



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

Συμβολή στη διερεύνηση της επιτόπου
συμπεριφοράς ασφαλικών οδοστρωμάτων
κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλης Παπαβασιλείου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Συμβουλευτική επιτροπή

Α. Λοΐζος (επιβλέπων) Καθηγητής ΕΜΠ

Γ. Κανελλαΐδης Καθηγητής ΕΜΠ

Α. Καλτσούνης Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κατεργασία υλικών στρώσεων ασφαλικών οδοστρωμάτων με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου στο πλαίσιο της επιτόπου και σε βάθος του οδοστρώματος ψυχρής ανακύκλωσης αποτελεί εξελιγμένη τεχνολογία, χρήσιμη για την αποκατάσταση οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν εκτεταμένες φθορές. Η υπόψη τεχνική ανακύκλωσης συμβάλλει επίσης στη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Από τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας διαπιστώθηκε ότι η έρευνα περιορίζεται κυρίως σε θέματα σύνθεσης κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών στο εργαστήριο. Δεν υπάρχει όμως συστηματική πληροφόρηση για τη συμπεριφορά του υλικού επιτόπου και για την επίδραση του στη συνολική συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επιπλέον, η έως τώρα διεθνής έρευνα περιορίζεται σε κατεργασμένα με αφρώδη ασφαλτο μίγματα που προορίζονται για οδοστρώματα ελαφριάς κυκλοφορίας. Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς ασφαλικών οδοστρωμάτων βαριάς κυκλοφορίας, αρχικά φθαρμένων και στη συνέχεια ανακυκλωμένων με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου.

Η διερεύνηση βασίστηκε σε πειραματικά τμήματα βαριάς κυκλοφορίας Ελληνικών αυτοκινητοδρόμων, ανακυκλωμένα με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου. Πραγματοποιήθηκε συστηματική έρευνα με παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος για χρονικό διάστημα επτά περίπου ετών, υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (RLT: Real Loading Testing). Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με χρήση των εξελιγμένων συστημάτων καταγραφών και εκτέλεσης μη καταστρεπτικών δοκιμών NDT (Non-Destructive Tests) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Τομέα ΜΣΥ του ΕΜΠ. Στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν, ως «εργαλεία» υποστήριξης των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών.

Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε με βάση διεθνώς αποδεκτούς δείκτες δομικής κατάστασης, καθώς και με ανάστροφους υπολογισμούς για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων. Η διερεύνηση περιλαμβάνει θέματα σχετικά με τη συμπεριφορά του ανακυκλωμένου υλικού σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης. Έγινε αναλυτικός υπολογισμός των κρίσιμων εντατικών μεγεθών στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων MLT (Multi-Layer Theory), καθώς και με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με βάση τα υπόψη αποτελέσματα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις και

κριτική των βασικότερων σχέσεων εκτίμησης του χρόνου ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επίσης πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και εγκατάσταση συστήματος επιτόπου μέτρησης (in-situ instrumentation) της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης με αισθητήρες οπτικών ινών (fiber optics), οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε κρίσιμα σημεία του «σώματος» του εν λειτουργία ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Από τις αναλύσεις προέκυψαν συμπεράσματα, τα οποία δεν επιβεβαιώνουν τη διεθνώς επικρατούσα άποψη, ότι το κατεργασμένο υλικό παρουσιάζει αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Από την παρούσα έρευνα προέκυψαν επίσης συμπεράσματα, που θέτουν υπό αμφισβήτηση την επικρατούσα θεώρηση, για την εξέλιξη της επιτόπου συμπεριφοράς των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών και κατ' επέκταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επιπλέον, σε αντίθεση με ότι πιστεύεται έως σήμερα διεθνώς, προέκυψε ότι υπό προϋποθέσεις, η κόπωση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού. Οι διαπιστώσεις αυτές είναι κρίσιμες για την ευρύτερη θεώρηση, τον τρόπο διαστασιολόγησης και την πρόβλεψη της επιτόπου συμπεριφοράς, διαδικασίες οι οποίες πιστεύεται ότι πρέπει να βελτιωθούν / αναθεωρηθούν σε περιπτώσεις τέτοιου τύπου ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων βαριάς κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των συλλεχθέντων στοιχείων με το σύστημα οπτικών ινών (fiber optics) επιβεβαίωσαν τα συμπεράσματα των αναλυτικών υπολογισμών.

Η έρευνα περιλαμβάνει επίσης πρακτικά συμπεράσματα, σχετικά με τον τρόπο ελέγχου και τη διασφάλιση ποιότητας υλικών κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο. Προτείνεται επίσης μεθοδολογία υλοποίησης επιτόπου ελέγχων με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT).

Για περαιτέρω έρευνα προτείνεται συνεχής παρακολούθηση των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων για διερεύνηση της περίπτωσης εμφάνισης παραμενουσών παραμορφώσεων, ή άλλου τύπου αστοχιών, καθώς και έρευνα της επίδρασης των μεταβολών της θερμοκρασίας και του φορτίου. Η παρούσα διατριβή πιστεύεται ότι μπορεί να συμβάλλει επίσης, σε ενδεχόμενη ερευνητική προσπάθεια ανάπτυξης καταστατικών νόμων της μηχανικής για αντίστοιχα μίγματα κατεργασμένα με αφρώδη ασφαλτο.

SUMMARY

Treatment of asphalt pavement materials using foamed asphalt technique in the framework of deep cold in-place recycling (CIPR) is an advanced technology, useful for the rehabilitation of severe damaged pavements. The above-mentioned recycled technique is also environment-friendly and energy saving. Following the international review, it was found out that research is limited mainly in cases concerning mix design procedures of foamed asphalt treated materials in the laboratory. However, there is not enough information about the field performance of the foamed treated material and its influence on the overall recycled pavement behaviour. Moreover, the research is limited to low-trafficked pavements. Aim of the present thesis is the investigation of the in-situ behaviour of originally damaged heavy-duty pavements and then recycled using the foamed asphalt technique.

The investigation was carried out on experimental heavy-trafficked pavements of Greek highways, recycled using the foamed asphalt technique. A comprehensive research study was performed, involving a seven-year monitoring of the pavement performance, under Real Loading Testing (RLT). The research was carried out using mainly Non-Destructive Testing (NDT) Systems of the Laboratory of Highway Engineering of NTUA. Laboratory test results were also used in order to support the analysis of the in-situ collected data.

The structural condition of the recycled pavement was determined using internationally accepted indicators, as well as performing back-analysis for the estimation of the mechanical characteristics of the individual layers. The research includes aspects concerning stress-dependent behaviour of the recycled material. Strain response analysis was carried out based on Multi-Layer Theory (MLT), as well as using Finite Elements Method (FEM). Using these results as input in transfer functions and algorithms, calculations were performed for the estimation of the structural life cycle of the recycled pavement. In-situ instrumentation was also performed using fiber optic sensors, with the aim of measuring the horizontal strain in critical positions of the “body” of the in-service recycled pavement.

The results arisen from the analyses do not confirm the international opinion about the increase of the modulus of the recycled material with increased applied stress (stress-dependent behaviour). The conclusions from the present research bring into question the consideration about the development of the in-situ performance of the foamed asphalt treated material and consequently of the recycled pavement.

Moreover, in contrary to the international opinion, it was concluded that under specific conditions fatigue is not the critical failure mode of the foamed asphalt treated material. The above conclusions are critical for the pavement design procedure and the prediction of the in-situ behaviour of the recycled pavements using the foamed asphalt technique. It is believed, that these processes need improvement / reconsideration. The analysis of the in-situ collected data using fiber optic sensors confirmed the conclusions arisen from the analytical calculations.

The research includes also practical conclusions regarding quality control and assurance of foamed asphalt treated materials. A methodology for in-situ measurements using NDT systems is also proposed.

Proposals for further research include continuous monitoring of the recycled pavements in order to detect eventual permanent deformation or any other type of distress as well as the influence of temperature and loading. It is believed, that the present thesis could also contribute to eventual future research for the development of constitutive models for foamed asphalt treated mixtures.

Περιεχόμενα κειμένου

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Αντικείμενο της έρευνας	4
1.3	Δομή της διατριβής	11
2.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΦΡΩΔΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΟΥ	13
2.1	Ιστορική αναδρομή των συστημάτων παραγωγής αφρώδους ασφάλτου	13
2.2	Παραγωγή αφρώδους ασφάλτου	14
2.3	Ιδιότητες αφρώδους ασφάλτου	16
2.4	Εφαρμογές της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου	19
2.5	Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων / κατεργασμένων υλικών	22
2.6	Καταλληλότητα αδρανών υλικών	25
2.7	Μελέτη σύνθεσης.....	26
2.8	Εργαστηριακές δοκιμές	27
2.8.1	Παρασκευή και συντήρηση δοκιμών.....	27
2.8.2	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS)	28
2.8.3	Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS)	30
2.8.4	Τριαξονικές δοκιμές (tri-axial testing)	31
2.8.5	Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (indirect tensile test)	33
2.9	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών	35
2.10	Συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση	36
2.11	Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλο υλικού	37
2.12	Σχέσεις εκτίμησης χρόνου ζωής	39
2.12.1	Φάση 1 (μείωση δυσκαμψίας).....	40
2.12.2	Φάση 2 (παραμένουσες παραμορφώσεις)	43
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	46
3.1	Γενικά	46
3.2.	Έρευνες και δοκιμές πριν από την εφαρμογή της ανακύκλωσης	49
3.2.1	Εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά ημιακάμπτου οδοστρώματος	52
3.2.2	Εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά ευκάμπτου οδοστρώματος	53
3.3.	Στοιχεία διατομών ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων	54

3.3.1 Διατομή ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος	54
3.3.2 Διατομή ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος	55
3.4. Εφαρμογή της ανακύκλωσης.....	56
4. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	63
4.1 Γενικά	63
4.2 Συστήματα επιτόπου συλλογής στοιχείων	64
4.3. Εκτίμηση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος	69
4.3.1 Διαδικασία ανάστροφων υπολογισμών.....	69
4.3.2 Κρίσιμα εντατικά μεγέθη.....	71
4.4. Διαδικασία εκτέλεσης των επιτόπου δοκιμών.....	71
5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	74
5.1. Γενικά	74
5.2. Αξιολόγηση με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης	74
5.2.1 Γενικά	74
5.2.2 Δοκιμές σε ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα	78
5.2.3 Δοκιμές σε ανακυκλωμένα εύκαμπτα οδοστρώματα	89
5.2.4 Επιμέρους συμπεράσματα	92
5.3. Ανάλυση συμπεριφοράς με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών	93
5.3.1 Γενικά	93
5.3.2 Ευαισθησία κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία	95
5.3.3 Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες.....	98
5.3.3.1 Κατεργασμένο υλικό	98
5.3.3.2 Νέες ασφατικές στρώσεις	104
5.4. Μηχανική ανάλυση μέσω ανάστροφων υπολογισμών	106
5.4.1 Γενικά	106
5.4.2 Παράγοντες επιρροής αποτελεσμάτων ανάστροφων υπολογισμών	107
5.4.2.1 Εναπομένουσα στρώση από ΚΘΑ	108
5.4.2.2 Πάχος εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ	110
5.4.2.3 Πάχος εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα	116
5.4.2.4 Πάχη επιμέρους στρώσεων	119
5.4.2.5 Επιμέρους συμπεράσματα.....	129

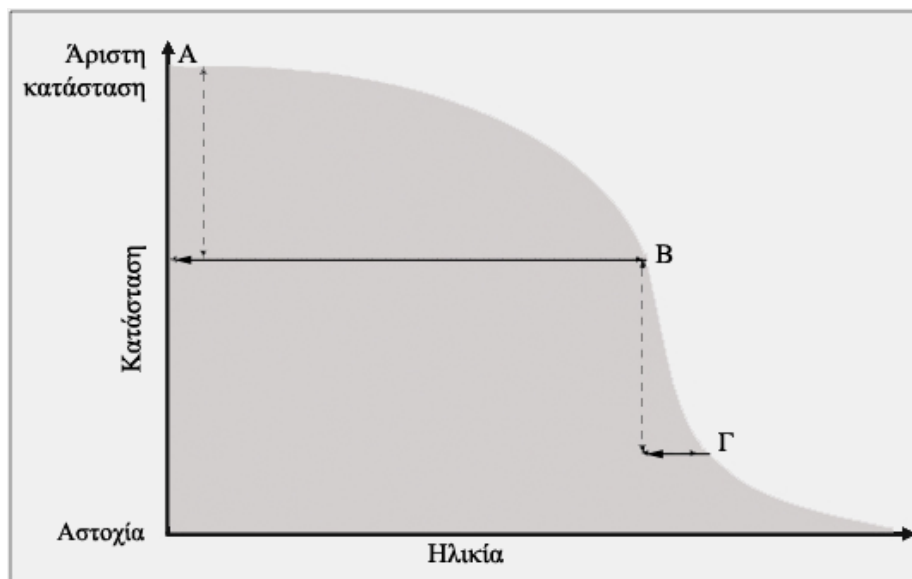
5.4.3 Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών	131
5.4.3.1 Κατεργασμένη με αφρώδη ασφαλτο στρώση	132
5.3.2.2 Ασφαλτικές στρώσεις	135
5.4.3.3 Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.....	136
5.4.3.4 Επιμέρους συμπεράσματα	140
5.5. Ανάλυση κρίσιμων εντατικών μεγεθών (strain response analysis).....	142
5.5.1 Ανάλυση με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT)	143
5.5.2 Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE).....	147
5.5.3 Επιμέρους συμπεράσματα	152
5.6. Διερεύνηση σχέσεων εκτίμησης χρόνου ζωής οδοστρώματος.....	154
5.6.1 Γενικά	154
5.6.2 «Σχέσεις μεταφοράς» βάσει των τεχνικών οδηγιών TG2	157
5.6.2.1 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με μελέτη.....	158
5.6.2.2 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με φθορά μετά	159
5.6.2.3 Φθορά κατεργασμένης στρώσης σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»	160
5.6.3 «Νόμος κόπωσης» κατεργασμένου υλικού	160
5.6.3.1 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με μελέτη.....	161
5.6.3.2 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με φθορά μετά	162
5.6.3.3 Φθορά κατεργασμένης στρώσης σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»	163
5.6.4 «Νόμος κόπωσης» ασφαλικών στρώσεων	164
5.6.4.1 Φθορά ασφαλικών στρώσεων πριν την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού, σε σχέση με μελέτη.....	164
5.6.4.2 Φθορά ασφαλικών στρώσεων πριν την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού, σε σχέση με φθορά μετά	165
5.6.4.3 Φθορά ασφαλικών στρώσεων σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.....	165
5.6.5 Επιμέρους συμπεράσματα	166

6. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ «ΩΡΙΜΑΝΣΗ» ΤΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	169
6.1. Γενικά	169
6.2. Συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης	169
6.3. Εξέλιξη της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος	176
6.3.1 Αξιολόγηση με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης.....	176
6.3.2 Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών	179
6.3.2.1 Κατεργασμένη με αφρώδη ασφαλτο στρώση	180
6.3.2.2 Ασφαλτικές στρώσεις	184
6.3.2.3 Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.....	188
6.3.2.4 Επιμέρους συμπεράσματα	192
7. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	196
7.1. Γενικά	196
7.2. Περιγραφή - γενικές αρχές συστήματος οπτικών ινών	197
7.3. Εγκατάσταση και εκτέλεση επιτόπου δοκιμών	199
7.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων καταγραφών	205
7.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων	207
7.6 Επιμέρους συμπεράσματα	210
8. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	212
8.1 Ανακεφαλαίωση.....	212
8.2 Βασικά συμπεράσματα και σχολιασμός	215
8.3 Σχόλια και συμπεράσματα με πρακτικό περιεχόμενο.....	217
8.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	222
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	224
Συντομογραφίες	232
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία 60 χρόνια παρατηρείται παγκοσμίως μεγάλη ανάπτυξη των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο των οδικών υποδομών. Με τον χρόνο όμως δημιουργήθηκε εύλογα και η ανάγκη διαχείρισης της συντήρησής τους. Σε πολλές περιπτώσεις, η ελλιπής συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη δομική του κατάσταση. Όπως φαίνεται (ποιοτικά) στο Σχήμα 1.1, το οποίο αναπαριστά τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, αν δεν γίνει συντήρηση έγκαιρα (ενδεικτικά και πριν από το χρονικό σημείο «B») ακολουθεί ραγδαία πτώση της δομικής του κατάστασης. Το γεγονός της έλλειψης επαρκούς συντήρησης, το οποίο παρατηρείται συχνά, οδηγεί μετά από σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (σημείο «Γ») σε ανάγκη σοβαρής αποκατάστασης (ενδεχομένως ανακατασκευή οδοστρώματος).



Σχήμα 1.1. Εξέλιξη δομικής κατάστασης οδοστρώματος χωρίς συντήρηση

Η περίπτωση της ολικής ανακατασκευής του οδοστρώματος, προσφέρει μεν το πλεονέκτημα της αναβάθμισης και τη δυνατότητα βελτίωσης της γεωμετρίας της οδού, έχει όμως σοβαρά μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος και τη μεγάλη χρονική διάρκεια όχλησης της κυκλοφορίας (COST-343 2004). Το τελευταίο μειονέκτημα είναι σημαντικό, ιδιαίτερα στις

περιπτώσεις αυτοκινητοδρόμων, λόγω των μεγάλων κυκλοφοριακών προβλημάτων που προκαλούν οι εργασίες αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Κατά συνέπεια, η λύση της ολικής ανακατασκευής δεν είναι επιθυμητή σε περιπτώσεις ανακατασκευής και κυρίως όταν πρόκειται για οδοστρώματα βαριάς κυκλοφορίας.

Η λύση της επίστρωσης νέων ασφαλικών στρώσεων προκαλεί αύξηση του υψομέτρου της οδού. Υπάρχει επίσης μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης ανακλαστικών αστοχιών, καθώς δεν γίνεται αποκατάσταση των υποκειμένων στρώσεων. Λύση που περιλαμβάνει συνδυασμό της επίστρωσης νέων ασφαλικών στρώσεων με φρεζάρισμα μέρους των υφισταμένων, ή/και με χρήση ενδιάμεσων στρώσεων από γεωσυνθετικά, συνήθως δεν επαρκεί για την αποκατάσταση οδοστρωμάτων με εκτεταμένες φθορές.

Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι οι προαναφερθείσες μέθοδοι αποκατάστασης του οδοστρώματος δεν προσφέρουν ικανοποιητικές από τεχνικοοικονομική άποψη λύσεις. Επιπλέον, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται προσπάθεια επαναχρησιμοποίησης των υλικών των φθαρμένων οδοστρωμάτων για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος. Τα παραπάνω οδήγησαν διαχρονικά στην ανάπτυξη εναλλακτικών κατασκευαστικών μεθόδων που στηρίζονται σε τεχνικές ανακύκλωσης (PIARC 2001). Αρχικά εφαρμόστηκε η τεχνική της θερμής ανακύκλωσης, η οποία όμως δεν αποτελεί λύση αποκατάστασης οδοστρωμάτων με εκτεταμένες αστοχίες (Φωτογραφία 1.1), ιδιαίτερα αν το πρόβλημα είναι σε βάθος. Η εφαρμογή της περιορίζεται ως επί το πλείστον στην αποκατάσταση των επιφανειακών στρώσεων του οδοστρώματος (εφόσον η γήρανση του υφισταμένου ασφαλτομίγματος το επιτρέπει), συνεισφέροντας στη βελτίωση της ποιότητας κύλισης (λειτουργικά χαρακτηριστικά) και δευτερευόντως στη δομική ενίσχυση του οδοστρώματος.

Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται η τεχνική της σε βάθος ψυχρής ανακύκλωσης (AIPCR & PIARC 2003), στην οποία επικεντρώνεται η παρούσα διατριβή. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται, υπό το πρίσμα της ορθολογικότερης διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων, με σκοπό την αύξηση της αποτελεσματικότητας των υπαρχόντων κονδυλίων. Αποτελεί γρήγορη μέθοδο αποκατάστασης κυρίως οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων, η οποία επιπροσθέτως είναι φιλική προς το περιβάλλον. Σημειώνεται, ότι η υπόψη τεχνική εφαρμόζεται είτε επιτόπου, είτε σε σταθερή εγκατάσταση. Αντικείμενο όμως της συγκεκριμένης διατριβής είναι η επιτόπου εφαρμογή της ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος, η οποία παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον.

Η επέμβαση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί έως το βάθος όπου έχει προκύψει το δομικό πρόβλημα, με κατεργασία / σταθεροποίηση των υλικών των φθαρμένων στρώσεων του οδοστρώματος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία στρώση με ανώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, η οποία αποτελεί τη βάση / υπόβαση του οδοστρώματος. Ακολουθεί

επίστρωση με νέες ασφαλτικές στρώσεις για την αναβάθμιση της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την εφαρμογή της υπόψη τεχνικής αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.



Φωτογραφία 1.1. Οδόστρωμα με εκτεταμένες αστοχίες

Στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση στο πλαίσιο της αποκατάστασης των οδοστρωμάτων περιλαμβάνεται η δραστική μείωση των απαιτούμενων αποθεσιοθαλάμων, της χρησιμοποίησης νέων υλικών από μη ανανεώσιμες πηγές, καθώς και των μετακινήσεων οχημάτων μεταφοράς αδρανών, με αποτέλεσμα μικρότερη ατμοσφαιρική ρύπανση και μείωση των φθορών στους δρόμους πρόσβασης στο εργοτάξιο. Τα πλεονεκτήματα αυτά, εκτός από τη μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον, έχουν ως αποτέλεσμα και τη μείωση ενδεχομένως του κόστους κατασκευής.

Για την κατεργασία των υλικών οδοστρωμάτων στην περίπτωση της επιτόπου ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος χρησιμοποιούνται συνήθως ως σταθεροποιητές (συνδετικά) τσιμέντο, ασφαλτικό γαλάκτωμα, ή αφρώδης άσφαλτος (Foamed Asphalt: FA). Από τους προαναφερθέντες τύπους σταθεροποιητών η αφρώδης άσφαλτος (AIPCR & PIARC 2003) αποτελεί τη σχετικά νεότερη εξέλιξη της υπόψη τεχνικής ανακύκλωσης των οδοστρωμάτων. Σε σχέση με τη χρήση τσιμέντου, η αφρώδης άσφαλτος συνεισφέρει στη δημιουργία λιγότερο παχυρού ανακυκλωμένου υλικού (Theyse et al. 2004). Τα μειονεκτήματα των ασφαλτικών γαλακτωμάτων, σε σχέση με τη χρήση της αφρώδους ασφάλτου, εντοπίζονται κυρίως στο σχετικά αυξημένο κόστος και στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα που απαιτείται για παράδοση

του οδοστρώματος στην κυκλοφορία μετά την κατασκευή, λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού υγρασίας και του αυξημένου χρόνου που απαιτείται για τη μείωσή της (Van Wijk 1984).

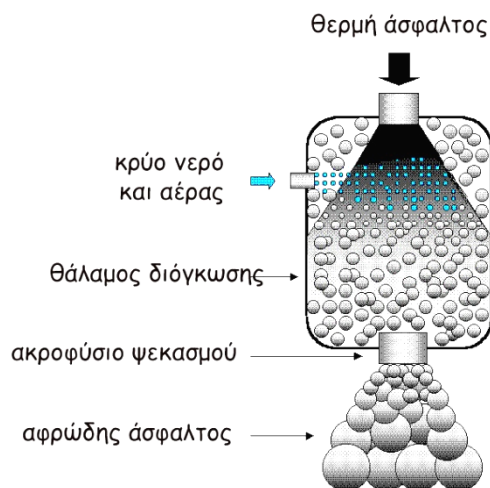
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, η έρευνα επικεντρώθηκε στην επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση σε βάθος με χρήση αφρώδους ασφάλτου με προσθήκη μικρής ποσότητας υδραυλικής κονίας (τσιμέντου), που αναφέρεται και ως ενεργή παιπάλη (active filler). Η τεχνική της αφρώδους ασφάλτου αποτελεί σήμερα την τελευταία τεχνολογική εξέλιξη της τεχνικής της ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος. Εφεξής, θα χρησιμοποιείται η έκφραση ανακύκλωση (ή κατεργασία) με αφρώδη άσφαλτο. Η υπόψη τεχνική τυγχάνει τα τελευταία χρόνια ευρύτατης αποδοχής παγκοσμίως, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αποκατάστασης οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν μεγάλες φθορές σε βάθος της δομής του οδοστρώματος.

Η παρούσα διατριβή επιχειρεί ειδικότερα να συμβάλει στη διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς ασφαλικών οδοστρωμάτων (εύκαμπτα, ημιάκαμπτα), στα οποία έχει εφαρμοστεί ανακύκλωση με αφρώδη άσφαλτο. Πρόκειται για επιστημονικό πεδίο, το οποίο όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του υποκεφαλαίου 1.2, δεν έχει έως σήμερα επαρκώς διερευνηθεί με ταυτόχρονη υποστήριξη δημοσιευμένου έργου. Η έρευνα επικεντρώνεται τόσο στο χαρακτηρισμό του υλικού της κατεργασμένης στρώσης, όσο και του αποκαταστημένου οδοστρώματος συνολικά.

1.2 Αντικείμενο της έρευνας

Ιστορικά, το σύστημα παραγωγής της αφρώδους ασφάλτου ανάγεται στο έτος 1957, όμως η αφρώδης άσφαλτος δεν χρησιμοποιήθηκε για ανακύκλωση οδοστρωμάτων πριν από τη δεκαετία του 1980. Σημειώνεται, ότι εκτός από την ανακύκλωση υφισταμένων οδοστρωμάτων, η εφαρμογή της κατεργασίας ασύνδετων υλικών με αφρώδη άσφαλτο για βάσεις / υποβάσεις σε νέα οδοστρώματα κερδίζει επίσης έδαφος διεθνώς. Η περίπτωση όμως αυτή δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Η αφρώδης άσφαλτος παράγεται με προσθήκη μικρής ποσότητας νερού σε θερμή άσφαλτο (Σχήμα 1.2). Στην αφρώδη κατάσταση, το ασφαλικό συνδετικό μπορεί να προστεθεί και να αναμειχθεί με τα προς κατεργασία ασύνδετα υλικά οδοστρώματος, στις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.2. Παραγωγή της αφρώδους ασφάλτου

Διεθνώς, η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στον έλεγχο κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο ασύνδετων υλικών στο εργαστήριο. Οι εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζονται ως επί το πλείστον στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της διαδικασίας της μελέτης σύνθεσης του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλτο υλικού (Kim & Lee 2006). Για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων των υπόψη μιγμάτων έχουν γίνει ορισμένες εργαστηριακές αναλύσεις και κάποιες μεμονωμένες εφαρμογές. Σχετικές έρευνες που στηρίζονται σε δοκιμές και έλεγχο του υλικού στο εργαστήριο αναφέρονται μεταξύ άλλων στις πηγές (Ruckel et al. 1980), (Lee 1980), (Van Wijk & Wood 1982), (Little et al. 1983), (Castedo-Franco & Wood 1983), (Roberts et al. 1984), (Asi 2001), (Jenkins & van de Ven 2001), (Weston et al. 2002), (Jenkins et al. 2007), (Saleh 2007).

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι συμβατά με την επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλτο υλικού, όπως αναφέρεται και στην πηγή (Kekwick 2005). Παρακάτω αναφέρονται οι βασικότεροι λόγοι, για τους οποίους δεν μπορεί να στηριχθεί κανείς αποκλειστικά σε εργαστηριακές δοκιμές, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά ασφαλτικών οδοστρωμάτων κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο.

Οι εργαστηριακές δοκιμές παρέχουν τη δυνατότητα εξέτασης διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Σε σχέση όμως με την επιτόπου παρακολούθηση μειονεκτούν σημαντικά, λόγω της αδυναμίας των εργαστηριακών δοκιμών να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του υλικού όταν ενσωματώνεται στο

οδοστρώμα. Η αδυναμία αυτή σχετίζεται κυρίως με διαφοροποιήσεις ως προς τη διαδικασία και τις συνθήκες συμπύκνωσης κατά την κατασκευή, καθώς και των πραγματικών συνθηκών φόρτισης και εντατικής κατάστασης στο «σώμα» του εν λειτουργία ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Στις παραπάνω διαφοροποιήσεις της επιτόπου συμπεριφοράς, σε σχέση με τις εργαστηριακές δοκιμές, προστίθεται ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας στην περίπτωση εφαρμογής της ψυχρής ανακύκλωσης. Πρόκειται για το γεγονός, ότι τα κατεργασμένα υλικά χρειάζονται χρόνο εωσότου αποκτήσουν τη μέγιστη αντοχή τους (Muthen 1998). Η διαδικασία αυτή, κατά την οποία βελτιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κατεργασμένου υλικού με τον χρόνο, αναφέρεται ως «ωρίμανση» (curing). Στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί διάφορες διαδικασίες συντήρησης δοκιμών, στο πλαίσιο της προσομοίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού μετά την «ωρίμανσή» του. Η διαφοροποίηση όμως των συνθηκών συντήρησης των δοκιμών (θερμοκρασία, χρόνος, υγρασία) στο εργαστήριο, έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μηχανική αντοχή τους (Engelbrecht et al. 1985).

Η αξιολόγηση με αποκοπή πυρήνων από το αποκαταστημένο με την υπόψη τεχνική οδοστρώμα και εκτέλεση δοκιμών στο εργαστήριο είναι διαδικασία χρονοβόρα και δίνει περιορισμένη πληροφόρηση. Το πρόβλημα αυτό είναι μεγάλο όταν πρόκειται για οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων, καθώς ούτε δυνατή ούτε επιθυμητή είναι η αποκοπή μεγάλου αριθμού πυρήνων, ώστε να έχει κανείς επαρκές δείγμα για επεξεργασία και ανάλυση. Επιπλέον, στην περίπτωση εφαρμογής της επιτόπου ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος, υπάρχει συχνά αδυναμία αποκοπής πυρήνων πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, όπως αναφέρεται εκτός άλλων στην πηγή (Wirtgen 2004) και επιβεβαιώθηκε επίσης από επιτόπου έρευνες στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Είναι προφανές, ότι οι εργαστηριακές δοκιμές σε μίγματα αφρώδους ασφάλτου δεν μπορούν να αναπαραστήσουν πλήρως την επιτόπου συμπεριφορά του μίγματος και κατ' επέκταση του συνόλου του οδοστρώματος, λόγω της αλληλεπίδρασης των επιμέρους στρώσεων και της διαφοράς της εντατικής κατάστασης στο «σώμα» του οδοστρώματος υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Οι προαναφερθείσες «αδυναμίες» εκτίμησης της συμπεριφοράς στο εργαστήριο, καθιστούν απαραίτητη τη δομική αξιολόγηση των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών επιτόπου (Van Wijk & Wood 1982). Η ανάγκη παρακολούθησης μέσω καταγραφών της δομικής κατάστασης των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων σε βάθος

χρόνου επισημάνθηκε μεταξύ άλλων και από τις πηγές (Lancaster et al. 1994), (Ramanujam & Jones 2000).

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει περιορισμένος αριθμός αναφορών αξιολόγησης της δομικής κατάστασης δοκιμαστικών οδικών τμημάτων, στα οποία έχει εφαρμοστεί η τεχνική της ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος με χρήση αφρώδους ασφάλτου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η επιτόπου αξιολόγηση στηρίζεται κυρίως σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Ορισμένες έρευνες εξ αυτών αναφέρονται σε παράλληλη χρήση, πλην όμως περιορισμένου αριθμού, επιτόπου μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non-Destructive Tests: NDT) (COST-336 1998). Όμως, όπως προκύπτει και από τις πηγές (Bowering & Martin 1976), (Van Wijk & Wood 1983), (Van Wijk 1984), (Maccarrone et al. 1994), τα αποτελέσματα των μεμονωμένων δοκιμών αυτών (NDT) δεν αξιοποιούνται και κατ' επέκταση δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στα εξαχθέντα συμπεράσματα.

Ιδιαίτερα τα τελευταία 15 χρόνια περίπου οι επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές, με έμφαση στο Σύστημα του Παραμορφωσμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) (COST-336 1998), χρησιμοποιούνται ευρέως για την επιτόπου αξιολόγηση των οδοστρωμάτων (Lancaster et al. 1994). Η εφαρμογή όμως του Συστήματος FWD για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων είναι σχετικά περιορισμένη. Από το μέχρι σήμερα δημοσιευμένο έργο δεν προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά των υπόψη οδοστρωμάτων, για τους λόγους που αναφέρονται παρακάτω.

Συνήθως, οι δημοσιευμένες έρευνες σχετικά με το υπόψη θέμα περιορίζονται μόνο στους δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρώματος, με βάση κυρίως τη μέγιστη κεντρική υποχώρηση που προκύπτει από τις δοκιμές με το Σύστημα FWD (Ramanujam & Fernando 1997), (Kendal et al. 1999). Είναι όμως γνωστό, ότι τα στοιχεία που συλλέγονται από τις δοκιμές με το υπόψη σύστημα δεν μπορούν από μόνα τους να «αποτυπώσουν» λεπτομερώς τη δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος. Χρησιμοποιούνται κυρίως για σύγκριση της δομικής κατάστασης διάφορων οδοστρωμάτων (όμοιου τύπου) μεταξύ τους, ή για την εκτίμηση της εξέλιξης ενός οδοστρώματος σε βάθος χρόνου με δοκιμές που απέχουν χρονικά μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, τα στοιχεία αυτά δίνουν περιορισμένη μόνο πληροφόρηση σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία με χρήση κατάλληλων λογισμικών.

Οι εξαιρετικά λίγες αναφορές σε δοκιμές και σχετικές αναλύσεις περιορίζονται στον αρχικό χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος και δεν είναι συστηματικές (Nunn & Thom 2002), (Romanoshi et al. 2003), (Lane & Kazmierowski 2005), (Losa et al. 2009). Όμως, για την

εκτίμηση της επιτόπου συμπεριφοράς οδοστρωμάτων κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο σε βάθος χρόνου, χρειάζεται συστηματική παρακολούθηση και ανάλυση κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, λόγω της διαδικασίας «ωρίμανσης» του υλικού. Τα στοιχεία που θα συλλεχθούν είναι καθοριστικής σημασίας για την εκτίμηση της περαιτέρω συμπεριφοράς του κατεργασμένου μίγματος και κατά συνέπεια και του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση και ανάλυση των στοιχείων για εύλογο χρονικό διάστημα μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση των φορτίων από την κυκλοφορία.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις δημοσιευμένων διερευνήσεων, γίνεται εφαρμογή της τεχνικής της ανακύκλωσης / κατεργασίας με αφρώδη ασφαλτο σε οδοστρώματα μικρού φόρτου κυκλοφορίας (Jahren et al. 1998), (Lane & Kazmierowski 2003), (Kim et al. 2007), (Jahren et al. 2007), (Eller & Olson 2009). Η απουσία στοιχείων από εφαρμογή σε οδούς βαριάς κυκλοφορίας έχει ως συνέπεια η υπόψη τεχνική να περιορίζεται σε δευτερεύουσες οδούς. Μεγαλύτερη όμως σημασία έχει η εφαρμογή της σε δρόμους βαριάς κυκλοφορίας, όπως οι αυτοκινητόδρομοι. Για παράδειγμα, στη Γερμανία δεν εφαρμόζεται σε οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων.

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 έγινε προσπάθεια για πρόβλεψη της επιτόπου δομικής συμπεριφοράς και χαρακτηρισμό κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών στρώσεων οδοστρώματος. Ένας από τους λόγους ήταν, ότι για να εξακριβωθούν τα οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή της κατεργασίας των οδοστρωμάτων με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου, είναι απαραίτητο να υπάρχουν αξιόπιστες προβλέψεις της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας (Long-term Pavement Performance: LTPP) (Jenkins 2000).

Οι επιτόπου έρευνες επικεντρώθηκαν σε πειραματικά τμήματα, τα οποία υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη καταπόνηση με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (Heavy Vehicle Simulator: HVS) (Long & Theyse 2001). Η διαδικασία αυτή, σε συνδυασμό με εργαστηριακές δοκιμές, οδήγησε στην ανάπτυξη σχέσεων εκτίμησης του (δομικού) χρόνου ζωής των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο στρώσεων (Long 2001), (Long et al. 2002). Τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών έδειξαν, ότι η δυσκαμψία του υλικού μειώνεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα μετά την έναρξη της καταπόνησης, μέχρι κάποια σταθερή τιμή. Τα παραπάνω συμπεράσματα και οι σχέσεις δημοσιεύθηκαν σε σχετικές Τεχνικές Οδηγίες (TG2) (Asphalt Academy 2002) και στην πηγή (Long & Theyse 2004), όπου αναφέρεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται στο πλαίσιο της (δομικής) μελέτης οδοστρώματος. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές με τον προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS) αμφισβητήθηκαν, καθώς δεν έχουν επιβεβαιωθεί από επιτόπου μετρήσεις (Collings &

Thomson 2007), αλλά και από εμπειρικές παρατηρήσεις (Collings et al. 2004), οι οποίες όμως αφορούν σε ένα μόνο πιλοτικό τμήμα και δεν εμπεριέχουν στοιχεία συστηματικής ανάλυσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής γίνεται σχολιασμός των παραπάνω συμπερασμάτων, που προέκυψαν από τις δοκιμές επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS). Πέραν όμως της κριτικής, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη σύνταξη των Τεχνικών Οδηγιών TG2 έχει τα παρακάτω μειονεκτήματα, που καθιστούν αμφίβολη τη γενίκευση των συμπερασμάτων σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών της ανακύκλωσης με αφρώδη ασφαλτο. Συγκεκριμένα:

- Οι αναπτυχθείσες σχέσεις, καθώς και οι εκτιμήσεις της επιτόπου συμπεριφοράς αφορούν μόνο στο κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό και όχι στο κατεργασμένο / ανακυκλωμένο οδόστρωμα συνολικά.
- Οι δοκιμές με το HVS πραγματοποιήθηκαν σε οδοστρώματα οδών μικρής κυκλοφορίας και σε περιορισμένο αριθμό πιλοτικών τμημάτων (Long & Theyse 2002).

Σημειώνεται, ότι οι δοκιμές επιταχυνόμενης φόρτισης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS) παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, λόγω της δυνατότητας λήψης επιτόπου στοιχείων και εξαγωγής συμπερασμάτων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς και επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φορτίο τροχού και ο αριθμός φορτίσεων που επιθυμεί ο μελετητής. Όμως δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης, κυρίως λόγω του μικρού χρόνου μεταξύ των φορτίσεων κατά τις δοκιμές με το HVS.

Στην περίπτωση της πραγματικής κυκλοφορίας, εκτός του μεγαλύτερου χρόνου μεταξύ των φορτίσεων, οι τροχοί των βαρέων οχημάτων παρουσιάζουν «πλευρική μετατόπιση» (lateral wander), με αποτέλεσμα να μην καταπονείται το οδόστρωμα πάντα στο ίδιο ακριβώς σημείο. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι σημαντικές για την πρόβλεψη του χρόνου ζωής του οδοστρώματος, καθώς με την παρέλευση ικανού χρόνου μη φόρτισης του οδοστρώματος, λόγω ανάπαυλας φορτίσεων (rest period), επιτυγχάνεται «ανάκτηση» των ιδιοτήτων της ασφάλτου (recovery) και κατά συνέπεια των μηχανικών ιδιοτήτων του ασφαλομίγματος (healing). Συνέπεια τούτου είναι η μεγάλη αύξηση των επιτρεπομένων διελεύσεων έως αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές, ότι υπήρχε ανάγκη για κατασκευή πειραματικών τμημάτων και συστηματική επιτόπου παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας, υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (Real Loading Testing: RLT) της εξέλιξης της δομικής κατάστασης ανακυκλωμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων. Δεδομένου ότι δεν

μπορεί κανείς να στηριχθεί σε επιτόπου δειγματοληψίες και εργαστηριακές δοκιμές, ο μόνος τρόπος που απομένει είναι η χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT). Με αυτό τον τρόπο μπορεί να χαρακτηρίσει κανείς το οδόστρωμα συνολικό και όχι μόνο το κατεργασμένο / ανακυκλωμένο υλικό μεμονωμένα. Η ανάγκη πραγματοποίησης ενός τέτοιου πειράματος ενισχύεται και από σχετικά πρόσφατες βιβλιογραφικές αναφορές (Lane & Kazmierowski 2003), (Theyse et al. 2004), (Ramanujam & Jones 2007).

Στο πλαίσιο συνεργασίας του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ με το ΥΠΕΧΩΔΕ κατασκευάστηκαν πιλοτικά τμήματα αυτοκινητοδρόμων με εφαρμογή της επιτόπου ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος με χρήση της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου. Τονίζεται, ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για οδοστρώματα πολύ βαριάς κυκλοφορίας. Τα υπόψη πιλοτικά τμήματα θεωρήθηκαν ως πειραματικά και παρακολουθήθηκαν συστηματικά από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής (ΜΣΥ) του ΕΜΠ, με επιτόπου δοκιμές και συλλογή στοιχείων. Ορισμένα από αυτά επιλέχθηκαν για διερεύνηση της συμπεριφοράς οδοστρωμάτων που έχει εφαρμοστεί η υπόψη τεχνική σε βάθος χρόνου λειτουργίας και εντάχθηκαν στην παρούσα διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διατριβή εστιάζεται στη διερεύνηση της δομικής συμπεριφοράς των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων και περιλαμβάνει στάδια διερεύνησης από τη φάση της κατασκευής και το αρχικό στάδιο λειτουργίας, καθώς και τη συμπεριφορά για ένα χρονικό διάστημα μετά την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με χρήση των διαθέσιμων εξελιγμένων συστημάτων καταγραφών και εκτέλεσης δοκιμών του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Τομέα ΜΣΥ. Βασίστηκε κυρίως σε επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές (NDT) και καταγραφές με το Σύστημα του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (FWD) (COST-336 1998).

Για την υποστήριξη της διαδικασίας επεξεργασίας των καταγραφών με το Σύστημα FWD χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά το γεωφυσικό Σύστημα καταγραφής στρωματογραφίας «Γεωραντάρ» (Ground Penetrating Radar: GPR) (Maser 1994). Το υπόψη Σύστημα αποτελεί χρήσιμο «εργαλείο», για την εκτίμηση του πάχους των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ως «εργαλεία» υποστήριξης των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών. Οι δοκιμές έγιναν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα ΜΣΥ, σε συνεργασία και με το εργαστήριο οδοστρωμάτων του Πανεπιστημίου Stellenbosch.

Η παρούσα έρευνα περιλαμβάνει επιπλέον πιλοτική πειραματική εγκατάσταση συστήματος οπτικών ινών (fiber optics), για επιτόπου μετρήσεις εντατικών (παραμορφωσιακών) μεγεθών

στο «σώμα» του εν λειτουργία κατεργασμένου / ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Laval. Σκοπός των υπόψη δοκιμών είναι ο έλεγχος και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παραμορφωσιακών μεγεθών, που προκύπτουν με χρήση διεθνώς αποδεκτών λογισμικών ανάλυσης και κατ' επέκταση της αξιοπιστίας των υπολογιστικών «εργαλείων». Αξίζει να τονιστεί, ότι οι οπτικές ίνες αποτελούν επιστήμη αιχμής, που έχει αρχίσει να εφαρμόζεται και στα οδοστρώματα, για την επιτόπου καταγραφή των ανηγμένων παραμορφώσεων .

1.3 Δομή της διατριβής

Σε συνέχεια των εισαγωγικών υποκεφαλαίων 1.1 και 1.2, παρατίθενται τα στοιχεία που αφορούν στην τεχνολογία της αφρώδους ασφάλτου (κεφάλαιο 2). Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στον τρόπο παραγωγής, στις βασικές ιδιότητες και στις εφαρμογές της. Επιπλέον, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων / κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο υλικών, οι κυριότερες εργαστηριακές δοκιμές και ο τρόπος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων αυτών, οι θεωρήσεις σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά των υπόψη υλικών, καθώς και οι σχέσεις εκτίμησης του χρόνου ζωής. Εκτός από την παράθεση των βασικότερων θεμάτων σχετικά με την τεχνολογία της αφρώδους ασφάλτου, στο κεφάλαιο αυτό εμπεριέχονται στοιχεία από τη διεθνή έρευνα, τα οποία αξιολογούνται και κρίνονται με βάση τα συμπεράσματα από τις διερευνήσεις της παρούσας διατριβής.

Το κεφάλαιο 3 εμπεριέχει στοιχεία σχετικά με την κατασκευή των πειραματικών οδοστρωμάτων, στα οποία έγιναν οι επιτόπου δοκιμές. Αναφέρονται οι έρευνες πριν από την εφαρμογή της ανακύκλωσης, στοιχεία των διατομών των ανακυκλωμένων με αφρώδη άσφαλτο οδοστρωμάτων (δομική μελέτη), καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή της ανακύκλωσης. Στοιχεία από τις δοκιμές και τις παραδοχές της δομικής μελέτης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων ελήφθησαν υπόψη κατά τις αναλύσεις των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων μετά την εφαρμογή της ανακύκλωσης.

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι βασικές αρχές των συστημάτων επιτόπου συλλογής στοιχείων, η μεθοδολογία εκτίμησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, καθώς και η διαδικασία εκτέλεσης των επιτόπου δοκιμών.

Οι δοκιμές, οι αναλύσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις επιτόπου δοκιμές κατά το στάδιο της κατασκευής των πειραματικών οδοστρωμάτων και για χρονικό διάστημα 1-2 ετών μετά την απόδοσή τους στην κυκλοφορία περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο 5. Σκοπός των επιτόπου ερευνών ήταν η αξιολόγηση σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου

οδοστρώματος. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει την εξέλιξη των δεικτών δομικής κατάστασης, την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων (ασφαλτικών και κατεργασμένης στρώσης), καθώς και τον υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών (παραμορφωσιακών) μεγεθών στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων, έγιναν μελέτες ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, ως προς τις παραδοχές / δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία εφαρμογής των (ανάστροφων) υπολογισμών. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται επίσης διερεύνηση και κριτική των βασικότερων σχέσεων εκτίμησης του χρόνου ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Το κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τις δοκιμές, αναλύσεις και συμπεράσματα από τις επιτόπου δοκιμές μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού (σταθεροποίηση της δομικής του κατάστασης), για χρονικό διάστημα περίπου 7 ετών. Σκοπός των δοκιμών είναι η αξιολόγηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας για εύλογο χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή. Περιλαμβάνεται έλεγχος της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης και αξιολόγηση της δομικής του κατάστασης με βάση σχετικούς δείκτες, καθώς και με εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων.

Οι επιτόπου δοκιμές μέτρησης των κρίσιμων εντατικών (παραμορφωσιακών) μεγεθών με το σύστημα οπτικών ινών στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο 7. Κύριος σκοπός των δοκιμών είναι ο έλεγχος της δυνατότητας των διεθνώς αποδεκτών και ευρέως χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών «εργαλείων» (λογισμικών) να εκτιμήσουν την εντατική / παραμορφωσιακή κατάσταση με τέτοια ακρίβεια, ώστε τα συμπεράσματα που προκύπτουν να είναι ασφαλή. Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται η περιγραφή του συστήματος μέτρησης οπτικών ινών, οι γενικές αρχές λειτουργίας, η εγκατάσταση και εκτέλεση των επιτόπου δοκιμών, η επεξεργασία των συλλεχθέντων στοιχείων, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Το κεφάλαιο 8 περιλαμβάνει τα βασικότερα συμπεράσματα που σχετίζονται με τη θεμελιώδη έρευνα, συμπεράσματα με ευρύτερο πρακτικό περιεχόμενο, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο κεφάλαιο 9 υπάρχουν οι βιβλιογραφικές αναφορές της παρούσας διατριβής.

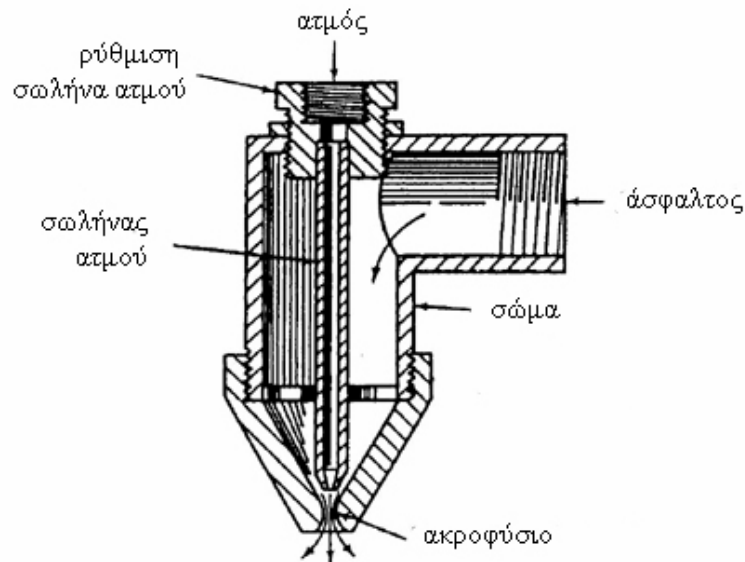
Στο Παράρτημα περιλαμβάνονται πίνακες με αποτελέσματα δοκιμών και αναλύσεων, καθώς και διαγράμματα συσχετίσεων αποτελεσμάτων.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΦΡΩΔΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΟΥ

2.1 Ιστορική αναδρομή των συστημάτων παραγωγής αφρώδους ασφάλτου

Η τεχνολογία της παραγωγής αφρώδους ασφάλτου έχει ιστορία που ανάγεται στο έτος 1889, όπου κατά τη διάρκεια εργασιών αποκατάστασης σε βάθος οδοστρώματος, στη Νεμπράσκα των ΗΠΑ, χρησιμοποιήθηκε ασφαλτός για βελτίωση της φέρουσας ικανότητας ασύνδετων υλικών βάσης (Van der Walt et al. 1999). Το έτος 1928, ο August Jacobi από το Ντάρμστατ της Γερμανίας κατασκεύασε το πρώτο σύστημα παραγωγής αφρώδους ασφάλτου.

Η βασικότερη εξέλιξη στην παραγωγή και χρήση αφρώδους ασφάλτου, η οποία ουσιαστικά θεωρείται και ως η πρώτη προσπάθεια προς τον σκοπό αυτό (Bowering & Martin 1976), αποτελεί η συσκευή που κατασκευάστηκε από τον καθηγητή Ladis Casanyi του Πανεπιστημίου της Αϊόβα των ΗΠΑ (Σχήμα 2.1). Χρησιμοποιούσε σύστημα, με το οποίο γινόταν εισαγωγή ατμού υπό πίεση σε θερμή άσφαλτο και εφαρμόστηκε επιτόπου στις ΗΠΑ (Αριζόνα) και στον Καναδά. Λόγω της πολυπλοκότητας της συσκευής και της αδυναμίας ελέγχου της ποσότητας του ατμού, το σύστημα δεν ήταν πρακτικό για επιτόπου εφαρμογή.



Σχήμα 2.1. Συσκευή παραγωγής αφρώδους ασφάλτου (Csanyi 1957)

Το έτος 1971 η εταιρία Mobil κατοχύρωσε στην Αυστραλία ως ευρεσιτεχνία το σύστημά της παραγωγής αφρώδους ασφάλτου. Η βασικότερη τροποποίηση του αρχικού συστήματος ήταν

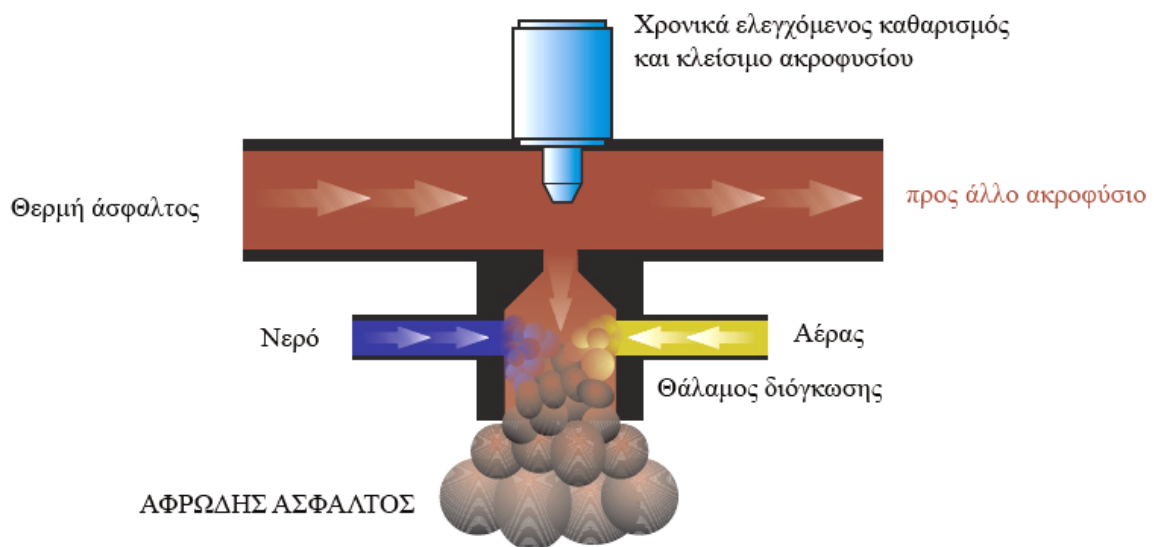
η αντικατάσταση του ατμού με ψεκασμό κρύου νερού, που έκανε την εφαρμογή της υπόψη τεχνικής οικονομικότερη και πιο πρακτική για εφαρμογή, με μικρές μόνο τροποποιήσεις των συμβατικών μηχανημάτων (Castedo-Franco & Wood 1983).

Εφαρμογές της υπόψη τεχνικής με ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφέρονται από το τέλος της δεκαετίας 1960 στην Αυστραλία (Bowering 1970). Στις ΗΠΑ, η κατασκευή πιλοτικών τμημάτων άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 (Ruckel et al. 1980).

Μετά το έτος 1991, οπότε έληξε και η περίοδος των δικαιωμάτων ευρεσιτεχνίας της Mobil αναπτύχθηκαν παγκοσμίως διάφορες παραλλαγές των συστημάτων παραγωγής αφρώδους ασφάλτου.

2.2 Παραγωγή αφρώδους ασφάλτου

Η αφρώδης άσφαλτος παράγεται σε θάλαμο διόγκωσης με προσθήκη μικρής ποσότητας νερού (συνήθως 2 - 4% κ.β.) σε θερμή άσφαλτο τύπου B60 έως B200 (Σχήμα 2.2). Το νερό εξατμίζεται ταχύτατα, δημιουργώντας εκρηκτική διαστολή του όγκου της ασφάλτου (συνήθως 10 – 25 φορές). Στην αφρώδη κατάσταση (Φωτογραφία 2.1), που αποτελεί προσωρινή φάση χαμηλού ιξώδους, το ασφαλτικό συνδετικό μπορεί να προστεθεί και να αναμειχθεί με τα προς ανακύκλωση αδρανή στις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

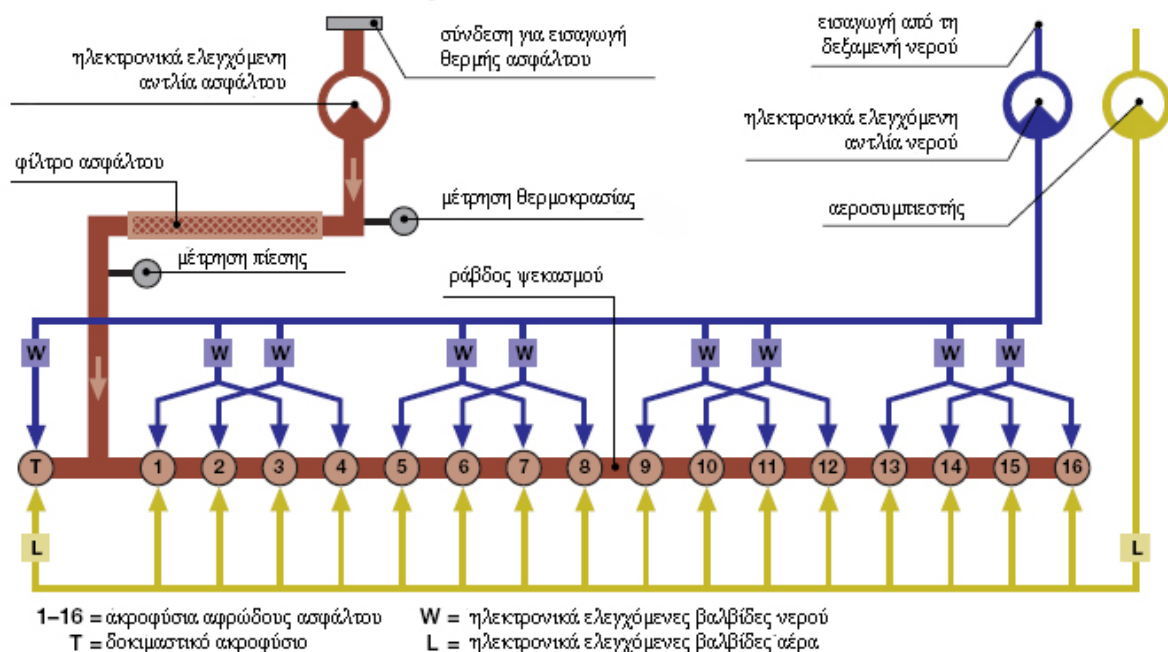


Σχήμα 2.2. Παραγωγή αφρώδους ασφάλτου (Wirtgen 2005)



Φωτογραφία 2.1. Αφρώδης ασφάλτος

Σημαντικό ρόλο για την ποιότητα της επιτόπου παραγόμενης αφρώδους ασφάλτου παίζει ο έλεγχος της διαδικασίας και των ποσοτήτων των παραγόντων που προστίθενται για την παραγωγή της (ασφάλτος, νερό, αέρας). Το διάγραμμα ενός σύγχρονου συστήματος παραγωγής αφρώδους ασφάλτου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



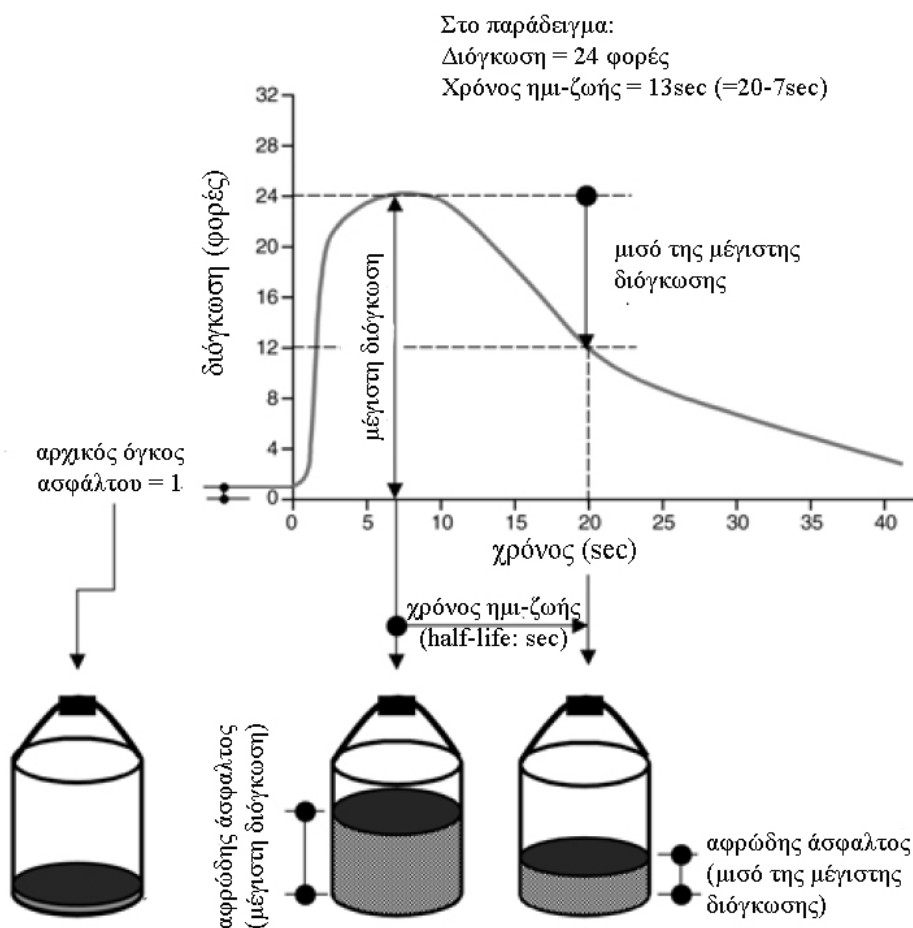
Σχήμα 2.3. Διάγραμμα συστήματος παραγωγής αφρώδους ασφάλτου (Wirtgen 2005)

2.3 Ιδιότητες αφρώδους ασφάλτου

Τα δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια για τον χαρακτηρισμό και την επιλογή των βέλτιστων ιδιοτήτων ενός ασφαλικού συνδετικού για την παραγωγή αφρώδους ασφάλτου (TRB 2008) είναι: ο λόγος διόγκωσης (expansion ratio: ER) και ο χρόνος ημι-ζωής (half-life: $t_{1/2}$) (Σχήμα 2.4).

Ο λόγος διόγκωσης (ER) αποτελεί εκτίμηση του ιξώδους της αφρώδους ασφάλτου και καθορίζει πόσο καλά διασκορπίζεται στο μίγμα. Υπολογίζεται ως ο λόγος του μέγιστου όγκου της αφρώδους ασφάλτου προς τον αρχικό όγκο.

Ο χρόνος ημι-ζωής ($t_{1/2}$) αποτελεί μέτρο της σταθερότητας της αφρώδους ασφάλτου και ένδειξη της ταχύτητας κατάπτωσης (συρρίκνωσης). Υπολογίζεται ως ο χρόνος (sec) για συρρίκνωση της αφρώδους ασφάλτου στο μισό του μέγιστου όγκου της.



Σχήμα 2.4. Χαρακτηριστικά αφρώδους ασφάλτου (Wirtgen 2004)

Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες ενός ασφαλικού συνδετικού για την παραγωγή αφρώδους ασφάλτου (Ramanujam & Jones 2000), (Wirtgen 2004).

Θερμοκρασία του ασφαλικού συνδετικού. Με αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται το ιξώδες της ασφάλτου, με συνέπεια την αύξηση του μεγέθους των φυσαλίδων που δημιουργούνται με την είσοδο του νερού κατά την παραγωγή αφρώδους ασφάλτου. Επειδή η υπόψη διαδικασία απορροφά θερμική ενέργεια από το ασφαλικό συνδετικό, η θερμοκρασία του ασφαλικού συνδετικού πριν από την παραγωγή της αφρώδους ασφάλτου πρέπει να υπερβαίνει τους 160°C (συνήθως είναι περί τους 175°C).

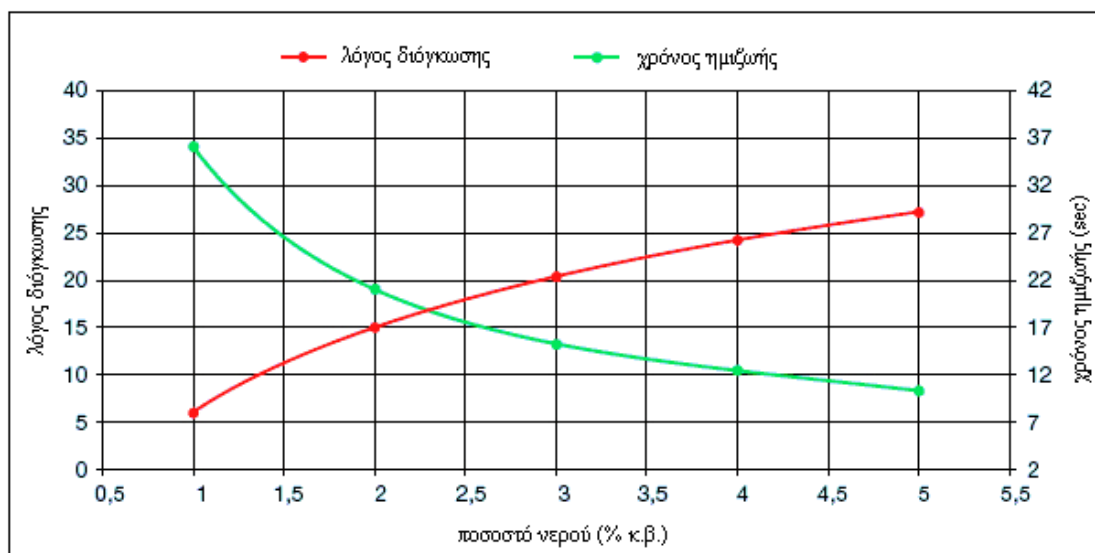
Τύπος του ασφαλικού συνδετικού. Συνήθως χρησιμοποιείται άσφαλτος με διείσδυση 80 έως 150, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στο παρελθόν και άσφαλοι με μικρότερες τιμές διείσδυσης. Σε περιοχές με εύκρατο κλίμα, επιλέγεται άσφαλτος με διείσδυση περίπου 100 (AIPCR & PIARC 2003). Τύποι ασφάλτου με μικρότερες τιμές διείσδυσης συνήθως αποφεύγονται, λόγω του κινδύνου να φράξουν τα ακροφύσια ψεκασμού. Επιπλέον, δεν παράγεται αφρώδης άσφαλτος πολύ καλής ποιότητας, με συνέπεια τη μη καλή διασπορά της στο μίγμα.

Προέλευση του ασφαλικού συνδετικού. Έχει παρατηρηθεί, ότι κάποιες άσφαλοι παράγουν καλύτερη αφρώδη άσφαλτο από άλλες, λόγω της σύνθεσής τους. Τέτοιο παράδειγμα είναι η άσφαλτος με προέλευση τη Βενεζουέλα.

Πρόσθετα. Πρόσθετα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των ασφαλικών συνδετικών για παραγωγή αφρώδους ασφάλτου συνήθως απαιτούνται σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες η άσφαλτος έχει υποβληθεί σε επεξεργασία με παράγοντες που αντιδρούν στη δημιουργία αφρώδους ασφάλτου (anti-foaming agents). Γενικά πάντως, λόγω και της αυξημένης τιμής των προσθέτων αυτών, συνιστάται η χρήση τους να γίνεται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις.

Πίεση ασφαλικού συνδετικού και νερού. Η αύξηση της πίεσης συμβάλει στη δημιουργία μικρότερων σωματιδίων και μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής, με συνέπεια τη βελτίωση της ομοιομορφίας της αφρώδους ασφάλτου.

Ποσότητα του νερού που προστίθεται. Η αύξηση της ποσότητας του νερού αυξάνει το μέγεθος των φυσαλίδων, με συνέπεια την αύξηση του λόγου διόγκωσης. Με την αύξηση όμως του όγκου μειώνεται το πάχος της ασφαλικής μεμβράνης της φυσαλίδας, καθιστώντας τη πιο ασταθή, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ημι-ζωής. Η σχέση του λόγου διόγκωσης και του χρόνου ημι-ζωής με την ποσότητα του νερού που προστίθεται για την παραγωγή της αφρώδους ασφάλτου απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Συσχέτιση ιδιοτήτων αφρώδους ασφάλτου (Wirtgen 2005)

Στο εργαστήριο η αφρώδης ασφαλτος παράγεται με τη συσκευή που φαίνεται στη Φωτογραφία 2.2.



Φωτογραφία 2.2. Συσκευή για παραγωγή αφρώδους ασφάλτου στο εργαστήριο

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας και του ποσοστού νερού, για επίτευξη των βέλτιστων ιδιοτήτων της αφρώδους ασφάλτου (μέγιστος λόγος διόγκωσης και χρόνος ημι-ζωής) γίνεται στο εργαστήριο με χρήση διαφόρων τιμών ποσότητας νερού και θερμοκρασίας ασφάλτου. Η διαδικασία πραγματοποιείται συνήθως με τρία ποσοστά νερού (2, 3 και 4% κ.β.), σε τρεις

θερμοκρασίες ασφάλτου (160, 170 και 180°C). Σύμφωνα με την πηγή (Wirtgen 2004), οι αποδεκτές τιμές για αποτελεσματική κατεργασία / ανακύκλωση είναι για τον λόγο διόγκωσης $ER \geq 8$ φορές και για τον χρόνο ημι-ζωής $t_{1/2} \geq 6$ sec. Σε περίπτωση μη ικανοποίησης κάποιας από τις παραπάνω απαιτήσεις, το ασφαλικό συνδετικό πρέπει να απορρίπτεται, ως μη κατάλληλο για παραγωγή αφρώδους ασφάλτου.

2.4 Εφαρμογές της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου

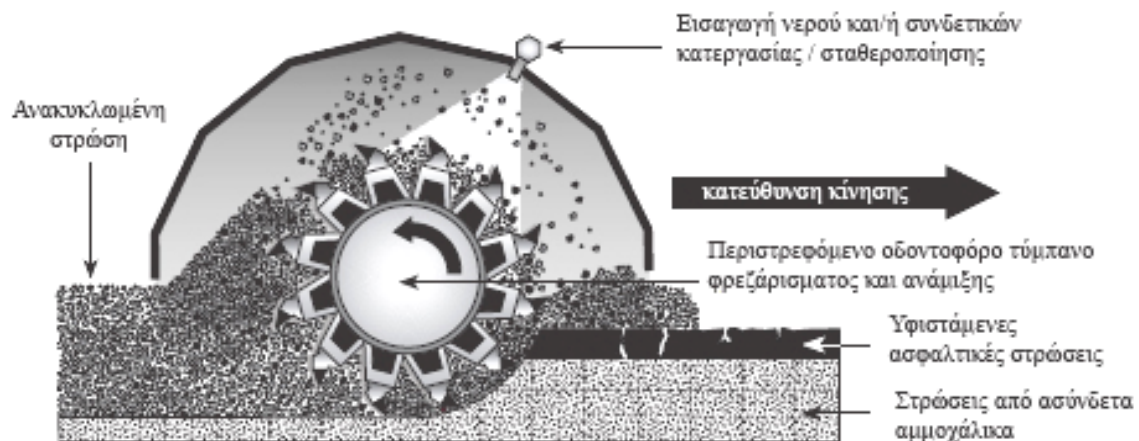
Η ψυχρή ανακύκλωση μπορεί να εφαρμοστεί και σε σταθερή εγκατάσταση (in-plant). Έχει ως πλεονέκτημα τη δυνατότητα ελέγχου της κοκκομετρικής διαβάθμισης του προς ανακύκλωση υλικού, με συνέπεια καλύτερη ποιότητα και ομοιομορφία. Μειονεκτεί όμως σε σχέση με την επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση (in-place ή in-situ), ως προς τον απαιτούμενο χρόνο επέμβασης και κυρίως ως προς το κόστος μεταφοράς των υλικών από και προς το εργοτάξιο. Η ψυχρή ανακύκλωση σε σταθερή εγκατάσταση εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις αναβάθμισης οδοστρωμάτων με κατασκευή νέας στρώσης σταθεροποιημένης βάσης / υπόβασης.

Η τεχνική της ψυχρής ανακύκλωσης με χρήση αφρώδους ασφάλτου τυγχάνει εφαρμογής στις εξής περιπτώσεις:

- Κατεργασία / σταθεροποίηση ασύνδετων αδρανών υλικών με σκοπό τη δημιουργία νέας υπόβασης ή βάσης.
- Ανακύκλωση μέρους των ανώτερων ασφαλικών στρώσεων του οδοστρώματος για ανακατασκευή της ασφαλικής βάσης, ή της ισοπεδωτικής στρώσης.
- Ανακύκλωση των ασφαλικών στρώσεων και μέρους των ασύνδετων, ή κατεργασμένων αδρανών υλικών για δημιουργία νέας στρώσης βάσης (ανακύκλωση σε βάθος).

Η αφρώδης άσφαλτος χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον ως συνδετικό κατά την εφαρμογή ψυχρής επιτόπου ανακύκλωσης (cold in place recycling: CIPR) σε περιπτώσεις δομικής αποκατάστασης του οδοστρώματος, κατά τις οποίες απαιτείται επέμβαση σε βάθος (Romanoshi et al. 2004), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Η περίπτωση αυτή, δηλαδή η εφαρμογή της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου για ανακύκλωση των ασφαλικών στρώσεων και μέρους των υποκείμενων στρώσεων ασφαλικών οδοστρωμάτων εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η πλέον εξελιγμένη μορφή της υπόψη τεχνικής περιλαμβάνει και την προσθήκη μικρού ποσοστού υδραυλικής κονίας (τσιμέντο). Η χρησιμότητα και οι ιδιότητες που προσδίδει το τσιμέντο στο κατεργασμένο με αφρώδη

άσφαλο μίγμα αναφέρονται στο επόμενο υποκεφάλαιο 2.5. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ανακυκλωμένου / κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλο υλικού παρουσιάζονται στη Φωτογραφία 2.3. Εκτός από την ανακύκλωση ευκάμπτων οδοστρωμάτων (με βάση / υπόβαση από ασύνδετα αμμοχάλικα), η υπόψη τεχνική εφαρμόζεται και σε ημιάκαμπτα ασφατικά οδοστρώματα, δηλαδή οδοστρώματα με βάση / υπόβαση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ). Τέτοιες περιπτώσεις εξετάζονται επίσης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 2.6. Επέμβαση σε βάθος με ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση (Wirtgen 2004)



Φωτογραφία 2.3. Υλικά για παραγωγή μίγματος κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλο

Τα βασικά πλεονεκτήματα της εφαρμογής της τεχνικής αυτής, είναι τα παρακάτω:

- Μειωμένοι ατμοσφαιρικοί ρύποι, λόγω της μικρής εκπομπής υδρογονανθράκων.
- Μείωση κατανάλωσης ενέργειας, λόγω της μη απαίτησης θέρμανσης των αδρανών.

- Μικρότερο βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου, σε σχέση με τα θερμά ασφαλτομίγματα, λόγω της μερικής μόνο κάλυψης των χονδροκόκκων αδρανών.
- Γήρανση του ασφαλικού συνδετικού κατά την ανάμιξη σε μικρότερο βαθμό, σε σχέση με τα θερμά ασφαλτομίγματα, λόγω της μικρότερης θερμοκρασίας των αδρανών.
- Μικρότερα προβλήματα, σε σχέση με τα ασφαλικά γαλακτώματα κατά τη συμπίκνωση, λόγω της αυξημένης υγρασίας των αδρανών (ασφαλτικά γαλακτώματα).
- Μεγαλύτερο πάχος στρώσης, σε σχέση με τα ασφαλικά γαλακτώματα, στα οποία το πάχος περιορίζεται, λόγω της ανάγκης απομάκρυνσης του νερού που περισσεύει.
- Καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος (μικρότερος χρόνος «ωρίμανσης»), σε σχέση με τη χρήση ασφαλικών γαλακτωμάτων.
- Δυνατότητα συσώρευσης των μιγμάτων αφρώδους ασφάλτου πλησίον της θέσης εφαρμογής, ώστε να γίνει η διάστρωση σε μεταγενέστερο χρόνο, παρέχοντας έτσι ευελιξία κατά την κατασκευή. Ελαχιστοποιούνται τα προβλήματα στράγγισης της ασφάλτου μετά από βροχή, σε σχέση με τα μίγματα με ασφαλικό γαλάκτωμα.
- Δεν είναι απαραίτητη η χρήση αδρανών υλικών υψηλής ποιότητας, με συνεπεία τη μείωση του κόστους μεταφοράς, λόγω χρήσης των επιτόπου διαθέσιμων αδρανών.
- Εύκολη ανακατασκευή, σε περίπτωση προβλημάτων που σχετίζονται με το τελικό υψόμετρο της κατεργασμένης στρώσης.

Υπάρχουν όμως και μειονεκτήματα κατά τη χρήση της τεχνικής της επιτόπου ψυχρής ανακύκλωσης με αφρώδη ασφαλτο, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σύμφωνα και με τις πηγές (Jenkins 2000) (AIPCR & PIARC 2003):

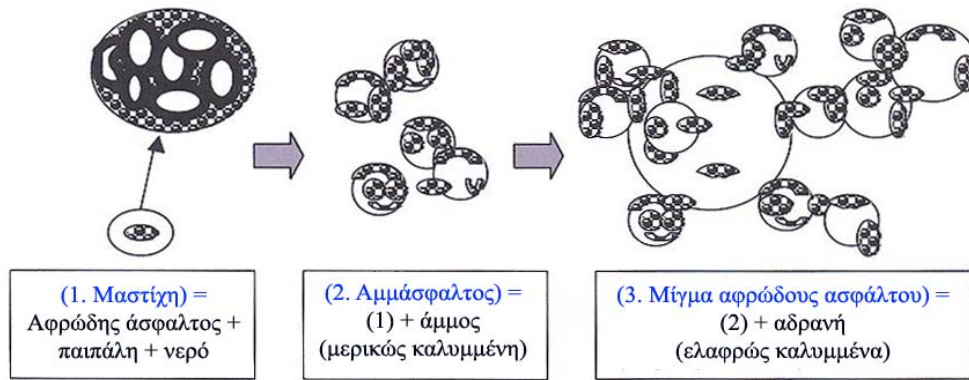
- Η ενσωμάτωση προσθέτων σε ορισμένα ασφαλικά συνδετικά κατά τη διύλιση, τα καθιστά μη κατάλληλα για παραγωγή αφρώδους ασφάλτου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτείται προσθήκη κατάλληλων προσθέτων κατά τη διαδικασία της παραγωγής της αφρώδους ασφάλτου, γεγονός το οποίο αυξάνει το κόστος.
- Απαιτείται ικανό γνωστικό επίπεδο και εμπειρία για τη μελέτη σύνθεσης και την παραγωγή μιγμάτων για να παραχθεί καλής ποιότητας κατεργασμένο υλικό.
- Οι απαιτούμενες διαδικασίες στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης των υπόψη μιγμάτων δεν είναι σαφώς διατυπωμένες (δεν υπάρχει σαφές πλαίσιο και προδιαγραφές), όπως ισχύει

για τα συνήθη θερμά ασφαλτομίγματα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυσκολία στην απόκτηση εμπειρίας σχετικά με την παραγωγή και τις προδιαγραφές των κατεργασμένων μιγμάτων.

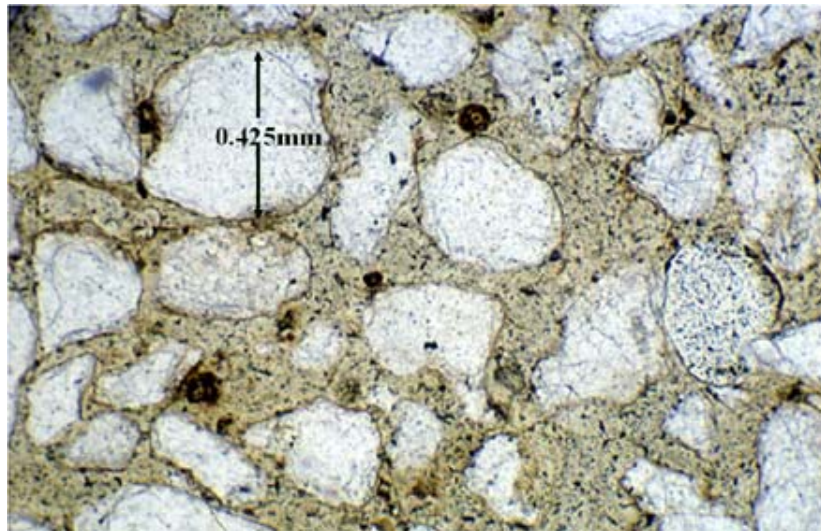
- Η ανακύκλωση οδοστρωμάτων χωρίς την προστασία με επίστρωση ασφαλικής στρώσης περιορίζεται σε περιοχές χαμηλής βροχόπτωσης και σε δρόμους μικρής κυκλοφορίας.
- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κατεργασμένων μιγμάτων είναι γενικά κατώτερα των ασφαλτομιγμάτων, με συνέπεια η δυνατότητα εφαρμογής της ανακύκλωσης να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομική κατάσταση της στρώσης, στην οποία εδράζεται η κατεργασμένη στρώση.
- Δυσκολίες σχετικά με τη (δομική) μελέτη οδοστρώματος, λόγω έλλειψης κατάλληλων «σχέσεων μεταφοράς» (transfer functions) για ευρεία εφαρμογή, στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης των κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλο στρώσεων.
- Είναι δύσκολο να εξακριβωθούν τα οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή της ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλο, χωρίς αξιόπιστες προβλέψεις της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου (Long Term Pavement Performance: LTPP).

2.5 Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων / κατεργασμένων υλικών

Η ανακύκλωση με αφρώδη άσφαλο δημιουργεί ένα κατεργασμένο / σταθεροποιημένο υλικό και όχι ένα υλικό που μοιάζει με ασφαλτόμιγμα. Τα κλειστού τύπου συμβατικά ασφαλτομίγματα έχουν ποσοστό κενών συνήθως 3-6% και κάθε σωματίδιο καλύπτεται από λεπτό υμένα ασφάλτου, που δρα ως «συγκολλητική σύνδεση». Στα κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλο υλικά το ασφαλικό υλικό αναμιγνύεται με τα λεπτόκοκκα αδρανή και κυρίως με τα διερχόμενα από το κόσκινο 0.075 mm. Τα άλλα λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος) είναι μερικώς καλυμμένα με ασφαλικό συνδετικό, ενώ τα χονδρόκοκκα είναι ελαφρώς μόνο καλυμμένα. Η διασπορά της αφρώδους ασφάλτου εντός των αδρανών κατά τη διάρκεια της ανάμιξης παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 2.7. Τυπική εικόνα της διασποράς της αφρώδους ασφάλτου στα αδρανή φαίνεται στη Φωτογραφία 2.4.

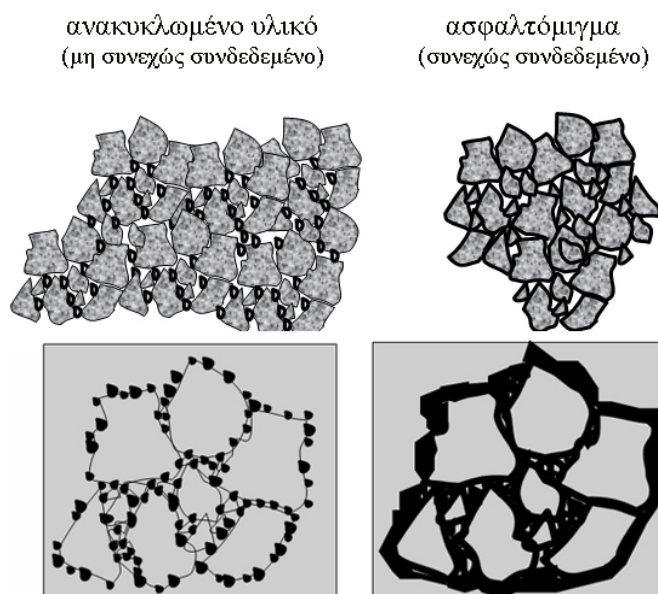


Σχήμα 2.7. Διασπορά αφρώδους ασφάλτου εντός των αδρανών (Jenkins 2000)



Φωτογραφία 2.4. Κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό (Wirtgen 2004)

Η διαφορά των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο μιγμάτων, σε σχέση με τα συμβατικά ασφαλτομίγματα φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Στην περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων, η σύνδεση των χονδρόκοκκων αδρανών μεταξύ τους είναι συνεχής. Αντίθετα, στην περίπτωση των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο μιγμάτων, τα χονδρόκοκκα αδρανή είναι ασυνεχώς συνδεδεμένα μεταξύ τους. Επιπλέον, το ποσοστό κενών μετά τη συμπίκνωση σε λίγες μόνο περιπτώσεις είναι μικρότερο του 10% (Wirtgen 2004).



Σχήμα 2.8. Διαφορά κατεργασμένων μιγμάτων ως προς τα ασφαλτομίγματα

Οι παράγοντες που καθορίζουν την αντοχή του κατεργασμένου υλικού σε διάτμηση είναι η δύναμη συνοχής, που καθορίζεται κυρίως από την ασφαλική μαστίχη (ασφαλτικό συνδετικό και λεπτόκοκκα αδρανή) και η δύναμη που παρέχεται από την τριβή μεταξύ των αδρανών και ενεργοποιείται όταν οι θλιπτικές τάσεις συμπιέζουν τα λεπτόκοκκα και τα χονδρόκοκκα αδρανή. Οι δύο παραπάνω παράγοντες, εκτός από τη διατμητική αντοχή, καθορίζουν επίσης τη δυσκαμψία και την εφελκυστική αντοχή. Όταν το υλικό υπόκειται σε θλίψη, η δυσκαμψία και η διατμητική αντοχή καθορίζονται κυρίως από τον συνδυασμό των στοιχείων συνοχής και τριβής. Όταν το υλικό είναι σε κατάσταση εφελκυσμού, τα αδρανή δεν συμπιέζονται και η δυσκαμψία και η διατμητική αντοχή εξαρτώνται κυρίως από τα στοιχεία συνοχής (ασφαλτική μαστίχη). Τα υλικά, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε διάτμηση και εφελκυσμό, είναι αυτά στα οποία υπάρχει καλή ισορροπία μεταξύ της αντοχής που προέρχεται από τα στοιχεία συνοχής και τριβής (Jooste et al. 2007).

Η ανακύκλωση / κατεργασία με αφρώδη άσφαλτο μπορεί να γίνει με ή χωρίς προσθήκη τσιμέντου. Η προσθήκη όμως τσιμέντου βελτιώνει την αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση και συνεισφέρει στην αύξηση του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού.

Τα υπόψη ανακυκλωμένα / κατεργασμένα υλικά συχνά παρουσιάζουν συνδυασμό χαρακτηριστικών εξαρτώμενων από το φορτίο (τάση) όπως των αδρανών υλικών, ψαθυρή συμπεριφορά πλην όμως αυξημένη αντίσταση σε μόνιμες παραμορφώσεις όπως των κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών και ελαστικότητα όπως τα ασφαλτικά υλικά (Theyse et al.

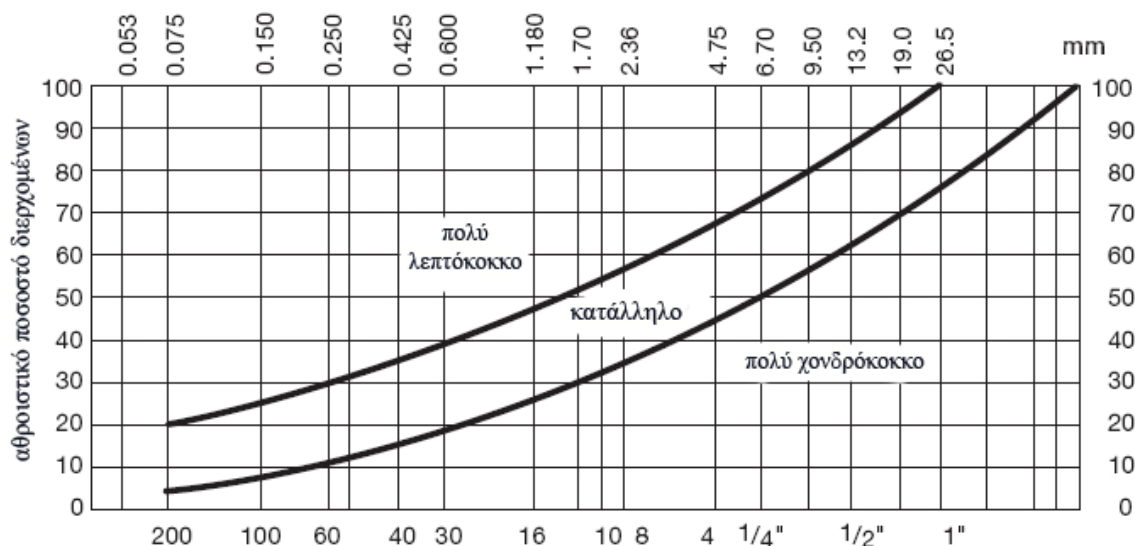
2004). Το κατά πόσο κάποιο από αυτά τα χαρακτηριστικά υπερισχύει στη συμπεριφορά του μίγματος, εξαρτάται από την αναλογία και τις ιδιότητες των βασικών συνιστωσών ανάμιξης. Κατά συνέπεια, η αναλογία του τσιμέντου ως προς το ασφαλτικό συνδετικό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά (αντίσταση σε μόνιμες παραμορφώσεις προς ελαστικότητα) των ανακυκλωμένων / κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών. Σύμφωνα με την πηγή (Long 2001), από εργαστηριακές δοκιμές σε κατεργασμένα με αφρώδη ασφαλτο υλικά, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Η αύξηση του ποσοστού της αφρώδους ασφάλτου, ή η μείωση του λόγου τσιμέντου προς αφρώδη ασφαλτο αυξάνει την ελαστικότητα και την αντοχή του υλικού σε κόπωση.
- Η αύξηση του ποσοστού τσιμέντου, ή η αύξηση του λόγου τσιμέντου προς αφρώδη ασφαλτο αυξάνει τόσο τη θλιπτική, όσο και την εφελκυστική αντοχή. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής αυξάνει την αντίσταση του υλικού σε παραμένουσες παραμορφώσεις.

2.6 Καταλληλότητα αδρανών υλικών

Η τεχνική της αφρώδους ασφάλτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανακύκλωση αδρανών ευρύτερης κοκκομετρικής διαβάθμισης (συμπεριλαμβανομένων αυτών με ποσοστό λεπτόκοκκου αδρανούς διερχόμενου από το κόσκινο 0.075 mm έως 20%), σε σχέση με άλλες τεχνικές ψυχρής ανακύκλωσης (TRB 2008). Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν συλλεκτά, ή θραυστά χαλίκια, άμμος και φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα από υφιστάμενο ασφαλτικό οδόστρωμα (reclaimed asphalt pavement: RAP).

Αδρανή με ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο 0.075 mm μικρότερο από 5% δεν αναμειγνύονται καλά με την αφρώδη ασφαλτο. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να προστίθεται άμμος με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου αδρανούς διερχόμενου από το κόσκινο 0.075 mm. Τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών που θεωρούνται κατάλληλα για κατεργασία / ανακύκλωση με αφρώδη ασφαλτο παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών για κατεργασία / ανακύκλωση με αφρώδη άσφαλτο (Wirtgen 2004)

2.7 Μελέτη σύνθεσης

Συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας των αδρανών πριν από την κατεργασία με αφρώδη άσφαλτο είναι απαραίτητο για καλή διασπορά του ασφαλτικού συνδετικού κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, καθώς και για βελτίωση της εργασιμότητας και της συμπίκνωσης του κατεργασμένου υλικού. Η διαδικασία που ακολουθείται στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης (AIPCR & PIARC 2003) είναι η εξής:

- Προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (optimum moisture content: OMC) των αδρανών με την τροποποιημένη δοκιμή Proctor.
- Επιλογή του αρχικού ποσοστού αφρώδους ασφάλτου με βάση την κοκκομετρική του διαβάθμιση (Wirtgen 2004).
- Προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας για ανάμιξη (optimum mixing moisture content: OMMC) με χρήση εργαστηριακών δοκιμών αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile test: ITS). Στις περισσότερες περιπτώσεις μιγμάτων, το OMMC είναι το 70% του OMC (Asphalt Academy 2002).
- Προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας για συμπίκνωση (optimum fluid content: OFC) από τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα.

- Προσδιορισμός του ποσοστού ασφάλτου από τα αποτελέσματα των δοκιμών σε δοκίμια παρασκευασμένα στο εργαστήριο με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για συμπύκνωση (OFC).

Οι δοκιμές στο εργαστήριο γίνονται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης σύνθεσης του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο μίγματος. Συνήθως πραγματοποιούνται σε κυλινδρικά δοκίμια Marshall. Πέραν των προφανών διαφορών στη θέρμανση των αδρανών, ως μέρος της διαδικασίας παραγωγής των δοκιμών στο εργαστήριο, υπάρχουν άλλες δύο βασικές διαφορές μεταξύ θερμών και ψυχρών ασφαλικών μιγμάτων, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (Engelbrecht et al. 1985). Η βασικότερη διαφορά είναι ότι απαιτείται ένας χρόνος «ωρίμανσης» (curing) για τα ψυχρά ασφατικά μίγματα, τόσο στο εργαστήριο πριν υποβληθούν σε εργαστηριακές δοκιμές, αλλά και επιτόπου πριν αποδοθεί στην κυκλοφορία το οδόστρωμα. Επιπλέον, υπό την επίδραση του νερού παρατηρείται στα ψυχρά ασφατικά μίγματα σημαντική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους (Chen et al. 2004). Οι δύο αυτές διαφορές προϋποθέτουν τον καθορισμό των παραγόντων που σχετίζονται με τον χρόνο «ωρίμανσης» και τις συνθήκες υδρεμποτισμού των δοκιμών κατά την εργαστηριακή μελέτη σύνθεσης, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τα δοκίμια υποβάλλονται σε διαδικασία «ωρίμανσης» / συντήρησης στο εργαστήριο, προκειμένου να προσομοιωθεί η απομάκρυνση του νερού και η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού, η οποία λαμβάνει χώρα σε πραγματικές συνθήκες στο ανακυκλωμένο οδόστρωμα. Η διαδικασία προσομοίωσης της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού στο εργαστήριο ποικίλει σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με το εγχειρίδιο εφαρμογής (Kekwick 2005).

2.8 Εργαστηριακές δοκιμές

2.8.1 Παρασκευή και συντήρηση δοκιμών

Στο εργαστήριο παρασκευάζονται δύο τύποι δοκιμών, διαμέτρου 100mm και 150mm.

Τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm συμπυκνώνονται σύμφωνα με τη μέθοδο Marshall με 75 κτύπους ανά πλευρά. Για την επίτευξη του επιθυμητού ύψους των 63.5 ± 1.5 mm συνήθως αρκεί ποσότητα 1150 g. Πριν από την εξαγωγή τους από τη μήτρα, τα δοκίμια παραμένουν συνήθως για 24 ώρες στο εργαστήριο για απόκτηση της απαιτούμενης αντοχής για εξαγωγή. Στη συνέχεια, συντηρούνται επί 72 ώρες σε θερμοκρασία 40°C (Wirtgen 2004) και μετά παραμένουν στο εργαστήριο, ώστε να επανέλθει η θερμοκρασία σε επίπεδα εργαστηρίου. Κατόπιν υποβάλλονται σε εργαστηριακές δοκιμές για προσδιορισμό της αντοχής σε έμμεσο

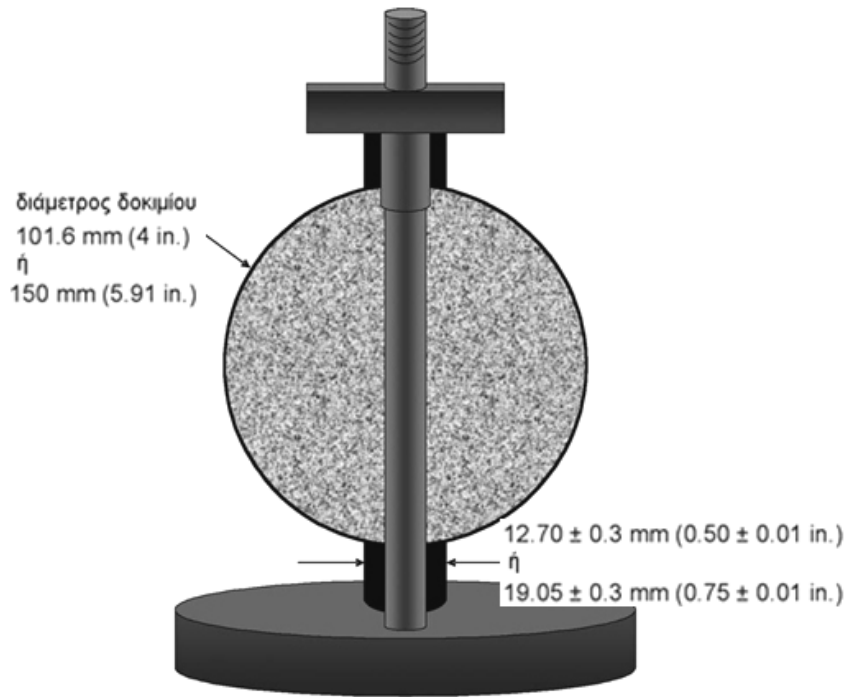
εφελκυσμό (ITS) σε ξηρά κατάσταση (dry condition), καθώς και κορεσμένα μετά από υδρεμποτισμό (soaked condition). Ο υδρεμποτισμός πραγματοποιείται με παραμονή των δοκιμίων σε νερό θερμοκρασίας $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ για 24 ώρες. Για την εκτίμηση του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου, παρασκευάζονται δοκίμια με διάφορα ποσοστά.

Τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm παρασκευάζονται σύμφωνα με την τροποποιημένη δοκιμή Proctor (AASHTO T-180). Πριν από την εξαγωγή τους από τη μήτρα, τα δοκίμια παραμένουν συνήθως για 24 ώρες στο εργαστήριο, για απόκτηση της απαιτούμενης αντοχής για εξαγωγή. Μετά παραμένουν στο εργαστήριο για 24 ώρες, η μέχρι η υγρασία να μειωθεί στο 50% του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (OMC). Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε πλαστικές σακούλες με όγκο τουλάχιστον όσο το διπλάσιο του δοκιμίου και συντηρούνται επί 48 ώρες σε θερμοκρασία 40°C (Wirtgen 2004). Κατόπιν βγαίνουν από τον φούρνο, απομακρύνεται η σακούλα με προσοχή, ώστε να μην έλθει σε επαφή η υγρασία που υπάρχει στην επιφάνεια με το δοκίμιο και παραμένουν σε θερμοκρασία εργαστηρίου, ώστε να επανέλθει η θερμοκρασία στα επίπεδα αυτά. Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στην προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών υγρασίας επιτόπου, μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. Το ποσοστό υγρασίας των δοκιμίων μετά τη συντήρηση, αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο «equilibrium moisture content». Τα δοκίμια πρέπει να υποβάλλονται σε δοκιμές το ταχύτερο δυνατόν, ώστε να αποφεύγεται η απώλεια υγρασίας.

Τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm χρησιμοποιούνται για εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile strength: ITS) και σε ανεμπόδιστη θλίψη (unconfined compressive strength: UCS). Λόγω της μεγάλης ποσότητας υλικού που απαιτείται για την παρασκευή τους, συνήθως παρασκευάζονται με το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου. Όμως μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλα ποσοστά ασφάλτου για μελέτη ευαισθησίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αλλαγής του ποσοστού τσιμέντου.

2.8.2 Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS)

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό υπολογίζεται σύμφωνα με τη δοκιμή κατά ASTM D 6931–07, μετρώντας το τελικό (μέγιστο) φορτίο αστοχίας σε δοκίμιο που υποβάλλεται σε φόρτιση αντιδιαμετρικά (Σχήμα 2.10), με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης 50 mm/min, σε θερμοκρασία 25°C (ASTM 2009).



Σχήμα 2.10. Δοκιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό ITS (ASTM D 6931 – 07)

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) υπολογίζεται από τη σχέση (2.1)

$$ITS = \frac{P}{\pi * h * d} \quad (2.1)$$

Όπου:

ITS: αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (kPa)

P: μέγιστο φορτίο (kN)

h: ύψος δοκιμίου (m)

d: διάμετρος δοκιμίου (m)

Όπως προαναφέρθηκε, η δοκιμή ITS γίνεται σε δοκίμια 100 mm σε ξηρά κατάσταση (ITS_{dry}), καθώς και μετά από υδρεμποτισμό (κορεσμένα δοκίμια) (ITS_{soaked}). Η αξιολόγηση των μιγμάτων που παρασκευάζονται στο εργαστήριο, εκτός από τις απόλυτες τιμές της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, γίνεται και με βάση την εναπομένουσα αντοχή σε εφελκυσμό (tensile

strength retained: TSR), που εκφράζει την ευπάθεια του κατεργασμένου υλικού στην υγρασία. Η εναπομένουσα αντοχή σε εφελκυσμό (TSR) υπολογίζεται από τη σχέση (2.2), εκφράζεται δε και σε ποσοστό επί τοις εκατό.

$$TSR = \frac{ITS_{soaked}}{ITS_{dry}} \quad (2.2)$$

Όπου:

TSR: εναπομένουσα αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile Strength Retained)

ITS_{soaked} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό μετά από υδρεμπτοτισμό (κορεσμένα δοκίμια) (kPa)

ITS_{dry} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε στεγνή κατάσταση (kPa)

Τα συνιστώμενα κατώτερα όρια (AIPCR & PIARC 2003) της εναπομένουσας αντοχής σε εφελκυσμό (TSR) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Συνιστώμενα κατώτερα όρια της εναπομένουσας αντοχής σε εφελκυσμό TSR

	Κλίμα περιοχής		
	Ξηρό	Μέτριο	Υγρό
Έδαφος επικλινές - καλή παροχέτευση ομβρίων	50 %	60 %	70 %
Έδαφος επίπεδο - όχι καλή παροχέτευση ομβρίων	60 %	65 %	75 %

2.8.3 Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS)

Η δοκιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη εκτελείται σε δοκίμια με ποσοστό υγρασίας που προσομοιάζει τις επιτόπου συνθήκες (equilibrium moisture content). Υπολογίζεται, με τη σχέση (2.3), μετρώντας το τελικό φορτίο αστοχίας δοκιμίου ύψους 127 mm και διαμέτρου 150 mm, που υποβάλλεται σε φόρτιση με σταθερό ρυθμό αύξησης 140 kPa/s (ή ισοδύναμα για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm: 153 kN/min).

$$UCS = \frac{4 * P}{\pi * d^2} \quad (2.3)$$

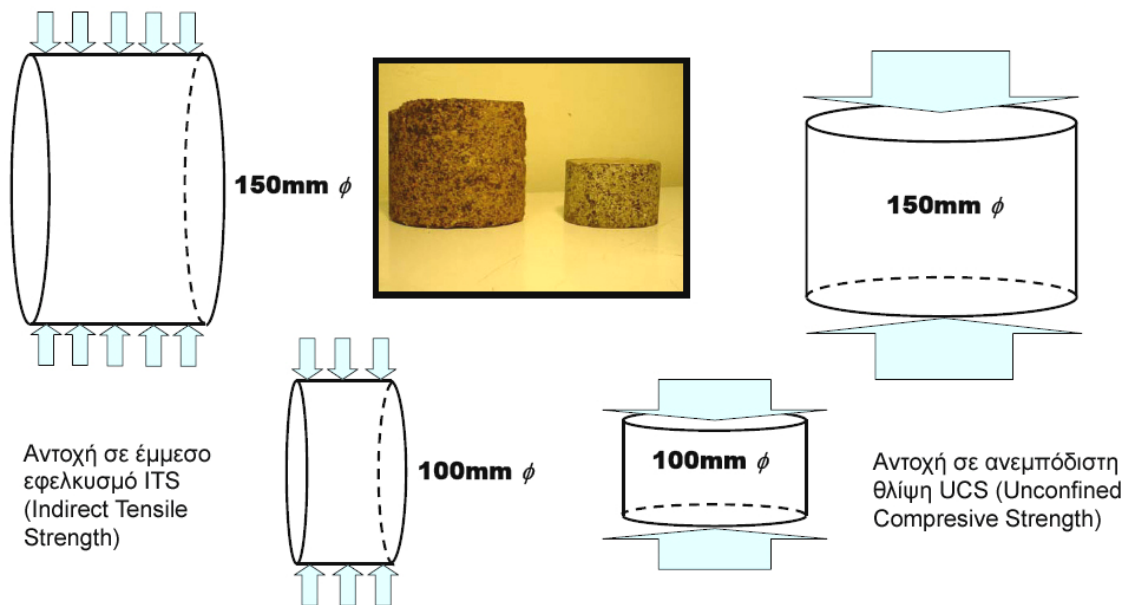
Όπου:

UCS: αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (kPa)

P: μέγιστο φορτίο (kN)

d: διάμετρος δοκιμίου (m)

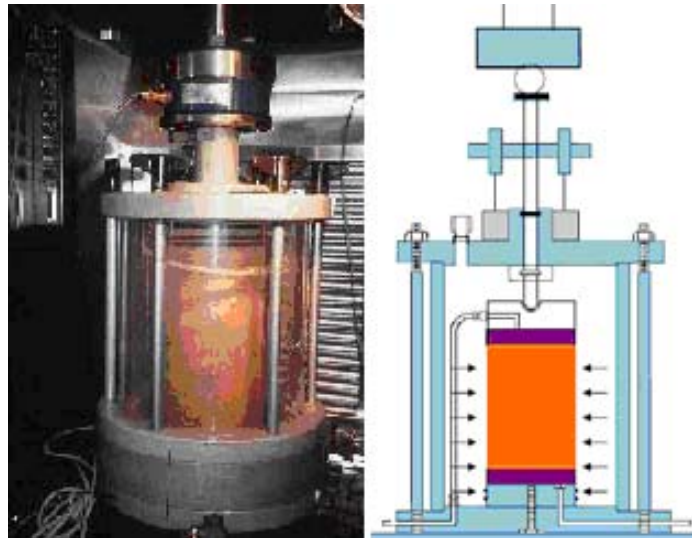
Ο τρόπος εφαρμογής του φορτίου, καθώς και τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται κατά τις δοκιμές ITS και UCS παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.11.



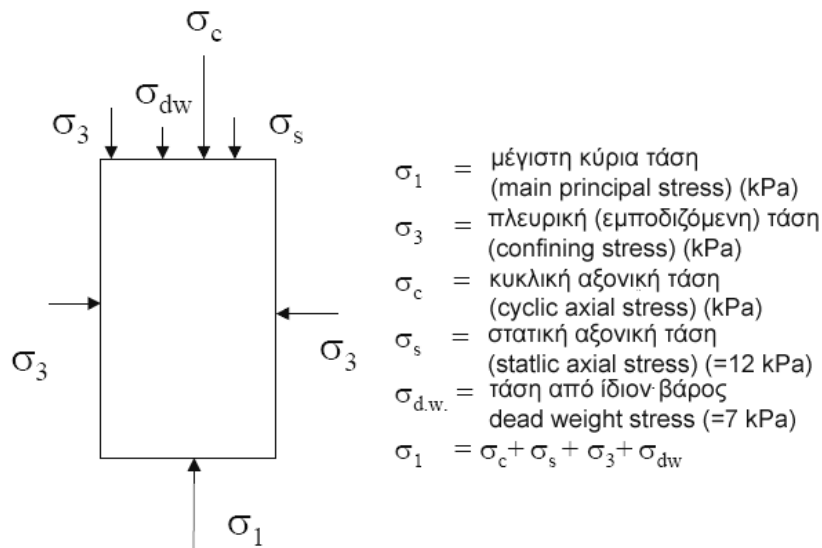
Σχήμα 2.11. Δοκιμές ITS και UCS (Loizos 2008)

2.8.4 Τριαξονικές δοκιμές (tri-axial testing)

Οι τριαξονικές δοκιμές δεν εφαρμόζονται κατά τη συνήθη διαδικασία της μελέτης σύνθεσης, λόγω αυξημένου κόστους και απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης των δοκιμών (AIPCR & PIARC 2003). Προσδιορίζονται οι παράμετροι αντοχής σε διάτμηση (δοκιμές με στατικό φορτίο), καθώς και το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης και η συμπεριφορά του υλικού σε μόνιμες (παραμένουσες) παραμορφώσεις (δοκιμές με επαναλαμβανόμενο φορτίο). Το σύστημα τριαξονικής κυψέλης με το οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές φαίνεται στη Φωτογραφία 2.5. Στο Σχήμα 2.12 φαίνονται οι τάσεις που εφαρμόζονται κατά την εκτέλεση των τριαξονικών δοκιμών.



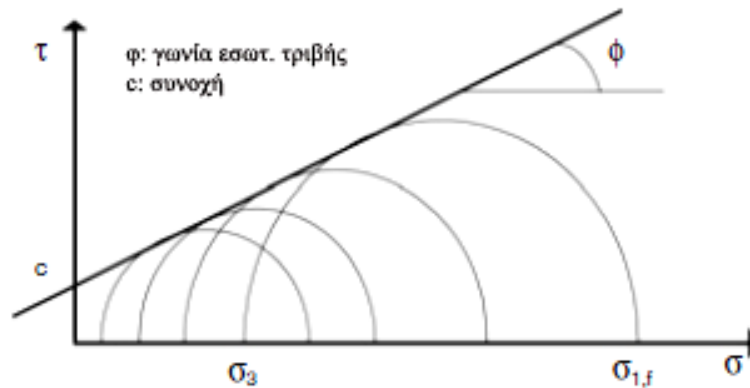
Φωτογραφία 2.5. Συσκευή και δοκίμιο για τριαξονικές δοκιμές (Long & Ventura 2004)



Σχήμα 2.12. Τάσεις κατά την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών (Jenkins et al. 2002)

Οι τριαξονικές δοκιμές με στατικό φορτίο (static tri-axial testing) εκτελούνται για προσδιορισμό της συνοχής (cohesion) και της γωνίας εσωτερικής τριβής (angle of internal friction) και αποσκοπούν στον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής σε διάτμηση. Οι δοκιμές συνήθως γίνονται σε θερμοκρασία 25°C, σε δοκίμια διαμέτρου 150 mm με το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου. Εκτελούνται όμως δοκιμές και με άλλα ποσοστά ασφάλτου, για μελέτη ευαισθησίας των παραμέτρων αυτών. Υπολογίζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη κύρια τάση (maximum allowable principal stress) σ_1 κατά την αστοχία σε διάτμηση για συγκεκριμένη εφαρμοζόμενη πλευρική (εμποδιζόμενη) τάση (confining stress) σ_3 . Οι δοκιμές

γίνονται με τέσσερις διαφορετικές τιμές πλευρικής (εμποδιζόμενης) πίεσης (confining pressure) και τα αποτελέσματα των υπόψη δοκιμών χρησιμοποιούνται για τη χάραξη των διαγραμμάτων των κύκλων τάσεων Mohr-Coulomb, παράδειγμα των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 2.13.

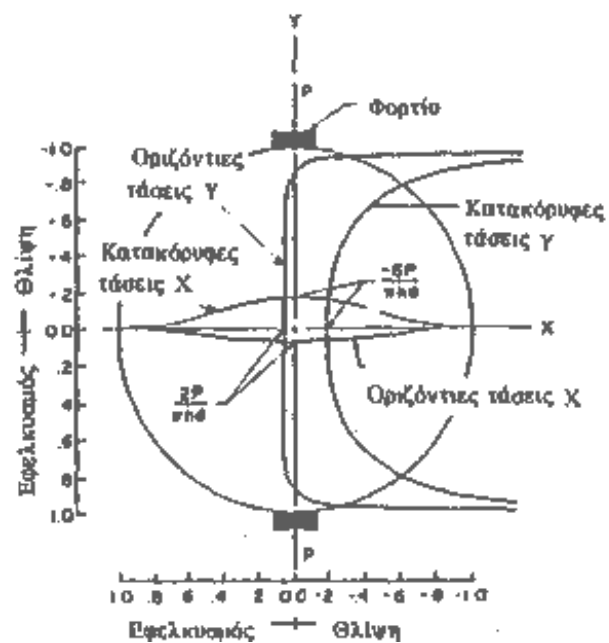


Σχήμα 2.13. Κύκλοι τάσεων Mohr-Coulomb (Wirtgen 2004)

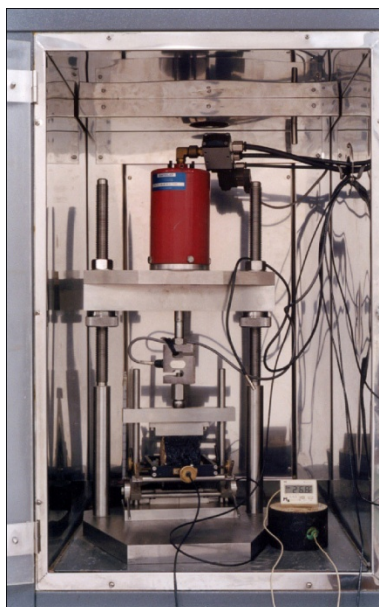
Οι τριαξονικές δοκιμές με επαναλαμβανόμενο φορτίο (dynamic tri-axial tests) εκτελούνται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των μιγμάτων σε μόνιμες (παραμένουσες) παραμορφώσεις, καθώς επίσης και για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού.

2.8.5 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (indirect tensile test)

Οι δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού εκτελούνται για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης. Κατά τη δοκιμή εφαρμόζεται θλιπτικό φορτίο κατά τις δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες κυλινδρικού δοκιμίου, με αποτέλεσμα την έμμεση ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων - παραμορφώσεων εγκάρσια στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου (Σχήμα 2.14). Η εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (ή επανατακτικότητας) (resilient modulus) γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D 4123-95 (ASTM, 2009). Το μέτρο δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης που προκύπτει από τις υπόψη δοκιμές αναφέρεται επίσης και ως ITSM (indirect tensile stiffness modulus). Μία από τις εργαστηριακές συσκευές που χρησιμοποιούνται ευρέως διεθνώς είναι αυτή που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο Νότινχαμ της Αγγλίας, γνωστή ως NAT (Nottingham asphalt tester) (Brown 1997). Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές με το Σύστημα NAT του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (Φωτογραφία 2.6).



Σχήμα 2.14. Κατανομή τάσεων κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού



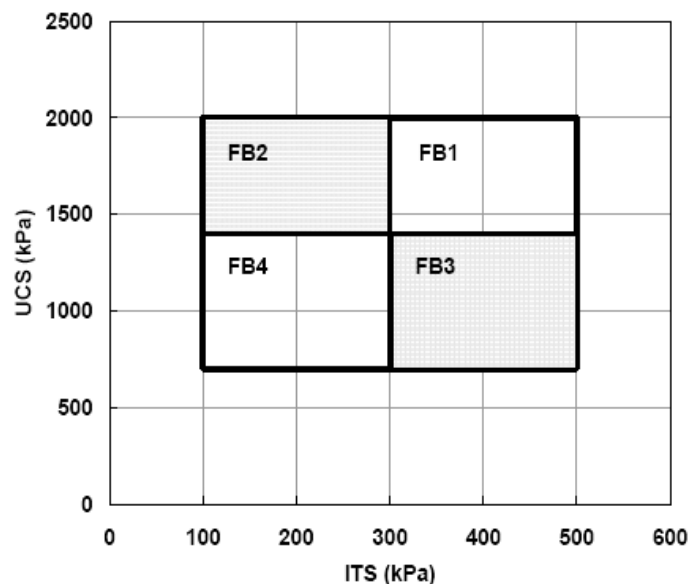
Φωτογραφία 2.6. Συσκευή NAT Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ

2.9 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών

Για κατεργασμένα με αφρώδη ασφαλτο υλικά έχει προταθεί κατηγοριοποίηση (Asphalt Academy 2002), η οποία λαμβάνει υπόψη συνδυαστικά τα αποτελέσματα προσδιορισμού της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS), καθώς και της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS), σε δοκίμια διαμέτρου 150 mm. Οι κατηγορίες είναι τέσσερις (FB1 έως FB4), με την κατηγορία FB4 να περιορίζεται για χρήση σε δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας, ενώ η FB1 να αποτελεί την ανώτερη κατηγορία. Οι κατηγορίες που συνήθως λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη οδοστρώματος, είναι οι FB2 και FB3. Αντιπροσωπευτικό υλικό κατηγορίας FB2 είναι αυτό που περιέχει 1.8% αφρώδη ασφαλτο και 2% τσιμέντο, ενώ για την κατηγορία FB3 είναι αυτό που περιέχει 3% αφρώδη ασφαλτο και 1% τσιμέντο. Τα υπόψη ποσοστά είναι ενδεικτικά και δεν αποτελούν συγκεκριμένη «συνταγή» για την επίτευξη κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού της αντίστοιχης κατηγορίας. Οι υπόψη κατηγορίες φαίνονται στον Πίνακα 2.2 και γραφικά στο Σχήμα 2.15.

Πίνακας 2.2 Κατηγορίες κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών (Asphalt Academy 2002)

		Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) στους 25°C (kPa)	
		100 - 300	300 - 500
Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS) στους 25°C (kPa)	700 - 1400	FB4	FB3
	1400 - 2000	FB2	FB1



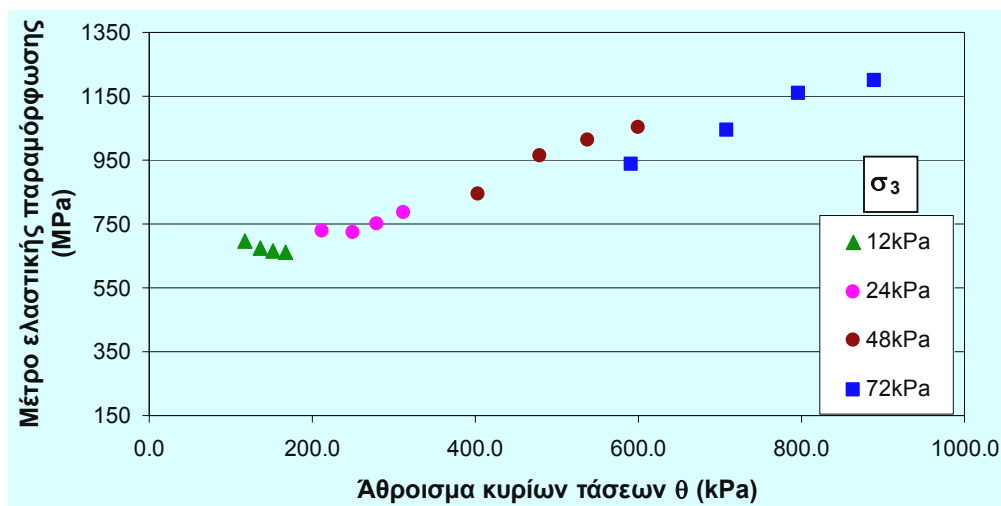
Σχήμα 2.15. Κατηγορίες κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών (Long & Ventura 2004)

Η επίδραση της προσθήκης τσιμέντου στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων με αφρώδη άσφαλτο υλικών αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στα αποτελέσματα εργαστηριακών ερευνών της πηγής (Lewis & Collings 1999). Σύμφωνα με αυτή, χαρακτηριστικές τιμές υλικών κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο σε ποσοστό 3.5% είναι ITS (ξηρά) = 200 kPa, ITS (κορεσμένα) = 80 kPa και μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ξηρά) 2000 MPa. Με το ίδιο ποσοστό αφρώδους ασφάλτου και προσθήκη 1% τσιμέντου, οι αντίστοιχες τιμές είναι ITS (ξηρά) = 500 kPa, ITS (κορεσμένα) = 300 kPa και μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ξηρά) 3500 MPa. Λόγω των διαφορών, κυρίως ως προς το ποσοστό ασφάλτου, οι υπόψη τιμές δεν χρησιμοποιούνται περαιτέρω για συγκρίσεις στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Μεγάλη αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με προσθήκη τσιμέντου (περίπου τριπλασιασμός με 1% τσιμέντο) διαπιστώθηκε και από άλλες εργαστηριακές έρευνες (Long & Ventura 2004).

2.10 Συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση

Σύμφωνα με τη διεθνώς επικρατούσα άποψη τα κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο υλικά παρουσιάζουν συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση (stress-dependent behaviour), που παρατηρείται κυρίως σε ασύνδετα υλικά. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση (Jenkins 2000), (Bredenhann & Jenkins 2004). Τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές σε κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο υλικά έδειξαν αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης (bulk stress) $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, όπως συνοψίζεται στην πηγή (Wirtgen 2004) και φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 2.16.

Η θεώρηση πάντως αυτή έχει προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά κατεργασμένα με σχετικά μικρό ποσοστό αφρώδους ασφάλτου (2%) και χωρίς προσθήκη τσιμέντου στο μίγμα. Όπως έχει όμως αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.5, η προσθήκη τσιμέντου αυξάνει την αντοχή και την αντίσταση του κατεργασμένου υλικού σε παραμένουσες παραμορφώσεις. Συνδυασμός τσιμέντου με αυξημένο ποσοστό αφρώδους ασφάλτου, οδηγεί σε αυξημένες τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλτο υλικού και σε διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του, σε σχέση με τα ασύνδετα υλικά. Επιπλέον, σύμφωνα με την πηγή (Jenkins 2000), σε περίπτωση προσθήκης τσιμέντου στο μίγμα η συμπεριφορά των υπόψη υλικών διαφοροποιείται και δεν είναι τόσο πολύ διακριτή, σε σχέση με αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16. Συσχέτιση μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με την εφαρμοζόμενη τάση θ (υλικά κατεργασμένα με 2% αφρώδη άσφαλτο) (Jenkins 2000)

Για να διαπιστωθεί κατά πόσο η υπόψη θεώρηση ισχύει και για άλλες συνθέσεις μιγμάτων κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, εξετάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής η επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης (κεφάλαιο 6.2).

2.11 Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλτο υλικού

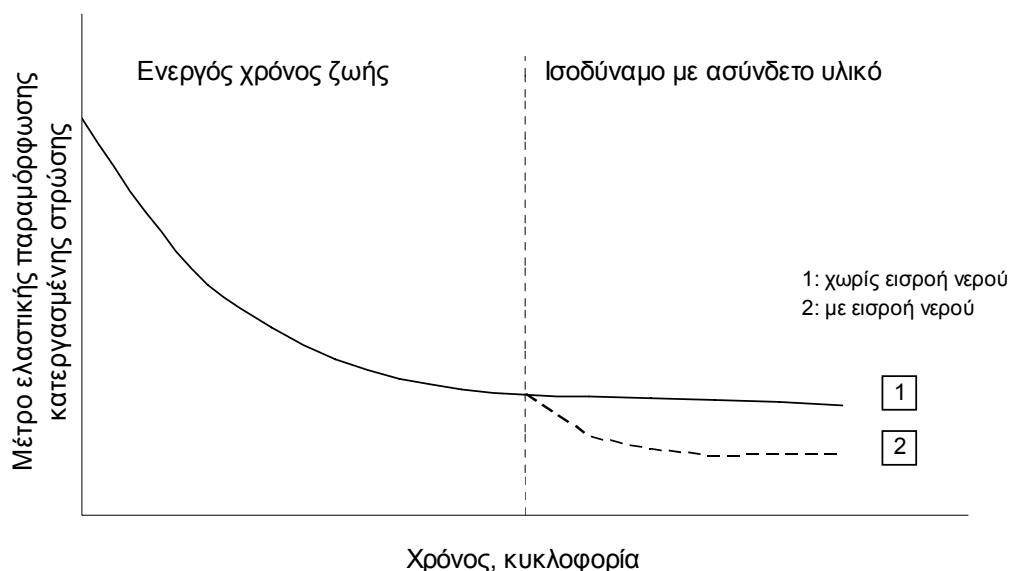
Τα κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο υλικά παρουσιάζουν σχετικά καλή συνοχή. Όσο η συνοχή του υλικού παραμένει, το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης είναι υψηλό, σε σχέση με τα ασύνδετα αμμοχάλικα. Η κατάσταση αυτή κατά την οποία το υλικό δεν παρουσιάζει φθορές και έχει σχετικά υψηλό μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης, το οποίο διατηρείται για κάποια χρονική περίοδο υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας, αναφέρεται στις Τεχνικές Οδηγίες (technical guidelines) TG2 (Asphalt Academy 2002) ως «ενεργός χρόνος ζωής» (effective fatigue life), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Υπό την επαναλαμβανόμενη κάμψη της στρώσης του κατεργασμένου υλικού από τα φορτία κυκλοφορίας παρατηρείται σταδιακά απώλεια της συνοχής του, με συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτό το στάδιο της δομικής ζωής του οδοστρώματος, το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού μειώνεται συνήθως έως κάποια τιμή που αντιστοιχεί με ασύνδετο υλικό (περίπου 400 MPa). Η φάση αυτή αναφέρεται ως «κατάσταση

ισοδύναμη με ασύνδετο υλικό» (equivalent granular state). Το «ισοδύναμο με ασύνδετο υλικό» είναι συμβατό με τα ασύνδετα αμμοχάλικα μόνο ως προς το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης και όχι ως προς τη σύνθεση. Ο υπόψη όρος δεν υποδηλώνει ότι το κατεργασμένο υλικό είναι σε ασύνδετη κατάσταση αποτελούμενο από μεμονωμένους κόκκους.

Η μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής των ελαστικών υποχωρήσεων (elastic deflections) που καταγράφονται με το Σύστημα FWD. Αναφορικά με την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, το γεγονός αυτό έχει τις παρακάτω συνέπειες:

- Μειωμένη προστασία των υποκείμενων στρώσεων.
- Πιθανή αύξηση των διατμητικών τάσεων στο σώμα της κατεργασμένης με αφρώδη ασφαλτο στρώσης.
- Αυξημένες οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους σε κόπωση.

Η επίδραση της εισροής νερού στη δομική κατάσταση του οδοστρώματος φαίνεται ποιοτικά στο Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17. Συμπεριφορά κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών οδοστρωμάτων (Asphalt Academy 2002)

Σύμφωνα με τη θεώρηση της (Asphalt Academy 2002), υιοθετείται η προσέγγιση των δύο φάσεων στη δομική συμπεριφορά των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών οδοστρώματος. Στην πρώτη φάση η κόπωση θεωρείται ότι είναι ο κύριος μηχανισμός φθοράς, ενώ στη δεύτερη φάση το υλικό θεωρείται ότι συμπεριφέρεται αντίστοιχα με τα ασύνδετα αμμοχάλικα, με τη διάτμηση να αποτελεί τον κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας.

Έρευνες βασισμένες σε επιτόπου δοκιμές επιταχυνόμενης καταπόνησης (accelerated pavement testing: APT) με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (heavy vehicle simulator: HVS) έδειξαν, ότι η μείωση (μέχρι κάποια σταθερή τιμή) του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού λαμβάνει χώρα σχετικά νωρίς στη δομική ζωή του οδοστρώματος και μπορεί να συμβεί γρήγορα υπό την επίδραση των βαρέων φορτίων κυκλοφορίας (Long & Theyse 2004).

Προς αποφυγή της σύγχυσης που προκαλεί ο όρος της δεύτερης φάσης «ισοδύναμο με ασύνδετο υλικό», προτάθηκε ο όρος αυτός να αλλάξει και η δεύτερη φάση να αναφέρεται ως «κατάσταση σταθερής δυσκαμψίας» (constant stiffness state). Για αποφυγή παρανόησης, σε σχέση με την κατάσταση του υλικού στο τέλος της πρώτης φάσης, προτάθηκε επίσης η αλλαγή του όρου «ενεργός χρόνος ζωής» (effective fatigue life). Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του υπόψη όρου θα μπορούσε να οδηγήσει σε παρανόηση, ότι το υλικό έχει υποστεί κόπωση και έχει ρωγμές στο τέλος της πρώτης φάσης. Επίσης έγινε διευκρίνιση, ότι το υλικό δεν βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο του χρόνου ζωής του. Η μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού, θεωρείται ότι οφείλεται στην καταστροφή των μικρο-δεσμών των κόκκων του υλικού που δημιουργήθηκαν από τη σταθεροποίηση με ασφαλικό συνδετικό ή/και τσιμέντο. Για να αποφευχθεί η παρανόηση σχετικά με τη δομική κατάσταση του υλικού στο τέλος της πρώτης φάσης, η φάση αυτή έχει προταθεί να αναφέρεται ως «φάση μείωσης δυσκαμψίας» (stiffness reduction phase) και ο «ενεργός χρόνος ζωής να αναφέρεται ως «χρόνος ζωής 1^{ης} φάσης» (phase 1 life).

2.12 Σχέσεις εκτίμησης χρόνου ζωής

Μέχρι το 2001 δεν υπήρχαν προσομοιώματα πρόβλεψης δομικής συμπεριφοράς για μελέτη οδοστρώματος (mechanistic-empirical structural design models) υλικών κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο, λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS). Ως εξαίρεση, μπορεί να αναφερθούν οι «σχέσεις μεταφοράς» (transfer functions) που αναπτύχθηκαν (Jenkins 2000) με χρήση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών, καθώς και στοιχείων (υπό κλίμακα) δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης APT. Οι «σχέσεις

μεταφοράς» που αναπτύχθηκαν το 2001 (Long & Theyse 2001) περιλαμβάνονται στις Τεχνικές Οδηγίες TG2 (Asphalt Academy 2002).

Αντίστοιχα με τα αναφερθέντα στο προηγούμενο κεφάλαιο περί της προσέγγισης των δύο φάσεων στη δομική συμπεριφορά των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών οδοστρώματος, η ίδια φιλοσοφία ακολουθήθηκε και για τη δομική μελέτη. Η πρώτη φάση είναι η φάση μείωσης της δυσκαμψίας, όπου προσδιορίζεται ο αριθμός επαναλήψεων τυπικού φορτίου, εωσότου επιτευχθεί σταθερό μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Η αθροιστική συσσώρευση των παραμενουσών παραμορφώσεων στη στρώση της κατεργασμένης βάσης λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια πολύ μεγαλύτερης χρονικής περιόδου από την πρώτη φάση (μείωσης της δυσκαμψίας). Κατά συνέπεια, θεωρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό παραμένουσας παραμόρφωσης λαμβάνει χώρα όταν το υλικό είναι σε φάση «σταθερής δυσκαμψίας» (Long & Theyse 2004). Παρά το γεγονός ότι μικρό ποσοστό της παραμένουσας παραμόρφωσης παρατηρείται και κατά την πρώτη φάση, είναι δύσκολο να ληφθούν υπόψη στη φάση αυτή συγχρόνως και τα δύο είδη φθοράς. Για τους λόγους αυτούς, οι δύο φάσεις θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα ακολούθως η μία μετά την άλλη.

2.12.1 Φάση 1 (μείωση δυσκαμψίας)

Η «σχέση μεταφοράς» της πρώτης φάσης αναπτύχθηκε με βάση τα στοιχεία των δοκιμών προσομοίωσης βαρέος οχήματος HVS (μείωση δυσκαμψίας) και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» (strain-at-break). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

Προσδιορισμός των επαναλήψεων φορτίσεων έως τη φάση σταθερής δυσκαμψίας

Οι επαναλήψεις φορτίσεων υπολογίζονται με βάση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού κατά τη διαδικασία των δοκιμών με τον προσομοιωτή βαρέος οχήματος HVS. Ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από το φορτίο εφαρμογής και την τιμή του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης που επιτυγχάνεται στο τέλος της πρώτης φάσης.

Υπολογισμός της ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης

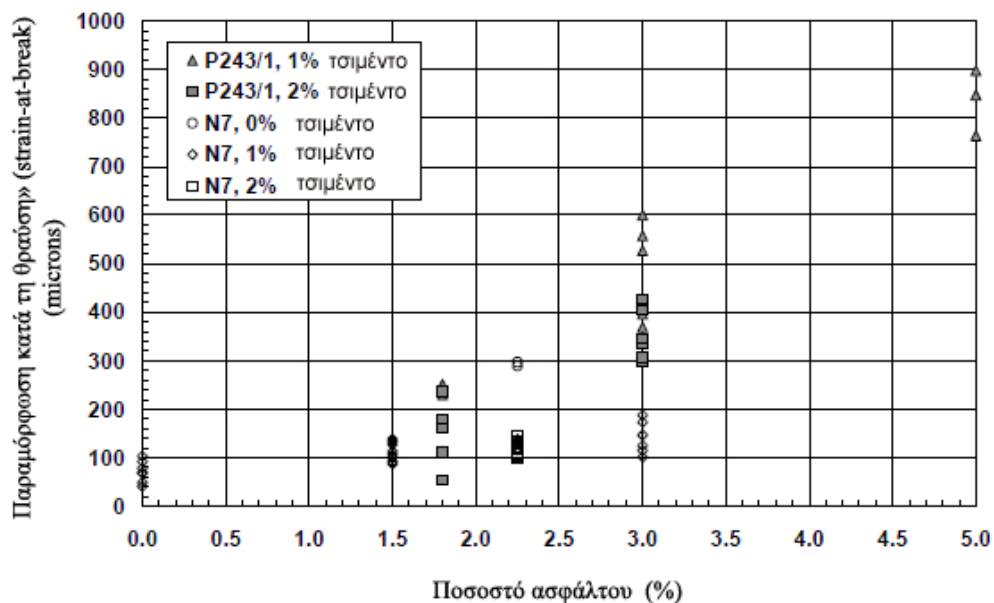
Με χρήση αναλυτικής μεθόδου, σύμφωνα με την οποία το οδόστρωμα προσομοιώνεται με σύστημα ελαστικών επάλληλων στρώσεων, υπολογίζεται η οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού (ε_t) στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης υπό την επίδραση του φορτίου υπολογισμού.

Προσδιορισμός της «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» (strain-at-break) του υλικού

Η τιμή της «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» (strain-at-break) εδ επιλέγεται από το διάγραμμα του Σχήματος 2.18, που προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές (Φωτογραφία 2.7), ανάλογα με το ποσοστό ασφάλτου και τσιμέντου.



Φωτογραφία 2.7. Δοκιμή «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» (strain-at-break): δοκίμιο πριν και μετά τη θραύση (Long & Ventura 2004)



Σχήμα 2.18. Δοκιμές «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» (Long & Theyse 2004)

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην πηγή (Asphalt Academy 2002), οι τιμές κυμαίνονται για την κατηγορία κατεργασμένου υλικού FB2 από 120 έως 225 (χρησιμοποιείται η τιμή 172) και για την κατηγορία FB3 από 390 έως 590 (χρησιμοποιείται η τιμή 490).

Υπολογισμός του «λόγου ανηγμένων παραμορφώσεων» (strain ratio)

Ο «λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων» (strain ratio) υπολογίζεται από τη σχέση (2.4). Αποτελεί μέτρο της ελαστικής κάμψης (flexural bending) του υλικού, σε σχέση με τη μέγιστη ελαστικότητα κατά τις εργαστηριακές δοκιμές. Επειδή τα δύο μεγέθη ανηγμένων παραμορφώσεων δεν μετρούνται με τον ίδιο τρόπο και υπό τις ίδιες συνθήκες, η ανηγμένη παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού δεν αποτελεί πραγματικό ποσοστό της «ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση» και κατά συνέπεια ο λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 1 (έχουν παρατηρηθεί τιμές περίπου έως 3.5).

$$SR_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_b} \quad (2.4)$$

Όπου:

SR_{ε} : Λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων (strain ratio)

ε_t : Ανηγμένη παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης

ε_b : «Ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη θραύση» (strain-at-break)

Για την ανάπτυξη των «σχέσεων μεταφοράς» (transfer functions) χρησιμοποιείται η γενικής μορφής σχέση (2.5) και με βάση τα αποτελέσματα των σχετικών δοκιμών, υπολογίζονται οι σταθερές c_1 και c_2 .

$$N_{eff} = c_1 * (SR_{\varepsilon})^{c_2} \quad (2.5)$$

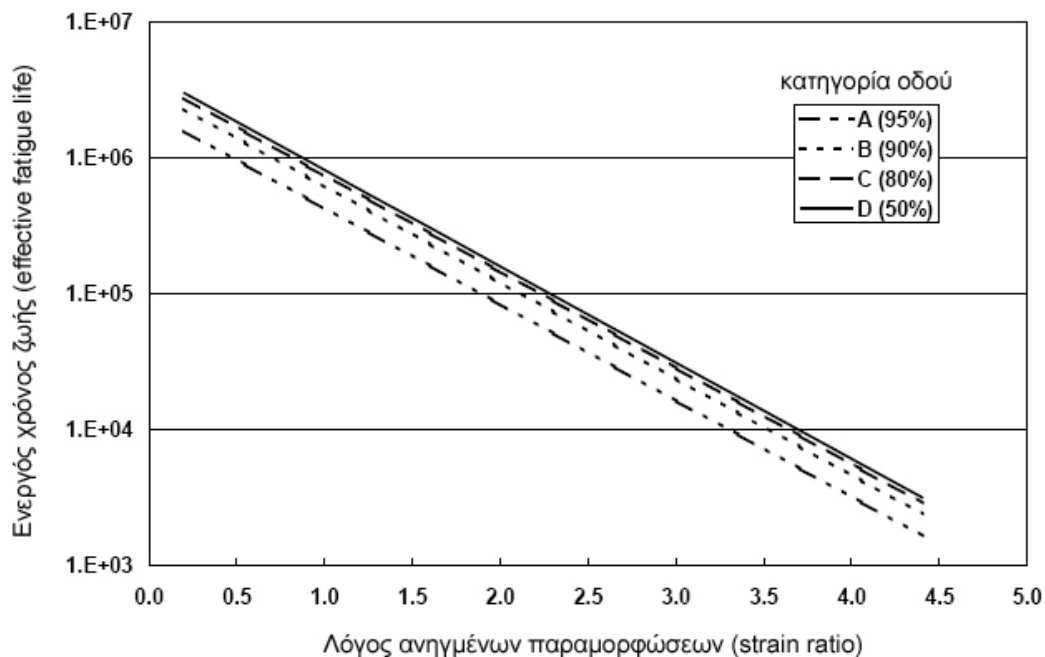
Όπου:

N_{eff} : Αριθμός επαναλήψεων φορτίου 1^{ης} φάσης (ενεργός χρόνος ζωής) έως τη φάση σταθερής δυσκαμψίας

SR_{ε} : Λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων (strain ratio)

c_1, c_2 : Σταθερές

Οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν (Long 2001) και υιοθετήθηκαν από τις Τεχνικές Οδηγίες TG2 παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 2.19.



Σχήμα 2.19. «Σχέσεις μεταφοράς» ενεργού χρόνου ζωής (Effective fatigue life transfer functions) (Long 2001)

2.12.2 Φάση 2 (παραμένουσες παραμορφώσεις)

Η δεύτερη φάση στη ζωή των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών είναι η αθροιστική συσσώρευση παραμενουσών παραμορφώσεων. Η «σχέση μεταφοράς» της δεύτερης φάσης αναπτύχθηκε με βάση τα στοιχεία των δοκιμών προσομοίωσης βαρέος οχήματος HVS (μέτρηση των παραμενουσών παραμορφώσεων) και τα αποτελέσματα των τριαξονικών εργαστηριακών δοκιμών με επαναλαμβανόμενο φορτίο (dynamic tri-axial tests). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

Προσδιορισμός της παραμένουσας παραμόρφωσης από τριαξονικές δοκιμές με επαναλαμβανόμενο φορτίο (dynamic tri-axial tests)

Προσδιορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων φορτίου για επτά επίπεδα τιμών (1-20%) παραμένουσας παραμόρφωσης (plastic strain). Τα δοκίμια παρασκευάζονται με διάφορες τιμές σχετικής πυκνότητας (relative density: RD) και επιπέδων κορεσμού (saturation level: S).

Υπολογισμός της αντοχής σε διάτμηση (shear strength)

Προσδιορίζεται η διατμητική αντοχή δοκιμών στο εργαστήριο και ο «λόγος εκτροπικών τάσεων» (deviator stress ratio) με τριαξονικές δοκιμές με στατικό φορτίο (static tri-axial tests). Οι δοκιμές εκτελούνται για διάφορα ποσοστά τσιμέντου και ασφαλτικού συνδετικού, καθώς και για διάφορες τιμές σχετικής πυκνότητας RD και επιπέδων κορεσμού S, που έχουν σημαντική επιρροή στη διατμητική αντοχή. Σχετικά πειράματα έδειξαν, ότι η αύξηση της σχετικής πυκνότητας έχει ως συνέπεια την αύξηση της μέγιστης επιτρεπόμενης κύριας τάσης και κατά συνέπεια της διατμητικής αντοχής. Αντίθετα, αύξηση του επιπέδου κορεσμού έχει ως συνέπεια τη μείωση της μέγιστης επιτρεπόμενης κύριας τάσης (Long & Theyse 2004). Ο «λόγος των τάσεων» (stress ratio) υπολογίζεται ως ο λόγος της εκτροπικής τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$), ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη εκτροπική τάση.

Ανάπτυξη προσομοιώματος για τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προσομοιώματος πρόβλεψης της παραμένουσας παραμόρφωσης (plastic strain), ως συνάρτηση του «λόγου των τάσεων» (stress ratio), των επαναλήψεων φορτίου έως την επίτευξη της παραμένουσας παραμόρφωσης και των ιδιοτήτων του υλικού, όπως της σχετικής πυκνότητας, των επιπέδων κορεσμού και του ποσοστού ασφάλτου, τσιμέντου.

Προσδιορισμός της παραμένουσας παραμόρφωσης από τις δοκιμές προσομοίωσης βαρέος οχήματος HVS

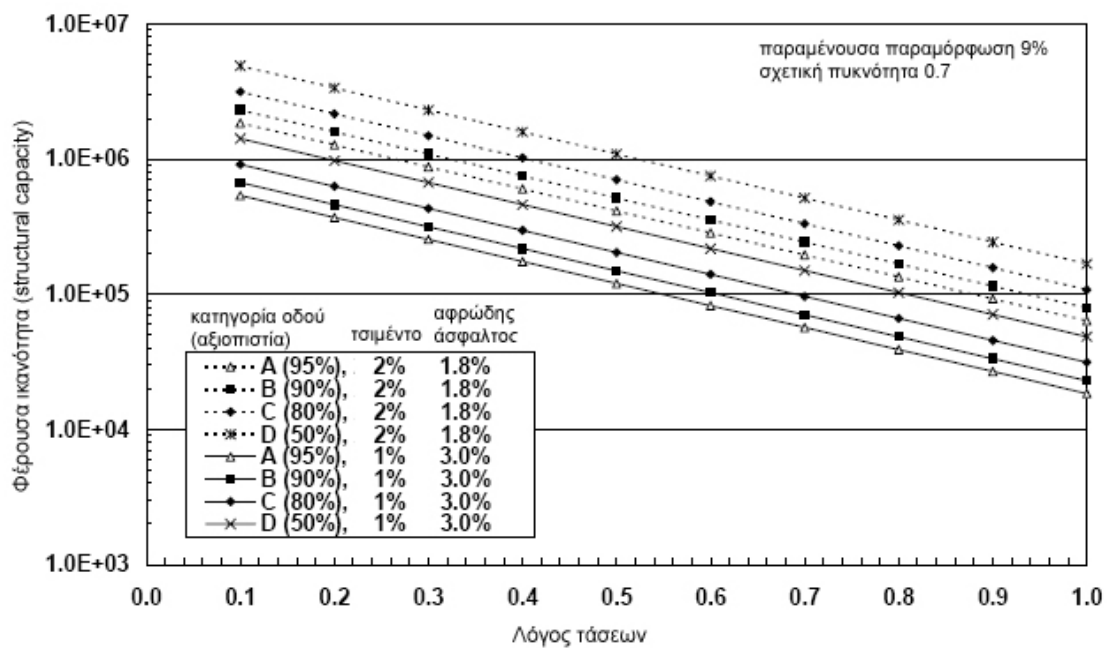
Η παραμένουσα παραμόρφωση μετράται κατά τη διάρκεια των δοκιμών με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS) με χρήση παραμορφωσιμέτρου πολλαπλού βάθους (multi-depth deflectometer: MDD) σε συγκεκριμένα βάθη στο «σώμα» του οδοστρώματος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη της «σχέσης μεταφοράς» είναι ο αριθμός των επαναλήψεων φορτίου για επτά επίπεδα πλαστικής ανηγμένης παραμόρφωσης (1-20%).

Προσδιορισμός του «λόγου των τάσεων» (stress ratio) στο «σώμα» του οδοστρώματος

Πραγματοποιούνται υπολογισμοί των τάσεων εντός της στρώσης του κατεργασμένου υλικού με χρήση αναλυτικής μεθόδου, σύμφωνα με την οποία το οδόστρωμα προσομοιώνεται με σύστημα ελαστικών επάλληλων στρώσεων. Οι τάσεις υπολογίζονται σε διάφορα σημεία, με σκοπό τον προσδιορισμό της δυσμενέστερης (κρίσιμης) εντατικής κατάστασης. Οι «λόγοι των τάσεων» υπολογίζονται στα κρίσιμα σημεία της κατεργασμένης στρώσης και η μεγαλύτερη τιμή χρησιμοποιείται στη «σχέση μεταφοράς».

Σύγκριση εργαστηριακών προβλέψεων και αποτελεσμάτων από τις δοκιμές προσομοίωσης βαρέος οχήματος HVS για βαθμονόμηση των εργαστηριακών «σχέσεων μεταφοράς»

Στις πραγματικές τιμές της σχετικής πυκνότητας και των επιπέδων κορεσμού των κατεργασμένων στρώσεων των τμημάτων όπου πραγματοποιούνται επιτόπου δοκιμές με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS), υπολογίζονται οι προβλεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων με χρήση των εργαστηριακών και των επιτόπου δεδομένων. Η σύγκριση πραγματοποιείται για βαθμονόμηση των εργαστηριακών «σχέσεων μεταφοράς».



Σχήμα 2.20. «Σχέσεις μεταφοράς» παραμενουσών παραμορφώσεων (Permanent deformation transfer functions) (πηγή: Long, 2001)

Οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν (Long 2001) και υιοθετήθηκαν από τις Τεχνικές Οδηγίες TG2 παρουσιάζονται γραφικά στο παραπάνω Σχήμα 2.20.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία από τις επιτόπου έρευνες και εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή πειραματικών τμημάτων, στα οποία εφαρμόστηκε επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση με χρήση αφρώδους ασφάλτου. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, το υπόψη υλικό (ή στρώση) θα αναφέρεται εφεξής ως κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό (ή στρώση), ή για λόγους συντομίας και ως κατεργασμένο (ή ανακυκλωμένο) υλικό (ή στρώση). Επίσης, τα υπόψη οδοστρώματα θα αναφέρονται ως ανακυκλωμένα με αφρώδη ασφαλτο οδοστρώματα, ή για λόγους συντομίας και ως ανακυκλωμένα οδοστρώματα.

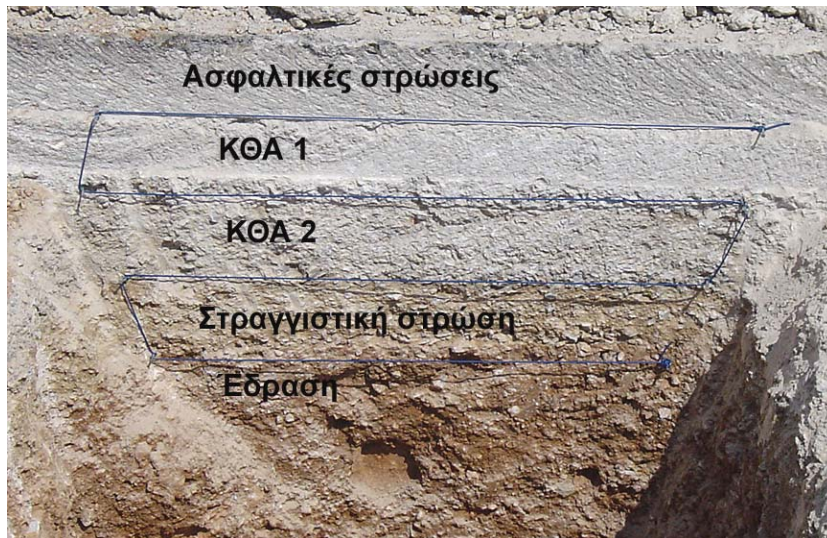
Τα τμήματα αυτά κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, σε συνεργασία με την ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ του ΥΠΕΧΩΔΕ και αποτέλεσαν το βασικό πεδίο εφαρμογής της έρευνας που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια. Αποτελούν τμήματα των αυτοκινητοδρόμων Αθηνών - Κορίνθου και Αθηνών – Λαμίας (Φωτογραφία 3.1) με τρεις λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση. Έχουν μεγάλη σημασία, γιατί λειτουργούν υπό πραγματικές συνθήκες βαριάς κυκλοφορίας. Στα πειραματικά τμήματα έγιναν επιτόπου δοκιμές και ελήφθησαν στοιχεία κατά το στάδιο εφαρμογής της ανακύκλωσης, ενώ συνεχίστηκε συστηματικά η παρακολούθηση της δομικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων έως και 7 χρόνια μετά την απόδοσή τους στην κυκλοφορία.

Η εφαρμογή της ανακύκλωσης στα πειραματικά τμήματα έγινε σε δύο τύπους οδοστρωμάτων, οι οποίοι απαντώνται σε ελληνικούς αυτοκινητόδρομους: σε ημιάκαμπτο και σε εύκαμπτο οδόστρωμα.

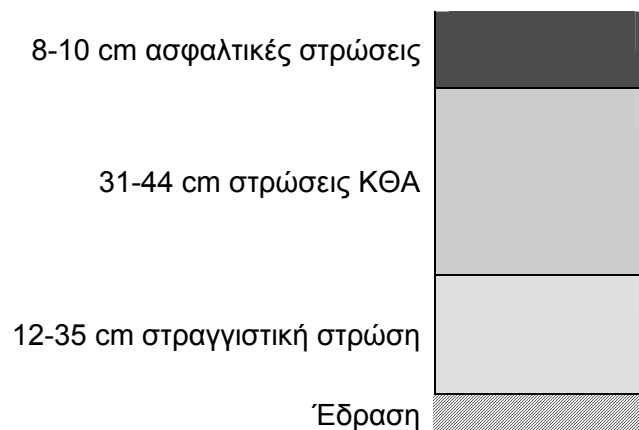


Φωτογραφία 3.1. Θέσεις πειραματικών οδοστρώματων

Το ημιάκαμπτο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση είχε συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων 8-10 cm και βάση / υπόβαση από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο με τσιμέντο (ΚΘΑ), που σύμφωνα με την αρχική μελέτη θα έπρεπε να ήταν κατασκευασμένες σε δύο στρώσεις πάχους 20 cm και 18 cm. Από πυρηνοληψίες και ερευνητικές τομές (Φωτογραφία 3.2), διαπιστώθηκε ότι ήταν κατασκευασμένες σε δύο ή περισσότερες στρώσεις, με συνολικό πάχος 31-44 cm. Από τις τομές διαπιστώθηκε, ότι το πάχος της στραγγιστικής στρώσης ήταν 12-25 cm και ότι το υλικό της έδρασης ήταν καλής ποιότητας. Η διατομή του ημιακάμπτου οδοστρώματος πριν την ανακύκλωση φαίνεται στο Σχήμα 3.1



Φωτογραφία 3.2. Τομή στο ημικάμπτο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση

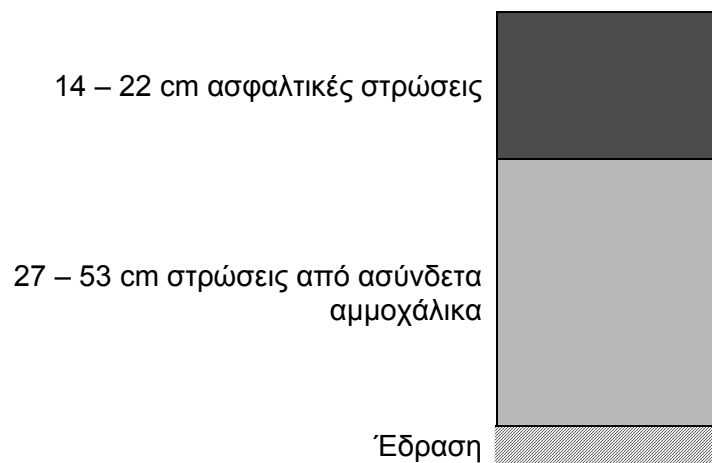


Σχήμα 3.1. Διατομή υφισταμένου ημικάμπτου οδοστρώματος πριν την ανακύκλωση, όπως προέκυψε από μετρήσεις (τομές) στο οδόστρωμα

Από πυρηνοληψίες και ερευνητικές τομές στο εύκαμπτο οδόστρωμα (Φωτογραφία 3.3) διαπιστώθηκε συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων 14-22 cm και βάση / υπόβαση από θραυστό αμμοχάλικο συνολικού πάχους 27-53 cm. Η διατομή του ευκάμπτου οδοστρώματος πριν την ανακύκλωση φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Φωτογραφία 3.3. Τομή στο εύκαμπτο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση

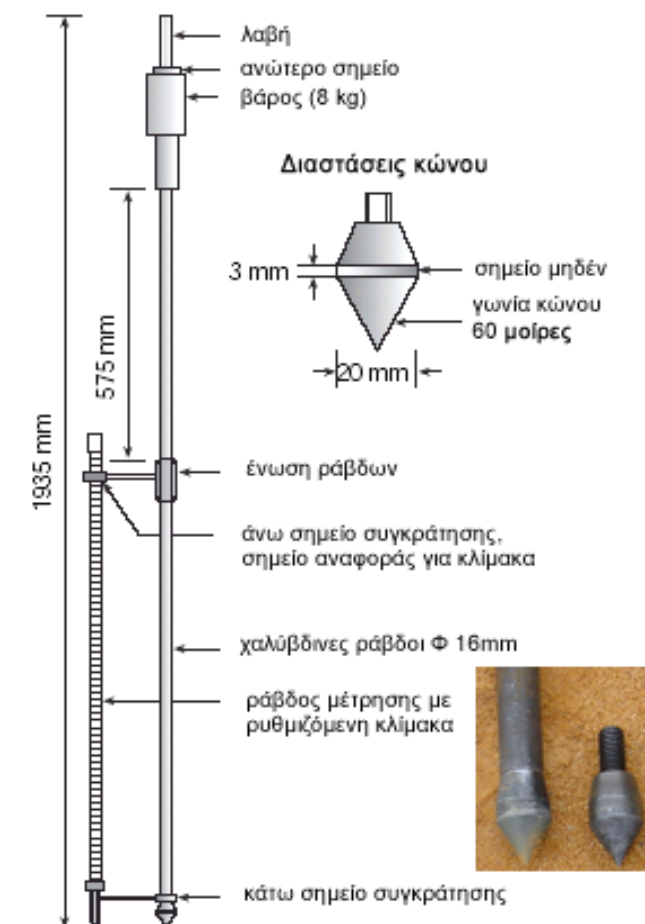


Σχήμα 3.2. Διατομή υφισταμένου ευκάμπτου οδοστρώματος πριν την ανακύκλωση, όπως προέκυψε από μετρήσεις (τομές) στο οδόστρωμα

3.2. Έρευνες και δοκιμές πριν από την εφαρμογή της ανακύκλωσης

Η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα και της έδρασης αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της ανακύκλωσης. Αυτό, επειδή απαιτείται ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα της έδρασης (soil support) της ανακυκλωμένης στρώσης, προκειμένου να διατηρηθούν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα οι αναπτυσσόμενες τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις, ώστε η «φθορά» να είναι μικρή. Για τον σκοπό αυτό

πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δοκιμές «δυναμικής διείσδυσης κώνου» με τη συσκευή DCP (Dynamic Cone Penetrometer) (Σχήμα 3.3). Επίσης, έγιναν δοκιμές με το Σύστημα FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, για υποστήριξη των ερευνών πριν από την εφαρμογή της ανακύκλωσης. Σημειώνεται, ότι τα αποτελέσματα της υπόψη διερεύνησης δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα διατριβή.



Σχήμα 3.3. Συσκευή DCP

Οι ερευνητικές τομές (Φωτογραφία 3.4), εκτός από την πληροφόρηση σχετικά με τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων πριν την ανακύκλωση, σκοπό είχαν και τη λήψη υλικού (Φωτογραφία 3.5) για την παρασκευή αντίστοιχου κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού στο εργαστήριο. Τα δοκίμια με το κατεργασμένο υλικό χρησιμοποιήθηκαν για εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης του υλικού.

Λόγω των διαφορών που παρατηρήθηκαν στα πάχη των επιμέρους στρώσεων των προς ανακύκλωση οδοστρωμάτων και λόγω των αλλαγών του τελικού υψομέτρου της οδού,

υπήρχαν διαφοροποιήσεις ως προς το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ΦΑ, ή Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) στο συνολικό μίγμα των αδρανών. Για τον σκοπό αυτό, παρήχθησαν μίγματα με διάφορα ποσοστά ΦΑ και ΚΘΑ στην περίπτωση των ημιακάμπτων, ή ασύνδετων αμμοχάλικων στην περίπτωση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Οι εργαστηριακές δοκιμές διεξήχθησαν σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο υποκεφάλαιο 2.8.



Φωτογραφία 3.4. Ερευνητικές τομές στο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση



Φωτογραφία 3.5. Υλικό από ερευνητικές τομές στο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση

3.2.1 Εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά ημιακάμπτου οδοστρώματος

Για την παραγωγή καλής ποιότητας αφρώδους ασφάλτου χρησιμοποιήθηκε ασφαλτος 80/100, σύμφωνα και με τα αναφερόμενα στο υποκεφάλαιο 2.3 (χρήση ασφάλτου με διείσδυση περίπου 100 για περιοχές με εύκρατο κλίμα). Οι βέλτιστες τιμές των χαρακτηριστικών της αφρώδους ασφάλτου, που προσδιορίστηκαν σε θερμοκρασία 170°C, ήταν βέλτιστο ποσοστό νερού 2.5 %, λόγος διόγκωσης: ER=14 φορές και χρόνος ημι-ζωής: $\tau_{1/2}=14$ sec.

Στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης έγινε παραγωγή τριών μιγμάτων με διαφορετική αναλογία φρεζαρισμένου ασφατομίγματος (ΦΑ) και ΚΘΑ. Ελήφθη επίσης υπόψη το γεγονός, ότι το απαιτούμενο ελάχιστο ποσοστό λεπτόκοκκου αδρανούς διερχόμενου από το κόσκινο 0.075 mm (5%) ήταν αμφίβολο να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της ανακύκλωσης, λόγω της παρουσίας μικρού ποσοστού λεπτόκοκκου αδρανούς στο φρεζαρισμένο με τα συμβατικά μηχανήματα ανακύκλωσης ΚΘΑ. Για τον σκοπό αυτό, αποφασίστηκε η προσθήκη άμμου (με ποσοστό λεπτόκοκκου αδρανούς διερχόμενου από το κόσκινο 0.075 mm περίπου 20%) στο μίγμα των φρεζαρισμένων αδρανών. Σε όλες τις περιπτώσεις προσδιορίστηκε βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου 3%. Σε δύο μίγματα έγινε βελτιστοποίηση, με προσθήκη τσιμέντου σε ποσοστό 1%. Για εκτίμηση της επίδρασης πιθανών διαφορών της αναλογίας ΦΑ και φρεζαρισμένου ΚΘΑ στα χαρακτηριστικά του κατεργασμένου υλικού, έγινε μελέτη ευαισθησίας με παραγωγή τριών επιπλέον μιγμάτων. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm.

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε κατεργασμένα υλικά ημιακάμπτων οδοστρωμάτων (Loizos et al. 2004)

Μίγμα	Συστατικά μίγματος (%)				Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) (kPa)							
	ΦΑ	ΚΘΑ	άμμος	τσιμέντο	Ποσοστό αφρώδους ασφάλτου							
					2%		2.5%		3%		3.5%	
					Ξη.	Κο.	Ξη.	Κο.	Ξη.	Κο.	Ξη.	Κο.
Μίγμα 1	5	80	15		269	229	265	179	333	280	331	248
Μίγμα 2		70	30		321	227	299	179	354	277	309	248
Μίγμα 3	20	80			347	254	392	298	371	309	374	349
Βελτιστοπ. 1	5	80	15	1					472	457		
Βελτιστοπ. 2		70	30	1					498	469		
Μελ. ευαισθ. 1	85		15	1					227	228		
Μελ. ευαισθ. 2	42.5	42.5	15	1					280	225		
Μελ. ευαισθ. 2		85	15	1					315	344		

Υποσημείωση: **1) ΦΑ:** φρεζαρισμένο ασφατόμιγμα. **2) Ξη.:** ξηρό. **3) Κο.:** κορεσμένο

Δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού με τη συσκευή NAT σε δοκίμια Marshall (θερμοκρασία 22-25°C) έδωσαν τιμές για το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) του κατεργασμένου υλικού μεγαλύτερες από 3000 MPa.

3.2.2 Εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά ευκάμπτου οδοστρώματος

Για την παραγωγή καλής ποιότητας αφρώδους ασφάλτου χρησιμοποιήθηκε άσφαλτος 80/100, σύμφωνα και με τα αναφερόμενα στο υποκεφάλαιο 2.3 (χρήση ασφάλτου με διείσδυση περίπου 100 για περιοχές με εύκρατο κλίμα). Οι βέλτιστες τιμές των χαρακτηριστικών της αφρώδους ασφάλτου προσδιορίστηκαν για βέλτιστο ποσοστό νερού 2.5 % σε θερμοκρασία 175°C.

Στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης έγινε παραγωγή δύο μιγμάτων με διαφορετική αναλογία φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ΦΑ) και ασύνδετων αμμοχάλικων (75/25 και 50/50). Τα δύο μίγματα αδρανών είχαν ποσοστό λεπτόκοκκου αδρανούς διερχόμενου από το κόσκινο 0.075 mm 5% και 7% αντίστοιχα, με συνέπεια να καλύπτουν το απαιτούμενο ελάχιστο ποσοστό (5%) και να μην απαιτείται προσθήκη άμμου. Από τις δοκιμές αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm (ξηρά και κορεσμένα), προσδιορίστηκε βέλτιστο ποσοστό αφρώδους ασφάλτου 2.25%, με προσθήκη τσιμέντου σε ποσοστό 1%. Με το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου έγιναν δοκιμές αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) και σε ανεμπόδιση θλίψη (UCS) σε δοκίμια διαμέτρου 150 mm, τα οποία είχαν συντηρηθεί με προσομοίωση πραγματικών συνθηκών υγρασίας (equilibrium moisture content). Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου 2.25% (και προσθήκη 1% τσιμέντο), παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε κατεργασμένα υλικά ευκάμπτων οδοστρωμάτων

Μίγμα	ΦΑ	Ασύνδετα αμμοχάλικα	ITS		TSR	ITS		TSR	UCS
			Φ 100 mm			Φ 150 mm			Φ 150 mm
			(kPa)		(%)	(kPa)		(%)	(kPa)
			Ξη.	Κο.		Προσ.	Κο.		Προσ.
Μίγμα 1	75	25	318	238	75	301	237	79	1900
Μίγμα 2	50	50	472	379	80	279	252	90	2400

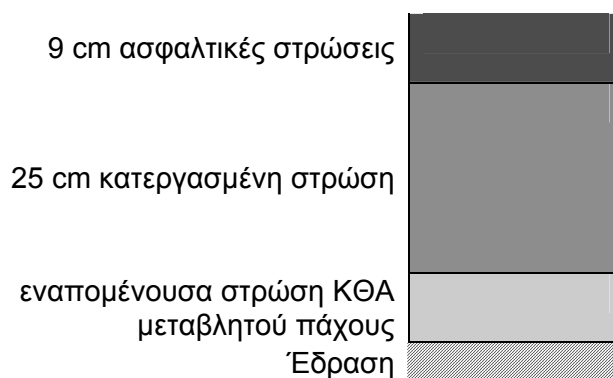
Υποσημείωση: **1) ΦΑ:** φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. **2) Ξη.:** ξηρό. **3) Κο.:** κορεσμένο. **4) Προσ.:** προσομοίωση πραγματικών συνθηκών υγρασίας. **6) TSR:** εναπομένουσα αντοχή σε εφελκυσμό (=ITS_{κο}/ITS_{ξη})

3.3. Στοιχεία διατομών ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, όπως προέκυψαν από την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) οδοστρώματος. Επιπλέον, αναφέρονται και τα χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων (μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης) που ελήφθησαν υπόψη κατά τους υπολογισμούς και προέκυψαν από τις επιτόπου έρευνες (για τις στρώσεις που απομένουν), καθώς και από τις εργαστηριακές δοκιμές (για τις νέες στρώσεις). Οι διατομές που αναφέρονται παρακάτω αφορούν στη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας, η οποία χαρακτηρίζεται και ως λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας, επειδή κυκλοφορεί το μεγαλύτερο ποσοστό βαρέων οχημάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, οι επιτόπου δοκιμές επικεντρώθηκαν στην υπόψη λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας.

3.3.1 Διατομή ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος

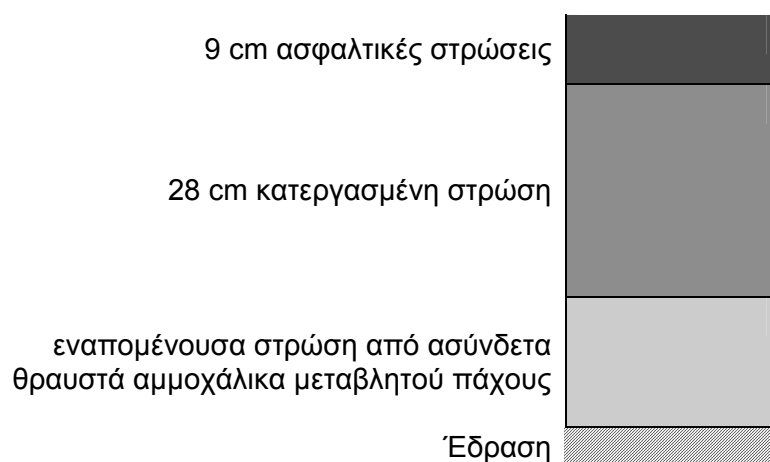
Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης της έδρασης, ως προϊόν ανάλυσης, ελήφθη ίσο με 120 MPa, με βάση τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD, καθώς και «δυναμικής διεξόδου κώνου» με τη συσκευή DCP. Αναφορικά με το ΚΘΑ που απομένει, από τις ερευνητικές τομές εκτιμήθηκε ότι μαζί με τη στραγγιστική στρώση έχει ελάχιστο πάχος 20 cm και μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης 300 - 500 MPa, με τη δυσμενέστερη υπόθεση ότι λειτουργεί ως ασύνδετο υλικό. Για την κατεργασμένη με αφρώδη άσφαλτο στρώση υπολογίστηκε πάχος 25 cm και εκτιμήθηκε μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης 3000 MPa. Όσον αφορά στις νέες ασφατικές στρώσεις, το πάχος τους σύμφωνα με την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) οδοστρώματος ήταν 7 cm (με μέτρο δυσκαμψίας 3000 MPa). Η διατομή που εφαρμόστηκε όμως στην πράξη, περιέλαβε ασφατικές στρώσεις συνολικού πάχους 9 cm και συγκεκριμένα, μία ισοπεδωτική στρώση πάχους 5 cm με ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου και μία αντιολισθηρή στρώση πάχους 4 cm με ασφαλτόμιγμα ημιανοικτού τύπου, η άσφαλτος της οποίας ήταν τροποποιημένη με πλαστομερή χημικά πρόσθετα τύπου EVA (Ethylene Vinyl Acetate) (Brule & Lefebvre 1993). Η διατομή του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Διατομή ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος

3.3.2 Διατομή ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος

Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης της έδρασης, ως προϊόν ανάλυσης, ελήφθη ίσο με 150-200 MPa, με βάση τα αποτελέσματα των επιτόπου διερευνήσεων με το Σύστημα FWD, καθώς και των δοκιμών «δυναμικής διείσδυσης κώνου» με τη συσκευή DCP. Αναφορικά με την εναπομένουσα στρώση από ασύνδετα θραυστά αμμοχάλικα, εκτιμήθηκε ότι έχει πάχος 13 - 19 cm και μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης 250 - 350 MPa. Για την κατεργασμένη με αφρώδη άσφαλτο στρώση υπολογίστηκε πάχος 28 cm και εκτιμήθηκε μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης 1500 MPa. Όσον αφορά στις νέες ασφαλτικές στρώσεις, το πάχος τους σύμφωνα με την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) οδοστρώματος ήταν 9 cm (με μέτρο δυσκαμψίας 3500 MPa). Η διατομή που εφαρμόστηκε, περιέλαβε μία ισοπεδωτική στρώση πάχους 5 cm με ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου και μία αντιολισθηρή στρώση πάχους 4 cm με ασφαλτόμιγμα ημιανοικτού τύπου, η άσφαλτος της οποίας ήταν τροποποιημένη με πλαστομερή χημικά πρόσθετα τύπου EVA (Brule & Lefebvre 1993). Η διατομή του ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Διατομή ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος

3.4. Εφαρμογή της ανακύκλωσης

Η εφαρμογή της ανακύκλωσης στα **ημιάκαμπτα οδοστρώματα** των πειραματικών τμημάτων έγινε σε πέντε στάδια, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.6 και περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

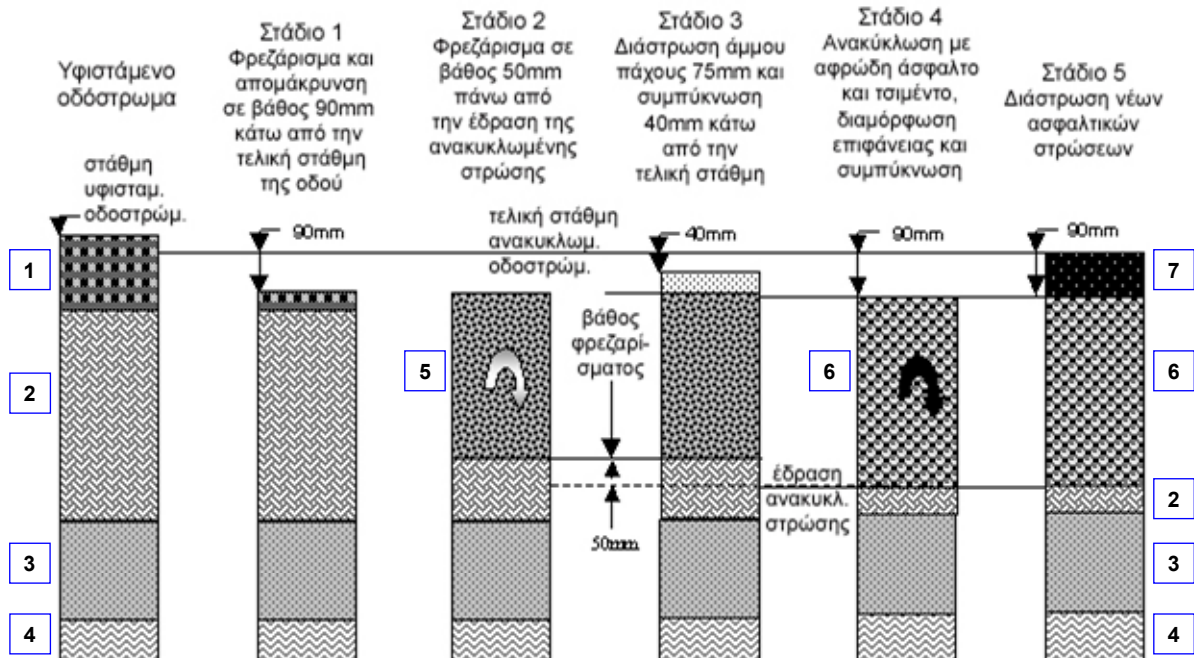
Στάδιο 1: Φρεζαρίστηκε το υφιστάμενο ασφαλτόμιγμα σε βάθος που αντιστοιχεί σε 90 mm κάτω από την τελική στάθμη του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (ΦΑ) απομακρύνθηκε.

Στάδιο 2: Φρεζαρίστηκε το οδόστρωμα σε βάθος που αντιστοιχεί σε 50 mm πάνω από την έδραση (πυθμένας) της κατεργασμένης στρώσης.

Στάδιο 3: Διαστρώθηκε άμμος σε πάχος 75 mm στην επιφάνεια του φρεζαρισμένου οδοστρώματος και συμπυκνώθηκε σε στάθμη που αντιστοιχεί σε 40 mm κάτω από την τελική στάθμη του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Στάδιο 4: Εφαρμόστηκε η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση του οδοστρώματος με αφρώδη άσφαλτο έως το προκαθορισμένο βάθος. Αμέσως μετά έγινε η αρχική συμπύκνωση του κατεργασμένου υλικού, στη συνέχεια διαμορφώθηκε στην επιθυμητή στάθμη με διαμορφωτήρα (grader) και συνεχίστηκε η συμπύκνωση. Η περαίωση της επιφάνειας του κατεργασμένου υλικού έγινε με ελαστικοφόρο οδοστρωτήρα.

Στάδιο 5: Η διάστρωση της ισοπεδωτικής ασφαλτικής στρώσης έγινε όταν η υγρασία της κατεργασμένης στρώσης ελαττώθηκε κάτω από το 50% του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας. Ακολούθησε η διάστρωση της αντιολισθηρής στρώσης και αποδόθηκαν τα πειραματικά τμήματα στην κυκλοφορία.



Υπόμνημα 1: Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις, 2: Στρώσεις ΚΘΑ, 3: Στραγγιστική στρώση, 4: Έδραση, 5: Φρεζαρισμένο υλικό, 6: Κατεργασμένο υλικό, 7: Νέες ασφαλτικές στρώσεις

Σχήμα 3.6. Στάδια εφαρμογής της ανακύκλωσης σε ημιάκαμπτο οδόστρωμα

Η εφαρμογή της ανακύκλωσης στα **εύκαμπτα οδοστρώματα** των πειραματικών τμημάτων έγινε σε τέσσερα στάδια, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 3.7. Οι διαφορές σε σχέση με τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται κυρίως στο γεγονός, ότι στα εύκαμπτα οδοστρώματα δεν διαστρώθηκε άμμος και δεν έγινε αρχικά φρεζάρισμα και απομάκρυνση μέρους των υφισταμένων ασφαλτικών στρώσεων, προκειμένου να συμπεριληφθεί στο μίγμα των προς ανακύκλωση αδρανών το μεγαλύτερο δυνατόν ποσοστό φρεζαρισμένης ασφάλτου. Τα τέσσερα στάδια ανακύκλωσης περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

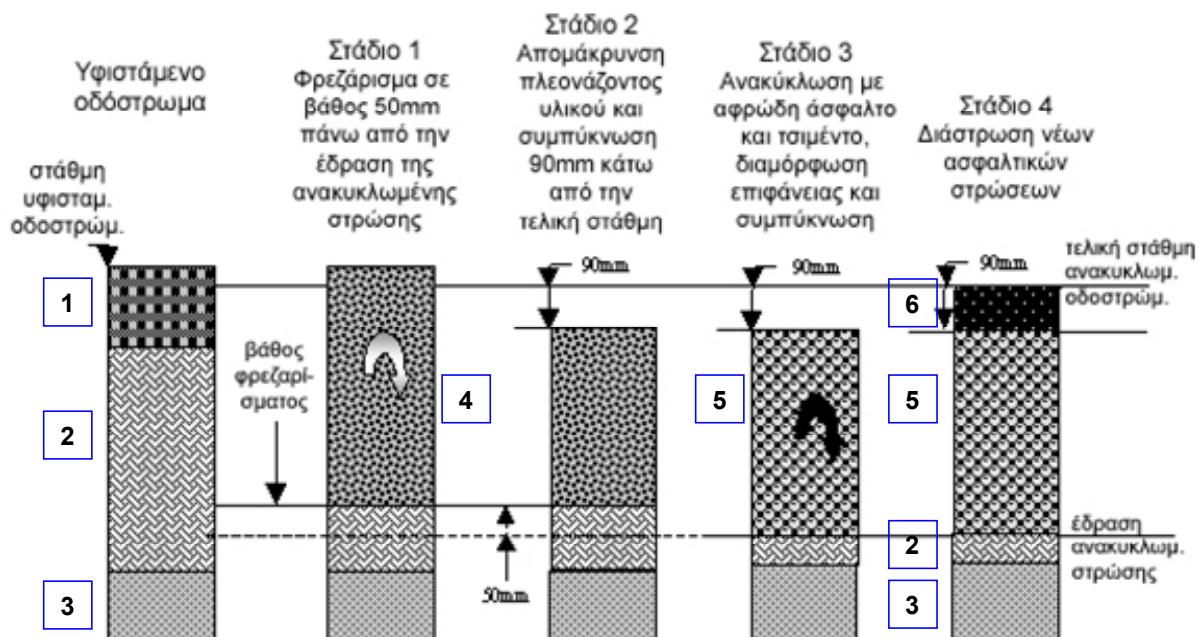
Στάδιο 1: Φρεζαρίστηκε το οδόστρωμα σε βάθος που αντιστοιχεί σε 50 mm πάνω από την έδραση (πυθμένας) της κατεργασμένης στρώσης.

Στάδιο 2: Το πλεονάζον υλικό απομακρύνθηκε, ή μεταφέρθηκε σε σημεία, όπου υπήρχε έλλειψη και συμπτυνώθηκε σε στάθμη που αντιστοιχεί σε 90 mm κάτω από την τελική στάθμη του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Στάδιο 3: Εφαρμόστηκε η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση του οδοστρώματος με αφρώδη ασφαλτο έως το προκαθορισμένο βάθος. Αμέσως μετά έγινε η αρχική συμπίκνωση του κατεργασμένου υλικού, στη συνέχεια διαμορφώθηκε στην επιθυμητή στάθμη με

διαμορφωτήρα (grader) και συνεχίστηκε η συμπίκνωση. Η περαίωση της επιφάνειας του κατεργασμένου υλικού έγινε με ελαστικοφόρο οδοστρωτήρα.

Στάδιο 4: Η διάστρωση της ισοπεδωτικής ασφαλτικής στρώσης έγινε όταν η υγρασία της κατεργασμένης στρώσης ελαττώθηκε κάτω από το 50% του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας. Ακολούθησε η διάστρωση της αντιολισθηρής στρώσης και αποδόθηκαν τα πειραματικά τμήματα στην κυκλοφορία.



Υπόμνημα 1: Υφιστάμενες ασφαλτικές στρώσεις, 2: Στρώσεις ΚΘΑ, 3: Έδραση, 4: Φρεζαρισμένο υλικό, 5: Κατεργασμένο υλικό, 6: Νέες ασφαλτικές στρώσεις

Σχήμα 3.7. Στάδια εφαρμογής της ανακύκλωσης σε εύκαμπτο οδόστρωμα

Στις Φωτογραφίες 3.6 έως 3.13 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες από τη διαδικασία εφαρμογής της ανακύκλωσης.



Φωτογραφία 3.6. Φρεζάρισμα



Φωτογραφία 3.7. Απομάκρυνση πλεονάζοντος υλικού



Φωτογραφία 3.8. Διαμόρφωση επιφάνειας πριν την ανακύκλωση



Φωτογραφία 3.9. Εφαρμογή της ανακύκλωσης



Φωτογραφία 3.10. Συμπύκνωση αμέσως μετά την ανακύκλωση



Φωτογραφία 3.11. Διαμόρφωση στην επιθυμητή στάθμη



Φωτογραφία 3.12. Συμπύκνωση μετά τη διαμόρφωση



Φωτογραφία 3.13. Τελική συμπύκνωση (περαίωση της επιφάνειας)

4. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 Γενικά

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος και για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του στο αρχικό στάδιο λειτουργίας του, στηρίχθηκαν κυρίως σε επιτόπου μη καταστρεπτικές μετρήσεις με ειδικά συστήματα, τα οποία περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 4.2.

Τα επιτόπου συλλεχθέντα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για υπολογισμό διεθνώς αναγνωρισμένων δεικτών δομικής κατάστασης οδοστρώματος. Για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιτόπου στρώσεων του οδοστρώματος έγιναν αναλύσεις με χρήση λογισμικών ανάστροφων υπολογισμών. Τα στοιχεία που προέκυψαν από τους ανάστροφους υπολογισμούς (μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης) χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για την ανάλυση της εντατικής κατάστασης και τον υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών μεγεθών στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων κατά τα διάφορα στάδια δοκιμών στα πειραματικά τμήματα οδηγούν στην εκτίμηση της δομικής κατάστασης και κατά συνέπεια της επιτόπου συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν και στοιχεία από τις παραδοχές της αναλυτικής διαστασιολόγησης του οδοστρώματος και τις εργαστηριακές δοκιμές κατά τη μελέτη σύνθεσης του κατεργασμένου υλικού.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκαν περιοδικές πυρηνοληψίες, για εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και για περαιτέρω εργαστηριακούς ελέγχους. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι περιέλαβαν δοκιμές αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) και εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM), σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 2.8.

Στις επιτόπου δοκιμές περιλαμβάνεται επίσης και η εγκατάσταση (instrumentation) συστήματος με αισθητήρες οπτικών ινών, για μέτρηση της ανηγμένης παραμόρφωσης σε κρίσιμα σημεία του «σώματος» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η περιγραφή του συστήματος και τα αποτελέσματα των αναλύσεων περιγράφονται στο κεφάλαιο 7.

4.2 Συστήματα επιτόπου συλλογής στοιχείων

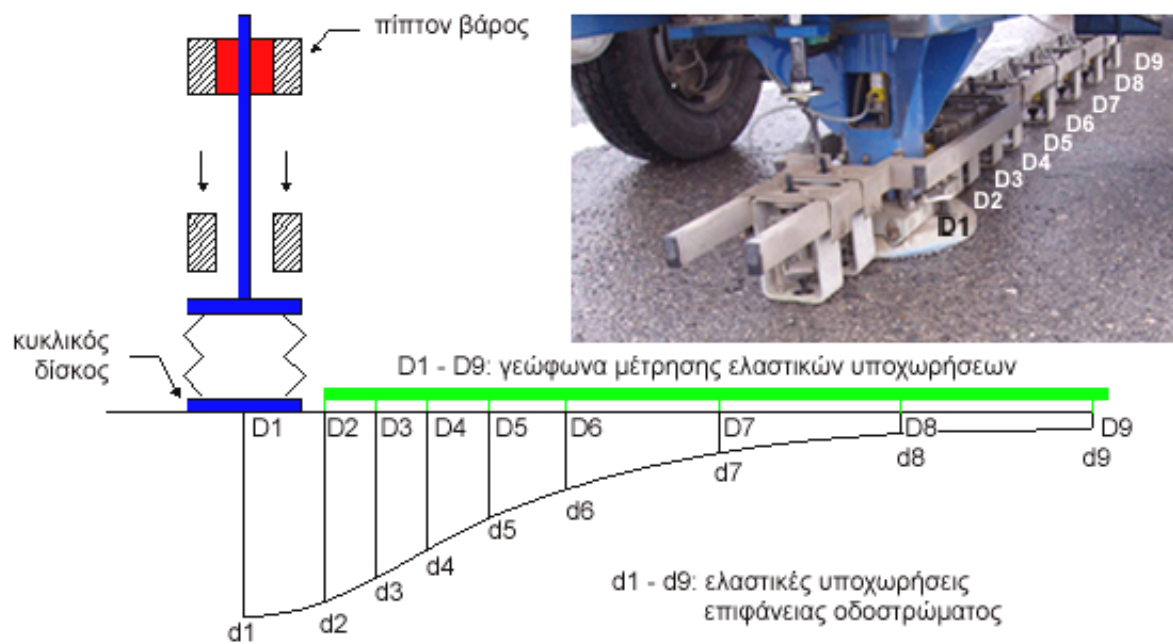
Η συλλογή στοιχείων με σκοπό την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος έγινε με το Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους, διεθνώς γνωστό ως FWD (Falling Weight Deflectometer) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής (ΜΣΥ) του ΕΜΠ (Dynatest 2001). Ανήκει στη γενικότερη κατηγορία των επιτόπου μη καταστρεπτικών ελέγχων (Non-Destructive Tests: NDT) και ειδικότερα στην κατηγορία των συστημάτων που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος, καταγράφοντας σε διάφορες αποστάσεις από το φορτίο τις ελαστικές υποχωρήσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό διαφόρων παραμέτρων και κυρίως του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων. Οι μετρήσεις των ελαστικών υποχωρήσεων πραγματοποιούνται με ειδικά γεωφώνια (geophones), που απέχουν μεταξύ τους συνήθως 20-40 cm. Το FWD είναι το πλέον αντιπροσωπευτικό, ευρέως χρησιμοποιούμενο και διεθνώς αποδεκτό σύστημα αυτής της κατηγορίας.

Κατά την εκτέλεση δοκιμών με το Σύστημα FWD (Φωτογραφία 4.1), το βάρος που πέφτει υπό την επίδραση της βαρύτητας (falling weight) προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια δημιουργώντας παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται στο οδόστρωμα μέσω ενός κυκλικού δίσκου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται με τη βοήθεια εννέα γεωφώνων (D1 – D9) οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις ($d_1 - d_9$ σε μm) κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό (Σχήμα 4.1). Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, οι αποστάσεις των γεωφώνων από το κέντρο του φορτίου ήταν 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 και 1800 mm (COST-336 1998). Σημειώνεται, ότι σε πολλές περιπτώσεις οι αναλύσεις γίνονται με βάση τα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών με χρήση επτά ή πέντε γεωφώνων (και πολλές φορές ενός γεωφώνου). Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν εννέα γεωφώνια.

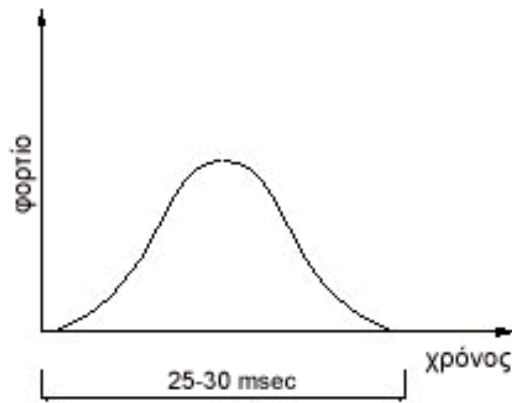
Η φόρτιση του οδοστρώματος, η οποία με το υπόψη Σύστημα FWD του ΕΜΠ διαρκεί 25–30 msec (Σχήμα 4.2), προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος κατά τη διέλευση ενός τροχού οχήματος. Για παράδειγμα, η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 msec.



Φωτογραφία 4.1. Το σύστημα FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ



Σχήμα 4.1. Κατατομή ελαστικών υποχωρήσεων λόγω φόρτισης με το FWD



Σχήμα 4.2. Φόρτιση με το FWD

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών υποχωρήσεων, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας (Φωτογραφία 4.2). Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τις σχετικές διερευνήσεις, δεδομένου ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού και των ασφαλτομιγμάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία.



Φωτογραφία 4.2. Μέτρηση θερμοκρασίας

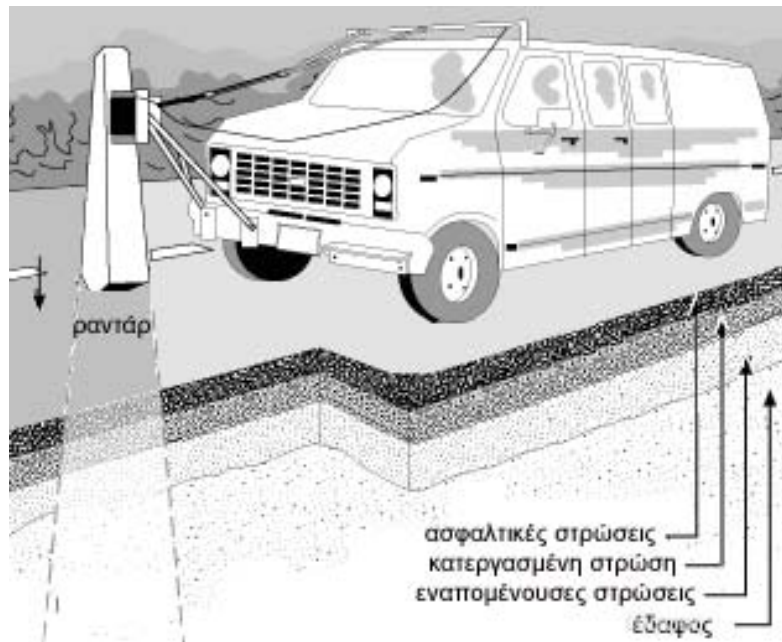
Τα στοιχεία που συλλέγονται κατά τις δοκιμές με το Σύστημα FWD, σε συνδυασμό με τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και τις σχετικές αναλύσεις, συμβάλλουν στην εκτίμηση της δομικής του κατάστασης.

Ο παραδοσιακός τρόπος προσδιορισμού του πάχους των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων είναι η λήψη πυρήνων. Πρόκειται για μία καταστρεπτική και χρονοβόρα μέθοδο που παρέχει σημειακή πληροφόρηση. Επιπλέον, στην περίπτωση εφαρμογής της ψυχρής επιτόπου ανακύκλωσης, δεν είναι δυνατή η αποκοπή πυρήνων σε όλο το πάχος της κατεργασμένης στρώσης κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, η πυρηνοληψία καθίσταται άρρηκτα συνδεδεμένη με την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη, ότι δεν είναι εφικτό να λαμβάνεται μεγάλος αριθμός πυρήνων από το οδόστρωμα αυτοκινητοδρόμου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για πειραματικό τμήμα, όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις σε μικρότερες αποστάσεις, σε σχέση με τις συνήθεις αποστάσεις των δοκιμών με το Σύστημα FWD. Για τους παραπάνω λόγους, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας έγινε χρήση του εξελιγμένου Συστήματος Γεωραντάρ GPR (Ground Penetrating Radar) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Τομέα ΜΣΥ του ΕΜΠ (Φωτογραφία 4.3), για καταγραφή των παχών των στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος (Loizos et al. 2007).

Το Σύστημα γεωραντάρ GPR είναι ένα υψηλής τεχνολογίας σύστημα επιτόπου μη καταστρεπτικών ελέγχων (NDT), το οποίο καταγράφει συνεχόμενα τη στρωματογραφία του οδοστρώματος (Σχήμα 4.3). Το συγκεκριμένο σύστημα λειτουργεί σε αποδεκτές ταχύτητες κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται διακοπή της κυκλοφορίας της οδού τη στιγμή που πραγματοποιείται η μέτρηση. Οι δοκιμές εκτελούνται σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 4748-98 (ASTM 2009). Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων που συλλέγονται με το Σύστημα γεωραντάρ γίνεται με χρήση κατάλληλου λογισμικού (RoadScanners 2001).

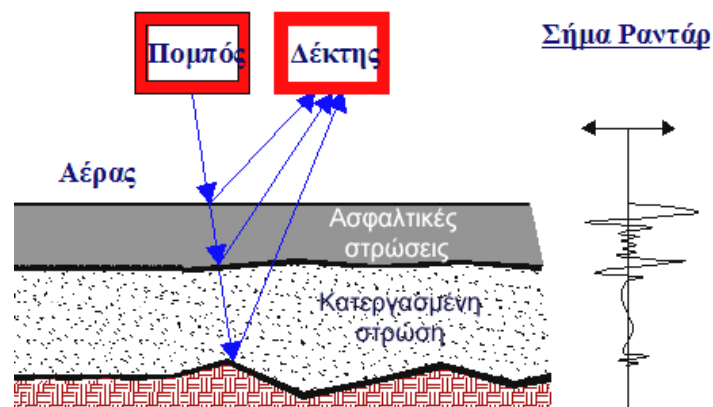


Σχήμα 4.3. Μέτρηση με το Σύστημα GPR στην επιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης



Σχήμα 4.3. Διερεύνηση οδοστρώματος με το Σύστημα GPR

Η θεμελιώδης αρχή λειτουργίας ενός Συστήματος GPR (Geophysical Survey Systems Inc. 2002) βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, αφού εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία περιγράφονται μαθηματικά από τις εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας (Maxwell). Η λειτουργία του απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4. Αρχή λειτουργίας του γεωραντάρ

Τα κύματα κατευθύνονται στο έδαφος και όταν συναντούν υλικό με διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά, αφενός μέρος τους ανακλάται πίσω στον δέκτη και

αφετέρου μεταβάλλεται η ταχύτητα που διαπερνούν το υλικό. Το Σύστημα GPR καταγράφει τα χρονικά διαστήματα που χρειάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαπεράσουν τα υλικά του οδοστρώματος και να επιστρέψουν στον δέκτη. Βάσει του χρόνου αυτού και των ιδιοτήτων των υλικών υπολογίζονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων. Το ποσόν της ενέργειας που ανακλάται εξαρτάται από τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά και την ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (Saarenketo & Scullion 2000). Το πάχος της στρώσης υπολογίζεται από τη σχέση (4.1)

$$h = \frac{V \cdot \Delta t}{2} = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon}} \quad (4.1)$$

Όπου:

- h: πάχος στρώσης (m)
- V: ταχύτητα κύματος (m/nsec)
- Δt : χρόνος (nsec)
- c: ταχύτητα στον αέρα (0.3 m/nsec)
- ε : διηλεκτρική σταθερά υλικού

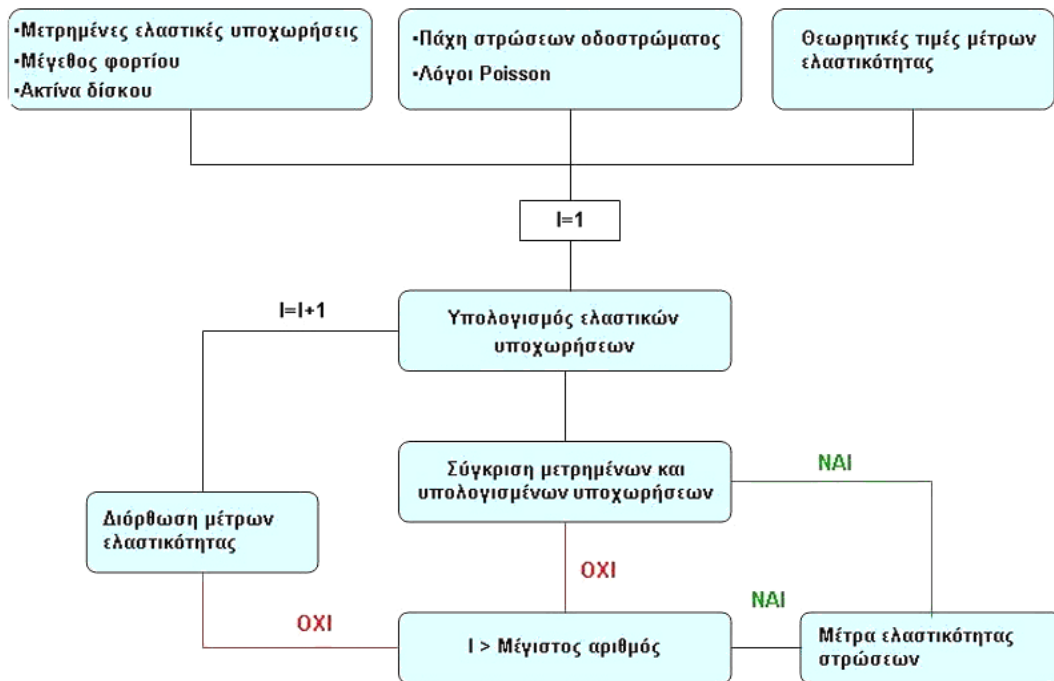
4.3. Εκτίμηση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Η εκτίμηση της δομικής κατάστασης της κατεργασμένης στρώσης, καθώς και των ασφαλικών στρώσεων των οδοστρωμάτων των πειραματικών τμημάτων έγινε με υπολογισμό των δεικτών δομικής κατάστασης, καθώς και με προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης αυτών.

4.3.1 Διαδικασία ανάστροφων υπολογισμών

Για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων εφαρμόστηκε μία πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που συλλέχθηκαν με το Σύστημα FWD, καθώς και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίστηκαν ή μετρήθηκαν επιτόπου (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ.), ενεργοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis ή back-calculation) (COST-336 1998) για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων και κατά συνέπεια της φέρουσας

ικανότητας του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των υλικών, τα οποία στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως back-calculated modulus. Για τη λειτουργία των αλγορίθμων ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιούνται κατάλληλα προσομοιώματα οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, οι ανάστροφοι υπολογισμοί έγιναν με χρήση των λογισμικών Modcomp (Irwin 2002) και Elmod (Dynatest 2001). Η συνολική διαδικασία ανάλυσης περιγράφεται από ένα διάγραμμα ροής, αποτελούμενο από διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα ροής ανάστροφων υπολογισμών

Η διόρθωση (αναγωγή) των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων στη θερμοκρασία αναφοράς έγινε με βάση τη σχέση (4.7) (Baltzer & Jansen 1994).

$$E_{ref} = \frac{E_{AC}}{1 - 2.2 * \log\left(\frac{T_{AC}}{T_{ref}}\right)} \quad (4.7)$$

Όπου,

E_{ref} : μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία αναφοράς

E_{AC} : μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία μέτρησης

T_{AC} : θερμοκρασία ασφαλικής στρώσης ($^{\circ}C$)

T_{ref} : θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}C$)

Η διόρθωση των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού έγινε με βάση τη σχέση που αναπτύχθηκε από εργαστηριακές δοκιμές στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 5.3.2.

4.3.2 Κρίσιμα εντατικά μεγέθη

Στη διαδικασία εκτίμησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, μεγάλη σημασία έχει η εκτίμηση των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται σε διάφορα κρίσιμα σημεία στο «σώμα» του οδοστρώματος. Το μέγεθος των κρίσιμων εντατικών μεγεθών «αντανακλά» τις καταπονήσεις ή φθορές που υφίσταται το οδόστρωμα υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας.

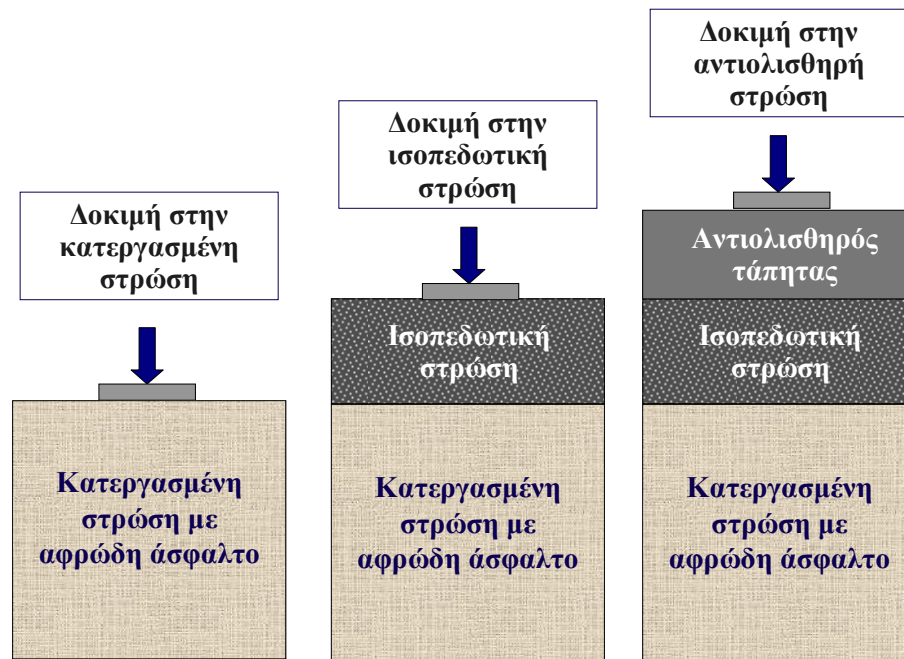
Για την εκτίμηση των κρίσιμων εντατικών μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, τα μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης και ο λόγος του Poisson των υλικών. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν βασισμένοι στη θεωρία των πολλαπλών επάλληλων γραμμικώς ελαστικών στρώσεων (BISAR 1998) και σε ορισμένες εξειδικευμένες περιπτώσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS 2000).

4.4. Διαδικασία εκτέλεσης των επιτόπου δοκιμών

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής έγιναν δοκιμές με το Σύστημα FWD στην επιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης 1 - 2 ημέρες μετά την εφαρμογή της ανακύκλωσης. Δοκιμές έγιναν επίσης στην επιφάνεια της ισοπεδωτικής στρώσης και στην επιφάνεια του αντιολισθηρού τάπητα, κατά τη διάρκεια των πρώτων εβδομάδων μετά την εφαρμογή της ανακύκλωσης. Οι θέσεις (επιφάνειες στρώσεων) εκτέλεσης των επιτόπου δοκιμών φαίνονται στο Σχήμα 4.6. Κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος (έως το δεύτερο έτος περίπου) έγιναν περιοδικές επιτόπου δοκιμές, οι οποίες κύριο σκοπό είχαν τη διαπίστωση της εξέλιξης της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού.

Οι δοκιμές έγιναν στη (δεξιά) λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας στο δεξιό ίχνος τροχών, όπου καταπονείται περισσότερο το οδόστρωμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανάμεσα

στα δύο ίχνη τροχών, όπου μπορεί να θεωρηθεί ότι τα φορτία κυκλοφορίας δεν καταπονούν το οδόστρωμα (Φωτογραφία 4.4).



Σχήμα 4.6. Επιφάνειες επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD



Φωτογραφία 4.4. Θέσεις δοκιμών στη λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας

Μετρήσεις με το Σύστημα GPR έγιναν σε διάφορες φάσεις της κατασκευής των πειραματικών τμημάτων, κυρίως όμως στην επιφάνεια του αντιολισθηρού τάπητα.

Συστηματικές πυρηνοληψίες έγιναν μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, κατά τη διάρκεια των επιτόπου δοκιμών, σε δύο πειραματικά τμήματα (ένα ημιάκαμπτο και ένα εύκαμπτο) τόσο στο δεξιό ίχνος, όσο και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών.

Οι πυρήνες (Σχήμα 4.7) χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη δεδομένων στο πλαίσιο περαιτέρω αναλύσεων των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων (ακριβή στοιχεία παχών, σύγκριση με αναλύσεις με τη χρήση δεδομένων από GPR), καθώς επίσης και για εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 4.7. Πυρήνας ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Στο κεφάλαιο 5 που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι αναλύσεις και τα επιμέρους συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση του κατεργασμένου με αφρώδη άσφαλτο υλικού, καθώς και του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

5.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιτόπου δοκιμές, οι αναλύσεις των συλλεχθέντων στοιχείων, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία των αναλύσεων κατά το αρχικό στάδιο της ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Οι αναλύσεις αφορούν τόσο στο κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό, όσο και στις νέες ασφατικές στρώσεις που διαστρώθηκαν και στο ανακυκλωμένο οδόστρωμα συνολικά.

Από τη διαδικασία των αναλύσεων προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά στο αρχικό στάδιο της ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Σε αυτό περιλαμβάνεται το χρονικό διάστημα της κατασκευής και ο χρόνος από την απόδοση των πειραματικών τμημάτων στην κυκλοφορία μέχρι την «ωρίμανση» (curing) του κατεργασμένου υλικού. Ως «ωρίμανση» θεωρείται η φάση της ζωής του ανακυκλωμένου / κατεργασμένου υλικού, κατά την οποία έχει επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή του, εκφραζόμενη με τη φάση επίτευξης της μέγιστης τιμής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Σημειώνεται, ότι στη διεθνή βιβλιογραφία το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης υλικών κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο αναφέρεται και ως δυσκαμψία. Για να διερευνηθεί αυτό, οι αναλύσεις περιέλαβαν και χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 6 έως 12 μηνών, που σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία συνήθως απαιτείται για την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού (Kekwick 2005).

5.2. Αξιολόγηση με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης

5.2.1 Γενικά

Για την προκαταρκτική αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες D_0 και SCI (COST-336 1998), (Hakim et al. 2002). Οι τιμές των δεικτών προέκυψαν από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το Σύστημα FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ.

Ο δείκτης D_0 εκφράζει τη δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος συνολικά. Μικρές τιμές του υπόψη δείκτη υποδηλώνουν ότι το οδόστρωμα είναι δομικά επαρκές, ή παρουσιάζει σχετικά

μεγάλη δυσκαμψία. Αντίστοιχα, μεγάλες τιμές του δείκτη D_0 υποδηλώνουν ότι πρόκειται για οδόστρωμα μη επαρκούς φέρουσας ικανότητας. Ο δείκτης SCI (Surface Curvature Index) εκφράζει τη δομική κατάσταση των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος, με έμφαση στην κατεργασμένη στρώση και στις ασφαλικές στρώσεις. Μικρές τιμές του δείκτη SCI αντιστοιχούν σε καλή κατάσταση των ανώτερων στρώσεων, ενώ μεγάλες αντιστοιχούν σε οδόστρωμα, του οποίου οι ανώτερες στρώσεις δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική δομική κατάσταση.

Η χρήση των δεικτών δομικής αντοχής έχει κυρίως την έννοια της σύγκρισης (ως προς τη δομική κατάσταση) διαφόρων τμημάτων με όμοια χαρακτηριστικά (πάχη επιμέρους στρώσεων, χρόνος λειτουργίας, κυκλοφορικά δεδομένα). Με την πάροδο του χρόνου και τις επαναληπτικές μετρήσεις στα πειραματικά τμήματα, αξιολογείται η εξέλιξη της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, μέσω της αλλαγής της τιμής των αντίστοιχων δεικτών.

Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το Σύστημα FWD εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των στρώσεων του οδοστρώματος.

Το φορτίο που εφαρμόστηκε στις περισσότερες περιπτώσεις και που θεωρείται ως φορτίο αναφοράς ήταν 50 kN. Κατά την εκτέλεση όμως των δοκιμών παρατηρούνται μικρές διαφορές, οι οποίες καταγράφονται και είναι έτσι δυνατή η αναγωγή των αποτελεσμάτων στο φορτίο αναφοράς.

Η θερμοκρασία στο «σώμα» των στρώσεων του οδοστρώματος επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων που καταγράφονται από το Σύστημα FWD. Διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε ένα πειραματικό τμήμα, κυρίως όμως όταν πραγματοποιούνται περιοδικές μετρήσεις. Κατά συνέπεια, για να είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγησή τους, αλλά και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των περιοδικών διερευνήσεων, γίνεται αναγωγή (normalization) στη θερμοκρασία αναφοράς των δεικτών D_0 και SCI που προκύπτουν από τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό και την αναγωγή στη θερμοκρασία αναφοράς των δεικτών D_0 και SCI είναι η παρακάτω.

Ο δείκτης D_0 προκύπτει από την τιμή της κεντρικής (μέγιστης) ελαστικής υποχώρησης d_1 , με αναγωγή στο φορτίο αναφοράς των 50 kN από τη σχέση (5.1). Σημειώνεται, ότι η τιμή της κεντρικής ελαστικής υποχώρησης d_1 , αναφέρεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία και ως d_0 , λόγω της (μηδενικής) απόστασης του γεωφώνου από το κέντρο του φορτίου. Γενικά, οι δείκτες λαμβάνουν είτε τις τιμές από την αρίθμηση του γεωφώνου

(δηλαδή 1 έως 9, με τιμή 1 στο κέντρο του φορτίου και αυξανόμενες τιμές από το πλησιέστερο στο φορτίο προς το πιο απομακρυσμένο), είτε τις τιμές της απόστασης (mm) από το κέντρο του φορτίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται έρευνες με χρήση 1, 5, ή 7 γεωφώνων. Στην παρούσα όμως έρευνα χρησιμοποιήθηκαν 9 γεώφωνα, για επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

$$D_0 = \frac{d_1 * 50}{P} \quad \left(\text{ή} \quad D_0 = \frac{d_0 * 50}{P} \right) \quad (5.1)$$

Όπου,

D_0 : δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά

d_1 ή d_0 : κεντρική (μέγιστη) ελαστική υποχώρηση

P : φορτίο κατά τη δοκιμή (kN)

Ο δείκτης SCI προκύπτει από την τιμή της κεντρικής (μέγιστης) ελαστικής υποχώρησης d_1 μείον την τιμή της ελαστικής υποχώρησης σε απόσταση 300 mm από το κέντρο του φορτίου (d_3 , ή d_{300} , λόγω της απόστασης 300 mm του γεωφώνου από το κέντρο του φορτίου), με αναγωγή στο φορτίο αναφοράς των 50 kN από τη σχέση (5.2). Σημειώνεται, ότι ο υπόψη δείκτης αναφέρεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία και ως SCI_{300} .

$$SCI = \frac{(d_1 - d_3) * 50}{P} \quad \left(\text{ή} \quad SCI_{300} = \frac{(d_0 - d_{300}) * 50}{P} \right) \quad (5.2)$$

Όπου,

SCI : δείκτης δομικής κατάστασης των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος

d_1 ή d_0 : κεντρική (μέγιστη) ελαστική υποχώρηση

d_3 ή d_{300} : ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 300 mm από το κέντρο του φορτίου

P : φορτίο κατά τη δοκιμή (kN)

Η διόρθωση / αναγωγή των υπόψη δεικτών στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C έγινε με χρήση κατάλληλων και διεθνώς ευρύτατα χρησιμοποιούμενων συντελεστών (COST-336).

1998), (Van Gurp 1995). Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διόρθωσης TNF (Temperature Normalization Factor) από τη σχέση (5.3).

$$TNF = 1 + \left(a_1 + \frac{a_2}{h_1} \right) * (T_A - 20) + \left(a_3 + \frac{a_4}{h_1} \right) * (T_A - 20)^2 \quad (5.3)$$

Όπου,

TNF: συντελεστής διόρθωσης στη θερμοκρασία αναφοράς (20°C)

T_A: θερμοκρασία στο μέσον του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (°C)

h₁: πάχος ασφαλτικής στρώσης (mm)

α₁-α₄: σταθερές (λαμβάνονται από τον Πίνακα 5.1)

Πίνακας 5.1. Σταθερές για χρήση στους συντελεστές διόρθωσης TNF

Δείκτης	α ₁ (°C ⁻¹)	α ₂ (mm/°C)	α ₃ (0.001°C ⁻¹)	α ₄ (mm/°C)
D ₀	0.01661	-0.67095	0.28612	-0.01408
SCI ₃₀₀	0.05398	-2.61130	1.28439	-0.07493

Η διορθωμένη τιμή του δείκτη D₀ ή SCI στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C προέκυψε με βάση τον αντίστοιχο συντελεστή TNF, από τη σχέση (5.4).

$$D_0(20^\circ C) = \frac{D_0}{TNF(D_0)} \quad \text{και} \quad SCI(20^\circ C) = \frac{SCI}{TNF(SCI)} \quad (5.4)$$

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη που υπολογίστηκαν, στο πλαίσιο της αξιολόγησης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων με χρήση των δεικτών δομικής κατάστασης D₀ και SCI, είναι ο Μέσος Όρος (Μ.Ο.) και η Τυπική Απόκλιση (Τ.Α.). Με βάση αυτά, υπολογίστηκε ο Συντελεστής Μεταβλητότητας (Σ.Μετ.) (Coefficient of Variation: CV), ο οποίος χαρακτηρίζει την ομοιογένεια των πειραματικών τμημάτων από τη σχέση (5.5). Στον Πίνακα 5.2 φαίνεται το επίπεδο ομοιογένειας, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας.

$$\Sigma.Μετ.(%) = \frac{T.A.}{M.O.} * 100 \quad (5.5)$$

Πίνακας 5.2: Επίπεδο ομοιογένειας ανάλογα με το Σ.Μετ. (πηγή: COST-336 1998)

Συντελεστής Μεταβλητότητας	Επίπεδο Ομοιογένειας
Σ.Μετ. < 20%	Καλό
$20\% \leq \Sigma.Μετ. < 30\%$	Μέτριο
$30\% \leq \Sigma.Μετ. < 40\%$	Χαμηλό
$\Sigma.Μετ. \geq 40\%$	Ανομοιογένεια

5.2.2 Δοκιμές σε ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα

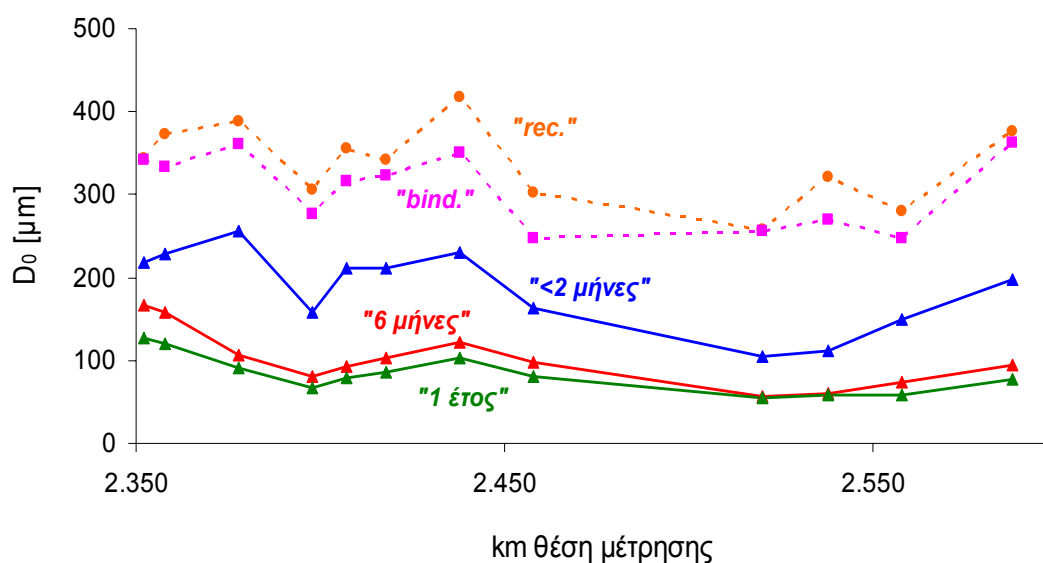
Οι αναλύσεις που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο αφορούν στα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD σε έξι πειραματικά τμήματα κατεργασμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος, όπως φαίνεται στη Φωτογραφία 3.1 του υποκεφαλαίου 3.1. Τα υπόψη τμήματα φέρουν κωδικούς: ΑΚ1 και ΑΚ2 (Αθήνα – Κόρινθος) και ΚΑ1, ΚΑ2, ΚΑ3 και ΚΑ4 (Κόρινθος – Αθήνα). Οι φάσεις των δοκιμών περιγράφονται στον Πίνακα 5.3. Η επιλογή των κωδικών των φάσεων έγινε έτσι ώστε οι δοκιμές κατά τις φάσεις κατασκευής (εφαρμογής της ανακύκλωσης) να έχουν κωδικούς που να είναι αντιπροσωπευτικοί της θέσης (επιφάνειας) εφαρμογής των δοκιμών, όπως φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 4.6. Έτσι, για τις δοκιμές στην επιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης χρησιμοποιήθηκε ο κωδικός “rec.” (recycling), ενώ για τις δοκιμές στην επιφάνεια της ισοπεδωτικής στρώσης χρησιμοποιήθηκε ο κωδικός “bind.” (binder course). Για τις επόμενες φάσεις δοκιμών στην επιφάνεια της αντιολισθηρής στρώσης χρησιμοποιήθηκαν κωδικοί αντιπροσωπευτικοί του χρόνου που παρήλθε από την εφαρμογή της ανακύκλωσης και της φόρτισης του οδοστρώματος.

Πίνακας 5.3: Φάσεις δοκιμών με το FWD σε ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα

Δοκιμή στη στρώση::	Χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση)		Κωδικός / φάση δοκιμών
	Πειρ. τμήματα «ΚΑ.»	Πειρ. τμήματα «ΑΚ».	
Κατεργασμένου υλικού	2 ημέρες	4 ημέρες	“rec.”
Ισοπεδωτική	5 ημέρες	8 ημέρες	“bind.”
Αντιολισθηρή	3 εβδομάδες	6 εβδομάδες	“<2 μήνες”
	6 μήνες	8 μήνες	“6 μήνες”
	12 μήνες	14 μήνες	“1 έτος”
	24 μήνες	26 μήνες	“2 έτη”

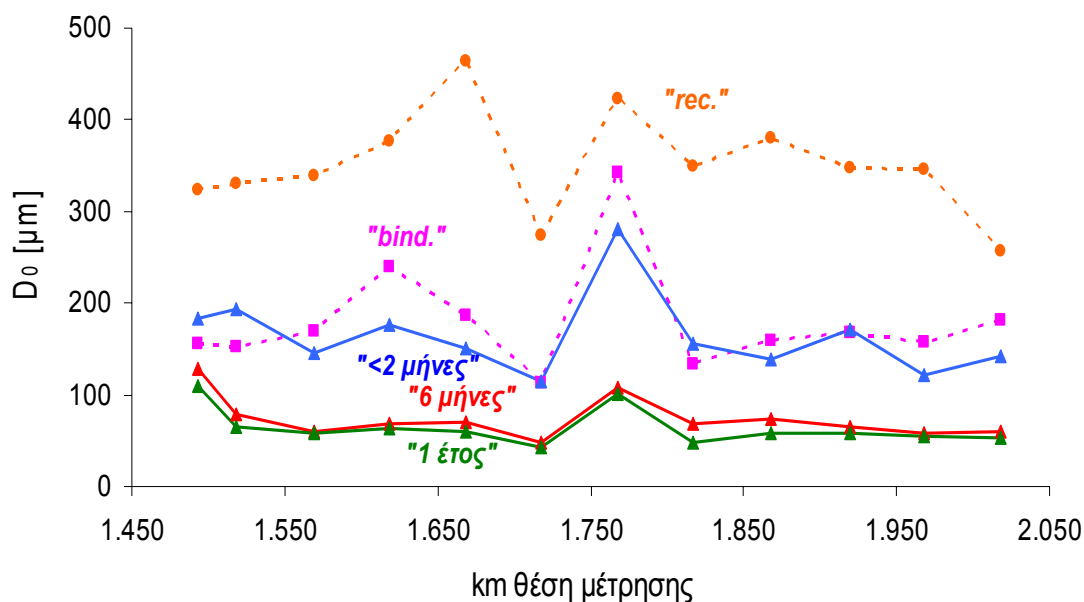
Χαρακτηριστικά διαγράμματα με τα αποτελέσματα του δείκτη δομικής κατάστασης D_0 κατά μήκος του πειραματικού τμήματος (δεξιό ίχνος τροχών) παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.1 και 5.2 για τα πειραματικά τμήματα AK1 και KA2 αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 5.1 και 5.2 διαπιστώνεται μείωση των τιμών του δείκτη D_0 μετά τη διάστρωση της ισοπεδωτικής στρώσης και του αντιολισθηρού τάπητα. Η μείωση των τιμών του δείκτη D_0 αποτελεί σαφή ένδειξη βελτίωσης της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Κατά το στάδιο της κατασκευής, η βελτίωση αυτή προκύπτει αφενός λόγω της διάστρωσης των νέων ασφαλικών στρώσεων και αφετέρου λόγω της αύξησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού (διαδικασία «ωρίμανσης»). Σε ποιο βαθμό όμως κάθε ένας από τους δύο αυτούς παράγοντες συνεισφέρει στη βελτίωση της δομικής κατάστασης και στην αύξηση της δυσκαμψίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί μέσω των δεικτών δομικής κατάστασης. Απαιτείται εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών, υπό τη μορφή του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων, όπως αναφέρεται στις σχετικές αναλύσεις στο υποκεφάλαιο 5.4.3.



Σχήμα 5.1. Δείκτης D_0 (τμήμα AK1)

Υποσημείωση: **1) D_0 :** Δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3)



Σχήμα 5.2. Δείκτης D_0 (τμήμα KA2)

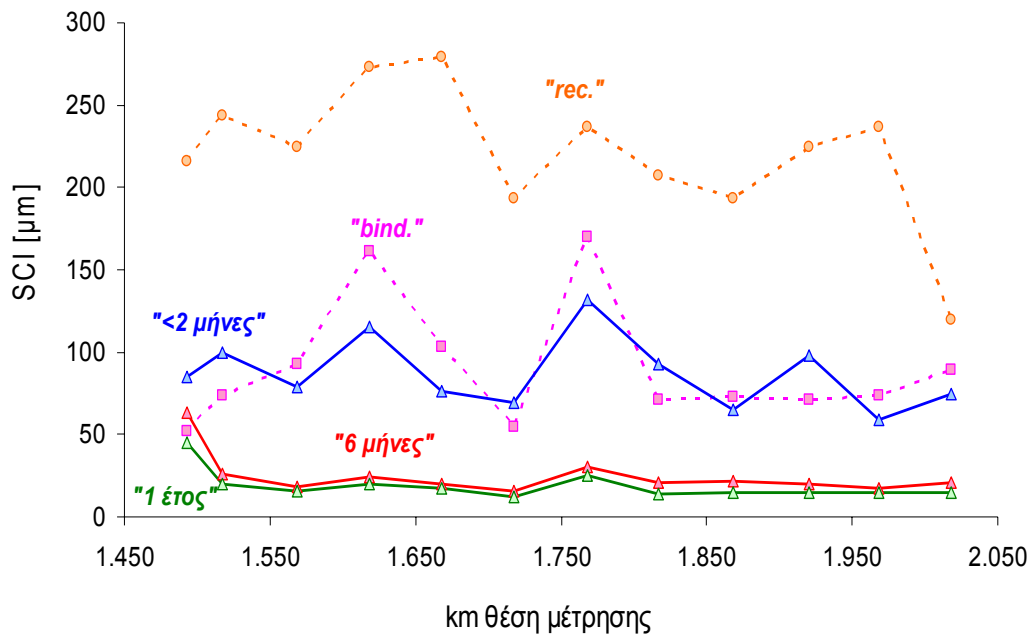
Υποσημείωση: **1) D_0 :** Δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3)

Σημαντική διαπίστωση από τις αναλύσεις είναι, ότι η διάστρωση κάθε ασφαλικής στρώσης επιδρά διαφορετικά στη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, στο πειραματικό τμήμα AK1 (Σχήμα 5.1) η συνεισφορά της ισοπεδωτικής στρώσης στη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος είναι μικρότερη, σε σχέση με τη διάστρωση του αντιολισθηρού τάπητα. Αντίθετη εικόνα παρατηρείται στο πειραματικό τμήμα KA2 (Σχήμα 5.2), όπου η μεγαλύτερη βελτίωση παρατηρήθηκε μετά τη διάστρωση της ισοπεδωτικής στρώσης, ενώ η διάστρωση αντιολισθηρού τάπητα δεν έδειξε ουσιαστική βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Αναλυτικά στοιχεία της ποσοστιαίας μεταβολής του δείκτη D_0 στα πειραματικά τμήματα του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 5.4.

Περαιτέρω μείωση, καθώς και τάση σταθεροποίησης των τιμών του D_0 παρατηρείται μετά από παρέλευση 6 μηνών και ενός έτους μετά την κατασκευή. Αυτό αποτελεί μία πρώτη ένδειξη, ότι 6 μήνες μετά την κατασκευή έχει ολοκληρωθεί σε μεγάλο ποσοστό η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αφορούν στις διαφοροποιήσεις της δομικής κατάστασης κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, όπως αποτυπώνονται με βάση τις διαφοροποιήσεις των τιμών του δείκτη D_0 . Η συνεισφορά των νέων στρώσεων

(κατεργασμένη στρώση και ασφατικές στρώσεις) στην εξέλιξη της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος με τον χρόνο αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα του Σχήματος 5.3. Στο υπόψη διάγραμμα φαίνεται η διαφοροποίηση του δείκτη δομικής κατάστασης των άνω στρώσεων του οδοστρώματος SCI, η οποία παρουσιάζει ίδια εικόνα με αυτή του δείκτη D_0 (Σχήμα 5.2). Από το γεγονός αυτό συμπεραίνεται, ότι η δομική κατάσταση των άνω στρώσεων αντανακλά τη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά (Brunton et al. 1992).



Σχήμα 5.3. Δείκτης SCI (τμήμα KA2)

Υποσημείωση: 1) SCI: Δείκτης δομικής κατάστασης ανώτερων στρώσεων οδοστρώματος. 2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος": Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3)

Οι μέσοι όροι (M.O.) των τιμών των δεικτών D_0 και SCI των πειραματικών τμημάτων φαίνονται στον Πίνακα Π1.1 του Παραρτήματος και παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 5.4 και 5.5. Από την ομοιότητα των δύο διαγραμμάτων προκύπτει το συμπέρασμα, ότι η βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος συνολικά οφείλεται στις άνω στρώσεις του οδοστρώματος (ασφατικές στρώσεις και αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης, λόγω της «ωρίμανσης» του υλικού). Στον Πίνακα 5.4 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του μέσου δείκτη D_0 των πειραματικών τμημάτων σε κάθε φάση δοκιμής. Επίσης, για κάθε πειραματικό τμήμα παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του M.O. του δείκτη D_0 της εκάστοτε φάσης δοκιμής, σε σχέση με την προηγούμενη,

σύμφωνα με τη σχέση (5.6). Στην υπόψη σχέση, η εκάστοτε φάση δοκιμής συμβολίζεται με (i) και η προηγούμενη με (i-1).

$$\Delta D_0(i) = \frac{[D_0(i) - D_0(i-1)] * 100}{D_0(i-1)} \quad (5.6)$$

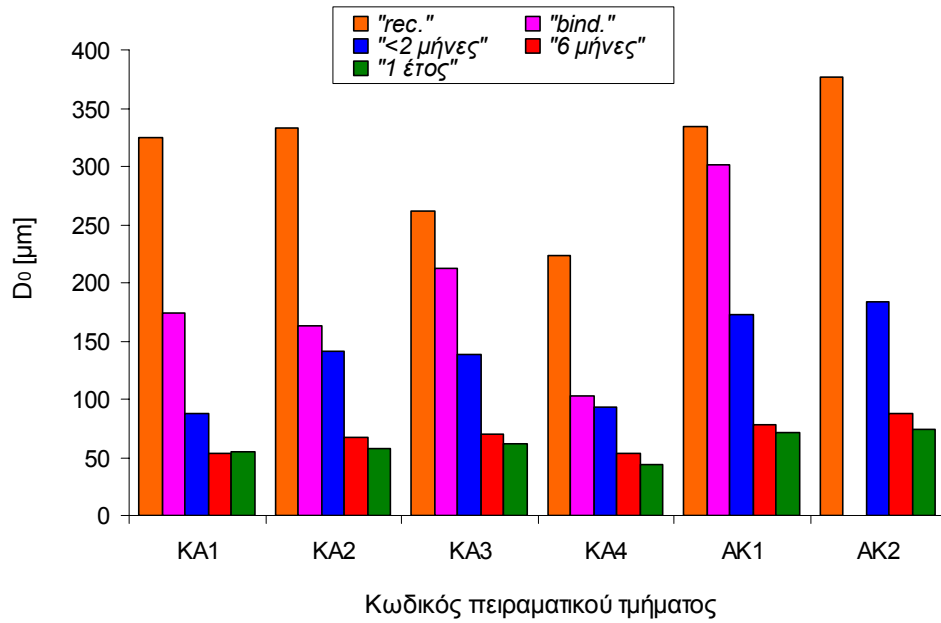
Όπου,

$\Delta D_0(i)$: ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη D_0 κατά τη φάση δοκιμής i

$D_0(i)$: δείκτης D_0 κατά τη φάση δοκιμής i

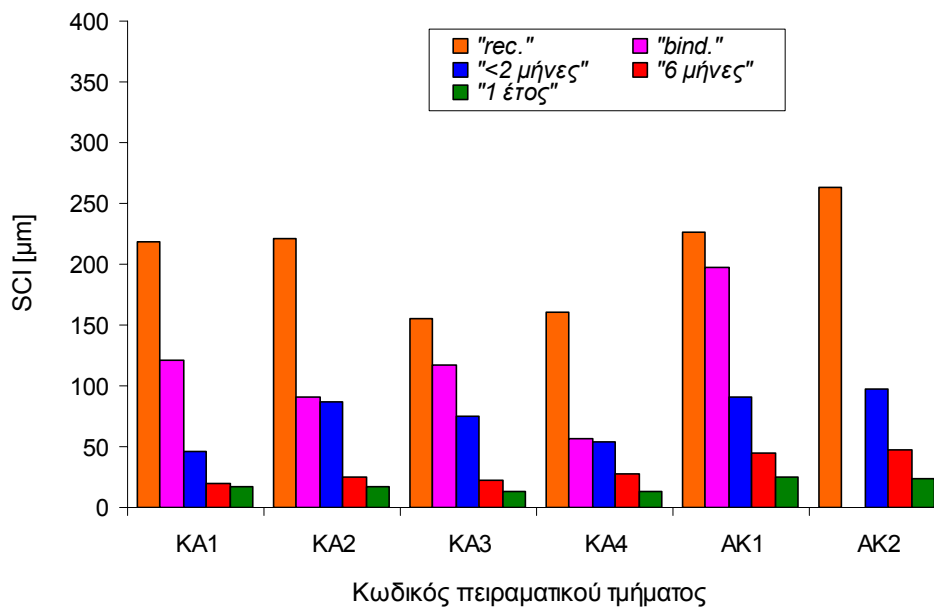
$D_0(i-1)$: δείκτης D_0 κατά την προηγούμενη φάση δοκιμής i-1

Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις (βελτίωση) της δομικής κατάστασης των περισσότερων πειραματικών τμημάτων παρατηρήθηκαν μετά τη διάστρωση της ισοπεδωτικής στρώσης (κωδικός δοκιμής: bind.), σε σχέση με την επιφάνεια του κατεργασμένου υλικού, καθώς και 6-8 μήνες μετά την κατασκευή (κωδικός δοκιμής: 6 μήνες), σε σχέση με τις δοκιμές επάνω στον αντιστοιχισμένο τάπητα <2 μήνες μετά την κατασκευή (ανακύκλωση). Στην πρώτη περίπτωση, στη βελτίωση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνεισφέρει τόσο η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, όσο και η διάστρωση της ισοπεδωτικής στρώσης, σε βαθμό που δεν μπορεί να εκτιμηθεί από τις τιμές των δεικτών δομικής κατάστασης. Στη δεύτερη περίπτωση, επειδή οι μετρήσεις έγιναν επάνω στον αντιστοιχισμένο τάπητα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, η βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος εκτιμάται ότι οφείλεται κατά κύριο λόγο στην «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. Σε κάθε περίπτωση, ασφαλέστερα συμπεράσματα προκύπτουν από τις αναλύσεις για την εκτίμηση των μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των υλικών.



Σχήμα 5.4. Μέσος όρος τιμών δείκτη D_0 πειραματικών τμημάτων

Υποσημείωση: **1) D_0 :** Δείκτης δομικής κατάστασης ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος συνολικά. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3)



Σχήμα 5.5. Μέσος όρος τιμών δείκτη SCI πειραματικών τμημάτων

Υποσημείωση: **1) SCI:** Δείκτης δομικής κατάστασης ανώτερων στρώσεων ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3)

Μέσω της ποσοστιαίας μεταβολής των τιμών του δείκτη D_0 (τιμές ΔD_0 Πίνακα 5.4) επιβεβαιώνονται ποσοτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα παραπάνω διαγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, από τις αρνητικές τιμές της ΔD_0 διαπιστώνεται, ότι η διάστρωση κάθε ασφαλικής στρώσης, σε συνδυασμό με την πρόοδο της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, συμβάλλει στη βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Οι διαφορές όμως στις τιμές της ΔD_0 κατά τις αναλύσεις σε κάθε ένα από τα πειραματικά τμήματα, υποδηλώνουν ότι κάθε στρώση συνεισφέρει σε διαφορετικό βαθμό στην εξέλιξη της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

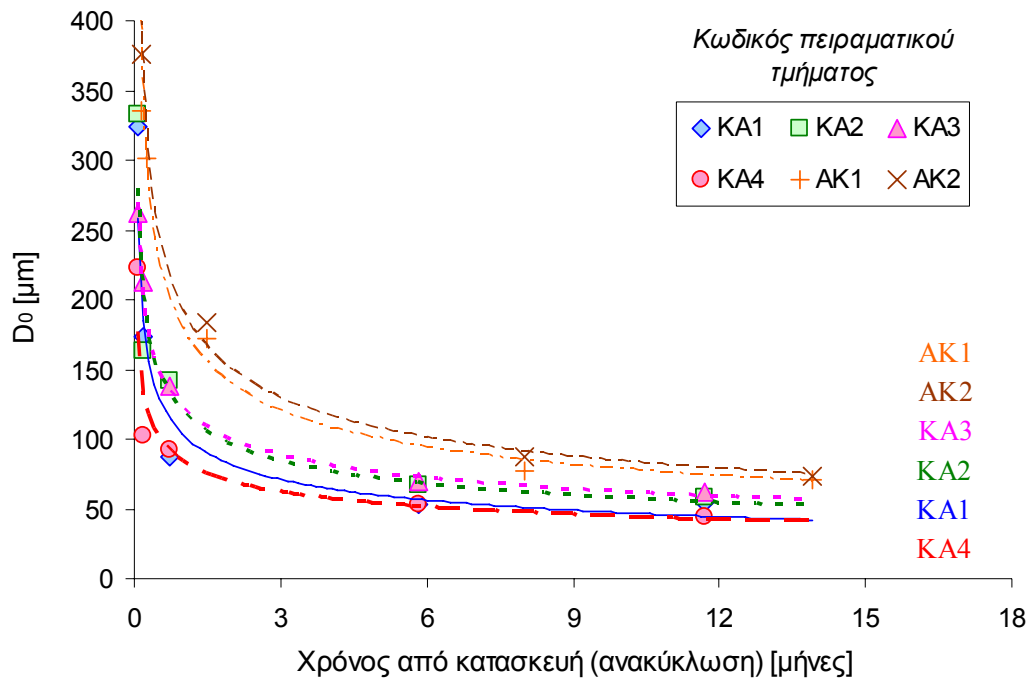
Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του δείκτη D_0 , δίνουν μία πρώτη εκτίμηση των διαφορών που παρουσιάζει η δομική κατάσταση των πειραματικών τμημάτων κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Οι διαφορές αυτές, πέραν της ενδεχόμενης ανομοιομορφίας των πειραματικών τμημάτων, εκτιμάται ότι οφείλονται σε κάποιες χρονικές διαφοροποιήσεις μεταξύ της ανακύκλωσης και της δοκιμής (διαφορετικό στάδιο «ωρίμανσης»), καθώς και στον διαφορετικό ρυθμό εξέλιξης της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού.

Πίνακας 5.4: Στοιχεία αναλύσεων δείκτη D_0 σε ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα)

Κωδικός / φάση δοκιμών (*)	Μέσος όρος (Μ.Ο.) δείκτη D_0 [μm]		Μεταβολή Μ.Ο. τιμών D_0 , σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή (ΔD_0) [%]					
			Κωδικός πειραματικού τμήματος (**)					
	max	min	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2
<i>rec.</i>	376.4	222.7						
<i>bind.</i>	307.3	104.7	-41.6	-50.3	-16.5	-53.0	-9.3	
<2 μήνες	191.4	97.4	-46.9	-6.9	-28.6	-7.0	-39.2	
6 μήνες	101.1	56.3	-44.0	-57.7	-52.1	-37.3	-45.9	-47.8
1 έτος	83.7	44.5	-3.9	-11.4	-17.7	-27.1	-17.4	-30.1

Υποσημείωση: **1) (*)** Πίνακας 5.3, Σχήμα 4.6. **2) (**)** Αρχή παρόντος υποκεφαλαίου (5.2.2)

Η εξέλιξη χρονικά του μέσου όρου (Μ.Ο.) των τιμών του δείκτη D_0 των πειραματικών τμημάτων παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 5.6, όπου φαίνεται και η κατάταξη των πειραματικών τμημάτων. Το τμήμα AK2 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μέσες τιμές D_0 (λιγότερο δύσκαμπτο), ενώ το τμήμα KA4 παρουσιάζει τις μικρότερες μέσες τιμές D_0 (περισσότερο δύσκαμπτο).



Σχήμα 5.6. Εξέλιξη του μέσου όρου των τιμών του δείκτη D_0 κατά το πρώτο έτος

Η καλύτερη συσχέτιση του Μ.Ο. των τιμών του δείκτη D_0 με τον χρόνο από την κατασκευή (μήνες) είναι καμπύλη εκθετικής μορφής. Οι συντελεστές α_1 και β_1 της σχέσης (5.6), που προέκυψαν για κάθε πειραματικό τμήμα παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.1 του Παραρτήματος.

$$D_0 = \alpha_1 * t^{\beta_1} \quad (5.6)$$

Όπου,

D_0 δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά (μm)

t : χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

α_1, β_1 : συντελεστές (Πίνακας Π2.1 του Παραρτήματος)

Η καμπύλη που αντιστοιχεί στον μέσο όρο (Μ.Ο.) των τιμών όλων των ανακυκλωμένων ημιακάμπτων οδοστρώματων των πειραματικών τμημάτων με κωδικό ΚΑ, δίδεται από τη σχέση (5.7). Η σχέση αυτή αποτελεί ενδεικτική στατιστική συσχέτιση αντιπροσωπευτική για

τα συγκεκριμένα πειραματικά τμήματα, δεδομένου ότι προέκυψε μετά από συστηματικές επιτόπου δοκιμές και αναλύσεις. Θεωρείται ως ικανοποιητική, προκειμένου να απεικονίσει την τάση της μεταβολής των τιμών του Μ.Ο. του δείκτη D_0 και κατ' επέκταση την εξέλιξη της δομικής συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του.

$$D_0 = 112.39 * t^{-0.3062} \quad (R^2 = 0.98) \quad (5.7)$$

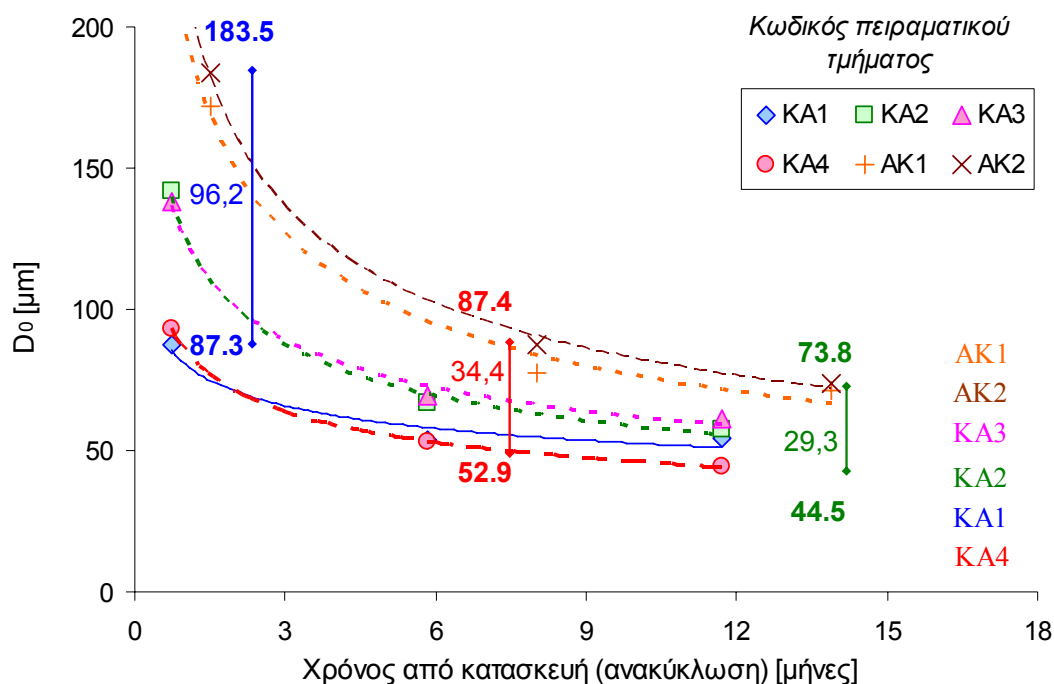
Όπου,

D_0 δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά (μm)

t : χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

Από το Σχήμα 5.6 και τη σχέση (5.7), στην οποία ο εκθέτης έχει χαμηλή τιμή (της τάξης του 0.3), διαπιστώνεται ότι οι τιμές του δείκτη D_0 παρουσιάζουν τάση σταθεροποίησης. Κατόπιν τούτου εκτιμάται, ότι κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του οδοστρώματος, έχει ολοκληρωθεί η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της δομικής του κατάστασης.

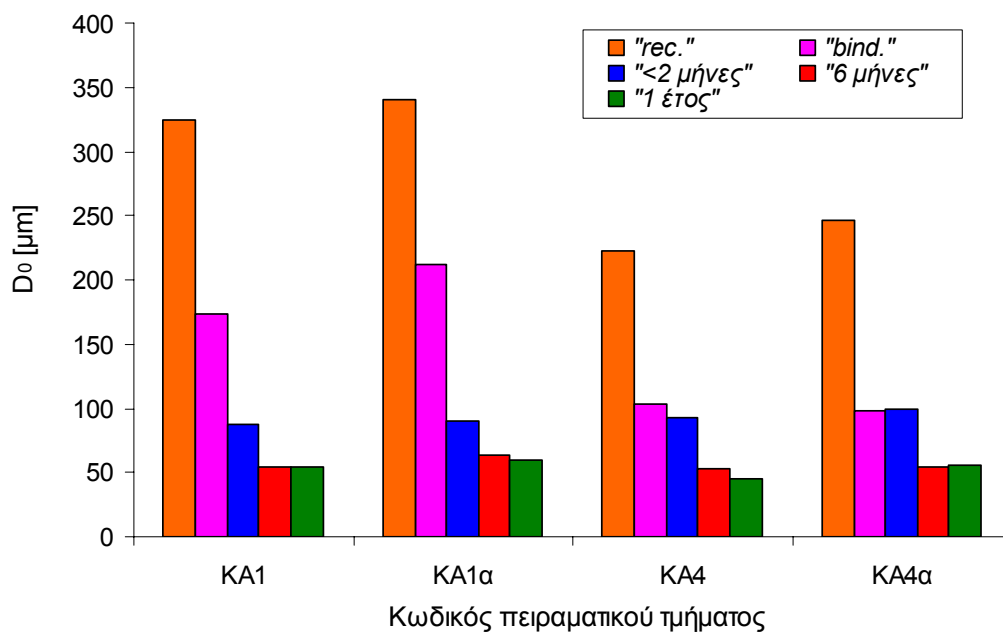
Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη του Μ.Ο. του δείκτη D_0 με τον χρόνο μετά τη διάστρωση του αντιστοιχισθηρού τάπητα, καθώς και οι διαφορές της μέγιστης με την ελάχιστη μέση τιμή των πειραματικών τμημάτων κατά τα διάφορα στάδια των δοκιμών. Μετά τη διάστρωση του αντιστοιχισθηρού τάπητα, εκτός από την τάση σταθεροποίησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, παρατηρείται και μείωση των διαφορών των Μ.Ο. των δεικτών D_0 των πειραματικών τμημάτων με τον χρόνο. Η τελική διαφορά (29.3 μm) ένα έτος περίπου μετά την κατασκευή, εκτιμάται ότι οφείλεται κυρίως σε διαφορές ως προς τη δυσκαμψία των στρώσεων των πειραματικών τμημάτων. Οι διαφορές κατά τα προηγούμενα στάδια των δοκιμών εκτιμάται ότι οφείλονται ως επί το πλείστον στη διαφορετική εξέλιξη της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού.



Σχήμα 5.7. Εξέλιξη μέσου όρου τιμών D_0 μετά τη διάστρωση του αντιολισθηρού τάπητα

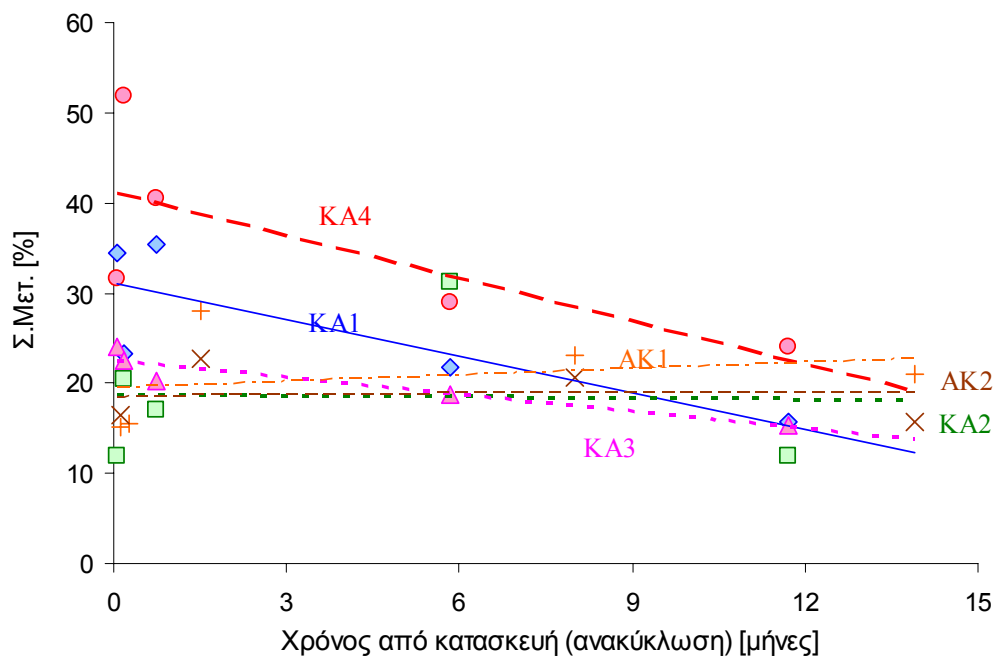
Οι δοκιμές σε θέσεις ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών σε δύο πειραματικά τμήματα ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος έδωσαν αυξημένες τιμές του μέσου όρου (Μ.Ο.) του δείκτη D_0 (κατά 13%), σε σχέση με το δεξιό ίχνη τροχών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Πίνακας Π1.1) και γραφικά στο Σχήμα 5.8 (με ένδειξη «α» στον κωδικό του πειραματικού τμήματος οι δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών). Για να διερευνηθεί εάν οι Μ.Ο. του δείκτη D_0 στο δεξιό ίχνη τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης, με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι οι Μ.Ο. του δείκτη D_0 στο δεξιό ίχνη τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π1.2 Παραρτήματος).

Οι τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας (Σ.Μετ.) του δείκτη D_0 παρουσιάζεται στον Πίνακα Π1.5 του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.9. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσιάστηκε χαμηλό έως μέτριο επίπεδο ομοιογένειας (υποκεφάλαιο 5.2.1, Πίνακας 5.2) Βελτίωση της ομοιογένειας με τον χρόνο παρουσιάστηκε σε πειραματικά τμήματα με αρχικά υψηλές τιμές Σ.Μετ (>30%). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τάση σταθεροποίησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού (περίπου ένα έτος μετά την εφαρμογή της ανακύκλωσης).



Σχήμα 5.8. Μ.Ο. δείκτη D_0 στο δεξιό ίχνος τροχών & ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: **1) D_0 :** Δείκτης δομικής κατάστασης ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος συνολικά. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (από Πίνακα 5.3). **3) KA1, KA4:** Δοκιμές FWD στο δεξιό ίχνος τροχών. **4) KA1α, KA4α:** Δοκιμές FWD ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών



Σχήμα 5.9. Εξέλιξη συντελεστή μεταβλητότητας δείκτη D_0

5.2.3 Δοκιμές σε ανακυκλωμένα εύκαμπτα οδοστρώματα

Οι αναλύσεις που περιγράφονται παρακάτω αφορούν στα αποτελέσματα επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD σε πειραματικά τμήματα ανακυκλωμένου εύκαμπτου οδοστρώματος, όπως φαίνεται στη Φωτογραφία 3.1 του υποκεφαλαίου 3.1. Τα υπόψη τμήματα φέρουν τους κωδικούς: ΛΑ1, ΛΑ2 και ΛΑ3 (Λαμία – Αθήνα). Οι φάσεις των δοκιμών περιγράφονται στον Πίνακα 5.5. Η επιλογή των κωδικών των φάσεων έγινε έτσι, ώστε οι δοκιμές κατά τις φάσεις κατασκευής (εφαρμογής της ανακύκλωσης), να έχουν κωδικούς που να είναι αντιπροσωπευτικοί της θέσης (επιφάνειας) εφαρμογής των δοκιμών, όπως φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 4.6. Έτσι, για τις δοκιμές στην επιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης χρησιμοποιήθηκε ο κωδικός “rec.” (recycling), ενώ για τις δοκιμές στην επιφάνεια της ισοπεδωτικής στρώσης χρησιμοποιήθηκε ο κωδικός “bind.” (binder course). Για τις επόμενες φάσεις δοκιμών στην επιφάνεια της αντιολισθηρής στρώσης χρησιμοποιήθηκαν κωδικοί αντιπροσωπευτικοί του χρόνου που παρήλθε από την εφαρμογή της ανακύκλωσης και της φόρτισης του οδοστρώματος.

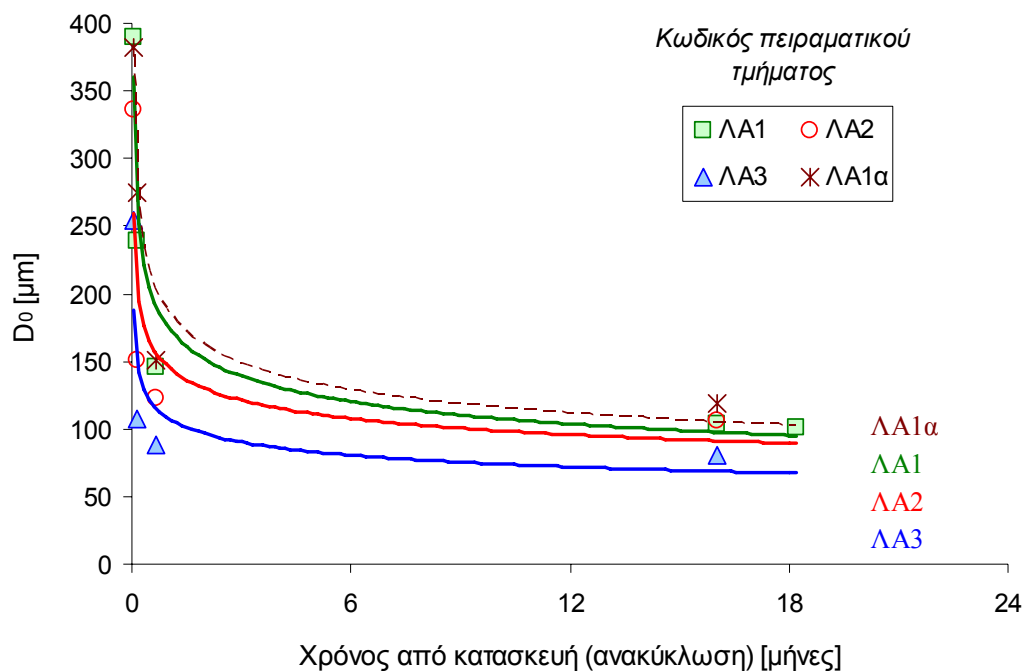
Πίνακας 5.5: Φάσεις δοκιμών με το FWD σε ανακυκλωμένα εύκαμπτα οδοστρώματα

Δοκιμή στη στρώση:	Χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση)	Κωδικός / φάση δοκιμών
Κατεργασμένου υλικού	2 ημέρες	“rec.”
Ισοπεδωτική	5 ημέρες	“bind.”
Αντιολισθηρή	3 εβδομάδες	“<2 μήνες”
	16 μήνες	“16 μήνες”
	18 μήνες	“18 μήνες”

Οι δοκιμές έγιναν στο δεξιό ίχνος τροχών σε όλα τα πειραματικά τμήματα και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών στο πρώτο πειραματικό τμήμα (κωδικός ΛΑ1α). Οι τιμές του μέσου όρου (Μ.Ο.) του δείκτη D_0 των πειραματικών τμημάτων φαίνονται στον Πίνακα Π1.3 του Παραρτήματος. Η εξέλιξη χρονικά του Μ.Ο. του δείκτη D_0 των πειραματικών τμημάτων παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 5.10, όπου φαίνεται και η κατάταξη των πειραματικών τμημάτων. Το τμήμα ΛΑ1α (ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών) παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μέσες τιμές (λιγότερο δύσκαμπτο), ενώ το τμήμα ΛΑ3 παρουσιάζει τις μικρότερες μέσες τιμές (περισσότερο δύσκαμπτο).

Οι συντελεστές α_1 και β_1 της σχέσης (5.6), που προέκυψαν για κάθε πειραματικό τμήμα παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.1 του Παραρτήματος. Ο συντελεστής β_1 (εκθέτης)

κυμάνθηκε από -0.16 έως -0.21, παρουσιάζοντας χαμηλότερες απόλυτες τιμές, σε σχέση με τα ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Η ποσοστιαία διαφοροποίηση (μείωση) των τιμών του δείκτη D_0 φαίνεται στον Πίνακα 5.6. Διαπιστώνεται, ότι σε σχέση με τις δοκιμές στον αντιστοιχισμένο τύπο <2 μήνες από την κατασκευή, η ποσοστιαία μείωση του δείκτη D_0 16 μήνες μετά την κατασκευή είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη μείωση που παρουσιάστηκε 6-8 μήνες μετά την κατασκευή στα ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Τα δύο αυτά στοιχεία αποτελούν ένδειξη, ότι η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού του ευκάμπτου οδοστρώματος ολοκληρώθηκε σε συντομότερο χρονικό διάστημα, σε σχέση με τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.



Σχήμα 5.10. Εξέλιξη μέσου όρου τιμών του δείκτη D_0

Υποσημείωση: **1) D_0 :** Δείκτης δομικής κατάστασης ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος συνολικά. **2) ΛΑ1, ΛΑ2, ΛΑ3:** Δοκιμές FWD στο δεξιό ίχνος, **ΛΑ1α:** Δοκιμές FWD ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

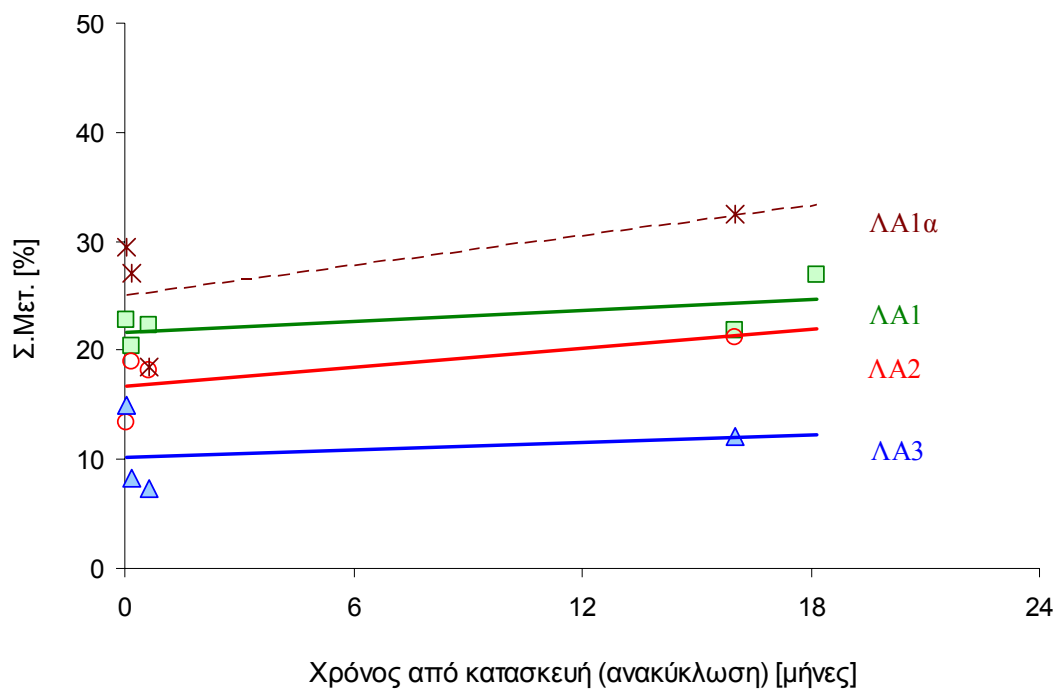
Πίνακας 5.6: Στοιχεία αναλύσεων δείκτη D_0 σε ανακυκλωμένα εύκαμπτα οδοστρώματα

Κωδικός / φάση δοκιμών (*)	Διαφορά Μ.Ο. D_0 σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή (%)			
	Κωδικός πειραματικού τμήματος (**)			
	ΛΑ1	ΛΑ2	ΛΑ3	ΛΑ1α
<i>rec.</i>				
<i>bind.</i>	-38.9	-55.3	-57.8	-28.1
<2 μήνες	-39.1	-18.6	-18.0	-45.3
16 μήνες	-28.3	-13.4	-7.7	-21.1
18 μήνες	-2.9			

Υποσημείωση: **1) (*)** Πίνακας 5.5, Σχήμα 4.6. **2) (**)** Αρχή παρόντος υποκεφαλαίου (5.2.3)

Οι δοκιμές σε θέσεις ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών στο πειραματικό τμήμα ΛΑ1α, έδωσαν γενικά αυξημένες τιμές του μέσου όρου (Μ.Ο.) του D_0 , σε σχέση με το δεξιό ίχνος τροχών (Σχήμα 5.10 και Πίνακας Π1.3 Παραρτήματος). Για να διερευνηθεί εάν οι Μ.Ο. των τιμών του δείκτη D_0 στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης, με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι οι Μ.Ο. των τιμών του δείκτη D_0 στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π1.4 Παραρτήματος). Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντίστοιχα με τα ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Οι τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας του δείκτη D_0 φαίνονται στον Πίνακα Π1.6 του Παραρτήματος. Η εξέλιξη του συντελεστή μεταβλητότητας με τον χρόνο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11. Τα πειραματικά τμήματα παρουσίασαν γενικά καλό έως μέτριο επίπεδο ομοιογένειας (υποκεφάλαιο 5.2.1, Πίνακας 5.2), χωρίς να παρατηρηθεί βελτίωση μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.



Σχήμα 5.11. Εξέλιξη συντελεστή μεταβλητότητας δείκτη D_0

5.2.4 Επιμέρους συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD σε πειραματικά τμήματα ανακυκλωμένου οδοστρώματος κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας τους με χρήση των δεικτών έκφρασης δομικής κατάστασης, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Η δομική κατάσταση των άνω στρώσεων (ασφαλτικές στρώσεις και κατεργασμένη στρώση) αντανακλά τη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά. Κατά συνέπεια, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος κατά τα διάφορα στάδια των δοκιμών αποδίδονται στην εξέλιξη της δομικής κατάστασης της κατεργασμένης στρώσης και των νέων ασφαλτικών στρώσεων.
- Η μείωση των τιμών των δεικτών αποτελεί σαφή ένδειξη βελτίωσης της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Κατά το στάδιο της κατασκευής η βελτίωση αυτή προκύπτει αφενός λόγω της διάστρωσης των νέων ασφαλτικών στρώσεων και αφετέρου λόγω της αύξησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (διαδικασία «ωρίμανσης») του κατεργασμένου υλικού. Ο βαθμός όμως συνεισφοράς κάθε

ενός από τους δύο αυτούς παράγοντες δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί μέσω των δεικτών δομικής κατάστασης.

- Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις (βελτιώσεις) της δομικής κατάστασης των περισσότερων πειραματικών τμημάτων παρατηρήθηκαν μετά τη διάστρωση της ασφατικής επίστρωσης υπό μορφή ισοπεδωτικής στρώσης. Κατά το στάδιο αυτό, στη βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος συνεισφέρει τόσο η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, όσο και η διαστρωθείσα ισοπεδωτική στρώση.
- Σε αρκετές περιπτώσεις, μεγάλες διαφοροποιήσεις (βελτιώσεις) της δομικής κατάστασης των πειραματικών τμημάτων παρατηρήθηκαν 6 - 8 μήνες μετά την κατασκευή, σε σχέση με τις δοκιμές επάνω στον αντιολισθηρό τάπητα <2 μήνες μετά την απόδοση των οδοστρώματων στην κυκλοφορία. Στη περίπτωση αυτή, η βελτίωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος εκτιμάται ότι οφείλεται κατά κύριο λόγο στην «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.
- Οι δοκιμές στη λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών έδειξαν λιγότερο δύσκαμπτο οδόστρωμα, σε σχέση με τις αντίστοιχες στο δεξιό ίχνος τροχών. Αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην περαιτέρω συμπύκνωση των στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος από την κυκλοφορία. Σύμφωνα πάντως με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων, οι μέσοι δείκτες επί του δεξιού ίχνους τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Το θέμα αυτό επανεξετάζεται παρακάτω, μέσω των αναλύσεων των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών, που παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 5.4.3.

Το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε από τις υπόψη αναλύσεις είναι, ότι κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του οδοστρώματος έχει ολοκληρωθεί η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.

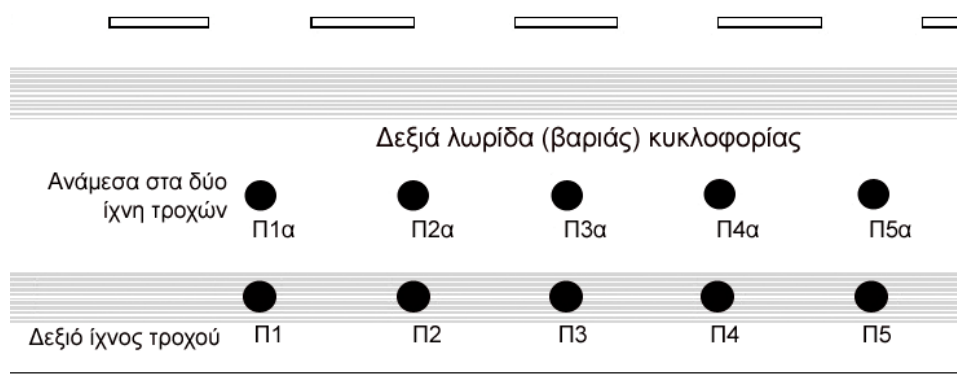
5.3. Ανάλυση συμπεριφοράς με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών

5.3.1 Γενικά

Στο παρόν υποκεφάλαιο αναφέρονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια και πυρήνες.

Μέσω των εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια προέκυψαν αλγόριθμοι διόρθωσης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς.

Αποκοπή πυρήνων σε όλο το πάχος της κατεργασμένης στρώσης κατέστη δυνατή 6 μήνες μετά την κατασκευή. Οι πυρήνες έδωσαν πληροφορίες για τα πάχη των ασφαλικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης. Συστηματική πυρηνοληψία κατά τα διάφορα στάδια των δοκιμών έγινε σε δύο πειραματικά τμήματα: σε ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο (KA1) και σε εύκαμπτο (ΛΑ1) οδόστρωμα, στα σημεία εκτέλεσης δοκιμών με το σύστημα FWD, τόσο στο δεξιό ίχνος τροχών, όσο και ανάμεσα στα δύο ίχνη (Σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12. Θέσεις πυρηνοληψίας

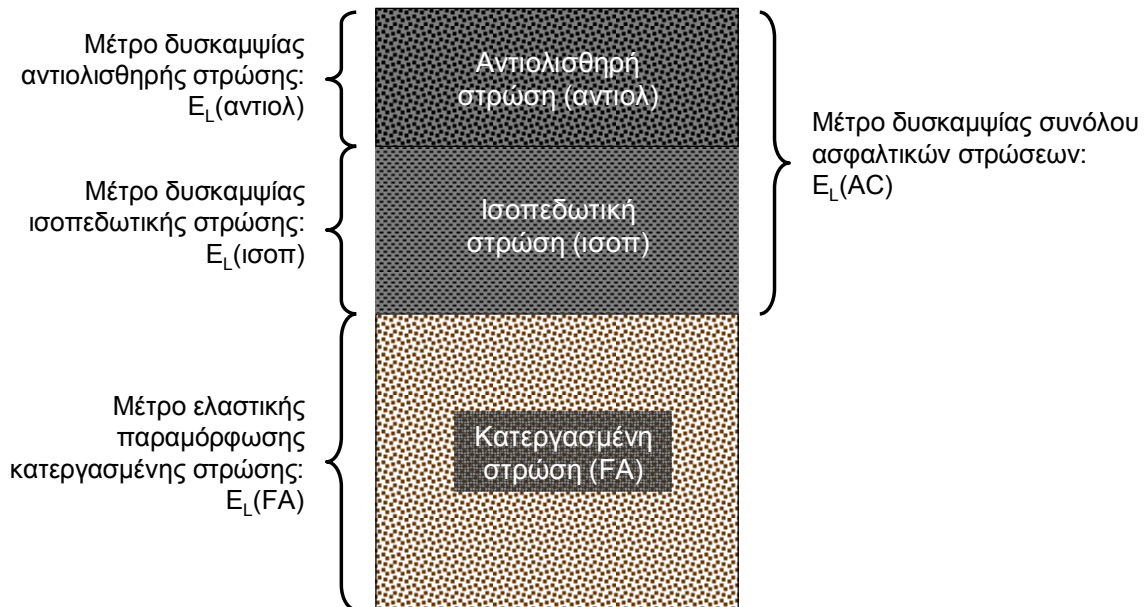
Παρακάτω παρουσιάζονται οι συμβολισμοί των μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων, οι οποίοι φαίνονται επίσης γραφικά στο Σχήμα 5.13. Πρέπει να σημειωθεί, ότι κατά την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών σε πυρήνες ασφαλικών στρώσεων, υπολογίστηκε ξεχωριστά το μέτρο δυσκαμψίας της ισοπεδωτικής και της αντιστοιχιστικής στρώσης, λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στο πάχος της προς έλεγχο ασφαλικής στρώσης. Ως εκ τούτου, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων προκύπτει ως σύνθεση των εργαστηριακά εκτιμηθέντων μέτρων δυσκαμψίας των υπόψη στρώσεων. Για να μη γίνεται σύγχυση με το σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης που αναφέρεται στο επόμενο υποκεφάλαιο 5.4, στο συμβολισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων δεν περιλαμβάνεται τμήμα του όρου «composite».

$E_L(FA)$: μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (εργαστηριακές δοκιμές)

$E_L(ισοπ)$: μέτρο δυσκαμψίας ισοπεδωτικής στρώσης (εργαστηριακές δοκιμές)

$E_L(\text{αντιολ})$: μέτρο δυσκαμψίας αντιολισθηρής στρώσης (εργαστηριακές δοκιμές)

$E_L(\text{AC})$: μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων (προκύπτει ως σύνθεση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών της ισοπεδωτικής και της αντιολισθηρής στρώσης)



Σχήμα 5.13. Μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης

5.3.2 Ευαισθησία κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία

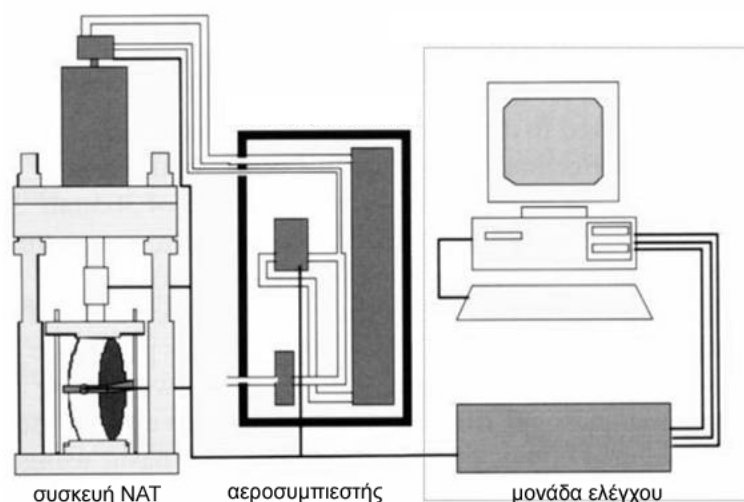
Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης των κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο υλικών, κατ' αντιστοιχία με τα ιξωδο-ελαστικά υλικά ασφαλτομιγμάτων, εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Όπως προέκυψε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τα κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο υλικά μπορεί να παρουσιάζουν τιμές μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης, αντίστοιχες με τα συνήθη ασφαλτομίγματα, με μικρότερη όμως ευαισθησία στη θερμοκρασία (Nataatmadja 2002). Επιπλέον, σύμφωνα με την πηγή (Muthen 1998), το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο υλικών παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές από τα συνήθη ασφαλτομίγματα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C..

Η μικρότερη ευαισθησία του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης των κατεργασμένων υλικών στις μεταβολές της θερμοκρασίας, σε σχέση με τα συνήθη ασφαλτομίγματα, εκτιμάται ότι οφείλεται στο μικρότερο ποσοστό ασφάλτου των κατεργασμένων υλικών. Η μερική μόνο κάλυψη των χονδρόκοκκων αδρανών με ασφαλτικό συνδετικό έχει ως αποτέλεσμα τη

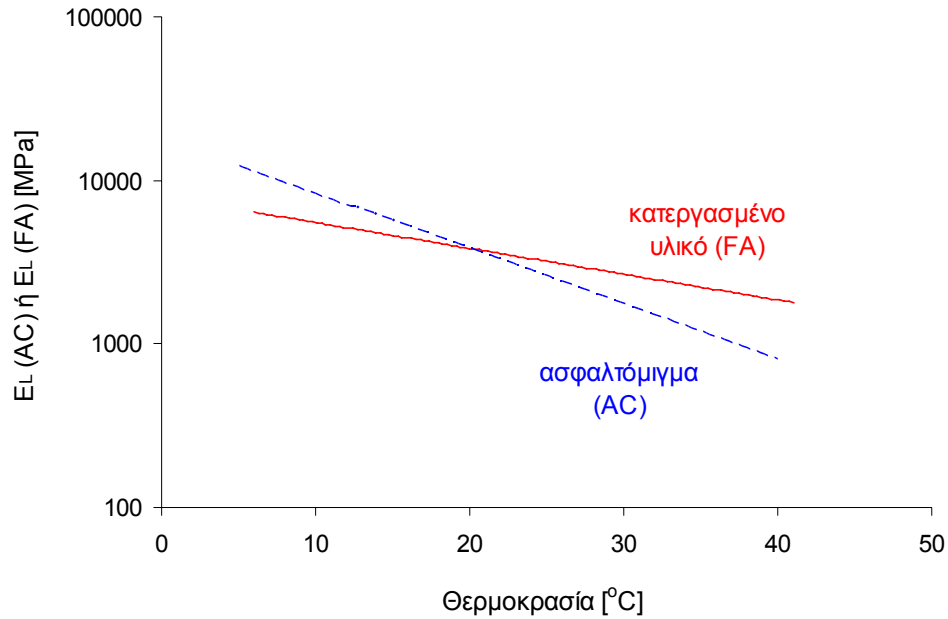
μικρότερη «ευαισθησία» του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Αντίθετα, στα συνήθη ασφαλτομίγματα τα χονδρόκοκκα αδρανή είναι πλήρως καλυμμένα με άσφαλτο, με συνέπεια το ασφαλτόμγμα να είναι περισσότερο «ευαίσθητο» στη μεταβολή του ιξώδους του ασφαλτικού συνδετικού με τη θερμοκρασία.

Για την εκτίμηση της επιρροής της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού έγιναν εργαστηριακές δοκιμές, για υπολογισμό του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) του υλικού σε θερμοκρασίες 6°C, 22°C και 36°C. Οι δοκιμές έγιναν στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης με τη συσκευή NAT (Σχήμα 5.14) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm.

Οι μέσες τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15, όπου για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται επίσης αντίστοιχα αποτελέσματα σε συμβατικό ασφαλτόμγμα κλειστού τύπου (Loizos & Papavasiliou 2007). Διαπιστώνεται, ότι το κατεργασμένο υλικό παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στη θερμοκρασία και μεγαλύτερες τιμές σε υψηλότερες θερμοκρασίες, σε σχέση με κλειστού τύπου ασφαλτομίγματα, επιβεβαιώνοντας αντίστοιχα συμπεράσματα που αναφέρονται στις πηγές (Ramanujam & Fernando 1997), (Nataatmadja 2002). Επιπλέον, η μέση τιμή στη θερμοκρασία 22°C ήταν περίπου 3800 MPa, αρκετά μεγαλύτερη από την αναφερόμενη (2500 MPa) στην πηγή (Muthen 1998).



Σχήμα 5.14. Σύστημα εκτέλεσης δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού με τη συσκευή NAT



Σχήμα 5.15. Σχέση μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης ως προς θερμοκρασία δοκιμής

Υποσημείωση: **1) $E_L (FA)$:** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού (εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια). **2) $E_L (AC)$:** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου (εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια)

Με βάση τα αποτελέσματα των υπόψη δοκιμών, που παρουσιάζονται στον Πίνακα Π3.1 του Παραρτήματος, αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι διόρθωσης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς, αντίστοιχοι των οποίων αναφέρονται στις πηγές (Nunn & Thom 2002), (Fu & Harvey 2007). Στο Παράρτημα Π3 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των συντελεστών A και a των σχέσεων (5.8) και (5.9).

$$E_L (FA) (20^{\circ} C) = E_L (FA) (T) * A^{(T-20)} \quad (5.8)$$

$$E_L (FA) (T_0) = E_L (FA) (T) * 10^{a*(T-T_0)} \quad (5.9)$$

Όπου,

$E_L (FA) (20^{\circ} C)$: μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς $20^{\circ} C$ (MPa)

$E_L (FA) (T_0)$:	μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς (MPa)
$E_L (FA) (T)$:	μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία δοκιμής (MPa)
T_0 :	θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}\text{C}$)
T :	θερμοκρασία δοκιμής ($^{\circ}\text{C}$)
A, α :	συντελεστές ($A = 1.035$ έως 1.037 , $\alpha = 0.0158$)

Από τη σχέση (5.9), για θερμοκρασία αναφοράς $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ προκύπτει η σχέση (5.8) με συντελεστή $A = 1.037$. Τα αποτελέσματα διόρθωσης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασίας αναφοράς 20°C με χρήση της τιμής $A = 1.037$ από τη σχέση (5.9), συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν με χρήση του συντελεστή $A = 1.035$ στη σχέση (5.8). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων, οι μέσες τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π3.5 Παραρτήματος).

5.3.3 Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες

5.3.3.1 Κατεργασμένο υλικό

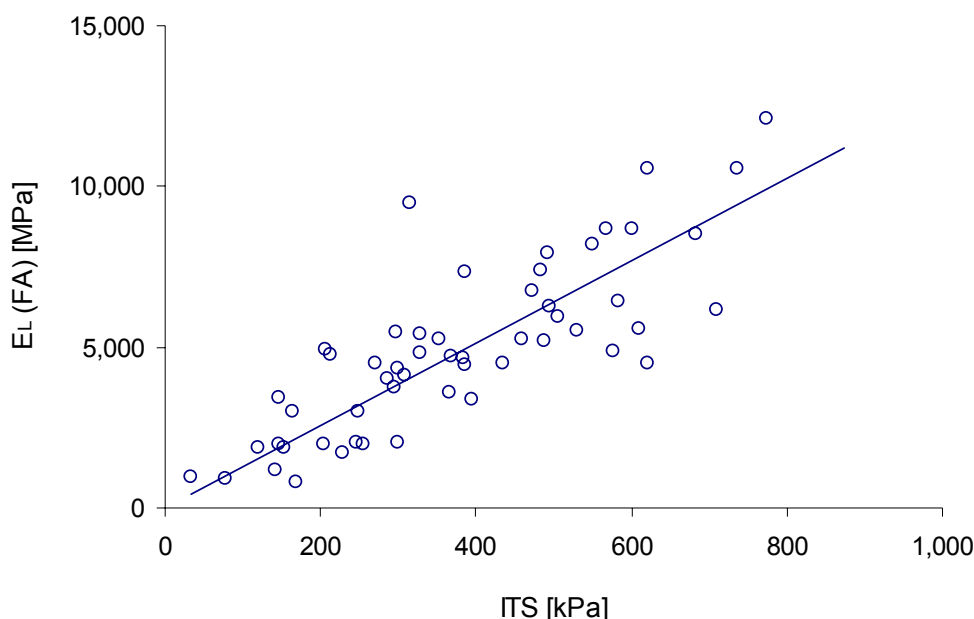
Από το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα αποκόπηκαν πυρήνες από τη στρώση κατεργασμένου υλικού. Οι πυρήνες κόπηκαν στην κατάλληλη διάσταση και εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε θερμοκρασία εργαστηρίου ($22-25^{\circ}\text{C}$), για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS). Τα αποτελέσματα για κάθε φάση πυρηνοληψίας (6 μήνες, 1 έτος και 2 έτη μετά την κατασκευή) παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.1 του Παραρτήματος. Η γραμμική συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο δοκιμών για κάθε φάση πυρηνοληψίας φαίνεται γραφικά στο Σχήμα Π4.1 του Παραρτήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των δοκιμών όλων των πυρήνων (Σχήμα 5.15), προέκυψε η σχέση (5.10).

$$E_L (FA) = 12.86 * ITS \quad \left(R^2 = 0.65 \right) \quad (5.10)$$

Όπου,

E_L (FA): μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού (MPa)

ITS: αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (kPa) κατεργασμένου υλικού



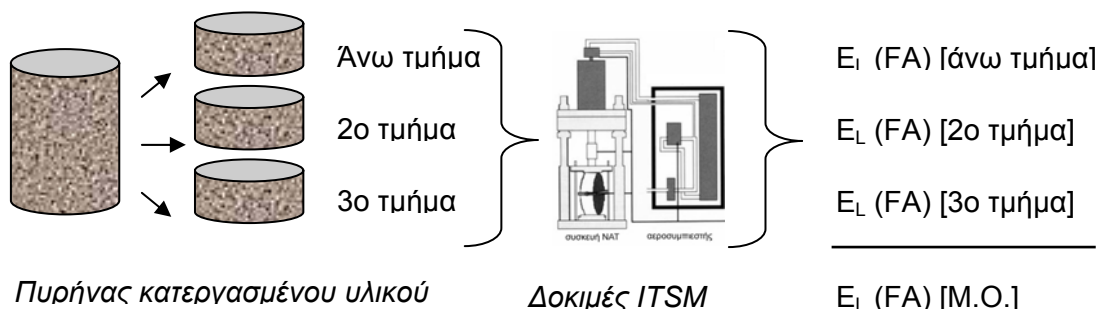
Σχήμα 5.16. Συσχέτιση τιμών E_L (FA) με αποτελέσματα ITS

Υποσημείωση: 1) E_L (FA): Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού (εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες). **2) ITS:** Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες)

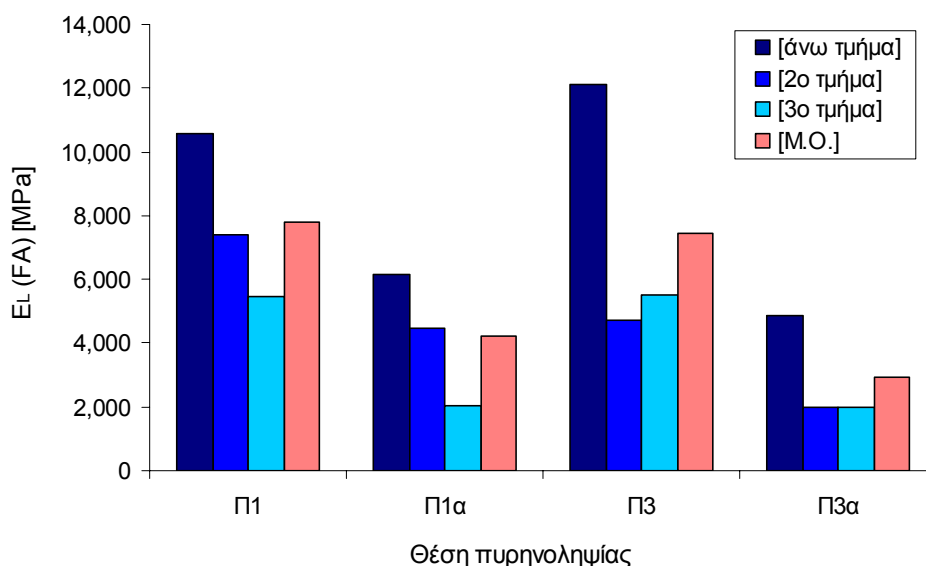
Δεδομένου ότι ο λόγος E_L (FA) / ITS έλαβε τιμές από 4.8 έως 30.1, εκτιμάται ότι η σχέση (5.10) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για ενδεικτική μετατροπή των αποτελεσμάτων της μίας δοκιμής στην άλλη.

Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού E_L (FA) εκτιμήθηκε από εργαστηριακές δοκιμές ITSM (σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο υποκεφάλαιο 2.8.5) σε πυρήνες, οι οποίοι κόπηκαν σε 3 ή 4 τμήματα. Η διαδικασία παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 5.17. Τα αποτελέσματα των υπόψη δοκιμών σε τέσσερις θέσεις (δύο στο δεξιό ίχνος τροχών: Π1 & Π3 και δύο ανάμεσα στα ίχνη τροχών: Π1α & Π3α) παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.2 του Παραρτήματος και γραφικά στα Σχήματα 5.18α, 5.18β και 5.18γ, κατά τις πυρηνοληψίες 6 μήνες, 1 έτος και 2 έτη μετά την κατασκευή αντίστοιχα. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού για τα διάφορα τμήματα, στα οποία κόπηκε κάθε πυρήνας, καθώς και ο μέσος όρος (Μ.Ο.) των τριών τιμών.

Περιλαμβάνονται μόνο τα τρία ανώτερα τμήματα του πυρήνα, καθώς σε λίγες μόνο περιπτώσεις ήταν δυνατόν να κοπεί και να ελεγχθεί τέταρτο τμήμα από τον πυρήνα.

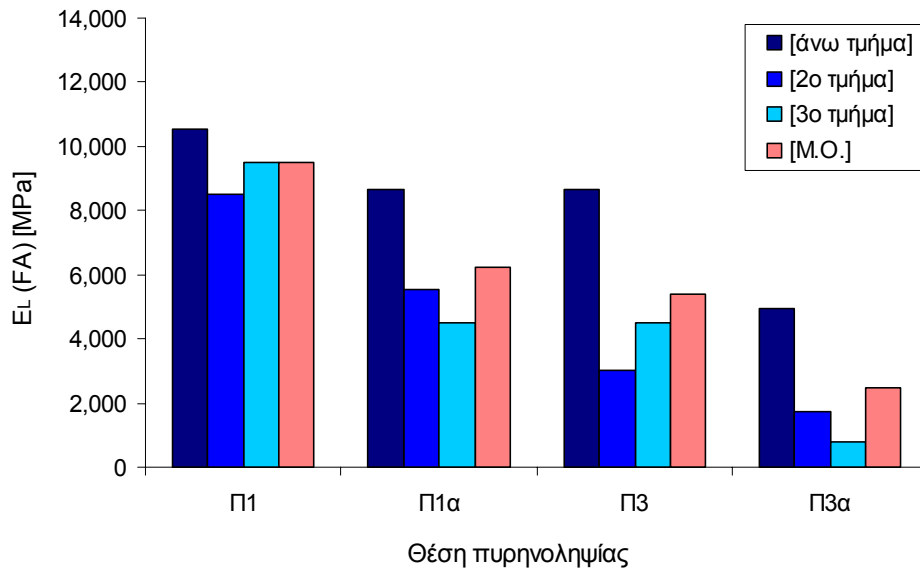


Σχήμα 5.17. Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμών ITSM στο εργαστήριο



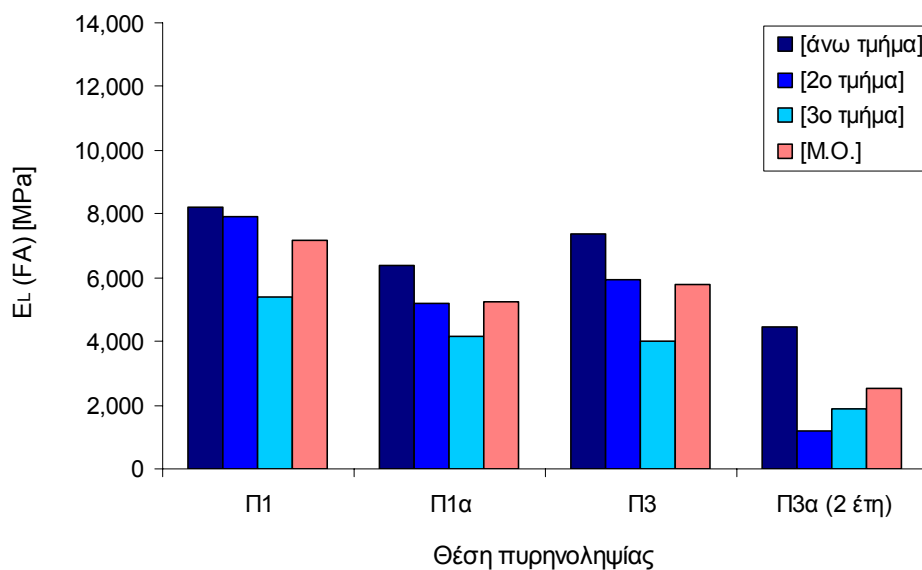
Σχήμα 5.18α. Τιμές E_L (FA) από δοκιμές σε πυρήνες 6 μήνες μετά την κατασκευή

Υποσημείωση: **1) E_i (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού. **2) [άνω τμήμα], [2ο τμήμα], [3ο τμήμα]:** Αποκοπέντα τμήματα πυρήνα (Σχήμα 5.17). **3) [Μ.Ο.]:** Μέσος όρος αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.17). **4) Π1, Π3:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **5) Π1α, Π3α:** Πυρήνες ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.18β. Τιμές E_L (FA) από δοκιμές σε πυρήνες 1 έτος μετά την κατασκευή

Υποσημείωση: **1) E_L (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού. **2) [άνω τμήμα], [2ο τμήμα], [3ο τμήμα]:** Αποκοπέντα τμήματα πυρήνα (Σχήμα 5.17). **3) [Μ.Ο.]:** Μέσος όρος αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.17). **4) Π1, Π3:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **5) Π1α, Π3α:** Πυρήνες ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.18γ Τιμές E_L (FA) από δοκιμές σε πυρήνες 2 έτη μετά την κατασκευή

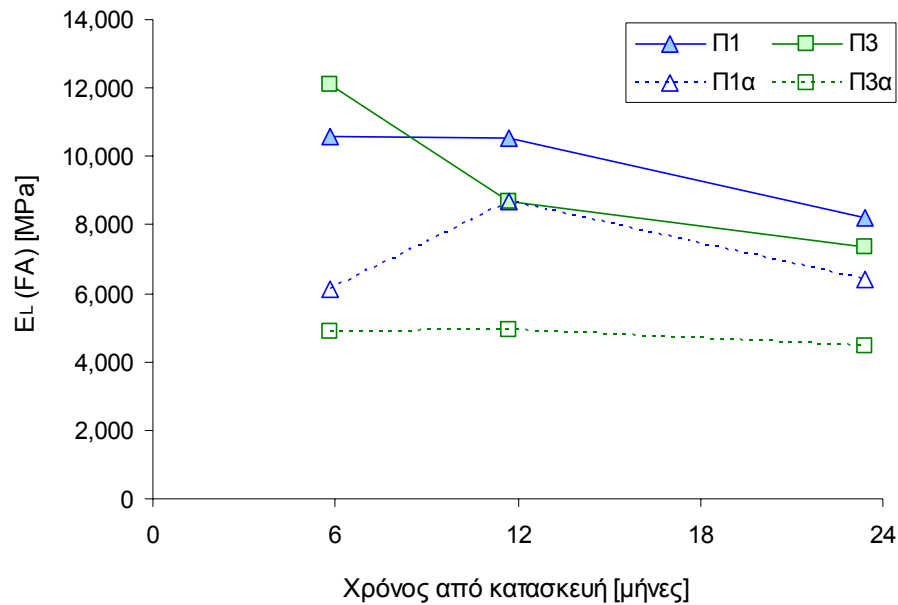
Υποσημείωση: **1) E_L (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού. **2) [άνω τμήμα], [2ο τμήμα], [3ο τμήμα]:** Αποκοπέντα τμήματα πυρήνα (Σχήμα 5.17). **3) [Μ.Ο.]:** Μέσος όρος αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.17). **4) Π1, Π3:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **5) Π1α, Π3α:** Πυρήνες ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών (Σχήμα 5.12)

Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται, ότι το ανώτερο τμήμα του πυρήνα του κατεργασμένου υλικού παρουσιάζει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης, σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα, καθώς επίσης τάση μείωσης με το βάθος. Αυτό, εκτιμάται ότι οφείλεται στη μειωμένη επίδραση της συμπίκνωσης με το βάθος της κατεργασμένης στρώσης κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Επιπλέον, από τους μέσους όρους (Μ.Ο.) των τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης διαπιστώνεται ότι η κατεργασμένη στρώση είναι περισσότερο δύσκαμπτη στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με την αντίστοιχη θέση πυρηνοληψίας (και ίδιο χρόνο από την κατασκευή) ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών. Αυτό είναι ενδεχόμενο να οφείλεται στην περαιτέρω συμπίκνωση της κατεργασμένης στρώσης υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας.

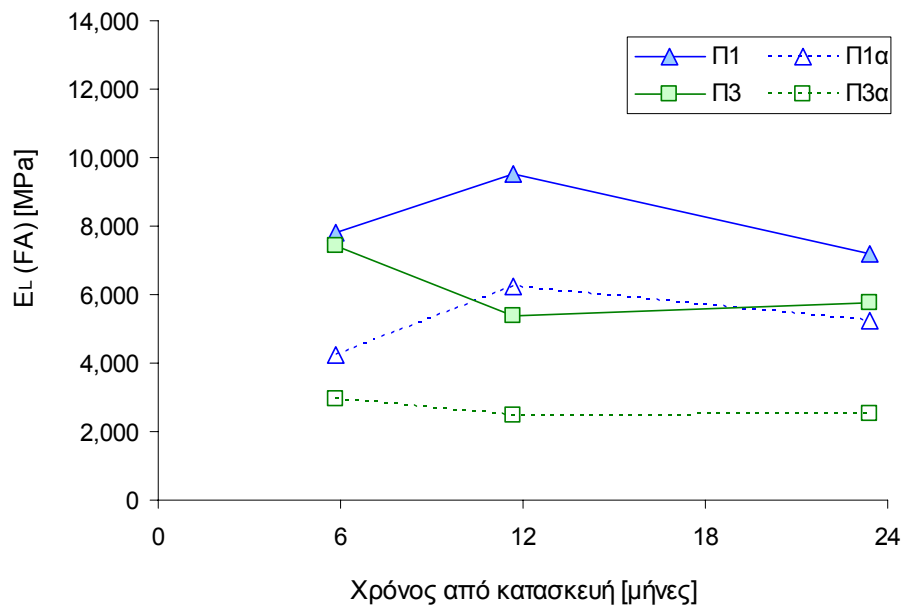
Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών με τον χρόνο πυρηνοληψίας (από την κατασκευή), παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 5.19α και 5.19β, για το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του ανώτερου τμήματος κάθε πυρήνα και για τον Μ.Ο. των τριών ανώτερων τμημάτων αντίστοιχα. Από τις υπόψη εργαστηριακές δοκιμές δεν προέκυψε κάποιο συμπέρασμα σχετικά με διαφοροποίηση (αύξηση ή μείωση) του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού για το χρονικό διάστημα έξι μηνών έως δύο ετών από την κατασκευή.

Λόγω του περιορισμένου αριθμού πυρήνων, οι παραπάνω διαπιστώσεις χρήζουν περαιτέρω έρευνας, με μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων και πειραματικών τμημάτων. Επιπλέον, λόγω της αδυναμίας αποκοπής πυρήνων από την κατεργασμένη στρώση πριν την «ωρίμανση» του υλικού, δεν είναι δυνατόν να γίνουν διαπιστώσεις σχετικά με τη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος κατά το χρονικό διάστημα των έξι πρώτων μηνών περίπου. Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι οι εργαστηριακές δοκιμές, δεν μπορούν να δώσουν αποτελέσματα, με βάση τα οποία να είναι δυνατή η εκτίμηση της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου με αφρώδη ασφαλτο οδοστρώματος κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του. Αυτό αναμένεται να καταστεί εφικτό, μέσω της διαδικασίας των ανάστροφων υπολογισμών των στοιχείων που συλλέγονται με το σύστημα FWD.



Σχήμα 5.19α. Τιμές E_L (FA) από δοκιμές σε πυρήνες ως προς τον χρόνο (άνω τμήμα)

Υποσημείωση: **1) E_L (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού. **2) (άνω τμήμα):** Αποκοπέν άνω τμήμα πυρήνα (Σχήμα 5.17). **3) Π1, Π3:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **4) Π1α, Π3α:** Πυρήνες ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.19β. Τιμές E_L (FA) από δοκιμές σε πυρήνες ως προς τον χρόνο (Μ.Ο.)

Υποσημείωση: **1) E_L (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού. **2) (Μ.Ο.):** Μέσος όρος αποτελεσμάτων (Σχήμα 5.17). **3) Π1, Π3:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **4) Π1α, Π3α:** Πυρήνες ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών (Σχήμα 5.12)

5.3.3.2 Νέες ασφατικές στρώσεις

Οι εργαστηριακές δοκιμές εκτίμησης της δυσκαμψίας (ITSM) των νέων ασφαλικών στρώσεων έγιναν με βάση τα αναφερόμενα στο υποκεφάλαιο 2.8.5. Οι πυρήνες κόπηκαν σε δύο τμήματα (ισοπεδωτική και αντιολισθηρή στρώση) και υπολογίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας για κάθε στρώση ξεχωριστά. Δεδομένου ότι οι νέες ασφατικές στρώσεις θεωρείται ότι λειτουργούν στο «σώμα» του οδοστρώματος ως μία ενιαία στρώση, υπολογίζεται ένα μέτρο δυσκαμψίας για το σύνολο των ασφαλικών στρώσεων. Αυτό θεωρείται ως αντιπροσωπευτικό της δυσκαμψίας των νέων ασφαλτομιγμάτων και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα πάχη και τη δυσκαμψία των επιμέρους στρώσεων (SHRP 1993) από τη σχέση (5.11). Η υπόψη διαδικασία παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 5.20. Διεθνώς χρησιμοποιείται η ορολογία «σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας» (composite modulus). Ο όρος αυτός όμως δεν χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής για τις ασφατικές στρώσεις, για να μη γίνει σύγχυση με το σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης των ασφαλικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης, όπως έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 5.3.1.

$$E_L(AC) = \left(\frac{h_{ισοπ}}{h_{AC}} * \sqrt[3]{E_L(ισοπ)} + \frac{h_{αντιολ}}{h_{AC}} * \sqrt[3]{E_L(αντιολ)} \right)^3 \quad (5.11)$$

Όπου,

$E_L(AC)$: μέτρο δυσκαμψίας συνόλου ασφαλικών στρώσεων

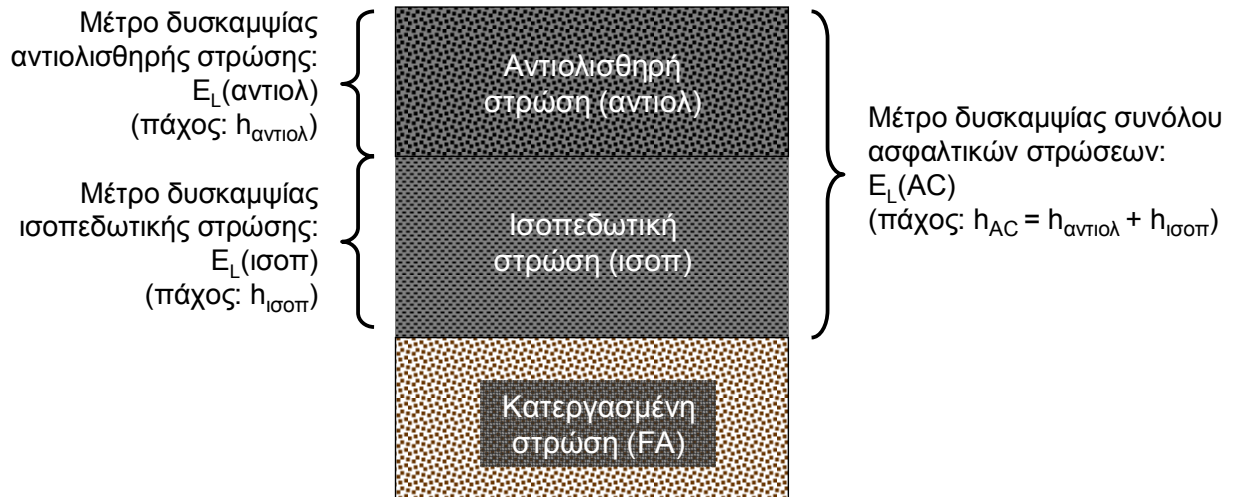
$E_L(ισοπ)$: μέτρο δυσκαμψίας ισοπεδωτικής στρώσης

$E_L(αντιολ)$: μέτρο δυσκαμψίας αντιολισθηρής στρώσης

$h_{ισοπ}$: πάχος ισοπεδωτικής στρώσης

$h_{αντιολ}$: πάχος αντιολισθηρής στρώσης

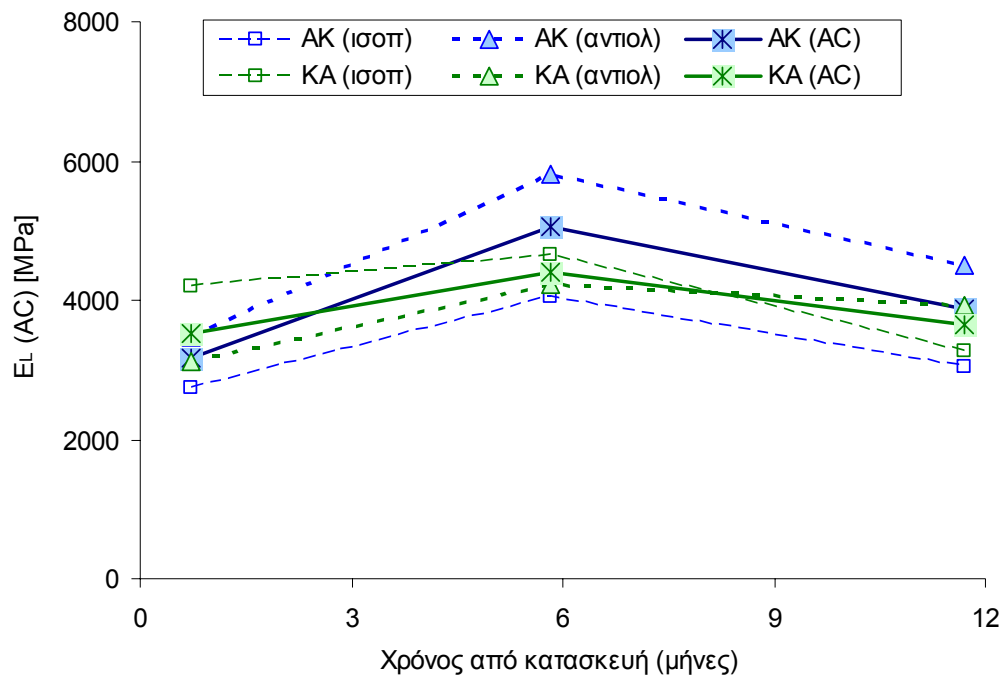
h_{AC} : συνολικό πάχος ασφαλικών στρώσεων ($h_{AC} = h_{ισοπ} + h_{αντιολ}$)



Σχήμα 5.20. Μέτρα δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε πυρήνες που αποκόπηκαν από τα πειραματικά τμήματα με κωδικούς KA και AK παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4.3 του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.21, κατά τις πυρηνοληψίες <2 μήνες, 6 μήνες και 1 έτος μετά την κατασκευή. Στο διάγραμμα φαίνεται η μέση τιμή της δυσκαμψίας κάθε στρώσης, καθώς και το μέτρο δυσκαμψίας του συνόλου των νέων ασφαλτικών στρώσεων (ισοπεδωτική και αντιστοιχιστική στρώση), σε σχέση με τον χρόνο από την κατασκευή.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από την αρχή της λειτουργίας του οδοστρώματος το μέτρο δυσκαμψίας του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων ήταν μεγαλύτερο από 3000 MPa, που είχε ληφθεί υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η σύγκριση των μέσων τιμών της δυσκαμψίας <2 μήνες μετά την κατασκευή και 1 έτος μετά, έδειξε ότι μεγαλύτερη αύξηση της δυσκαμψίας (25 - 30%) παρουσίασε ο αντιστοιχιστικός τύπος, γεγονός το οποίο εκτιμάται ότι οφείλεται στην περαιτέρω συμπίκνωσή του από τα φορτία κυκλοφορίας. Δεν παρατηρήθηκε πάντως μακροσκοπικά έναρξη δημιουργίας τροχοαυλάκωσης κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.21. Τιμές E_L (AC) από δοκιμές σε πυρήνες ως προς τον χρόνο

Υποσημείωση: **1) E_L (AC):** Μέτρο δυσκαμψίας (ITSM) ασφαλικών στρώσεων. **2) AK, KA:** Κωδικοί πειραματικών τμημάτων. **3) (ισοπ):** Πυρήνες από ισοπεδωτική στρώση. **4) (αντιολ):** Πυρήνες από αντιολισθηρή στρώση. **5) (AC):** Σύνολο ασφαλικών στρώσεων

5.4. Μηχανική ανάλυση μέσω ανάστροφων υπολογισμών

5.4.1 Γενικά

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος εκτιμήθηκαν με προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης, κυρίως με τη διαδικασία ανάστροφων υπολογισμών των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων με το Σύστημα FWD. Στα εδάφια που ακολουθούν αναλύονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και των επιτόπου δοκιμών και γίνεται μελέτη ευαισθησίας των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών. Για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, κατά τη διαδικασία των ανάστροφων υπολογισμών γίνεται θεώρηση ενοποιημένων ασφαλικών στρώσεων (Irwin 2002), (Dynatest 2001), οπότε υπολογίζεται απ' ευθείας το μέτρο δυσκαμψίας του συνόλου των ασφαλικών στρώσεων.

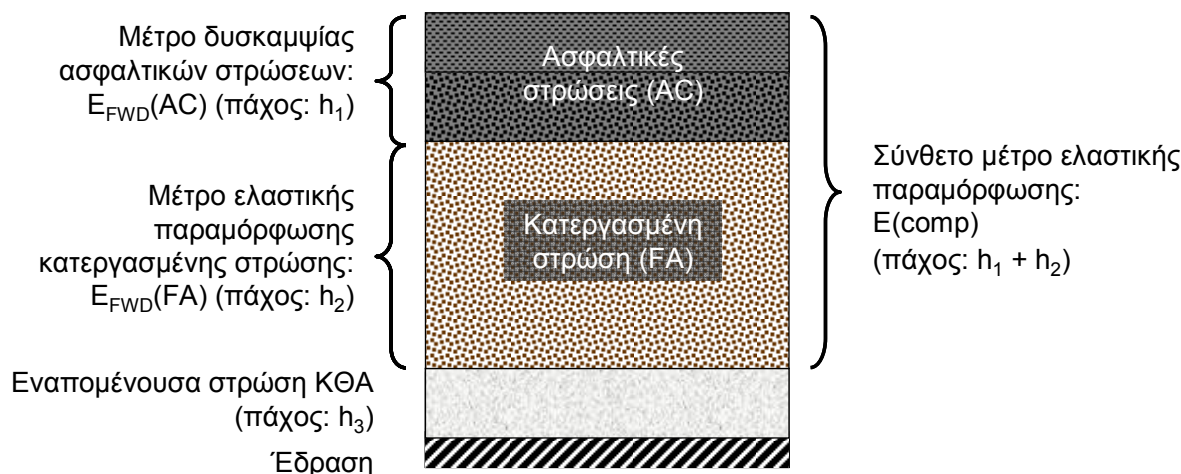
Παρακάτω παρουσιάζονται οι συμβολισμοί των μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων. Αναφέρεται επίσης και το σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (composite modulus) των ενοποιημένων ασφαλικών στρώσεων

και κατεργασμένης στρώσης, το οποίο εκτιμάται μέσω των ανάστροφων υπολογισμών των συλλεχθέντων στοιχείων με το Σύστημα FWD. Το στατικό πρότυπο, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιούνται οι ανάστροφοι υπολογισμοί παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22.

$E_{FWD} (FA)$: μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (ανάστροφοι υπολογισμοί στοιχείων FWD)

$E_{FWD} (AC)$: μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων (ανάστροφοι υπολογισμοί στοιχείων FWD)

$E (comp)$: σύνθετο ($AC + FA$) μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί στοιχείων FWD)



Σχήμα 5.22. Στατικό πρότυπο ανάστροφων υπολογισμών

5.4.2 Παράγοντες επιρροής αποτελεσμάτων ανάστροφων υπολογισμών

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στη μελέτης ευαισθησίας, σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών. Σκοπός της διαδικασίας που περιγράφεται παρακάτω είναι ο κατά το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων και κατά συνέπεια της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, μέσω της διαδικασίας των ανάστροφων υπολογισμών. Οι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη στο πλαίσιο της μελέτης ευαισθησίας των ανάστροφων υπολογισμών είναι ο συνυπολογισμός της εναπομένουσας στρώσης (ΚΘΑ και ασύνδετα αμμοχάλικα), στο προσομοίωμα (στατικό πρότυπο) και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

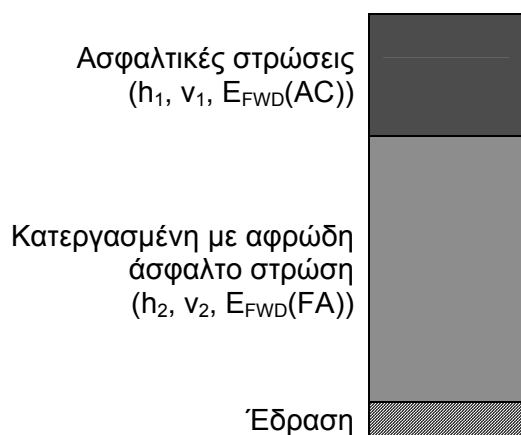
5.4.2.1 Εναπομένουσα στρώση από ΚΘΑ

Το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων και των στρώσεων από ΚΘΑ στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα πριν την ανακύκλωση ήταν μεγαλύτερο από 38 cm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Δεδομένου ότι από την αναλυτική μελέτη του ανακυκλωμένου οδοστρώματος το συνολικό πάχος της κατεργασμένης με αφρώδη ασφαλτο στρώσης και των νέων ασφαλικών στρώσεων ανέρχεται σε 34 cm (Σχήμα 3.5), καθίσταται σαφές ότι η κατεργασμένη στρώση εδράζεται σε εναπομένουσα στρώση από ΚΘΑ. Αυτό εγκυμονεί τον κίνδυνο διάδοσης πιθανών ρωγμών στο «σώμα» της στρώσης από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) στην επιφάνεια του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η περίπτωση όμως απομάκρυνσης της στρώσης από ΚΘΑ κρίνεται από τεχνικοοικονομική άποψη ως μη εφικτή, καθώς απαιτείται επέμβαση σε μεγαλύτερο βάθος από το απαιτούμενο, δεδομένου ότι πρέπει να διατηρηθεί το υφιστάμενο υψόμετρο της οδού.

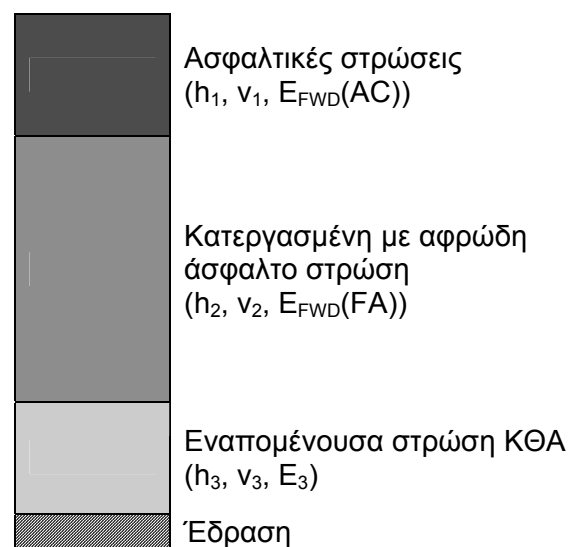
Πέραν των κατασκευαστικών προβλημάτων, από δομική άποψη κρίνεται ως θετικό το γεγονός, ότι η κατεργασμένη με αφρώδη ασφαλτο στρώση εδράζεται σε στρώση (από ΚΘΑ), η οποία αναμένεται να έχει μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης αντίστοιχο ή υψηλότερο από τα ασύνδετα θραυστά αμμοχάλικα. Όπως όμως διαπιστώθηκε από τις προκαταρκτικές αναλύσεις των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD, στις περισσότερες περιπτώσεις η εναπομένουσα στρώση από ΚΘΑ παρουσιάζει υψηλή δυσκαμψία. Αυτό θεωρήθηκε πολύ ενδιαφέρον, λόγω της επιρροής που ενδεχομένως να έχει η υπόψη στρώση στη δομική συμπεριφορά της κατεργασμένης με αφρώδη ασφαλτο στρώσης και κατ' επέκταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκαν ξεχωριστά οι περιπτώσεις των πειραματικών τμημάτων με ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και με τα ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα. Σκοπός είναι να αναδειχθούν οι ομοιότητες ή οι διαφορές των δύο αυτών περιπτώσεων, οι οποίες στην πράξη είναι οι συνηθέστερες, όταν εφαρμόζεται επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση με εφαρμογή της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου.

Η επιρροή της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών εκτιμήθηκε με χρήση των δύο προσομοιωμάτων του ανακυκλωμένου ημιάκαμπτου οδοστρώματος, που φαίνονται στα Σχήματα 5.23α και 5.23β.

Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών στο πειραματικό τμήμα AK1, για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα οδοστρώματος χωρίς και με συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.1 του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.24 (με ένδειξη «ΚΘΑ» οι υπολογισμοί με στρώση ΚΘΑ).

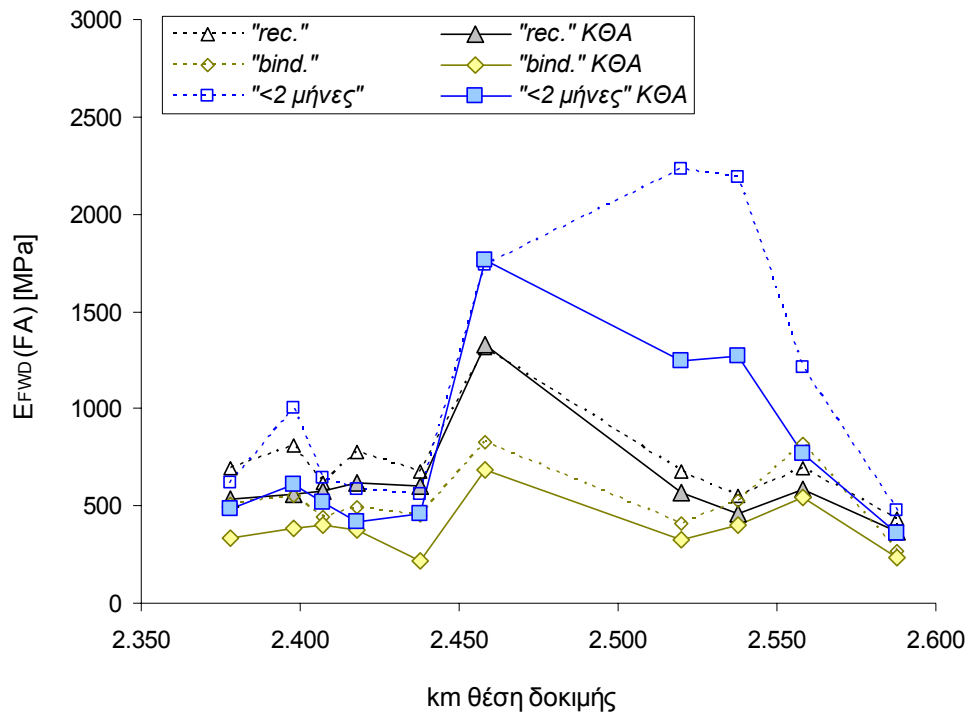


Σχήμα 5.23α. Προσομοίωμα
οδοστρώματος χωρίς στρώση ΚΘΑ



Σχήμα 5.23β. Προσομοίωμα
οδοστρώματος με στρώση ΚΘΑ

Από τα στοιχεία του Πίνακα Π5.1 παρατηρείται, ότι σε περίπτωση κατά την οποία δεν ληφθεί υπόψη η εναπομένουσα στρώση από ΚΘΑ, υπερεκτιμάται το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης. Οι ποσοστιαίες διαφορές κυμάνθηκαν από 16.9% έως 123.5% και το σφάλμα RMS από 22.8% έως 132.9%, με αυξανόμενη τάση από τις δοκιμές στην επιφάνεια του κατεργασμένου υλικού και έως 8 μήνες μετά την κατασκευή (κωδικός δοκιμής: 6 μήνες). Κατά το τελευταίο χρονικό διάστημα, οι ανάστροφοι υπολογισμοί χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ έδωσαν πολύ υψηλές τιμές σε τρεις θέσεις (μη αποδεκτά αποτελέσματα). Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα Π5.1α, Π5.1β, Π5.1γ και Π5.1δ του Παραρτήματος, από όπου διαπιστώνεται μεγαλύτερες διαφορές με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού. Οι τιμές του λόγου $E_{FWD}(FA)$ (με ΚΘΑ) / $E_{FWD}(FA)$ (χωρίς ΚΘΑ) κυμάνθηκαν μεταξύ 0.87 (δοκιμή στην κατεργασμένη στρώση, κωδικός δοκιμής: *rec.*) και 0.58 (κωδικός δοκιμής: 6 μήνες). Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης με και χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μέσες τιμές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π5.2 Παραρτήματος).



Σχήμα 5.24. Ανάστροφοι υπολογισμοί με και χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD} (FA)$:** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) "rec.", "bind.", "<2 μήνες":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών από Πίνακα 5.3. Υπολογισμοί με βάση το προσομοίωμα του Σχήματος 5.23α. **3) "rec." ΚΘΑ, "bind." ΚΘΑ, "<2 μήνες" ΚΘΑ:** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών από Πίνακα 5.3. Υπολογισμοί με βάση το προσομοίωμα του Σχήματος 5.23β

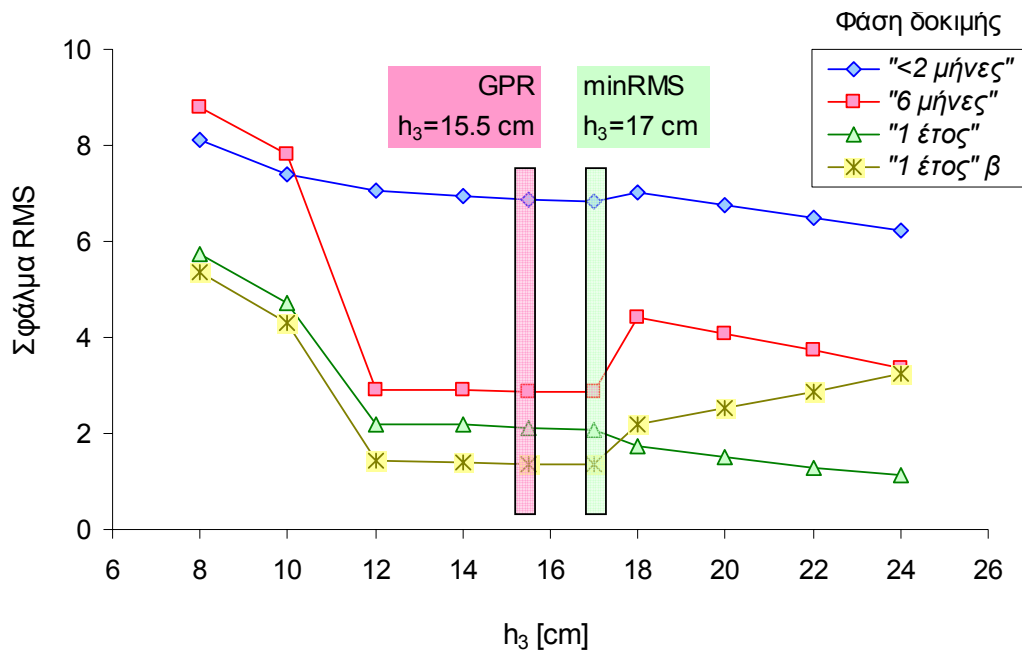
Η παραπάνω διαδικασία κατέδειξε με σαφήνεια, ότι για την ακριβέστερη εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού μέσω των ανάστροφων υπολογισμών είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στο προσομοίωμα του οδοστρώματος. Κατόπιν αυτού, όλοι οι ανάστροφοι υπολογισμοί έγιναν με χρήση του στατικού προτύπου που φαίνεται στο Σχήμα 5.20β. Σημειώνεται επίσης, ότι για λόγους συντομίας δεν περιλαμβάνεται η ένδειξη «ΚΘΑ» στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.4.2.2 Πάχος εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Για την εκτίμηση της επίδρασης του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών, έγιναν αναλύσεις με χρήση διάφορων πιθανών παχών ΚΘΑ. Οι αναλύσεις έγιναν στο πειραματικό τμήμα ΚΑ1, στο οποίο πραγματοποιήθηκε περιοδική συστηματική πυρηνοληψία 6 μήνες μετά την κατασκευή και στα επόμενα στάδια των δοκιμών με το Σύστημα FWD. Με αυτό τον τρόπο, κατέστη δυνατός

ο προσδιορισμός των πραγματικών παχών των ασφαλτικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης, στις θέσεις δοκιμών με το FWD. Η επιλογή των υπόψη θέσεων έγινε για την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών για τη μελέτη ευαισθησίας, αναφορικά με το πάχος της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ.

Στη διαδικασία των αναλύσεων, για την εκτίμηση του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ, εκτός από τις αναλύσεις με το Σύστημα GPR, εξετάστηκε και το ενδεχόμενο έμμεσου προσδιορισμού, μέσω του υπολογισμού της ελάχιστης τιμής του σφάλματος RMS κατά τη διαδικασία των ανάστροφων υπολογισμών. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.25, για τη θέση πυρηνοληψίας Π1. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται με τον κωδικό minRMS. Παρουσιάζεται επίσης και το αντίστοιχο πάχος ΚΘΑ, που προέκυψε από τις αναλύσεις των καταγραφών του Συστήματος GPR.



Σχήμα 5.25. Σφάλμα RMS ανάστροφων υπολογισμών για διάφορα πιθανά πάχη εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **2) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **3) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών από Πίνακα 5.3

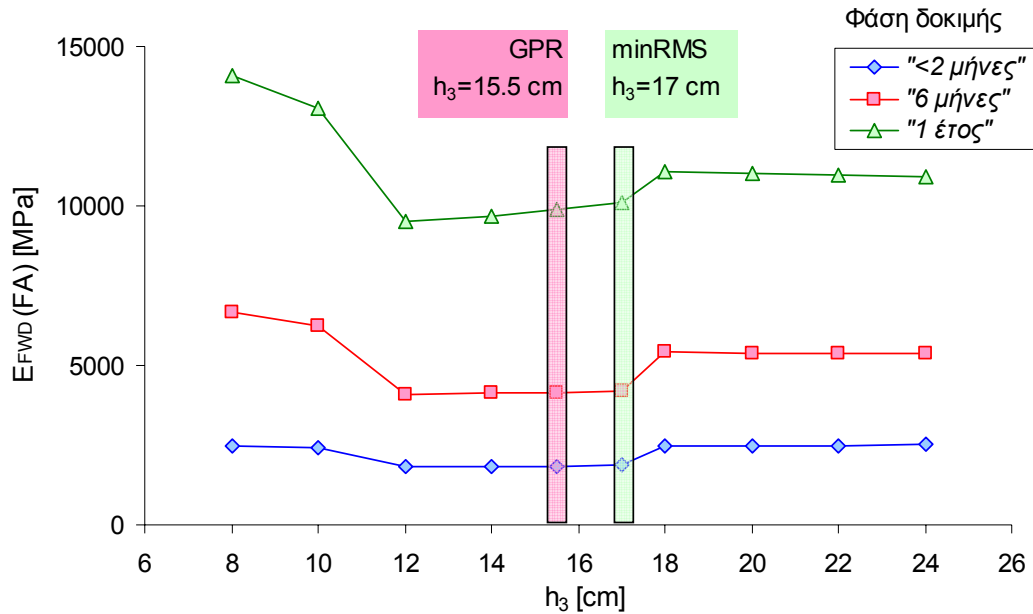
Όπως διαπιστώνεται, εκτός του μεγάλου αριθμού ανάστροφων υπολογισμών για τον προσδιορισμό του ελάχιστου σφάλματος RMS (min RMS), δεν είναι σαφές σε όλα τα στάδια των δοκιμών το πάχος του ΚΘΑ, για το οποίο παρατηρείται το min RMS. Στο παράδειγμα του

Σχήματος 5.25 το min RMS προσδιορίστηκε κατά τις δοκιμές 6 μήνες μετά την κατασκευή. Ένα έτος μετά την κατασκευή σε δύο δοκιμές στην ίδια θέση τη μία φορά (κωδικός 1 έτος β) το min RMS επιβεβαιώθηκε, ενώ στην άλλη (κωδικός 1 έτος) δεν προέκυψε αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν στο ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας των ασφατικών στρώσεων E_{FWD} (AC) και στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης E_{FWD} (FA). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ανάστροφοι υπολογισμοί, του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης E (comp), με ενοποίηση των ασφατικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης. Δίνεται έτσι η δυνατότητα εκτίμησης της δυσκαμψίας των νέων στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά (Marquis et al. 2003). Το στατικό πρότυπο, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι ανάστροφοι υπολογισμοί φαίνεται στο Σχήμα 5.22.

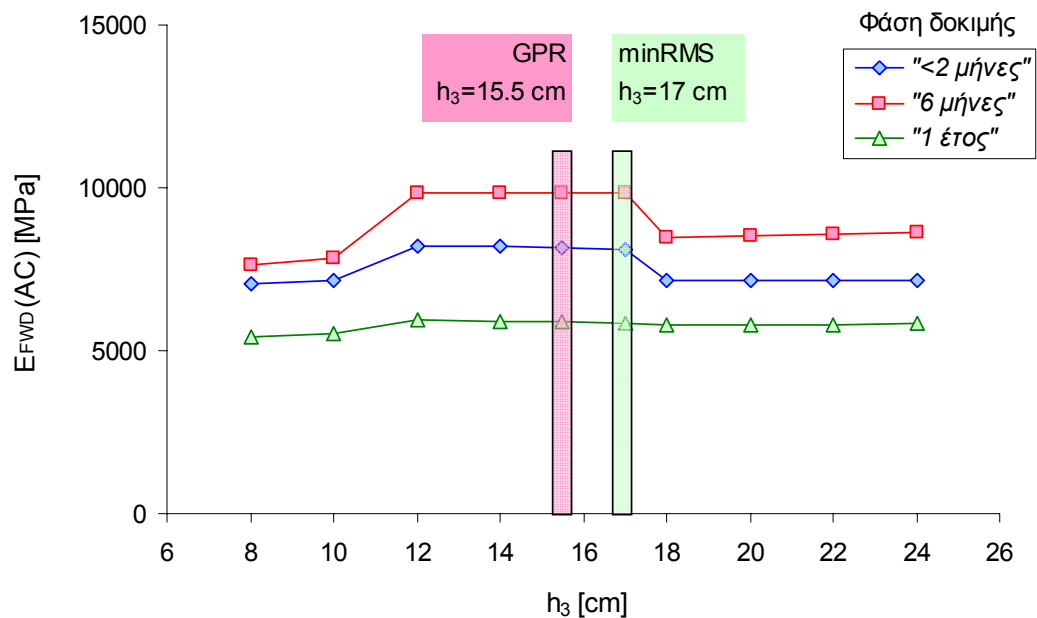
Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για διάφορες πιθανές τιμές του πάχους h_3 της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στη θέση πυρηνοληψίας Π1 του πειραματικού τμήματος ΚΑ1 παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.26α, 5.26β και 5.26γ. Οι τιμές είναι διορθωμένες στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C.

Από τα διαγράμματα παρατηρούνται διαφοροποιήσεις των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε περιπτώσεις σχετικά μικρών ή/και μεγάλων τιμών πάχους στρώσης ΚΘΑ. Η ποσοτικοποίηση (%) των διαφορών αυτών, σε σχέση με τους ανάστροφους υπολογισμούς με τιμή πάχους ΚΘΑ από τις αναλύσεις των καταγραφών με το Σύστημα GPR, παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.27α, 5.27β και 5.27γ.



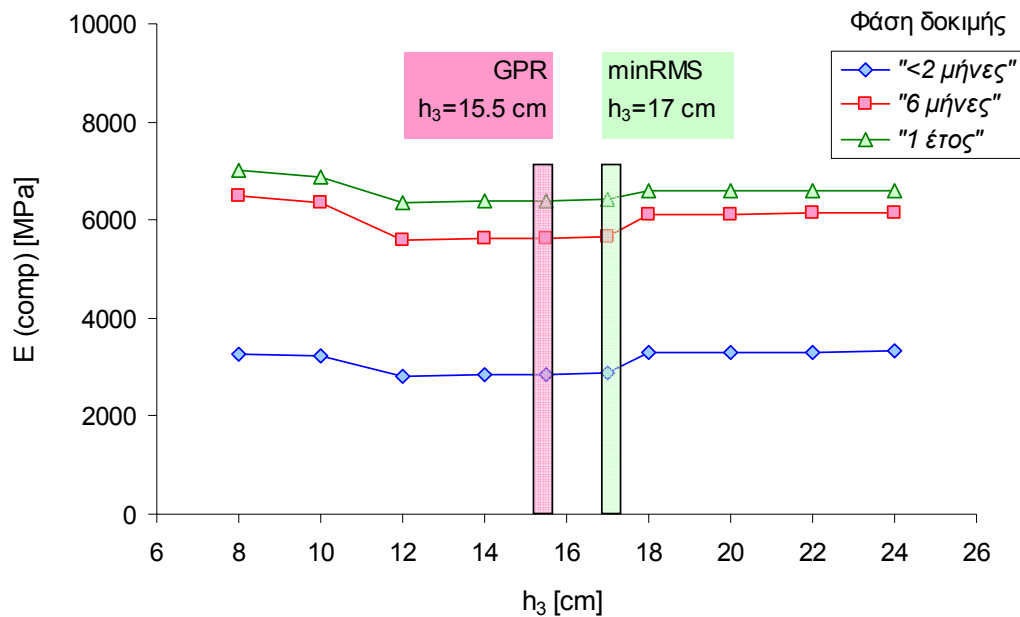
Σχήμα 5.26α. Τιμές $E_{FWD}(FA)$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)



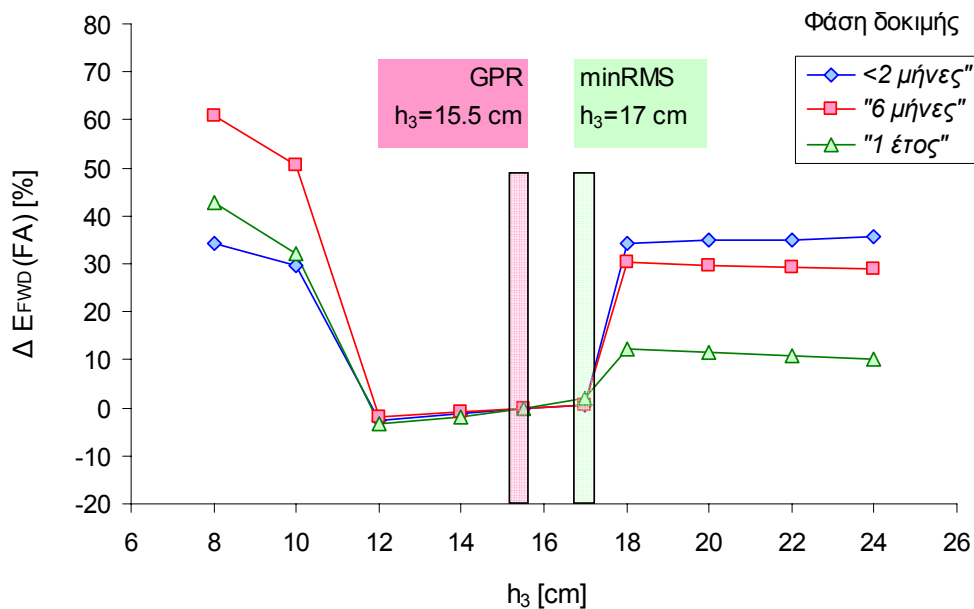
Σχήμα 5.26β. Τιμές $E_{FWD}(AC)$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(AC)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)



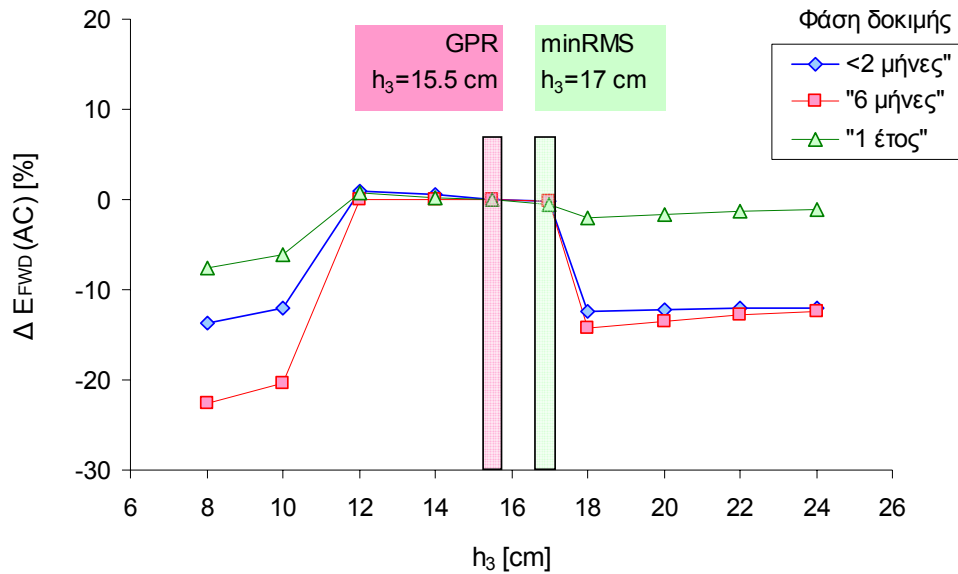
Σχήμα 5.26γ. Τιμές $E_{(comp)}$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $E_{(comp)}$:** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης & ασφαλικών στρώσεων. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)



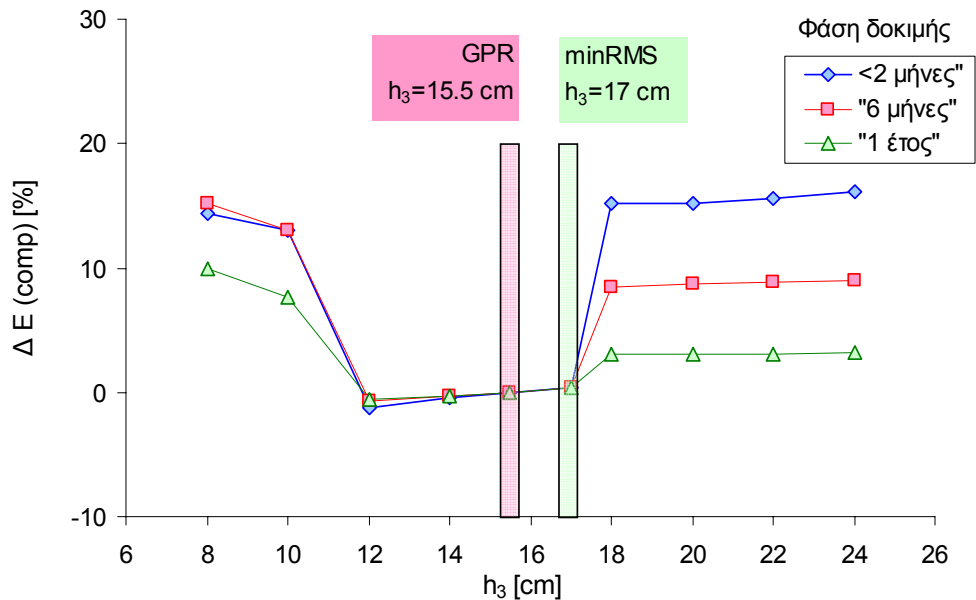
Σχήμα 5.27α. Διαφορές τιμών $E_{FWD}(FA)$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $\Delta E_{FWD}(FA)$:** Διαφορές ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης, σε σχέση με ανάλυση με h_3 μέσω GPR. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)



Σχήμα 5.27β. Διαφορές τιμών $E_{FWD} (AC)$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $\Delta E_{FWD} (AC)$:** Διαφορές ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων, σε σχέση με ανάλυση με h_3 μέσω GPR. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)



Σχήμα 5.27γ. Διαφορές τιμών $E (comp)$ για διάφορες πιθανές τιμές παχών ΚΘΑ (h_3)

Υποσημείωση: **1) $\Delta E (comp)$:** Διαφορές σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης & ασφαλτικών στρώσεων, σε σχέση με ανάλυση με h_3 μέσω GPR. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)

Από τα Σχήματα 5.27α, 5.27β και 5.27γ διαπιστώνονται διαφορές των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις ήταν μεγαλύτερες του 20%. Παρατηρείται επίσης, ότι για τιμές πάχους ΚΘΑ h_3 κοντά στην τιμή $h_3(\text{GPR})$, οι διαφορές είναι μικρές. Από κάποια τιμή όμως του h_3 και με την αύξηση της απόκλισης, σε σχέση με το $h_3(\text{GPR})$, παρατηρείται απότομη αύξηση της ποσοστιαίας διαφοράς των ανάστροφα υπολογισμένων τιμών.

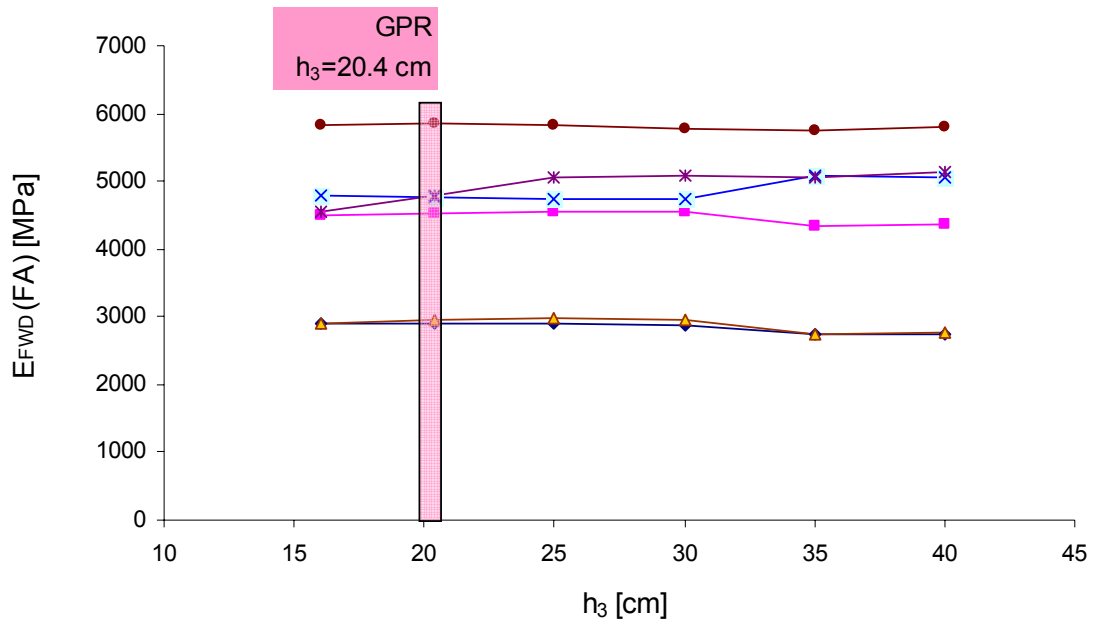
Από την υπόψη διερεύνηση προκύπτει το συμπέρασμα, ότι η εκτίμηση του πάχους της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ με αξιόπιστη μέθοδο είναι σημαντικός παράγοντας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών.

5.4.2.3 Πάχος εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα

Η χρήση του Συστήματος GPR για την εκτίμηση του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_3), σε πολλές περιπτώσεις δεν έδωσε αποτελέσματα. Κατόπιν τούτου, στα ανακυκλωμένα εύκαμπτα οδοστρώματα ελήφθη σταθερή τιμή $h_3(\text{GPR})=20.4 \text{ cm}$, που ήταν το μέσο πάχος, που προέκυψε από τις αναλύσεις των καταγραφών με το Σύστημα GPR. Η μελέτη ευαισθησίας έγινε σε θέσεις πυρηνοληψίας των πειραματικών τμημάτων ΛΑ, με χρήση διάφορων πιθανών παχών στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_3) και των πραγματικών παχών των ασφαλικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης, στις θέσεις δοκιμών με το Σύστημα FWD.

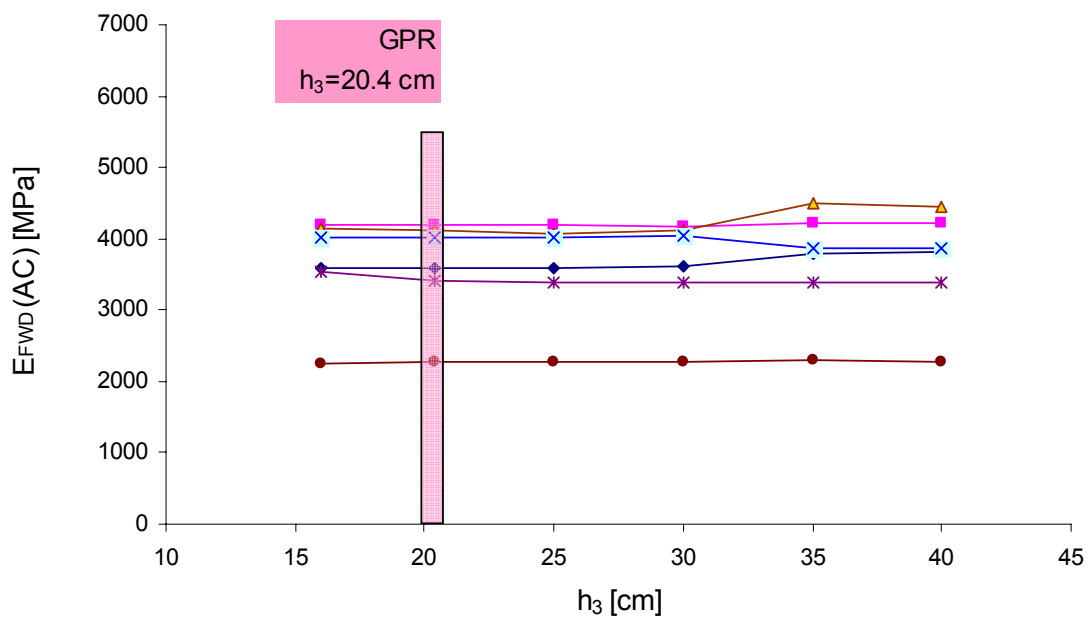
Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για διάφορες πιθανές τιμές του πάχους h_3 παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 5.28α και 5.28β, ενώ οι ποσοστιαίες διαφορές, σε σχέση με την τιμή $h_3(\text{GPR})$ στα Σχήματα 5.29α και 5.29β. Παρατηρείται, ότι ακόμη και σε περιπτώσεις μεγάλων διαφορών του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_3) από το $h_3(\text{GPR})$, οι διαφορές των ανάστροφα υπολογισμένων τιμών του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων (AC) δεν ξεπέρασαν κατ' απόλυτη τιμή το 9% και του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης (FA) το 8%.

Από τις υπόψη αναλύσεις προέκυψε, ότι τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις διακυμάνσεις του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα h_3 . Κατόπιν αυτού, οι ανάστροφοι υπολογισμοί στις περιπτώσεις πειραματικών τμημάτων ανακυκλωμένων εύκαμπτων οδοστρωμάτων έγιναν με σταθερή τιμή $h_3(\text{GPR}) = 20.4 \text{ cm}$.



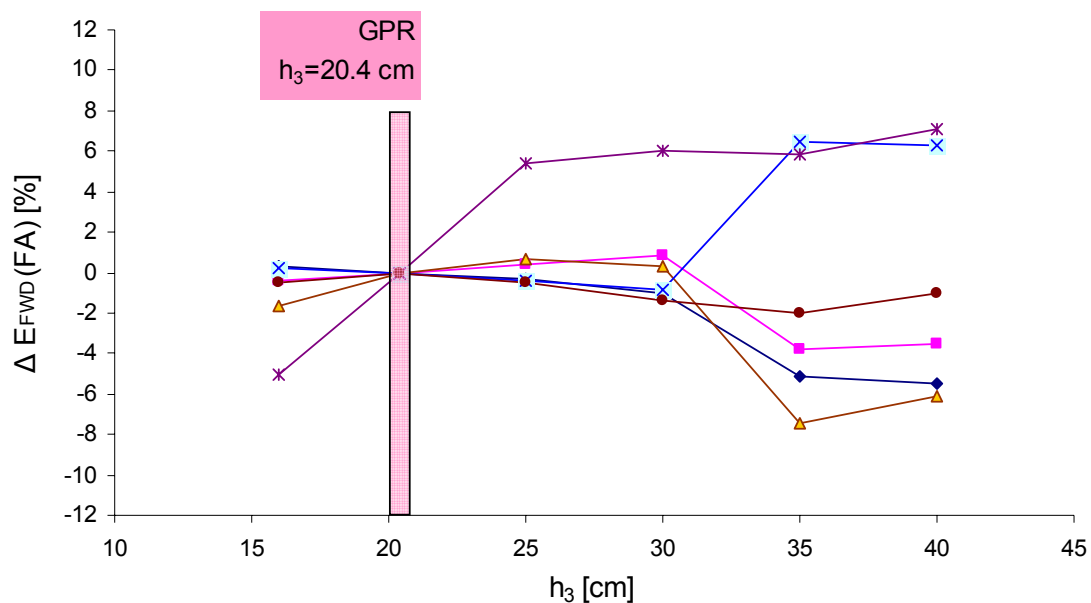
Σχήμα 5.28α. Τιμές E_{FWD} (FA) για διάφορες πιθανές τιμές παχών στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_3)

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR



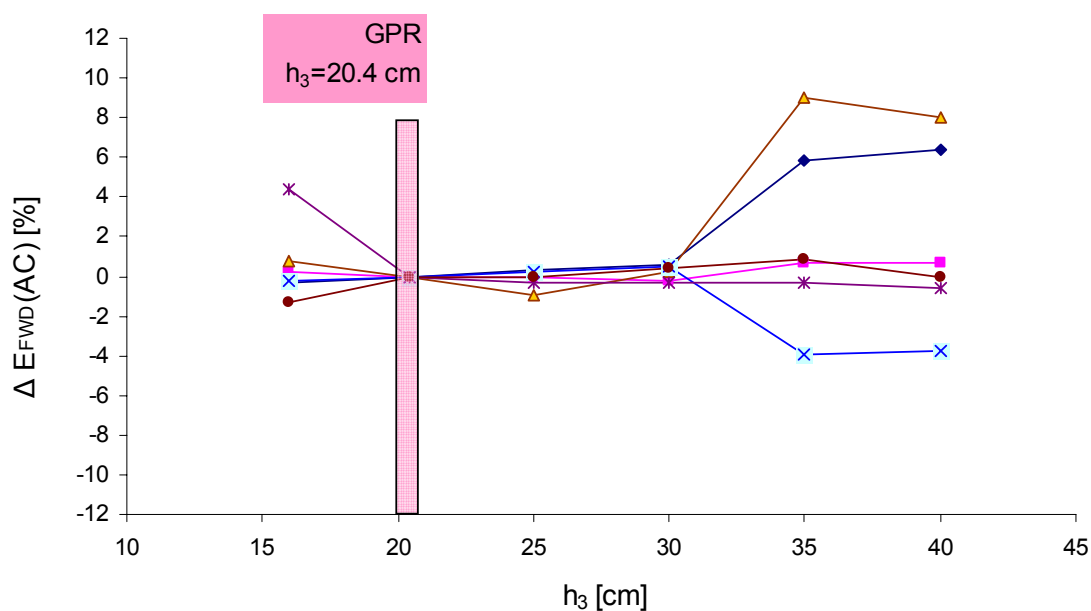
Σχήμα 5.28β. Τιμές E_{FWD} (AC) για διάφορες πιθανές τιμές παχών στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_3)

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR



Σχήμα 5.29α. Ποσοστιαίες διαφορές E_{FWD} (FA), σε σχέση με υπολογισμούς με h_3 (GPR)

Υποσημείωση: 1) ΔE_{FWD} (FA): Διαφορές ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης, σε σχέση με ανάλυση με h_3 μέσω GPR. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR



Σχήμα 5.29β. Ποσοστιαίες διαφορές E_{FWD} (AC), σε σχέση με υπολογισμούς με h_3 (GPR) (Ευκ)

Υποσημείωση: 1) ΔE_{FWD} (AC): Διαφορές ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων, σε σχέση με ανάλυση με h_3 μέσω GPR. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR

5.4.2.4 Πάχη επιμέρους στρώσεων

Η ανάλυση των καταγραφών του Συστήματος GPR για την εκτίμηση του πάχους της στρώσης από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ), σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό των παχών των ασφαλικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης από πυρηνοληψίες, θεωρείται ως η πλέον αξιόπιστη πηγή πληροφοριών, καθώς δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή πυρήνων πλήρους πάχους από την εναπομένουσα στρώση ΚΘΑ. Αποτελεί τη διαδικασία αναφοράς για την εκτίμηση / προσδιορισμό των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος, στο πλαίσιο των αναλύσεων των συλλεχθέντων στοιχείων με το Σύστημα FWD (ανάστροφοι υπολογισμοί). Άλλη διαδικασία που αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.4.2.2, είναι η εκτίμηση του πάχους της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ μέσω της διαδικασίας προσδιορισμού του ελάχιστου σφάλματος RMS (min RMS). Επίσης, εξετάστηκε και η περίπτωση εκτίμησης των τιμών των παχών όλων των στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος μέσω της ανάλυσης των καταγραφών του Συστήματος GPR. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε και στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος.

Για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης μέσω των ανάστροφων υπολογισμών, προτείνεται από την πηγή (Nunn & Thom 2002) διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τη θεώρηση σταθερού μέτρου δυσκαμψίας για τις ασφαλικές στρώσεις. Στο πλαίσιο της μελέτης ευαισθησίας των παραγόντων επιρροής των αποτελεσμάτων, έγιναν ανάστροφοι υπολογισμοί με σταθερή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων, το οποίο εκτιμήθηκε από εργαστηριακές δοκιμές.

Οι παραπάνω αναφερθείσες διαδικασίες εκτίμησης των παχών των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος φαίνονται στον Πίνακα 5.7. Ακολουθούν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη ευαισθησίας.

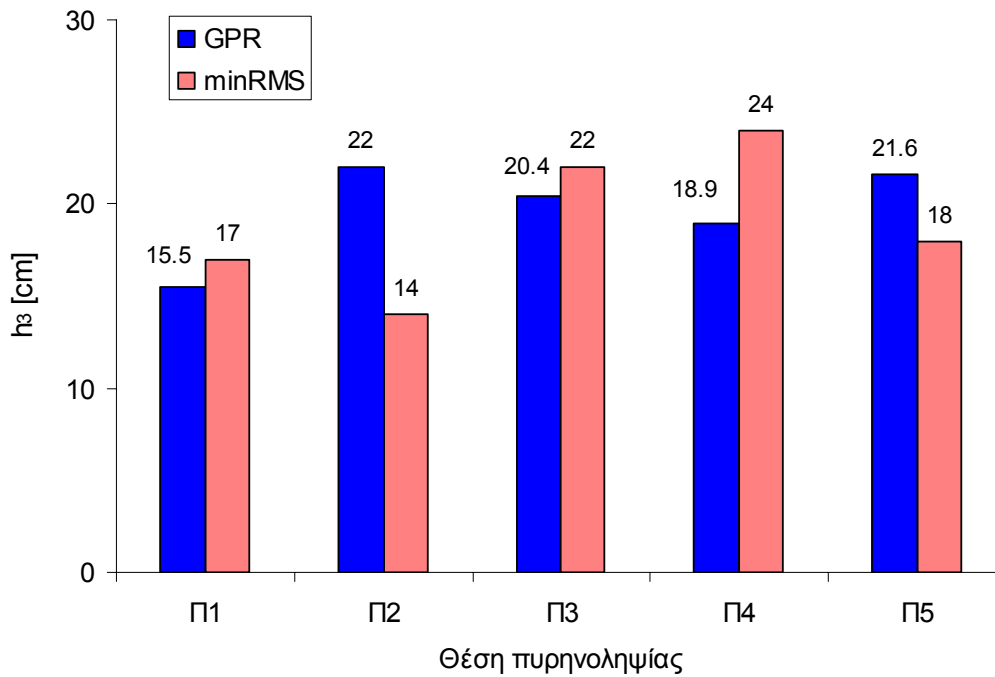
Πίνακας 5.7: Διαδικασίες εκτίμησης παχών επιμέρους στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος

$h_{KΘΑ} = h_3$	Διαδικασία προσδιορισμού / εκτίμησης πάχους επιμέρους στρώσεων				
	h_3 (GPR) (διαδικασία αναφοράς)	h_3 (minRMS)	h (GPR)	h_3 (GPR) & $E_{AC}=σταθ.$	h_3 (minRMS) & $E_{AC}=σταθ.$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Ασφαλτικές στρώσεις (AC)	Πυρήνας	Πυρήνας	GPR	Πυρήνας	Πυρήνας
Κατεργασμένη στρώση (FA)	Πυρήνας	Πυρήνας	GPR	Πυρήνας	Πυρήνας
Εναπομένουσα στρώση ΚΘΑ	GPR	min RMS	GPR	GPR	min RMS

Διαδικασία (2), σε σχέση με (1) Πίνακα 5.7

Παρά το γεγονός ότι η εκτίμηση του πάχους της στρώσης ΚΘΑ μέσω της διαδικασίας minRMS είναι χρονοβόρα, ελέγχθηκε η αξιοπιστία της, σε σχέση με την ανάλυση των καταγραφών του Συστήματος GPR. Έγινε δηλαδή σύγκριση των αποτελεσμάτων παχών ΚΘΑ και ανάστροφων υπολογισμών της διαδικασίας (2), σε σχέση με τη διαδικασία (1) του Πίνακα 5.7.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την εκτίμηση του πάχους της στρώσης ΚΘΑ του πειραματικού τμήματος ΚΑ1 μέσω των προαναφερθέντων διαδικασιών παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.30. Οι απόλυτες τιμές της διαφοράς του πάχους της στρώσης ΚΘΑ κυμάνθηκαν από 1.5 έως 8 cm.

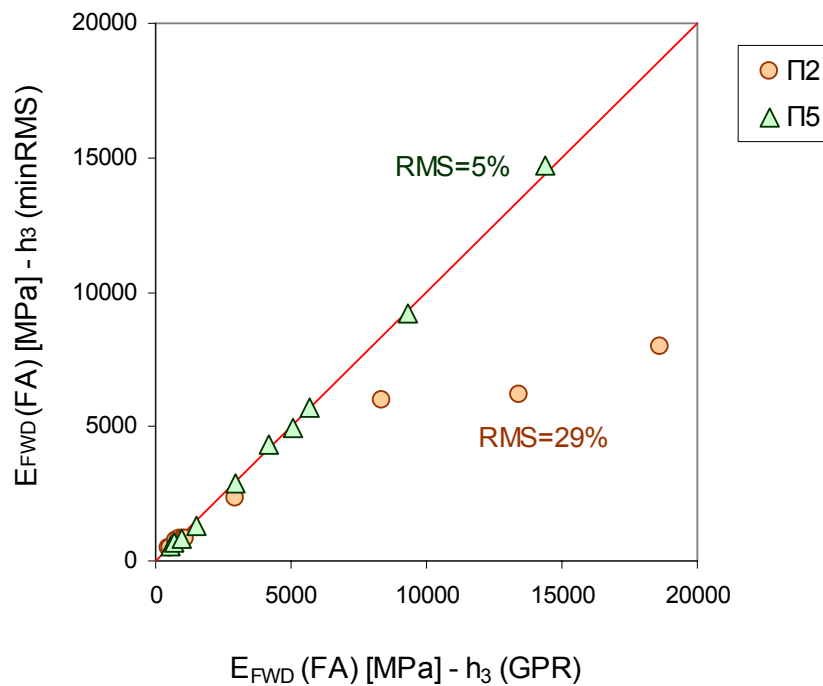


Σχήμα 5.30. Πάχος εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ (τμήμα ΚΑ1)

Υποσημείωση: **1) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **2) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **3) Π1, Π2, Π3, Π4, Π5:** Πυρήνες στο δεξιό ίχνος τροχών (Σχήμα 5.12)

Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών φαίνονται στο Παράρτημα στον Πίνακα Π5.3α (μέτρο δυσκαμψίας ασφατικών στρώσεων: E_{FWD} (AC)), στον Πίνακα Π5.3β (μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης: E_{FWD} (FA)) και στον Πίνακα Π5.3γ (σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης: E (comp)). Με εξαίρεση τη θέση πυρηνοληψίας Π2, όπου παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερη διαφορά ως προς την εκτίμηση του πάχους της στρώσης ΚΘΑ, η διαφορά των αποτελεσμάτων εκφραζόμενη με το σφάλμα RMS δεν ξεπέρασε το 6%, ενώ οι μικρότερες συγκριτικά τιμές του RMS παρατηρήθηκαν για το σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης. Για τις θέσεις πυρηνοληψίας Π2 και Π5, όπου υπολογίστηκε το μεγαλύτερο σφάλμα RMS, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης στο Σχήμα 5.31.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις υπόψη αναλύσεις είναι, ότι σε περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχουν στοιχεία αναλύσεων με το Σύστημα GPR, η διαδικασία minRMS μπορεί να δώσει εκτιμήσεις για το πάχος της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ, οι οποίες οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών.

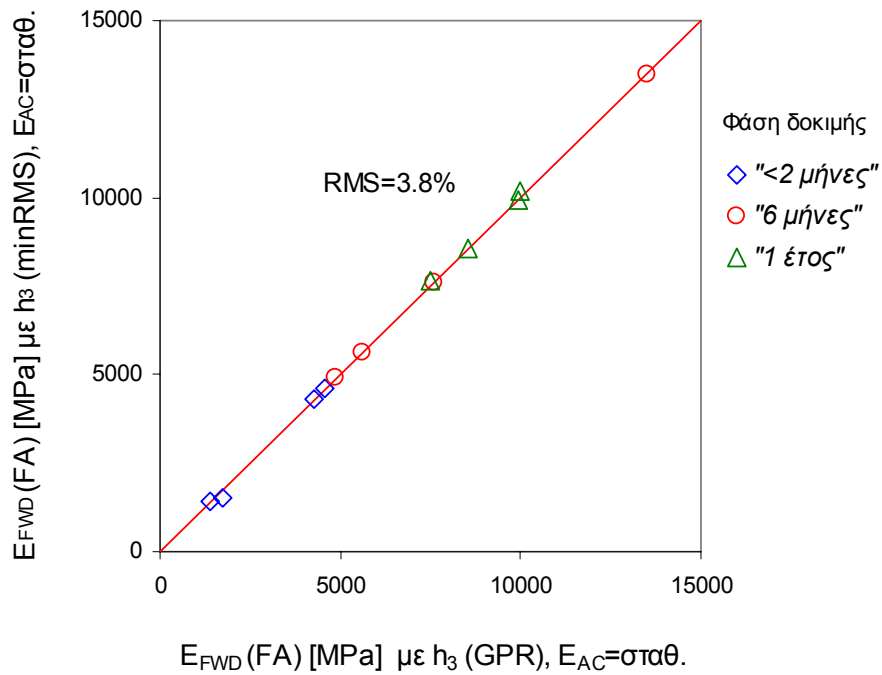


Σχήμα 5.31. Σύγκριση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με πάχος ΚΘΑ $h_3(GPR)$ & $h_3(minRMS)$

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS

Διαδικασία (5), σε σχέση με (4) Πίνακα 5.7

Ανάστροφοι υπολογισμοί με σταθερή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων ($E_{AC}=\text{σταθ.}$) έγιναν στις θέσεις πυρηνοληψίας Π1 και Π3 του πειραματικού τμήματος ΚΑ1. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών με εκτίμηση του πάχους της στρώσης ΚΘΑ από το Σύστημα GPR και βάσει του min RMS, δηλαδή της διαδικασίας (4) και (5) του Πίνακα 5.7 αντίστοιχα, έδωσε αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.4 του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.32.

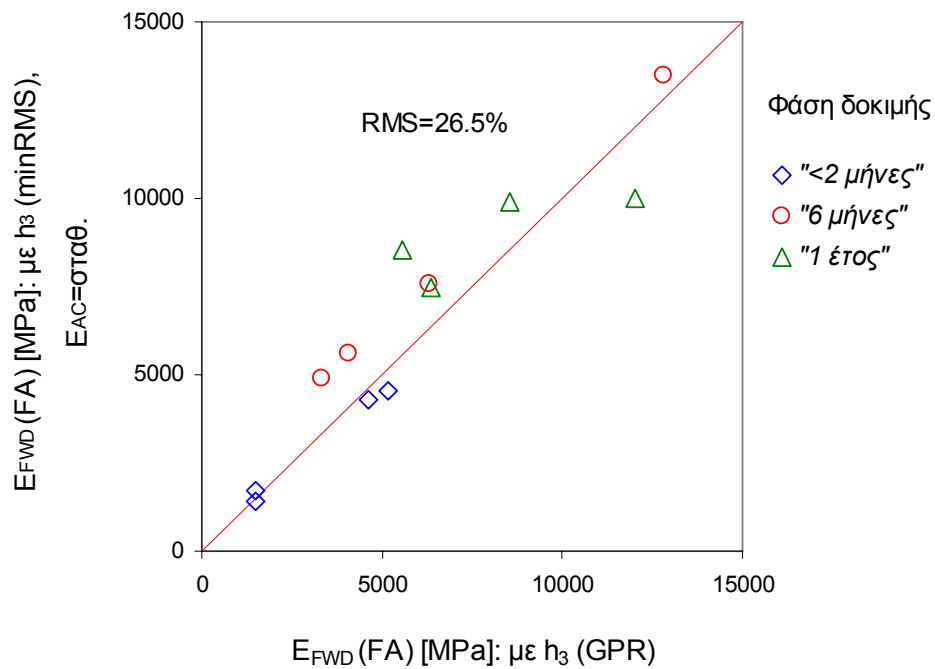


Σχήμα 5.32. Σύγκριση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με $E_{AC}=\text{σταθ.}$, με πάχος ΚΘΑ $h_3(\text{GPR})$ & $h_3(\text{minRMS})$

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) minRMS:** Εκτίμηση h_3 μέσω διαδικασίας min RMS. **4) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)

Διαδικασία (4), σε σχέση με (1) Πίνακα 5.7

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών με σταθερή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων ($E_{AC}=\text{σταθ.}$), σε σχέση με τη διαδικασία αναφοράς φαίνεται στον Πίνακα Π5.5α του Παραρτήματος και στο Σχήμα 5.33. Οι τιμές του πάχους της στρώσης ΚΘΑ εκτιμήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις, μέσω των αναλύσεων των καταγραφών με το Σύστημα GPR. Έγινε δηλαδή σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών της διαδικασίας (4), σε σχέση με τη διαδικασία (1) του Πίνακα 5.7.



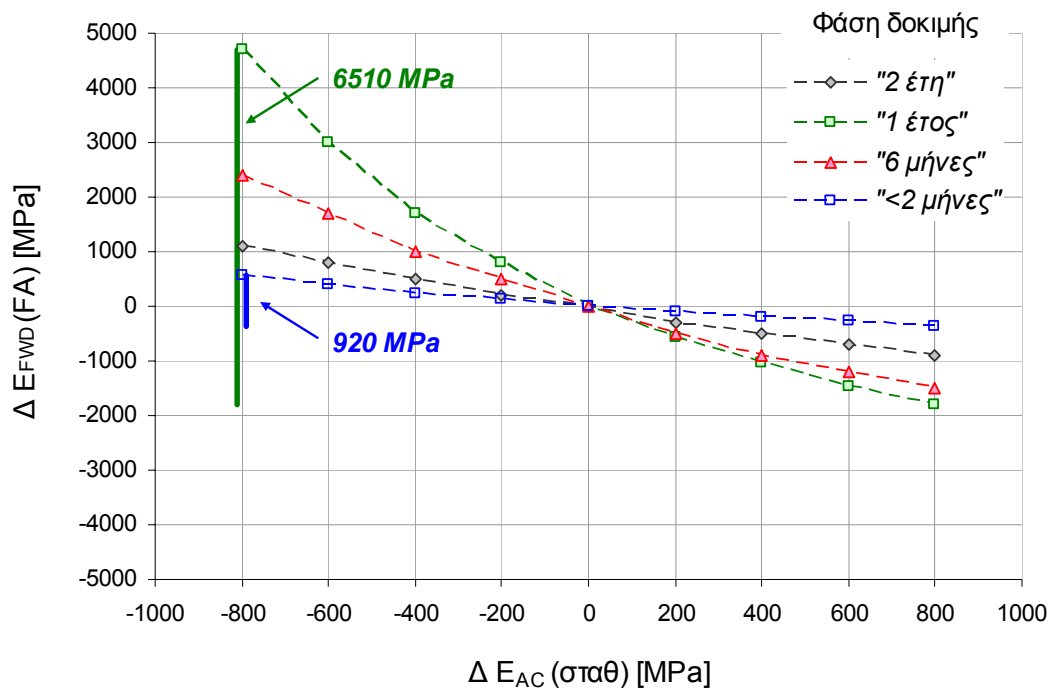
Σχήμα 5.33. Σύγκριση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με και χωρίς E_{AC} =σταθ., με πάχος ΚΘΑ h_3 από GPR

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) GPR:** Εκτίμηση h_3 μέσω GPR. **3) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)

Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές του $E_{FWD}(FA)$ με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση, τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π5.5β Παραρτήματος). Δεδομένου όμως, ότι οι διαφορές κυμάνθηκαν από -16.7% έως 54% και το σφάλμα RMS ήταν υψηλό (26.5%), υπάρχει αμφιβολία ως προς την αξιοπιστία της διαδικασίας εκτέλεσης ανάστροφων υπολογισμών με χρήση σταθερού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων.

Επειδή οι συνθήκες των εργαστηριακών δοκιμών είναι διαφορετικές, σε σχέση με τις επιτόπου δοκιμές και οι αλγόριθμοι διόρθωσης των αποτελεσμάτων εμπεριέχουν αβεβαιότητες, ελήφθησαν υπόψη κατά τους ανάστροφους υπολογισμούς διάφορες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων με μικρές διαφορές από τις (σταθερές) τιμές που εκτιμήθηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές. Εξετάστηκε έτσι η ευαισθησία των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης.

Για την εκτίμηση της ευαισθησίας των ανάστροφων υπολογισμών, μέσω της διαδικασίας θεώρησης σταθερού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων, έγιναν ανάστροφοι υπολογισμοί με διάφορες (σταθερές) τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων E_{AC} , οι οποίες διέφεραν κατά μέγιστη τιμή ± 800 MPa. Ενδεικτικά αποτελέσματα των διαφορών των τιμών του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης $E(FA)$ στη θέση πυρηνοληψίας Π3 (δεξιό ίχνος τροχών, πάχος ΚΘΑ h_3 από GPR) του πειραματικού τμήματος ΚΑ1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.34, όπου φαίνεται επίσης η ελάχιστη και μέγιστη διαφορά $\Delta E_{FWD}(FA)$, που ήταν 920 MPa και 6510 MPa αντίστοιχα.



Σχήμα 5.34. Διαφορές $E_{FWD}(FA)$, ως προς πιθανές διαφορές του (σταθερού) E_{AC}

Υποσημείωση: **1) $\Delta E_{FWD}(FA)$:** Διαφορές ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) ΔE_{AC} (σταθ):** Διαφορές (σταθερού) μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων. **3) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)

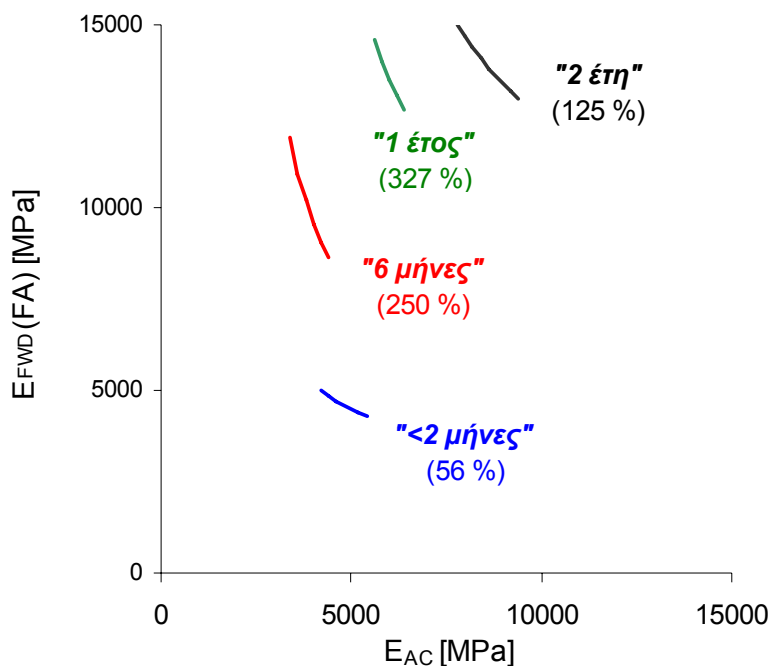
Η ποσοτικοποίηση των διαφορών έγινε μέσω της ποσοστιαίας μεταβολής του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $E_{FWD}(FA)$, ως προς τη διαφορά του (σταθερού) μέτρου δυσκαμψίας E_{AC} . Κατά τη διαδικασία αυτή, σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν συνεχώς αυξανόμενες διαφορές του $E_{FWD}(FA)$, με συνέπεια την αλλαγή της κλίσης της καμπύλης (αντίστοιχης με αυτές του Σχήματος 5.34). Για τον λόγο αυτό, μειώθηκε το εύρος των διαφορών E_{AC} , έτσι ώστε η καμπύλη να προσεγγίζει κατά το δυνατόν την ευθεία

γραμμή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της θέσης Π3 (δεξιό ίχνος τροχών) που φαίνεται στο Σχήμα 5.34, ελήφθη υπόψη εύρος ΔE_{AC} από -400 MPa έως +600 MPa, με ποσοστιαία μεταβολή του E_{FWD} (FA) 315%, ενώ στην περίπτωση του εύρους $\Delta E_{AC} \pm 800$ MPa, η ποσοστιαία μεταβολή του E_{FWD} (FA) θα ήταν 407%. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8 και γραφικά στο Σχήμα 5.35, για τη θέση πυρηνοληψίας Π1. Διαπιστώνεται, ότι σε πολλές περιπτώσεις η μεταβολή του E_{FWD} (FA) ήταν μεγαλύτερη του 100%. Αυτό πρακτικά σημαίνει μεγαλύτερη μεταβολή των ανάστροφα υπολογισμένων τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης, σε σχέση με τις διαφορές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων. Για το παράδειγμα που προαναφέρθηκε, η ποσοστιαία μεταβολή του E_{FWD} (FA) 315% συνεπάγεται μεταβολή της τιμής του E_{FWD} (FA) κατά 315 MPa, για κάθε 100 MPa πιθανής απόκλισης από τη (σταθερή) τιμή του E_{AC} που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία των ανάστροφων υπολογισμών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στην εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης. Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης ευαισθησίας, αλλά και το γεγονός ότι απαιτείται μεγάλο πλήθος πυρήνων (καταστρεπτικές δοκιμές) και εργαστηριακών δοκιμών, η υπόψη διαδικασία δεν θεωρήθηκε αρκούντως αξιόπιστη και εφικτή για περαιτέρω εφαρμογή στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης.

Πίνακας 5.8. Ποσοστιαία μεταβολή του E_{FWD} (FA), σε σχέση με μεταβολές του E_{AC}

Κωδικός δοκιμής	Μεταβολή E_{FWD} (FA) [%]			
	Θέση πυρηνοληψίας			
	Π1	Π1α	Π3	Π3α
«>2 μήνες»	16	21	56	51
«6 μήνες»	98	64	242	85
«1 έτος»	775	162	315	198
«2 έτη»	167	57	125	60

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) Π1, Π3:** Δεξιό ίχνος (Σχήμα 5.12). **3) Π1α, Π3α:** Ανάμεσα στα δύο ίχνη (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.35. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς πιθανές τιμές E_{AC}

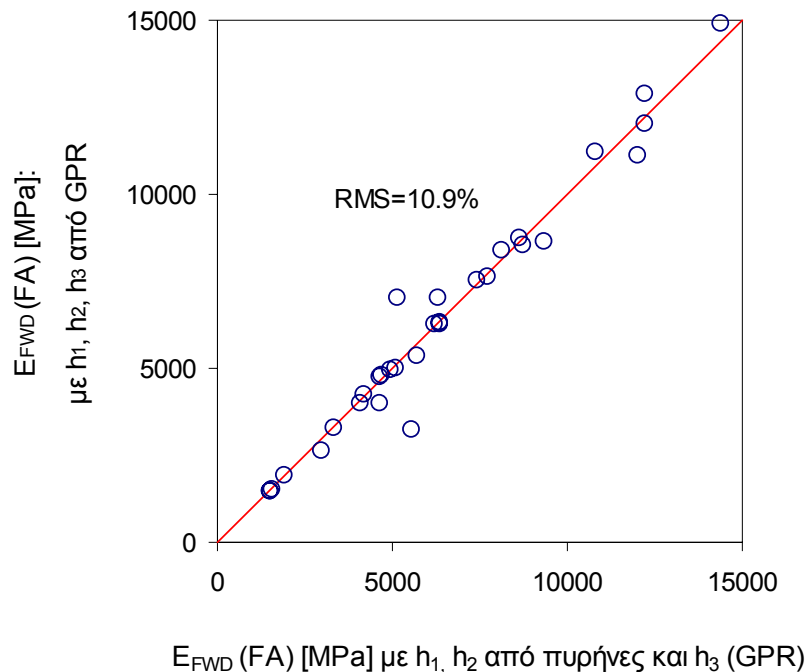
Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης στη θέση δοκιμής Π1 (Σχήμα 5.12). **2) E_{AC} :** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων (σταθερό). **3) "<2 μήνες", "6 μήνες", "1 έτος", "2 έτη":** Κωδικοί / φάσεις δοκιμών (Πίν. 5.3)

Διαδικασία (3), σε σχέση με (1) Πίνακα 5.7 (ημιάκαμπτο και εύκαμπτο οδόστρωμα)

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης, με εκτίμηση όλων των παχών των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος (πειραματικό τμήμα KA1) μέσω των αναλύσεων των καταγραφών με το Σύστημα GPR, σε σχέση με τη διαδικασία αναφοράς φαίνεται στον Πίνακα Π5.6α του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.36. Έγινε δηλαδή σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών της διαδικασίας (3), σε σχέση με τη διαδικασία (1) του Πίνακα 5.7.

Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές του E_{FWD} (FA) με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π5.6β Παραρτήματος). Η διαφορά (με εξαίρεση τρία αποτελέσματα) δεν ξεπέρασε κατ' απόλυτη τιμή το 14%, με μέση απόλυτη τιμή 5.7%. Επιπλέον, η συσχέτιση των αποτελεσμάτων ήταν

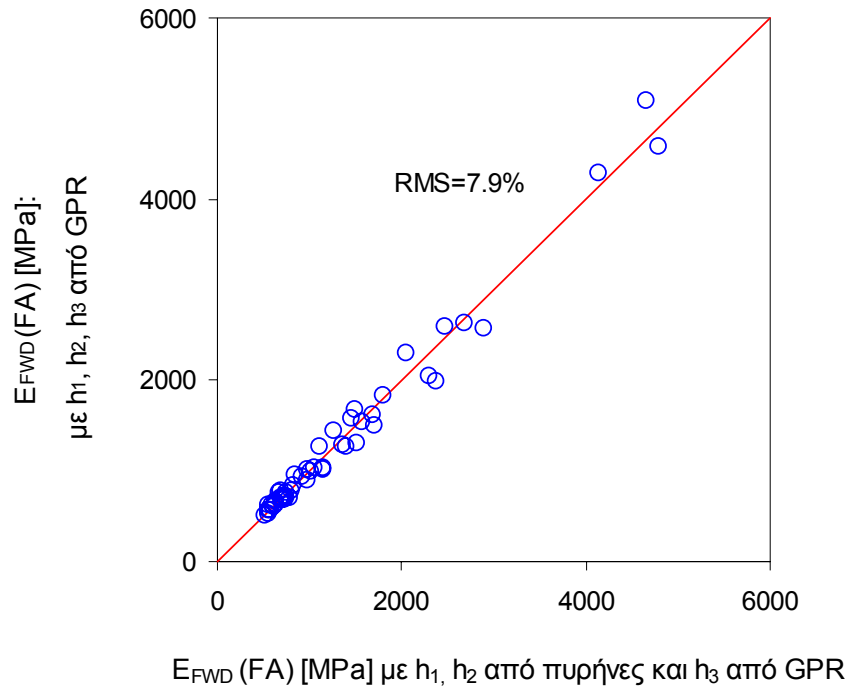
καλή (το σφάλμα RMS ήταν 10.9%). Κατά συνέπεια, η χρήση GPR για την εκτίμηση όλων των παχών των επιμέρους στρώσεων ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος, μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη διαδικασία, στο πλαίσιο των ανάστροφων υπολογισμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης.



Σχήμα 5.36. Σύγκριση τιμών $E_{FWD} (FA)$ με h_1, h_2 από πυρήνες και GPR (πάχος ΚΘΑ h_3 από GPR)

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD} (FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης σε ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα. **2) h_1 :** Πάχος ασφαλτικών στρώσεων. **3) h_2 :** Πάχος κατεργασμένης στρώσης. **4) GPR:** Εκτίμηση πάχους στρώσης / στρώσεων μέσω GPR

Αντίστοιχη σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης, με εκτίμηση όλων των παχών των επιμέρους στρώσεων μέσω των αναλύσεων των καταγραφών με το Σύστημα GPR, σε σχέση με τη διαδικασία αναφοράς, έγινε και στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος (πειραματικό τμήμα ΛΑ1). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα Π5.7α του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.37.



Σχήμα 5.37. Σύγκριση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με h_1, h_2 από πυρήνες και GPR (πάχος h_3 από GPR)

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης σε ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα, **2) h_1 :** Πάχος ασφαλικών στρώσεων. **3) h_2 :** Πάχος κατεργασμένης στρώσης. **4) h_3 :** Πάχος στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα. **5) GPR:** Εκτίμηση πάχους στρώσης/ στρώσεων μέσω GPR

Ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων έδειξε ότι τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π5.7β Παραρτήματος). Η διαφορά κυμάνθηκε μεταξύ -15.6% και 15.1%, με μέση απόλυτη τιμή 6.3%. Επιπλέον, η συσχέτιση των αποτελεσμάτων ήταν καλή (το σφάλμα RMS ήταν 7.9%). Κατά συνέπεια, η χρήση GPR για την εκτίμηση όλων των παχών των επιμέρους στρώσεων ανακυκλωμένου εύκαμπτου οδοστρώματος, μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη διαδικασία, στο πλαίσιο των ανάστροφων υπολογισμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης.

5.4.2.5 Επιμέρους συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη ευαισθησίας σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών είναι τα ακόλουθα.

- Για την ακριβέστερη εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού μέσω της διαδικασίας των ανάστροφων υπολογισμών, είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός της εναπομένουσας στρώσης από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) στο στατικό πρότυπο του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος. Αυτό πιστεύεται ότι οφείλεται στη μεγάλη δυσκαμψία της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ και στο σχετικά μικρό πάχος της, με συνέπεια να μη μπορεί να θεωρηθεί ως στρώση έδρασης οδοστρώματος με άπειρο πάχος στο στατικό πρότυπο των ανάστροφων υπολογισμών.
- Η εκτίμηση του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στο ανακυκλωμένο ημιακάμπτο οδόστρωμα με αξιόπιστη μέθοδο είναι σημαντικός παράγοντας για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών.
- Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις διακυμάνσεις του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα.
- Η διαδικασία εκτίμησης του πάχους της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στο ανακυκλωμένο ημιακάμπτο οδόστρωμα, μέσω της διαδικασίας προσδιορισμού του $\min$ RMS είναι χρονοβόρα και προϋποθέτει πολλές φορές την κρίση του αναλυτή. Σε περιπτώσεις πάντως, κατά τις οποίες δεν είναι διαθέσιμα στοιχεία αναλύσεων με το Σύστημα GPR, μπορεί να δώσει εκτιμήσεις για το πάχος της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ, οι οποίες οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών.
- Η διαδικασία με την οποία λαμβάνεται σταθερό το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων δεν θεωρήθηκε αρκούντως αξιόπιστη για εφαρμογή σε ανάστροφους υπολογισμούς εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού. Επιπλέον, είναι μέθοδος χρονοβόρα και προϋποθέτει την αποκοπή μεγάλου πλήθους πυρήνων (καταστρεπτικές δοκιμές) και την εκτέλεση μεγάλου αριθμού εργαστηριακών δοκιμών.
- Η χρήση του Συστήματος GPR για την εκτίμηση των παχών όλων των επιμέρους στρώσεων μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη διαδικασία, στο πλαίσιο των ανάστροφων υπολογισμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των διαδικασιών εκτίμησης του πάχους της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Ομοιότητα αποτελεσμάτων ανάστροφων υπολογισμών, κατόπιν σύγκρισης των διαδικασιών εκτίμησης των παχών των επιμέρους στρώσεων

$h_{KΘA} = h_3$		h_3 (GPR) (διαδικασία αναφοράς)	h_3 (minRMS)	h (GPR)	h_3 (GPR) & $E_{AC=σταθ.}$
		(1)	(2*)	(3)	(4*)
h_3 (minRMS)	(2*)	NAI			
h (GPR)	(3)	NAI			
h_3 (GPR) & $E_{AC=σταθ.}$	(4*)	OXI			
h_3 (minRMS) & $E_{AC=σταθ.}$	(5*)				NAI

Υποσημείωση: Διαδικασίες εκτίμησης παχών (1) έως (5) από Πίνακα 5.7, (2*), (4*), (5*) διαδικασίες δύσκολα εφαρμόσιμες

5.4.3 Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων και κατά συνέπεια της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Για τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, οι υπολογισμοί έγιναν στις θέσεις πυρηνοληψίας του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου (πειραματικό τμήμα ΚΑ1) και ευκάμπτου (πειραματικό τμήμα ΛΑ1) οδοστρώματος, όπου υπήρχε επαρκής πληροφόρηση σχετικά με τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων και τις κατεργασμένης στρώσης. Έγιναν δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη, ώστε να υπάρχει σύγκριση της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας, σε σχέση με τις θέσεις, όπου δεν υπάρχει φόρτιση. Όλες οι τιμές των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης είναι «διορθωμένες» στη θερμοκρασία αναφοράς 25°C. Η επιλογή της συγκεκριμένης θερμοκρασίας έγινε για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, επειδή είναι πλησιέστερη στις επιτόπου μετρηθείσες θερμοκρασίες κατά τις διάφορες φάσεις των επιτόπου δοκιμών.

5.4.3.1 Κατεργασμένη με αφρώδη άσφαλτο στρώση

Τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης παρουσιάζονται στους Πίνακες Π6.1 και Π6.4 του Παραρτήματος. Η εξέλιξη χρονικά της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης E_{FWD} (FA) παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 5.38α και 5.38β για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και στα Σχήματα 5.39α και 5.39β για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών.

Η καλύτερη συσχέτιση του E_{FWD} (FA) με τον χρόνο από την κατασκευή (μήνες) είναι καμπύλη εκθετικής μορφής. Οι συντελεστές α_2 και β_2 της σχέσης (5.12) παρουσιάζονται στον Πίνακα Π6.7 του Παραρτήματος. Με βάση τις συσχετίσεις αυτές, είναι δυνατή η εκτίμηση του E_{FWD} (FA) και κατ' επέκταση της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού σε διάφορες χρονικές περιόδους.

$$E_{FWD}(FA) = \alpha_2 * t^{\beta_2} \quad (5.12)$$

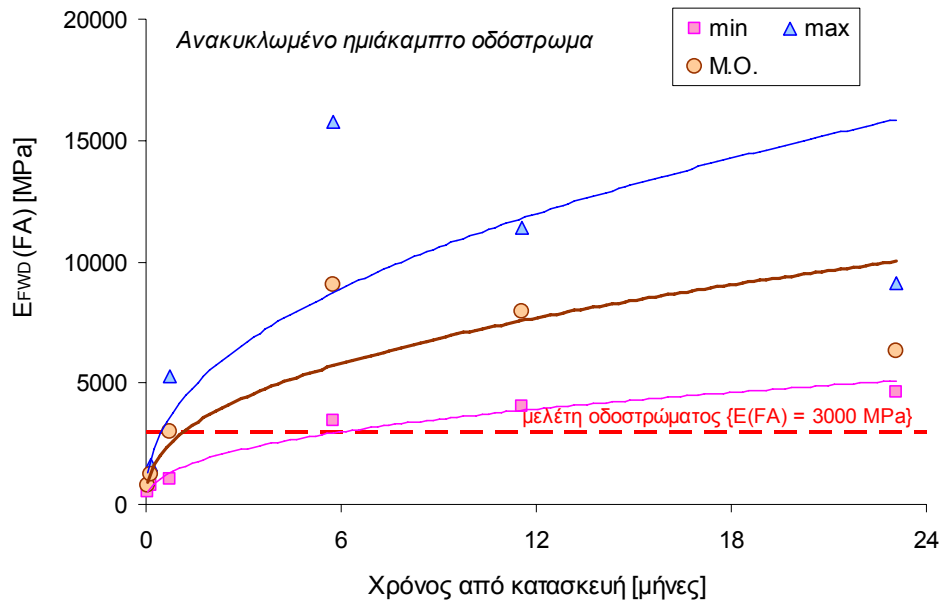
Όπου,

$E_{FWD}(FA)$: μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης

t: χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

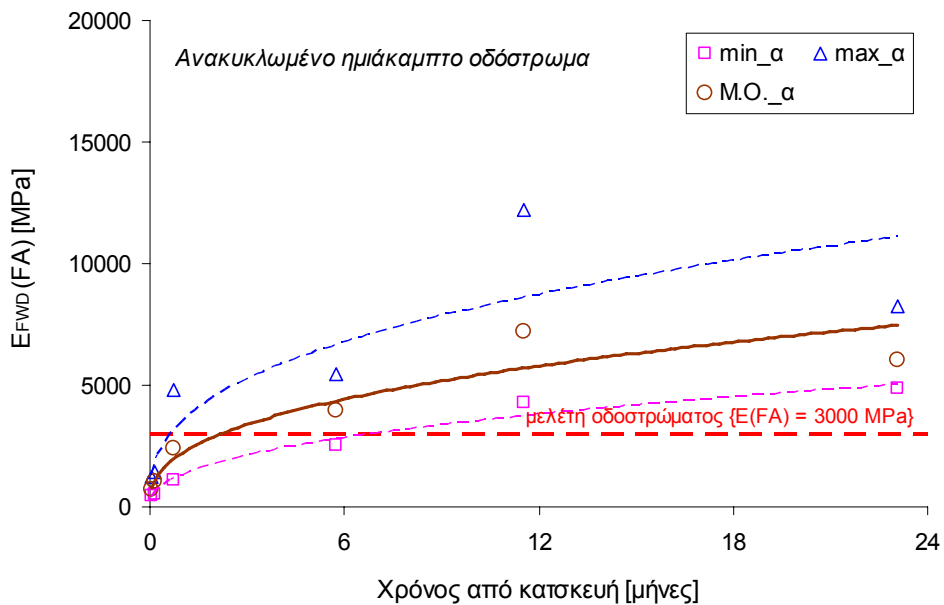
α_2, β_2 : συντελεστές (Πίνακας Π6.7 του Παραρτήματος)

Οι συσχετίσεις του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού με τον χρόνο έδειξαν ότι έξι μήνες μετά την κατασκευή σε όλες σχεδόν τις θέσεις δοκιμών υπερκεράστηκε η τιμή της μελέτης του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος (3000 MPa). Όσον αφορά στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα, σε μία θέση δοκιμής δεν επιτεύχθηκε η τιμή της μελέτης (1500 MPa). Οι μέσοι όροι (Μ.Ο.) των τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού έδειξαν αυξανόμενη τάση με τον χρόνο, με υπερκερασμό των τιμών που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) οδοστρώματος σε χρονικό διάστημα μικρότερο των τριών μηνών.



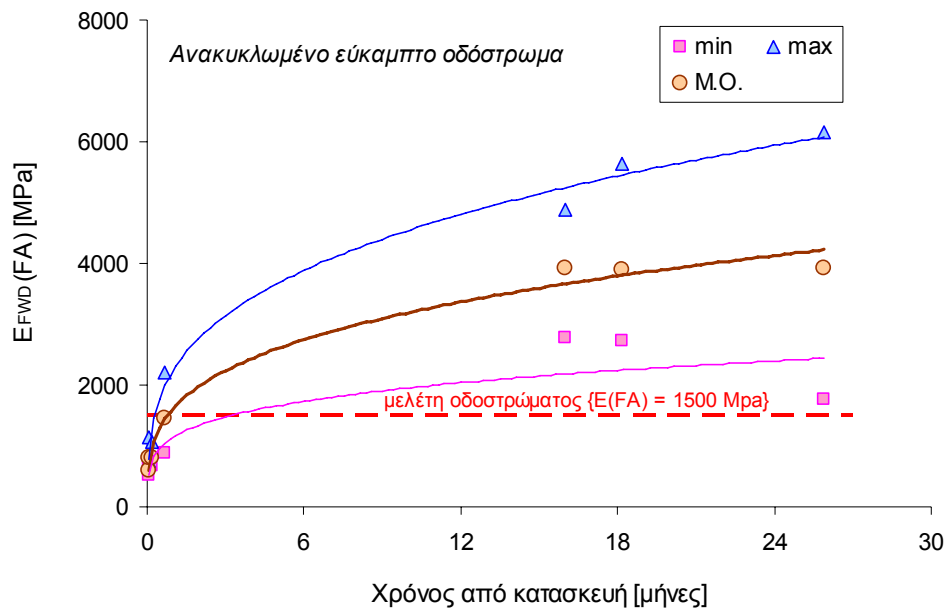
Σχήμα 5.38α. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



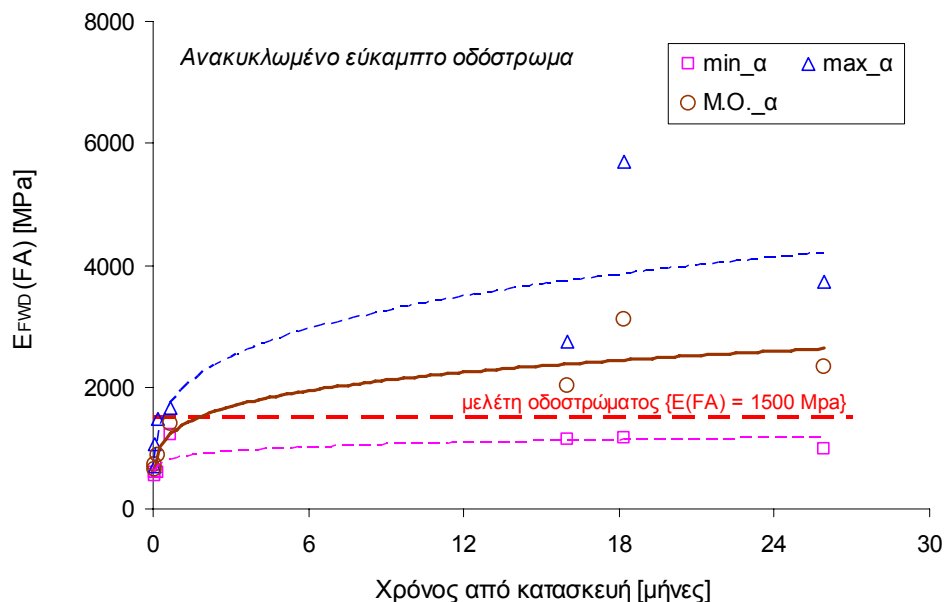
Σχήμα 5.38β. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 5.39α. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



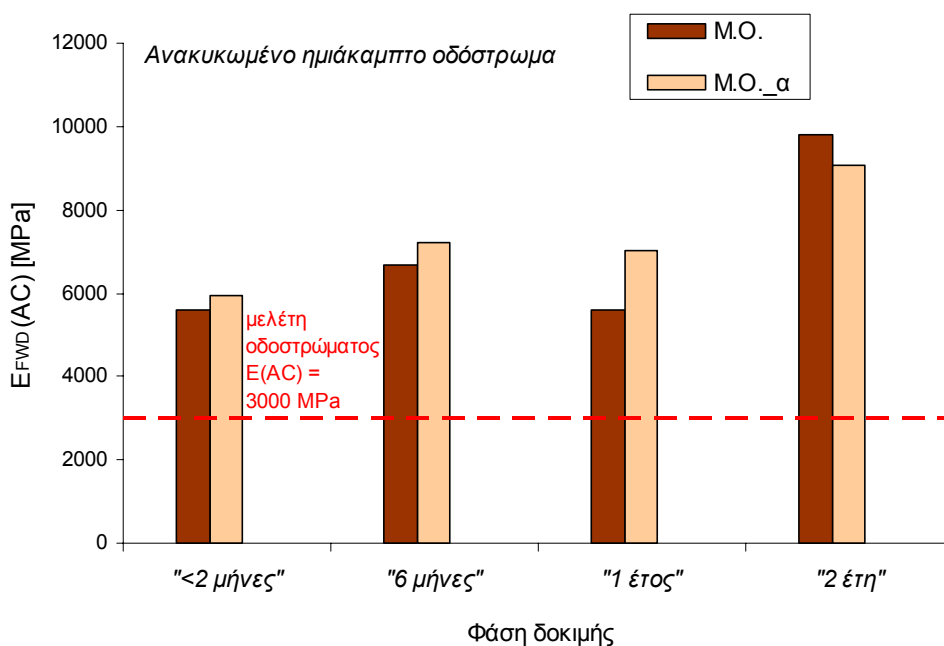
Σχήμα 5.39β. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) min_α:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_α:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών

5.3.2.2 Ασφαλτικές στρώσεις

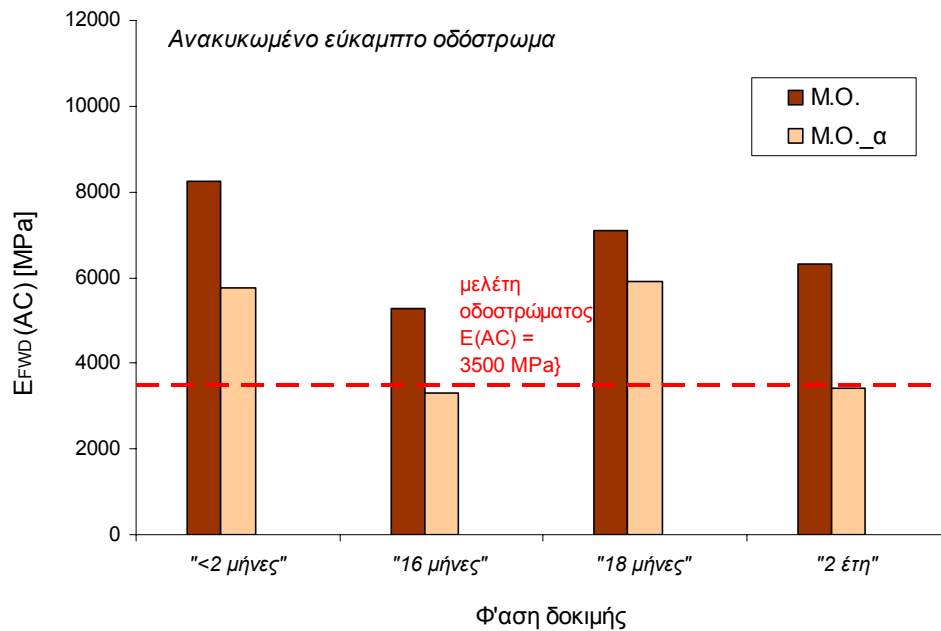
Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων (Μ.Ο.) παρουσιάζονται στους Πίνακες Π6.2 και Π6.5 του Παραρτήματος και γραφικά στα Σχήματα 5.40 και 5.41, για το ημιάκαμπτο και εύκαμπτο οδόστρωμα αντίστοιχα. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών.

Οι μέσες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων ήταν υψηλές ήδη από τις πρώτες ημέρες μετά την απόδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία. Δεν παρατηρήθηκε συγκεκριμένη τάση σχετικά με την εξέλιξη του μέτρου δυσκαμψίας με τον χρόνο, γεγονός το οποίο θεωρείται αναμενόμενο, καθώς δεν απαιτείται χρόνος «ωρίμανσης» για τα ασφατομίγματα.



Σχήμα 5.40. Τιμές $E_{FWD}(AC)$ σε διάφορες φάσεις δοκιμών

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(AC)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων. **2) $E(AC)$:** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) Μ.Ο.:** Μέσος όρος τιμών στο δεξιό ίχνη. **4) Μ.Ο._α:** Μέσος όρος τιμών ανάμεσα στα δύο ίχνη



Σχήμα 5.41. Τιμές E_{FWD} (AC) σε διάφορες φάσεις δοκιμών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων. **2) E (AC):** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων που ελήφθη υπόψη κατά τη μελέτη του οδοστρώματος. **3) M.O.:** Μέσος όρος τιμών στο δεξιό ίχνος. **4) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών ανάμεσα στα δύο ίχνη

Λόγω της μη επαρκούς «ωρίμανσης» της κατεργασμένης στρώσης κατά το χρονικό διάστημα των πρώτων ημερών μετά την κατασκευή, μεγάλη σημασία αποκτά η παρουσία ασφαλτικών στρώσεων ικανού πάχους και φέρουσας ικανότητας. Από τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές του μέσου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων, σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Το γεγονός όμως αυτό δεν μπορεί να αποτελέσει από μόνο του ένδειξη επαρκούς φέρουσας ικανότητας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος κατά το υπόψη αρχικό χρονικό διάστημα, χωρίς συνυπολογισμό της δομικής κατάστασης της κατεργασμένης στρώσης. Για τον σκοπό αυτό, υιοθετήθηκε η απλουστευμένη θεώρηση ενοποιημένης της κατεργασμένης στρώσης με τις ασφαλτικές στρώσεις και οι ανάστροφοι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν για την εκτίμηση του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο 5.4.3.3.

5.4.3.3 Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης

Για την εκτίμηση της συνεισφοράς των ασφαλτικών στρώσεων στην επιτόπου συμπεριφορά κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, υπολογίστηκε το

σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης $E (comp)$, όπως αυτό ορίστηκε στο Σχήμα 5.22 (υποκεφάλαιο 5.4.1), ως απλουστευμένος δείκτης δομικής κατάστασης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες Π6.3 και Π6.6 του Παραρτήματος. Η εξέλιξη χρονικά της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής του ανάστροφα υπολογισμένου $E (comp)$ παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 5.42α και 5.42β για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και στα Σχήματα 5.43α και 5.43β για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών.

Η καλύτερη συσχέτιση του $E (comp)$ με τον χρόνο από την κατασκευή (μήνες) είναι καμπύλη εκθετικής μορφής. Οι συντελεστές α_3 και β_3 της σχέσης (5.13) παρουσιάζονται στον Πίνακα Π6.8 του Παραρτήματος. Με βάση τις συσχετίσεις αυτές, είναι δυνατή η εκτίμηση του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $E (comp)$ σε διάφορες χρονικές περιόδους.

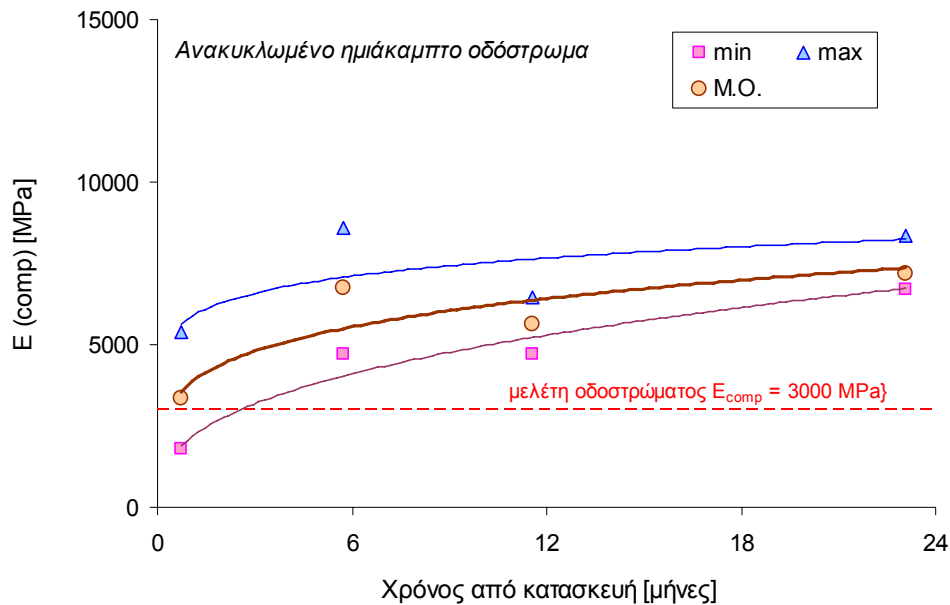
$$E (comp) = \alpha_3 * t^{\beta_3} \quad (5.13)$$

Όπου,

$E (comp)$: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης

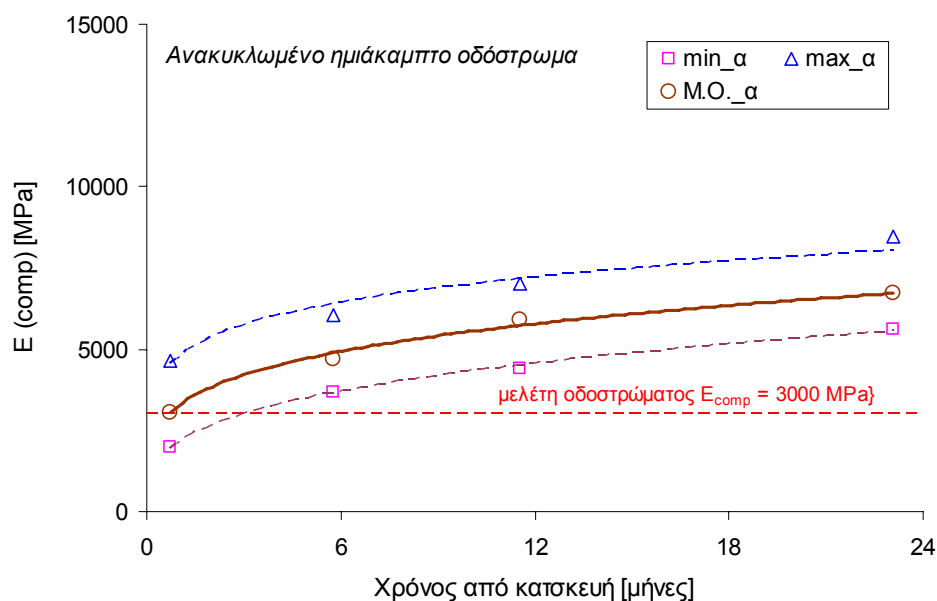
t : χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

α_3, β_3 : συντελεστές (Πίνακας Π6.8 του Παραρτήματος)



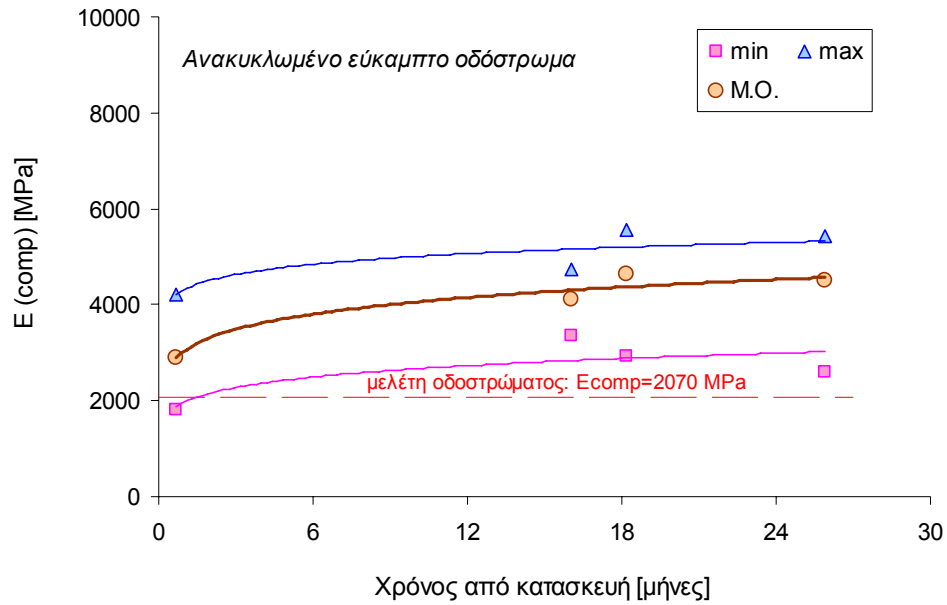
Σχήμα 5.42α. Τιμές E_{comp} ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



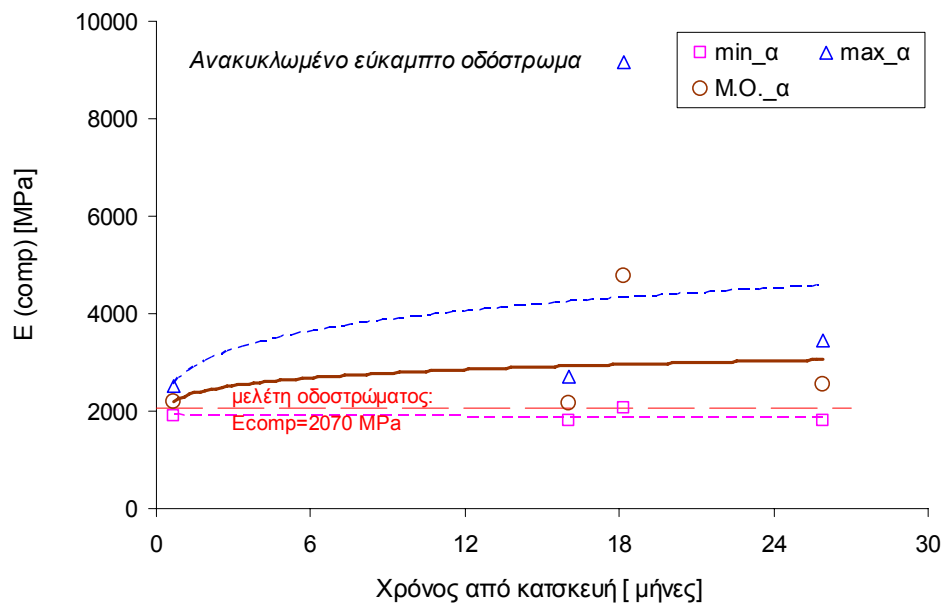
Σχήμα 5.42β. Τιμές E_{comp} ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min_a:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_a:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._a:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 5.43α. Τιμές $E (comp)$ ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) $E (comp)$:** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 5.43β. Τιμές $E (comp)$ ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) $E (comp)$:** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min_a:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_a:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._a:** Μέσος όρος τιμών

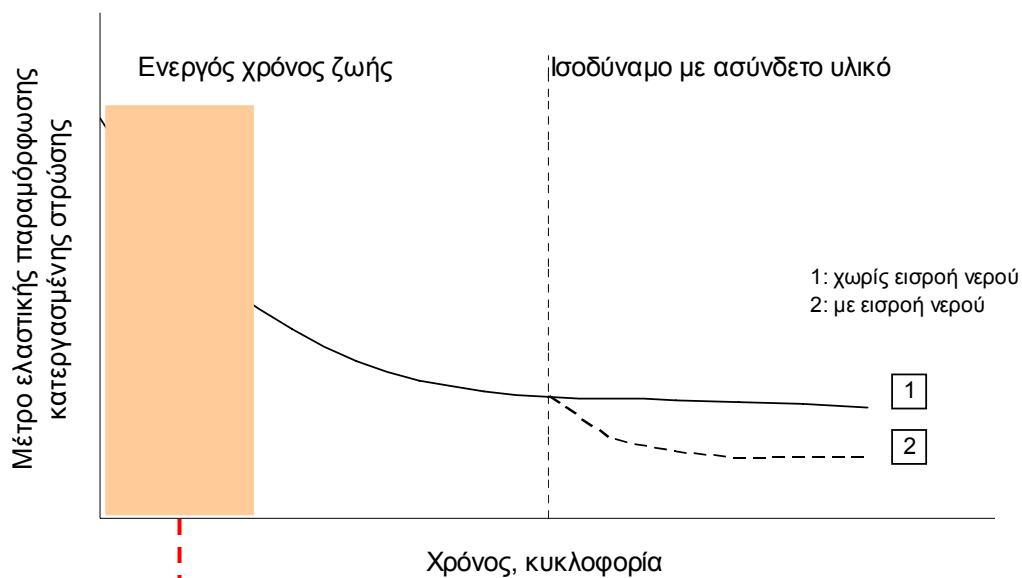
Οι μέσες τιμές του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης έδειξαν αυξανόμενη τάση με τον χρόνο, με υπερκερασμό των τιμών που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του οδοστρώματος σε χρονικό διάστημα μικρότερο από ένα μήνα. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη, ότι το ανακυκλωμένο οδόστρωμα παρουσίασε μηχανικά χαρακτηριστικά αντίστοιχα με τα προβλεπόμενα στην αναλυτική μελέτη, ήδη από το αρχικό διάστημα λειτουργίας του. Αυτό, παρά το γεγονός ότι απαιτήθηκε χρονικό διάστημα περίπου τριών μηνών «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, ώστε να υπερκεραστούν οι τιμές της αναλυτικής μελέτης οδοστρώματος από τις μέσες τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης. Κατά συνέπεια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι ασφαλικές στρώσεις συνέβαλαν στην επίτευξη επαρκούς δομικής κατάστασης του οδοστρώματος δύο περίπου μήνες πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.

5.4.3.4 Επιμέρους συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος προέκυψαν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα.

- Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού ήταν μεγαλύτερο κατά τις δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάμεσα στα δύο ίχνη. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη, ότι κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος τα φορτία κυκλοφορίας δεν έχουν αρνητική επίδραση στη δομική κατάσταση της κατεργασμένης στρώσης, πιθανόν δε να επιδρούν θετικά, λόγω ενδεχόμενης περαιτέρω συμπύκνωσης της στρώσης.
- Με βάση τις τιμές που ελήφθησαν υπόψη κατά τη μελέτη του ανακυκλωμένου οδοστρώματος προέκυψε, ότι έξι περίπου μήνες από την κατασκευή ολοκληρώθηκε η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.
- Παρατηρήθηκε τάση αύξησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού με τον χρόνο, με τάση σταθεροποίησης ένα έτος μετά την κατασκευή σε τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ανάστροφα υπολογισμένων τιμών και των εργαστηριακών αποτελεσμάτων εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού. Αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται σε διαφορές τόσο στον τρόπο παρασκευής και συμπύκνωσης των δοκιμών, σε σχέση με το υλικό που παράγεται και συμπυκνώνεται επιτόπου, όσο και στον τρόπο εκτέλεσης της δοκιμής στο εργαστήριο.

- Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.11, η διεθνώς επικρατούσα άποψη είναι, ότι υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας καταστρέφεται η συνοχή του ανακυκλωμένου και κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού, με συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (Asphalt Academy 2002), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.44α. Τα συμπεράσματα αυτά προέκυψαν μετά από εκτέλεση δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (Heavy Vehicle Simulator: HVS). Σύμφωνα όμως με την παρούσα διερεύνηση, η επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας, υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (Real Loading Testing: RLT) ήταν εντελώς διαφορετική (Σχήμα 5.44β). Η διαφοροποίηση έγκειται κατά πρώτον στο γεγονός ότι το κατεργασμένο υλικό «ωριμάζει», παρουσιάζεται δηλαδή αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με τον χρόνο. Το σημαντικό αυτό στοιχείο της συμπεριφοράς του κατεργασμένου υλικού, δεν περιλαμβάνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.44α και μπορεί να θεωρηθεί ως παράλειψη. Κατά δεύτερον, από την παρούσα διερεύνηση παρατηρήθηκε σταθεροποίηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού μετά την ολοκλήρωση της «ωρίμανσής» του. Το γεγονός αυτό, που διαπιστώθηκε επιτόπου όχι μόνο σε θέσεις όπου δεν υπάρχει φόρτιση (ανάμεσα στα δύο ίχνη), αλλά και σε θέσεις που φορτίζεται το οδόστρωμα (δεξιό ίχνος τροχών), έδειξε εντελώς διαφορετική συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού, σε σχέση με τη διεθνώς επικρατούσα άποψη.
- Οι ασφαλικές στρώσεις συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στη δομικής επάρκεια του οδοστρώματος κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας, πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.



Σχήμα 5.44α. Συμπεριφορά κατεργασμένης στρώσης, σύμφωνα με τη διεθνώς επικρατούσα άποψη

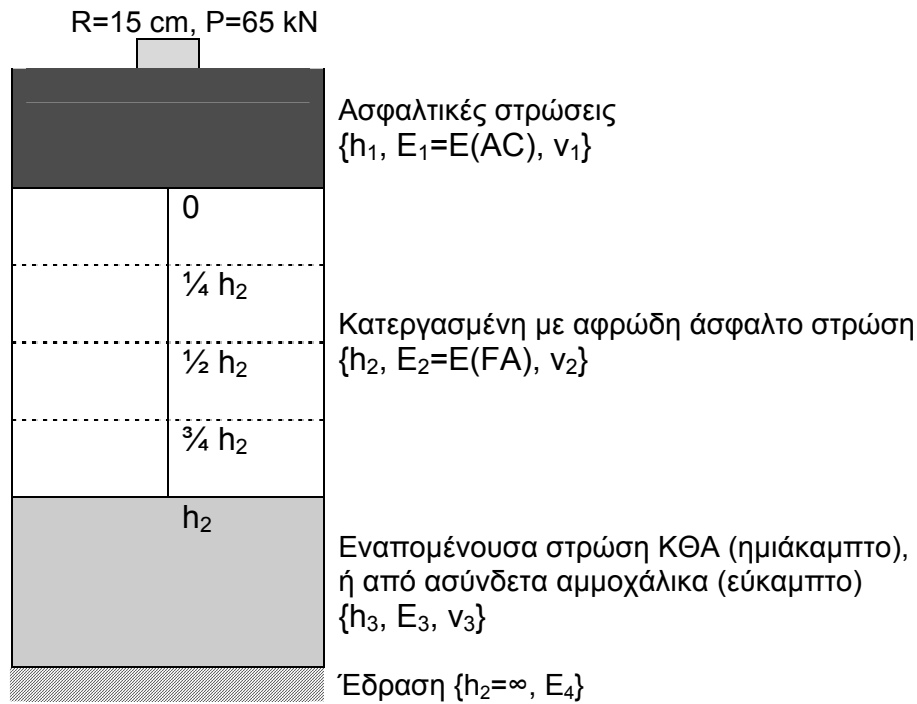


Σχήμα 5.44β. Συμπεριφορά κατεργασμένης στρώσης, σύμφωνα με την παρούσα διερεύνηση

5.5. Ανάλυση κρίσιμων εντατικών μεγεθών (strain response analysis)

Υπολογίστηκε η οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_r) στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, καθώς και σε χαρακτηριστικές θέσεις στο «σώμα» αυτής και συγκεκριμένα στη διεπιφάνεια και σε βάθος $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ και $\frac{3}{4}$ από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων,

σύμφωνα με το στατικό πρότυπο που φαίνεται στο Σχήμα 4.45. Για την εκτίμηση των κρίσιμων εντατικών / παραμορφωσιακών μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, τα μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης και ο λόγος του Poisson των υλικών.



Σχήμα 5.45. Στατικό πρότυπο ανακυκλωμένου οδοστρώματος για υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών μεγεθών

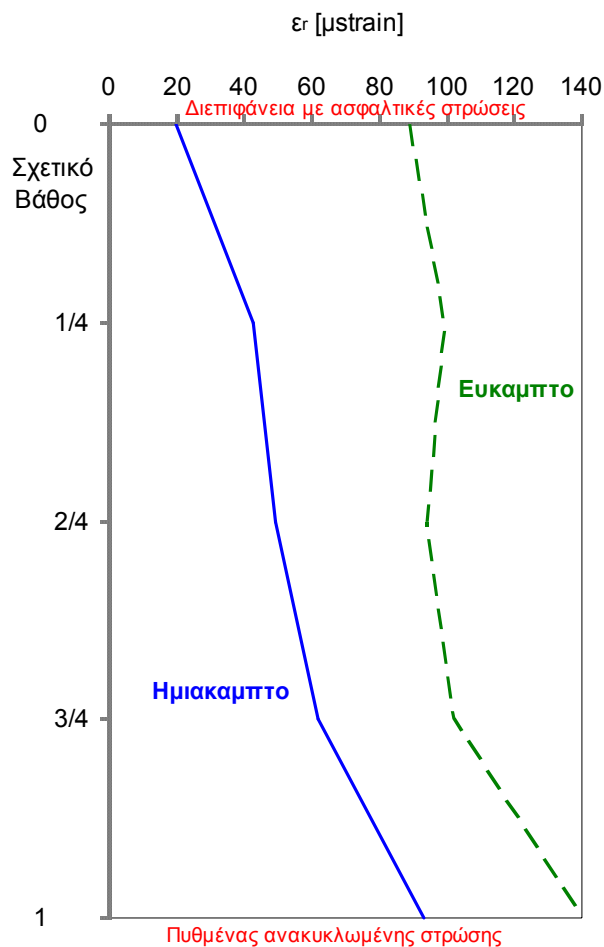
Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (multi-layer theory: MLT) (BISAR 1998), καθώς και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (finite elements: FE) (ABAQUS 2000), για σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5.5.1 Ανάλυση με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT)

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Bisar γραμμικώς ελαστικής ανάλυσης (BISAR 1998) με φορτίο 65 kN σε κύκλο ακτίνας 15 cm στα πειραματικά τμήματα KA1 (ημιάκαμπτο οδόστρωμα) και ΛΑ1 (εύκαμπτο οδόστρωμα), στις θέσεις των πυρηνοληψιών, στο δεξιό ίχνος τροχών. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών (μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης), καθώς και τα στοιχεία των παχών από τις πυρηνοληψίες για τις ασφαλτικές στρώσεις και την κατεργασμένη στρώση και τα στοιχεία από το Σύστημα GPR για την εναπομένουσα στρώση ΚΘΑ και των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα. Ελήφθησαν υπόψη οι δοκιμές επί της αντιστοιχισθείσας στρώσης

κατά το αρχικό χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή, δηλαδή την εφαρμογή της ανακύκλωσης (κωδικός δοκιμής: <2 μήνες), καθώς και μετά από παρέλευση χρονικού διαστήματος >1 έτους (κωδικός δοκιμής: 1 έτος για το ημιάκαμπτο και 16 μήνες για το εύκαμπτο οδόστρωμα). Η θερμοκρασία στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης, για τις υπόψη δοκιμές κυμάνθηκε μεταξύ 22°C και 26°C, οπότε κρίθηκε σκόπιμο να μη γίνει αναγωγή των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών στη θερμοκρασία αναφοράς.

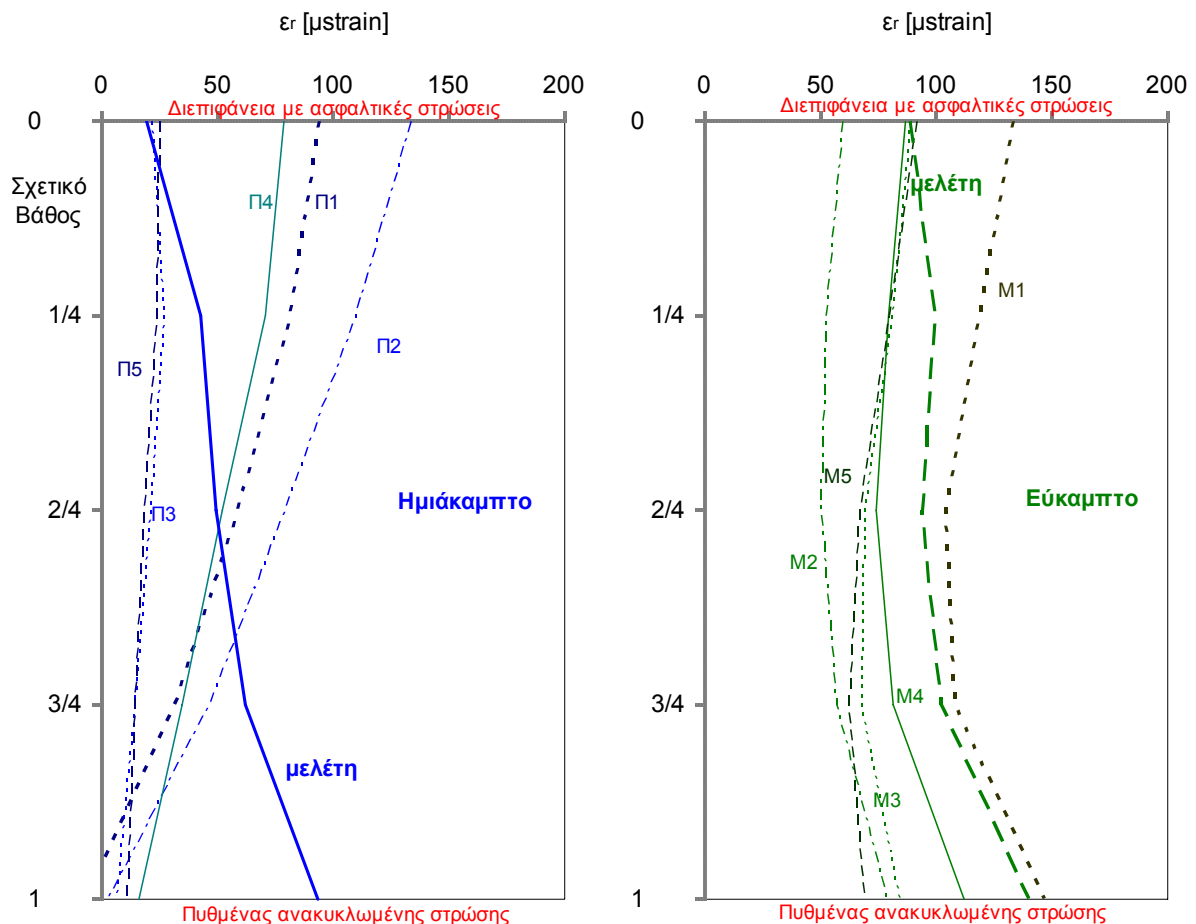
Εκτός από τα επιτόπου συλλεχθέντα στοιχεία, χρησιμοποιήθηκαν και τα στοιχεία από τις παραδοχές της μελέτης του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου και εύκαμπτου οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 του Παραρτήματος και γραφικά στο Σχήμα 5.46. Οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, όπου σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης οδοστρώματος, εντοπίζονται οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Επιπλέον, οι ανηγμένες παραμορφώσεις στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα παρουσίασαν μικρότερες τιμές, σε σχέση με το εύκαμπτο οδόστρωμα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, λόγω των μεγαλύτερων τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης και της παρουσίας της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα, που έχει ως συνέπεια η στρώση του κατεργασμένου υλικού να εδράζεται σε στρώση με πιο δύσκαμπτο υλικό (ΚΘΑ, σε σχέση με ασύνδετα αμμοχάλικα).



Σχήμα 5.46. Τιμές ϵ_r (MLT), στοιχεία από μελέτη οδοστρώματος

Υποσημείωση: 1) ϵ_r : Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων

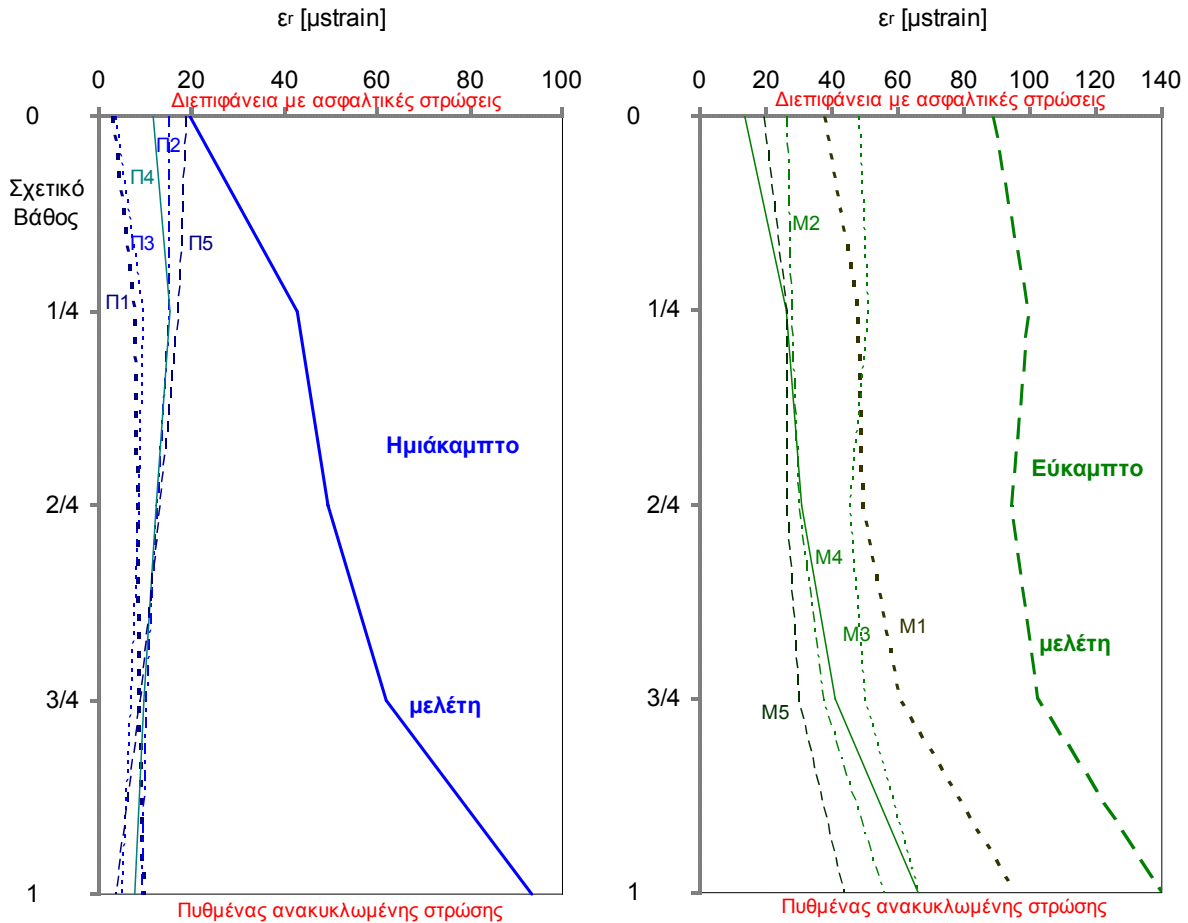
Τα αποτελέσματα για κάθε θέση δοκιμής / πυρηνοληψίας παρουσιάζονται στους Πίνακες Π7.2 και Π7.3 του Παραρτήματος και γραφικά στα Σχήματα 5.47 και 4.48 για τις φάσεις δοκιμών <2 μηνών και >1 έτους μετά την κατασκευή αντίστοιχα.



Σχήμα 5.47. Τιμές ε_r (MLT), <2 μήνες μετά την κατασκευή

Υποσημείωση: 1) ε_r: Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) μελέτη:** Αναλύσεις με βάση τα στοιχεία της μελέτης του οδοστρώματος. **3) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων. **4) P1, P2, P3, P4, P5:** Θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδοστρώμα (Σχήμα 5.12). **5) M1, M2, M3, M4, M5:** Αντίστοιχες θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδοστρώμα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.47, κατά τις δοκιμές <2 μήνες μετά την κατασκευή, η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση ε_r υπολογίστηκε στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος στο άνω τμήμα της κατεργασμένης στρώσης, εμφανίζοντας διαφορετική συμπεριφορά, σε σχέση με τις παραδοχές που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του οδοστρώματος.



Σχήμα 5.48. Τιμές ε_r (MLT), >1 έτος μετά την κατασκευή

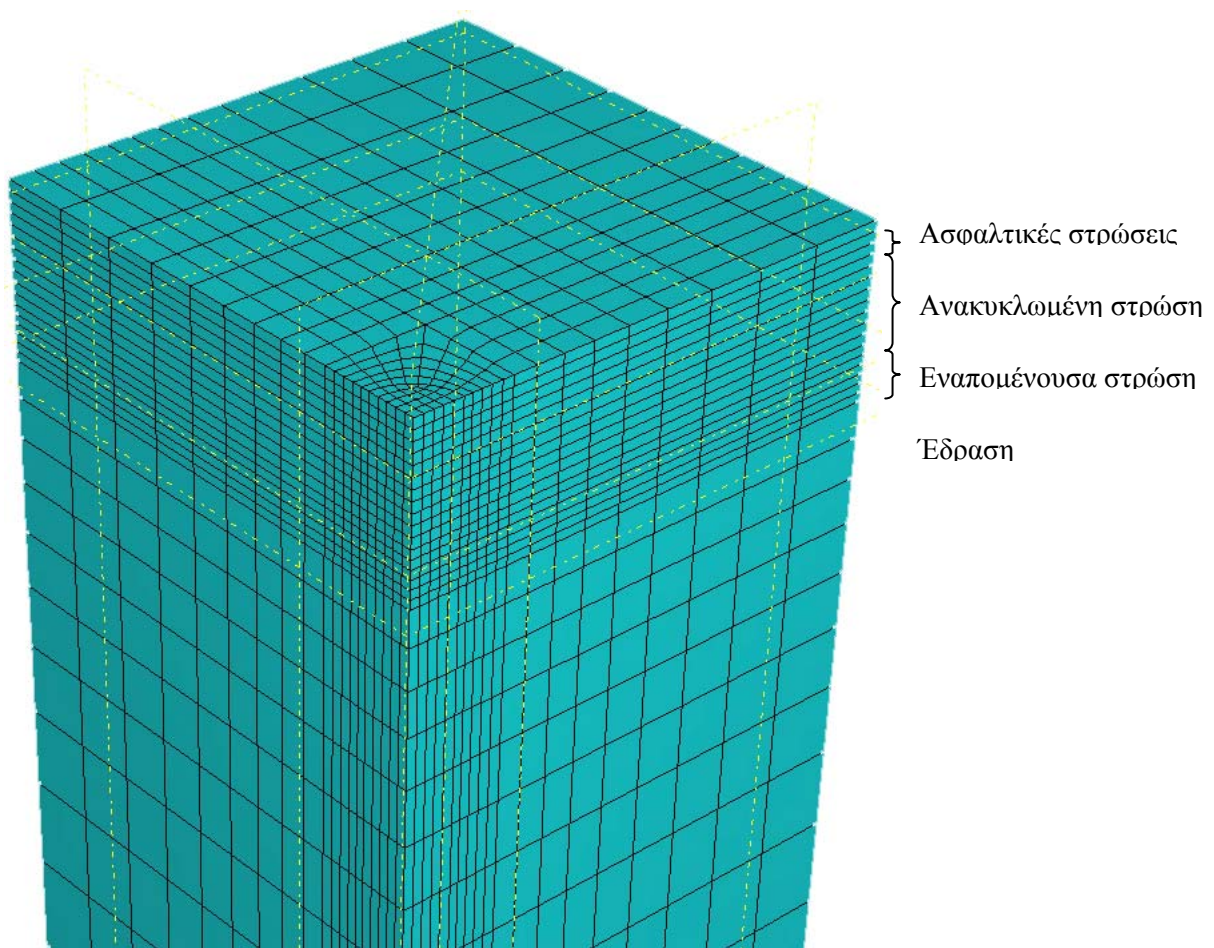
Υποσημείωση: **1) ε_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) μελέτη:** Αναλύσεις με βάση τα στοιχεία της μελέτης του οδοστρώματος. **3) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων. **4) P1, P2, P3, P4, P5:** Θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδοστρώμα (Σχήμα 5.12). **5) M1, M2, M3, M4, M5:** Αντίστοιχες θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδοστρώμα

5.5.2 Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE)

Αναλύσεις για τον υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών μεγεθών πραγματοποιήθηκαν και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS 2000). Η προσομοίωση του οδοστρώματος έγινε με πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 5.49), διαστάσεων 1.50 m από την περιοχή επιβολής του φορτίου κατά την οριζόντια κατεύθυνση και 3 m περίπου κάτω από την επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Οι παραπάνω διαστάσεις του προσομοιώματος επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι μεγαλύτερες από τις αποστάσεις, όπου εκτιμάται ότι οι τάσεις και παραμορφώσεις πρακτικά μηδενίζονται. Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες, έχουν δεσμευτεί οι οριζόντιες μετακινήσεις για τις κατακόρυφες

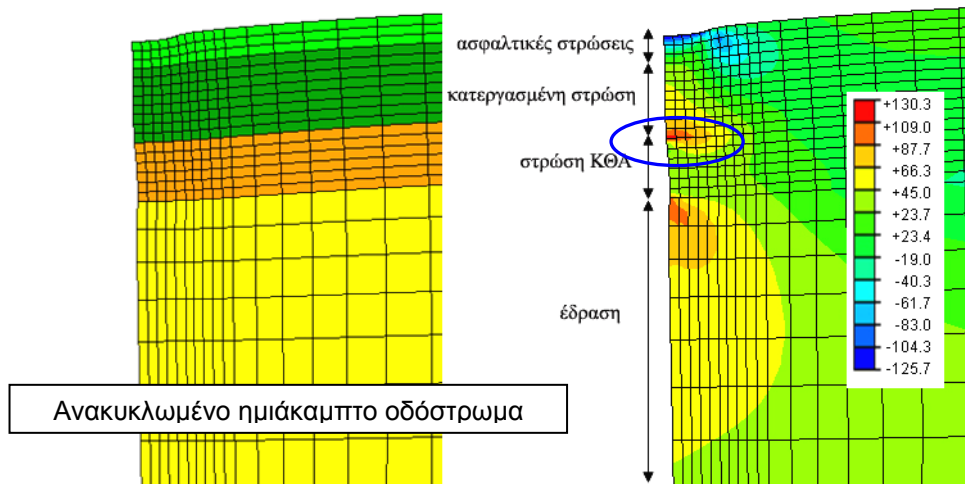
πλευρές του φορέα, η βάση του θεωρήθηκε πακτωμένη ενώ η άνω επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία δέσμευση. Οι παραπάνω δεσμεύσεις αποτελούν ένα είδος στήριξης για το προσομοίωμα και επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε να υποκαθιστούν τη συνέχεια του οδοστρώματος.

Για την κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκαν τρισδιάστατα, ισοπαραμετρικά εξαεδρικά στοιχεία συνεχούς μέσου, 20 κόμβων, που μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα τη γεωμετρία του φορέα και με σκοπό να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στους υπολογισμούς. Το πλέγμα έχει σχεδιαστεί να είναι πυκνότερο στις περιοχές επιβολής του φορτίου και στις περιοχές εμφάνισης των κρίσιμων θέσεων, για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στα αποτελέσματα της ανάλυσης (Zienkiewicz & Taylor 1989).



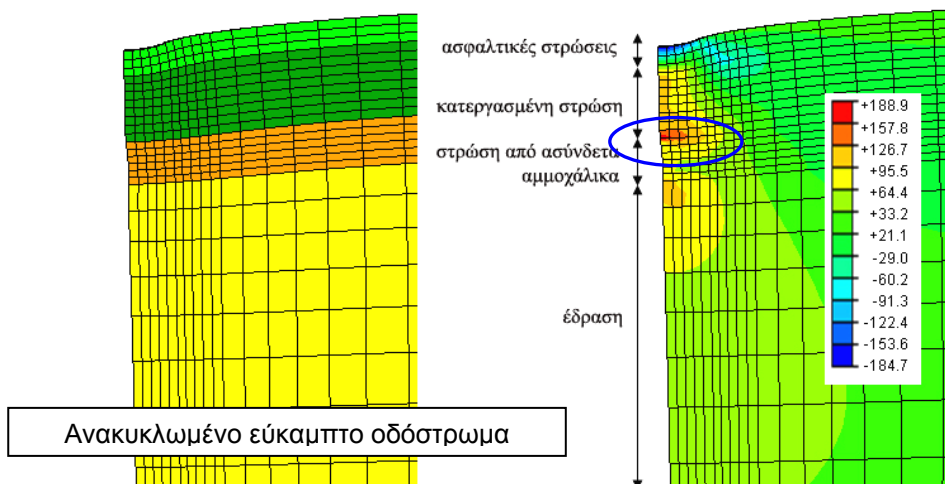
Σχήμα 5.49. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Στα Σχήματα 5.50 και 5.51 φαίνονται γραφικά τα αποτελέσματα των υπόψη αναλύσεων με χρήση των παραδοχών της μελέτης για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και εύκαμπτο οδόστρωμα αντίστοιχα. Επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT), καθώς οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα παρουσίασαν μικρότερες τιμές, σε σχέση με το εύκαμπτο.



Σχήμα 5.50. Τιμές ε_r (FE), στοιχεία από μελέτη οδοστρώματος

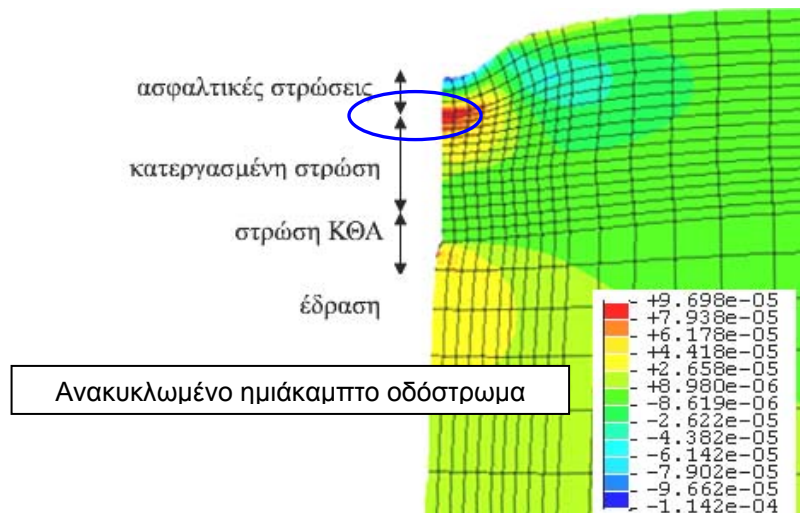
Υποσημείωση: **1) ε_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 5.51. Τιμές ε_r (FE), στοιχεία από μελέτη οδοστρώματος

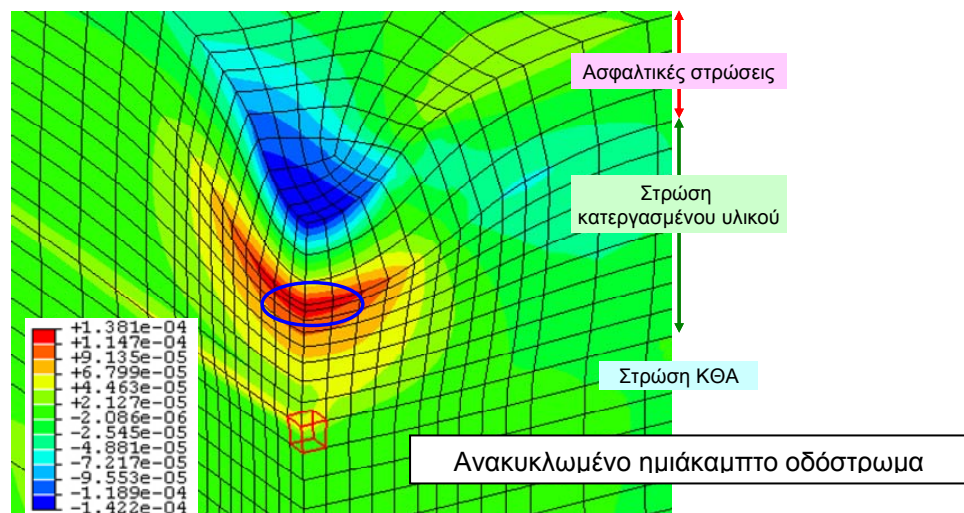
Υποσημείωση: **1) ε_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Κατά τις δοκιμές <2 μήνες μετά την κατασκευή, στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_r υπολογίστηκε στις περισσότερες περιπτώσεις στο άνω τμήμα της κατεργασμένης στρώσης, επιβεβαιώνοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης με βάση τη θεωρία των πολλαπλών στρώσεων (MLT). Χαρακτηριστικά παραδείγματα για τις θέσεις πυρηνοληψίας Π1 και Π2 φαίνονται στα Σχήματα 5.52α και 5.52β αντίστοιχα (με διαφορετική μορφή παρουσίασης). Τα αποτελέσματα για τη φάση δοκιμών <2 μήνες μετά την κατασκευή παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5.53.



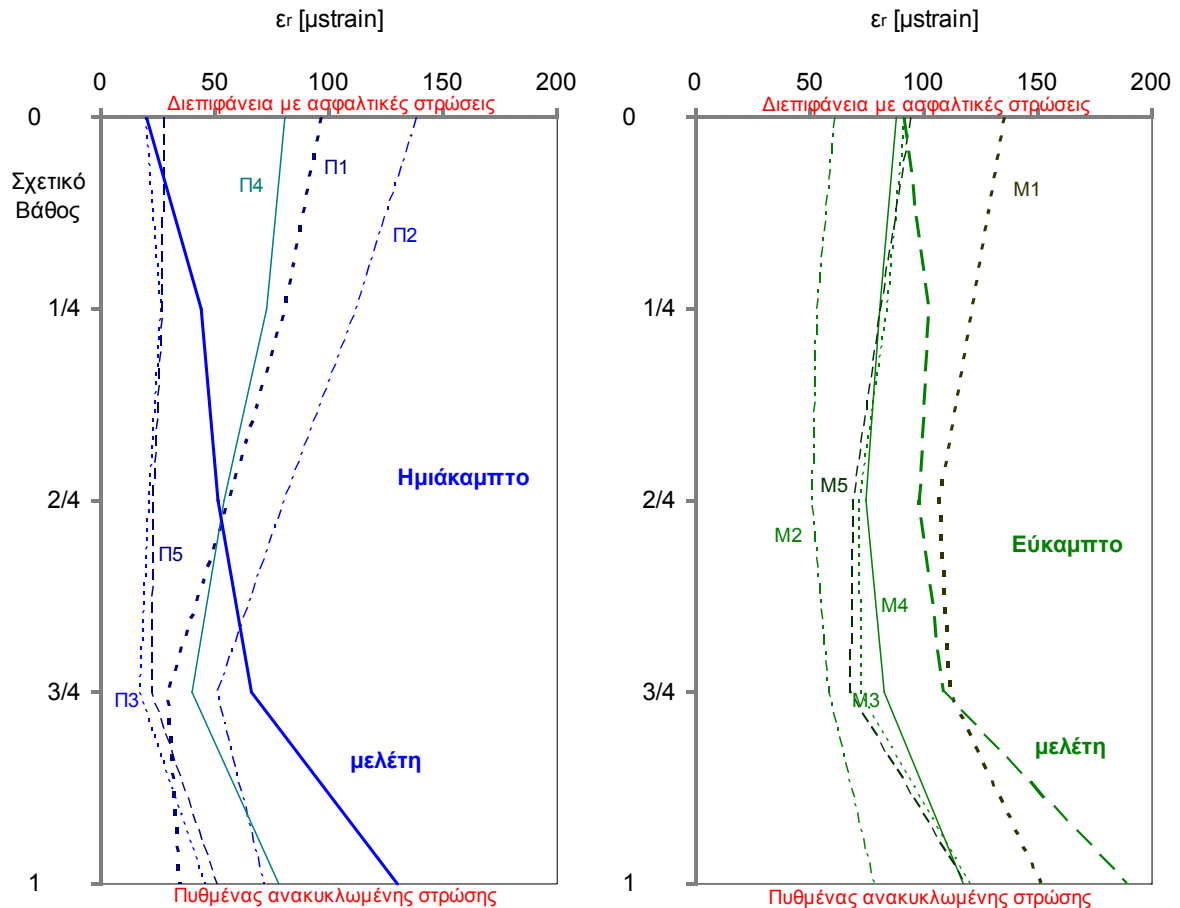
Σχήμα 5.52α. Τιμές ϵ_r (FE), θέση Π1, <2 μήνες μετά την κατασκευή

Υποσημείωση: **1) ϵ_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. **3) Π1:** Θέση δοκιμής / πυρηνοληψίας (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.52β. Τιμές ϵ_r (FE), θέση Π2, 3 εβδομάδες μετά την κατασκευή (Ημ)

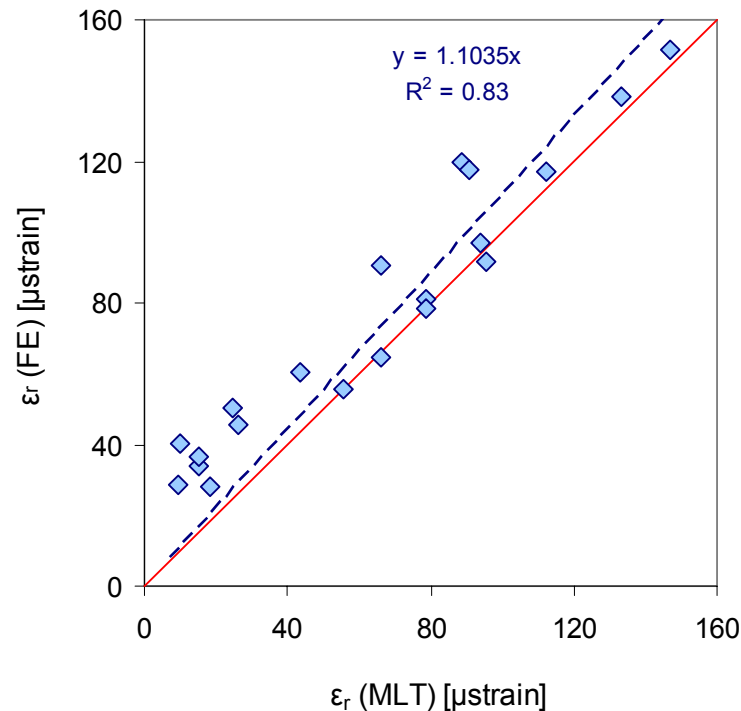
Υποσημείωση: **1) ϵ_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. **3) Π1:** Θέση δοκιμής / πυρηνοληψίας (Σχήμα 5.12)



Σχήμα 5.53. Τιμές ϵ_r (FE), <2 μήνες μετά την κατασκευή

Υποσημείωση: **1) ϵ_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) μελέτη:** Αναλύσεις με βάση τα στοιχεία της μελέτης του οδοστρώματος. **3) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. **4) Π1, Π2, Π3, Π4, Π5:** Θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα (Σχήμα 5.12). **5) M1, M2, M3, M4, M5:** Αντίστοιχες θέσεις δοκιμών / πυρηνοληψιών στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE), σε σχέση με την ανάλυση με τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT), φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 5.54.



Σχήμα 5.54. Σύγκριση τιμών ϵ_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης

Υποσημείωση: **1) ϵ_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων. **3) FE:** Αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η ανάλυση με τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT) μπορεί να δώσει αποτελέσματα συμβατά με αυτά που προκύπτουν με τη μέθοδο ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιβεβαιώνονται έτσι με επιτόπου στοιχεία τα συμπεράσματα που προέκυψαν από θεωρητικές αναλύσεις (AMADEUS 2000).

5.5.3 Επιμέρους συμπεράσματα

Από τις αναλύσεις για τον προσδιορισμό των κρίσιμων θέσεων και μέγιστων τιμών της ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης προέκυψαν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα.

- Η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_r υπολογίστηκε στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος στο άνω τμήμα της κατεργασμένης στρώσης, εμφανίζοντας διαφορετική συμπεριφορά, σε σχέση με τις παραδοχές που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του οδοστρώματος. Στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, υπολογίστηκαν χαμηλές τιμές ακόμη και κατά τις δοκιμές <2 μήνες μετά την κατασκευή και σε μία περίπτωση αρνητική τιμή

(θλιπτική). Αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην αυξημένη δυσκαμψία της απομένουσας στρώσης από ΚΘΑ, στην οποία εδράζεται η κατεργασμένη με αφρώδη ασφαλτο στρώση.

- Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, όπως επίσης και το γεγονός ότι το φορτίο υπολογισμού (65 kN) αντιστοιχεί στο θεωρούμενο διεθνώς ως μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο, εκτιμάται ότι η κόπωση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί σχετική διερεύνηση σε θεωρητικά πρότυπα μη κατασκευασθέντων οδοστρωμάτων (με υποθετικές τιμές παχών και μηχανικών χαρακτηριστικών επιμέρους στρώσεων) του Πανεπιστημίου Davis California (Fu & Harvey 2006). Η υπόψη διερεύνηση δεν έτυχε αναγνώρισης διεθνώς, τα αποτελέσματα όμως της παρούσας έρευνας τεκμηριώνουν τις εκτιμήσεις σχετικά με την εντατική κατάσταση και την κόπωση των κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο υλικών στρώσεων, οι οποίες εδράζονται σε εναπομένουσα στρώση (π.χ. από ΚΘΑ) με αυξημένη δυσκαμψία.

- Στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ευκάμπτου οδοστρώματος η ανάλυση έδειξε όμοια εικόνα, σε σχέση με τις παραδοχές της αναλυτικής μελέτης οδοστρώματος. Οι τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης, ακόμη και κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, ήταν (με εξαίρεση μία θέση δοκιμής) χαμηλότερες, σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν με βάση τις παραδοχές της μελέτης.
- Οι μεγάλες τιμές των επιτόπου υπολογισμένων τιμών της ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_r στη διεπιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης με τις ασφαλικές στρώσεις, κατά τις δοκιμές <2 μήνες μετά την κατασκευή, σε σχέση με τις αντίστοιχες ένα έτος περίπου μετά, αποτελεί ένδειξη ότι κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών μετά την απόδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία, οι ασφαλικές στρώσεις υπόκεινται σε μεγαλύτερη καταπόνηση. Μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, εκτός από τη μείωση της καταπόνησης της κατεργασμένης στρώσης, μειώνεται και η καταπόνηση των ασφαλικών στρώσεων. Επιβεβαιώνεται έτσι η εκτίμηση από προηγούμενα εδάφια, ότι η συνεισφορά των ασφαλικών στρώσεων στη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος είναι πολύ σημαντική κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του, πριν από την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.
- Η διαφοροποίηση των κρίσιμων θέσεων των εντατικών μεγεθών στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης, έχει ενδιαφέρον για τη διαστασιολόγηση των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων. Απαιτείται προσοχή και κατά το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των

μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων πριν την εφαρμογή της ανακύκλωσης, προκειμένου να εκτιμηθεί και να ληφθεί υπόψη στην αναλυτική μελέτη οδοστρώματος η πραγματική εντατική κατάσταση μετά την κατασκευή, τόσο πριν όσο και μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού.

- Υπάρχει ένδειξη ότι ο υπολογισμός των κρίσιμων εντατικών μεγεθών στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (multi-layer theory: MLT) μπορεί να δώσει αποτελέσματα συμβατά με αυτά που προκύπτουν με χρήση πολύπλοκων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (FE). Επιβεβαιώνονται έτσι, με επιτόπου πραγματικά στοιχεία μηχανικών χαρακτηριστικών επιμέρους στρώσεων ανακυκλωμένου οδοστρώματος, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από θεωρητικές αναλύσεις (AMADEUS 2000).

5.6. Διερεύνηση σχέσεων εκτίμησης χρόνου ζωής οδοστρώματος

5.6.1 Γενικά

Για την εκτίμηση του χρόνου ζωής της κατεργασμένης στρώσης χρησιμοποιήθηκαν οι «σχέσεις μεταφοράς» που περιλαμβάνονται στις Τεχνικές Οδηγίες TG2 (Asphalt Academy 2002). Επιπλέον, ελήφθησαν υπόψη και «κλασσικοί» αλγόριθμοι υπολογισμού των επιτρεπομένων διελεύσεων τυπικού άξονα έως αστοχίας λόγω κόπωσης, τόσο για την κατεργασμένη στρώση, όσο και για τις ασφαλικές στρώσεις.

Σκοπός της διαδικασίας που ακολουθήθηκε ήταν η διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος βάσει της «φθοράς» που προκαλούν τα φορτία της κυκλοφορίας. Η «φθορά» (damage) για κάθε κρίσιμη θέση αστοχίας ενός οδοστρώματος εκφράζεται από τη σχέση (5.14).

$$d = \frac{n}{N_{\varepsilon\pi}} \quad (5.14)$$

Όπου,

d φθορά

n: συνολικός αριθμός αξονικών διελεύσεων (ανηγμένος σε αξονικές διελεύσεις τυπικού φορτίου τροχού) που έχουν διέλθει

$N_{\text{επ}}$: αριθμός επιτρεπομένων αξονικών διελεύσεων τυπικού φορτίου έως αστοχίας του υλικού

Στην περίπτωση των ανακυκλωμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρώματων η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται κατά το αρχικό στάδιο της ζωής τους, λόγω της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού. Συνέπεια αυτού είναι να παρατηρούνται με τον χρόνο διαφοροποιήσεις (συνήθως μείωση) των τιμών της μέγιστης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ_r) που αναπτύσσεται στις κρίσιμες θέσεις του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επειδή ο αριθμός των επιτρεπομένων αξονικών διελεύσεων ($N_{\text{επ}}$) εξαρτάται από τη μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_r), η «φθορά» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος διαφοροποιείται κατά το αρχικό στάδιο της ζωής του. Για να μπορεί να γίνει σύγκριση της «φθοράς» του οδοστρώματος κατά τα διάφορα στάδια της ζωής του, χρησιμοποιήθηκε η έννοια της «σχετικής φθοράς» (relative damage: d_{rel}), που εκφράζεται από τη σχέση (5.15).

$$d_{\text{rel}i} = \frac{1}{N_i} \quad (5.15)$$

Όπου,

$d_{\text{rel}i}$: σχετική φθορά κατά το στάδιο «i» ζωής οδοστρώματος

N_i : αριθμός αξονικών διελεύσεων τυπικού φορτίου έως αστοχίας του υλικού κατά το στάδιο «i» ζωής οδοστρώματος

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που ελήφθησαν υπόψη για τις περαιτέρω αναλύσεις, καθώς και οι σχετικοί συμβολισμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο παρόν κεφάλαιο είναι οι παρακάτω.

- Κατά τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων των δοκιμών επί της αντιολισθηρής στρώσης (κωδικός δοκιμής: <2 μήνες), χρησιμοποιείται ο συμβολισμός «*pre-cure*» (πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού).
- Κατά τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων των δοκιμών μετά από παρέλευση χρονικού διαστήματος τουλάχιστον ενός έτους (κωδικός δοκιμής: 1 έτος για το ημιάκαμπτο και 16

μήνες για το εύκαμπτο οδόστρωμα), χρησιμοποιείται ο συμβολισμός «*post-cure*» (μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού).

- Επιπλέον, ελήφθησαν υπόψη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση των στοιχείων της μελέτης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, με συμβολισμό «*design*», για σύγκριση με τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών.

Η διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος έγινε λαμβάνοντας υπόψη τον «λόγο φθοράς» (damage ratio: d_{ratio}), ο οποίος προκύπτει από τον λόγο της σχετικής φθοράς κατά τις δοκιμές κάθε σταδίου της ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, ή με βάση τις παραδοχές της μελέτης.

Για παράδειγμα, ο «λόγος φθοράς» (d_{ratio}) της κατεργασμένης στρώσης κατά τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού (*pre-cure*), σε σχέση με τις δοκιμές μετά την «ωρίμανση» (*post-cure*) προκύπτει από τη σχέση (5.16). Αντίστοιχες σχέσεις του «λόγου φθοράς» με βάση τις παραδοχές της μελέτης, σε σχέση με τις επιτόπου δοκιμές, προέκυψαν από τις σχέσεις (5.17) και (5.18) για τις δοκιμές πριν και μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού αντίστοιχα.

$$d_{ratio} \left(\frac{pre-cure}{post-cure} \right) = \frac{d_{rel\ pre-cure}}{d_{rel\ post-cure}} = \frac{\frac{1}{N_{pre-cure}}}{\frac{1}{N_{post-cure}}} = \frac{N_{post-cure}}{N_{pre-cure}} \quad (5.16)$$

$$d_{ratio} \left(\frac{pre-cure}{design} \right) = \frac{d_{rel\ pre-cure}}{d_{rel\ design}} = \frac{\frac{1}{N_{pre-cure}}}{\frac{1}{N_{design}}} = \frac{N_{design}}{N_{pre-cure}} \quad (5.17)$$

$$d_{ratio} \left(\frac{design}{post-cure} \right) = \frac{d_{rel\ design}}{d_{rel\ post-cure}} = \frac{\frac{1}{N_{design}}}{\frac{1}{N_{post-cure}}} = \frac{N_{post-cure}}{N_{design}} \quad (5.18)$$

Όπου,

$$d_{ratio} \left(\frac{pre-cure}{post-cure} \right) \quad \text{φθορά πριν, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»}$$

$$d_{ratio} \left(\frac{pre-cure}{design} \right) \quad \text{φθορά πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με μελέτη}$$

$d_{ratio} \left(\frac{design}{post-cure} \right)$	φθορά βάσει μελέτης, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»
$d_{rel pre-cure}$	σχετική φθορά πριν την «ωρίμανση»
$d_{rel post-cure}$	σχετική φθορά μετά την «ωρίμανση»
$d_{rel design}$	σχετική φθορά, σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης
$N_{pre-cure}$:	αριθμός αξονικών διελεύσεων τυπικού φορτίου έως αστοχίας του υλικού πριν την «ωρίμανση»
$N_{post-cure}$:	αριθμός αξονικών διελεύσεων τυπικού φορτίου έως αστοχίας του υλικού μετά την «ωρίμανση»
N_{design} :	αριθμός αξονικών διελεύσεων τυπικού φορτίου έως αστοχίας του υλικού, σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των «λόγων φθοράς» (d_{ratio}) έγινε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα όρια στα οποία κυμάνθηκε, όσο και στον διάμεσο (median), που προτιμήθηκε σε σχέση με τον μέσο όρο, επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν εξαιρετικά μεγάλες διαφορές των τιμών του d_{ratio} .

5.6.2 «Σχέσεις μεταφοράς» βάσει των τεχνικών οδηγιών TG2

Εφαρμόστηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.11.1 για τον προσδιορισμό των επαναλήψεων φορτίσεων έως τη φάση σταθερής δυσκαμψίας (φάση 1). Ο «λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων» (strain ratio) υπολογίστηκε από τη σχέση (5.19). Για την «ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη θραυση» (strain-at-break) ελήφθη η τιμή $\varepsilon_b=172$, που αντιστοιχεί στην κατηγορία κατεργασμένου υλικού FB2, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις από τα στοιχεία της μελέτης σύνθεσης (κεφάλαιο 3 και Σχήμα 2 24). Διαφοροποίηση ως προς τη σχέση (2.4) αποτελεί το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα, αλλά η μέγιστη τιμή αυτής ανεξάρτητα από τη θέση που εντοπίστηκε στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης.

$$SR_{\varepsilon} = \frac{\max \varepsilon_r}{\varepsilon_b} \quad (5.19)$$

Όπου:

SR_{ε} : λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων (strain ratio)

$\max \varepsilon_r$: μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης

ε_b : «ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη θραύση» (strain-at-break)

Ο ενεργός χρόνος ζωής N_i , με βάση τον οποίο υπολογίστηκαν οι «λόγοι φθοράς» που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο (5.6.1), υπολογίστηκε από τη σχέση (5.20) (Asphalt Academy 2002) για κατηγορία οδού A.

$$N_i = 10^{\left[6.339 - 0.708 * SR_{\varepsilon,i}\right]} \quad (5.20)$$

Όπου:

N_i : ενεργός χρόνος ζωής του κατεργασμένου υλικού κατά το στάδιο «i» της ζωής οδοστρώματος

$SR_{\varepsilon,i}$: λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων (strain ratio) κατά το στάδιο «i» της ζωής οδοστρώματος

Στα εδάφια που ακολουθούν γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα Π8.1 του Παραρτήματος.

5.6.2.1 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με μελέτη

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού κυμάνθηκαν από τιμές μικρότερες της μονάδας, που υποδηλώνει «φθορά» μικρότερη σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης, μέχρι μεγαλύτερες από τη μονάδα, δηλαδή «φθορά» μεγαλύτερη σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.10. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, σε πολλές θέσεις δοκιμών η «φθορά» της κατεργασμένης στρώσης είναι μικρότερη σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης, παρά το γεγονός ότι δεν είχε «ωριμάσει» πλήρως το υλικό. Αυτό μπορεί να

αποδοθεί στην παρουσία ασφαλικών στρώσεων ικανού πάχους και μηχανικών χαρακτηριστικών, οι οποίες συνεισφέρουν στην μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης.

Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικές τιμές d_{ratio} (pre-cure / design) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2

d_{ratio} (pre-cure / design)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	0.52	0,87	1.46
Εύκαμπτο οδόστρωμα	0.58	0,65	1,11

Υποσημείωση: 1) d_{ratio} : Λόγος φθοράς από σχέση (5.17). **2) pre-cure**: Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) design**: Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος

5.6.2.2 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με φθορά μετά

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού έδωσαν τιμές μεγαλύτερες από τη μονάδα, το οποίο υποδηλώνει «φθορά» μεγαλύτερη, σε σχέση με τη τις δοκιμές μετά την «ωρίμανση». Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.11. Διαπιστώνεται, ότι στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα η «φθορά» πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού είναι έως 3 φορές περίπου μεγαλύτερη, σε σχέση με τη «φθορά» ένα έτος μετά. Αυτό «μεταφράζεται» στη διαπίστωση, ότι η «φθορά» που προξενούν 3 άξονες τυπικού φορτίου μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, είναι ίση με τη «φθορά» ενός άξονα (στη δυσμενέστερη θέση μέτρησης) πριν την «ωρίμανσή» του. Οι αντίστοιχες τιμές του d_{ratio} (pre-cure / post-cure) ήταν μικρότερες στην περίπτωση του ευκάμπτου οδοστρώματος, όσον αφορά στον διάμεσο και στη μέγιστη τιμή.

Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικές τιμές d_{ratio} (pre-cure / post-cure) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2

d_{ratio} (pre-cure / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	1,06	1.83	3,06
Εύκαμπτο οδόστρωμα	1,24	1,54	1,63

Υποσημείωση: 1) d_{ratio} : Λόγος φθοράς από σχέση (5.16). **2) pre-cure**: Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) post-cure**: Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

5.6.2.3 Φθορά κατεργασμένης στρώσης σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης, σε σχέση με τις επιτόπου δοκιμές μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, έδωσαν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές μεγαλύτερες από τη μονάδα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι μετά την «ωρίμανση» του υλικού η «φθορά» είναι μικρότερη σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.12. Σύμφωνα με τα υπόψη αποτελέσματα, ο ενεργός χρόνος ζωής του κατεργασμένου υλικού μετά την «ωρίμανσή» του αναμένεται να είναι στις περισσότερες περιπτώσεις περίπου διπλάσιος, σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικές τιμές d_{ratio} (design / post-cure) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2

d_{ratio} (design / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	2,03	2,10	2,22
Εύκαμπτο οδόστρωμα	1,47	1,95	2,41

Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.18). **2) design:** Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος. **3) post-cure:** Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

5.6.3 «Νόμος κόπωσης» κατεργασμένου υλικού

Τα χαρακτηριστικά της κόπωσης του κατεργασμένου υλικού προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο με τη δοκιμή κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό (Indirect Tensile Fatigue Test: ITFT) (ΕΜΠ 2003). Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια Marshall με κατεργασμένο υλικό που ελήφθη επιτόπου κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν στους 40°C για 72 ώρες και στο εργαστήριο σε θερμοκρασία 23-25°C και σχετική υγρασία 55-65% για 6 μήνες. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού εφαρμόζεται επαναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο αντιδιαμετρικά στο κυλινδρικό δοκίμιο. Η μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στο κέντρο του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση (5.20).

$$\varepsilon_{xx \max} = \frac{\sigma_{xx \max} * (1 + 3 * \nu)}{S_m} \quad (5.20)$$

Όπου:

$\varepsilon_{xx \max}$: μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στο κέντρο του δοκιμίου

$\sigma_{xx \max}$: μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στο κέντρο του δοκιμίου

ν : λόγος Poisson

S_m : μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Τα χαρακτηριστικά κόπωσης του κατεργασμένου υλικού, που προσδιορίστηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές, εκφράζονται μέσω της σχέσης (5.21) (ΕΜΠ 2003).

$$N_{FA} = 1.72 * 10^{11} * \left(\frac{1}{\varepsilon_{xx \max}} \right)^{3.59} \quad (5.21)$$

Όπου:

N_{FA} : κύκλοι φόρτισης έως αστοχίας

$\varepsilon_{xx \max}$: μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στο κέντρο του δοκιμίου

Σημειώνεται, ότι οι εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης έγιναν σε δοκίμια ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος. Ελλείπει όμως στοιχείων από το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα και επειδή λαμβάνεται υπόψη ο λόγος των αποτελεσμάτων εφαρμογής του νόμου κόπωσης, επεκτάθηκε η εφαρμογή του και στο εύκαμπτο οδόστρωμα. Στα εδάφια που ακολουθούν γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα Π8.2 του Παραρτήματος.

5.6.3.1 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με μελέτη

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» έδειξαν συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού αντίστοιχη με την εφαρμογή των «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2 (υποκεφάλαιο 5.6.2.1). Διαφοροποίηση παρατηρήθηκε ως προς το εύρος διακύμανσης των τιμών του d_{ratio} (pre-cure / design), που ήταν μεγαλύτερο, στην περίπτωση της εφαρμογής του νόμου κόπωσης. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Χαρακτηριστικές τιμές λόγου φθοράς d_{ratio} (pre-cure / design) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «νόμου κόπωσης»

d_{ratio} (pre-cure / design)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	0.01	0,54	3,58
Εύκαμπτο οδόστρωμα	0.34	0,23	1,31

Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.17). **2) pre-cure:** Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) design:** Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος

5.6.3.2 Φθορά κατεργασμένης στρώσης πριν την «ωρίμανση», σε σχέση με φθορά μετά

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» έδειξαν συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού αντίστοιχη με την εφαρμογή των «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2 (υποκεφάλαιο 5.6.2.2). Διαφοροποίηση παρατηρήθηκε ως προς τις τιμές του d_{ratio} (pre-cure / post-cure), οι οποίες ήταν υψηλότερες, στην περίπτωση της εφαρμογής του νόμου κόπωσης. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικές τιμές d_{ratio} (pre-cure / post-cure) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «νόμου κόπωσης»

d_{ratio} (pre-cure / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	2,8	375	3377
Εύκαμπτο οδόστρωμα	2,9	4,7	14,2

Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.16). **2) pre-cure:** Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) post-cure:** Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

Διαπιστώνεται, ότι στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα η «φθορά» πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού είναι σύμφωνα με τον νόμο κόπωσης τουλάχιστον 2,8 φορές μεγαλύτερη, σε σχέση με τη «φθορά» ένα έτος μετά. Η τιμή αυτή πάντως μπορεί να θεωρηθεί χαμηλή, καθώς σε άλλες θέσεις υπολογίστηκαν εξαιρετικά υψηλές τιμές (διάμεσος: 375). Όσον αφορά στα αποτελέσματα του d_{ratio} στο εύκαμπτο οδόστρωμα, επιβεβαιώνεται η διαπίστωση από την εφαρμογή των «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2, ότι οι τιμές ήταν μικρότερες σε σχέση με το ημιάκαμπτο οδόστρωμα, όσον αφορά στον διάμεσο και στη μέγιστη τιμή. Λόγω όμως του γεγονότος ότι δεν υπάρχει διαθέσιμος νόμος κόπωσης για

το συγκεκριμένο κατεργασμένο υλικό ευκάμπτου οδοστρώματος, η εκτίμηση αυτή εμπεριέχει κάποιες αβεβαιότητες. Έτσι, σε περίπτωση εφαρμογής άλλου νόμου κόπωσης με διαφορετικό εκθέτη από αυτόν της σχέσης (5.21) θα προέκυπτε διαφοροποίηση των τιμών του d_{ratio} για το εύκαμπτο οδόστρωμα.

5.6.3.3 Φθορά κατεργασμένης στρώσης σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση»

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης, σε σχέση με τις επιτόπου δοκιμές μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, έδωσαν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από τη μονάδα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει, ότι μετά την «ωρίμανση» του υλικού η «φθορά» είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15: Χαρακτηριστικές τιμές d_{ratio} (design / post-cure) κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «νόμου κόπωσης»

d_{ratio} (design / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	327	702	3917
Εύκαμπτο οδόστρωμα	3,6	13,5	60,6

Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.18). **2) design:** Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος. **3) post-cure:** Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του «λόγου φθοράς», οι συνολικές διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου έως αστοχίας του κατεργασμένου υλικού του ημιακάμπτου οδοστρώματος (μετά την «ωρίμανσή» του), εκτιμάται ότι θα είναι τουλάχιστον 300 φορές περισσότερες, σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Βασικός στόχος των υπόψη αναλύσεων δεν ήταν να προσδιοριστεί ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων τυπικού αξονικού φορτίου μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, οι οποίες ούτως ή άλλως διαφέρουν σε κάθε θέση δοκιμής, λόγω της διακύμανσης των τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων. Οι παραπάνω αναλύσεις επιβεβαίωσαν την εκτίμηση από τον υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών μεγεθών, ότι η κόπωση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος.

5.6.4 «Νόμος κόπωσης» ασφαλικών στρώσεων

Τα χαρακτηριστικά κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων προσδιορίστηκαν μέσω της σχέσης (5.22).

$$N_{AC} = 11.522 * 10^{-13} * \left(\frac{1}{\varepsilon_{xx \max} * 10^{-6}} \right)^{-4.831} \quad (5.22)$$

Όπου:

N_{AC} : κύκλοι φόρτισης έως αστοχίας

$\varepsilon_{xx \max}$: μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση

Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα Π8.3 του Παραρτήματος.

5.6.4.1 Φθορά ασφαλικών στρώσεων πριν την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού, σε σχέση με μελέτη

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, σε σύγκριση με τις παραδοχές της μελέτης έδειξαν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά του ημιάκαμπτου, με το εύκαμπτο οδόστρωμα. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές του $d_{ratioAC}$ (pre-cure / design) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.16. Στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη «φθορά» των ασφαλικών στρώσεων, σε σχέση με τις παραδοχές της μελέτης. Αυτό επιβεβαιώνει την εκτίμηση που έχει ήδη αναφερθεί, ότι οι ασφαλικές στρώσεις αναλαμβάνουν μεγάλο μέρος της καταπόνησης κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Στο εύκαμπτο οδόστρωμα δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό στην ίδια έκταση.

Πίνακας 5.16: Χαρακτηριστικές τιμές $d_{ratioAC}$ (pre-cure / design) ασφαλικών στρώσεων

$d_{ratioAC}$ (pre-cure / design)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	1,5	842	10721
Εύκαμπτο οδόστρωμα	0.14	1,00	7,09

Υποσημείωση: 1) d_{ratio} : Λόγος φθοράς από σχέση (5.17). **2) pre-cure**: Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) design**: Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος

5.6.4.2 Φθορά ασφαλικών στρώσεων πριν την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού, σε σχέση με φθορά μετά

Τα αποτελέσματα για τις δοκιμές πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, σε σύγκριση με τις δοκιμές μετά, τόσο στο ημιάκαμπτο, όσο και στο εύκαμπτο ανακυκλωμένο οδόστρωμα έδειξαν αντίστοιχη συμπεριφορά. Και στις δύο περιπτώσεις η «φθορά» ήταν πολύ μεγαλύτερη πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, γεγονός το οποίο υποδηλώνει, ότι η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη μείωση της καταπόνησης των ασφαλικών στρώσεων. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17: Χαρακτηριστικές τιμές $d_{ratioAC}$ (pre-cure / post-cure) ασφαλικών στρώσεων

$d_{ratioAC}$ (pre-cure / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	4	10512	2.E+07
Εύκαμπτο οδόστρωμα	19,6	440	8326

Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.16). **2) pre-cure:** Επιτόπου στοιχεία πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. **3) post-cure:** Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

5.6.4.3 Φθορά ασφαλικών στρώσεων σύμφωνα με τη μελέτη, σε σχέση με φθορά μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης, σε σχέση με τις επιτόπου δοκιμές μετά την ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, έδωσαν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από τη μονάδα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει, ότι μετά την ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού η «φθορά» των ασφαλικών στρώσεων είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με τη μελέτη. Οι ελάχιστες, διάμεσες και μέγιστες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.18.

Πίνακας 5.18: Χαρακτηριστικές τιμές $d_{ratioAC}$ (design / post-cure) ασφαλικών στρώσεων

$d_{ratioAC}$ (design / post-cure)	min	διάμεσος	max
Ημιάκαμπτο οδόστρωμα	1,3	12,5	10171
Εύκαμπτο οδόστρωμα	19,6	368	9314

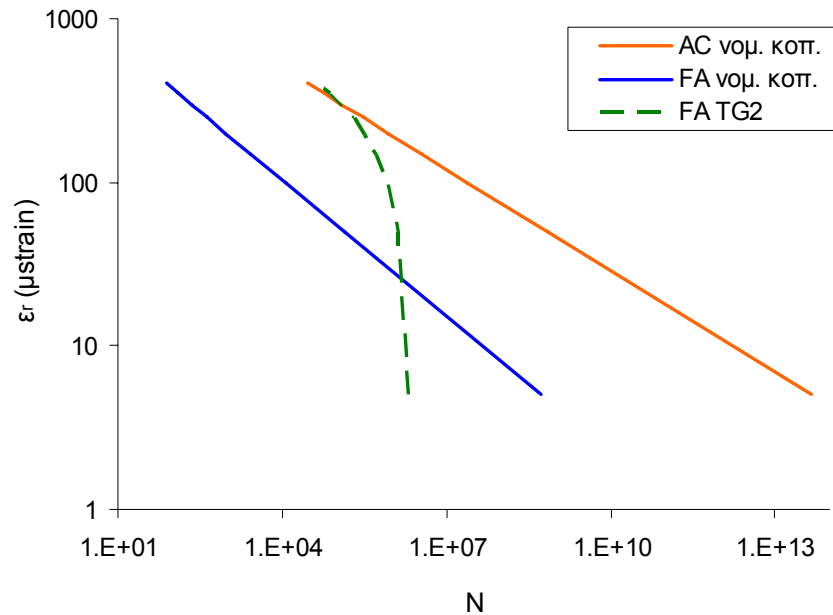
Υποσημείωση: **1) d_{ratio} :** Λόγος φθοράς από σχέση (5.18). **2) design:** Στοιχεία από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος. **3) post-cure:** Επιτόπου στοιχεία μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

5.6.5 Επιμέρους συμπεράσματα

Οι σχέσεις εκτίμησης του χρόνου ζωής της κατεργασμένης στρώσης και των ασφαλικών στρώσεων παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 5.55. Η καμπύλη με ένδειξη «AC νομ. κοπ.» αφορά στον νόμο κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων, η καμπύλη «FA νομ. κοπ.» στον νόμο κόπωσης του υλικού της κατεργασμένης στρώσης και η καμπύλη «FA TG2» στη «σχέση μεταφοράς» του υλικού της κατεργασμένης στρώσης, σύμφωνα με την πηγή (Asphalt Academy 2002).

Από τις θέσης των καμπύλων «AC νομ. κοπ.» και «FA νομ. κοπ.» στο διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι για ίδια τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ_r) προκύπτει μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N) έως αστοχίας, στην περίπτωση των ασφαλικών στρώσεων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι υπό την προϋπόθεση ίδιας εντατικής κατάστασης, τα συμβατικά ασφαλτομίγματα παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση, σε σχέση με τα κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο υλικά.

Διαπιστώνεται επίσης, ότι η καμπύλη που αφορά στην εφαρμογή των «σχέσεων μεταφοράς» σύμφωνα με την (Asphalt Academy 2002) έχει διαφορετική κλίση, σε σχέση με τις αντίστοιχες των νόμων κόπωσης. Κατά συνέπεια, το εύρος των επαναλήψεων φορτίσεων έως αστοχίας (N) είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των νόμων κόπωσης. Το γεγονός αυτό «ερμηνεύει» τα αποτελέσματα των τιμών του «λόγου φθοράς», η διακύμανση των οποίων ήταν μεγαλύτερη στην περίπτωση εφαρμογής του νόμου κόπωσης.



Σχήμα 5.55. Διαγράμματα σχέσεων εκτίμησης του χρόνου ζωής των επιμέρους στρώσεων ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Υποσημείωση: **1) ε:** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της στρώσης. **2) N:** Επαναλήψεις φορτίσεων έως αστοχίας. **3) AC νομ. κοπ.:** Νόμος κόπωσης ασφαλτικών στρώσεων. **3) FA νομ. κοπ.:** Νόμος κόπωσης κατεργασμένου υλικού. **4) FA TG2:** «Σχέση μεταφοράς» του κατεργασμένου υλικού, σύμφωνα με την πηγή (Asphalt Academy 2002)

Από τη διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος βάσει της μηχανικής ανάλυσης της «φθοράς» που προκαλούν τα φορτία της κυκλοφορίας ως προς την αντοχή σε κόπωση, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Σε πολλές θέσεις δοκιμών η «φθορά» της κατεργασμένης στρώσης <2 μήνες μετά την κατασκευή ήταν μικρότερη σε σχέση με τις παραδοχές της αναλυτικής διαστασιολόγησης (μελέτης) του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, παρά το γεγονός ότι δεν είχε ολοκληρωθεί η «ωρίμανση» του υλικού. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία ασφαλτικών στρώσεων, οι οποίες συνεισφέρουν στην μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης.
- Με εφαρμογή των «σχέσεων μεταφοράς» (Asphalt Academy 2002), ο ενεργός χρόνος ζωής του κατεργασμένου υλικού μετά την «ωρίμανσή» του αναμένεται να είναι στις περισσότερες περιπτώσεις περίπου διπλάσιος, σε σχέση με τις παραδοχές της αναλυτικής διαστασιολόγησης (μελέτης) του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

- Οι αναλύσεις με χρήση νόμου κόπωσης του κατεργασμένου υλικού επιβεβαίωσαν την εκτίμηση, ότι η κόπωση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας στην περίπτωση του ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος.
- Η χρήση νόμου κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων επιβεβαιώνει την εκτίμηση που έχει ήδη αναφερθεί, ότι οι ασφαλικές στρώσεις αναλαμβάνουν μεγάλο μέρος της καταπόνησης κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος (πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού).
- Η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού και κατά συνέπεια η αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη μείωση της καταπόνησης που υφίστανται οι ασφαλικές στρώσεις. Συνάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι ο χρόνος «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην φθορά που υφίστανται οι ασφαλικές στρώσεις και κατά συνέπεια στη συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε βάθος χρόνου.

Σημειώνεται επίσης, ότι οι ασφαλικές στρώσεις, εκτός από τον πολύ σημαντικό ρόλο που παίζουν στη δομική συμπεριφορά κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, συνεισφέρουν και στη βελτίωση της ομαλότητας της επιφάνειας του τελικού ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας, λόγω της όχι καλής επιπεδότητας που εν γένει επιτυγχάνεται στην επιφάνειας της κατεργασμένης στρώσης (Loizos et al. 2006).

6. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ «ΩΡΙΜΑΝΣΗ» ΤΟΥ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

6.1. Γενικά

Μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού και για χρονικό διάστημα επτά περίπου ετών μετά την κατασκευή έγιναν επιτόπου δοκιμές και αναλύσεις των συλλεχθέντων στοιχείων, με σκοπό την εκτίμηση της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, υπό την επίδραση φορτίων σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλύσεις των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών και αναφέρονται τα σχόλια και συμπεράσματα και οι εκτιμήσεις που προέκυψαν από αυτές.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εξετάστηκε επίσης η επίδραση του μεγέθους του εφαρμοζόμενου φορτίου στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, καθώς και στην οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης. Αυτό έχει ευρύτερη σημασία τόσο για τη διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά, όσο και για διαδικασία ανάλυσης των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων.

Οι δοκιμές εκτίμησης της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού έγιναν, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της εκτίμησης της επιτόπου συμπεριφοράς κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Οι αναλύσεις περιέλαβαν στοιχεία σχετικά με τη δομική συμπεριφορά της κατεργασμένης στρώσης, των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς και του ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνολικά.

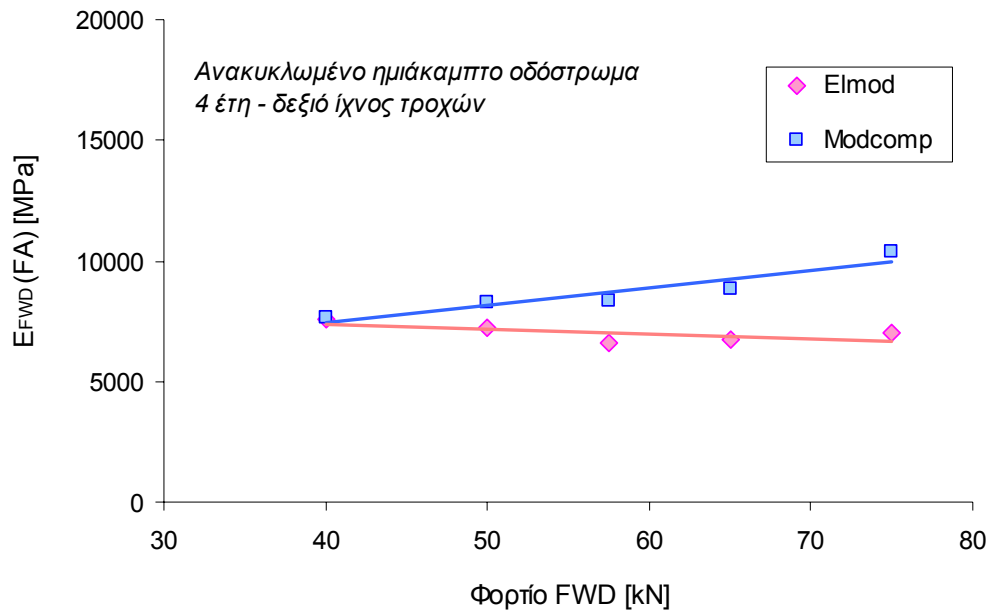
6.2. Συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης

Σύμφωνα με τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά κατεργασμένα με αφρώδη άσφαλτο παρατηρήθηκε αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του υλικού με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης (bulk stress) $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (Bredenhann & Jenkins 2004). Αυτό αναφέρεται ως «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση» (stress-dependent behaviour) και παρατηρείται κυρίως σε ασύνδετα υλικά (υποκεφάλαιο 2.10). Στο πλαίσιο της παρούσας

διατριβής, εξετάστηκε η επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης, εφαρμόζοντας τις παρακάτω διαδικασίες δοκιμών.

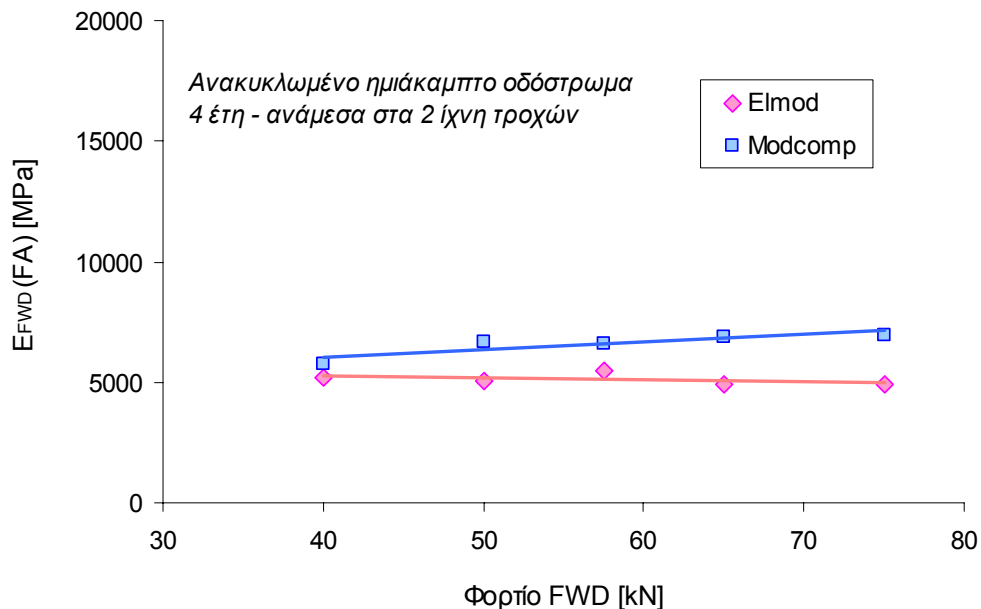
Κατά τις περιοδικές μη καταστρεπτικές δοκιμές με το Σύστημα FWD, εκτός από το φορτίο αναφοράς (50 kN), εφαρμόστηκαν και άλλα μικρότερα και μεγαλύτερα φορτία. Δόθηκε έτσι η δυνατότητα μέσω των ανάστροφων υπολογισμών να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης και να γίνει συσχέτιση με τις τιμές των αντίστοιχων εφαρμοζόμενων φορτίων. Επιπλέον, αναφέρονται και τα αποτελέσματα περιορισμένου αριθμού τριαξονικών εργαστηριακών δοκιμών, που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της συνεργασίας με το Πανεπιστήμιο Stellenbosch.

Η συσχέτιση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης με το εφαρμοζόμενο φορτίο του FWD έγινε μέσω των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών με χρήση των λογισμικών Modcomp (Irwin 2002) Elmod (Dynatest. 2001). Η επιλογή δύο λογισμικών έγινε για εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων. Το Modcomp συστήνεται στο πλαίσιο του SHRP (Strategic Highway Research Program), ως το λογισμικό με αυστηρότερη προσέγγιση των αλγόριθμων των ανάστροφων υπολογισμών. Το Elmod είναι λογισμικό περισσότερο διαδεδομένο στην πράξη, για ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν κατά τις περιοδικές δοκιμές με το Σύστημα FWD, στα πειραματικά τμήματα που έγιναν συστηματικές πυρηνοληψίες. Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 (ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα) και στο Σχήμα 6.3 (εύκαμπτο οδόστρωμα) παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα (μέσος όρος μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης για κάθε φορτίο FWD).



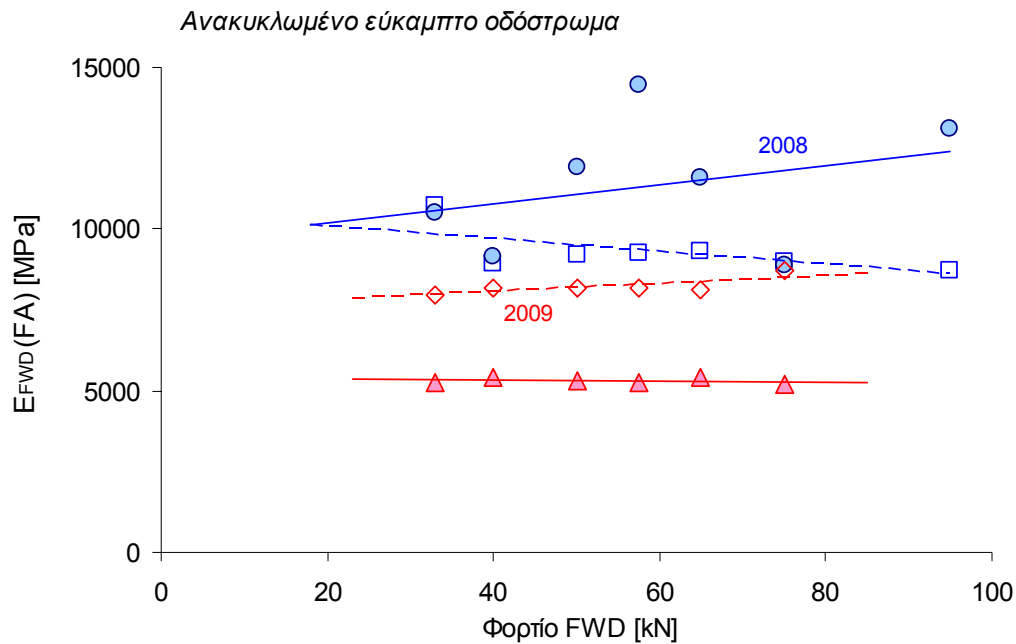
Σχήμα 6.1. Συσχέτιση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με το φορτίο FWD

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) Elmod, Modcomp:** Λογισμικά ανάστροφων υπολογισμών



Σχήμα 6.2. Συσχέτιση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με το φορτίο FWD

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) Elmod, Modcomp:** Λογισμικά ανάστροφων υπολογισμών



Σχήμα 6.3. Συσχέτιση τιμών $E_{FWD}(FA)$ με το φορτίο FWD

Υποσημείωση: $E_{FWD}(FA)$: Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης

Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν σαφή τάση αύξησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης με το φορτίο. Κατά συνέπεια, η θεώρηση ότι το υλικό παρουσιάζει «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση» δεν μπορεί να αποτελέσει παραδοχή υπολογισμών, χωρίς περαιτέρω ευρύτερη διερεύνηση στο εργαστήριο και επιτόπου. Κατόπιν αυτού, η θεώρηση του κατεργασμένου υλικού ως γραμμικώς ελαστικό αποτελεί προς το παρόν μία ικανοποιητική προσέγγιση.

Συμπληρωματικά προς τις προαναφερθείσες αναλύσεις, υπολογίστηκε η ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης για διάφορα φορτία FWD. Αυτό έγινε για να εκτιμηθεί η επίδραση της αλλαγής της εντατικής κατάστασης (μέσω της διαφοροποίησης των φορτίων) στην παραμορφωσιακή κατάσταση στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης (κρίσιμη θέση).

Το μέγεθος της ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, καθώς και από το φορτίο που επιβάλλεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά τη δοκιμή. Το φορτίο επιδρά με άμεσο τρόπο στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος και προκαλεί μεταβολές στην αναπτυσσόμενη τάση. Σε

περίπτωση κατά την οποία το υλικό δεν παρουσιάζει «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση», είναι δηλαδή γραμμικά ελαστικό, αναμένεται η ανηγμένη παραμόρφωση να είναι περίπου ανάλογη του φορτίου. Σε περίπτωση κατά την οποία το υλικό παρουσιάζει αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης, θα πρέπει ο ρυθμός αύξησης της ανηγμένης παραμόρφωσης να μειώνεται με την αύξηση του φορτίου.

Οι αναλύσεις που αναφέρονται παρακάτω αφορούν στις δοκιμές που εκτελέστηκαν τον Απρίλιο του 2009. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, η συσχέτιση έγινε με βάση τη σχέση (6.1). Αν ισχύει η υπόθεση ότι το υλικό παρουσιάζει «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση», με αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης, θα πρέπει ο συντελεστής β_4 της υπόψη σχέσης να είναι μικρότερος της μονάδας. Αν ο συντελεστής β_4 παρουσιάζει τιμές πλησίον της μονάδας, η σχέση είναι ουσιαστικά γραμμική και η υπόθεση αυτή καταρρίπτεται.

$$\varepsilon_r = \alpha_4 * P^{\beta_4} \quad (6.1)$$

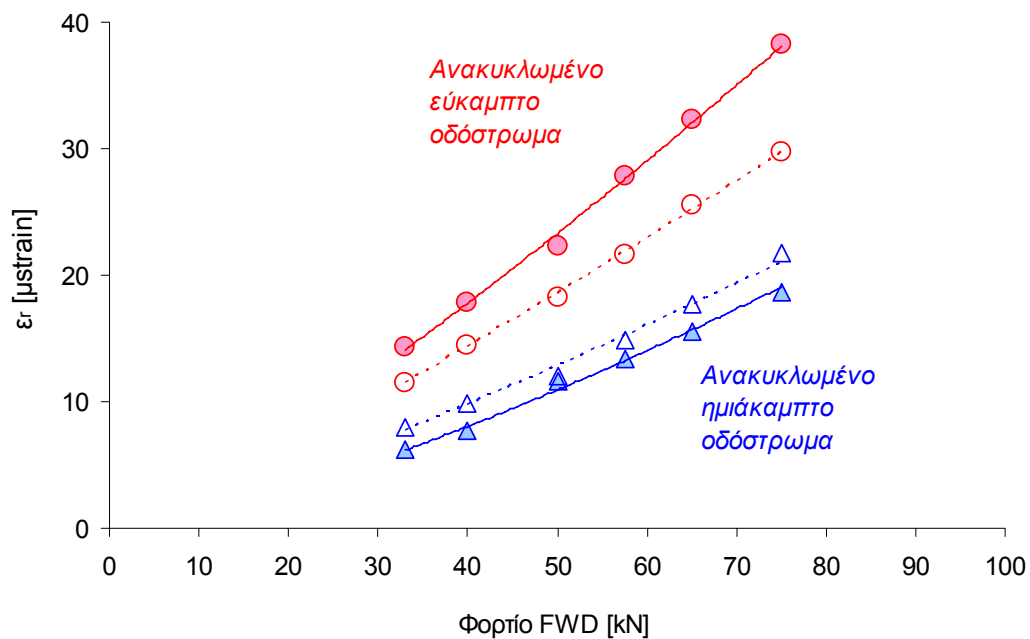
Όπου,

ε_r : οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης (μstrain)

P: φορτίο FWD (kN)

α_4, β_4 : συντελεστές

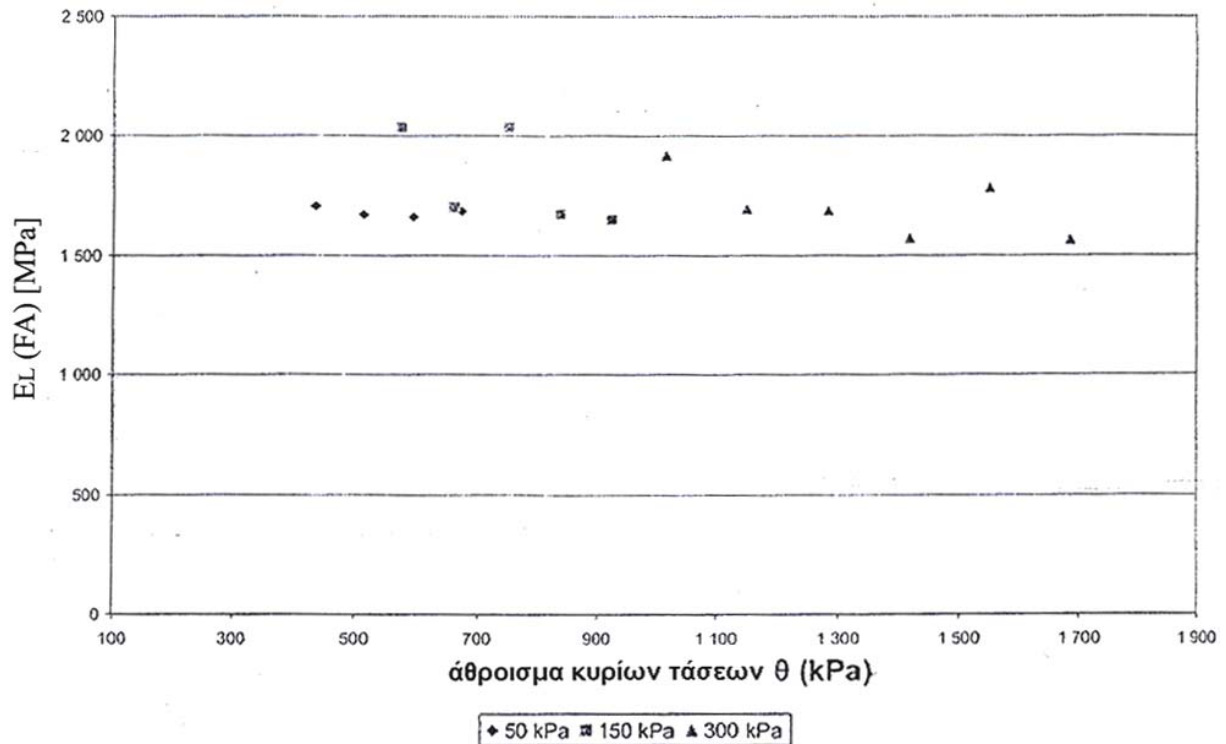
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 6.4. Ο συντελεστής β_4 κυμάνθηκε από 1.157 έως 1.372. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα και με βάση το γεγονός ότι ο συντελεστής β_4 έλαβε τιμές πλησίον της μονάδας, επιβεβαιώνεται η εκτίμηση ότι η θεώρηση του κατεργασμένου υλικού ως γραμμικώς ελαστικό αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση.



Σχήμα 6.4. Συσχέτιση τιμών ϵ_r με το φορτίο FWD

Υποσημείωση: ϵ_r : Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση

Σημειώνεται επίσης, ότι εκτελέστηκαν τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν με κατεργασμένο υλικό ευκάμπτου οδοστρώματος, στο πλαίσιο της επιστημονικής συνεργασίας με το Πανεπιστήμιο του Stellenbosch. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5. Συσχέτιση E_L (FA) με τη συνολική τάση θ

Υποσημείωση: 1) E_L (FA): Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές). **2) θ :** Άθροισμα κυρίων τάσεων ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών δεν προέκυψε συγκεκριμένη τάση μεταβολής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης, αντίστοιχη με το διάγραμμα του Σχήματος 2.16 (Jenkins 2000). Αυτό, εκτιμάται ότι οφείλεται στην παρουσία μεγαλύτερου ποσοστού ασφάλτου, αλλά και του τσιμέντου, το οποίο καθιστά το κατεργασμένο υλικό πιο δύσκαμπτο. Συνέπεια τούτου, το υλικό παρουσιάζει συμπεριφορά πλησιέστερη προς τα ασφαλτομίγματα και τα κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες υλικά, τα οποία σε θερμοκρασίες εργαστηρίου συμπεριφέρονται ως επί το πλείστον ως γραμμικώς ελαστικά. Αντίθετα, για το διάγραμμα του Σχήματος 2.16 χρησιμοποιήθηκε μίγμα κατεργασμένο με σχετικά χαμηλό ποσοστό αφρώδους ασφάλτου (2%) χωρίς προσθήκη τσιμέντου, με συνέπεια το υπόψη υλικό να παρουσιάζει συμπεριφορά πλησιέστερη των ασύνδετων αδρανών υλικών, τα οποία παρουσιάζουν «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση». Οι διαφορές της σύνθεσης των προαναφερθέντων κατεργασμένων μιγμάτων, ερμηνεύουν επίσης τις μεγαλύτερες τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης E_L (FA), που φαίνονται στο Σχήμα 6.5, σε σχέση με τις τιμές του Σχήματος 2.16.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση τίθεται επίσης ο προβληματισμός για το εάν ένα μίγμα με μικρό ποσοστό αφρώδους ασφάλτου και κατά συνέπεια με σχετικά χαμηλές τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης θα ήταν κατάλληλο για χρήση σε οδοστρώματα βαριάς κυκλοφορίας και υπό ποιες προϋποθέσεις. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να αυξηθεί το πάχος των ασφαλικών στρώσεων, ώστε να μειωθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις – παραμορφώσεις. Το θέμα αυτό πάντως χρήζει περαιτέρω τεχνικοοικονομικής διερεύνησης τόσο σε θεωρητικό (υπολογιστικό) επίπεδο, όσο και με εφαρμογή στην πράξη, πέραν των ορίων της παρούσας έρευνας.

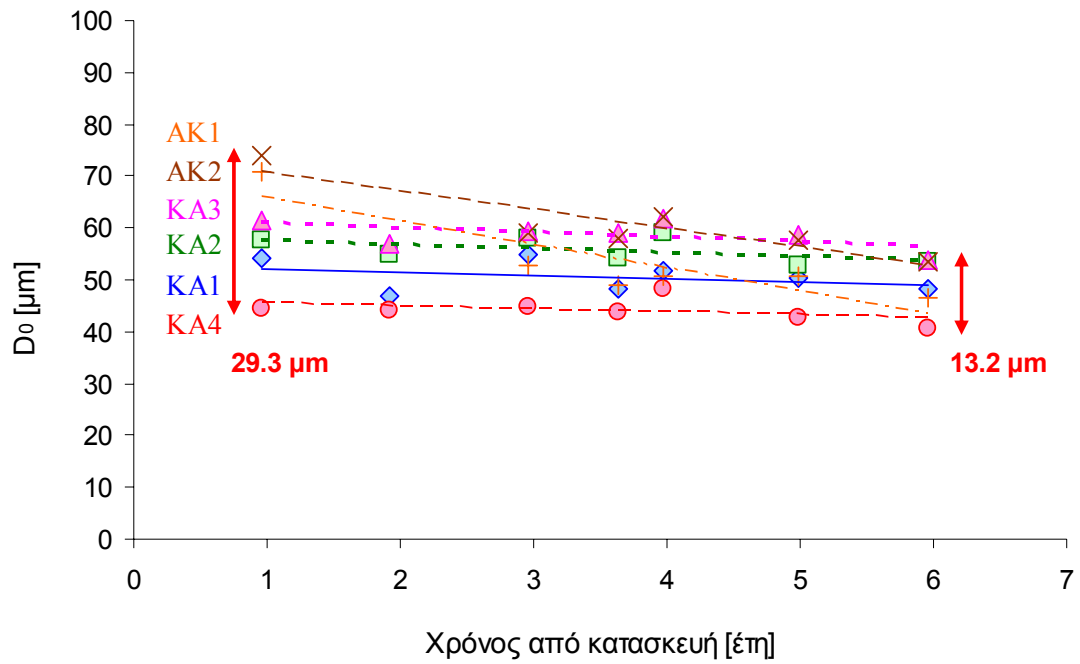
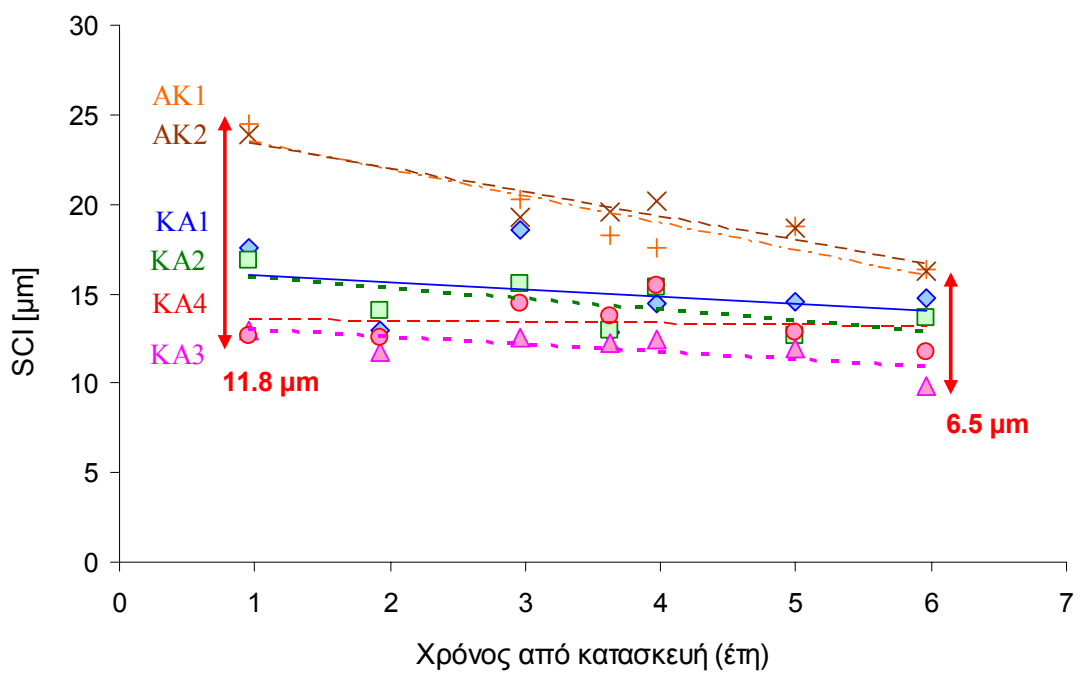
6.3. Εξέλιξη της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Η εκτίμηση της εξέλιξης της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού και για χρονικό διάστημα έως επτά ετών περίπου από την κατασκευή έγινε με υπολογισμό των δεικτών δομικής κατάστασης και με προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των υλικών των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

6.3.1 Αξιολόγηση με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης

Οι αναλύσεις που περιγράφονται στο παρόν υποκεφάλαιο αφορούν στα αποτελέσματα επιτόπου (in-situ) δοκιμών με το Σύστημα FWD σε έξι πειραματικά τμήματα ανακυκλωμένου ημιακάμπτου οδοστρώματος με κωδικούς AK1, AK2, KA1, KA2, KA3 και KA4.

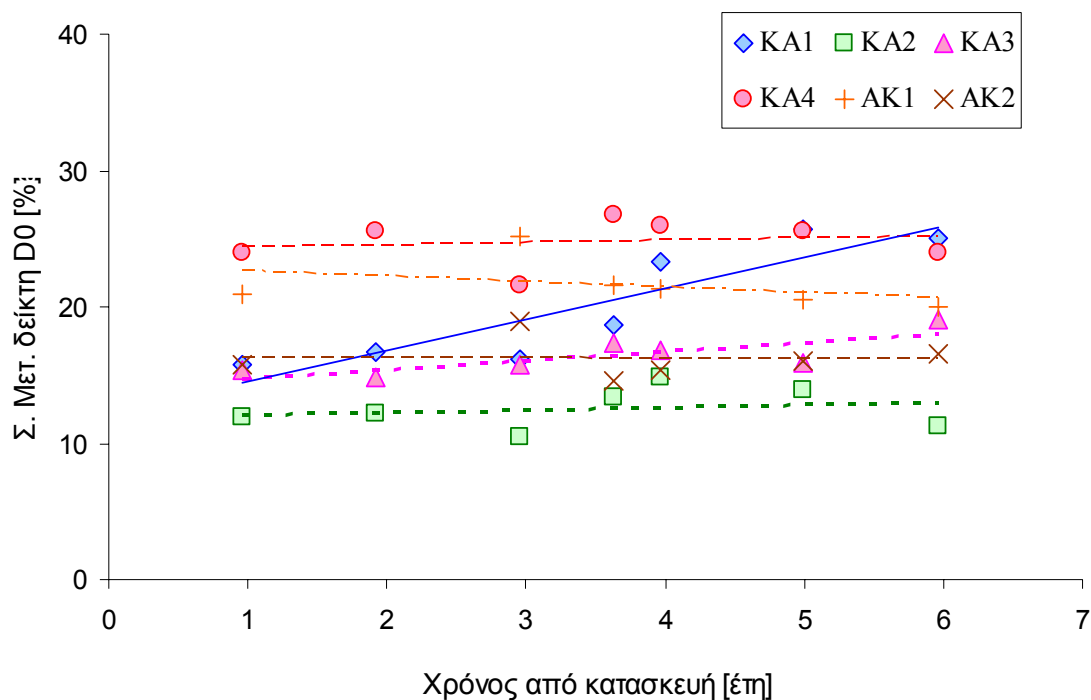
Οι μέσες τιμές των δεικτών D_0 και SCI των πειραματικών τμημάτων (διορθωμένες στη θερμοκρασία των 20°C) φαίνονται στον Πίνακα Π9.1 του Παραρτήματος Η εξέλιξη χρονικά των Μ.Ο. των τιμών του δείκτη D_0 και SCI παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 6.6α και 6.6β αντίστοιχα, όπου φαίνεται και η κατάταξη των πειραματικών τμημάτων ένα έτος μετά την κατασκευή.

Σχήμα 6.6α. Εξέλιξη μέσου όρου δείκτη D_0 

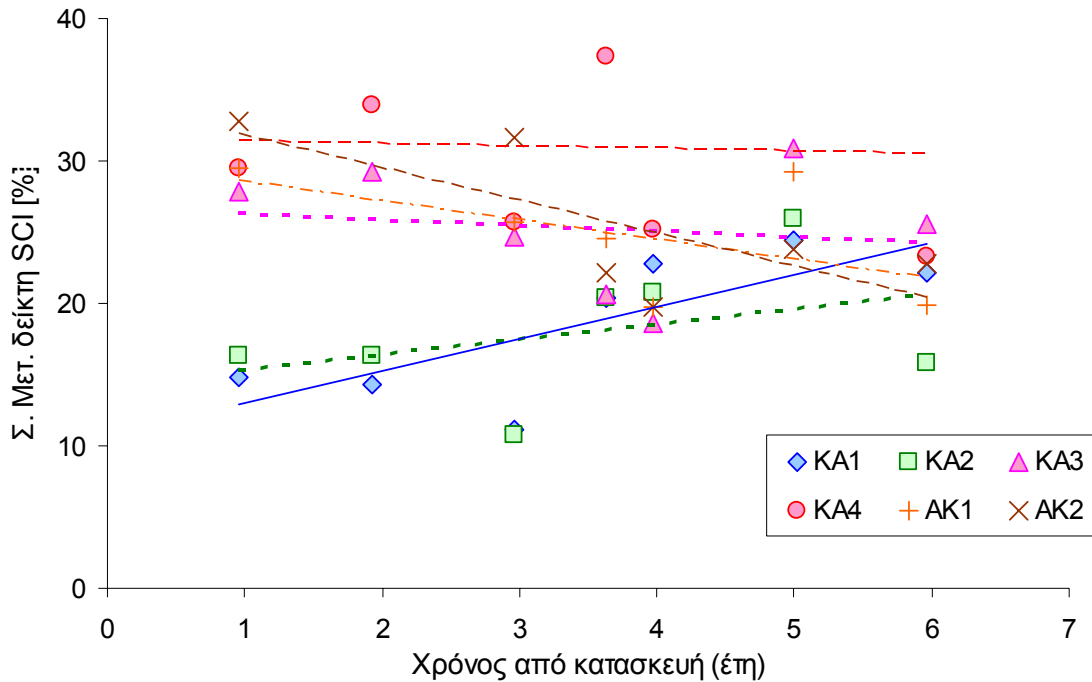
Σχήμα 6.6β. Εξέλιξη μέσου όρου δείκτη SCI

Διαπιστώνεται τάση μείωσης των τιμών των δεικτών, καθώς και των διαφορών μεταξύ των πειραματικών τμημάτων. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη μικρής βελτίωσης ή σταθεροποίησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων με τον χρόνο, καθώς και μείωση των διαφορών μεταξύ των πειραματικών τμημάτων. Οι τιμές του Μ.Ο. του δείκτη D_0 κυμάνθηκαν ως επί το πλείστον μεταξύ 40 και 60 μm (σε θερμοκρασία 20°C). Λόγω του μεγάλου αριθμού συλλεχθέντων στοιχείων, τα υπόψη όρια μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αντιπροσωπευτικά για ανακυκλωμένα ημιάκαμπτα οδοστρώματα με χαρακτηριστικά διατομής αντίστοιχα των πειραματικών τμημάτων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Οι τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας των δεικτών D_0 και SCI παρουσιάζονται στον Πίνακα Π9.2 του Παραρτήματος και γραφικά στα Σχήματα 6.7α και 6.7β αντίστοιχα. Στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσιάστηκε μέτριο έως καλό επίπεδο ομοιογένειας (υποκεφάλαιο 5.2.1, Πίνακας 5.2), χωρίς να παρατηρηθεί συγκεκριμένη τάση μεταβολής του συντελεστή μεταβλητότητας με τον χρόνο.



Σχήμα 6.7α. Εξέλιξη συντελεστή μεταβλητότητας δείκτη D_0



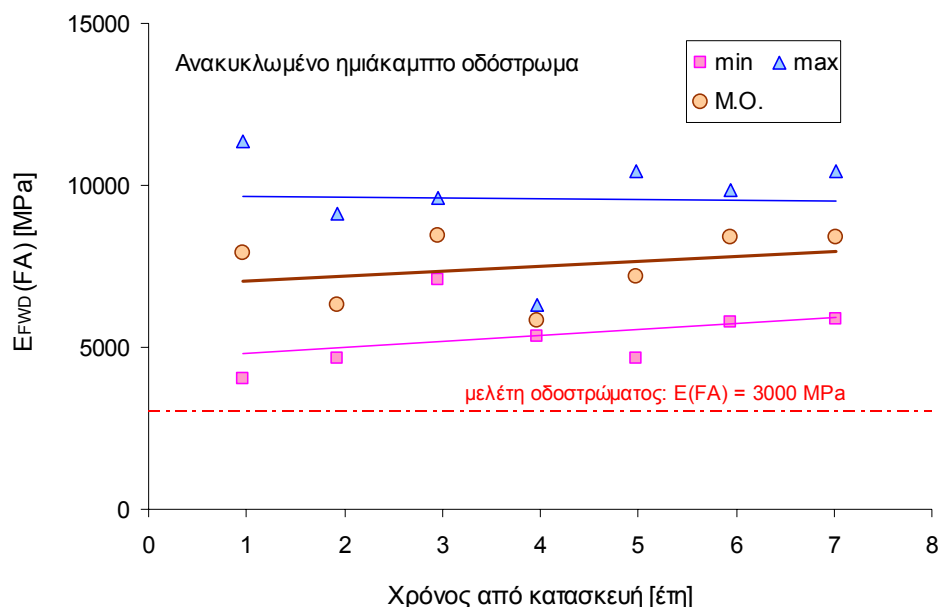
Σχήμα 6.7β. Εξέλιξη συντελεστή μεταβλητότητας δείκτη SCI

6.3.2 Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών, για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων και κατά συνέπεια της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. Όπως και στην περίπτωση των δοκιμών κατά το αρχικό στάδιο της λειτουργίας του οδοστρώματος, οι υπολογισμοί έγιναν στις θέσεις πυρηνοληψίας του ημιακάμπτου (πειραματικό τμήμα KA1) και ευκάμπτου (πειραματικό τμήμα ΛΑ1) οδοστρώματος. Παρακάτω, αναφέρονται οι αναλύσεις των αποτελεσμάτων των δοκιμών στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα ίχνη τροχών, ώστε να υπάρχει σύγκριση της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας, σε σχέση με τα σημεία όπου δεν υπάρχει φόρτιση. Όλες οι τιμές των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης είναι «διορθωμένες» στη θερμοκρασία αναφοράς 25°C. Η επιλογή της συγκεκριμένης θερμοκρασίας έγινε για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, επειδή είναι πλησιέστερη στις επιτόπου μετρηθείσες θερμοκρασίες κατά τις διάφορες φάσεις των επιτόπου δοκιμών.

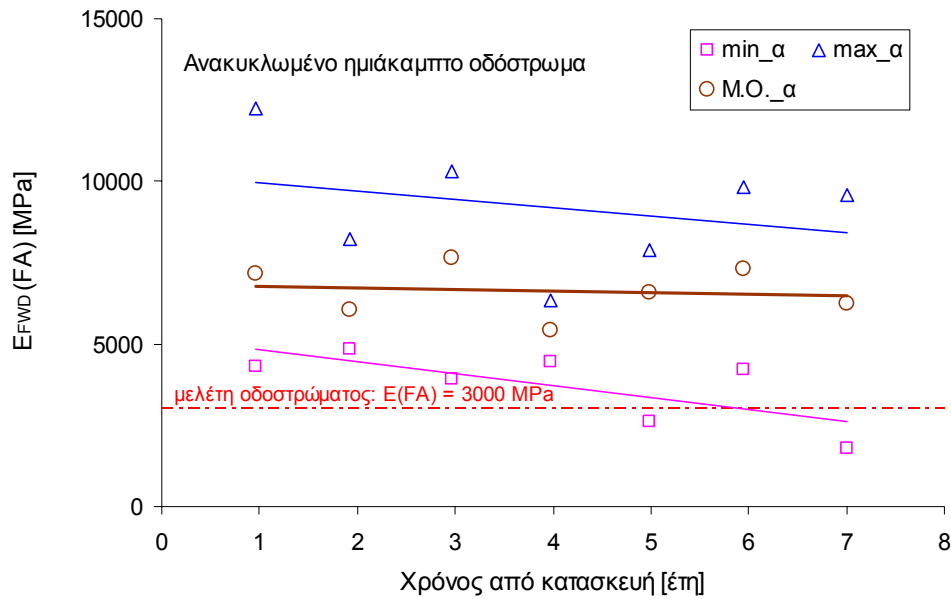
6.3.2.1 Κατεργασμένη με αφρώδη άσφαλτο στρώση

Οι τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης παρουσιάζονται στους Πίνακες Π10.1α, Π10.1β, Π10.4α και Π10.4β του Παραρτήματος. Στους υπόψη πίνακες οι τιμές που ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες παραδοχές της μελέτης (ημιάκαμπτο οδόστρωμα: 3000 MPa, εύκαμπτο οδόστρωμα: 1500 MPa) επισημαίνονται με γκρι χρώμα. Η εξέλιξη χρονικά της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης $E_{FWD}(FA)$ παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 6.8α και 6.8β για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και στα Σχήματα 6.9α και 6.9β για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών. Λόγω της διακύμανσης των τιμών, δεν προκύπτει ότι ο μέσος όρος είναι αντιπροσωπευτικός του τμήματος για την εκάστοτε χρονική περίοδο αξιολόγησης (φάση δοκιμών). Είναι όμως αντιπροσωπευτικός, για την αξιολόγηση της μεταβολής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού με τον χρόνο.



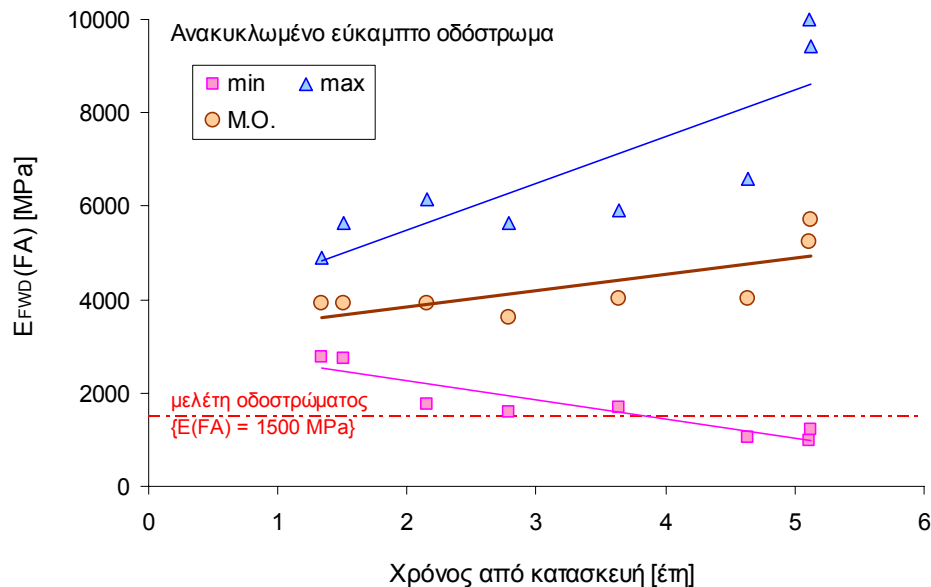
Σχήμα 6.8α. Τιμές $E_{FWD}(FA)$ ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) $E(FA)$:** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (μελέτη οδοστρώματος). **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



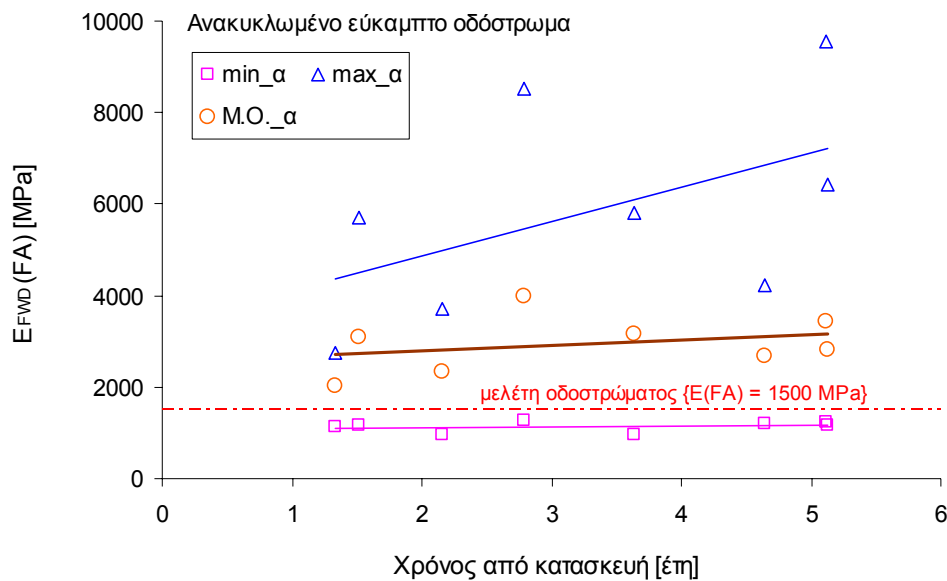
Σχήμα 6.8β. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (μελέτη οδοστρώματος). **3) min_α:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_α:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 6.9α. Τιμές E_{FWD} (FA) ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) E (FA):** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (μελέτη οδοστρώματος). **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 6.9β. Τιμές $E_{FWD} (FA)$ ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD} (FA)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) $E (FA)$:** Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης (μελέτη οδοστρώματος). **3) min_α:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_α:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών

Από τις κλίσεις των γραμμών συσχέτισης των μέσων τιμών (Πίνακας 6.1) παρατηρείται μικρή αύξηση, ή σταθεροποίηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης της κατεργασμένης στρώσης. Κατά συνέπεια, εκτιμάται ότι κατά το χρονικό διάστημα της ανάλυσης, παρά την καταπόνηση του οδοστρώματος δεν παρουσιάζεται τάση μείωσης του μέτρου ελαστικής καταπόνησης του κατεργασμένου υλικού, με συνέπεια η εξέλιξη της δομικής του κατάστασης να κρίνεται ως σταθερή. Επιπλέον, ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών παρατηρήθηκαν περισσότερες περιπτώσεις (θέσεις / φάσεις δοκιμών) με τιμές μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης μικρότερες από τις αντίστοιχες των παραδοχών της μελέτης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

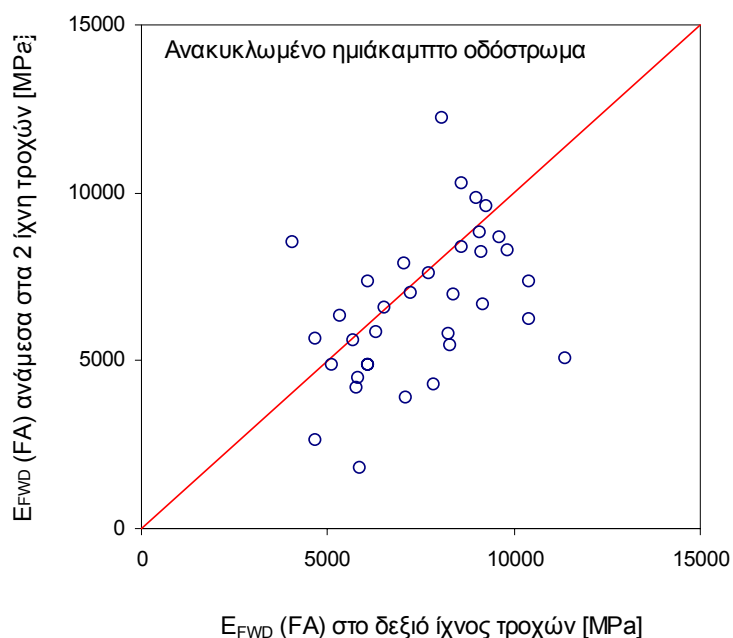
Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές του $E_{FWD} (FA)$ στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές ανάμεσα στα ίχνη τροχών έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακες Π10.1γ και Π10.4γ Παραρτήματος). Προκειμένου να διερευνηθεί η συμμεταβολή των τιμών $E_{FWD} (FA)$, γίνεται έλεγχος των υπόψη διαφορών ως προς τη διαφορά των μέσων όρων των δύο θεωρούμενων δειγμάτων. Για τον έλεγχο της προαναφερόμενης μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιείται το στατιστικό t-test των κατά ζεύγη

παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση οι διαφορές των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών δεν διαφέρουν σημαντικά από τη διαφορά των μέσων όρων των τιμών τους (Πίνακες Π10.1δ και Π10.4δ Παραρτήματος). Κατά συνέπεια, οι διαφορές των μέσων όρων (869 MPa για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και 1350 MPa για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα) μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικές των διαφορών του E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές ανάμεσα στα ίχνη τροχών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες Π10.1ε και Π10.4ε του Παραρτήματος και γραφικά στα Σχήματα 6.10α και 6.10β. Τα βασικά στατιστικά στοιχεία όπως ο μέσος όρος (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (Σ.Μετ.) των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Στοιχεία αναλύσεων: E_{FWD} (FA)

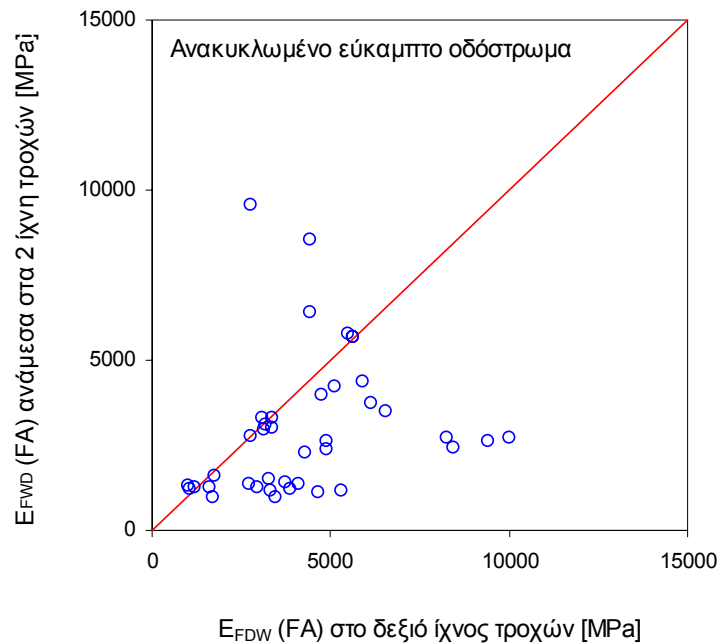
Πειραματικό τμήμα	Ίχνος τροχών	Κλίση γραμμής συσχέτισης [MPa/έτος]	Μ.Ο. [MPa]	Τ.Α.	Σ.Μετ	Τύπος οδοστρώματος
ΚΑ1	Δ	154	7502	1871	24,9	Ημιάκαμπτο
ΚΑ1α	Αν	-45	6633	2223	33,5	
ΛΑ1	Δ	350	4296	2151	50,1	Εύκαμπτο
ΛΑ1α	Αν	125	2946	2045	69,4	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμή στο δεξιό ίχνος. **2) Αν:** δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών



Σχήμα 6.10α. Σύγκριση E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: **E_{FWD} (FA):** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης



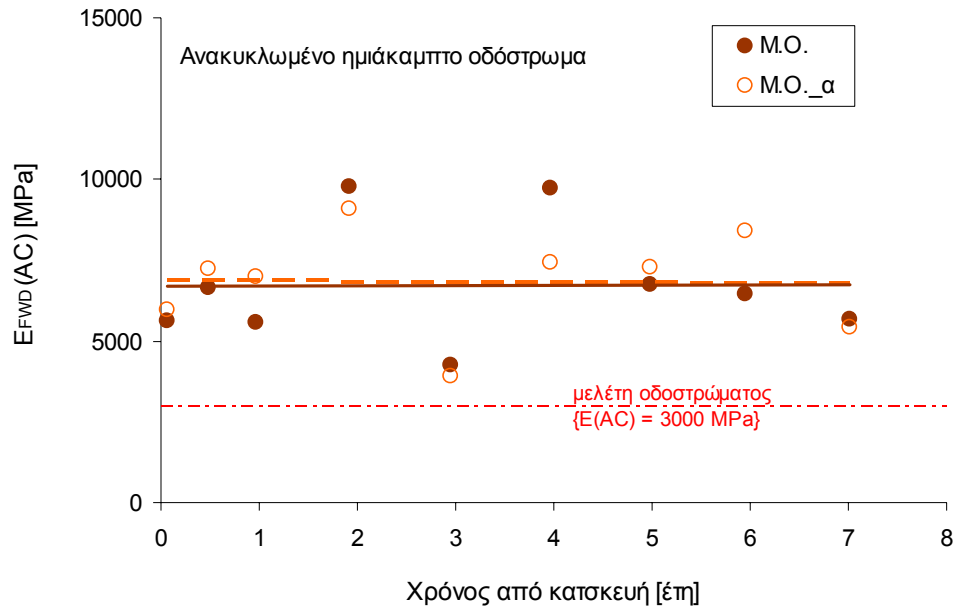
Σχήμα 6.10β. Σύγκριση $E_{FWD} (FA)$ στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: **$E_{FWD} (FA)$** : Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι στο δεξιό ίχνος τροχών, παρά το γεγονός της καταπόνησης από τα φορτία της κυκλοφορίας, οι τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού ήταν μεγαλύτερες, σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάμεσα στα δύο ίχνη, όπου δεν υπάρχει φόρτιση. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην περαιτέρω συμπύκνωση (post-compaction) της κατεργασμένης στρώσης, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας «ωρίμανσης» του υλικού.

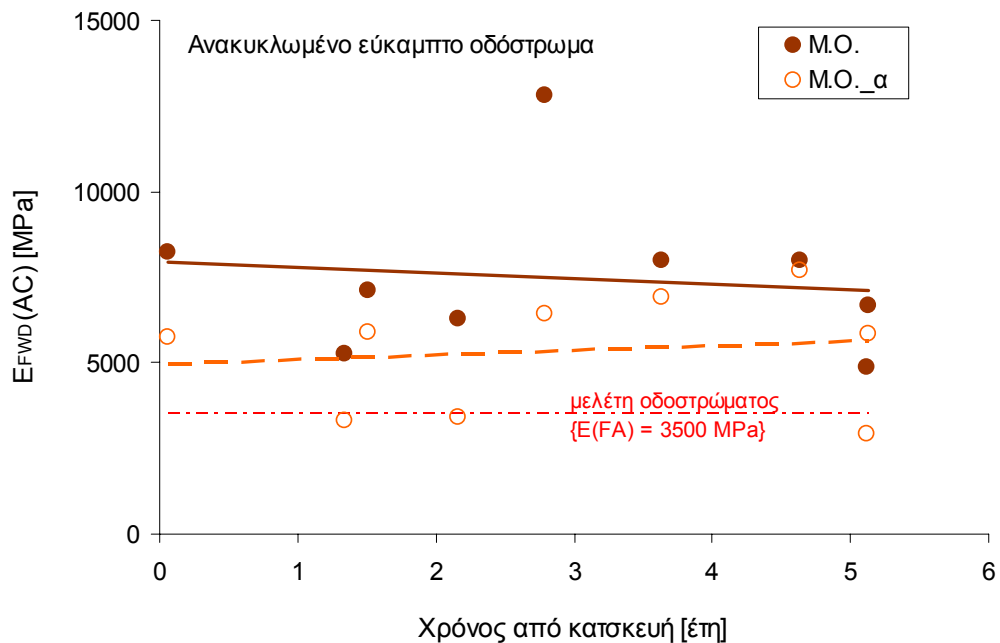
6.3.2.2 Ασφαλτικές στρώσεις

Τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες Π10.2α, Π10.2β, Π10.5α και Π10.5β του Παραρτήματος. Η εξέλιξη χρονικά της μέσης τιμής του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων $E_{FWD} (AC)$ παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 6.11α και 6.11β. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών. Όπως φαίνεται και από τις κλίσεις των γραμμών συσχέτισης των μέσων τιμών (Πίνακας 6.2), το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων παραμένει σταθερό.



Σχήμα 6.11α. Τιμές $E_{FWD}(AC)$ ως προς το χρόνο

Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(AC)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων. **2) $E(AC)$:** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων (μελέτη οδοστρώματος). **3) M.O.:** Μέσος όρος τιμών στο δεξι ίχνος. **4) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών ανάμεσα στα 2 ίχνη



Σχήμα 6.11β. Τιμές $E_{FWD}(AC)$ ως προς το χρόνο

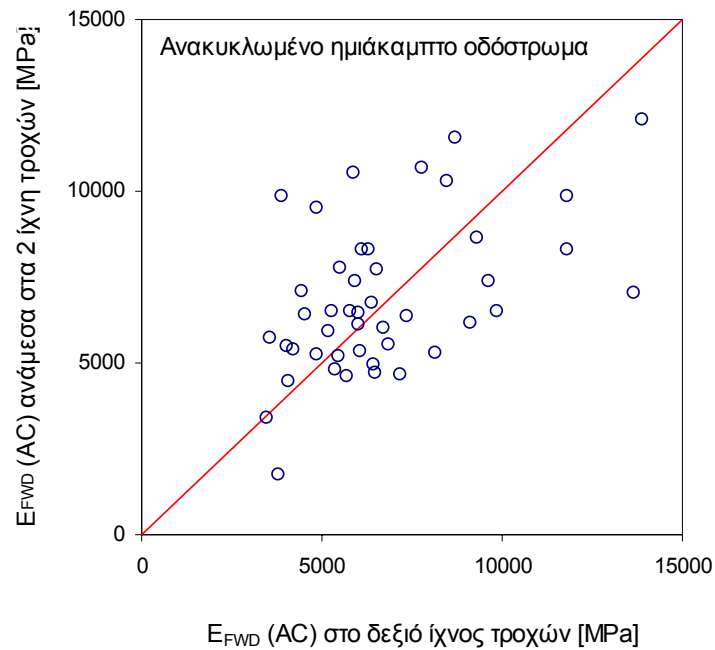
Υποσημείωση: **1) $E_{FWD}(AC)$:** Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων. **2) $E(AC)$:** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων (μελέτη οδοστρώματος). **3) M.O.:** Μέσος όρος τιμών στο δεξι ίχνος. **4) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών ανάμεσα στα 2 ίχνη

Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές του E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών στο ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο οδόστρωμα δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π10.2γ Παραρτήματος). Αντίθετα, στο ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακας Π10.5γ Παραρτήματος). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 6.12α και 6.12β. Τα βασικά στατιστικά στοιχεία, όπως ο μέσος όρος (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (Σ.Μετ.) των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Στοιχεία αναλύσεων: E_{FWD} (AC)

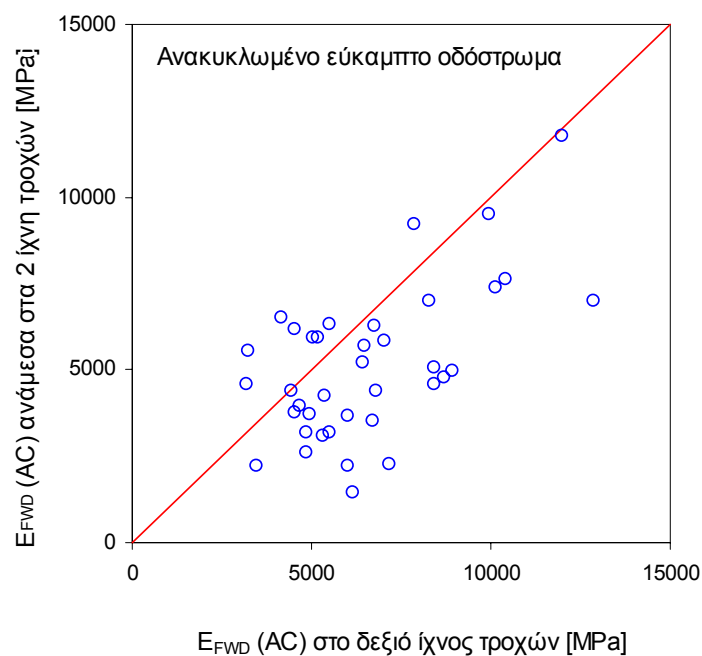
Πειραματικό τμήμα	Ίχνος τροχών	Κλίση γραμμής συσχέτισης [MPa/έτος]	Μ.Ο. [MPa]	Τ.Α.	Σ.Μετ	Τύπος ανακυκλωμένου οδοστρώματος
ΚΑ1	Δ	11	6723	2534	37.7	Ημιάκαμπτο
ΚΑ1α	Αν	-13	6856	2201	32.1	
ΛΑ1	Δ	-163	6800	2675	39.3	Εύκαμπτο
ΛΑ1α	Αν	138	5225	2199	42.1	

Υποσημείωση: **Δ**: δοκιμή στο δεξιό ίχνος τροχών, **Αν**: δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών



Σχήμα 6.12α. Σύγκριση E_{FWD} (AC) στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: E_{FWD} (AC): Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων



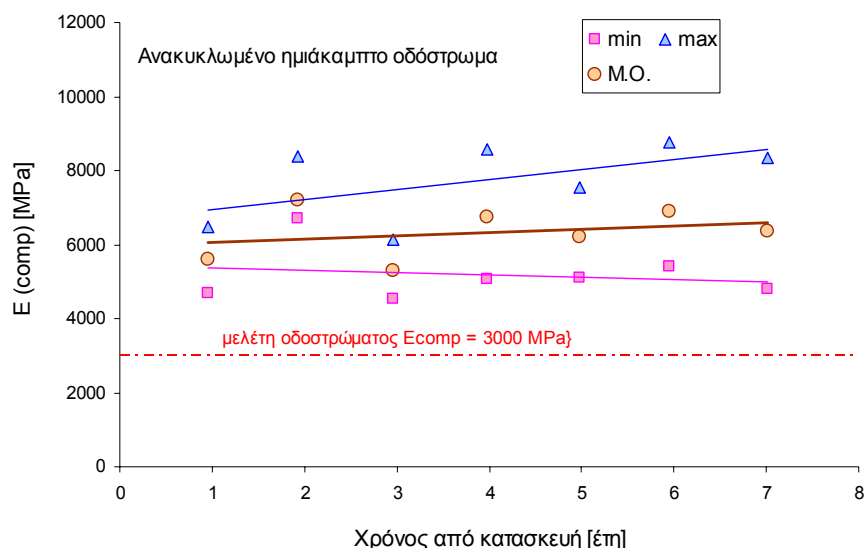
Σχήμα 6.12β. Σύγκριση E_{FWD} (AC) στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: E_{FWD} (AC): Ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων

Όπως έχει αναφερθεί στις αντίστοιχες αναλύσεις κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, οι μέσες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των μιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων ήταν υψηλές ήδη από τις πρώτες ημέρες μετά την απόδοση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος στην κυκλοφορία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, δεν παρατηρήθηκε τάση μείωσης της μέσης τιμής του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων με τον χρόνο. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα φορτία κυκλοφορίας δεν είχαν αρνητική επίδραση στη δομική κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων.

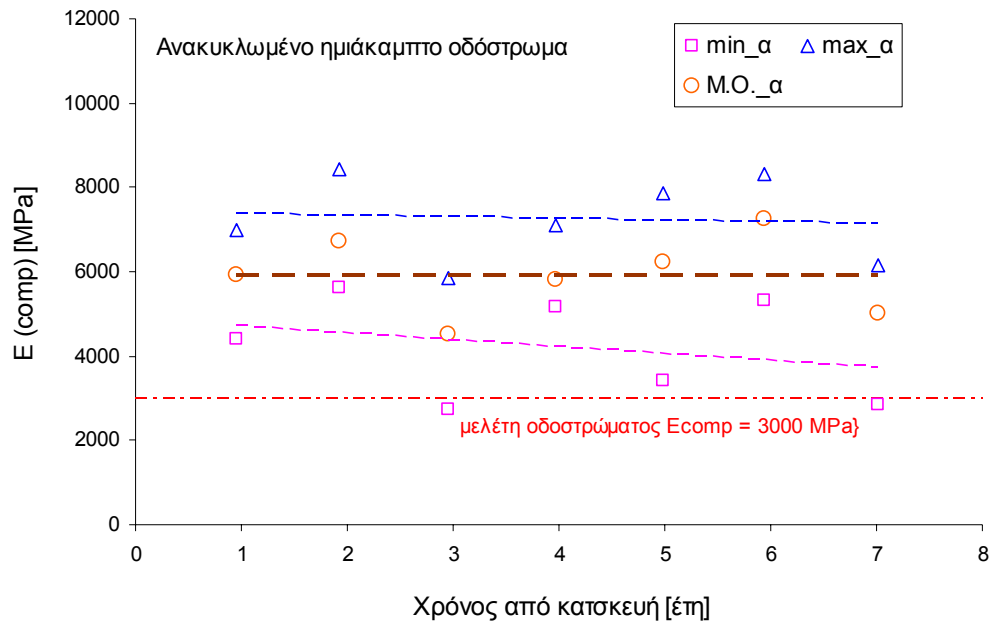
6.3.2.3 Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης

Τα αποτελέσματα του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται στους Πίνακες Π10.3α, Π10.3β, Π10.6α και Π10.6β του Παραρτήματος. Οι τιμές που ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες παραδοχές της μελέτης (ημιάκαμπτο οδόστρωμα: $E_{comp} = 3000$ MPa, εύκαμπτο οδόστρωμα: $E_{comp} = 2070$ MPa) επισημαίνονται με γκρι χρώμα. Η εξέλιξη χρονικά της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής του ανάστροφα υπολογισμένου σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $E (comp)$ παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 6.13α και 6.13β για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και στα Σχήματα 6.14α και 6.14β για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα. Οι τιμές με ένδειξη «α» αφορούν σε δοκιμές ανάμεσα από τα δύο ίχνη τροχών. Από τις κλίσεις των γραμμών συσχέτισης των μέσων τιμών (Πίνακας 6.3) παρατηρείται σταθεροποίηση του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης.



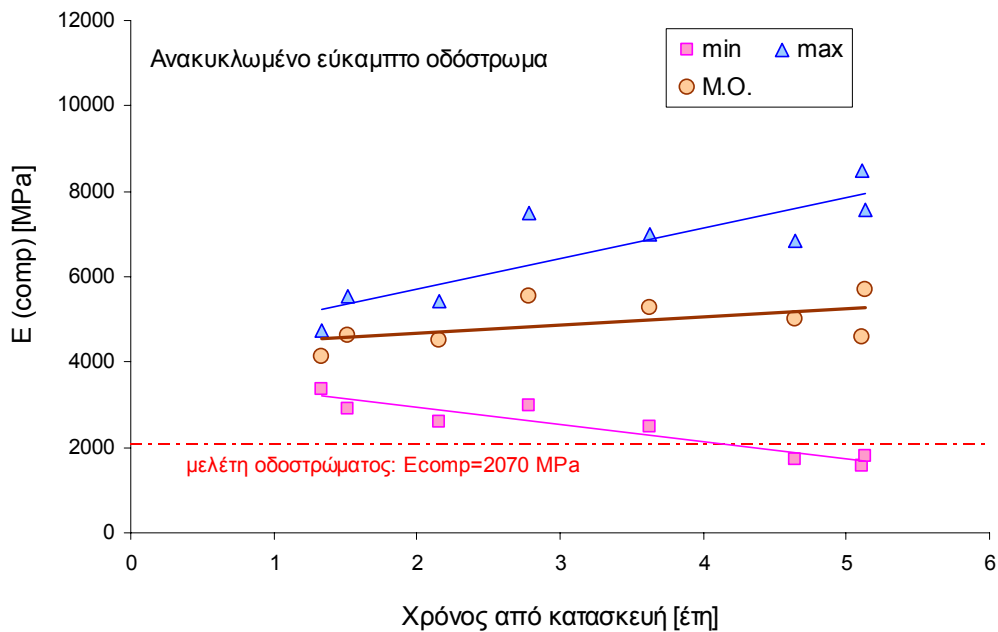
Σχήμα 6.13α. Τιμές $E (comp)$ ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνη τροχών

Υποσημείωση: **1) $E(\text{comp})$:** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) $\min$:** Ελάχιστη τιμή. **4) $\max$:** Μέγιστη τιμή. **5) $M.O.$:** Μέσος όρος τιμών



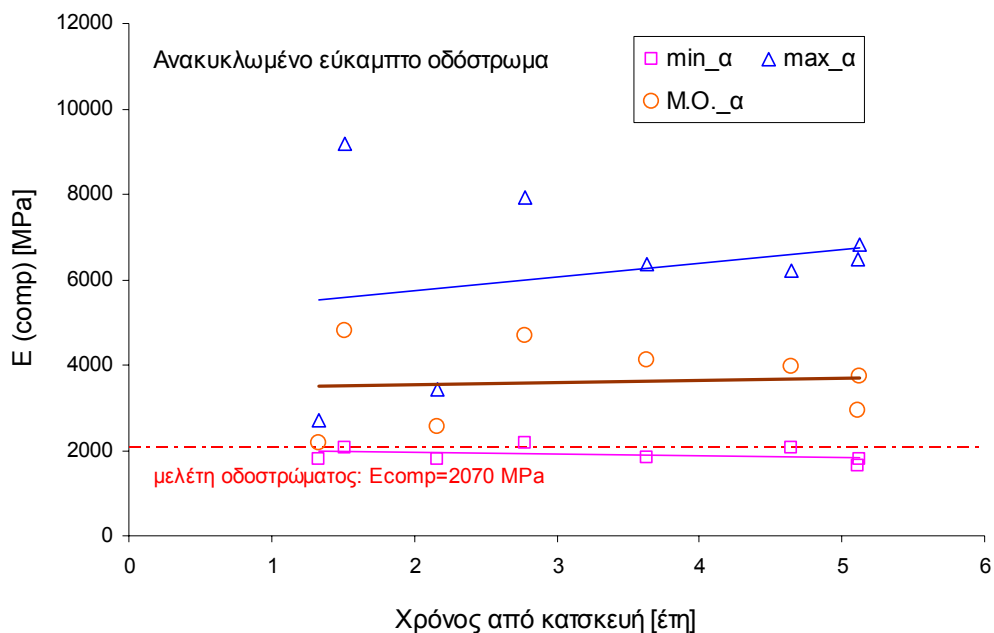
Σχήμα 6.13β. Τιμές $E(\text{comp})$ ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη

Υποσημείωση: **1) $E(\text{comp})$:** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) $\min_{\alpha}$:** Ελάχιστη τιμή. **4) $\max_{\alpha}$:** Μέγιστη τιμή. **5) $M.O._{\alpha}$:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 6.14α. Τιμές $E(\text{comp})$ ως προς το χρόνο στο δεξιό ίχνος τροχών

Υποσημείωση: **1) E (comp):** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min:** Ελάχιστη τιμή. **4) max:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O.:** Μέσος όρος τιμών



Σχήμα 6.14β. Τιμές E (comp) ως προς το χρόνο ανάμεσα στα 2 ίχνη

Υποσημείωση: **1) E (comp):** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) E_{comp} :** Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης από μελέτη οδοστρώματος. **3) min_α:** Ελάχιστη τιμή. **4) max_α:** Μέγιστη τιμή. **5) M.O._α:** Μέσος όρος τιμών

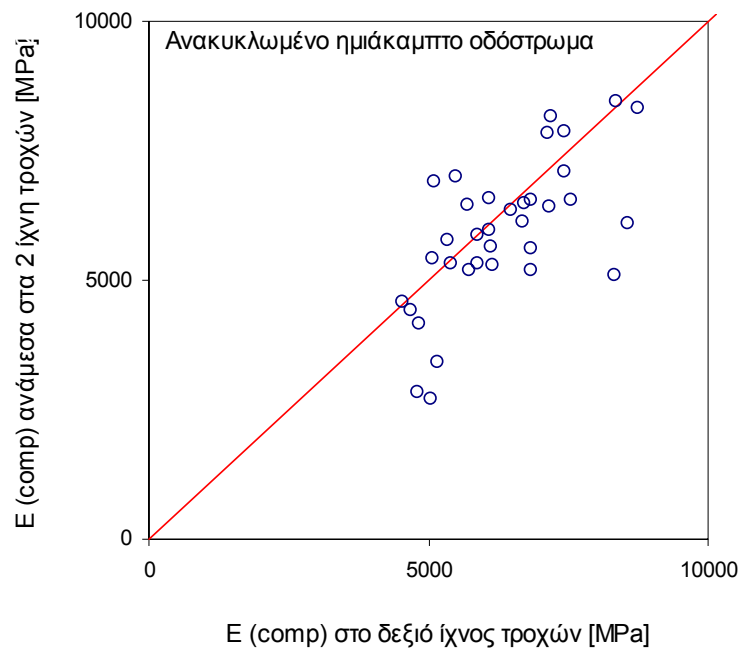
Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης E (comp) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t -test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (Πίνακες Π10.3γ και Π10.6γ Παραρτήματος). Προκειμένου να διερευνηθεί η συμμεταβολή των τιμών του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης E (comp), γίνεται έλεγχος των υπόψη διαφορών ως προς τη διαφορά των μέσων όρων των δύο θεωρούμενων δειγμάτων. Για τον έλεγχο της προαναφερόμενης μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιείται το στατιστικό t -test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Σύμφωνα με την υπόψη ανάλυση οι διαφορές των αποτελεσμάτων των ανάστροφων υπολογισμών δεν διαφέρουν σημαντικά από τη διαφορά των μέσων όρων των τιμών τους (Πίνακες Π10.3δ και Π10.6δ Παραρτήματος). Κατά συνέπεια, οι διαφορές των μέσων όρων (410 MPa για το ανακυκλωμένο ημιάκαμπτο και 1304 MPa για το ανακυκλωμένο εύκαμπτο οδόστρωμα) μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικές των

διαφορών του E (comp) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες δοκιμές ανάμεσα στα ίχνη τροχών. Τα βασικά στατιστικά στοιχεία όπως ο μέσος όρος (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (Σ.Μετ.) των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Στοιχεία αναλύσεων: E (comp)

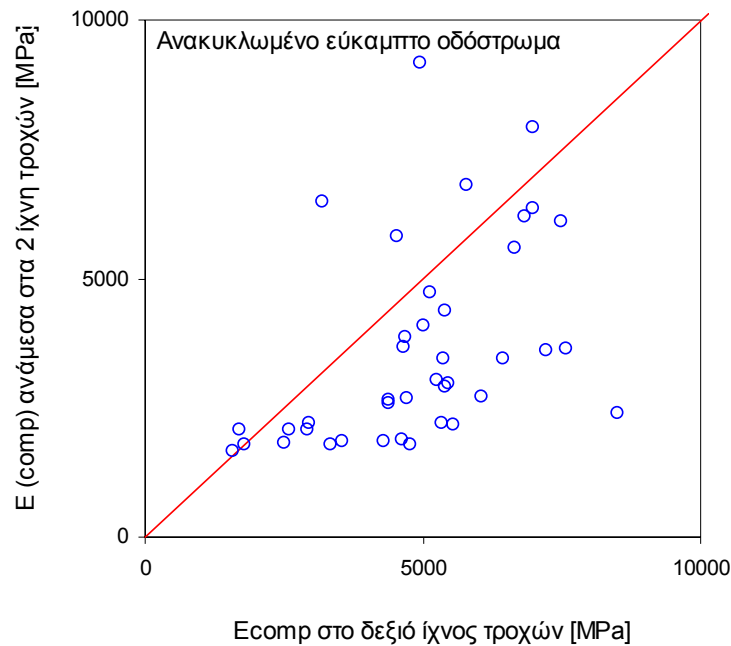
Πειραματικό τμήμα	Ίχνος τροχών	Κλίση γραμμής συσχέτισης [MPa/έτος]	Μ.Ο. [MPa]	Τ.Α.	Σ.Μετ	Τύπος οδοστρώματος
ΚΑ1	Δ	91	6328	1170	18.5	Ημιάκαμπτο
ΚΑ1α	Αν	0	5918	1403	23.7	
ΛΑ1	Δ	190	4917	1697	34.5	Εύκαμπτο
ΛΑ1α	Αν	55	3613	1929	53.4	

Υποσημείωση: **Δ**: δοκιμή στο δεξιό ίχνος τροχών, **Αν**: δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών



Σχήμα 6.15α. Σύγκριση E (comp) στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: **E (comp)**: Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί)



Σχήμα 6.15β. Σύγκριση $E (comp)$ στο δεξιό ίχνος τροχών και ανάμεσα στα δύο ίχνη

Υποσημείωση: **$E (comp)$** : Σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ανάστροφοι υπολογισμοί)

Οι μέσες τιμές του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης ήταν μεγαλύτερες στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάμεσα στα δύο ίχνη, όπου δεν υπάρχει φόρτιση. Αντίστοιχες διαπιστώσεις προέκυψαν και από τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, όχι όμως των ασφαλτικών στρώσεων (ημιάκαμπτο οδόστρωμα). Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα φορτία από την κυκλοφορία είχαν συνεισφορά στην αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, πιθανόν λόγω περαιτέρω συμπίκνωσης (post-compaction) κατά την περίοδο της «ωρίμανσης», χωρίς να επιδράσουν αρνητικά στη δομική κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων.

6.3.2.4 Επιμέρους συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού προέκυψαν τα παρακάτω βασικά συμπεράσματα.

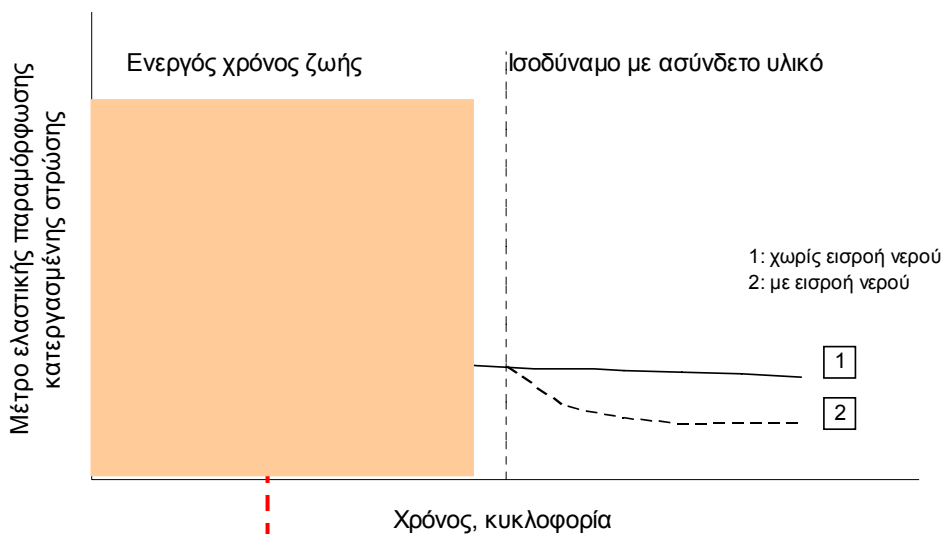
- Σύμφωνα με τις δοκιμές κατά τη διάρκεια των πρώτων επτά περίπου ετών υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, δεν παρατηρήθηκε τάση μείωσης της μέσης τιμής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, καθώς και του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων με τον χρόνο. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα

φορτία κυκλοφορίας δεν είχαν αρνητική επίδραση στη δομική κατάσταση της κατεργασμένης στρώσης, καθώς και των ασφαλικών στρώσεων.

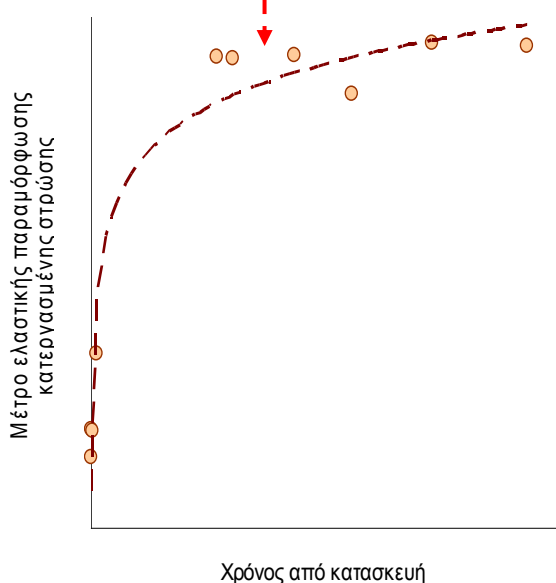
- Σημαντικές διαφορές στα ανάστροφα υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων μεταξύ δεξιού ίχνους τροχών (μεγαλύτερες τιμές) και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών παρατηρήθηκαν μόνο στο εύκαμπτο οδόστρωμα. Η μέση τιμή του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, αλλά και του σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης ήταν μεγαλύτερη κατά τις δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα φορτία από την κυκλοφορία είχαν συνεισφορά στην αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού ενδεχομένως λόγω περαιτέρω συμπίκνωσης (post-compaction) πριν την «ωρίμανση» του υλικού, χωρίς να επιδράσουν αρνητικά στη δομική κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων.
- Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.16α, παρουσιάζεται γραφικά η έως τώρα επικρατούσα άποψη, σύμφωνα με την οποία υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας παρατηρείται μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (Asphalt Academy 2002). Τα συμπεράσματα αυτά, όπως αναφέρεται και στο υποκεφάλαιο 2.11, προέκυψαν με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS), όπου παρατηρήθηκε απώλεια της συνοχής του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού. Από την παρούσα διερεύνηση διαπιστώνεται εντελώς διαφορετική επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού, χωρίς ενδείξεις απώλειας της συνοχής του υλικού υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας, τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα διενέργειας (7 περίπου ετών) των επιτόπου δοκιμών (Σχήμα 6.16β). Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στις υψηλές τιμές των μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, που συνεισφέρουν στη διατήρηση της εντατικής / παραμορφωσιακής κατάστασης στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε χαμηλά επίπεδα τιμών.
- Οι μέσες τιμές των μέτρων δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των νέων στρώσεων (ασφαλικές στρώσεις και κατεργασμένη στρώση) του ανακυκλωμένου οδοστρώματος ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες, από αυτές που είχαν εκτιμηθεί στο εργαστήριο και ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική διαστασιολόγηση (μελέτη) του οδοστρώματος. Αυτό καταδεικνύει, ότι στο έργο είναι δυνατόν να επιτευχθούν βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, σε σχέση με αυτά που εκτιμώνται στο εργαστήριο. Στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος με αναλυτική μέθοδο πιστεύεται ότι είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη τα βελτιωμένα

μηχανικά χαρακτηριστικά. Πρέπει όμως να γίνει εξισορρόπηση των εργαστηριακών με τις επιτόπου τιμές, λαμβάνοντας υπόψη και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων.

Από τις παραπάνω διαπιστώσεις καταδεικνύεται η αξία των επιτόπου δοκιμών υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας (real loading testing: RLT), οι οποίες όμως έχουν το μειονέκτημα ότι είναι πολύ χρονοβόρες, σε σχέση με τις δοκιμές επιταχυνόμενης καταπόνησης APT με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS).



Σχήμα 6.16α. Συμπεριφορά κατεργασμένης στρώσης, σύμφωνα με τη διεθνώς επικρατούσα άποψη



Σχήμα 6.16β. Συμπεριφορά κατεργασμένης στρώσης, σύμφωνα με την παρούσα διερεύνηση

Πιστεύεται, ότι συνδυαστικές δοκιμές RLT και APT στα συγκεκριμένα ή/και σε νέα πειραματικά τμήματα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απάλειψη των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι δοκιμές APT με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS). Επιπλέον, σε συνδυασμό και με εργαστηριακές δοκιμές θα μπορούσαν πιθανόν να αναπτυχθούν «σχέσεις μεταφοράς» για το κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό, προς αναθεώρηση / συμπλήρωση των αντίστοιχων σχέσεων, οι οποίες αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.11.

7. ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

7.1. Γενικά

Οι εκτιμήσεις που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια στηρίζονται σε αποτελέσματα των αναλύσεων των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων, με βάση τα οποία εκτιμήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη. Η διαδικασία αυτή για τον αναλυτικό υπολογισμό των εντατικών μεγεθών στα οδοστρώματα είναι αποδεκτή σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική. Η αξιοπιστία όμως των αποτελεσμάτων εξαρτάται από τις παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη, καθώς και από την ακρίβεια των λογισμικών που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, έγινε σχεδιασμός και εγκατάσταση συστήματος μέτρησης (instrumentation) της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης σε κρίσιμα σημεία του «σώματος» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Δόθηκε έτσι η δυνατότητα σύγκρισης των επιτόπου μετρημένων τιμών, με τις αναλυτικά υπολογισμένες, με σκοπό την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Αξίζει να τονιστεί, ότι η εγκατάσταση αντίστοιχων συστημάτων μέτρησης γίνεται διεθνώς για ερευνητικούς και μόνο λόγους. Δεν αποτελεί δηλαδή ευρέως εφαρμοζόμενη διαδικασία επιτόπου δοκιμών.

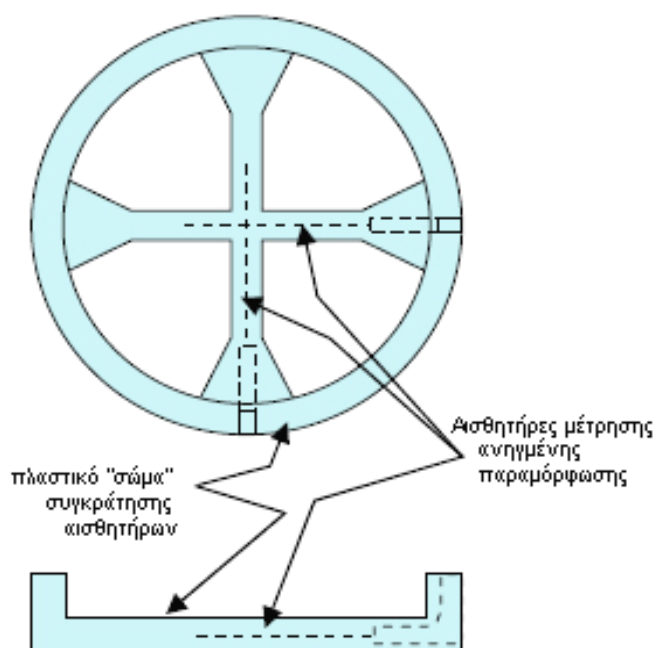
Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρες οπτικών ινών (fiber optics), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο «σώμα» του υφισταμένου οδοστρώματος. Η πιλοτική εγκατάσταση του συστήματος οπτικών ινών έγινε στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας με το εργαστήριο οδοστρωμάτων του Πανεπιστημίου Laval.

Στα εδάφια που ακολουθούν γίνεται αναφορά στις γενικές αρχές που διέπουν τις μετρήσεις με το υπόψη σύστημα, περιγράφονται οι διαδικασίες εγκατάστασης και εκτέλεσης των επιτόπου δοκιμών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων.

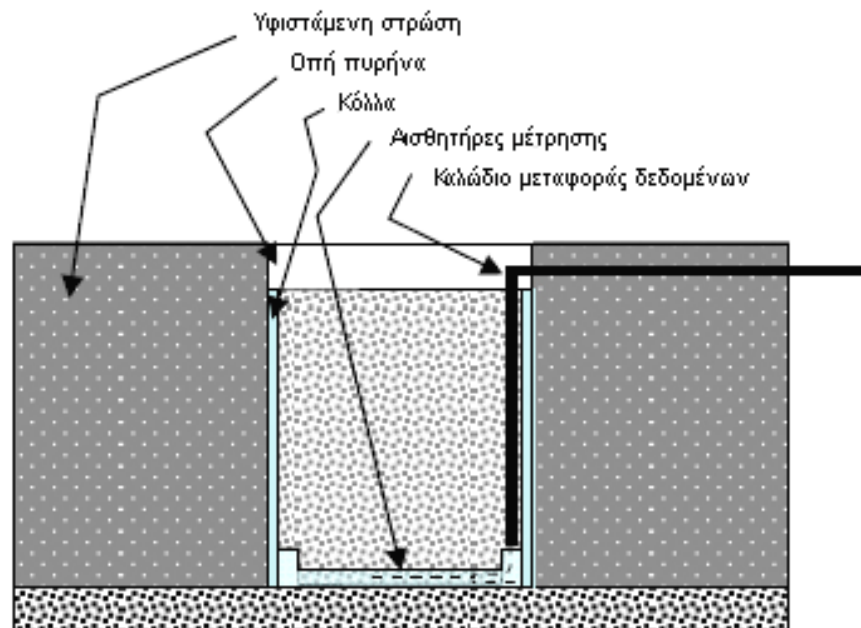
7.2. Περιγραφή - γενικές αρχές συστήματος οπτικών ινών

Το σύστημα μέτρησης περιλαμβάνει ένα πλαστικό «σώμα» (Σχήμα 7.1) συγκράτησης δύο κάθετα τοποθετημένων αισθητήρων οπτικών ινών για μέτρηση της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης. Το πλαστικό «σώμα» προσαρμόζεται στο εργαστήριο στο επιθυμητό σημείο μέτρησης στον πυρήνα ασφαλτικής ή κατεργασμένης στρώσης. Ο πυρήνας με το σύστημα μέτρησης τοποθετείται στο οδόστρωμα σε οπή πυρήνα κατάλληλης διαμέτρου και γίνεται συγκόλληση με τις παρειές της οπής (Σχήμα 7.2). Τα δεδομένα λαμβάνονται μέσω καλωδίου οπτικών ινών.

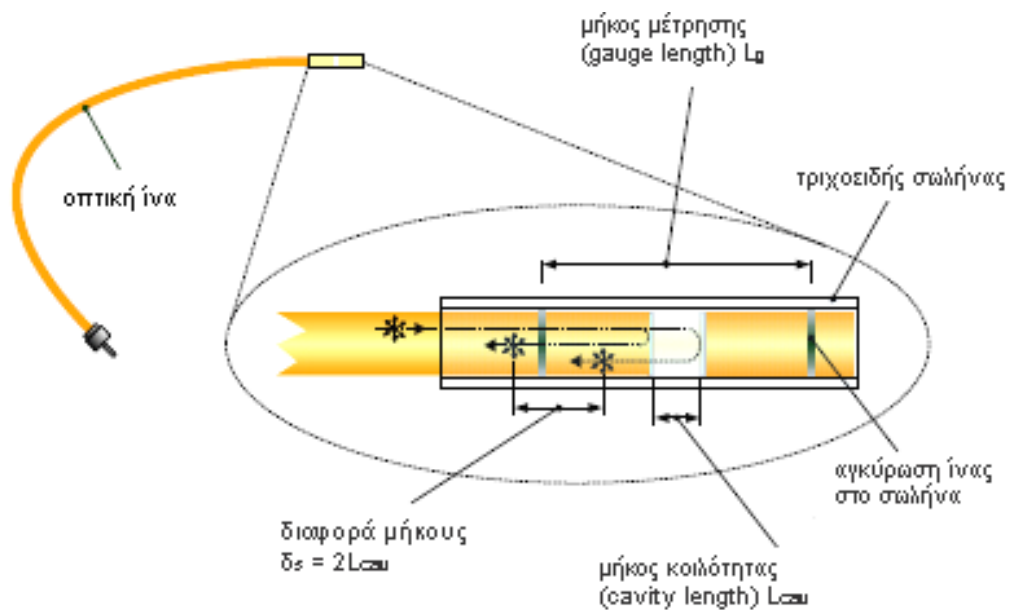
Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η διάταξη μέτρησης της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης μέσω ενός αισθητήρα οπτικών ινών. Ο αισθητήρας αποτελείται από δύο οπτικές ίνες ευθυγραμμισμένες με ακρίβεια μέσα σε ένα τριχοειδή σωλήνα. Οι δύο ίνες είναι προσαρτημένες στον σωλήνα σε ακριβείς θέσεις και η απόσταση μεταξύ τους ορίζεται ως μήκος μέτρησης (gauge length) L_g . Το κενό, ή η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων των οπτικών ινών ορίζεται ως μήκος κοιλότητας (cavity length) L_{cav} .



Σχήμα 7.1. Σύστημα μέτρησης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης (Doré et al. 2007)



Σχήμα 7.2. Εγκατάσταση συστήματος οπτικών ινών (Doré et al. 2007)



Σχήμα 7.3. Αισθητήρας μέτρησης ανηγμένης παραμόρφωσης (Doré et al. 2007)

Η διαφορά μήκους δ_s , η οποία ισούται με δύο φορές το μήκος κοιλότητας, μεταβάλλεται συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης του υλικού, στο οποίο είναι προσαρτημένος ο

αισθητήρας. Η συσχέτιση μεταξύ της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ε_r ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) και της διαφοράς μήκους δ_s (nm) δίνεται από τη σχέση (7.1).

$$\delta_s = 2 * L_{cav} = 2 * (L_g * \varepsilon_r + L_0) \quad (7.1)$$

Όπου,

δ_s : διαφορά μήκους [nm]

L_{cav} : μήκος κοιλότητας (cavity length) [nm]

L_g : μήκος μέτρησης (gauge length) [nm]

L_0 : μήκος κοιλότητας για μηδενική παραμόρφωση [nm]

ε_r : οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση

7.3. Εγκατάσταση και εκτέλεση επιτόπου δοκιμών

Η προσαρμογή του συστήματος οπτικών ινών (fiber optics) έγινε στο εργαστήριο οδοποιίας του Πανεπιστημίου Laval, σε τέσσερις πυρήνες που (ανά δύο) αποκόπηκαν από το ημιάκαμπτο (πειραματικό τμήμα KA1) και εύκαμπτο (πειραματικό τμήμα ΛΑ1) οδόστρωμα. Επιλέχθηκαν τα υπόψη πειραματικά τμήματα, επειδή σε αυτά έχει πραγματοποιηθεί συστηματική πυρηνοληψία κατά τις διάφορες φάσεις εκτέλεσης επιτόπου δοκιμών με το σύστημα FWD. Σε κάθε πειραματικό τμήμα, έγινε εγκατάσταση του υπόψη συστήματος σε δύο γειτονικές μεταξύ τους θέσεις, στο δεξιό ίχνος τροχών.

Σε δύο σημεία κάθε πυρήνα εγκαταστάθηκαν συστήματα με δύο αισθητήρες κάθετα τοποθετημένους μεταξύ τους κατά την εγκάρσια και την κατά μήκος (παράλληλα με την κίνηση των οχημάτων) κατεύθυνση. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στη διεπιφάνεια της ασφαλικής με την κατεργασμένη στρώση και στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης (κρίσιμες θέσεις). Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται η θέση τοποθέτησης κάθε αισθητήρα στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος, καθώς και το στατικό πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για τον αναλυτικό υπολογισμό των οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων (ε_r).

Σημειώνεται, ότι στο πλαίσιο της πιλοτικής εγκατάστασης του υπόψη συστήματος στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης αντιμετωπίστηκε η «πρόκληση» της τοποθέτησης των

αισθητήρων οπτικών ινών σε υλικό, το οποίο διαφέρει σε σχέση με τα συνήθη ασφαλτομίγματα (υποκεφάλαιο 2.5)

Στις θέσεις εγκατάστασης του συστήματος οπτικών ινών έγιναν δοκιμές με το Σύστημα FWD. Η τοποθέτηση του κέντρου της πλάκας φόρτισης του FWD έγινε στον κατακόρυφο άξονα z (σύστημα αξόνων: x, y, z). Τα αποτελέσματα των επιτόπου μετρήσεων συγκρίθηκαν με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στα αντίστοιχα σημεία, με βάση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών.

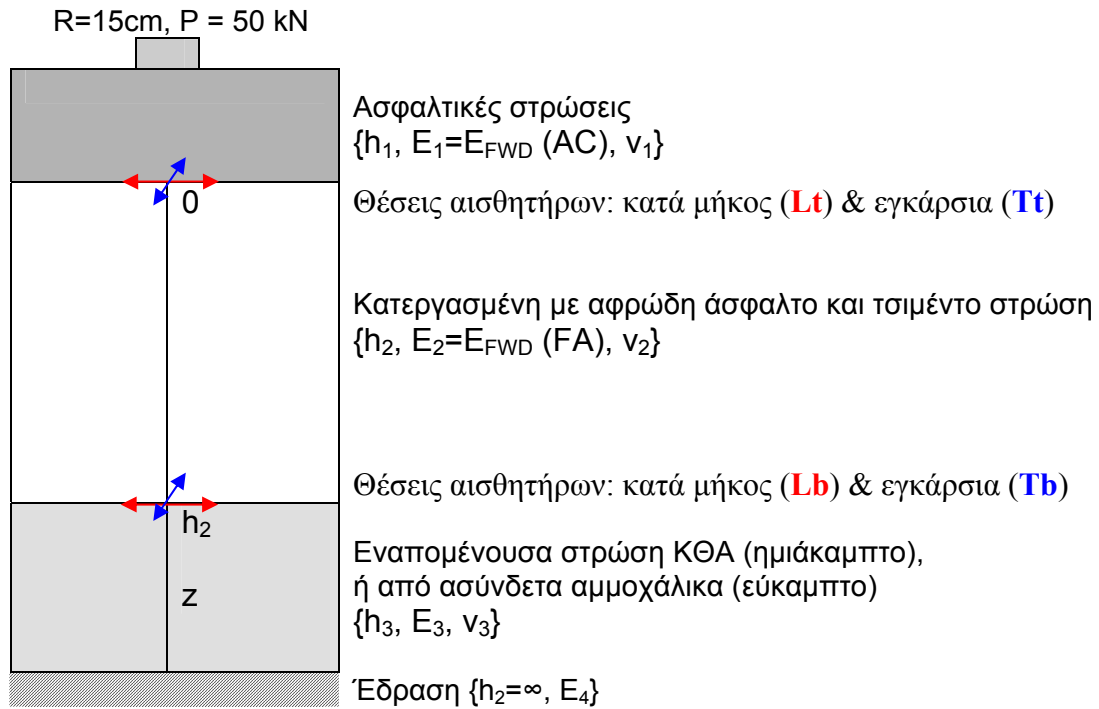
Λόγω των δύο διαφορετικών θέσεων τοποθέτησης των αισθητήρων ως προς τον κατακόρυφο άξονα z και για να είναι σαφής ο προσανατολισμός κάθε αισθητήρα, ως προς την κατεύθυνση της κυκλοφορίας, επελέγη η κωδικοποίηση που φαίνεται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Κωδικοποίηση αισθητήρων σε κάθε θέση μέτρησης

Κατακόρυφη θέση αισθητήρα	Προσανατολισμός, ως προς κατεύθυνση κυκλοφορίας	Κωδικός αισθητήρα
Άνω (διεπιφάνεια ασφαλικής & κατεργασμένης στρώσης)	Εγκάρσια	Tt (Transverse top)
	Κατά μήκος	Lt (Longitudinal top)
Κάτω (πυθμένας κατεργασμένης στρώσης)	Εγκάρσια	Tb (Transverse bottom)
	Κατά μήκος	Lb (Longitudinal bottom)

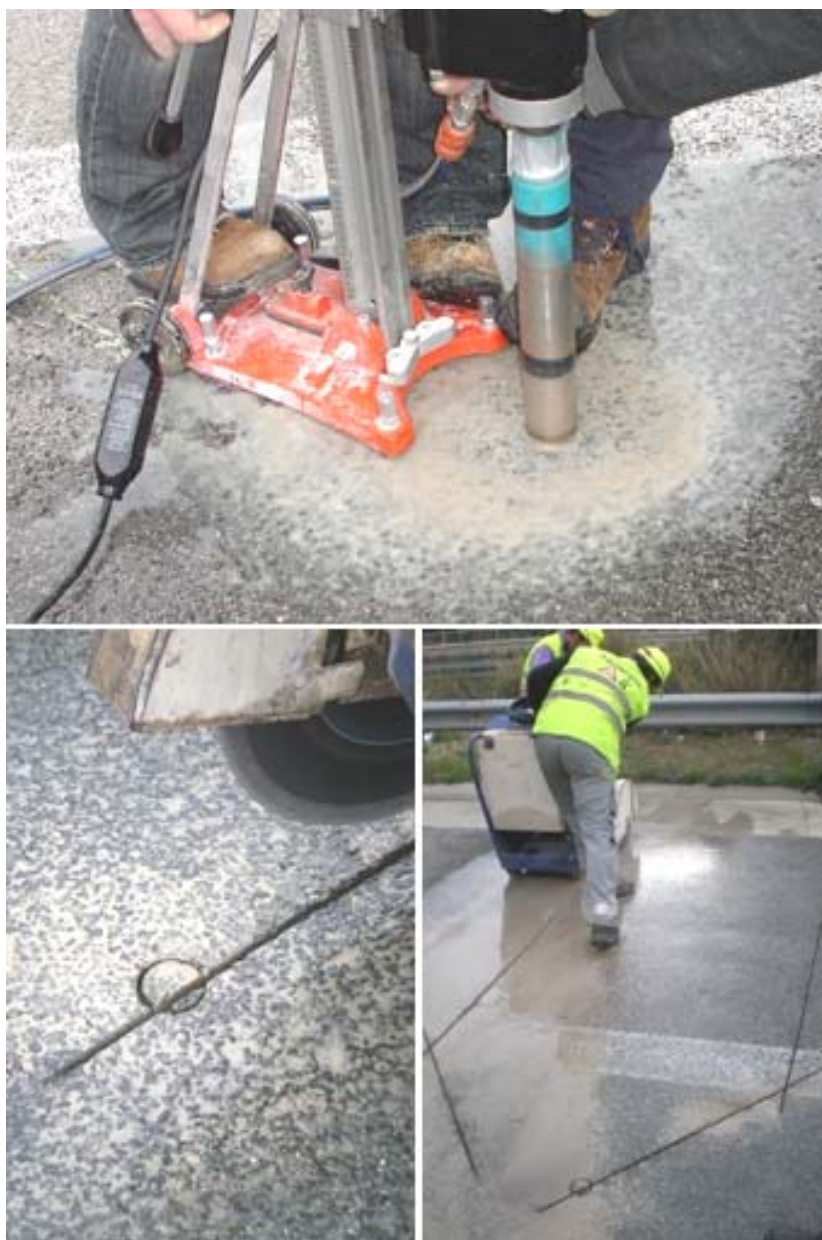
Οι θέσεις (πυρήνες) μέτρησης κάθε πειραματικού τμήματος έχουν τους παρακάτω κωδικούς:

- Πειραματικό τμήμα ΚΑ1 (ημιάκαμπτο οδόστρωμα): θέσεις **W** (west) και **E** (east).
- Πειραματικό τμήμα ΛΑ1 (εύκαμπτο οδόστρωμα): θέσεις **N** (north) και **S** (south).



Σχήμα 7.4. Θέσεις μέτρησης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης και στατικό πρότυπο οδοστρώματος

Η εγκατάσταση του συστήματος και οι δοκιμές έγιναν τον Δεκέμβριο του έτους 2008. Η θερμοκρασία στο «σώμα» των ασφαλτικών στρώσεων (μέσον του πάχους της στρώσης) ήταν 16-18°C και στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης (ανώτερο 1/3 του πάχους της στρώσης) 15-17°C. Στις Φωτογραφίες 7.1 έως 7.4 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες από τη διαδικασία εγκατάστασης του συστήματος οπτικών ινών και τις επιτόπου δοκιμές με το Σύστημα FWD.



Φωτογραφία 7.1. Προετοιμασία επιφάνειας



Φωτογραφία 7.2. Τοποθέτηση πυρήνα με σύστημα οπτικών ινών



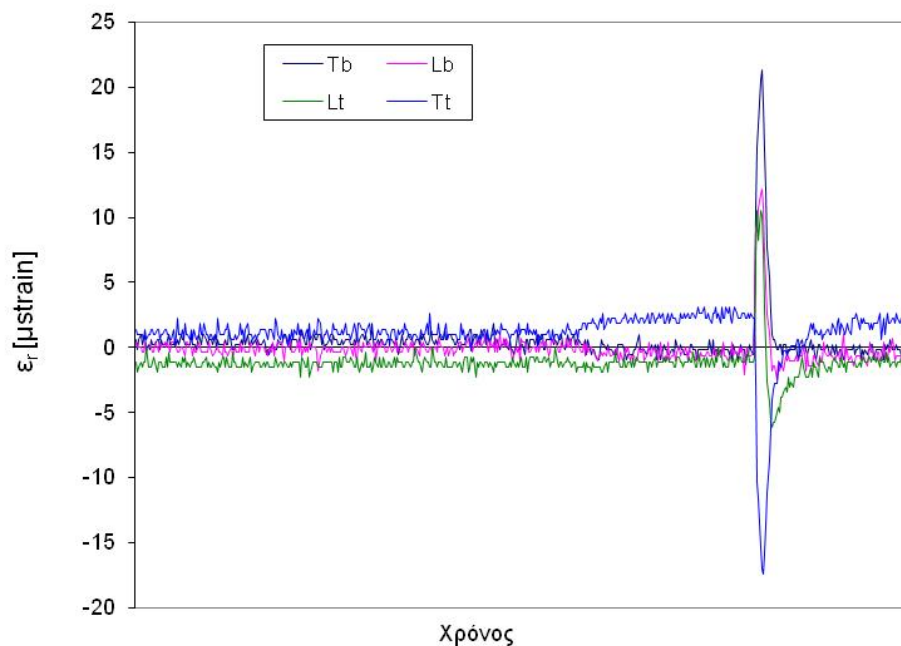
Φωτογραφία 7.3. Εγκατάσταση συστήματος οπτικών ινών



Φωτογραφία 7.4. Επιτόπου δοκιμές με το Σύστημα FWD

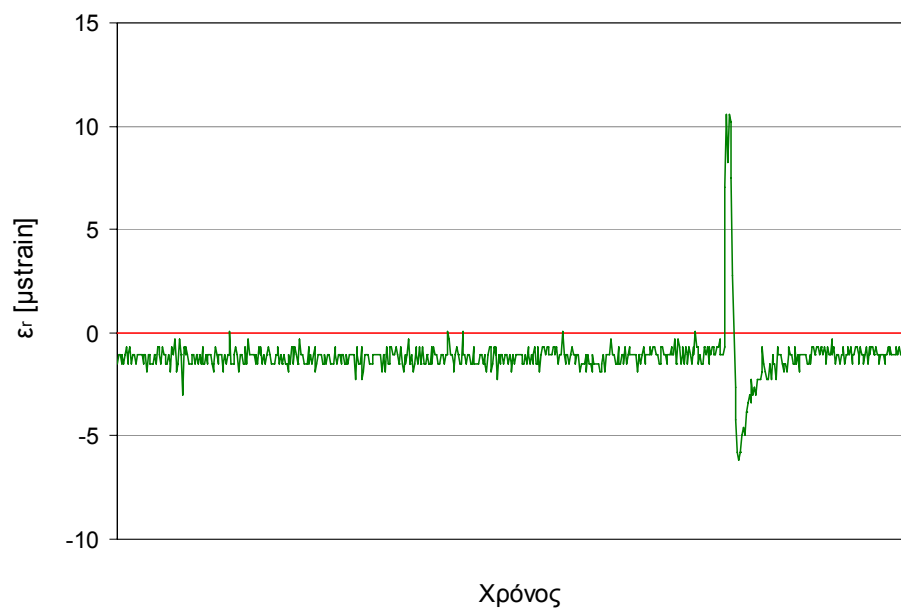
7.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων καταγραφών

Το σύστημα οπτικών ινών κατέγραφε τις ανηγμένες παραμορφώσεις με συχνότητα 500 τιμών ανά δευτερόλεπτο. Κατά τη στιγμή της επιβολής του φορτίου καταγράφεται η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση. Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των αισθητήρων πριν και μετά την επίδραση του φορτίου του FWD, είναι της μορφής που φαίνεται στο Σχήμα 7.5.

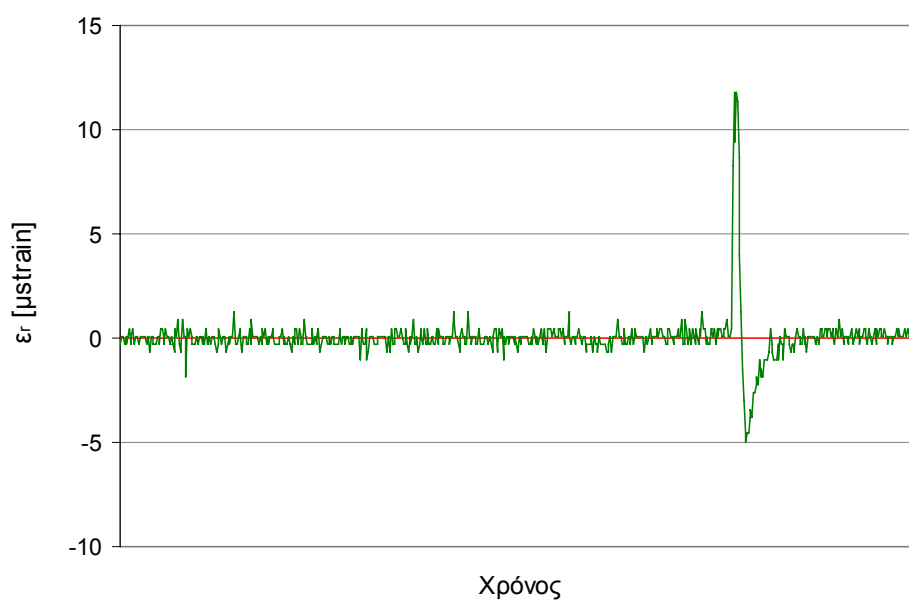


Σχήμα 7.5. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων μέτρησης της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ε_r με το σύστημα οπτικών ινών

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων κάθε αισθητήρα γίνεται με αφαίρεση του «θορύβου», ώστε κατά το τελευταίο δευτερόλεπτο πριν την επιβολή του φορτίου, ο μέσος όρος των καταγραφών του αισθητήρα να είναι περίπου «μηδέν». Ουσιαστικά, αυτό αντιστοιχεί σε μία παράλληλη μετατόπιση του διαγράμματος, με τις καταγραφές πριν την επιβολή του φορτίου να έχουν αυξομειώσεις περί τον άξονα «x». Η διαδικασία αυτή, παράδειγμα της οποίας φαίνεται γραφικά στα Σχήματα 7.6α και 7.6β πριν και μετά την αφαίρεση του «θορύβου» αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκε για κάθε μία από τις τρεις φορτίσεις με το Σύστημα FWD, από όπου προέκυψε η μέση τιμή της (μέγιστης) οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης που καταγράφηκε από το σύστημα οπτικών ινών σε κάθε θέση ή/και φορτίο δοκιμής.



Σχήμα 7.6α. Τιμές οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ε_r πριν την αφαίρεση του «θορύβου»



Σχήμα 7.6β. Τιμές οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ε_r μετά την αφαίρεση του «θορύβου»

7.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο αφορούν στις επιτόπου δοκιμές με το Σύστημα FWD (Φωτογραφία 7.4, υποκεφάλαιο 7.3). Τοποθετήθηκε η επιφάνεια φόρτισης του FWD (υποκεφάλαιο 4.2) στην επιφάνεια του οδοστρώματος, έτσι ώστε το κέντρο της φόρτισης να συμπίπτει με τον κατακόρυφο άξονα z του συστήματος οπτικών ινών και ακολούθησαν οι δοκιμές φόρτισης. Στο παρόν υποκεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των καταγραφών με το σύστημα οπτικών ινών υπό την επίδραση φορτίου 50 kN (Σχήμα 7.4, υποκεφάλαιο 7.3), το οποίο αποτελεί το φορτίο αναφοράς των επιτόπου δοκιμών με το Σύστημα FWD.

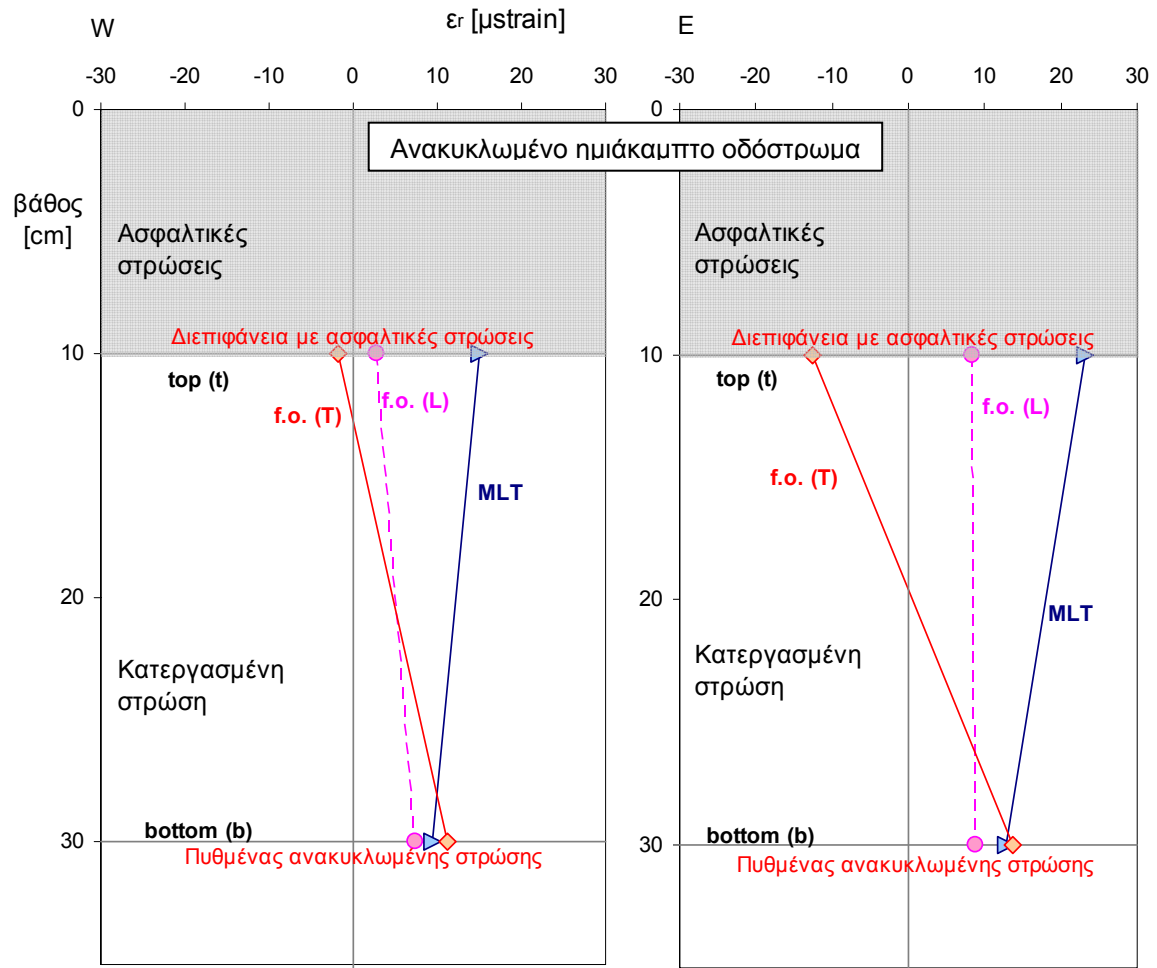
Για σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων των καταγραφών του συστήματος οπτικών ινών, πραγματοποιήθηκε επίσης υπολογισμός των αναπτυσσόμενων οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT) με το λογισμικό Bisar (BISAR 1998). Για τους υπόψη υπολογισμούς ελήφθησαν υπόψη τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών (μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης) των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα στοιχεία των παχών από τις πυρηνοληψίες (για τις ασφαλικές στρώσεις και την κατεργασμένη στρώση) και τα στοιχεία από το Σύστημα GPR (για την εναπομένουσα στρώση ΚΘΑ και των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα).

Σημειώνεται, ότι για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων δεν χρησιμοποιήθηκε μέθοδος ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE). Αυτό έγινε, επειδή από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η θεωρία πολλαπλών στρώσεων (MLT) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στα Σχήματα 7.7 και 7.8 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών στα ημιάκαμπτα και εύκαμπτα οδοστρώματα αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα με ένδειξη «f.o.» αφορούν στις μετρήσεις με το σύστημα οπτικών ινών, ενώ με ένδειξη «MLT» στις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης.

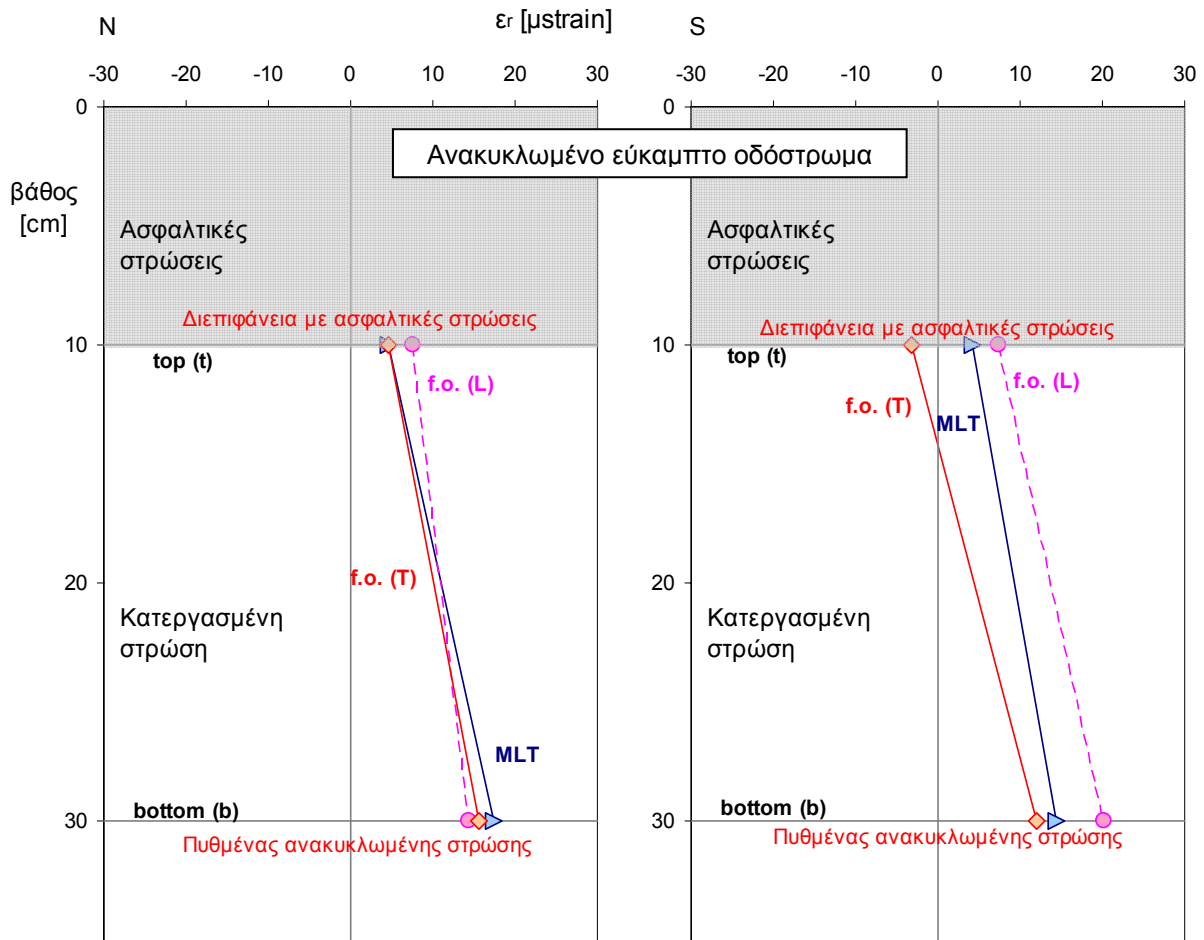
Στα διαγράμματα των σχημάτων που παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρούνται διαφορές των μετρημένων, σε σχέση με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια μεταξύ ασφαλικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μετρημένες τιμές κατά την εγκάρσια κατεύθυνση παρουσίασαν αρνητικό πρόσημο (θλίψη).

Αντίθετα, στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης παρατηρείται σύγκλιση των τιμών, με μικρότερες διαφορές μεταξύ τους. Όλες οι τιμές που μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν είχαν θετικό πρόσημο (εφελκυσμός).



Σχήμα 7.7. Αποτελέσματα μετρήσεων με το σύστημα οπτικών ινών

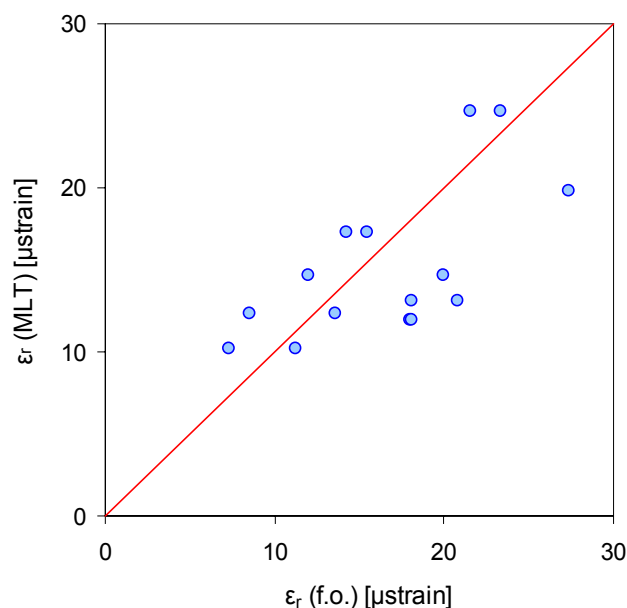
Υποσημείωση: **1) ϵ_r :** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) W, E:** Θέσεις δοκιμών (υποκεφάλαιο 7.3). **3) f.o.:** Μετρήσεις με το σύστημα οπτικών ινών (fiber optics). **4) (T):** Αισθητήρας εγκάρσια προς την κυκλοφορία (υποκεφάλαιο 7.3: Πίνακας 7.1 και Σχήμα 7.4). **5) (L):** Αισθητήρας κατά μήκος (υποκεφάλαιο 7.3: Πίνακας 7.1 και Σχήμα 7.4). **6) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων



Σχήμα 7.8. Αποτελέσματα μετρήσεων με το σύστημα οπτικών ινών

Υποσημείωση: **1) ε:** Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) N, S:** Θέσεις δοκιμών (υποκεφάλαιο 7.3). **3) f.o.:** Μετρήσεις με το σύστημα οπτικών ινών (fiber optics). **4) (T):** Αισθητήρας εγκάρσια προς την κυκλοφορία (υποκεφάλαιο 7.3: Πίνακας 7.1 και Σχήμα 7.4). **5) (L):** Αισθητήρας κατά μήκος (υποκεφάλαιο 7.3: Πίνακας 7.1 και Σχήμα 7.4). **6) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων

Για να διερευνηθεί εάν οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων μέτρησης της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, σε σχέση με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές (με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων MLT), έχουν μηδενική διαφορά, έγινε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αναλυτικά υπολογισμένες τιμές δεν διαφέρουν σημαντικά από τις μετρημένες με το σύστημα οπτικών ινών (Πίνακας Π11.2 Παραρτήματος). Η σύγκριση παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 7.9. Τα στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα Π11.1 του Παραρτήματος.



Σχήμα 7.9. Σύγκριση μετρημένων τιμών ϵ_r (f.o.) και υπολογισμένων τιμών ϵ_r (MLT) στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης

Υποσημείωση: 1) ϵ_r : Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση. **2) f.o.:** Μετρήσεις με το σύστημα οπτικών ινών (fiber optics). **3) MLT:** Αναλύσεις με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων

7.6 Επιμέρους συμπεράσματα

Από τις παραπάνω αναλύσεις των επιτόπου μετρήσεων της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης με το σύστημα οπτικών ινών προέκυψαν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα.

Διεπιφάνεια ασφαλικής και κατεργασμένης στρώσης

- Οι τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στη διεπιφάνεια μεταξύ ασφαλικής και κατεργασμένης στρώσης ήταν σε όλες τις περιπτώσεις πολύ χαμηλές και σε κάποιες περιπτώσεις αρνητικές (θλίψη). Βάσει αυτού, επιβεβαιώνεται κατ' επέκταση η εκτίμηση ότι η «φθορά» που υφίστανται οι ασφαλικές στρώσεις από τα φορτία κυκλοφορίας είναι μικρή και δεν καταπονούνται σε κόπωση.
- Οι διαφορές των μετρημένων ανηγμένων παραμορφώσεων (εγκάρσια) ήταν μεγάλες, σε σχέση με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές, παρουσιάζοντας ακόμη και αρνητικές τιμές (θλίψη).

Με βάση το τελευταίο συμπέρασμα, υπάρχει ένδειξη ότι οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρουσιάζουν διαφορές από την πραγματική εντατική κατάσταση. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε ένα «αδύνατο σημείο» που παρουσιάζουν οι αναλυτικοί υπολογισμοί έκφρασης της μηχανικής συμπεριφοράς σχετικά με την τιμή του μέτρου δυσκαμψίας, η οποία λαμβάνεται σταθερή (από τους ανάστροφους υπολογισμούς) σε όλο το πάχος των ασφαλικών στρώσεων. Στην πραγματικότητα όμως η τιμή της δυσκαμψίας διαφοροποιείται, λόγω των διαφορετικών τύπων ασφαλτομιγμάτων, καθώς και λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας με το βάθος, γεγονός το οποίο έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών. Το θέμα αυτό, το οποίο αναδεικνύεται μέσω των επιτόπου καταγραφών με το σύστημα οπτικών ινών είναι πολύ ενδιαφέρον και χρήζει σύνθετης περαιτέρω διερεύνησης, εκτός του πλαισίου της παρούσας διατριβής.

Πυθμένας της κατεργασμένης στρώσης

- Τόσο οι μετρημένες, όσο και οι αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης ήταν σε όλες τις περιπτώσεις πολύ χαμηλές. Αυτό επιβεβαιώνει τις εκτιμήσεις της παρούσας έρευνας, ότι μετά την ολοκλήρωση της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, αλλά και κατά τη διάρκεια του έως τώρα χρόνου ζωής του, η «φθορά» στον πυθμένα είναι μικρή, με συνέπεια η κόπωση να μην αποτελεί παράγοντα αστοχίας. Η σύγκριση των μετρημένων, με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές έδειξε στατιστική ομοιομορφία. Οι έως τώρα αναλύσεις έδειξαν ότι με χρήση της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων για τον αναλυτικό υπολογισμό της εντατικής / παραμορφωσιακής κατάστασης μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης. Το γεγονός αυτό αφορά στην οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, όπου εντοπίζεται μία από τις κρίσιμες θέσεις αστοχίας στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Προϋπόθεση όμως για το παραπάνω είναι η ύπαρξη αξιόπιστων στοιχείων σχετικά με τα πάχη και τη δομική κατάσταση των επιμέρους στρώσεων, εκφραζόμενη με το μέτρο δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης.
- Οι αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης είναι ίδιες κατά τις δύο κατευθύνσεις, θεωρώντας ότι το υλικό είναι ομογενές και ισότροπο. Αυτό όμως δεν επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με το σύστημα οπτικών ινών, γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη ότι το υλικό δεν είναι ισότροπο. Τα ευρήματα αυτά εγείρουν ευρύτερο προβληματισμό σχετικά με τις παραδοχές της θεωρίας σχετικά με το αν το ασφαλικό σκυρόδεμα, καθώς και το κατεργασμένο με αφρώδη άσφαλο υλικό συμπεριφέρονται ισότροπα. Όμως, λόγω των πολύ χαμηλών τιμών που παρατηρήθηκαν, τα προαναφερθέντα συμπεράσματα εξακολουθούν να ισχύουν.

8. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Ανακεφαλαίωση

Η κατεργασία υλικών στρώσεων ασφαλικών οδοστρωμάτων με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου στο πλαίσιο της επιτόπου και σε βάθος του οδοστρώματος ψυχρής ανακύκλωσης, αποτελεί τα τελευταία χρόνια εξελιγμένη τεχνολογία, χρήσιμη για την αποκατάσταση οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν κυρίως εκτεταμένες σε βάθος φθορές. Η υπόψη τεχνική ανακύκλωσης συμβάλλει επίσης στη μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Διαπιστώνεται όμως ότι η έως τώρα εφαρμογή της, ιδιαίτερα σε οδοστρώματα βαριάς κυκλοφορίας, προσκρούει στη έλλειψη στοιχείων σχετικά με τη συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος στην πράξη, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται κυρίως σε οδοστρώματα με μικρούς κυκλοφοριακούς φόρτους και μειωμένα αξονικά φορτία.

Όπως προέκυψε από τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας, υπάρχει ικανός αριθμός αναφορών σχετικά με συμπεριφορά μίγμάτων κατεργασμένων με αφρώδη άσφαλτο στο εργαστήριο, οι οποίες ως επί το πλείστον επικεντρώνονται σε θέματα βελτιστοποίησης σχεδιασμού μίγματος (μελέτη σύνθεσης). Οι εργαστηριακές όμως δοκιμές αδυνατούν να προσομοιώσουν πλήρως την εντατική κατάσταση στο «σώμα» του κατεργασμένου υλικού, όταν ενσωματώνεται στο οδόστρωμα. Επίσης, δεν μπορούν να προσομοιώσουν τη μηχανική συμπεριφορά του υπόψη υλικού κατά το αρχικό χρονικό διάστημα, κατά το οποίο παρατηρείται αύξηση της αντοχής του («ωρίμανση»), λόγω της απομάκρυνσης από την κατεργασμένη στρώση της υγρασίας, η οποία είναι απαραίτητη για την ανάμειξη και συμπύκνωση του υλικού.

Διαπιστώνεται επίσης, ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός δημοσιευμένων ερευνών με επιτόπου δοκιμές, οι οποίες επιπλέον αφορούν είτε σε οδοστρώματα χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και μικρών αξονικών φορτίων, είτε σε αποσπασματικές έρευνες για μικρό χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή, είτε σε δοκιμές επιταχυνόμενης καταπόνησης οδοστρώματος με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS). Υπάρχει όμως απουσία συστηματικής έρευνας, η οποία να καλύπτει τόσο την περίοδο της κατασκευής, όσο και το μετέπειτα χρονικό διάστημα, κατά το οποίο το οδόστρωμα καταπονείται από τα φορτία σε πραγματικές συνθήκες βαριάς κυκλοφορίας. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια η εφαρμογή της υπόψη τεχνικής να περιορίζεται σε δευτερεύουσες οδούς, ενώ μεγαλύτερη σημασία έχει η εφαρμογή της σε αυτοκινητοδρόμους, ή οδοστρώματα με μεγάλα αξονικά φορτία. Για την εφαρμογή της σε οδούς μεγάλης κυκλοφορίας είναι απαραίτητη η ύπαρξη αξιόπιστων

συστηματικών αξιολογήσεων και παρακολούθησης (monitoring) της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε βάθος χρόνου (Long Term Pavement Performance: LTPP), ώστε να γίνει χαρακτηρισμός του μίγματος επιτόπου και κατ' επέκταση του οδοστρώματος.

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στο να συμβάλει στη διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς αρχικά φθαρμένων ασφατικών οδοστρωμάτων και στη συνέχεια ανακυκλωμένων με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου. Η έρευνα βασίστηκε κυρίως σε πιλοτικά τμήματα αυτοκινητοδρόμων, όπου εφαρμόστηκε η τεχνική της επιτόπου ψυχρής ανακύκλωσης σε βάθος, με χρήση της τεχνικής της αφρώδους ασφάλτου. Τα υπόψη πιλοτικά τμήματα θεωρήθηκαν ως πειραματικά και παρακολουθήθηκαν συστηματικά για χρονικό διάστημα επτά περίπου ετών υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (Real Loading Testing: RLT), βάσει προγράμματος εκτέλεσης επιτόπου δοκιμών του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Τομέα ΜΣΥ του ΕΜΠ. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με χρήση των εξελιγμένων Συστημάτων καταγραφών και εκτέλεσης δοκιμών του Εργαστηρίου Οδοποιίας. Βασίστηκε κυρίως σε επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές (Non-Destructive Tests: NDT) και καταγραφές με το Σύστημα του παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD). Για την υποστήριξη της διαδικασίας επεξεργασίας των επιτόπου στοιχείων, χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά το γεωφυσικό Σύστημα καταγραφής της στρωματογραφίας «Γεωραντάρ» (Ground Penetrating Radar: GPR). Χρησιμοποιήθηκαν επίσης, ως «εργαλεία» υποστήριξης των αποτελεσμάτων των επιτόπου δοκιμών, στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών.

Η διερεύνηση περιέλαβε δύο βασικά στάδια διερεύνησης. Στο πρώτο στάδιο εξετάστηκε η συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος από τη φάση της κατασκευής και το αρχικό στάδιο λειτουργίας του, έως την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού (σταθεροποίηση της δομικής του κατάστασης). Για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών έγιναν μελέτες ευαισθησίας των αποτελεσμάτων, ως προς τις παραδοχές και τα δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία της ανάλυσης των συλλεχθέντων στοιχείων. Προσδιορίστηκαν έτσι οι παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των αναλύσεων και οι οποίοι θα πρέπει να εκτιμώνται με ακρίβεια για την αξιοπιστία των υπολογισμών. Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε με βάση διεθνώς αποδεκτούς δείκτες δομικής κατάστασης, καθώς και με εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων. Από τις εκτεταμένες αναλύσεις, προέκυψαν ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την εξέλιξη της διαδικασίας «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού. Επιπλέον, προτείνεται συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας «ωρίμανσης» τόσο στο πλαίσιο της

έρευνας της επιτόπου συμπεριφοράς, όσο και σε πρακτικές περιπτώσεις συμβατικής «παραλαβής» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Στο πλαίσιο του πρώτου σταδίου διερεύνησης περιλαμβάνεται επίσης ο υπολογισμός των κρίσιμων εντατικών (παραμορφωσιακών) μεγεθών στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (Multi-Layer Theory: MLT), καθώς και με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements: FE). Πραγματοποιήθηκε επίσης διερεύνηση και κριτική των βασικότερων σχέσεων εκτίμησης του χρόνου ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Από τις υπόψη αναλύσεις προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με τις κρίσιμες θέσεις αστοχίας, καθώς και τη «φθορά» των επιμέρους στρώσεων του ανακυκλωμένου οδοστρώματος πριν και μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού. Δόθηκε έτσι η δυνατότητα να καθοριστεί με ακρίβεια η συνεισφορά κάθε στρώσης στη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του.

Το δεύτερο στάδιο διερεύνησης αποτελεί συνέχεια του πρώτου και περιλαμβάνει αναλύσεις και συμπεράσματα από τις επιτόπου δοκιμές μετά την «ωρίμανση» του ανακυκλωμένου υλικού. Σκοπός των δοκιμών είναι η αξιολόγηση της επιτόπου συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (RLT), για εύλογο χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή. Περιλαμβάνεται διερεύνηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε αλλαγές της εντατικής του κατάστασης και αξιολόγηση της δομικής κατάστασης με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης, καθώς και με εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων (ασφαλτικών και κατεργασμένης στρώσης).

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης έγινε σχεδιασμός και εγκατάσταση συστήματος μέτρησης (instrumentation) της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης σε κρίσιμα σημεία του «σώματος» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Δόθηκε έτσι η δυνατότητα σύγκρισης των επιτόπου μετρημένων τιμών, με τις αναλυτικά υπολογισμένες, με σκοπό την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Δόθηκε επίσης η δυνατότητα αξιολόγησης των αναλυτικών υπολογισμών με βάση τις υφιστάμενες θεωρίες. Αξίζει να τονιστεί, ότι η εγκατάσταση αντίστοιχων συστημάτων μέτρησης γίνεται διεθνώς για ερευνητικούς και μόνο λόγους. Δεν αποτελεί δηλαδή ευρέως εφαρμοζόμενη διαδικασία επιτόπου δοκιμών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με αισθητήρες οπτικών ινών (fiber optics), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο «σώμα» του υφισταμένου οδοστρώματος. Η πιλοτική εγκατάσταση του συστήματος οπτικών ινών έγινε στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας με το εργαστήριο οδοστρωμάτων του Πανεπιστημίου Laval.

Ανακεφαλαιωτικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων έδωσαν μέσω των μηχανικών χαρακτηριστικών και ειδικότερα των μέτρων ελαστικής παραμόρφωσης των υλικών των επιμέρους στρώσεων, σαφή «εικόνα» της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος στην πράξη. Επιπλέον, «τροφοδότησαν» με τα απαραίτητα δεδομένα τα λογισμικά υπολογισμού της εντατικής κατάστασης στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Με το σύστημα (οπτικών ινών) επιτόπου μέτρησης των ανηγμένων παραμορφώσεων υπό μορφή πιλοτικής έρευνας έγινε αξιολόγηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων και έμμεσα των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτά.

Σημειώνεται, ότι όπως προκύπτει από την έως τώρα διεθνή βιβλιογραφία, δεν αναφέρεται αντίστοιχη έρευνα, βασιζόμενη σε συστηματική παρακολούθηση της επιτόπου δομικής συμπεριφοράς ανακυκλωμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων, υπό πραγματικές συνθήκες βαριάς κυκλοφορίας.

Από την επεξεργασία των επιτόπου συλλεχθέντων στοιχείων και τις σχετικές αναλύσεις προέκυψαν επιμέρους συμπεράσματα, όπως αναφέρονται στα αντίστοιχα κεφάλαια των αναλύσεων. Ανακεφαλαιωτικά, κρίνεται σκόπιμο να τονιστούν τα παρακάτω σχόλια και συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, τα βασικά συμπεράσματα που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 8.2, πιστεύεται ότι αποτελούν συμβολή στη θεμελιώδη έρευνα. Στο υποκεφάλαιο 8.3 αναφέρονται τα σχόλια και συμπεράσματα με ευρύτερο πρακτικό περιεχόμενο. Τέλος, οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 8.4.

8.2 Βασικά συμπεράσματα και σχολιασμός

- Δεν προέκυψε «συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση» (stress-dependent behaviour), αναφορικά με το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού.

Το γεγονός αυτό αποτελεί επιβεβαίωση της ορθότητας της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο των αναλύσεων της παρούσας διατριβής (διαδικασία ανάστροφων υπολογισμών, χρήση θεωρίας πολλαπλών στρώσεων). Κατά συνέπεια, οι υπόψη αναλύσεις δεν επιβεβαιώνουν τη διεθνώς επικρατούσα άποψη, ότι το κατεργασμένο υλικό παρουσιάζει αύξηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Η συμπεριφορά αυτή, η οποία είχε εκτιμηθεί έως τώρα από τριαξονικές εργαστηριακές δοκιμές, παρατηρείται κυρίως σε ασύνδετα υλικά. Η θεώρηση όμως αυτή ισχύει ως επί το πλείστον για κατεργασμένα υλικά χαμηλού μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης, με μικρό ποσοστό

αφρώδους ασφάλτου και χωρίς την προσθήκη τσιμέντου στο μίγμα. Όμως, τέτοια μίγματα πιστεύεται ότι δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε οδοστρώματα βαριάς κυκλοφορίας, καθώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά που επιτυγχάνονται δεν συμβάλλουν στην επίτευξη ικανοποιητικού χρόνου ζωής του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η προσθήκη μικρής ποσότητας τσιμέντου, όπως στην περίπτωση της παρούσας διατριβής, έχει ως συνέπεια να μην εμφανίζεται το φαινόμενο αύξησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Το θέμα πάντως αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, καθώς η συμπεριφορά του υπόψη υλικού ως προς την εφαρμοζόμενη τάση επηρεάζει το είδος και την έκταση των εργαστηριακών δοκιμών που απαιτούνται για το χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού.

- Υπό την προϋπόθεση διάστρωσης ασφαλικών στρώσεων ικανοποιητικού πάχους, η κόπωση δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα αστοχίας του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού.

Οι αναλύσεις έδειξαν ότι αυτό ισχύει με μεγαλύτερη βεβαιότητα (ιδιαίτερα κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος) όταν η κατεργασμένη στρώση εδράζεται σε υλικά με υψηλό μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (π.χ. κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) με τσιμέντο).

- Η διεθνώς επικρατούσα άποψη βάσει δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος ήταν ότι υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας καταστρέφεται η συνοχή του κατεργασμένου υλικού, με συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης. Η διερεύνηση όμως της επιτόπου συμπεριφοράς του κατεργασμένου υλικού υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας έδειξε διαφορετική συμπεριφορά. Η διαφοροποίηση έγκειται, αφενός μεν στο γεγονός ότι αμέσως μετά την εφαρμογή της ανακύκλωσης και κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος το κατεργασμένο υλικό «ωριμάζει», αυξάνεται δηλαδή το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης με τον χρόνο, αφετέρου δε ότι παρατηρείται σταθεροποίηση μετά από την ολοκλήρωση της «ωρίμανσης». Επιπλέον, δεν παρατηρήθηκε μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού, τουλάχιστον κατά το χρονικό διάστημα διερεύνησης της παρούσας διατριβής.

Κατά συνέπεια, εκτιμάται ότι πρέπει να γίνει αναθεώρηση τόσο της άποψης για την επιτόπου συμπεριφορά του κατεργασμένου υλικού, όσο και του τρόπου αναλυτικής θεώρησης (διαστασιολόγηση) τέτοιου τύπου οδοστρώματων. Στη διαδικασία αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συνεισφορά των ασφαλικών στρώσεων, η οποία είναι πολύ σημαντική στο αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος.

- Από τις αναλύσεις των μετρημένων με το σύστημα οπτικών ινών ανηγμένων παραμορφώσεων επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει μέσω των αναλυτικών υπολογισμών, σχετικά με την επιτόπου συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Επιβεβαιώθηκε επίσης το συμπέρασμα, ότι το κατεργασμένο υλικό δεν παρουσιάζει συμπεριφορά εξαρτώμενη από την τάση, καταδεικνύοντας έτσι την ορθότητα των σχετικών παραδοχών που ελήφθησαν υπόψη κατά τη διαδικασία των αναλύσεων.

Η εγκατάσταση του Συστήματος οπτικών ινών ανοίγει ορίζοντες περαιτέρω έρευνας της επιτόπου συμπεριφοράς ανακυκλωμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης των παραγόντων που επηρεάζουν τα εντατικά (παραμορφωσιακά) μεγέθη στο «σώμα» του εν λειτουργία ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

8.3 Σχόλια και συμπεράσματα με πρακτικό περιεχόμενο

Τα σχόλια και συμπεράσματα με ευρύτερο πρακτικό περιεχόμενο, που πιστεύεται ότι αποτελούν συμβολή στην εφαρμοσμένη έρευνα, παρουσιάζονται παρακάτω σε επιμέρους ενότητες, ανάλογα με τις θεματικές.

Αξιολόγηση με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης

Στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται αναφορά στους δείκτες δομικής κατάστασης, που εξαρτώνται κυρίως από τη μέγιστη ελαστική υποχώρηση που καταγράφεται από το Σύστημα FWD, σαν «εργαλείο» για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων. Όσον αφορά στην περίπτωση των κατεργασμένων / ανακυκλωμένων με αφρώδη ασφαλτο οδοστρωμάτων, όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία, δεν έχει γίνει συστηματική εφαρμογή τους, με συνέπεια να μη μπορούν να δώσουν σαφή «εικόνα» της επιτόπου συμπεριφοράς τέτοιων οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ακολουθήθηκε διαδικασία για τη μέγιστη αξιοποίηση των υπόψη δεικτών. Οι δοκιμές έγιναν συστηματικά και στα κατάλληλα χρονικά διαστήματα τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και μετέπειτα, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες. Από τις σχετικές αναλύσεις προέκυψαν συμπεράσματα σχετικά με τον χρόνο «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, καθώς και τη βελτίωση – σταθεροποίηση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

- Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από τις αναλύσεις με βάση τους δείκτες δομικής κατάστασης είναι ότι κατά το πρώτο έτος λειτουργίας ενός τέτοιου οδοστρώματος είχε ολοκληρωθεί η «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού, με συνέπεια τη σταθεροποίηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Στη συνέχεια και κατά τη διάρκεια των

δοκιμών μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού παρατηρήθηκε τάση μικρής βελτίωσης ή σταθεροποίησης της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων με τον χρόνο, καθώς και μείωση των διαφορών μεταξύ των πειραματικών τμημάτων.

Με βάση τις αναλύσεις των τιμών των δεικτών δομικής κατάστασης από τη φάση της κατασκευής και έως ένα περίπου έτος λειτουργίας προέκυψε ένδειξη βελτίωσης της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Κατά το στάδιο της κατασκευής, η βελτίωση αυτή προκύπτει αφενός λόγω της διάστρωσης των νέων ασφαλικών στρώσεων και αφετέρου λόγω της αύξησης σταδιακά του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (διαδικασία «ωρίμανσης») του κατεργασμένου υλικού. Ο βαθμός όμως συνεισφοράς κάθε ενός από τους δύο αυτούς παράγοντες (νέες ασφαλικές στρώσεις, στρώση κατεργασμένου υλικού) στη βελτίωση της δομικής κατάστασης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί μέσω των υπόψη δεικτών. Κατά συνέπεια, οι δείκτες που συνήθως χρησιμοποιούνται σε σχετικές αναλύσεις έχουν περιορισμένες δυνατότητες και δεν μπορούν να δώσουν καθαρή «εικόνα» της δομικής κατάστασης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων χωρίς περαιτέρω αναλύσεις.

Αξιολόγηση με βάση τα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών

- Από τη φάση της εφαρμογής της ανακύκλωσης και έως ένα έτος περίπου μετά, παρατηρήθηκε αύξηση του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού με τον χρόνο.

Μέσω της διαδικασίας των ανάστροφων υπολογισμών προσδιορίστηκε ότι η διαδικασία της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού ολοκληρώθηκε εντός του πρώτου έτους λειτουργίας του οδοστρώματος.

- Ένα έτος μετά την κατασκευή παρατηρήθηκε τάση σταθεροποίησης του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού σε τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από τις παραδοχές της αναλυτικής διαδικασίας διαστασιολόγησης του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι στο έργο είναι δυνατόν να επιτευχθούν ανώτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, από αυτά που εκτιμήθηκαν στο εργαστήριο και με βάση τα οποία έγιναν οι παραδοχές ως προς τις τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού.

- Υπό την προϋπόθεση ομοειδών υλικών και κλιματολογικών συνθηκών, ως πρακτική λύση στο πλαίσιο της παραλαβής ανακυκλωμένου οδοστρώματος προτείνεται η διενέργεια επιτόπου ελέγχων μετά την παρέλευση χρονικού διαστήματος περίπου έξι μηνών από την κατασκευή.

Κατά το υπόψη χρονικό διάστημα διαπιστώθηκε ότι το κατεργασμένο υλικό παρουσίασε επιτόπου τιμές μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης αντίστοιχες με αυτές που ελήφθησαν υπόψη κατά την αναλυτική μελέτη οδοστρώματος. Σε περιπτώσεις μη ομοειδών υλικών ή κλιματολογικών συνθηκών προτείνεται η εφαρμογή ανάλογης μεθοδολογίας, με αυτή που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

- Κατά τη διάρκεια των πρώτων επτά περίπου ετών υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας δεν παρατηρήθηκε τάση μείωσης της μέσης τιμής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού, καθώς και του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών, στρώσεων με τον χρόνο.

Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι τα φορτία κυκλοφορίας δεν είχαν αρνητική επίδραση στη δομική κατάσταση της κατεργασμένης στρώσης, καθώς και των ασφαλικών στρώσεων.

Συνεισφορά των ασφαλικών στρώσεων

- Κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, πριν την «ωρίμανση» του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού, διαπιστώθηκε ότι οι ασφαλικές στρώσεις αναλαμβάνουν μεγάλο μέρος της καταπόνησης του οδοστρώματος.

Κατά συνέπεια, η συνεισφορά των ασφαλικών στρώσεων στη δομική κατάσταση του ανακυκλωμένου οδοστρώματος είναι πολύ σημαντική κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του. Επιπλέον, ο χρόνος «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη «φθορά» που υφίστανται οι ασφαλικές στρώσεις και κατά συνέπεια παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε βάθος χρόνου.

- Μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου με αφρώδη ασφαλτο υλικού, εκτός από τη μείωση της καταπόνησης της κατεργασμένης στρώσης, μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό και η καταπόνηση των ασφαλικών στρώσεων.

Η διαστασιολόγηση ενός τέτοιου οδοστρώματος πρέπει να γίνεται με αυξημένο πάχος ασφαλικών στρώσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός μεν την επίτευξη αυξημένου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων και αφετέρου τη μείωση των τιμών των κρίσιμων εντατικών / παραμορφωσιακών μεγεθών στο «σώμα» του κατεργασμένου / ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Αρνητική συνέπεια αυτού είναι το αυξημένο αρχικό κόστος

(αποκατάστασης). Συχνά, για να γίνει ελκυστική από οικονομική άποψη η υπόψη τεχνική, προτείνεται η διάστρωση μικρού πάχους ασφαλτικών στρώσεων. Αυτό όμως έχει αρνητικές συνέπειες στη δομική κατάσταση του οδοστρώματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις βαριάς κυκλοφορίας.

Ανάλυση των κρίσιμων εντατικών / παραμορφωσιακών μεγεθών

- Ο αναλυτικός υπολογισμός των κρίσιμων εντατικών / παραμορφωσιακών μεγεθών στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης με βάση τη θεωρία πολλαπλών στρώσεων (Multi-Layer Theory: MLT), έδωσε αποτελέσματα συμβατά με αυτά που προκύπτουν με χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements: FE).

Επιβεβαιώνονται έτσι, με επιτόπου πραγματικά στοιχεία μηχανικών χαρακτηριστικών επιμέρους στρώσεων ανακυκλωμένου οδοστρώματος, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αντίστοιχες θεωρητικές αναλύσεις, στο πλαίσιο του διευρωπαϊκού προγράμματος Amadeus. Εκτιμάται ότι με χρήση της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων (MLT) μπορεί να γίνει ικανοποιητική προσέγγιση της εντατικής κατάστασης του ανακυκλωμένου με την τεχνική της αφρώδους ασφάλτου οδοστρώματος. Η χρήση του πλεονεκτήματος των λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων (FE), ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μη γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς, δεν θεωρείται αναγκαία και λόγω του γεγονότος ότι το κατεργασμένο με αφρώδη ασφαλτο υλικό παρουσιάζει επιτόπου συμπεριφορά ομοειδή με τα γραμμικώς ελαστικά υλικά. Κατά συνέπεια, σε «επίπεδο» αξιολόγησης της κατασκευής (ανακύκλωσης), η χρήση της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων (MLT) μπορεί να θεωρηθεί ως ικανοποιητική προσέγγιση για την ανάλυση μεγάλου αριθμού δεδομένων.

- Η σύγκριση των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, με τις μετρημένες με το σύστημα οπτικών ινών (fiber optics), έδειξε στατιστική ομοιομορφία.

Αυτό αποτελεί ένδειξη, ότι με χρήση της θεωρίας των πολλαπλών στρώσεων (MLT) για τον αναλυτικό υπολογισμό της εντατικής κατάστασης, μπορεί να επιτευχθεί με αρκετή αξιοπιστία προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης, όσον αφορά στην οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, όπου εντοπίζεται μία από τις κρίσιμες θέσεις αστοχίας στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

- Τόσο οι μετρημένες με το σύστημα οπτικών ινών, όσο και οι αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης, ήταν σε όλες τις περιπτώσεις πολύ χαμηλές.

Αυτό επιβεβαιώνει τις εκτιμήσεις των αναλυτικών υπολογισμών της παρούσας έρευνας, ότι μετά την ολοκλήρωση της «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού, αλλά και κατά τη διάρκεια του έως τώρα χρόνου ζωής του η «φθορά» είναι μικρή, με συνέπεια η κόπωση να μην αποτελεί παράγοντα αστοχίας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλικών στρώσεων και της κατεργασμένης στρώσης (μέτρα δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης) αποτελεί ένδειξη, ότι για την επίτευξη σταθερής δομικής συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε βάθος χρόνου, απαραίτητη είναι η διατήρηση των τιμών των κρίσιμων εντατικών μεγεθών σε χαμηλά επίπεδα. Για να επιτευχθεί αυτό, εκτός από τα προαναφερθέντα μηχανικά χαρακτηριστικά, οι ασφαλικές στρώσεις να έχουν ικανοποιητικό πάχος. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο παίζουν το πάχος, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά έδρασης (soil support) της κατεργασμένης με αφρώδη άσφαλτο στρώσης.

- Στην περίπτωση των μετρημένων οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων με το σύστημα οπτικών ινών παρατηρήθηκαν διαφορές, σε σχέση με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές. Δεν διαφοροποιούν όμως τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τον αναλυτικό υπολογισμό της εντατικής κατάστασης στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.

Οι διαφορές των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών από την πραγματική εντατική κατάσταση, πιθανόν να οφείλεται σε ένα «αδύνατο σημείο» που παρουσιάζουν οι υπολογισμοί, σχετικά με την τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων, η οποία λαμβάνεται σταθερή. Στην πραγματικότητα όμως διαφοροποιείται, λόγω των διαφορετικών τύπων ασφαλτομιγμάτων, αλλά και λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας με το βάθος, γεγονός το οποίο έχει επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών.

- Οι αναλυτικά υπολογισμένες τιμές της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στις κρίσιμες θέσεις στο «σώμα» του κατεργασμένου υλικού είναι ίδιες κατά τις δύο κατευθύνσεις, θεωρώντας ότι το υλικό είναι ομογενές και ισότροπο. Αυτό δεν επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με το σύστημα οπτικών ινών. Όμως, λόγω των πολύ χαμηλών τιμών της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης τα προαναφερθέντα συμπεράσματα εξακολουθούν να ισχύουν.

Τα ευρήματα αυτά εγείρουν ευρύτερο προβληματισμό σχετικά με τις παραδοχές της θεωρίας σχετικά με το αν το ασφαλικό σκυρόδεμα, καθώς και το κατεργασμένο με αφρώδη άσφαλτο υλικό παρουσιάζουν ισότροπη συμπεριφορά.

Γενικά σχόλια

- Η εφαρμογή επιτόπου μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT) είναι απαραίτητη όχι μόνο για χαρακτηρισμό ασφαλικών οδοστρωμάτων ανακυκλωμένων με αφρώδη άσφαλτο, αλλά και στο πλαίσιο της διαχείρισης της συντήρησής τους.

Στις προδιαγραφές πρέπει να γίνει εισαγωγή της χρήσης των δοκιμών NDT για την οριστική παραλαβή, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας «ωρίμανσης» του κατεργασμένου υλικού. Χρήση στοιχείων από πυρήνες, ή δοκίμια από τα κατεργασμένα και ασφατικά υλικά χρησιμεύουν μόνο υποβοηθητικά, καθώς δεν μπορεί να στηριχθεί σε αυτά η οριστική παραλαβή ή ο χαρακτηρισμός των κατεργασμένων / ανακυκλωμένων με αφρώδη άσφαλτο οδοστρωμάτων. Χωρίς την εφαρμογή επιτόπου μη καταστρεπτικών δοκιμών, είναι πιθανόν είτε να μην προκύψουν συμπεράσματα, είτε τα συμπεράσματα να είναι εσφαλμένα.

- Αυξημένο πάχος των ασφαλικών στρώσεων και καλή αρχική ομαλότητα (μειωμένες δυναμικές καταπονήσεις) μπορεί να συμβάλλουν στην ένταξη των ανακατασκευασμένων οδοστρωμάτων με την υπόψη τεχνική ανακύκλωσης, σε κατηγορία οδοστρωμάτων πολύ μεγάλου χρόνου ζωής (Long Life Pavement: LLP) ως προς την αντοχή σε κόπωση.

Το στοιχείο αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον τόσο διεθνώς, όσο και στη χώρα μας, λόγω των συστημάτων παραχώρησης των αυτοκινητοδρόμων (Concession Agreement, ή Private Public Partnership: PPP).

8.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Περαιτέρω συνεχής και συστηματική επιτόπου παρακολούθηση (monitoring) και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ανακυκλωμένου οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας. Μέσω της διαδικασίας αυτής, θα εμπλουτιστεί η ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων των πειραματικών τμημάτων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, τα οποία αποτελούν τμήματα LTPP (Long-Term Pavement Performance), κατά το πρότυπο SHRP. Έμφαση πρέπει να δοθεί σε θέσεις, όπου εντοπίζονται σχετικά μειωμένες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης των επιμέρους στρώσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανότητα εμφάνισης παραμενουσών παραμορφώσεων, ή άλλου τύπου αστοχιών. Ιδανική θα ήταν και η συνδυαστική αξιολόγηση μέσω δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS).

- Διερεύνηση της επίδρασης των μεταβολών της θερμοκρασίας και του φορτίου στην παραμορφωσιακή κατάσταση στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος τόσο μέσω αναλυτικών υπολογισμών, όσο και με επιτόπου καταγραφές μέσω του συστήματος οπτικών ινών (fiber optics).
- Αναθεώρηση της διαδικασίας που περιλαμβάνει αξιολόγηση μέσω δοκιμών επιταχυνόμενης καταπόνησης με προσομοιωτή βαρέος οχήματος (HVS). Βαθμονόμηση των υπόψη δοκιμών με βάση τις δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (RLT) και με μετρήσεις παραμορφωσιακών μεγεθών με το σύστημα οπτικών ινών.
- Κρίνεται επίσης σκόπιμο να πραγματοποιηθούν σε επίπεδο εργαστηρίου δοκιμές με τριαξονικές δυναμικές κυψέλες, σε συνδυασμό με αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE). Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή θα πρέπει να δοθεί έμφαση στη διερεύνηση της εμφάνισης παραμενουσών παραμορφώσεων. Οι σχετικές αναλύσεις πιστεύεται ότι θα συνεισφέρουν στον περαιτέρω χαρακτηρισμό κατεργασμένων με αφρώδη ασφαλτο μιγμάτων και κατ' επέκταση στη δυνατότητα ανάπτυξης καταστατικών νόμων της μηχανικής (constitutive models), οι οποίοι μακροπρόθεσμα θα πρέπει να επιβεβαιωθούν μέσω έρευνας της επιτόπου συμπεριφοράς των υπόψη υλικών.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ABAQUS, 2000. User's Manual. Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.

AIPCR & PIARC, 2003. Guidelines for Cold In-Place Recycling of Pavements with Emulsion or Foamed Bitumen. Association Mondiale de la Route (AIPCR) and World Road Association (PIARC). Technical committee 7/8 Road Pavements

AMADEUS, 2000. Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures. Final report, European Commission under the Transport RTD

Asi, I.M., 2001. Stabilization of Sebkha Soil Using Foamed Asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 13, No. 5

Asphalt Academy, 2002. The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. Interim Technical Guideline 2 (TG2). 1st Ed., Pretoria

ASTM, 2009. Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.03

Baltzer, S. & Jansen, J.M., 1994. Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD-Measurements. 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. 17-21 July, University of Minneapolis, Minnesota

BISAR, 1998. User Manual. Hibbitt, Bitumen Business Group

Bowering, R.H., 1970. Properties and Behaviour of Foamed Bitumen Mixtures for Road Building. 5th Australian Road Research Board Conference. Canberra

Bowering, R.H. & Martin, C.L., 1976. Foamed Bitumen Production and Application of Mixtures, Evaluation and Performance of Pavements. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 45

Bredenhann, S.J. & Jenkins, K.J., 2004. Determination of Stress-Dependent Material Properties with the FWD, for Use in the Structural Analysis of Pavements Using Finite Element Analysis Techniques. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). 12-16 Sept., Sun City

Brown, S., 1997. Achievements and Challenges in Asphalt Pavement Engineering. Keynote Address. Eighth International Conference on Asphalt Pavements. 10-14 Aug., Seattle, Washington

Brule, B. & Lefebvre, J., 1993. Polymer-Modified Bitumens, Basic Principles. *Revue Generale des Routes et des Aerodromes*, No. 711

Brunton, J.M., Arnitage, R.J. & Brown, S.F., 1992. Seven Years Experience of Pavement Evaluation. 7th International Conference on Asphalt Pavements. 17-21 Aug., Nottingham University

Castedo-Franco, L.H. & Wood, E.L., 1983. Stabilisation with Foamed Asphalt of Aggregates Commonly Used in Low Volume Roads. *Transportation Research Record* 898, Transportation Research Board

Chen, D.H., Bilyeu, J., Scullion, T., Nazarian, S. & Chiu, C.T., 2004. Failure Investigation of Foamed Asphalt Project. CD Compendium, 83rd Annual Meeting. Transportation Research Board. 11-15 Jan., Washington, DC

Collings, D. & Thompson, H., 2007. A Critical Appraisal of the Performance of Foamed Bitumen and Bitumen Emulsion Treated Materials. 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). 2-5 Sept., Gaborone

Collings, D., Lindsay, R. & Shunmugam, R., 2004. LTPP Exercise on a Foamed Bitumen Treated Base - Evaluation of Almost 10 Years of Heavy Trafficking on MR 504 in Kwazulu-Natal. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). 12-16 Sept., Sun City

COST-336, 1998. Guidelines for Evaluation of Flexible Pavements at Project Level Using Falling Weight Deflectometer, Final Report. European Commission. Brussels

COST-343, 2004. Reduction in Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures, Final Report. European Commission. Brussels

Csanyi, L.H., 1957. Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixes. *Highway Research Board Bulletin*, vol. 10, No. 160

Doré, G., Duplain, G. & Pierre, P., 2007. Monitoring Mechanical Response of in Service Pavements Using Retrofitted Fibre Optic Sensors. International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials. 20-22 June, Athens

Dynatest, 2001. 8002 FWD Test System: Owner's Manual

Dynatest, 2001. ELMOD: Pavement Evaluation Manual

Eller, A. & Olson, R., 2009. Recycled Pavement Using Foamed Asphalt in Minnesota. Final Report, Office of Materials and Road Research, Minnesota Department of Transportation, Research Services Section. Minnesota

Engelbrecht, J.C., Roberts, F.L. & Kennedy, T.W. 1985. Cold Recycled Mixtures, with Emphasis on the Curing of Foamed Specimens - a Laboratory Study. Annual Transportation Convention, Session - Maintenance of the Transport Infrastructure. 29 July-2 Aug., Pretoria

Fu, P. & Harvey, J.T., 2006. Strategy Selection for DISR-Foamed Asphalt: Stiffer or more Flexible. 10th International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 12-17 Aug., Quebec

Fu, P. & Harvey, J.T., 2007. Temperature Sensitivity of Foamed Asphalt Mix Stiffness: Field and Lab Study. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 2

Geophysical Survey Systems Inc., 2002. RADAN for Windows NT, Version 4.0, User's Manual. North Salem, New Hampshire

Hakim, B.A., Brown, S.F. & Armitage, R.J., 2002. Pavement Evaluation and Strengthening Design: Sixteen Years Experience. Ninth International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 17-22 Aug., Copenhagen

Irwin, L.H., 2002. Backcalculation Analysis. Tutorial, Ninth International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 17-22 Aug., Copenhagen

Jahren, C.T., Chen, D., Lee, H. & Kim, J., 2007. Evaluation of Long-Term Field Performance of Cold In-Place Recycled Roads. Mid-Continent Transportation Research Symposium. 16-17 Aug., Ames, Iowa

Jahren, C.T., Ellsworth, B.J., Cawley, B. & Bergeson, K., 1998. Review of Cold In-Place Recycled Asphalt Concrete Projects. Project HR-392, Final Report. Iowa DOT

Jenkins, K.J., 2000. Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with an Emphasis on Foamed Bitumen. Doctoral Dissertation. University of Stellenbosch

Jenkins, K.J. & van de Ven, M.F.C., 2001. Guidelines for the Mix Design and Performance Prediction of Foamed Bitumen Mixes. 20th South African Transport Conference. 16-20 July, Pretoria

Jenkins, K.J., Long, F.M. & Ebels, L.J., 2007. Foamed Bitumen Mixes = Shear Performance? International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 2

Jenkins, K.J., Van de Ven, M.F.C., Molenaar A.A.A. & de Groot, J.L.A., 2002. Performance Prediction of Cold Foamed Bitumen Mixes. Ninth International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 17-22 Aug., Copenhagen

Jooste, F., Long, F.M. & Hefer A., 2007. A Method for Consistent Classification of Materials for Pavement Rehabilitation Design. Technical Memorandum CSIR/BE/IE/ER/2007/0005/B. Gauteng Department of Public Transport, Roads and Works & SABITA

Kendall, M., Baker, B., Evans, P. & Ramanujam, J., 1999. Foamed Bitumen Stabilisation. Southern Region Symposium. Queensland Department of Main Roads, 21 Oct., Goondiwindi

Kekwick, S.V., 2005. Best Practice: Bitumen-Emulsion and Foamed Bitumen Materials Laboratory Processing. 24th Southern African Transport Conference (SATC). 23-24 June, Pretoria

Kim, J. & Lee, H., 2006. Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Jan./ Febr.

Kim, J., Lee, H., Jahren, C.T. Chen, D., & Heitzman, M., 2007. Long-term Field Performance of Cold In-Place Recycled Roads in Iowa. CD Compendium, 86th Annual Meeting. Transportation Research Board. 21-25 Jan., Washington, DC

Lancaster, J., McArthur, L. & Warwick, R., 1994. VicRoads Experience with Foamed Bitumen Stabilization. 17th ARRB Conference. 15-19 Aug., Gold Coast, Queensland

Lane, B. & Kazmierowski, T., 2003. Expanded Asphalt Stabilization on the Trans-Canada Highway. CD Compendium, 82nd Annual Meeting. Transportation Research Board. 12-16 Jan., Washington, DC

Lane, B. & Kazmierowski, T., 2005. Short Term Performance of an Innovative Cold In-Place Recycling Technology in Ontario. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. 18-21 Sept., Calgary, Alberta

Lee, D.Y., 1981. Treating Marginal Aggregates and Soil with Foamed Asphalt. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50

Little, D.N., Button, J.W. & Epps, J.A., 1983. Structural Properties of Laboratory Mixtures Containing Foamed Asphalt and Marginal Aggregates. Transportation Research Record 911. Transportation Research Board

Lewis, A.J.N. & Collings, D.C., 1999. Cold In-Place Recycling: A Relevant Process for Road Rehabilitation and Ugrading. 7th Conference on Asphalt Pavements for South Africa (CAPSA). 29 Aug.-2 Sept., Pretoria

Loizos, A., 2008. Foamed Bitumen Stabilization – State of the Art. Keynote Presentation. 4th International Gulf Conference on Roads. 10-13 Nov., Doha

Loizos, A. & Papavasiliou, V. 2007. In situ Characterization of Pavement Materials Stabilized with Foamed Asphalt and Cement. International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials. 20-22 June, Athens

Loizos, A., Collings, D. & Jenkins, K.J., 2004. Rehabilitation of a Major Greek Highway by Recycling/Stabilizing with Foamed Bitumen. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). 12-16 Sept., Sun City

Loizos, A., Papavasiliou, V. & Plati, C. 2006. Evaluation of Cold-in-Place Recycling Using Foamed Asphalt. 10th International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 12-17 Aug., Quebec

Loizos, A., Plati, C., Teroviti, E. & Kanellaidis, G., 2007. Development of a Pavement Roughness Index Using Power Spectral Density Analysis. International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials. 20-22 June, Athens

Long, F.M., 2001. The Development of Structural Design Models for Foamed Bitumen Treated Pavement Layers. Contract Report CR-2001/76. CSIR Transportek. Pretoria

Long, F.M. & Theyse, H.L., 2001. Laboratory Testing for the HVS Sections on Road P243/1, Contract Report CR-2001/22. CSIR Transportek. Pretoria

Long, F.M. & Theyse, H.L., 2002. The Development of Structural Design Models for Foamed Bitumen Treated Materials. 21st Annual South African Transport Conference “Towards Building Capacity and Accelerating Delivery”. 15-18 July, Pretoria

Long, F.M. & Theyse, H.L., 2004. Mechanistic Empirical Structural Design Models for Foamed and Emulsified Bitumen treated Materials. 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). 12-16 Sept., Sun City

Long, F.M. & Ventura, D.G.C., 2004. Laboratory Testing for the HVS Sections on the N7 (TR11/1), Contract Report CR-2003/56. CSIR Transportek. Pretoria

Long, F.M., Theyse, H.L., Robroch, S. & Liebenberg, J., 2002. Performance Models for Deep In Situ Recycled, Bitumen Stabilised Pavements under Accelerated Traffic. Ninth International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 17-22 Aug., Copenhagen

Losa, M., Bacci, R., Aserio, T. & Leandri, P., 2009. Design of Pavements Containing Foamed Bitumen Recycled Layers. 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCR2A). 29 June-2 July, University of Illinois at Urbana - Champaign

Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard D.J. & Hey, S., 1994. Pavement Recycling Using Foamed Bitumen. 17th Australian Road Research Board (ARRB) Conference. 15-19 Aug., Gold Coast, Queensland

Marquis, B., Bradbury, R.L., Colson, S., Mallick, R.B., Nanagiri, Y., Gould, J.S. O'Brien, S., & Marshall, M., 2003. Design, Construction and Early Performance of Foamed Asphalt Full Depth Reclaimed (FDR) Pavement in Maine. CD Proceedings, 82nd Annual Meeting. Transportation Research Board. 12-16 Jan., Washington, DC

Maser, K.R., 1994. Ground Penetrating Radar Surveys to Characterize Pavement Layer Thickness Variations at GPS Sites. Strategic Highway Research Program (SHRP), National Research Council: Report SHRP-P-397. Washington, D.C.

Muthen, K.M., 1998. Foamed Asphalt Mixes Mix Design Procedure. Contract Report CR-98/077. SABITA Ltd & CSIR Transportek. Pretoria

Nataatmadja, A., 2002. Foamed Bitumen Mix: Soil or Asphalt? Ninth International Conference on Asphalt Pavements (ICAP). 17-22 Aug., Copenhagen

Nunn, M. & Thom, N., 2002. Foamix: Pilot Scale Trials and Design Considerations. Viridis Report VR1, TRL

PIARC, 2001. Recycling of Existing Flexible Pavements. Technical Committee on Road Pavements, C7/8. World Road Association

Ramanujam, J.M. & Fernando, D.P., 1997. Foam Bitumen Trial at Gladfield-Cunningham Highway. Southern Region Symposium. 20-22 Nov., Australia

Ramanujam, J.M. & Jones, J. D., 2000. Characterization of Foamed-Bitumen stabilization. Road System and Engineering Technology Forum. Qld Department of Main Roads. Bardon Centre

Ramanujam, J.M. & Jones, J. D., 2007. Characterization of Foamed-Bitumen Stabilization. International Journal of Pavement Engineering, 8:2

RoadScanners, 2001. Road Doctor Software, Version 1.1, User's Guide. Rovaniemi

Roberts, F.L., Engelbrecht, J.C. & Kennedy, T.W. 1984. Evaluation of Recycled Mixtures Using Foamed Asphalt. Transportation Research Record 968. Transportation Research Board

Romanoshi, S.A., Hossain, M., Gisi A. & Heitzmann, M., 2004. Accelerated Pavement Testing Evaluation of the Structural Contribution of Full-Depth Reclamation Material when Stabilized with Foamed Asphalt. CD Proceeding, 83rd Annual Meeting. Transportation Research Board. 11-15 Jan., Washington, DC

Romanoshi, S.A., Hossain, M., Heitzmann, M. & Gisi A., 2003. Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads. Mid-Continent Transportation Research Symposium. 21-22 Aug., Ames, Iowa

Ruckel, P.J., Kole, L.L., Abel, F., Zator, R.E., Button, J.W. & Epps, J.A., 1980. Foamix Asphalt Advances. Asphalt Pavement Construction, New Materials and Techniques, American Society for Testing and Materials (ASTM). STP 724, J.A. Scheroeman, Ed.

Saarenketo, T. & Scullion, T., 2000. Road Evaluation with Ground Penetrating Radar. Journal of Applied Geophysics, Vol. 43, No. 2

Saleh, M.F., 2007. Effect of Rheology on the Bitumen Foamability and Mechanical Properties of Foam Bitumen Stabilised Mixes. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 2

SHRP, 1993. SHRP's Layer Moduli Backcalculation Procedure. Strategic Highway Research Program (SHRP), National Research Council. Washington, DC

Theyse, H., Long, F., Harvey, J.T. & Monismith, C.L., 2004. Discussion of Deep In-Situ Recycling (DISR). Technical Memorandum TM-UCB-PRC-2004-6. Institute of Transportation Studies. University of California, Berkeley

TRB, 2008. Use of Foamed Asphalt in Recycling of Pavements. Transportation Research Circular, Committee on Pavement Rehabilitation (AFD70). Washington, DC

Van der Walt, N., Botha, P., Semmelink, C., Engelbrecht, F. & Salminen, N., 1999. The Use of Foamed Bitumen in Full-Depth In-Place Recycling of Pavement Layers Illustrating the Basic Concept of Water Saturation in the Foam Process. 7th Conference on Asphalt Pavements for South Africa (CAPSA). 29 Aug.-2 Sept., Pretoria

Van Gurp, C., 1995. Seasonal Influence on Asphalt Pavements with the Use of Falling Weight Deflectometers. Phd Thesis. Delft

Van Wijk, A.J., 1984. Structural Comparison of Two Cold Recycled Pavement Layers. Design, Evaluation, and Performance of Pavements. Transportation Research Record 954. Transportation Research Board

Van Wijk, A.J. & Wood, L.E. 1982. Construction of a Recycled Pavement Using Foamed Asphalt. 27th Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association. Edmonton, Alberta

Van Wijk, A.J. & Wood, L.E. 1983. Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement. Transportation Research Record 911. Transportation Research Board

Weston, C.T., Van Amsterdam, E. & Jenkins, K.J., 2002. A Study into the Mechanical Properties of Foamed Bitumen Stabilised Materials. 21th South African Transport Conference. 15-19 July, Pretoria

Wirtgen, 2004. Cold Recycling Manual. Wirtgen GmbH, Honner Strasse 2, D-53578, Windhagen

Wirtgen, 2005. Foamed Bitumen – The Innovative Binding Agent for Road Construction. Wirtgen GmbH, Honner Strasse 2, D-53578, Windhagen

Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R.L., 1989. The Finite Element Method (fourth edition), volume 1: Basic Formulation and Linear Problems.. Maidenhead: McGraw-Hill Book Company, UK

ΕΜΠ., 2003. «Αξιολόγηση Της Πιλοτικής Εφαρμογής για Την Αποκατάσταση Τον Οδοστρωμάτων Στον Αυτοκινητόδρομο Αθηνών – Κορίνθου». Έκθεση Ι, ΙΙΙ. Τομέας Μ.Σ.Υ., Εργαστήριο Οδοποιίας. Αθήνα

Συντομογραφίες

FA	Αφρώδης άσφαλτος (foamed asphalt)
AC	Ασφαλτικό σκυρόδεμα (asphalt concrete)
NDT	Μη καταστρεπτικές δοκιμές (non-destructive tests)
FWD	Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (falling weight deflectometer)
LTPP	Προβλέψεις της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας (long-term pavement performance)
HVS	Προσομοιωτής βαρέος οχήματος (heavy vehicle simulator)
RLT	Δοκιμές υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης (real loading testing)
GPR	Γεωραντάρ (ground penetrating radar)
ER	Λόγος διόγκωσης (expansion ratio)
$T_{1/2}$	Χρόνος ημι-ζωής (half-life)
ΚΘΑ	Κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο
RAP	Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα από υφιστάμενο ασφαλτικό οδόστρωμα (reclaimed asphalt pavement)
ΦΑ	Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα
OMC	Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (optimum moisture content)
OMMC	Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για ανάμειξη (optimum mixing moisture content)
OFC	Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για συμπύκνωση (optimum fluid content)
ITS	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile strength)
UCS	Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (unconfined compressive strength)
TSR	Εναπομένουσα αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength retained)
ITSM	Μέτρο δυσκαμψίας / ελαστικής παραμόρφωσης από δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (indirect tensile stiffness modulus)
NAT	Συσκευή Nottingham asphalt tester
APT	Δοκιμές επιταχυνόμενης καταπόνησης (accelerated pavement testing)
SR _e	Λόγος ανηγμένων παραμορφώσεων» (strain ratio)

RD	Σχετική πυκνότητα (relative density)
S	Επίπεδο κορεσμού (saturation level)
DVP	Δοκιμή δυναμικής διείσδυσης κώνου (dynamic cone penetrometer)
SCI	Δείκτης κατάστασης άνω στρώσεων οδοστρώματος (surface curvature index)
TNF	Συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας (temperature normalization factor)
M.O.	Μέσος όρος
T.A.	Τυπική απόκλιση
Σ.Μετ.	Συντελεστής μεταβλητότητας
RMS error	Μέσο τετραγωνικό (root mean square) σφάλμα
MLT	Θεωρία πολλαπλών στρώσεων (multi-layer theory)
FE	Πεπερασμένα στοιχεία (finite elements)
ITFT	δοκιμή κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile fatigue test)
f.o.	Σύστημα οπτικών ινών (fiber optics)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Περιεχόμενα Παραρτήματος

Π1. Δείκτες δομικής κατάστασης ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων.....	2
Π2. Χρονική εξέλιξη δείκτη δομικής κατάστασης ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων.....	5
Π3. Διόρθωση μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς	6
Π4. Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες	12
Π5. Επιρροή εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών	15
Π6. Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος	28
Π7. Κρίσιμα εντατικά μεγέθη	37
Π8. Λόγος φθοράς στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος.....	39
Π9. Δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού	41
Π10. Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού	43
Π11. Μετρήσεις οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων με εφαρμογή Συστήματος οπτικών ινών.....	56
Π12. Στατιστικός έλεγχος αποκλίσεων	57

Π1. Δείκτες δομικής κατάστασης ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων

Πίνακας Π1.1. Μέσος όρος τιμών D_0 και SCI (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)

Φάση δοκιμών (*)	D_0 (μm)							
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (**)							
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2	max	min
<i>rec.</i>	324.0	332.5	261.4	222.7	338.7	376.4	376.4	222.7
<i>bind.</i>	189.4	165.2	218.4	104.7	307.3		307.3	104.7
<2 μήνες	100.6	153.9	155.9	97.4	186.8	191.4	191.4	97.4
6 μήνες	56.3	65.1	74.7	61.1	101.1	100.0	101.1	56.3
1 έτος	54.1	57.7	61.5	44.5	83.7	69.9	83.7	44.5
	KA1α			KA4α				
<i>rec.</i>	340.2			246.1				
<i>bind.</i>	230.8			97.2				
<2 μήνες	104.5			110.0				
6 μήνες	67.1			62.6				
1 έτος	65.1			57.0				
Φάση δοκιμών (*)	SCI (μm)							
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (**)							
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2	max	min
<i>rec.</i>	218.5	220.8	155.2	160.7	225.7	263.8	263.8	155.2
<i>bind.</i>	121.0	90.5	117.1	56.5	197.5		197.5	56.5
<2 μήνες	46.5	87.1	75.1	53.6	90.8	97.7	97.7	46.5
6 μήνες	20.2	24.8	22.4	27.5	45.2	47.2	47.2	20.2
1 έτος	17.6	16.9	12.9	12.6	24.5	23.9	24.5	12.6
	KA1α			KA4α				
<i>rec.</i>	340.2			246.1				
<i>bind.</i>	230.8			97.2				
<2 μήνες	104.5			110.0				
6 μήνες	67.1			62.6				
1 έτος	65.1			57.0				

Υποσημείωση: **1) KA1,...:** δεξιό ίχνος τροχών. **2) KA1α, KA4α:** ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.2

Πίνακας Π1.2. Στατιστική σύγκριση D_0 στο δεξιό ίχνος και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών

t-Test: Κατά ζεύγη	Μεταβλητή 1 KA1α	Μεταβλητή 2 KA1	Μεταβλητή 1 KA4α	Μεταβλητή 2 KA4
M.O.	161.6	144.9	114.6	106.1
t Stat	2.565582		1.60785	
t Critical	2.776445		2.776445	

Υποσημείωση: **1) KA1, KA4:** δεξιό ίχνος τροχών. **2) KA1α, KA4α:** ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π1.3. Μέσος όρος τιμών D_0 (Εύκαμπτο οδόστρωμα)

Φάση δοκιμών (*)	D_0 (μm)			
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (**)			
	ΛΑ1	ΛΑ2	ΛΑ3	ΛΑ1α
rec.	390.1	335.9	253.7	382.7
bind.	238.4	150.2	107.0	275.1
<2 μήνες	145.2	122.3	87.8	150.5
16 μήνες	104.1	105.9	81.0	118.8
18 μήνες	101.1			

Υποσημείωση: **1) ΛΑ1, ΛΑ2, ΛΑ3:** δεξιό ίχνος τροχών. **2) ΛΑ1α:** ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.3

Πίνακας Π1.4. Στατιστική σύγκριση D_0 στο δεξιό ίχνος και ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών

t-Test: Κατά ζεύγη	Μεταβλητή 1 ΛΑ1α	Μεταβλητή 2 ΛΑ1
M.O.	231.8	219.5
t Stat	1.321326	
t Critical	3.182446	

Υποσημείωση: **1) ΛΑ1:** δεξιό ίχνος τροχών. **2) ΛΑ1α:** ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π1.5. Συντελεστής μεταβλητότητας δείκτη D_0

Φάση δοκιμών (*)	Σ. Μετ. D_0 (%)					
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (**)					
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2
<i>rec.</i>	34,4	12,0	24,1	31,6	15,1	16,5
<i>bind.</i>	23,2	20,4	22,6	51,8	15,6	
<2 μήνες	35,4	17,1	20,2	40,5	28,0	22,7
6 μήνες	21,7	31,2	18,8	28,9	23,1	20,7
1 έτος	15,8	11,9	15,3	24,0	20,9	15,8
	KA1α			KA4α		
<i>rec.</i>	24,0			30,7		
<i>bind.</i>	33,8			41,7		
<2 μήνες	33,9			39,3		
6 μήνες	20,8			30,4		
1 έτος	19,5			25,1		

Υποσημείωση: **1) KA1,...**: δεξιό ίχνος τροχών. **2) KA1α, KA4α**: ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.2

Πίνακας Π1.6. Συντελεστής μεταβλητότητας δείκτη D_0

Φάση δοκιμών (*)	Σ. Μετ. D_0 (%)			
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (**)			
	ΛA1	ΛA2	ΛA3	ΛA1α
<i>rec.</i>	22.7	13.3	15.0	29.5
<i>bind.</i>	20.4	18.9	8.3	27.0
<2 μήνες	22.4	18.1	7.4	18.5
16 μήνες	21.8	21.2	12.2	32.5
18 μήνες	26.8			

Υποσημείωση: **1) ΛA1, ΛA2, ΛA3**: δεξιό ίχνος τροχών. **2) ΛA1α**: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών. **3) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.3

Π2. Χρονική εξέλιξη δείκτη δομικής κατάστασης ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων

$$D_0 = \alpha_1 * t^{\beta_1} \quad (5.6)$$

Όπου,

D_0 δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος συνολικά (μm)

t : χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

α_1, β_1 : συντελεστές (από Πίνακα Π2.1)

Πίνακας Π2.1: Τιμές συντελεστών α_1 και β_1

Πιλοτικό τμήμα	Ίχνος τροχών	α	β	R^2	Τύπος οδοστρώματος
KA1	Δ	109.01	-0.3435	0.96	Ημιάκαμπτο (*)
KA1α	Αν	124.26	-0.3262	0.95	
KA2	Δ	121.39	-0.3173	0.95	
KA3	Δ	128.08	-0.2883	0.99	
KA4	Δ	88.05	-0.2616	0.90	
KA4α	Αν	96.05	-0,235	0.80	
AK1	Δ	169.33	-0.2838	0.99	
AK2	Δ	164.86	-0.3179	0.99	
ΛΑ1	Δ	175.36	-0.2114	0.90	Εύκαμπτο (**)
ΛΑ1α	Αν	186.25	-0.2062	0.85	
ΛΑ2	Δ	145.83	-0.1693	0.62	
ΛΑ3	Δ	107.89	-0.163	0.56	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμή στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν:** δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.3

Π3. Διόρθωση μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς

Πίνακας Π3.1: Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ITSM) δοκιμίων κατεργασμένου υλικού

Θερμοκρασία δοκιμής T	E _L (FA) [MPa]		
	6 °C	22 °C	36 °C
	5800	3400	2100
	5750	2700	2100
	5650	2850	1500
	5300	2650	1500
	5850	3300	2300
	6200	3400	2300
	7050	4150	2400
	6400	3850	2300
	6200	3650	1700
	6300	3400	1800
	8400	4150	2700
	8300	4050	2600
	6600	3850	2300
	6050	3650	2400
	6450	3850	2250
	6350	3750	2250
M.O. (aver E _L (FA))	6416	3541	2156
T.A.	862	480	357
Σ.Μετ. (%)	13.4	13.5	16.6
T-20 (°C)	-14	2	16
log (aver,E _L (FA))	3.807	3.549	3.334

$$E_L (FA) (20^\circ C) = E_L (FA) (T) * A^{(T-20)} \quad (5.8)$$

$$E_L (FA) (T_0) = E_L (FA) (T) * 10^{a*(T-T_0)} \quad (5.9)$$

Όπου,

E_L (FA) (20°C): μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού: 20°C (MPa)

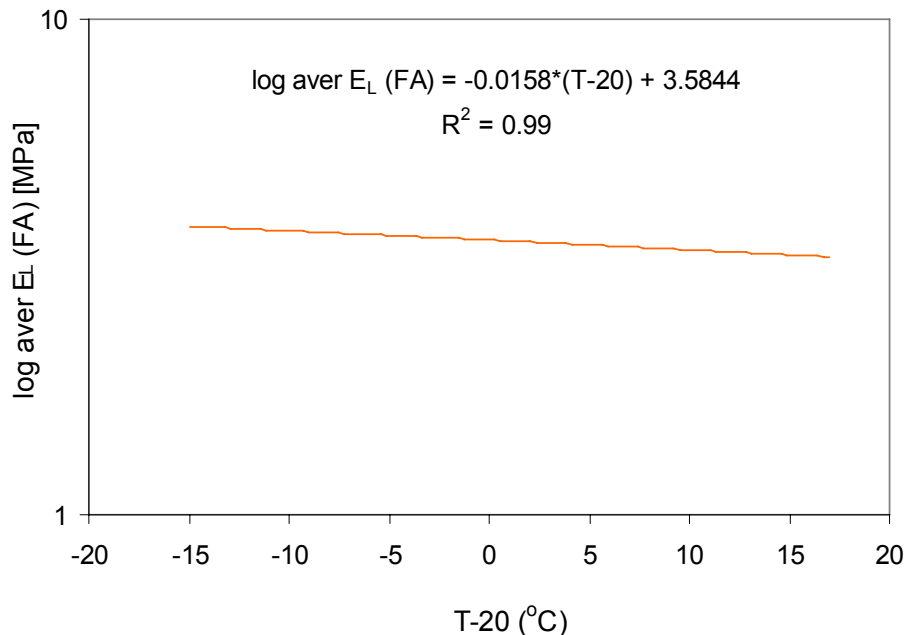
E_L (FA) (T₀): μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία αναφοράς (MPa)

$E_L (FA) (T)$:	μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασία δοκιμής (MPa)
T_0 :	θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}\text{C}$)
T :	θερμοκρασία δοκιμής ($^{\circ}\text{C}$)
A, α :	συντελεστές ($A = 1.035$ έως 1.037 , $\alpha = 0.0158$)

Υπολογισμός συντελεστή «Α» σχέσης (4.10)

Από τα στοιχεία του Πίνακα Π3.1, προσδιορίστηκε η συσχέτιση της μέσης τιμής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης ($\text{aver } E_L (FA)$), ως προς τη διαφορά της θερμοκρασίας δοκιμής με τη θερμοκρασία αναφοράς 20°C ($T-20$). Με βάση τη σχέση που φαίνεται στο Σχήμα Π3.1, για τη θερμοκρασία αναφοράς $T=20^{\circ}\text{C}$, υπολογίστηκε μέση τιμή του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης:

$$\text{aver } E_L (FA) (20^{\circ}\text{C}) = 10^{3.5844} = 3841 \text{ MPa}.$$



Σχήμα Π3.1. Συσχέτιση μέσης μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $\text{aver } E_L (FA)$ με θερμοκρασία δοκιμής $T-20^{\circ}\text{C}$

Οι τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές στη θερμοκρασία 22°C, διορθώθηκαν στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C, με το συντελεστή 1.0847 που προέκυψε από τον λόγο των μέσων τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης στις αντίστοιχες θερμοκρασίες:

$\text{aver } E_L(\text{FA})(20^\circ\text{C}) / \text{aver } E_L(\text{FA})(22^\circ\text{C}) = 3841 / 3541 = 1.0847$. Δηλαδή:

$$E_L(\text{FA})(20) = 1.0847 \cdot E_L(\text{FA})(22)$$

Με χρήση διάφορων τιμών του συντελεστή Α της σχέσης (5.8), διορθώθηκαν οι τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $E_L(\text{FA})(T)$ κάθε δοκιμής στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C και υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά από την αντίστοιχη τιμή $E_L(\text{FA})(20^\circ\text{C})$. Η τιμή του συντελεστή Α που ελήφθη τελικά υπόψη, ήταν 1.035, για την οποία προέκυψε η μικρότερη μέση ποσοστιαία διαφορά όλων των δοκιμών (0.01%). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, για συντελεστή $A=1.035$, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π3.2.

Πίνακας Π3.2: Διόρθωση τιμών μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με τη σχέση (5.8) και $A=1.035$

Διόρθωση από $E_L(\text{FA})(T)$ σε $E_L(\text{FA})(20)$			$E_L(\text{FA})(20)$	Διαφορά από $E_L(\text{FA})(20)$ [%]		
6 °C	22 °C	36 °C	20 °C	6 °C	22 °C	36 °C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3583	3642	3641	3688	-2.85	-1.24	-1.27
3552	2892	3641	2929	21.29	-1.24	24.33
3490	3053	2601	3091	12.91	-1.24	-15.87
3274	2839	2601	2875	13.91	-1.24	-9.52
3614	3535	3988	3580	0.96	-1.24	11.41
3830	3642	3988	3688	3.86	-1.24	8.14
4355	4446	4162	4502	-3.25	-1.24	-7.55
3954	4124	3988	4176	-5.33	-1.24	-4.50
3830	3910	2948	3959	-3.26	-1.24	-25.55
3892	3642	3121	3688	5.53	-1.24	-15.37
5189	4446	4682	4502	15.28	-1.24	4.00
5128	4338	4508	4393	16.72	-1.24	2.62
4077	4124	3988	4176	-2.37	-1.24	-4.50
3738	3910	4162	3959	-5.60	-1.24	5.11
3985	4124	3901	4176	-4.59	-1.24	-6.58
3923	4017	3901	4068	-3.56	-1.24	-4.09
M.O.				0.01		
3963	3793	3739	3841	3.20	-1.24	-2.65

Επεξήγηση Πίνακα Π3.2:

Οι τιμές στις στήλες (1), (2) και (3) προέκυψαν από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμών (Πίνακας Π3.1) και διόρθωση με τη σχέση (8.8) ($A=1.035$).

Οι τιμές στη στήλη (4) προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών στη θερμοκρασία 22°C (Πίνακας Π3.1) με πολλαπλασιασμό με το συντελεστή 1.0847.

Οι τιμές στις στήλες (5), (6) και (7) προέκυψαν ως ποσοστιαία διαφορά των τιμών από τις στήλες (1), (2) και (3) αντίστοιχα, σε σχέση με τις τιμές στη στήλη (4). Για παράδειγμα: (5) = [(1)-(4)]*100/(4).

Οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square (RMS) error). Η τιμή του συντελεστή A που προέκυψε, για τις μικρότερες τιμές του RMS σφάλματος όλων των δοκιμών ήταν 1.037, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη, σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση (1.035). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, για συντελεστή A=1.037, παρουσιάζονται στον Πίνακα Π3.3.

Πίνακας Π3.3: Διόρθωση τιμών μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με τη σχέση (5.8) και A=1.037

Διόρθωση από $E_L(FA)(T)$ σε $E_L(FA)(20)$			$E_L(FA)(20)$	Σφάλμα RMS από $E_L(FA)(20)$ [%]		
6 °C	22 °C	36 °C	20 °C	6 °C	22 °C	36 °C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
3488	3656	3756	3688	29.5	0.7	3.4
3458	2903	3756	2929	326.0	0.7	797.0
3397	3065	2683	3091	97.9	0.7	174.9
3187	2850	2683	2875	118.1	0.7	44.6
3518	3549	4113	3580	3.0	0.7	222.3
3728	3656	4113	3688	1.2	0.7	132.9
4239	4463	4292	4502	34.0	0.7	21.7
3848	4140	4113	4176	61.6	0.7	2.3
3728	3925	3040	3959	34.1	0.7	538.8
3788	3656	3219	3688	7.4	0.7	161.7
5051	4463	4829	4502	148.9	0.7	52.8
4991	4355	4650	4393	185.1	0.7	34.1
3969	4140	4113	4176	24.7	0.7	2.3
3638	3925	4292	3959	65.9	0.7	70.7
3878	4140	4024	4176	50.8	0.7	13.3
3818	4033	4024	4068	37.6	0.7	1.2
M.O.				σφάλμα RMS		
3858	3807	3856	3841	8.5	0.9	11.9

Επεξήγηση Πίνακα Π3.3:

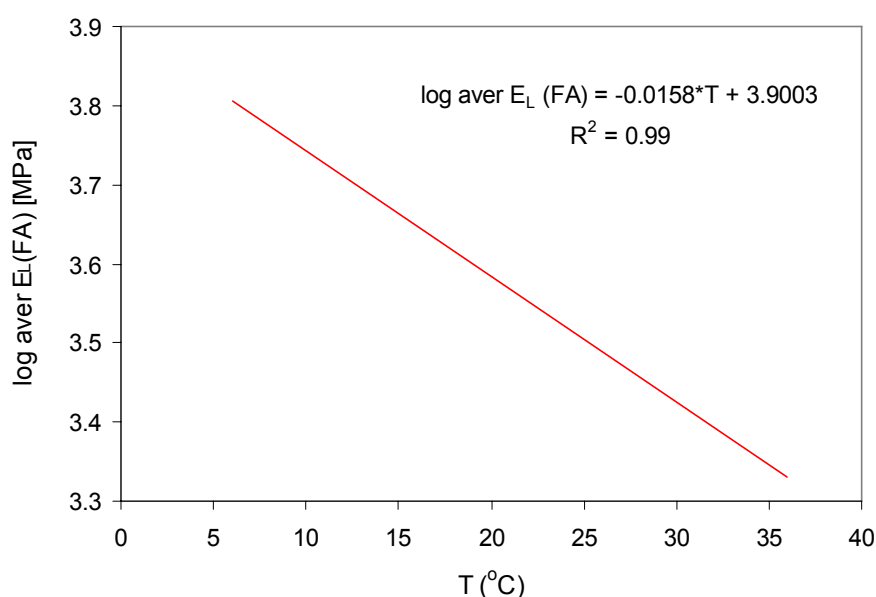
Οι τιμές στις στήλες (1), (2) και (3) προέκυψαν από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμών (Πίνακας Π3.1) και διόρθωση με τη σχέση (5.8) (A=1.035).

Οι τιμές στη στήλη (4) προέκυψαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών στη θερμοκρασία 22°C (Πίνακας Π3.1) με πολλαπλασιασμό με το συντελεστή 1.0847.

Οι τιμές στις στήλες (5), (6) και (7) δίνουν την ποσοστιαία τετραγωνική διαφορά των τιμών από τις στήλες (1), (2) και (3) αντίστοιχα, σε σχέση με τις τιμές στη στήλη (4). Για παράδειγμα: (5) = $\{[(1)-(4)]*100/(4)\}^2$.

Υπολογισμός του συντελεστή «α» της σχέσης (5.9)

Ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναφέρεται στην πηγή (Harvey & Fu 2007). Από τα στοιχεία του Πίνακα Π3.1, προσδιορίστηκε η συσχέτιση του $\log \text{aver } E_L \text{ (FA)}$, ως προς τη θερμοκρασία δοκιμής. Με βάση τη σχέση που φαίνεται στο Σχήμα Π3.2, προέκυψε $\alpha = 0.0158$ (κλίση της γραμμής συσχέτισης).



Σχήμα Π3.2. Συσχέτιση μέσης μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $\text{aver } E_L \text{ (FA)}$ με τη θερμοκρασία δοκιμής T

Σύγκριση αποτελεσμάτων σχέσεων (5.8) και (5.9)

Έγινε στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων διόρθωσης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης του κατεργασμένου υλικού στη θερμοκρασίας αναφοράς 20°C, με εφαρμογή της σχέσης (5.9), σε σχέση με τη διόρθωση με τη σχέση (5.8) και τιμές συντελεστή A 1.035 και 1.037. Οι διορθωμένες τιμές με εφαρμογή της σχέσης (5.9) φαίνονται στον Πίνακα Π3.4. Οι στατιστικές συγκρίσεις, σε σχέση με τη διόρθωση με τη σχέση (5.8) και τιμές συντελεστή A = 1.035 φαίνονται στον Πίνακα Π3.5. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης με χρήση του στατιστικού t-test των κατά ζεύγη

παρατηρήσεων, οι μέσες τιμές που προέκυψαν με εφαρμογή της σχέσης (5.9) και αυτές που προέκυψαν από τη σχέση (5.8) και τιμές συντελεστή $A = 1.035$ δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Πίνακας Π3.4: Διόρθωση μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης στη θερμοκρασίας αναφοράς 20°C με τη σχέση (5.9) και $\alpha=0.0158$

Διόρθωση από $E_L(\text{FA})(T)$ σε $E_L(\text{FA})(20)$		
6°C	22°C	36°C
3485	3657	3759
3455	2904	3759
3395	3065	2685
3185	2850	2685
3515	3549	4116
3726	3657	4116
4236	4463	4295
3846	4141	4116
3726	3925	3043
3786	3657	3222
5048	4463	4832
4987	4356	4653
3966	4141	4116
3635	3925	4295
3876	4141	4027
3816	4033	4027
M.O.		
3855	3808	3859

Πίνακας Π3.5: Σύγκριση διόρθωσης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C με τη σχέση (5.9) και με τη σχέση (5.8) με $A=1.035$

$A=1.035$	Διόρθωση από $E_L(\text{FA})(T)$ σε $E_L(\text{FA})(20)$					
	6°C		22°C		36°C	
Σχέση	(4.10)	(4.11)	(4.11)	(4.10)	(4.11)	(4.10)
t-Test						
M.O.	3963.5	3855.1	3807.9	3792.8	3859.2	3738.9
t Stat	0.583328		0.082653		0.540559	
t Critical	2.042272		2.042272		2.042272	

Π4. Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες

Πίνακας Π4.1: Εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες κατεργασμένου υλικού (τμήμα ΑΚ1)

6 μήνες		1 έτος		2 έτη	
ITS [kPa]	E _L (FA) [MPa]	ITS [kPa]	E _L (FA) [MPa]	ITS [kPa]	E _L (FA) [MPa]
737	10,569	621	10,534	549	8,194
483	7,390	683	8,513	492	7,937
297	5,441	315	9,481	328	5,396
709	6,141	601	8,679	584	6,405
621	4,486	610	5,560	487	5,170
246	2,027	434	4,523	308	4,137
773	12,092	568	8,680	385	7,348
369	4,699	248	3,021	505	5,938
531	5,502	270	4,500	286	4,029
300	4,355	494	6,286	383	4,653
576	4,868	207	4,939	386	4,463
254	1,964	229	1,720	143	1,181
205	1,963	169	812	119	1,891
				212	4,759
				299	2,026
				472	6,775
				163	2,974
				458	5,262
				329	4,805
				154	1,893
				366	3,570
				352	5,234
				395	3,397
				294	3,763
				147	3,422
				147	1,975
				77	914
				33	980

Υποσημείωση: **1) ITS:** αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile strength). **2) E_L (FA):** μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού (εργαστηριακές δοκιμές)

Πίνακας Π4.2: Μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού E_L (FA) (πυρήνες)

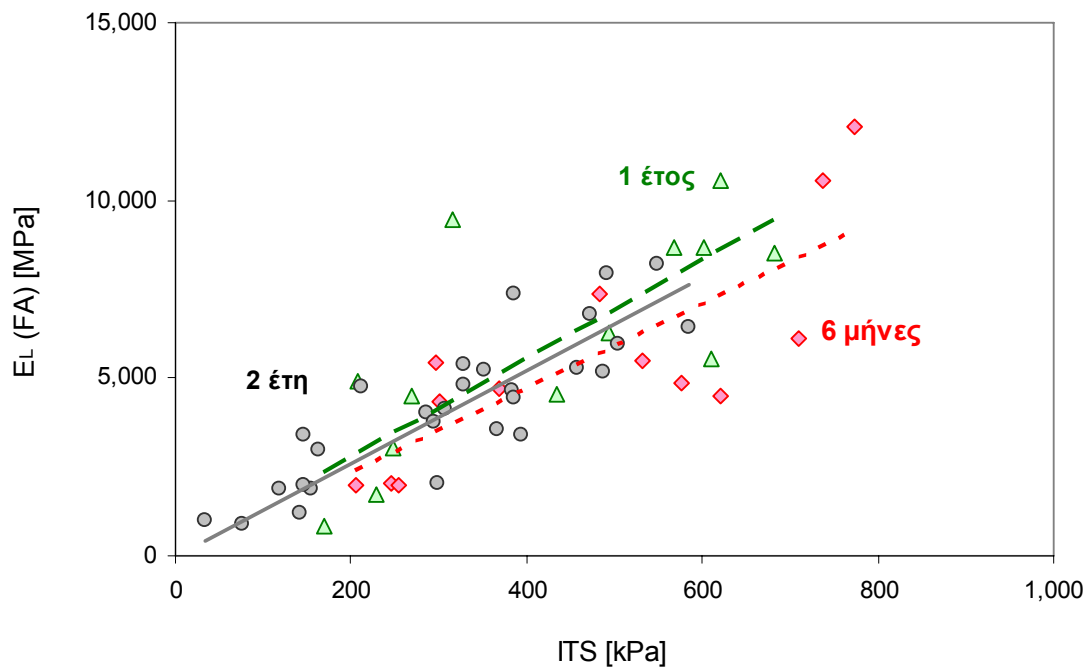
Θέση πυρηνοληψίας (χρόνος από κατασκευή)	Άνω (1 ^ο) τμήμα	2 ^ο τμήμα	3 ^ο τμήμα	4 ^ο τμήμα	M.O. (1 ^ο – 3 ^ο τμήμα)
Π1 (6 μήνες)	10,569	7,390	5,441		7,800
Π1 (1 έτος)	10,534	8,513	9,481		9,509
Π1 (2 έτη)	8,194	7,937	5,396	2913	7,176
Π1α (6 μήνες)	6,141	4,486	2,027		4,218
Π1α (1 έτος)	8,679	5,560	4,523		6,254
Π1α (2 έτη)	6,405	5,170	4,137		5,237
Π3 (6 μήνες)	12,092	4,699	5,502	4355	7,431
Π3 (1 έτος)	8,680	3,021	4,500	6286	5,400
Π3 (2 έτη)	7,348	5,938	4,029	4653	5,772
Π3α (6 μήνες)	4,868	1,964	1,963		2,932
Π3α (1 έτος)	4,939	1,720	812		2,490
Π3α (2 έτη)	4,463	1,181	1,891		2,512
M.O.	7,743	4,798	4,142		5,561
6 μήνες	8,418	4,635	3,733		5,595
1 έτος	8,208	4,704	4,829		5,914
2 έτη	6,603	5,057	3,863		5,174

Υποσημείωση: **1) Π1, Π3:** πυρήνες από το δεξιό ίχνος τροχών. **2) Π1α, Π3α:** πυρήνες ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π4.3: Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων (πυρήνες)

Φάση δοκιμών	Μέση τιμή μέτρου δυσκαμψίας (ITSM) [MPa]					
	AK			KA		
	E_L (ισοπ)	E_L (αντιολ)	E_L (AC)	E_L (ισοπ)	E_L (αντιολ)	E_L (AC)
<2 μήνες	2750	3460	3163	4200	3130	3533
6 μήνες	4050	5800	5050	4650	4230	4395
1 έτος	3040	4500	3870	3260	3920	3646

Υποσημείωση: **1) E_L (ισοπ):** δυσκαμψία ισοπεδωτικής στρώσης. **2) E_L (αντιολ):** δυσκαμψία αντιολισθηρής στρώσης. **3) E_L (AC):** δυσκαμψία συνόλου ασφαλτικών στρώσεων (ισοπεδωτικής & αντιολισθηρής στρώσης)



Σχήμα Π4.1. Συσχέτιση E_L (FA) με αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (ITS) κατεργασμένου υλικού (πυρήνες 6 μήνες, 1 έτος και 2 έτη μετά την κατασκευή)

Υποσημείωση: **1) ITS:** αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile strength). **2) E_L (FA):** μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένου υλικού (εργαστηριακές δοκιμές σε πυρήνες)

Π5. Επιρροή εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ στα αποτελέσματα των ανάστροφων υπολογισμών

Πίνακας Π5.1α: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa] (τμήμα ΑΚ1, φάση δοκιμών rec.)

Θέση δοκιμής	E_{FWD} (FA)		Δ [%]	RMS [%]
	rec.	rec. ΚΘΑ		
2.378	690	534	29.2	853.4
2.398	812	564	44.0	1933.5
2.407	620	574	8.0	64.2
2.418	779	617	26.3	689.4
2.438	673	599	12.4	152.6
2.458	1310	1330	-1.5	2.3
2.520	676	567	19.2	369.6
2.538	550	459	19.8	393.1
2.558	697	584	19.3	374.4
2.588	438	367	19.3	374.3
M.O.	725	620	16.9	22.8
T.A.	231.9	260.6		
Σ.Μετ.	32.0	42.1		

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) φάση δοκιμών rec.:** φορτίο FWD στην επιφάνεια της κατεργασμένης στρώσης (από Πίνακα 5.3, υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) rec.:** ανάστροφοι υπολογισμοί χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ. **4) rec. ΚΘΑ:** ανάστροφοι υπολογισμοί με συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Πίνακας Π5.1β: E_{FWD} (FA) [MPa] (τμήμα ΑΚ1, φάση δοκιμών bind.)

Θέση δοκιμής	E_{FWD} (FA)		Δ [%]	RMS [%]
	bind.	bind. ΚΘΑ		
2.378	512	335	52.8	2791.6
2.398	550	381	44.4	1967.5
2.407	446	405	10.1	102.5
2.418	489	380	28.7	822.8
2.438	452	217	108.3	11727.8
2.458	829	682	21.6	464.6
2.520	413	328	25.9	671.6
2.538	525	405	29.6	877.9
2.558	823	546	50.7	2573.8
2.588	266	230	15.7	245.0
M.O.	531	391	35.7	47.2
T.A.	174.5	138.5		
Σ.Μετ.	32.9	35.4		

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) φάση δοκιμών bind.:** φορτίο FWD στην επιφάνεια της ισοπεδωτικής στρώσης (από Πίνακα 5.2, υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) bind.:** ανάστροφοι υπολογισμοί χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ. **4) bind. ΚΘΑ:** ανάστροφοι υπολογισμοί με συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Πίνακας Π5.1γ: E_{FWD} (FA) [MPa] (τμήμα AK1, φάση δοκιμών <2 μήνες)

Θέση δοκιμής	E_{FWD} (FA)		Δ [%]	RMS [%]
	<2 μήνες	<2 μήνες ΚΘΑ		
2.378	640	499	28.3	798.4
2.398	1040	634	64.0	4100.8
2.407	668	539	23.9	572.8
2.418	604	431	40.1	1611.2
2.438	579	476	21.6	468.2
2.458	1800	1830	-1.6	2.7
2.520	2310	1290	79.1	6252.0
2.538	2270	1320	72.0	5179.6
2.558	1260	800	57.5	3306.3
2.588	492	375	31.2	973.4
M.O.	1166	819	42.3	48.2
T.A.	714.4	491.7		
Σ.Μετ.	61.3	60.0		

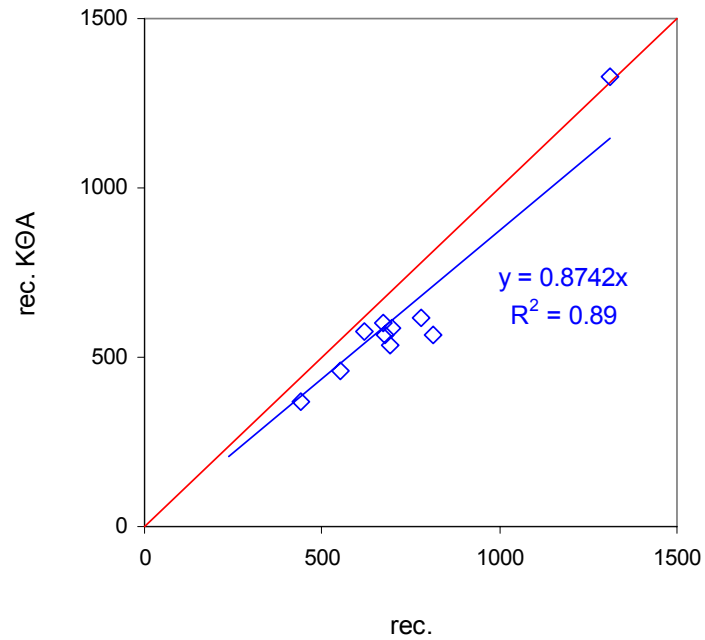
Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA)**: ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) φάση δοκιμών <2 μήνες**: φορτίο FWD στην επιφάνεια της αντιστοιχισμένης στρώσης (από Πίνακα 5.2, υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) <2 μήνες**: ανάστροφοι υπολογισμοί χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ. **4) <2 μήνες ΚΘΑ**: ανάστροφοι υπολογισμοί με συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Πίνακας Π5.1δ: E_{FWD} (FA) [MPa] (τμήμα AK1, φάση δοκιμών 6 μήνες)

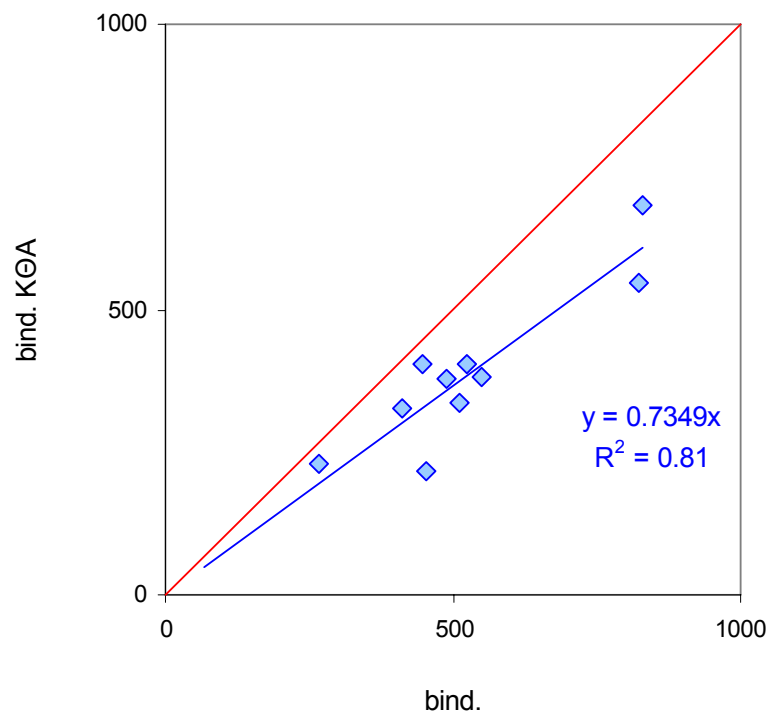
Θέση δοκιμής	E_{FWD} (FA)		Δ [%]	RMS [%]
	6 μήνες	6 μήνες ΚΘΑ		
2.378	6850	3730	83.6	6996.7
2.398	8460	3630	133.1	17704.4
2.407	4290	2860	50.0	2500.0
2.418	4570	2300	98.7	9740.8
2.438	2950	2400	22.9	525.2
2.458	10800	7380	46.3	2147.5
2.520	36000	8370	330.1	108971.0
2.538	21400	9810	118.1	13958.2
2.558	20100	10600	89.6	8032.2
2.588	4970	2790	78.1	6105.3
M.O.	12039	5387	123.5	132.9
T.A.	10627.1	3283.3		
Σ.Μετ.	88.3	60.9		

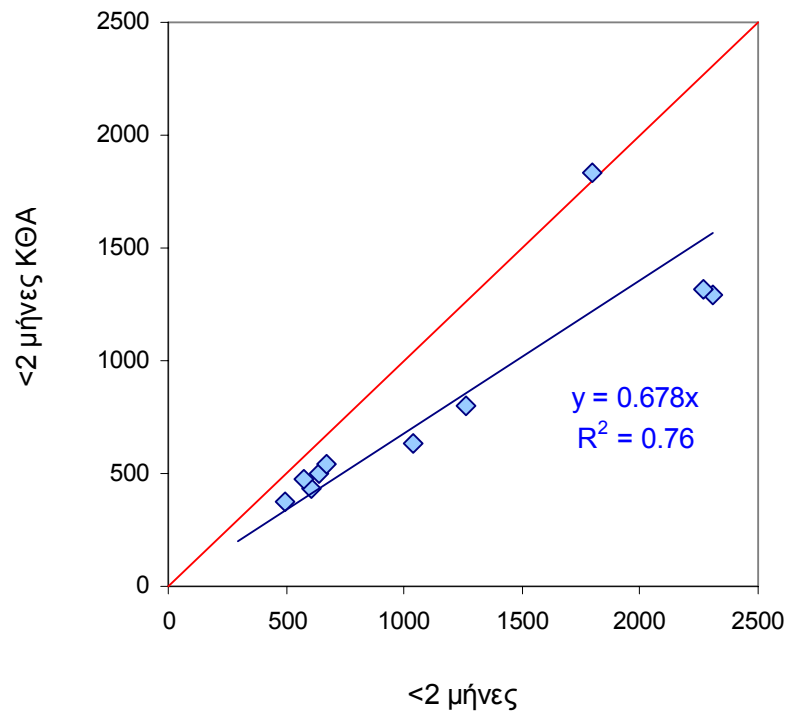
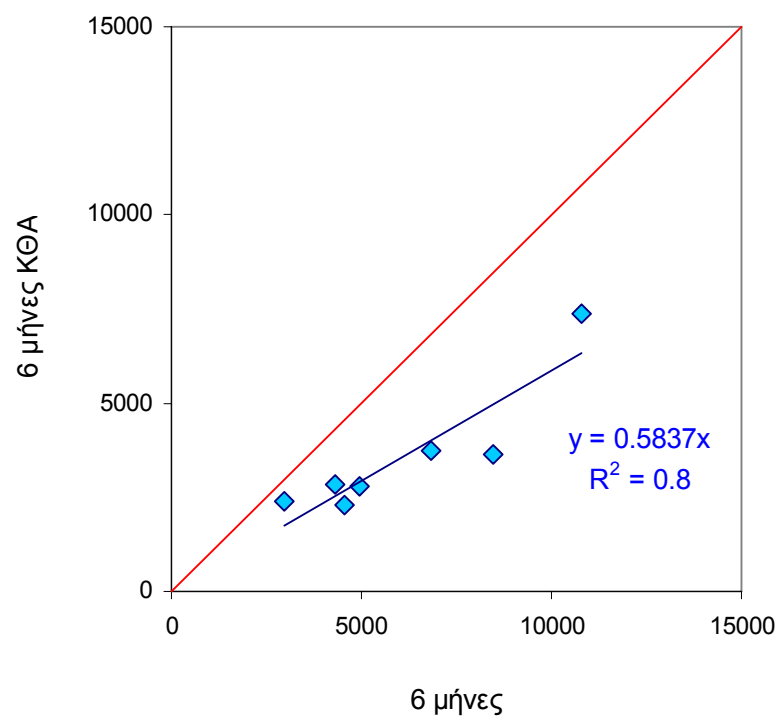
Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA)**: ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης. **2) φάση δοκιμών 6 μήνες**: φορτίο FWD στην επιφάνεια της αντιστοιχισμένης στρώσης (από Πίνακα 5.2, υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) 6 μήνες**: ανάστροφοι υπολογισμοί χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ. **4) 6 μήνες ΚΘΑ**: ανάστροφοι υπολογισμοί με συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης ΚΘΑ

Συσχέτιση τιμών E_{FWD} (FA) με (ένδειξη «ΚΘΑ» στο διάγραμμα) και χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ



Σχήμα Π5.1α. Συσχέτιση τιμών E_{FWD} (FA) (φάση δοκιμών: rec.)



Σχήμα Π5.1β. Συσχέτιση τιμών E_{FWD} (FA) (φάση δοκιμών: bind.)Σχήμα Π5.1γ. Συσχέτιση τιμών E_{FWD} (FA) (φάση δοκιμών: <2 μήνες)Σχήμα Π5.1δ. Συσχέτιση τιμών E_{FWD} (FA) (φάση δοκιμών: 6 μήνες)

Πίνακας Π5.2: Σύγκριση τιμών E_{FWD} (FA) με (ένδειξη «ΚΘΑ») και χωρίς συνυπολογισμό της εναπομένουσας στρώσης από ΚΘΑ

t-Test: Κατά ζεύγη								
Φάση δοκιμών	rec.	rec. ΚΘΑ	bind.	bind. ΚΘΑ	<2 μήνες	<2 μήνες ΚΘΑ	6 μήνες	6 μήνες ΚΘΑ
M.O.	724.5	619.5	530.5	390.9	1166.3	819.4	12039	5387
t Stat	4.556		5.644		2.995		2.571	
t Critical	2.262		2.262		2.262		2.262	

Πίνακας Π5.3α: Σύγκριση τιμών E_{FWD} (AC) με εκτίμηση πάχους στρώσης ΚΘΑ (h_3) μέσω GPR και μέσω της διαδικασίας υπολογισμού του $min RMS$ (h_3 (minRMS))

Θέση πυρηνοληψίας	Φάση δοκιμών	E_{FWD} (AC) [MPa]		Δ [%]	RMS [%]
		h_3 (GPR)	h_3 (minRMS)		
Π1	rec.				
Π1α					
Π1	bind.	1090	1110	1.8	3.4
Π1α	(E_{FWD} (ισοπ))	1230	1130	-8.1	66.1
Π1	<2 μήνες	4250	4240	-0.2	0.1
Π1α		4790	4790	0.0	0.0
Π1	6 μήνες	7940	7930	-0.1	0.0
Π1α		10700	10700	0.0	0.0
Π1	1 έτος	3800	3780	-0.5	0.3
Π1α		6220	6210	-0.2	0.0
Π1: δεξιό ίχνος τροχών, Π1α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					3.0
Π2	rec.				
Π2α					
Π2	bind.	1260	1250	-0.8	0.6
Π2α	(E_{FWD} (ισοπ))	1530	1530	0.0	0.0
Π2	<2 μήνες	3570	3830	7.3	53.0
Π2α		3850	4470	16.1	259.3
Π2	6 μήνες	6120	7600	24.2	584.8
Π2α		6450	7560	17.2	296.2
Π2	1 έτος	5520	6110	10.7	114.2
Π2α		4340	5270	21.4	459.2
Π2: δεξιό ίχνος τροχών, Π2α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					14.9
Π3	rec.				
Π3α					
Π3	bind.	696	686	-1.4	2.1
Π3α	(E_{FWD} (ισοπ))	1310	1270	-3.1	9.3

Π3	<2 μήνες	4180	4130	-1.2	1.4
Π3α		4500	4440	-1.3	1.8
Π3	6 μήνες	6370	6370	0.0	0.0
Π3α		8300	8360	0.7	0.5
Π3	1 έτος	3370	3370	0.0	0.0
Π3α		8620	8710	1.0	1.1
Π3: δεξιό ίχνος τροχών, Π3α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					1.4

Π4	rec.				
Π4α					
Π4	bind.	1310	1260	-3.8	14.6
Π4α	(E_{FWD} (ισοπ))	2630	2560	-2.7	7.1
Π4	<2 μήνες	2950	2960	0.3	0.1
Π4α		4030	4030	0.0	0.0
Π4	6 μήνες	6610	6800	2.9	8.3
Π4α		4690	4790	2.1	4.5
Π4	1 έτος	3050	3100	1.6	2.7
Π4α		5010	5150	2.8	7.8
Π4: δεξιό ίχνος τροχών, Π4α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					2.4

Π5	rec.				
Π5α					
Π5	bind.	964	1060	10.0	99.2
Π5α	(E_{FWD} (ισοπ))	961	1090	13.4	180.2
Π5	<2 μήνες	5400	5430	0.6	0.3
Π5α		4680	4710	0.6	0.4
Π5	6 μήνες	6850	6760	-1.3	1.7
Π5α		6020	5970	-0.8	0.7
Π5	1 έτος	8270	8050	-2.7	7.1
Π5α		6450	6430	-0.3	0.1
Π5: δεξιό ίχνος τροχών, Π5α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					6.0

Πίνακας Π5.3β: Σύγκριση E_{FWD} (FA) με εκτίμηση πάχους στρώσης ΚΘΑ μέσω GPR και μέσω της διαδικασίας υπολογισμού του $min\ RMS$ (h_3 (minRMS))

Θέση πυρηνοληψίας	Φάση δοκιμών	E_{FWD} (FA) [MPa]		Δ [%]	RMS [%]
		h_3 (GPR)	h_3 (minRMS)		
Π1	rec.	911	928	1.9	3.5
Π1α		1090	1100	0.9	0.8
Π1	bind.	1510	1490	-1.3	1.8
Π1α		1400	1530	9.3	86.2
Π1	<2 μήνες	1490	1500	0.7	0.5
Π1α		1490	1500	0.7	0.5
Π1	6 μήνες	4080	4110	0.7	0.5
Π1α		3310	3330	0.6	0.4
Π1	1 έτος	8550	8730	2.1	4.4
Π1α		6340	6390	0.8	0.6
Π1: δεξιό ίχνος τροχών, Π1α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					3.1

Π2	<i>rec.</i>	453	449	-0.9	0.8
Π2α		516	511	-1.0	0.9
Π2	<i>bind.</i>	778	775	-0.4	0.1
Π2α		861	855	-0.7	0.5
Π2	<2 μήνες	1000	841	-15.9	252.8
Π2α		1070	793	-25.9	670.2
Π2	6 μήνες	18600	7950	-57.3	3278.5
Π2α		2960	2330	-21.3	453.0
Π2	1 έτος	8390	5970	-28.8	832.0
Π2α		13400	6180	-53.9	2903.1
Π2: δεξιό ίχνος τροχών, Π2α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					29.0

Π3	<i>rec.</i>	816	816	0.0	0.0
Π3α		417	417	0.0	0.0
Π3	<i>bind.</i>	1600	1630	1.9	3.5
Π3α		1360	1380	1.5	2.2
Π3	<2 μήνες	5170	5280	2.1	4.5
Π3α		4630	4720	1.9	3.8
Π3	6 μήνες	12800	12800	0.0	0.0
Π3α		6290	6290	0.0	0.0
Π3	1 έτος	12000	12000	0.0	0.0
Π3α		5560	5540	-0.4	0.1
Π3: δεξιό ίχνος τροχών, Π3α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					1.2

Π4	<i>rec.</i>	859	867	0.9	0.9
Π4α		473	484	2.3	5.4
Π4	<i>bind.</i>	820	839	2.3	5.4
Π4α		536	546	1.9	3.5
Π4	<2 μήνες	1930	1950	1.0	1.1
Π4α		1550	1560	0.6	0.4
Π4	6 μήνες	4930	4800	-2.6	7.0
Π4α		4670	4580	-1.9	3.7
Π4	1 έτος	8150	7920	-2.8	8.0
Π4α		4700	4560	-3.0	8.9
Π4: δεξιό ίχνος τροχών, Π4α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					2.1

Π5	<i>rec.</i>	538	529	-1.7	2.8
Π5α		680	673	-1.0	1.1
Π5	<i>bind.</i>	1480	1330	-10.1	102.7
Π5α		948	844	-11.0	120.4
Π5	<2 μήνες	5080	4950	-2.6	6.5
Π5α		2970	2890	-2.7	7.3
Π5	6 μήνες	14400	14700	2.1	4.3
Π5α		5700	5680	-0.4	0.1
Π5	1 έτος	4200	4320	2.9	8.2
Π5α		9340	9220	-1.3	1.7
Π5: δεξιό ίχνος τροχών, Π5α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					5.0

Πίνακας Π5.3γ: Σύγκριση E (comp) με εκτίμηση πάχους στρώσης ΚΘΑ μέσω GPR και μέσω της διαδικασίας υπολογισμού του $\min RMS$ (h_3 (minRMS))

Θέση πυρηνοληψίας	Φάση δοκιμών	E (comp) [MPa]		Δ [%]	RMS [%]
		h_3 (GPR)	h_3 (minRMS)		
Π1 Π1α	rec.				
Π1 Π1α	bind.	1360 1380	1360 1390	0.0 0.7	0.0 0.5
Π1 Π1α	<2 μήνες	2300 2410	2310 2420	0.4 0.4	0.2 0.2
Π1 Π1α	6 μήνες	5530 5440	5550 5450	0.4 0.2	0.1 0.0
Π1 Π1α	1 έτος	5530 6320	5550 6340	0.4 0.3	0.1 0.1
Π1: δεξιό ίχνος τροχών, Π1α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					0.4

Π2 Π2α	rec.				
Π2 Π2α	bind.	906 1030	903 1020	-0.3 -1.0	0.1 0.9
Π2 Π2α	<2 μήνες	1750 1890	1590 1650	-9.1 -12.7	83.6 161.2
Π2 Π2α	6 μήνες	10100 4240	7790 3880	-22.9 -8.5	523.1 72.1
Π2 Π2α	1 έτος	6720 6970	6060 5700	-9.8 -18.2	96.5 332.0
Π2: δεξιό ίχνος τροχών, Π2α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					12.6

Π3 Π3α	rec.				
Π3 Π3α	bind.	1280 1360	1290 1360	0.8 0.0	0.6 0.0
Π3 Π3α	<2 μήνες	4680 4500	4710 4520	0.6 0.4	0.4 0.2
Π3 Π3α	6 μήνες	9370 6990	9400 7010	0.3 0.3	0.1 0.1
Π3 Π3α	1 έτος	6400 6540	6410 6550	0.2 0.2	0.0 0.0
Π3: δεξιό ίχνος τροχών, Π3α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					0.4

Π4 Π4α	rec.				
Π4 Π4α	bind.	922 747	932 754	1.1 0.9	1.2 0.9
Π4 Π4α	<2 μήνες	2300 2250	2320 2270	0.9 0.9	0.8 0.8
Π4	6 μήνες	5600	5580	-0.4	0.1

Π4α		4690	4690	0.0	0.0
Π4	1 έτος	4860	4860	0.0	0.0
Π4α		4840	4820	-0.4	0.2
Π4: δεξιό ίχνος τροχών, Π4α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					0.7

Π5	rec.				
Π5α					
Π5	bind.	1270	1220	-3.9	15.5
Π5α		952	913	-4.1	16.8
Π5	<2 μήνες	5200	5160	-0.8	0.6
Π5α		3720	3680	-1.1	1.2
Π5	6 μήνες	9690	9690	0.0	0.0
Π5α		5870	5830	-0.7	0.5
Π5	1 έτος	5700	5730	0.5	0.3
Π5α		7670	7610	-0.8	0.6
Π5: δεξιό ίχνος τροχών, Π5α: ανάμεσα στα δύο ίχνη τροχών					2.1

Πίνακας Π5.4: Σύγκριση E_{FWD} (FA), με σταθερό E_{AC} , με εκτίμηση πάχους στρώσης ΚΘΑ μέσω GPR και μέσω υπολογισμού του $min\ RMS$ (h_3 (minRMS))

Θέση πυρηνοληψίας	Φάση δοκιμών	E _{FWD} (FA) (με E (AC) σταθ)		Δ [%]	RMS [%]
		h ₃ (GPR) & E _{AC} =σταθ.	h ₃ (minRMS) & E _{AC} =σταθ.		
Π1	<2 μήνες	1390	1400	0.7	0.5
Π3		4560	4600	0.9	0.8
Π1α		1730	1510	-12.7	161.7
Π3α		4280	4320	0.9	0.9
Π1	6 μήνες	5610	5640	0.5	0.3
Π3		13500	13500	0.0	0.0
Π1α		4890	4910	0.4	0.2
Π3α		7580	7610	0.4	0.2
Π1	1 έτος	9910	9950	0.4	0.2
Π3		10000	10200	2.0	4.0
Π1α		7500	7640	1.9	3.5
Π3α		8560	8580	0.2	0.1
Π1, Π3: δεξιό ίχνος τροχών, Π1α, Π3α: ανάμεσα στα δύο ίχνη					3.8

Πίνακας Π5.5α: Σύγκριση E_{FWD} (FA), με εκτίμηση πάχους στρώσης από ΚΘΑ μέσω GPR, με και χωρίς σταθερό E_{AC}

Θέση πυρηνοληψίας	Φάση δοκιμών	E _{FWD} (FA)		Δ [%]	RMS [%]
		(με E _{AC} σταθ)			
		h ₃ (GPR)	h ₃ (GPR) & E _{AC} =σταθ.		
Π1	<2 μήνες	1490	1390	-6.7	45.0
Π3		5170	4560	-11.8	139.2
Π1α		1490	1730	16.1	259.4
Π3α		4630	4280	-7.6	57.1
Π1	6 μήνες	4080	5610	37.5	1406.3
Π3		12800	13500	5.5	29.9
Π1α		3310	4890	47.7	2278.5
Π3α		6290	7580	20.5	420.6
Π1	1 έτος	8550	9910	15.9	253.0
Π3		12000	10000	-16.7	277.8
Π1α		6340	7500	18.3	334.8
Π3α		5560	8560	54.0	2911.3
Π1, Π3: δεξιό ίχνος τροχών, Π1α, Π3α: ανάμεσα στα δύο ίχνη					26.5

Πίνακας Π5.5β: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (FA), με εκτίμηση πάχους στρώσης από ΚΘΑ (h_3) μέσω GPR, με και χωρίς σταθερό E_{AC}

t-Test: Κατά ζεύγη		
	h_3 (GPR) & $E_{AC}=\text{σταθ.}$	h_3 (GPR)
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	6625.8	5975.8
t Stat	1.727929	
t Critical two-tail	2.200985	

Πίνακας Π5.6α: Σύγκριση E_{FWD} (FA, με εκτίμηση όλων των παχών από GPR (3), σε σχέση με διαδικασία αναφοράς (1) (h_1 , h_2 : πυρήνες, h_3 : GPR)

h ₃ (GPR)	h (GPR)				RMS
(1)	(3)	(3) / (1)	Δ [%]	Δ [%]	
E _{FWD} (FA) [MPa]					
1,490	1,470	0.99	-1.3	1.3	1.8
4,080	4,010	0.98	-1.7	1.7	2.9
12,200	12,000	0.98	-1.6	1.6	2.7
7,720	7,620	0.99	-1.3	1.3	1.7
1,490	1,480	0.99	-0.7	0.7	0.5
3,310	3,270	0.99	-1.2	1.2	1.5
6,340	6,240	0.98	-1.6	1.6	2.5
6,380	6,310	0.99	-1.1	1.1	1.2
5,170	7,020	1.36	35.8	35.8	1280.4
12,000	11,100	0.93	-7.5	7.5	56.3
12,200	12,900	1.06	5.7	5.7	32.9
4,630	4,000	0.86	-13.6	13.6	185.1
6,290	7,030	1.12	11.8	11.8	138.4
5,560	3,250	0.58	-41.5	41.5	1726.1
10,800	11,200	1.04	3.7	3.7	13.7
1,930	1,910	0.99	-1.0	1.0	1.1
4,930	4,970	1.01	0.8	0.8	0.7
8,150	8,400	1.03	3.1	3.1	9.4
8,730	8,560	0.98	-1.9	1.9	3.8
1,550	1,520	0.98	-1.9	1.9	3.7
4,670	4,730	1.01	1.3	1.3	1.7
4,700	4,810	1.02	2.3	2.3	5.5
8,630	8,740	1.01	1.3	1.3	1.6
5,080	5,020	0.99	-1.2	1.2	1.4
14,400	14,900	1.03	3.5	3.5	12.1
4,200	4,250	1.01	1.2	1.2	1.4
6,230	6,250	1.00	0.3	0.3	0.1
2,970	2,650	0.89	-10.8	10.8	116.1
5,700	5,340	0.94	-6.3	6.3	39.9
9,340	8,630	0.92	-7.6	7.6	57.8
7,440	7,540	1.01	1.3	1.3	1.8
5,7					10.9

Πίνακας Π5.6β: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (FA, με εκτίμηση όλων των παχών από GPR (h (GPR))), σε σχέση με διαδικασία αναφοράς h_3 (GPR) (h_1, h_2 : πυρήνες, h_3 : GPR)

t-Test: Κατά ζεύγη		
	h_3 (GPR)	h (GPR)
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	6397.1	6358.7
t Stat	0.333601	
t Critical	2.042272	

Πίνακας Π5.7α: E_{FWD} (FA), με εκτίμηση όλων των παχών από GPR (h (GPR)), σε σχέση με διαδικασία αναφοράς h_3 (GPR) (h_1, h_2 : πυρήνες, h_3 : GPR)

h_3 (GPR)	h (GPR)	h (GPR) / h_3 (GPR)	Δ [%]	$ \Delta $ [%]	RMS
E(FA) [MPa]					
578	572	0.99	-1.0	1.0	1.1
748	703	0.94	-6.0	6.0	36.2
564	617	1.09	9.4	9.4	88.3
554	556	1.00	0.4	0.4	0.1
517	514	0.99	-0.6	0.6	0.3
598	629	1.05	5.2	5.2	26.9
678	762	1.12	12.4	12.4	153.5
691	770	1.11	11.4	11.4	130.7
621	599	0.96	-3.5	3.5	12.6
638	617	0.97	-3.3	3.3	10.8
703	690	0.98	-1.8	1.8	3.4
1150	1020	0.89	-11.3	11.3	127.8
703	690	0.98	-1.8	1.8	3.4
813	777	0.96	-4.4	4.4	19.6
720	690	0.96	-4.2	4.2	17.4
719	715	0.99	-0.6	0.6	0.3
624	656	1.05	5.1	5.1	26.3
1060	1030	0.97	-2.8	2.8	8.0
549	535	0.97	-2.6	2.6	6.5
722	723	1.00	0.1	0.1	0.0
785	694	0.88	-11.6	11.6	134.4
1260	1450	1.15	15.1	15.1	227.4
843	962	1.14	14.1	14.1	199.3
978	1010	1.03	3.3	3.3	10.7
922	941	1.02	2.1	2.1	4.2

828	839	1.01	1.3	1.3	1.8
1150	1030	0.90	-10.4	10.4	108.9
1700	1500	0.88	-11.8	11.8	138.4
744	753	1.01	1.2	1.2	1.5
695	695	1.00	0.0	0.0	0.0
981	887	0.90	-9.6	9.6	91.8
2300	2050	0.89	-10.9	10.9	118.1
1570	1540	0.98	-1.9	1.9	3.7
1370	1290	0.94	-5.8	5.8	34.1
1460	1570	1.08	7.5	7.5	56.8
1680	1610	0.96	-4.2	4.2	17.4
1810	1840	1.02	1.7	1.7	2.7
1500	1680	1.12	12.0	12.0	144.0
1520	1310	0.86	-13.8	13.8	190.9
1400	1270	0.91	-9.3	9.3	86.2
2890	2580	0.89	-10.7	10.7	115.1
4650	5080	1.09	9.2	9.2	85.5
2680	2630	0.98	-1.9	1.9	3.5
4800	4580	0.95	-4.6	4.6	21.0
4150	4290	1.03	3.4	3.4	11.4
1110	1270	1.14	14.4	14.4	207.8
1020	1000	0.98	-2.0	2.0	3.8
2470	2590	1.05	4.9	4.9	23.6
2370	1980	0.84	-16.5	16.5	270.8
2060	2300	1.12	11.7	11.7	135.7
6.3					7.0

Πίνακας Π5.7β: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (FA), με εκτίμηση όλων των παχών από GPR h (GPR), σε σχέση με διαδικασία αναφοράς h_3 (GPR) (h_1 , h_2 : πυρήνες, h_3 : GPR)

t-Test: Κατά ζεύγη		
	h_3 (GPR)	h (GPR)
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	1352.9	1341.7
t Stat	0.571356	
t Critical two-tail	2.009575	

Π6. Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος

Πίνακας Π6.1α: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
Rec.	1016	505	910	958	600	798	229	28.8
Bind.	1538	792	1629	835	1507	1260	410	32.6
<2 μήνες	1545	1037	5154	2002	5268	3001	2046	68.2
6 μήνες	3464	15791	9763	4185	12225	9086	5265	58.0
1 έτος	8245	8090	11378	7859	4050	7924	2602	32.8
2 έτη	6092	5120	9119	6526	4657	6303	1742	27.6

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.1β: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
Rec.	1216	576	465	528	758	708	304	42.9
Bind.	1426	877	1385	546	965	1040	369	35.5
<2 μήνες	1545	1110	4802	1607	3080	2429	1521	62.6
6 μήνες	2862	2559	5438	4038	4928	3965	1255	31.6
1 έτος	5789	12235	5077	4291	8528	7184	3243	45.1
2 έτη	4856	4872	8221	6569	5663	6036	1409	23.3

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.2α: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
<i>Rec.</i>								
<i>Bind.</i>	1575	1820	1005	1892	1393	1537	358	23.3
<2 μήνες	5784	4859	6016	4015	7350	5605	1258	22.4
6 μήνες	7790	6004	6318	6485	6720	6663	681	10.2
1 έτος	4428	6432	3892	3554	9637	5588	2523	45.1
2 έτη	8708	11806	8457	8139	11806	9783	1858	19.0

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.2β: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
<i>Rec.</i>								
<i>Bind.</i>	1777	2210	1892	3799	1388	2213	934	42.2
<2 μήνες	6519	5240	6125	5485	6370	5948	559	9.4
6 μήνες	10700	6450	8300	4690	6020	7232	2330	32.2
1 έτος	7110	4961	9854	5727	7373	7005	1876	26.8
2 έτη	11572	9858	10286	5306	8323	9069	2402	26.5

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.3α: Τιμές $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
<i>Rec.</i>								
<i>Bind.</i>								
<2 μήνες	2385	1815	4853	2385	5393	3366	1632	48.5
6 μήνες	4695	8575	7590	4754	8227	6768	1899	28.1
1 έτος	5332	6480	6094	4686	5496	5618	695	12.4
2 έτη	6847	7168	8372	6832	6705	7185	685	9.5

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ημιακάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.3β: Τιμές $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
<i>Rec.</i>								
<i>Bind.</i>								
<2 μήνες	2499	1960	4667	2333	3858	3063	1148	37.5
6 μήνες	4703	3666	6043	4055	5075	4708	926	19.7
1 έτος	5771	6364	5971	4419	7003	5906	955	16.2
2 έτη	6554	6432	8449	5625	6470	6706	1044	15.6

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ημιακάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) (*)** από Πίνακα 5.3 (υποκεφάλαιο 5.2.2). **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π6.4α: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	M1	M2	M3	M4	M5			
Rec._1	578	748	564	554	517	592	90	15.2
Rec._2	703	1150	703	813	720	818	191	23.4
Bind.	669	1074	718	833	786	816	157	19.3
<2 μήνες	889	2197	1408	1354	1426	1454	470	32.3
16 μήνες	2976	4677	2779	4895	4304	3926	983	25.0
18 μήνες	2726	3343	4744	3085	5644	3908	1236	31.6
2 έτη	1757	3461	3380	4904	6160	3932	1671	42.5

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1:** μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2:** 2 ημέρες μετά την ανακύκλωση

Πίνακας Π6.4β: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	M1α	M2α	M3α	M4α	M5α			
Rec._1	598	678	691	621	638	645	39	6.0
Rec._2	719	624	1060	549	722	735	196	26.6
Bind.	708	988	1463	648	607	883	357	40.4
<2 μήνες	1487	1651	1297	1366	1210	1402	172	12.3
16 μήνες	1238	1138	2755	2643	2298	2014	774	38.4
18 μήνες	1383	1158	3987	3280	5700	3101	1891	61.0
2 έτη	1581	974	3009	2362	3722	2330	1095	47.0

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1:** μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2:** δύο ημέρες μετά την ανακύκλωση

Πίνακας Π6.5α: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	M1	M2	M3	M4	M5			
Rec._1 Rec._2								
Bind.	10241	7856	10786	11458	6951	9459	1951	20.6
<2 μήνες	7015	6492	6443	12867	8420	8247	2703	32.8
16 μήνες	4655	5365	6140	5307	4953	5284	558	10.6
18 μήνες	3213	8418	5191	15359	3256	7087	5086	71.8
2 έτη	6006	6699	7170	6795	4841	6302	919	14.6

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC)**: ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1**: μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2**: δύο ημέρες μετά την ανακύκλωση

Πίνακας Π6.5β: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	M1α	M2α	M3α	M4α	M5α			
Rec._1 Rec._2								
Bind.	7337	5247	2299	7434	4620	5387	2129	39.5
<2 μήνες	5854	5700	5221	6995	5049	5764	764	13.3
16 μήνες	3939	4245	1465	3080	3722	3290	1106	33.6
18 μήνες	4574	4605	5937	8829	5541	5897	1742	29.5
2 έτη	3667	3512	2254	4395	3190	3404	779	22.9

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC)**: ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1**: μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2**: δύο ημέρες μετά την ανακύκλωση

Πίνακας Π6.6α: Τιμές $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Μ1	Μ2	Μ3	Μ4	Μ5			
<i>Rec._1</i>								
<i>Rec._2</i>								
<i>Bind.</i>								
<2 μήνες	1824	4219	2525	3000	2870	2888	873	30.2
16 μήνες	3345	4614	3549	4721	4399	4126	634	15.4
18 μήνες	2923	5559	4961	5133	4552	4625	1018	22.0
2 έτη	2584	4775	4374	5414	5369	4503	1157	25.7

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ευκάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1**: μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2**: δύο ημέρες μετά την ανακύκλωση

Πίνακας Π6.6β: Τιμές $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυρηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Μ1α	Μ2α	Μ3α	Μ4α	Μ5α			
<i>Rec._1</i>								
<i>Rec._2</i>								
<i>Bind.</i>								
<2 μήνες	2165	2530	2055	2275	1919	2189	232	10.6
16 μήνες	1793	1874	1862	2695	2660	2177	458	21.1
18 μήνες	2071	2161	9169	4724	5804	4786	2937	61.4
2 έτη	2092	1797	2573	2897	3437	2559	649	25.4

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ευκάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι

υπολογισμοί). **2) (*)** από Πίνακα 5.5 (υποκεφάλαιο 5.2.3). **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας. **7) Rec._1:** μία ημέρα μετά την ανακύκλωση. **8) Rec._2:** δύο ημέρες μετά την ανακύκλωση

Χρονική εξέλιξη μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης $E_{FWD}(FA)$

$$E_{FWD}(FA) = \alpha_2 * t^{\beta_2} \quad (5.12)$$

Όπου,

$E_{FWD}(FA)$: μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης

t : χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

α_2, β_2 : συντελεστές (από Πίνακα Π6.7)

Πίνακας Π6.7: Τιμές συντελεστών α_2 και β_2

Πιλοτικό τμήμα	Ίχνος τροχών	$E_{FWD}(FA)$	α_2	β_2	R^2	Τύπος οδοστρώματος
ΚΑ1	Δ	max	4124.5	0.4291	0.86	Ημιάκαμπτο (*)
		M.O.	2820.1	0.4034	0.90	
		min	1471.7	0.3954	0.98	
ΚΑ1α	Av	max	3496.2	0.3678	0.88	
		M.O.	2213.6	0.387	0.96	
		min	1317.2	0.4256	0.99	
ΛΑ1	Δ	max	2248.3	0.3056	0.96	Εύκαμπτο (**)
		M.O.	1620.6	0.2942	0.99	
		min	1141.1	0.2336	0.91	
ΛΑ1α	Av	max	1902.2	0.2434	0.90	
		M.O.	1335.9	0.208	0.95	
		min	838.73	0.1017	0.68	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμή στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Av:** δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.3

Χρονική εξέλιξη σύνθετου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης E (comp)

$$E (comp) = \alpha_3 * t^{\beta_3} \quad (5.13)$$

Όπου,

E (comp): σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης

t: χρόνος από κατασκευή (ανακύκλωση) (μήνες)

α_3, β_3 : συντελεστές (από Πίνακα Π6.8)

Πίνακας Π6.8: Τιμές συντελεστών α_3 και β_3

Πιλοτικό τμήμα	Ίχνος τροχών	E (comp)	α_3	β_3	R^2	Τύπος οδοστρώματος
ΚΑ1	Δ	max	5840.5	0.1096	0.55	Ημιάκαμπτο (*)
		M.O.	3817.1	0.2091	0.82	
		min	2124.8	0.3673	0.96	
ΚΑ1α	Av	max	4791.8	0.1644	0.96	
		M.O.	3270.7	0.2293	0.99	
		min	2155.8	0.3013	0.99	
ΛΑ1	Δ	max	4312.4	0.0647	0.74	Εύκαμπτο (**)
		M.O.	3042.8	0.1249	0.96	
		min	1971.9	0.131	0.74	
ΛΑ1α	Av	max	2738.4	0.1575	0.21	
		M.O.	2288.8	0.0887	0.17	
		min	1918.7	-0.0067	0.03	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμή στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν:** δοκιμή ανάμεσα στα δύο ίχνη. **3) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **4) (**)** υποκεφάλαιο 5.2.3

Π7. Κρίσιμα εντατικά μεγέθη

Πίνακας Π7.1: Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση ε_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης
(στοιχεία από μελέτη οδοστρώματος)

Σχετική απόσταση από διεπιφάνεια με ασφαλτικές στρώσεις	ε_r [μ strain]	
	Ημιάκαμπτο	Εύκαμπτο
0	19.5	88.9
1/4	42.6	99.0
2/4	49.3	93.5
3/4	61.8	100.4
1	93.4	136.3
max	93.4	136.3

Πίνακας Π7.2: Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση ε_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης
(στοιχεία από επιτόπου δοκιμές <2 μήνες μετά την κατασκευή)

Σχετική απόσταση από διεπιφάνεια με ασφαλτικές στρώσεις	ε_r [μ strain]				
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)				
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5
0	93.7	133.2	21.1	78.7	24.9
1/4	81.2	109.3	26.4	70.6	23.0
2/4	58.6	78.6	20.8	51.9	18.3
3/4	31.5	45.8	14.0	34.6	14.1
1	-7.5	2.1	5.9	16.2	10.9
max	93.7	133.2	26.4	78.7	24.9
Διαφορά από μελέτη [%]	0.3	42.6	-71.8	-15.8	-73.4
Σχετική απόσταση από διεπιφάνεια με ασφαλτικές στρώσεις	ε_r [μ strain]				
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Εύκαμπτο οδόστρωμα)				
	M1	M2	M3	M4	M5
0	133.3	59.4	88.9	86.8	91.0
1/4	118.9	51.9	81.0	79.4	79.0
2/4	103.9	49.8	68.8	73.9	66.5
3/4	108.2	56.9	67.3	81.4	61.7
1	147.0	78.5	84.3	112.0	69.0
max	147.0	78.5	88.9	112.0	91.0
Διαφορά από μελέτη [%]	7.9	-42.4	-34.8	-17.8	-33.2

Πίνακας Π7.3: Οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση ε_r στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης
(στοιχεία από επιτόπου δοκιμές >1έτος μετά την κατασκευή)

Σχετική απόσταση από διεπιφάνεια με ασφαλτικές στρώσεις	ε_r [μstrain]				
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)				
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5
0	2.9	15.1	3.5	11.6	18.6
1/4	7.7	14.8	9.3	15.1	17.0
2/4	8.3	12.1	8.4	12.4	12.9
3/4	8.6	10.0	6.5	9.7	8.6
1	9.7	8.8	4.5	7.5	3.5
max	9.7	15.1	9.3	15.1	18.6
Διαφορά από μελέτη [%]	-89.6	-83.9	-90.0	-83.8	-80.1
Σχετική απόσταση από διεπιφάνεια με ασφαλτικές στρώσεις	ε_r [μstrain]				
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Εύκαμπτο οδόστρωμα)				
	M1	M2	M3	M4	M5
0	37.8	26.2	48.0	13.4	18.9
1/4	48.0	27.4	50.6	25.8	25.8
2/4	49.1	29.6	45.3	30.5	26.1
3/4	60.5	37.2	49.6	40.9	30.0
1	95.5	55.4	66.0	66.3	43.4
max	95.5	55.4	66.0	66.3	43.4
Διαφορά από μελέτη [%]	-29.9	-59.4	-51.6	-51.4	-68.1

Π8. Λόγος φθοράς στο «σώμα» του ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Πίνακας Π8.1: Λόγος φθοράς d_{ratio} στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή «σχέσεων μεταφοράς» των τεχνικών οδηγιών TG2

	Θέσεις πυρηνοληψίας (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο.	διάμεσος
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	2.22	3.06	1.18	1.83	1.06	1.87	1.83
d_{ratio} (pre-cure/design)	1.00	1.46	0.53	0.87	0.52	0.88	0.87
d_{ratio} (post-cure/design)	0.45	0.48	0.45	0.48	0.49	0.47	0.48
d_{ratio} (design/pre-cure)	1.00	0.69	1.89	1.15	1.91	1.33	1.15
d_{ratio} (design/post-cure)	2.21	2.10	2.22	2.10	2.03	2.13	2.10
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Εύκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο.	διάμεσος
	M1	M2	M3	M4	M5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	1.63	1.25	1.24	1.54	1.57	1.45	1.54
d_{ratio} (pre-cure/design)	1.11	0.58	0.64	0.79	0.65	0.75	0.65
d_{ratio} (post-cure/design)	0.68	0.46	0.51	0.51	0.41	0.52	0.51
d_{ratio} (design/pre-cure)	0.90	1.73	1.57	1.26	1.54	1.40	1.54
d_{ratio} (design/post-cure)	1.47	2.15	1.95	1.94	2.41	1.99	1.95

Πίνακας Π8.2: Λόγος φθοράς d_{ratio} στο «σώμα» της κατεργασμένης στρώσης με εφαρμογή εργαστηριακού «νόμου κόπωσης»

	Θέσεις πυρηνοληψίας (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο.	διάμεσος
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	3377	2510	42	375	2.8	1261	375
d_{ratio} (pre-cure/design)	1.01	3.58	0.01	0.54	0.01	1.03	0.54
d_{ratio} (design/pre-cure)	0.99	0.28	93.70	1.85	115.13	42.39	1.85
d_{ratio} (design/post-cure)	3342	702	3917	695	327	1797	702
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Εύκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο.	διάμεσος
	M1	M2	M3	M4	M5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	4.70	3.50	2.91	6.58	14.23	6.38	4.70
d_{ratio} (pre-cure/design)	1.31	0.14	0.22	0.49	0.23	0.48	0.23
d_{ratio} (post-cure/design)	0.28	0.04	0.07	0.08	0.02	0.10	0.07
d_{ratio} (design/pre-cure)	0.76	7.24	4.64	2.02	4.26	3.79	4.26
d_{ratio} (design/post-cure)	3.58	25.35	13.50	13.32	60.65	23.28	13.50

Πίνακας Π8.3: Λόγος φθοράς d_{ratio} στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων με εφαρμογή εργαστηριακού «νόμου κόπωσης»

	Θέσεις πυρηνοληψίας (Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο. διάμεσος	
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	2.E+07	37567	6187	10512	4.0	4.E+06	10512
d_{ratio} (pre-cure/design)	1957	10721	1.5	842	3.2	2705	842
d_{ratio} (design/post-cure)	10171	3.5	4208	12.5	1.3	2879	12.5
	Θέσεις πυρηνοληψίας (Εύκαμπτο οδόστρωμα)					Μ.Ο. διάμεσος	
	M1	M2	M3	M4	M5		
d_{ratio} (pre-cure/post-cure)	440	53	19.6	8326	1990	2166	440
d_{ratio} (pre-cure/design)	7.09	0.14	1.00	0.89	1.12	2.05	1.00
d_{ratio} (design/post-cure)	62	368	19.6	9314	1773	2308	368

Π9. Δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

Πίνακας Π9.1. Μέσος όρος τιμών D_0 και SCI

Φάση δοκιμών (*)	D_0 (μm)							
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (*)							
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2	max	min
1 έτος	54.1	57.7	61.5	44.5	83.7	69.9	83.7	44.5
2 έτη	47.0	54.7	57.1	44.0			57.1	44.0
3 έτη	54.7	57.8	59.4	44.9	52.9	59.1	59.4	44.9
4 έτη	51.6	58.9	61.9	48.3	50.5	62.0	62.0	48.3
5 έτη	50.4	52.9	58.6	42.7	50.6	57.6	58.6	42.7
6 έτη	48.4	53.4	53.8	40.7	46.4	53.6	53.8	40.7
Φάση δοκιμών (*)	SCI (μm)							
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (*)							
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2	max	min
1 έτος	17.6	16.9	12.9	12.6	24.5	23.9	24.5	12.6
2 έτη	12.9	14.1	11.8	12.6			14.1	11.8
3 έτη	18.6	15.5	12.5	14.4	20.3	19.3	20.3	12.5
4 έτη	14.4	15.4	12.5	15.5	17.5	20.2	20.2	12.5
5 έτη	14.6	12.7	11.9	12.8	18.7	18.6	18.7	11.9
6 έτη	14.7	13.6	9.9	11.8	16.4	16.2	16.4	9.9

Υποσημείωση: (*) υποκεφάλαιο 5.2.2

Πίνακας Π9.2. Συντελεστής μεταβλητότητας D_0 και SCI

Φάση δοκιμών (*)	Σ.Μετ. D_0 (%)					
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (*)					
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2
1 έτος	15.8	11.9	19.1	24.8	30.5	20.1
2 έτη	16.7	12.2	15.9	31.4		
3 έτη	16.2	10.4	16.8	26.0	25.1	19.0
4 έτη	23.3	14.8	15.7	21.6	21.3	15.4
5 έτη	25.7	13.9	14.9	25.6	20.5	16.0
6 έτη	25.0	11.3	15.3	24.0	20.0	16.5
Φάση δοκιμών (*)	Σ.Μετ. SCI (%)					
	Κωδικός πιλοτικού τμήματος (*)					
	KA1	KA2	KA3	KA4	AK1	AK2
1 έτος	14.8	16.3	27.8	29.5	29.5	32.8
2 έτη	14.3	16.3	29.3	33.9		
3 έτη	11.1	10.8	24.7	25.7	25.8	31.7
4 έτη	22.8	20.8	18.5	25.2	19.8	19.8
5 έτη	24.4	25.9	30.9	41.5	29.3	23.8
6 έτη	22.2	15.8	25.5	23.3	19.9	22.8

Υποσημείωση: (*) υποκεφάλαιο 5.2.2

Π10. Αποτελέσματα ανάστροφων υπολογισμών μετά την «ωρίμανση» του κατεργασμένου υλικού

Πίνακας Π10.1α: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
1 έτος	8245	8090	11378	7859	4050	7924	2602	32.8
2 έτη	6092	5120	9119	6526	4657	6303	1742	27.6
3 έτη	7101	8604	9612	8372	8604	8459	898	10.6
4 έτη	5811	6306	5676	6108	5330	5846	380	6.5
5 έτη	4677	7061	10421	6086	7712	7191	2137	29.7
6 έτη	5782	9848	9084	8278	8999	8398	1565	18.6
7 έτη	5869	9170	10421	7253	9254	8394	1812	21.6

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.1β: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
1 έτος	5789	12235	5077	4291	8528	7184	3243	45.1
2 έτη	4856	4872	8221	6569	5663	6036	1409	23.3
3 έτη	3899	8361	8682	6954	10290	7637	2403	31.5
4 έτη	4473	5829	5620	4884	6341	5429	748	13.8
5 έτη	2622	7876	7373	7364	7587	6565	2214	33.7
6 έτη	4207	8289	8818	5459	9825	7319	2378	32.5
7 έτη	1790	6666	6251	7012	9597	6263	2822	45.1

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.1γ: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Δ	A_v
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	7502.2	6633.4
t Stat	2.346168	
t Critical	2.032244	

Υποσημείωση: **1) Δ :** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) A_v :** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.1δ: Στατιστική σύγκριση διαφορών E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Δ	A_v
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	7502.2	6633.4
t Stat	-0.00054	
t Critical	2.032244	

Υποσημείωση: **1) Δ :** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) A_v :** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.1ε: Τιμές E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη
(Ημιάκαμπτο οδόστρωμα)

Δ	A_v
8245	5789
6092	4856
7101	3899
5811	4473
4677	2622
5782	4207
5869	1790
8090	12235
5120	4872
8604	8361
6306	5829
7061	7876
9848	8289
9170	6666
11378	5077
9119	8221
9612	8682
5676	5620
10421	7373
9084	8818
10421	6251
7859	4291
6526	6569
8372	6954
6108	4884
6086	7364
8278	5459
7253	7012
4050	8528
4657	5663
8604	10290
5330	6341
7712	7587
8999	9825
9254	9597

Υποσημείωση: **1) Δ :** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) A_v :** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.2α: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
<2 μήνες	5784	4859	6016	4015	7350	5605	1258	22.4
6 μήνες	7790	6004	6318	6485	6720	6663	681	10.2
1 έτος	4428	6432	3892	3554	9637	5588	2523	45.1
2 έτη	8708	11806	8457	8139	11806	9783	1858	19.0
3 έτη	4192	5703	4079	3814	3475	4253	856	20.1
4 έτη	6384	13658	13900	9132	5479	9711	3951	40.7
5 έτη	6874	9880	5899	5920	5260	6767	1833	27.1
6 έτη	5505	6099	9310	4863	6534	6462	1712	26.5
7 έτη	4543	5188	7180	5390	6055	5671	1001	17.7

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.2β: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
<2 μήνες	6519	5240	6125	5485	6370	5948	559	9.4
6 μήνες	10700	6450	8300	4690	6020	7232	2330	32.2
1 έτος	7110	4961	9854	5727	7373	7005	1876	26.8
2 έτη	11572	9858	10286	5306	8323	9069	2402	26.5
3 έτη	5366	4591	4474	1756	3375	3912	1399	35.8
4 έτη	6755	7038	12087	6146	5203	7446	2688	36.1
5 έτη	5526	6487	10513	7372	6498	7279	1922	26.4
6 έτη	7747	8279	8624	9520	7738	8382	739	8.8
7 έτη	6417	5915	4659	4824	5359	5435	738	13.6

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.2γ: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (AC) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Αν	Δ
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	6856.4	6722.5
t Stat	0.372537	
t Critical two-tail	2.032244	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν:** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.3α: Τιμές E (comp) [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1	Π2	Π3	Π4	Π5			
1 έτος	5332	6480	6094	4686	5496	5618	695	12.4
2 έτη	6847	7168	8372	6832	6705	7185	685	9.5
3 έτη	4845	6147	5891	5031	4550	5293	691	13.1
4 έτη	5733	8564	7432	6837	5061	6725	1383	20.6
5 έτη	5152	7561	7420	5119	5702	6191	1210	19.5
6 έτη	5391	7123	8745	6087	7208	6911	1273	18.4
7 έτη	4810	6128	8337	5894	6698	6373	1294	20.3

Υποσημείωση: **1) E (comp):** σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ημιακάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.3β: Τιμές $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΚΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Π1α	Π2α	Π3α	Π4α	Π5α			
1 έτος	5771	6364	5971	4419	7003	5906	955	16.2
2 έτη	6554	6432	8449	5625	6470	6706	1044	15.6
3 έτη	4148	5306	5860	2725	4582	4524	1202	26.6
4 έτη	5209	6093	7101	5178	5418	5800	815	14.1
5 έτη	3412	6546	7866	6890	6462	6235	1674	26.8
6 έτη	5316	7827	8322	6575	8171	7242	1277	17.6
7 έτη	2853	5646	5084	5326	6138	5009	1268	25.3

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ημιακάμπτου οδοστρώματος (ανάστροφοι υπολογισμοί). **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.2. **3) (**)** Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.3γ: Στατιστική σύγκριση $E (comp)$ στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Αν	Δ
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Μ.Ο.	6328	5917.6
t Stat	2.24446	
t Critical	2.032244	

Υποσημείωση: **1) Δ**: δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν**: δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.3δ: Στατιστική σύγκριση διαφορών $E (comp)$ στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Αν	Δ
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Μ.Ο.	6328	5917.6
t Stat	0.002398	
t Critical	2.032244	

Υποσημείωση: **1) Δ**: δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν**: δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.4α: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Μ1	Μ2	Μ3	Μ4	Μ5			
16 μήνες	2976	4677	2779	4895	4304	3926	983	25.0
18 μήνες	2726	3343	4744	3085	5644	3908	1236	31.6
26 μήνες (2 έτη)	1757	3461	3380	4904	6160	3932	1671	42.5
33 μήνες	1596	3264	4427	3141	5635	3613	1514	41.9
44 μήνες	1693	3716	5474	3360	5920	4033	1708	42.3
56 μήνες	1053	4107	5140	3166	6575	4008	2081	51.9
61 μήνες	992	3875	8460	2779	10016	5224	3845	73.6
62 μήνες	1211	5322	9426	4417	8242	5724	3251	56.8

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.4β: Τιμές E_{FWD} (FA) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Μ1α	Μ2α	Μ3α	Μ4α	Μ5α			
16 μήνες	1238	1138	2755	2643	2298	2014	774	38.4
18 μήνες	1383	1158	3987	3280	5700	3101	1891	61.0
26 μήνες (2 έτη)	1581	974	3009	2362	3722	2330	1095	47.0
33 μήνες	1256	1525	8521	2938	5688	3986	3085	77.4
44 μήνες	974	1428	5791	3317	4357	3173	2010	63.3
56 μήνες	1208	1344	4239	3108	3503	2681	1346	50.2
61 μήνες	1331	1226	2424	9546	2719	3449	3471	100.6
62 μήνες	1240	1166	2610	6419	2726	2832	2135	75.4

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (FA):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης κατεργασμένης στρώσης ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)**

αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.4γ: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Δ	Av
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	4296	2945.8
t Stat	3.278427	
t Critical	2.022691	

Υποσημείωση: **1) Δ :** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Av:** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.4δ: Στατιστική σύγκριση διαφορών E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Δ	Av
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	4296	2945.8
t Stat	0.000479	
t Critical	2.022691	

Υποσημείωση: **1) Δ :** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Av:** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.4ε: Τιμές E_{FWD} (FA) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη
(Εύκαμπτο οδόστρωμα)

Δ	Av
2976	1238
2726	1383
1757	1581
1596	1256
1693	974
1053	1208
992	1331
1211	1240
4677	1138
3343	1158
3461	974
3264	1525
3716	1428
4107	1344
3875	1226
5322	1166
2779	2755
4744	3987
3380	3009
4427	8521
5474	5791
5140	4239
8460	2424
9426	2610
4895	2643
3085	3280
4904	2362
3141	2938
3360	3317
3166	3108
2779	9546
4417	6419
4304	2298
5644	5700
6160	3722

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Av:** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.5α: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Μ1	Μ2	Μ3	Μ4	Μ5			
<2 μήνες	7015	6492	6443	12867	8420	8247	2703	32.8
16 μήνες	4655	5365	6140	5307	4953	5284	558	10.6
18 μήνες	3213	8418	5191	15359	3256	7087	5086	71.8
26 μήνες (2 έτη)	6006	6699	7170	6795	4841	6302	919	14.6
33 μήνες	11644	9001	18254	14099	11078	12815	3541	27.6
44 μήνες	4548	8309	10155	8924	7878	7963	2093	26.3
56 μήνες	5052	9954	12013	8719	4161	7980	3311	41.5
61 μήνες	4854	5527	3478	4421	5998	4856	980	20.2
62 μήνες	4551	6748	5506	10436	6180	6684	2252	33.7

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC):** ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.:** μέσος όρος. **5) Τ.Α.:** τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.:** συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.5β: Τιμές E_{FWD} (AC) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α,	Σ.Μετ.
	Μ1α	Μ2α	Μ3α	Μ4α	Μ5α			
<2 μήνες	5854	5700	5221	6995	5049	5764	764	13.3
16 μήνες	3939	4245	1465	3080	3722	3290	1106	33.6
18 μήνες	4574	4605	5937	8829	5541	5897	1742	29.5
26 μήνες (2 έτη)	3667	3512	2254	4395	3190	3404	779	22.9
33 μήνες	5732	6028	6592	7661	6196	6442	749	11.6
44 μήνες	6156	6972	7366	4979	9208	6936	1564	22.6

56 μήνες	5953	9501	11763	4789	6528	7707	2857	37.1
61 μήνες	2609	3198	2240	4407	2225	2936	912	31.1
62 μήνες	3739	6289	6341	7630	5325	5865	1443	24.6

Υποσημείωση: **1) E_{FWD} (AC)**: ανάστροφα υπολογισμένο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.5γ: Στατιστική σύγκριση E_{FWD} (AC) στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Δ	Av
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	6800.4	5224.8
t Stat	4.622998	
t Critical two-tail	2.022691	

Υποσημείωση: **1) Δ** : δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Av**: δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.6α: Τιμές E (comp) [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, δεξιό ίχνος τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	M1	M2	M3	M4	M5			
16 μήνες	3345	4614	3549	4721	4399	4126	634	15.4
18 μήνες	2923	5559	4961	5133	4552	4625	1018	22.0
26 μήνες (2 έτη)	2584	4775	4374	5414	5369	4503	1157	25.7
33 μήνες	2966	5267	6979	5015	7496	5545	1794	32.4
44 μήνες	2495	5474	6979	4692	6656	5259	1797	34.2
56 μήνες	1702	6441	6836	4644	5415	5008	2038	40.7
61 μήνες	1571	4312	5352	3189	8496	4584	2598	56.7
62 μήνες	1790	6045	7583	5786	7216	5684	2306	40.6

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.6β: $E (comp)$ [MPa], 25°C (τμήμα ΛΑ1, ανάμεσα στα ίχνη τροχών)

Φάση δοκιμών (*)	Θέση πυτηνοληψίας (**)					Μ.Ο.	Τ.Α.	Σ.Μετ.
	Μ1α	Μ2α	Μ3α	Μ4α	Μ5α			
16 μήνες	1793	1874	1862	2695	2660	2177	458	21.1
18 μήνες	2071	2161	9169	4724	5804	4786	2937	61.4
26 μήνες (2 έτη)	2092	1797	2573	2897	3437	2559	649	25.4
33 μήνες	2190	3027	7923	4089	6114	4669	2338	50.1
44 μήνες	1836	2962	6371	3863	5587	4124	1860	45.1
56 μήνες	2068	3438	6210	3690	4362	3954	1513	38.3
61 μήνες	1647	1844	2220	6480	2386	2915	2014	69.1
62 μήνες	1799	2708	3653	6819	3619	3720	1893	50.9

Υποσημείωση: **1) E (comp)**: σύνθετο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης (ασφαλτικών στρώσεων και κατεργασμένης στρώσης) ευκάμπτου οδοστρώματος. **2) (*)** υποκεφάλαιο 5.2.3. **3) (**)** αντίστοιχα με Σχήμα 5.12 (υποκεφάλαιο 5.3.1). **4) Μ.Ο.**: μέσος όρος. **5) Τ.Α.**: τυπική απόκλιση. **6) Σ.Μετ.**: συντελεστής μεταβλητότητας

Πίνακας Π10.6γ: Στατιστική σύγκριση $E (comp)$ στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Αν	Δ
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Μ.Ο.	4916.8	3612.9
t Stat	4.345334	
t Critical	2.022691	

Υποσημείωση: **1) Δ**: δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν**: δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Πίνακας Π10.6δ: Στατιστική σύγκριση διαφορών $E (comp)$ στο δεξιό ίχνος τροχών, σε σχέση με δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

t-Test: Κατά ζεύγη		
	Αν	Δ
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	4916.8	3612.9
t Stat	-0.00034	
t Critical	2.022691	

Υποσημείωση: **1) Δ:** δοκιμές στο δεξιό ίχνος τροχών. **2) Αν:** δοκιμές ανάμεσα στα δύο ίχνη

Π11. Μετρήσεις οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων με εφαρμογή Συστήματος Οπτικών Ινών

Πίνακας Π11.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέτρησης της οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης: ϵ_r (f.o.) με υπολογισμένες τιμές: ϵ_r (calc)

Ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης [μstrain]					
ϵ_r (f.o.) [μstrain]	ϵ_r (calc) [μstrain]	ϵ_r (f.o.) / ϵ_r (calc)	Δ [%]	$ \Delta $ [%]	RMS
11.2	10.2	0.91	-9.5	9.5	89.7
7.3	10.2	1.40	39.9	39.9	1593.5
18.0	11.9	0.66	-33.8	33.8	1141.7
18.1	11.9	0.66	-34.3	34.3	1174.2
13.6	12.3	0.90	-9.6	9.6	92.4
8.6	12.3	1.44	43.7	43.7	1906.5
20.9	13.1	0.63	-37.0	37.0	1367.7
18.1	13.1	0.73	-27.4	27.4	752.6
15.5	17.3	1.12	11.6	11.6	133.5
14.3	17.3	1.21	21.3	21.3	453.7
23.4	24.7	1.05	5.4	5.4	29.5
21.6	24.7	1.14	14.3	14.3	203.3
12.0	14.7	1.22	22.5	22.5	505.5
20.0	14.7	0.73	-26.7	26.7	713.1
27.4	19.8	0.72	-27.6	27.6	760.3
16.7	15.2			24,3	27.0

Πίνακας Π11.2: Στατιστική σύγκριση ϵ_r (f.o.) με ϵ_r (calc)

t-Test: Κατά ζεύγη		
	ϵ_r (f.o.)	ϵ_r (calc)
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
M.O.	16.7	15.2
t Stat	1.277994	
t Critical	2.144787	

Υποσημείωση: **1) ϵ_r (f.o.):** μετρημένες τιμές οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης με το σύστημα οπτικών ινών. **2) ϵ_r (calc):** αναλυτικά υπολογισμένες τιμές οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της κατεργασμένης στρώσης

Π12. Στατιστικός έλεγχος αποκλίσεων

Προκειμένου να διερευνηθεί αν οι μέσες τιμές δύο δειγμάτων έχουν μηδενική διαφορά, γίνεται έλεγχος των αποκλίσεων των διαφορών των τιμών των δύο αυτών δειγμάτων. Ο έλεγχος αυτός αφορά στη *μηδενική υπόθεση* (H_0) ότι δηλαδή

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \quad (\text{Π.1})$$

Όπου μ_1 και μ_2 είναι οι μέσοι όροι των τιμών δύο δειγμάτων

Για τον έλεγχο της προαναφερόμενης μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιείται το στατιστικό t-test των *κατά ζεύγη παρατηρήσεων* σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Π.2):

$$t = \frac{\bar{x}_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Π.2})$$

Όπου, n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων (μέγεθος δείγματος), $\bar{x}_d$ και s_d είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του υπόψη δείγματος, ενώ ο έλεγχος βασίζεται στους βαθμούς ελευθερίας $df = n - 1$.

Προκειμένου να διερευνηθεί η εφικτότητα συμμεταβολής των μέσων τιμών δύο δειγμάτων, γίνεται έλεγχος των αποκλίσεων των διαφορών των τιμών των δύο αυτών δειγμάτων ως προς τη διαφορά των μέσων όρων τους. Ο έλεγχος αυτός αφορά στη *μηδενική υπόθεση* (H_0) ότι δηλαδή

$$H_0 : \mu_d = \mu_1 - \mu_2 \quad (\text{Π.3})$$

Όπου μ_1 και μ_2 είναι οι μέσοι όροι των τιμών δύο δειγμάτων

Για τον έλεγχο της προαναφερόμενης μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιείται το στατιστικό t-test των *κατά ζεύγη παρατηρήσεων* σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Π.4):

$$t = \frac{\bar{x}_d - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} \quad (\Pi.4)$$

Όπου, n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων (μέγεθος δείγματος), $\bar{x}_d$ και s_d είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του υπόψη δείγματος, ενώ ο έλεγχος βασίζεται στους βαθμούς ελευθερίας $df = n - 1$.

Βασικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή του ελέγχου όπως περιγράφεται στα ανωτέρω είναι: Οι μεταβλητές / παρατηρήσεις των αρχικών δειγμάτων είναι ζευγαρωτές. Το δείγμα των διαφορών είναι ένα τυχαίο δείγμα του πληθυσμού των διαφορών. Η κατανομή του δείγματος είναι κανονική.