
WEST TT 9	-6.689942857	3.81

WEST TT 10	-10.56681	-21.63
WEST LT 2	1.822290476	5.044
WEST LT 3	1.736338095	13.47
WEST LT 4	1.151771429	5.044
WEST LT 5	1.856571429	16.03
WEST LT 6	1.615904762	16.23
WEST LT 7	2.492719048	13.47
WEST LT 8	1.289385714	16.21
WEST LT 9	2.0113	15.94
WEST LT 10	1.787809524	13.09

Πίνακας Π7.4 Αποτελεσμάτα στατιστικού *t*-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω *όπισθεν* τροχό

	<i>Πειραματική τιμή</i>	<i>Αναλυτική τιμή</i>
Μέσος	1.704300679	10.53023214
Διακύμανση	152.3340593	102.6202498
Μέγεθος δείγματος	72	72
Συσχέτιση Pearson	0.22381007	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	71	
t	-5.309004251	
P(T<=t) μονόπλευρη	6.00924E-07	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.666599659	
P(T<=t) δίπλευρη	1.20185E-06	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.993943341	

2^Η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 2Κ

Πίνακας Π7.5 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις λόγω έμπροσθεν τροχού

FRONT

Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
EAST TB 1	11.9122	5.135
EAST TB 2	1.847	6.728
EAST TB 3	4.1917	8.322
EAST TB 4	4.1917	8.339
EAST TB 5	12.398	6.728
EAST TB 6	12.7888	5.135
EAST TB 7	10.8349	3.492
EAST TB 8	11.6165	6.728
EAST TB 9	12.7888	5.135
EAST TB 10	12.7888	5.798
EAST TB 11	4.65	8.322
EAST LB 1	7.13088	7.169
EAST LB 2	5.0908	7.778
EAST LB 3	5.4482	8.332
EAST LB 4	5.8056	8.338
EAST LB 5	6.5204	7.778
EAST LB 6	6.8778	7.169
EAST LB 7	6.8778	6.452
EAST LB 8	6.5204	7.778
EAST LB 9	6.8778	7.169
EAST LB 10	6.8778	7.431
EAST LB 11	6.24599	8.332
EAST LT 1	7.313142857	12.4
EAST LT 2	1.240457143	18.38
EAST LT 3	4.0176	23.36
EAST LT 4	3.036342857	23.4
EAST LT 5	9.9792	18.38
EAST LT 6	7.350171429	12.4
EAST LT 7	6.498514286	7.012
EASTL LT 8	9.4288	18.38
EASTL LT 9	9.04	12.4
EASTL LT 10	9.04	14.89
EAST LT 11	4.350885714	23.36
EAST TT 1	-7.94983	-6.016

EAST TT 2	-13.1004	7.878
EAST TT 3	-21.29275714	23.27
EAST TT 4	-20.95316	23.4
EAST TT 5	-13.68243	7.878
EAST TT 6	-8.3094	-6.016
EAST TT 7	-5.71273	-10.75
EAST TT 8	-19.6149	7.878
EAST TT 9	-11.52520476	-6.016
EAST TT 10	-9.5478	-1.231
EAST TT 11	-23.74959524	23.27
WEST LB 1	3.75642	1.843
WEST LB 2	7.30732	2.043
WEST LB 3	7.21392	2.62
WEST LB 4	6.33546	2.558
WEST LB 5	3.9807	2.043
WEST LB 6	3.60692	1.843
WEST LB 7	4.61614	1.671
WEST LB 8	4.89646	2.043
WEST LB 9	3.92461	1.843
WEST LB 10	4.22363	1.919
WEST LB 11	6.26572	2.62
WEST TB 1	1.24458	-0.559
WEST TB 2	10.6729	-0.551
WEST TB 3	7.927938	-0.4919
WEST TB 4	8.1667	-0.5032
WEST TB 5	1.72199	-0.5513
WEST TB 6	1.07417	-0.559
WEST TB 7	1.43217	-0.5665
WEST TB 8	2.67672	-0.5513
WEST TB 9	1.63672	-0.559
WEST TB 10	1.744	-0.5562
WEST TB 11	7.8566	-0.4919
WEST TT 1	-1.972742857	-0.8774
WEST TT 2	1.2313	-1.176
WEST TT 3	3.3926	-2.153
WEST TT 4	3.739528571	-2.038
WEST TT 5	3.430766667	-1.176
WEST TT 6	-2.607338095	-0.8774
WEST TT 7	-2.43582381	-0.6365
WEST TT 8	-2.607371429	-1.176
WEST TT 9	-2.71029	-0.8774
WEST TT 10	-2.5902	-0.9889
WEST TT 11	5.4622	-2.153
WEST LT 1	-2.131680952	-1.926

WEST LT 2	1.409680952	-2.002
WEST LT 3	2.802061905	-2.088
WEST LT 4	3.231909524	-2.088
WEST LT 5	2.131719048	-2.002
WEST LT 6	-2.080147619	-1.926
WEST LT 7	-1.890952381	-1.842
WEST LT 8	1.392528571	-2.002
WEST LT 9	-2.251990476	-1.926
WEST LT 10	-2.080109524	-1.958
WEST LT 11	2.406719048	-2.088

Πίνακας Π7.6 Αποτελεσμάτα στατιστικού *t-test* κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω *έμπροσθεν* τροχού

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	2.191202645	4.347989773
Διακύμανση	58.46187297	57.36061382
Μέγεθος δείγματος	88	88
Συσχέτιση Pearson	-0.0690937	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	87	
t	-1.818213699	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.036236487	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.66255735	
P(T<=t) δίπλευρη	0.072472974	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.987608241	

Πίνακας Π7.7 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις λόγω όπισθεν τροχού

BACK		
Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
EAST TB 1	12.6938	10.84
EAST TB 2	6.9271	10.9
EAST TB 3	10.4441	10.79
EAST TB 4	10.0534	10.77
EAST TB 5	12.7888	10.9
EAST TB 6	13.9611	10.84
EAST TB 7	14.3519	10.27
EAST TB 8	11.6165	10.9
EAST TB 9	12.0073	10.84
EAST TB 10	12.398	10.91
EAST TB 11	10.1209	10.79
EAST LB 1	12.49188	15.81
EAST LB 2	9.737	16.21
EAST LB 3	11.524	16.41
EAST LB 4	11.1666	16.43
EAST LB 5	12.9536	16.21
EAST LB 6	13.311	15.81
EAST LB 7	12.5962	15.16
EAST LB 8	13.311	16.21
EAST LB 9	12.5962	15.81
EAST LB 10	11.8814	16
EAST LB 11	10.89219	16.41
EAST LT 1	5.757942857	26.86
EAST LT 2	6.683657143	26.06
EAST LT 3	10.2384	24.18
EAST LT 4	8.479542857	23.9
EAST LT 5	5.3136	26.06
EAST LT 6	5.406171429	26.86
EAST LT 7	7.276114286	26.12
EASTL LT 8	6.3184	26.06
EASTL LT 9	5.152	26.86
EASTL LT 10	6.3184	26.74
EAST LT 11	9.405285714	24.18
EAST TT 1	-33.11763	14.36
EAST TT 2	-26.9427	1.649
EAST TT 3	-28.42365714	-15.54
EAST TT 4	-27.66456	-17.78

EAST TT 5	-30.46103	1.649
EAST TT 6	-35.5745	14.36
EAST TT 7	-36.75293	18.61
EAST TT 8	-30.1015	1.649
EAST TT 9	-35.01520476	14.36
EAST TT 10	-35.5545	10.4
EAST TT 11	-29.62209524	-15.54
WEST LB 1	10.42832	9.376
WEST LB 2	10.44702	10.53
WEST LB 3	12.31592	12.83
WEST LB 4	11.82996	12.65
WEST LB 5	11.0451	10.53
WEST LB 6	10.27882	9.376
WEST LB 7	10.11064	8.28
WEST LB 8	10.78346	10.53
WEST LB 9	9.81161	9.376
WEST LB 10	10.11063	9.834
WEST LB 11	11.36772	12.83
WEST TB 1	7.68928	2.525
WEST TB 2	10.3149	4.346
WEST TB 3	13.656638	8.227
WEST TB 4	12.8212	7.954
WEST TB 5	9.95689	4.346
WEST TB 6	7.51877	2.525
WEST TB 7	6.08667	1.057
WEST TB 8	10.91162	4.346
WEST TB 9	8.43952	2.525
WEST TB 10	8.81456	3.221
WEST TB 11	12.5111	8.227
WEST TT 1	5.952357143	-14.41
WEST TT 2	-12.8177	-12.51
WEST TT 3	-8.8552	10.62
WEST TT 4	-8.86857	9.568
WEST TT 5	3.773833333	-12.51
WEST TT 6	5.317661905	-14.41
WEST TT 7	3.32787619	-11.57
WEST TT 8	3.156328571	-12.51
WEST TT 9	4.494309524	-14.41
WEST TT 10	5.334895238	-14.66
WEST TT 11	-8.5868	10.62
WEST LT 1	1.839419048	0.4148
WEST LT 2	1.409680952	5.044
WEST LT 3	1.719061905	14.74
WEST LT 4	1.787809524	14.28

WEST LT 5	2.561480952	5.044
WEST LT 6	2.252052381	0.4148
WEST LT 7	0.636047619	-2.277
WEST LT 8	2.114528571	5.044
WEST LT 9	0.997109524	0.4148
WEST LT 10	2.251990476	2.03
WEST LT 11	1.684719048	14.74

Πίνακας Π7.8 Αποτελέσματα στατιστικού *t-test* κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων λόγω *όπισθεν* τροχού

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	2,593221785	8,595743182
Διακύμανση	198,9939883	124,7410154
Μέγεθος δείγματος	88	88
Συσχέτιση Pearson	0,26061245	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	87	
t	-3,622540456	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,000244999	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,66255735	
P(T<=t) δίπλευρη	0,000489998	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1,987608241	

Πίνακας Π7.9 Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις

1^H-2^H ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 1K-2K

		Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
FRONT	EAST TB	1K2	12.6910	6.7280
FRONT	EAST TB	1K3	-1.7864	3.4920
FRONT	EAST TB	1K4	5.3186	6.7280
FRONT	EAST TB	1K5	-2.9029	-0.1491
FRONT	EAST TB	1K6	3.2379	7.0080
FRONT	EAST TB	1K7	-1.7120	3.4920
FRONT	EAST TB	1K8	0.4838	6.7280
FRONT	EAST TB	1K9	-0.9834	5.9600
FRONT	EAST TB	1K10	3.7059	3.0340
FRONT	EAST TB	2K1	11.9122	5.1350
FRONT	EAST TB	2K2	1.8470	6.7280
FRONT	EAST TB	2K3	4.1917	8.3220
FRONT	EAST TB	2K4	4.1917	8.3390
FRONT	EAST TB	2K5	12.3980	6.7280
FRONT	EAST TB	2K6	12.7888	5.1350
FRONT	EAST TB	2K7	10.8349	3.4920
FRONT	EAST TB	2K8	11.6165	6.7280
FRONT	EAST TB	2K9	12.7888	5.1350
FRONT	EAST TB	2K10	12.7888	5.7980
FRONT	EAST TB	2K11	4.6500	8.3220
FRONT	EAST LB	1K2	7.5565	7.7780
FRONT	EAST LB	1K3	3.6251	6.4520
FRONT	EAST LB	1K4	6.5958	7.7780
FRONT	EAST LB	1K5	2.8762	3.8440
FRONT	EAST LB	1K6	6.1268	7.8790
FRONT	EAST LB	1K7	4.1867	6.4520
FRONT	EAST LB	1K8	5.1908	7.7780
FRONT	EAST LB	1K9	4.0504	7.4930
FRONT	EAST LB	1K10	6.0927	6.2300
FRONT	EAST LB	2K1	7.1309	7.1690
FRONT	EAST LB	2K2	5.0908	7.7780
FRONT	EAST LB	2K3	5.4482	8.3320
FRONT	EAST LB	2K4	5.8056	8.3380
FRONT	EAST LB	2K5	6.5204	7.7780
FRONT	EAST LB	2K6	6.8778	7.1690

FRONT	EAST LB	2K7	6.8778	6.4520
FRONT	EAST LB	2K8	6.5204	7.7780
FRONT	EAST LB	2K9	6.8778	7.1690
FRONT	EAST LB	2K10	6.8778	7.4310
FRONT	EAST LB	2K11	6.2460	8.3320
FRONT	EAST LT	1K2	6.7393	18.3800
FRONT	EAST LT	1K3	-1.7218	7.0120
FRONT	EAST LT	1K4	3.3242	18.3800
FRONT	EAST LT	1K5	-1.6663	-0.3891
FRONT	EAST LT	1K6	2.1847	19.3800
FRONT	EAST LT	1K7	-1.6107	7.0120
FRONT	EAST LT	1K8	2.7506	18.3800
FRONT	EAST LT	1K9	-1.5182	15.5000
FRONT	EAST LT	1K10	2.2773	5.7700
FRONT	EAST LT	2K1	7.3131	12.4000
FRONT	EAST LT	2K2	1.2405	18.3800
FRONT	EAST LT	2K3	4.0176	23.3600
FRONT	EAST LT	2K4	3.0363	23.4000
FRONT	EAST LT	2K5	9.9792	18.3800
FRONT	EAST LT	2K6	7.3502	12.4000
FRONT	EAST LT	2K7	6.4985	7.0120
FRONT	EAST LT	2K8	9.4288	18.3800
FRONT	EAST LT	2K9	9.0400	12.4000
FRONT	EAST LT	2K10	9.0400	14.8900
FRONT	EAST LT	2K11	4.3509	23.3600
FRONT	EAST TT	1K2	-9.6876	7.8780
FRONT	EAST TT	1K3	-7.9098	-10.7500
FRONT	EAST TT	1K4	-20.9998	7.8780
FRONT	EAST TT	1K5	-4.3944	-4.4160
FRONT	EAST TT	1K6	-17.5975	10.8700
FRONT	EAST TT	1K7	-9.5478	-10.7500
FRONT	EAST TT	1K8	-14.6812	7.8780
FRONT	EAST TT	1K9	-9.9790	0.1913
FRONT	EAST TT	1K10	-19.0357	-10.7700
FRONT	EAST TT	2K1	-7.9498	-6.0160
FRONT	EAST TT	2K2	-13.1004	7.8780
FRONT	EAST TT	2K3	-21.2928	23.2700
FRONT	EAST TT	2K4	-20.9532	23.4000
FRONT	EAST TT	2K5	-13.6824	7.8780
FRONT	EAST TT	2K6	-8.3094	-6.0160
FRONT	EAST TT	2K7	-5.7127	-10.7500
FRONT	EAST TT	2K8	-19.6149	7.8780
FRONT	EAST TT	2K9	-11.5252	-6.0160
FRONT	EAST TT	2K10	-9.5478	-1.2310

FRONT	EAST TT	2K11	-23.7496	23.2700
FRONT	WEST LB	1K2	4.8777	2.0430
FRONT	WEST LB	1K3	7.5129	4.3540
FRONT	WEST LB	1K4	7.0253	2.0430
FRONT	WEST LB	1K5	4.2780	6.9750
FRONT	WEST LB	1K6	6.2403	3.2120
FRONT	WEST LB	1K7	7.0253	4.3540
FRONT	WEST LB	1K8	7.0253	3.2990
FRONT	WEST LB	1K9	7.2261	3.5310
FRONT	WEST LB	1K10	7.2261	4.5410
FRONT	WEST LB	2K1	3.7564	1.8430
FRONT	WEST LB	2K2	7.3073	2.0430
FRONT	WEST LB	2K3	7.2139	2.6200
FRONT	WEST LB	2K4	6.3355	2.5580
FRONT	WEST LB	2K5	3.9807	2.0430
FRONT	WEST LB	2K6	3.6069	1.8430
FRONT	WEST LB	2K7	4.6161	1.6710
FRONT	WEST LB	2K8	4.8965	2.0430
FRONT	WEST LB	2K9	3.9246	1.8430
FRONT	WEST LB	2K10	4.2236	1.9190
FRONT	WEST LB	2K11	6.2657	2.6200
FRONT	WEST TB	1K2	1.1253	-0.5513
FRONT	WEST TB	1K3	9.6670	0.6821
FRONT	WEST TB	1K4	7.1779	-0.5513
FRONT	WEST TB	1K5	3.7493	5.9500
FRONT	WEST TB	1K6	9.4779	-0.2918
FRONT	WEST TB	1K7	10.1939	0.6821
FRONT	WEST TB	1K8	10.3320	-0.2462
FRONT	WEST TB	1K9	11.1079	-0.1025
FRONT	WEST TB	1K10	9.3177	0.9211
FRONT	WEST TB	2K1	1.2446	-0.5590
FRONT	WEST TB	2K2	10.6729	-0.5510
FRONT	WEST TB	2K3	7.9279	-0.4919
FRONT	WEST TB	2K4	8.1667	-0.5032
FRONT	WEST TB	2K5	1.7220	-0.5513
FRONT	WEST TB	2K6	1.0742	-0.5590
FRONT	WEST TB	2K7	1.4322	-0.5665
FRONT	WEST TB	2K8	2.6767	-0.5513
FRONT	WEST TB	2K9	1.6367	-0.5590
FRONT	WEST TB	2K10	1.7440	-0.5562
FRONT	WEST TB	2K11	7.8566	-0.4919
FRONT	WEST TT	1K2	-2.2986	-1.1760
FRONT	WEST TT	1K3	-5.5921	-6.6320
FRONT	WEST TT	1K4	4.4599	-1.1760

FRONT	WEST TT	1K5	-8.2510	3.7520
FRONT	WEST TT	1K6	4.5286	-3.3790
FRONT	WEST TT	1K7	-5.8837	-6.6320
FRONT	WEST TT	1K8	4.3590	-3.5830
FRONT	WEST TT	1K9	-4.5286	-4.1600
FRONT	WEST TT	1K10	4.9232	-7.2860
FRONT	WEST TT	2K1	-1.9727	-0.8774
FRONT	WEST TT	2K2	1.2313	-1.1760
FRONT	WEST TT	2K3	3.3926	-2.1530
FRONT	WEST TT	2K4	3.7395	-2.0380
FRONT	WEST TT	2K5	3.4308	-1.1760
FRONT	WEST TT	2K6	-2.6073	-0.8774
FRONT	WEST TT	2K7	-2.4358	-0.6365
FRONT	WEST TT	2K8	-2.6074	-1.1760
FRONT	WEST TT	2K9	-2.7103	-0.8774
FRONT	WEST TT	2K10	-2.5902	-0.9889
FRONT	WEST TT	2K11	5.4622	-2.1530
FRONT	WEST LT	1K2	-2.1488	-2.0020
FRONT	WEST LT	1K3	1.7363	-0.9263
FRONT	WEST LT	1K4	1.8738	-2.0020
FRONT	WEST LT	1K5	-0.3094	12.5300
FRONT	WEST LT	1K6	2.6990	-1.9650
FRONT	WEST LT	1K7	1.0486	-0.9263
FRONT	WEST LT	1K8	3.0944	-1.9280
FRONT	WEST LT	1K9	0.9283	-1.7990
FRONT	WEST LT	1K10	2.8709	-0.6088
FRONT	WEST LT	2K1	-2.1317	-1.9260
FRONT	WEST LT	2K2	1.4097	-2.0020
FRONT	WEST LT	2K3	2.8021	-2.0880
FRONT	WEST LT	2K4	3.2319	-2.0880
FRONT	WEST LT	2K5	2.1317	-2.0020
FRONT	WEST LT	2K6	-2.0801	-1.9260
FRONT	WEST LT	2K7	-1.8910	-1.8420
FRONT	WEST LT	2K8	1.3925	-2.0020
FRONT	WEST LT	2K9	-2.2520	-1.9260
FRONT	WEST LT	2K10	-2.0801	-1.9580
FRONT	WEST LT	2K11	2.4067	-2.0880
BACK	EAST TB	1K2	11.9095	10.9000
BACK	EAST TB	1K3	3.2937	9.3370
BACK	EAST TB	1K4	10.7895	10.9000
BACK	EAST TB	1K5	-4.4660	1.8400
BACK	EAST TB	1K6	8.7088	10.9100
BACK	EAST TB	1K7	3.3681	9.3370
BACK	EAST TB	1K8	7.5178	10.8800

BACK	EAST TB	1K9	3.7059	10.7300
BACK	EAST TB	1K10	9.9583	8.8800
BACK	EAST TB	2K1	12.6938	10.8400
BACK	EAST TB	2K2	6.9271	10.9000
BACK	EAST TB	2K3	10.4441	10.7900
BACK	EAST TB	2K4	10.0534	10.7700
BACK	EAST TB	2K5	12.7888	10.9000
BACK	EAST TB	2K6	13.9611	10.8400
BACK	EAST TB	2K7	14.3519	10.2700
BACK	EAST TB	2K8	11.6165	10.9000
BACK	EAST TB	2K9	12.0073	10.8400
BACK	EAST TB	2K10	12.3980	10.9100
BACK	EAST TB	2K11	10.1209	10.7900
BACK	EAST LB	1K2	13.6322	16.2100
BACK	EAST LB	1K3	8.9860	14.4800
BACK	EAST LB	1K4	11.5994	16.2100
BACK	EAST LB	1K5	5.7354	9.7910
BACK	EAST LB	1K6	11.1304	16.0000
BACK	EAST LB	1K7	9.5477	14.4800
BACK	EAST LB	1K8	10.9092	15.9100
BACK	EAST LB	1K9	9.0540	15.6400
BACK	EAST LB	1K10	11.0963	14.1800
BACK	EAST LB	2K1	12.4919	15.8100
BACK	EAST LB	2K2	9.7370	16.2100
BACK	EAST LB	2K3	11.5240	16.4100
BACK	EAST LB	2K4	11.1666	16.4300
BACK	EAST LB	2K5	12.9536	16.2100
BACK	EAST LB	2K6	13.3110	15.8100
BACK	EAST LB	2K7	12.5962	15.1600
BACK	EAST LB	2K8	13.3110	16.2100
BACK	EAST LB	2K9	12.5962	15.8100
BACK	EAST LB	2K10	11.8814	16.0000
BACK	EAST LB	2K11	10.8922	16.4100
BACK	EAST LT	1K2	5.1841	26.0600
BACK	EAST LT	1K3	1.7775	24.3500
BACK	EAST LT	1K4	8.3786	26.0600
BACK	EAST LT	1K5	-3.6104	2.2217
BACK	EAST LT	1K6	7.6279	26.7400
BACK	EAST LT	1K7	2.2773	24.3500
BACK	EAST LT	1K8	0.9456	26.8300
BACK	EAST LT	1K9	3.1474	26.8000
BACK	EAST LT	1K10	8.4982	23.3200
BACK	EAST LT	2K1	5.7579	26.8600
BACK	EAST LT	2K2	6.6837	26.0600

BACK	EAST LT	2K3	10.2384	24.1800
BACK	EAST LT	2K4	8.4795	23.9000
BACK	EAST LT	2K5	5.3136	26.0600
BACK	EAST LT	2K6	5.4062	26.8600
BACK	EAST LT	2K7	7.2761	26.1200
BACK	EAST LT	2K8	6.3184	26.0600
BACK	EAST LT	2K9	5.1520	26.8600
BACK	EAST LT	2K10	6.3184	26.7400
BACK	EAST LT	2K11	9.4053	24.1800
BACK	EAST TT	1K2	-31.0802	1.6490
BACK	EAST TT	1K3	-23.8494	16.6700
BACK	EAST TT	1K4	-26.0333	1.6490
BACK	EAST TT	1K5	-9.8474	-13.5000
BACK	EAST TT	1K6	-27.6646	10.4000
BACK	EAST TT	1K7	-25.4874	16.6700
BACK	EAST TT	1K8	-26.4262	12.5600
BACK	EAST TT	1K9	-25.9186	16.4100
BACK	EAST TT	1K10	-29.5223	14.4700
BACK	EAST TT	2K1	-33.1176	14.3600
BACK	EAST TT	2K2	-26.9427	1.6490
BACK	EAST TT	2K3	-28.4237	-15.5400
BACK	EAST TT	2K4	-27.6646	-17.7800
BACK	EAST TT	2K5	-30.4610	1.6490
BACK	EAST TT	2K6	-35.5745	14.3600
BACK	EAST TT	2K7	-36.7529	18.6100
BACK	EAST TT	2K8	-30.1015	1.6490
BACK	EAST TT	2K9	-35.0152	14.3600
BACK	EAST TT	2K10	-35.5545	10.4000
BACK	EAST TT	2K11	-29.6221	-15.5400
BACK	WEST LB	1K2	11.9421	10.5300
BACK	WEST LB	1K3	12.2225	14.5600
BACK	WEST LB	1K4	13.3047	10.5300
BACK	WEST LB	1K5	10.1650	13.6000
BACK	WEST LB	1K6	12.5198	13.9400
BACK	WEST LB	1K7	10.5575	14.5600
BACK	WEST LB	1K8	12.5198	14.0400
BACK	WEST LB	1K9	11.1508	14.2400
BACK	WEST LB	1K10	12.3281	14.5800
BACK	WEST LB	2K1	10.4283	9.3760
BACK	WEST LB	2K2	10.4470	10.5300
BACK	WEST LB	2K3	12.3159	12.8300
BACK	WEST LB	2K4	11.8300	12.6500
BACK	WEST LB	2K5	11.0451	10.5300
BACK	WEST LB	2K6	10.2788	9.3760

BACK	WEST LB	2K7	10.1106	8.2800
BACK	WEST LB	2K8	10.7835	10.5300
BACK	WEST LB	2K9	9.8116	9.3760
BACK	WEST LB	2K10	10.1106	9.8340
BACK	WEST LB	2K11	11.3677	12.8300
BACK	WEST TB	1K2	7.9280	4.3460
BACK	WEST TB	1K3	11.8152	9.1910
BACK	WEST TB	1K4	13.6225	4.3460
BACK	WEST TB	1K5	9.8359	9.1900
BACK	WEST TB	1K6	13.0582	9.4380
BACK	WEST TB	1K7	11.6261	9.1910
BACK	WEST TB	1K8	12.1220	9.4730
BACK	WEST TB	1K9	11.4660	9.4750
BACK	WEST TB	1K10	13.2561	9.1560
BACK	WEST TB	2K1	7.6893	2.5250
BACK	WEST TB	2K2	10.3149	4.3460
BACK	WEST TB	2K3	13.6566	8.2270
BACK	WEST TB	2K4	12.8212	7.9540
BACK	WEST TB	2K5	9.9569	4.3460
BACK	WEST TB	2K6	7.5188	2.5250
BACK	WEST TB	2K7	6.0867	1.0570
BACK	WEST TB	2K8	10.9116	4.3460
BACK	WEST TB	2K9	8.4395	2.5250
BACK	WEST TB	2K10	8.8146	3.2210
BACK	WEST TB	2K11	12.5111	8.2270
BACK	WEST TT	1K2	5.9867	-12.5100
BACK	WEST TT	1K3	-5.5921	-18.7500
BACK	WEST TT	1K4	-5.9867	-12.5100
BACK	WEST TT	1K5	-9.6919	11.6000
BACK	WEST TT	1K6	-13.4829	9.4480
BACK	WEST TT	1K7	-6.2440	-18.7500
BACK	WEST TT	1K8	-12.9321	8.2300
BACK	WEST TT	1K9	-6.6899	3.8100
BACK	WEST TT	1K10	-10.5668	-21.6300
BACK	WEST TT	2K1	5.9524	-14.4100
BACK	WEST TT	2K2	-12.8177	-12.5100
BACK	WEST TT	2K3	-8.8552	10.6200
BACK	WEST TT	2K4	-8.8686	9.5680
BACK	WEST TT	2K5	3.7738	-12.5100
BACK	WEST TT	2K6	5.3177	-14.4100
BACK	WEST TT	2K7	3.3279	-11.5700
BACK	WEST TT	2K8	3.1563	-12.5100
BACK	WEST TT	2K9	4.4943	-14.4100
BACK	WEST TT	2K10	5.3349	-14.6600

BACK	WEST TT	2K11	-8.5868	10.6200
BACK	WEST LT	1K2	1.4613	5.0440
BACK	WEST LT	1K3	1.7363	13.4700
BACK	WEST LT	1K4	1.1518	5.0440
BACK	WEST LT	1K5	0.0516	16.0300
BACK	WEST LT	1K6	1.6159	16.2300
BACK	WEST LT	1K7	2.4927	13.4700
BACK	WEST LT	1K8	1.2894	16.2100
BACK	WEST LT	1K9	2.0113	15.9400
BACK	WEST LT	1K10	1.7878	13.0900
BACK	WEST LT	2K1	1.8394	0.4148
BACK	WEST LT	2K2	1.4097	5.0440
BACK	WEST LT	2K3	1.7191	14.7400
BACK	WEST LT	2K4	1.7878	14.2800
BACK	WEST LT	2K5	2.5615	5.0440
BACK	WEST LT	2K6	2.2521	0.4148
BACK	WEST LT	2K7	0.6360	-2.2770
BACK	WEST LT	2K8	2.1145	5.0440
BACK	WEST LT	2K9	0.9971	0.4148
BACK	WEST LT	2K10	2.2520	2.0300
BACK	WEST LT	2K11	1.6847	14.7400

Πίνακας Π7.10 Αποτελέσματα στατιστικού t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών παρατηρήσεων

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	2,095738277	6,625965982
Διακύμανση	114,9079807	90,64721314
Μέγεθος δείγματος	320	320
Συσχέτιση Pearson	0,179036908	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	319	
t	-6,23359006	
P(T<=t) μονόπλευρη	7,21333E-10	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,64964432	
P(T<=t) δίπλευρη	1,44267E-09	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1,96742832	

1^H ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 1Κ

Πίνακας Π7.11 Σειρά δεδομένων 1Κ- Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στον **πυθμένα** της ανακυκλωμένης στρώσης

BOTTOM

	Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
FRONT	EAST TB 1	74.248	-
FRONT	EAST TB 2	12.69099048	6.728
FRONT	EAST TB 3	-1.786361905	3.492
FRONT	EAST TB 4	5.3186	6.728
FRONT	EAST TB 5	-2.902942857	-0.1491
FRONT	EAST TB 6	3.237871429	7.008
FRONT	EAST TB 7	-1.711971429	3.492
FRONT	EAST TB 8	0.483847619	6.728
FRONT	EAST TB 9	-0.9834	5.96
FRONT	EAST TB 10	3.7059	3.034
FRONT	EAST LB 1	62.245	-
FRONT	EAST LB 2	7.556457143	7.778
FRONT	EAST LB 3	3.625057143	6.452
FRONT	EAST LB 4	6.5958	7.778
FRONT	EAST LB 5	2.876190476	3.844
FRONT	EAST LB 6	6.126847619	7.879
FRONT	EAST LB 7	4.186671	6.452
FRONT	EAST LB 8	5.19081	7.778
FRONT	EAST LB 9	4.05043	7.493
FRONT	EAST LB 10	6.09272	6.23
FRONT	WEST LB 1	72.15	-
FRONT	WEST LB 2	4.87772381	2.043
FRONT	WEST LB 3	7.512895238	4.354
FRONT	WEST LB 4	7.0253	2.043
FRONT	WEST LB 5	4.278	6.975
FRONT	WEST LB 6	6.2403	3.212
FRONT	WEST LB 7	7.0253	4.354
FRONT	WEST LB 8	7.0253	3.299
FRONT	WEST LB 9	7.2261	3.531
FRONT	WEST LB 10	7.2261	4.541
FRONT	WEST TB 1	60.587	-
FRONT	WEST TB 2	1.12527619	-0.5513

FRONT	WEST TB 3	9.667028571	0.6821
FRONT	WEST TB 4	7.177852381	-0.5513
FRONT	WEST TB 5	3.7493	5.95
FRONT	WEST TB 6	9.4779	-0.2918
FRONT	WEST TB 7	10.1939	0.6821
FRONT	WEST TB 8	10.332	-0.2462
FRONT	WEST TB 9	11.1079	-0.1025
FRONT	WEST TB 10	9.3177	0.9211
BACK	EAST TB 1	109.418	-
BACK	EAST TB 2	11.90949048	10.9
BACK	EAST TB 3	3.293738095	9.337
BACK	EAST TB 4	10.7895	10.9
BACK	EAST TB 5	-4.466042857	1.84
BACK	EAST TB 6	8.708771429	10.91
BACK	EAST TB 7	3.368128	9.337
BACK	EAST TB 8	7.517847	10.88
BACK	EAST TB 9	3.7059	10.73
BACK	EAST TB 10	9.9583	8.88
BACK	EAST LB 1	126.576	-
BACK	EAST LB 2	13.63215714	16.21
BACK	EAST LB 3	8.985957143	14.48
BACK	EAST LB 4	11.5994	16.21
BACK	EAST LB 5	5.73539	9.791
BACK	EAST LB 6	11.13044762	16
BACK	EAST LB 7	9.547671	14.48
BACK	EAST LB 8	10.90921	15.91
BACK	EAST LB 9	9.05403	15.64
BACK	EAST LB 10	11.09632	14.18
BACK	WEST LB 1	138.869	-
BACK	WEST LB 2	11.94212381	10.53
BACK	WEST LB 3	12.22249524	14.56
BACK	WEST LB 4	13.3047	10.53
BACK	WEST LB 5	10.165	13.6
BACK	WEST LB 6	12.5198	13.94
BACK	WEST LB 7	10.5575	14.56
BACK	WEST LB 8	12.5198	14.04
BACK	WEST LB 9	11.1508	14.24
BACK	WEST LB 10	12.3281	14.58
BACK	WEST TB 1	142.935	-
BACK	WEST TB 2	7.92797619	4.346
BACK	WEST TB 3	11.81522857	9.191
BACK	WEST TB 4	13.62245238	4.346
BACK	WEST TB 5	9.8359	9.19
BACK	WEST TB 6	13.0582	9.438

BACK	WEST TB 7	11.6261	9.191
BACK	WEST TB 8	12.122	9.473
BACK	WEST TB 9	11.466	9.475
BACK	WEST TB 10	13.2561	9.156

Πίνακας Π7.12 Σειρά δεδομένων 1Κ- Αποτελεσμάτα στατιστικού t-test κατά ζεύγη στον **πυθμένα** της ανακυκλωμένης στρώσης

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	7.835946993	7.7298625
Διακύμανση	16.4917026	23.93109628
Μέγεθος δείγματος	72	72
Συσχέτιση Pearson	0.492685006	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	71	
t	0.197148512	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.422137308	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.666599659	
P(T<=t) δίπλευρη	0.844274616	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.993943341	

2 ^η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 2Κ

Πίνακας Π7.13 Σειρά δεδομένων 2Κ- Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στον **πυθμένα** της ανακυκλωμένης στρώσης

BOTTOM

	Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
FRONT	EAST TB 1	11.9122	5.1350
FRONT	EAST TB 2	1.8470	6.7280
FRONT	EAST TB 3	4.1917	8.3220
FRONT	EAST TB 4	4.1917	8.3390
FRONT	EAST TB 5	12.3980	6.7280
FRONT	EAST TB 6	12.7888	5.1350
FRONT	EAST TB 7	10.8349	3.4920
FRONT	EAST TB 8	11.6165	6.7280
FRONT	EAST TB 9	12.7888	5.1350
FRONT	EAST TB 10	12.7888	5.7980
FRONT	EAST TB 11	4.6500	8.3220
FRONT	EAST LB 1	7.1309	7.1690
FRONT	EAST LB 2	5.0908	7.7780
FRONT	EAST LB 3	5.4482	8.3320
FRONT	EAST LB 4	5.8056	8.3380
FRONT	EAST LB 5	6.5204	7.7780
FRONT	EAST LB 6	6.8778	7.1690
FRONT	EAST LB 7	6.8778	6.4520
FRONT	EAST LB 8	6.5204	7.7780
FRONT	EAST LB 9	6.8778	7.1690
FRONT	EAST LB 10	6.8778	7.4310
FRONT	EAST LB 11	6.2460	8.3320
FRONT	WEST LB 1	3.7564	1.8430
FRONT	WEST LB 2	7.3073	2.0430
FRONT	WEST LB 3	7.2139	2.6200
FRONT	WEST LB 4	6.3355	2.5580
FRONT	WEST LB 5	3.9807	2.0430
FRONT	WEST LB 6	3.6069	1.8430
FRONT	WEST LB 7	4.6161	1.6710

FRONT	WEST LB 8	4.8965	2.0430
FRONT	WEST LB 9	3.9246	1.8430
FRONT	WEST LB 10	4.2236	1.9190
FRONT	WEST LB 11	6.2657	2.6200
FRONT	WEST TB 1	1.2446	-0.5590
FRONT	WEST TB 2	10.6729	-0.5510
FRONT	WEST TB 3	7.9279	-0.4919
FRONT	WEST TB 4	8.1667	-0.5032
FRONT	WEST TB 5	1.7220	-0.5513
FRONT	WEST TB 6	1.0742	-0.5590
FRONT	WEST TB 7	1.4322	-0.5665
FRONT	WEST TB 8	2.6767	-0.5513
FRONT	WEST TB 9	1.6367	-0.5590
FRONT	WEST TB 10	1.7440	-0.5562
FRONT	WEST TB 11	7.8566	-0.4919
BACK	EAST TB 1	12.6938	10.8400
BACK	EAST TB 2	6.9271	10.9000
BACK	EAST TB 3	10.4441	10.7900
BACK	EAST TB 4	10.0534	10.7700
BACK	EAST TB 5	12.7888	10.9000
BACK	EAST TB 6	13.9611	10.8400
BACK	EAST TB 7	14.3519	10.2700
BACK	EAST TB 8	11.6165	10.9000
BACK	EAST TB 9	12.0073	10.8400
BACK	EAST TB 10	12.3980	10.9100
BACK	EAST TB 11	10.1209	10.7900
BACK	EAST LB 1	12.4919	15.8100
BACK	EAST LB 2	9.7370	16.2100
BACK	EAST LB 3	11.5240	16.4100
BACK	EAST LB 4	11.1666	16.4300
BACK	EAST LB 5	12.9536	16.2100
BACK	EAST LB 6	13.3110	15.8100
BACK	EAST LB 7	12.5962	15.1600
BACK	EAST LB 8	13.3110	16.2100
BACK	EAST LB 9	12.5962	15.8100
BACK	EAST LB 10	11.8814	16.0000
BACK	EAST LB 11	10.8922	16.4100
BACK	WEST LB 1	10.4283	9.3760
BACK	WEST LB 2	10.4470	10.5300
BACK	WEST LB 3	12.3159	12.8300
BACK	WEST LB 4	11.8300	12.6500
BACK	WEST LB 5	11.0451	10.5300
BACK	WEST LB 6	10.2788	9.3760
BACK	WEST LB 7	10.1106	8.2800
BACK	WEST LB 8	10.7835	10.5300

BACK	WEST LB 9	9.8116	9.3760
BACK	WEST LB 10	10.1106	9.8340
BACK	WEST LB 11	11.3677	12.8300
BACK	WEST TB 1	7.6893	2.5250
BACK	WEST TB 2	10.3149	4.3460
BACK	WEST TB 3	13.6566	8.2270
BACK	WEST TB 4	12.8212	7.9540
BACK	WEST TB 5	9.9569	4.3460
BACK	WEST TB 6	7.5188	2.5250
BACK	WEST TB 7	6.0867	1.0570
BACK	WEST TB 8	10.9116	4.3460
BACK	WEST TB 9	8.4395	2.5250
BACK	WEST TB 10	8.8146	3.2210
BACK	WEST TB 11	12.5111	8.2270

Πίνακας Π7.14 Σειρά δεδομένων 2Κ-Αποτελέσματα t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στον **πυθμένα** της ανακυκλωμένης στρώσης

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	8.632249727	7.174485227
Διακύμανση	13.45498976	26.25600538
Μέγεθος δείγματος	88	88
Συσχέτιση Pearson	0.655953241	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	87	
t	3.52466705	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.000339331	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.66255735	
P(T<=t) δίπλευρη	0.000678661	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.987608241	

1^Η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 1Κ

Πίνακας Π7.15 Σειρά δεδομένων 1Κ- Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στην **επιφάνεια** της ανακυκλωμένης στρώσης

TOP

	Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
FRONT	EAST LT 2	6.7393	18.3800
FRONT	EAST LT 3	-1.7218	7.0120
FRONT	EAST LT 4	3.3242	18.3800
FRONT	EAST LT 5	-1.6663	-0.3891
FRONT	EAST LT 6	2.1847	19.3800
FRONT	EAST LT 7	-1.6107	7.0120
FRONT	EAST LT 8	2.7506	18.3800
FRONT	EAST LT 9	-1.5182	15.5000
FRONT	EAST LT 10	2.2773	5.7700
FRONT	EAST TT 2	-9.6876	7.8780
FRONT	EAST TT 3	-7.9098	-10.7500
FRONT	EAST TT 4	-20.9998	7.8780
FRONT	EAST TT 5	-4.3944	-4.4160
FRONT	EAST TT 6	-17.5975	10.8700
FRONT	EAST TT 7	-9.5478	-10.7500
FRONT	EAST TT 8	-14.6812	7.8780
FRONT	EAST TT 9	-9.9790	0.1913
FRONT	EAST TT 10	-19.0357	-10.7700
FRONT	WEST TT 2	-2.2986	-1.1760
FRONT	WEST TT 3	-5.5921	-6.6320
FRONT	WEST TT 4	4.4599	-1.1760
FRONT	WEST TT 5	-8.2510	3.7520
FRONT	WEST TT 6	4.5286	-3.3790
FRONT	WEST TT 7	-5.8837	-6.6320
FRONT	WEST TT 8	4.3590	-3.5830
FRONT	WEST TT 9	-4.5286	-4.1600
FRONT	WEST TT 10	4.9232	-7.2860
FRONT	WEST LT 2	-2.1488	-2.0020
FRONT	WEST LT 3	1.7363	-0.9263
FRONT	WEST LT 4	1.8738	-2.0020
FRONT	WEST LT 5	-0.3094	12.5300

FRONT	WEST LT 6	2.6990	-1.9650
FRONT	WEST LT 7	1.0486	-0.9263
FRONT	WEST LT 8	3.0944	-1.9280
FRONT	WEST LT 9	0.9283	-1.7990
FRONT	WEST LT 10	2.8709	-0.6088
BACK	EAST LT 2	5.1841	26.0600
BACK	EAST LT 3	1.7775	24.3500
BACK	EAST LT 4	8.3786	26.0600
BACK	EAST LT 5	-3.6104	2.2217
BACK	EAST LT 6	7.6279	26.7400
BACK	EAST LT 7	2.2773	24.3500
BACK	EAST LT 8	0.9456	26.8300
BACK	EAST LT 9	3.1474	26.8000
BACK	EAST LT 10	8.4982	23.3200
BACK	EAST TT 2	-31.0802	1.6490
BACK	EAST TT 3	-23.8494	16.6700
BACK	EAST TT 4	-26.0333	1.6490
BACK	EAST TT 5	-9.8474	-13.5000
BACK	EAST TT 6	-27.6646	10.4000
BACK	EAST TT 7	-25.4874	16.6700
BACK	EAST TT 8	-26.4262	12.5600
BACK	EAST TT 9	-25.9186	16.4100
BACK	EAST TT 10	-29.5223	14.4700
BACK	WEST TT 2	5.9867	-12.5100
BACK	WEST TT 3	-5.5921	-18.7500
BACK	WEST TT 4	-5.9867	-12.5100
BACK	WEST TT 5	-9.6919	11.6000
BACK	WEST TT 6	-13.4829	9.4480
BACK	WEST TT 7	-6.2440	-18.7500
BACK	WEST TT 8	-12.9321	8.2300
BACK	WEST TT 9	-6.6899	3.8100
BACK	WEST TT 10	-10.5668	-21.6300
BACK	WEST LT 2	1.4613	5.0440
BACK	WEST LT 3	1.7363	13.4700
BACK	WEST LT 4	1.1518	5.0440
BACK	WEST LT 5	0.0516	16.0300
BACK	WEST LT 6	1.6159	16.2300
BACK	WEST LT 7	2.4927	13.4700
BACK	WEST LT 8	1.2894	16.2100
BACK	WEST LT 9	2.0113	15.9400
BACK	WEST LT 10	1.7878	13.0900

Πίνακας Π7.16 Σειρά δεδομένων 1Κ- Αποτελέσματα t-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στην **επιφάνεια** της ανακυκλωμένης στρώσης

	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
Μέσος	8.632249727	7.174485227
Διακύμανση	13.45498976	26.25600538
Μέγεθος δείγματος	88	88
Συσχέτιση Pearson	0.655953241	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	87	
t	3.52466705	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.000339331	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.66255735	
P(T<=t) δίπλευρη	0.000678661	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.987608241	

2 ^Η ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΩΝ 2Κ

Πίνακας Π7.17 Σειρά δεδομένων 2Κ- Κατά ζεύγη πειραματικές και αναλυτικές παρατηρήσεις στην **επιφάνεια** της ανακυκλωμένης στρώσης

TOP

	Test	Πειραματική τιμή	Αναλυτική τιμή
FRONT	EAST LT 1	7.3131	12.4000
FRONT	EAST LT 2	1.2405	18.3800
FRONT	EAST LT 3	4.0176	23.3600
FRONT	EAST LT 4	3.0363	23.4000
FRONT	EAST LT 5	9.9792	18.3800
FRONT	EAST LT 6	7.3502	12.4000
FRONT	EAST LT 7	6.4985	7.0120
FRONT	EAST LT 8	9.4288	18.3800
FRONT	EAST LT 9	9.0400	12.4000
FRONT	EAST LT 10	9.0400	14.8900
FRONT	EAST LT 11	4.3509	23.3600
FRONT	EAST TT 1	-7.9498	-6.0160
FRONT	EAST TT 2	-13.1004	7.8780
FRONT	EAST TT 3	-21.2928	23.2700
FRONT	EAST TT 4	-20.9532	23.4000
FRONT	EAST TT 5	-13.6824	7.8780
FRONT	EAST TT 6	-8.3094	-6.0160
FRONT	EAST TT 7	-5.7127	-10.7500
FRONT	EAST TT 8	-19.6149	7.8780
FRONT	EAST TT 9	-11.5252	-6.0160
FRONT	EAST TT 10	-9.5478	-1.2310
FRONT	EAST TT 11	-23.7496	23.2700
FRONT	WEST TT 1	-1.9727	-0.8774
FRONT	WEST TT 2	1.2313	-1.1760
FRONT	WEST TT 3	3.3926	-2.1530
FRONT	WEST TT 4	3.7395	-2.0380
FRONT	WEST TT 5	3.4308	-1.1760
FRONT	WEST TT 6	-2.6073	-0.8774
FRONT	WEST TT 7	-2.4358	-0.6365

FRONT	WEST TT 8	-2.6074	-1.1760
FRONT	WEST TT 9	-2.7103	-0.8774
FRONT	WEST TT 10	-2.5902	-0.9889
FRONT	WEST TT 11	5.4622	-2.1530
FRONT	WEST LT 1	-2.1317	-1.9260
FRONT	WEST LT 2	1.4097	-2.0020
FRONT	WEST LT 3	2.8021	-2.0880
FRONT	WEST LT 4	3.2319	-2.0880
FRONT	WEST LT 5	2.1317	-2.0020
FRONT	WEST LT 6	-2.0801	-1.9260
FRONT	WEST LT 7	-1.8910	-1.8420
FRONT	WEST LT 8	1.3925	-2.0020
FRONT	WEST LT 9	-2.2520	-1.9260
FRONT	WEST LT 10	-2.0801	-1.9580
FRONT	WEST LT 11	2.4067	-2.0880
BACK	EAST LT 1	5.7579	26.8600
BACK	EAST LT 2	6.6837	26.0600
BACK	EAST LT 3	10.2384	24.1800
BACK	EAST LT 4	8.4795	23.9000
BACK	EAST LT 5	5.3136	26.0600
BACK	EAST LT 6	5.4062	26.8600
BACK	EAST LT 7	7.2761	26.1200
BACK	EAST LT 8	6.3184	26.0600
BACK	EAST LT 9	5.1520	26.8600
BACK	EAST LT 10	6.3184	26.7400
BACK	EAST LT 11	9.4053	24.1800
BACK	EAST TT 1	-33.1176	14.3600
BACK	EAST TT 2	-26.9427	1.6490
BACK	EAST TT 3	-28.4237	-15.5400
BACK	EAST TT 4	-27.6646	-17.7800
BACK	EAST TT 5	-30.4610	1.6490
BACK	EAST TT 6	-35.5745	14.3600
BACK	EAST TT 7	-36.7529	18.6100
BACK	EAST TT 8	-30.1015	1.6490
BACK	EAST TT 9	-35.0152	14.3600
BACK	EAST TT 10	-35.5545	10.4000
BACK	EAST TT 11	-29.6221	-15.5400
BACK	WEST TT 1	5.9524	-14.4100
BACK	WEST TT 2	-12.8177	-12.5100
BACK	WEST TT 3	-8.8552	10.6200
BACK	WEST TT 4	-8.8686	9.5680
BACK	WEST TT 5	3.7738	-12.5100
BACK	WEST TT 6	5.3177	-14.4100
BACK	WEST TT 7	3.3279	-11.5700

BACK	WEST TT 8	3.1563	-12.5100
BACK	WEST TT 9	4.4943	-14.4100
BACK	WEST TT 10	5.3349	-14.6600
BACK	WEST TT 11	-8.5868	10.6200
BACK	WEST LT 1	1.8394	0.4148
BACK	WEST LT 2	1.4097	5.0440
BACK	WEST LT 3	1.7191	14.7400
BACK	WEST LT 4	1.7878	14.2800
BACK	WEST LT 5	2.5615	5.0440
BACK	WEST LT 6	2.2521	0.4148
BACK	WEST LT 7	0.6360	-2.2770
BACK	WEST LT 8	2.1145	5.0440
BACK	WEST LT 9	0.9971	0.4148
BACK	WEST LT 10	2.2520	2.0300
BACK	WEST LT 11	1.6847	14.7400

Πίνακας Π7.18 Σειρά δεδομένων 2Κ- Αποτελέσματα *t*-test παρατηρήσεων κατά ζεύγη στην **επιφάνεια** της ανακυκλωμένης στρώσης

	Πειραματική τιμή	Θεωρητική τιμή
Μέσος	8.632249727	7.174485227
Διακύμανση	13.45498976	26.25600538
Μέγεθος δείγματος	88	88
Συσχέτιση Pearson	0.655953241	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	87	
t	3.52466705	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.000339331	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.66255735	
P(T<=t) δίπλευρη	0.000678661	
t κρίσιμο, δίπλευρο	1.987608241	

Πίνακας Π7.19 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στην επιφάνεια του ανατολικού πυρήνα

TOP EAST			
	Test	ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ	ΕΓΚΑΡΣΙΕΣ
FRONT	1K2	6.7393	-9.6876
FRONT	1K3	-1.7218	-7.9098
FRONT	1K4	3.3242	-20.9998
FRONT	1K5	-1.6663	-4.3944
FRONT	1K6	2.1847	-17.5975
FRONT	1K7	-1.6107	-9.5478
FRONT	1K8	2.7506	-14.6812
FRONT	1K9	-1.5182	-9.9790
FRONT	1K10	2.2773	-19.0357
FRONT	2K1	7.3131	-7.9498
FRONT	2K2	1.2405	-13.1004
FRONT	2K3	4.0176	-21.2928
FRONT	2K4	3.0363	-20.9532
FRONT	2K5	9.9792	-13.6824
FRONT	2K6	7.3502	-8.3094
FRONT	2K7	6.4985	-5.7127
FRONT	2K8	9.4288	-19.6149
FRONT	2K9	9.0400	-11.5252
FRONT	2K10	9.0400	-9.5478
FRONT	2K11	4.3509	-23.7496
BACK	1K2	5.1841	-31.0802
BACK	1K3	1.7775	-23.8494
BACK	1K4	8.3786	-26.0333
BACK	1K5	-3.6104	-9.8474
BACK	1K6	7.6279	-27.6646
BACK	1K7	2.2773	-25.4874
BACK	1K8	0.9456	-26.4262
BACK	1K9	3.1474	-25.9186
BACK	1K10	8.4982	-29.5223
BACK	2K1	5.7579	-33.1176
BACK	2K2	6.6837	-26.9427
BACK	2K3	10.2384	-28.4237
BACK	2K4	8.4795	-27.6646
BACK	2K5	5.3136	-30.4610
BACK	2K6	5.4062	-35.5745

BACK	2K7	7.2761	-36.7529
BACK	2K8	6.3184	-30.1015
BACK	2K9	5.1520	-35.0152
BACK	2K10	6.3184	-35.5545
BACK	2K11	9.4053	-29.6221

Πίνακας Π7.20 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στην επιφάνεια του δυτικού πυρήνα

TOP WEST

	Test	ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ	ΕΓΚΑΡΣΙΕΣ
FRONT	1K2	-2.2986	-2.1488
FRONT	1K3	-5.5921	1.7363
FRONT	1K4	4.4599	1.8738
FRONT	1K5	-8.2510	-0.3094
FRONT	1K6	4.5286	2.6990
FRONT	1K7	-5.8837	1.0486
FRONT	1K8	4.3590	3.0944
FRONT	1K9	-4.5286	0.9283
FRONT	1K10	4.9232	2.8709
FRONT	2K1	-1.9727	-2.1317
FRONT	2K2	1.2313	1.4097
FRONT	2K3	3.3926	2.8021
FRONT	2K4	3.7395	3.2319
FRONT	2K5	3.4308	2.1317
FRONT	2K6	-2.6073	-2.0801
FRONT	2K7	-2.4358	-1.8910
FRONT	2K8	-2.6074	1.3925
FRONT	2K9	-2.7103	-2.2520
FRONT	2K10	-2.5902	-2.0801
BACK	1K2	5.9867	1.4613
BACK	1K3	-5.5921	1.7363
BACK	1K4	-5.9867	1.1518
BACK	1K5	-9.6919	0.0516
BACK	1K6	-13.4829	1.6159
BACK	1K7	-6.2440	2.4927
BACK	1K8	-12.9321	1.2894
BACK	1K9	-6.6899	2.0113

BACK	1K10	-10.5668	1.7878
BACK	2K1	5.9524	1.8394
BACK	2K2	-12.8177	1.4097
BACK	2K3	-8.8552	1.7191
BACK	2K4	-8.8686	1.7878
BACK	2K5	3.7738	2.5615
BACK	2K6	5.3177	2.2521
BACK	2K7	3.3279	0.6360
BACK	2K8	3.1563	2.1145
BACK	2K9	4.4943	0.9971
BACK	2K10	5.3349	2.2520
BACK	2K11	-8.5868	1.6847

Πίνακας Π7.21 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στον πυθμένα του ανατολικού πυρήνα

BOTTOM EAST

	Test	EAST TB	EAST LB
FRONT	1K2	12.6910	7.5565
FRONT	1K3	-1.7864	3.6251
FRONT	1K4	5.3186	6.5958
FRONT	1K5	-2.9029	2.8762
FRONT	1K6	3.2379	6.1268
FRONT	1K7	-1.7120	4.1867
FRONT	1K8	0.4838	5.1908
FRONT	1K9	-0.9834	4.0504
FRONT	1K10	3.7059	6.0927
FRONT	2K1	11.9122	7.1309
FRONT	2K2	1.8470	5.0908
FRONT	2K3	4.1917	5.4482
FRONT	2K4	4.1917	5.8056
FRONT	2K5	12.3980	6.5204
FRONT	2K6	12.7888	6.8778
FRONT	2K7	10.8349	6.8778
FRONT	2K8	11.6165	6.5204
FRONT	2K9	12.7888	6.8778
FRONT	2K10	12.7888	6.8778
FRONT	2K11	4.6500	6.2460
BACK	1K2	11.9095	13.6322

BACK	1K3	3.2937	8.9860
BACK	1K4	10.7895	11.5994
BACK	1K5	-4.4660	5.7354
BACK	1K6	8.7088	11.1304
BACK	1K7	3.3681	9.5477
BACK	1K8	7.5178	10.9092
BACK	1K9	3.7059	9.0540
BACK	1K10	9.9583	11.0963
BACK	2K1	12.6938	12.4919
BACK	2K2	6.9271	9.7370
BACK	2K3	10.4441	11.5240
BACK	2K4	10.0534	11.1666
BACK	2K5	12.7888	12.9536
BACK	2K6	13.9611	13.3110
BACK	2K7	14.3519	12.5962
BACK	2K8	11.6165	13.3110
BACK	2K9	12.0073	12.5962
BACK	2K10	12.3980	11.8814
BACK	2K11	10.1209	10.8922

Πίνακας Π7.22 Διαμήκεις-εγκάρσιες επί τόπου παραμορφώσεις στον πυθμένα του δυτικού πυρήνα

BOTTOM WEST

	Test	WEST LB	WEST TB
FRONT	1K2	4.8777	1.1253
FRONT	1K3	7.5129	9.6670
FRONT	1K4	7.0253	7.1779
FRONT	1K5	4.2780	3.7493
FRONT	1K6	6.2403	9.4779
FRONT	1K7	7.0253	10.1939
FRONT	1K8	7.0253	10.3320
FRONT	1K9	7.2261	11.1079
FRONT	1K10	7.2261	9.3177
FRONT	2K1	3.7564	1.2446
FRONT	2K2	7.3073	10.6729
FRONT	2K3	7.2139	7.9279
FRONT	2K4	6.3355	8.1667
FRONT	2K5	3.9807	1.7220

FRONT	2K6	3.6069	1.0742
FRONT	2K7	4.6161	1.4322
FRONT	2K8	4.8965	2.6767
FRONT	2K9	3.9246	1.6367
FRONT	2K10	4.2236	1.7440
FRONT	2K11	6.2657	7.8566
BACK	1K2	11.9421	7.9280
BACK	1K3	12.2225	11.8152
BACK	1K4	13.3047	13.6225
BACK	1K5	10.1650	9.8359
BACK	1K6	12.5198	13.0582
BACK	1K7	10.5575	11.6261
BACK	1K8	12.5198	12.1220
BACK	1K9	11.1508	11.4660
BACK	1K10	12.3281	13.2561
BACK	2K1	10.4283	7.6893
BACK	2K2	10.4470	10.3149
BACK	2K3	12.3159	13.6566
BACK	2K4	11.8300	12.8212
BACK	2K5	11.0451	9.9569
BACK	2K6	10.2788	7.5188
BACK	2K7	10.1106	6.0867
BACK	2K8	10.7835	10.9116
BACK	2K9	9.8116	8.4395
BACK	2K10	10.1106	8.8146
BACK	2K11	11.3677	12.5111

