



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ανδρέας Λοΐζος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ
ΦΟΡΗΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΩΝ ΠΗΠΤΟΝΤΟΣ
ΒΑΡΟΥΣ (P.F.W.D.) ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Ζύχος Γεώργιος

Αθήνα, Νοέμβριος 2002

ΣΥΝΟΨΗ:

Διερεύνηση της Δυνατότητας Εφαρμογής των Φορητών Παραμορφωσιμέτρων Πίπτοντος Βάρους (P.F.W.D.) στο πλαίσιο της Δομικής Αξιολόγησης Ασφαλτικών Οδοστρώματων, Ζάχος Γεώργιος, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ανδρέας Λαΐζος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Νοέμβριος 2002

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα χρήσης του φορητού Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους και συγκεκριμένα των συσκευών PFWD (Portable Falling Weight Deflectometers) στον τομέα του ελέγχου και αξιολόγησης οδοστρώματων. Η εργασία επικεντρώνεται κυρίως στον έλεγχο της αξιοπιστίας των δεδομένων που προκύπτουν από τη δοκιμή με τη συγκεκριμένη συσκευή πάνω στην επιφάνεια ασφαλτικών υλικών υφιστάμενων οδοστρώματων και στα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από μια τέτοια δοκιμή, όπως και στον έλεγχο της εγκυρότητας μεθόδων που προτείνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία για την απόκτηση των απαραίτητων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος (μέτρο ελαστικότητας). Γενικά, η διεθνής εμπειρία στην πραγματοποίηση δοκιμών πάνω σε συνδεδεμένα υλικά, όπως το ασφαλτόμειγμα, με τα ελαφριά παραμορφωσιμέτρα είναι αρκετά περιορισμένη, οπότε απαραίτητη ήταν η διεξαγωγή μιας εκτεταμένης επί τόπου έρευνας για τη συλλογή των αναγκαίων στοιχείων. Η έρευνα, τελικά, κατέληξε στον καθορισμό των δεδομένων σκληρών, που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης οδοστρώματος, μέσω δοκιμής με ένα φορητό Π.Π.Β και δίνει το έναυσμα για νέες μελέτες πάνω στο αντικείμενο αυτό.

Λέξεις Κλειδιά: μη καταστρεπτικές δοκιμές, ασπνδετα υλικά, ασφαλτικά, μέτρο ελαστικότητας, παραμόρφωση, αξιοπιστία των μετρήσεων, φορητό παραμορφωσιμέτρο πίπτοντος βάρους

ABSTRACT:

The Possibility of Using a portable Falling Weight Deflectometer (P.F.W.D.) in the Field of the Asphalt Pavement Structural Evaluation, Zachos Georgios, SUPERVISOR: Andreas Laizos, Athens, November 2002

In the present graduation thesis, the issue that is being under research is the possibility of using a Portable Falling Weight Deflectometer, in the field of testing and evaluating the structural capacity of pavements. The research is, mainly, concentrated in evaluating the credibility of the PFWD data that are coming from an on-the-asphalt layer testing and the conclusions that result from a survey like this, such as the inspection of the validity of methods, suggested by the bibliography, for the obtaining the necessary characteristics of a pavement (elasticity modulus). Generally, the international experience in undertaking a light falling weight testing on bound materials, like the asphalt concrete, is very limited, so an in-situ survey has been held in order to collect the necessary database. At the end, the survey concluded to the determination of the data, that could be used in the field of pavement evaluation, through a portable FWD testing, and gives the trigger for more studies concerning this issue.

Key Words: non-destructive tests, unbound materials, asphalt concrete, elasticity modulus, deflection, measurement credibility, portable FWD

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Δομική Αξιολόγηση των Οδοστρωμάτων και Μέθοδοι Επί Τόπου Ελέγχου	7
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Παραμορφωσιακές μέθοδοι	9
2.3 Εξοπλισμός παραμορφωσιακών δοκιμών	10
2.4 Ερμηνεία των παραμορφωσιακών δεδομένων	16
2.5 Σχόλια	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Περιγραφή του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer)	19
3.1 Εισαγωγή	20
3.2 Περιγραφή της συσκευής FWD	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Τα Ελαφρά ή Φορητά Παραμορφωσίμετρα Πίπτοντος Βάρους και Περιγραφή και Χρήση της Συσκευής LOADMAN	30
4.1 Εισαγωγή	31
4.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	32
4.3 Τα ελαφρά (ή φορητά) Παραμορφωσίμετρα Πίπτοντος Βάρους (Light ή Portable FWDs)	36
4.4 Κατασκευή και Λειτουργία της Συσκευής LOADMAN	42
4.5 Σχόλια	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Η Χρήση των P.F.W.D. σε Ασύνδετα και Εδαφικά Υλικά (Unbound Materials)	51
5.1 Εισαγωγή	52
5.2 Αριθμός μετρήσεων ανά σημείο	52

5.3 Συγκριτικός έλεγχος	54
5.4 Σχόλια	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Καθορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας Οδοστρώματος με βάση τη Δοκιμή του Φορητού Παραμορφωσίμετρου Πάπτοντος Βάρους (PFWD)

6.1 Εισαγωγή	68
6.2 Συγκρίσεις με τη δοκιμή Benkelman	69
6.3 Διαδικασία καθορισμού του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p	71
6.4 Διαδικασία υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης χωρίς την αποκόλληση "καρότου"	79
6.5 Σχόλια	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Περιγραφή Επί Τόπου Έρευνας με τη Συσκευή PFWD και Λήψη Συγκριτικών Στοιχείων

7.1 Εισαγωγή	90
7.2 Περιοχές όπου πραγματοποιήθηκε η επί τόπου επισκόπηση	90
7.3 Λεπτομερής έρευνα (detailed survey)	93
7.4 Μετρήσεις με τη συσκευή LOADMAN	96
7.5 Γενικά χαρακτηριστικά	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: Στατιστικός Έλεγχος επί τόπου Μετρήσεων με το PFWD

8.1 Εισαγωγή	102
8.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	102
8.3 Στατιστική Επεξεργασία Δείγματος	106
8.4 Βελτίωση ακρίβειας δείγματος	114
8.5 Υιοθέτηση Τιμών για κάθε Θέση και Σημείο	118

8.6 Παρατηρήσεις και Σχόλια	122
-----------------------------	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: Μέθοδος Καθορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας της Ασφαλτικής Στρώσης με βάση τη Δοκιμή PFWD κατά Moshe Lénneh	127
--	------------

9.1 Εισαγωγή	128
9.2 Ανασκόπηση της μεθόδου και αναφορά κυριότερων σχέσεων	128
9.3 Εφαρμογή της μεθόδου του Lénneh στις μετρήσεις που προέκυψαν από το Ελληνικό Δίκτυο	131
9.4 Συμπεράσματα	133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο: Προσδιορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας Ασφαλτομίγματος μέσω Εργαστηριακής Δοκιμής	135
---	------------

10.1 Εισαγωγή	136
10.2 Μηχανή Δοκιμής Μέτρου Δυσκαμψίας και Παραμενουσών Παραμορφώσεων	136
10.3 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης αντιδιαμετρικής θλίψης - Δοκιμή μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος (Προδιαγραφές: BS DD 213: 1993, ASTM D 4123-82)	141
10.4 Διεξαγωγή της δοκιμής στα δοκίμια που λήφθηκαν κατά την επί τόπου επισκόπηση	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο: Ανάστροφος Υπολογισμός των Μέτρων Ελαστικότητας των Στρώσεων του Οδοστρώματος από τα Λεδομένα της Δοκιμής Πίπτοντος Βάρους	148
--	------------

11.1 Εισαγωγή	149
11.2 Τα δεδομένα του HWD	149
11.3 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)	150

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12^ο: Συγκρίσεις Μεθόδων	155
12.1 Εισαγωγή	156
12.2 Παρουσίαση συγκριτικών δεδομένων	157
12.3 Αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας λόγω θερμοκρασίας	161
12.4 Αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας λόγω χρόνου φόρτισης	163
12.5 Σύγκριση μεθόδων	164
12.6 Σύγκριση μέσων μέτρων ελαστικότητας	172
12.7 Σύγκριση παραμορφώσεων	176
12.8 Σχόλια	179
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13^ο: Διερεύνηση Δυνατότητας Χρήσης των Παραμορφωσιακών Δεδομένων του PFWD για τη Δομική Αξιολόγηση Οδοστρώματος	 181
13.1 Εισαγωγή	182
13.2 Σύγκριση παραμορφώσεων	182
13.3 Σύγκριση του SNP (Δομικός Αριθμός Οδοστρώματος)	189
13.4 Σχόλια	192
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14^ο: Αξιοποίηση των Δυνατοτήτων του PFWD σε Ειδικές Κατασκευές	 194
14.1 Εισαγωγή	195
14.2 Έλεγχος των αποτελεσμάτων	196
14.3 Σχόλια	198
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15^ο: Συμπεράσματα	 201
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 206
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	 210

Ευχαριστώ τους κ.κ. Καθηγητές της σχολής και ειδικά αυτούς του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του οποίου την κατεύθυνση ακολούθησα.

Ευχαριστώ τον κ. Λοίζο για την εποπτεία του στην παρούσα διπλωματική εργασία και για τη βοήθεια και συμπαράσταση που παρείχε όποτε χρειάστηκε.

Ευχαριστώ, τέλος, όλα τα παιδιά του τομέα που βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο, τεχνικό ή μη, στην εκπόνηση της εργασίας αυτής (Παπαβασιλείου Βασίλη, Πλατή Χριστίνα, Σωτηρόπουλο Γιώργο, Χαρωνίτη Γιώργο, Στεργίου Τάσο, Σαμουηλίδη Σάντρα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη στο χώρο των τροχοφόρων μέσων μεταφοράς, η οποία συντελέστηκε κυρίως τον περασμένο αιώνα, αλλά συνεχίζει ακάθεκτη και στο παρόν, επέβαλε την ανάπτυξη και σε αρκετούς άλλους τομείς της τεχνολογίας που έχουν άμεση σχέση με αυτά. Έτσι, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, αλλά σιγά σιγά και στον υπόλοιπο κόσμο, έγινε αναγκαία η κατασκευή σύνθετων οδικών δικτύων, που θα εξασφάλιζαν στα τροχοφόρα οχήματα όλο και περισσότερη ασφάλεια και ταχύτητα κατά τη μεταφορά, όπως, επίσης, θα μετέφεραν τα φορτία τους στο έδαφος χωρίς να το καταστρέφουν.

Για τους παραπάνω λόγους, έπρεπε να δημιουργηθεί μια κατασκευή που θα πρόσφερε και αντοχή στις καταπονήσεις και ασφάλεια στα κινούμενα οχήματα για όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες. Έτσι, δημιουργήθηκαν τα οδοστρώματα, μέχρι να εξελιχθούν στην μορφή που έχουν σήμερα.

Όπως, όμως είναι αυτονόητο, τα οδοστρώματα παθαίνουν φθορές με το πέρασμα του χρόνου, με αποτέλεσμα να χάνουν τις αρχικές ιδιότητές τους. Έτσι, απαιτήθηκε και η ανάπτυξη μιας λογικής με βάση την οποία θα γίνεται η συντήρησή τους (φυσικά η ανακατασκευή σε κάθε περίπτωση θα ήταν ασύμφορη). Επίσης, έπρεπε να βρεθούν τρόποι που να επιτρέπουν τον έλεγχο ενός νέου οδοστρώματος, με σκοπό την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του.

Οι παραπάνω ανάγκες, οδήγησαν στην ανάπτυξη πληθώρας μεθόδων για τους αναγκαίους ελέγχους, από την επί τόπου δειγματοληψία και τις εργαστηριακές δοκιμές, μέχρι την εφεύρεση διάφορων συσκευών, οι οποίες είτε προσομοιώνουν τις καταπονήσεις που επιβάλλει η κυκλοφορία και βγάζουν κάποια συμπεράσματα για τις ιδιότητες του οδοστρώματος, είτε μετρούν κάποια χαρακτηριστικά του και τα συγκρίνουν με κάποιες πρότυπες τιμές.

Ειδικότερα, τα τελευταία 40- 45 χρόνια, μεγάλη προσπάθεια έχει γίνει για την ανάπτυξη μη καταστρεπτικών για το οδόστρωμα δοκιμών και των αντίστοιχων μεθόδων.

Μια από αυτές τις συσκευές, είναι και το Ελαφρό ή Φορητό Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (**Portable/ Light Falling Weight Deflectometer**), το οποίο εμφανίζεται ως η ελαφριά έκδοση μιας δοκιμασμένης και ευρείας χρήσης, στον τομέα της αξιολόγησης των οδοστρωμάτων, συσκευής, το Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (**Falling Weight Deflectometer**). Στα παρακάτω κεφάλαια διερευνάται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η συσκευή PFWD στην αξιολόγηση των ασφαλικών στρώσεων ενός οδοστρώματος. Ο λόγος που οδηγεί στην κατανάλωση χρόνου και κόπου για μια τέτοια διερεύνηση είναι προφανώς τα πλεονεκτήματα που θα προσέφερε μια τέτοια συσκευή στον τομέα της αξιολόγησης, μερικά από τα οποία είναι η ευχρηστία της και η ταχύτητα στην πραγματοποίηση των δοκιμών, αλλά κυρίως το χαμηλό κόστος που απαιτείται για την απόκτησή της, το οποίο την καθιστά προσιτή ακόμη και για μια μικρή μονάδα αξιολόγησης και συντήρησης του οδικού δικτύου, σε αντίθεση με το συμβατικό FWD, το οποίο είναι πολύ ακριβό.

Όλα αυτά, όμως, παρουσιάζονται αναλυτικότερα στα παρακάτω κεφάλαια.

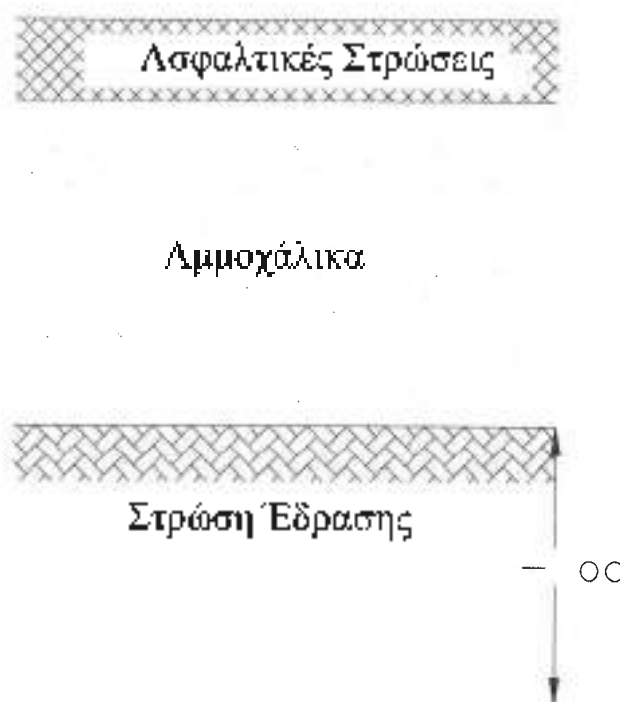
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Δομική Αξιολόγηση των Οδοστρωμάτων και Μέθοδοι Επί Τόπου Ελέγχου

2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, η ανάπτυξη στην κατασκευή των οδικών δικτύων επέβαλλε την παράλληλη ανάπτυξη στις μεθόδους αξιολόγησης τους με σκοπό τόσο τον έλεγχο τους μετά την κατασκευή, όσο και τη διαπίστωση της ύπαρξης αναγκαιότητας για συντήρηση. Η αξιολόγηση ενός οδικού δικτύου περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους, μια από τις οποίες είναι και ο έλεγχος της δομικής κατάστασης (έλεγχος αντοχής) του οδοστρώματος.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου των υλικών, είναι η δημιουργία συνθηκών, παρόμοιων με τις πραγματικές, σε έναν εργαστηριακό χώρο και η επιβολή αυτών των συνθηκών σε ένα δοκίμιο κατασκευασμένο από το υπό έλεγχο υλικό. Στο χώρο των οδοστρωμάτων αυτή η τακτική ενδείκνυται μόνο για τον έλεγχο της τεχνικής της κατασκευής του. Για την περίπτωση ενός ήδη υπάρχοντος οδοστρώματος, παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές δυσκολίες. Καταρχήν το οδόστρωμα είναι μια πολυστρωματική κατασκευή. Για παράδειγμα, ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις ασφαλτικών υλικών και αμμοχάλικων και φυσικά υπάρχει και το έδαφος που συμμετέχει στην υποστήριξη των φορτίων (σχήμα 2.1). Οπότε είναι δύσκολο να μεταφέρουμε τα υλικά στο εργαστήριο, διατηρώντας τη μορφή που έχουν στο εργοτάξιο. Επίσης, ακόμη και όταν αυτό είναι δυνατό (π.χ. λήψη πυρήνα ασφαλτομίγματος), απαιτείται καταστροφή ενός τμήματος της οδού. Τέλος, οι συνθήκες του εργαστηρίου, δεν είναι εύκολο να προσομοιάσουν τις πραγματικές.



Σχήμα 2.1. Τυπική δομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Για τους λόγους αυτούς, γεννήθηκε η ιδέα της ανάπτυξης επί τόπου μεθόδων αξιολόγησης του οδοστρώματος. Έτσι, τα τελευταία 40 χρόνια, κατασκευάστηκαν πολλές συσκευές που βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Μερικές από τις παλιότερες μεθόδους περιλαμβάνουν βαρείς δονητές, φορτία τροχού φορτηγού (π.χ. ράβδος Benkelman, παραμορφωσιογράφος Lacroix), στατική φόρτιση πλάκας, παραμορφωσίμετρα πίπτοντος βάρους κτλ. Οι νεότερες μέθοδοι περιλαμβάνουν παραμορφωσίμετρα μεγάλης ταχύτητας και τα ελαφρά παραμορφωσίμετρα.

2.2 Παραμορφωσιακές μέθοδοι

Η ιδέα της χρήσης των παραμορφωσιακών δεδομένων στην αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των οδοστρώματων, χρονολογείται στο πρώτο μισό του περασμένου αιώνα (τουλάχιστο το 1938) όταν το τμήμα αυτοκινητοδρόμων της California (California Division of Highways) χρησιμοποίησε ηλεκτρικά όργανα

εμφυτευμένα σε οδοστρώματα, με σκοπό τη μέτρηση παραμορφώσεων κατά τη διάλυση φορτηγών[1]. Έπειτα, η δοκιμή φόρτισης πλάκας χρησιμοποιήθηκε από τον Τομέα Μεταφορών του Καναδά από τα μέσα της δεκαετίας του 1940[2], ενώ η ράβδος Benkelman εισήχθηκε στα τέλη της ίδιας δεκαετίας και χρησιμοποιείται ακόμη σε ορισμένες περιφέρειες. Βασισμένες στις ίδιες αρχές, αναπτύχθηκαν και άλλες συσκευές μέτρησης παραμορφώσεων εξαιτίας ημιστατικού φορτίου, οι οποίες μεταφέρονταν πιο εύκολα.

Οι συσκευές μέτρησης παραμορφώσεων εξαιτίας δυναμικού φορτίου εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Οι πρώτες συσκευές χρησιμοποιούσαν ένα παλμικό φορτίο που επιβαλλόταν πάνω σε ένα ήδη υπάρχον στατικό. Τα παραμορφωσίμετρα πύπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometers) αποτέλεσαν την επόμενη γενιά δυναμικού εξοπλισμού και χρησιμοποίησαν ένα μόνο παλμικό φορτίο. Τέλος, υπό ανάπτυξη βρίσκονται συσκευές που μετρούν την παραμόρφωση κάτω από ένα κυλιόμενο φορτίο[3].

2.3 Εξοπλισμός παραμορφωσιακών δοκιμών

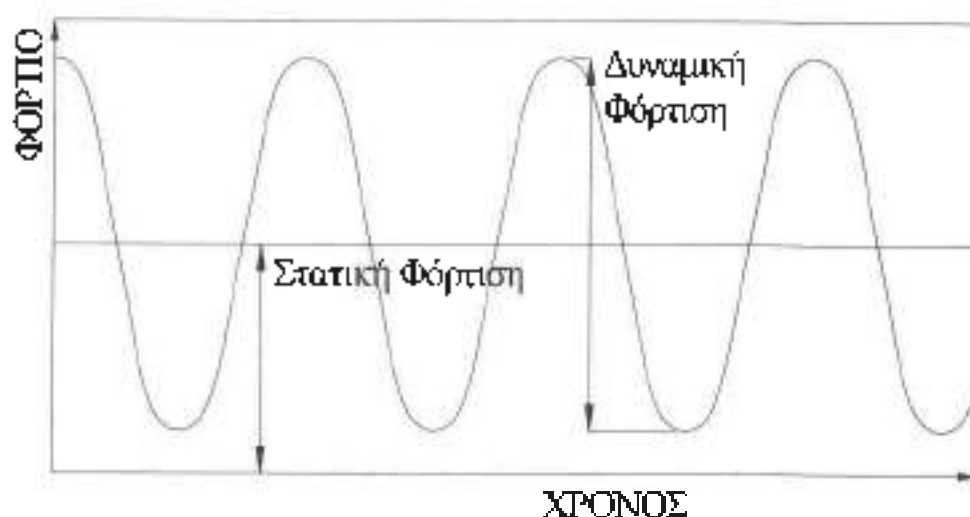
- Παραμορφωσίμετρα Πύπτοντος Βάρους (FWD)

Οι συσκευές αυτής της κατηγορίας ορίζονται από τους Smith & Lytton[4] ως αυτές που «επιβάλλουν ένα προσωρινό δυναμικό καλμό στην επιφάνεια του οδοστρώματος». Τα FWD έχουν εξελιχθεί τόσο, που αποτελούν σήμερα τον πιο συνηθισμένο εξοπλισμό ελέγχου. Στη διεθνή βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πολλές περιγραφές διαφορετικών ειδών FWD[3]. Γενικά, όλα τα FWD είναι ρυμουλκούμενες συσκευές που μεταφέρονται από ελαφρά φορτηγά έως και από επιβατικά αυτοκίνητα. Όπως, υπονοεί και η ονομασία τους, τα FWD επιβάλλουν τη φόρτιση, που προκαλεί την παραμόρφωση στην επιφάνεια του οδοστρώματος, αφήνοντας ένα συγκεκριμένο βάρος να πέσει από ένα

συγκεκριμένο ύψος σε μια πλάκα στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το FWD περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

- Δυναμικές Συσκευές Σταθερής Κατάστασης

Αυτού του είδους οι συσκευές ορίζονται ως εκείνες που παράγουν «μια αρμονική δόνηση στο οδόστρωμα χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια δυναμικής φόρτισης[4]». Σε αυτό το είδος εξοπλισμού, η δυναμική φόρτιση επιβάλλεται πάνω σε ένα στατικό φορτίο (σχήμα 2.2). Για να παραμείνει η συσκευή σε επαφή με την οδική επιφάνεια, το στατικό φορτίο πρέπει να είναι τουλάχιστο διπλάσιο αυτού της δυναμικής φόρτισης. Η χρήση μεγάλου στατικού φορτίου, όμως, έχει ως αποτέλεσμα μια πιο δύσκαμπτη απόκριση από το οδόστρωμα με την παρουσία μη γραμμικών υλικών[3]. Και σε αυτή την περίπτωση ο εξοπλισμός είναι ρυμουλκούμενος.

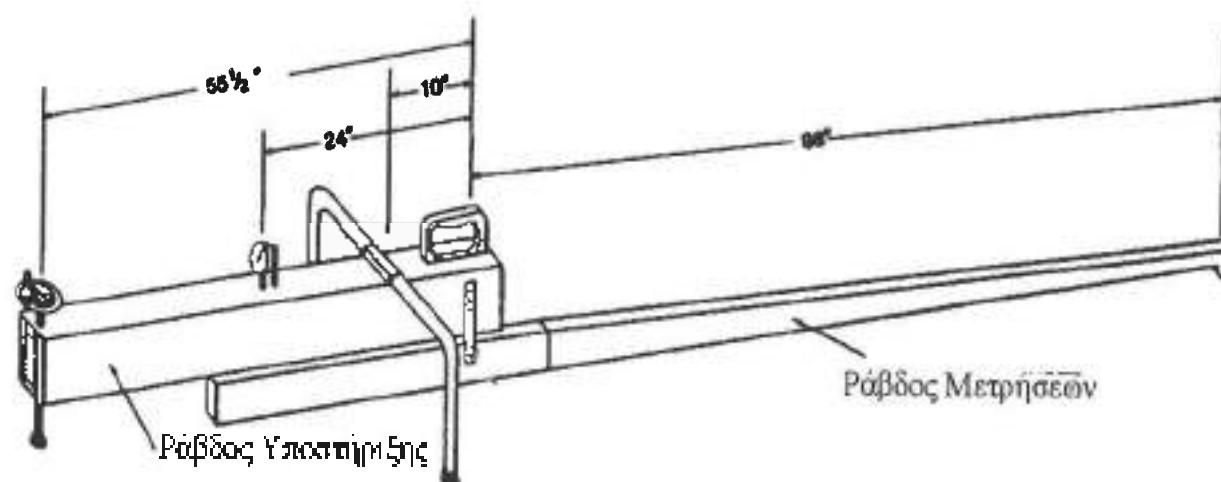


Σχήμα 2.2: Σχέση χρόνου – φόρτισης στη στατική σταθερή κατάσταση[3]

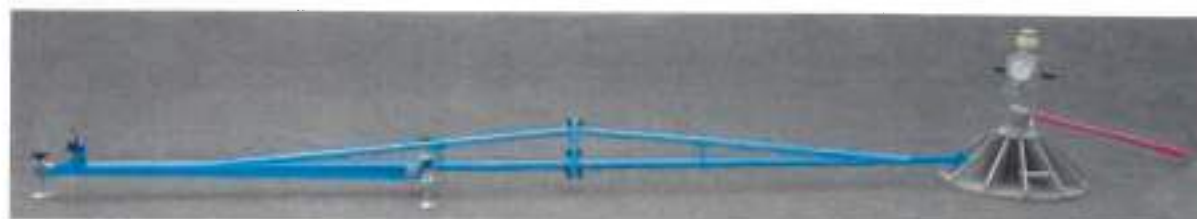
- Ημιστατικές Συσκευές

Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται συσκευές που επιβάλλουν ένα αργό κυλιόμενο φορτίο και μετρούν την παραμόρφωση που αυτό προκαλεί.

Συνήθως, μπορούν να μετρήσουν μόνο τη μέγιστη παραμόρφωση και γι' αυτό με τη χρήση τους είναι δυνατό να αποκτηθεί μόνο μια ιδέα της πραγματικής δομικής κατάστασης του οδοστρώματος[3]. Τέτοιου είδους συσκευές είναι η ράβδος Benkelman (σχήματα 2.3, 2.4, 2.5) και ο παραμορφασιογράφος Lacroix (σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα Ράβδου Benkelman[3]



Σχήμα 2.4: Ράβδος Benkelman

(www.cebt.fr/vente/benkelman/benkelman_us.html)



Σχήμα 2.5: Χρήση της Ράβδου Benkelman
(www.cedex.fr/vente/benkelman/benkelman_us.htm)



Σχήμα 2.6: Ο παριμορφωσιογράφος Lacroix
(www.cedex.es/cec/documenti/survey.htm#lacroix)

- Φορτιζόμενη Πλάκα (Στατικές Συσκευές)

Η δοκιμή φόρτισης πλάκας (σχήμα 2.7) χρησιμοποιείται για τον άμεσο υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Ως μέθοδος είναι χρονοβόρα και απαιτεί έντονη εργασία, γι' αυτό δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν πολλές δοκιμές σε ένα δεδομένο τμήμα οδού[3].



Σχήμα 2.7: Εξοπλισμός δοκιμής Φόρτισης Πλάκας
(www.mbt.co.id/equipment/so-250a.html)

- Παραμορφωσίμετρα Υψηλής Ταχύτητας

Τα παραμορφωσίμετρα υψηλής ταχύτητα ορίζονται ως όργανα ικανά να μετρήσουν παραμορφώσεις, ενώ βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση σε αντίθεση με το FWD που απαιτεί στάση κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής. Τα πλεονεκτήματα τέτοιου είδους συσκευών στους τομείς της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και της ποσότητας των πληροφοριών είναι προφανή. Παρόλα αυτά, είναι εμφανής μια αυξανόμενη πολυπλοκότητα τόσο του τρόπου διεξαγωγής των μετρήσεων, όσο και της ερμηνείας τους. Τέτοιες συσκευές, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι το Γαλλικό Καμπυλώμετρο και το Παραμορφωσίμετρο Κυλιόμενου Βάρους (Rolling Weight Deflectometer – USA (σχήματα 2.8, 2.9), Road Deflection Tester – Sweden)[3].



*Σχήμα 2.8: Rolling Weight Deflectometer
(www.aepo.es/ausc/equip/fwdkf.htm)*



*Σχήμα 2.9: Rolling Weight Deflectometer
(www.aepo.es/ausc/equip/fwdkf.htm)*

- *Ελαφρά Παραμορφωσίμετρα*

Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται οι συσκευές που επιβάλλουν ελαφρά παλμικά ή αρμονικά φορτία στο οδόστρωμα ή στο έδαφος και μετρούν και αναλύουν την ανταπόκριση χρησιμοποιώντας την ταχύτητα των παλμικών κυμάτων. Η ανάλυση κυμαίνεται από απλή εξέταση της διασποράς των

παραμορφώσεων έως σύνθετο καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας ενός ή περισσοτέρων στρώσεων του οδοστρώματος[3]. Τέτοιες συσκευές είναι τα Clegg Impact Soil Tester, Humboldt Stiffness Gauge και το Φινλανδικό *LOADMAN*, το οποίο θα περιγραφεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

2.4 Ερμηνεία των παραμορφωσιακών δεδομένων[3]

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την ερμηνεία των παραπάνω δοκιμών είναι οι εξής:

- *Η μέγιστη παραμόρφωση*

Η παραμόρφωση στο κέντρο του φορτίου αντιπροσωπεύει την συνολική παραμόρφωση του οδοστρώματος και γι' αυτό είναι ενδεικτική της συνολικής δυσκαμψίας του συμπεριλαμβανομένης και της στρώσης έδρασης.

- *Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης*

Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης υπολογίζεται άμεσα χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις που αφορούν περιοχές έξω από την επιρροή του οδοστρώματος.

- *Η παράμετρος «AREA»*

Η παράμετρος αυτή εισήχθηκε από ερευνητές στο πανεπιστήμιο του illinois ως μέσο ποσοτικοποίησης της σχετικής δυσκαμψίας του οδοστρώματος. Υπολογίζεται από τη σχέση

$$"AREA" = 6 \times \left(1 + \frac{2D_1}{D_s} + \frac{2D_2}{D_s} + \frac{D_3}{D_s} \right)$$

όπου D_1 , D_2 , D_3 παραμορφώσεις σε καθορισμένες αποστάσεις από το κέντρο του φορτίου.

- Το δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας

Ο δείκτης αυτός ισούται με τη διαφορά της μέγιστης παραμόρφωσης με την παραμόρφωση σε καθορισμένη απόσταση από το κέντρο του φορτίου. Χρησιμοποιείται ως ένδειξη της σχετικής δυσκαμψίας των συνδεδεμένων (bound) στρώσεων του οδοστρώματος.

- Το μέτρο της απόκρισης της στρώσης έδρασης

- Ανάστροφα υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων

Γενικά, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος. Στη συγκεκριμένη μελέτη η μέθοδος που χρησιμοποιείται περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

2.5 Σχόλια

Στο παρόν κεφάλαιο διαπιστώνεται η ύπαρξη πληθώρας επιλογών, όσων αφορά την επί τόπου διεξαγωγή δοκιμών σε ένα οδόστρωμα, η κάθε μια με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η τελική επιλογή είναι ένας συνδυασμός οικονομικών, τεχνολογικών και χρονικών παραγόντων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Περιγραφή του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer)

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία 40-45 χρόνια έχει αφιερωθεί πολλή προσπάθεια στην ανάπτυξη μη καταστρεπτικών μεθόδων εκτίμησης της κατάστασης των οδοστρωμάτων και ως αποτέλεσμα αναπτύχθηκαν αρκετές συσκευές δοκιμών και οι αντίστοιχες αναλυτικές διαδικασίες υπολογισμού. Σαν παράδειγμα αναφέρονται οι βαριοί δονητές, η δοκιμή με τη ράβδο Benkelman ή με το παραμορφωσίμετρο Lacroix και οι διάφορες δοκιμές φόρτισης πλάκας.

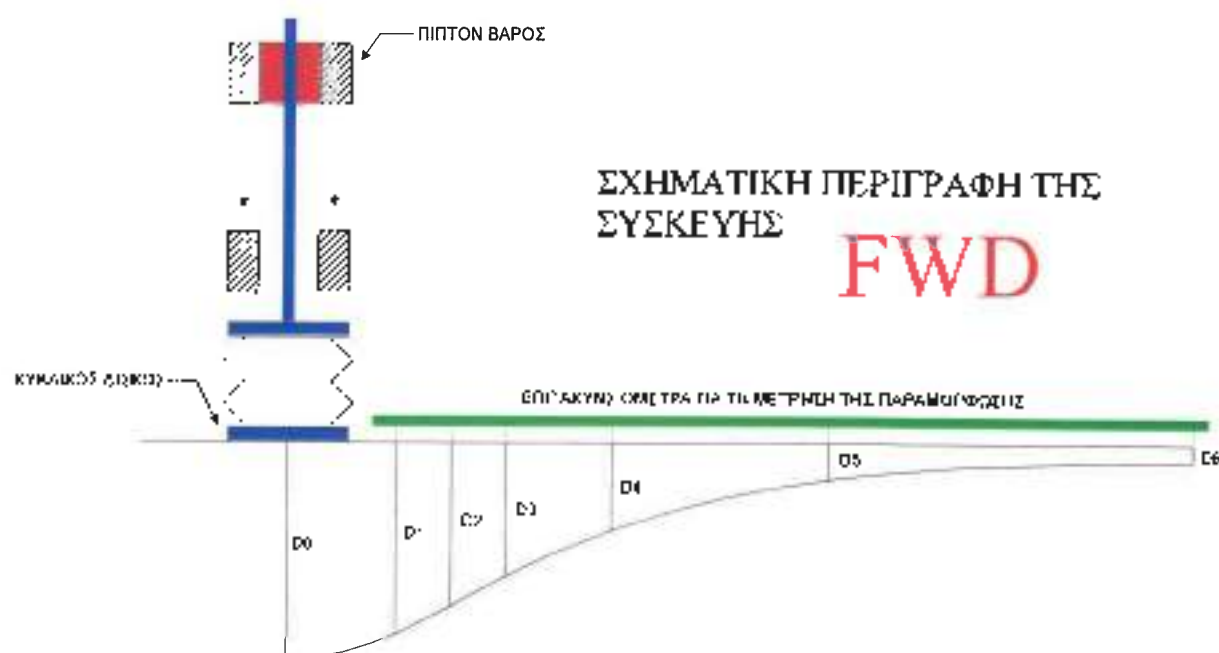
Οι παραπάνω διαδικασίες παρέχουν στο μελετητή τα παραμορφωσιακά δεδομένα του υπό επισκόπηση οδοστρώματος και στη συνέχεια προκύπτουν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Συχνά οι παραμορφώσεις χρησιμοποιούνται κατευθείαν ως μέτρο της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, είτε από μόνες τους, είτε ως ο λόγος του εφαρμοζόμενου φορτίου προς τη μέγιστη ή την ελαστική παραμόρφωση (δυσκαμψία). Η χρήση της παραμόρφωσης ή της δυσκαμψίας ως μέτρο της δομικής κατάστασης οδοστρώματος είναι ως μέθοδος αρκετά αμφιλεγόμενη. Έχει αποδειχθεί ότι τα παραμορφωσιακά κριτήρια είναι ασύμβατα με τα κριτήρια των τάσεων^[3]. Έτσι, αν η διαδικασία σχεδιασμού βασίζεται σε κρίσιμες τάσεις (θλίψη ή σφελκυσμός) στις διάφορες στρώσεις (το οποίο συμβαίνει σε όλες τις γνωστές αναλυτικές ή εμπειρικές μεθόδους), τότε η ολική παραμόρφωση ή δυσκαμψία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την αξιολόγηση του οδοστρώματος.

Ο «κανονικός» τρόπος αξιολόγησης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι ο καθορισμός του μέτρου ελαστικότητας της κάθε στρώσης του και έπειτα η χρήση του για των υπολογισμό των κρίσιμων τάσεων κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες ή καταστάσεις φόρτισης.

Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ανάλυσης των παραμορφωσιακών δεδομένων. Παρόλα αυτά, αν αυτή η διαδικασία χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες δοκιμές, προκύπτουν διάφορα προβλήματα. Για παράδειγμα, τα μεγέθη των τάσεων που επιβάλλονται από τους δονητές είναι μόνο ένα κλάσμα των αντίστοιχων μεγεθών της πραγματικής βαρέας κυκλοφορίας, γι' αυτό το προκύπτον μέτρο ελαστικότητας αποκλίνει σημαντικά από αυτό που ανταποκρίνεται στις συνθήκες σχεδιασμού. Επί προσθέτως, χρησιμοποιώντας μια δόνηση σταθερής συχνότητας μπορούν να προκληθούν προβλήματα με τις αδρανειακές επιδράσεις. Αντίστοιχα, με τη φόρτιση βαρέος τροχού όπως χρησιμοποιείται στη δοκιμή παραμορφωσιμέτρου Lacoix, ενώ μπορεί να αναπαραχθεί η σωστή τάση, το πρόβλημα είναι η ακριβής μέτρηση της παραμόρφωσης, ειδικά σε κάποια απόσταση από τη φόρτιση, στην οποία ένα λάθος θα μπορούσε να προκαλέσει μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Επίσης, η ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική ταχύτητα κυκλοφορίας. Η διαφορά στο χρόνο φόρτισης, φυσικά, επηρεάζει την αντίδραση ενός βισκοελαστικού υλικού σαν την ασφάλτο. Τα ίδια προβλήματα συναντώνται και στη δοκιμή φόρτισης πλάκας[6].

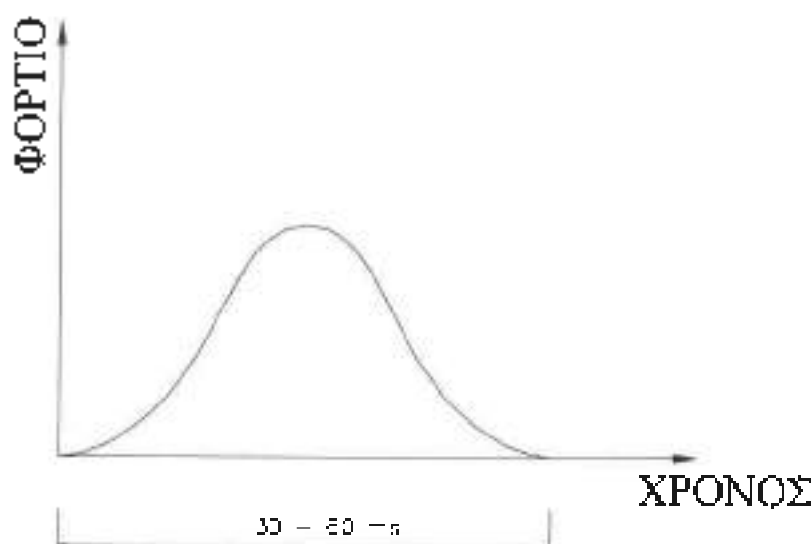
Όλα αυτά τα προβλήματα φαίνεται να ξεπερνιούνται με μια δυναμική δοκιμή φόρτισης πλάκας, όπως το παραδοσιακό Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντας Βάρους (FWD). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι κατά κύριο λόγο η διερεύνηση των δυνατοτήτων του Φορητού FWD, το οποίο βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του συμβατικού FWD, οπότε η καλύτερη κατανόηση του θέματος επιβάλλει μια περιγραφή της συμβατικής συσκευής.

3.2 Περιγραφή της συσκευής FWD



Σχήμα 3.1: Σκαρίφημα του συμβατικού FWD[7]

Η συσκευή FWD αποτελείται από ένα βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας (σχήμα 3.1). Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε ειδικά σχεδιασμένες επιφάνειες και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή επιβάλλει στο οδόστρωμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 30 - 60 ms (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει πολύ καλά την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός άξονα σχήματος (ή φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 ms). Η αξιόλογη αυτή προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των συσκευών που έχει ως αποτέλεσμα την ευρεία εφαρμογή τους διεθνώς[7].



Σχήμα 3.2[7]

Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί από το FWD είναι ίση με:

$$F = \sqrt{2Mghk} \quad (3.1)[3]$$

όπου M: η μάζα που αφήνεται να πέσει

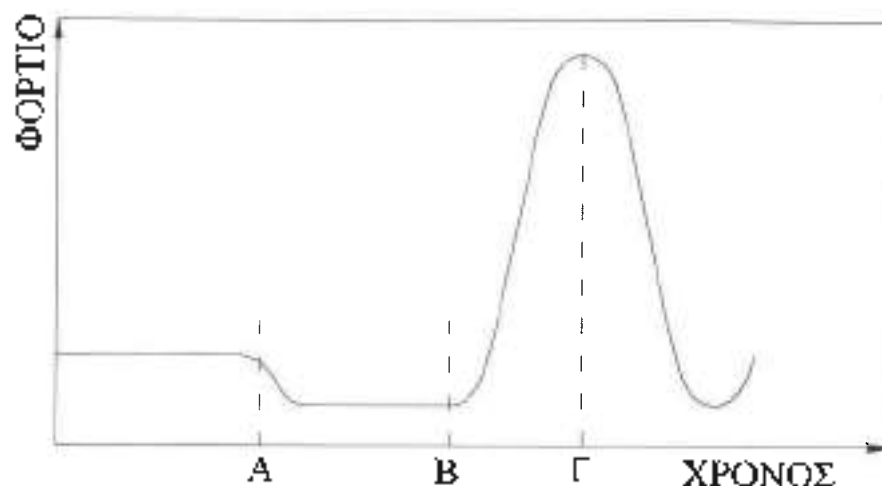
g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

h: το ύψος πτώσης

k: σταθερά που εξαρτάται από την παραμόρφωση.

Όπως είναι προφανές, η δύναμη μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας κάποιον από τους παράγοντες της εξίσωσης (3.1). Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η μεταβολή του ύψους πτώσης.

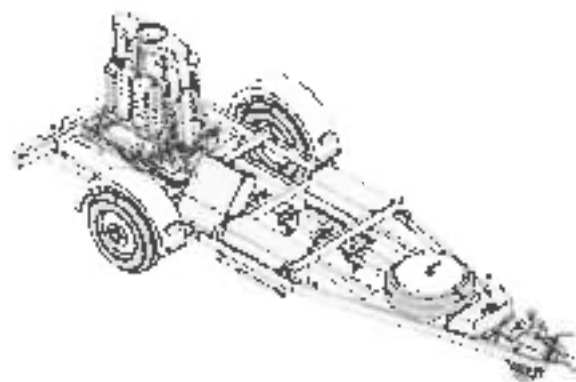
Ένα μικρό μειονέκτημα της συσκευής, είναι ότι δεν μπορεί να αποφευχθεί ένα μικρό στατικό φορτίο που επιβάλλει στο σημείο μέτρησης, έτσι ώστε η πλάκα να έχει πλήρη επαφή. Το γεγονός αυτό έχει κάποια επίπτωση στα αποτελέσματα. Όπως, όμως, δείχνει το σχήμα 3.3, το στατικό αυτό φορτίο είναι αμελητέο σε σχέση με το δυναμικό που προκαλείται, έτσι και η επίπτωση στα τελικά αποτελέσματα είναι αμελητέα.



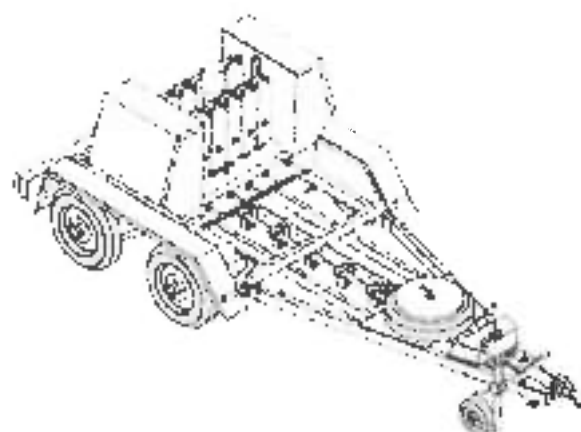
- A: Χρόνος που το πίπτον βάρος απελευθερώνεται
B: Χρόνος που το βάρος αποκτά επαφή με την πλάκα
Γ: Χρόνος που εκδηλώνεται το μέγιστο φορτίο

Σχήμα 3.3: Σχέση στατικού – δυναμικού φορτίου στο FWD[3]

Η δύναμη που παράγεται από έναν κανονικό τύπο FWD (σχήμα 3.4) για εργασίες σε αυτοκινητόδρομο κυμαίνεται ανάμεσα στα 4 και στα 107kN, αν και υπάρχει μια βαρύτερη έκδοσή του, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στις μετρήσεις της παρούσας μελέτης, το βαρύ παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (**Heavy Weight Deflectometer** - Σχήμα 3.5), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε οδοστρώματα αεροδρομίων, αλλά και σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα, με δύναμη που φτάνει τα 245kN[3].



Σχήμα 3.4: Συμβατικός τύπος FWD (σκαρίφημα)
(www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm)



Σχήμα 3.5: Heavy Weight Deflectometer (σκαρίφημα)
(www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm)

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις D_0 , κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό (εξαρτάται από τη συσκευή)- (σχήμα 3.1).

Έχοντας έτσι τις μετρημένες υπό τη συσκευή ελαστικές υποχωρήσεις σε μια διατομή του οδοστρώματος, τα πάχη των στρώσεων από την σχετική επί τόπου λήψη πυρήνων (καρότων) καθώς και τις τιμές του λόγου του Poisson κάθε στρώσης, υπολογίζουμε (ανάστροφος υπολογισμός) τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων και κατά συνέπεια τη φέρουσα ικανότητα του

οδοστρώματος στη συγκεκριμένη διατομή, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό[7].

Ακολουθούν ορισμένες φωτογραφίες από διάφορους τύπους FWD και από επί τόπου μετρήσεις με τη συσκευή.



*Σχήμα 3.4: Πλάκα Φόρτισης
(Φωτογραφία από τις επί τόπου μετρήσεις – Κεφάλαιο 7^ο)*



Σχήμα 3.5: Το Falling Weight Deflectometer Dynatest 8002
(www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm)



Σχήμα 3.6: Ρυμούλκηση ενός συμβατικού FWD
(www.wsdot.wa.gov/biz/mats/pavement/fwd.htm)



Σχήμα 3.7: FWD τύπου ΚΥΑΒ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Τα Ελαφρά ή Φορητά Παραμορφωσίμετρα Πίπτοντος Βάρους και Περιγραφή και Χρήση της Συσκευής *LOADMAN*

4.1 Εισαγωγή

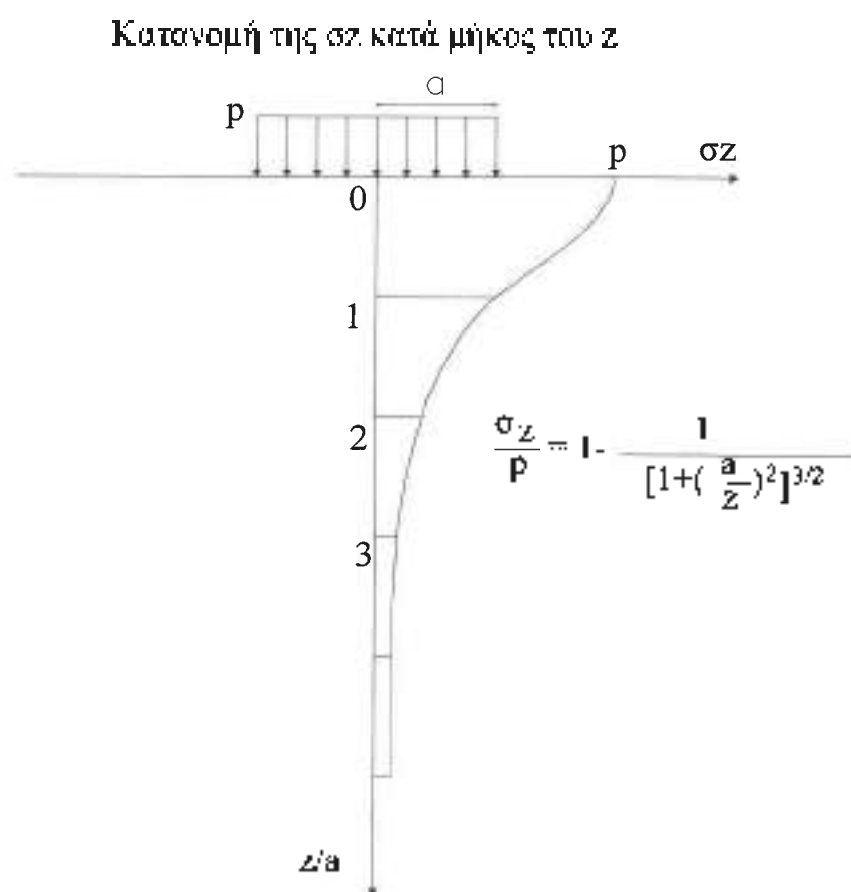
Τα τελευταία χρόνια έχει λάβει χώρα μια πολύ σημαντική εξέλιξη στο χώρο των FWD, τα οποία φαίνεται να λύνουν πολλά από τα προβλήματα στον τομέα της αξιολόγησης και του ελέγχου των οδοστρωμάτων. Είναι αρκετά γρήγορα, οπότε μπορούν να πραγματοποιηθούν πολλές δοκιμές σε λίγο χρόνο, με αποτέλεσμα να προσφέρουν τη δυνατότητα να αξιολογούνται ολόκληρα οδικά δίκτυα περιοχών σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης, η εξέλιξη στις μεθόδους ανάλυσης των παραμορφωσιακών δεδομένων τα έχει καταστήσει αξιόπιστα. Η καταπόνηση που επιβάλλουν στο οδόστρωμα πλησιάζει πολύ τις καταπονήσεις που επιβάλλουν τα φορτία της κυκλοφορίας, πράγμα που βοηθάει κι άλλο στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τέλος, η διαδικασία της δοκιμής είναι απόλυτα αυτοματοποιημένη και δεν απαιτεί την απασχόληση αρκετών ατόμων, αλλά αρκούν δύο ή ακόμη και ένας για την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Βέβαια, τα μειονεκτήματα δε λείπουν τα οποία είναι κυρίως οικονομικής φύσης. Οι οικονομικές και τεχνολογικές απαιτήσεις για την απόκτηση και συντήρηση ενός FWD είναι μεγάλες. Έτσι δεν μπορεί να το αποκτήσει η κάθε μονάδα αξιολόγησης οδοστρωμάτων. Για παράδειγμα στην Ελλάδα υπάρχουν μόνο δύο τέτοιες συσκευές και η μία είναι πρακτικά λειτουργική και σύγχρονη. Αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο ο αριθμός τους είναι περιορισμένος. Οπότε η χρήση τους περιορίζεται κυρίως σε σημαντικά οδικά δίκτυα. Επίσης, δεν πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός ότι είναι ρυμουλκούμενες συσκευές, δηλαδή η πρόσβασή τους περιορίζεται σε σημεία τα οποία είναι προσπελάσιμα από τα οχήματα που τα ρυμουλκούν. Όταν πρόκειται για δοκιμές επί της ασφαλικής στρώσης δεν υπάρχει πρόβλημα. Τι γίνεται, όμως, όταν χρειαστεί να γίνει έλεγχος σε βάσεις, υποβάσεις ή ακόμα χειρότερα στη στρώση έδρυσης;

Με το παραπάνω σκεπτικό, σχετικά πρόσφατα, κατασκευάστηκε μια γενιά ελαφρών συσκευών που βασίζονται στην αρχή του FWD, οι οποίες όμως έχουν πολύ μικρότερο βάρος και μπορούν να μεταφερθούν με τη μυϊκή δύναμη ενός ατόμου.

4.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο [8]

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων κάτω από ένα συγκεντρωμένο φορτίο σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο παίρνει τη μορφή που περιγράφεται (για κυκλικό φορτίο) παραστατικά στο σχήμα 4.1. Η μέγιστη τάση παρατηρείται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο περνώντας από το σημείο που ασκείται το φορτίο (ή από το κέντρο του κυκλικού φορτίου του σχήματος). Η τάση μηδενίζεται θεωρητικά σε άπειρο βάθος, αλλά για πρακτικούς λόγους σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι μηδενίζεται σε πεπερασμένο βάθος, αφού ουσιαστικά η επιρροή της είναι αμελητέα από ένα βάθος και μετά.



Σχήμα 4.1 [8]

Το 1885 ο J. V. Boussinesq ανέπτυξε κάποιες θεωρητικές εκφράσεις για τον καθορισμό των τάσεων σε ένα σημείο (στοιχειώδους μάζας) εξαιτίας επιφανειακών σημειακών φορτίων (σχήμα 4.2). Οι εκφράσεις αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι το έδαφος είναι ένας ελαστικός, ισότροπος και ομογενής ημιχώρος. Πιο αναλυτικά, η *θεωρία του Boussinesq*, καθορίζει κάποιες εξισώσεις που υπολογίζουν τις τάσεις σε στοιχειώδεις μάζες. Οι εξισώσεις ισχύουν για υλικά που υπακούνε στο *νόμο του Hooke*, δηλαδή ισχύει:

$$\sigma = E \times \delta ,$$

όπου σ : τάση

E : μέτρο ελαστικότητας

δ : παραμόρφωση

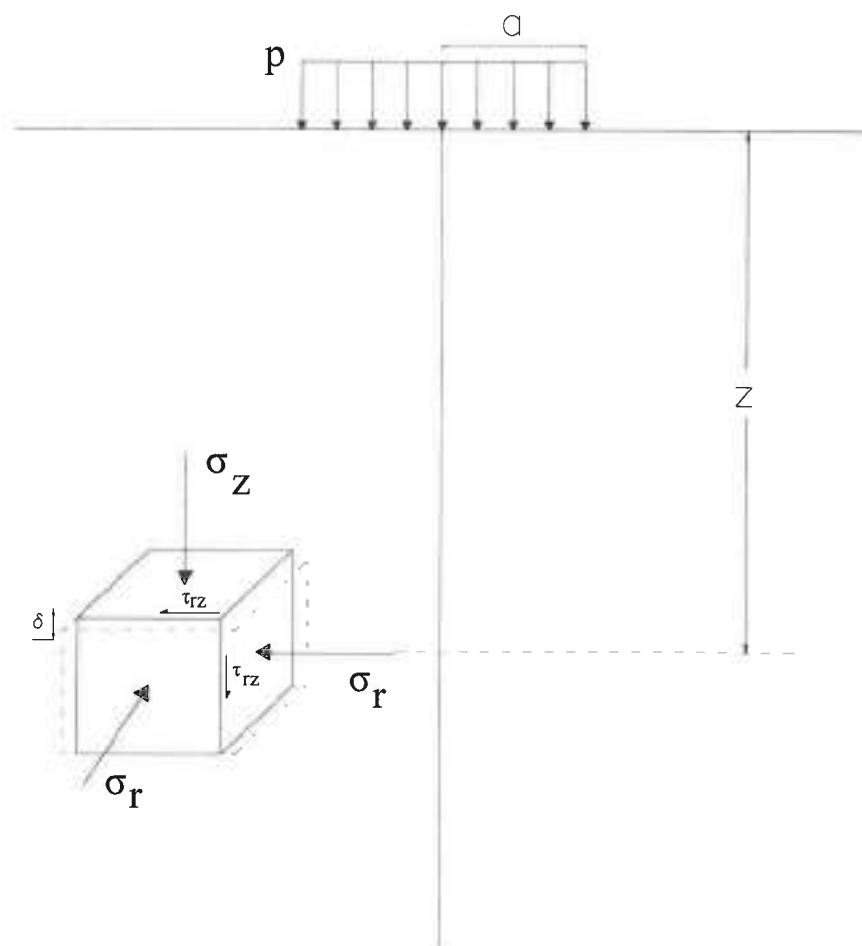
Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Boussinesq, η κατακόρυφη τάση σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους εξαιτίας ενός σημειακού επιφανειακού φορτίου, είναι:

$$\sigma_z = k \times \frac{p}{z^2} \quad (4.1),$$

$$\text{με } k = \frac{3}{2\pi} \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (4.2),$$

όπου r : η ακτινική απόσταση από το σημειακό φορτίο

z : το βάθος



Σχήμα 4.2: Τάσεις που δρουν σε μια στοιχειώδη μάζα υπό επιφανειακό ομοιόμορφο κυκλικό φορτίο[8]

Με σκοπό να προκύψει η κατακόρυφη τάση στον κατακόρυφο άξονα που περνάει από το κέντρο κυκλικού ομοιόμορφου φορτίου (η οποία είναι και η περίπτωση που ενδιαφέρει περισσότερο όσον αφορά την παρούσα μελέτη), η παραπάνω εξίσωση ολοκληρώνεται και γίνεται:

$$\sigma_z = p \times \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (4.3),$$

όπου p : το φορτίο

z : το βάθος

a : η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης

Η οριζόντια τάση δίνεται από τη σχέση:

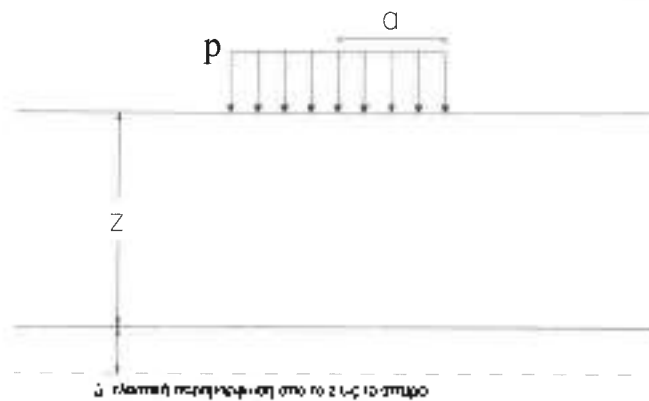
$$\sigma_r = \frac{p}{2} \times \left[1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (4.4), \text{ με } \nu \text{ το λόγο του Poisson.}$$

Αντίστοιχα, όταν είναι γνωστές οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις, η ελαστική παραμόρφωση εξαιτίας τριαξονικής φόρτισης κάτω από το μέσο της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης είναι:

$$\delta = \frac{1}{E} \times (\sigma_z - 2\nu\sigma_r) \quad (4.5).$$

Αντικαθιστώντας τα σ_z και σ_r στην παραπάνω σχέση, ολοκληρώνοντας από $z=0$ ως $z=\infty$ και θεωρώντας ότι $\nu=0,5$ (δηλαδή υποθέτοντας ότι ο όγκος του υλικού δεν αλλάζει κατά την παραμόρφωση), παίρνω την ελαστική παραμόρφωση του υλικού από βάθος z ως το άπειρο:

$$\Delta = \frac{3pa^3}{2E\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (4.6) - (\text{σχήμα 4.3}).$$



Σχήμα 4.3: Παραδοχές ολοκλήρωσης[6]

Οι παραμορφώσεις, σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, είναι ελαστικές και οφείλονται σε μια υποχωρούσα στρώση έδρασης κάτω από μια βασική στρώση. Για $z=0$ λαμβάνεται:

$$\Delta = 1.5 \times \frac{Pa}{E} \quad (4.7).$$

4.3 Τα ελαφρά (ή φορητά) Παραμορφωσίμετρα Πέπτοντος Βάρους (*Light ή Portable FWDs*)

Βασισμένα στις παραπάνω αρχές και παραδοχές της Μηχανικής και της Εδαφομηχανικής αλλά και στον τρόπο λειτουργίας του FWD κατασκευάστηκαν τα φορητά FWD. Σήμερα υπάρχει μια πορεία ποικιλία τέτοιων συσκευών, μερικές από τις οποίες αναφέρονται στο 2^ο Κεφάλαιο. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται μερικές από αυτές ακολούθως.

- Η Κρουστική Σφύρα Ελέγχου Εδαφών (*Clegg Impact Soil Tester*)

Η συσκευή αυτή αποτελείται από μια σφύρα 4,5kg που συγκρατείται σε ύψος 450mm μέσα σε ένα πλαστικό κύλινδρο (σχήμα 4.4). Ο κύλινδρος έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους και το βάρος ελευθερώνεται. Η επιβράδυνση της σφύρας μετριέται από τη στιγμή της επαφής και μετατρέπεται αμέσως στην αποκαλούμενη Τιμή Κρούσης Σφύρας (*Clegg Impact Value*).

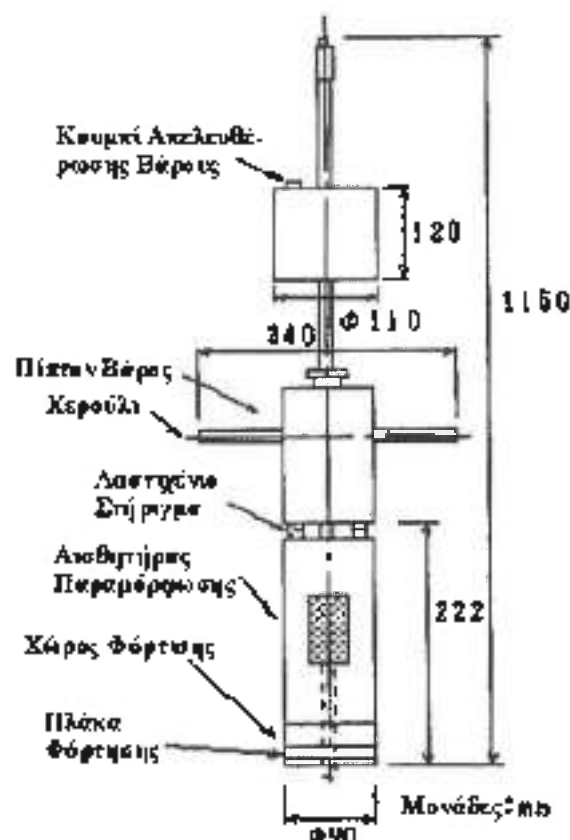
Αυτή η τιμή, έπειτα, μπορεί να σχετιστεί με άλλες παραμέτρους όπως το CBR (California Bearing Ratio), το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ή τη σχετική πυκνότητα[3].



Σχήμα 4.4: Η συσκευή CIST και η χρήση της
(<http://www.licmef.com/clegg.htm>)

- Το «Εύχρηστο» (Handy) FWD (HFWD) [9]

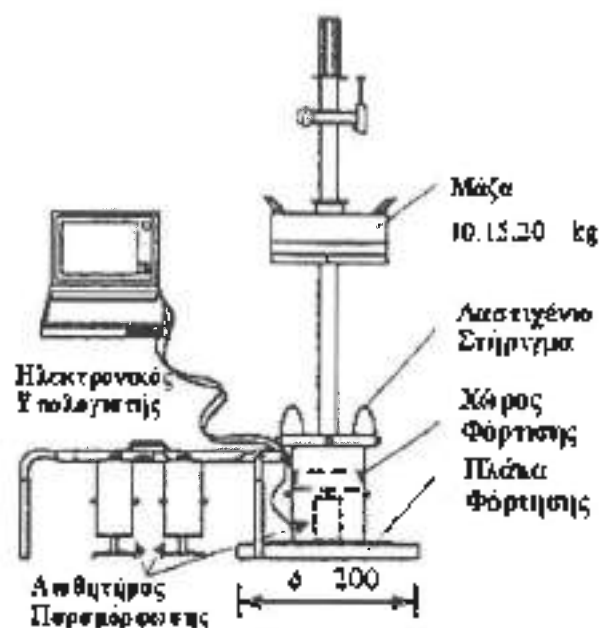
Στο HFWD υπάρχουν τρεις επιλογές πέπτοντος βάρους: 8, 10 και 15kg, και τρεις επιλογές διαμέτρου φορτιζόμενης πλάκας: 90, 200 και 300mm. Η παραμόρφωση υπολογίζεται από τη μετακίνηση της ράβδου – οδηγού που είναι τοποθετημένη στο μέσο της πλάκας φόρτισης. Όλα φαίνονται παραστατικά στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Σκαρίφημα του HFWD[9]

- Η συσκευή *PRIMA 100*[10]

Η συσκευή αυτή είναι σχετικά νέα στην αγορά. Ζυγίζει 26kg συνολικά, συμπεριλαμβανομένης της μάζας 10kg που χρησιμεύει ως πίπτον βάρους. Ο παλμός φόρτισης που παράγει είναι χρονικής διάρκειας 15-20ms. Η δύναμη που ασκεί κυμαίνεται στα 1-15kN, δηλαδή τάση έως και 200kPa με την πλάκα φόρτισης των 300mm. Μετράει και την τάση και την παραμόρφωση χρησιμοποιώντας ένα γεωφώνο με μέγιστη δυνατότητα μέτρησης παραμόρφωσης τα 2,2mm. Η συσκευή απαιτεί τη σύνδεση ενός φορητού υπολογιστή για την αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων. Γενικά, δεν υπάρχουν πολλά δημοσιευμένα στοιχεία όσον αφορά την αποτελεσματικότητά της. Παρόλα αυτά, πιο πρόσφατες μελέτες έδειξαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκρισή της με τη συμβατική δοκιμή Πίπτοντος βάρους[11]. Η συσκευή παρουσιάζεται στα σχήματα 4.5, 4.6.



Σχήμα 4.5: Σκαρίφημα συσκευής *PRIMA 100*[9]



Σχήμα 4.6: Φωτογραφία συσκευής *PRIMA 100*
(www.pavement-consultants.com/fwd.htm)

- Η συσκευή Ελέγχου Υποδομής του *Transport Research Laboratory (TRL Foundation Tester)*[10]

Η συσκευή TFT αποτελείται από μια χειροκίνητα ανυψούμενη μάζα 10, η οποία απελευθερώνεται από ύψος που επιλέγεται από των καταμετρητή και πέφτει σε μια πλάκα διαμέτρου 300mm. Το συνολικό βάρος της συσκευής είναι 30kg. Ο παλμός φόρτισης κυμαίνεται στα 15 με 25ms. Η εφαρμοζόμενη τάση και η παραμόρφωση, που υπολογίζονται από ένα γεώφωνο, καταγράφονται αυτόματα.

- Η Γερμανική Δοκιμή Φόρτισης Πλάκας (*German Dynamic Plate Bearing Test*)[10]

Η GDP περιγράφεται στο Γερμανικό Κανονισμό (1992). Περιλαμβάνει συνολική μάζα 25kg στην οποία περιλαμβάνεται το πίπτον βάρος 10kg. Η πλάκα φόρτισης έχει διάμετρο 300mm και έχει ενσωματωμένο ένα γεώφωνο (σχήμα 4.7). Το ύψος πτώσης καθορίζεται έτσι ώστε η μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη να είναι 7,07kN (δηλαδή η τάση 100kPa) όταν γίνονται οι ρυθμίσεις. Η δύναμη δεν μετριέται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ο παλμός φόρτισης διαρκεί 18 ± 2 ms. Μπορεί να μετρήσει μέτρα ελαστικότητας από 10 μέχρι 225MPa, γι' αυτό συνιστάται να χρησιμοποιείται μέχρι και σε δύσκαμπτα εδάφη. Η προτεινόμενη διαδικασία της δοκιμής από το Γερμανικό Κανονισμό είναι 6 μετρήσεις σε κάθε σημείο από τις οποίες οι τρεις πρώτες αγνοούνται στους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.7: Δοκιμή GDP

- *Η συσκευή LOADMAN*

Το *LOADMAN* αποτελεί και το κύριο αντικείμενο της παρούσας μελέτης, οπότε περιγράφεται με λεπτομέρεια στην επόμενη παράγραφο. Απεικονίζεται, αρχικά, στο σχήμα 4.8.



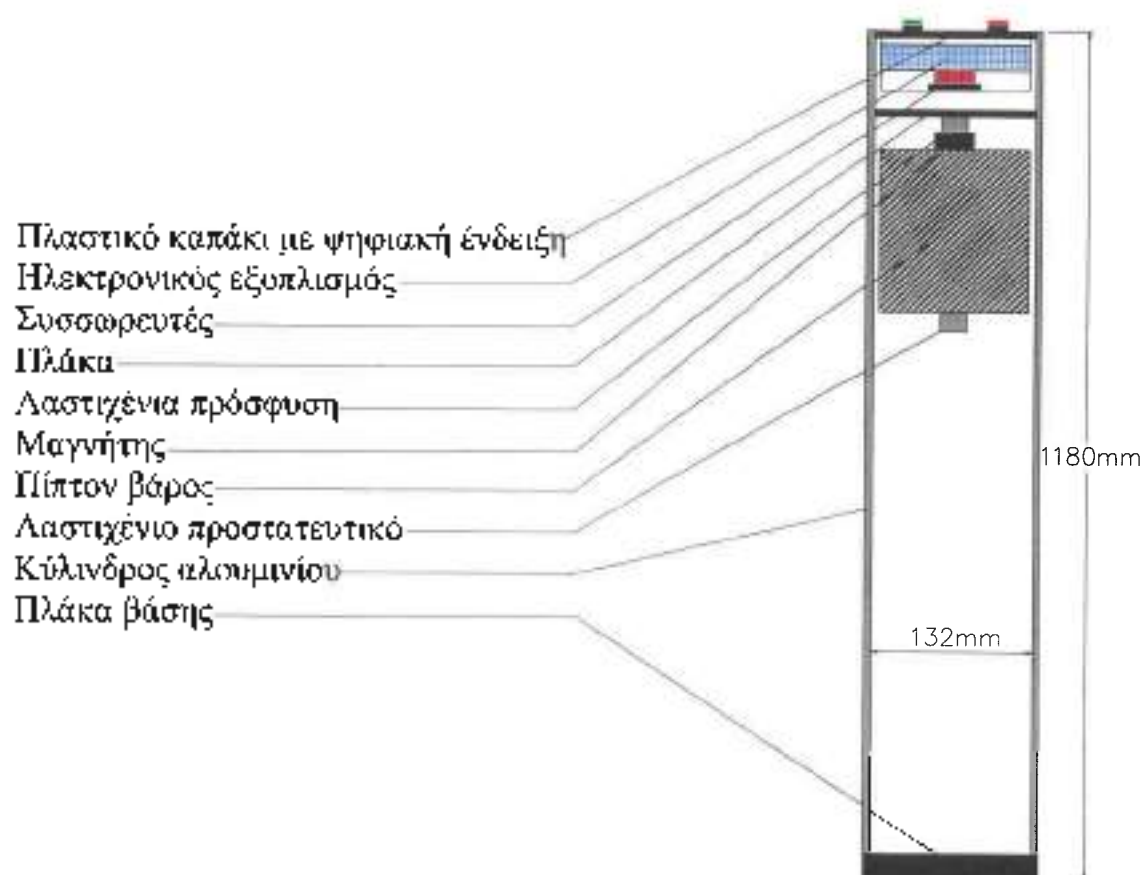
Σχήμα 4.8. Φωτογραφία της συσκευής *LOADMAN*[12]

4.4 Κατασκευή και Λειτουργία της Συσκευής *LOADMAN*

Η συσκευή *LOADMAN*, όπως έχει προαναφερθεί, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αρχή της λειτουργίας του FWD. Αποτελείται από έναν κλειστό κύλινδρο από αλουμίνιο, διαμέτρου 132mm. Μέσα στον κύλινδρο υπάρχει ένα ελεύθερα κινούμενο βάρος από ατσάλι μάζας 10kg με ένα λαστιχένιο προστατευτικό σώμα προσκολλημένο στην κάτω πλευρά του. Στο κάτω μέρος του κυλίνδρου υπάρχει ένα ατσάλινο καπάκι διαμέτρου 132mm επίσης, που συνδέεται με τον κύλινδρο μέσω τεσσάρων βιδών, ώστε να αποτρέπεται η κίνηση μεταξύ αυτού και του κυλίνδρου. Για πιο επιτυχημένες και ακριβείς μετρήσεις, είναι σημαντικό οι βίδες να είναι καλά σφιγμένες. Η μέτρηση της παραμόρφωσης στο σημείο όπου διέρχεται ο άξονας της φόρτισης γίνεται με τη χρήση επιταχυνσιωμέτρων. Όπως είναι προφανές, δεν υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης

της παραμόρφωσης σε απόσταση από τον άξονα του φορτίου, όπως κάνει το FWD.

Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός του PFWD είναι τοποθετημένος στο πάνω τμήμα του κυλίνδρου. Τα ηλεκτρονικά μαζί με το επιταχυνσιόμετρο και την οθόνη για τις ενδείξεις είναι στερεωμένα σε ένα πλαστικό καπάκι στην πάνω πλευρά του κυλίνδρου, μέσω τεσσάρων βιδών. Και αυτό το καπάκι πρέπει να είναι πολύ καλά βιδωμένο. Μέσα στον κύλινδρο υπάρχει μια πλάκα φτιαγμένη από αλουμίνιο, στην οποία είναι στερεωμένος ένας μαγνήτης που συγκρατεί το πίπτον βάρος σταθερό κατά την προετοιμασία της διεξαγωγής της δοκιμής. Ο μαγνήτης συνδέεται με την αλουμινένια πλάκα μέσω μιας λαστιχένιας πρόσφυσης. Οι συσσωρευτές που απαιτούνται από τις ηλεκτρονικές συσκευές (3x9V) βρίσκονται σε μια θήκη κάτω από αυτές. Για να ανανεωθούν είναι αναγκαία η αφαίρεση της μονάδας των μετρήσεων. Η συσκευή απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 6 και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της φαίνονται στον πίνακα 4.1 [12].



Σχήμα 4.9: Σκαρίφημα του φορητού παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους
LOADMAN[12]

επιφανειακή πίεση κατά τη μέτρηση θα είναι ψηλότερη από την θεωρούμενη. Προτείνεται να στρίβεται η συσκευή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όταν πρόκειται για ασύνδετες στρώσεις, ώστε να έχει πλήρη επαφή με το έδαφος. Όταν πρόκειται για σκυρόδετη στρώση, όπως οι ασφαλικές προτείνεται η χρήση ενός λεπτού στρώματος άμμου. Σημειώνεται ότι δεν είναι ανάγκη ο κύλινδρος να βρίσκεται σε πλήρως κατακόρυφη θέση (αρκεί να υπάρχει ελεύθερη πτώση του φορτίου), αλλά είναι πολύ σημαντικό η φορτική πλάκα να βρίσκεται σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια μέτρησης.

4. Η μέτρηση πραγματοποιείται πιέζοντας σύντομα το κόκκινο κουμπί.
5. Οι ακόλουθες μετρήσεις πραγματοποιούνται επαναλαμβάνοντας τα βήματα 2-4.
6. Όταν είναι επιθυμητό να τελειώσει η σειρά των μετρήσεων και να γίνει μια νέα σειρά σε ένα άλλο σημείο, το πράσινο κουμπί ξαναρχίζει τη διαδικασία και διαγράφει την τελευταία μέτρηση.
7. Αν είναι επιθυμητό να μεταβληθούν οι προεπιλεγμένες τιμές που χρειάζονται για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας E (δηλαδή η διάμετρος της φορτικής επιφάνειας), χρησιμοποιείται το μαύρο κουμπί ως εξής. Πιέστε το μαύρο κουμπί και ταυτόχρονα πιέστε και απελευθερώστε το μαύρο και το πράσινο κουμπί. Στην οθόνη θα φανεί η ένδειξη *LOADMAN WAIT* για λίγα δευτερόλεπτα και έπειτα η ένδειξη *E-MODIFY*, η οποία αλλάζει με τη χρήση του μαύρου κουμπιού. Αφού επιλεγεί η επιθυμητή τιμή πιέστε το πράσινο κουμπί.

Λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική φόρτιση, τη διάμετρο της φορτικής πλάκας και τον τύπο υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας E ($= 1.5 \cdot \rho a / \Delta$ ως απόρροια της σχέσης (4.7)), επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές που ανταποκρίνονται στις διαφορετικές διαμέτρους της επιφάνειας φόρτισης.

Διάμετρος Πλάκας (mm)	E-MODIFY (MPa)
132	160
300	68

Όταν η συσκευή ανάψει ή μετά την πίεση του πράσινου κουμπιού, στην οθόνη φαίνονται τα ακόλουθα (π.χ. για πλάκα φόρτισης 132mm):

E160	d=mm	T=ms	Q=%
-------------	-------------	-------------	------------

Μετά τη διεξαγωγή της πρώτης μέτρησης μπορούν παραδείγματος χάριν να εμφανιστούν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

E320	0.50	06	60
-------------	-------------	-----------	-----------

Τα ουσία σημαίνουν:

E320 είναι το μέτρο ελαστικότητας σε MPa, $320 = 160 / 0.50$

0.50 είναι η μετρούμενη παραμόρφωση σε mm

06 είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η παραμόρφωση τη μέγιστη τιμή της σε ms

65 είναι ο λόγος της ελαστικής παραμόρφωσης προς την συνολική παραμόρφωση σε ποσοστό %.

Η δεύτερη μέτρηση στο ίδιο σημείο θα μπορούσε να δώσει τα εξής αποτελέσματα:

E400	0.40	1R1.25
-------------	-------------	---------------

Δηλαδή:

E400 είναι το μέτρο ελαστικότητας σε MPa, $400 = 160/0.40$

0.40 είναι η μετρούμενη παραμόρφωση σε mm

1R1.25 το 1 μπροστά από το R είναι ο αύξων αριθμός της μέτρησης μετά την πρώτη και το 1.25 είναι ο λόγος της ένδειξης E400 προς την πρώτη

E320.

Εκτελώντας και μια τρίτη μέτρηση θα μπορούσαν αποκτηθούν οι ακόλουθες τιμές:

E356	0.45	2R1.11
-------------	-------------	---------------

E356 είναι το μέτρο ελαστικότητας σε MPa, $356 = 160/0.45$

0.45 είναι η μετρούμενη παραμόρφωση σε mm

2R1.11 το 2 μπροστά από το R είναι ο αύξων αριθμός της μέτρησης μετά την πρώτη και το 1.11 είναι ο λόγος της ένδειξης E356 προς την πρώτη

E320.

Τα παραπάνω παραδείγματα, επεξηγήσεις και θεωρητικά στοιχεία δίνουν μια σαφή εικόνα της χρήσης του PFWD και της φιλοσοφίας πάνω στην οποία στηρίχθηκε η κατασκευή του, η οποία είναι απαραίτητη για την κατανόηση των ακόλουθων κεφαλαίων.

4.5 Σχόλια

Η εξέλιξη στον χώρο των ελαφρών παραμορφωσιμέτρων, μέχρι σήμερα, παρέχει ένα μεγάλο εύρος συσκευών στους ερευνητές. Γενικά, όμως, η χρήση τους περιορίζεται σε εδάφη, βάσεις και υποβάσεις. Η αξιοπιστία τους όσον αφορά τις μετρήσεις πάνω σε ασφαλικές στρώσεις δεν είναι ακόμη ελεγμένη ή για πολλές συσκευές δεν υπάρχει καν η δυνατότητα.

Η συσκευή *LOADMAN* σε σχέση με της άλλες, είναι γενικά πιο ελαφριά και εύχρηστη. Απαιτεί μόνο ένα χειριστή (σχήμα 4.9) και η διαδικασία μετρήσεων είναι αρκετά γρήγορη. Απαραίτητος είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας των μετρήσεων της τόσο σε ασόνδετα και εδαφικά υλικά, όσο και σε ασφαλικές στρώσεις.



Σχήμα 4.9: Επαναφορά του πίπτοντος βάρους στην αρχική του θέση
(Φωτογραφία κατά διάρκεια των επί τόπου μετρήσεων – Κεφάλαιο 7^ο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Η Χρήση των P.F.W.D. σε Ασύνδετα και Εδαφικά Υλικά (Unbound Materials)

5.1 Εισαγωγή

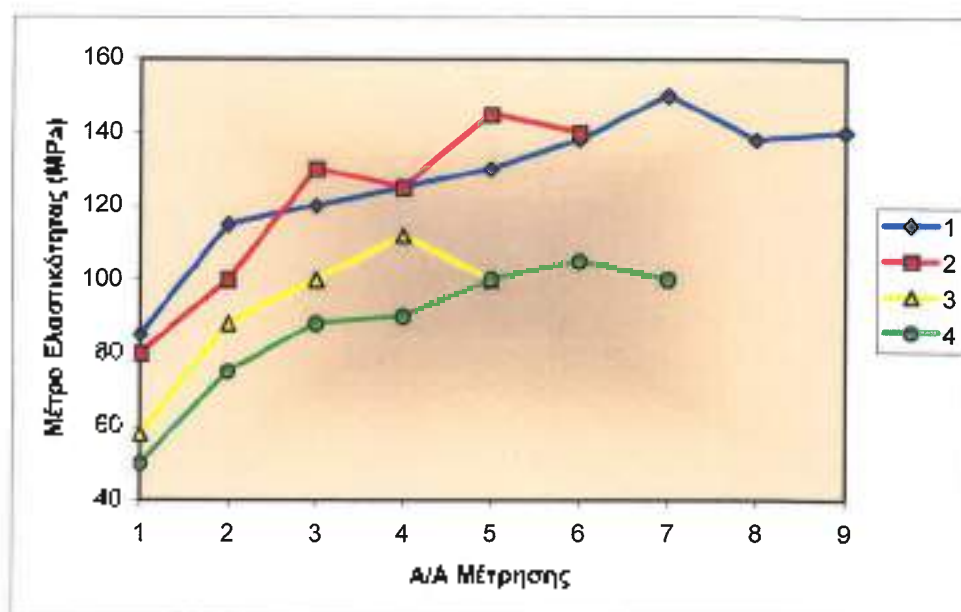
Το κύριο πλεονέκτημα των ελαφρών παραμορφωσιμέτρων πέπτοντος βάρους έναντι των συμβατικών FWD, εκτός, βέβαια, της οικονομικής πλευράς του ζητήματος, είναι η δυνατότητά τους να μεταφέρονται από ένα συνήθως άτομο, με αποτέλεσμα να έχουν πρόσβαση σε δύσβατες για τα τροχοφόρα περιοχές. Έτσι, ο βασικός λόγος για τον οποίο κατασκευάστηκαν είναι η διεξαγωγή μετρήσεων σε εδάφη και σε ασύνδετες στρώσεις του οδοστρώματος (βάση, υπόβαση, στρώση έδρασης), αφού σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει το πρόβλημα πρόσβασης. Επίσης, σε υλικά με χαμηλή δυσκαμψία, όπως αυτά που αποτελούν τα εδάφη και τις ασύνδετες ασφαλικές στρώσεις, η στατική προφόρτιση που επιβάλλει το FWD κατά τις μετρήσεις έχει σημαντικό αντίκτυπο στα τελικά αποτελέσματα[11] (κεφάλαιο 3^ο, σχήμα 3.3). Οπότε και για αυτές τις περιπτώσεις τα ελαφρά παραμορφωσίμετρα φαίνονται να αποτελούν μια καλή λύση.

Η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει πολλές περιγραφές δοκιμών και συγκρίσεις μεταξύ των φορητών FWD και συμβατικών τρόπων ελέγχου. Ανάλογες συγκρίσεις υπάρχουν και για τη συσκευή LOADMAN, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

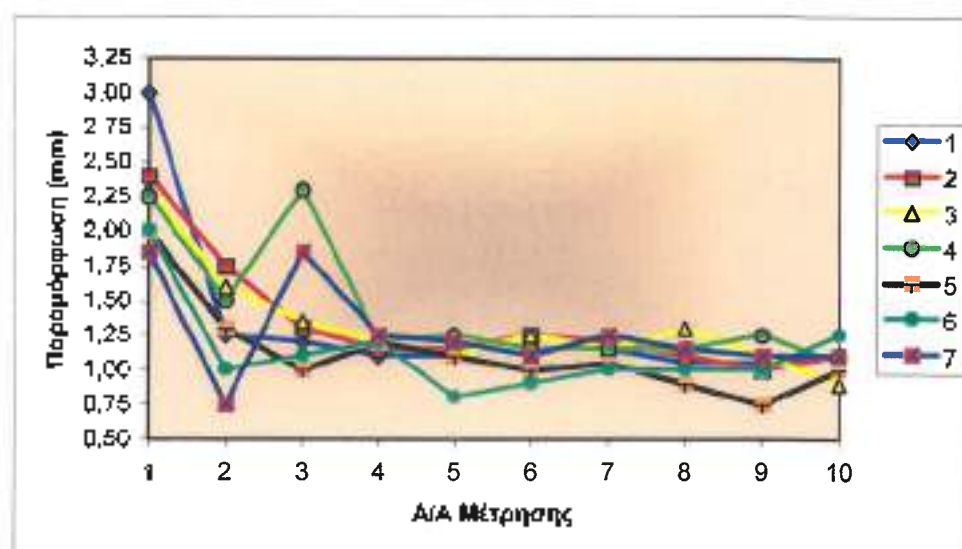
5.2 Αριθμός μετρήσεων ανά σημείο

Γενικά, όσων αφορά τη δοκιμή σε ασύνδετα υλικά με τη συσκευή LOADMAN, οι ερευνητές συμφωνούν ότι οι μετρήσεις που πρέπει να διεξάγονται σε κάθε σημείο, για να ληφθεί μια πιο αξιόπιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας ή της παραμόρφωσης, είναι περισσότερες των πέντε και αυτό γιατί οι δύο ή τρεις

πρώτες μετρήσεις δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα από τις υπόλοιπες[6],[13]. Αυτό γίνεται φανερό στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.1: 4 σειρές μετρήσεων του μέτρου ελαστικότητας στο ίδιο σημείο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε στρώση πάχους 40cm, αποτελούμενη από χαλίκι[6]



Σχήμα 5.2: 7 σειρές μετρήσεων της παραμόρφωσης στο ίδιο σημείο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε στρώση βάσης πάχους 20cm, από θραυστό αμμοχάλικο[13]

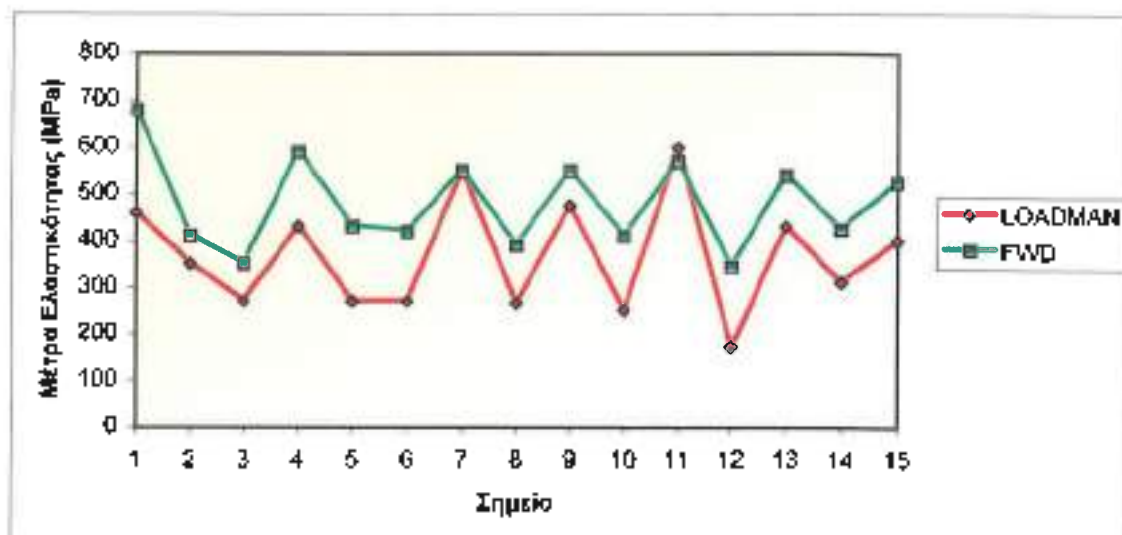
Όπως είναι προφανές από τα παραπάνω σχήματα, οι τιμές που προκύπτουν από κάθε μέτρηση αρχίζουν να σταθεροποιούνται μετά την τρίτη. Το γεγονός αυτό συμβαίνει εξαιτίας κάποιου είδους συμπίκνωσης της υποκείμενης στρώσης που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των πρώτων μετρήσεων, όπως επίσης και της βελτίωσης της θέσης της συσκευής, αφού μετά από 2-3 πτώσεις του βάρους αποκτά καλύτερη επαφή με το έδαφος. Έτσι, απαραίτητο είναι να πραγματοποιούνται τουλάχιστο έξι μετρήσεις σε κάθε σημείο.

5.3 Συγκριτικός έλεγχος

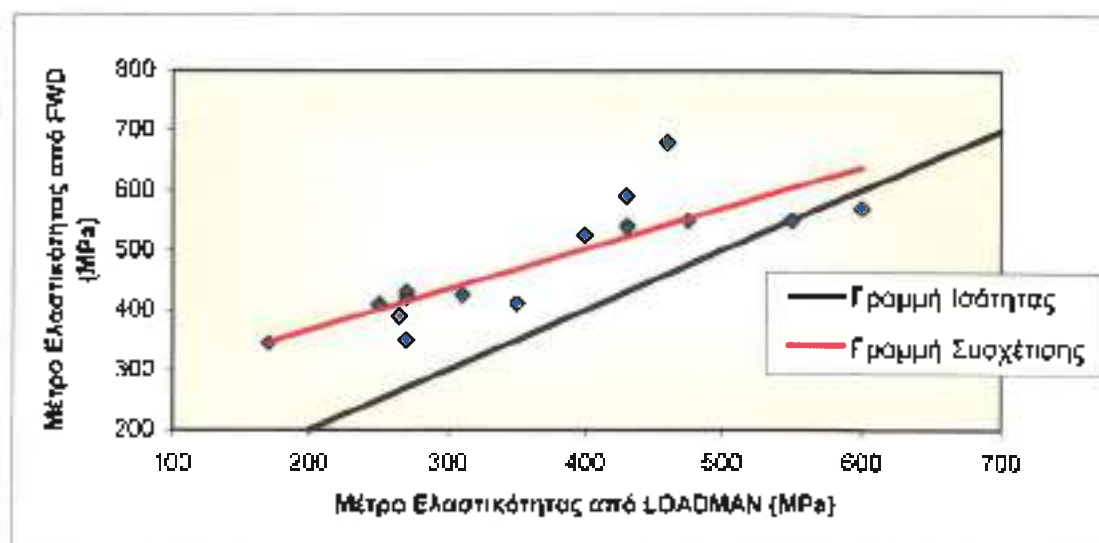
Για την αξιολόγηση του PFWD-LOADMAN ως συσκευής για την εκτέλεση δοκιμών σε ασύνδετα υλικά έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς αρκετές μελέτες από το 1990 και μετά. Οι μελέτες αυτές στηρίζονται στη σύγκριση των δεδομένων που προκύπτουν από τη χρήση του PFWD, με αντίστοιχα δεδομένα που προκύπτουν από συσκευές αποδεκτές και ελεγμένες από την επιστημονική κοινότητα (συμβατικό FWD, Plate Loading Test). Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις από διάφορες περιοχές, με διαφορετικά υλικά και από διαφορετικά εργοτάξια.

- *Περιοχή Kello – Râinânpereä (Φινλανδία), εργοτάξιο κατασκευής οδού – 6/7/93[6]*

Το υλικό που εξετάστηκε ήταν μια σταθεροποιητική στρώση πυκνού αμμοχάλικου 40cm. Προέκυψαν οι εξής τιμές (σχήματα 5.3, 5.4):



Σχήμα 5.3[6]

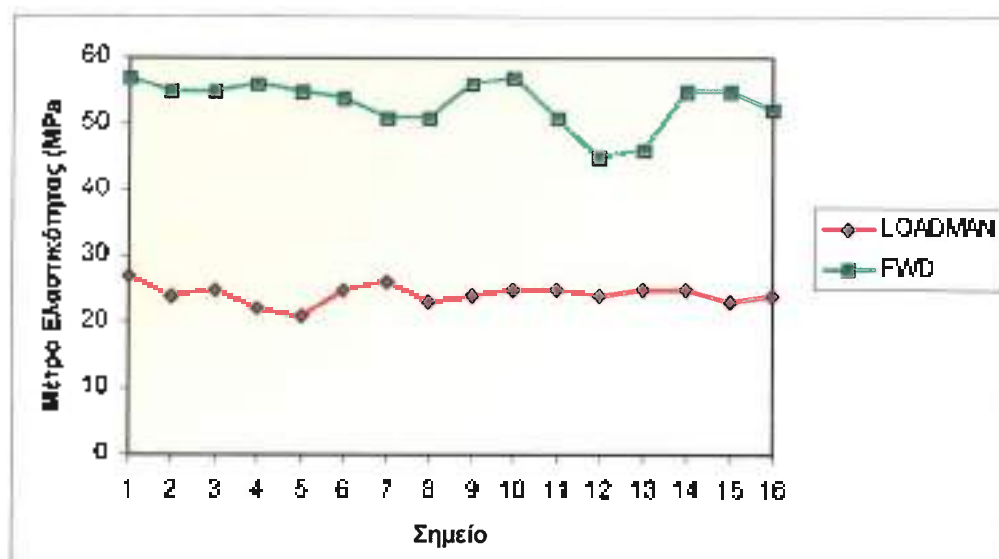
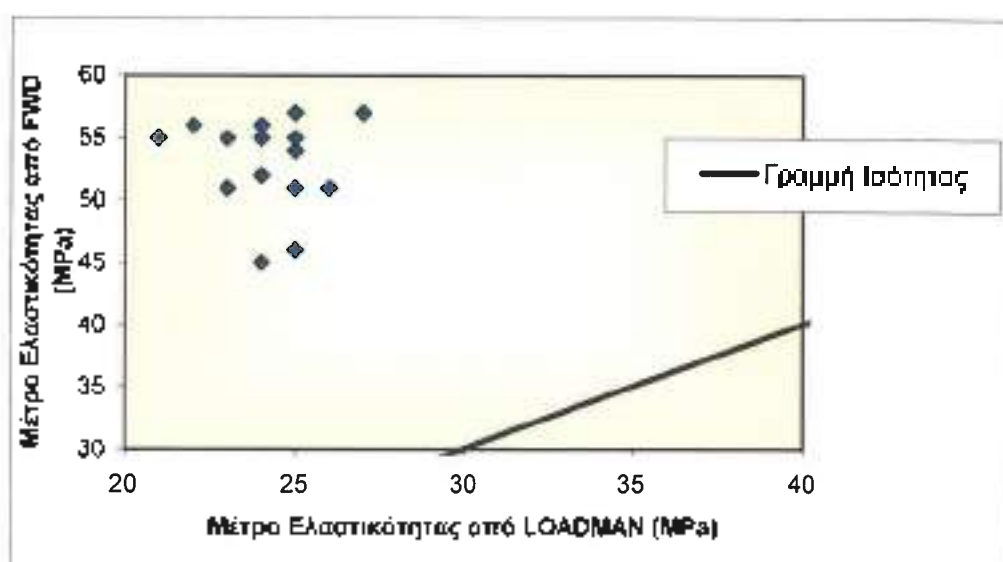


Σχήμα 5.4

Σε αυτή την περίπτωση οι τιμές που προκύπτουν από το LOADMAN, είναι γενικά κατά ένα ποσοστό χαμηλότερες από αυτές του FWD. Η συσχέτισή τους είναι αρκετά καλή, παρόλα αυτά ($R^2 = 0,7$).

- Περιοχή Liminka, γήπεδο Base-ball – 2/6/93[6]

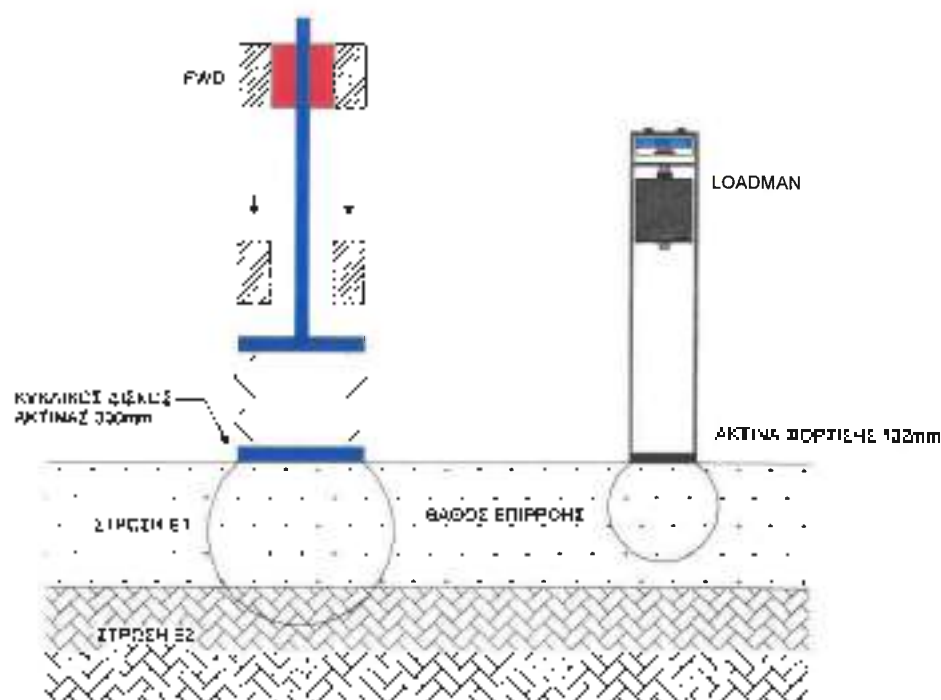
Το γήπεδο καλυπτόταν από μια στρώση πυκνής άμμου (πάχος κόκκων 0 – 6 mm), πάχους 10cm. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στα σχήματα 5.5, 5.6.

Σχήμα 5.5^α

Σχήμα 5.6

Εδώ παρατηρείται μια σχέση LOADMAN/ FWD της τάξης του 0,5. Μια εξήγηση για το γεγονός αυτό, είναι η περίπτωση το υποκείμενο στρώμα της άμμου να είναι δύσκαμπτο, επομένως, ενώ το LOADMAN «αισθάνεται» μόνο την επιφανειακή στρώση, το FWD επηρεάζει και την παρακάτω (σχήμα 5.7).

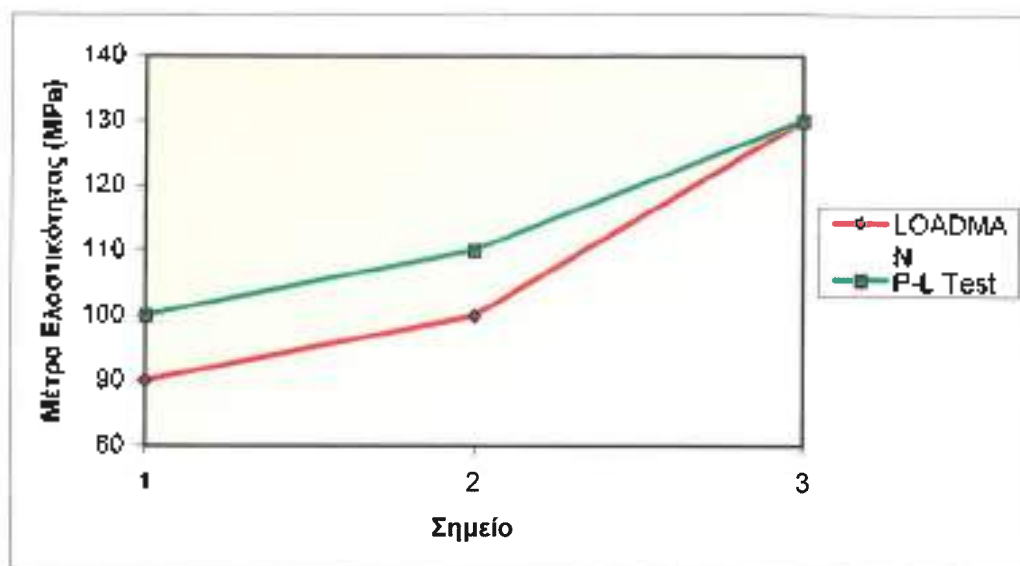
Οπότε προφανώς η κατώτερη στρώση είναι πιο ισχυρή από αυτή της άμμου, με αποτέλεσμα το FWD να δίνει υψηλότερες τιμές.



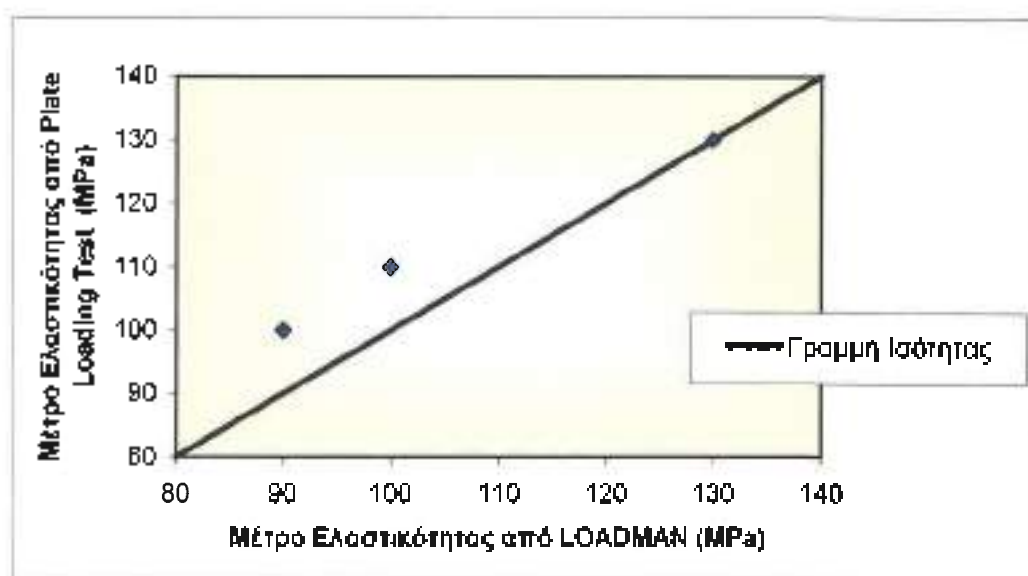
Σχήμα 5.7: Βάθος επιρροής συσκευών (σκαρίφημα)

- Περιοχή Ουful, εργοτάξιο αεροδρομίου – 4/6/93[6]

Η εξεταζόμενη στρώση αποτελούνταν από χαλίκι (πάχος κόκκων 0 – 20 mm). Το πάχος της ήταν 40cm και προοριζόταν να αποτελέσει την υπόβαση του συγκεκριμένου οδοστρώματος. Εδώ η σύγκριση του LOADMAN γίνεται με τη δοκιμή φόρτισης πλάκας (σχήματα 5.8, 5.9).



Σχήμα 5.8[6]

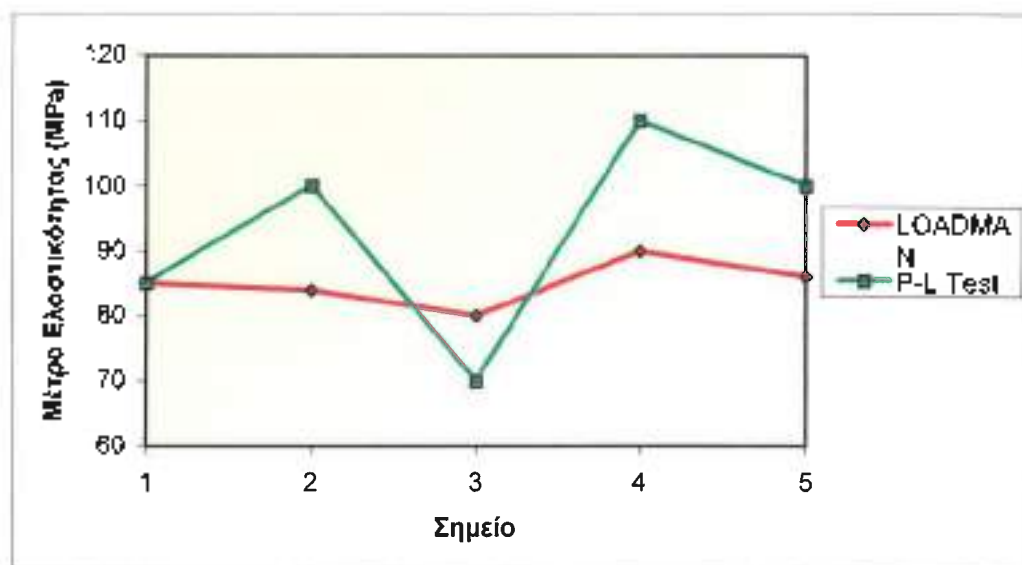


Σχήμα 5.9

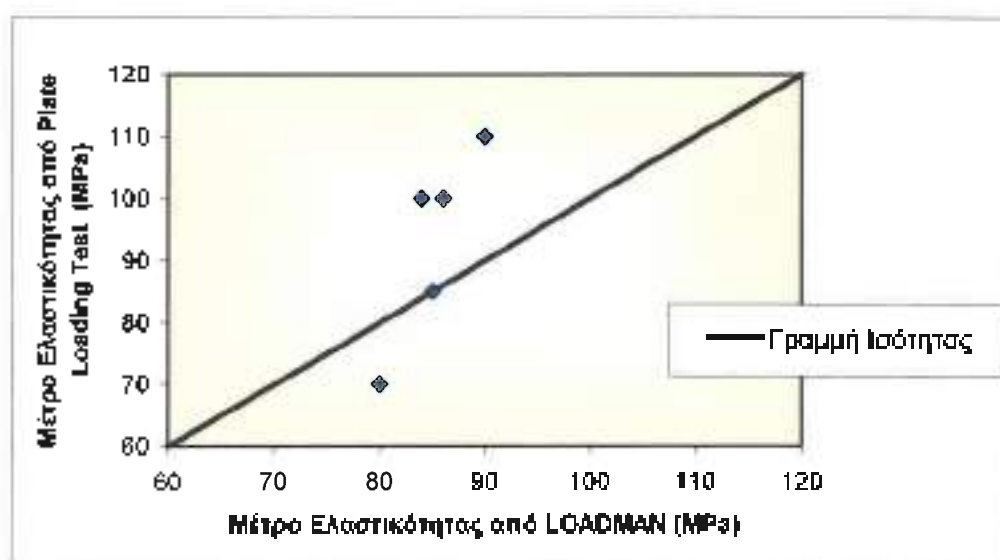
Προφανώς, οι τιμές των δύο συσκευών είναι πολύ κοντά, αλλά, βέβαια, ο αριθμός των μετρήσεων είναι περιορισμένος.

Στο ίδιο εργοτάξιο, σε ένα σημείο όπου είχαν κατασκευαστεί δύο στρώσεις, μια στρώση υπόβασης από το ίδιο χαλίκι πάχους 25cm και μια στρώση βάσης από

θραυστό αμμοχάλικο (πάχος κόκκων 0 – 55 mm) πάχους 15cm, έγιναν οι εξής μετρήσεις (σχήματα 5.10, 5.11):

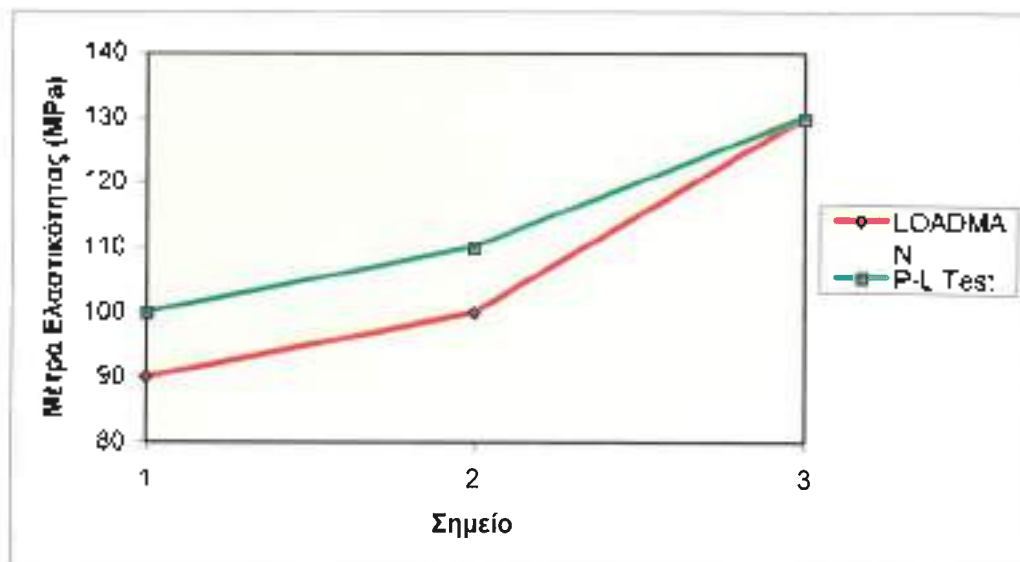


Σχήμα 5.10[6]

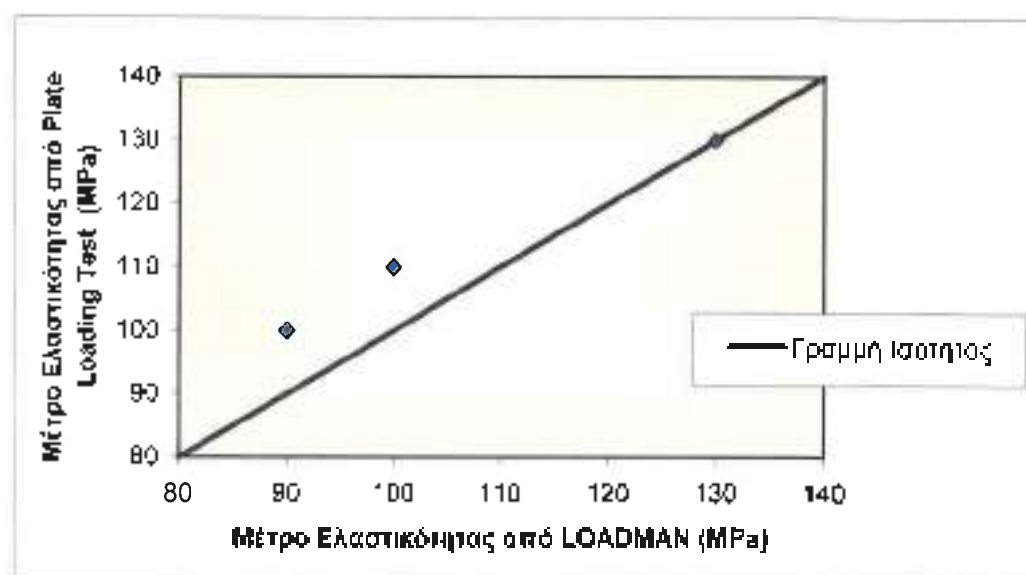


Σχήμα 5.11

Και εδώ παρατηρείται αντιστοιχία στις τιμές των δύο συσκευών.



Σχήμα 5.8[6]

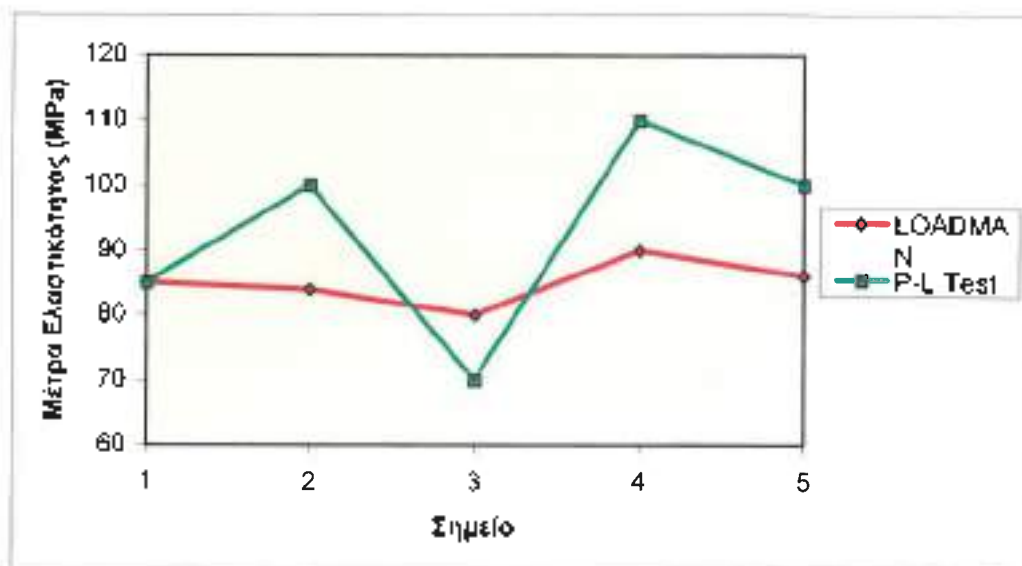


Σχήμα 5.9

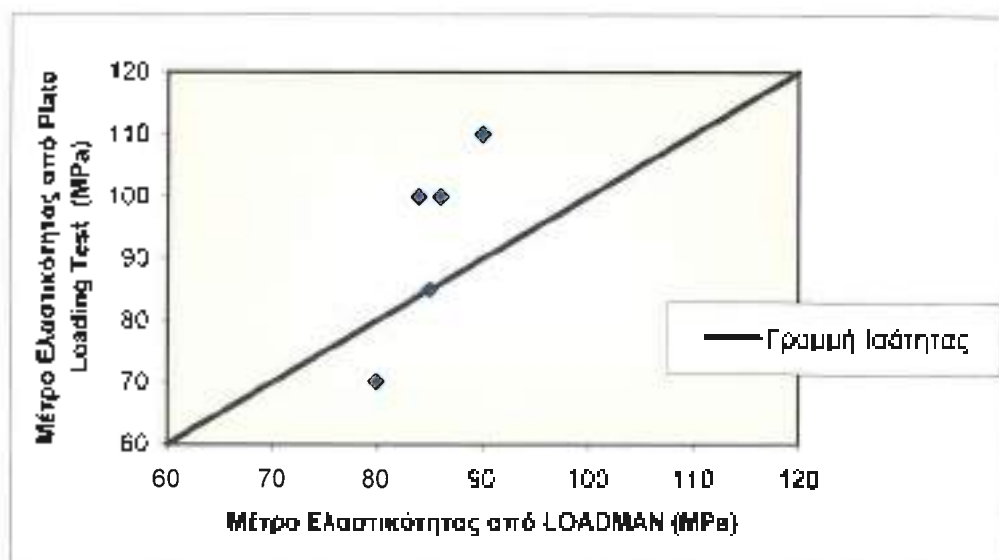
Προφανώς, οι τιμές των δύο συσκευών είναι πολύ κοντά, αλλά, βέβαια, ο αριθμός των μετρήσεων είναι περιορισμένος.

Στο ίδιο εργοτάξιο, σε ένα σημείο όπου είχαν κατασκευαστεί δύο στρώσεις, μια στρώση υπόβασης από το ίδιο χαλίκι πάχους 25cm και μια στρώση βάσης από

θραυστό αμμοχάλικο (πάχος κόκκων 0 – 55 mm) πάχους 15cm, έγιναν οι εξής μετρήσεις (σχήματα 5.10, 5.11):



Σχήμα 5.10[6]

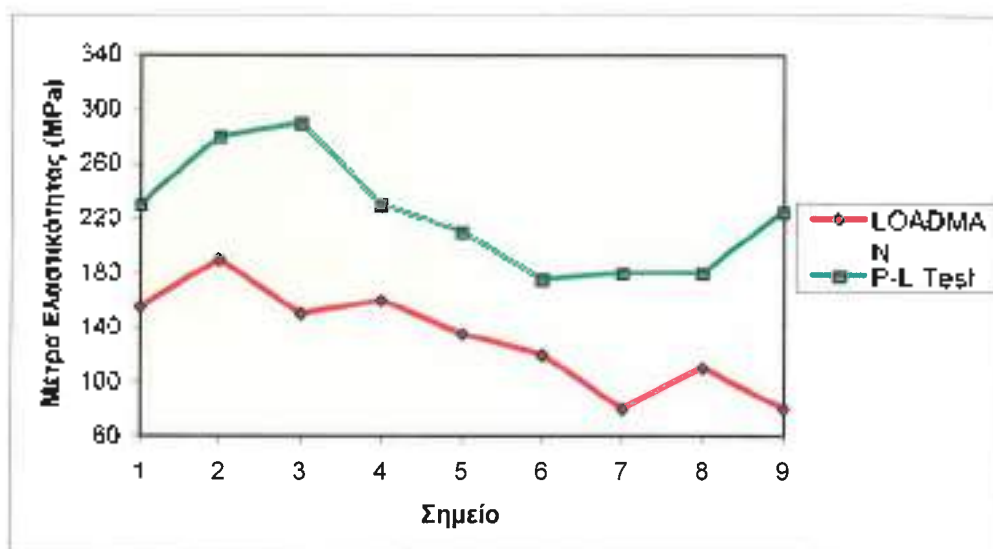


Σχήμα 5.11

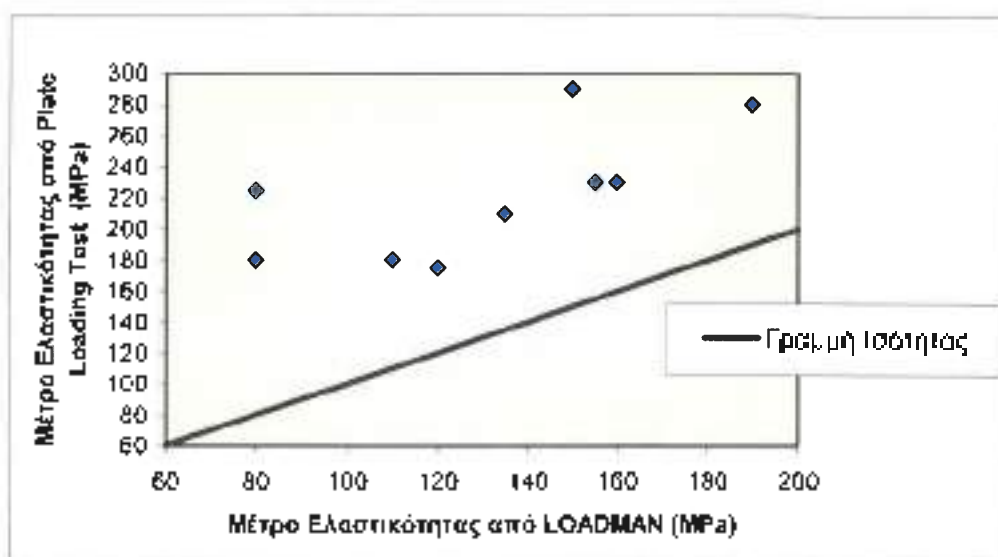
Και εδώ παρατηρείται αντιστοιχία στις τιμές των δύο συσκευών.

- Περιοχή Λιθιανθία, εργοτάξιο κατασκευής οδού – 14/6/93[6]

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται στρώση βάσης 40cm αποτελούμενη από σκωρία μεταλλεύματος (σχήματα 5.12, 5.13).



Σχήμα 5.12[6]



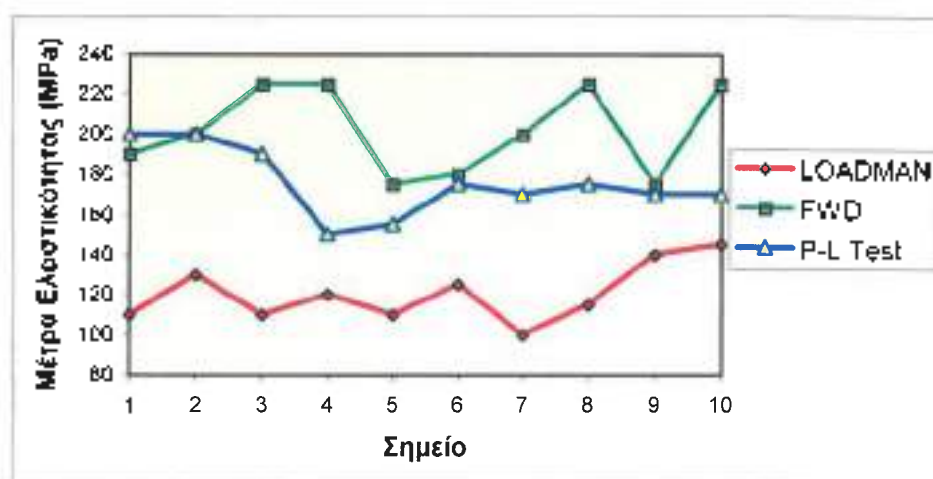
Σχήμα 5.13

Εδώ ξανά οι τιμές παρουσιάζουν μια σταθερή διαφορά μεταξύ τους με το LOADMAN πάλι να υποτιμά το μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τη δοκιμή φόρτισης πλάκας.

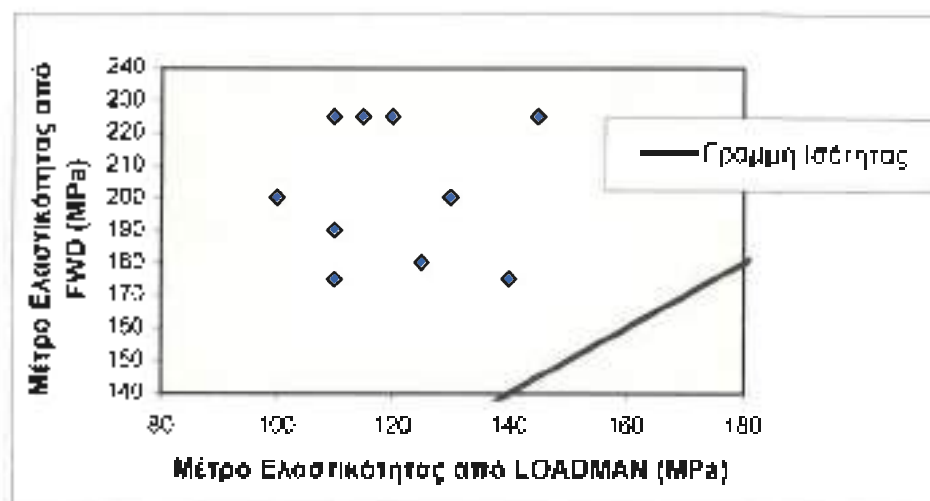
- *Περιοχή Κίνιμακι (Λετονία) – 24, 25 /10/90[13]*

Στην περιοχή αυτή κατασκευάστηκαν τρεις στρώσεις από θραυστό αμμοχάλικο (πάχος κόκκων $0 - 45 \text{ mm}$), με διαδοχικά πάχη 20, 30 και 40cm. Πάνω σε κάθε μια από αυτές πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με το LOADMAN, το FWD τύπου KUAB 50 και με τη μονάδα δοκιμής φόρτισης πλάκας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών καθώς και οι σύγκριση μεταξύ των τριών συσκευών φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα.

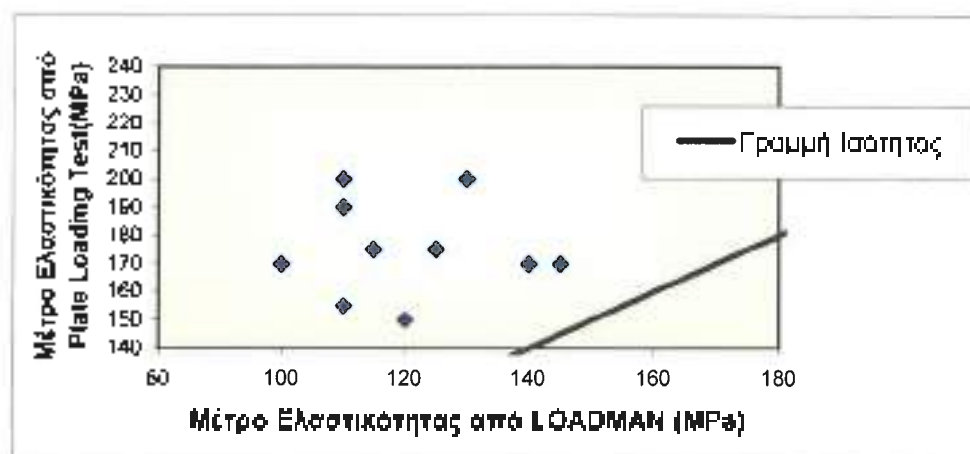
▪ Στρώση 20cm



Σχήμα 5.13[13]

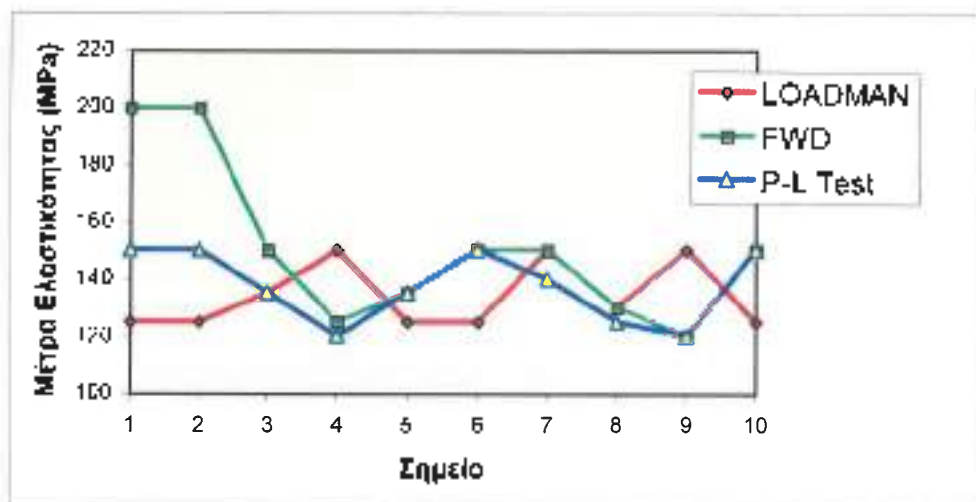


Σχήμα 5.14

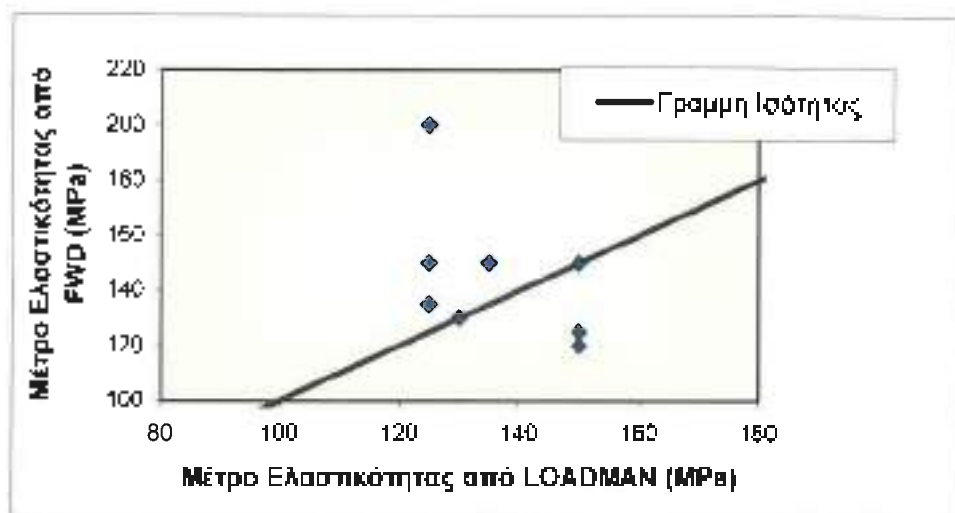


Σχήμα 5.15

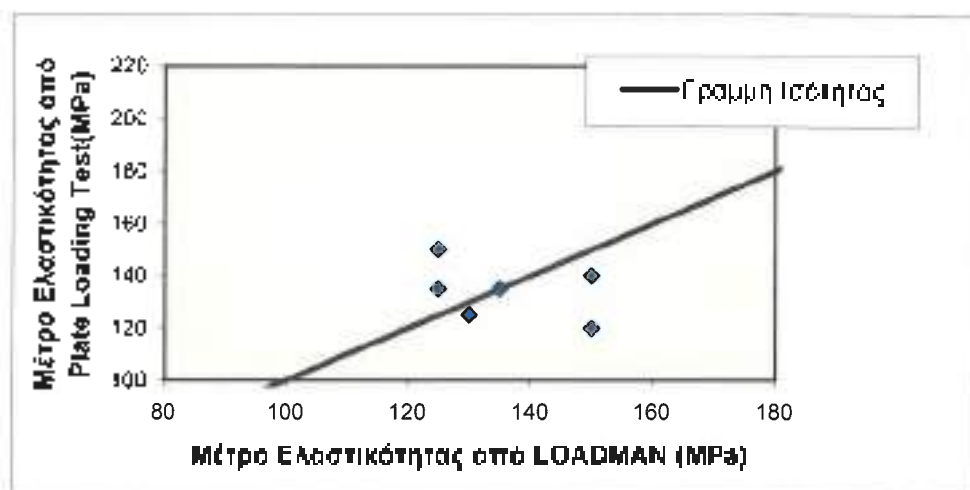
- Στρώση 30cm



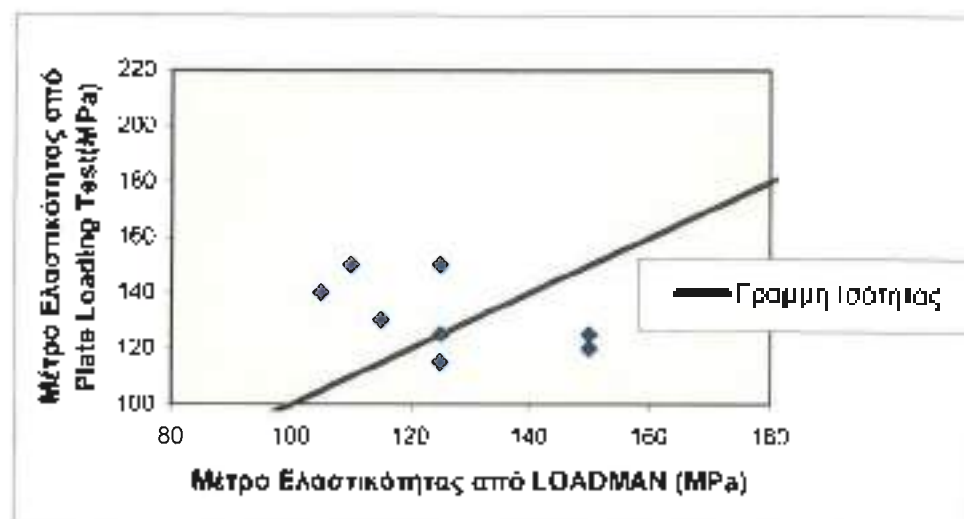
Σχήμα 5.16[13]



Σχήμα 5.17



Σχήμα 5.18



Σχήμα 5.21

Είναι φανερό από τα προηγούμενα διαγράμματα ότι ενώ στη στρώση των 20cm το LOADMAN δίνει μικρότερα αποτελέσματα από τις άλλες δύο συσκευές (προφανώς λόγω του βάθους επιρροής τους), στις άλλες δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

5.4 Συμπεράσματα

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων δείχνει ότι με το LOADMAN χρειάζεται να γίνονται τουλάχιστο έξι μετρήσεις ανά σημείο. Οι δύο ή τρεις πρώτες πρέπει να απορρίπτονται και να χρησιμοποιείται η μέση τιμή των υπολοίπων ως η αντιπροσωπευτική του σημείου[13].

Γενικά, όσον αφορά τα συγκριτικά τεστ, το LOADMAN φαίνεται να δίνει ίδιας τάξης μεγέθους αποτελέσματα με τις δοκιμές πλίντοντος βάρους και φόρτισης πλάκας, όταν οι μετρήσεις διεξάγονται σε στρώσεις πάχους μεγαλύτερου των 30cm. Όταν το πάχος μικραίνει, ενώ το LOADMAN συνεχίζει να αισθάνεται μόνο την υπερκείμενη στρώση, οι άλλες δύο συσκευές μετρούν βαθύτερα με αποτέλεσμα η σύγκριση να μην είναι αξιόπιστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Καθορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας Οδοστρώματος με βάση τη Δοκιμή με τη Συσκευή FWD

6.1 Εισαγωγή

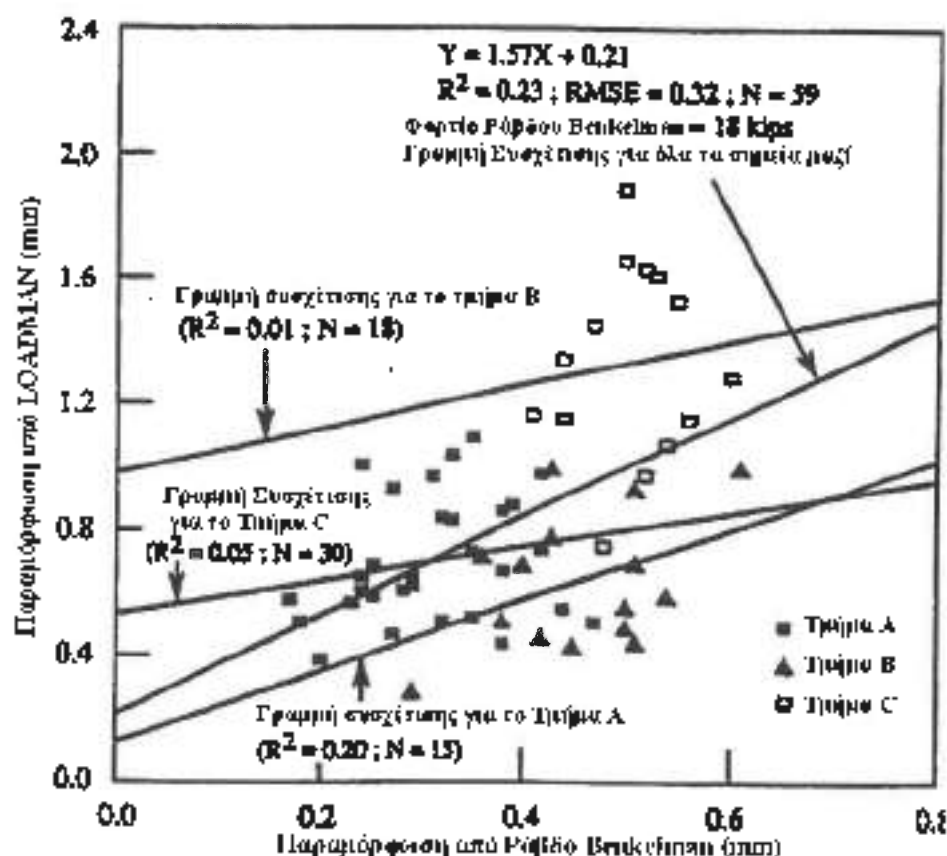
Τις τελευταίες δεκαετίες, επιτακτική γινόταν η ανάγκη ανάπτυξης μη καταστρεπτικών μεθόδων αξιολόγησης των οδοστρώματων. Η πρόοδος στον τομέα αυτό υπήρξε σημαντική, αλλά υπάρχουν ακόμη προβλήματα τα οποία δεν έχουν ξεπεραστεί. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως στην τεράστια διαφοροποίηση και ανισοτροπία των ιδιοτήτων των υλικών όπως και στην αδυναμία των μεθόδων μέτρησης, των προτύπων και των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται, να περιγράψουν με ακρίβεια την πραγματικότητα[14].

Για παράδειγμα, μια μη καταστρεπτική δοκιμή επί τόπου μετρήσεων είναι η δοκιμή του συμβατικού Παραμορφωσίμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD). Παρόλο που τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής είναι γενικά αποδεκτά, συγκρίσεις με εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν μεγάλες αποκλίσεις στις τελικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας[15]. Επί προσθέτως, κάποιες αβεβαιότητες σχετικές με την διαδικασία υπολογισμού δεν επιτρέπουν την εφαρμογή της δοκιμής σε λεπτές ασφαλικές στρώσεις (75÷100mm)[5].

Όλα αυτά υποδεικνύουν ότι υπάρχει η ανάγκη μιας συσκευής επί τόπου μετρήσεων που να μπορεί να ξεπεράσει αυτές τις δυσκολίες ή τουλάχιστο να δώσει ανάλογα αποτελέσματα με τις ήδη αποδεκτές δοκιμές, προσφέροντας παράλληλα πλεονεκτήματα που δεν τα έχουν οι άλλες. Μια τέτοια συσκευή θα μπορούσε να είναι το FWD, το οποίο είναι εξαιρετικά εύχρηστο οπότε μπορούμε να διεξάγουμε μια δοκιμή σε λίγα λεπτά, δεν απαιτεί σύνθετες διαδικασίες υπολογισμών και δεν επηρεάζει μεγάλο όγκο επί τόπου υλικών, όπως συμβαίνει με το συμβατικό FWD.

6.2 Συγκρίσεις με τη δοκιμή Benkelman[14]

Αντίθετα με τα αποτελέσματα που έδωσε στα ασύνδετα υλικά (unbound materials), όσων αφορά τα οδοστρώματα το FWD αρχικά δεν έδωσε ενθαρρυντικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, διεξάχθηκαν κάποιες συγκριτικές δοκιμές με σκοπό να βρεθεί η συσχέτιση ανάμεσα στην παραμόρφωση που υπολόγιζε το FWD και σε αυτή που υπολογιζόταν με τη δοκιμή Benkelman. Όπως φαίνεται και στο σχήμα' 6.1 η συσχέτιση των αποτελεσμάτων δεν είναι σημαντική. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να εξετάσουμε την αιτία αυτής της αναντιστοιχίας.



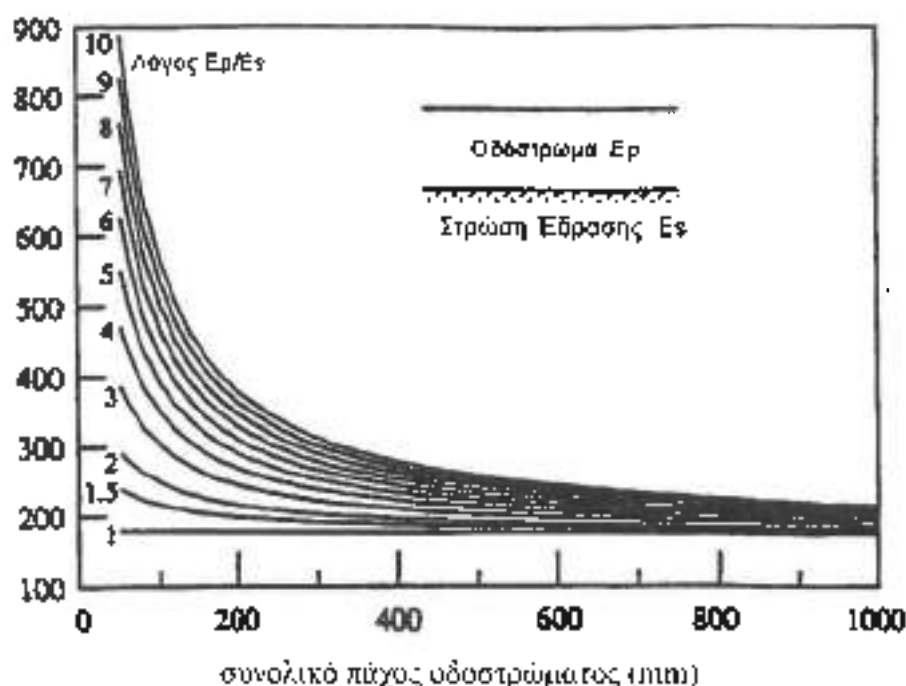
Σχήμα 6.1: Συσχέτιση αποτελεσμάτων των δοκιμών FWD και Benkelman[14]

Οι δοκιμές διεξήχθησαν στη Ισραήλ σε 3 διαφορετικές θέσεις:

- Θέση A: 8ημετα ασφαλτική στρώση και 320mm εδαφική
- Θέση B: 100ημετα ασφαλτική στρώση και 450mm εδαφική
- Θέση C: 160ημετα ασφαλτική στρώση και 1050mm εδαφική

Όπως όλα δείχνουν η έλλειψη συσχέτισης ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι το PFWD είναι ικανό να επηρεάζει το οδόστρωμα μέχρι ένα περιορισμένο βάθος. Η επίδραση των κατώτερων στρώσεων στην επιφανειακή παραμόρφωση είναι συνάρτηση του λόγου του πάχους της στρώσης προς την ακτίνα της επιφάνειας φόρτισης. Γι' αυτό, η μικρή ακτίνα της επιφάνειας φόρτισης του PFWD οδηγεί σε σχεδόν σταθερές παραμορφώσεις από ένα συγκεκριμένο πάχος και μετά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2. Σύμφωνα με το σχήμα, το PFWD παύει να

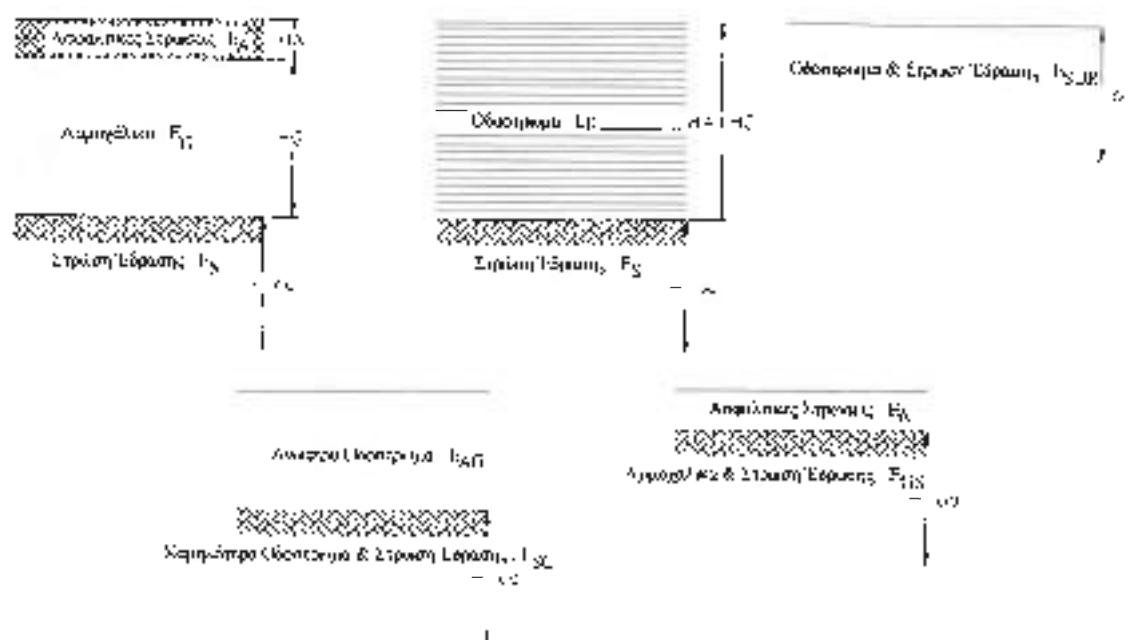
Παραμόρφωση $\times E_p$ (N/mm)



Σχήμα 6.2: Βάθος επιρροής του PFWD [14],[24]

«αισθάνεται» τις αλλαγές στο πάχος του οδοστρώματος από τα 400mm και μετά. Δηλαδή το γινόμενο $E_p \times \delta_p$ παραμένει σχεδόν σταθερό για κάθε λογική τιμή του λόγου E_p/E_s . Αντίθετα, για τη συσκευή Benkelman συνεχίζει να μεταβάλλεται και πέρα από τα 400mm, αφού η ισοδύναμη επιφάνεια επαφής του φορτίου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επιφάνεια του PFWD.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σχήμα 6.2 βασίζεται στο μοντέλο των δύο στρώσεων, όπου το οδόστρωμα αντιπροσωπεύει την ανώτερη στρώση με μέτρο ελαστικότητας E_p και η στρώση έδρασης είναι η, αλείρου βάρους, κατώτερη στρώση με μέτρο ελαστικότητας E_s .



Σχήμα 6.3: Μορφές προσομοίωσης οδοστρώματος[14]

6.3 Διαδικασία καθορισμού του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p

Το μέσο μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p επηρεάζεται σημαντικά από τη δυσκαμψία της ασφαλτικής στρώσης. Από τη στιγμή που το PFWP γίνεται λιγότερο ευαίσθητο όσο μεγαλώνει το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης, αναπτύχθηκε μια μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός.

Σύμφωνα με την οδηγία του AASHTO (1993), το κατασκευαστικό πάχος ενός οδοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω εξίσωση[16].

$$SN_{\varpi} = 0,0226 H_r \left(\frac{E_p}{1 - \mu_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.1)$$

όπου (σχήμα 6.3) SN_{ϖ} είναι το ενεργό κατασκευαστικό πάχος σε μονάδες H_r , H_r είναι το συνολικό πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος, E_p είναι το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας όλων των στρώσεων σε MPa και μ_p είναι ο ισοδύναμος λόγος Poisson για όλες τις στρώσεις του οδοστρώματος.

Το ενεργό κατασκευαστικό πάχος χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε το πάχος της ασφαλικής επικάλυψης αφαιρώντας την τιμή του SN_{ϖ} από την τιμή SN_0 , με το τελευταίο να είναι το απαιτούμενο (τιμή σχεδιασμού) πάχος σύμφωνα με την προβλεπόμενη κυκλοφορία και το υπάρχον μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, E_s . Τελικά, το πάχος της ασφαλικής επικάλυψης ισούται με την παραπάνω διαφορά, διαιρεμένη με το συντελεστή σχετικής αντοχής (ΣΣΑ) της ασφάλτου (συνήθως 0,33÷0,44), δηλαδή

$$H_A = \frac{SN_0 - SN_{\varpi}}{\Sigma \Sigma \Lambda} \quad (6.2)$$

Οπότε συμπεραίνουμε ότι η εκτίμηση του E_p είναι ουσιαστική για την διαδικασία σχεδιασμού της ασφαλικής επικάλυψης.

Το E_p προσεγγίζεται από την ακόλουθη έκφραση [17]:

$$E_p^* = \left(\frac{\sqrt[3]{E_A} \times H_A + \sqrt[3]{E_G} \times H_G}{H_A + H_G} \right)^3 \quad (6.3)$$

όπου το E_p^* προσεγγίζει το μέτρο ελαστικότητας E_p , H_A είναι το πάχος της ασφαλικής στρώσης, H_G είναι το πάχος των εδαφικών στρώσεων και E_G είναι το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων αυτών (όλα φαίνονται στο σχήμα 6.3).

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά Baus & Johnson (1992)[18], η προσεγγιστική τιμή E_p^* μπορεί να αποκλίνει αρκετά από την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει

κατευθείαν από την παραμόρφωση όταν χρησιμοποιείται το πρότυπο των δύο στρώσεων. Σύμφωνα με υπολογισμούς που έγιναν (οι οποίοι δεν αποτελούν αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης, οπότε δεν θα δοθεί έκταση στο θέμα) η τιμή E_p που προκύπτει από τη σχέση 6.4 πρέπει να πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή λ (σχήμα 6.4) για να προκύψει μια πιο ρεαλιστική τιμή για το E_p . Η τιμή του λ βρέθηκε ότι είναι :

$$\lambda = A + B \times \frac{H_c}{a} + C \times \frac{H_a}{a} + D \times \frac{H_a}{a} \times \frac{H_c}{a} \quad (6.4)$$

όπου:

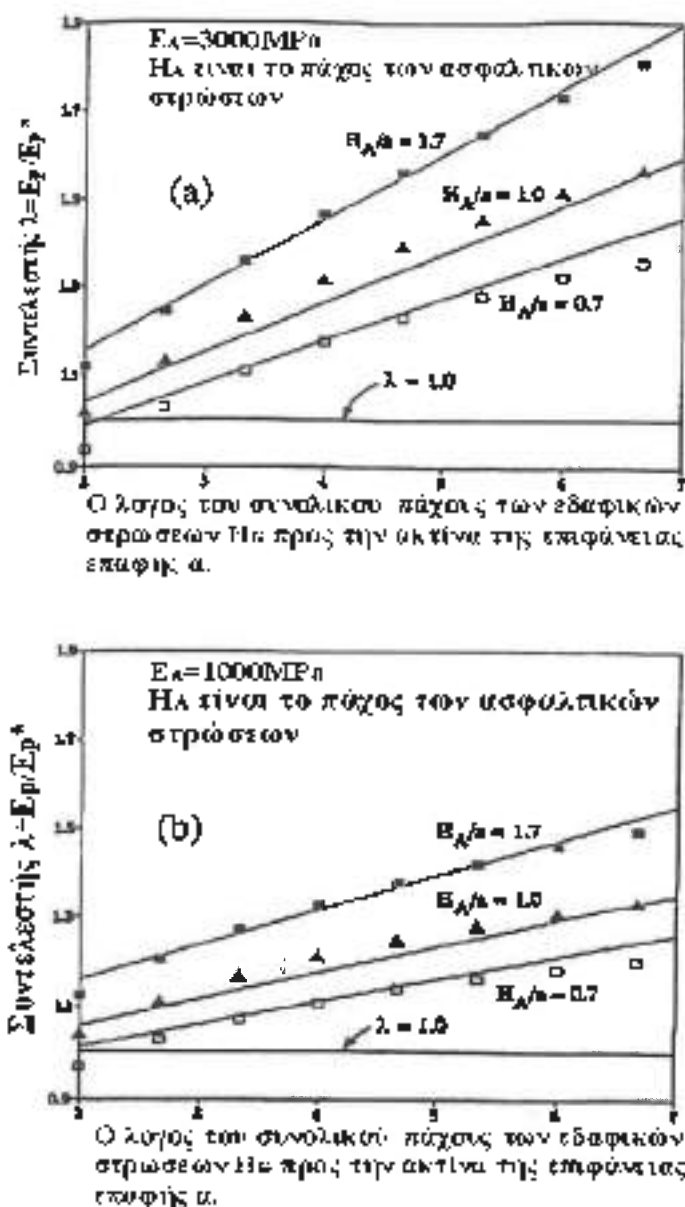
$$A = 3,341 - 0,176 \log E_A - 0,808 \log F_0$$

$$B = 0,320 - 0,073 \log E_A$$

$$C = 0,123 - 0,052 \log E_A$$

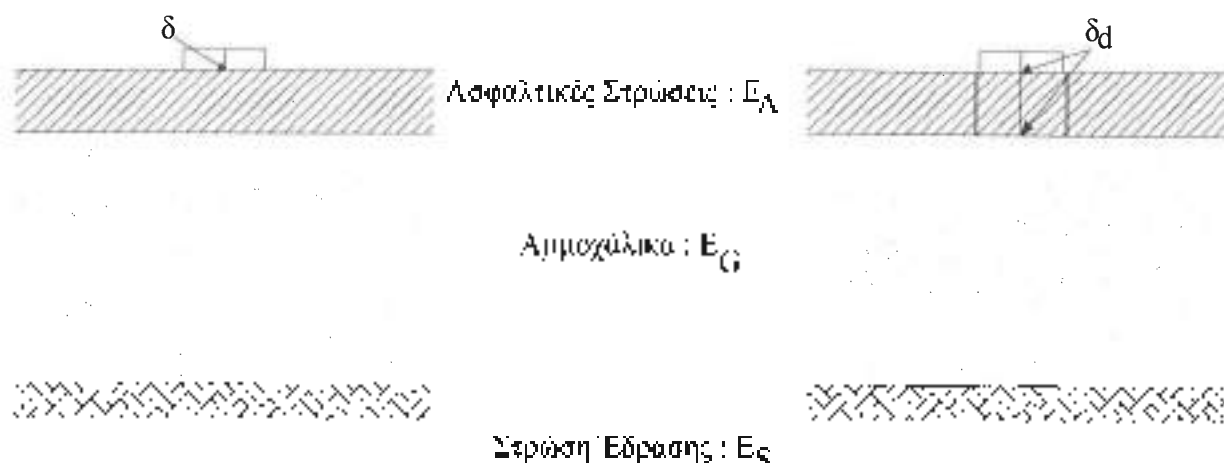
$$D = 0,137 + 0,057 \log E_A$$

Με a την ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής, H_A το συνολικό ασφατικό πάχος σε mm, H_G το συνολικό πάχος των εδαφικών στρώσεων σε mm και E_A το μέτρο ελαστικότητας της ασφατικής στρώσης σε MPa.



Σχήμα 6.4: Εκτίμηση συντελεστή λ [14]

Τα παραπάνω καθιστούν φανερό ότι για να υπολογιστεί η τιμή του E_p είναι αναγκαία να γνωρίζουμε τις τιμές E_A και E_H . Αυτές μπορούν να καθοριστούν εκτελώντας μια δοκιμή με τη συσκευή PFW D, στην ασφαλτική επιφάνεια και μετά την ίδια δοκιμή αφού τρυπήσουμε την ασφαλτο σε όλο της το πάχος, με τη διάμετρο του καρότου να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από τη διάμετρο της επιφάνειας επαφής της συσκευής (σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4: Διαδικασία όδο μετρήσεων[14]

Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να υπολογίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας E_{AG} και E_{GS} , όπου το πρώτο είναι το επιφανειακό μέτρο ελαστικότητας για όλες τις στρώσεις, συμπεριλαμβανομένης και της ασφαλτικής, και το δεύτερο είναι το αντίστοιχο για όλες τις στρώσεις εκτός από την ασφαλτική. Ειδικά για τον υπολογισμό του E_{GS} πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μετρηθείσα παραμόρφωση στην προτεινόμενη διαδικασία περιορίζεται εξαιτίας του οριζόντιου περιορισμού του καρότου από την ασφαλτική στρώση. Για να εκτιμήσουμε την παραμόρφωση που θα είχαμε αν δεν υπήρχε η ασφαλτική στρώση, η μετρηθείσα παραμόρφωση πρέπει να διαιρεθεί με ένα μειωτικό συντελεστή. Ο συντελεστής αυτός είναι ο παρακάτω[19],[20],[21]:

$$\mu_{max} = 0.86 + \frac{0.28}{1 + 2.0^{\frac{\mu_d}{\mu_A}}} \quad (6.5)$$

$$\mu_{min} = 0.52 + \frac{0.96}{1 + 2.0^{\frac{\mu_d}{\mu_A}}} \quad (6.6)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά προτιμάται ο λιγότερο δραστικός συντελεστής μ_{min} [22],[23]. Οι προηγούμενες εξισώσεις βασίζονται στην υπόθεση ότι το ισοδύναμο πάχος των στρώσεων κάτω από την ασφαλτική είναι διπλάσιο αυτού

της ασφαλτικής στρώσης, υποθέτοντας ότι ο λόγος E_A/E_G ισούται με 8

$$(H_w = H_A \times \sqrt{\frac{E_A}{E_G}} = 2H_A).$$

Ο λόγος των E_{GS} και E_{AG} , που τελικά προκύπτουν, αποτελούν τον συντελεστή παραμόρφωσης (Burmister), δηλαδή:

$$F_w = \frac{E_{GS}}{E_{AG}} \quad (6.7)$$

Η τιμή του F_w είναι σύμφωνα με τον Odemark προσεγγιστικά ίση με την ακόλουθη έκφραση:

$$F_w = \frac{E_{GS}}{E_A} \left[1 - \left(\sqrt{1+m_A^2} - m_A \left(1 + \frac{m_A}{2(1-\mu_{GS})\sqrt{1+m_A^2}} \right) \right) \right] + \left[\left(\sqrt{1+m_G^2} - m_G \left(1 + \frac{m_G}{2(1-\mu_{GS})\sqrt{1+m_G^2}} \right) \right) \right] \quad (6.8)$$

όπου:

$$m_A = \frac{H_A}{a} \quad (6.9)$$

$$m_G = \frac{H_G}{a} \quad (6.10)$$

με H_A το πάχος της ασφαλτικής στρώσης και H_G το ισοδύναμο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, δηλαδή:

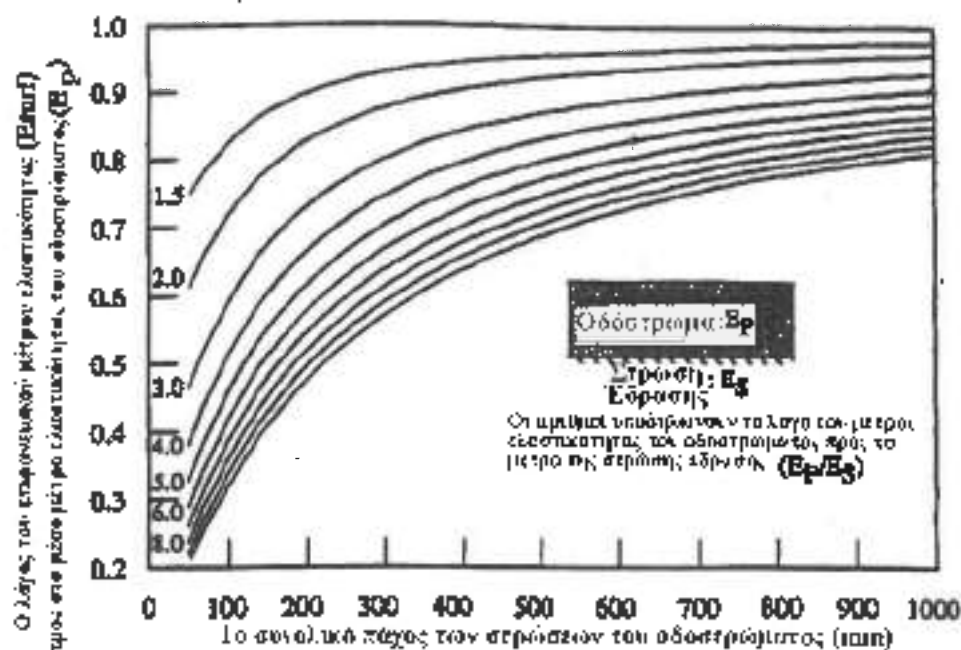
$$H_G = \left(\frac{E_A}{E_{GS}} \right)^{\frac{1}{3}} \times H_A \times a \quad (6.11)$$

και

$$a = 1.1 - 0.1 \left(\frac{E_A}{E_{GS}} \right) \geq 0.9 \quad (6.12)$$

Το σχήμα 6.5 βοηθάει στην απόκτηση των τιμών E_A και E_{GS} . Αυτό το σχήμα ήδη λαμβάνει υπόψη του όλα τα δεδομένα του FWD. Ο υπολογισμός γίνεται με τη διαδικασία δοκιμών και επαναλήψεων, όπου το E_{AG} αντικαθιστάται από

το E_{SUK} και το E_{SC} από το E_S . Επιπλέον το σχήμα αυτό καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της τιμής του E_S εκτιμώντας εκ των προτέρων το λόγο E_S/E_3 [14].



Σχήμα 6.5 [14]

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο, πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές δοκιμές με τα στοιχεία που προέκυψαν από το συμβατικό FWD (Πίνακας 6.1) [14].

	Θέση D				Μέση Τιμή θέσης G
	0	500	1000	2000	
H_d (mm)	120	237	239	251	50
H_b (mm)	980	1000	1250	1190	710
E_{G3} (MPa)	291	333	490	369	194
E_{A3} (MPa)	665	547	1141	943	280
E_A (MPa)	1085	607	1411	1183	547
E_S (MPa)	320	365	538	408	214
E_P (MPa)	368	406	664	517	230
PFWDE _P (MPa)	471	483	952	727	246
FWD E _P (MPa)	470	1486	1358	1221	234

Πίνακας 6.1: Ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από το PFWD με βάση την παραπάνω μέθοδο και σύγκριση με τα δεδομένα του συμβατικού FWD [14]

Οι σύγκριση, όπως είναι προφανές, έδειξε σημαντικές αποκλίσεις σε πολλές περιπτώσεις (συγκεκριμένα σε 3 από τις 5), οι οποίες αποδόθηκαν στις μεταβολές του λόγου του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (H_A σε mm) προς το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας (E_A σε MPa). Ύστερα από γραμμική συσχέτιση του λόγου $\frac{PFWD - E_p}{FWD - E_p}$ με το λόγο H_A/E_A προέκυψε η ακόλουθη έκφραση[14]:

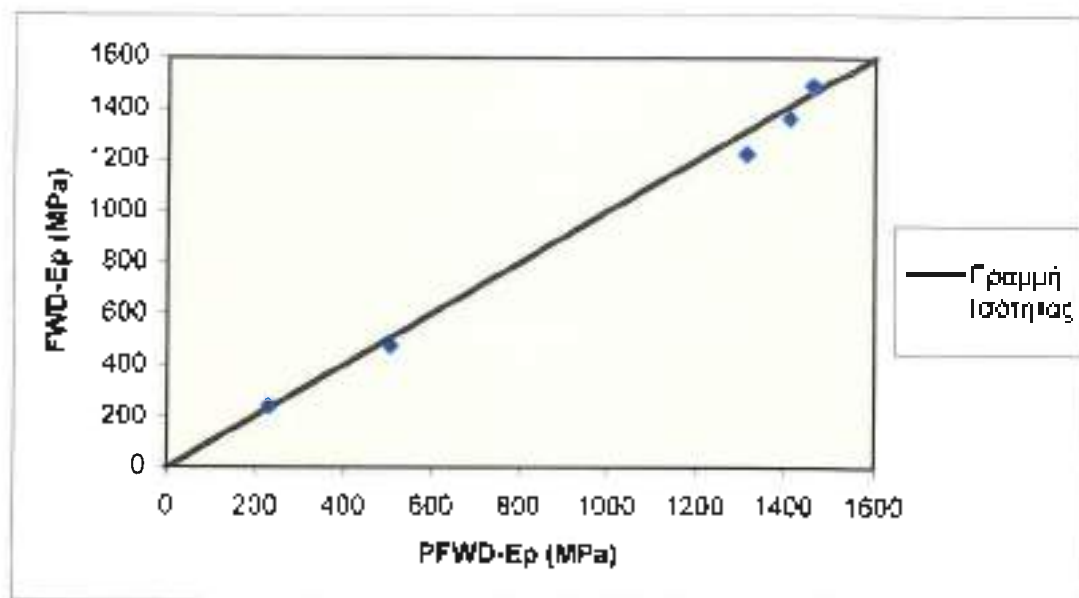
$$F_r = 0,3 + 7,0 \times \frac{H_A}{E_A} \geq 1 \quad (6.13)$$

όπου F_r ο λόγος PFWD- E_p προς FWD- E_p .

Μετά τον πολλαπλασιασμό των μέσων μέτρων ελαστικότητας E_p που προέκυψαν από τις μετρήσεις της συσκευής LOADMAN με το συντελεστή F_r , οι αποκλίσεις δείχνουν να μειώνονται δραστικά (Πίνακας 6.2, Σχήμα 6.6):

	Θέση D				Μέση Τιμή θέσης G
	0	500	1000	2000	
H_A (mm)	120	237	239	251	50
H_G (mm)	980	1000	1250	1190	710
F_r	1,07	3,03	1,49	1,81	0,94
PFWDE _p (MPa)	471	483	952	727	246
FWD E_p (MPa)	470	1488	1358	1221	234
PFWDE _p (MPa)	506	1465	1414	1316	231

Πίνακας 6.2



Σχήμα 6.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων μετά την εφαρμογή του διορθωτικού συντελεστή

Έτσι, ο λόγος F_c μπορεί να θεωρηθεί ως ένας εμπειρικός διορθωτικός συντελεστής για τα αποτελέσματα του PFWD όσον αφορά το μέσο μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p [14].

6.4 Διαδικασία υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης χωρίς την αποκόλληση «καρότου»

Η παραπάνω διαδικασία δύο μετρήσεων στο ίδιο σημείο ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα μπορεί να αποδειχθεί είτε χρονοβόρα είτε εξαιρετικά δαπανηρή, οπότε η χρήση του PFWD να μην προσφέρει μια ουσιαστική εξέλιξη στον τομέα της εκτίμησης οδοστρωμάτων. Εξάλλου, κύριο μέλημα της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος μιας μη καταστρεπτικής μεθόδου αξιολόγησης οδοστρωμάτων, ενώ κατά την παραπάνω διαδικασία απαιτείται η αποκόλληση «καρότου» σε κάθε σημείο που πραγματοποιείται η δοκιμή, γεγονός κάθε άλλο παρά μη καταστρεπτικό! Γι' αυτό, παρακάτω,

αναπτύσσεται μια τεχνική που επιτρέπει την απόκτηση των αποτελεσμάτων με μια μόνο μέτρηση.

Όπως προαναφέρθηκε, το PFWO «αισθάνεται» μόνο ένα μικρό βάθος του οδοστρώματος, οπότε μετράει ένα μέτρο ελαστικότητας το οποίο αφορά τις ανώτερες στρώσεις (E_{AG} σχήμα 6.3). Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην ακόλουθη προσεγγιστική έκφραση[24]:

$$E_{AG} = \frac{k_c}{\delta} \times \left[169,0 + 13,5 \left(\frac{E_{AG}}{E_{CS}} \right)^{0,75} \right] \quad (6.14)$$

όπου k_c ο συντελεστής διόρθωσης της παλμικής φόρτισης και ισούται με:

$$k_c = \frac{2,76}{\delta + 3} + 0,08 \quad (6.15)$$

Συχνά στην πραγματικότητα ισχύει: $\frac{E_{AG}}{E_{CS}} \cong 3$, οπότε η σχέση (6.14) γίνεται:

$$E_{AG} = k_c \times \left(\frac{200}{\delta} \right) \quad (6.16)$$

Η σχέση (6.15), (στην οποία ονομάσαμε το υπολογιζόμενο E_{AG} , E_{UR} , γιατί δεν συμπίπτει ακριβώς με την τιμή που μετράει το PFWO) μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά, αφού η ευαισθησία της έκφρασης (6.14) είναι μικρή. Για παράδειγμα, διπλασιάζοντας το λόγο E_{AG}/E_{CS} , ο αριθμητής στη σχέση (6.16) αλλάζει μόλις κατά 10% (220 από 200).

Ύστερα από στατιστική επεξεργασία δεδομένων της συγκεκριμένης δοκιμής[24], προέκυψε μια σχέση ανάμεσα στο λόγο E_{UR}/E_A και στο πάχος της ασφαλτικής στρώσης H_A . Αυτή η σχέση εξαρτάται από το λόγο E_A/E_G :

$$\frac{E_{UR}}{E_A} = 0,684 - 0,461 \times \log \left(\frac{E_A}{E_G} \right) + 0,002 \times H_A \quad (6.17)$$

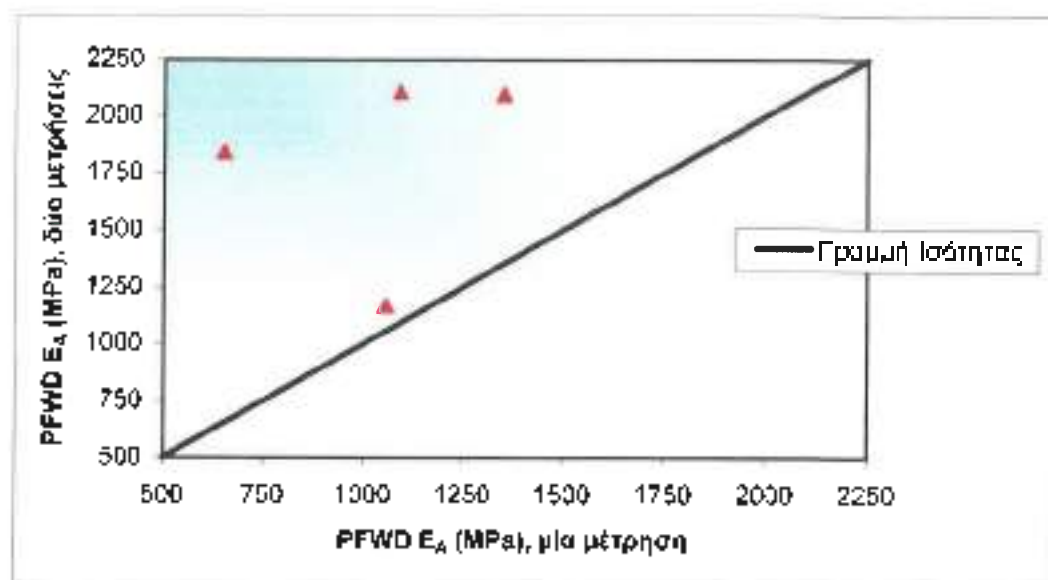
με το H_A σε mm.

Προφανώς στην παραπάνω σχέση όταν $E_A/E_G=1$, η περίπτωση ταυτίζεται με αυτή των δύο στρώσεων όπου $E_{LP}=E_A$. Αντίθετα, όταν ο λόγος E_A/E_G αυξάνει, το μέσο μέτρο ελαστικότητας του ανώτερου οδοστρώματος αποκλίνει από το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης. Είναι ξεκάθαρο ότι όσο το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεγαλώνει, η συσκευή «αισθάνεται» μόνο αυτή. Έτσι για κάθε τιμή του λόγου E_A/E_G , ο λόγος E_{LP}/E_A αυξάνει μέχρι την τιμή 1. Για παράδειγμα, όταν το E_A/E_G ισούται με 6, το ασφαλικό πάχος που αντιστοιχεί στην τιμή $E_{LP}/E_A=1$, είναι περίπου 400mm, γεγονός που βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία και με το διάγραμμα του σχήματος 6.2.

Με την παραπάνω μέθοδο, εκτιμώντας μια λογική τιμή του λόγου E_A/E_G , μπορεί να προκύψει μια εύλογη εκτίμηση της τιμής του E_A . Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ασφαλικής στρώσης, τόσο μικρότερη είναι η εξάρτηση του υπολογισμένου E_A από το λόγο E_A/E_G [24]. Παρόλα αυτά, συγκρίσεις με τη συμβατική δοκιμή FWD, έδειξαν αποκλίσεις στα τελικά αποτελέσματα (Πίνακας 6.3, Σχήμα 6.7).

	Θέση D			
	0	500	1000	2000
H_A (mm)	120	237	239	251
H_G (mm)	980	1000	1250	1190
δ (mm)	0,25	0,3	0,15	0,18
E_{LP} (MPa)	743	611	1275	1053
E_A/E_{LP}	0,70	0,94	0,94	0,97
E_A/E_G	3	3	3	3
1 Μέτρηση- E_A (MPa)	1058	651	1353	1090
2 Μετρήσεις- E_A (MPa)	1165	1641	2096	2106

Πίνακας 6.3[24]

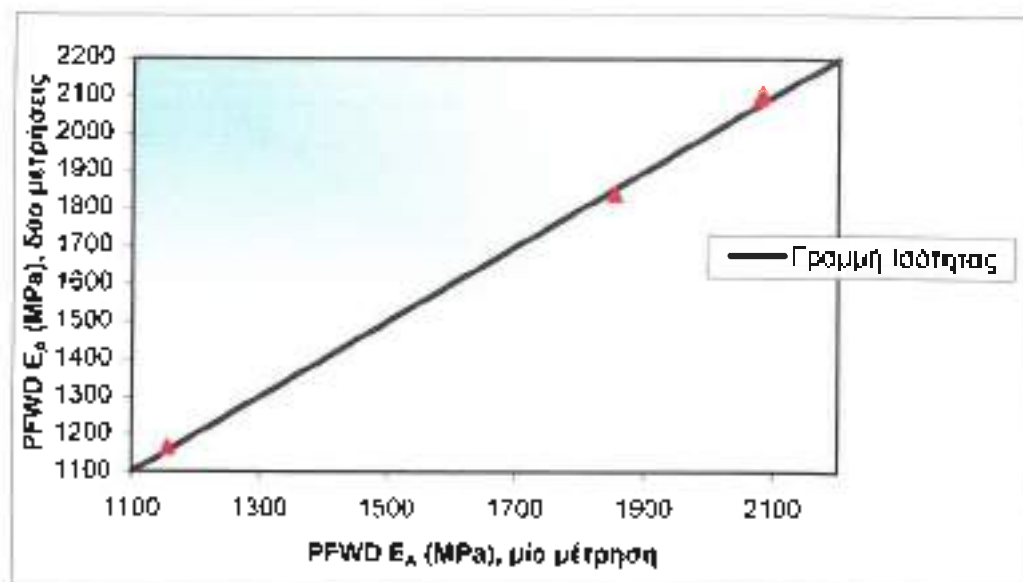


Σχήμα 6.7

Τελικά, όμως, η χρήση του συντελεστή F_c , όπως και στην περίπτωση του υπολογισμού του E_p , έδειξε ότι μειώνει δραστικά τις αποκλίσεις, σε βαθμό που να θεωρούνται αμελητέες. Το γεγονός αυτό, παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα 6.4 και σχήμα 6.8[24].

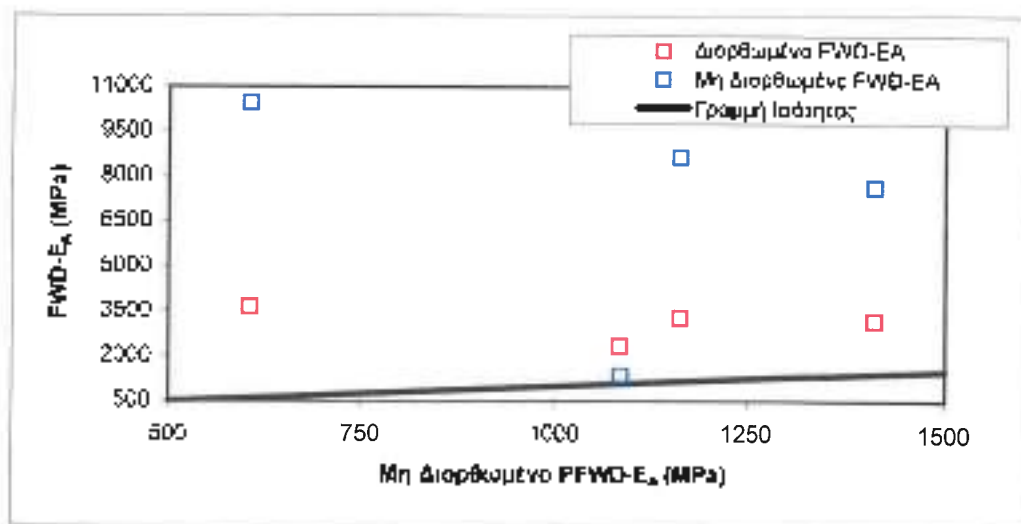
	Θέση D			
	0	500	1000	2000
H_A (mm)	120	237	239	251
δ (mm)	0.25	0.3	0.15	0.18
F_c	1.10	2.85	1.54	1.91
1 Μέτρηση- E_A (MPa)	1058	851	1353	1090
2 Μετρήσεις- E_A (MPa)	1165	1841	2096	2106
1 Μέτρηση- E_A (MPa) διορθωμένο	1.57	1854	2079	2084

Πίνακας 6.4[24]

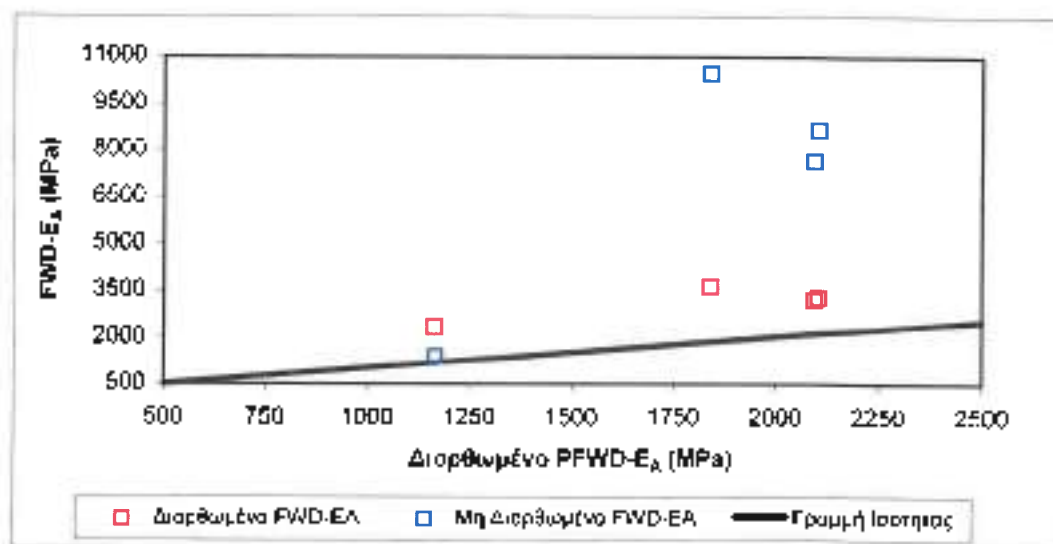


Σχήμα 6.8[24]

Τι γίνεται, όμως, όσον αφορά τη σύγκριση των παραπάνω τιμών με εγκυρότερες και γενικά αποδεκτές μεθόδους (εργαστηριακές δοκιμές, μετρήσεις με το συμβατικό FWD και ανάστροφου υπολογισμό); Εκεί τα πράγματα είναι πιο συγκεκριμένα. Από τον ίδιο το LlnveH παρέχονται μόνο δύο διαγράμματα (σχήματα 6.9, 6.10) σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθόδου των δύο μετρήσεων με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού από τη δοκιμή FWD[24].

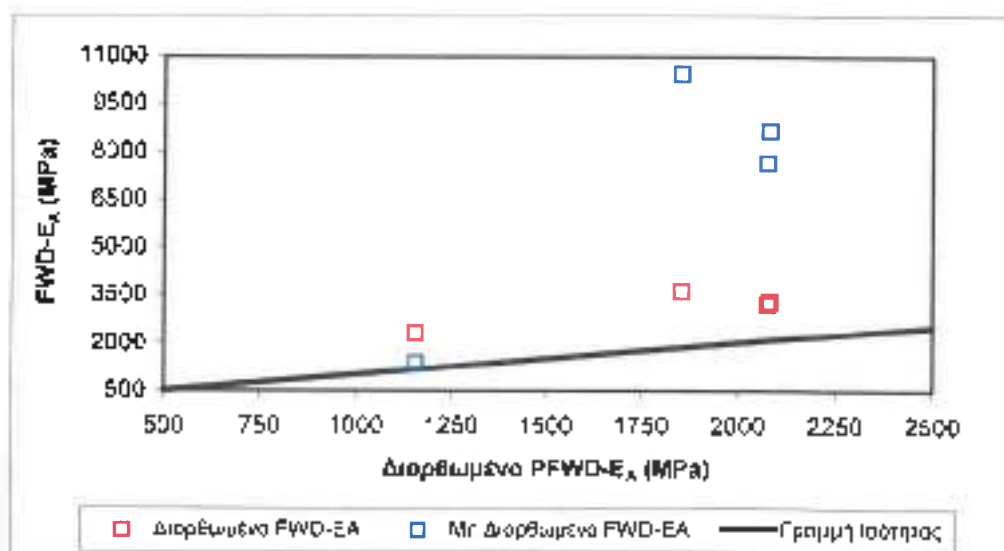


Σχήμα 6.9: Σύγκριση των τιμών (μη διορθωμένων) του μέτρου ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης από τις μετρήσεις του PFWD με τις τιμές του FWD[24]



Σχήμα 6.10: Σύγκριση των τιμών (διορθωμένων) του μέτρου ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης από τις μετρήσεις του PFWD με τις τιμές του FWD[24]

Από τις παραπάνω τιμές, εύκολα προκύπτει και το διάγραμμα σύγκρισης των (διορθωμένων τιμών) του E_a , που προκύπτουν από τη μέθοδο της μιας μέτρησης με τις τιμές του ανάστροφου υπολογισμού των δεδομένων του συμβατικού FWD (σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Σύγκριση των τιμών (διορθωμένων) του μέτρου ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης από τις μετρήσεις του PWD (μέθοδος μιας μέτρησης) με τις τιμές του FWD[24]

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διόρθωση των τιμών που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό των δεδομένων του συμβατικού FWD, αναφέρεται σε μια σχέση που προέκυψε ανάμεσα σε αυτές και τις εργαστηριακές τιμές των ίδιων σημείων, από γραμμική συσχέτιση. Η σκοπιμότητα αυτής της πράξης δεν είναι αντικείμενο αυτής της μελέτης, αλλά σίγουρα παρέχεται μια εικόνα και όσων αφορά τη σύγκριση PWD και εργαστηριακών αποτελεσμάτων (τα οποία παρεμπιπτόντως φαίνεται να συσχετίζονται καλύτερα). Τέλος, η διόρθωση των τιμών που προέκυψαν από τα δεδομένα του LOADMAN, αναφέρεται στον συντελεστή F_c .

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των λόγων των τιμών που προέκυψαν από τις αναλύσεις του M. Livenh. Έτσι, όσων αφορά το λόγο

$$\frac{FWD - E_s}{PWD - E_s (Single Measurement)}, \text{ κυμάνθηκε μεταξύ 1,2 και 5,7. Ο ίδιος λόγος,}$$

αλλά χρησιμοποιώντας τις διορθωμένες, με βάση το εργαστήριο, τιμές του

FWD κυμάνθηκε μεταξύ 1,5 και 2. Τέλος ο λόγος $\frac{FWD - E_1}{Lah - E_1}$ (υπολογίστηκε έμμεσα), κινήθηκε ανάμεσα σε 0,5 και 2,9, τιμές λίγο έξω από τα όρια που δίνει η βιβλιογραφία, οι οποίες όμως δεν είναι ακριβείς.

6.5 Σχόλια

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν δύο μεθοδολογίες μέτρησης με τη συσκευή PWD, για τις οποίες τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της εκτίμησης οδοστρωμάτων. Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία υπολογισμού παρουσιάζεται αναλυτικά ένα παράδειγμα, όπου γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας σε τιμές που μετρήθηκαν με τη συσκευή PWD.

Παράδειγμα:

Δεδομένα:	Πάχος ασφαλτικής στρώσης	$H_a = 120\text{mm}$
	Πάχος υπόφυκτων στρώσεων	$H_b = 980\text{mm}$

Διαδικασία δύο μετρήσεων:

Αποτέλεσμα πρώτης μέτρησης	$E_{av} = 665\text{MPa}$
Αποτέλεσμα δεύτερης μέτρησης	$E_{ub} = 291\text{MPa}$

Καταρχήν γίνεται εφαρμογή των τιμών στη σχέση (7) και εξάγεται ο συντελεστής παραμόρφωσης κατά Burmeister $F_w = 0,44$.

Στη συνέχεια με χρήση των σχέσεων (8),(9),(10),(11),(12) εξισώεται ο συντελεστής παραμόρφωσης κατά Odemark με τον ήδη γνωστό, οπότε με δοκιμές καταλήγουμε στο μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης $E_a^* = 1085\text{MPa}$.

Τέλος υπολογίζεται ο διορθωτικός συντελεστής από τη σχέση (13) $F_c = 1,074$, οπότε εξάγεται η τελική τιμή $E_a = 1165\text{MPa}$.

Διαδικασία μιας μέτρησης:

Μετρούμενη παραμόρφωση	$\delta = 0,25\text{mm}$
------------------------	--------------------------

Εφαρμόζοντας την τιμή της παραμόρφωσης στη σχέση (15) αφού υπολογιστεί το k_e με βάση τον τύπο

$$\left(k_e = \frac{2,76}{\delta + 3} + 0,08 = 0,929 \right)$$

$$(15) \rightarrow E_{(p)} = 743,4\text{MPa}$$

Εκτίμηση λόγου E_A/E_S :

Για $E_A/E_S=3,4(6) \Rightarrow E_A^*=1056\text{MPa}$, $F_c=1,095$ άρα $E_A=1156\text{MPa}$

Για $E_A/E_S=6,4(6) \Rightarrow E_A^*=1315\text{MPa}$, $F_c=0,939$ άρα $E_A=1234\text{MPa}$

Είναι φανερό, ειδικά για το λόγο $E_A/E_S=3$ ότι η διαφορά στα αποτελέσματα είναι αμελητέα. Ας συγκρίνουμε τώρα τα αποτελέσματα και με μία τιμή της συμβατικής δοκιμής FWD. Στο συγκεκριμένο πείραμα το μέσο μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος βρέθηκε $E_p=470\text{MPa}$.

Οι τιμές που προέκυψαν από τα FWD με τη διαδικασία της μιας μέτρησης ήταν:

$E_A=1156\text{MPa}$

$E_S=385\text{MPa}$

Με επικροπή των τιμών αυτών στις σχέσεις (3),(4) έχουμε: $E_p^*=444\text{MPa}$ και για $\lambda=1,1 \Rightarrow E_p=488\text{MPa}$, τιμή πολύ κοντά σε αυτή που έδωσε η δοκιμή FWD

Συμπρασματικά μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν αμφιλεγόμενες τιμές όσων αφορά τον επί τόπου υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων E_A , με χρήση της συσκευής FWD.
- Για τον υπολογισμό του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p φαίνεται να είναι αναγκαία η διαδικασία των δύο μετρήσεων. Παρόλα αυτά με κρίση μηχανικού και σωστή εκτίμηση κάποιων παραμέτρων μπορούμε να έχουμε μια εύλογη εκτίμησή του και με τη διεξαγωγή μιας μέτρησης.
- Οι παραπάνω μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν μετά από μελέτη σχετικά περιορισμένου αριθμού πειραμάτων, οπότε αναγκαίο είναι να γίνει εφαρμογή τους σε μεγαλύτερο αριθμό δοκιμών και να γίνουν κι άλλες συγκρίσεις με τις ήδη αποδεκτές δοκιμές.

^[14] Moshe Livneh, Noam A. Livneh, Eliezer Eliadad, "Determining a Pavement Modulus from Portable FWD Testing", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 20, No. 4, December 1997

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

Περιγραφή Επί Τόπου Έρευνας με τη Συσκευή PFWD και Λήψη Συγκριτικών Στοιχείων

7.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η μέθοδος υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης με χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις με τη συσκευή PFWD. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στη μελέτη του M. Livenh[14],[24]. Τα αποτελέσματα της έρευνας, όσον αφορά την εγκυρότητα της μεθόδου είναι αρκετά συγκεκριμένα. Οι συγκρίσεις με τις τιμές που προέκυψαν από την ανάστροφη ανάλυση των δεδομένων του συμβατικού FWD δεν ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικές, αλλά πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι η βάση δεδομένων ήταν ιδιαίτερα περιορισμένη, οπότε σκόπιμη κρίθηκε η επέκτασή της, η εφαρμογή της μεθόδου πάνω στα νέα στοιχεία και η νέα σύγκριση με άλλες μεθόδους ευρείας αποδοχής (back-analysis των δεδομένων του FWD, εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών ύστερα από δειγματοληψία).

Στα πλαίσια, λοιπόν, ενός προγράμματος διαχείρισης της οδικής υποδομής στον ελληνικό χώρο έγιναν οι απαραίτητες μετρήσεις και δοκιμές ώστε να αποκτηθούν τα αναγκαία δεδομένα.

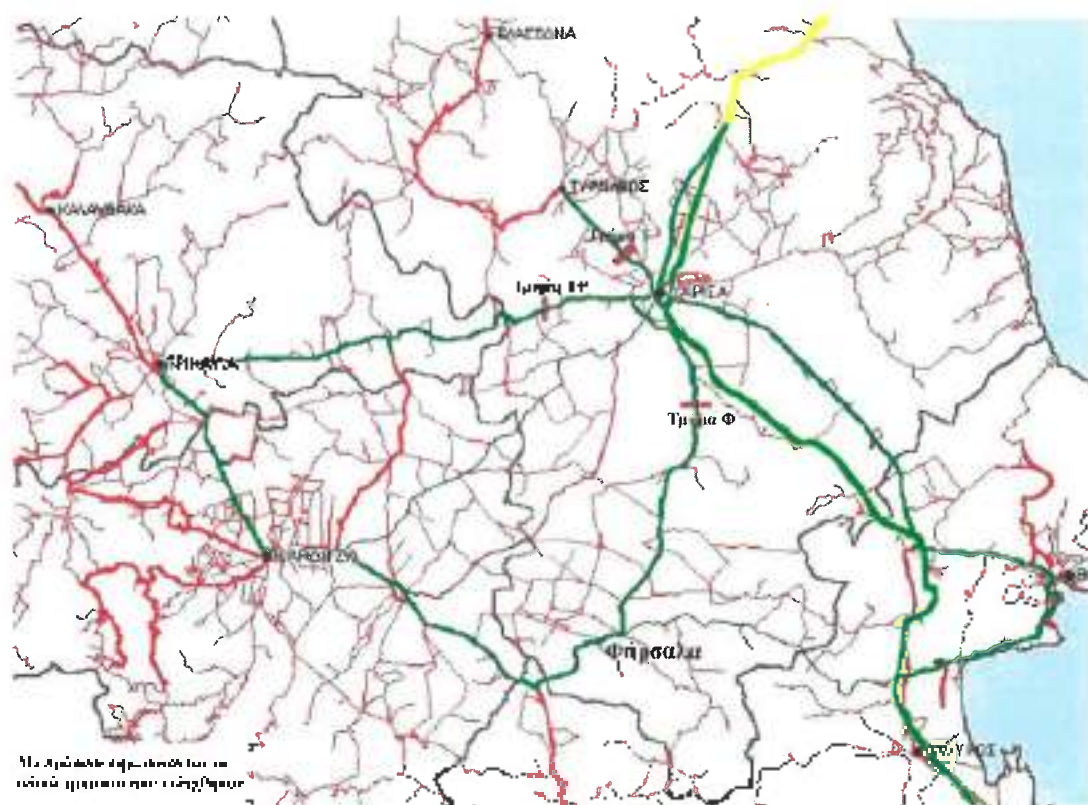
7.2 Περιοχές όπου πραγματοποιήθηκε η επί τόπου επισκόπηση

Με σκοπό την επιλογή όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερου δείγματος, ώστε να συμπεριληφθούν οι περισσότερες πιθανές περιπτώσεις, έγινε προσπάθεια να μελετηθούν περιοχές με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και ποικιλία οδών και οδοστρωμάτων. Τελικά, η έρευνα διεξάχθηκε στα οδικά δίκτυα της βορειοανατολικής Πελοποννήσου (Κορινθία, Αργολίδα και μέρος

της Αρκαδίας), της Θεσσαλίας και της Χαλκιδικής. Οι οδοί που πραγματοποιήθηκε οι έρευνα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 7.1: Δίκτυο ΒΑ Πελοποννήσου



Σχήμα 7.2: Δίκτυο Θεσσαλίας



Σχήμα 7.3: Δίκτυο Χαλκιδικής

Στα οδικά δίκτυα που φαίνονται σημειωμένα στους παραπάνω οδικούς χάρτες και με βήμα 400m πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το FWD και πιο συγκεκριμένα την πιο βαριά έκδοσή του, σχεδιασμένη και για οδοστρώματα αεροδρομίων, το **Heavy Weight Deflectometer** (σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4: Το HWD (Dynatest 8081)

7.3 Λεπτομερής έρευνα (detailed survey)

Μετά τις μετρήσεις με το HWD, αποκτήθηκε μια γενική εικόνα του δικτύου κάθε περιοχής. Έτσι, επιλέχθηκαν κάποια οδικά τμήματα στα οποία κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια πιο λεπτομερής επισκόπηση. Σε αυτό το στάδιο της έρευνας πραγματοποιήθηκαν και οι μετρήσεις με τη συσκευή *LOADMAN*. Τα τμήματα επιλέχθηκαν με βάση την ποικιλία στη μορφή, στην ηλικία και στην επιφανειακή κατάσταση, ώστε το δείγμα να αντιπροσωπεύει την πλειοψηφία των ελληνικών οδών. Βέβαια, πρωταρχικό ρόλο στην επιλογή έπαιξε και η ασφάλεια της ομάδας εργασίας, αφού για να διεξαχθεί η λεπτομερής έρευνα απαιτείται κάποιος χρόνος εργασιών επί του

οδυστρώματος, με αποτέλεσμα να χρειάζεται αποκλεισμός του οδικού τμήματος. Οπότε, προφανώς, αυτό ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί σε αυτοκινητόδρομους ή εθνικές οδούς, με επακόλουθο το δείγμα να περιορίζεται σε παρχιακό επίπεδο.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν 4 οδικά τμήματα στο δίκτυο της Χαλκιδικής τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια ως H1, H2, H3, H4, 3 οδικά τμήματα του δικτύου της Πελοποννήσου (TM1, TM2, TM3) και 3 της Θεσσαλίας (T, TP, Φ). Σε αυτά τα τμήματα, πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια η λεπτομερής έρευνα.

Η λεπτομερής επισκόπηση περιλάμβανε:

- επιλογή του οδικού τμήματος (συνήθως μήκους ενός χιλιομέτρου) και αποκλεισμός
- επιβολή της δοκιμής με τη συσκευή HWD με βήμα 10m (σχήμα 7.5). Σε κάθε σημείο πραγματοποιούνταν έξι μετρήσεις υπό τάση 700kPa και έξι υπό τάση 1000kPa
- εξασφάλιση των σημείων στα οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή πέτοντος βάρους και επί τόπου και με το σύστημα GPS, ώστε να ακολουθήσουν οι υπόλοιπες δοκιμές, αλλά και να μπορέσει να επαναληφθεί μελλοντικά η έρευνα στα ίδια σημεία
- πραγματοποίηση μετρήσεων με τη συσκευή *LOADMAN* (σχήμα 7.6)
- λήψη πυρήνων από ορισμένα σημεία (σχήμα 7.7)
- δοκιμή με το DCP (Dynamic Cone Penetrometer) στα σημεία όπου έγινε η πυρηνοληψία
- δοκιμές προσδιορισμού επιφανειακής υφής και ομαλότητας (οι οποίες δεν έχουν άμεση σχέση με την παρούσα μελέτη)
- και τέλος αποκατάσταση των σημείων όπου λήφθηκαν τα «καρότα».



Σχήμα 7.5: Η δοκιμή πέπτοντος βάρους



Σχήμα 7.6: Μετρήσεις με τη συσκευή LOADMAN



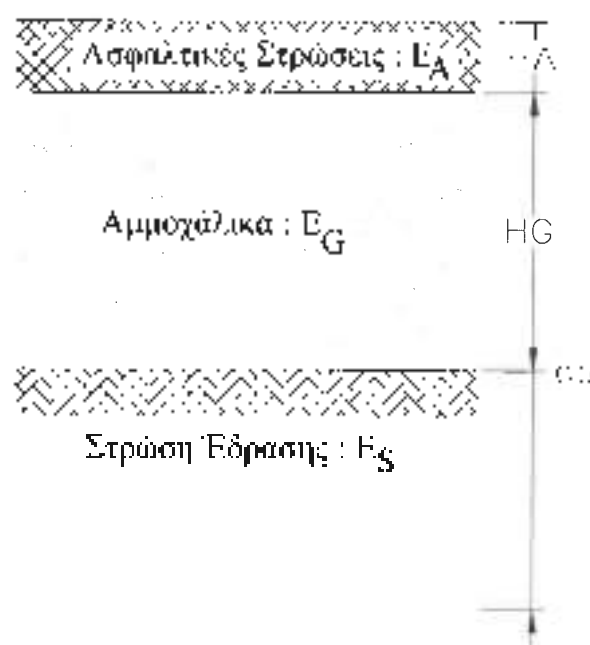
Σχήμα 7.7: Λήψη πυρήνων

7.4 Μετρήσεις με τη συσκευή **LOADMAN**

Όσον αφορά το PFWD, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα ίδια σημεία που έγιναν και οι δοκιμές με το HWD, με σκοπό τη δημιουργία συγκρίσιμων βάσεων δεδομένων που προήλθαν από τις δύο συσκευές. Σε κάθε σημείο έγιναν (στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων) 10-11 μετρήσεις. Αναλυτικά, όλα τα δεδομένα παρουσιάζονται στο παράρτημα.

7.5 Γενικά χαρακτηριστικά

Αρχικά, ενδιαφέρον θα είχε να παρουσιαστούν τα γενικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη οδοστρωμάτων, τα οποία αποκτήθηκαν με την επί τόπου επισκόπηση της περιοχής και με την πρώτη ματιά στα στοιχεία των δοκιμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα οδοστρώματα που μελετήθηκαν ήταν εύκαμπτα (σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8: Τυπική δομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Τα γενικά χαρακτηριστικά των παραπάνω οδικών τμημάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1 που ακολουθεί.

Ο προηγούμενος πίνακας δίνει μια πρώτη εικόνα των οδικών τμημάτων που μελετήθηκαν. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στα ακόλουθα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Στατιστικός Έλεγχος επί τόπου Μετρήσεων με το PFWD

8.1 Εισαγωγή

Όπως έχει επανειλημμένα αναφερθεί, όσων αφορά τον τομέα της αξιολόγησης οδοστρώματων, το PFWD βρίσκεται ακόμη στο στάδιο του ελέγχου της αξιοπιστίας του. Για το σκοπό αυτό, αναγκαία είναι μια συνεχής πρακτική εφαρμογή του σε πειραματικό επίπεδο και έπειτα, έλεγχος των αποτελεσμάτων μέσω μιας πρωτογενούς στατιστικής επεξεργασίας και σύγκρισής τους, όπου είναι δυνατό, με άλλες πιο αποδεκτές δοκιμές που δίνουν αντίστοιχα αποτελέσματα. Σε πρώτο στάδιο η επεξεργασία δε χρειάζεται να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, αφού πολύτιμα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και από απλές, αλλά πάντα πολύ χρήσιμες διαδικασίες.

Πριν από όλα τα άλλα, βέβαια, πρέπει να ελεγχθεί η ακρίβεια και η εγκυρότητα της μεθόδου μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε, να διασφαλιστεί, δηλαδή ότι τα αποτελέσματά της δεν είναι κάποιοι τυχαίοι αριθμοί, αλλά έχουν κάποια σύνδεση με την πραγματικότητα. Επίσης, πρέπει να βρούμε μια αντιπροσωπευτική τιμή, η οποία θα προκύπτει από μια σειρά μετρήσεων, ώστε να τη χρησιμοποιούμε στους υπολογισμούς. Αναγκυία είναι, λοιπόν, μια σύντομη θεωρητική αναδρομή στους τομείς εκείνους της στατιστικής και της θεωρίας σφαλμάτων που θα οδηγήσουν στην εξαγωγή κάποιων ουσιαστών συμπερασμάτων για την παρούσα μελέτη.

8.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο[25],[26],[27]

Σκοπός μας όταν διεξάγουμε μια διαδικασία μετρήσεων, είναι να προσδιορίσουμε την πραγματική τιμή X_0 ενός μεγέθους - στην συγκεκριμένη περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος ή των στρώσεών του. Αυστηχώς όμως, δεν είναι δυνατό, απλώς να πάρουμε μια συσκευή μετρήσεων, να τη χρησιμοποιήσουμε μια φορά, να διαβάσουμε την ένδειξη που μας έδωσε

και να τη θεωρήσουμε ως τη ζητούμενη τιμή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ύπαρξης του «σφάλματος».

Είναι σε όλους γνωστό ότι οι πειραματικές μετρήσεις του ίδιου μεγέθους, ακόμη και αν γίνονται κάτω από τις «ίδιες ονομαστικές» συνθήκες, δίνουν τιμές διαφορετικές μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως:

- Το σύστημα μέτρησης. (Είναι η συσκευή PFWD ακριβής και έγκυρη;)
- Τη διαδικασία μέτρησης και η τεχνική της. (Έγινε ο απαιτούμενος αριθμός μετρήσεων σε κάθε θέση; Τηρούσε ο καταμετρητής όλες τις προδιαγραφές;)
- Τη μετρούμενη μεταβλητή (Χωροχρονική διακύμανση).

Οπότε η πρώτη μέτρηση του ζητούμενου μεγέθους θα δώσει ένα αποτέλεσμα X_1 , το οποίο θα απέχει κατά μια ποσότητα λ από την πραγματική τιμή. Το ίδιο θα συμβεί και με μια πιθανή επόμενη μέτρηση. Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, είναι να διεξαχθεί ένας ικανός αριθμός μετρήσεων, ώστε με κάποια μέθοδο να μπορέσει να προσεγγιστεί καλύτερα η πραγματικότητα.

Αφού αποκτηθεί αυτό το δείγμα, ο μηχανικός θέλει να γνωρίζει :

- Μια αντιπροσωπευτική τιμή που να χαρακτηρίζει κατά βέλτιστο τρόπο το δεδομένο σύνολο τιμών.
- Μια αντιπροσωπευτική τιμή, η οποία χαρακτηρίζει τη διακύμανση των τιμών.
- Ένα διάστημα γύρω από την αντιπροσωπευτική τιμή, στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται η πραγματική τιμή της μεταβλητής.

Ποια είναι, όμως, η αντιπροσωπευτική αυτή τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στους περαιτέρω υπολογισμούς μιας μελέτης; Επειδή, εύλογη είναι η θεώρηση ότι το συνολικό σφάλμα σε κάθε μέτρηση είναι εντελώς τυχαίο, η μόνη ασφαλής

υπόθεση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι η πιο πιθανή τιμή ενός μετρούμενου μεγέθους είναι η μέση τιμή ενός αριθμού εξίσου αξιόπιστων μετρήσεων (*Gauss*). Η μέση τιμή, ως γνωστόν, ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των μετρήσεων προς τον αριθμό τους, δηλαδή:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Το δεύτερο ζητούμενο μέγεθος, είναι μια τιμή που να χαρακτηρίζει τη διακύμανση των τιμών. Αυτή η τιμή αποδεικνύεται ότι είναι η

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

που ονομάζεται *τυπική απόκλιση της μιας μέτρησης* (αντίστοιχα η σ^2 ονομάζεται *διασπορά*) και είναι ένα μέτρο της διασποράς των μετρήσεων γύρω από την πραγματική τιμή X_0 , οπότε και ένα μέτρο αξιολόγησης της ακρίβειας της μεθόδου μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε. Όσο πιο μικρή η τυπική απόκλιση τόσο πιο ακριβής η μέθοδος. Επίσης, ορίζεται ο συντελεστής απόκλισης ως ο λόγος

$$\nu = \frac{\sigma}{\bar{X}},$$

ο οποίος είναι ένα σχετικό μέγεθος, που θα χρησιμεύσει παρακάτω στην σύγκριση των αποτελεσμάτων για διαφορετικές μεταβλητές.

Το τρίτο ζητούμενο μέγεθος είναι ένα διάστημα γύρω από τη μέση τιμή, στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται η πραγματική τιμή της ζητούμενης μεταβλητής. Ας υποθέσουμε ότι η σειρά των n μετρήσεων επαναλαμβάνεται πολλές φορές, οπότε προκύπτει μια μέση τιμή X_k για κάθε σειρά. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, η μέση τιμή αυτών των X_k θα τείνει προς το X_0 . Θα υπάρξει όμως και μια διασπορά των X_k γύρω από το X_0 , η οποία θα χαρακτηρίζεται από

μια τυπική απόκλιση σ_{μ} , που ονομάζεται *τυπική απόκλιση της μέσης τιμής*. Αποδεικνύεται ότι

$$\sigma_{\mu} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Η φυσική σημασία της σ_{μ} είναι ότι δίνει ένα μέτρο του πιθανού σφάλματος που κάνουμε υποθέτοντας ότι η $\bar{x}$ είναι η τιμή του μεγέθους που έχει πραγματική τιμή x_0 . Η σ_{μ} βοηθάει να προσδιορίσουμε την περιοχή στην οποία κείται η πραγματική τιμή σε σχέση με τη μέση τιμή με μια πιθανότητα P , ως εξής:

$$X_0 = \bar{X} \pm t_{n,p} \cdot \sigma_{\mu}$$

όπου n οι βαθμοί ελευθερίας του δείγματος και $t_{n,p}$ η αντίστοιχη τιμή της κατανομής t του Student.

Τέλος, ένα συνηθισμένο φαινόμενο κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της διαδικασίας των μετρήσεων, είναι η λήψη κάποιων τιμών οι οποίες αποκλίνουν τόσο πολύ από την κεντρική τάση, ώστε θα πρέπει να εξαιρεθούν από την περαιτέρω στατιστική ανάλυση για να μην επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα, με τη λογική ότι κατά τη συγκεκριμένη μέτρηση υπεισήλθε ένας αστάθμητος παράγων, μη σχετιζόμενος με την πραγματική μεταβλητή. Για τον αποκλεισμό τέτοιων τιμών, αναπτύχθηκαν ειδικές τεχνικές, διότι πρέπει να υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα ότι αυτή η απόκλιση δεν έχει κάποια φυσική σημασία, ουσιώδη για την ακόλουθη ανάλυση. Η απλούστερη μέθοδος εντοπισμού προβληματικών σημείων, για μικρά δείγματα, είναι να εξαιρεθούν αυτά τα οποία βρίσκονται έξω από το διάστημα πιθανότητας εμφανίσεως 99,8%, δηλαδή $\bar{x} \pm 3 \cdot \sigma_{\mu}$ (μέθοδος τριών σίγμα). Συχνά χρησιμοποιείται και το κριτήριο *Chapman*, σύμφωνα με το οποίο μια μέτρηση απορρίπτεται αν η πιθανότητα να παρατηρηθεί η συγκεκριμένη απόκλιση είναι μικρότερη από 0,5n.

8.3 Στατιστική Επεξεργασία Δείγματος

Το πρώτο βήμα, φυσικά, είναι να επιλεγεί το κατάλληλο δείγμα, πάνω στο οποίο θα πραγματοποιηθούν οι περαιτέρω έλεγχοι. Το δείγμα αυτό, συγκεντρώθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Επιγραμματικά, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν απλή. Αφού επιλέχθηκε το κατάλληλο τμήμα και χωρίστηκε σε σημεία ανά 10m, σε κάθε σημείο πραγματοποιήθηκε ένα σετ 10-11 μετρήσεων, ώστε να αποκτηθεί ένας ικανός αριθμός δεδομένων. Στα ίδια σημεία πραγματοποιήθηκαν και άλλες δοκιμές, οι οποίες θα χρησιμεύσουν σε επόμενο κεφάλαιο ως μέσο σύγκρισης. Στο παρών κεφάλαιο γίνεται, αποκλειστικά, έλεγχος των δεδομένων της συσκευής *LOADMAN*.

Αναλυτικά οι μετρήσεις και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους (μέσος όρος θέσης, διασπορά, τυπική και μέση απόκλιση) φαίνονται στο παράρτημα. Εδώ θα γίνει ένας γενικότερος σχολιασμός των αποτελεσμάτων, όπως και αναφορά κάποιων χαρακτηριστικών περιπτώσεων. Χάρην ευκολίας στην περαιτέρω ανάγνωση, αναφέρεται (όπως έχει ήδη επισημανθεί) ότι τα οδοστρώματα του δικτύου της Χαλκιδικής χαρακτηρίζονται από τους κωδικούς H1, H2, H3 και H4, τα οδοστρώματα της Θεσσαλίας από τους T, TP, Φ και της Ηελοποννήσου από τους TM1, TM2, TM3. Σημειώνεται ότι οι κωδικοί επιλέχθηκαν από τον εκύστετε καταμετρητή και από περιοχή σε περιοχή διαφέρουν τα κριτήρια επιλογής τους, τα οποία άλλωστε δεν αποτελούν σημαντικό στοιχείο της παρούσας μελέτης.

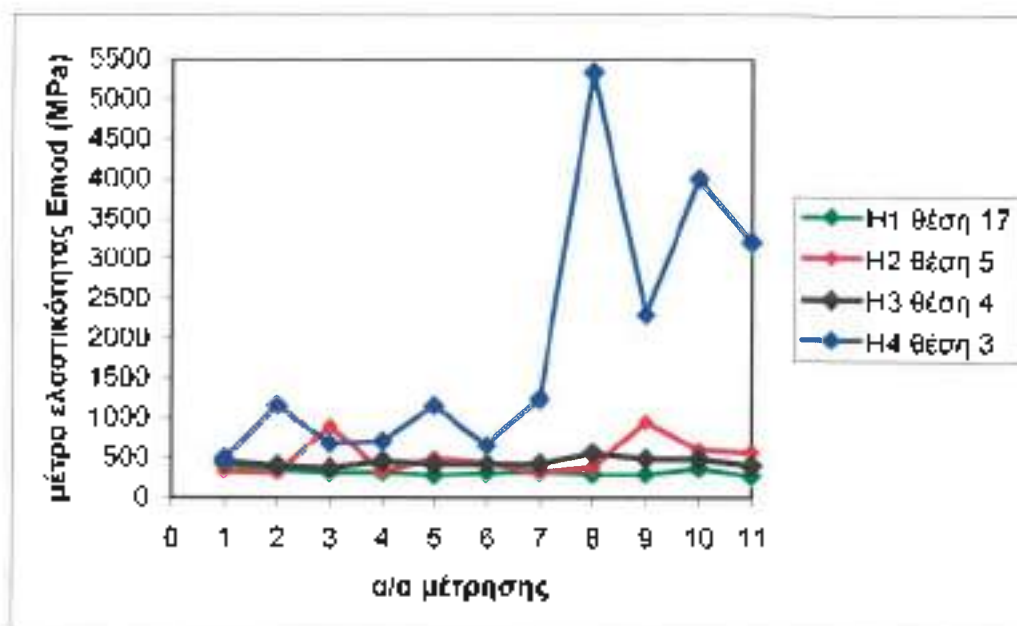
Όπως γίνεται αντιληπτό, έγινε προσπάθεια να συμπεριληφθούν στη μελέτη οδικά τμήματα με ποικίλα χαρακτηριστικά, ώστε να εξαχθούν αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα. Έτσι μελετήθηκαν οδοστρώματα διαφόρων

ηλικιών (από το πολύ νέο οδόστρωμα TP μέχρι τα παλαιά τμήματα της Πελοποννήσου) και διαφόρων επιφανειακών καταστάσεων (από τελείως συμπαγή μέχρι βαριά ρηγματωμένα). Επειδή, όπως έχει προαναφερθεί, σπουδαίο ρόλο στην μεθοδολογία εξαγωγής αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις του PFWB παίζει το πάχος των ασφαλικών στρώσεων, επιλέχθηκαν τμήματα που καλύπτουν όλο το φάσμα των συνήθων παχών των εύκαμπτων οδοστρώματων (παραρτησιάστηκαν τιμές από 20cm έως και 24cm πάνω στο Wheel Path όπου και πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις διεξάχθηκαν τον Ιούλιο του 2001 στη Χαλκιδική, τον Μάρτιο του 2002 στη Θεσσαλία και τον Απρίλιο του 2002 στην Πελοπόννησο.

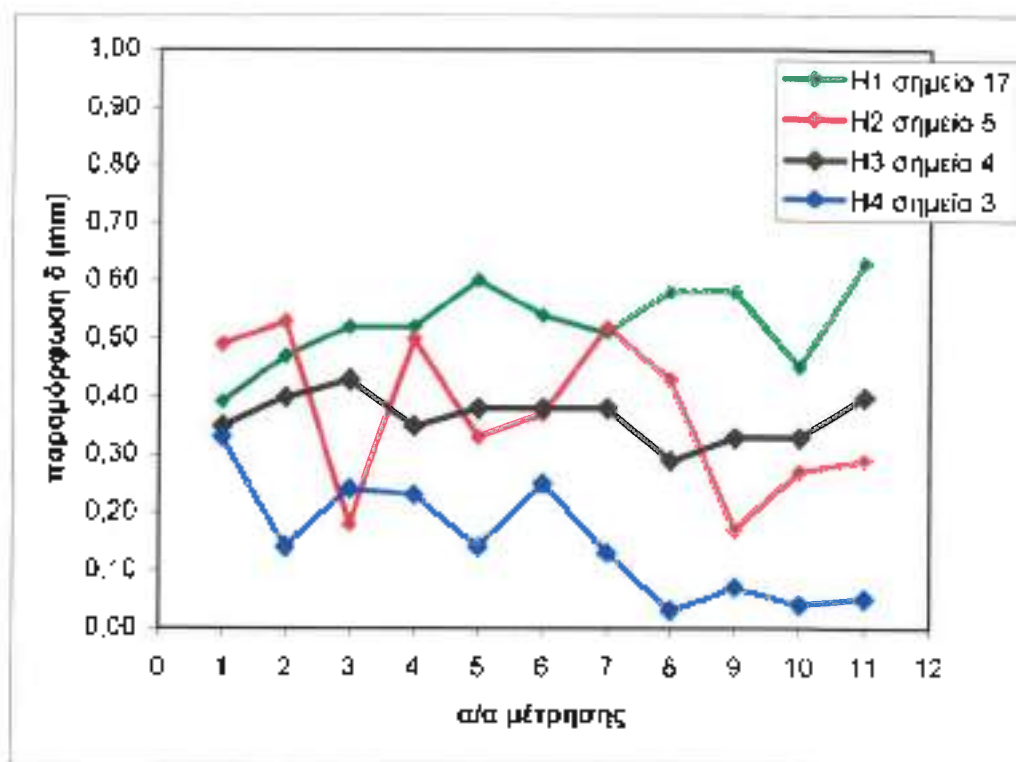
Αρχικά μελετήθηκαν τα στατιστικά στοιχεία όλων των δεδομένων, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας. Όσον αφορά τα οδοστρώματα της Χαλκιδικής: Για τα H1, H3 τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά. Ο συντελεστής απόκλισης των τιμών του μέτρου ελαστικότητας κυμαινόταν από 11% μέχρι 32% και από 12% μέχρι 27% αντίστοιχα. Στο οδόστρωμα H2, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά ήταν της τάξης του $18\% \pm 25\%$, υπήρξαν δύο περιπτώσεις όπου παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη διασπορά των τιμών. Τέλος, στο οδόστρωμα H4 η διασπορά των δεδομένων ήταν πολύ μεγάλη με την απόκλιση να κυμαίνεται από 29% έως και 125% του μέσου όρου. Οι τιμές των παραμορφώσεων, όπως είναι φυσικό, παρουσίασαν ανάλογη διακύμανση, αφού το PFWB υπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας με βάση την παραμόρφωση. Έτσι, για τα οδοστρώματα H1 και H3 παρατηρήθηκαν τιμές του συντελεστή απόκλισης, που κυμαίνονταν από 11% έως 24% και από 11% έως 29% αντίστοιχα. Αντίθετα, για το H2 είχαμε τιμές της τάξης του $19\% \pm 43\%$ και ακόμη πιο ακραίες ήταν οι τιμές του συντελεστή απόκλισης στο H4 όπου έφτασαν και το 67% (αν και πρέπει να σημειωθεί ότι η διακύμανση στις τιμές των παραμορφώσεων δεν παρουσίασε τις ακρότητες των μέτρων ελαστικότητας).

Α/Α Μέτρησης	H1 σημείο 17		H2 σημείο 5		H3 σημείο 4		H4 σημείο 3	
	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]
1	410	0,39	327	0,49	457	0,35	485	0,33
2	340	0,47	302	0,53	400	0,40	1143	0,14
3	308	0,52	880	0,18	372	0,43	657	0,24
4	308	0,52	320	0,50	457	0,35	696	0,23
5	267	0,60	485	0,33	421	0,38	1143	0,14
6	296	0,54	432	0,37	421	0,38	540	0,26
7	314	0,51	308	0,52	421	0,38	1231	0,13
8	276	0,58	372	0,43	552	0,29	5333	0,03
9	276	0,58	941	0,17	485	0,33	2286	0,07
10	356	0,45	593	0,27	485	0,33	4000	0,04
11	254	0,63	552	0,29	400	0,40	3200	0,05
Μέσος Όρος	310	0,53	502	0,37	443	0,37	1893	0,15
Τυπική Απόκλιση	45	0,071	227	0,133	51	0,040	1618	0,100
Συντελεστής Απόκλισης	15%	13%	45%	36%	12%	11%	85%	67%

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά παραδείγματα μετρήσεων (Χαλκιδική)



Σχήμα 8.1: Παράδειγμα αποκλίσεων του μετρούμενου μέτρου ελαστικότητας σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Χαλκιδική)



Σχήμα 8.2: Παράδειγμα αποκλίσεων της μετρούμενης παραμόρφωσης σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Χολκιδική)

Στη Θεσσαλία, οι τιμές, γενικά, παρουσίασαν πιο μικρές στατιστικές αποκλίσεις. Έτσι στις θέσεις Φ και ΤΡ οι αποκλίσεις των μέτρων ελαστικότητας κυμάνθηκαν στα επίπεδα του 9%-18%, ενώ της ίδιας τάξης μεγέθους ήταν και οι αποκλίσεις των παραμορφώσεων. Στις ίδιες τιμές κυμάνθηκαν και τα περισσότερα σημεία του οδοστρώματος Τ (Πίνακας 8.2.Σχήματα 8.3, 8.4). Μόνο σε τέσσερις περιπτώσεις είχαμε πολύ μεγάλους συντελεστές απόκλισης μέχρι και 113% στην πιο ακραία. Για τα σημεία που επιλέχθηκαν στη Θεσσαλία πρέπει να σημειωθούν τα εξής δύο στοιχεία. Στο οδόστρωμα Τ τα τρία τελευταία σημεία (11,12,13) βρισκόταν σε επανεπιστρωμένο οδόστρωμα με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά τους να διαφέρουν από το υπόλοιπο οδόστρωμα. Έτσι στην υπόλοιπη επεξεργασία, αυτά τα σημεία θεωρούνται ως διαφορετικό οδόστρωμα. Επίσης, στο

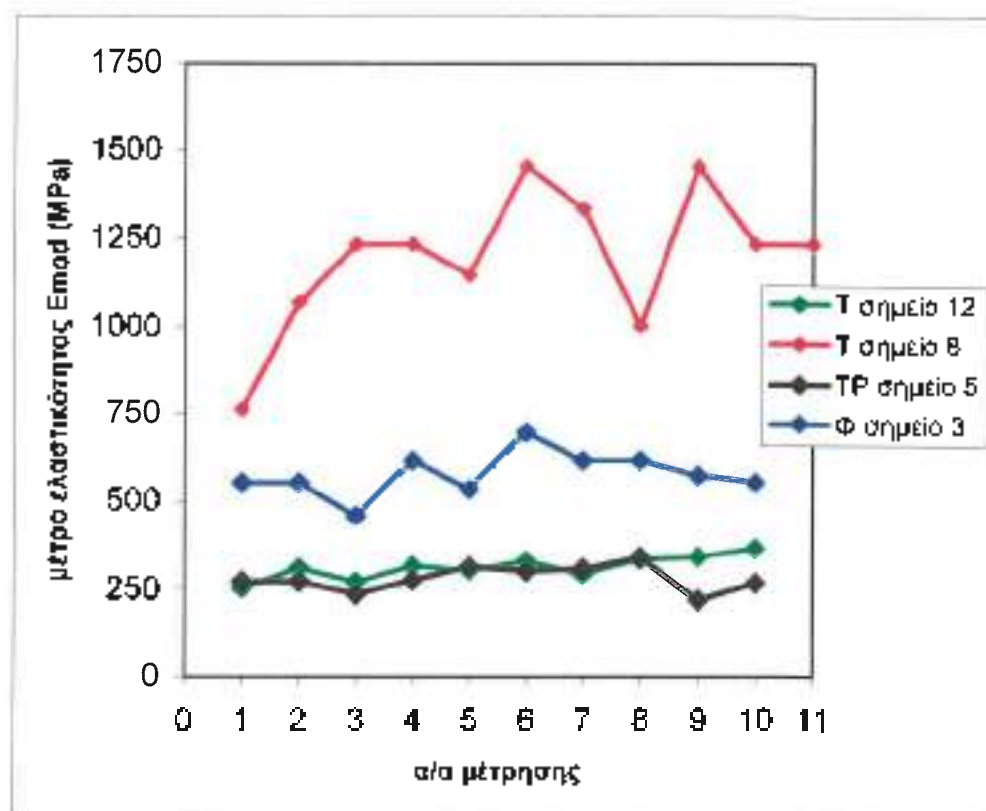
οδόστρωμα Φ και συγκεκριμένα στο σημείο 4, οι τέσσερις πρώτες μετρήσεις έδωσαν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα από τις έξι επόμενες χωρίς κάποιο προφανή λόγο (Πίνακας 8.3). Έτσι μελετήθηκαν και ως ξεχωριστά σημεία, με σκοπό τη σύγκριση τους με μετρήσεις άλλων οργάνων.

Α/Α Μέτρησης	Τ σημείο 12		Τ σημείο 8		ΤΡ σημείο 5		Φ σημείο 3	
	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]
1	250	0,64	762	0,21	271	0,59	552	0,29
2	308	0,52	1067	0,15	271	0,59	552	0,29
3	268	0,61	1231	0,13	235	0,68	457	0,35
4	314	0,51	1231	0,13	276	0,58	615	0,26
5	302	0,53	1143	0,14	314	0,51	533	0,2
6	327	0,49	1455	0,11	302	0,53	606	0,23
7	291	0,55	1333	0,12	308	0,52	615	0,26
8	333	0,48	1000	0,16	340	0,47	615	0,26
9	340	0,47	1455	0,11	219	0,73	571	0,28
10	364	0,44	1231	0,13	267	0,60	552	0,29
11			1231	0,13				
M.O.	310	0,52	1194	0,14	280	0,58	576	0,27
Τυπική Απόκλιση	34	0,062	201	0,028	37	0,079	64	0,040
Συντελεστής Απόκλισης	11%	12%	17%	20%	13%	14%	11%	15%

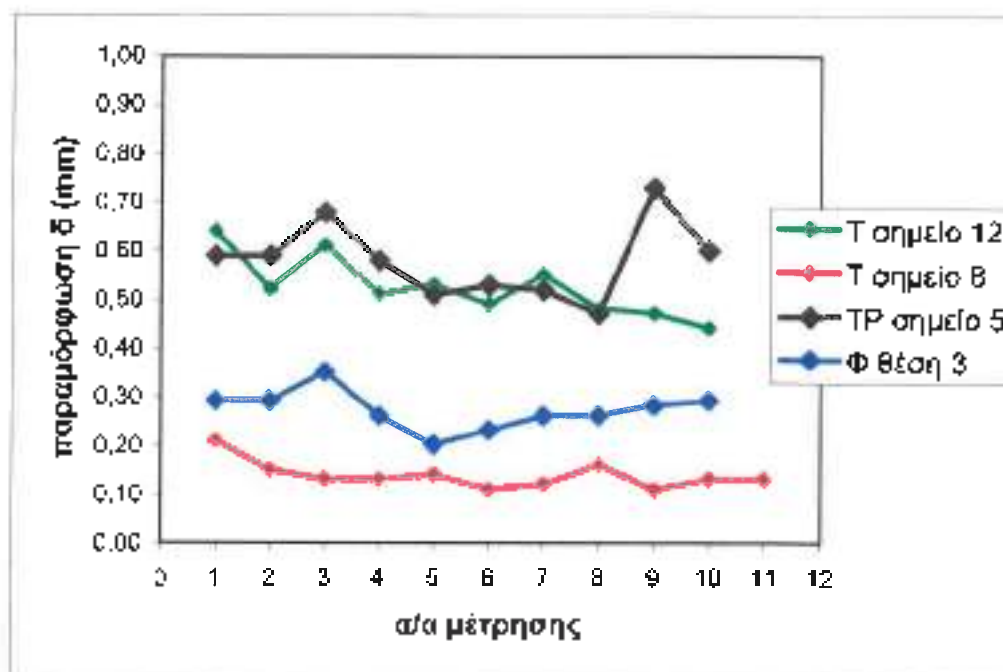
Πίνακας 8.2· Χαρακτηριστικά παραδείγματος μετρήσεων (Θεσσαλία)

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
4	1	356	0,45
	2	372	0,43
	3	327	0,49
	4	390	0,41
	5	571	0,28
	6	500	0,32
	7	516	0,31
	8	662	0,29
	9	571	0,28
	10	516	0,31
	11		
Μέση Τιμή X_p		467	0,357

Πίνακας 8.3: Σημείο 4 οδοστρώματος Φ



Σχήμα 8.3: Παράδειγμα αποκλίσεων του μετρούμενου μέτρου ελαστικότητας σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Θεσσαλία)

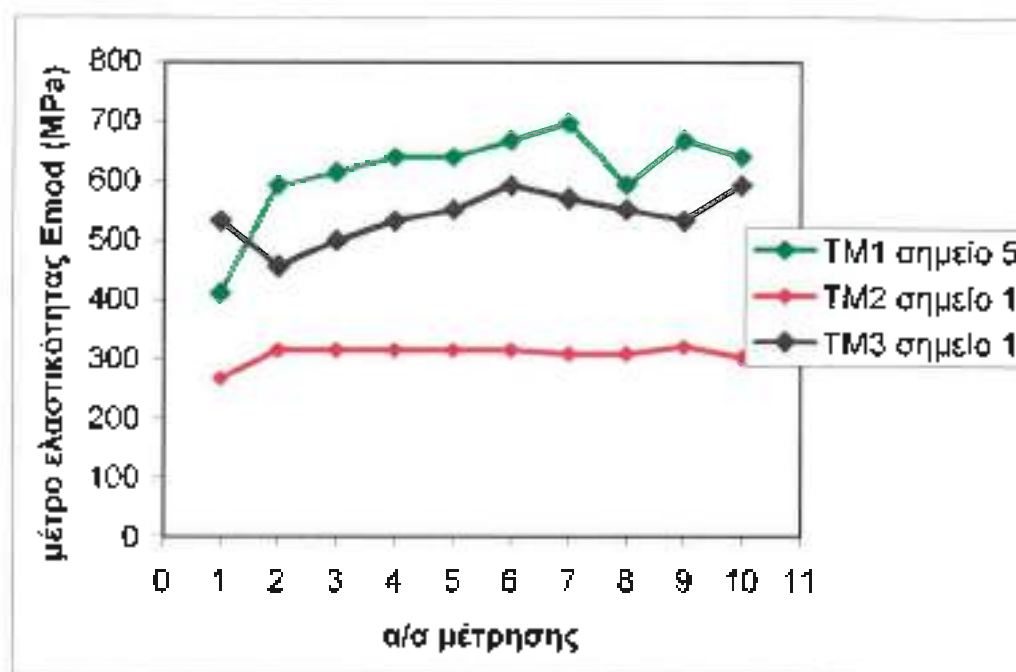


Σχήμα 8.4: Παράδειγμα αποκλίσεων της μετρούμενης παραμόρφωσης σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Θεσσαλία)

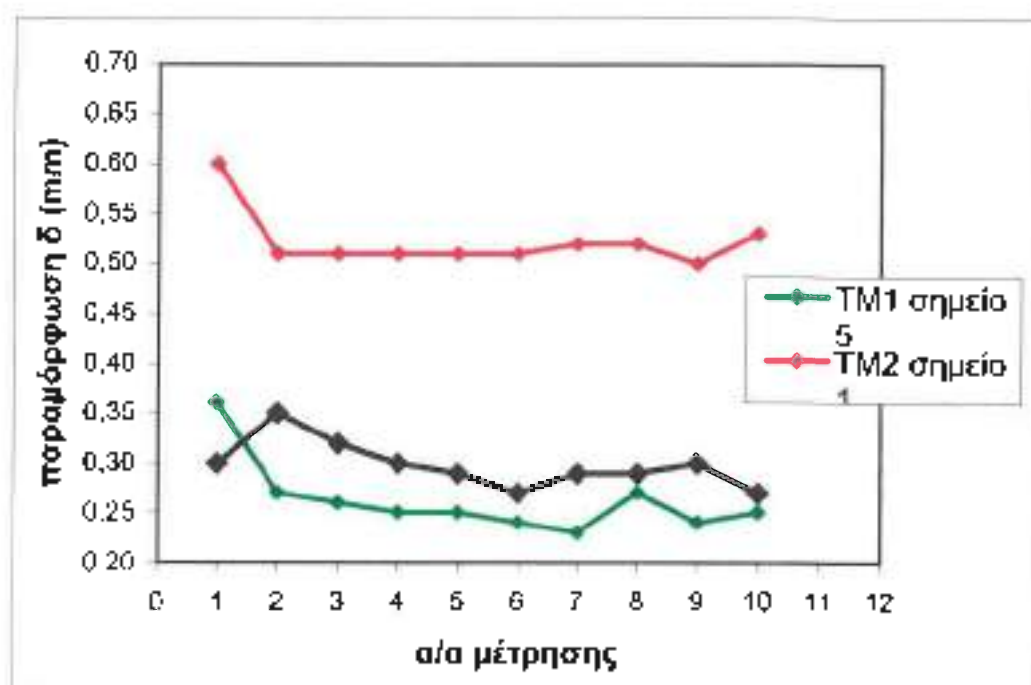
Τέλος, στην Πελοπόννησο παρατηρήθηκαν και οι μικρότερες διασπορές των τιμών στις σειρές των μετρήσεων. Ειδικά στο οδόστρωμα TM2 οι μετρήσεις ήταν σε γενικές γραμμές οι πιο ακριβείς (σημειώνεται ότι το TM2 αποτελείται από μια υπερβολικά λεπτή ασφαλτική στρώση, ~35mm). Στα συγκεκριμένα οδοστρώματα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το δείγμα ως έχει, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει προφανής λόγος απόρριψης κάποιων τιμών. Για παραστατικά η παραπάνω κατάσταση απεικονίζεται στον πίνακα 8.4 και στα σχήματα 8.5 και 8.6, όπου και παρουσιάζονται παραδείγματα σειρών μετρήσεων σε επιλεγμένα σημεία.

Α/Α Μέτρησης	TM1 σημείο 5		TM2 σημείο 1		TM3 σημείο 1	
	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]	E mod [MPa]	Deflection [mm]
1	410	0,36	267	0,60	533	0,30
2	593	0,27	314	0,51	457	0,35
3	615	0,26	314	0,51	500	0,32
4	640	0,25	314	0,51	533	0,30
5	640	0,25	314	0,51	552	0,29
6	667	0,24	314	0,51	593	0,27
7	696	0,23	308	0,52	571	0,29
8	593	0,27	308	0,52	552	0,29
9	867	0,24	320	0,50	533	0,30
10	640	0,25	302	0,53	593	0,27
M.O.	616	0,26	308	0,52	542	0,30
Τυπική Απόκλιση	79	0,037	15	0,029	41	0,023
Συντελεστής Απόκλισης	13%	14%	5%	5%	8%	8%

Πίνακας 8.4: Χαρακτηριστικά παραδείγματα μετρήσεων (Πελοπόννησος)



Σχήμα 8.5: Παράδειγμα αποκλίσεων του μετρούμενου μέτρου ελαστικότητας σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Πελοπόννησος)



Σχήμα 8.6: Παράδειγμα αποκλίσεων της μετρούμενης παραμόρφωσης σε χαρακτηριστικά σημεία για κάθε οδόστρωμα (Πελοπόννησος)

8.4 Βελτίωση ακρίβειας δείγματος

Η εμπειρία της χρήσης του PFWD σε ασύνδετα υλικά, όπως οι εδαφικές στρώσεις του οδοστρώματος, έδειξε ότι, συνήθως, κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας μετρήσεων, οι δύο πρώτες δοκιμές δείχνουν μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης ($\Rightarrow$ μικρότερο μέτρο ελαστικότητας) από τις ακόλουθες. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται ως εξής. Είτε ο καταμετρητής χρειάζεται ένα διάστημα εξοικείωσης με τη θέση (μην ξεχνάμε ότι το PFWD πρέπει να είναι κατακόρυφο και να ακουμπάει όλη η επιφάνειά του στο έδαφος), είτε πολλές φορές συμβαίνει ένα είδος συμπίκνωσης του εδάφους κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων μετρήσεων (ένα χαλίκι που προεξέχει, καλύτερη επαφή της επιφάνειας του PFWD μετά την πρώτη και δεύτερη πτώση του βάρους κτλ.). Οπότε σκόπιμο κρίθηκε να ελεγχθεί αν αυτές οι μετρήσεις έχουν τις ίδιες επιπτώσεις και όταν πρόκειται για δοκιμή σε ασφαλικά υλικά.

Υστερα από την αφαίρεση των δύο πρώτων μετρήσεων από κάθε θέση, επαναλήφθηκε η παραπάνω διαδικασία. Τα στατιστικά μεγέθη (τα οποία φαίνονται αναλυτικά στο παράρτημα) έδειξαν ότι σ' αυτή την περίπτωση οι πρώτες μετρήσεις, όχι μόνο δεν επηρεάζουν το δείγμα, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις η αφαίρεσή τους υποβαθμίζει την ακρίβειά του. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της θέσης 3 του οδοστρώματος H3, όπου η πρώτη ανάλυση μας έδωσε συντελεστή απόκλισης 26% και 29% για το E_{mod} και την Παραμόρφωση αντίστοιχα, ενώ μετά την απομάκρυνση των δύο πρώτων μετρήσεων οι αντίστοιχοι συντελεστές έγιναν 29% και 31%. Εξάλλου και με την απλή παρατήρηση του δείγματος δε φάνηκε να υπάρχει κάποια διαφορά στις τιμές των πρώτων μετρήσεων από τις υπόλοιπες, παρά μόνο όταν αυτό συνέβαινε τυχαία.

Ο καλύτερος τρόπος για να βελτιωθεί η ακρίβεια του δείγματος, οπότε στη συνέχεια να καταστεί δυνατή η εύρεση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής για κάθε σειρά μετρήσεων (προφανώς της μέσης τιμής των εναπομεινάντων μετρήσεων), είναι η απόρριψη κάποιων τιμών που για κάποιους λόγους δεν είναι συμβατές με τις υπόλοιπες.

Η πιο εύκολη προσέγγιση του ζητήματος, είναι η απόρριψη της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής κάθε σειράς μετρήσεων και ο έλεγχος των υπολοίπων επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία που ακολουθήθηκε πριν. Η πράξη αυτή είναι εύλογη, καθώς το PFWD είναι αρκετά ελαφρύ και ευάλωτο σε παρενέργειες εξαιτίας εξωγενών παραγόντων. Έτσι, για παράδειγμα, η μικρότερη και η μεγαλύτερη τιμή θα μπορούσαν να οφείλονται είτε σε κακή πρόσφυση της επιφάνειας φόρτισης, είτε σε κακή κατακορύφωση της συσκευής κτλ.

Όπως είναι και φυσικό, κατ' αυτό τον τρόπο τα στατιστικά μεγέθη του δείγματος, βελτιώθηκαν σημαντικά (εκτός από μια περίπτωση στη θέση 8 του

οδοστρώματος H4), δίνοντας πολλές φορές θεαματικά αποτελέσματα, πράγμα που επιβεβαιώνει και την υπόθεση της προηγούμενης παραγράφου. Για παράδειγμα, στη θέση 6 του οδοστρώματος H3, οι συντελεστές απόκλισης έγιναν 15-13% από 24-20% (Μέτρο Ελαστικότητας- Παραμόρφωση). Γενικά, ακόμη και σε πολλές θέσεις του H4, τα μεγέθη έδειξαν ότι η Μέση Τιμή των μετρήσεων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μια καλή εκτίμηση Μέτρου Ελαστικότητας και της Παραμόρφωσης για κάθε θέση, για εφαρμογή στις περαιτέρω διαδικασίες.

Όμως από τη μια η περίπτωση της θέσης 8 του H4, όπου η ανάλυση έδειξε ότι οι τιμές που απορρίφθηκαν ήταν σημαντικές και από την άλλη το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις απορρίφθηκαν τιμές που εμφανιζόταν παραπάνω από μια φορές στην σειρά των μετρήσεων, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η παραπάνω μέθοδος μερικές δεν είναι αρκετά έγκυρη, αφού μπορεί να απορρίπτει τιμές που αποτελούν σημαντικό στοιχείο της σειράς μετρήσεων και συνίσταται μόνο όταν χρειαζόμαστε μια γρήγορη εκτίμηση κάποιων μεγεθών.

Τελικά η διαδικασία που απέδωσε τις τιμές των μεγεθών για κάθε θέση, ήταν η εξής:

- Για κάθε θέση υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των μετρήσεων σ_r .
- Υπολογίστηκε διάστημα $\pm 3\sigma_r$, γύρω από τη μέση τιμή X_r των μετρήσεων.
- Απορρίφθηκαν όλες οι τιμές εκτός του διαστήματος αυτού.
- Υπολογίστηκαν ξανά τα μεγέθη του νέου δείγματος.

* Το διάστημα αυτό σημαίνει ότι η Πραγματική Τιμή της μετρούμενης μεταβλητής έχει πιθανότητα 99% πιθανότητα να βρίσκεται σε αυτό το όριο.

- Η μέση τιμή του νέου δείγματος για κάθε μετρούμενο μέγεθος, θεωρήθηκε η αντιπροσωπευτική τιμή¹ για τη θέση αυτή.

Η διαδικασία για όλες τις θέσεις φαίνεται στο παράρτημα. Εδώ παρατίθεται ο Πίνακας 8.5, ως παράδειγμα:

H1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]	H1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	410	0.39	Βήμα 10m	1	410	0,39
17	2	340	0.47	17	2	340	0.47
	3	308	0.52		3	308	0.52
	4	308	0.52		4	308	0,52
	5	267	0,6		5	267	0,6
	6	296	0,54		6	296	0,54
	7	314	0,51		7	314	0,51
	8	276	0,58		8	276	0,58
	9	276	0,58		9	270	0,58
	10	356	0,45		10	358	0,45
	11	254	0,63		11	254	0,63
Μέση Τιμή X_m		310	0,526	Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		351	0,590
Τυπική Απόκλιση σ		45	0,071	Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		269	0,462
Συντελεστής Απόκλισης v		15%	13%	Μέση Τιμή X_m		303	0,521
Τυπική Απόκλιση της X_m - σ_m		14	0,021	Τυπική απόκλιση σ		23	0,048
				Συντελεστής Απόκλισης v		7%	9%

Πίνακας 8.5: Απόρριψη τιμών με βάση την παραπάνω διαδικασία και παρουσίαση στατιστικών μεγεθών.

Όπως είναι εύνητο, η μέθοδος αυτή συνήθως απορρίπτει τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του δείγματος, και όντως στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό είναι που προστάζει και η λογική. Όμως κάποιες φορές το δείγμα μπορεί να έχει την εξής μορφή (Πίνακας 8.6):

¹ Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες περιπτώσεις δεν απορρίστηκαν ακριβώς οι ίδιες τιμές για κάθε μεταβλητή, οπότε το μέσο Μετρο Ελαστικότητας δεν έχει κάποια σχέση με τη Μέση Παραμόρφωση. Στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί στο X_m , είτε το μέσο, ανάλογα με το ζητούμενο.

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
1	Βήμα 10m		
	1	287	0.6
	2	314	0,51
	3	314	0,51
	4	314	0,51
	5	314	0,51
	6	314	0.51
	7	308	0.52
	8	308	0.52
	9	320	0,5
	10	302	0,53

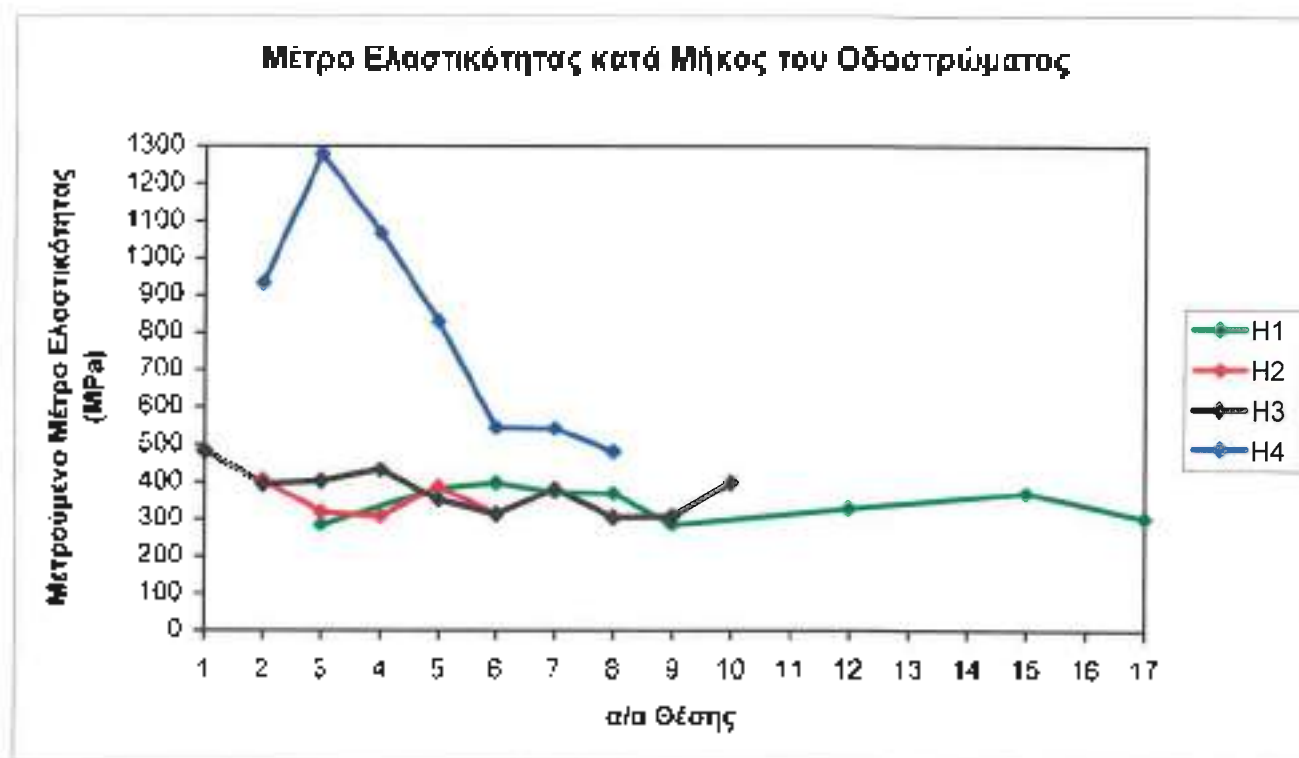
Πίνακας 8.6

Σε αυτή την περίπτωση η απόρριψη της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής θα στερούσε ένα στατιστικά σημαντικό δεδομένο από την ανάλυση, τη μέτρηση 9, της οποίας η απόκλιση από το μέσο όρο δε δικαιολογεί την απόρριψή της. Βέβαια η απόκλιση του τελικού αποτελέσματος είναι ελάχιστη και ίσως να μην επηρεάζει την τάξη μεγέθους που χρειάζεται για να γίνουν οι απαραίτητες εκτιμήσεις, όμως στόχος είναι η υιοθέτηση της σωστότερης διαδικασίας.

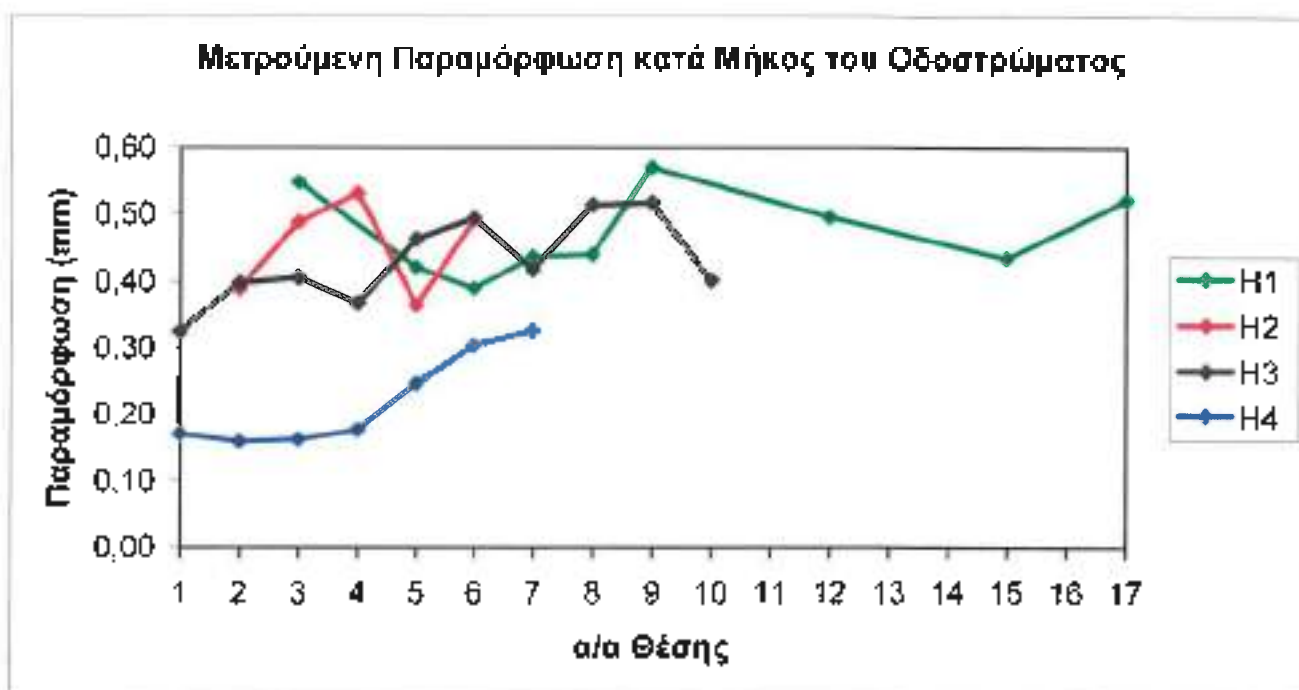
8.5 Υιοθέτηση Τιμών για κάθε Θέση και Σημείο

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω έδωσε, τελικά, και τις πιο ασφαλείς εκτιμήσεις για τα ζητούμενα μεγέθη, οι οποίες κρίνονται ικανοποιητικές για την εφαρμογή της διαδικασίας υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης και του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα πλαίσια, πάντα, ενός γρήγορου και εύχρηστου επί τόπου υπολογισμού. Αναλυτικά ο υπολογισμός των μέσων τιμών που υιοθετήθηκαν φαίνεται στο παράρτημα μαζί με τη στατιστική επεξεργασία.

Παρακάτω, στα σχήματα 8.7 έως 8.12 παρουσιάζονται οι υιοθετούμενες τιμές σε κάθε σημείο του κάθε οδοστρώματος.

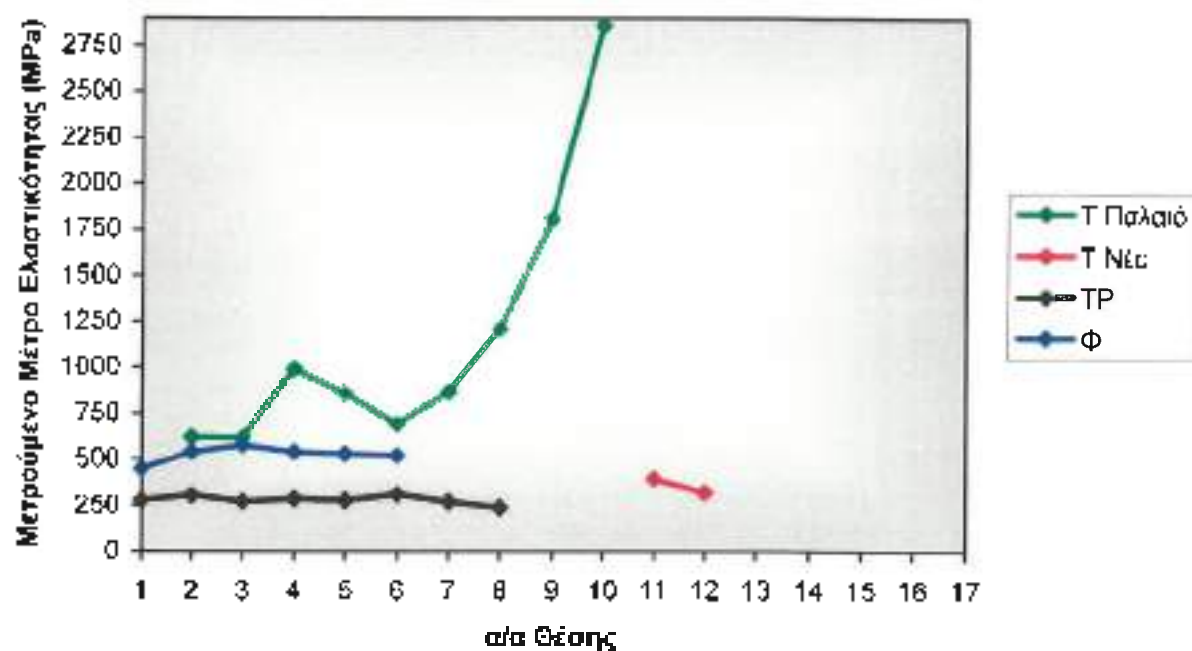


Σχήμα 8.7: Υιοθετούμενο μέτρο ελαστικότητας ανά θέση (Χαλκιδική).



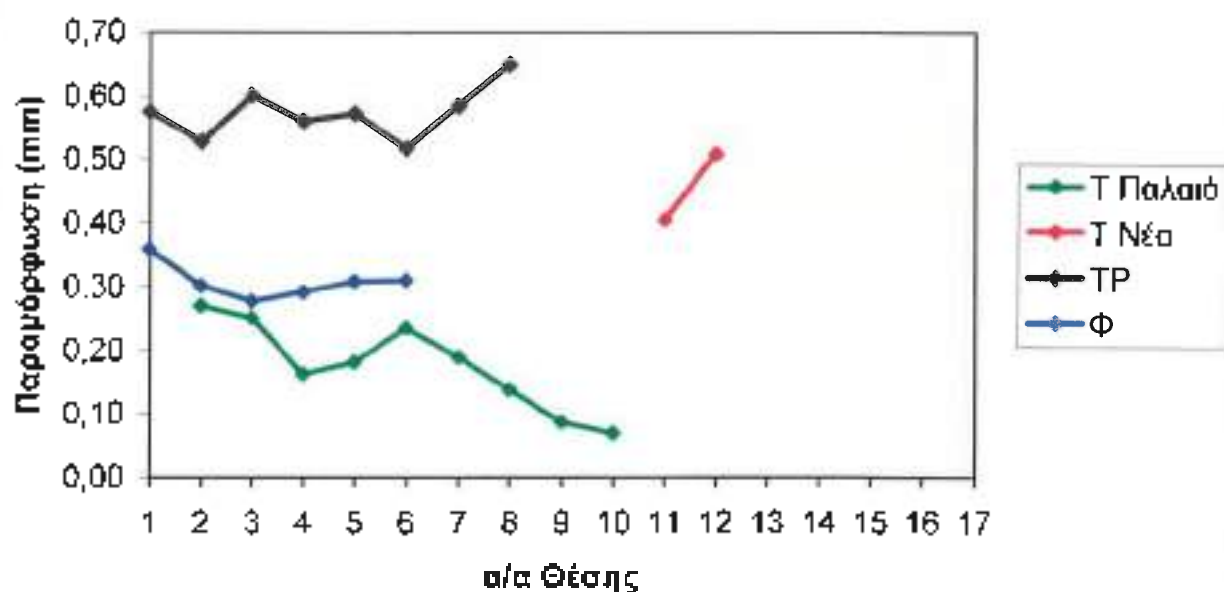
Σχήμα 8.8: Υιοθετούμενη παραμόρφωση ανά θέση (Χαλκιδική).

Μέτρο Ελαστικότητας κατά Μήκος του Οδοστρώματος

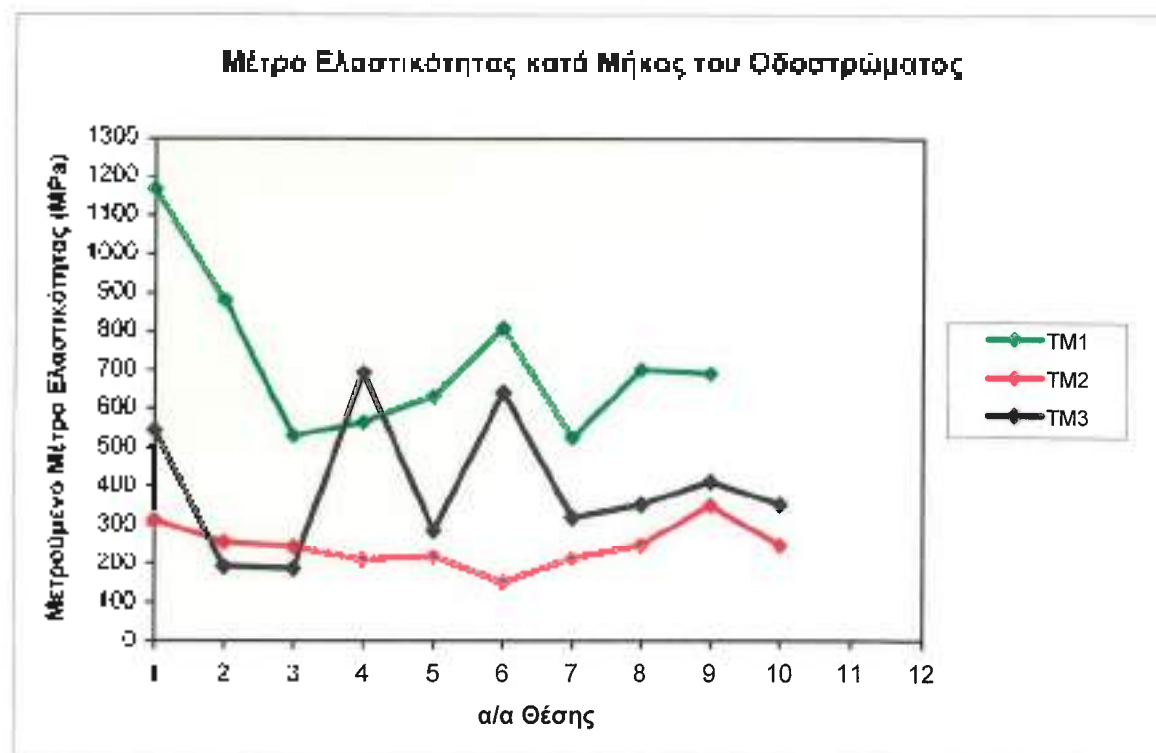


Σχήμα 8.9: Υιοθετούμενο μέτρο ελαστικότητας ανά θέση (Θεσσαλία).

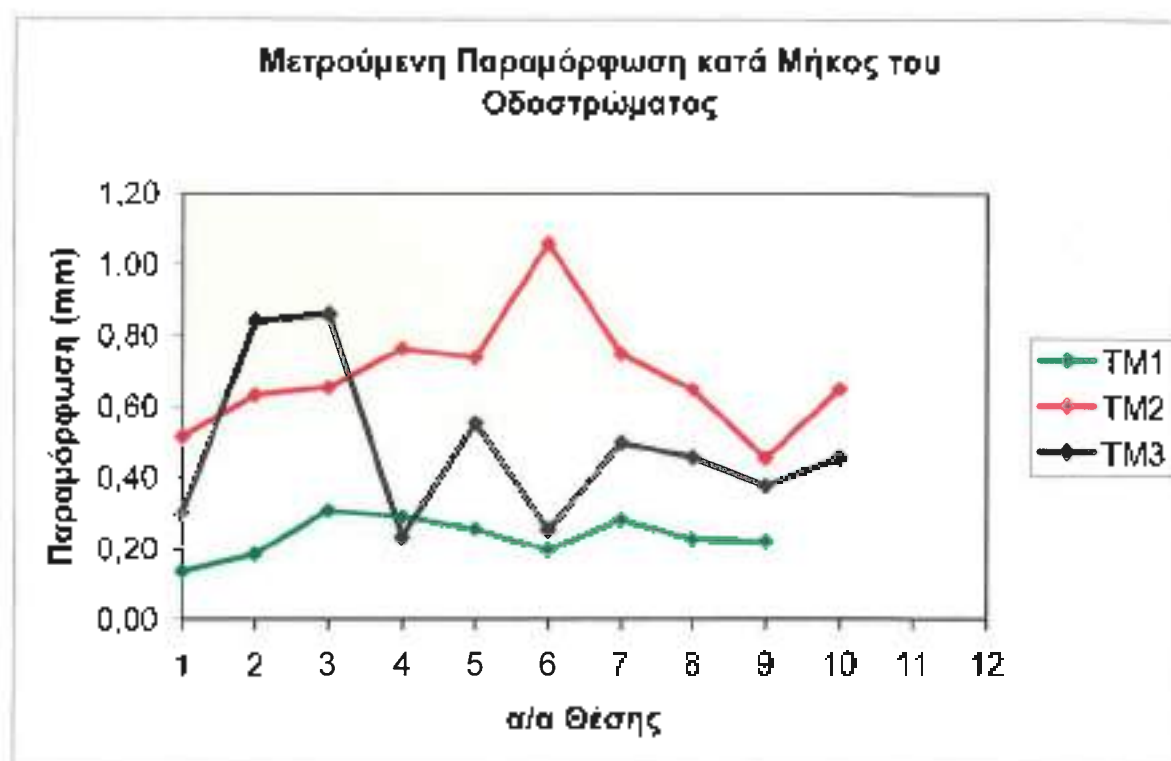
Μετρούμενη Παραμόρφωση κατά Μήκος του Οδοστρώματος



Σχήμα 8.10: Υιοθετούμενη παραμόρφωση ανά θέση (Θεσσαλία).



Σχήμα 8.11: Υποθετούμενο μέτρο ελαστικότητας ανά θέση (Πελοπόννησος).



Σχήμα 8.12: Υποθετούμενη παραμόρφωση ανά θέση (Πελοπόννησος).

8.6 Παρατηρήσεις και Σχόλια

Από τη μελέτη των παραπάνω σχημάτων διαπιστώνεται ότι τα πιο δύσκαμπτα είναι τα οδοστρώματα H4, Γ(παλαιό) και TM1. Με μια γρήγορη επισκόπηση της στατιστικής επεξεργασίας προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα τμήματα αυτά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διασπορά τιμών. Μάλιστα σε γενικές γραμμές ισχύει το γεγονός ότι η μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στις θέσεις που δίνουν τις μικρότερες παραμορφώσεις. Εξαίρεση αποτελεί το τμήμα H2 το οποίο αν και αρκετά πιο εύκαμπτο παρουσιάζει ανίσλογες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό, εν μέρει εξηγείται από την ακρίβεια με την οποία η συσκευή LOADMAN μετράει την παραμόρφωση. Το PFWD χρησιμοποιεί τη μετρούμενη παραμόρφωση με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού για να υπολογίσει το μέτρο ελαστικότητας E_{40} . Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε φορτική πλάκα διαμέτρου 132mm για την οποία το μετρούμενο μέτρο ελαστικότητας ισούται με (σύμφωνα με το 3^ο Κεφάλαιο):

$$E_{40} = \frac{160}{\delta}, \text{ όπου } \delta \text{ η μετρούμενη παραμόρφωση.}$$

Οπότε, για παράδειγμα, σε ένα αρκετά ελαστικό οδόστρωμα μπορώ να πάρω τις εξής τιμές:

$\delta=0,43\text{mm} \Rightarrow E=372\text{MPa}$	}	Μέση Τιμή $E_p=381,5\text{MPa}$
$\delta=0,40\text{mm} \Rightarrow E=400\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση $\sigma=16,4\text{MPa}$
$\delta=0,41\text{mm} \Rightarrow E=390\text{MPa}$		Συντελεστής Απόκλισης $\nu=4,3\%$
$\delta=0,44\text{mm} \Rightarrow E=364\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση της Μ.Τ. $\sigma_p=8,2\text{MPa}$
και σε ένα δύσκαμπτο τις εξής:		
$\delta=0,03\text{mm} \Rightarrow E=5333\text{MPa}$	}	Μέση Τιμή $E_p=5000\text{MPa}$
$\delta=0,02\text{mm} \Rightarrow E=8000\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση $\sigma=2277\text{MPa}$
$\delta=0,06\text{mm} \Rightarrow E=2667\text{MPa}$		Συντελεστής Απόκλισης $\nu=45,5\%$
$\delta=0,04\text{mm} \Rightarrow E=4000\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση της Μ.Τ. $\sigma_p=1114\text{MPa}$

Παρατηρούμε ότι η ακρίβεια του PFWD δεν επαρκεί για να περιγράψει ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα. Παραδείγματος χάριν, μια πιο ακριβής συσκευή θα μπορούσε να δώσει για το ίδιο οδόστρωμα:

$\delta=0,034\text{mm} \Rightarrow E=4706\text{MPa}$	}	Μέση Τιμή $E_s=4623\text{MPa}$
$\delta=0,024\text{mm} \Rightarrow E=6667\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση $\sigma=1559\text{MPa}$
$\delta=0,055\text{mm} \Rightarrow E=2909\text{MPa}$		Συντελεστής Απόκλισης $v=33,7\%$
$\delta=0,038\text{mm} \Rightarrow E=4211\text{MPa}$		Τυπική Απόκλιση της Μ.Τ. $\sigma_p=780\text{MPa}$

Σίγουρα, ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα δεν θα έπρεπε να παρουσιάζει ανάλογες αποκλίσεις με ένα εύκαμπτο, αλλά είναι φανερό ότι ένα αρκετά σημαντικό μέρος του σφάλματος οφείλεται στην ακρίβεια της συσκευής.

Επί προσθέτως το LOADMAN είναι κατασκευασμένο κυρίως για δοκιμές σε ασύνδετα υλικά τα οποία είναι πιο ελαστικά από τα ασφαλτικά, με αποτέλεσμα σε πολύ δύσκαμπτα οδοστρώματα να επηρεάζεται περισσότερο από εξωγενείς παράγοντες (προσέχος, κακή κατακορύφωση κτλ.). Επίσης το μικρό του βάρος το εμποδίζει να «διαβάξει» με ακρίβεια τις μικρές παραμορφώσεις. Γι' αυτό τα αποτελέσματα που εξάγονται για τα μη ελαστικά οδοστρώματα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή και οι μετρήσεις να γίνονται σωστά. Ως παράδειγμα, παρατίθεται ο πίνακας 8.7, που απεικονίζει μετρήσεις που έγιναν σε ένα σημείο όπου το οδόστρωμα ήταν αρκετά δύσκαμπτο.

T	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
8	Βήμα 10m		
	1	762	0,21
	2	1087	0,15
	3	1231	0,13
	4	1231	0,13
	5	1143	0,14
	6	1455	0,11
	7	1333	0,12
	8	1000	0,16
	9	1455	0,11
	10	1231	0,13
	11	1231	0,13
Μέση Τιμή $\bar{X}_n$		1104	0,138
Τυπική Απόκλιση σ		201	0,028
Συντελεστής Απόκλισης v		17%	20%
Τυπική Απόκλιση της $\bar{X}_n$, $\sigma_{\bar{X}}$		61	0,009

Πίνακας 8.7

Άλλες παρατηρήσεις που αξίζει να αναφερθούν, είναι ότι, καταρχάς, πιο σταθερές τιμές κατά μήκος τους δίνουν τα πιο εύκαμπτα (H1, H2, H3, TP, Φ, T νέο, TM2) και – λογικά – τα νέα οδοστρώματα (TP, TM2). Στο σημείο 6 του TM2, παρατηρείται μια απόκλιση που οφείλεται σε ρηγμάτωση της ασφαλικής στρώσης, όπως έδειξε η επί τόπου παρατήρηση. Όπως είναι φυσικό, το βαριά ρηγματωμένο IM3 παρουσίασε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις στα σημεία όπου η μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πάνω στις ρωγμές. Τα T παλαιό και TM1 περιλάμβαναν διαφορές στα χαρακτηριστικά τους από σημείο σε σημείο, με αποτέλεσμα να βρεθούν και διαφορετικές τιμές.

Εν κατακλείδι, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα, ως απόρροια της στατιστικής επισκόπησης των μετρήσεων, αλλά και της επί τόπου εφαρμογής τους:

- Το PFWO μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε μια λεπτομερή μελέτη ενός οδικού τμήματος, αφού είναι αρκετά ελαφρύ ώστε να απαιτεί μόνο

ένα καταμετρητή για να το χρησιμοποιήσει και η διαδικασία της δοκιμής είναι απλή και ταχεία.

- Το PFWD, φυσικά, δε συνίσταται για μια πιο μακροσκοπική μελέτη του δικτύου μιας περιοχής. Θα καθιστούσε τη διαδικασία υπερβολικά αργή.
- Το PFWD είναι πιο έγκυρο και ακριβές όταν τα οδοστρώματα είναι αρκετά ελαστικά.
- Για να εξαχθούν πιο ασφαλή συμπεράσματα, αρχικά, χρειάζεται μια διαδικασία τουλάχιστο 6 μετρήσεων σε κάθε σημείο, αλλά αν υπάρχει η δυνατότητα καλό είναι να γίνονται 10. (Στις περισσότερες περιπτώσεις στην παρούσα μελέτη έγιναν 10-11 μετρήσεις).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

Μέθοδος Καθορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας της Ασφαλτικής Στρώσης με βάση τη Δοκιμή PFWD κατά Moshe Lívneh

9.1 Εισαγωγή

Είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, την προσπάθεια χρήσης των μετρήσεων της συσκευής PFWD στον υπολογισμό διαφόρων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, όπως το μέσο μέτρο ελαστικότητάς του και τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών και εδαφικών στρώσεων. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν, από τους *Moshe Lívneh*, κατά πρώτο λόγο, και τους *Noam Lívneh* και *Eliezer Elhadad*, κατά δεύτερο, δύο μέθοδοι λήψης και διόρθωσης των αποτελεσμάτων, ώστε να συσχετίζονται με τα αποτελέσματα των συμβατικών δοκιμών (FWD, Benkelman κτλ). Η δεύτερη[24] (μέθοδος Lívneh), μάλιστα, είναι μετεξέλιξη της πρώτης, η οποία κάνοντας κάποιες πιναδοχές παρακάμπτει τη διαδικασία των δύο μετρήσεων. Για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ενδιαφέρει ιδιαίτερα να περιορισθούν οι μετρήσεις σε μια, στην επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης, οπότε αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται ιδιαίτερα σε αυτή τη μέθοδο και την εφαρμόζει στις τιμές που λήφθηκαν από εγχώρια οδοστρώματα, με σκοπό τον έλεγχο των αποτελεσμάτων, αλλά και τις συγκρίσεις, όπου είναι δυνατό.

9.2 Ανασκόπηση της μεθόδου και αναφορά κυριότερων σχέσεων

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος χρησιμοποιεί τη μετρούμενη παραμόρφωση από το PFWD και την εφαρμόζει στην παρακάτω σχέση:

$$E_{c,p} = k_c \times \left(\frac{200}{\delta} \right) \quad (9.1)$$

Όπου δ η παραμόρφωση σε mm και k_c ο διορθωτικός συντελεστής φόρτισης.

Κατ' αυτό τον τρόπο, λαμβάνεται ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας του ανώτερου τμήματος του οδοστρώματος. Η τιμή αυτή εφαρμόζεται στη σχέση

$$\frac{E_{cp}}{E_A^*} = 0,684 - 0,461 \times \log\left(\frac{E_A^*}{E_G}\right) + 0,002 \times H_A \quad (9.2)^1$$

και με μια λογική εκτίμηση του λόγου E_A^*/E_G , προκύπτει το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων E_A^* . Η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με το διορθωτικό συντελεστή

$$F_A = 0,3 + 7,0 \times \frac{H_A}{E_A} \quad (9.3),$$

οπότε λαμβάνεται μια καλή προσέγγιση του πραγματικού μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων. Μια εικόνα της σχέσης μεταξύ αυτού και του μέτρου ελαστικότητας που προκύπτει από τις δύο μετρήσεις, παρουσιάζεται στον πίνακα 9.1.

¹ Στις σχέσεις (2), (3) έχω.

E_{cp} : μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων

E_G : μέτρο ελαστικότητας των εδαφικών στρώσεων

H_A : συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων

	Θέση			
	0	500	1000	2000
H_A (mm)	120	237	239	251
H_G (mm)	980	1000	1250	1190
Δ (mm)	0,25	0,3	0,15	0,18
E_{LP} (MPa)	743	61*	1275	1053
E_A (MPa) για $E_A/E_G=3$	1055	651	1353	1090
E_A (MPa) για $E_A/E_G=6$	1314	764	1587	1273
$F_{c,2}$	1,10	2,85	1,54	1,91
$F_{c,p}$	0,94	2,47	1,35	1,68
Διορθωμένο E_A για $E_A/E_G=3$	1157	1854	2079	2084
Διορθωμένο E_A για $E_A/E_G=6$	1234	1888	2149	2139
E_A από διαδικασία 2 μετρήσεων	1165	1841	2096	2106

Πίνακας 9.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων[24]

Από τον πίνακα, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων διαφέρουν κατά αμελητέες ποσότητες, οπότε δίνεται η δυνατότητα χρήσης της πιο σύντομης και εύκολης.

Είναι φανερό, όμως ότι δεν προκύπτει κανένα στοιχείο όσων αφορά κάποια άλλα χρήσιμα μεγέθη, όπως του μέτρου ελαστικότητας των εδαφικών στρώσεων, το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p (σχέσεις (9.4), (9.5)).

$$E_p^* = \left(\frac{\sqrt[3]{E_A} \times H_A + \sqrt[3]{E_G} \times H_G}{H_A + H_G} \right)^3 \quad (9.4)$$

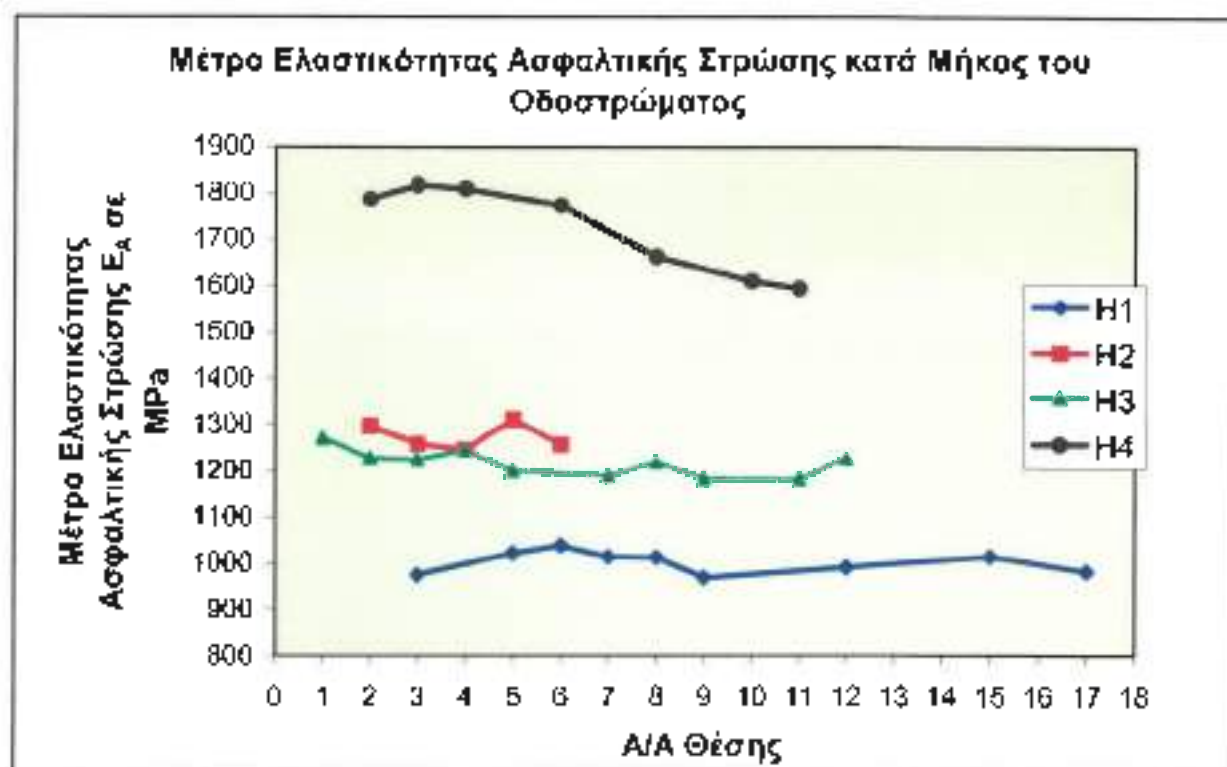
$$E_p = \lambda * E_p^* \quad (9.5)$$

όπου H_G το συνολικό πάχος των εδαφικών στρώσεων και λ διορθωτικός συντελεστής.

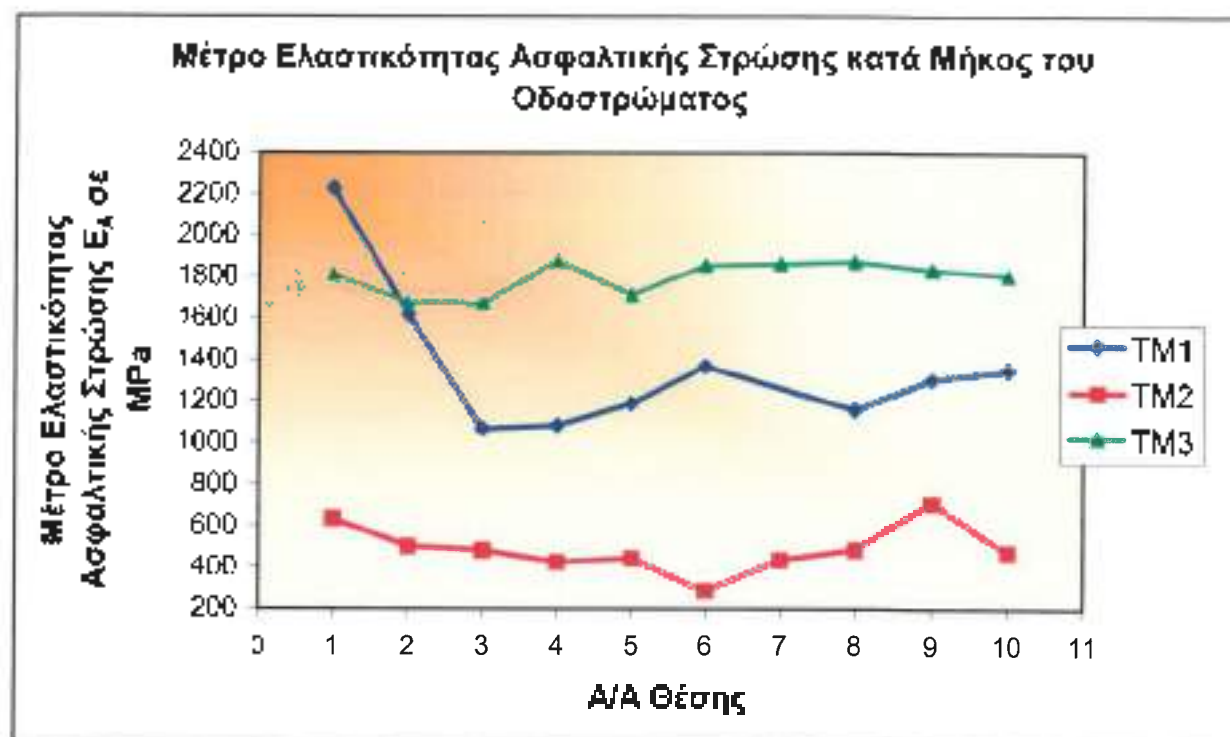
Για τα μεγέθη αυτά μπορούν να γίνουν μόνο λογικές εκτιμήσεις, κατά την κρίση του μελετητή.

9.3 Εφαρμογή της μεθόδου του Livench στις μετρήσεις που προέκυψαν από το Ελληνικό Δίκτυο

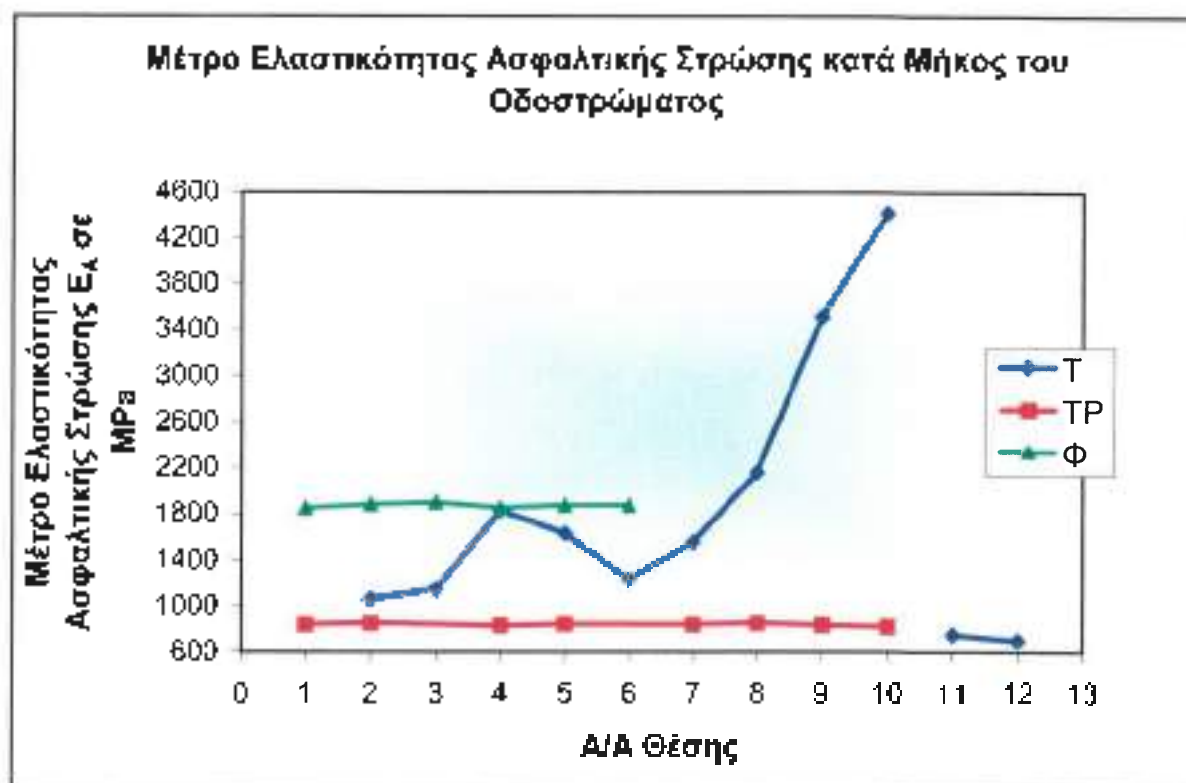
Με βάση τις σχέσεις (1), (2) και (3) υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας E_A των ασφαλτικών στρώσεων για τα οδοστρώματα των δικτύων της Χαλκιδικής, της Πελοποννήσου και της Θεσσαλίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί έγιναν για λόγους E_A^*/E_G ίσους με 2,3 και 4, γιατί όπως προέκυψε από τις υπάρχουσες μελέτες, ο λόγος κυμαίνεται συνήθως σε αυτά τα όρια. Επίσης, όπως προτείνεται και από τον Livench, δε χρησιμοποιήθηκαν τιμές του συντελεστή F_c μικρότερες του 1, τουλάχιστο μέχρι να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων με εγκυρότερες δοκιμές. Η πλήρης εφαρμογή της μεθόδου και οι τιμές παρουσιάζονται αναλυτικά σε μορφή πίνακα στο παράρτημα. Ακολούθως απεικονίζονται με τη μορφή διαγράμματος οι υπολογισμένες τιμές κατά μήκος του κάθε οδοστρώματος για $E_A^*/E_G = 3$.



Σχήμα 9.1: Δίκτυο Χαλκιδικής



Σχήμα 9.2: Δίκτυο Ηελοποννήσου



Σχήμα 9.3: Δίκτυο Θεσσαλίας

9.4 Σχόλια

Η μέθοδος που προτείνει ο Moshe Livench, σύμφωνα με τους δικούς του υπολογισμούς από ένα περιορισμένο αριθμό δοκιμών, δίνει αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, κατά τον ίδιο, όσον αφορά την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης, συγκρινόμενο με τις τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο των δύο μετρήσεων. Όμως, όπως φαίνεται ξεκάθαρα και στα διαγράμματα (6^ο Κεφάλαιο), δεν πρέπει να βγούνε βιαστικά συμπεράσματα, όσον αφορά την εγκυρότητά της.

Γενικά, είναι φανερό ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις τιμές που προκύπτουν από το PFWD-I. (LOADMAN) σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Είναι, επίσης, αντιληπτό ότι ο αριθμός των συγκριτικών δοκιμών είναι εξαιρετικά περιορισμένος (υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία μόνο για τέσσερα σημεία) και επομένως ανεπαρκής. Αντίθετα, με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις παραπάνω τρεις περιοχές του Ελληνικού Δικτύου, δίνεται η δυνατότητα μιας, σαφώς, ευρύτερης συγκριτικής μελέτης μεταξύ των παραπάνω μεθόδων.

Με μια πρώτη ματιά στα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου μιας μέτρησης του Livench στα οδοστρώματα του Ελληνικού Δικτύου, θα μπορούσαν να διακριθούν οι πολύ χαμηλές τιμές που προκύπτουν για το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης σε πολλά σημεία και οδικά τμήματα. Τιμές της τάξης των 800 και 500(!) MPa, μάλλον είναι αναληθοφανείς για τα ασφαλτοσκυροδέματα.

Πρέπει, λοιπόν, να ακολουθήσει μια σύγκριση μεταξύ αυτών των τιμών και των τιμών που προκύπτουν από αποδεκτές μεθόδους για να ελεγχθεί η εγκυρότητα της συσκευής PFWD-L. Αναλυτικά, αυτή η σύγκριση, παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10⁰

Προσδιορισμός του Μέτρου Ελαστικότητας Ασφαλτομίγματος μέσω Εργαστηριακής Δοκιμής

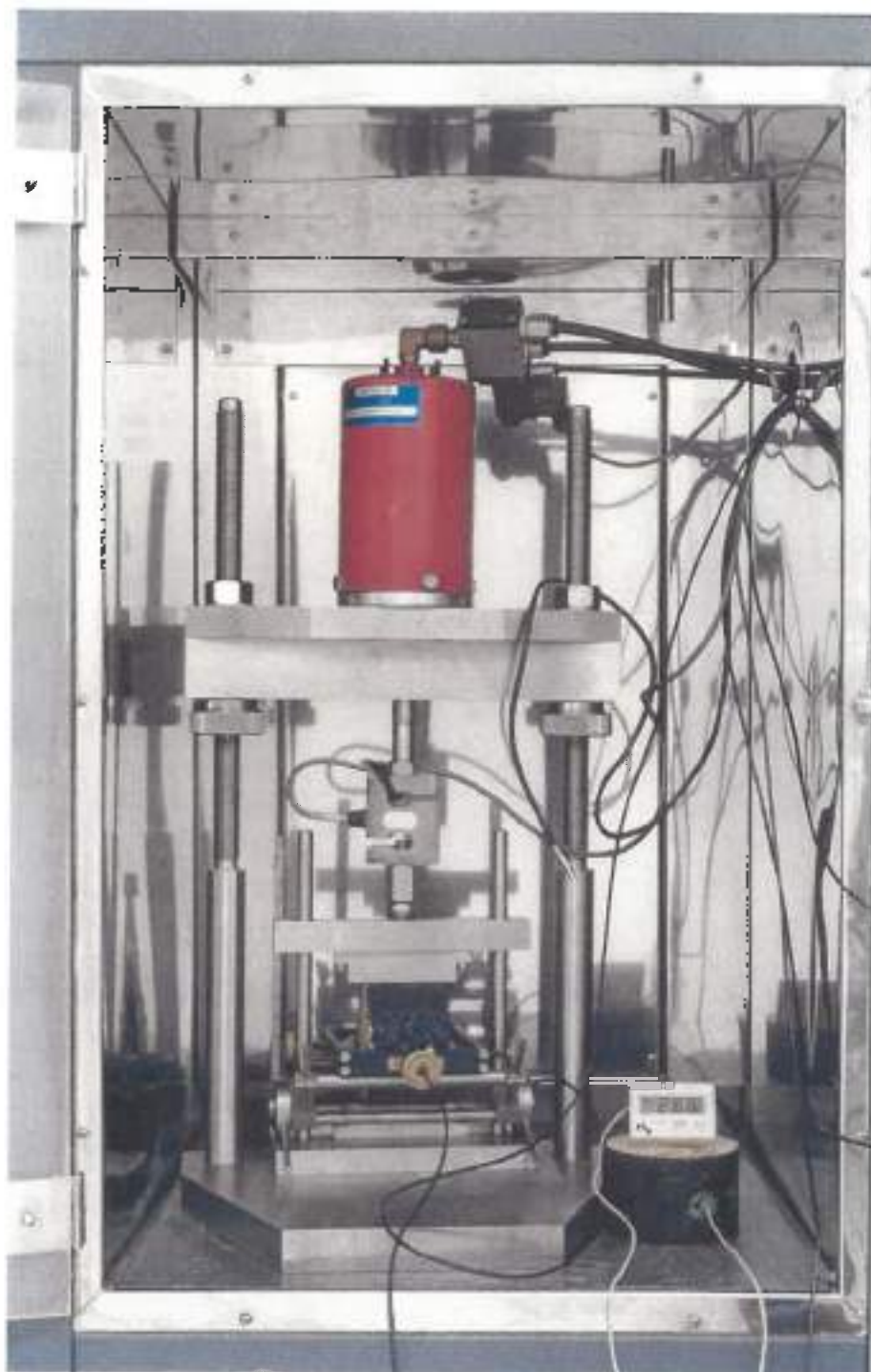
10.1 Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε και στο 7^ο Κεφάλαιο, σε επιλεγμένα σημεία κάθε οδικού τμήματος όπου έγινε η λεπτομερής έρευνα, πραγματοποιήθηκε λήψη πυρήνων, με σκοπό τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ασφαλτικών στρώσεων, αλλά και τη χρήση των «καρότων» σε περαιτέρω εργαστηριακές αναλύσεις. Μια από τις δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια, είναι η δοκιμή επαναλαμβανόμενης αντιδιαμετρικής θλίψης με σκοπό τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας τους (Nottingham Asphalt Tester – Indirect Tensile Stiffness Modulus, NAT – ITSM). Τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν για κάθε σημείο μέσω των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την πραγματοποίηση των συγκριτικών ελέγχων.

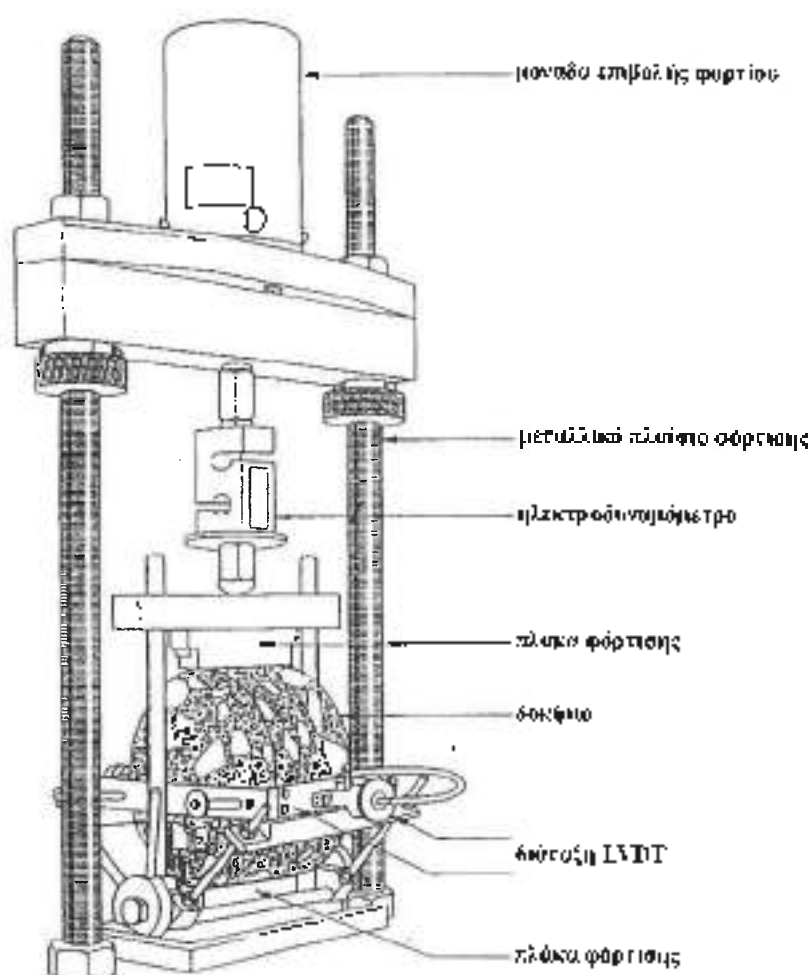
10.2 Μηχανή Δοκιμής Μέτρου Δυσκαμψίας και Παραμενουσών Παραμορφώσεων[28]

Με τη μηχανή αυτή (σχήμα 10.1) παρέχεται η δυνατότητα εργαστηριακών μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας και των παραμενουσών παραμορφώσεων ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση η μελέτη της επιρροής διάφορων παραμέτρων, όπως το ποσοστό ασφάλτου, το ποσοστό κενών, της κοκκομετρικής διαβάθμισης, της θερμοκρασίας κτλ, στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος. Η μηχανή αποτελείται από (σχήμα 10.2):

- Το μεταλλικό πλαίσιο δοκιμής και τη μονάδα επιβολής φορτίου με πεπιεσμένο αέρα.
- Τη μονάδα καταγραφής, επεξεργασίας και ελέγχου. – Σύνδεση με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή.
- Το θάλαμο ελέγχου θερμοκρασίας (μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένα, το μεταλλικό πλαίσιο της δοκιμής και η μονάδα επιβολής του φορτίου, έτσι ώστε η δοκιμή να εκτελείται υπό τη επιθυμητή θερμοκρασία που διατηρείται σταθερή).



Σχήμα 10.1· Συσκευή δοκιμής μέτρου δυσκαμψίας & παραμενοουσίων παραμορφώσεων (NAT-ITSM)

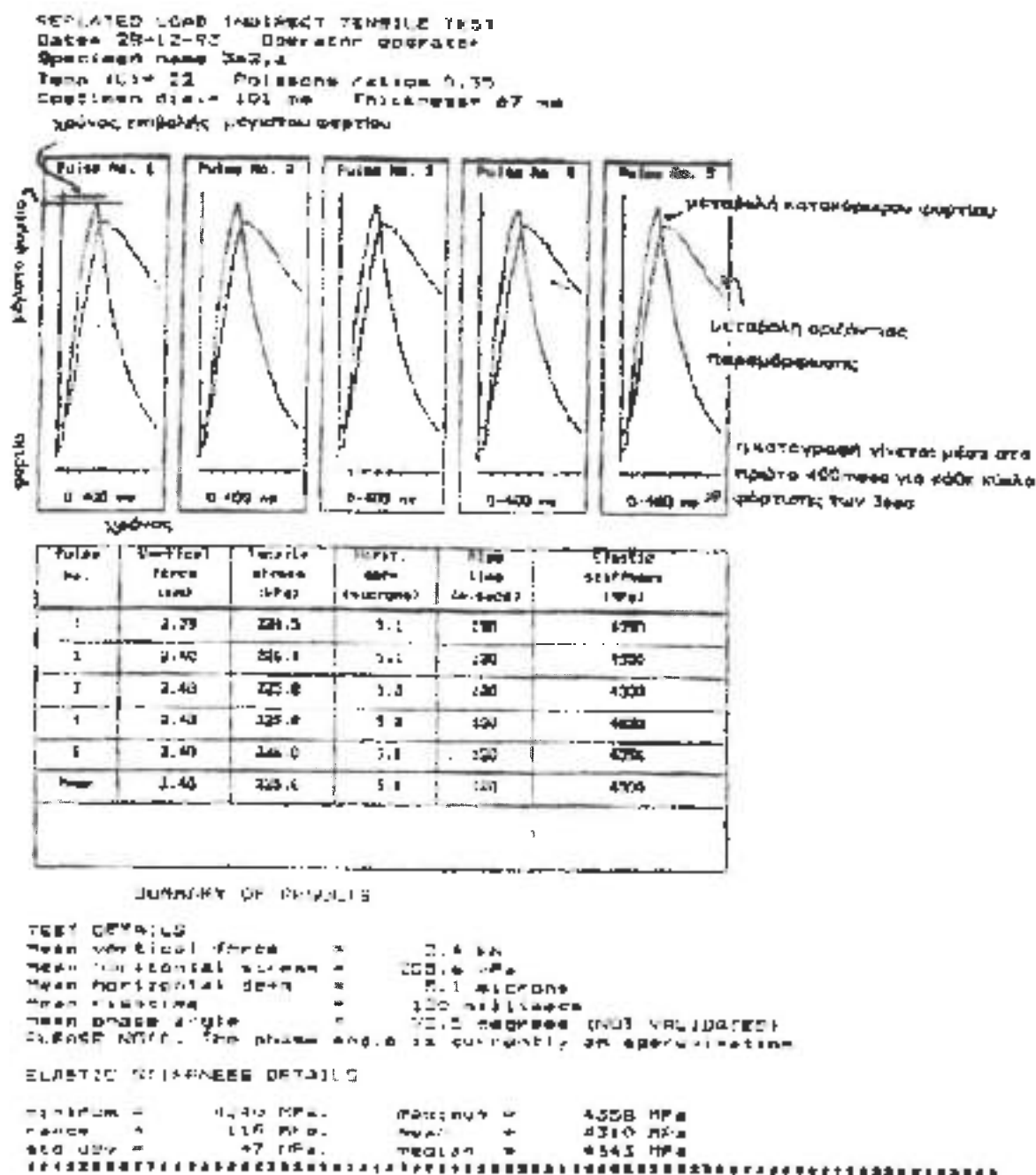


Σχήμα 10.2: Δεκτομέρεια μεταλλικού πλαισίου και μονάδα επιβολής φορτίου (σκαμνίστημα) [28]

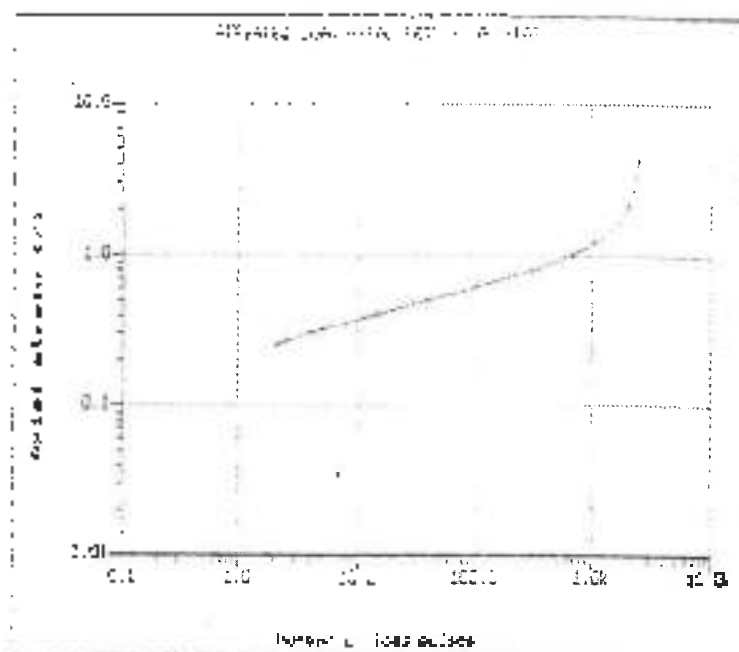
Με τη μηχανή μπορούν να εκτελεστούν τέσσερις τύποι δοκιμών:

- Δοκιμή επαναλαμβανόμενης αντιδιαμετρικής θλίψης, με την οποία εκτιμάται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (σχήμα 10.3).
- Δοκιμή ερπυσμού, με την οποία καταγράφονται οι μόνιμες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται.
- Δοκιμή επαναλαμβανόμενης θλίψης, με την οποία καταγράφονται επίσης οι μόνιμες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται (σχήμα 10.4).

- Δοκιμή επαναλαμβανόμενης αντιδιαμετρικής θλίψης, που ισοδυναμεί με τη δοκιμή κόπωσης υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης και κατά την οποία καταγράφονται οι επαναλήψεις φορτίσεων μέχρι την αστοχία του δοκιμίου.



Σχήμα 10.3: Τυπικό φύλλο εκτύπωσης της δοκιμής προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας ασφαλτομίγματος[28]



Σχήμα 10.4: Τυπικό δείγμα εκτύπωσης της δοκιμής επαναλαμβανόμενης θλιπτικής φόρτισης[28]

10.3 Δοκιμή επαναλαμβανόμενης αντιδιαμετρικής θλίψης – Δοκιμή μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος (Προδιαγραφές: BS DD 213: 1993, ASTM D 4123-82) [28]

Κατά τη δοκιμή εφαρμόζεται θλιπτικό φορτίο κατά τις δύο αντιδιαμετρικές γενέτερες κυλινδρικού δοκιμίου, με αποτέλεσμα την έμμεση ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων εγκάρσια στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. (σχήμα 10.5). Το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου υπολογίζεται αυτόματα από τη μηχανή με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, σύμφωνα με τη σχέση :

$$S_m = \frac{p \times (r + 0,27)}{\Delta H, \times t} \quad (10.1)$$

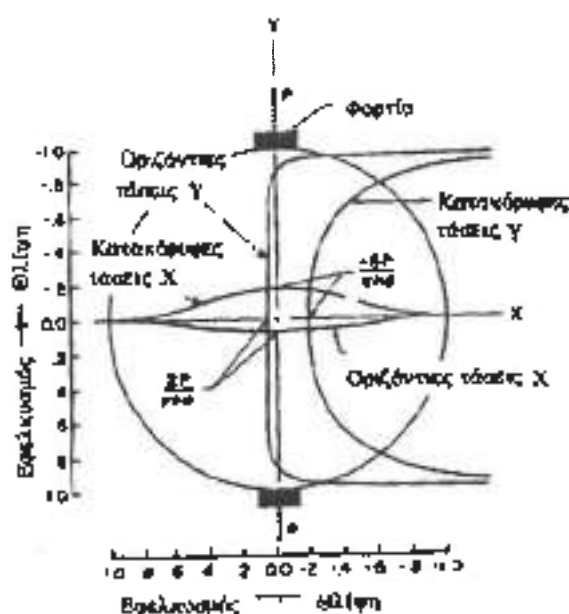
όπου S_m : Το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου (MPa).

P: Το κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο (N).

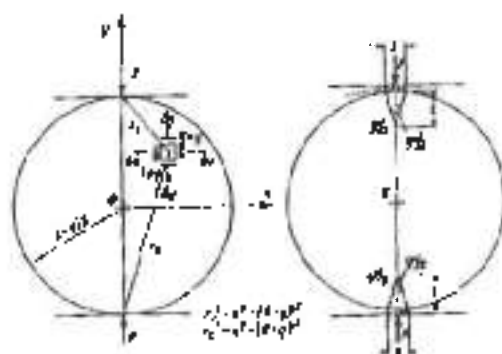
ΔH : Η αναπτυσσόμενη οριζόντια παραμόρφωση (mm).

t: Το μέσο πάχος του δοκιμίου.

ν : Ο λόγος του Poisson του ασφαλτομίγματος (για τη θερμοκρασία της δοκιμής).



P: φορτίο
h: ύψος
d: διάμετρος



$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi b} \left[\frac{(R-y)x^2}{r^3} + \frac{(R+y)x^2}{r^3} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{2P}{\pi b} \left[\frac{(R-y)^2}{r^3} + \frac{(R+y)^2}{r^3} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{2P}{\pi b} \left[\frac{(R-y)^2}{r^3} - \frac{(R+y)^2}{r^3} \right]$$

Σχήμα 10.5: Κατανομή οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων κατά τη δοκιμή
αντιδιαμετρικής θλίψης[28]

Τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτέλεση της δοκιμής είναι (εισαγόμενα στο πρόγραμμα της δοκιμής):

- Το πάχος t και η διάμετρος d του δοκιμίου (μέσος όρος τριών τιμών που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 60° , τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι κυλινδρικά).
- Η θερμοκρασία της δοκιμής – θερμοκρασία θαλάμου φόρτισης σε $^\circ\text{C}$. Τα δοκίμια παραμένουν στο θάλαμο τουλάχιστο 4 ώρες υπό σταθερή θερμοκρασία.
- Ο λόγος του Poisson, ν (ανάλογα με τη θερμοκρασία η τιμή του κυμαίνεται από 0,2 έως 0,5).
- Ο αριθμός προφορτίσεων (πριν από την κυρίως δοκιμή προηγούνται μερικές προφορτίσεις μικρού φορτίου).
- Ο χρόνος για την επιβολή μέγιστου φορτίου σε msec, (το χρονικό διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που ξεκινά η φόρτιση και της χρονικής στιγμής που το φορτίο γίνεται μέγιστο).
- Η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση (microns). Πρόκειται για μια προεπιλεγμένη παραμόρφωση η οποία για δοκίμια διαμέτρου 100-150mm κυμαίνεται από 5 έως 10mm για να μην καταστραφεί το δοκίμιο. Η μηχανή μέσα στον προκαθορισμένο χρόνο επιβολής του μέγιστου φορτίου, ρυθμίζει το φορτίο έτσι ώστε η μετρούμενη παραμόρφωση που αναπτύσσεται να είναι ίση με τη ζητούμενη τιμή. Η μέτρηση των παραμορφώσεων γίνεται με τη βοήθεια επαγωγικών μηχανισιομέτρων τα οποία εφάπτονται στο δοκίμιο συμμετρικά και κατά μήκος του άξονα που περνά από το κέντρο του δοκιμίου και είναι κάθετος προς τον άξονα επιβολής του φορτίου.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής επιβάλλονται 5 «κανονικές» φορτίσεις (χρονική περίοδος κάθε φόρτισης 3sec). Για κάθε μια από τις φορτίσεις καταγράφονται και παρουσιάζονται τα ακόλουθα (σχήμα 10.3):

- Το κατακόρυφο φορτίο (kN – vertical force).
- Η οριζόντια εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται (kPa – tensile stress).
- Η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται (microns – horizontal deformation).
- Ο χρόνος επιβολής του μέγιστου φορτίου (msec – rise time)
- Το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου (MPa – elastic stiffness).

Καθώς επίσης και:

- Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας (MPa – min-max)
- Το εύρος τιμών (MPa – range)
- Ο μέσος όρος (MPa – mean)
- Η τυπική απόκλιση (MPa – std dev)
- Η τιμή πάνω από την οποία βρίσκεται το 50% των τιμών (MPa – median)

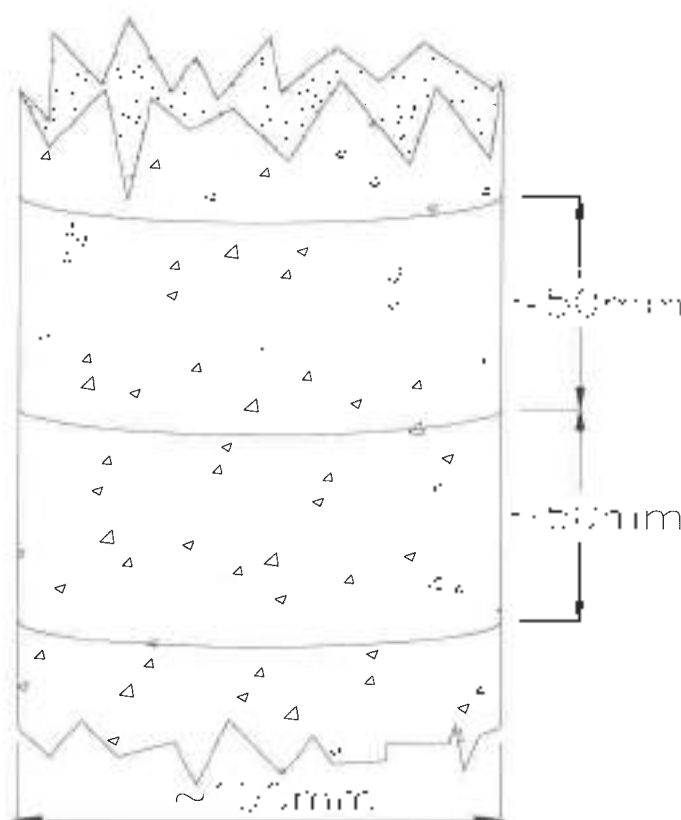
Τα αποτελέσματα της δοκιμής επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- Ο χρόνος φόρτισης
- Η θερμοκρασία διεξαγωγής της δοκιμής
- Ο τύπος του ασφαλτικού συνδετικού
- Η σύνθεση του ασφαλτομίγματος

10.4 Διεξαγωγή της δοκιμής στα δοκίμια που λήφθηκαν κατά την επί τόπου επισκόπηση

Κατά την επί τόπου επισκόπηση, όπως περιγράφηκε στο 7^ο Κεφάλαιο, λήφθηκαν πυρήνες ασφαλτομίγματος από επιλεγμένα σημεία των υπό μελέτη οδικών τμημάτων. Στη συνέχεια οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου αποθηκεύθηκαν για να χρησιμοποιηθούν ως δοκίμια. Τα δοκίμια που είχαν υποβληθεί στη δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας τους, μέχρι το χρόνο συγγραφής της παρούσας εργασίας προερχόταν μόνο από το οδικό δίκτυο της Χαλκιδικής.

Η δοκιμή διεξάχθηκε σε θερμοκρασία 23°C. Η διάμετρος και το πάχος των δοκιμίων προσδιορίστηκε με βάση την διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους.



Σχήμα 10.6: Τυπική μορφή δοκιμίου

Σε πολλές περιπτώσεις, οι πυρήνες που εξάγονται από ένα ήδη υπάρχον οδόστρωμα έχουν τη μορφή του σχήματος 10.6. Δηλαδή, οι βάσεις του κυλίνδρου (από τις οποίες η μία είναι η επιφάνεια του οδοστρώματος και η άλλη είναι η επιφάνεια επαφής με τα υλικά της βάσης) είναι αρκετά διαταραγμένες και κυρίως η κάτω βάση. Συχνά, υπάρχουν διαταραγμένα τμήματα και στο εσωτερικό του πυρήνα. Επίσης, για να δώσει η δοκιμή καλύτερα αποτελέσματα, καλό είναι τα δοκίμια να μην ξεπερνούν τα 50mm πάχους. Γι' αυτό, για τη διεξαγωγή της δοκιμής, κάθε πυρήνας χωρίστηκε σε δύο ή περισσότερα τμήματα ανάλογα με το πάχος του και το βαθμό ρηγμάτωσής του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10.6.

Έτσι, έχοντας τα πάχη h_i των δοκιμίων που προέκυψαν από κάθε πυρήνα και τα μέσα μέτρα δυσκαμψίας S_{pi} , που υπολογίζει το λογισμικό της συσκευής, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος.

Αναλυτικά τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων των οδοστρωμάτων της Χαλκιδικής, που προκύπτουν από τη δοκιμή με τη συσκευή NAT, παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11^ο

Ανάστροφος Υπολογισμός των Μέτρων Ελαστικότητας των Στρώσεων του Οδοστρώματος από τα Δεδομένα της Δοκιμής Πίπτοντος Βάρους

11.1 Εισαγωγή

Όπως περιγράφηκε στο 7^ο Κεφάλαιο, ένα σημαντικό τμήμα της επί τόπου επισκόπησης, τα στοιχεία του οποίου θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την πραγματοποίηση των συγκριτικών ελέγχων με τα δεδομένα του FWD, ήταν η διεξαγωγή της δοκιμής Πίπτοντος Βάρους με τη συσκευή HWD.

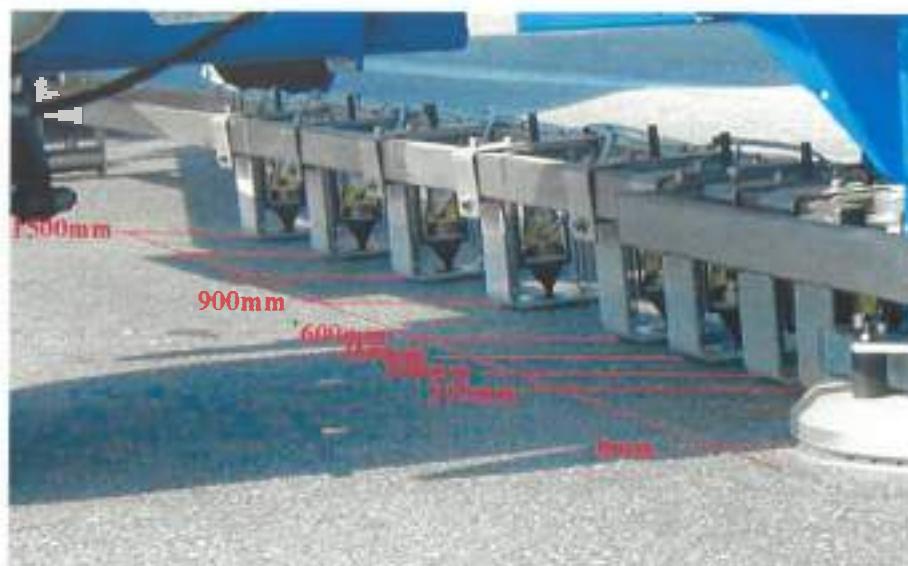
11.2 Τα δεδομένα του HWD

Η συσκευές τύπου FWD, μετά την πτώση του βάρους, έχοντας τοποθετημένα γεώφωνα στον άξονα του φορτίου, αλλά και σε διάφορες αποστάσεις από αυτό, ουσιαστικά μετρούν την ασκούμενη τάση και την ελαστική υποχώρηση που αυτή προκαλεί στις συγκεκριμένες θέσεις. Το Heavy Weight Deflectometer που χρησιμοποιήθηκε, συγκεκριμένα, δίνει τα εξής στοιχεία:

Surface	Air	Stress	Deflections in microns at distance (mm)					
Temp	Temp	(kPa)	0	200	300	450	600	900 1500

Πίνακας 11.1

Δηλαδή, τις θερμοκρασίες αέρα και επιφάνειας της ασφαλικής στρώσης, την ασκούμενη τάση και τις ελαστικές υποχωρήσεις στον άξονα του φορτίου και σε αποστάσεις 200, 300, 450, 600, 900 και 1500mm από αυτόν.



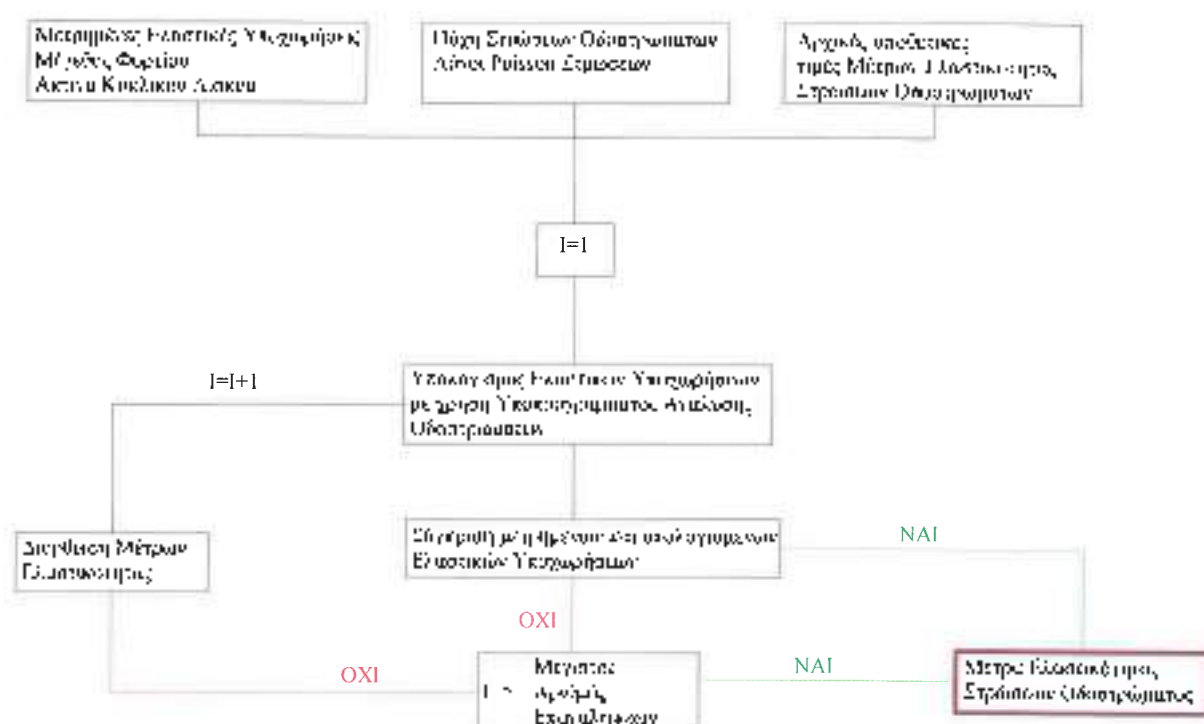
Σχήμα 11.1: Διάταξη αισθητήρων του HWD

Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια μπορούν να φανούν χρήσιμα σε πληθώρα αναλύσεων και στην εύρεση αρκετών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθούν τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος, τα οποία προκύπτουν από την ανάστροφη ανάλυση και οι ελαστικές υποχωρήσεις στον άξονα του φορτίου.

11.3 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)

Οι προσπάθειες για τη δημιουργία αξιόπιστων μεθόδων ανάστροφου υπολογισμού δρομολογούνται από το 1973 με τη δημιουργία νομογραφημάτων υπολογισμού μέτρων ελαστικότητας για οδοστρώματα δύο στρώσεων και φθάνουν σήμερα στις ευρέως εφαρμοζόμενες μεθόδους που χρησιμοποιούνται από διάφορα λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών[29]. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούν προγράμματα ανάστροφου υπολογισμού τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως σε Ευρώπη και Αμερική. Ο αντικειμενικός σκοπός όλων αυτών των μεθόδων είναι η όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των μετρημένων από τη συσκευή FWD ελαστικών υποχωρήσεων. Δηλαδή, υπολογίζονται εκτίνα τα

μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων για τα οποία οι ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος προσεγγίζουν τις μετρημένες υποχωρήσεις. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες και αντιπροσωπευτικές κατηγορίες μεθόδων ανάστροφου υπολογισμού, εκείνες που προσεγγίζουν τις μετρημένες υποχωρήσεις με διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (Σχήμα 11.2) και εκείνες που για την προσέγγιση χρησιμοποιούν βάση δεδομένων.



Σχήμα 11.2: Διάγραμμα ροής μεθόδου ανάστροφου υπολογισμού με διαδοχικούς κύκλους[7]

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βασίζεται στη μέθοδο των διαδοχικών κύκλων υπολογισμού και είναι, συγκεκριμένα, το πρόγραμμα MODCOMP3 που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ. Τα δεδομένα που απαιτεί το λογισμικό αυτό, είναι οι μετρημένες από το FWD ελαστικές υποχωρήσεις (στον άξονα του φορτίου και σε αποστάσεις από αυτό Σχήμα 11.1), τα πάχη των στρώσεων, τους λόγους Poisson κάθε στρώσης και τις αρχικές υποθετικές τιμές (initial values) των μέτρων ελαστικότητας των

στρώσεων του υπό εξέταση οδοστρώματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή των αρχικών τιμών των μέτρων ελαστικότητας της κάθε στρώσης δεν επηρεάζει καθόλου τα τελικά εξαγόμενα αποτελέσματα όταν υπάρχει καλή προσέγγιση της μετρημένης κατανομής των ελαστικών υποχωρήσεων.

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζονται ανάστροφα οι ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος στα σημεία στα οποία έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις. Αυτές οι υποχωρήσεις αντιστοιχούν στη διατομή του οδοστρώματος που εξετάζεται, έχοντας όμως λάβει υπόψη υποθετικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας. Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά των υπολογισμένων από τις μετρημένες υποχωρήσεις. Αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από ένα όριο α , το οποίο προκαθορίζεται από το χρήστη, διορθώνονται τα αρχικά υποθετικά μέτρα ελαστικότητας, βάσει του λόγου μετρημένης προς υπολογισμένη υποχώρηση.

Έπειτα, για τα διορθωμένα μέτρα ελαστικότητας πραγματοποιείται ένας νέος κύκλος υπολογισμών. Οι διαδοχικοί κύκλοι σταματούν όταν η διαφορά μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων γίνει μικρότερη από το προκαθορισμένο όριο α , οπότε και τα μέτρα ελαστικότητας που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές μπορούν να θεωρηθούν ως τα τελικά του ανάστροφου υπολογισμού.

Ένα αξιοσημείωτο στάδιο της παραπάνω διαδικασίας, που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, είναι ο έλεγχος με τον οποίο βρίσκεται αν η κατανομή των υπολογισμένων υποχωρήσεων προσεγγίζει την αντίστοιχη των μετρημένων. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται συνήθως με μια μορφή συγκριτικής διαφοράς που δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{d_{\text{υπολ.}} - d_{\text{μετρημ.}}}{d_{\text{μετρημ.}}} \times 100\% < a$$

όπου n ο αριθμός των αισθητήρων της συσκευής.

Όταν ισχύει η παραπάνω σχέση, θεωρείται ότι η προσέγγιση έχει πραγματοποιηθεί, λαμβάνοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Από το γεγονός αυτό φαίνεται η μεγάλη σημασία του ορίου a. Όσο πιο μικρή τιμή λαμβάνει, τόσο περισσότερη ακρίβεια υπάρχει στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι όταν η τιμή του ορίου είναι μικρότερη ή ίση του 0,1% τότε τα εξαγόμενα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα[7].

Αναλυτικά, τα εξαγόμενα του ανάστροφου υπολογισμού για τα υπό εξέταση οδοστρώματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12^ο

Συγκρίσεις Μεθόδων

12.1 Εισαγωγή

Σε προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται από τον Moshe Livneh[24] για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης με βάση τη δοκιμή με τη συσκευή PFWD. Για να διαπιστωθεί η εγκυρότητα ή μη της δοκιμής αυτής, απαραίτητη είναι η διεξαγωγή συγκρίσεων με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από δοκιμασμένες και γενικά αποδεδειγμένες μεθόδους. Ήδη ο ίδιος έχει πραγματοποιήσει κάποιες συγκρίσεις, οι οποίες, όμως, είναι εξαιρετικά ανεπαρκείς από άποψη ποσότητας, για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια να καλυφθεί ένα ευρύτερο φάσμα οδών και οδοστρωμάτων με μεγαλύτερη ποικιλία χαρακτηριστικών, ώστε να γενικευθεί όσο περισσότερο γίνεται το συμπέρασμα που θα προκύψει από την παρούσα μελέτη.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παράλληλα με τη δοκιμή PFWD, είναι η δοκιμή με το FWD (χρησιμοποιήθηκε, μάλιστα, μια πιο βαριά μορφή της συσκευής αυτής που έχει κατασκευαστεί και με τη δυνατότητα μέτρησης σε οδοστρώματα αεραδρομίων, το HWD μοντέλο της Dynatest) και οι εργαστηριακές μετρήσεις. Οι δοκιμές με το HWD πραγματοποιήθηκαν την ίδια χρονική στιγμή και στα ίδια ακριβώς τμήματα με αυτές του LOADMAN (εκτός από αυτές του δικτύου της Πελοποννήσου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με διαφορά λίγων εβδομάδων, πάντα όμως στα ίδια τμήματα). Τα εργαστηριακά αποτελέσματα που ήταν διαθέσιμα μέχρι τη χρονική στιγμή της συγγραφής του συγκεκριμένου κεφαλαίου, αφορούσαν το δίκτυο της Χαλκιδικής, οπότε η βάση δεδομένων για αυτή τη σύγκριση είναι κάπως πιο περιορισμένη.

Για να διασφαλιστεί η ποικιλία μορφών και χαρακτηριστικών, επιλέχθηκαν οδικά τμήματα σε διάφορες μορφολογίες εδάφους, με διάφορα πάχη στρώσεων, διαφορετικών, γενικά, ηλικιών, ποικιλία επιφανειακής κατάστασης και με διαφορετικά κυκλοφοριακά δεδομένα. Δυστυχώς, η συντριπτική πλειοψηφία των οδικών τμημάτων που ελέγχθηκαν, ανήκαν στο επαρχιακό δίκτυο των περιοχών και αυτό συνέβη λόγω της επικινδυνότητας της διεξαγωγής μετρήσεων σε αυτοκινητόδρομους ή εθνικές οδούς. Παρόλα αυτά, το δείγμα που προέκυψε είναι αρκετά ικανοποιητικό για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής, όπως θα γίνει αντιληπτό και στη συνέχεια.

Αναλυτικά, οι συγκρίσεις και τα απαραίτητα πρόσθετα στοιχεία παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

12.2 Παρουσίαση συγκριτικών δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, οι δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση των μέτρων σύγκρισης, ήταν οι εργαστηριακές και οι επί τόπου μετρήσεις με τη συσκευή HWD. Τα απαραίτητα στοιχεία για την διεξαγωγή της ανάλυσης λήφθηκαν από την επί τόπου επισκόπηση και την εξαγωγή πυρήνων (καρότων). Όπως είναι φυσικό, μέτρα ελαστικότητας υπολογίστηκαν μόνο για τα σημεία εκείνα από τα οποία έγινε δειγματοληψία, οπότε σε αυτά θα επικεντρωθεί και η σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθόδου του M. Livench.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από τα παραμορφωσιακά δεδομένα που λήφθηκαν από το HWD χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού, μέσω του κατάλληλου λογισμικού, βεβαίως. Αναλυτικά, ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας μέσω της μεθόδου του Livench από τις μετρήσεις του PFWD για τα σημεία που έγινε δειγματοληψία και επομένως υπάρχουν ακριβή στοιχεία, παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.1. Πρέπει να

σημειωθεί ότι τα πάχη των στρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και στον ανάστροφο υπολογισμό.

	Οδικό Τμήμα	Θέση	H _A (mm)	H _S (mm)	PFWD-δ (mm)	E _u (MPa)	E _u /E _A	E _A (MPa)	F _c	PFWD-E _A (MPa)
Δίκτυο Χαλκιδικής	H1	3	120	450	0,55	314	0,704	446	2,19	974
		5	135	450	0,42	422	0,734	575	1,94	1118
		6	130	450	0,39	461	0,724	637	1,73	1101
	H2	2	180	400	0,39	461	0,824	559	2,55	1428
		4	185	400	0,53	324	0,834	389	3,63	1412
		6	184	450	0,49	355	0,832	428	3,32	1416
	H3	2	209		0,40	448	0,882	509	3,17	1616
		4	205		0,37	491	0,874	562	2,86	1603
		7	183		0,50	351	0,830	423	3,33	1408
		11	175		0,52	334	0,814	410	3,29	1348
	H4	2	265	500	0,17	1118	0,994	1125	1,95	2193
		4	265	500	0,16	1181	0,994	1188	1,86	2211
		10	180	400	0,30	605	0,824	735	2,01	1480
Δίκτυο Πελοποννήσου	TM1	2	90		0,18	1041	0,644	1616	0,89	1616
		3	115		0,30	602	0,694	868	1,23	1065
		4	105		0,29	638	0,674	947	1,08	1019
		8	125		0,28	665	0,714	931	1,24	1154
	TM2	2	45		0,63	268	0,554	480	0,96	480
		5	45		0,74	222	0,554	401	1,09	435
		8	45		0,65	258	0,554	466	0,98	466
		10	45		0,65	258	0,554	466	0,98	466
	TM3	2	90		0,84	191	0,644	296	2,43	719
		4	130	400	0,23	807	0,724	1115	1,12	1244
		6	130	400	0,25	743	0,724	1027	1,19	1218
		8	190	450	0,46	385	0,844	457	3,21	1467
		10	190	450	0,46	385	0,844	457	3,21	1467
Δίκτυο Θεσσαλίας	T	3	95	250	0,25	747	0,654	1141	0,88	1141
		8	165	350	0,14	1409	0,794	1775	0,95	1775
	TP	1	100		0,58	296	0,664	446	1,87	834
		4	100		0,60	282	0,664	425	1,95	828
	Φ	1	190		0,36	505	0,844	599	2,52	1510
		3	230		0,28	669	0,924	724	2,52	1827
		4	240		0,35	525	0,944	556	3,32	1847

Πίνακας 12.1: Καθορισμός μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης με τη μέθοδο Linneth

Τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τις άλλες δύο δοκιμές, μαζί με τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.2 που ακολουθεί. Αναλυτικά τα εργαστηριακά αποτελέσματα και τα υποτελέσματα του ανίστροφου υπολογισμού παρατίθενται στο Παράρτημα.

	Όδικο Τμήμα	Θέση	H _A (mm)	H _C (mm)	PFWD-δ (mm)	PFWD-E _x (MPa)	lab-E _p (MPa)	4WD-E _A (MPa)
Δίκτυο Χαλκιδικής	H1	3	120	450	0,55	974	5055	5695
		5	135	450	0,42	1118	6947	5715
		6	130	450	0,39	1101	5685	5980
	H2	2	180	400	0,39	1428	6708	6085
		4	185	400	0,53	1412	5641	6830
		6	184	450	0,49	1418	5730	4635
	H3	2	209		0,40	1616	5455	4075
		4	205		0,37	1603	4293	4100
		7	183		0,50	1408	4397	5380
		11	175		0,52	1348	5230	3465
	H4	2	265	500	0,17	2193	11288	7455
		4	265	500	0,16	2211	10178	8525
		10	180	400	0,30	1480	7947	3790
Δίκτυο Πελοποννήσου	TM1	2	90		0,18	1616	N/A	4210
		3	115		0,30	1065	N/A	6685
		4	105		0,29	1019	N/A	9970
		8	125		0,28	1154	N/A	12550
	TM2	2	45		0,63	480	N/A	13850
		5	45		0,74	435	N/A	12850
		8	45		0,85	466	N/A	14800
		10	45		0,65	466	N/A	12250
	TM3	2	90		0,84	719	N/A	8175
		4	130	400	0,23	1244	N/A	3710
		6	130	400	0,25	1218	N/A	2645
		8	190	450	0,46	1467	N/A	2320
		10	190	450	0,46	1467	N/A	3080
Δίκτυο Θεσσαλίας	T	3	95	250	0,25	1141	N/A	8580
		8	165	350	0,14	1775	N/A	9780
	TP	1	100		0,58	834	N/A	3615
		4	100		0,50	828	N/A	3660
	Φ	1	190		0,36	1510	N/A	3210
		3	230		0,28	1827	N/A	3580
		4	240		0,35	1847	N/A	3025

Πίνακας 12.2: Μέτρα ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης ανά δοκιμή

Μια πρώτη εκτίμηση της μεθόδου του Livench μπορεί να γίνει και με μια ματιά στον Πίνακα 12.2. Είναι προφανές ότι τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν είναι πολύ μικρότερα από αυτά των άλλων δύο δοκιμών.

Οι παραπάνω τιμές, βέβαια, δεν είναι ακόμα συγκρίσιμες. Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία, αλλά και ο χρόνος φόρτισης επηρεάζουν σημαντικά τη δυσκαμψία της ασφάλτου. Οι τρεις δοκιμές, όπως είναι φυσικό, πραγματοποιήθηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Γι' αυτό, απαραίτητη είναι η αναγωγή των τιμών των μέτρων ελαστικότητας σε συγκρίσιμα μεγέθη, με βάση τύπους και συντελεστές μετατροπής που προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

12.3 Αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας λόγω θερμοκρασίας

Όπως τονίστηκε και προηγουμένως, σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη δυσκαμψία της ασφάλτου και κατ' επέκταση του ασφαλτομίγματος, είναι η θερμοκρασία. Έτσι, δεν μπορούν να συγκριθούν τιμές που προέκυψαν από το εργαστήριο, μέσα στο οποίο οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες, με τιμές που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις. Επίσης, δεν μπορούν να συγκριθούν τιμές που αποκτήθηκαν κατά διαφορετικές χρονικές περιόδους (για παράδειγμα, οι μετρήσεις με το HWD και με το PWD στο δίκτυο της Πελοποννήσου διεξάχθηκαν με διαφορά λίγων εβδομάδων, μέσα στις οποίες θα μπορούσε να έχει μεταβληθεί το κλίμα της περιοχής). Γι' τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητη η αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας σε μια τιμή που θα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Επειδή, οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 23°C, αποφασίστηκε να αναχθούν οι υπόλοιπες τιμές στη θερμοκρασία αυτή.

Οι θερμοκρασίες του αέρα και της επιφάνειας του οδοστρώματος, αποκτήθηκαν από τη συσκευή HWD η οποία έχει τους κατάλληλους αισθητήρες για αυτές τις μετρήσεις. Για την περίπτωση των μετρήσεων του PWD, που πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετική χρονική περίοδο (δίκτυο Πελοποννήσου), χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που λήφθηκαν από τους ίδιους τους καταμετρητές, ως η καλύτερη δυνατή προσέγγιση. Εξάλλου η διαφορά λίγων βαθμών Κελσίου επηρεάζει ελάχιστα τα τελικά αποτελέσματα.

Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή προήλθαν από τη διεθνή βιβλιογραφία. Με βάση αυτούς, αναγκαία είναι αρχικά, η διόρθωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του οδοστρώματος, ώστε να μετατραπεί σε πραγματική θερμοκρασία του οδοστρώματος. Μελέτες έχουν αποδείξει ότι η θερμοκρασία που πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της ασφατικής στρώσης, είναι αυτή που υπάρχει σε βάθος $1/31d_A$ από την επιφάνεια (όπου H_A το πάχος της ασφατικής στρώσης). Αυτή η θερμοκρασία αποκτάται με βάση την επιφανειακή με τον ακόλουθο τύπο[30]:

$$T_{ac} = 8,77 + 0,649 \times IR \cdot (\log d - 1,7) \times (-0,503 \times IR + 0,786 \times S_{day} + 4,79 \times \sin(hr - 18)) - \sin(hr - 14) \times (2,2 + 0,044 \times IR) \quad (12.1)$$

όπου IR: Η επιφανειακή θερμοκρασία του οδοστρώματος

d: Το $1/31d_A$

S_{day} : Η μέση τιμή της μέσης θερμοκρασίας των πέντε τελευταίων ημερών

hr: Η ώρα της ημέρας σε 24ωρο κύκλο

$\sin(\dots)$: Το ημίτονο του περιεχομένου ανηγμένου σε rad με βάση τον 24ωρο κύκλο

Έπειτα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που έχει αποκτηθεί από την ανάλυση, μετατρέπεται στην τιμή που αντιστοιχεί στη ζητούμενη θερμοκρασία (στη συγκεκριμένη περίπτωση 23°C) με βάση τον ακόλουθο τύπο[30]:

$$E_{ref} = \frac{E_{back-calculation}}{\left[1 - 2.2 \times \log \left(\frac{T_{AC}}{T_{ref}} \right) \right]} \quad (12.2)$$

Η μετατροπή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για τις δοκιμές HWD και PFWD, παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα.

12.4 Αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας λόγω χρόνου φόρτισης

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ελαστική συμπεριφορά του ασφαλτοσκυροδέματος είναι ο χρόνος που διαρκεί η φόρτιση. Διαφορετικό είναι το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών όταν πρόκειται για στατική φόρτιση και διαφορετικό (μεγαλύτερο) όταν πρόκειται για μια φόρτιση μικρής διάρκειας.

Οι υπό εξέταση δοκιμές επιβάλλουν φορτίσεις που διαρκούν διαφορετικούς χρόνους μεταξύ τους αλλά και με την πραγματική καταπόνηση που επιβάλλεται από την κυκλοφορία. Ο χρόνος της επιβαλλόμενης φόρτισης από την εργαστηριακή δοκιμή είναι 0.24sec, ο χρόνος φόρτισης του HWD είναι 0,054sec, ενώ τέλος ο χρόνος φόρτισης που μετράει το PFWD είναι περίπου 0.030sec. Από την άλλη, η φόρτιση που επιβάλλει ένας άξονας φορτηγού κινούμενος με 50km/h (άξονας σχεδιασμού) είναι 0,02sec. Οπότε, αναγκαία είναι η αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας σε ένα σταθερό χρόνο φόρτισης, ο οποίος επιλέχθηκε να είναι τα 0,02sec.

Η αναγωγή αυτή γίνεται με βάση τη σχέση (12.3)[31] και πραγματοποιείται αφού γίνει η διόρθωση των μέτρων ελαστικότητας λόγω θερμοκρασίας.

$$E_D = E_{ref} \times \left(\frac{t}{t_D} \right)^{0.09+0.008 \times T_{ref}} \quad (12.3)$$

όπου E_{ref} : Το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε από τη θερμοκρασιακή διόρθωση

t : Ο χρόνος φόρτισης που επιβλήθηκε κατά τη δοκιμή

t_0 : Ο χρόνος στον οποίο θέλουμε να ανάγουμε τα αποτελέσματα

T_{ref} : Η θερμοκρασία αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε κατά τη θερμοκρασιακή διόρθωση

Η μετατροπή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα μαζί με τη θερμοκρασιακή διόρθωση.

Μετά την πραγματοποίηση και αυτής της μετατροπής τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι και έτοιμα για σύγκριση και αξιολόγηση.

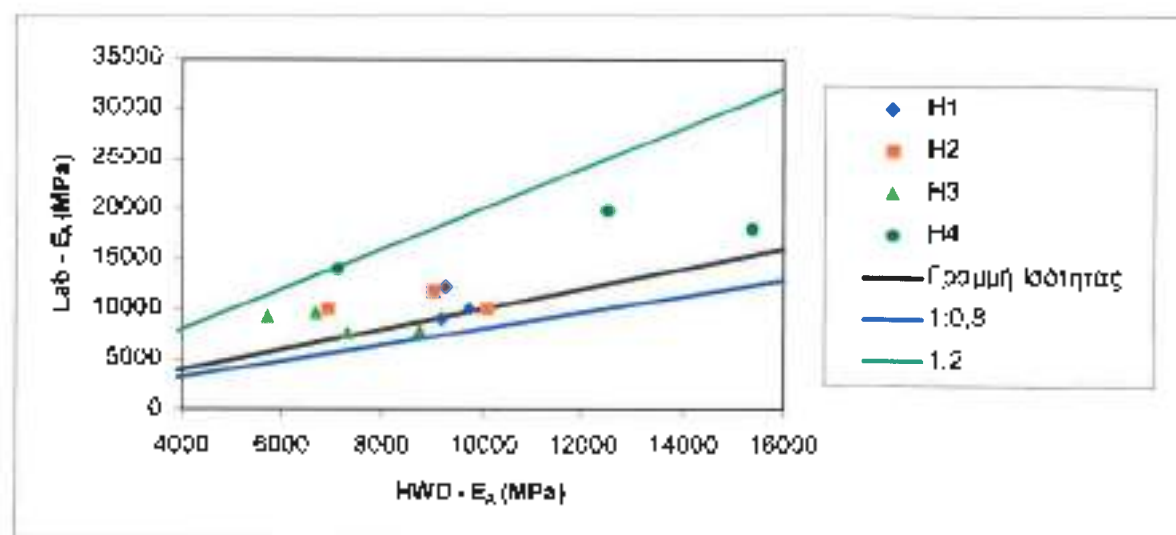
12.5 Σύγκριση μεθόδων

Τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν και θα αποτελέσουν και τη βάση για τη σύγκριση και αξιολόγηση της μεθόδου του Linnesh παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.3 που ακολουθεί.

		Φ (mm)	H_L (mm)	H_B (mm)	HWD- $E_{A,23,D}$ (MPa)	Lab- $E_{A,23,C}$ (MPa)	PFWO- $E_{A,23,D}$ (MPa)
Δίκτυο Χωλεοεικλής	H1	3	120	450	9202	8910	1379
		5	135	450	9277	12243	1587
		6	130	450	9753	10017	1574
	H2	2	180	400	9009	11818	1850
		4	185	400	10118	9940	1829
		6	184	450	8899	10097	1845
	H3	2	209		6687	9612	2323
		4	205		7313	7566	2336
		7	183		8732	7748	2003
		11	175		5707	9216	1942
	H4	2	265	500	12539	19892	3236
		4	265	500	15415	17938	3510
		10	180	400	7093	14005	2433
Δίκτυο Πελοποννήσου	TM1	2	90		6512	N/A	1319
		3	115		10318	N/A	1232
		4	105		15477	N/A	1190
		8	125		19133	N/A	1327
	TM2	2	45		24342	N/A	625
		5	45		22507	N/A	594
		8	45		25573	N/A	621
		10	45		21468	N/A	622
	TM3	2	90		9225	N/A	977
		4	130	400	5335	N/A	1645
		6	130	400	3849	N/A	1613
		8	190	450	3177	N/A	1869
		10	190	450	4239	N/A	1893
Δίκτυο Θεσσαλίας	T	3	95	250	9174	N/A	1437
		8	165	350	10401	N/A	2326
	TP	1	100		5138	N/A	1264
		4	100		5379	N/A	1298
	Φ	1	190		4534	N/A	2224
		3	230		4788	N/A	2688
		4	240		4240	N/A	2770

Πίνακας 12.3: Ανηγγμένα μέτρα πλαστικότητας

Οι διαφορές μεταξύ των τριών μεθόδων είναι προφανείς και με μια απλή ματιά στον Πίνακα 12.3, αλλά γίνονται πιο κατανοητές και τεκμηριώνονται καλύτερα μέσω διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 12.1 καταρχήν γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της εργαστηριακής δοκιμής και της δοκιμής με το HWD.

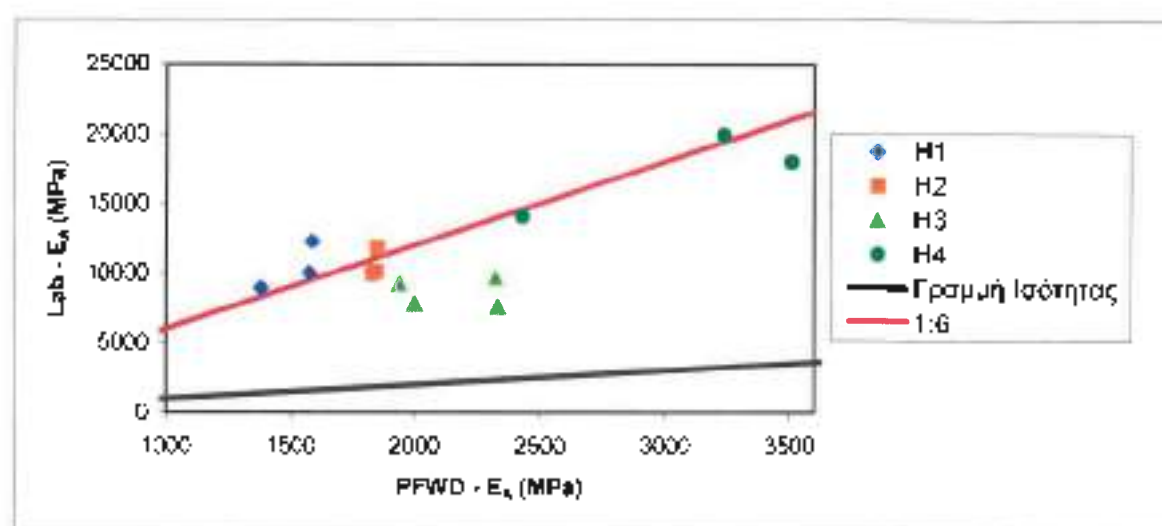


Σχήμα 12.1: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από εργαστηριακές μετρήσεις και από επί τόπου μετρήσεις με το HWD

Όπως προαναφέρθηκε, τα διαθέσιμα εργαστηριακά αποτελέσματα αφορούν μόνο το δίκτυο της Χαλκιδικής. Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι υπάρχει μια σαφής αντιστοιχία των τιμών και σε γενικές γραμμές ισχύει $Lab - E_s = (0,8 \pm 2) \times HWD - E_s$. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και ανάλογες συγκριτικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν^[7]. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στο οδόστρωμα H4, για το οποίο και, από τον ανάστροφο υπολογισμό, προέκυψε ότι η ασφαλτική στρώση χωρίζεται σε δύο ζώνες, μια αρκετά ασθενή και μια πολύ ισχυρή. Η διαφορές μεταξύ των δύο δοκιμών εξηγούνται σε ένα σημαντικό βαθμό από το γεγονός ότι στο εργαστήριο ελέγχονται, γενικά, συμπαγή τμήματα του δείγματος χωρίς

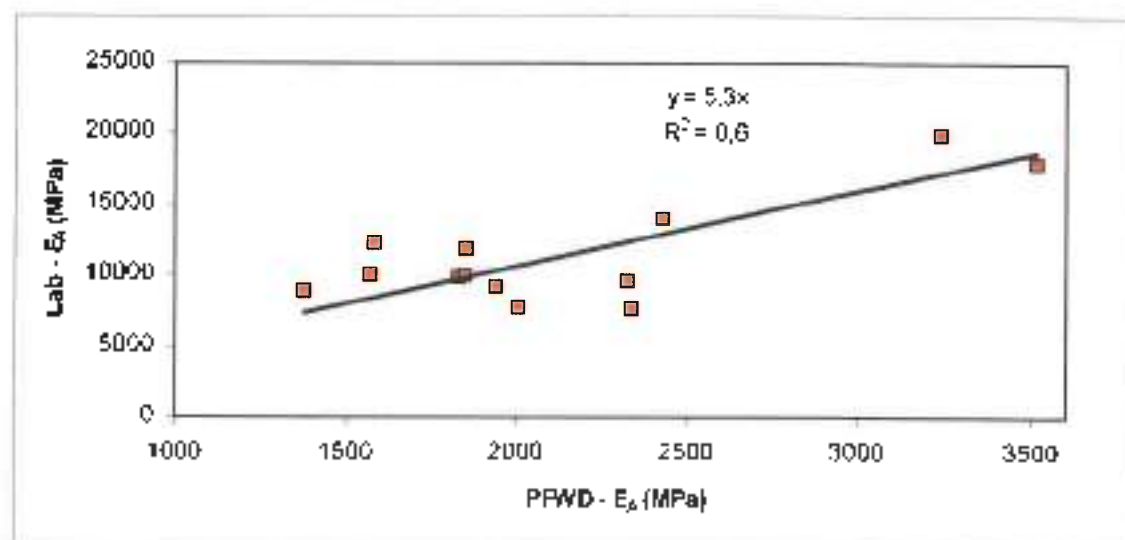
(εμφανείς) ρωγμές, ενώ το HWD μετράει την παραμόρφωση επί τόπου χωρίς να διακρίνει τη μορφή της ασφαλτικής στρώσης. Γι' αυτό το λόγο είναι λογικό κάποιες εργαστηριακές τιμές να είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες του ανάστροφου υπολογισμού. Επίσης, ένας άλλος λόγος που υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων, είναι ότι στο εργαστήριο οι συνθήκες είναι σχεδόν απόλυτα ελεγχόμενες, ενώ επί τόπου είναι δυνατόν σε κάποιες μετρήσεις να προέκυψε ένας αστάθμητος παράγοντας, ο οποίος δεν έγινε αντιληπτός από τον καταμετρητή.

Σκοπός, βέβαια, του κεφαλαίου είναι να συγκρίνει τη μέθοδο του Lίντσεϊ με τις δύο έγκυρες μεθόδους που επιλέχθηκαν και έτσι γίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα. Στο Σχήμα 12.2 φαίνεται η σχέση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης που προέκυψε από το PFWD με τα εργαστηριακά αποτελέσματα.



Σχήμα 12.2· Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από εργαστηριακές μετρήσεις και από επί τόπου μετρήσεις με το PFWD

Όπως είναι προφανές, οι τιμές του PFWD είναι σαφώς μικρότερες από αυτές του εργαστηρίου. Παρόλα αυτά, φανερό είναι και κάποια συσχέτιση μεταξύ τους, με το λόγο $Lab-E_a/PFWD-E_a$ να κυμαίνεται γύρω από το 6. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 12.3 απεικονίζεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεθόδων.

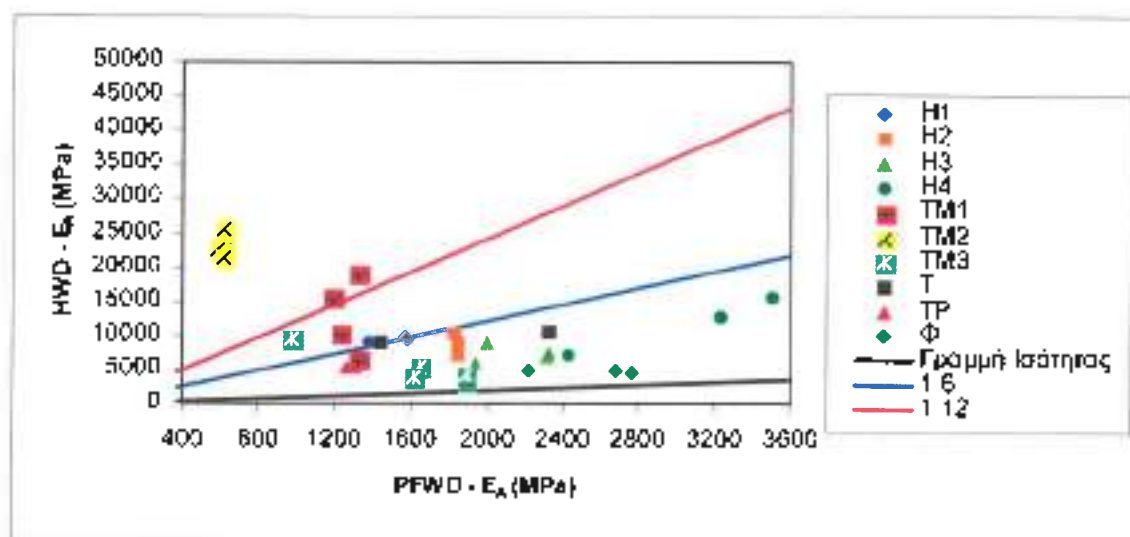


Σχήμα 12.3: Γραμμική Συσχέτιση εργαστηριακών τιμών με τις τιμές που προέκυψαν από την επεξεργασία των στοιχείων του PFWD

Η γραμμική συσχέτιση δίνει $Lab - E_a = 5,3 \times PFWD - E_a$, με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,57$, ο οποίος δεν επαρκεί για να αποδείξει ότι η σχέση αυτή είναι ακριβής, αλλά σίγουρα δείχνει την ύπαρξη μιας γενικής τάσης. Οπωσδήποτε, το δείγμα είναι σχετικά μικρό αφού εργαστηριακά αποτελέσματα υπήρχαν μόνο για το δίκτυο της Χαλκιδικής μέχρι τη συγγραφή του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

Εν αντιθέσει, περισσότερα είναι τα συγκριτικά στοιχεία που προήλθαν από το HWD και επειδή όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η αρχή του PFWD είναι ίδια με του συμβατικού FWD, θα είχε ενδιαφέρον η σύγκρισή

τους. Στο Σχήμα 12.4, που ακολουθεί φαίνονται όλα τα συγκριτικά στοιχεία ανά οδικό τμήμα, για όλα τα υπό μελέτη δίκτυα.

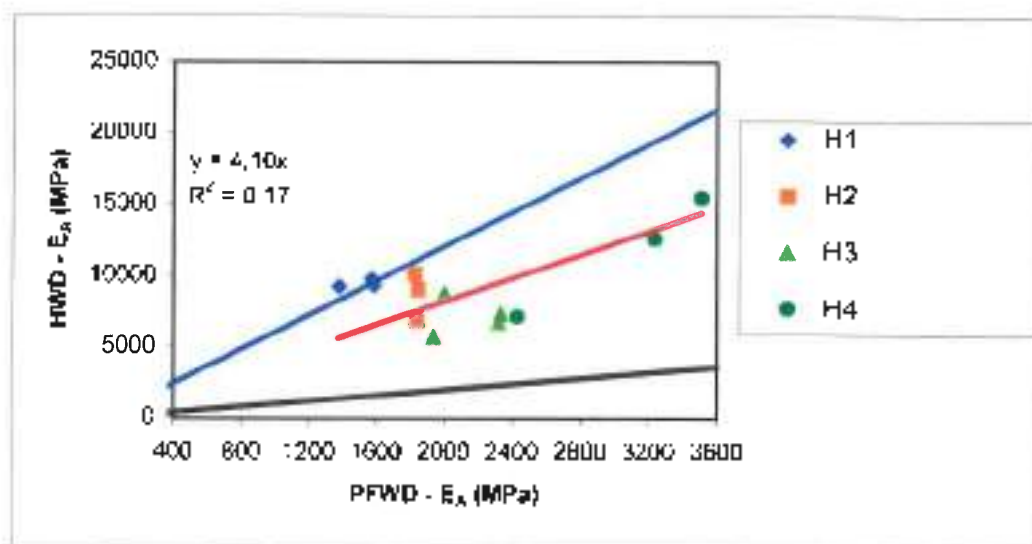


Σχήμα 12.4: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με το HWD και από επί τόπου μετρήσεις με το PFWO

Γιδω η διασπορά των τιμών είναι σαφώς μεγαλύτερη. Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι ο λόγος της πλειοψηφίας των τιμών των δύο μεθόδων είναι λίγο μικρότερος από 6, αλλά υπάρχουν και τιμές όπου ο λόγος κυμαίνεται στο 12! Εξάλλου, στο τμήμα TM2, ο λόγος αυτός ξεπερνάει το 40! Πρέπει να σημειωθεί ότι, από τη λήψη πυρήνων, διαπιστώθηκε ότι το πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυτού του τμήματος ήταν υπερβολικά μικρό (~40mm). Ίσως αυτός να είναι και ο λόγος της σημαντικότητας αυτής απόκλισης, αφού αφενός η μελέτη του M. Ligneh για τη μέθοδο της μιας μέτρησης δεν περιλάμβανε οδικά τμήματα με τόσο λεπτή ασφαλτική στρώση και αφετέρου, στην προτεινόμενη μέθοδο το πάχος των ασφαλτικών παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι οι μετρήσεις με το FWD δεν είναι αξιόπιστες για ασφαλτικά πάχη μικρότερα των

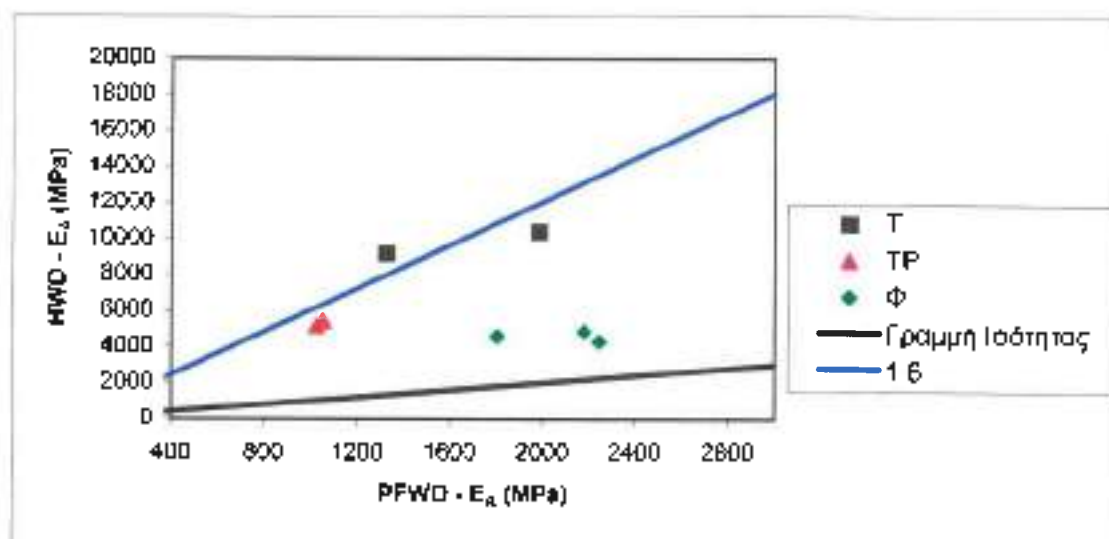
70mm. Οπότε, το τμήμα αυτό θα μπορούσε να αποκλεισθεί από την σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας.

Χρήσιμο θα ήταν να εξεταστεί και το κάθε δίκτυο χωριστά, αφού η σύγκριση των εργαστηριακών τιμών έγινε μόνο για το δίκτυο της Χαλκιδικής. Στο Σχήμα 12.5, φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τη Χαλκιδική.

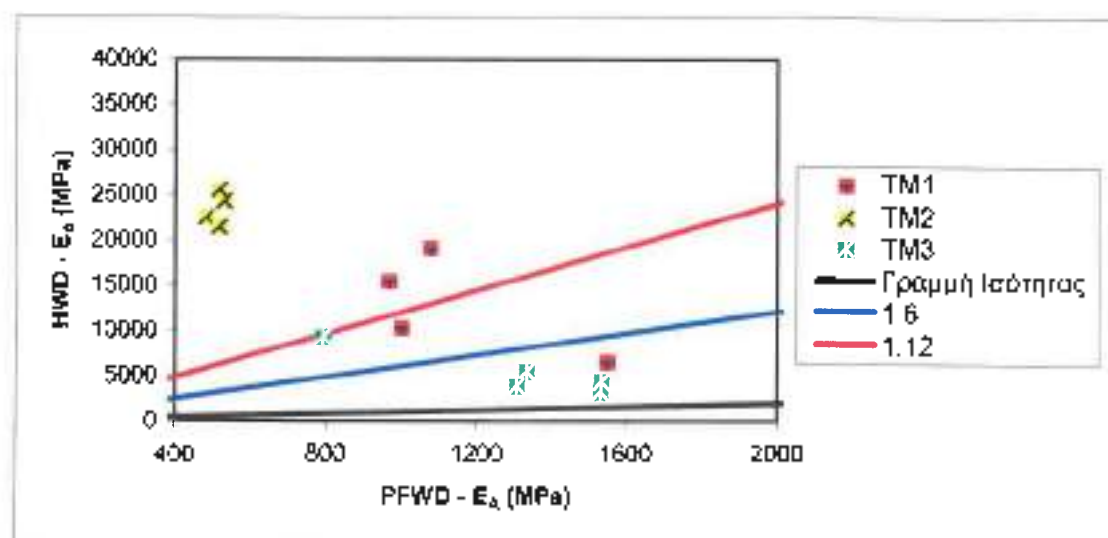


Σχήμα 12.5: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με το HWD και από επί τόπου μετρήσεις με το PFWO για το δίκτυο της Χαλκιδικής και Γραμμική Συσχέτιση

Και εδώ ο λόγος των τιμών κυμαίνεται στα 4, πολύ κοντά δηλαδή στον αντίστοιχο με τις εργαστηριακές τιμές, αλλά προφανώς ο συντελεστής συσχέτισης είναι πολύ μικρός για την εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα, για τα δίκτυα της Θεσσαλίας και της Πελοποννήσου.



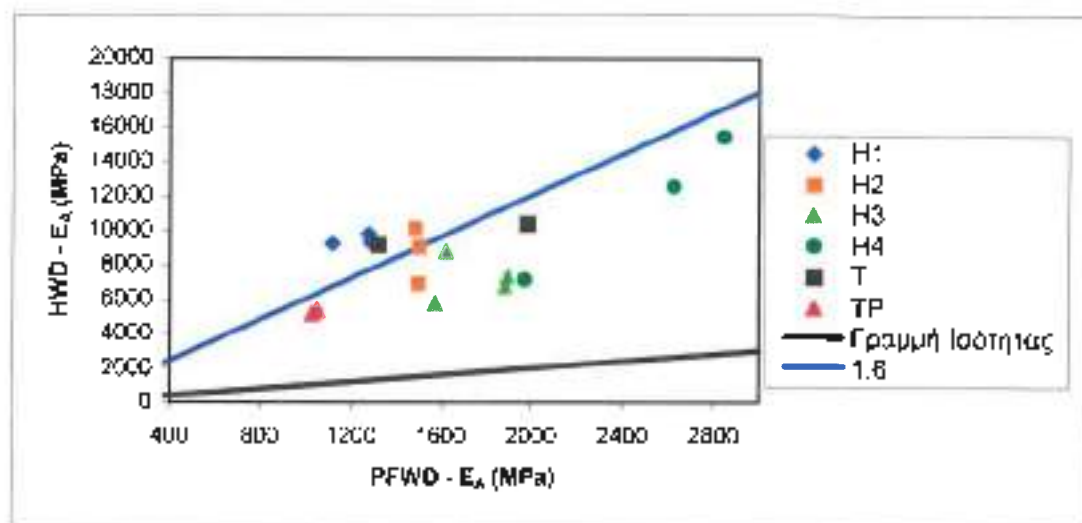
Σχήμα 12.6: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με το HWD και από επί τόπου μετρήσεις με το PFW για το δίκτυο της Θεσσαλίας



Σχήμα 12.7: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με το HWD και από επί τόπου μετρήσεις με το PFW για το δίκτυο της Πελοποννήσου

Για τα δίκτυα της Θεσσαλίας και της Πελοποννήσου η διασπορά των τιμών είναι μεγάλη και δεν μπορεί να λεχθεί ότι η τιμές παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη τάση. Παρόλα αυτά, υπάρχουν οδικά τμήματα που παρουσιάζουν

ανάλογη διασπορά με τα τμήματα της Χαλκιδικής. Όλα μαζί φαίνονται στο διάγραμμα του Σχήματος 12.8 ακολούθως.



Σχήμα 12.8: Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν από επί τόπου μετρήσεις με το HWD και από επί τόπου μετρήσεις με το PFWD

Τα παραπάνω οδικά τμήματα, είναι προφανές ότι παρουσιάζουν μια πιο σταθερή τάση του λόγου $HWD \cdot E_a / PFWD \cdot E_a$ να τείνει σε γενικές γραμμές, κοντά στο 5. Βέβαια, το γεγονός αυτό μπορεί να είναι τυχαίο και σε καμία περίπτωση δεν δικαιολογεί την εγκυρότητα της μεθόδου του Λίνπεθ. Άλλωστε, και τα διαγράμματα του ίδιου όσων αφορά το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτικών, τα οποία παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν έδειξαν κάτι το ενθαρρυντικό.

12.6 Σύγκριση μέσων μέτρων ελαστικότητας

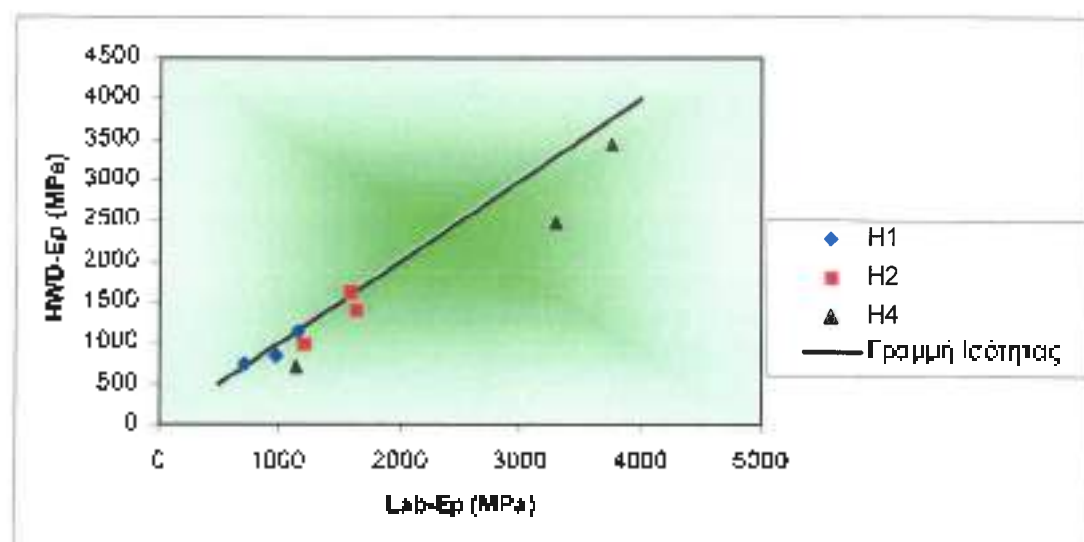
Ο Λίνπεθ κατά την ανάπτυξη της μεθόδου του ασχολήθηκε αρχικά με τον υπολογισμό του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος E_p , το οποίο

και χρησιμοποίησε και στις συγκρίσεις που έκανε με άλλες δοκιμές (6^ο Κεφάλαιο). Το E_r υπολογίζεται με βάση τη σχέση (6.3). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των μέσων μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν με τη χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε. Έτσι, χρησιμοποιώντας το E_d που προέκυψε από κάθε δοκιμή, τις διαστάσεις που προέκυψαν από τη δειγματοληψία και το E_G που υπολογίστηκε από την back-analysis των παραμορφωσιακών δεδομένων του HWD, διαμορφώθηκε ο ακόλουθος πίνακας.

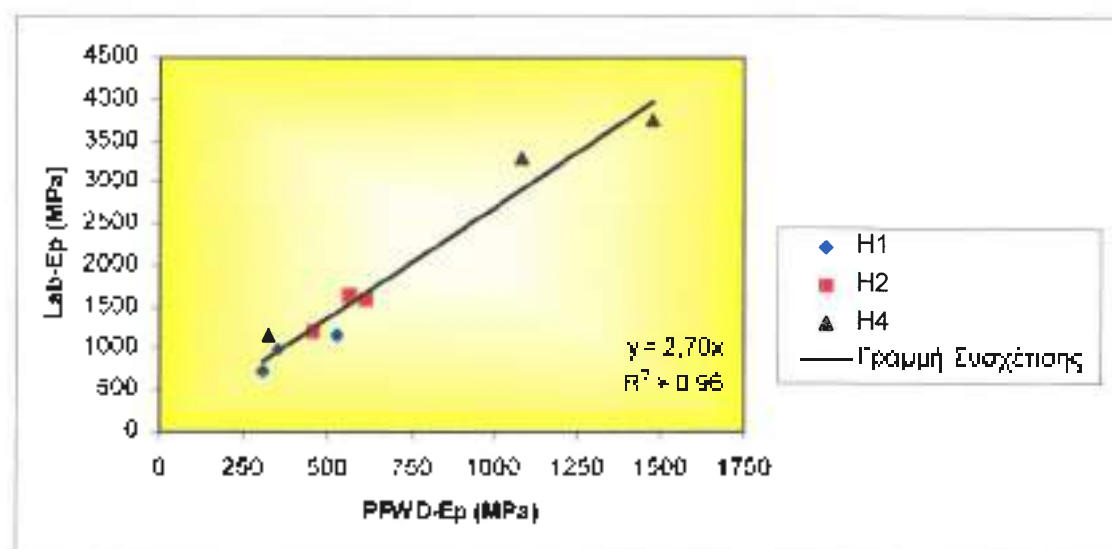
		Θέση	H _d (mm)	H _L (mm)	E _G (MPa)	HWD-E _{A,23,0} (MPa)	Lab-E _{A,23,0} (MPa)	PFWD-E _{A,23,0} (MPa)	HWD-E _p (MPa)	Lab-E _p (MPa)	PFWD-E _p (MPa)
Δίκτυο Χολοκιδιές	H1	3	120	450	197	9202	8910	1119	729	718	311
		5	135	450	215	9277	12243	1288	846	978	361
		6	130	450	389	9753	10017	1277	1141	1155	530
	H2	2	180	400	324	9009	11818	1502	1403	1645	570
		4	185	400	366	10118	9940	1484	1613	1597	613
		6	184	450	236	6899	10097	1467	974	1211	458
	H4	2	265	500	590	12539	19892	2626	2477	3287	1080
		4	265	500	974	15415	17936	2848	3442	3757	1477
		10	180	400	82	7093	14005	1974	719	1150	327
Δίκτυο Πελοποννήσου	TM3	4	130	400	215	5335	N/A	1335	683	N/A	377
		6	130	400	303	3849	N/A	1309	708	N/A	466
		8	190	450	188	3177	N/A	1533	590	N/A	413
		10	190	450	334	4239	N/A	1536	907	N/A	572
Δίκτυο Θεσσαλίας	T	3	95	250	394	9174	N/A	1321	1358	N/A	578
		8	165	350	466	10401	N/A	1985	1844	N/A	803

Πίνακας 12.4: Υπολογισμός E_r για κάθε δοκιμή

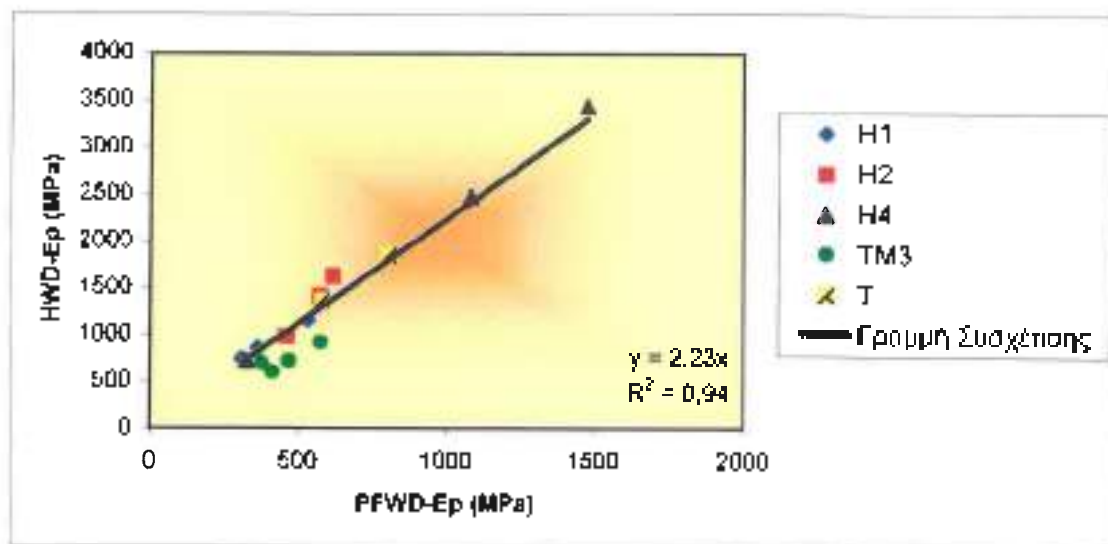
Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων στα σχήματα 8, 9, 10.



Σχήμα 12.9



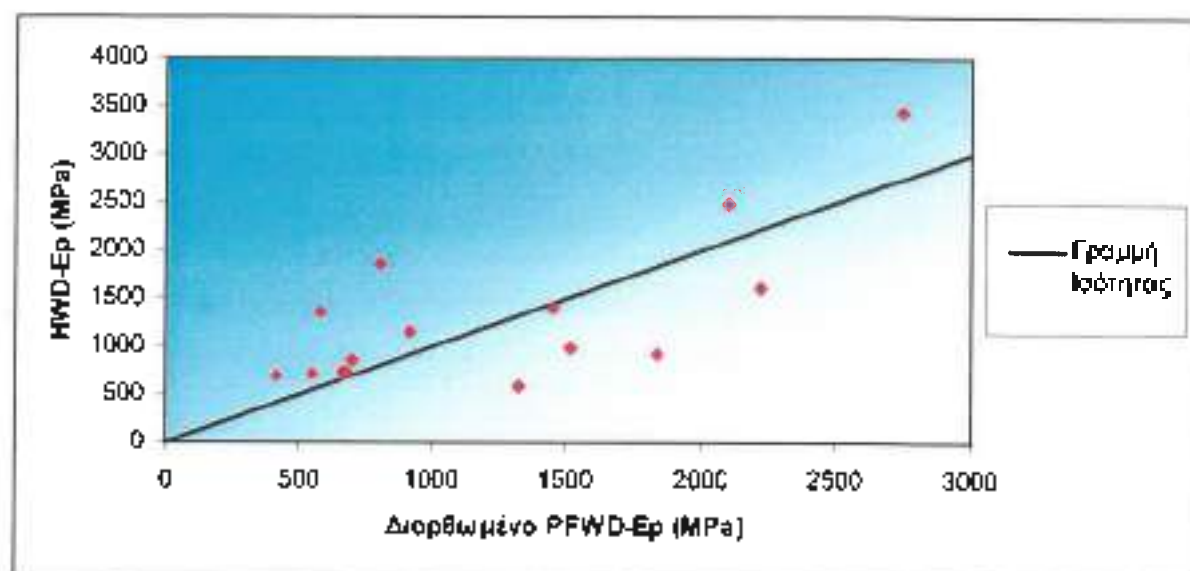
Σχήμα 12.10



Σχήμα 12.11

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με τα αποτελέσματα της ανάστροφης ανάλυσης των δεδομένων του HWD. Αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η συσχέτιση των τιμών του PFWD με τις άλλες δύο δοκιμές, που δείχνει τον σχετικά μικρό ρόλο που παίζει το μέτρο ελαστικότητας των υσφαλτικών στη διαμόρφωση του μέσου μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος. Έτσι η χρήση του E_p ως μέτρου σύγκρισης θα μπορούσε να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα για την εγκυρότητα των δεδομένων του PFWD.

Τέλος, η χρήση του συντελεστή F_c (σχέση 6.13), για τη διόρθωση του PFWD- E_p , έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτουν τιμές πιο κοντά στην τάξη μεγέθους των άλλων δύο δοκιμών, αλλά με σαφώς χαμηλότερη συσχέτιση (σχήμα 12.12).

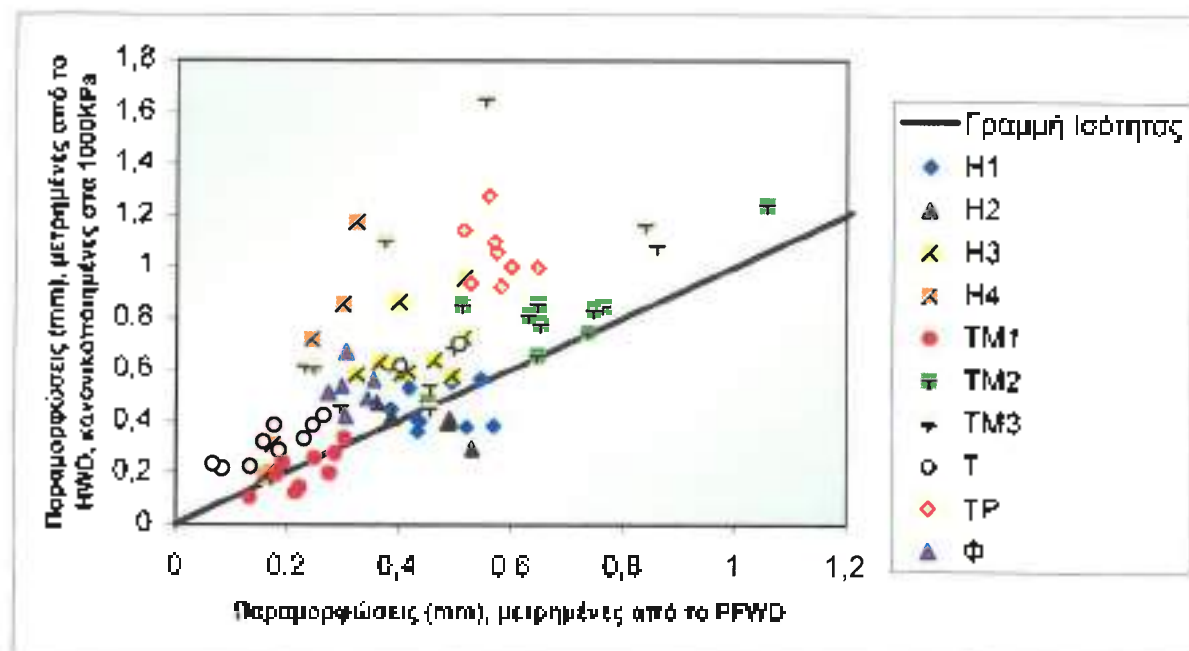


Σχήμα 12.12

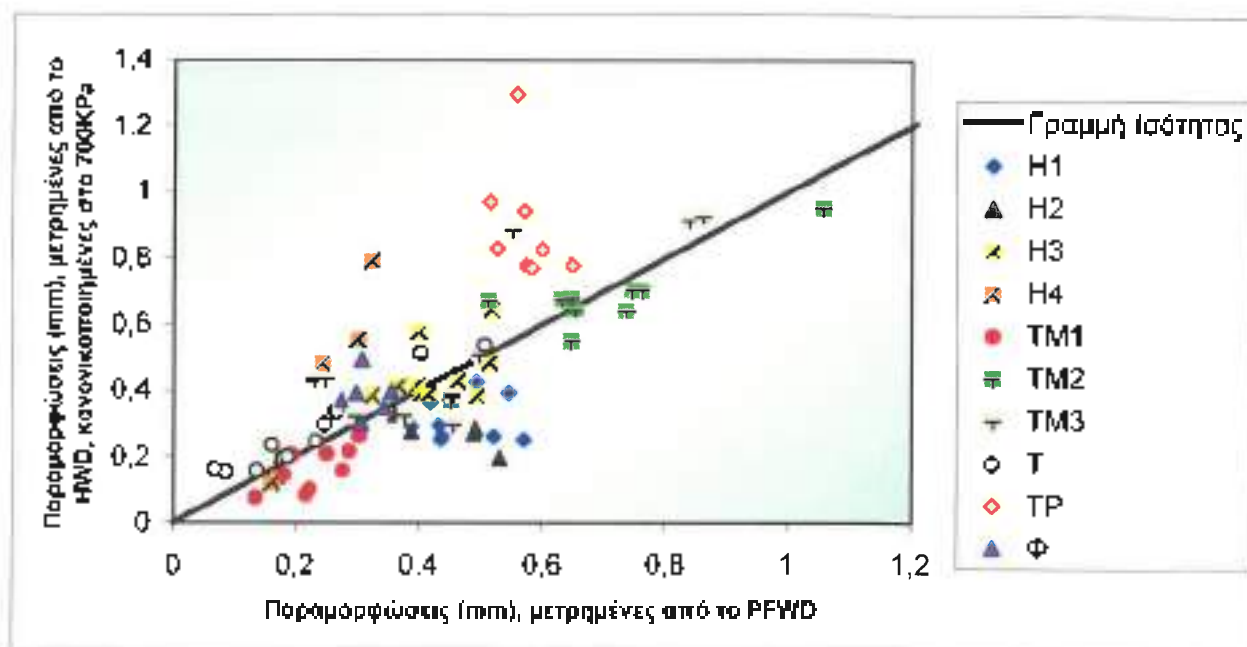
12.7 Σύγκριση παραμορφώσεων

Ενώ η σύγκριση των υπολογιστικών μεθόδων, περιλαμβάνει όλες τις αβεβαιότητες που υπεισέρχονται σε αυτές, ειδικά στη μέθοδο Lίννεχ, η οποία αφενός είναι ακόμη στο στάδιο του ελέγχου και αφετέρου χρησιμοποιεί πολύ λιγότερα δεδομένα, υπάρχει η δυνατότητα να συγκριθούν τα άμεσα συλλεγόμενα στοιχεία που είναι κοινά για τις δύο δοκιμές, δηλαδή οι παραμορφώσεις στο σημείο πτώσης του βάρους από τις δύο συσκευές.

Αναλυτικά οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν παρουσιάζονται στο παράρτημα σε μορφή πίνακα. Παρακάτω ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν από το PFWD σε σύγκριση με αυτές που προέκυψαν από το HWD για φορτίσεις 1000 και 700 kPa αντίστοιχα.

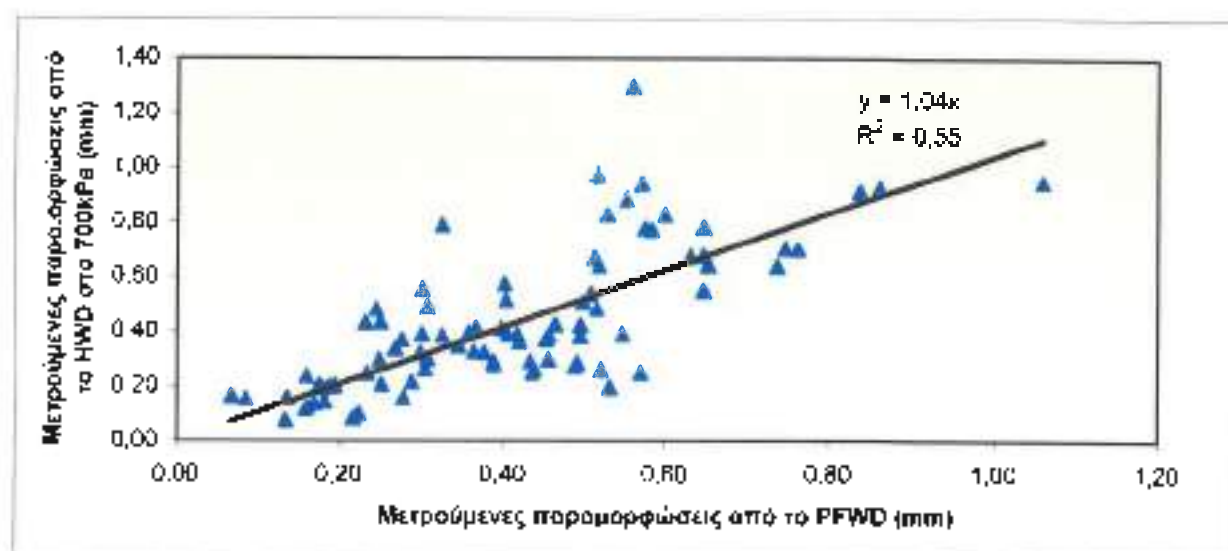


Σχήμα 12.13: Σύγκριση μετρούμενων παραμορφώσεων από το PFWD και το HWD στα 1000kPa



Σχήμα 12.14: Σύγκριση μετρούμενων παραμορφώσεων από το PFWD και το HWD στα 700kPa

Είναι φανερό ότι οι μετρούμενες παραμορφώσεις από τις δύο συσκευές, σε αντίθεση με τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τις προηγούμενες αναλύσεις, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, ειδικά όταν πρόκειται για αυτές που προέκυψαν από το HWD στα 700 kPa (και αυτό γιατί το HWD πολλές φορές ήταν ασταθές στο μεγάλο φορτίο). Μάλιστα, η γραμμική συσχέτιση των μετρούμενων παραμορφώσεων συμπίπτει σχεδόν με τη γραμμή ισότητας, με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,55$, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 12.15: Γραμμική Συσχέτιση μετρούμενων παραμορφώσεων από το PFWD και το HWD στα 700kPa

Γίνεται, δηλαδή, αντιληπτό ότι, ενώ τα αρχικά δεδομένα (παραμορφώσεις) σε κάθε ανάλυση είναι της ίδιας τάξης μεγέθους σε γενικές γραμμές (παρατηρούνται φανερά κάποιες αποκλίσεις), τα τελικά αποτελέσματα (μέτρα ελαστικότητας) διαφέρουν σημαντικά κατά τάξη μεγέθους αλλά και κατ' αναλογία σε πολλές περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό ίσως υποδεικνύει μια λάθος προσέγγιση στην ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν από τη συσκευή *LOADMAN*.

12.8 Σχόλια

Από όλα τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της συσκευής PFWD-L, επεξεργασμένες με την προτεινόμενη μέθοδο του Μ. Λίνπελ, δεν ανήκουν στην ίδια τάξη μεγέθους με αυτά που προκύπτουν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης, ούτε με αυτά που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό από τα δεδομένα του HWD.

Για τα συγκριτικά στοιχεία που υπήρχαν από το εργαστήριο, ωστόσο, παρατηρείται μια συσχέτιση των αποτελεσμάτων, με το λόγο $E_A/PFWD-E_A$ να είναι περίπου 5,3. Αντίθετα, όσον αφορά τη σύγκριση με το HWD, δε βρέθηκε συγκεκριμένη τάση του ίδιου λόγου ($HWD-E_A/PFWD-E_A$), παρά μόνο για ορισμένα από αυτά. Η διαφορά στα αποτελέσματα, ίσως να οφείλονται στο μικρό αριθμό των μετρήσεων που βασίστηκε η ανάπτυξη της μεθόδου από τον Λίνπελ.

Επίσης, η σύγκριση των E_r έδειξε ότι υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του PFWD-L με τις άλλες δύο δοκιμές. Το γεγονός όμως αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μικρή συμμετοχή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης στον υπολογισμό του και στο ότι όλα τα υπόλοιπα δεδομένα προήλθαν από την ανάστροφη ανάλυση των παραμορφώσεων του HWD. Έτσι, παρά τη μεγάλη συσχέτιση δεν μπορεί να γενικευθεί το συμπέρασμα και για τα E_A , όπως έκανε στη μελέτη του ο Μ. Λίνπελ.

Οπότε, τουλάχιστο για τα οδοστρώματα που εξετάστηκαν, τα οποία καλύπτουν ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα των μορφών των Ελληνικών οδοστρωμάτων, η προτεινόμενη μέθοδος δεν μπορεί να εκτιμήσει επαρκώς το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης.

Παρόλα αυτά, κάποια ενθαρρυντικά στοιχεία δίνονται κατά τη σύγκριση των παραμορφωσιακών δεδομένων των δοκιμών PFWD και HWD. Τελικά, ίσως μια διαφορετική προσέγγιση των δεδομένων που προκύπτουν από τη συσκευή PFWD-L θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο έγκυρα αποτελέσματα και συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13^ο

Διερεύνηση Δυνατότητας Χρήσης των Παραμορφωσιακών Δεδομένων του PFWD για τη Δομική Αξιολόγηση Οδοστρώματος

13.1 Εισαγωγή

Όπως έγινε φανερό και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μέθοδος που προτάθηκε από το Μ. Λίνπεη για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης οδοστρώματος με τη χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από τη δοκιμή με το PFWD, δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και επομένως δεν είναι ασφαλές να χρησιμοποιηθεί για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Παρόλα αυτά, η σύγκριση των παραμορφωσιακών δεδομένων που προέκυψαν από τη δοκιμή με τη συσκευή *LOADMAN* με τις τιμές του HWD, έδειξε ότι υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ τους.

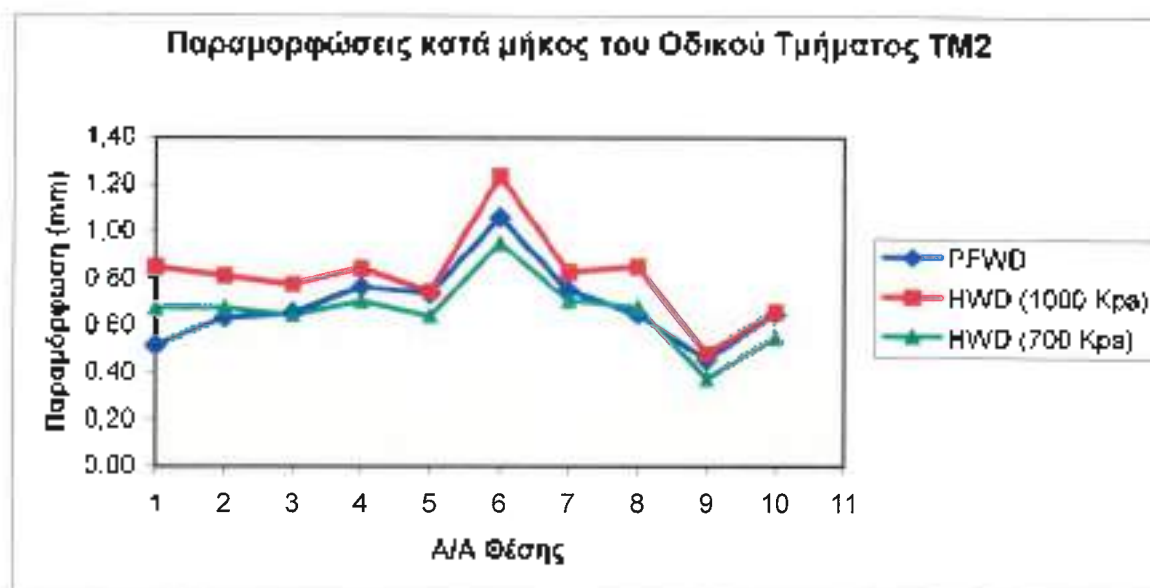
Πολλές φορές, οι παραμορφώσεις από μόνες τους ή ο δομικός αριθμός του οδοστρώματος (SNP: Structural Number of Pavement) που προκύπτει άμεσα από αυτές, μπορούν να αποτελέσουν ένα μέτρο για τη δομική αξιολόγηση του οδοστρώματος. Οπότε, ενδιαφέρον θα ήταν να συγκριθούν τα παραμορφωσιακά δεδομένα που προέκυψαν από τις δύο δοκιμές κατά μήκος κάθε υπό μελέτη οδοστρώματος.

13.2 Σύγκριση παραμορφώσεων

Αρχικά συγκρίθηκαν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το PFWD με τα αντίστοιχα στοιχεία του HWD για τις τάσεις των 700 και 1000 kPa. Πρέπει να σημειωθεί ότι πιο αξιόπιστες είναι οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν υπό τάση 700 kPa, γιατί όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, πολλές φορές η συσκευή ήταν ασταθής στο υψηλό

φορτίο. Επίσης, τα στοιχεία στην τάση των 700 kPa δείχνουν να είναι πιο συμβατά με αυτά του PFWD.

Η πλήρης εικόνα της σύγκρισης δίνεται στα διαγράμματα του Παραρτήματος. Στην πλειοψηφία των οδών που μελετήθηκαν είναι φανερή η ομοιότητα των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν με τη συσκευή *LOADMAN* σε σχέση με αυτές που μετρήθηκαν με το HWD (και ειδικά στην τάση των 700 kPa). Παρακάτω ακολουθούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα και γίνεται ο σχολιασμός τους.



Σχήμα 13.1. Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος TM2 (Δίκτυο Πελοποννήσου)



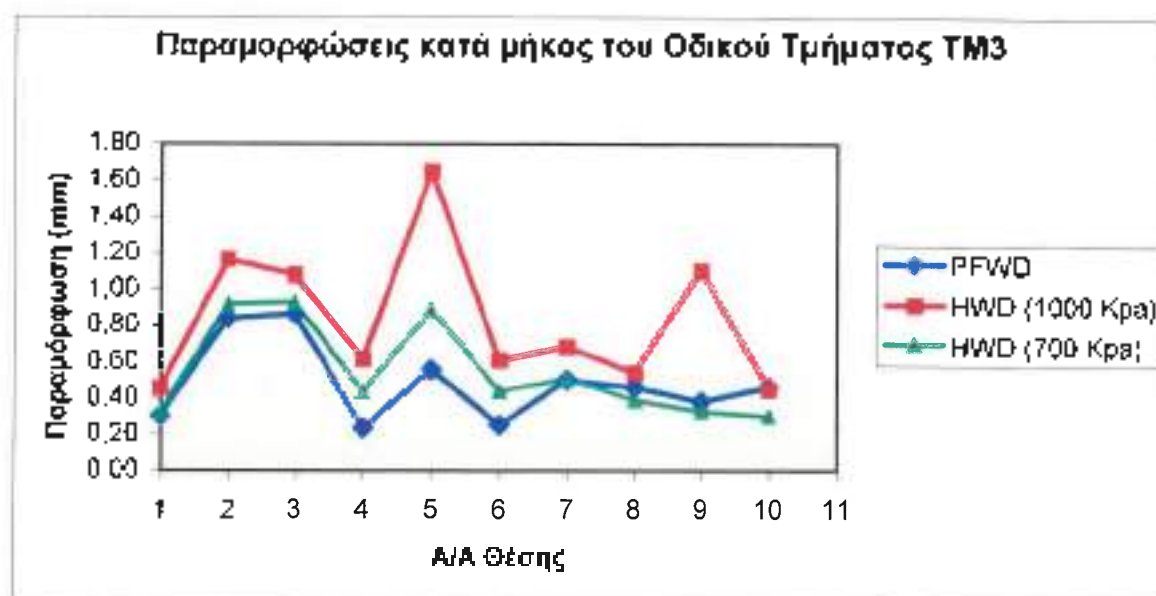
Σχήμα 13.2: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος Η3 (Δίκτυο Χαλκιδικής)



Σχήμα 13.3: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος Τ (Δίκτυο Θεσσαλίας)

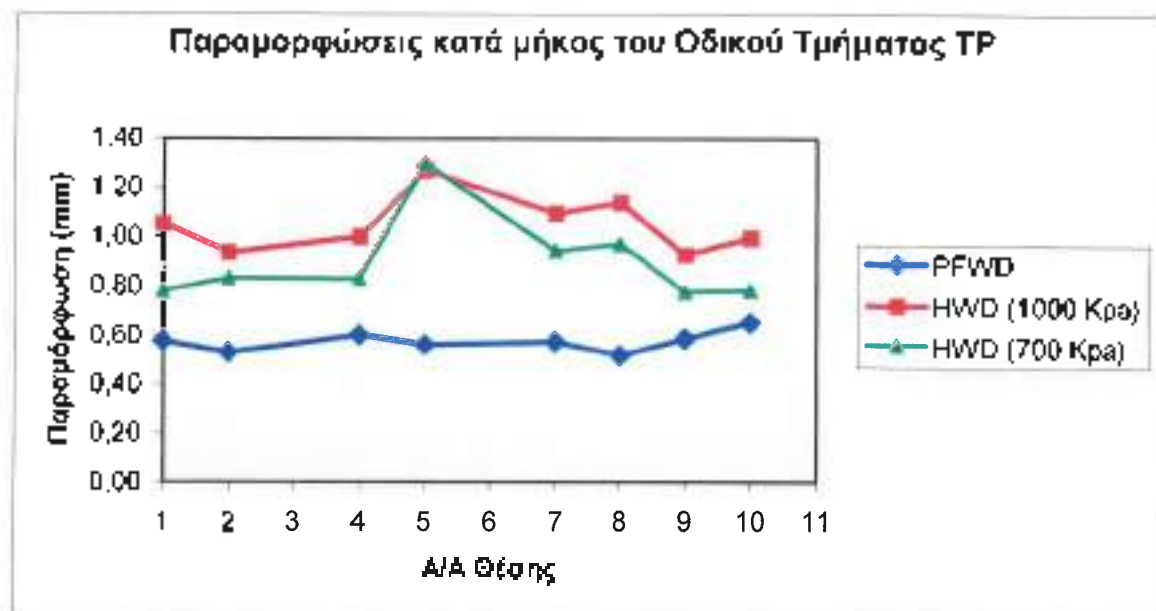
Στα παραπάνω διαγράμματα, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το PFWD δίνει όμοια εικόνα, για κάθε οδικό τμήμα, με αυτή που θα έδινε και το HWD. Οπότε μπορεί να υποτεθεί ότι, για τέτοιου είδους μετρήσεις δεν είναι απαραίτητη η χρήση του πολύ ακριβούς και ογκώδους FWD με τις απαιτήσεις σε τεχνολογία και λογισμικό, αλλά αρκεί το φθηνό και εύχρηστο PFWD-1, το οποίο μπορεί

να αποκτηθεί από οποιαδήποτε Νομαρχία ή και Δήμο. Βέβαια, αυτό θα συνέβαινε στην ιδανική περίπτωση που όλες οι συγκρίσεις θα κατέληγαν σε παρόμοια αποτελέσματα. Δυστυχώς, παρόλο που στην πλειοψηφία των υπό μελέτη οδών τα αποτελέσματα ήταν θετικά, υπάρχουν μερικές περιπτώσεις, οι οποίες αφήνουν αμφιβολίες για την εγκυρότητα της συσκευής. Ακολουθούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα.



Σχήμα 13.4: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος TM3 (Δίκτυο Πελοποννήσου)

Το διάγραμμα του σχήματος 13.4 αντιπροσωπεύει την περίπτωση που το HWD ήταν ασταθές στο υψηλό φορτίο. Έτσι, ενώ είναι φανερό η ομοιότητα των παραμορφώσεων μεταξύ FWD και HWD στα 700 kPa, στο φορτίο των 1000 kPa παρατηρούνται αποκλίσεις από την παραμορφωσιακή εικόνα του τμήματος (ειδικά στο σημείο 9). Η απόκλιση αυτή, κατά πάσα πιθανότητα, οφείλεται στην έντονη ριγμάτωση που υπήρχε στο συγκεκριμένο οδικό τμήμα με αποτέλεσμα οι μετρήσεις υπό υψηλή τάση να μην είναι αξιόπιστες.



Σχήμα 13.5: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος TP (Δίκτυο Θεσσαλίας)

Το διάγραμμα του σχήματος 13.5 είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα πλήρους ασυμβατότητας των μετρήσεων των δύο συσκευών. Είναι και η μόνη περίπτωση που δεν φαίνεται να υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων. Φανερός λόγος που να δικαιολογεί κάτι τέτοιο δεν υπήρχε. Το τμήμα ήταν νέο (2-3 ετών) και η δειγματοληψία έδειξε ότι δεν υπήρχαν κάποια δομικά λάθη ή ρωγμές.



Σχήμα 13.6: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος Η4 (Δίκτυο Χαλκιδικής)

Στο παραπάνω διάγραμμα, ενώ παρατηρείται συμβατότητα στις μικρές παραμορφώσεις, οι μεγάλες αρχίζουν και αποκλίνουν. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο τμήμα αυτό παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερη απόκλιση στη σειρά μετρήσεων με το FWD σε κάθε σημείο, οπότε η μέση τιμή της παραμόρφωσης, η οποία και χρησιμοποιείται, ίσως να μην είναι τόσο αξιόπιστη.



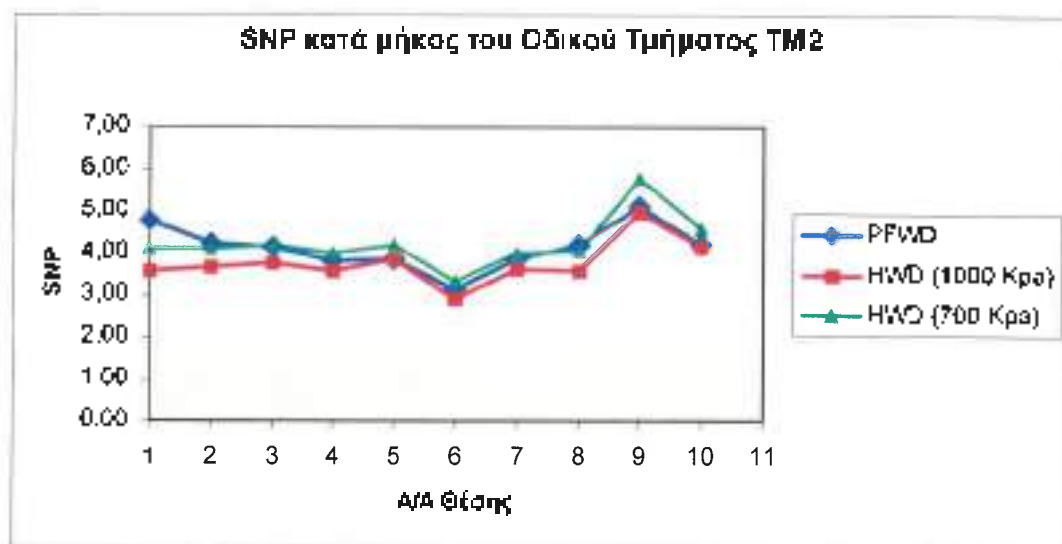
Σχήμα 13.7: Παραμορφώσεις κατά μήκος του τμήματος Η1 (Δίκτυο Χαλκιδικής)

Τέλος, στο τμήμα Η1, όπως και στο Η2 (παράρτημα), οι παραμορφώσεις που έδωσε το PFWD φαίνεται να είναι πιο κοντά στις παραμορφώσεις που έδωσε το HWD στα 1000 kPa.

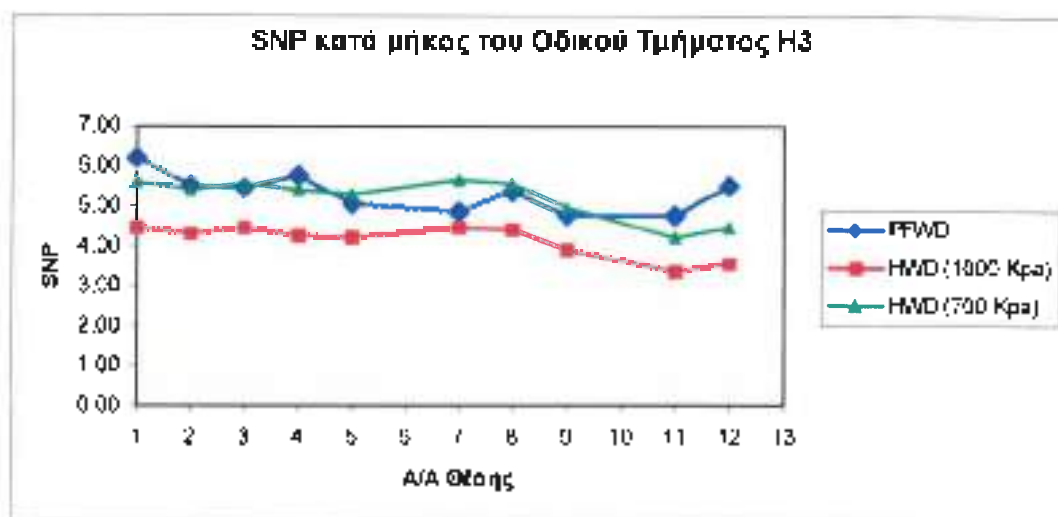
13.3 Σύγκριση του SNP (Δομικός Αριθμός Οδοστρώματος)

Ένας από τους δείκτες δομικής αξιολόγησης ενός οδοστρώματος είναι και ο δομικός αριθμός του οδοστρώματος, ο οποίος αναφέρεται ως SNP (Structural Number of Pavement). Ο SNP μπορεί να προκύψει από τη βιβλιογραφία[32],[33].

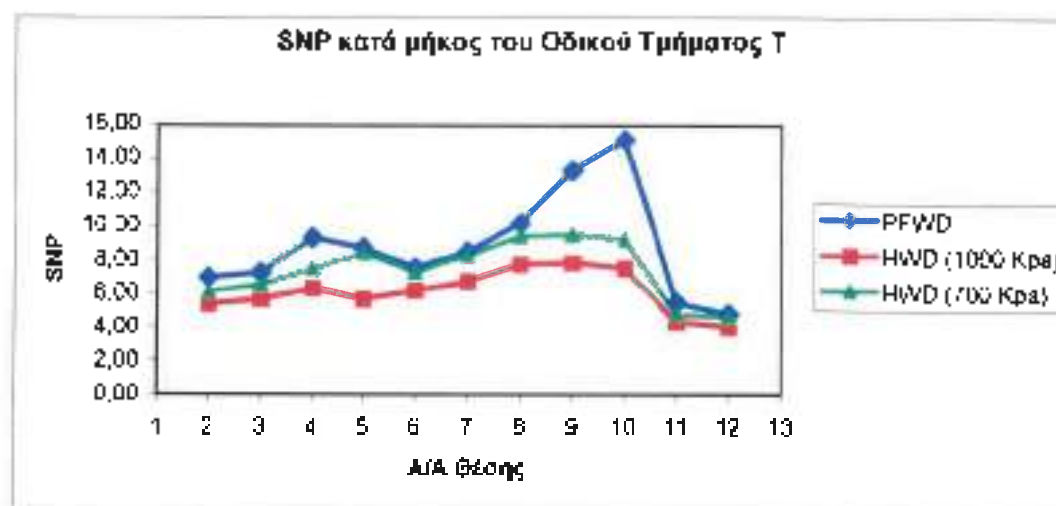
Επειδή ο SNP προκύπτει άμεσα από την παραμόρφωση, είναι φυσικό τα συγκριτικά διαγράμματα να έχουν τη μορφή που έχουν και τα αντίστοιχα για τις παραμορφώσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις οι διαφορές ενισχύονται (λόγω της σχέσης), αλλά γενικά τα αποτελέσματα είναι αρκετά συμβατά. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι δομικοί αριθμοί των τμημάτων που παρουσιάστηκαν και στις παραμορφώσεις (σχήματα 13.8, 13.9, 13.10).



Σχήμα 13.8: SNP κατά μήκος του τμήματος TM2 (Δίκτυο Πελοποννήσου)

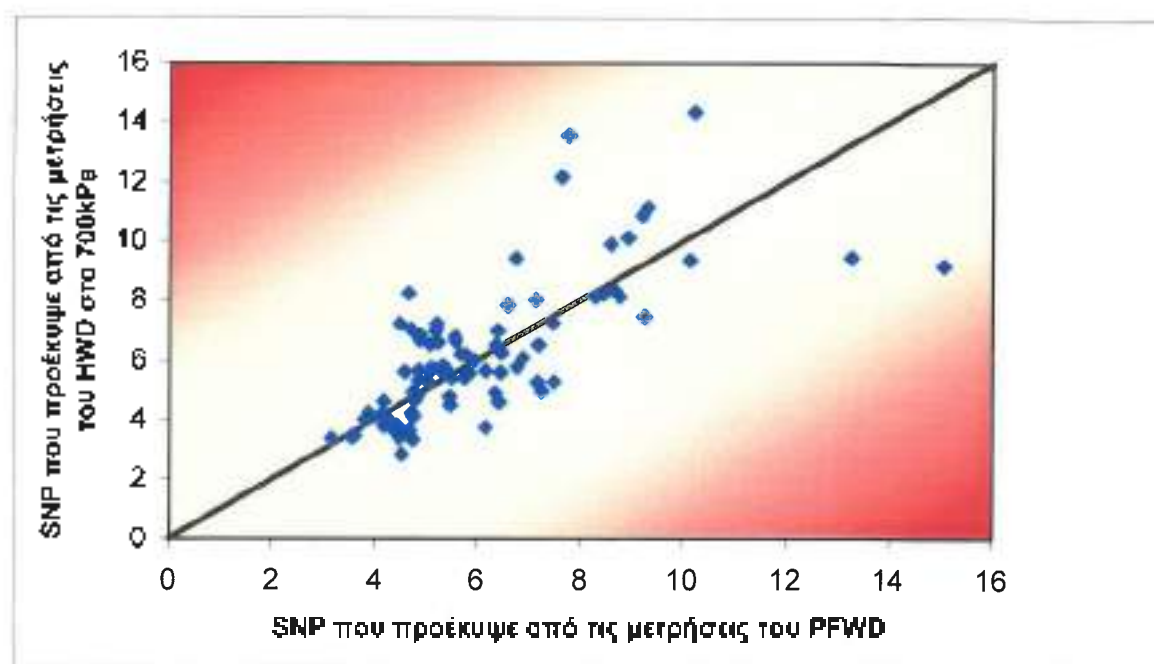


Σχήμα 13.9: SNP κατά μήκος του τμήματος H3 (Δίκτυο Χαλκιδικής)



Σχήμα 13.10: SNP κατά μήκος του τμήματος T (Δίκτυο Θεσσαλίας)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των SNP που προέκυψαν από τις παραμορφώσεις που έδωσε η δοκιμή με το HWD σε τάση 700kPa, με αυτούς που προέκυψαν από το PWD. Είναι οφθαλμοφανής κάποια συμβατότητα ανάμεσα στις αντίστοιχες τιμές των δύο συσκευών.



Σχήμα 13.11: Σύγκριση των υπολογισμένων δομικών αριθμών

13.4 Σχόλια

Στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώθηκε ξεκάθαρα ότι η προτεινόμενη μέθοδος για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης από τις μετρήσεις του PWD δεν έπεισε για την εγκυρότητά της. Παρόλα αυτά, όπως διαφαίνεται στο παρόν κεφάλαιο, οι μετρήσεις της συσκευής *LOADMAN* μπορούν να φανούν χρήσιμες σε πολλές περιπτώσεις. Είναι φανερή η συμβατότητά τους με τις παραμορφώσεις που προέκυψαν από τη δοκιμή με το PWD στα ίδια σημεία και μάλιστα φαίνεται να συσχετίζονται καλύτερα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν υπό τάση 700kPa. Το γεγονός αυτό, βέβαια, είναι αξιοπερίεργο, γιατί η τάση που επιβάλλει το PWD είναι περίπου 1600kPa.

Αν, τελικά, αποδειχθεί μια τέτοια σχέση, τότε η συσκευή *LOADMAN* θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις και για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Οι δυνατότητες της παραμένουν, βέβαια, περιορισμένες (όπως έχει ήδη τονιστεί, οι παραμορφώσεις δεν αποτελούν από μόνες τους αξιόπιστο τρόπο αξιολόγησης), αλλά, σίγουρα, μπορεί να οδηγήσει σε κάποια συμπεράσματα, όταν οι συνθήκες (οικονομικές, τεχνολογικές κτλ) δεν επιτρέπουν τη χρήση άλλων συσκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14^ο

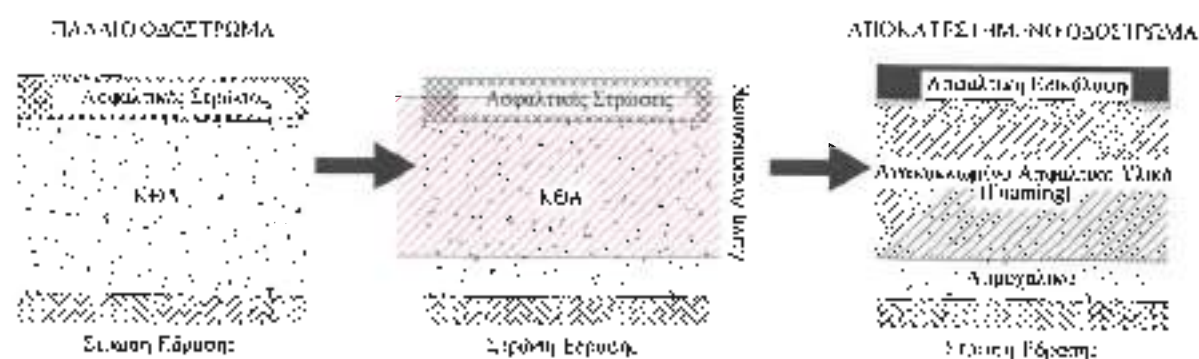
Αξιοποίηση των Δυνατοτήτων του PFWD σε Ειδικές Κατασκευές

14.1 Εισαγωγή

Ως τώρα η δοκιμές με το PFWD στα πλαίσια της παρούσας μελέτης έγιναν είτε σε ήδη υπάρχοντα, είτε σε νέα οδοστρώματα στην επιφάνεια της ασφατικής στρώσης. Επίσης, οι βιβλιογραφικές αναφορές για τα ασύνδετα υλικά αναφερόταν σε δοκιμές πάνω στην επιφάνεια του εκάστοτε υλικού. Στα πλαίσια της ανακατασκευής ενός τμήματος του αυτοκινητοδρόμου ΠΛΘΕ (Σχήμα 14.1), δόθηκε η ευκαιρία να πραγματοποιηθεί η δοκιμή σε δύο στάδια της αποκατάστασης. Σε ένα μέρος του τμήματος αυτού η αποκατάσταση, έγινε με τη μέθοδο της αφρώδους ασφάλτου (Foaming – ψυχρή ανακύκλωση του παλαιού ασφαλτικού μαζί με μέρος του ΚΘΑ), (Σχήμα 14.2), η οποία βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο όσον αφορά τους αυτοκινητοδρόμους, αλλά χρησιμοποιείται ευρέως στο εξωτερικό όταν πρόκειται για οδοστρώματα επαρχιακών και γενικά δευτερευόντων δικτύων.



Σχήμα 14.1: Εθνική οδός Αθηνών – Κορίνθου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο ύψος των διλιστηρίων, στην κατεύθυνση προς Αθήνα



Σχήμα 14.2: Αποκατάσταση παλαιού οδοστρώματος με την πειραματική μέθοδο της ανακύκλωσης του κεφαλαιωμένου ασφαλτικού

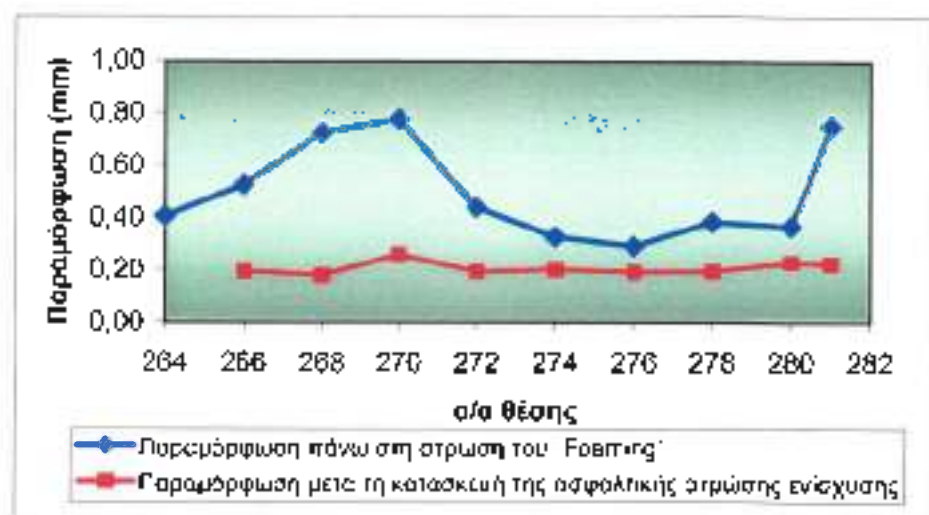
Αρχικά η δοκιμή πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την επίστρωση του ανακυκλωμένου υλικού, και έπειτα, ακριβώς στα ίδια σημεία, αφού τοποθετήθηκε η ασφαλτική επικάλυψη. Με αυτό τον τρόπο, κινέστη δυνατός, από τη μια ο έλεγχος της δομικής αντοχής που προστέθηκε λόγω της επικάλυψης, αλλά και της δομικής αντοχής της στρώσης του foaming, και από την άλλη ένας περαιτέρω έλεγχος των δεδομένων της δοκιμής με συσκευές τύπου PFWD.

14.2 Έλεγχος των αποτελεσμάτων

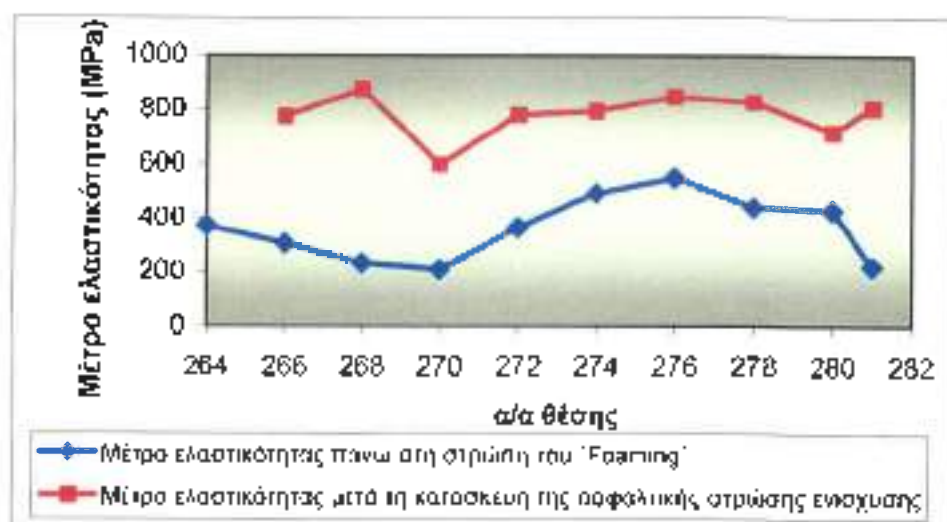
Στα σχήματα 14.4 και 14.5 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις και τα μέτρα ελαστικότητας, αντίστοιχα, που προέκυψαν από το PFWD πριν και μετά την τοποθέτηση της ασφαλτικής επικάλυψης. Στο σχήμα 14.3 αναπαριστάνεται η παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας που μετράει το PFWD.



Σχήμα 14.3: Σχηματική αναπαράσταση μετρήσεων πριν και μετά την ασφαλτική επικάλυψη



Σχήμα 14.4



Σχήμα 14.5

Είναι σαφές, από τα παραπάνω σχήματα, μια αισθητή μείωση της παραμόρφωσης και ως συνέπεια, αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, μετά την προσθήκη της ασφαλικής επικάλυψης, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Οπότε, ως προς αυτή την πτυχή της έρευνας το PFWD, δείχνει να δίνει την πραγματική εικόνα του οδοστρώματος.

Επίσης, μετά την προσθήκη της ασφαλικής στρώσης, οι παραμορφώσεις γίνονται πιο σταθερές κατά μήκος του υπό έλεγχο τμήματος, που και αυτό το γεγονός συμπίπτει με την εύλογη πρόβλεψη. Αντίθετα, η στρώση του ανακυκλωμένου ασφαλτικού φαίνεται να μην «πετυχαίνει» τόσο σταθερές τιμές και συμπεριφέρεται, μέχρι ένα βαθμό σαν ένα τυπικό ασύνδετο υλικό.

14.3 Σχόλια

Είναι φανερό ότι οι συσκευές τύπου PFWD θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τον έλεγχο τέτοιων ειδικών κατασκευών. Έτσι από τη μια πλευρά η εκάστοτε οδική αρχή θα μπορούσε να θέσει κάποια όρια (στις παραμορφώσεις – ελαστικές υποχωρήσεις), τα οποία θα πρέπει να πληρεί η κατασκευή και από την άλλη ο κατασκευαστής θα μπορούσε να ελέγξει την κατασκευή πιο εύκολα

με ένα φορητό παραμορφωσίμετρο. Το γεγονός αυτό δίνει το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα πάνω στο θέμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15^ο

Συμπεράσματα

Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενα κεφάλαια, τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί μια μεγάλη προσπάθεια στην ανάπτυξη μη καταστρεπτικών δοκιμών με σκοπό την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης οδοστρώματος. Ο συμβατικός τρόπος ελέγχου αυτή τη στιγμή είναι οι δοκιμές πέτοντος βάρους με συσκευές τύπου FWD. Ως εναλλακτική μορφή αυτών των συσκευών, πρόσφατα, έχουν προταθεί τα φορητά παραμορφωσίμετρα (PFWD), τα οποία αποτελούν την ελαφριά εκδοχή των συμβατικών τύπων. Τα φορητά παραμορφωσίμετρα, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο ασύνδετων υλικών (unbound materials), όπως το έδαφος ή οι κατώτερες στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.

Σιγά σιγά, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αρχίσει να προτείνονται μέθοδοι [14],[24], με σκοπό την επέκταση της χρήσης των συσκευών τύπου PFWD στον έλεγχο ασφαλικών στρώσεων (πάνω σε εύκαμπτα οδοστρώματα). Ο λόγος που γίνονται όλα αυτά είναι προφανώς, τα οφέλη που θα προέκυπταν. Τα φορητά παραμορφωσίμετρα είναι πολύ οικονομικότερα από τα συμβατικά και είναι και πιο εύκολο να αποκτηθούν από οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο. Επίσης, είναι ελαφρά, ευέλικτα και εύκολα στη χρήση. Οπότε, θα άξιζε τον κόπο αν μπορούσε να βρεθεί τρόπος ώστε να επεκταθεί η χρήση τους.

Η παρούσα εργασία, επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση των PFWD, ως συσκευές, αλλά και στον έλεγχο της αξιοπιστίας κάποιων μεθόδων που προτείνονται για την απόκτηση χρήσιμων, για την επισκόπηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, στοιχείων, μέσω μιας τέτοιας δοκιμής. Πρέπει να επισημανθεί ότι η συσκευή τύπου PFWD που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, ήταν το Φινλανδικό LOADMAN.

Η επί τόπου εμπειρία με το PFWD έφερε στην επιφάνεια, εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα και ορισμένα μειονεκτήματα, κυρίως τεχνικής φύσης, όπως η αστάθεια. Γενικά, πάντως, τα περισσότερα μπορούν να ξεπεραστούν με προσεκτική χρήση από το χειριστή και διάφορες παρεμβάσεις από τον κατασκευαστή.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των PFWD, είναι η χαμηλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων (Κεφάλαιο 7^ο). Η πρώτη ένδειξη για την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μετρήσεων, που γίνεται αντιληπτή αμέσως, είναι η επαναληψιμότητα της δοκιμής[28]. Σίγουρα, όταν πρόκειται για μια επί τόπου δοκιμή και μάλιστα σε ένα υλικό που έχει υποστεί διαταραχές, όπως μια υφιστάμενη ασφαλική στρώση, δεν υπάρχουν οι ίδιες απαιτήσεις που θα υπήρχαν για μια απόλυτα ελεγχόμενη εργαστηριακή δοκιμή σε ένα πρότυπο υλικό, όσον αφορά αυτό το μέγεθος. Παρόλα αυτά, μια απλή αναδρομή στα δεδομένα των μετρήσεων δείχνει μια επαναληψιμότητα αρκετά χαμηλή και σίγουρα όχι αρκετά ικανοποιητική σε ορισμένα σημεία. Υπήρχαν, βέβαια, και σημεία όπου η επαναληψιμότητα ήταν ικανοποιητική. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η ακρίβεια βελτιώνεται όσο είναι δυνατό, με την προτεινόμενη μέθοδο του 8^{ου} Κεφαλαίου.

Όσον αφορά την προτεινόμενη μέθοδο υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης από τις μετρήσεις της συσκευής PFWD, τα αποτελέσματα της σύγκρισης με τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους του ανάστροφου υπολογισμού, από τα δεδομένα του συμβατικού FWD, και της εργαστηριακής δοκιμής NAT-ITSM, ήταν αποθαρρυντικά. Οπότε δεν υπήρξε κάποια σοβαρή ένδειξη ότι αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον αξιόπιστο υπολογισμό αυτών των χαρακτηριστικών.

Παρόλα αυτά, κάποια ενθαρρυντικά στοιχεία φάνηκαν κατά τη σύγκριση των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν μέσω της δοκιμής με το PFWD και των αντίστοιχων που προέκυψαν από το HWD. Οπότε μια ένδειξη των χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος, θα μπορούσαμε να πάρουμε με χρήση των παραμορφώσεων που προκύπτουν από το PFWD. Η δοκιμή του 14^{ου} Κεφαλαίου σε ειδική κατασκευή (στρώση ανακυκλωμένου ασφαλτικού), πριν και μετά την ασφαλτική επικάλυψη έδειξε ότι τα φορητά παραμορφωσίμετρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα πρωτογενή έλεγχο κάποιων χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, η εκάστοτε οδική αρχή να θέσει κάποια όρια στις μετρούμενες από το PFWD παραμορφώσεις, τα οποία θα πρέπει να τηρηθούν κατά την κατασκευή.

Τελικά, παρόλες τις αβεβαιότητες που περιλαμβάνει, οι συσκευές τύπου PFWD θα μπορούσαν να συμβάλλουν στη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Οι παραμορφώσεις στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος, όπως και ο δομικός αριθμός (SNP) που προκύπτει άμεσα από αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μόνα τους στην εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων για το οδόστρωμα. Έτσι, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος των PFWD, οι συσκευές αυτές μπορούν να αποδειχθούν αρκετά χρήσιμες. Από την άλλη, το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζει η συσκευή (το λογισμικό της οποίας θεωρεί τη οόρτιση στατική) δεν φαίνεται να έχει κάποια χρησιμότητα.

Φυσικά, η παρούσα εργασία, απλώς αποτελεί ένα μικρό τμήμα των ερευνών και των συγκρίσεων που απαιτούνται για να κλείσει ένα τόσο σημαντικό θέμα. Έτσι, στο μέλλον χρήσιμο είναι η έρευνα να επικεντρωθεί στα θέματα εκείνα όπου τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Επίσης, μια διαφορετική προσέγγιση των δεδομένων, όσων αφορά τις προτεινόμενες μεθόδους υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας θα μπορούσε να βελτιώσει τα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Zube, E. and R. Forsythe, "Flexible Pavement Maintenance Requirements as Determined by Deflection Measurements", Highway Research Record No. 129, Highway Research Board, Washington, D.C., 1966
- [2] McCleod, N.W., "Airport Runway Evaluation In Canada", Report No. 4B, Highway Research Board, Washington, D.C., 1947
- [3] National Cooperative Highway Research Program Synthesis 278, "Measuring In Situ Mechanical Properties of Pavement Subgrade Soils", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1999
- [4] Smith, R.E. and R.L. Lytton, "Synthesis Study of Non-Destructive Testing Devices for Use in Overlay Thickness Design of Flexible Pavement", Report No. FHWA/RD-83/097, Federal Highway Administration, Washington, D.C., April 1984
- [5] Ullidtz, Pavement Analysis, "Developments In Civil Engineering", Vol. 19, 1987
- [6] Christophe Gros, "Use Of A Portable Falling Weight Deflectometer; LOADMAN", University Of Oulu, Publications Of Road And Transportation Laboratory, Finland, 1993
- [7] Α. Λοΐζος, Δ. Σαριδάκης, «Αξιολόγηση Μετρήσεων Φέρουσας Ικανότητας Ασφαλτοταπήςτων Οδοστρωμάτων», ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ Τόμος 14, Τεύχος 4, Οκτ. – Δεκ. 1994
- [8] Γ. Γκαζέτας, «Σημειώσεις Εδαφομηχανικής», Τομέας Γεωτεχνικής ΕΜΠ, Αθήνα, 1998
- [9] Masaki Kamiura, Etsuo Sekine, Nagato Abe, Teruhiko Maruyama, "Stiffness Evaluation of the Subgrade and Granular Aggregates Using the Portable FWD", Unbound Aggregates In Road Construction, Rotterdam, 2000
- [10] P.R. Fleming & M.W. Frost, C.D.F. Rogers, "A Comparison Of Devices for Measuring Stiffness In Situ", Unbound Aggregates In Road Construction, Rotterdam, 2000
- [11] N.H. Thom, P.R. Fleming, "Experimental and Theoretical Comparison of Dynamic Plate Testing Methods", Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Vol. I, Lisbon, Portugal, 24-26 June 2002
- [12] AL-Engineering Oy, "Instructions For Use; LOADMAN; Portable Falling Weight Deflectometer", Finland, 2000
- [13] Pentti Hunkanen, "LOADMAN: Comparison of Test Results Obtained Using Loadman with Those Obtained Using: -A Falling Weight Deflectometer, -A Plate Bearing Instrument", Finnish National Road Administration, District Surveys and Studies, Turku 1991

- [14] Moshe Livneh, Noam A. Livneh, Eliezer Elhadad, "Determining a Pavement Modulus from Portable FWD Testing", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 20, No. 4, December 1997
- [15] Hossain M., Scofield L.A., "Correlation Between Backcalculated and Laboratory Determined Asphalt Concrete Moduli", *Transportation Research Record* 1377, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1992
- [16] American Association of State Transportation & Highways Officials, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", AASHTO, Washington, D.C., 1993
- [17] Uzan, J., Livneh, M., Ishai, I., "Thickness Design of Flexible Pavements with Different Layer Structures", *Journal of Australian Road Research Board*, Vol. 10, No 1., 1980
- [18] Baus, R.L., Johnson, A.M., "AASHTO Direct Structural Capacity Method Error Analysis", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 118, No. 1, ASCE, New York, 1992
- [19] Fox, E., "The Mean Elastic Settlements of a Uniformly Loaded Area at a Depth Below the Ground Surface", *Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics*, 5th ed., Chapman & Hall, University and Professional Division, London, England, 1948
- [20] Poulos, H.G., "The Use of the Sector Method for Calculating Stresses and Displacements in an Elastic Mass", *Proceedings, 5th Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sydney, Australia, 1967
- [21] Burland, J.B., "Discussion", *Proceedings, Conference on In Situ Investigations in Soils and Rocks*, British Geotechnical Society, London, England, 1970
- [22] Christian, J.T., Carrier III, W.D., "Bjerrum and Kjaernsli's Chart Reinterpreted", *Canadian Geotechnical Journal*, No. 15, 1978
- [23] Craig, R.F., *Soil Mechanics*, 5th Ed., Chapman & Hall, University and Professional Division, London, England, 1992
- [24] Moshe Livneh, "Single Measurement Estimation of In Situ Asphalt - Layer Moduli with Portable Falling Weight Deflectometer", *Transportation Research Record* 1570, Haifa, Israel
- [25] H. Young, "Statistical Treatment of Experimental Data." McGraw - Hill, N.Y.
- [26] S.L. Meyer. "Data Analysis for Scientists and Engineers." J. Wiley and sons, N.Y.
- [27] P.R. Bevington. "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences". McGraw - Hill, N.Y.
- [28] Κόλλιας Σ., Λοΐζος Α., «Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων», Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997

- [29] Lytton, R. L., "Backcalculation of Pavement Layer Properties", Non Destructive Testing of Pavements and Backcalculation of Pavement Layer Moduli ASTM STP 1026, Philadelphia, 1989
- [30] Baltzer, S., Jansen, J. M., "Temperature Correction of Asphalt Moduli for FWD Measurements", The 4th International Conference on the Bearing capacity of Roads and Airfields. Vejteknisk Institut, Vejdirektoratet, 1994
- [31] Van Culp, W. Hoynck, A. Van de Streek, T. Thewessen, "Harmonisation of Falling Weight Deflection Evaluation Procedures", Proc. 7th Int. Conf on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 3, Nottingham, August, 1992
- [32] Roberts, JD & Roper, RL, The Application Of Adjusted Structural Number (SNP) in Pavement Asset Management. Internal Report, ARRB TR, Vermont South, Vic, Australia, 2000
- [33] Ερευνητικό Πρόγραμμα, «Πilotική Εφαρμογή Στρατηγικού Σχεδίου για τη Διαχείριση της Οδικής Υποδομής στην Ελλάδα», ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας ΜΣΥ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2002

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. Μετρήσεις με το PFWD

A. ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ

1. Ασφαλτικά

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 3	1	239	0.67
	2	276	0.55
	3	320	0.5
	4	235	0.67
	5	258	0.62
	6	267	0.6
	7	356	0.45
	8	271	0.59
	9	327	0.49
	10	571	0.25
	11	457	0.35
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		419	0.642
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		232	0.412
Μέση Τιμή X_p		284	0.547
Τυπική απόκλιση σ		41	0.086
Συντελεστής Απόκλισης ν		15%	12%

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 6	1	381	0.42
	2	400	0.4
	3	320	0.5
	4	390	0.41
	5	432	0.37
	6	471	0.34
	7	444	0.36
	8	381	0.42
	9	327	0.40
	10	372	0.43
	11	364	0.44
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		431	0.461
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		347	0.371
Μέση Τιμή X_p		381	0.420
Τυπική απόκλιση σ		13	0.014
Συντελεστής Απόκλισης ν		3%	3%

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 5	1	432	0.37
	2	286	0.56
	3	432	0.37
	4	400	0.4
	5	516	0.31
	6	471	0.34
	7	356	0.45
	8	457	0.35
	9	271	0.59
	10	291	0.55
	11	276	0.56
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		461	0.540
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		291	0.346
Μέση Τιμή X_p		385	0.388
Τυπική απόκλιση σ		62	0.039
Συντελεστής Απόκλισης ν		16%	10%

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 7	1	320	0.5
	2	308	0.52
	3	444	0.36
	4	421	0.38
	5	314	0.51
	6	314	0.51
	7	421	0.38
	8	250	0.64
	9	421	0.38
	10	421	0.38
	11	500	0.32
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		446	0.532
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		306	0.356
Μέση Τιμή X_p		370	0.436
Τυπική απόκλιση σ		61	0.07
Συντελεστής Απόκλισης ν		16%	18%

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 8	1	356	0.45
	2	410	0.39
	3	382	0.42
	4	381	0.42
	5	333	0.48
	6	302	0.53
	7	302	0.53
	8	302	0.53
	9	364	0.44
	10	364	0.44
	11	381	0.42
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		386	0.505
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		316	0.413
Μέση Τιμή X_p		356	0.439
Τυπική απόκλιση σ		19	0.022
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	5%

H1	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m Θέση 9	1	250	0.64
	2	225	0.71
	3	267	0.6
	4	271	0.59
	5	296	0.54
	6	262	0.61
	7	381	0.42
	8	320	0.5
	9	314	0.51
	10	356	0.45
	11	203	0.79
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		335	0.676
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		237	0.479
Μέση Τιμή X_p		283	0.570
Τυπική απόκλιση σ		27	0.054
Συντελεστής Απόκλισης ν		10%	9%

H1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m Θέση 12	1	278	0.58
	2	400	0.4
	3	320	0.5
	4	340	0.47
	5	320	0.5
	6	327	0.49
	7	327	0.49
	8	211	0.75
	9	400	0.4
	10	364	0.44
	11	327	0.49
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		377	0.592
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		280	0.412
Μέση Τιμή X_{μ}		327	0.495
Τυπική απόκλιση σ		7	0.040
Συντελεστής Απόκλισης ν		2%	8%

H1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m Θέση 15	1	348	0.46
	2	348	0.46
	3	432	0.37
	4	381	0.42
	5	444	0.36
	6	276	0.58
	7	421	0.38
	8	432	0.37
	9	384	0.44
	10	390	0.41
	11	348	0.46
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		426	0.486
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		335	0.371
Μέση Τιμή X_{μ}		368	0.433
Τυπική απόκλιση σ		29	0.031
Συντελεστής Απόκλισης ν		8%	7%

H1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m Θέση 17	1	410	0.39
	2	340	0.47
	3	308	0.52
	4	308	0.52
	5	267	0.6
	6	296	0.54
	7	314	0.51
	8	276	0.58
	9	278	0.58
	10	356	0.45
	11	254	0.63
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		351	0.590
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		268	0.462
Μέση Τιμή X_{μ}		303	0.521
Τυπική απόκλιση σ		23	0.046
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	9%

H2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 2	1	219	0.73
	2	282	0.81
	3	239	0.67
	4	410	0.39
	5	327	0.49
	6	302	0.53
	7	842	0.19
	8	390	0.41
	9	616	0.31
	10	800	0.2
	11	615	0.26
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		646	0.604
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		249	0.266
Μέση Τιμή X_u		403	0.388
Τυπική απόκλιση σ		125	0.120
Συντελεστής Απόκλισης ν		31%	31%

H2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 3	1	364	0.44
	2	340	0.47
	3	308	0.52
	4	254	0.63
	5	291	0.55
	6	372	0.43
	7	410	0.39
	8	291	0.55
	9	348	0.48
	10	229	0.7
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		374	0.605
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		287	0.423
Μέση Τιμή X_u		318	0.489
Τυπική απόκλιση σ		48	0.051
Συντελεστής Απόκλισης ν		15%	10%

H2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 4	1	271	0.59
	2	258	0.62
	3	465	0.33
	4	390	0.41
	5	281	0.57
	6	285	0.56
	7	356	0.45
	8	215	0.74
	9	293	0.54
	10	314	0.51
	11	432	0.37
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		399	0.526
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		252	0.409
Μέση Τιμή X_u		307	0.531
Τυπική απόκλιση σ		45	0.071
Συντελεστής Απόκλισης ν		15%	13%

H2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 5	1	327	0.49
	2	302	0.53
	3	589	0.18
	4	320	0.5
	5	455	0.33
	6	432	0.37
	7	308	0.52
	8	372	0.43
	9	941	0.17
	10	593	0.27
	11	552	0.29
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		708	0.491
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		295	0.251
Μέση Τιμή X_u		367	0.363
Τυπική απόκλιση σ		93	0.085
Συντελεστής Απόκλισης ν		24%	23%

H2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 6	1	291	0.55
	2	348	0.46
	3	444	0.36
	4	358	0.46
	5	291	0.55
	6	235	0.68
	7	320	0.5
	8	281	0.57
	9	314	0.51
	10	516	0.31
	11	308	0.52
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		409	0.588
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		265	0.405
Μέση Τιμή X_u		314	0.491
Τυπική απόκλιση σ		27	0.079
Συντελεστής Απόκλισης ν		9%	16%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	390	0.41
	2	571	0.28
	3	471	0.34
	4	815	0.26
	5	421	0.38
	6	432	0.37
	7	842	0.19
	8	410	0.39
	9	410	0.39
	10	571	0.28
	11	533	0.3
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		636	0.389
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		394	0.264
Μέση Τιμή X_u		483	0.325
Τυπική απόκλιση σ		80	0.045
Συντελεστής Απόκλισης ν		17%	14%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	518	0.31
	2	410	0.39
	3	364	0.44
	4	432	0.37
	5	246	0.65
	6	348	0.46
	7	432	0.37
	8	381	0.42
	9	410	0.39
	10	372	0.43
	11	471	0.34
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		462	0.496
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		335	0.335
Μέση Τιμή X_u		394	0.338
Τυπική απόκλιση σ		32	0.040
Συντελεστής Απόκλισης ν		8%	10%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	421	0.38
	2	421	0.38
	3	432	0.37
	4	242	0.66
	5	571	0.28
	6	516	0.31
	7	308	0.52
	8	485	0.33
	9	348	0.46
	10	400	0.4
	11	262	0.61
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		494	0.538
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		307	0.316
Μέση Τιμή X_u		402	0.406
Τυπική απόκλιση σ		58	0.064
Συντελεστής Απόκλισης ν		14%	16%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	457	0.35
	2	400	0.4
	3	372	0.43
	4	457	0.35
	5	421	0.38
	6	421	0.38
	7	421	0.38
	8	552	0.29
	9	485	0.33
	10	485	0.33
	11	400	0.4
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		489	0.401
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		397	0.329
Μέση Τιμή X_u		433	0.367
Τυπική απόκλιση σ		30	0.027
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	7%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	333	0.48
	2	356	0.45
	3	372	0.43
	4	296	0.54
	5	327	0.49
	6	242	0.66
	7	340	0.47
	8	372	0.43
	9	364	0.44
	10	364	0.44
	11	421	0.38
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		386	0.541
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		302	0.407
Μέση Τιμή X_u		352	0.463
Τυπική απόκλιση σ		19	0.036
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	8%

H3	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m	1	246	0.65
	2	320	0.5
	3	276	0.58
	4	296	0.54
	5	340	0.47
	6	302	0.53
	7	314	0.51
	8	302	0.53
	9	372	0.43
	10	421	0.38
	11	320	0.5
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		361	0.578
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		277	0.446
Μέση Τιμή X_u		313	0.495
Τυπική απόκλιση σ		15	0.052
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	10%

H3	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Θήμα 10m	1	235	0.68
	2	340	0.47
	3	421	0.38
	4	356	0.45
	5	364	0.44
	6	372	0.43
	7	421	0.38
	8	421	0.38
	9	364	0.44
	10	457	0.35
	11	356	0.45
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		427	0.521
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		320	0.361
Μέση Τιμή X_p		379	0.417
Τυπική απόκλιση σ		32	0.041
Συντελεστής Απόκλισης v		9%	10%

H3	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Θήμα 10m	1	432	0.37
	2	381	0.42
	3	208	0.77
	4	400	0.4
	5	271	0.69
	6	286	0.66
	7	320	0.5
	8	421	0.38
	9	308	0.52
	10	246	0.66
	11	320	0.5
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		393	0.626
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		260	0.403
Μέση Τιμή X_p		305	0.515
Τυπική απόκλιση σ		43	0.059
Συντελεστής Απόκλισης v		14%	11%

H3	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Θήμα 10m	1	333	0.48
	2	180	0.69
	3	254	0.63
	4	340	0.47
	5	276	0.68
	6	340	0.47
	7	291	0.55
	8	183	0.83
	9	340	0.47
	10	356	0.45
	11	286	0.56
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		345	0.716
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		235	0.444
Μέση Τιμή X_p		308	0.518
Τυπική απόκλιση σ		35	0.063
Συντελεστής Απόκλισης v		11%	12%

H3	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Θήμα 10m	1	356	0.45
	2	410	0.39
	3	421	0.38
	4	381	0.42
	5	372	0.43
	6	636	0.23
	7	381	0.42
	8	615	0.26
	9	500	0.32
	10	364	0.44
	11	333	0.48
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		546	0.456
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		333	0.377
Μέση Τιμή X_p		388	0.401
Τυπική απόκλιση σ		47	0.043
Συντελεστής Απόκλισης v		12%	11%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 2	1	532	0,3
	2	1067	0,15
	3	4000	0,04
	4	667	0,24
	5		
	6	1143	0,14
	7	737	0,22
	8	1231	0,13
	9	2667	0,06
	10	1143	0,14
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		2601	0,241
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		327	0,074
Μέση Τιμή X_p		930	0,170
Τυπική απόκλιση σ		280	0,047
Συντελεστής Απόκλισης ν		30%	28%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 3	1	485	0,33
	2	1143	0,14
	3	667	0,24
	4	696	0,23
	5	1143	0,14
	6	640	0,25
	7	1231	0,13
	8	5333	0,03
	9	2286	0,07
	10	4000	0,04
	11	3200	0,05
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		3367	0,241
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		429	0,059
Μέση Τιμή X_p		1277	0,158
Τυπική απόκλιση σ		901	0,065
Συντελεστής Απόκλισης ν		71%	41%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 4	1	589	0,18
	2	1000	0,16
	3	533	0,3
	4	1067	0,15
	5	589	0,18
	6	941	0,17
	7	2000	0,08
	8	1333	0,12
	9	941	0,17
	10	5333	0,03
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		2824	0,221
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		152	0,087
Μέση Τιμή X_p		1066	0,161
Τυπική απόκλιση σ		407	0,021
Συντελεστής Απόκλισης ν		38%	13%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 8	1	1000	0,16
	2	800	0,2
	3	1000	0,16
	4	2286	0,07
	5	667	0,24
	6	762	0,21
	7	800	0,2
	8	667	0,24
	9	2667	0,06
	10	1231	0,13
	11	941	0,17
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1775	0,222
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		556	0,112
Μέση Τιμή X_p		830	0,176
Τυπική απόκλιση σ		136	0,029
Συντελεστής Απόκλισης ν		16%	16%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 5	1	390	0,41
	2	615	0,26
	3	500	0,32
	4	372	0,43
	5	5333	0,03
	6		
	7	5333	0,03
	8	842	0,19
	9		
	10	762	0,21
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		4103	0,397
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		572	0,073
Μέση Τιμή X_p		544	0,345
Τυπική απόκλιση σ		193	0,058
Συντελεστής Απόκλισης ν		36%	24%

H4	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 10	1	333	0,48
	2	571	0,28
	3	800	0,2
	4	198	0,81
	5	471	0,34
	6	640	0,25
	7	1067	0,15
	8	485	0,33
	9	589	0,18
	10	381	0,42
	11	444	0,36
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		505	0,512
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		337	0,179
Μέση Τιμή X_p		542	0,303
Τυπική απόκλιση σ		142	0,097
Συντελεστής Απόκλισης ν		26%	32%

H4	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Θήμα 10m 11	1	390	0,41
	2	364	0,44
	3	390	0,41
	4	533	0,3
	5	410	0,39
	6	533	0,3
	7	485	0,33
	8	615	0,28
	9	356	0,45
	10	800	0,2
	11	698	0,23
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		639	0,417
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		374	0,259
Μέση Τιμή X_n		479	0,325
Τυπική απόκλιση σ		87	0,075
Συντελεστής Απόκλισης ν		18%	23%

B. ΘΕΣΣΑΛΙΑ

T	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 2	-	593	0,27
	2	615	0,26
	3	667	0,24
	4	552	0,29
	5	571	0,28
	6	615	0,26
	7	727	0,22
	8	667	0,24
	9	552	0,29
	10	593	0,27
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		669	0,284
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		552	0,240
Μέση Τιμή X_m		617	0,266
Τυπική απόκλιση σ		37	0,006
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		14	0,004

T	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 4	1	727	0,22
	2	1778	0,09
	3	996	0,23
	4	1231	0,13
	5	516	0,31
	6	4000	0,04
	7	1778	0,09
	8	800	0,2
	9	533	0,3
	10	2286	0,07
	11	842	0,29
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		2330	0,260
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		432	0,089
Μέση Τιμή X_m		989	0,160
Τυπική απόκλιση σ		493	0,064
Συντελεστής Απόκλισης ν		50%	40%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		164	0,026

T	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 3	1	696	0,25
	2	593	0,27
	3	696	0,23
	4	696	0,23
	5	667	0,24
	6	571	0,28
	7	465	0,33
	8	615	0,20
	9	640	0,25
	10	693	0,27
	11	696	0,23
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		693	0,264
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		570	0,219
Μέση Τιμή X_m		613	0,249
Τυπική απόκλιση σ		35	0,020
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	8%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		14	0,006

T	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 5	1	842	0,16
	2	2657	0,06
	3	941	0,17
	4	800	0,2
	5	941	0,17
	6	667	0,24
	7	800	0,2
	8	941	0,17
	9	569	0,18
	10	2067	0,06
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1781	0,216
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		530	0,106
Μέση Τιμή X_m		853	0,179
Τυπική απόκλιση σ		96	0,016
Συντελεστής Απόκλισης ν		11%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		34	0,006

T	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	698	0.23
	2	727	0.22
	3	727	0.22
	4	667	0.24
	5	696	0.20
	6	593	0.27
	7	693	0.23
	8	593	0.27
	9	593	0.27
	10	889	0.18
	11	615	0.26
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		760	0.263
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		602	0.213
Μέση Τιμή X_m		629	0.233
Τυπική απόκλιση σ		39	0.014
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	6%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		15	0.005

T	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	762	0.21
	2	1087	0.15
	3	1231	0.13
	4	1231	0.13
	5	1143	0.14
	6	1455	0.11
	7	1333	0.12
	8	1000	0.16
	9	1455	0.11
	10	1231	0.13
	11	1231	0.13
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1376	0.164
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		1013	0.113
Μέση Τιμή X_m		1206	0.136
Τυπική απόκλιση σ		91	0.013
Συντελεστής Απόκλισης ν		8%	10%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		37	0.005

T	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	829	0.18
	2	727	0.22
	3	667	0.24
	4	1143	0.14
	5	1000	0.16
	6	900	0.2
	7	941	0.17
	8	552	0.29
	9	842	0.15
	10	842	0.15
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1001	0.239
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		680	0.157
Μέση Τιμή X_m		863	0.187
Τυπική απόκλιση σ		90	0.020
Συντελεστής Απόκλισης ν		10%	11%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		34	0.007

T	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	1778	0.09
	2	1455	0.11
	3	1143	0.14
	4	4000	0.04
	5	2000	0.08
	6	2000	0.08
	7	1778	0.09
	8	3200	0.05
	9	1231	0.13
	10	2687	0.06
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		2988	0.118
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		1262	0.056
Μέση Τιμή X_m		1802	0.085
Τυπική απόκλιση σ		224	0.016
Συντελεστής Απόκλισης ν		12%	19%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		100	0.007

T	ΑνΑ Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 10	1	3200	0,05
	2	3200	0,05
	3	1455	0,11
	4	2667	0,06
	5	1143	0,14
	6	2286	0,07
	7	8000	0,02
	8	15535	0
	9	889	0,15
	10	1500	0,1
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X _{max}		6300	0,130
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X _{min}		305	0,026
Μέση Τιμή X _υ		2855	0,065
Τυπική απόκλιση σ		2262	0,025
Συντελεστής Απόκλισης ν		78%	37%
Τυπική Απόκλιση της X _υ , σ _υ		800	0,011

T	A/A Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
11	Βήμα 10m		
	1	400	0.4
	2	444	0.36
	3	390	0.41
	4	421	0.38
	5	432	0.37
	6	372	0.43
	7	390	0.41
	8	400	0.4
	9	361	0.42
	10	364	0.44
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		424	0.426
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		375	0.378
Μέση Τιμή X_u		392	0.403
Τυπική απόκλιση σ		18	0.014
Συντελεστής Απόκλισης v		5%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		7	0.008

T	A/A Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
12	Βήμα 10m		
	1	250	0.54
	2	308	0.52
	3	268	0.61
	4	314	0.51
	5	302	0.53
	6	327	0.49
	7	291	0.55
	8	333	0.48
	9	340	0.47
	10	364	0.44
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		342	0.583
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		277	0.466
Μέση Τιμή X_u		316	0.507
Τυπική απόκλιση σ		18	0.029
Συντελεστής Απόκλισης v		6%	6%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		7	0.011

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
1	Βήμα 10m		
	1	271	0.59
	2	275	0.71
	3	295	0.54
	4	291	0.55
	5	288	0.56
	6	281	0.57
	7	348	0.46
	8	254	0.63
	9	254	0.63
	10	302	0.53
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		312	0.542
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		249	0.512
Μέση Τιμή X_u		276	0.575
Τυπική απόκλιση σ		17	0.039
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		6	0.014

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
4	Βήμα 10m		
	1	205	0.76
	2	254	0.63
	3	262	0.51
	4	229	0.7
	5	295	0.54
	6	286	0.56
	7	296	0.56
	8		
	9		
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		298	0.725
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		222	0.527
Μέση Τιμή X_u		269	0.600
Τυπική απόκλιση σ		25	0.060
Συντελεστής Απόκλισης ν		9%	10%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		18	0.024

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
2	Βήμα 10m		
	1	250	0.54
	2	258	0.52
	3	296	0.54
	4	314	0.51
	5	276	0.56
	6	340	0.47
	7	227	0.49
	8	327	0.49
	9	286	0.56
	10	340	0.47
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		333	0.545
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		270	0.479
Μέση Τιμή X_u		304	0.528
Τυπική απόκλιση σ		22	0.038
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		10	0.015

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
5	Βήμα 10m		
	1	271	0.59
	2	271	0.59
	3	235	0.68
	4	276	0.58
	5	314	0.51
	6	302	0.53
	7	308	0.52
	8	340	0.47
	9	219	0.73
	10	267	0.6
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		315	0.555
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		245	0.505
Μέση Τιμή X_u		267	0.560
Τυπική απόκλιση σ		20	0.038
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		8	0.014

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
7	Βήμα 10m		
	1	255	0.56
	2	232	0.72
	3	249	0.65
	4	281	0.57
	5	298	0.54
	6	271	0.59
	7	267	0.6
	8	333	0.48
	9	302	0.53
	10	308	0.52
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		309	0.660
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		243	0.515
Μέση Τιμή X_{μ}		277	0.571
Τυπική απόκλιση σ		20	0.048
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	8%
Τυπική Απόκλιση της X_{μ} , σ_{μ}		9	0.017

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
8	Βήμα 10m		
	1	213	0.75
	2	267	0.6
	3	302	0.53
	4	226	0.56
	5	314	0.51
	6	327	0.48
	7	340	0.47
	8	320	0.5
	9	314	0.51
	10	333	0.48
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		338	0.619
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		253	0.461
Μέση Τιμή X_{μ}		311	0.517
Τυπική απόκλιση σ		22	0.041
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_{μ} , σ_{μ}		8	0.014

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
9	Βήμα 10m		
	1	213	0.75
	2	222	0.72
	3	271	0.59
	4	356	0.45
	5	276	0.58
	6	340	0.47
	7	250	0.64
	8	271	0.59
	9	286	0.56
	10	296	0.54
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		321	0.680
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		235	0.456
Μέση Τιμή X_{μ}		271	0.583
Τυπική απόκλιση σ		13	0.034
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	6%
Τυπική Απόκλιση της X_{μ} , σ_{μ}		7	0.014

TP	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
10	Βήμα 10m		
	1	222	0.72
	2	242	0.66
	3	267	0.6
	4	262	0.61
	5	239	0.67
	6	281	0.57
	7	216	0.74
	8	254	0.53
	9	302	0.53
	10	195	0.82
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		278	0.737
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		218	0.573
Μέση Τιμή X_{μ}		240	0.648
Τυπική απόκλιση σ		25	0.044
Συντελεστής Απόκλισης ν		10%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_{μ} , σ_{μ}		9	0.018

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 1	1	410	0,39
	2	302	0,53
	3	444	0,36
	4	444	0,36
	5	444	0,36
	6	533	0,3
	7	457	0,35
	8	471	0,34
	9	533	0,3
	10	471	0,34
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		513	0,424
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		389	0,302
Μέση Τιμή X_m		445	0,357
Τυπική απόκλιση σ		20	0,017
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σμ		8	0,006

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 3	1	552	0,29
	2	552	0,29
	3	457	0,35
	4	615	0,26
	5	533	0,2
	6	696	0,23
	7	615	0,26
	8	615	0,26
	9	571	0,25
	10	552	0,29
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		636	0,309
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		515	0,233
Μέση Τιμή X_m		576	0,266
Τυπική απόκλιση σ		34	0,025
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σμ		13	0,011

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 2	1	455	0,33
	2	529	0,27
	3	552	0,29
	4	432	0,37
	5	640	0,25
	6	485	0,33
	7	500	0,32
	8	552	0,29
	9	593	0,27
	10	640	0,25
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		614	0,334
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		460	0,280
Μέση Τιμή X_m		537	0,300
Τυπική απόκλιση σ		47	0,026
Συντελεστής Απόκλισης ν		9%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σμ		19	0,010

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 4	1	356	0,45
	2	372	0,43
	3	327	0,49
	4	390	0,41
	5	571	0,28
	6	500	0,32
	7	518	0,31
	8	552	0,29
	9	571	0,28
	10	516	0,31
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		557	0,432
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		373	0,282
Μέση Τιμή X_m		490	0,345
Τυπική απόκλιση σ		70	0,059
Συντελεστής Απόκλισης ν		14%	17%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σμ		35	0,024

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
5	Θήμα 10m		
	1	615	0,26
	2	495	0,33
	3	523	0,3
	4	457	0,35
	5	640	0,25
	6	400	0,4
	7	593	0,27
	8	667	0,24
	9	421	0,38
	10	486	0,33
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		619	0,364
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		440	0,258
Μέση Τιμή X_m		528	0,307
Τυπική απόκλιση σ		84	0,035
Συντελεστής Απόκλισης ν		12%	12%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		29	0,015

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
4α	Θήμα 10m		
	1	356	0,45
	2	372	0,43
	3	327	0,49
	4	390	0,41
	5		
	6		
	7		
	8		
	9		
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		401	0,496
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		321	0,394
Μέση Τιμή X_m		361	0,445
Τυπική απόκλιση σ		27	0,034
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	8%

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
6	Θήμα 10m		
	1	533	0,3
	2	485	0,33
	3	444	0,36
	4	533	0,3
	5	471	0,34
	6	615	0,26
	7	533	0,3
	8	533	0,3
	9	500	0,32
	10	571	0,28
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		589	0,337
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		475	0,281
Μέση Τιμή X_m		520	0,308
Τυπική απόκλιση σ		21	0,013
Συντελεστής Απόκλισης ν		4%	4%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		9	0,005

Φ	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
4β	Θήμα 10m		
	1		
	2		
	3		
	4		
	5	571	0,25
	6	500	0,32
	7	516	0,31
	8	562	0,29
	9	571	0,28
	10	516	0,31
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		575	0,319
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		500	0,277
Μέση Τιμή X_m		538	0,290
Τυπική απόκλιση σ		31	0,014
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	5%

Γ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 1	1	1455	0.11
	2	941	0.17
	3	989	0.10
	4	1231	0.13
	5	1231	0.13
	6	1778	0.09
	7	1231	0.13
	8	1067	0.15
	9	1333	0.12
	10	842	0.19
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1470	0.170
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		930	0.110
Μέση Τιμή X_p		1166	0.134
Τυπική απόκλιση σ		203	0.020
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	15%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		72	0.008

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 2	1	859	0.18
	2	1067	0.15
	3	842	0.19
	4	727	0.22
	5	889	0.18
	6	842	0.19
	7	941	0.17
	8		
	9		
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1003	0.207
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		757	0.159
Μέση Τιμή X_p		881	0.182
Τυπική απόκλιση σ		41	0.008
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		41	0.004

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 3	1	571	0.28
	2	533	0.3
	3	457	0.35
	4	457	0.35
	5	457	0.35
	6	593	0.27
	7	615	0.28
	8	552	0.28
	9	518	0.31
	10	471	0.34
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		579	0.343
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		465	0.277
Μέση Τιμή X_p		529	0.304
Τυπική απόκλιση σ		38	0.023
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	8%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		19	0.010

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 4	1	516	0.31
	2	457	0.35
	3	518	0.31
	4	571	0.28
	5	727	0.22
	6	782	0.21
	7	485	0.33
	8	687	0.23
	9	552	0.29
	10	640	0.25
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		888	0.324
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		490	0.232
Μέση Τιμή X_p		584	0.288
Τυπική απόκλιση σ		62	0.025
Συντελεστής Απόκλισης ν		11%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		28	0.011

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 5	1	410	0.36
	2	583	0.27
	3	615	0.26
	4	640	0.25
	5	640	0.25
	6	667	0.24
	7	896	0.23
	8	583	0.27
	9	667	0.24
	10	640	0.25
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		691	0.297
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		541	0.227
Μέση Τιμή X_p		651	0.251
Τυπική απόκλιση σ		31	0.014
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		13	0.005

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 6	1	782	0.21
	2	941	0.17
	3	800	0.2
	4	727	0.22
	5	615	0.26
	6	941	0.17
	7	1778	0.09
	8	842	0.19
	9	842	0.19
	10	800	0.2
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1240	0.237
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		590	0.149
Μέση Τιμή X_p		838	0.194
Τυπική απόκλιση σ		132	0.018
Συντελεστής Απόκλισης ν		13%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		34	0.008

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	416	0,36
	2	593	0,27
	3	613	0,20
	4	640	0,25
	5	640	0,25
	6	567	0,24
	7	696	0,23
	8	593	0,27
	9	667	0,24
	10	640	0,25
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		691	0,287
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		541	0,227
Μέση Τιμή X_p		631	0,251
Τυπική απόκλιση σ		31	0,014
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		13	0,006

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	762	0,21
	2	941	0,17
	3	803	0,2
	4	727	0,22
	5	615	0,26
	6	941	0,17
	7	1772	0,09
	8	842	0,19
	9	842	0,19
	10	800	0,2
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		1210	0,231
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		600	0,149
Μέση Τιμή X_p		808	0,184
Τυπική απόκλιση σ		102	0,018
Συντελεστής Απόκλισης ν		13%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		34	0,006

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	444	0,36
	2	552	0,29
	3	640	0,25
	4	640	0,25
	5	485	0,33
	6	444	0,36
	7	640	0,23
	8	571	0,28
	9	485	0,33
	10	667	0,24
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		640	0,329
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		474	0,248
Μέση Τιμή X_p		523	0,278
Τυπική απόκλιση σ		45	0,037
Συντελεστής Απόκλισης ν		9%	13%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		26	0,013

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	552	0,29
	2	640	0,25
	3	727	0,22
	4	593	0,27
	5	552	0,29
	6	696	0,23
	7	869	0,18
	8	842	0,19
	9	869	0,18
	10	869	0,18
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		961	0,271
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		593	0,185
Μέση Τιμή X_p		700	0,223
Τυπική απόκλιση σ		95	0,034
Συντελεστής Απόκλισης ν		14%	15%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		42	0,014

TM1	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
Βήμα 10m	1	541	0,17
	2	593	0,27
	3	615	0,28
	4	640	0,25
	5	842	0,19
	6	593	0,27
	7	696	0,23
	8	571	0,28
	9	842	0,19
	10	800	0,18
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		856	0,268
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		568	0,169
Μέση Τιμή X_p		689	0,217
Τυπική απόκλιση σ		113	0,034
Συντελεστής Απόκλισης ν		16%	16%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		42	0,014

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
1	Βήμα 10m		
	1	267	0.6
	2	314	0.51
	3	314	0.51
	4	314	0.51
	5	314	0.51
	6	314	0.51
	7	308	0.52
	8	308	0.52
	9	320	0.5
	10	302	0.53
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		322	0.546
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		295	0.495
Μέση Τιμή X_p		312	0.513
Τυπική απόκλιση σ		5	0.008
Συντελεστής Απόκλισης V		2%	2%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		2	0.003

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
2	Βήμα 10m		
	1	213	0.75
	2	242	0.66
	3	258	0.62
	4	262	0.61
	5	258	0.62
	6	245	0.65
	7	248	0.62
	8	211	0.59
	9	250	0.64
	10	254	0.63
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		268	0.681
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		236	0.597
Μέση Τιμή X_p		254	0.631
Τυπική απόκλιση σ		7	0.017
Συντελεστής Απόκλισης V		3%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		2	0.008

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
3	Βήμα 10m		
	1	213	0.75
	2	248	0.65
	3	242	0.66
	4	248	0.65
	5	254	0.63
	6	248	0.65
	7	250	0.64
	8	242	0.66
	9	242	0.66
	10	225	0.71
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		252	0.706
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		229	0.632
Μέση Τιμή X_p		242	0.656
Τυπική απόκλιση σ		9	0.008
Συντελεστής Απόκλισης V		3%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		3	0.003

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
4	Βήμα 10m		
	1	168	0.95
	2	195	0.82
	3	184	0.87
	4	198	0.81
	5	208	0.77
	6	213	0.75
	7	222	0.72
	8	225	0.71
	9	219	0.73
	10	218	0.74
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		222	0.860
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		187	0.714
Μέση Τιμή X_p		209	0.783
Τυπική απόκλιση σ		11	0.029
Συντελεστής Απόκλισης V		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		4	0.015

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
5	Βήμα 10m		
	1	180	0.89
	2	203	0.79
	3	211	0.76
	4	222	0.72
	5	211	0.76
	6	229	0.7
	7	219	0.73
	8	229	0.7
	9		
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		230	0.823
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		196	0.590
Μέση Τιμή X_p		218	0.737
Τυπική απόκλιση σ		10	0.034
Συντελεστής Απόκλισης V		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		5	0.013

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
6	Βήμα 10m		
	1	111	1.44
	2	138	1.16
	3	142	1.13
	4	143	1.12
	5	158	1.01
	6	158	1.01
	7	155	1.03
	8	155	1.03
	9	154	1.04
	10	160	1
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		162	1.223
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		133	0.971
Μέση Τιμή X_p		151	1.059
Τυπική απόκλιση σ		8	0.061
Συντελεστής Απόκλισης V		5%	6%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		3	0.020

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 7	1	182	0.58
	2	190	0.54
	3	193	0.53
	4	216	0.74
	5	211	0.76
	6	208	0.77
	7	219	0.73
	8	213	0.75
	9	213	0.75
	10	218	0.73
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		219	0.828
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		194	0.728
Μέση Τιμή X_u		212	0.747
Τυπική απόκλιση σ		3	0.015
Συντελεστής Απόκλισης v		1%	2%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		1	0.005

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 8	1	239	0.57
	2	232	0.63
	3	242	0.66
	4	254	0.63
	5	254	0.63
	6	242	0.68
	7	242	0.66
	8	276	0.58
	9	250	0.64
	10	254	0.63
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		260	0.674
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		237	0.516
Μέση Τιμή X_u		246	0.648
Τυπική απόκλιση σ		6	0.017
Συντελεστής Απόκλισης v		3%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		2	0.006

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 9	1	229	0.7
	2	327	0.49
	3	340	0.47
	4	381	0.42
	5	364	0.44
	6	340	0.47
	7	390	0.41
	8	356	0.45
	9	333	0.48
	10	364	0.44
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		385	0.555
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		300	0.399
Μέση Τιμή X_u		349	0.452
Τυπική απόκλιση σ		19	0.027
Συντελεστής Απόκλισης v		5%	6%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		7	0.009

TM2	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 10	1	254	0.63
	2	291	0.55
	3	276	0.68
	4	291	0.55
	5	281	0.57
	6	276	0.58
	7	291	0.55
	8	288	0.56
	9	314	0.51
	10	302	0.53
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		302	0.592
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		271	0.530
Μέση Τιμή X_u		285	0.559
Τυπική απόκλιση σ		7	0.017
Συντελεστής Απόκλισης v		2%	2%
Τυπική Απόκλιση της X_u , σ_u		3	0.006

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
1	Βήμα 10m		
	1	592	0,3
	2	457	0,35
	3	505	0,32
	4	533	0,3
	5	552	0,29
	6	593	0,27
	7	471	0,34
	8	552	0,29
	9	533	0,3
	10	593	0,27
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		581	0,320
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		502	0,275
Μέση Τιμή X_p		546	0,288
Τυπική απόκλιση σ		18	0,011
Συντελεστής Απόκλισης v		3%	4%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		6	0,004

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
2	Βήμα 10m		
	1	190	0,84
	2	211	0,76
	3	200	0,9
	4	242	0,66
	5	205	0,71
	6	188	0,85
	7	180	0,99
	8	154	1,04
	9	190	0,84
	10	180	0,89
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		220	0,528
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		172	0,728
Μέση Τιμή X_p		181	0,838
Τυπική απόκλιση σ		11	0,047
Συντελεστής Απόκλισης v		6%	8%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		4	0,016

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
3	Βήμα 10m		
	1	184	0,85
	2	150	1,07
	3	158	1,01
	4	174	0,92
	5	180	0,89
	6	186	0,86
	7	198	0,81
	8	155	1,03
	9	180	0,84
	10	225	0,71
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		202	0,804
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		158	0,794
Μέση Τιμή X_p		166	0,862
Τυπική απόκλιση σ		8	0,039
Συντελεστής Απόκλισης v		4%	4%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		4	0,016

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
4	Βήμα 10m		
	1	687	0,24
	2	615	0,28
	3	727	0,22
	4	687	0,24
	5	686	0,23
	6	762	0,21
	7	687	0,24
	8	727	0,22
	9	696	0,23
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		735	0,247
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		648	0,217
Μέση Τιμή X_p		692	0,231
Τυπική απόκλιση σ		27	0,009
Συντελεστής Απόκλισης v		4%	4%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		11	0,003

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
5	Βήμα 10m		
	1	271	0,58
	2	291	0,55
	3	308	0,52
	4	271	0,58
	5	282	0,61
	6	306	0,52
	7	308	0,52
	8	200	0,60
	9	281	0,57
	10	302	0,53
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		305	0,588
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		272	0,524
Μέση Τιμή X_p		284	0,553
Τυπική απόκλιση σ		6	0,017
Συντελεστής Απόκλισης v		2%	3%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		4	0,006

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
6	Βήμα 10m		
	1	583	0,27
	2	540	0,26
	3	533	0,3
	4	615	0,25
	5	667	0,24
	6	667	0,24
	7	533	0,3
	8	727	0,22
	9	667	0,24
	10	552	0,29
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		692	0,288
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		557	0,234
Μέση Τιμή X_p		642	0,250
Τυπική απόκλιση σ		32	0,013
Συντελεστής Απόκλισης v		5%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_p , σ_p		13	0,005

Οδός 206α ΤΜ3

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
7	Βήμα 10m		
	1	320	0,5
	2	309	0,52
	3	286	0,56
	4	278	0,58
	5	356	0,45
	6	333	0,48
	7	372	0,43
	8	298	0,54
	9	381	0,42
	10	296	0,54
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		357	0,555
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		287	0,449
Μέση Τιμή X_p		318	0,498
Τυπική απόκλιση σ		23	0,035
Συντελεστής Απόκλισης v		7%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		10	0,016

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
8	Βήμα 10m		
	1	288	0,56
	2	348	0,46
	3	372	0,43
	4	471	0,34
	5	356	0,45
	6	333	0,49
	7	348	0,46
	8		
	9		
	10		
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		423	0,528
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		296	0,380
Μέση Τιμή X_p		351	0,456
Τυπική απόκλιση σ		14	0,018
Συντελεστής Απόκλισης v		4%	4%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		10	0,008

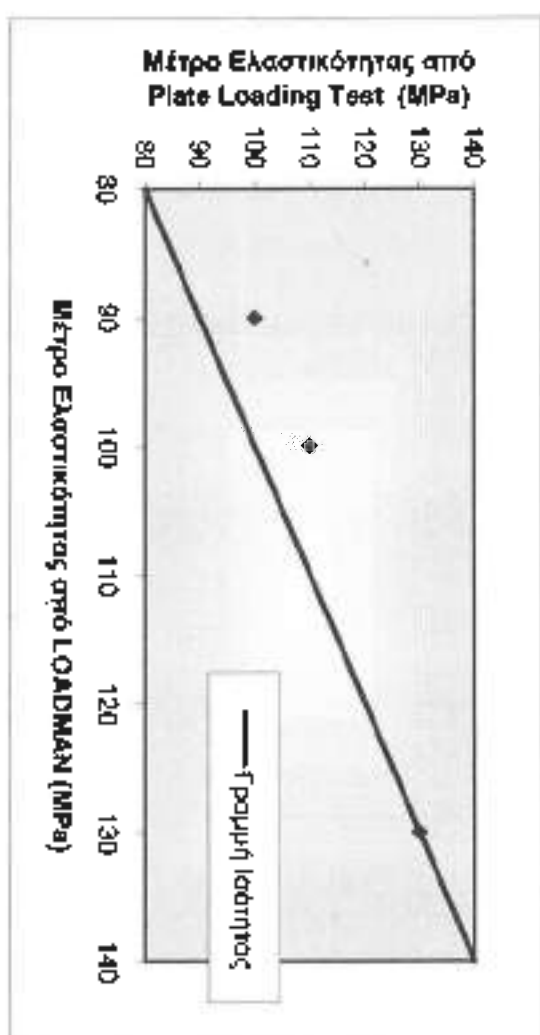
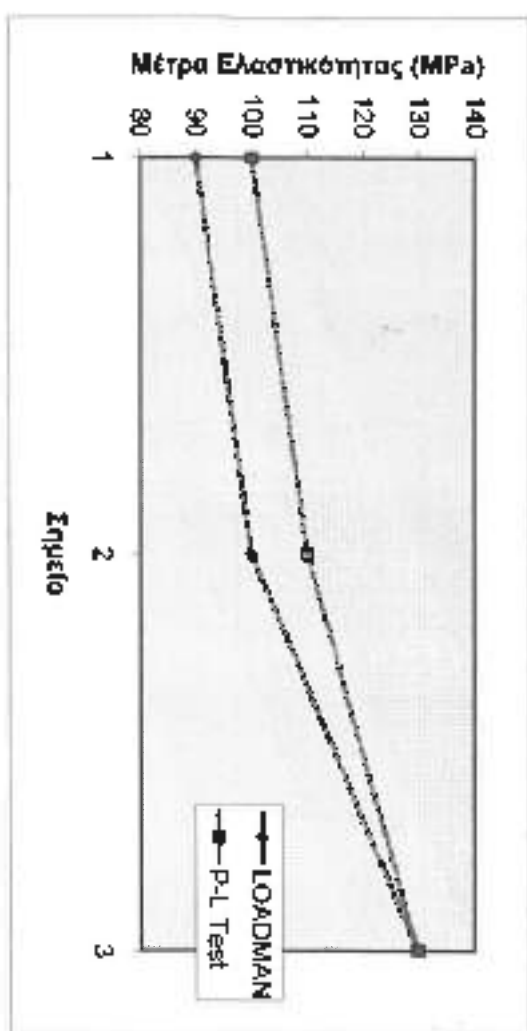
TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
9	Βήμα 10m		
	1	400	0,4
	2	485	0,33
	3	432	0,37
	4	421	0,38
	5	372	0,43
	6	432	0,37
	7	471	0,34
	8	457	0,35
	9	410	0,39
	10	327	0,49
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		465	0,430
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		376	0,340
Μέση Τιμή X_p		431	0,377
Τυπική απόκλιση σ		41	0,018
Συντελεστής Απόκλισης v		10%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		16	0,007

TM3	Α/Α Μέτρησης	E mod (MPa)	Deflection (mm)
10	Βήμα 10m		
	1	432	0,37
	2	500	0,32
	3	457	0,35
	4	471	0,34
	5	667	0,24
	6	421	0,38
	7	552	0,29
	8	696	0,23
	9	485	0,33
	10	500	0,32
	11		
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		807	0,385
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		429	0,269
Μέση Τιμή X_p		485	0,326
Τυπική απόκλιση σ		38	0,023
Συντελεστής Απόκλισης v		8%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		14	0,010

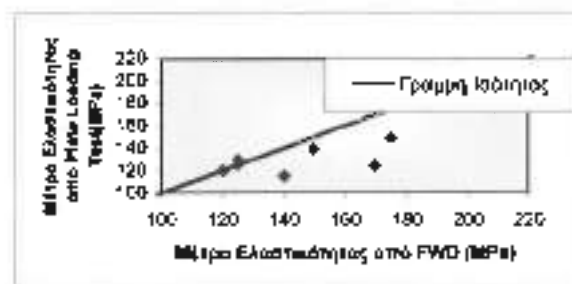
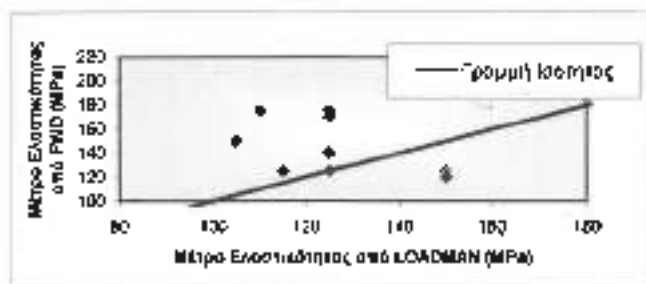
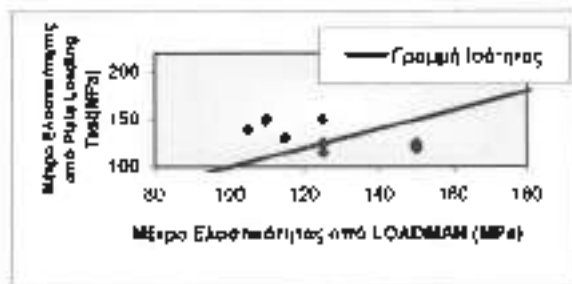
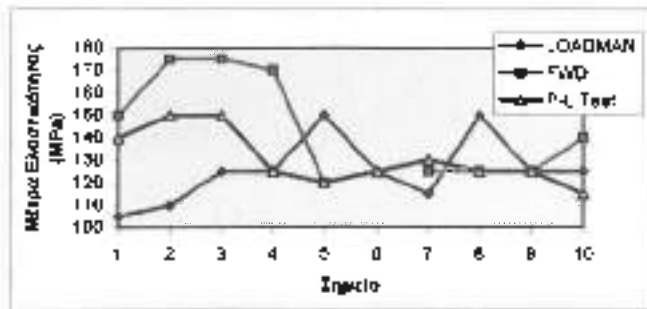
2. Ασύνδετα Υλικά

Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) LOADMAN	P-L Test
1	90	100
2	100	140
3	130	130

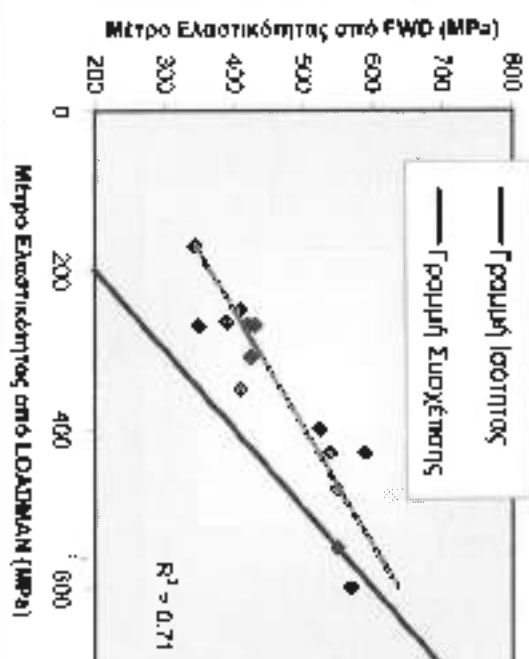
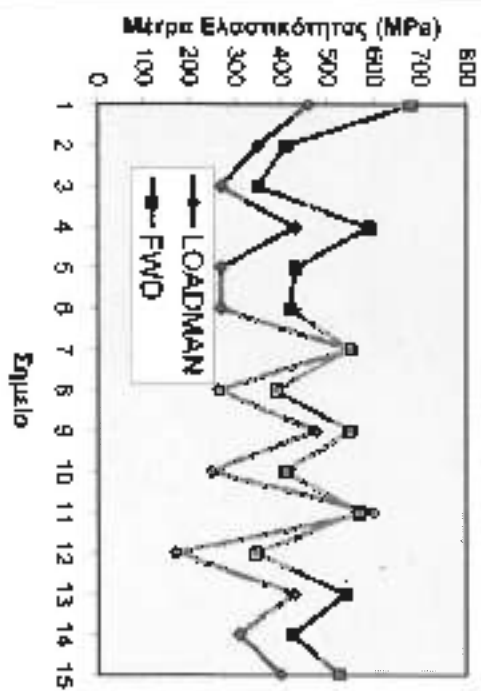
Στρώση Χαλκού 40cm



Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)		
	LOADMAN	FWD	P-L Test
1	105	153	140
2	110	175	160
3	125	175	150
4	125	170	125
5	150	120	120
6	125		125
7	115	125	130
8	150	125	125
9	125	125	125
10	125	140	115

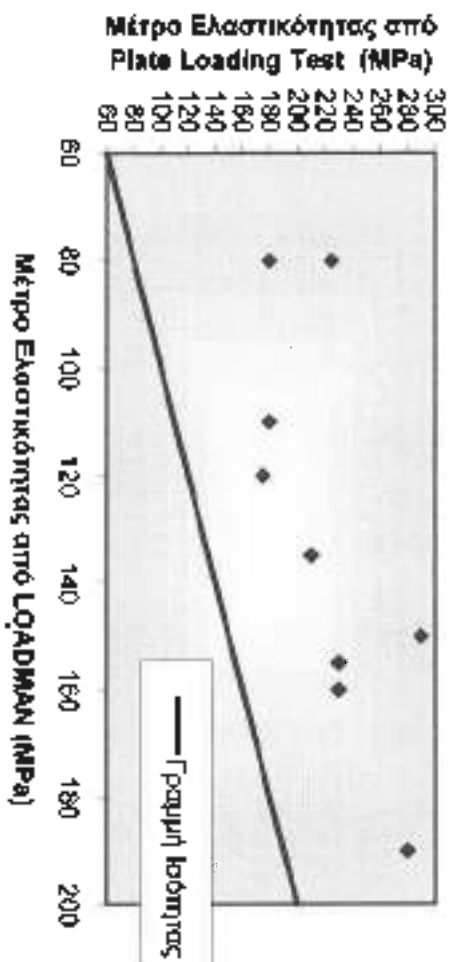
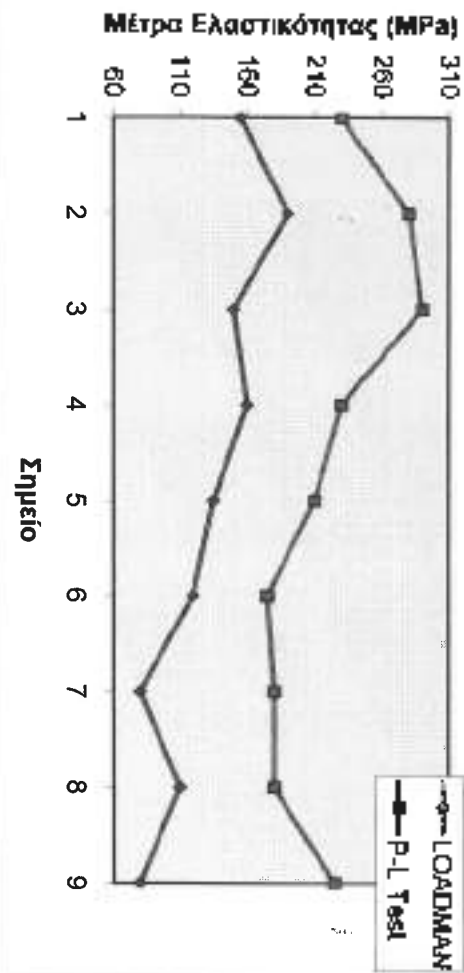


Σημείο	LOADMAN	FWD
1	460	680
2	350	410
3	270	350
4	430	580
5	270	430
6	270	420
7	550	550
8	265	390
9	475	550
10	250	410
11	600	570
12	170	345
13	430	540
14	310	425
15	400	525

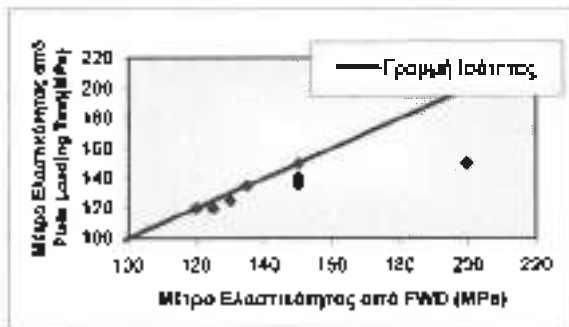
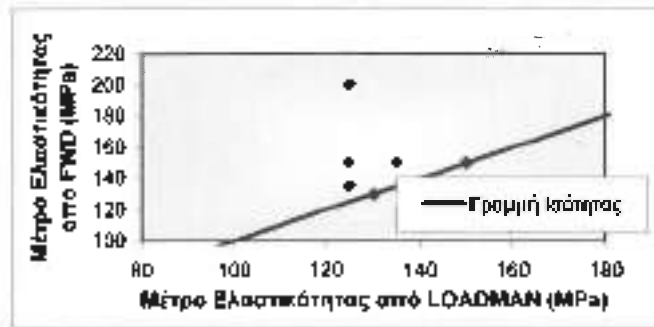
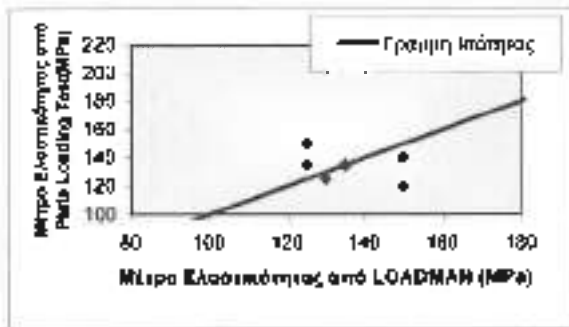
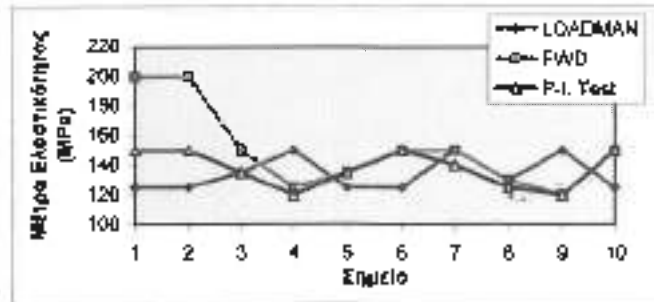


Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) LOADMAN	P-L Test
1	155	230
2	190	280
3	150	290
4	160	230
5	135	210
6	120	175
7	80	180
8	110	180
9	80	225

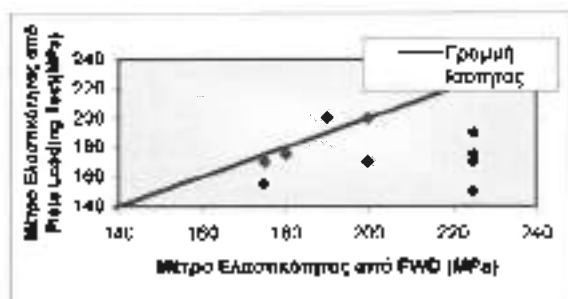
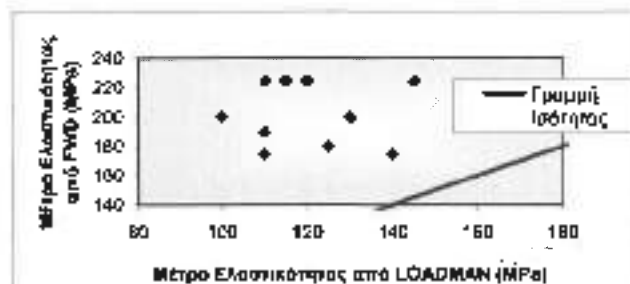
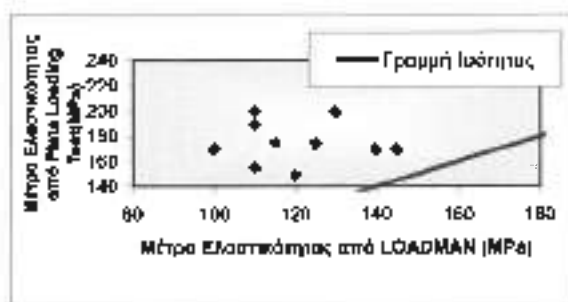
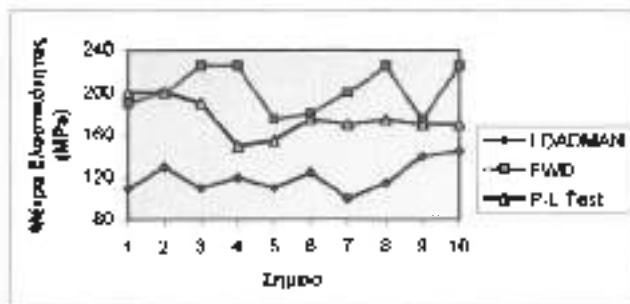
Στρώση σκυροδέματος 40cm



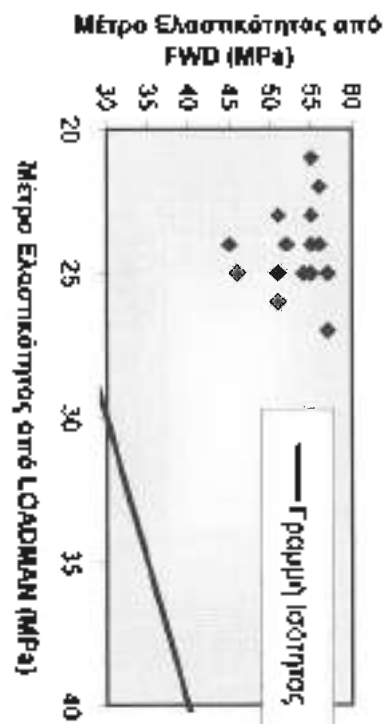
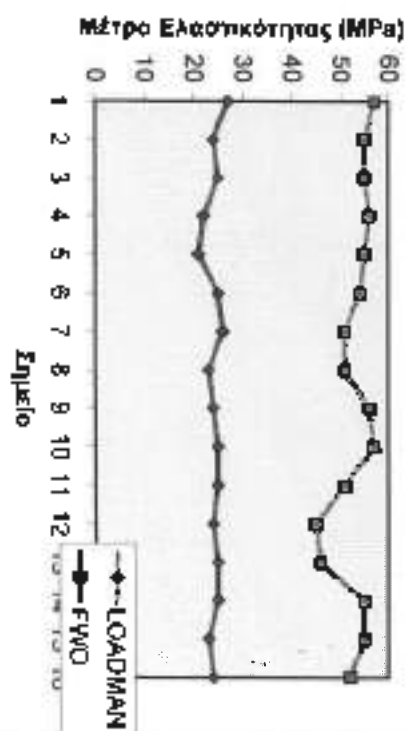
Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)		
	LOADMAN	FWD	P-I Test
1	125	200	150
2	125	200	150
3	135	150	135
4	150	125	120
5	125	135	135
6	125	150	150
7	150	150	140
8	130	130	125
9	150	120	120
10	125	150	150



Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)		
	LOADMAN	FWD	P.L Test
1	110	190	200
2	130	200	200
3	110	225	190
4	120	225	150
5	110	175	155
6	125	180	175
7	100	200	170
8	115	225	175
9	140	175	170
10	145	225	170

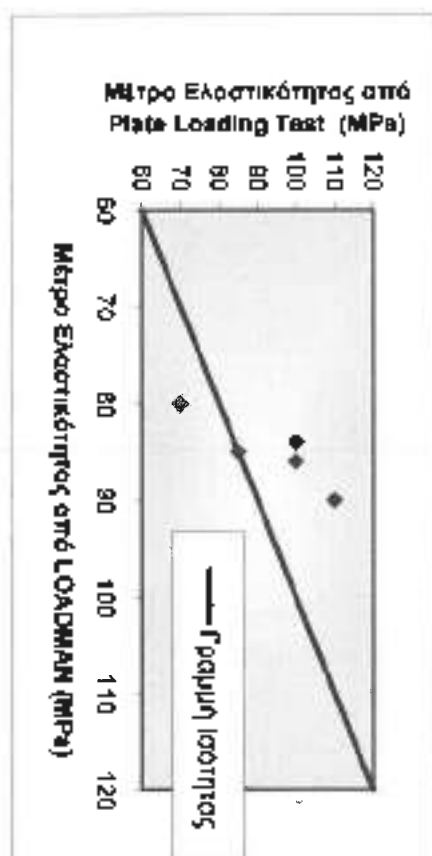
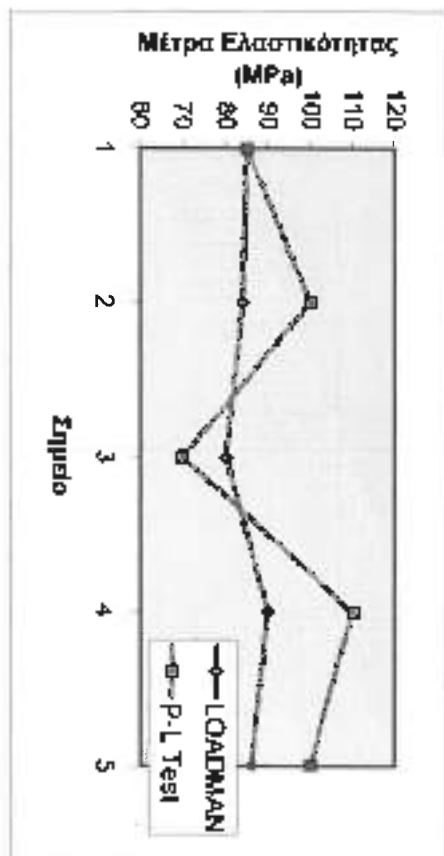


Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) LOADMAN	FWD
1	27	57
2	24	55
3	25	55
4	22	56
5	21	55
6	25	54
7	26	51
8	23	51
9	24	58
10	25	57
11	25	51
12	24	45
13	25	46
14	25	55
15	23	55
16	24	52

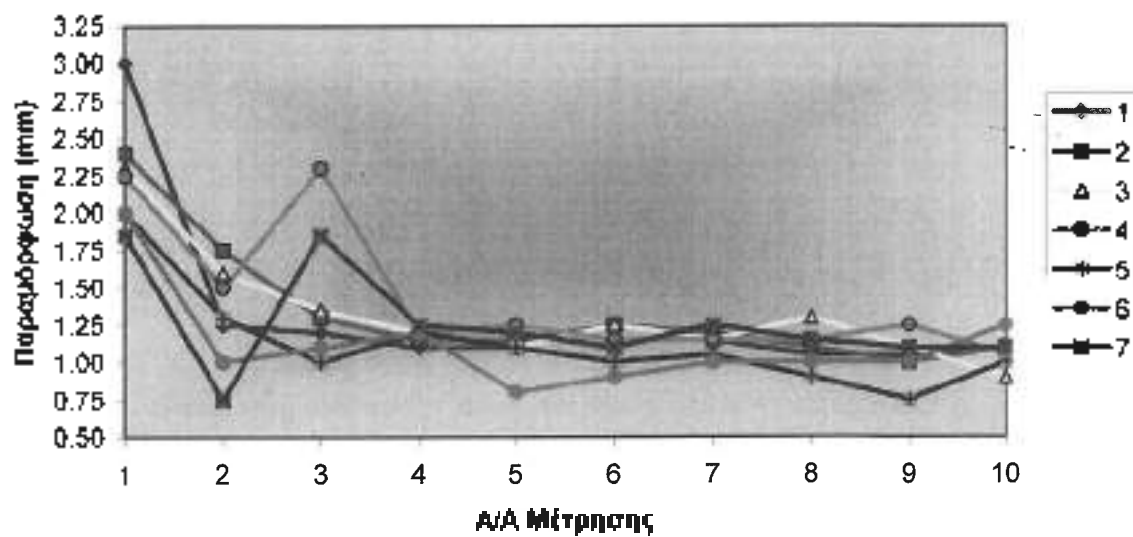


Δύο στρώσεις, η πάνω θραυστό αιμοχάλικο 15cm και η κάτω χαλίκι 25cm

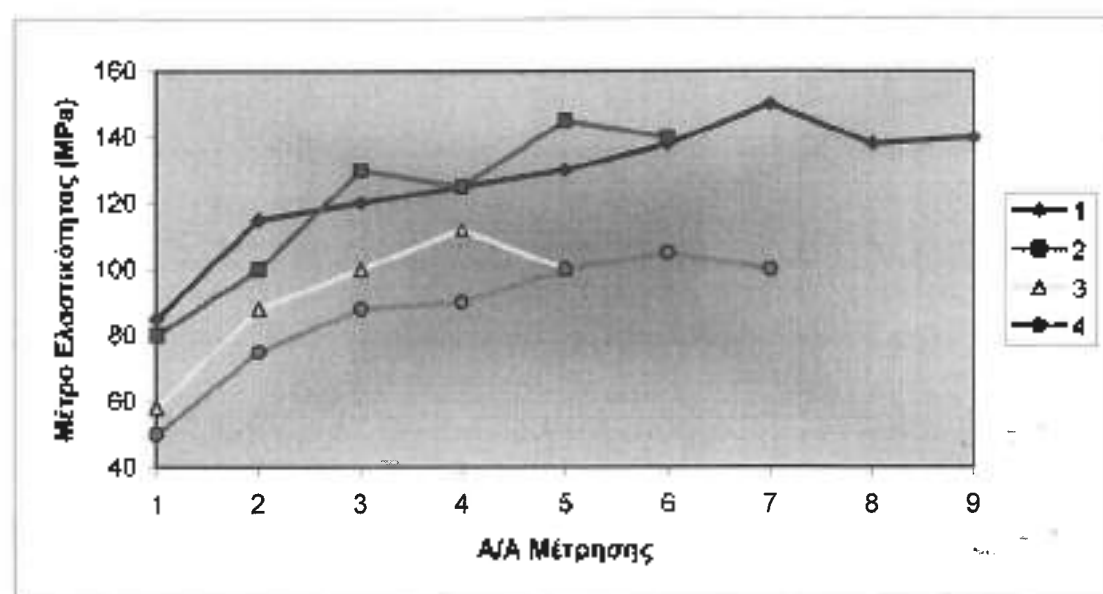
Σημείο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) LOADMAN	P-L Test
1	85	85
2	84	100
3	80	70
4	90	110
5	86	100



σημείο ω/α μέτρησης	Παραμόρφωση (mm)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	3.00	2.40	2.30	2.25	2.00	2.00	1.85
2	1.25	1.75	1.60	1.50	1.30	1.00	0.75
3	1.20	1.30	1.35	2.30	1.00	1.10	1.85
4	1.10	1.15	1.20	1.20	1.20	1.20	1.25
5	1.10	1.15	1.10	1.25	1.10	0.80	1.20
6	1.25	1.25	1.25	1.15	1.00	0.90	1.10
7	1.15	1.20	1.15	1.15	1.05	1.00	1.25
8	1.05	1.10	1.30	1.15	0.90	1.00	1.15
9	1.05	1.00	1.10	1.25	0.75	1.00	1.10
10	1.10	1.10	0.90	1.05	1.00	1.25	1.10



σημείο α/α μέτρησης		Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)			
		1	2	3	4
1		86	80	58	50
2		115	100	88	75
3		120	130	100	88
4		125	125	112	90
5		130	145	100	100
6		138	140		105
7		150			100
8		138			
9		140			



2. Αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού (FWD)

Υπόμνημα:**ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ****Ολυνθος: H1****Κασσάνδρα: H2****Ρύσιο: H3****Αγ. Αναστασία: H4****ΔΙΚΤΥΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ****Τέρναβος: T****Φάρσαλα: Φ****Τρίκαλα: TP****ΔΙΚΤΥΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ****Ν. Επίδαυρος: TM1****Ασκληπιείο: TM2****Μόλοι: TM3**

A. ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ

	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										MAT E1comp	h	Xavg		Aavg		h.b.200	E3
		0	200	300	450	600	900	1500	E1		E2								
Qaur805																			
1	706 1067	388 563	301 440	245 357	172 259	123 189	67 104	34 52	6120	13.0 4750 4700		4725	45.0 197 206		h.b.200 113 109		111		
2	691 1062	355 508	286 412	234 343	167 250	121 185	65 101	34 49	6483	12.5 6990 6990		6990	45.0 169 182	176	h.b.200 122 118		120		
3	697 1053	389 558	306 446	252 369	178 267	128 197	88 106	36 54	5056	12.0 5770 5620		5695	45.0 194 199	197	h.b.200 111 108		109		
4	694 1052	350 575	306 452	250 375	178 272	129 201	71 113	36 59	6239	15.5 3510 3500		3505	45.0 155 177	166	h.b.200 113 103		108		
										13.5 4400 4370		4385	45.0 181 205	193	h.b.200 108 100		104		
5	686 1039	362 527	291 431	243 366	180 278	137 212	79 123	41 62	6947	13.5 5330 6100		5715	45.0 214 216	215	h.b.200 95 92		94		
6	686 1031	289 442	233 352	196 299	147 230	114 180	74 116	44 66	5685	13.0 6450 5510		5980	45.0 358 408	389	h.b.200 94 87		91		

Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										NAT E1comp	Aspect ratio		Approx. d _{max} E2	E3comp E3		
	0	200	300	450	600	900	1500	E11	E12								
Kaoudy60a																	
251	682	276	224	195	155	123	77	38	18.0	4520			40.0	301		h.b.200	95
	1040	412	339	297	238	193	120	59		4950	4750			289	295	h.b.200	91
									5.0				40.0				93
	682	278	224	195	155	123	77	38		2290				331		h.b.200	84
	1040	412	339	297	238	193	120	59		2600	2545			317	324	h.b.200	90
									18.5				40.0				92
4	681	196	162	140	110	86	54	28		6650				352		h.b.200	141
	1040	292	242	212	170	137	86	43		7010	6830			378	386	h.b.200	128
									18.4				45.0				135
6	681	285	222	187	138	103	59	31		3570				211		h.b.200	136
	1038	407	322	274	206	159	93	48		4010	3780			232	222	h.b.200	127
									4.4				45.0				132
	681	285	222	187	138	103	59	31		1900				220		h.b.200	134
	1038	407	322	274	206	159	93	48		2180	2040			252	236	h.b.200	125
									14.0				46.35				130

	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa									NAT E1comp	Actual E1		Approx E2		E3poor E3	
		0	200	300	450	600	900	1500									
Pútoro																	
2	680	413	345	313	240	197	128	84									
	1023	620	524	483	371	307	189	130	6465								
4	684	412	347	324	238	185	126	88									
	1022	625	530	499	378	312	201	132	4293								
7	677	382	327	294	222	184	119	77									
	1016	575	488	454	349	289	188	112	4397								
10	672	490	423	388	292	241	152	97									
	1014	728	633	593	448	371	238	135	4691								
11	662	644	540	499	368	296	182	112									
	1002	953	807	744	562	455	280	160	5230								
13	671	607	493	431	311	244	154	100									
	892	903	737	655	475	378	239	144	4422								

Αγ. Ανοστρωτήρ	Stress (MPa)	Deflections normalised to 700 or 1060 kPa										MAT E _{comp}	E ₁₀	Ανοστρωτήρ		Αντοχή E ₂		Αντοχή E ₃	E ₃₀₀₀	
		0	200	300	450	600	900	1600	E ₁₀	E ₁₀										
24 1	696	133	110	84	75	59	40	26				28.0	5040			50.0	380	n.b.200	191	
	1040	204	168	143	113	93	64	37	9450			4390	4715			545	463	155	173	
	896	137	106	88	71	58	38	23				26.5	4070			50.0	588	n.b.200	182	
	1043	206	162	137	111	93	60	37				4440	4255			524	545	174	176	
2	699	137	106	89	71	58	38	23				13.0	7260			50.0	613	n.b.200	172	
	1043	206	162	137	111	93	60	37	11288			7650	7455			567	590	165	169	
	700	121	94	80	64	53	36	25				26.5	4270			50.0	924	n.b.200	154	
	1026	187	147	126	102	85	60	40				4540	4405			806	865	150	152	
4	700	121	94	80	64	53	38	25				14.0	9680			50.0	1060	n.b.200	139	
	1026	187	147	126	102	85	60	40	10178			8370	6525			887	974	139	139	
	709	554	451	385	287	219	122	52				18.0	2480			40.0	81	n.b.200	70	
	1042	850	706	607	468	364	207	86				2670	2575			80	81	61	66	
10	708	554	451	385	287	219	122	52				9.0				40.0		n.b.200		
	1042	850	706	607	468	364	207	86	7947			3790				82		61		
	685	787	617	505	372	273	144	64				15.5	2100					70		
	1026	1129	923	775	581	435	236	96	6626			2450	2275					65	68	

B. ΘΕΣΣΑΛΙΑ

Τόπος	Stress Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										Απόσπ. E_1	Αυτοχάλυκ E_2	Εόρπον E_3	
	(kPa)	0	200	300	450	600	900	1500						
1	700	425	329	252	163	114	63	17	9.0	9060			180	
	1000	503	392	313	215	154	94	24	11500				214	
1	700	425	329	252	163	114	63	17	8.5	7910			179	
	1000	503	392	313	215	154	94	24	9850	8930			212	196
3	700	297	222	178	121	87	51	13	9.5	6570		25.0	286	
	1000	361	287	235	166	123	75	18	8590	8580		314 473	259	263
8	700	162	135	118	94	74	51	11	16.5	10400		36.0	311	
	1000	223	183	165	131	107	72	17	9120	9760		386 546	305	309
13	700	517	389	313	208	143	74	16	7.5	9950			162	
	1000	647	489	397	273	194	108	25	11700	10825			183	173

Φάση	Stress (kPa)	Deflections normal to 700 or 1050 kPa										Απόκλιση E1	Απόκλιση E2	Εκκέντρωση E3	
		0	200	300	450	600	900	1500							
1	700 1000	385 559	316 457	273 398	208 308	165 247	104 157	32 45	19.0 23.0	3210 3210	3210		136 133	135	
3	700 1000	358 503	303 430	271 387	221 317	182 265	118 173	28 43	23.0 24.0	3470 3590	3580		117 115	116	
4	700 1000	337 485	279 410	248 360	198 288	159 239	102 150	22 32		2970 3080	3025		134 128	131	

Τίτλος	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1060 kPa								h	Αρµητός E1		Αυτοχάλικο E2	Εξοχή E3	
		0	200	300	450	600	900	1500							
1	700	736	557	448	285	171	52	6	10.0	3650				106	
	1000	918	684	560	354	214	64	10		3680				126	116
3	700	947	727	581	359	228	82	13	10.0	3040				79	
	1000	1207	915	748	465	304	109	18		3130				92	86
4	700	893	693	552	360	226	84	7		3460				82	
	1000	1160	902	729	485	310	116	9		3860				89	86

Γ. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΣ

N. Επιδαυρος	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										Ανταρτία E1	h (cm)	Επίθεση YAKO	Αποκλίση E2	Επίθεση E3
		0	200	300	450	600	800	1500								
2	700 1000	141 187	113 149	98 132	77 102	59 78	29 41	6 9	9.0 3480	4940 4210	11.0 13300 29800	21550	h.b 250 292 294	293		
259 3	700 1000	254 331	188 244	146 190	86 115	51 69	14 19	2 2	11.5 6460 6910	6685			316 350	333		
4	700 1000	208 272	155 200	121 155	73 95	43 56	12 16	1 0	10.5 8740 10200	9970			386 434	411		
8	700 1000	163 199	128 154	102 124	68 82	46 56	19 26	3 7	12.5 12200 12900	12550			419 511	465		
9	700 1000	98 143	69 124	85 121	77 110	73 102	59 84	15 21	9.0							

Ασκήνσιο	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										Ασκήνσιο E1	Ασκήνσιο E2	Ασκήνσιο E3	
		0	200	300	450	600	800	1000							
2	700 1000	629 803	402 518	265 380	140 207	93 144	57 88	12 18	4.5 4.5	12700 15000	13850			189 203	186
5	700 1000	565 737	347 466	216 307	115 178	80 125	48 73	20 28	4.5 5.0	11100 14600	12850			216 227	222
5A	700 1000	565 737	347 466	216 307	115 178	80 125	48 73	20 28	4.5 4.5	8210 10700	9465			215 226	221
8	700 1000	629 843	404 555	258 368	146 180	58 94	23 36	5 8	4.5 4.5	13100 16100	14600			182 187	185
10	700 1000	505 648	303 397	183 248	88 97	27 39	10 12	4 6	4.5 4.5	10800 13700	12250			249 270	260

Μετρώ	Stress (kPa)	Deflections normalised to 700 or 1050 kPa										Αρµωσις F1	Αρµωσις F2	Εξασθη E3	
		0	200	300	450	600	900	1500							
2	700	881	704	458	263	167	92	22	9.0	5670				79	
	1000	1152	943	637	431	253	137	34		6780				82	81
4	700	427	329	268	190	141	80	18	13.0	3570					
	1000	617	482	394	282	211	122	27		3850				87	90
6	700	422	315	261	192	146	85	38	13.0	2660					
	1000	608	457	363	285	219	132	57		2630				85	81
8	700	374	284	236	170	127	77	16	19.0	2180					
	1000	538	417	352	280	194	118	47		2460				100	97
10	700	284	231	201	156	125	85	19	19.0	3200					
	1000	448	356	306	238	194	131	28		2860				80	77

3. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών (NAT-ITSM)

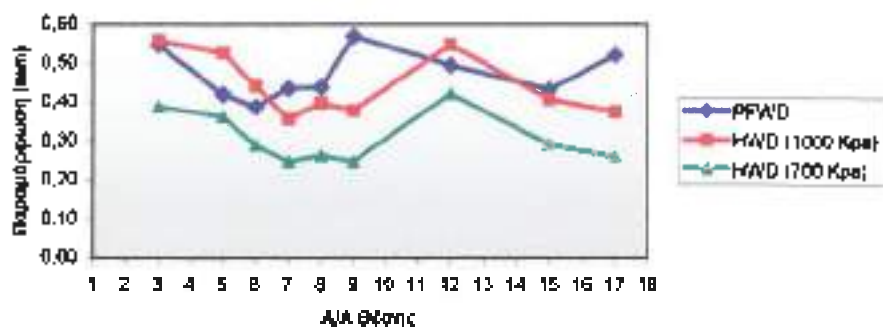
ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ Αποτελέσματα NAT - Θερμοκρασία δοκιμής: 23 οC

h (cm)	A/A	h	S _m (a)	S _m (b)	S _m	E'	h comp	E comp	
130	1	49	6000	6450	6225	8.91	61	8120	Ομάδα H1
	2	42	6150	5850	6000	8.38			
125	3	50	7000	7050	7025	10.08	95	6483	
	4	45	5850	6100	5975	8.55			
120	5	49	7050	7250	7150	9.84	95	6058	
	6	48	3300	3350	3325	7.23			
155	7	51	8250	8350	8300	10.99	94	6239	
	8	43	4100	4450	4275	7.42			
135	9	53	10650	9300	9975	10.97	104	6907	
	10	51	4300	4750	4525	8.11			
130	11	43	5850	6950	6900	9.00	91	5886	
	12	48	4550	4900	4725	8.85			
208	13	26							Ομάδα H3
	14	34	9700	9050	9375	5.88	122	5455	
	15	50	5000	5150	5075	7.04			
	16	38	3350	3450	3400	4.68			
205	17	38	7050	6850	7000	4.88	156	4293	
	18	37	5200	4050	4675	4.10			
	19	36	4550	4700	4625	3.87			
	20	44	2100	1950	2025	3.58			
163	21	25	8250	9650	9900	3.88	137	4397	
	22	46	3150	2950	3050	4.87			
	23	39	3700	3500	3600	4.38			
	24	27	4400	4750	4575	3.37			
180	25	23							
	26	43	8050	5600	5825	6.29	123	4691	
	27	38	6750	7100	6925	5.58			
	28	44	2450	2800	2525	4.87			
175	29	33	8150	7400	7775	4.48	148	5230	
	30	38	6400	7000	6700	4.91			
	31	36	5200	5050	5575	4.37			
	32	39	2900	2000	2450	3.60			
193	33	35	1600	1350	1475	2.51	158	4422	
	34	34	4850	5100	4975	3.33			
	35	41	4800	4500	4500	4.28			
	36	52	7300	7150	7225	6.32			
260	37	27	8200	6100	8150	4.31	126	9460	
	38	35	10850	10350	10150	7.02			
	39	27	9900	9800	9850	4.58			
	40	37	5050	6150	5900	5.21			
	41	23							
	42	20							
	43	21							
285	44	30	10250	10350	10300	4.91	133	11288	
	45	45	12950	12850	12700	7.66			
	46	28	10600	9450	10025	4.54			
	47	30	12100	10600	11500	5.09			
	48	30							
	49	29							
265	50	30	11400	11100	11250	4.84	139	10178	Ομάδα H4
	51	40	15700	16750	16225	7.29			
	52	30	7900	7400	7450	4.22			
	53	39	6850	6900	6875	5.34			
	54	38							
	55	33							
	56	38	8450	8400	8425	8.06	86	7847	
	57	26	8350	8150	8250	5.47			
	58	52	8850	7500	7175	6.43			
	59	24							
	60	20							
	61	22							
	62	36	8900	8450	8625			6826	
	63	22							
	64	22							
	65	27							
180	66	48	7400	6800	7100	9.31	95	6708	Ομάδα F2
	67	49	9650	8050	8350	6.55			
	68	56	5650	5900	5525	9.43	108	5641	
	69	49	5950	5600	5775	8.37			
	70	67	5350	5100	5225	8.74	133	5730	
	71	68	8700	8350	8275	6.15			

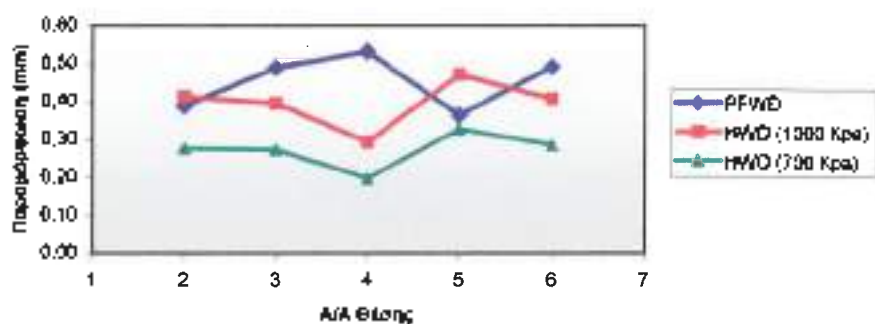
4. Παραμορφώσεις

	Β(α)	FFA(Δ δ (mm)	HV(Δ δ (mm) 1000MPa	HAD(Δ δ (mm) 1000MPa
H1	3	0.55	0.66	0.38
	5	0.42	0.53	0.35
	8	0.39	0.44	0.29
	7	0.44	0.36	0.25
	8	0.44	0.40	0.26
	9	0.57	0.38	0.25
	12	0.50	0.56	0.42
	15	0.43	0.44	0.25
H2	17	0.52	0.38	0.26
	2	0.39	0.41	0.28
	3	0.49	0.39	0.27
	4	0.63	0.29	0.20
	5	0.35	0.47	0.33
H3	6	0.49	0.41	0.28
	7	0.23	0.58	0.38
	2	0.40	0.82	0.41
	3	0.41	0.58	0.39
	4	0.37	0.62	0.41
	5	0.46	0.84	0.45
	7	0.50	0.57	0.35
	8	0.42	0.59	0.39
	9	0.52	0.72	0.40
	11	0.52	0.95	0.64
	12	0.40	0.88	0.57
H4	2	0.17	0.21	0.14
	3	0.18	0.18	0.12
	4	0.18	0.19	0.12
	6	0.18	0.31	0.20
	8	0.25	0.12	0.48
	10	0.33	0.63	0.35
	15	0.33	1.17	0.78
TMI	1	0.13	0.10	0.07
	2	0.12	0.18	0.14
	3	0.30	0.33	0.26
	4	0.29	0.27	0.21
	5	0.25	0.26	0.21
	8	0.19	0.24	0.20
	8	0.20	0.30	0.15
	10	0.22	0.14	0.10
	10	0.22	0.12	0.08
TM2	1	0.51	0.85	0.67
	2	0.63	0.81	0.85
	3	0.65	0.77	0.64
	4	0.75	0.64	0.70
	5	0.74	0.75	0.54
	6	1.06	1.24	0.96
	7	0.75	0.83	0.70
	8	0.65	0.86	0.68
	9	0.45	0.40	0.37
	10	0.85	0.96	0.56
TM3	1	0.30	0.48	0.32
	2	0.84	1.16	0.91
	3	0.95	1.08	0.90
	4	0.21	0.81	0.43
	5	0.51	1.65	0.88
	8	0.29	0.61	0.43
	7	0.50	0.68	0.51
	6	0.46	0.54	0.39
	9	0.38	1.10	0.32
	10	0.48	0.43	0.30
T	2	0.27	0.42	0.34
	3	0.25	0.30	0.20
	4	0.16	0.32	0.24
	5	0.18	0.38	0.19
	6	0.23	0.33	0.25
	7	0.18	0.28	0.20
	8	0.14	0.22	0.16
	9	0.09	0.22	0.10
	10	0.07	0.23	0.16
	11	0.40	0.61	0.51
	12	0.51	0.70	0.54
TP	1	0.58	1.05	0.78
	2	0.53	0.83	0.83
	4	0.66	1.00	0.83
	5	0.56	1.27	1.30
	7	0.57	1.06	0.94
	8	0.52	1.14	0.97
	9	0.38	0.92	0.77
	10	0.68	0.96	0.78
Φ	1	0.36	0.56	0.90
	2	0.30	0.54	0.95
	3	0.28	0.51	0.37
	4	0.35	0.40	0.36
	5	0.31	0.42	0.36
	6	0.31	0.66	0.48

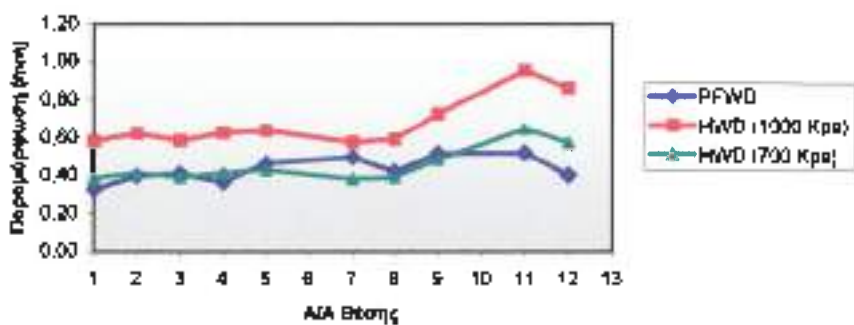
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η1



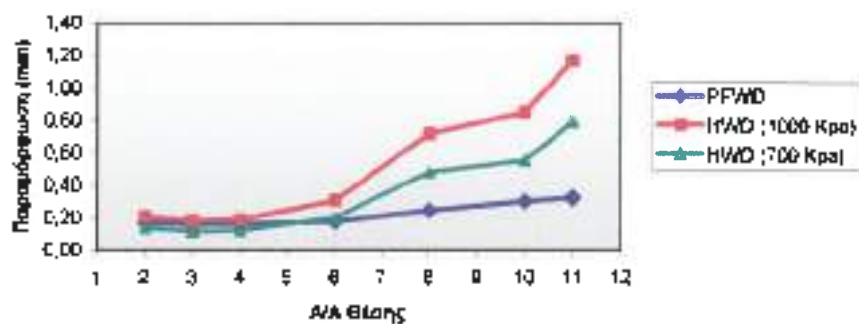
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η2



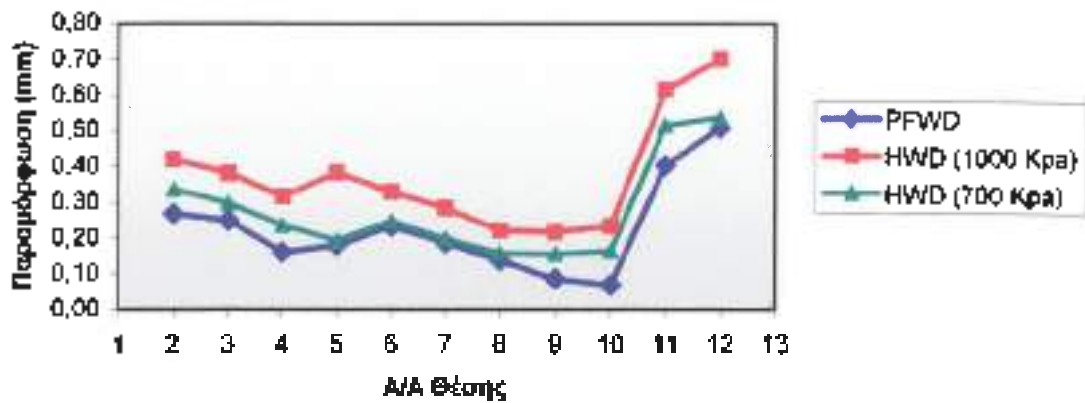
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η3



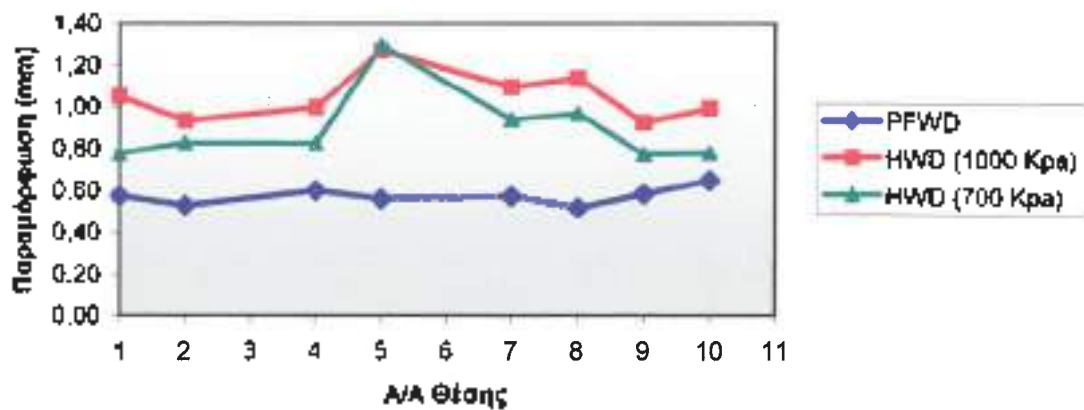
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η4



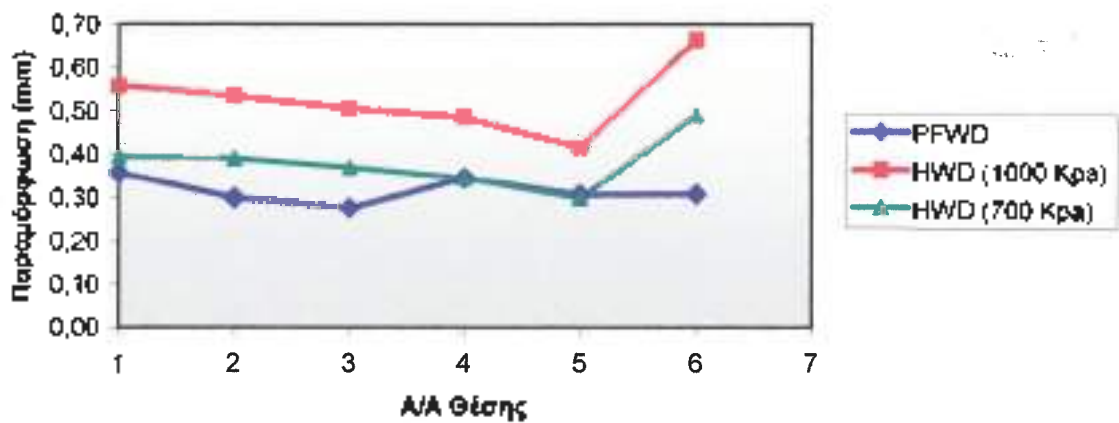
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Τ



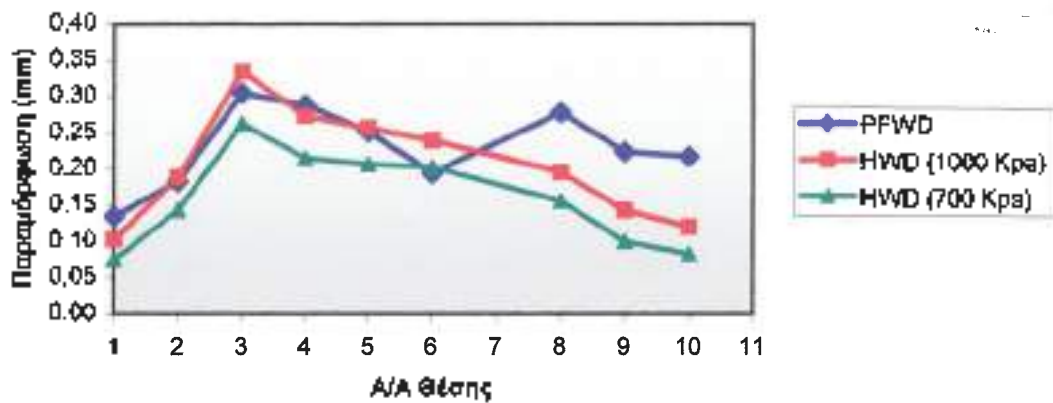
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος ΤΡ



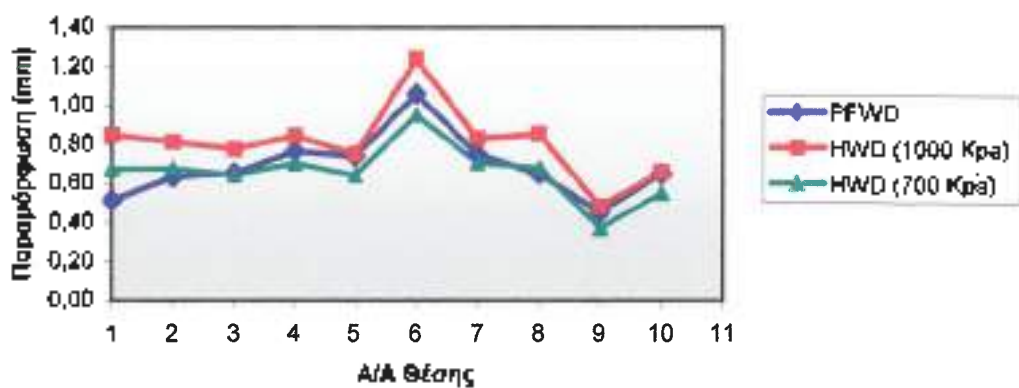
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Φ



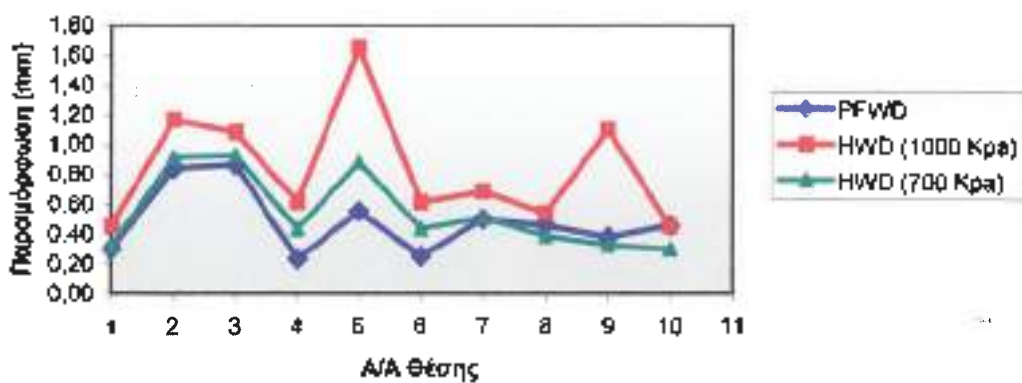
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM1



Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM2



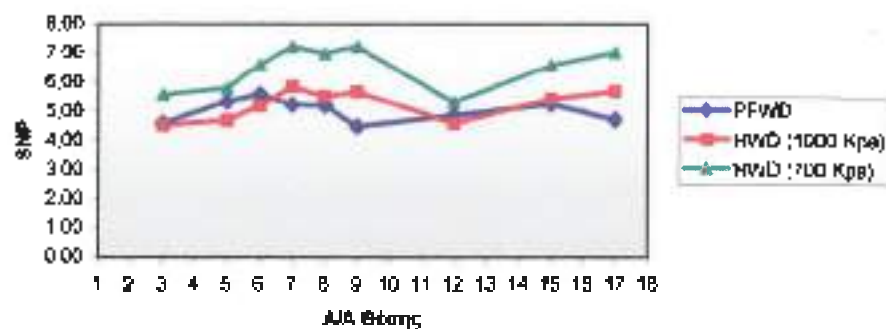
Παραμορφώσεις κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM3



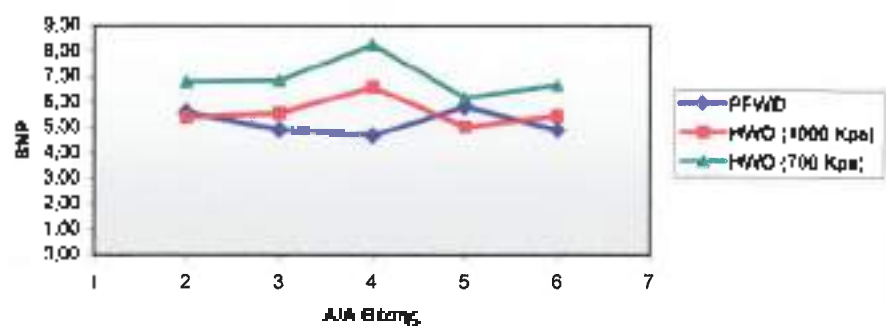
5. SNP

	Θαλ	ΡΕΛΩΔ-SMP	ΗΛΩΔ SHP 1000Pa	ΗΛΩΔ SHP. 1000Pa
H1	3	4.69	4.64	5.54
	5	5.34	4.68	5.81
	6	5.32	5.18	6.81
	7	5.27	5.88	7.22
	8	5.24	5.51	6.99
	9	4.49	5.67	7.22
	12	4.86	4.59	5.32
	15	5.25	5.40	5.58
	17	4.72	5.60	7.02
	2	5.52	5.40	6.78
H2	3	4.05	5.54	6.80
	4	4.07	6.57	8.24
	6	5.80	5.01	6.18
	8	4.84	5.44	6.88
H3	1	5.18	4.44	5.88
	2	5.51	4.28	5.30
	3	5.45	4.43	5.57
	4	5.77	4.28	5.39
	5	5.05	4.21	5.29
	7	4.85	4.47	5.64
	8	5.92	4.40	5.57
	8	4.75	3.82	4.80
	-1	4.74	3.35	4.18
	-2	5.48	3.55	4.47
	2	5.84	4.00	10.10
	3	6.31	8.64	11.12
H4	4	6.24	8.48	10.35
	8	5.77	6.30	8.10
	8	7.26	3.04	4.08
	-0	6.44	3.57	4.58
	-1	6.18	2.36	3.72
	1	10.28	11.93	14.32
	2	8.00	8.45	9.57
TMI	3	6.42	6.08	6.28
	4	6.62	6.23	7.83
	5	7.14	7.08	8.31
	8	5.90	7.37	8.10
	8	6.76	8.26	9.41
	9	7.85	9.90	12.14
	-0	7.79	10.93	13.55
	1	4.78	3.58	4.30
	2	4.23	3.67	4.07
	3	4.19	3.77	4.19
TM2	4	3.80	3.54	3.98
	5	3.67	3.25	4.30
	8	3.15	2.88	3.35
	7	3.84	3.63	3.98
	8	4.17	3.57	4.30
	9	5.12	4.55	5.74
	10	4.17	4.14	4.50
	1	6.48	5.10	8.24
	2	3.80	2.58	3.43
	3	3.54	3.12	3.40
TM3	4	7.50	4.30	6.28
	5	4.57	2.45	3.40
	8	7.18	4.32	5.24
	7	4.85	4.04	4.78
	8	5.09	4.63	5.01
	8	5.08	3.00	6.20
	10	5.08	5.15	8.51
	2	6.80	4.25	8.07
	3	7.19	5.64	8.50
	4	6.95	6.25	7.42
1	5	8.69	6.64	8.38
	6	7.47	8.14	7.23
	7	8.46	6.68	8.21
	9	10.14	7.79	8.35
	9	13.27	7.60	8.43
	10	15.07	7.48	9.18
	11	5.48	4.30	4.75
	12	4.50	3.99	4.84
	1	4.46	3.15	3.76
	2	4.58	3.38	3.62
	4	4.36	3.25	3.63
	5	4.58	2.84	2.01
TP	7	4.48	3.09	3.37
	8	4.74	3.03	3.37
	9	4.43	3.49	3.77
	10	4.17	3.27	3.75
	1	5.18	4.54	5.54
	2	6.47	4.85	5.57
	3	6.79	4.80	5.74
	4	5.97	4.91	6.97
	5	6.39	6.38	6.40
	6	6.37	4.51	4.88

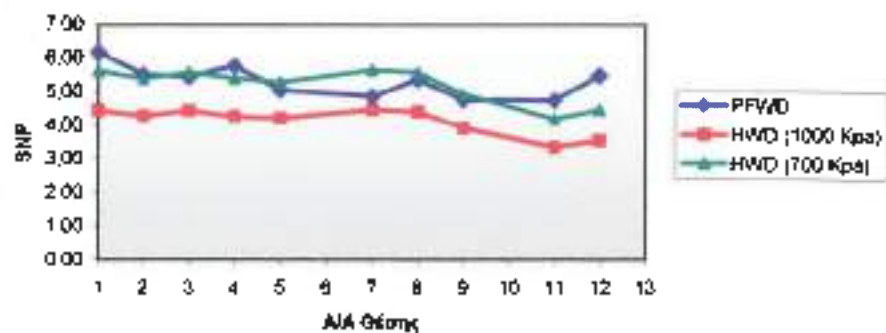
SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η1



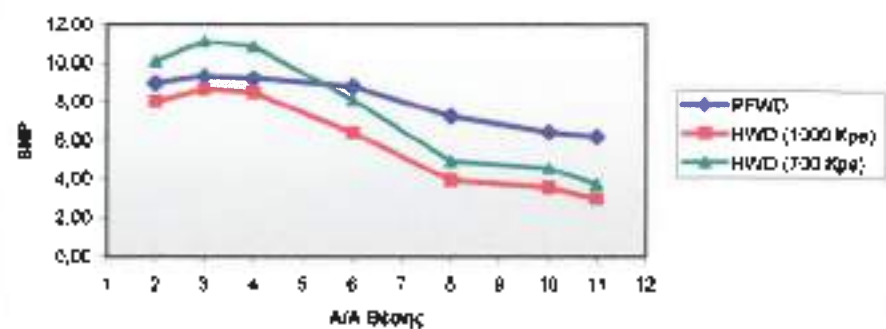
SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η2



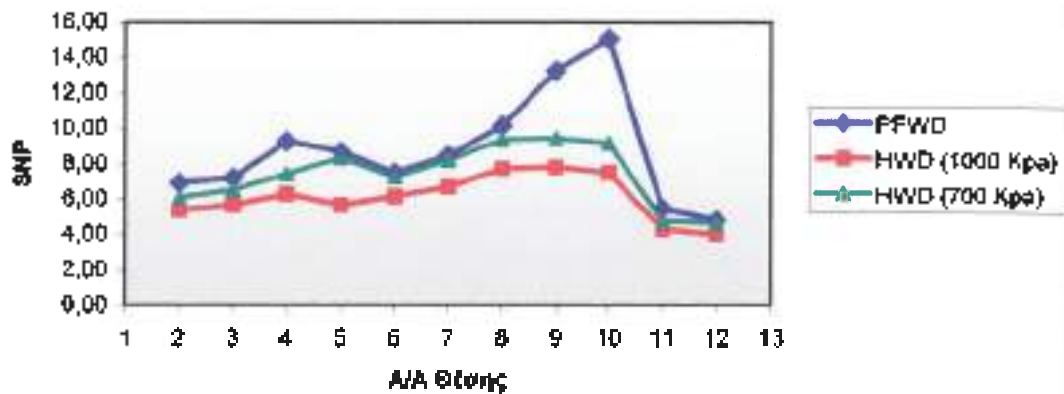
SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η3



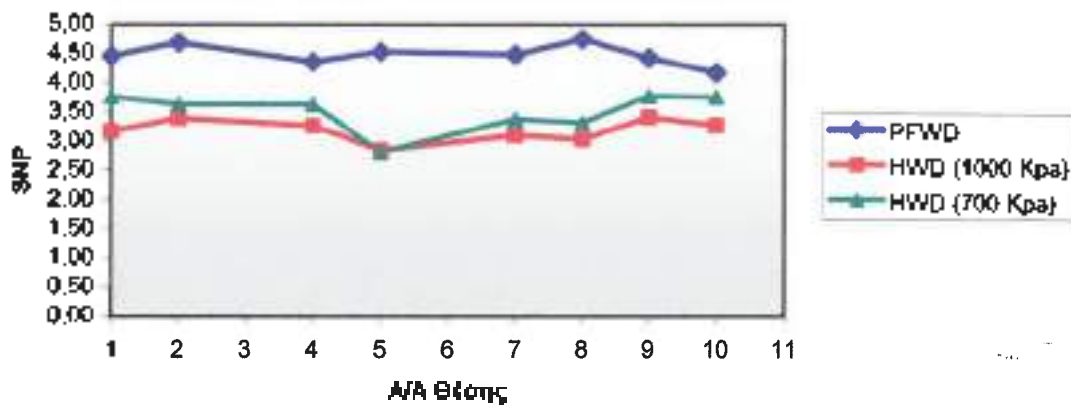
SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Η4



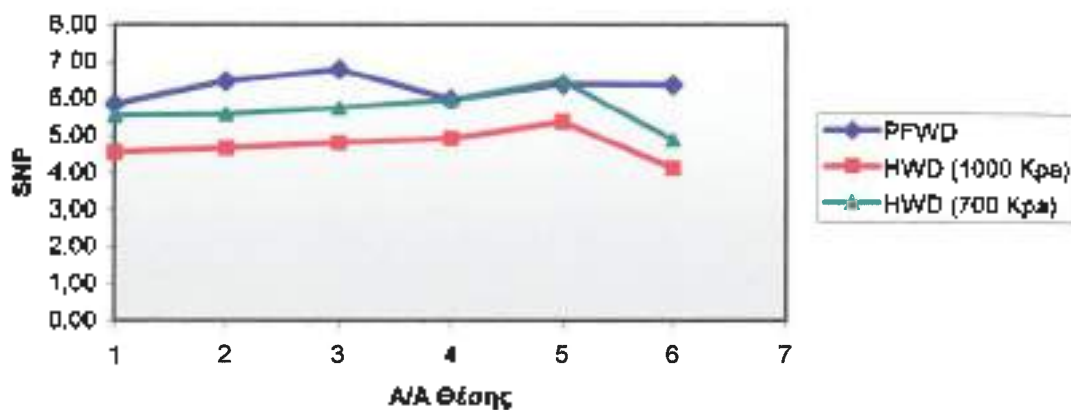
ΣΝΡ κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Τ



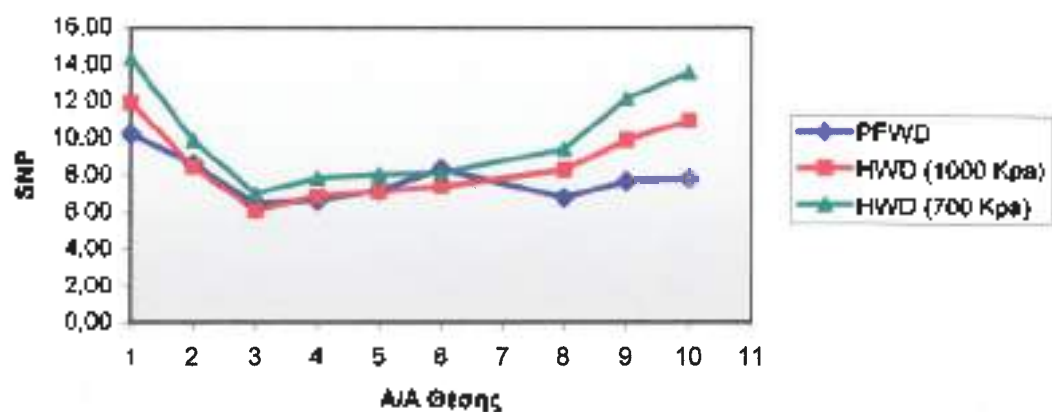
ΣΝΡ κατά μήκος του Οδικού Τμήματος ΤΡ



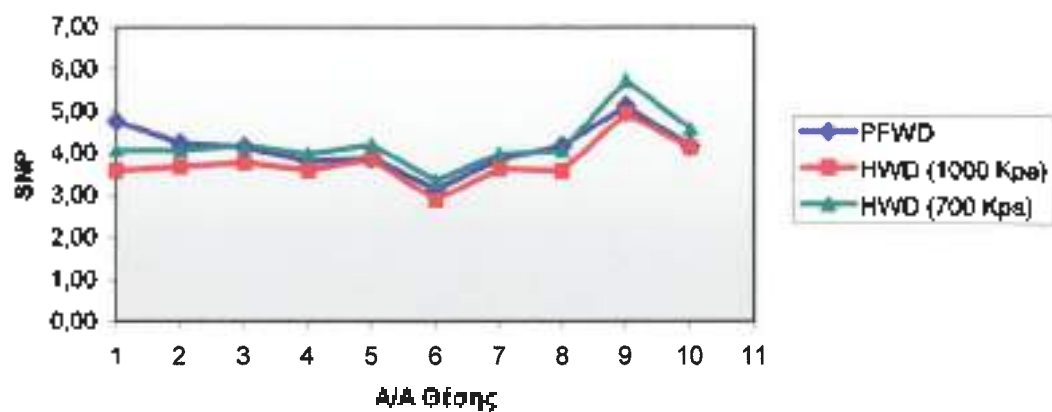
ΣΝΡ κατά μήκος του Οδικού Τμήματος Φ



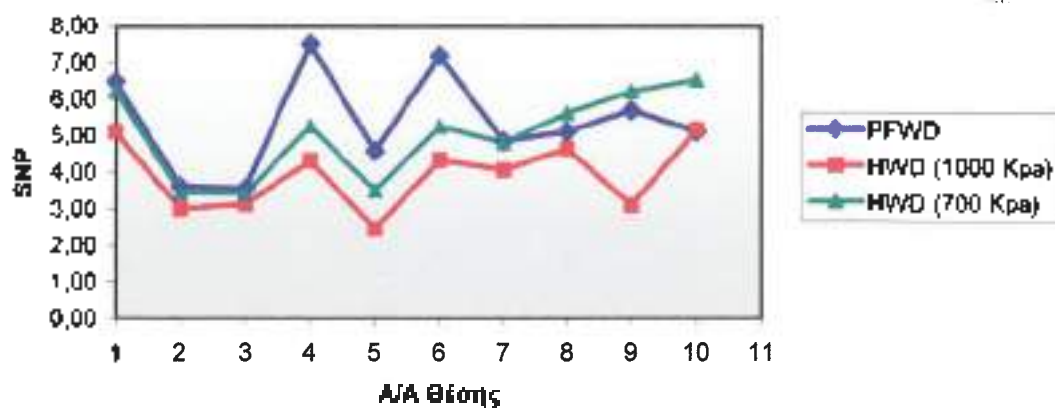
SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM1



SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM2



SNP κατά μήκος του Οδικού Τμήματος TM3



6. Εφαρμογή Μεθόδων και Συγκρίσεις

Οδικό Τμήμα	Θέση	H _A (mm)	H _B (mm)	PFWD-δ (mm)	E _{UP} (MPa)	E _{UP} /E _A	E _A (MPa)	F _c	PFWD-E _A (MPa)
H1	3	120	450	0.55	314	0.704	446	2.19	974
	5	135	450	0.42	422	0.734	575	1.94	1118
	6	130	450	0.39	461	0.724	637	1.73	1101
H2	2	180	400	0.39	481	0.824	559	2.55	1428
	4	185	400	0.53	324	0.834	389	3.63	1412
	6	184	450	0.49	355	0.832	426	3.32	1416
H3	2	209		0.40	449	0.882	509	3.17	1616
	4	205		0.37	491	0.874	562	2.88	1603
	7	183		0.50	351	0.830	423	3.33	1408
	11	175		0.52	334	0.814	410	3.29	1348
H4	2	265	500	0.17	1118	0.994	1125	1.85	2193
	4	265	500	0.16	1181	0.994	1188	1.86	2211
	10	180	400	0.30	605	0.824	735	2.01	1480
TM1	2	90		0.18	1041	0.644	1616	0.69	1115
	3	115		0.30	802	0.694	868	1.23	1065
	4	105		0.29	638	0.674	947	1.08	1019
	8	125		0.28	865	0.714	931	1.24	1154
TM2	2	45		0.63	266	0.554	480	0.98	459
	5	45		0.74	222	0.554	401	1.09	435
	8	45		0.65	258	0.554	466	0.98	455
	10	45		0.65	258	0.554	466	0.98	455
TM3	2	90		0.84	191	0.644	296	2.43	719
	4	130	400	0.23	807	0.724	1115	1.12	1244
	6	130	400	0.25	743	0.724	1027	1.19	1218
	8	190	450	0.48	395	0.844	457	3.21	1467
	10	190	450	0.46	385	0.844	457	3.21	1467
T	3	95	250	0.25	747	0.664	1141	0.88	1007
	8	165	350	0.14	1408	0.794	1775	0.95	1687
TP	1	100		0.58	296	0.664	446	1.87	834
	4	100		0.60	282	0.664	425	1.95	828
Φ	1	190		0.36	505	0.844	598	2.52	1510
	3	230		0.28	669	0.924	724	2.62	1827
	4	240		0.35	525	0.944	556	3.32	1847

Ανταγωγή αποτελεσμάτων της δοκιμής PFWD

	Θέση	H ₀ (mm)	H _c (mm)	PFWD-E ₀ (MPa)	IR (°C)	d (mm)	Όρος (h)	sin(πr-18)	sin(πr-14)	5day (°C)	T _{ac} (°C)	E _{avg} (MPa)	E _{avg} (MPa)
H1	3	120	450	974	36.1	40	8.9	-0.853	-0.879	25	28.1	1257	1379
	5	135	450	1118	36.4	45	9.9	-0.853	-0.879	25	29.2	1447	1587
	6	130	450	1101	38.5	43	10.0	-0.868	-0.868	25	29.3	1435	1574
H2	2	180	400	1428	33.6	60	9.2	-0.743	-0.951	25	27.0	1687	1850
	4	185	400	1412	33.6	62	9.2	-0.743	-0.951	25	27.0	1687	1829
	6	184	450	1416	33.8	61	9.3	-0.760	-0.943	25	27.1	1682	1845
H3	2	209		1616	37.6	70	10.3	-0.903	-0.824	25	28.5	2118	2323
	4	205		1603	38.1	68	10.3	-0.903	-0.824	25	29.8	2129	2336
	7	163		1408	38.7	61	10.4	-0.914	-0.808	25	28.2	1826	2003
H4	11	175		1346	37.0	58	10.5	-0.924	-0.793	25	29.5	1770	1942
	2	265	500	2183	37.8	88	11.7	-0.997	-0.566	25	30.1	2951	3236
	4	265	500	2211	41.0	88	11.8	-0.999	-0.545	25	31.8	3200	3510
TM1	10	180	400	1480	40.4	60	12.0	-1.0000	-0.500	25	32.6	2218	2433
	2	90		1115	27.0	30	10.5	-0.9239	-0.793	16	24.8	1202	1319
	3	115		1065	27.0	38	10.6	-0.9288	-0.785	16	24.3	1123	1232
TM2	4	105		1019	27.0	35	10.6	-0.9336	-0.777	16	24.5	1085	1190
	8	125		1154	27.0	42	10.7	-0.9382	-0.769	16	24.1	1210	1327
	2	45		459	27.0	15	12.8	-0.9808	-0.321	16	28.2	570	625
TM3	5	46		435	27.0	15	12.8	-0.9781	-0.308	16	28.2	541	594
	8	45		455	27.0	15	12.9	-0.9753	-0.297	16	28.3	566	621
	10	45		455	27.0	15	12.9	-0.9724	-0.284	16	28.3	567	622
T	2	90		719	27.0	30	15.0	-0.7071	0.259	16	26.1	891	977
	4	130	400	1244	27.0	43	15.1	-0.6976	0.271	16	27.5	1500	1645
	6	130	400	1218	27.0	43	15.1	-0.6884	0.264	16	27.5	1470	1613
TP	8	190	450	1467	27.0	83	15.2	-0.6788	0.297	16	26.9	1723	1889
	10	190	450	1467	27.0	83	15.2	-0.6691	0.309	16	26.9	1726	1893
	3	95	250	1007	28.0	32	15.3	-0.6583	0.321	14	29.3	1310	1437
Φ	8	165	350	1687	28.0	55	15.3	-0.6494	0.334	14	28.5	2120	2326
	1	100		834	30.0	33	15.4	-0.6394	0.346	14	30.7	1153	1294
	4	100		828	31.0	33	15.4	-0.6293	0.358	14	31.5	1184	1298
Φ	1	190		1510	32.0	63	15.6	-0.6191	0.371	14	30.1	2028	2224
	3	230		1827	33.0	77	15.5	-0.6088	0.383	14	30.0	2450	2688
	4	240		1847	34.0	80	15.6	-0.5983	0.395	14	30.5	2526	2770

	Θέση	H _A (mm)	H _D (mm)	Lab-E _A (MPa)	E _{A,23,D} (MPa)
H1	3	120	450	5056	8910
	5	135	450	6947	12243
	6	130	450	5685	10017
H2	2	180	400	6706	11818
	4	185	400	5641	9940
	6	184	450	5730	10097
H3	2	209	0	5455	9812
	4	205	0	4293	7566
	7	183	0	4387	7748
	11	175	0	5230	9216
H4	2	265	500	11268	19892
	4	265	500	10178	17938
	10	180	400	7947	14005
TM1	2	90	0	N/A	N/A
	3	115	0	N/A	N/A
	4	105	0	N/A	N/A
	8	125	0	N/A	N/A
TM2	2	45	0	N/A	N/A
	5	45	0	N/A	N/A
	8	45	0	N/A	N/A
	10	45	0	N/A	N/A
TM3	2	90	0	N/A	N/A
	4	130	400	N/A	N/A
	6	130	400	N/A	N/A
	8	190	450	N/A	N/A
	10	190	450	N/A	N/A
T	3	95	250	N/A	N/A
	8	165	350	N/A	N/A
TP	1	100		N/A	N/A
	4	100		N/A	N/A
Φ	1	190		N/A	N/A
	3	230		N/A	N/A
	4	240		N/A	N/A

Αναγωγή των τιμών που προκύπτουν από τον υδροφόρο υπολογισμό (FWD)

	Θέση	H ₀ (mm)	H ₂ (mm)	MWD-E ₀ (MPa)	IR (°C)	d (mm)	Δρρ (h)	sn(hr-18)	sln(hr-14)	5day (°C)	T ₅₀ (°C)	E _{as} (MPa)	E _{asD} (MPa)
H1	3	120	450	5695	36.1	40	9.8	-0.839	-0.891	25	28.1	7337	9202
	5	135	450	5715	36.4	45	9.9	-0.853	-0.879	25	29.2	7397	9277
	6	130	450	5980	36.5	43	9.9	-0.853	-0.879	25	29.3	7776	9753
H2	2	160	400	6085	33.6	60	9.1	-0.725	-0.859	25	27.0	7184	8009
	4	185	400	6830	33.6	62	9.2	-0.743	-0.951	25	27.0	8067	10116
	6	184	450	4635	33.8	61	9.2	-0.743	-0.951	25	27.1	5501	6899
H3	2	209		4075	37.6	70	10.2	-0.891	-0.839	25	28.4	5332	6687
	4	205		4400	38.1	68	10.2	-0.891	-0.839	25	29.7	5831	7313
	7	183		5380	36.7	61	10.3	-0.903	-0.824	25	29.2	6863	8732
H4	11	175		3455	37.0	68	10.5	-0.924	-0.793	26	29.5	4561	5707
	2	265	500	7455	37.8	88	11.6	-0.895	-0.588	26	30.0	9998	12539
	4	265	500	8525	41.0	88	11.7	-0.897	-0.588	25	31.7	12281	15415
TM1	10	190	400	3780	40.4	60	11.8	-1.000	-0.522	25	32.5	5656	7093
	2	90		4210	24.8	30	17.2	-0.208	0.743	13	28.0	5192	6512
	3	115		6885	25.2	38	17.2	-0.208	0.743	13	28.0	8227	10318
TM2	4	105		8970	25.2	35	17.2	-0.208	0.743	13	28.1	12341	15477
	8	125		12550	24.9	42	17.3	-0.182	0.760	13	27.7	16256	19133
	2	45		13650	27.0	15	16.2	-0.464	0.545	13	31.0	19409	24342
TM3	5	45		12650	26.9	15	16.3	-0.431	0.566	13	31.0	17946	22507
	8	45		14600	26.9	15	16.3	-0.431	0.566	13	31.0	20390	25573
	10	45		12250	26.9	15	16.4	-0.407	0.588	13	31.0	17118	21468
T	2	90		6175	26.0	30	14.0	-0.856	0.000	13	27.2	7355	9225
	4	130	400	3710	26.3	43	14.0	-0.866	0.000	13	26.3	4263	5335
	6	130	400	2645	26.6	43	14.1	-0.853	0.026	13	26.6	3069	3649
TP	8	190	450	2320	26.0	63	14.2	-0.839	0.062	13	25.1	2833	3177
	10	190	450	3080	26.2	63	14.2	-0.839	0.052	13	25.2	3380	4239
	3	95	250	8580	19.6	32	9.5	-0.793	-0.924	14	19.2	7315	9174
Φ	8	165	350	8780	20.5	55	9.6	-0.809	-0.914	14	19.1	8293	10401
	1	100		3615	26.5	33	12.6	-0.988	-0.358	14	26.0	4097	5138
	4	100		3660	27.5	33	12.7	-0.983	-0.334	14	26.8	4289	5379
Φ	1	190		3210	26.0	63	14.9	-0.725	0.233	14	25.9	3615	4534
	3	230		3680	24.5	77	14.9	-0.725	0.233	14	24.6	3818	4788
	4	240		3025	26.5	80	15.0	-0.707	0.256	14	25.7	3381	4240

		Θέση	H _A (mm)	H _D (mm)	HWD-E _{A,23,0} (MPa)	Lab-E _{A,23,0} (MPa)	PFWD-E _{A,23,0} (MPa)
Δίκτυο Χαλκίδης	H1	3	120	450	9202	8910	1379
		5	135	450	9277	12243	1587
		6	130	450	9753	10017	1574
	H2	2	180	400	9009	11818	1850
		4	185	400	10118	9940	1829
		6	184	450	6889	10097	1845
	H3	2	209		6687	9612	2323
		4	205		7313	7566	2336
		7	183		8732	7748	2003
		11	176		5707	9216	1942
	H4	2	265	500	12539	19892	3236
		4	265	500	15415	17936	3510
		10	180	400	7093	14005	2433
Δίκτυο Πελοποννήσου	TM1	2	90		6512	N/A	1319
		3	115		10318	N/A	1232
		4	105		15477	N/A	1190
		8	125		19133	N/A	1327
	TM2	2	45		24342	N/A	625
		5	45		22507	N/A	584
		8	45		25573	N/A	621
		10	45		21468	N/A	622
	TM3	2	90		9225	N/A	977
		4	130	400	5335	N/A	1645
		6	130	400	3849	N/A	1613
		8	190	450	3177	N/A	1889
		10	190	450	4239	N/A	1893
Δίκτυο Θεσσαλίας	T	3	95	250	9174	N/A	1437
		8	165	350	10401	N/A	2328
	TP	1	100		5138	N/A	1264
		4	100		5379	N/A	1298
	Φ	1	190		4534	N/A	2224
		3	230		4788	N/A	2668
		4	240		4240	N/A	2770

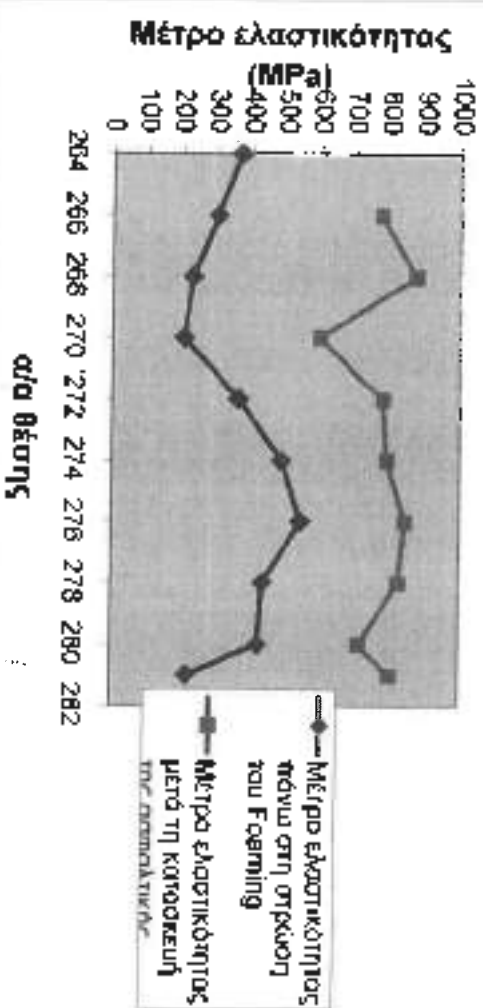
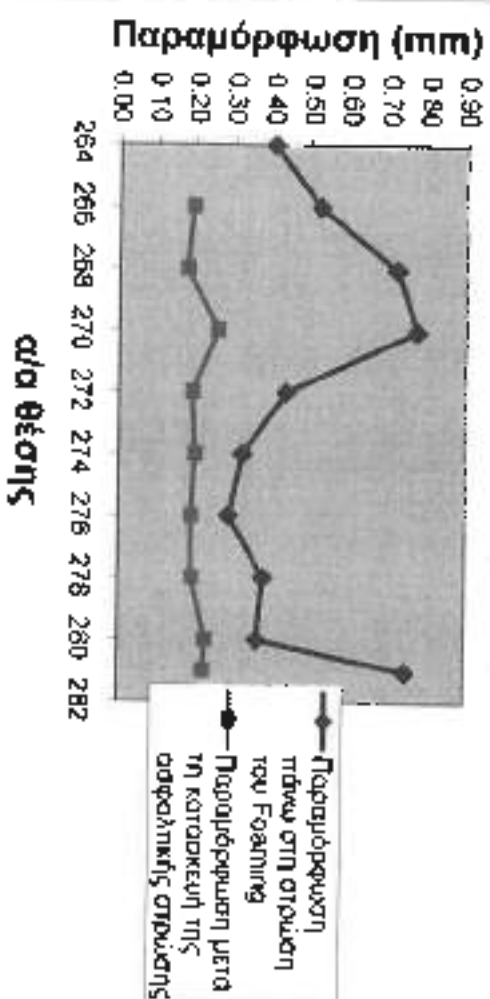
E_{HWD}/E_{NAT}	E_{HWD}/E_{PFWD}	E_{NAT}/E_{PFWD}
1.03	6.67	6.46
0.76	5.85	7.72
0.97	6.20	6.36
0.76	4.87	6.39
1.02	5.53	5.43
0.68	3.74	5.47
0.70	2.88	4.14
0.97	3.13	3.24
1.13	4.36	3.87
0.62	2.94	4.75
0.63	3.87	6.15
0.86	4.39	5.11
0.51	2.92	5.76
N/A	4.94	N/A
N/A	8.38	N/A
N/A	13.00	N/A
N/A	14.42	N/A
N/A	38.94	N/A
N/A	37.92	N/A
N/A	41.16	N/A
N/A	34.50	N/A
N/A	9.44	N/A
N/A	3.24	N/A
N/A	2.39	N/A
N/A	1.68	N/A
N/A	2.24	N/A
N/A	8.38	N/A
N/A	4.47	N/A
N/A	4.06	N/A
N/A	4.14	N/A
N/A	2.04	N/A
N/A	1.78	N/A
N/A	1.53	N/A

Υπολογισμός μέσου μέτρου ελαστικότητας οδοστρώματος E_p

Δίκτυο Χαλκιδικής		Δίκτυο Πελοποννήσου		Δίκτυο Θεσσαλίας						
Θέση	H _a (mm)	H _g (mm)	E _s (MPa)	HWD-E _{a,20,D} (MPa)	Lab-E _{a,20,D} (MPa)	PFWD-E _{a,20,D} (MPa)	HWD-E _p (MPa)	Lab-E _p (MPa)	PFWD-E _p (MPa)	
										T
H1	3	120	450	197	9202	8910	1379	729	718	333
	5	135	450	215	9277	12243	1587	848	978	389
	6	130	450	389	9753	10017	1574	1141	1155	585
H2	2	180	400	324	9009	11818	1650	1403	1645	624
	4	185	400	366	10118	9940	1829	1613	1597	671
	6	184	450	236	6899	10097	1845	874	1211	502
H4	2	265	500	590	12539	19882	3236	2477	3287	1193
	4	265	500	974	15415	17936	3510	3442	3757	1619
	10	180	400	82	7093	14005	2433	719	1150	369
TMS	4	130	400	215	5335	N/A	1648	683	N/A	408
	6	130	400	303	3849	N/A	1616	708	N/A	502
	8	190	450	188	3177	N/A	1693	590	N/A	456
T	10	180	450	334	4239	N/A	1897	907	N/A	625
	3	95	250	394	9174	N/A	1630	1358	N/A	625
	8	165	350	466	10401	N/A	2451	1844	N/A	882

***7. Εθνική Οδός
Κορίνθου – Αθηνών
(Foaming)***

	Μετά την κατασκευή της ασφαλιστικής στρώσης	Πάνω στο Foaming		
α/α θέσης	E (MPa)	d (mm)	E (MPa)	d (mm)
264			368	0.40
266	774	0.19	303	0.52
268	874	0.18	231	0.72
270	597	0.26	206	0.78
272	780	0.19	363	0.44
274	793	0.20	488	0.32
276	846	0.19	545	0.29
278	827	0.19	436	0.38
280	716	0.23	423	0.37
281	806	0.22	219	0.75



Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 264	1	384	0.44
	2	348	0.48
	3	242	0.66
	4	348	0.46
	5	471	0.34
	6	485	0.33
	7	356	0.45
	8	471	0.34
	9	421	0.38
	10	372	0.43
	11	471	0.34
Μέση Τιμή X_u		402	0.413
Τυπική Απόκλιση σ		56	0.051
Συντελεστής Απόκλισης ν		14%	12%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		19	0.017

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 266	1	208	0.77
	2	203	0.79
	3	102	1.57
	4	190	0.84
	5	121	1.32
	6	196	0.82
	7	222	0.72
	8	291	0.55
	9	241	0.76
	10	250	0.84
	11	188	0.86
Μέση Τιμή X_u		202	0.836
Τυπική Απόκλιση σ		38	0.193
Συντελεστής Απόκλισης ν		19%	23%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		13	0.064

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 268	1	205	0.78
	2	276	0.58
	3	229	0.7
	4	193	0.83
	5	213	0.75
	6	320	0.5
	7	162	0.99
	8	198	0.81
	9	327	0.49
	10	302	0.53
	11	262	0.81
Μέση Τιμή X_u		244	0.677
Τυπική Απόκλιση σ		47	0.125
Συντελεστής Απόκλισης ν		19%	18%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		16	0.042

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 270	1	291	0.55
	2	276	0.58
	3	298	0.54
	4	372	0.43
	5	225	0.71
	6	364	0.44
	7	314	0.51
	8	380	0.41
	9	381	0.42
	10	276	0.58
	11	340	0.47
Μέση Τιμή X_u		323	0.506
Τυπική Απόκλιση σ		42	0.067
Συντελεστής Απόκλισης ν		13%	13%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		14	0.022

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 272	1	364	0.44
	2	267	0.6
	3	348	0.46
	4	327	0.49
	5	364	0.44
	6	381	0.42
	7	390	0.41
	8	340	0.47
	9	390	0.41
	10	400	0.4
	11	432	0.37
Μέση Τιμή X_u		367	0.438
Τυπική Απόκλιση σ		25	0.031
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	7%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		8	0.010

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 274	1	372	0.43
	2	485	0.33
	3	340	0.47
	4	533	0.3
	5	562	0.29
	6	500	0.32
	7	516	0.31
	8	500	0.32
	9	471	0.34
	10	457	0.35
	11	381	0.42
Μέση Τιμή X_u		468	0.338
Τυπική Απόκλιση σ		57	0.041
Συντελεστής Απόκλισης ν		12%	12%
Τυπική Απόκλιση της $X_u \cdot \sigma_u$		19	0.014

285στρώμα KA

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 284	1	384	0.44
	2	348	0.46
	3	242	0.66
	4	348	0.46
	5	471	0.34
	6	485	0.33
	7	356	0.45
	8	471	0.34
	9	421	0.38
	10	372	0.43
	11	471	0.34
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		484	0.507
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		327	0.335
Μέση Τιμή X_p		368	0.404
Τυπική απόκλιση σ		28	0.054
Συντελεστής Απόκλισης ν		7%	13%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		11	0.018

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 266	1	206	0.77
	2	203	0.79
	3	102	1.57
	4	190	0.84
	5	121	1.32
	6	195	0.82
	7	222	0.72
	8	291	0.55
	9	241	0.76
	10	250	0.64
	11	186	0.86
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		250	1.148
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		152	0.605
Μέση Τιμή X_p		206	0.775
Τυπική απόκλιση σ		19	0.071
Συντελεστής Απόκλισης ν		9%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		7	0.025

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 268	1	205	0.78
	2	276	0.58
	3	229	0.7
	4	193	0.83
	5	213	0.75
	6	320	0.5
	7	182	0.89
	8	198	0.81
	9	327	0.49
	10	302	0.53
	11	262	0.61
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		295	0.833
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		193	0.543
Μέση Τιμή X_p		231	0.723
Τυπική απόκλιση σ		32	0.097
Συντελεστής Απόκλισης ν		14%	13%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		13	0.037

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 270	1	291	0.55
	2	276	0.58
	3	296	0.54
	4	372	0.48
	5	225	0.71
	6	364	0.44
	7	314	0.51
	8	360	0.41
	9	381	0.42
	10	278	0.58
	11	340	0.47
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		368	0.595
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		273	0.430
Μέση Τιμή X_p		303	0.524
Τυπική απόκλιση σ		33	0.054
Συντελεστής Απόκλισης ν		11%	10%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		14	0.020

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 272	1	384	0.44
	2	287	0.6
	3	348	0.46
	4	327	0.49
	5	364	0.44
	6	381	0.42
	7	390	0.41
	8	340	0.47
	9	390	0.41
	10	400	0.4
	11	432	0.37
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		404	0.502
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		324	0.381
Μέση Τιμή X_p		363	0.438
Τυπική απόκλιση σ		23	0.031
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	7%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		8	0.010

Foaming	Α/Α Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 274	1	372	0.43
	2	485	0.33
	3	340	0.47
	4	533	0.3
	5	552	0.29
	6	500	0.32
	7	516	0.31
	8	500	0.32
	9	471	0.34
	10	457	0.35
	11	381	0.42
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		528	0.407
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		401	0.299
Μέση Τιμή X_p		488	0.324
Τυπική απόκλιση σ		22	0.017
Συντελεστής Απόκλισης ν		4%	5%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		9	0.008

Foaming	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 276	1	571	0.2
	2	500	0.32
	3	552	0.28
	4	640	0.25
	5	667	0.24
	6	471	0.34
	7	593	0.27
	8	457	0.35
	9	533	0.3
	10	533	0.3
	11	533	0.3
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		609	0.328
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		481	0.247
Μέση Τιμή X_p		545	0.288
Τυπική απόκλιση σ		30	0.025
Συντελεστής Απόκλισης ν		5%	9%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		11	0.010

Foaming	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 278	1	410	0.39
	2	314	0.51
	3	457	0.35
	4	410	0.39
	5	271	0.59
	6	254	0.63
	7	457	0.35
	8	444	0.36
	9	471	0.34
	10	444	0.38
	11	421	0.38
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		458	0.517
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		325	0.329
Μέση Τιμή X_p		436	0.381
Τυπική απόκλιση σ		24	0.052
Συντελεστής Απόκλισης ν		6%	14%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		11	0.017

Foaming	A/A Μέτρησης	E mod [MPa]	Deflection [mm]
Βήμα 10m 280	1	471	0.34
	2	381	0.42
	3	267	0.61
	4	390	0.41
	5	432	0.37
	6	471	0.34
	7	390	0.41
	8	593	0.27
	9	302	0.53
	10	471	0.34
	11	552	0.29
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		517	0.485
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		341	0.302
Μέση Τιμή X_p		423	0.365
Τυπική απόκλιση σ		42	0.046
Συντελεστής Απόκλισης ν		10%	13%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		17	0.016

Foaming	5	E mod [MPa]	Deflection [mm]
0 281	1	162	0.89
	2	200	0.8
	3	164	0.87
	4	219	0.73
	5	219	0.73
	6	232	0.69
	7	222	0.72
	8	216	0.74
	9	291	0.55
	10	198	0.81
	11	262	0.61
Μέγιστη αναμενόμενη τιμή, X_{max}		251	0.857
Ελάχιστη αναμενόμενη τιμή, X_{min}		187	0.641
Μέση Τιμή X_p		219	0.749
Τυπική απόκλιση σ		36	0.120
Συντελεστής Απόκλισης ν		16%	16%
Τυπική Απόκλιση της X_m , σ_m		13	0.045