



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ**



ΚΑΤΖΙΛΙΕΡΑΚΗΣ ΑΡΗΣ-ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται και ο κύκλος σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά ορισμένους ανθρώπους οι οποίοι συνέβαλλαν τα μέγιστα για την ολοκλήρωση αυτής της διαδρομής.

Πρωτίστως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος καθώς και για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή της σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Εν συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην κα. Αγγελική Αρμένη για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε, το χρόνο που κατέβαλε και την προθυμία της στο να με κατευθύνει σωστά σε διαφορετικά τμήματα της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να αναφερθώ και να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου και συνέβαλλαν έμπρακτα στην ολοκλήρωση του παρόντος κύκλου της ζωής μου.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, Βίκυ και Νίκο, καθώς και στον αδελφό μου, Νικήτα, για την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν καθώς και για την ανεκτίμητη και συνεχή βοήθεια που μου έχουν προσφέρει καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου.

Κατζιλιεράκης Άρης-Στυλιανός

Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της σωστής συντήρησης ενός οδοστρώματος είναι απαραίτητο να μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση της δομικής κατάστασής του. Το βασικότερο εργαλείο που χρησιμοποιείται στον έλεγχο της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer-FWD). Το FWD παρέχει πληροφορίες οι οποίες μπορούν να δώσουν σαφή εικόνα για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το οδόστρωμα. Μέσω της επεξεργασίας των πληροφοριών αυτών δύναται και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με ευκολία και προσομοιάζει τη διατομή του οδοστρώματος ως έναν ομογενή ημίχωρο παρέχοντας πληροφορίες για τη συνολική κατάσταση της υπό μελέτη οδού. Μέσω του FWD τροφοδοτούνται παράλληλα και οι διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού, οι οποίες ναι μεν παρέχουν σημαντική ακρίβεια και αξιοπιστία για την κατάσταση του οδοστρώματος αλλά είναι αρκετά πολύπλοκες και απαιτούν εξειδικευμένο μηχανικό προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ασφαλή. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνάται η δυνατότητα εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος χωρίς να απαιτούνται πολύπλοκες διαδικασίες. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκαν δεδομένα τα οποία διατέθηκαν από Εργαστήριο Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π. μέσω του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer-FWD) και του Συστήματος Γεωραντάρ-GPR. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν στοιχεία από οδικό τμήμα μήκους 13 χιλιομέτρων για 5 διαφορετικά έτη. Τα στοιχεία αυτά τροφοδότησαν και τις αναλύσεις του ανάστροφου υπολογισμού. Δεδομένων τούτων, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μέτρων ελαστικότητας και η διερεύνηση της μεταξύ τους συσχέτισης. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: οδόστρωμα, φέρουσα ικανότητα, δομική κατάσταση, δείκτες, FWD, Surface Modulus, Back Analysis, ελαστικές υποχωρήσεις, συσχέτιση, στατιστική ανάλυση

ABSTRACT

In the context of proper maintenance of a pavement, it is necessary to be able to assess its structural condition. The most essential tool used in evaluating the structural condition of a pavement is the Falling Weight Deflectometer (FWD). FWD provides information that, if properly utilized, can give a clear picture of the pavement's condition. Through processing this information, the Surface Modulus, which represents the weighted mean modulus of an equivalent half space of a material with uniform modulus, can be easily calculated in the field, providing information about the overall condition of the studied road. The FWD also feeds into the procedures of backcalculation, which, while offering significant accuracy and reliability in assessing pavement condition, are complex and require specialized engineering knowledge to ensure reliable results. In the context of this thesis, the possibility of accurately estimating the elasticity measure of flexible pavements with a standard cross-section, without relying on complex procedures, is investigated. To this end, data collected from the Pavement Engineering Laboratory of the National Technical University of Athens (NTUA) through the Falling Weight Deflectometer (FWD) were utilized. Specifically, data was collected from a 13-kilometer road segment for 5 different years. These data points were also used for the backcalculation analyses. The objective of the thesis is to correlate the Surface Modulus index, which represents the elasticity measure, with the elasticity measure obtained through the backcalculation process. Based on these findings, a comparative evaluation of the aforementioned elasticity measures was conducted, along with an exploration of their correlation. The results and conclusions are presented in this thesis.

Key words: pavement, bearing capacity, structural condition, indexes, FWD, Surface Modulus, Back Analysis, deflections, correlation, statistical analysis

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Στόχος και Μεθοδολογία της διπλωματικής.....	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
2.	ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	4
2.1	Εισαγωγή.....	4
2.2	Το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD).....	5
2.3	Προσδιορισμός Παχών.....	10
2.4	Δείκτες Ελαστικών Υποχωρήσεων.....	12
2.5	Το Μέτρο Ελαστικότητας Surface Modulus	19
2.6	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού	24
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	28
3.1	Γενικά	28
3.2	Καθορισμός διατομής	28
3.3	Αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων.....	30
3.4	Διαχωρισμός οδικών τμημάτων.....	31
3.5	Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus	34
3.6	Συσχετίσεις Αποτελεσμάτων Ανάστροφου υπολογισμού και Surface Modulus	36
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	47
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	50
6.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	52

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους-FWD του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π.....	5
Εικόνα 2.2: Τυπικό προφίλ παραμόρφωσης για κινούμενο τροχό (100 km/h) (Authority, 2000).....	6
Εικόνα 2.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση προκαλούμενων παραμορφώσεων του οδοστρώματος εξαιτίας της παλμικής φόρτισης του FWD συναρτήσει του χρόνου (Authority, 2000).....	6
Εικόνα 2.4: Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD (Λοίζος & Πλατή, 2021).....	7
Εικόνα 2.5: Ψηφιακό θερμόμετρο μέτρησης θερμοκρασίας (Λοίζος & Πλατή, 2021).....	9
Εικόνα 2.6: Η μέθοδος της Πυρηνοληψίας.....	10
Εικόνα 2.7: Το Σύστημα GPR του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ.....	11
Εικόνα 2.8: Ελαστική υποχώρηση και συνήθεις δείκτες αξιολόγησης οδοστρωμάτων του FWD (Plati, et al., 2020).....	12
Εικόνα 2.9: Δείκτης D_0 σε τρία οδικά τμήματα (Λοίζος & Πλατή, 2021).....	16
Εικόνα 2.10: Ζώνες της καμπύλης προφίλ των υποχωρήσεων (deflection bowl) (Horak, July 2007).....	20
Εικόνα 2.11: Παραδείγματα του μέτρου ελαστικότητας δύο διαφορετικών οδοστρωμάτων.....	21
Εικόνα 2.12: Διαγράμματα μέτρου ελαστικότητας οδοστρώματος με στρώση έδρασης μικρού και απείρου πάχους.....	22
Εικόνα 2.13: Ζώνη επιρροής (Horak, July 1987).....	23
Εικόνα 2.14: : Εκτίμηση επιθυμητού μέτρου $E_{0(0)}$ (Tonkin & Taylor, 1998).....	24
Εικόνα 2.15: Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.....	25
Εικόνα 2.16: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού (Λοίζος & Πλατή, 2021).....	26
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα παχών Ασφαλικών Στρώσεων και Βάσης/Υπόβασης.....	29
Εικόνα 3.2: Διατομή πειραματικού οδοστρώματος.....	30
Εικόνα 3.3: Τιμές κεντρικής ελαστικής υποχώρησης D_0 κατά μήκος της οδού.....	33
Εικόνα 3.4: Διαχωρισμός τμημάτων ως προς D_0 βάσει Αθροιστικών Αποκλίσεων.....	33
Εικόνα 3.5: Διάγραμμα μέσης τιμής μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$	35
Εικόνα 3.6: Διάγραμμα μέσης τιμής μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(8)}$	35
Εικόνα 3.7: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_1	36
Εικόνα 3.8: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_2	37
Εικόνα 3.9: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_3	37
Εικόνα 3.10: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας $E_{0(0)}$	38
Εικόνα 3.11: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_1 σε όλο το μήκος της οδού.	38
Εικόνα 3.12: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_1 ασφαλικών στρώσεων.....	39
Εικόνα 3.13: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_2 ενοποιημένης βάσης/υπόβασης.....	40
Εικόνα 3.14: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_3 στρώσης έδρασης.....	40
Εικόνα 3.15: Μέτρα ελαστικότητας E_1 σε όλο το μήκος της οδού.....	43

Εικόνα 3.16: Μέτρα ελαστικότητας E_2 σε όλο το μήκος της οδού	43
Εικόνα 3.17: Μέτρα ελαστικότητας E_3 σε όλο το μήκος της οδού	44
Εικόνα 3.18: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E_1	45
Εικόνα 3.19: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E_2	45
Εικόνα 3.20: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E_3	46

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: : Πίνακας δεικτών δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων (Plati, et al., 2020) ...	13
Πίνακας 2.2: Τιμές Σταθερών	15
Πίνακας 2.3: Κριτήρια αξιολόγησης βάσει D_0 σύμφωνα με Horak (Horak, July 2007).....	17
Πίνακας 2.4: Κριτήριο αξιολόγησης βάσει D_0 σύμφωνα με Hakim & Brown (Hakim & Brown, 2006):.....	18
Πίνακας 2.5: Κριτήριο αξιολόγησης βάσει D_8 σύμφωνα με Authority (Authority, 2000)	18
Πίνακας 2.6: Γενίκευση αποτελεσμάτων βάσει D_0 (Pierce, et al., 2017)	18
Πίνακας 2.7: Συμπεριφορά του οδοστρώματος με βάση το SMD.....	21
Πίνακας 3.1: Στατιστικά στοιχεία για τα πάχη του οδοστρώματος	29
Πίνακας 3.2: Διόρθωση ελαστικών υποχωρήσεων με αναγωγή σε φορτίο και θερμοκρασία αναφοράς του οδοστρώματος (Απόσπασμα)	31
Πίνακας 3.3: Ομογενή τμήματα	34
Πίνακας 3.4: Εξισώσεις Συσχετίσεων	41
Πίνακας 3.5: Απόσπασμα εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας 4 ^{ου} έτους.....	41

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Τα οδοστρώματα αποτελούν αναπόσπαστο σκέλος του συγκοινωνιακού ιστού κάθε κοινωνίας και για αυτό το λόγο επιβάλλεται η ανάγκη για τη διαρκή λειτουργία τους. Βέβαια, στη σύγχρονη εποχή, οι απαιτήσεις ολοένα και αυξάνονται τόσο σε επίπεδο φορτίων που καλούνται να αναλάβουν-καθώς οι διαρκώς αυξανόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες, οι κλιματικές μεταβολές και η τεχνολογική εξέλιξη επηρεάζουν σημαντικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, μέσω διαφόρων φθορών και αστοχιών που εμφανίζονται-όσο και σε επίπεδο επέμβασης η οποία προβλέπεται για τη διασφάλιση της εξυπηρετικότητας των οδοστρωμάτων με τον πιο βέλτιστο τρόπο. Γίνεται επομένως αντιληπτό, ότι το έργο της συντήρησης των οδοστρωμάτων έχει γίνει πιο απαιτητικό και η αξιολόγηση της δομικής κατάστασής τους αποτελεί βασικό κριτήριο.

Η δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος παρέχει πληροφορίες για τη φέρουσα ικανότητά του και την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του, δηλαδή το πλήθος των φορτίων που μπορεί να δεχθεί ένα υφιστάμενο οδόστρωμα προτού αποφασιστούν ενέργειες συντήρησης ή αποκατάστασης. Επομένως, είναι σημαντικό καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης δομικής αξιολόγησης αυτού.

Η προαναφερόμενη δυνατότητα δίνεται μέσα από διάφορες μεθόδους. Ανάμεσα σε αυτές, είναι οι μη καταστρεπτικές δοκιμές. Η πιο διαδεδομένη μη καταστρεπτική μέθοδος αξιολόγησης οδοστρώματος είναι οι μετρήσεις με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer-FWD), το οποίο προσομοιώνει συνθήκες δυναμικής καταπόνησης και καταγράφει τις ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος σε διάφορες αποστάσεις από το σημείο επιβολής του φορτίου.

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το σύστημα FWD αλλά και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίζονται ή μετρούνται επί τόπου (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ.) ενεργοποιείται και η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού (Back-Analysis) με χρήση ειδικών λογισμικών, τα οποία παρέχουν αναλυτικότερες και ακριβέστερες πληροφορίες για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού αποτελεί, όμως, μία εξειδικευμένη και

πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων.

Λόγω της πολυπλοκότητας της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, σε κάποιες περιπτώσεις αντιπροτείνεται η χρήση των δεικτών αξιολόγησης. Οι δείκτες οι οποίοι εξάγονται μέσω του FWD παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη δομική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υπό μελέτη οδόστρωμα. Τέτοιος δείκτης είναι και το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus, το οποίο αποτυπώνει το οδόστρωμα ως ένα ομογενή ημίχωρο φαινομενικής συνολικής δυσκαμψίας εκφράζοντας συνολικά τη μηχανική συμπεριφορά του.

Συνεπώς, προκύπτει ένα ενδιαφέρον στο πώς οι δείκτες, και ιδιαίτερα ο δείκτης Surface Modulus, που εξάγονται μέσω των μετρήσεων με το σύστημα του FWD χρησιμοποιούνται για τη δομική αξιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος σε σχέση και με τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος.

1.2 Στόχος και Μεθοδολογία της διπλωματικής

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η απλοποίηση της αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων με χρήση δεικτών, και ειδικότερα του δείκτη Surface Modulus, που προκύπτουν μέσω του συστήματος FWD χωρίς να απαιτούνται οι διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού.

Η απλοποίηση αυτή αποσκοπεί στην εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων ενός τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος χωρίς να απαιτούνται πολύπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες. Έτσι, μπορεί να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος και να περιοριστεί σημαντικά το κόστος.

Η διερεύνηση για την υλοποίηση των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας κινείται σε δύο άξονες. Ο πρώτος άξονας, αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ανεύρεση δεικτών που υπεισέρχονται στη διαδικασία αξιολόγησης της δομικής κατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Ο δεύτερος άξονας αφορά στην ανάλυση στοιχείων πεδίου με σκοπό την ανάδειξη διαφορών ή συγκλίσεων όσον αφορά στη χρήση του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus ως δείκτη αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος FWD καθώς και οι δείκτες αξιολόγησης οι οποίοι προκύπτουν μέσω του συστήματος αυτού και χρησιμοποιούνται για την κατάταξη της δομικής κατάστασης. Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus καθώς και στη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των στοιχείων πεδίου.

Στο **κεφάλαιο 4** συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο **κεφάλαιο 5** παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, περιλαμβάνεται παράρτημα με τους πίνακες από το στοιχεία που αναλύθηκαν.

2. ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Καθώς τα τελευταία έτη οι απαιτήσεις των χρηστών για μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια των οδοστρωμάτων ολοένα και αυξάνονται, είναι βαρύνουσας σημασίας η εξαγωγή πληροφοριών που παρέχουν τη δυνατότητα δομικής αξιολόγησης ενός οδοστρώματος. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτή η σημασία των μεθόδων που χρησιμοποιούνται προκειμένου να πραγματοποιείται η σωστή αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη των μεθόδων μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing-NDT) δίνει ισχυρά εργαλεία για την επίτευξη του στόχου αυτού.

Ως μη καταστρεπτικές μέθοδοι, οι οποίες πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των παραδοσιακών καταστρεπτικών δοκιμών, αναφέρονται εκείνες οι οποίες εφαρμόζονται σε υφιστάμενα οδοστρώματα για τη συλλογή στοιχείων χωρίς να έχουν καταστρεπτική επίδραση σε αυτά και χωρίς να πραγματοποιείται ιδιαίτερη όχληση της κυκλοφορίας. Για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης νέων και εν λειτουργία οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται εξελιγμένα μη καταστρεπτικά συστήματα (Non Destructive Testing – NDT) με σκοπό την επιτόπου συλλογή πληροφοριών ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υφιστάμενων μιγμάτων ενός οδοστρώματος με δημοφιλέστερο όλων το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους-FWD.

Μέσω της επεξεργασίας των στοιχείων που παρέχονται από το FWD, εξάγονται δείκτες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να περιγράψουν τόσο τη δομική κατάσταση της κάθε στρώσης ξεχωριστά, όσο και της διατομής του οδοστρώματος συνολικά. Ένας από τους δείκτες αυτούς είναι και το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus, ο οποίος υπολογίζει το μέτρο ελαστικότητας της διατομής σε οποιοδήποτε σημείο. Επίσης, μέσω των στοιχείων που παρέχει το FWD τροφοδοτούνται και οι διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού, οι οποίες ναι μεν παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υπό μελέτη οδόστρωμα, αποτελούν, όμως, διαδικασίες πολύπλοκες και εξειδικευμένες.

2.2 Το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Το FWD ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων/συσκευών που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν την ελαστική υποχώρησή του. Η Εικόνα 2.1 παρουσιάζει τη σύγχρονη μορφή του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους-FWD.

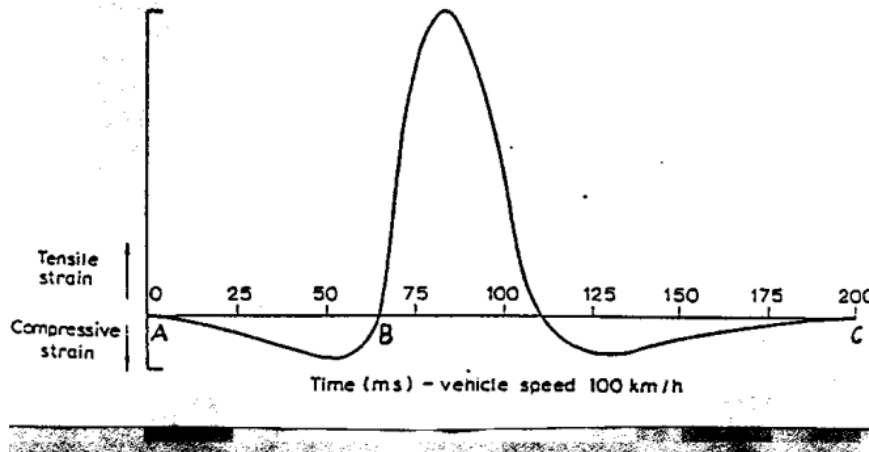


Εικόνα 2.1: Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους-FWD του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π.

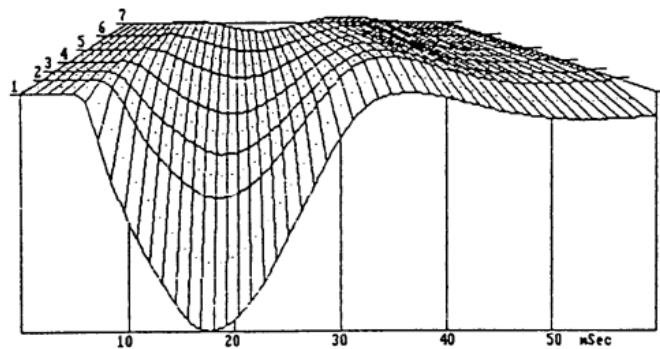
Η βασική του λειτουργία περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα (Λοίζος & Πλατή, 2021).

Οι διαφορές στο σχεδιασμό των κατασκευαστών αφορούν στον τρόπο μετάδοσης των παλμών για το ίδιο φορτίο αιχμής. Ωστόσο, για τα περισσότερα συστήματα FWD ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή της κρούσης έως ότου το παλμικό φορτίο να φτάσει τη μέγιστη τιμή του είναι μεταξύ 5 και 30 χιλιοστών του δευτερολέπτου. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, παρουσιάζει μια ψευδοδυναμική μορφή και προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού. Η Εικόνα 2.2 παρουσιάζει ένα τυπικό προφίλ διαμήκους

καταπόνησης από τροχό οχήματος που κινείται με 100 km/h σε μια ασφαλτική βάση. Ομοίως, η Εικόνα 2.3 δείχνει ένα τυπικό προφίλ ελαστικών υποχωρήσεων από ένα παλμικό φορτίο FWD (Authority, 2000).



Εικόνα 2.2: Τυπικό προφίλ παραμόρφωσης για κινούμενο τροχό (100 km/h) (Authority, 2000)

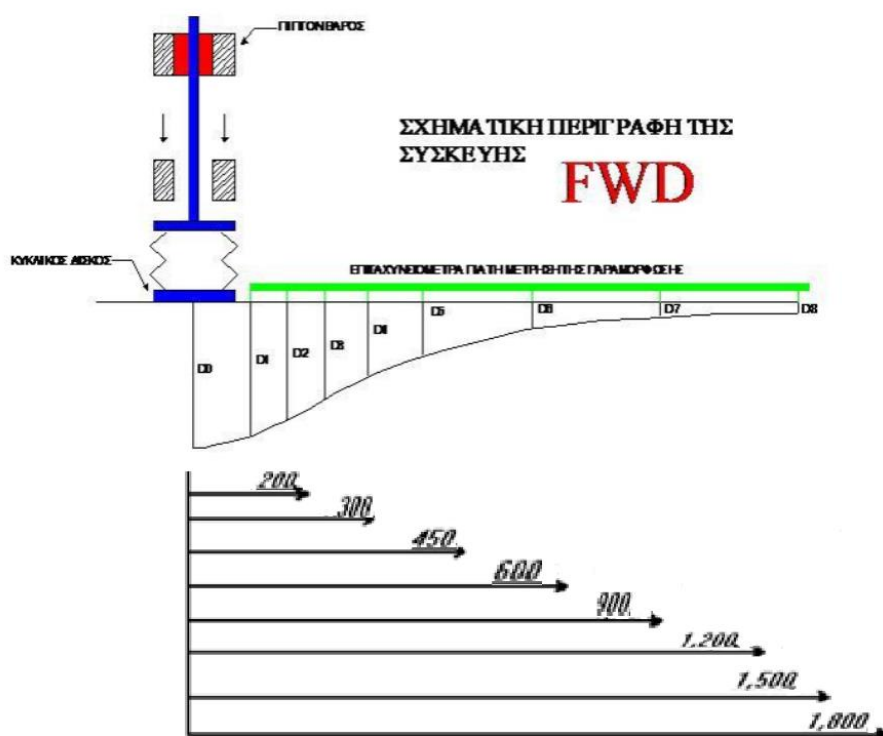


Εικόνα 2.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση προκαλούμενων παραμορφώσεων του οδοστρώματος εξαιτίας της παλμικής φόρτισης του FWD συναρτήσεως του χρόνου (Authority, 2000)

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής FWD, ένα παλμικό φορτίο δημιουργείται ρίχνοντας μια σταθερή μάζα με ελαστικούς προσκρουστήρες μέσω ενός συγκεκριμένου ύψους σε μια πλάκα κρούσης. Το φορτίο μεταδίδεται στο οδόστρωμα μέσω ενός κυκλικού δίσκου διαμέτρου 300mm. Ο κυκλικός δίσκος έχει ένα ελαστικό επίθεμα

προσαρμοσμένο στην επιφάνεια του ώστε να εξασφαλίζεται καλή επαφή με το οδόστρωμα.

Οι υποχωρήσεις του οδοστρώματος που προκύπτουν καταγράφονται από έναν αριθμό γεωφώνων, τα οποία βρίσκονται στον άξονα από το κέντρο του κυκλικού δίσκου. Ένας από τους αισθητήρες βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο προκειμένου να καταγράφεται η κεντρική παραμόρφωση D_0 (Εικόνα 2.4) (Authority, 2000).



Εικόνα 2.4: Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD (Λοίζος & Πλατή, 2021)

Τα περισσότερα συστήματα FWD έχουν εύρος παλμών φορτίου μεταξύ 25 και 120 kN περίπου. Ορισμένα μηχανήματα είναι ικανά να επιτύχουν μεγαλύτερα φορτία, τα οποία μπορεί να απαιτούνται για ειδικές εργασίες όπως για παράδειγμα, εργασίες σε οδοστρώματα αεροδρομίων. Τα αποτελέσματα, στη συνέχεια, ανάγονται στο φορτίο αναφοράς. Το φορτίο αναφοράς που χρησιμοποιείται για την ανάλυση είναι συνήθως είτε 40kN είτε 50kN (Τυπικό Φορτίο Τροχού).

Όσον αφορά στους αισθητήρες παραμόρφωσης είναι απαραίτητο να έχουν τη δυνατότητα ανάγνωσης παραμορφώσεων σε αναλύσεις του 1μm (0,001mm). Ταυτόχρονα, οφείλουν να είναι αρκετά ανθεκτικοί ώστε να αντέχουν τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο. Επίσης, είναι σημαντικό να υπάρχει επαρκής αριθμός

αισθητήρων για να εξασφαλίζεται ότι καταγράφεται η πλήρης επίδραση του παλμικού φορτίου στο οδόστρωμα (Authority, 2000).

Η διαδικασία μετρήσεων με το σύστημα FWD μπορεί να ξεκινήσει αφού έχουν ληφθεί κατάλληλα κυκλοφοριακά μέτρα ασφαλείας αποκλεισμού λωρίδας στην περιοχή μελέτης. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται στη διαδρομή του εξωτερικού τροχού της λωρίδας βαριάς κυκλοφορίας (δεξιά λωρίδα) με φορτίο 50 kN το οποίο εφαρμόζεται κάθε 200 m. Ο λόγος για αυτήν την επιλογή είναι ότι αυτή είναι συνήθως η πρώτη περιοχή που εμφανίζει σημάδια κινδύνου σε ένα οδόστρωμα. Οι εκτροπές καταγράφονται από εννέα αισθητήρες σε ακτινικές αποστάσεις 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 και 1800mm από το κέντρο μιας πλάκας φόρτωσης που έχει ακτίνα 150mm (Plati, et al., 2020).

Τα δεδομένα των δοκιμών καταγράφονται με τη βοήθεια φορητού υπολογιστή εντός του ρυμουλκούμενου οχήματος. Η ακολουθία δοκιμών που περιλαμβάνει τον αριθμό των πτώσεων και τα ύψη πτώσης ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας λογισμικό που παρέχεται με τη συσκευή FWD (Authority, 2000).

Όσον αφορά στη θερμοκρασία, πρέπει να καταγράφεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής και να γίνεται μια διόρθωση, εάν είναι απαραίτητο, στη θερμοκρασία αναφοράς. Το θερμοκρασιακό εύρος για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι 10-25°C.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται ειδική οπή στο οδόστρωμα και εισάγεται ειδικό θερμόμετρο εντός αυτής. Οι οπές αυτές πρέπει να πραγματοποιούνται το λιγότερο 10 λεπτά πριν την καταγραφή θερμοκρασίας προκειμένου να μην επηρεάσει το αποτέλεσμα η θερμοκρασία που παράγεται κατά τη δημιουργία της οπής. Μια σταγόνα γλυκερόλης ή παρόμοιου υγρού συνίσταται ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη θερμική επαφή μεταξύ του θερμομέτρου και του ασφαλικού υλικού. Το σύνολο της διαδικασίας διαρκεί 15 λεπτά και πρέπει να εκτελείται τουλάχιστον κάθε 4 ώρες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Authority, 2000).



Εικόνα 2.5: Ψηφιακό θερμομέτρο μέτρησης θερμοκρασίας (Λοίζος & Πλατή, 2021)

Τα δεδομένα τα οποία καταγράφονται κατά τη διάρκεια των δοκιμών αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου. Τα δεδομένα αυτά είναι τα ακόλουθα (Authority, 2000).

- Αποστάσεις αισθητήρων από το κέντρο
- Διάμετρος πλάκας φόρτωσης
- Αριθμός αισθητήρων
- Όνομα αρχείου προγράμματος
- Όνομα και αριθμός μήκους δοκιμής, οδόστρωμα
- Όνομα χειριστή
- Ημερομηνία έρευνας

Επίσης θα πρέπει να καταγράφονται και τα εξής:

- Τοποθεσία (χιλιομετρική θέση, λωρίδα, εγκάρσια θέση στη λωρίδα)
- Ώρα και ημερομηνία
- Θερμοκρασία του αέρα
- Θερμοκρασία οδοστρώματος
- Φορτίο αιχμής και μέγιστες παραμορφώσεις για κάθε ρίψη που καταγράφεται
- Αριθμός ρίψης
- Σχόλια π.χ. Αριθμός πινακίδας σήμανσης

Κλείνοντας, η μέθοδος πίπτοντος βάρους FWD είναι η επικρατούσα μη καταστρεπτική μέθοδος δομικής αξιολόγησης οδοστρωμάτων και ελέγχου υγείας του οδοστρώματος λόγω των πλεονεκτημάτων που έχει σε αντίθεση με άλλες μη καταστρεπτικές μεθόδους. Ορισμένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που έχει είναι (Smith, et al., March 2017):

- Ρεαλιστική προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης ενός τροχού
- Υψηλή παραγωγικότητα
- Δυνατότητα μέτρησης καμπύλης παραμόρφωσης
- Δυνατότητα μέτρησης φορτίου ρωγμής

Από την άλλη έχει και ορισμένα μειονεκτήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα:

- Υψηλό αρχικό κόστος
- Απαιτήση για κυκλοφοριακές ρυθμίσεις
- Δυσκολία στο χειρισμό λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανολογικού συστήματος.

2.3 Προσδιορισμός Παχών

Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων ενός οδοστρώματος αποτελούν ένα βασικό στοιχείο για την εκτίμηση της δομικής κατάστασής του. Ο παραδοσιακός τρόπος προσδιορισμού του πάχους των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων είναι η λήψη πυρήνων (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Η μέθοδος της Πυρηνοληψίας

Το πλεονέκτημα της μεθόδου πυρηνοληψίας είναι ότι δίνει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα ως προς τον υπολογισμό των παχών των επιμέρους στρώσεων. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι ότι απαιτείται η εξαγωγή πυρήνων, διαδικασία η οποία καταστρέφει τη δομή και την συνέχεια του οδοστρώματος στο σημείο της πυρηνοληψίας. Επίσης, απαιτεί μεγάλο κόστος και παρέχει πλήρη, πλην όμως σημειακή, πληροφόρηση της κατάστασης του οδοστρώματος.

Ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας ενός οδοστρώματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και με μη καταστρεπτικές δοκιμές (NDT) όπως με γεωφυσικές

μεθόδους, δηλαδή με χρήση συστήματος γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar: GPR). Το Σύστημα GPR είναι ένα υψηλής τεχνολογίας σύστημα επιτόπου μη καταστρεπτικών ελέγχων-NDT, το οποίο καταγράφει συνεχόμενα τη στρωματογραφία του οδοστρώματος και αποσκοπεί στον καθορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος καθώς και στον εντοπισμό τυχόν ανομοιογένειας είτε στο οδόστρωμα είτε στην στρώση έδρασης. Η επεξεργασία και ανάλυση των υπόψη καταγραφών πρακτικά οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων, ανά πολύ μικρές αποστάσεις, με σημαντική ακρίβεια. Κατά συνέπεια πλεονεκτεί σε σχέση με τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες παραδοσιακές μεθόδους, όπως η λήψη πυρήνων, για τον προσδιορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος.

Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων που συλλέγονται με το σύστημα γεωραντάρ γίνεται με χρήση κατάλληλων λογισμικών. Σημαντικός παράγοντας κατά τη διαδικασία της ανάλυσης για την ακρίβεια των σχετικών αποτελεσμάτων είναι η εμπειρία του αναλυτή. Γενικά, το υπόψη σύστημα επιτρέπει μια αρκετά ταχεία συλλογή στοιχείων, αλλά η ανάλυση αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, της οποίας όσο αυξάνεται η ακρίβεια, αυξάνεται και η διάρκεια και επίσης απαιτεί εμπειρία και εξειδίκευση του αναλυτή. Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των παχών των στρώσεων ενός οδοστρώματος είναι απαραίτητο κριτήριο για την αξιολόγηση του οδοστρώματος, αλλά και για τον προσδιορισμό της συμβολής των στρώσεων στη δομική του αντοχή. Κατ' επέκταση αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος (Λοίζος & Πλατή, 2021).



Εικόνα 2.7: Το Σύστημα GPR του Εργαστηρίου Οδοστρώματων του ΕΜΠ

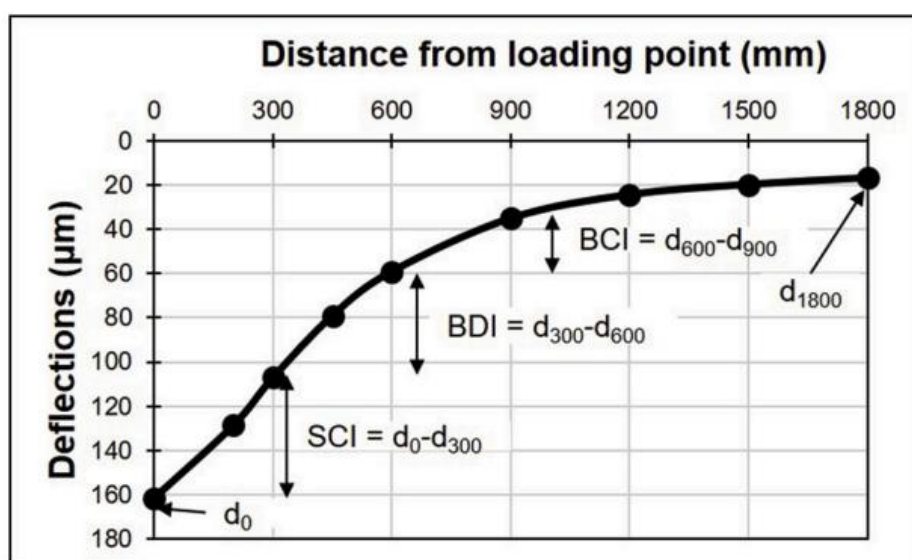
2.4 Δείκτες Ελαστικών Υποχωρήσεων

2.4.1.1 Γενικά

Η χρήση δεδομένων παραμόρφωσης με βάση το FWD για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων εμπίπτει γενικά σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη από αυτές είναι μια ανάλυση πρώτου επιπέδου που περιλαμβάνει αξιολόγηση παραμέτρων με βάση την εκτροπή (Deflection-Based Parameters-DBPs), η οποία είναι η πλέον κατάλληλη για προσεγγίσεις σε επίπεδο δικτύου. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν αρκετούς δείκτες (Εικόνα 2.8). Επίσης, παρουσιάζεται μια λίστα με τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες μαζί με την περιοχή του οδοστρώματος για την οποία παρέχουν ενδείξεις της δομικής κατάστασης (Πίνακας 2.1).

Για τη δεύτερη κατηγορία, οι παραμορφώσεις FWD χρησιμοποιούνται, σε μια ανάλυση δεύτερου επιπέδου, ως δεδομένα εισόδου (σε συνδυασμό με τα πάχη των στρώσεων) στη μέθοδο του ανάστροφου υπολογισμού με σκοπό τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υλικού οδοστρώματος που θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για τις αποκρίσεις του οδοστρώματος. Πέραν αυτού, οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των τάσεων και των παραμορφώσεων οι οποίες είναι απαραίτητες για τη δομική ανάλυση ή τον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Καθώς πρόκειται για μια πιο εις βάθος ανάλυση, είναι καταλληλότερη για αξιολόγηση σε επίπεδο έργου, που απαιτείται για παράδειγμα σε έργα πιθανής, αποκατάστασης οδοστρώματος (Plati, et al., 2020).



Εικόνα 2.8: Ελαστική υποχώρηση και συνήθεις δείκτες αξιολόγησης οδοστρωμάτων του FWD (Plati, et al., 2020)

Πίνακας 2.1: : Πίνακας δεικτών δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων (Plati, et al., 2020)
Deflection based parameters (DBPs).

No	Indexes	Mathematical expression	Comments
1	Central (maximum) deflection: d_0 [μm]	–	Overall pavement condition
2	Surface Curvature Index (SCI) [μm]	d_0-d_{300}	Surface layer condition
3	Base Damage Index (BDI) [μm]	$d_{300}-d_{600}$	Intermediate layers condition
4	Base Curvature Index (BCI) [μm]	$d_{600}-d_{900}$	Intermediate layers condition
5	AREA parameter (AREA) [dimensionless]	6 $(d_0+2d_{300}+2d_{600}+d_{900})/d_0$	Overall pavement condition
6	Area Under Pavement Profile (AUPP) [μm]	$0.5(5d_0-2d_{300}-2d_{600}-d_{900})$	Upper layers pavement condition
7	Deflection at the outer geophone: d_{1800} [μm]	–	Subgrade condition

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι χρησιμοποιώντας κατάλληλα τις πληροφορίες που παρέχονται μέσω του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους-FWD δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης διαφορετικών στρώσεων και χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην απλοποίηση της αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων με χρήση κατάλληλων δεικτών.

2.4.1.2 Ορισμοί

➤ **Δείκτης D_0**

Ο δείκτης D_0 , ο οποίος αναφέρεται στην κεντρική ελαστική υποχώρηση, εκφράζει τη συνολική κατάσταση ενός οδοστρώματος από άποψη δομικής αντοχής. Μικρές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν, γενικά, ότι το οδόστρωμα είναι ισχυρό. Αντίστοιχα, μεγάλες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι πρόκειται για ένα ασθενές οδόστρωμα. Σημειώνεται ότι υπάρχουν και εξειδικευμένοι επιμέρους δείκτες, οι οποίοι δεν εκφράζουν τη συνολική κατάσταση του οδοστρώματος, αλλά την κατάσταση μέρους αυτού (π.χ. κατάσταση ανώτερων στρώσεων οδοστρώματος, στρώσης έδρασης, κλπ.) (Λοίζος & Πλατή, 2021).

➤ **Αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων**

Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το σύστημα FWD εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων. Το φορτίο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται ως φορτίο αναφοράς (P_{target}). Κατά την εκτέλεση όμως των δοκιμών παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις οι οποίες καταγράφονται και για αυτό το

λόγο απαιτείται αναγωγή των αποτελεσμάτων στο φορτίο αναφοράς $D_0(P_{target})$ με τη βοήθεια της σχέσης (Λοίζος & Πλατή, 2021):

$$D_0(P_{target}) = D_0(P) * \frac{P_{target}}{P} \quad (2.1)$$

Όπου:

- $D_0(P)$: Μέτρηση D_0 σε φορτίο P
- P : Φορτίο στο οποίο έχει γίνει η μέτρηση
- $D_0(P_{target})$: Αναγωγή D_0 στο φορτίο αναφοράς (P_{target})

Για παράδειγμα, για την περίπτωση που το φορτίο αναφοράς είναι 50kN η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$D_0(50kN) = D_0(P) * \frac{50}{P} \quad (2.1)$$

Η θερμοκρασία στο σώμα των ασφαλτικών στρώσεων επηρεάζει σημαντικά τις ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει το σύστημα FWD. Διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε ένα οδικό τμήμα, αλλά και όταν διακόπτονται οι μετρήσεις και συνεχίζονται άλλη μέρα. Κατά συνέπεια, για να είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγησή τους, πρέπει να γίνεται αναγωγή του δείκτη D_0 που προκύπτει από τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις σε μία θερμοκρασία αναφοράς.

Ο δείκτης D_0 μπορεί να αναχθεί σε μία επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς με χρήση κατάλληλων συντελεστών. Παρακάτω αναφέρεται ένας διεθνώς και ευρύτατα χρησιμοποιούμενος συντελεστής διόρθωσης του δείκτη D_0 στη θερμοκρασία των 20°C (TNF: Temperature Normalization Factor), που προκύπτει από τη σχέση (Λοίζος & Πλατή, 2021):

$$TNF = 1 + \left(a_1 + \frac{a_2}{h_1}\right) * (TA - 20) + \left(a_3 + \frac{a_4}{h_1}\right) * (TA - 20)^2 \quad (2.3)$$

Όπου:

- TNF: συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

- T_A : θερμοκρασία στο μέσο του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων ($^{\circ}\text{C}$)
- h_1 : πάχος ασφαλτικών στρώσεων (mm)
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: σταθερές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2

Πίνακας 2.2: Τιμές Σταθερών

Ελαστική Υποχώρηση	Σταθερές			
	α_1 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	α_2 (mm/ $^{\circ}\text{C}$)	α_3 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	α_4 (mm/ $^{\circ}\text{C}$)
D_0	0.01661	-0.67095	0.00028612	-0.01408

Όπου:

- D_0 : η μέγιστη ελαστική υποχώρηση

Τελικά, η διορθωμένη τιμή της υποχώρησης προκύπτει από την Εξίσωση 2.4:

$$D_0(20^{\circ}\text{C}) = \frac{D_0(T)}{TNF} \quad (2.4)$$

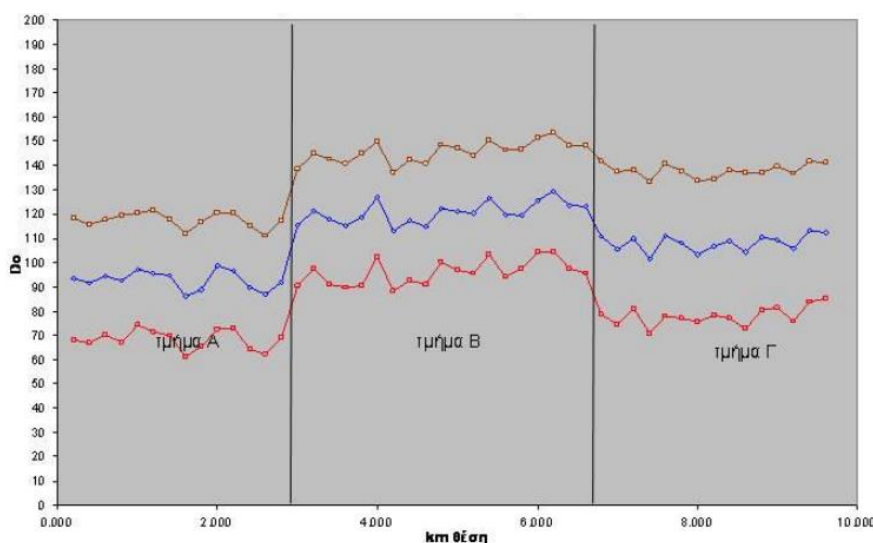
Όπου:

- $D_0(T)$: Μέτρηση D_0 σε θερμοκρασία T
- T : Θερμοκρασία αναφοράς 20°C
- $D_0(20^{\circ}\text{C})$: Αναγωγή D_0 στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C
- TNF : Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

Σημειώνεται, ότι πραγματοποιείται πρώτα η διόρθωση του δείκτη D_0 ως προς το φορτίο και η νέα τιμή που προκύπτει διορθώνεται στη συνέχεια ως προς τη θερμοκρασία αναφοράς.

Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι η χρήση του δείκτη δομικής αντοχής έχει κυρίως την έννοια της σύγκρισης και της ιεράρχησης (ranking) ως προς τη δομική κατάσταση διαφόρων τμημάτων μεταξύ τους, τα οποία έχουν ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (πάχη επιμέρους στρώσεων, χρόνος λειτουργίας, κυκλοφορικά δεδομένα) (Εικόνα 2.9). Επίσης, με την πάροδο του χρόνου και τις επαναληπτικές μετρήσεις σε κάποιο οδικό τμήμα, συλλέγονται στοιχεία σχετικά με την εξέλιξη της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, μέσω της ποσοστιαίας αύξησης των αντίστοιχων δεικτών. Επιπλέον, μπορεί να εντοπιστεί κάποιο επιμέρους τμήμα με μειωμένη φέρουσα

ικανότητα, όπου θα πρέπει να γίνουν πυκνότερες μετρήσεις και αξιολόγηση (Λοίζος & Πλατή, 2021).



Εικόνα 2.9: Δείκτης D_0 σε τρία οδικά τμήματα (Λοίζος & Πλατή, 2021)

➤ D_8

Ο δείκτης D_8 , ο οποίος αναφέρεται στην ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 1800mm από το κέντρο της φόρτισης, συνδέεται με τη δομική κατάσταση της στρώσης έδρασης. Χαμηλές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν μια ισχυρή στρώση έδρασης. Στην περίπτωση που το διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη D_8 έχει παρόμοιο σχήμα με το σχήμα του διαγράμματος του δείκτη D_0 τότε συμπεραίνεται ότι η στρώση έδρασης έχει μεγάλη επιρροή στη συνολική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος (Authority, 2000).

2.4.1.3 Κριτήρια αξιολόγησης βάσει δεικτών

Αυτό είναι το απλούστερο επίπεδο που περιλαμβάνει τη σύγκριση των μετρούμενων παραμορφώσεων μέσω του συστήματος FWD, κάτω από ένα δεδομένο φορτίο, με διάφορα προκαθορισμένα επίπεδα για διαφορετικές ιεραρχίες δρόμων και τύπους οδοστρώματος, προκειμένου να περιγραφεί ποιοτικά η κατάσταση του οδοστρώματος. Αυτή η προσέγγιση δεν απαιτεί μεθόδους ανάστροφου υπολογισμού και κατατάσσει το οδόστρωμα, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μελέτες, με βάση τη δομική κατάσταση σε :

- εξαιρετική
- πολύ καλή

- καλή
- μέτρια
- κακή
- πολύ κακή ποιότητα

Αρχικά, στον Πίνακα 2.3 κατατάσσεται η δομική κατάσταση του οδοστρώματος με βάση το δείκτη D_0 . Σύμφωνα με τον πίνακα αυτό η δομική κατάσταση του οδοστρώματος κρίνεται ως υγιής (sound), προειδοποιητική (warning) ή σοβαρή (severe). Τα όρια του κάθε δείκτη διαφέρουν ανάλογα με το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένη η βάση του οδοστρώματος (βάση από κοκκώδες υλικό, βάση από τσιμέντο ή ασφαλτική βάση). Ο πίνακας εφαρμόζεται για ελαστικές υποχωρήσεις που αντιστοιχούν σε φορτίο αναφοράς 40 KN (Horak, July 2007).

Πίνακας 2.3: Κριτήρια αξιολόγησης βάσει D_0 σύμφωνα με Horak (Horak, July 2007)

	Structural Condition Rating	Deflection bowl parameters
		D_0 (μm)
Granular Base	Sound	<500
	Warning	500-750
	Severe	>750
Cementitious Base	Sound	<200
	Warning	200-400
	Severe	>400
Bituminous Base	Sound	<400
	Warning	400-600
	Severe	>600

Ένας άλλος τρόπος αξιολόγησης με τον οποίο μπορεί να γίνει χαρακτηρισμός της κατάστασης ενός οδοστρώματος χρησιμοποιώντας το δείκτη D_0 είναι ο Πίνακας 2.4. Επισημαίνεται ότι έχει προηγηθεί αναγωγή των ελαστικών υποχωρήσεων στο φορτίο αναφοράς των 40kN (Hakim & Brown, 2006).

Πίνακας 2.4: Κριτήριο αξιολόγησης βάσει D_0 σύμφωνα με Hakim & Brown (Hakim & Brown, 2006):

ΔΕΙΚΤΗΣ D_0 (microns)	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ
< 100	Εξαιρετική
100-150	Πολύ Καλή
150-200	Καλή
200-250	Μέτρια
250-300	Κακή
>300	Πολύ Κακή

Αντίστοιχα, αξιολόγηση με βάση το δείκτη D_8 για τη στρώση έδρασης παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5, με τις τιμές του πίνακα ισχύουν για φορτίο εφαρμογής 40 kN.

Πίνακας 2.5: Κριτήριο αξιολόγησης βάσει D_8 σύμφωνα με Authority (Authority, 2000)

D_8 (microns)	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ
<10	Πολύ Δύσκαμπτη
10-20	Δύσκαμπτη
20-30	Δύσκαμπτη προς Μέτρια
30-40	Μέτρια προς Αδύναμη
40-50	Αδύναμη
>50	Πολύ Αδύναμη

Αντίστοιχα, ο Πίνακας 2.6 παρουσιάζει αξιολόγηση με βάση το δείκτη D_0 , με τις τιμές του πίνακα να έχουν αναχθεί για φορτίο εφαρμογής 40 kN.

Πίνακας 2.6: Γενίκευση αποτελεσμάτων βάσει D_0 (Pierce, et al., 2017)

Τιμή Δείκτη D_0	Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων
Χαμηλή	Ασθενής δομική κατάσταση, καλή στρώση έδρασης
Υψηλή	Ασθενής δομική κατάσταση, ασθενής στρώση έδρασης
Χαμηλή	Καλή δομική κατάσταση, καλή στρώση έδρασης
Υψηλή	Καλή δομική κατάσταση, ασθενής στρώση έδρασης

2.5 Το Μέτρο Ελαστικότητας Surface Modulus

Ένα άλλο δεδομένο το οποίο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και υπολογίζεται από τα στοιχεία καταγραφής του FWD κατά την διάρκεια των μετρήσεων είναι το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus. Ως Surface Modulus ορίζεται το σταθμισμένο μέσο μέτρο ελαστικότητας (weighted mean modulus) ενός ισοδύναμου ομογενούς ημίχωρου και συμβολίζεται με $E_{0(r)}$. Με αυτόν το τρόπο γίνεται η παραδοχή μιας φαινομενικής συνολικής δυσκαμψίας (overall apparent stiffness) σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο φόρτισης. Το μέτρο $E_{0(r)}$ υπολογίζεται από τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις με τη βοήθεια των σχέσεων του Boussinesq:

$$E_{0(r)} = \frac{(1-\mu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot D(r)} \quad (2.5)$$

Όπου:

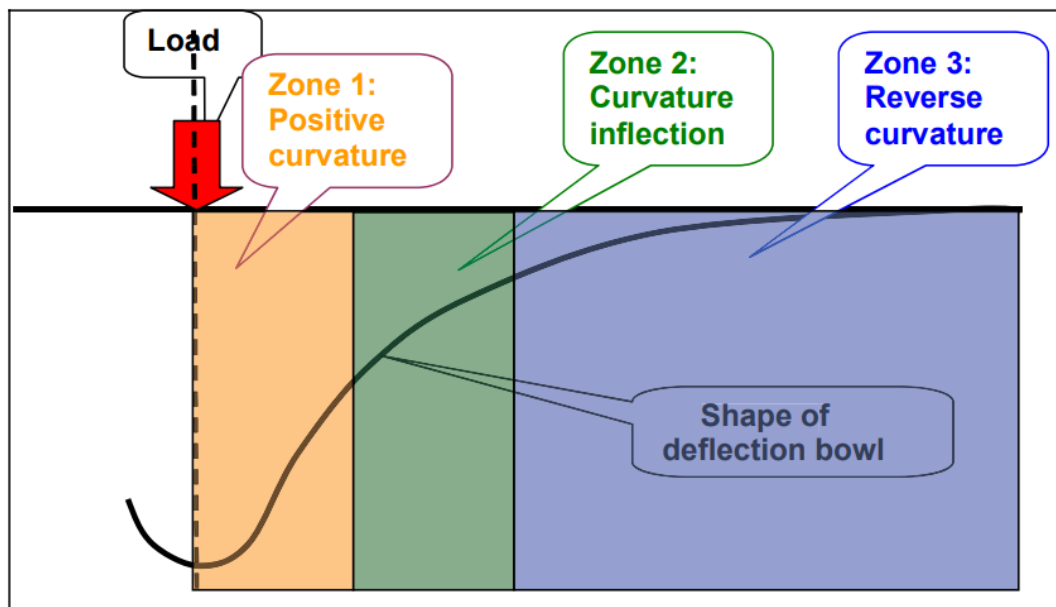
- $E_{0(r)}$ = το μέτρο E_0 σε απόσταση r από το κέντρο του κυκλικού δίσκου,
- $\mu = 0$ λόγος Poisson (συνήθως παίρνει την τιμή 0.35)
- σ_0 = η πίεση επαφής κάτω από τον κυκλικό δίσκο
- a = η ακτίνα του κυκλικού δίσκου
- $D_{(r)}$ = η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση r από το κέντρο του κυκλικού δίσκου

Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus, όσον αφορά στην κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 , συμβολίζεται ως $E_{0(0)}$ και υπολογίζεται με την εφαρμογή της σχέσης:

$$E_{0(0)} = \frac{2 \cdot (1-\mu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{D(0)} \quad (2.6)$$

Κατά τη διάρκεια επιβολής φορτίου τροχού σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα η ζώνη επιρροής επεκτείνεται σε μήκος μέχρι και 2.0 μέτρα μακριά από το σημείο εφαρμογής. Επομένως, σχηματίζεται το προφίλ των υποχωρήσεων σε μορφή καμπύλης (deflection bowl) του οποίου το σχήμα διαφέρει ανάλογα με το φορτίο, το είδος του οδοστρώματος, τη διάρκεια επιβολής του φορτίου, τη θερμοκρασία κ.α. Η Εικόνα 2.10 απεικονίζει την καμπύλη του προφίλ των υποχωρήσεων, η οποία μπορεί να περιγραφεί από τρεις διαφορετικές ζώνες:

- Η ζώνη 1 η οποία βρίσκεται κοντά στο κέντρο του φορτίου σε απόσταση περίπου μέχρι και 300mm σχηματίζει ένα κυρτό σχήμα με θετική καμπυλότητα.
- Η ζώνη 2 ορίζεται από το σημείο όπου αλλάζει η κλίση του σχήματος και η καμπυλότητα γίνεται αρνητική. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ζώνη 2 κυμαίνεται από τα 300 έως τα 600mm από το σημείο εφαρμογής του φορτίου.
- Τέλος, η τρίτη και τελευταία ζώνη βρίσκεται σε απόσταση που κυμαίνεται από τον κυκλικό δίσκο φόρτισης από 600mm μέχρι και 2.00m ανάλογα με τον αριθμό των γεωφώνων που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή.



Εικόνα 2.10: Ζώνες της καμπύλης προφίλ των υποχωρήσεων (deflection bowl) (Horak, July 2007)

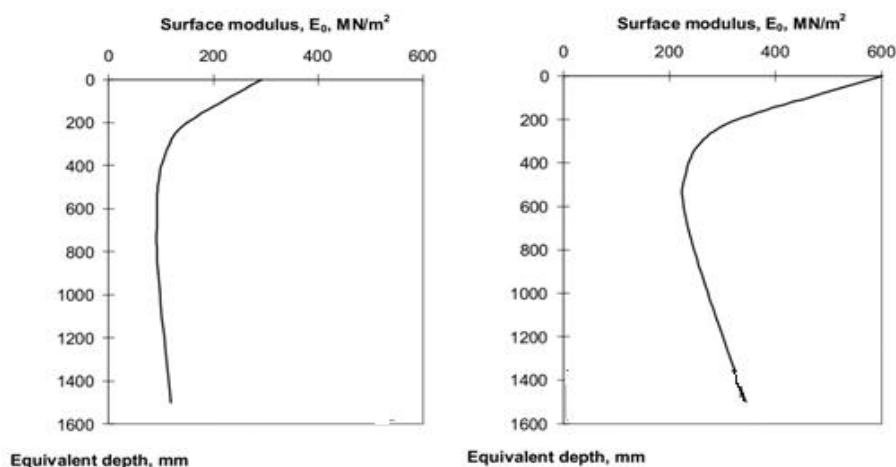
Με βάση τα παραπάνω ο Ullidtz (1987) προσδιόρισε ότι η κλίση των μέτρων ελαστικότητας (Surface Modulus) σε σχέση με την απόσταση που καθορίζεται από τις ζώνες 2 και 3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να δείξει εάν η στρώση έδρασης παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά ή εάν η συμπεριφορά της διαφοροποιείται ανάλογα με την τάση (stress hardening, stress softening ή linear). Με αυτόν τον τρόπο δύναται η περιγραφή της στρώσης έδρασης, κάτι που είναι ιδιαίτερως σημαντικό, ειδικότερα στην περίπτωση που χρειαστούν αναλυτικότεροι υπολογισμοί.

Η παραπάνω συμπεριφορά υπολογίζεται μέσω της διαφοράς των μέτρων ελαστικότητας (SMD-Surface Modulus Differential). Συγκριμένα, υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας σε απόσταση 600mm και 1200mm. Ο Πίνακας 2.7 παρουσιάζει τη συμπεριφορά του οδοστρώματος ανάλογα με την τιμή του SMD (Horak, 2008).

Πίνακας 2.7: Συμπεριφορά του οδοστρώματος με βάση το SMD

Συμπεριφορά του οδοστρώματος	Εύρη Τιμών SMD (Mpa)
Stress softening	>20
Linear elastic	20 έως -20
Stress stiffening	<-20

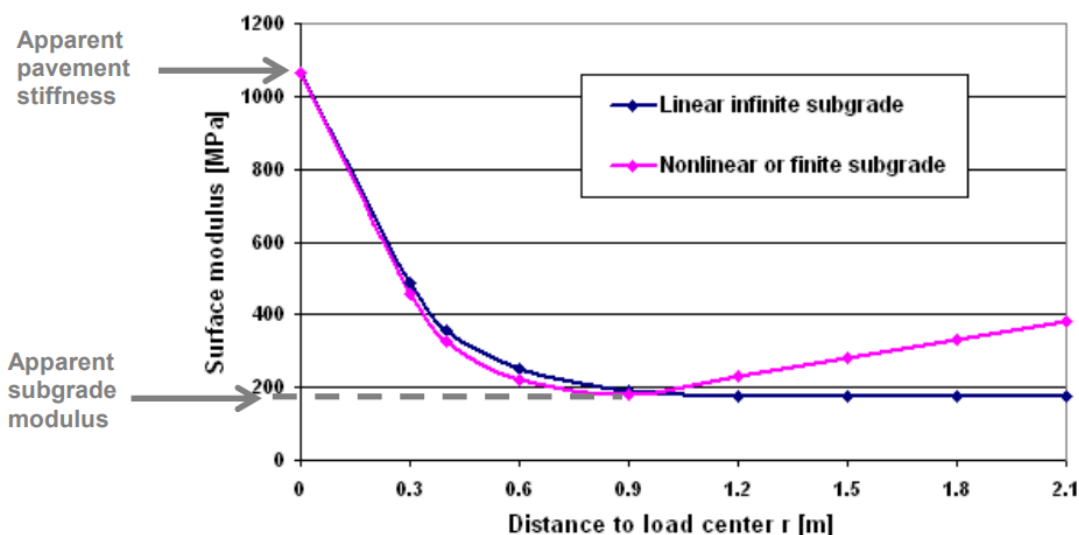
Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα μέτρου ελαστικότητας από δύο διατομές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στην αριστερή εικόνα παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ καθώς μειώνεται το βάθος. Αυτό σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας των κατώτερων στρώσεων είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό των ανώτερων και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης είναι περίπου 100MPa. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται οδόστρωμα με μαλακή ενδιάμεση στρώση (soft interlayer) μεταξύ των ανώτερων στρώσεων και της στρώσης έδρασης. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης είναι περίπου 300MPa και το μέτρο ελαστικότητας της ενδιάμεσης στρώσης είναι περίπου 150 MPa (Authority, 2000).



Εικόνα 2.11: Παραδείγματα του μέτρου ελαστικότητας δύο διαφορετικών οδοστρωμάτων

Επιπλέον, σύμφωνα με τον Ullidtz (1987) προτείνεται να μελετάται η γενική τάση της εξέλιξης της καμπύλης του μέτρου ελαστικότητας $E_{0(r)}$ σε σχέση με την απόσταση από το σημείο εφαρμογής του φορτίου προκειμένου να ανιχνευθούν τυχόν μη γραμμικές συμπεριφορές του υλικού της στρώσης έδρασης.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.12 η καμπύλη μπορεί να έχει δύο πιθανές μορφές. Εάν η καμπύλη παρουσιάζει οριζόντια ασύμπτωτη, η βάση-υπόβαση μπορεί στην πραγματικότητα να θεωρηθεί ως γραμμική και άπειρης έκτασης. Ωστόσο, μία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, δεν είναι απαραίτητο ότι αναπαριστά μια μη γραμμικότητα υλικού. Στην πραγματικότητα, εάν η στρώση έδρασης έχει μικρό πάχος πιθανότητα θα υπήρχε το ίδιο αποτέλεσμα.



Εικόνα 2.12: Διαγράμματα μέτρου ελαστικότητας οδοστρώματος με στρώση έδρασης μικρού και απείρου πάχους

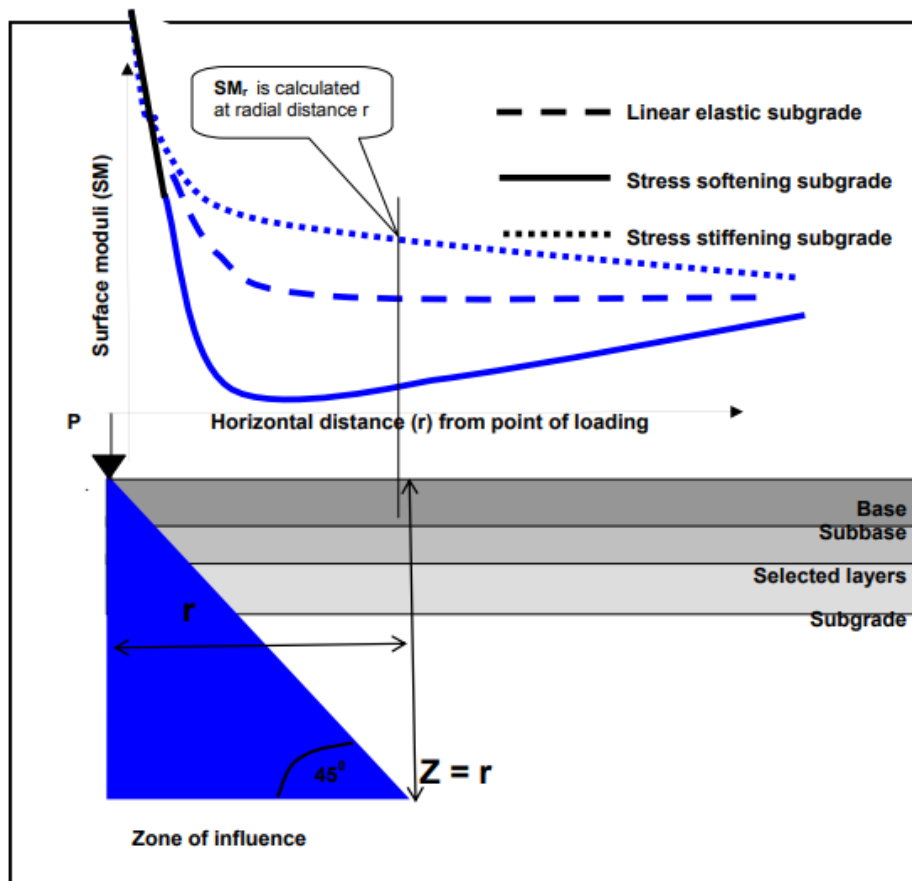
Προτείνεται, λοιπόν, να εκτελούνται συστηματικά ορισμένες επιπλέον μετρήσεις σε ορισμένα σημεία δοκιμής με διαφορετικό φορτίο για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Από τα δεδομένα αυτά θα καταστεί εφικτό να αποφασιστεί εάν η παρατηρούμενη αύξηση του συντελεστή οφείλεται στη μη γραμμικότητα του υλικού ή στο ρηχό του υπόβαθρο (Broutin, 2010).

Επομένως, το μέτρο ελαστικότητας $E_{0(r)}$ μπορεί να παρέχει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Tonkin & Taylor, 1998):

- Μια εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης
- Άμεσο προσδιορισμό του εάν η στρώση έδρασης ακολουθεί ελαστικά γραμμική συμπεριφορά ή όχι
- Επιβεβαίωση της επάρκειας των ρυθμίσεων των γεωφώνων.

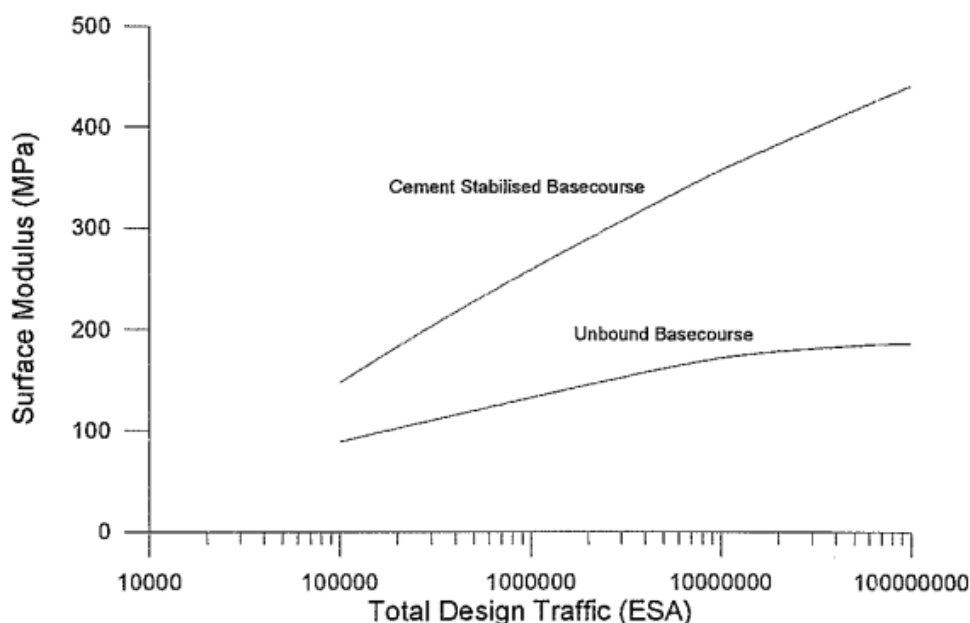
Η στρώση έδρασης συνεισφέρει περίπου στο 60-80% της κεντρικής υποχώρησης (D_0). Το φορτίο που ασκείται στο οδόστρωμα από το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους μεταφέρεται στις υποκείμενες στρώσεις υπό γωνία, περίπου, 45°

σχηματίζοντας μια κωνική επιφάνεια. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.13 το μέτρο ελαστικότητας το οποίο υπολογίζεται για απόσταση r αναπαριστά το συμπιεσμένο ομογενή ημίχωρο με ζώνη επιρροής βάθους Z . Επομένως, όσο αυξάνεται η οριζόντια απόσταση φτάνουμε σε σημείο που η ζώνη επιρροής επηρεάζει μόνο τη στρώση έδρασης και στο σημείο αυτό ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας αναπαριστά τη δομική κατάσταση της στρώση έδρασης (Horak, 2008).



Εικόνα 2.13: Ζώνη επιρροής (Horak, July 1987)

Πρώμη εκτίμηση της δομικής κατάστασης γίνεται και μέσω του διαγράμματος στην Εικόνα 2.14. Έχοντας ως δεδομένο τον κυκλοφοριακό φόρτο ενός οδικού άξονα εκφρασμένο σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες ITA (ESAL: : Equivalent Standard Axle Load) καθώς και το είδος της βάσης του οδοστρώματος (βάση από ασύνδετο υλικό ή βάση σταθεροποιημένη με τσιμέντο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι καμπύλες του διαγράμματος προκειμένου να εκτιμηθεί η τιμή του $E_{0(0)}$ (MPa). Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την τιμή που έχει υπολογιστεί από τις δοκιμές FWD και με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν κατά προσέγγιση τα επίπεδα επέμβασης στα οποία θα απαιτηθεί επίστρωση.



Εικόνα 2.14: : Εκτίμηση επιθυμητού μέτρου $E_{0(0)}$ (Tonkin & Taylor, 1998)

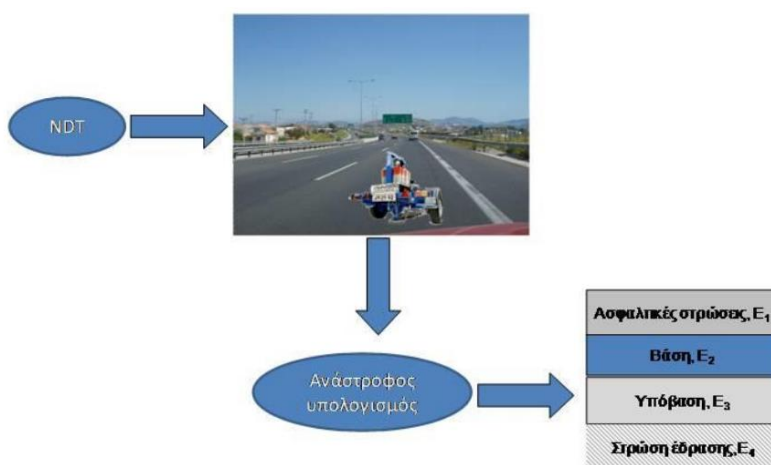
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προκύπτει από την γνώση της δομικής επάρκειας είναι σε περιπτώσεις όπου οι δοκιμές γίνονται ανά 100 ή 200m. Με αυτόν τον τρόπο όταν εντοπίζονται δομικά ασθενή σημεία από το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$, η δοκιμή μπορεί να αναπροσαρμοστεί σε νέες πυκνότερες αποστάσεις, ώστε να προσδιοριστεί όσο καλύτερα γίνεται το αδύναμο τμήμα του οδοστρώματος (Tonkin & Taylor, 1998).

Ως συμπέρασμα, η ανάλυση συντελεστών επιφάνειας παρέχει ενδιαφέρουσες πληροφορίες σχετικά με τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων, και ειδικά για το υποκείμενο υπόστρωμα. Ωστόσο, οι πληροφορίες είναι μόνο κατά προσέγγιση και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τον ανάστροφο υπολογισμό.

2.6 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται αναλυτικότεροι και ακριβέστεροι υπολογισμοί για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος ακολουθείται μία εξειδικευμένη και πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το Σύστημα FWD αλλά και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίζονται ή μετρούνται επί τόπου (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ.) ενεργοποιείται η διαδικασία ανάστροφου

υπολογισμού (back-analysis) των μηχανικών χαρακτηριστικών με χρήση ειδικών λογισμικών (Εικόνα 2.15).



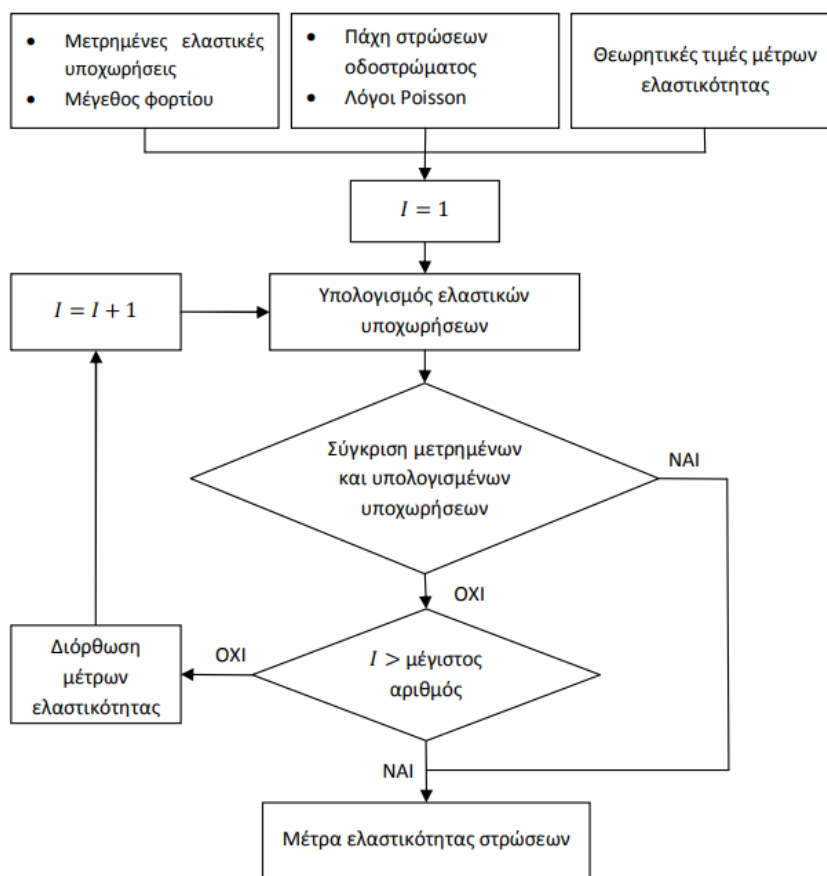
Εικόνα 2.15: Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Ως ανάστροφος υπολογισμός ορίζεται η διαδικασία του έμμεσου προσδιορισμού του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των στρώσεων του οδοστρώματος (backcalculation of pavement layer moduli), έχοντας ως αφετηρία τα επιτόπου στοιχεία της ελαστικής απόκρισής του υπό την επιβολή της φόρτισης. Τα επιτόπου στοιχεία, δηλαδή οι ελαστικές τιμές των υποχωρήσεων που καταγράφουν τα γεώφωνα, οι θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής καθώς και τα πάχη των στρώσεων αποτελούν μεταβλητές εισόδου για τις διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού.

Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται για τον ανάστροφο υπολογισμό, και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.16, είναι (Tutumluer, et al., 2009):

- Καθορισμός των παραμέτρων εισόδου όπως για παράδειγμα το πάχος του οδοστρώματος, ο λόγος Poisson κ.α.
- Εκτίμηση αρχικών μέτρων ελαστικότητας ως δεδομένα εισόδου. Οι τιμές αυτές επιλέγονται με βάση την εμπειρία του μελετητή ή βάση τυπικών τιμών. Οι τιμές αυτές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το πρόγραμμα και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται.

- Υπολογισμός των ελαστικών υποχωρήσεων στις αντίστοιχες θέσεις των γεωφώνων του FWD, κατά μήκος της επιφάνειας.
- Σύγκριση των υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων με τις αντίστοιχες μετρημένες μέσω του FWD. Εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι αποδεκτή τότε συμπεραίνεται ότι τα χρησιμοποιούμενα μέτρα ελαστικότητας είναι και τα πραγματικά. Διαφορετικά, γίνεται επανεκτίμηση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή. Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του ανάστροφου υπολογισμού.



Εικόνα 2.16: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού (Λοίζος & Πλατή, 2021)

Για τη λειτουργία των αλγορίθμων ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιούνται κατάλληλα προσομοιώματα οδοστρωμάτων που βασίζονται στη βασική αρχή της εδαφομηχανικής και της εδαφοδυναμικής. Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού είναι ιδιαίτερως χρονοβόρα και σύνθετη και απαιτεί σχετική εξειδίκευση. Με την παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται η εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος (όπως για

παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας E). Ως δεδομένα εισόδου χρειάζονται οι υποχωρήσεις καθώς και στοιχεία στρωματογραφίας (πάχη) που μπορεί να συλλεχθούν με το Σύστημα Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar-GPR). Η σύνθετη ανάλυση είναι χρήσιμη όταν πρόκειται να αξιολογηθούν οι ανάγκες επανασχεδιασμού ενός οδοστρώματος.

Υπάρχουν διάφορα προγράμματα ανάστροφου υπολογισμού. Τα περισσότερα εξ αυτών, όπως είναι το CIRCLY, BISAR και MODULUS, βασίζονται στην πολυστρωματική ελαστική θεωρία με αριθμητική ολοκλήρωση ή πεπερασμένα στοιχεία. Υπάρχουν και άλλα, όπως είναι το ELMOD, τα οποία βασίζονται στην προσεγγιστική θεωρία μετασχηματισμού των Odermark-Boussinesq, τα οποία είναι ιδιαίτερα δημοφιλή λόγω της υψηλής ταχύτητας στην επεξεργασία δεδομένων (Taylor & Tonkin , 2012).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

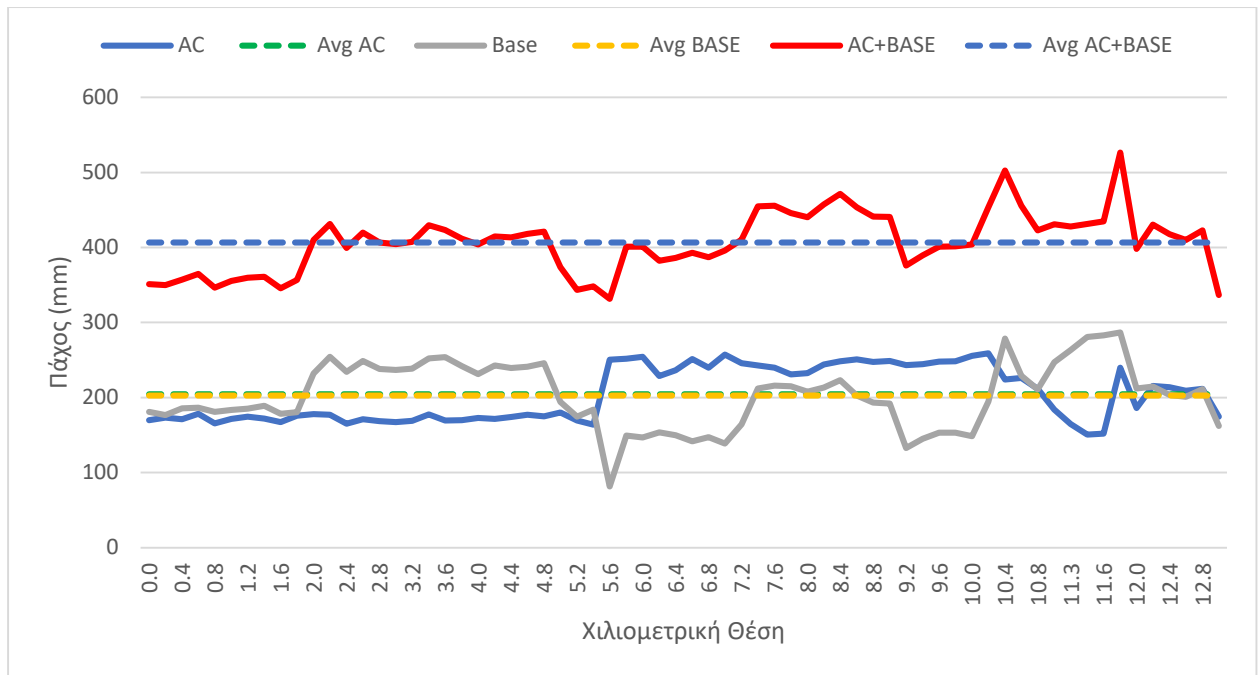
3.1 Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα τα οποία προέρχονται από μετρήσεις σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου του Ελλαδικού χώρου. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν ετήσιες (περιοδικές) μετρήσεις σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου 13 χιλιομέτρων για πέντε (5) έτη με συχνότητα μετρήσεων ανά 200m.

Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους-FWD. Σε κάθε σημείο των μετρήσεων καταγράφηκε το πίπτον φορτίο, η πίεση επαφής και οι ελαστικές υποχωρήσεις σε απόσταση έως και 1800mm από το κέντρο φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, οι υποχωρήσεις που μετρήθηκαν είναι οι: D₀, D₂₀₀, D₃₀₀, D₄₅₀, D₆₀₀, D₉₀₀, D₁₂₀₀, D₁₅₀₀ και D₁₈₀₀. Επίσης καταγράφηκε η θερμοκρασία στην επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς και το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων αλλά και της βάσης/υπόβασης, μέσω του συστήματος γεωραντάρ-GPR. Όλα αυτά είναι απαραίτητα για τον καθορισμό και την ανάλυση των δεικτών σε πρώτη φάση και στη συνέχεια για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης των τμημάτων του οδοστρώματος.

3.2 Καθορισμός διατομής

Σύμφωνα με τα δεδομένα τα οποία διατέθηκαν, το τμήμα του οδοστρώματος το οποίο μελετήθηκε αποτελείται από ασφαλτική στρώση με πάχος το οποίο κυμαίνεται από 151mm έως και 259mm, καθώς και από στρώση από ασύνδετα υλικά με πάχος από 81mm έως και 287mm. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα των παχών των επιμέρους ασφαλτικών στρώσεων στο σύνολο του οδοστρώματος, καθώς επίσης και η μέση τιμή της επιμέρους στρώσης ξεχωριστά. Ακόμα, στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στατιστικά στοιχεία, τόσο για το πάχος της ασφαλτικής στρώσης όσο και για το πάχος της ενοποιημένης στρώσης βάσης/υπόβασης.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα παχών Ασφαλτικών Στρώσεων και Βάσης/Υπόβασης

Πίνακας 3.1: Στατιστικά στοιχεία για τα πάχη του οδοστρώματος

	Πάχος Ασφαλτικών Στρώσεων h_1(mm)	Πάχος βάσης/υπόβασης h_2 (mm)
Ελάχιστη Τιμή	151	81
Μέγιστη Τιμή	259	287
Μέση Τιμή	204	203
Τυπική Απόκλιση	35.94	42.73
Συντελεστής Μεταβλητότητας CV	17.59%	21.09%

Παρατηρείται ότι για τις ασφαλτικές στρώσεις το μέσο πάχος βρίσκεται στα 204mm, και ο συντελεστής μεταβλητότητας στο 17,59%, ποσοστό το οποίο θεωρείται αποδεκτό, γεγονός που σημαίνει ότι η μέση τιμή είναι αντιπροσωπευτική για την περιγραφή του πάχους του οδοστρώματος. Ομοίως, το πάχος βάσης/υπόβασης έχει μέση τιμή πάχους 203mm και συντελεστή μεταβλητότητας ο οποίος ανέρχεται στο 21,09%.

Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι το δείγμα είναι σχετικά ομοιογενές καθώς ο συντελεστής μεταβολής και στις δύο στρώσεις βρίσκεται στα επίπεδα του 20%. Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω ως αντιπροσωπευτική διατομή, για τους σκοπούς της ανάλυσης, μπορεί να θεωρηθεί η διατομή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Διατομή πειραματικού οδοστρώματος

3.3 Αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων

Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το σύστημα FWD εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων (Λοίζος & Πλατή, 2021).

Με βάση τα ανωτέρω, αρχικά πραγματοποιείται αναγωγή των μετρημένων κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D_0 στο φορτίο αναφοράς, το οποίο στις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι 50kN. Έπειτα, για τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις πραγματοποιείται αναγωγή στην θερμοκρασία αναφοράς των 20°C. Οι αναγωγές πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των εξισώσεων 2.1, 2.3 και 2.4 για φορτίο και θερμοκρασία, αντίστοιχα. Αντιθέτως, για τις ελαστικές υποχωρήσεις D_8 πραγματοποιείται αναγωγή μόνο στο φορτίο αναφοράς των 50kN.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε η κεντρική ελαστική υποχώρηση και η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 1800mm από το κέντρο φόρτισης για όλο το μήκος του οδοστρώματος και για κάθε έτος ξεχωριστά. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 3.2 απεικονίζονται οι παραπάνω υπολογισμοί για το 1^ο έτος για ένα τυχαίο τμήμα του οδοστρώματος. Για τα υπόλοιπα έτη ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία.

Πίνακας 3.2: Διόρθωση ελαστικών υποχωρήσεων με αναγωγή σε φορτίο και θερμοκρασία αναφοράς του οδοστρώματος (Απόσπασμα)

Έτος	Χ.Θ.	Force	AC Temperature	D ₀	D ₀ (P _{target} -50kN)	TNF	D ₀ (20 °C)	D ₈	D ₈ (P _{target} -50kN)
1 ^ο	0	50.1	20.5	185	184.63	1.007	183.35	20.8	20.758
1 ^ο	0.2	50.22	20.2	98.5	98.07	1.003	97.82	21	20.908
1 ^ο	0.4	50.17	20.1	121.2	120.79	1.001	120.67	22.7	22.623
1 ^ο	0.6	50.14	20.0	166.4	165.94	0.999	166.03	7.9	7.878
1 ^ο	0.8	50.49	19.6	182.4	180.63	0.995	181.46	10.9	10.794
1 ^ο	1.0	49.61	19.5	65.5	66.01	0.994	66.42	13.8	13.908
1 ^ο	1.2	50.08	19.4	94.4	94.25	0.992	94.98	8.1	8.087
1 ^ο	1.4	50.26	19.3	162.4	161.56	0.991	163.08	10.9	10.844
1 ^ο	1.6	50.07	19.1	92.8	92.67	0.989	93.67	10.7	10.685
1 ^ο	1.8	50.5	19.0	154.6	153.07	0.988	154.97	12.3	12.178
1 ^ο	2.0	50.35	18.9	145.8	144.79	0.986	146.82	9.9	9.831
1 ^ο	2.2	50.21	8.0	84.3	83.95	0.876	95.80	12	11.950
1 ^ο	2.4	50.05	8.2	116	115.88	0.880	131.74	17	16.983
1 ^ο	2.6	49.93	8.3	145.1	145.30	0.880	165.15	15.4	15.422

3.4 Διαχωρισμός οδικών τμημάτων

Προκειμένου να γίνει καλύτερη και αναλυτικότερη μελέτη του οδικού τμήματος θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει ο διαχωρισμός του συνολικού τμήματος σε ομογενή υποτμήματα. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για το διαχωρισμό των τμημάτων είναι εκείνη των Αθροιστικών Αποκλίσεων.

Η μέθοδος των Αθροιστικών Αποκλίσεων (Cumsum: Cumulative Sums) είναι μια στατιστική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των τμημάτων του άξονα σε υποτμήματα με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Η διαδικασία υπολογισμού μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Υποθέτοντας ότι μια έρευνα περιλαμβάνει n μετρήσεις που ονομάζονται X_1, X_2, \dots, X_n , αρχικά υπολογίζεται ο μέσος όρος X_m των μετρήσεων. Στη συνέχεια, οι τιμές αφαιρούνται από τον μέσο όρο και τα αποτελέσματα προστίθενται διαδοχικά. Η διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω (Λοίζος & Πλατή, 2021).

$$S_1 = X_m - X_1 \quad (3.1)$$

$$S_2 = X_m - X_2 + S_1$$

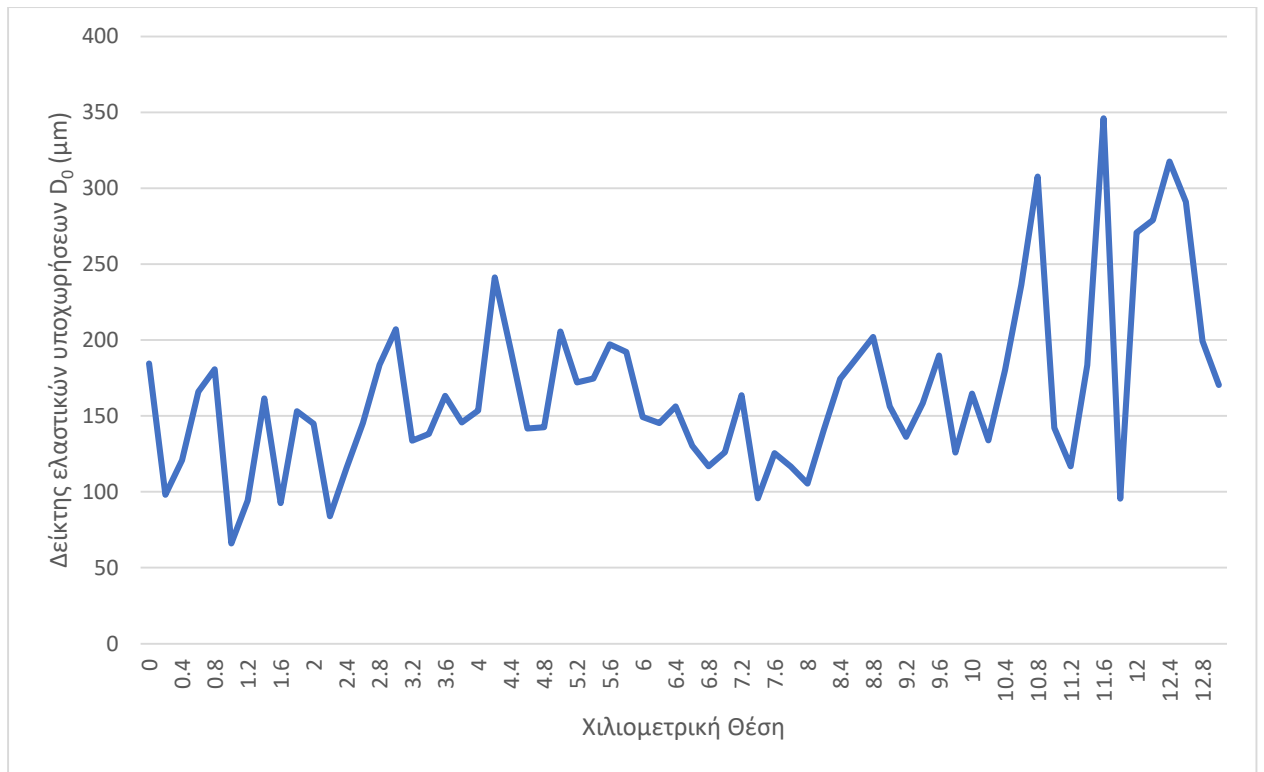
$$S_i = X_m - X_i + S_{i-1}$$

$$S_n = X_m - X_n + S_{n-1} = 0$$

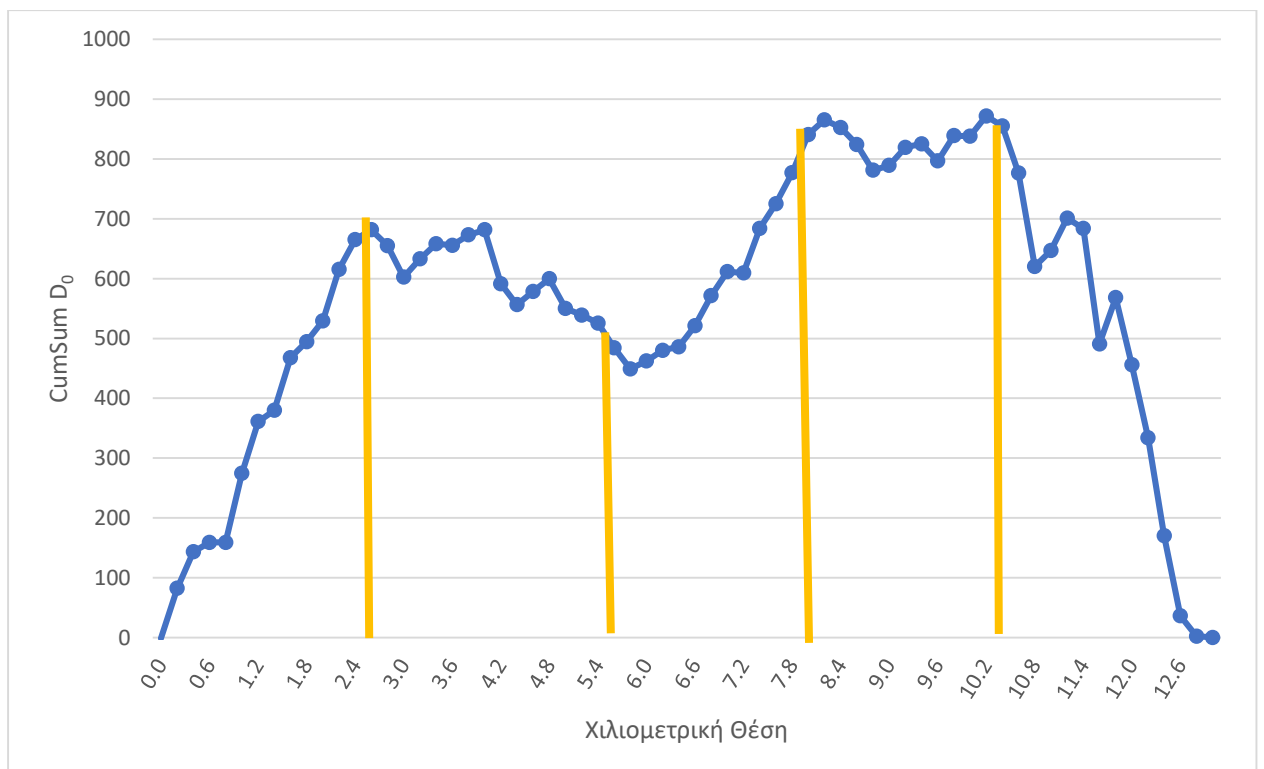
Όπου:

- S: η αποκαλούμενη τιμή CumSum
- X_i : οι τιμές της θερμοκρασίας
- X_m : ο μέσος όρος των θερμοκρασιών
- n: το πλήθος των τιμών

Οι τιμές αυτές τοποθετούνται σε ένα γράφημα και γίνεται οπτικά ο διαχωρισμός του τμήματος σε ομογενή υποτμήματα, με βάση την κλίση και τη συνολική μορφή του γραφήματος (Λοίζος & Πλατή, 2021). Η μέθοδος των αθροιστικών αποκλίσεων εφαρμόστηκε σε διάφορα βασικά μεγέθη, όπως είναι το D_0 , το D_8 καθώς και το πάχος των ασφαλικών στρώσεων, με σκοπό να βρεθούν τα πλέον αντιπροσωπευτικά υποτμήματα του οδοστρώματος. Μετά από πολλές εφαρμογές της μεθόδου τα τμήματα χωρίστηκαν με βάση το D_0 . Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται οι κατά μήκος τιμές των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D_0 με βάση τα στοιχεία του 1^{ου} έτους, ενώ στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα των αθροιστικών αποκλίσεων του D_0 στον πίνακα καθώς και τα επιμέρους τμήματα.



Εικόνα 3.3: Τιμές κεντρικής ελαστικής υποχώρησης D_0 κατά μήκος της οδού



Εικόνα 3.4: Διαχωρισμός τμημάτων ως προς D_0 βάσει Αθροιστικών Αποκλίσεων

Όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια δημιουργήθηκαν πέντε υποτμήματα (Πίνακας 3.3).

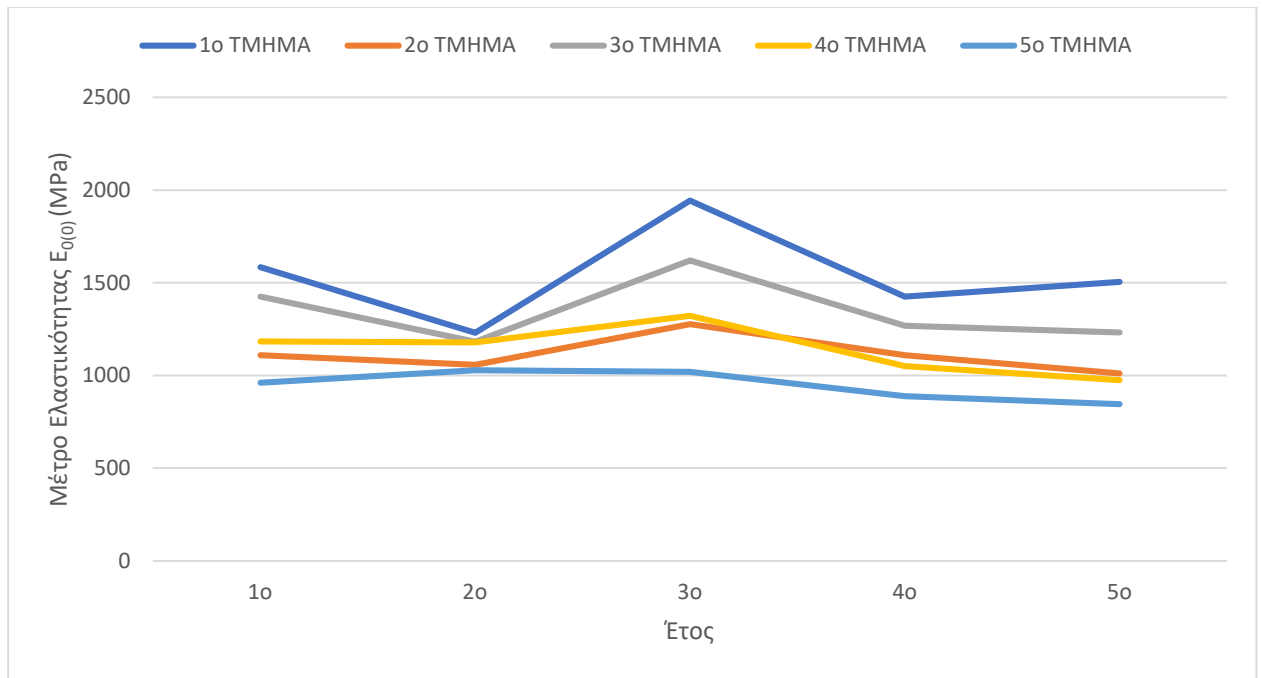
Συγκεκριμένα χωρίστηκαν ως εξής:

Πίνακας 3.3: Ομογενή τμήματα

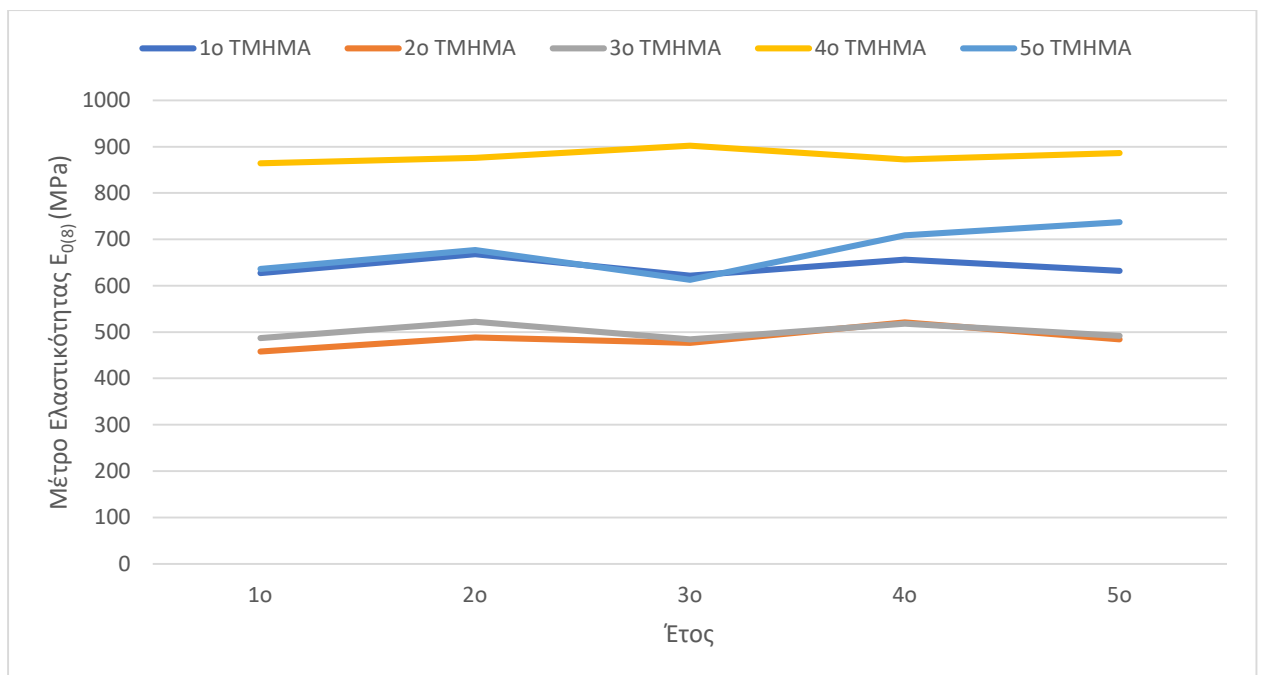
ΤΜΜΗΜΑΤΑ	Χ.Θ.
1 ^ο ΤΜΗΜΑ	0.0-2.6
2 ^ο ΤΜΗΜΑ	2.8-5.6
3 ^ο ΤΜΗΜΑ	5.8-8.0
4 ^ο ΤΜΗΜΑ	8.2-10.2
5 ^ο ΤΜΗΜΑ	10.4-13.0

3.5 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus

Στη συνέχεια, μετά το διαχωρισμό του οδικού τμήματος σε επιμέρους υποτμήματα, πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus. Για να αποτυπωθεί η συνολική εικόνα της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας για κάθε απόσταση γεωφώνων. Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$, προκύπτει από τη κεντρική υποχώρηση D_0 και περιγράφει τη δομική αξιολόγηση του συνολικού οδοστρώματος ενώ τα υπόλοιπα μέτρα ελαστικότητας $E_{0(1)}$, $E_{0(2)}$, $E_{0(3)}$, $E_{0(4)}$, $E_{0(5)}$, $E_{0(6)}$, $E_{0(7)}$, $E_{0(8)}$ προκύπτουν από τις αντίστοιχες υποχωρήσεις του οδοστρώματος σε απόσταση 200mm, 300mm, 450mm, 600mm, 900mm, 1200mm, 1500mm, 1800mm από το κέντρο του κυκλικού δίσκου. Με χρήση της εξίσωσης Boussinesq υπολογίζεται για κάθε σημείο το μέτρο ελαστικότητας και στη συνέχεια για κάθε υποτμήμα που έχει προκύψει υπολογίζεται ο μέσος όρος, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής μεταβλητότητας αλλά και η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του κάθε δείγματος (Πίνακας Π3). Στην Εικόνα 3.5 και Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μέσης τιμής για τα μέτρα ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ και $E_{0(8)}$.



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα μέσης τιμής μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα μέσης τιμής μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(8)}$

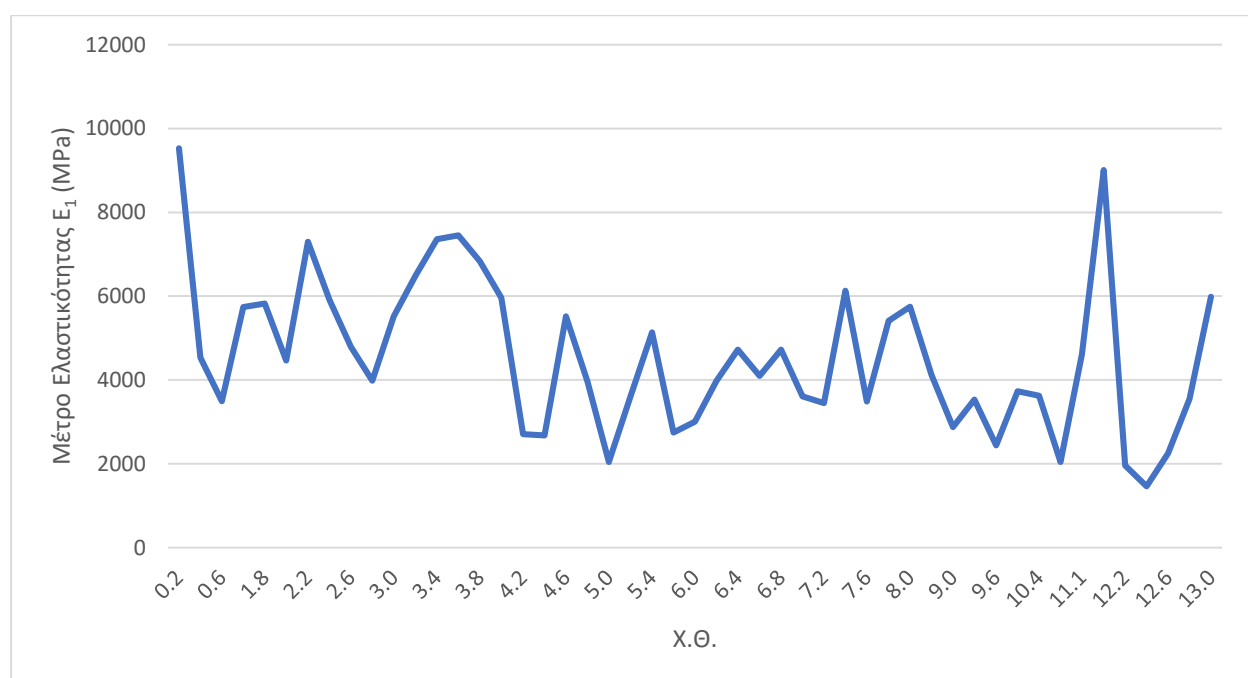
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων (Εικόνα 3.5 και Εικόνα 3.6) με το διάγραμμα στην Εικόνα 2.14, παρατηρείται ότι τόσο το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ όσο και το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(8)}$ επαρκούν ακόμη

και για θεώρηση υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Με βάση τα ανωτέρω, δίνεται μια πρώτη εικόνα της κατάστασης της υπό μελέτη οδού.

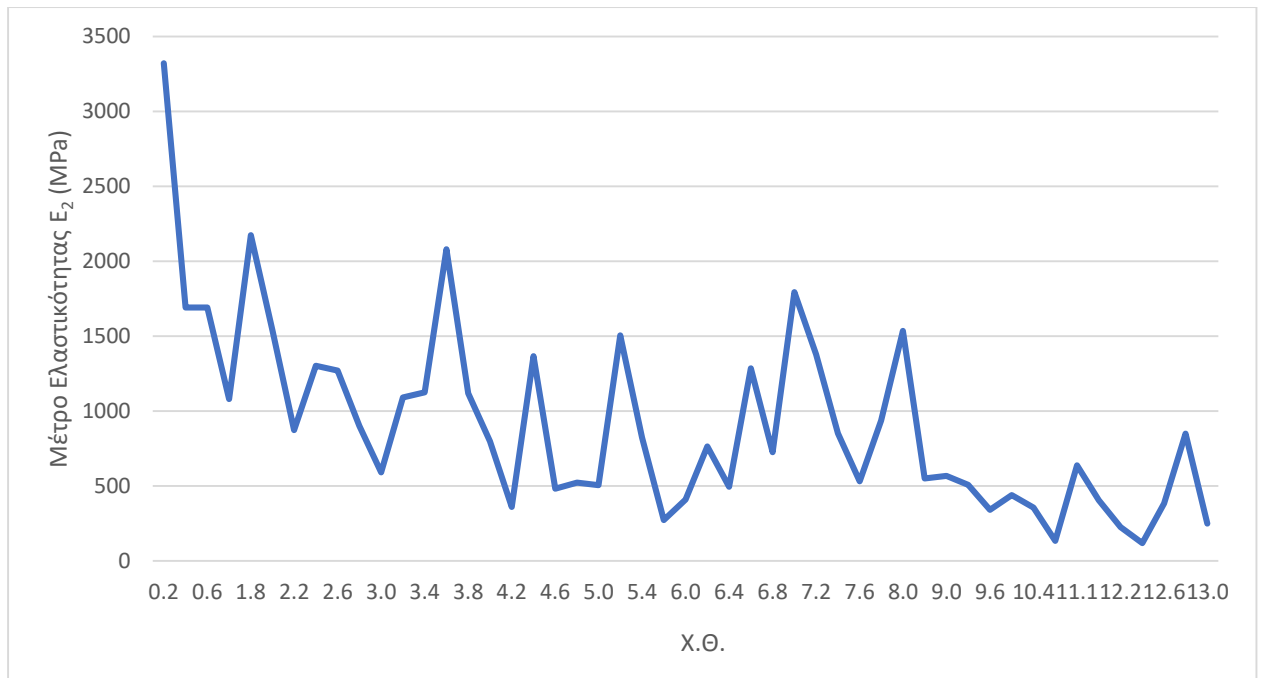
Παρόλα αυτά, προκειμένου να υπάρχει μια πλήρης εικόνα της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος απαιτούνται επιπλέον αναλύσεις. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων χρησιμοποιείται η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

3.6 Συσχετίσεις Αποτελεσμάτων Ανάστροφου υπολογισμού και Surface Modulus

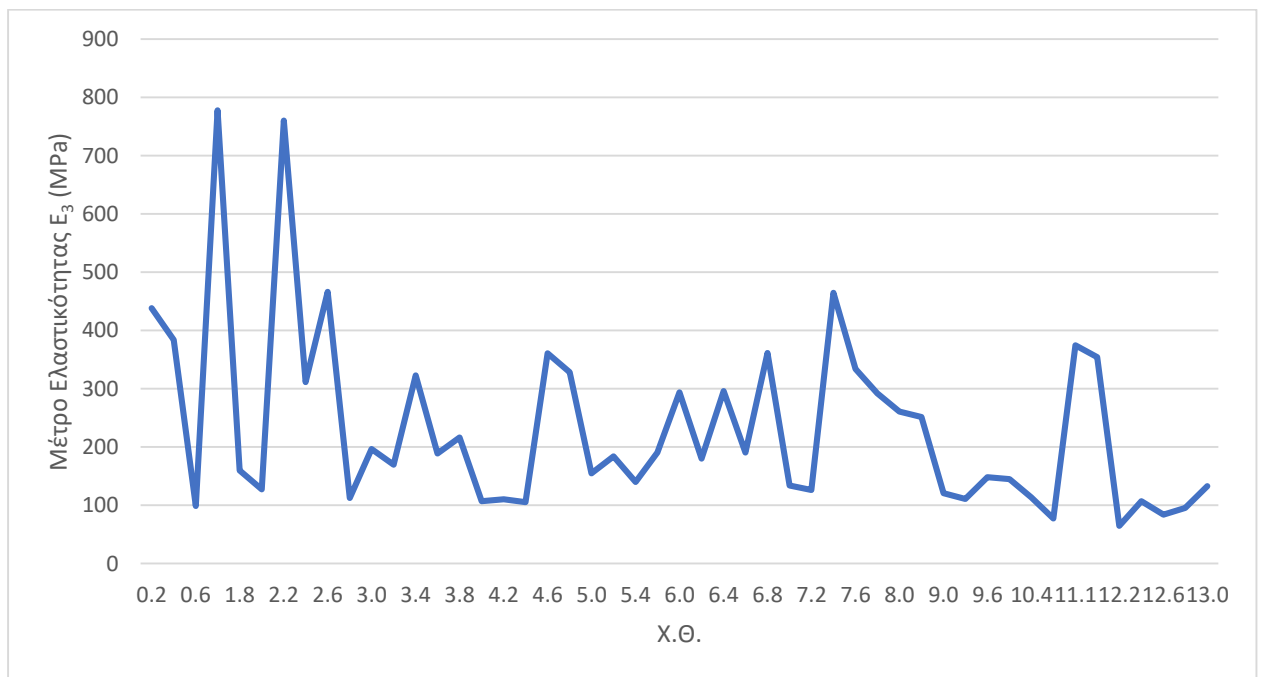
Εν συνέχεια, αξιοποιήθηκαν διατιθέμενα στοιχεία ανάστροφου υπολογισμού, από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π., για το 4^ο και 5^ο έτος σε όλο το μήκος του οδοστρώματος που εξετάστηκε. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται (Εικόνα 3.7, Εικόνα 3.8, Εικόνα 3.9) απεικονίζουν την κατά μήκος εξέλιξη των μέτρων ελαστικότητας για το 5^ο έτος σε όλο το τμήμα του υπό μελέτη οδοστρώματος. Επίσης, παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ (Εικόνα 3.10) για το 5^ο έτος, όπως προέκυψε από κατάλληλη επεξεργασία των στοιχείων συλλογής.



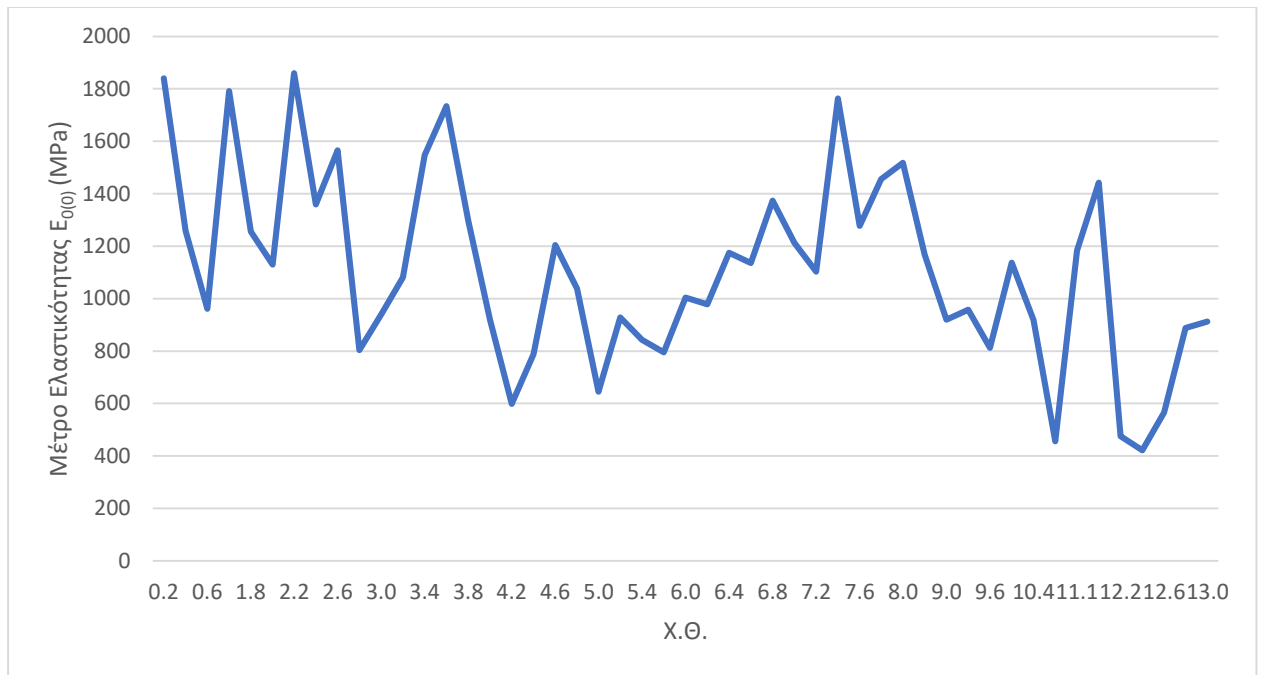
Εικόνα 3.7: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_1



Εικόνα 3.8: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_2

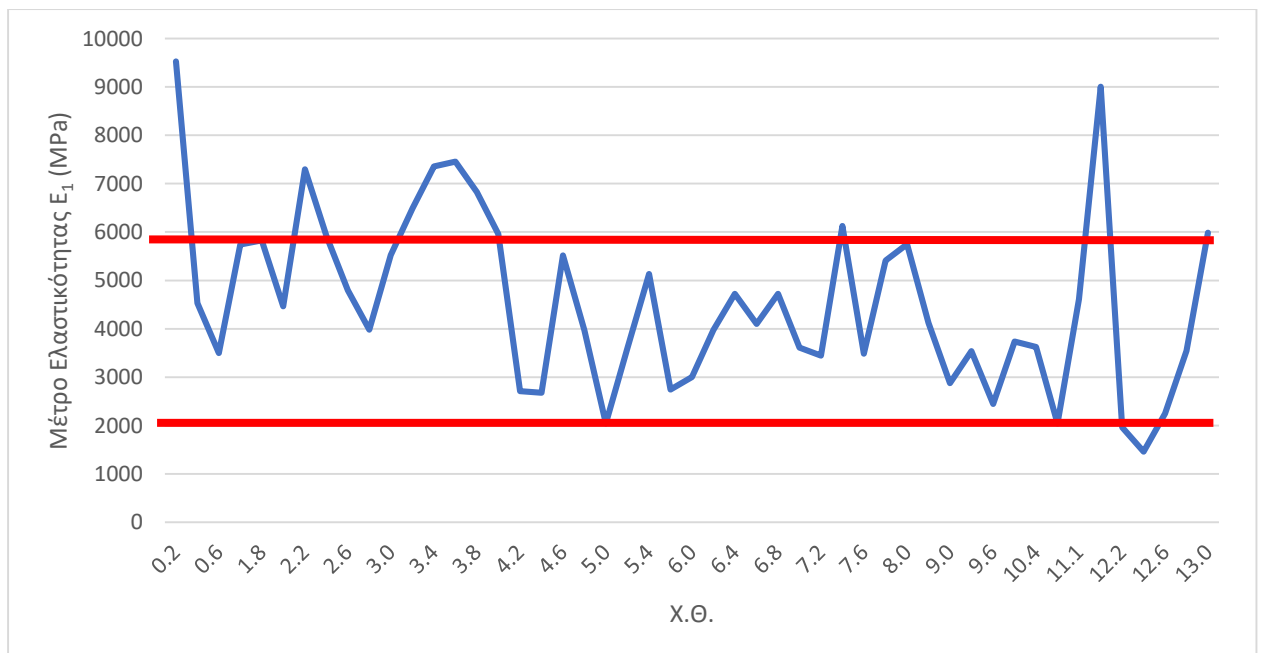


Εικόνα 3.9: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας E_3



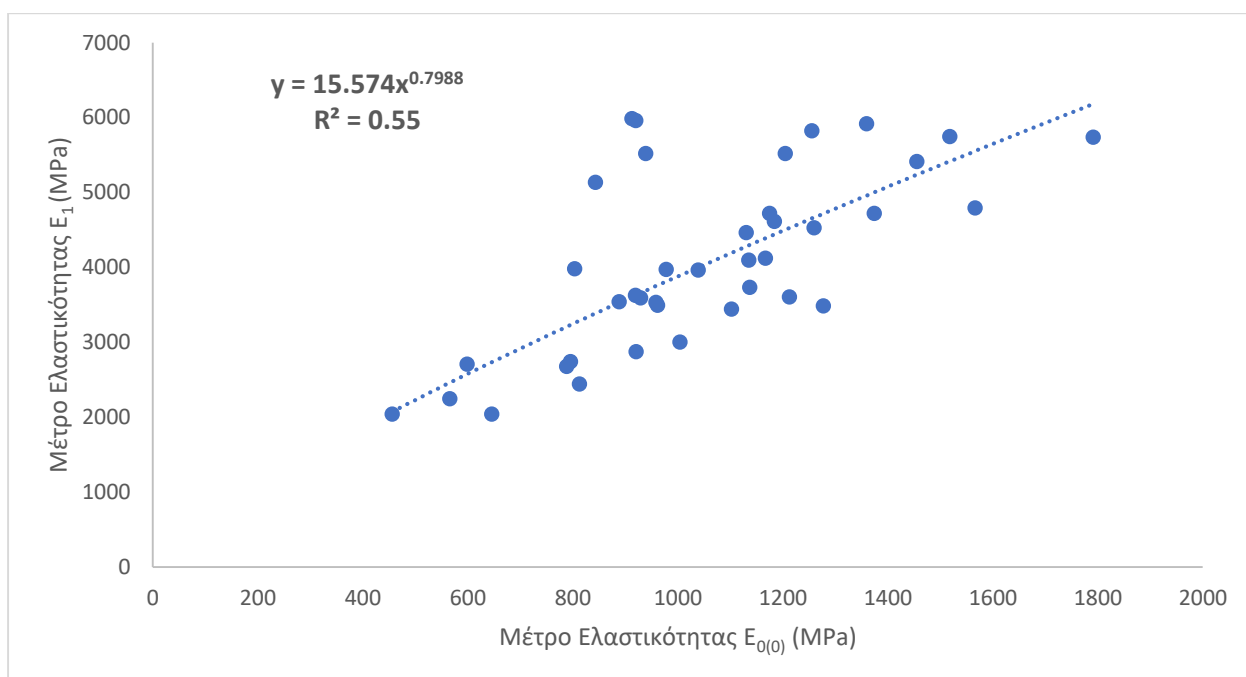
Εικόνα 3.10: Κατά μήκος μέτρο ελαστικότητας $E_{0(0)}$

Στη συνέχεια, από τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E_1 που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7, επιλέχθηκαν τα σημεία των οποίων οι τιμές κυμαίνονται στο εύρος από 2.000 MPa έως 6.000 MPa (Εικόνα 3.11).

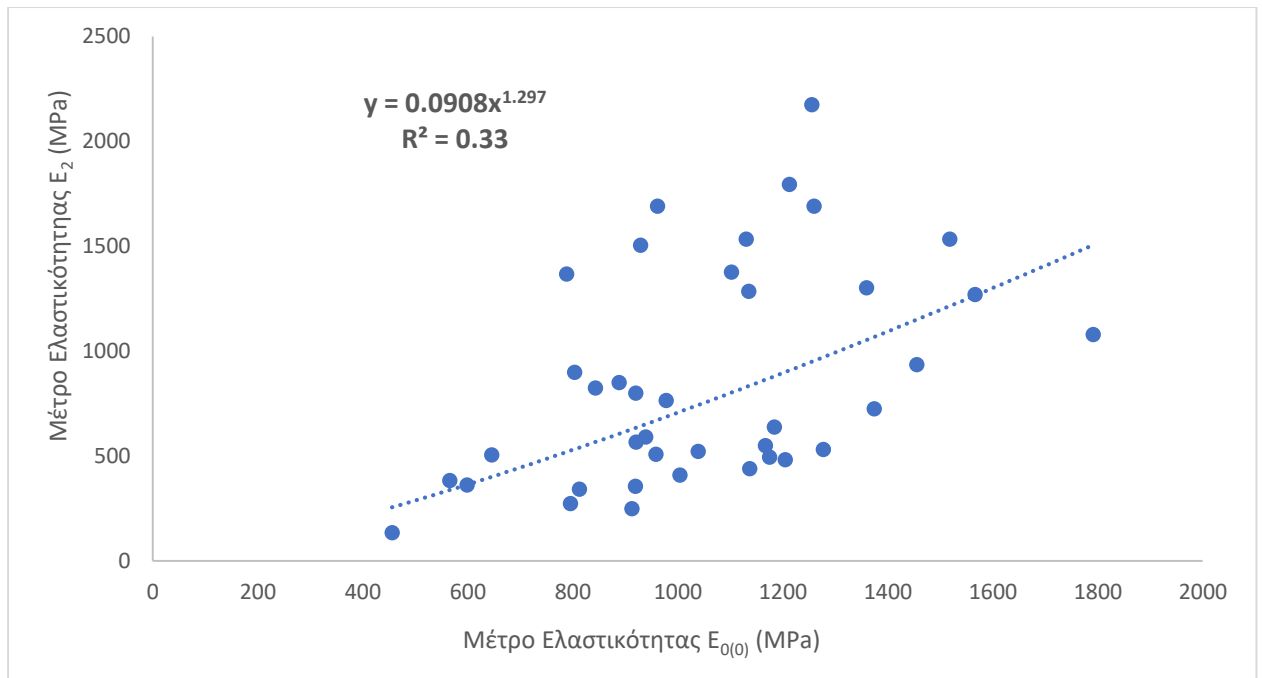


Εικόνα 3.11: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας E_1 σε όλο το μήκος της οδού.

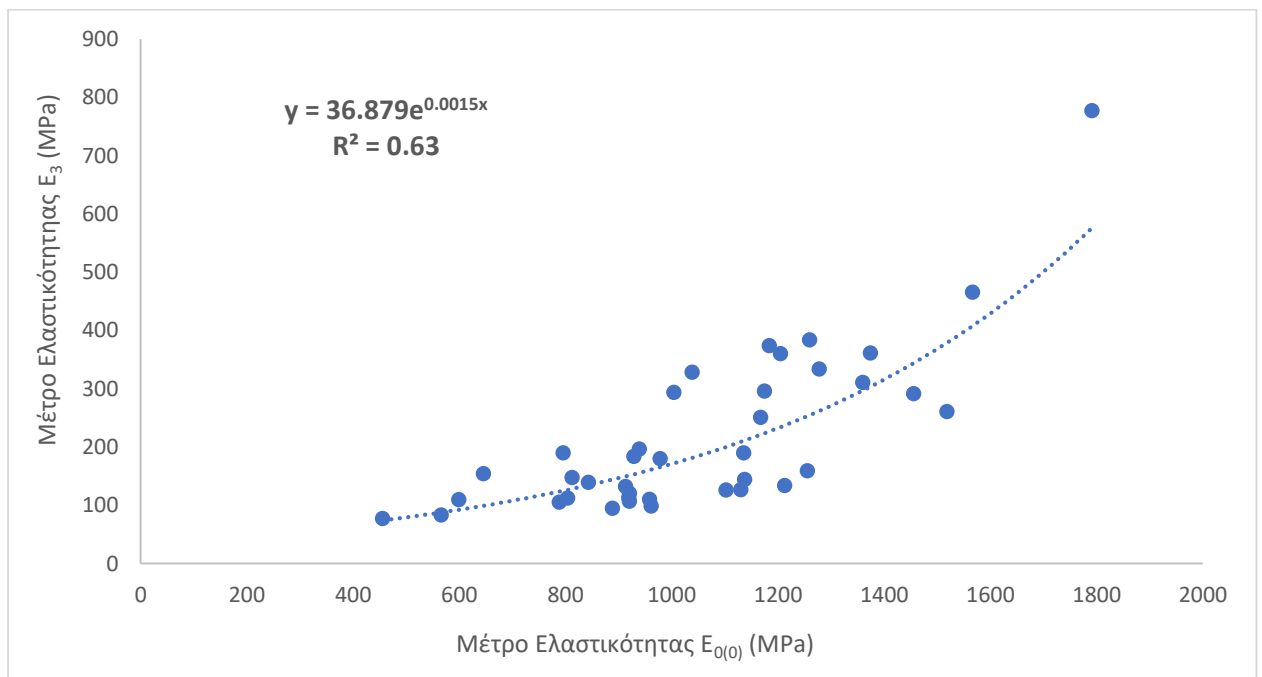
Έπειτα, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ και των μέτρων ελαστικότητας E_1 , E_2 , E_3 που προέκυψαν μέσω της διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού. Στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 3.12, Εικόνα 3.13 και Εικόνα 3.14) παρουσιάζονται οι συσχετίσεις και οι εξισώσεις γραμμικής εξάρτησης οι οποίες προέκυψαν μεταξύ των μεταβλητών. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται η συσχέτιση του $E_{0(0)}$ με το E_1 . Ομοίως, στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η συσχέτιση του $E_{0(0)}$ με το E_2 και στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται η συσχέτιση του $E_{0(0)}$ με το E_3 .



Εικόνα 3.12: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_1 ασφαλτικών στρώσεων



Εικόνα 3.13: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_2 ενοποιημένης βάσης/υπόβασης



Εικόνα 3.14: Συσχέτιση μέτρου ελαστικότητας $E_{0(0)}$ με μέτρο ελαστικότητας E_3 στρώσης έδρασης

Παρατηρείται ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ παρουσιάζουν ικανοποιητική συσχέτιση τόσο με τις τιμές E_1 όσο και με τις τιμές E_3 , που προκύπτουν μετά τις διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού. Αντίθετα, δεν

παρουσιάζεται συσχέτιση με τις τιμές E_2 του ανάστροφου υπολογισμού, όπως διακρίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα.

Οι σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης, συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4: Εξισώσεις Συσχετίσεων

	Σχέση Συσχετίσεων	R^2
$E_{0(0)}-E_1$	$y = 15.574x^{0.7988}$	0.55
$E_{0(0)}-E_2$	$y = 0.0908x^{1.297}$	0.33
$E_{0(0)}-E_3$	$y = 36.879e^{0.0015x}$	0.63

Οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, με βάση τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ του 4^{ου} έτους.

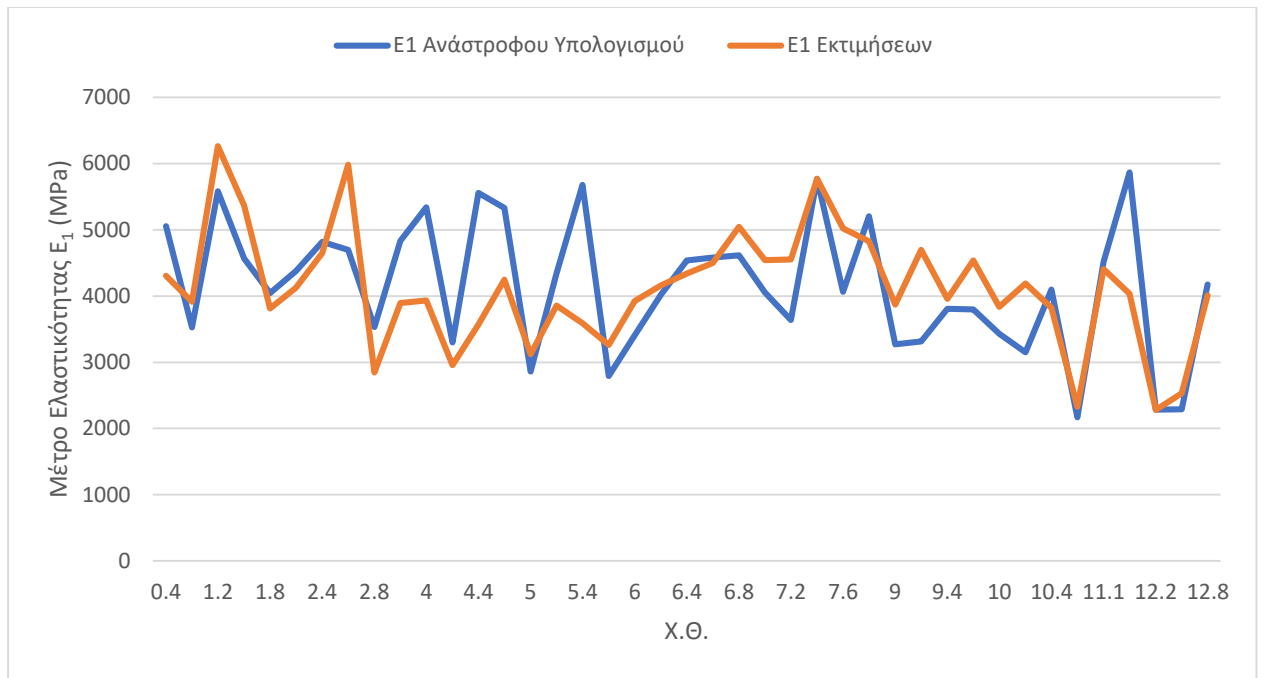
Ο Πίνακας 3.5, παρουσιάζει τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για τους δείκτες E_1 , E_2 , E_3 για το 4^ο έτος.

Πίνακας 3.5: Απόσπασμα εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας 4^{ου} έτους

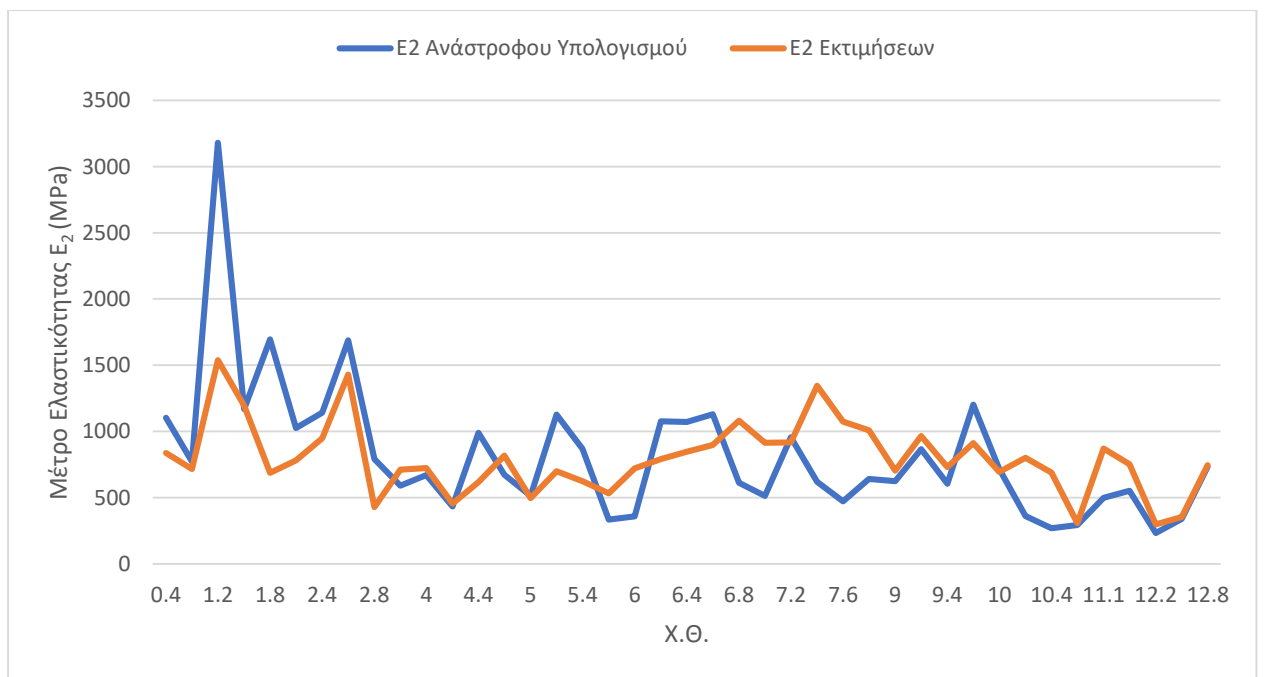
Χ.Θ.	Εκτιμήσεις Μέτρων Ελαστικότητας		
	E_1	E_2	E_3
	$y = 15.574x^{0.7988}$	$y = 0.0908x^{1.297}$	$y = 36.879e^{0.0015x}$
0.40	4306.40	836.88	203.76
0.60	3912.66	716.22	167.94
1.20	6265.91	1538.55	567.42
1.40	5362.93	1195.03	349.76
1.80	3812.18	686.60	159.98
2.00	4128.23	781.39	186.58
2.40	4648.05	947.32	241.86
2.60	5984.45	1427.91	487.00
2.80	2846.54	427.29	102.07
3.00	3893.96	710.67	166.42
4.00	3934.74	722.80	169.75
4.20	2958.74	454.98	107.35

4.40	3568.43	616.75	142.38
4.60	4247.67	818.42	197.91
5.00	3119.71	495.84	115.51
5.20	3854.02	698.87	163.24
5.40	3591.51	623.24	143.95
5.80	3261.49	532.95	123.31
6.00	3925.20	719.95	168.96
6.20	4159.71	791.08	189.50
6.40	4337.95	846.85	206.98
6.60	4498.36	898.28	224.27
6.80	5044.32	1081.91	296.25
7.00	4544.19	913.19	229.50
7.20	4553.17	916.12	230.54
7.40	5769.16	1345.45	433.80
7.60	5022.49	1074.32	292.93
8.20	4826.59	1007.11	264.87
9.00	3868.15	703.04	164.36
9.20	4699.16	964.29	248.22
9.40	3956.59	729.33	171.56
9.80	4539.00	911.50	228.90
10.00	3836.21	693.64	161.84
10.20	4191.22	800.84	192.46
10.40	3821.67	689.38	160.71
10.80	2326.19	307.88	81.31
11.10	4408.58	869.36	214.41
11.40	4033.18	752.38	178.09
12.20	2281.46	298.32	79.78
12.60	2529.11	352.66	88.73
12.80	4009.62	745.26	176.05

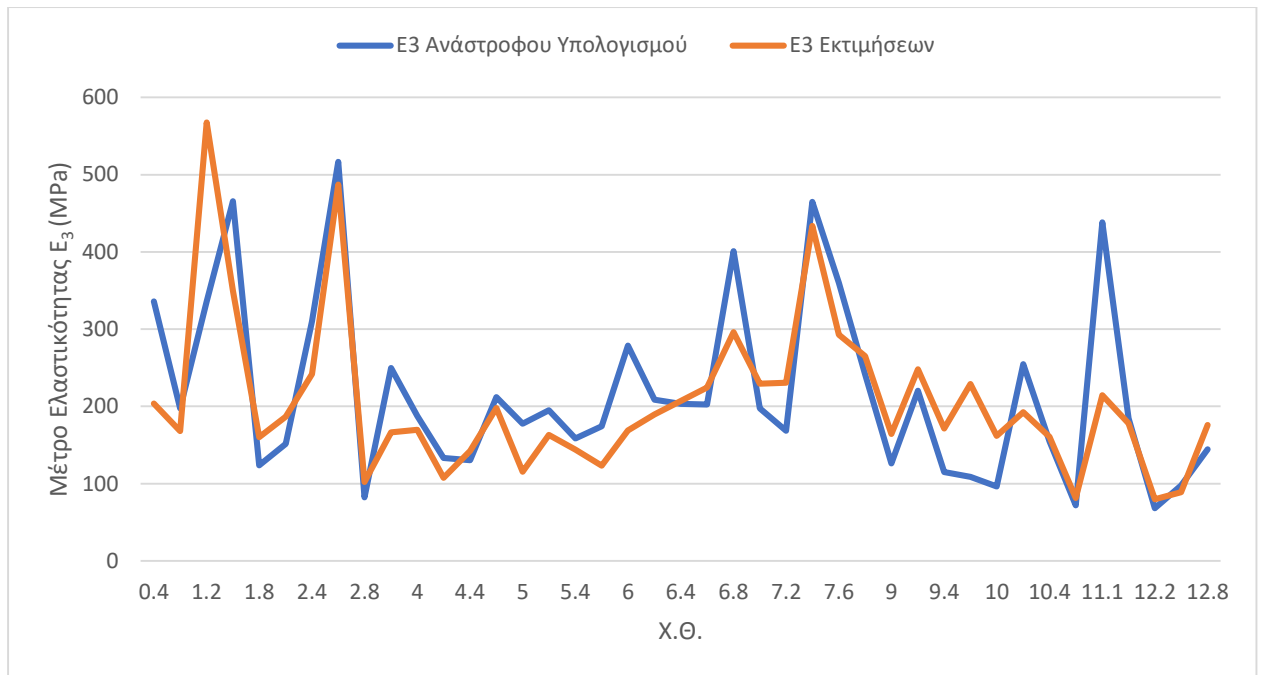
Επίσης, παρουσιάζονται για όλο το μήκος της οδού μελέτης οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψαν με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού και οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψαν μέσω των εκτιμήσεων που πραγματοποιήθηκαν (Εικόνα 3.15, Εικόνα 3.16, Εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.15: Μέτρα ελαστικότητας E_1 σε όλο το μήκος της οδού



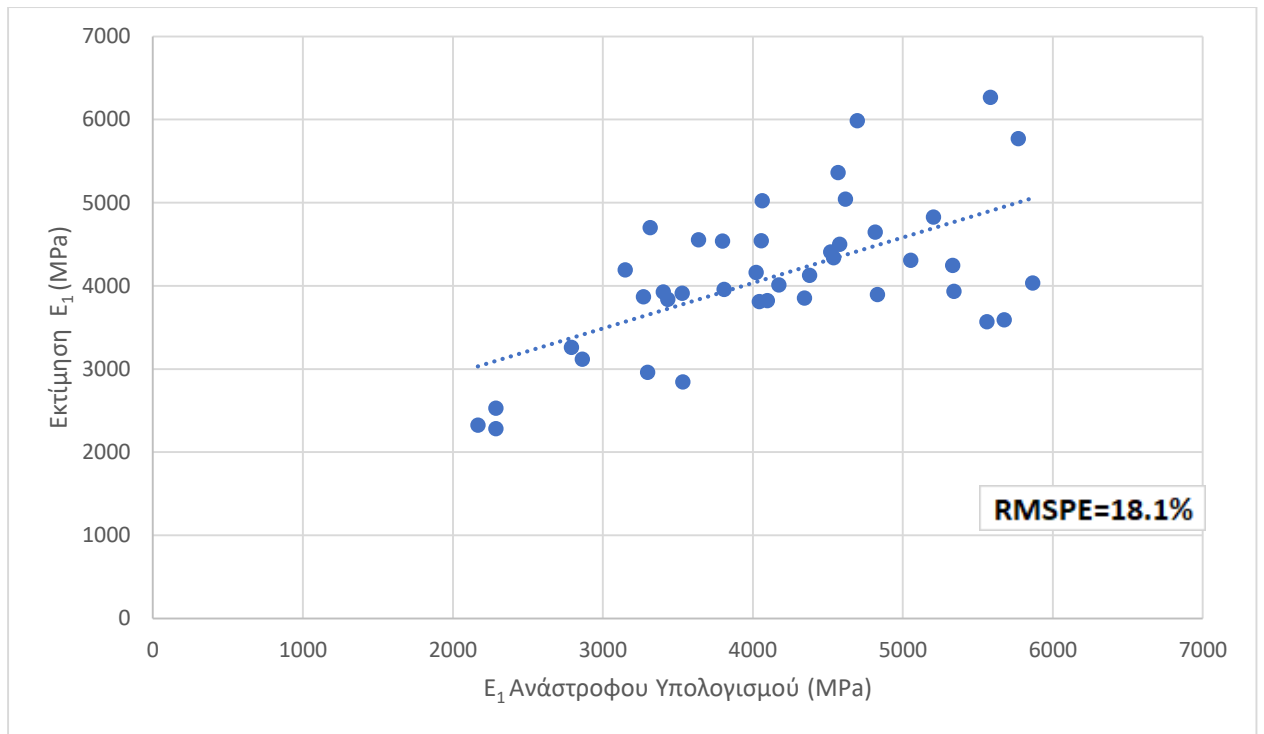
Εικόνα 3.16: Μέτρα ελαστικότητας E_2 σε όλο το μήκος της οδού



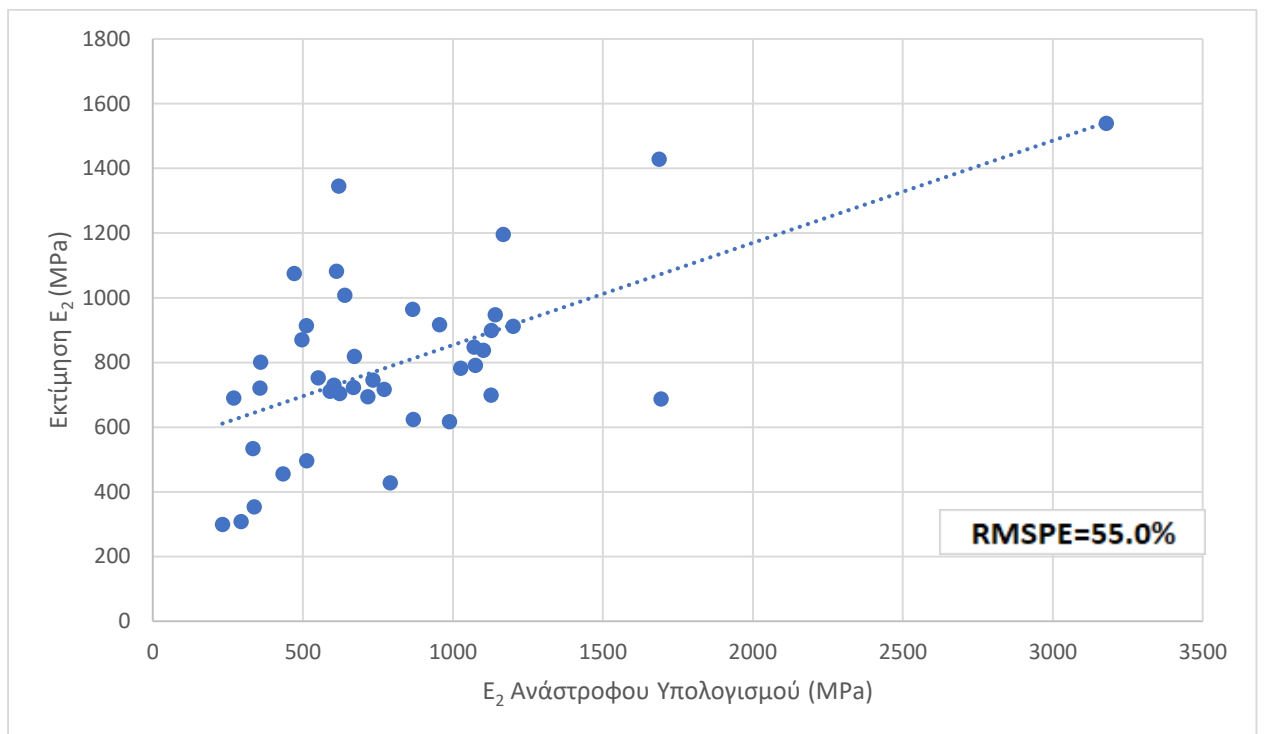
Εικόνα 3.17: Μέτρα ελαστικότητας E_3 σε όλο το μήκος της οδού

Για την δημιουργία εκτιμήσεων δεν αρκεί μόνο η ανάπτυξη και ο προσδιορισμός του δείκτη συσχέτισης αλλά είναι απαραίτητη και η αξιολόγηση της ακρίβειας τους.

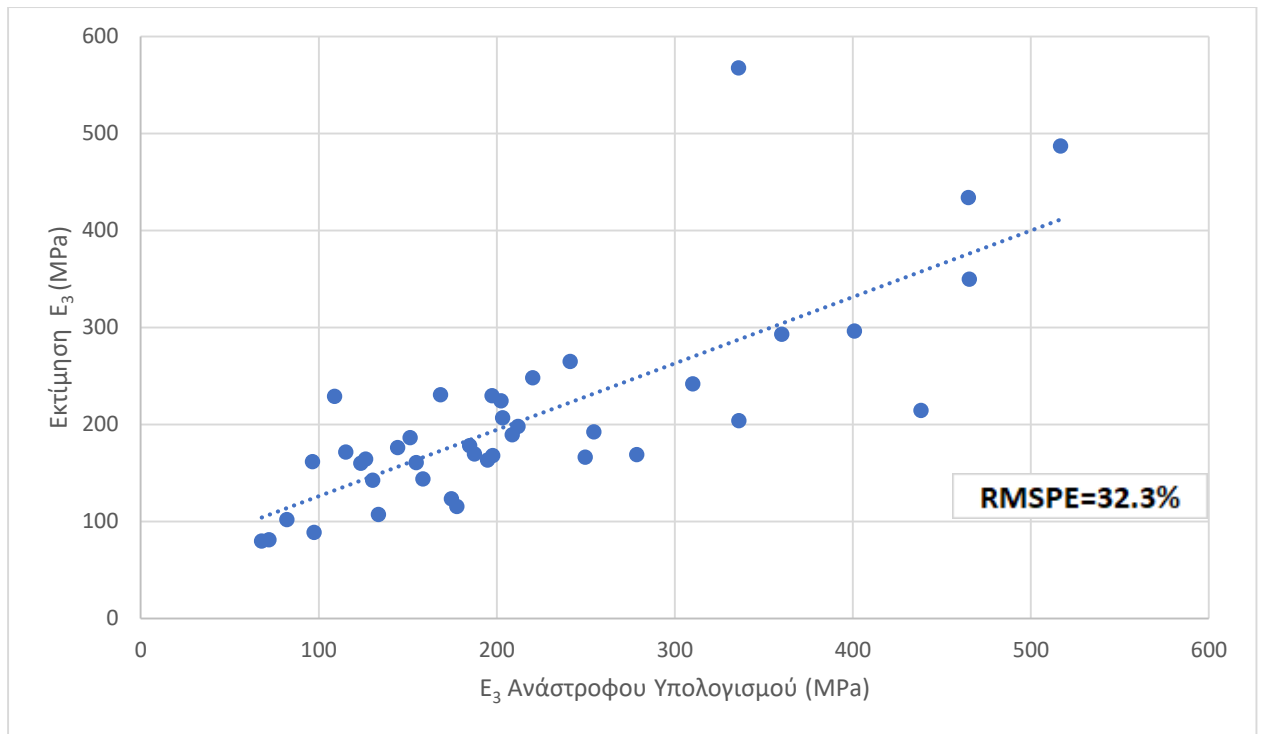
Για τον προσδιορισμό των αποκλίσεων των τιμών που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων και τις τιμές που υπολογίστηκαν μέσω της μεθόδου του ανάστροφου υπολογισμού, υπολογίστηκε για το εξεταζόμενο τμήμα του οδοστρώματος, για το 4^ο έτος, το ποσοστό σφάλματος Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) σύμφωνα με το οποίο καταγράφεται το σφάλμα εκτίμησης του δείκτη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα με το ποσοστό του σφάλματος που έχει το κάθε ένα (Εικόνα 3.18, Εικόνα 3.19 και Εικόνα 3.20).



Εικόνα 3.18: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E_1



Εικόνα 3.19: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E_2



Εικόνα 3.20: Ποσοστό σφάλματος εκτιμήσεων μέτρου ελαστικότητας E₃

Παρατηρείται, πως οι τιμές του RMSPE που υπολογίστηκαν είναι αρκετά υψηλές ιδίως στις περιπτώσεις των μέτρων ελαστικότητας E₂ και E₃. Οι υψηλές τιμές υποδηλώνουν ότι υπάρχει μειωμένη ακρίβεια στις εκτιμήσεις που αναπτύχθηκαν καθώς οι τιμές αποκλίνουν σημαντικά. Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας E₁, συμπεραίνεται ότι οι μειωμένες αποκλίσεις δίνουν εκτιμήσεις οι οποίες θεωρούνται αρκετά ασφαλείς, στην εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E₁.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τη δομική αξιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Έγινε αναφορά στο παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους-FWD και εντοπίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του, τα στοιχεία καταγραφής του καθώς και οι τρόποι με τους οποίους το FWD συμβάλει στη δομική αξιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω δεικτών. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στο μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus, αναφέροντας την έννοια και τα χαρακτηριστικά του καθώς και τη σημασία που έχει για τη δομική αξιολόγηση των οδοστρωμάτων. Επίσης, εκτενής αναφορά έγινε και στη μέθοδο του ανάστροφου υπολογισμού, καθώς αποτελεί βασικό παράγοντα της παρούσας εργασίας.

Εν συνεχεία, για την επίτευξη του στόχου της εργασίας πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις των στοιχείων που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π. Τα στοιχεία αυτά αφορούσαν αφενός σε μετρήσεις μέσω του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους-FWD, συμπεριλαμβανομένης και της θερμοκρασίας, και αφετέρου σε στοιχεία παχών μετρημένα με το Σύστημα Γεωραντάρ-GPR.

Σε πρώτο στάδιο, έγινε ο καθορισμός της διατομής μελέτης και ο διαχωρισμός του συνολικού υπό διερεύνηση οδοστρώματος σε επιμέρους υποτομήματα, ο οποίος έγινε με βάση τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις. Έπειτα, έγινε η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus για όλα τα έτη και για όλες τις αποστάσεις των γεώφωνων με στόχο την καλύτερη απεικόνιση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Επίσης, τα αποτελέσματα του FWD τροφοδότησαν και τις διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού. Σε δεύτερο στάδιο, οι συγκεκριμένες μετρήσεις αναλύθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση συσχέτισης μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ και των μέτρων ελαστικότητας E_1 , E_2 , E_3 που προέκυψαν μέσω του ανάστροφου υπολογισμού, για το 5^ο έτος. Ύστερα, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των συσχετίσεων, εξετάστηκε η δυνατότητα εκτίμησης των μέτρων ελαστικότητας του 4^{ου} έτους. Τέλος, προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων έγινε έλεγχος με τον στατιστικό δείκτη RMSPE.

Δεδομένων των παραπάνω, τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται ακολούθως.

Με βάση τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ότι:

1. Πέραν του ανάστροφου υπολογισμού, η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί και με χρήση δεικτών.
2. Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus εκφράζει τη μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος συνολικά, δίνοντας της δυνατότητα ενός απλού μέτρου για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος.

Από την ανάλυση των στοιχείων προέκυψε ότι:

1. Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ παρουσιάζει ικανοποιητική συσχέτιση με τα μέτρα ελαστικότητας E_1 της ασφαλτικής στρώσης και E_3 της στρώσης έδρασης, όπως προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό.
2. Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$ δεν παρουσιάζει συσχέτιση με το μέτρο ελαστικότητας E_2 της ενοποιημένης στρώσης βάσης/υπόβασης.
3. Τέλος, το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$, ενδεχομένως, μπορεί να συσχετιστεί με το μέτρο ελαστικότητας E_1 των ασφαλτικών στρώσεων από ανάστροφο υπολογισμό καθώς δίνει εκτίμηση αυτού με αποδεκτή ακρίβεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι θέματα τα οποία περιλαμβάνουν πειραματική μελέτη, όπως αυτό που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, είναι αποδεκτό ότι υπεισέρχονται σφάλματα. Ακόμα, καθώς, η διερεύνηση αυτή βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, επιτείνεται η ανάγκη για εμπλουτισμό των ερευνητικών στοιχείων.

Ως περαιτέρω έρευνα του αντικείμενου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διαμορφώνονται οι ακόλουθες προτάσεις:

1. Η πραγματοποίηση περισσότερων μετρήσεων και αναλύσεων με βάση το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus θα βοηθήσει στον εμπλουτισμό των ερευνητικών στοιχείων. Σημαντικό είναι οι μελέτες να γίνουν σε ποικίλα οδικά τμήματα και σε διαφορετικές εποχές του έτους προκειμένου να εξεταστεί τυχόν συμβολή και άλλων παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, πάχη).
2. Η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης των μέτρων ελαστικότητας με βάση το Surface Modulus με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος των προβλέψεων.

3. Τέλος, η διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και του πάχους των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος στο Surface Modulus, αποτελεί επίσης ένα θέμα ενδιαφέροντος.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aavik, A. & Talvik, O., May 2008. *Use of Falling Weight Deflectometer (FWD) measurement data for pavement structural evaluation and repair design*. Lithuania, The 7th international conference of Environmental Engineering.

Alavi, S., LeCates, J. & Tavares, M., 2008. *Falling Weight Deflectometer Usage*, Washington, D.C.: NCHRP .

Authority, N. R., 2000. *Guidelines for the Use of the Falling Weight Deflectometer in Ireland*, Ireland : Transport infrastructure Ireland (TII) Publications .

Broutin, M., 2010. *Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Development of a FEM dynamical time-domain analysis for the backcalculation of structural properties*, s.l.: Ecole des Ponts ParisTech.

Chatti, K. et al., 2017. *Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers*, McLean: Federal Highway Administration Office of Acquisition Management.

COST 336, 2005. *Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation, Final Report of the Action*, Netherlands: European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research.

Hakim, B. & Brown, S., 2006. *Pavement Analysis Using the FWD: Practical Difficulties and Proposed Simplifications*. Canada, 10th International Conference on Asphalt Pavements.

Hoffman, M. S., 1983. Loading Mode Effects on Pavement Deflections. *Transportation Engineering*, 109(5), pp. 651-668.

Horak, E., 2008. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, June, 50(2), pp. 2-9.

Horak, E. & Emery, S., 2009. *Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter benchmarking methodology*. Amsterdam, 2nd European Airport Pavement Workshop.

Horak, E., July 2007. *Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool*. Pretoria South Africa, Proceeding of the 26th Annual Southern African Transport Conference.

Horak, July 1987. *The use of surface deflection basin measurements in the mechanistic analysis of flexible pavements*. Michigan, 6th International conference on the structural design of asphalt pavements.

Mehta, Y. & Reynaldo, R., 2003. Evaluation of FWD Data for Determination of Layer Moduli of Pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003 01, 15(1), p. 7.

Pierce, L. M., Bruinsma, J., Bruinsma & Smith, K., 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data With Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation*, Washington: Applied Pavement Technology.

Plati, C., Gkyrtis, K. & Loizos, A., 2020. Integrating non-destructive testing data to produce asphalt pavement critical strains. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27 Oct, pp. 546-570.

Plati, C., Loizos, A. & Gkyrtis, K., 2020. Integration of non-destructive testing methods to assess asphalt pavement thickness. *NDT & E International*, 5 May, 115(1), p. 11.

Rohde, G. T., 1994. Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue 1448, pp. 61-68.

Smith, Kurt, D., Bruinsma, J. & Wade, M. J., March 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report*, s.l.: US Department of Transportation Federal Highway Administration.

Taylor & Tonkin, 2012. *Collection and Interpretation of Pavement Structural Parameters using Deflection Testing*, New Zealand: RIMS.

Tonkin & Taylor, 1998. *Pavement Deflection measurement & interpretation for the design of rehabilitation treatments*, Auckland: Transit New Zealand.

Tutumluer, E., Pekcan, O. & Ghaboussi, J., 2009. *Nondestructive Pavement Evaluation Using Finite Element Analysis Based Soft Computing Models*, s.l.: USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report.

Λοίζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων*, Αθήνα: ΕΜΠ.

Λοίζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*, Αθήνα: ΕΜΠ.

6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πίνακας Π1: Απόσπασμα μετρήσεων μέτρων ελαστικότητας Surface Modulus 5^{ου} έτους

$E_{0(1)}$	$E_{0(2)}$	$E_{0(3)}$	$E_{0(4)}$	$E_{0(5)}$	$E_{0(6)}$	$E_{0(7)}$	$E_{0(8)}$	$E_{0(9)}$
816.15	606.91	465.60	395.21	345.84	337.12	339.08	1840.42	343.56
604.00	468.28	377.07	340.19	312.82	316.89	319.08	1259.80	318.64
480.00	401.59	383.36	419.35	551.17	691.42	1010.08	961.48	911.05
944.67	763.34	699.44	715.48	725.47	740.39	725.47	1791.11	708.98
569.50	462.91	391.29	375.09	418.11	513.89	618.03	1255.17	694.36
543.99	436.90	385.82	377.67	465.76	605.85	795.38	1130.04	791.32
914.73	736.23	630.48	612.23	638.26	657.20	646.24	1859.32	601.16
649.49	505.47	423.08	399.66	408.49	442.53	450.74	1359.83	455.63
801.81	669.52	606.51	579.97	585.83	633.85	672.43	1566.17	696.66
371.44	292.64	248.55	235.00	257.21	305.31	367.82	803.62	399.74
428.79	334.26	287.09	277.68	293.61	321.79	336.43	938.95	351.40
487.42	367.58	301.40	277.54	278.03	312.79	335.43	1081.29	362.73
721.48	557.12	469.33	442.51	448.92	476.06	502.31	1547.50	577.91
832.68	672.41	612.17	617.87	730.56	914.64	1290.66	1733.72	1173.32
597.58	467.06	399.07	379.15	404.29	463.32	517.68	1298.72	532.55
412.01	321.78	275.49	267.41	305.31	399.74	474.79	920.01	523.98
293.91	240.80	224.45	236.52	303.35	397.57	439.58	598.72	456.82
367.86	286.74	232.51	205.63	197.86	212.57	234.74	788.08	266.87
577.02	468.56	428.97	435.85	501.63	568.97	577.50	1204.70	574.63
520.08	425.70	391.17	401.12	460.23	501.39	503.02	1038.60	472.86
338.15	284.93	270.91	287.22	356.55	409.59	456.17	645.35	445.68
444.99	350.97	299.15	283.95	297.99	335.24	369.70	928.89	394.54
384.54	297.69	258.71	254.26	286.16	331.41	372.24	842.92	387.75
373.57	291.08	253.75	250.53	260.81	283.61	290.90	795.50	299.73
484.01	381.39	333.19	316.96	321.11	335.23	338.40	1003.87	338.64
451.93	345.48	288.01	273.25	278.16	301.28	323.33	977.83	331.89
535.45	410.97	342.32	317.87	317.22	329.99	342.32	1174.78	338.60
526.80	399.52	324.01	297.46	293.33	319.12	348.04	1135.34	375.92
643.78	502.35	421.37	397.48	393.42	410.16	418.70	1373.90	421.37
593.66	482.99	433.83	451.10	559.13	699.75	893.53	1212.36	967.99
535.30	435.46	387.20	381.47	451.54	589.64	703.99	1102.34	815.15
822.85	633.02	517.12	474.12	456.87	464.64	455.53	1763.33	445.05
646.56	541.81	491.51	507.57	592.81	681.22	716.85	1277.46	699.63
683.59	519.30	426.09	395.66	393.65	421.46	436.90	1455.18	461.60
703.57	531.77	423.19	380.76	358.19	375.24	387.75	1518.09	406.02
546.89	422.82	356.64	331.88	339.12	368.63	383.50	1167.07	404.47
457.76	373.89	344.11	366.83	475.65	604.42	746.58	920.34	845.31
466.81	383.68	365.71	404.74	586.66	860.44	1055.99	958.01	1032.53
404.14	338.15	325.84	348.27	448.26	573.02	650.76	812.39	718.05
573.49	482.17	499.51	583.08	917.74	1436.09	1755.83	1136.94	1520.57
443.48	356.23	336.55	363.46	524.72	792.44	970.73	919.04	913.63
209.39	173.24	166.97	182.93	248.84	347.40	387.69	455.54	344.80
576.00	457.77	395.10	381.47	398.15	411.91	413.01	1183.79	411.91
722.71	582.89	539.82	590.30	948.83	1681.08	1449.93	1442.05	2274.40
222.36	181.79	171.36	184.33	240.59	325.82	380.79	475.26	403.72
211.80	178.45	173.42	196.26	274.51	350.00	374.09	422.21	377.45
267.68	217.83	196.89	199.30	244.71	311.81	361.07	565.48	379.07
421.54	337.93	299.44	303.25	373.57	499.98	639.97	888.00	722.71
443.14	384.86	410.31	514.71	969.36	1661.77	1755.83	912.79	1384.80

Πίνακας Π2: Μέτρα ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(0)}$

$E_{0(0)}$										
ΤΜΗΜΑ/ΕΤΟΣ	1°		2°		3°		4°		5°	
1ο ΤΜΗΜΑ	AVG	1583.62	AVG	1231.19	AVG	1943.22	AVG	1425.62	AVG	1505.35
	MEDIAN	1413.85	MEDIAN	1134.58	MEDIAN	1762.16	MEDIAN	1376.78	MEDIAN	1463.00
	standar DE	535.03	standar DE	428.66	standar DE	705.65	standar DE	526.90	standar DE	560.85
	CV	0.34	CV	0.35	CV	0.36	CV	0.37	CV	0.37
	MAX	2782.11	MAX	2161.33	MAX	3451.50	MAX	2681.46	MAX	2655.00
MIN	1017.98	MIN	641.94	MIN	961.03	MIN	666.38	MIN	679.35	
2ο ΤΜΗΜΑ	AVG	1109.75	AVG	1058.18	AVG	1277.65	AVG	1108.70	AVG	1010.61
	MEDIAN	1082.18	MEDIAN	959.72	MEDIAN	1201.53	MEDIAN	1004.60	MEDIAN	928.89
	standar DE	192.40	standar DE	354.44	standar DE	314.60	standar DE	382.61	standar DE	319.68
	CV	0.17	CV	0.33	CV	0.25	CV	0.35	CV	0.32
	MAX	1238.41	MAX	1839.11	MAX	1890.34	MAX	1921.16	MAX	1733.72
MIN	690.62	MIN	653.27	MIN	820.55	MIN	678.65	MIN	598.72	
3ο ΤΜΗΜΑ	AVG	1426.35	AVG	1182.24	AVG	1620.77	AVG	1267.60	AVG	1232.50
	MEDIAN	1452.71	MEDIAN	1159.59	MEDIAN	1592.28	MEDIAN	1220.36	MEDIAN	1193.57
	standar DE	277.33	standar DE	214.47	standar DE	329.65	standar DE	244.26	standar DE	265.12
	CV	0.19	CV	0.18	CV	0.20	CV	0.19	CV	0.22
	MAX	1736.46	MAX	1640.41	MAX	2180.86	MAX	1643.29	MAX	1763.33
MIN	862.55	MIN	800.81	MIN	1096.62	MIN	804.69	MIN	795.50	
4ο ΤΜΗΜΑ	AVG	1183.75	AVG	1178.36	AVG	1321.42	AVG	1050.82	AVG	974.44
	MEDIAN	1174.96	MEDIAN	1138.21	MEDIAN	1270.49	MEDIAN	1008.68	MEDIAN	942.75
	standar DE	186.23	standar DE	292.94	standar DE	227.55	standar DE	157.56	standar DE	143.01
	CV	0.16	CV	0.25	CV	0.17	CV	0.15	CV	0.15
	MAX	1348.91	MAX	1578.61	MAX	1692.83	MAX	1314.40	MAX	1197.36
MIN	832.25	MIN	814.74	MIN	1064.17	MIN	842.88	MIN	805.10	
5ο ΤΜΗΜΑ	AVG	960.41	AVG	1029.16	AVG	1019.93	AVG	889.08	AVG	845.34
	MEDIAN	861.61	MEDIAN	963.66	MEDIAN	969.21	MEDIAN	900.87	MEDIAN	819.54
	standar DE	417.48	standar DE	480.93	standar DE	509.76	standar DE	370.35	standar DE	425.28
	CV	0.43	CV	0.47	CV	0.50	CV	0.42	CV	0.50
	MAX	1801.91	MAX	2244.72	MAX	2227.74	MAX	1621.93	MAX	1866.34
MIN	500.28	MIN	580.14	MIN	454.02	MIN	451.90	MIN	422.21	

Πίνακας Π3: Μέτρα ελαστικότητας Surface Modulus $E_{0(8)}$

$E_{0(8)}$										
ΤΜΗΜΑ/ΕΤΟΣ	1°		2°		3°		4°		5°	
1ο ΤΜΗΜΑ	AVG	627.55	AVG	667.80	AVG	621.71	AVG	656.28	AVG	632.38
	MEDIAN	643.30	MEDIAN	657.19	MEDIAN	621.69	MEDIAN	682.14	MEDIAN	662.87
	Standar DEV	205.80	Standar DEV	215.88	Standar DEV	206.26	Standar DEV	224.82	Standar DEV	199.24
	CV	0.33	CV	0.32	CV	0.33	CV	0.34	CV	0.32
	MAX	984.41	MAX	1096.88	MAX	1005.71	MAX	974.85	MAX	935.65
	MIN	343.08	MIN	361.20	MIN	318.64	MIN	295.38	MIN	318.64
2ο ΤΜΗΜΑ	AVG	458.05	AVG	488.41	AVG	476.94	AVG	520.72	AVG	484.49
	MEDIAN	434.46	MEDIAN	437.52	MEDIAN	441.26	MEDIAN	454.69	MEDIAN	445.68
	Standar DEV	142.22	Standar DEV	156.26	Standar DEV	165.10	Standar DEV	262.07	Standar DEV	210.64
	CV	0.31	CV	0.32	CV	0.35	CV	0.50	CV	0.43
	MAX	888.72	MAX	980.25	MAX	985.80	MAX	1396.56	MAX	1173.32
	MIN	291.95	MIN	323.15	MIN	294.58	MIN	265.85	MIN	266.87
3ο ΤΜΗΜΑ	AVG	486.91	AVG	521.91	AVG	484.26	AVG	517.95	AVG	491.80
	MEDIAN	400.25	MEDIAN	446.89	MEDIAN	417.11	MEDIAN	425.14	MEDIAN	413.69
	Standar DEV	217.06	Standar DEV	213.10	Standar DEV	198.78	Standar DEV	253.57	Standar DEV	215.90
	CV	0.45	CV	0.41	CV	0.41	CV	0.49	CV	0.44
	MAX	987.19	MAX	1047.96	MAX	951.98	MAX	1041.30	MAX	967.99
	MIN	289.92	MIN	330.45	MIN	314.85	MIN	301.11	MIN	299.73
4ο ΤΜΗΜΑ	AVG	864.00	AVG	876.27	AVG	902.43	AVG	872.65	AVG	886.00
	MEDIAN	711.97	MEDIAN	667.66	MEDIAN	693.38	MEDIAN	759.29	MEDIAN	718.05
	Standar DEV	479.25	Standar DEV	450.63	Standar DEV	537.41	Standar DEV	493.18	Standar DEV	497.75
	CV	0.55	CV	0.51	CV	0.60	CV	0.57	CV	0.56
	MAX	1821.32	MAX	1652.31	MAX	1841.18	MAX	2002.50	MAX	1841.18
	MIN	361.71	MIN	415.54	MIN	361.87	MIN	398.25	MIN	395.44
5ο ΤΜΗΜΑ	AVG	636.46	AVG	676.88	AVG	612.68	AVG	708.80	AVG	736.81
	MEDIAN	530.27	MEDIAN	518.84	MEDIAN	534.10	MEDIAN	599.71	MEDIAN	587.19
	Standar DEV	319.61	Standar DEV	392.08	Standar DEV	302.66	Standar DEV	386.97	Standar DEV	538.62
	CV	0.50	CV	0.58	CV	0.49	CV	0.55	CV	0.73
	MAX	1321.83	MAX	1662.00	MAX	1211.70	MAX	1638.46	MAX	2274.40
	MIN	288.18	MIN	325.31	MIN	258.82	MIN	321.81	MIN	277.17

Πίνακας Π4: Αποτελέσματα Ανάστροφου Υπολογισμού για το 5^ο έτος

Αποτελέσματα Ανάστροφου Υπολογισμού 5 ^{ου} έτους			
Χ.Θ.	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	E ₃ (MPa)
0.00	3246	230	398
0.20	9524	3322	438
0.40	4530	1691	384
0.60	3498	1690	99
0.80	3649	79	310
1.00	4614	9757	900
1.20	3665	5458	253
1.40	5739	1079	778
1.60	4766	12399	416
1.80	5826	2174	160
2.00	4465	1533	127
2.20	7299	873	760
2.40	5917	1302	311
2.60	4796	1270	466
2.80	3982	899	113
3.00	5522	590	197
3.20	6491	1090	170
3.40	7357	1125	323
3.60	7453	2080	189
3.80	6829	1118	216
4.00	5961	799	107
4.20	2710	361	110
4.40	2678	1367	106
4.60	5519	482	361
4.80	3966	522	329
5.00	2042	505	155
5.20	3594	1504	184
5.40	5135	824	140
5.60	2094	252	266
5.80	2744	273	190
6.00	3003	410	294
6.20	3973	764	180
6.40	4723	495	296
6.60	4099	1284	190
6.80	4724	725	362
7.00	3609	1794	134
7.20	3445	1377	127
7.40	6127	852	465
7.60	3486	532	334
7.80	5414	936	292
8.00	5746	1534	261
8.20	4123	549	251
8.40	2126	118	743
8.60	2478	201	209
8.80	2469	226	231
9.00	2878	567	121

9.20	3369	3777	78
9.40	3535	508	111
9.60	2443	342	148
9.80	3734	439	145
10.00	3538	89	170
10.20	2653	154	517
10.40	3627	356	114
10.60	1929	129	430
10.80	2041	134	78
11.00	4613	638	374
11.20	9005	405	354
11.40	6181	207	472
11.60	3108	112	171
11.80	4848	518	961
12.00	2135	79	358
12.20	1963	226	65
12.40	1461	119	107
12.60	2249	383	84
12.80	3544	850	95
13.00	5986	248	133