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

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΕΡΙΧΑΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΛΟΪΖΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον κύριο Ανδρέα Λοΐζο, καθηγητή και διευθυντή του εργαστηρίου οδοποιίας του ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ερευνήσω αυτό το ενδιαφέρον θέμα και για την καθοδήγηση και το ενδιαφέρον που έδειξε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την κυρία Κωνσταντίνα Γεωργούλη, επιστημονικής συνεργάτιδας του εργαστηρίου οδοποιίας του ΕΜΠ, για την καθοδήγησή της τόσο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όσο και στη συγγραφή του κειμένου καθώς και για την τεράστια υπομονή και κατανόηση που έδειξε, όταν κλήθηκα να εκτελέσω τις στρατιωτικές μου υποχρεώσεις και διέκοψα τη διαδικασία της συγγραφής. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου οδοποιίας του ΕΜΠ για τη βοήθεια τους στην εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

Επιπροσθέτως θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και τη σύντροφο μου για την κατανόηση και την υποστήριξη που μου έδειξαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη που νιώθω απέναντι στην οικογένεια μου, και κυρίως στη μητέρα μου στην οποία και αφιερώνω την εργασία αυτή, για ό,τι μου έχουν προσφέρει.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα εισαγωγής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E* των ασφαλτομιγμάτων στις διαδικασίες ελέγχου νέων οδοστρωμάτων εύκαμπτου τύπου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εργαστηριακό και οδικό πείραμα σε δύο οδικά τμήματα νέου οδοστρώματος. Δύο διαφορετικά ασφαλτομίγματα χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε οδικό τμήμα, μία ασφαλτική βάση με αδρανή κοκκομετρικής διαβάθμισης Α.Σ 20 και ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας διαβάθμισης Α.Σ 12.5, αθροιστικά λοιπόν χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ασφαλτομίγματα για την κατασκευή των δύο τμημάτων. Όσον αφορά στο εργαστηριακό πείραμα, συμπυκνώθηκε χρησιμοποιώντας τη γυροσκοπική μέθοδο, ένας ικανοποιητικός αριθμός δοκιμίων για κάθε ασφαλτόμιγμα. Στη συνέχεια έγιναν εργαστηριακές δοκιμές στα δοκίμια αυτά, για τον υπολογισμό του ποσοστού κενών αέρα που περιέχουν, για την εξασφάλιση ότι είναι κοντά στις απαιτήσεις της μελέτης σύνθεσης του έργου. Στα δοκίμια που βρίσκονταν εντός των αποδεκτών ορίων σε σχέση με τη μελέτη του έργου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Τελικώς, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας κάθε ασφαλτομίγματος ορίστηκε ως ο μέσος όρος των μέτρων των δοκιμίων του. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα που περιλάμβανε μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD) και έπειτα την πυρηνοληψία σε δέκα κοινές χαρακτηριστικές θέσεις, πέντε σε κάθε οδικό τμήμα. Με τον ανάστροφο υπολογισμό των καταγραφών του FWD προσδιορίστηκε το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας και τα αποτελέσματα των δυναμικών μέτρων δυσκαμψίας ανάχθηκαν στις συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης που επικρατούσαν κατά τις μετρήσεις του FWD. Στους πυρήνες ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με τα δοκίμια. Αναπτύχθηκαν οι κεντρικές καμπύλες τόσο για τους πυρήνες όσο και για τα ασφαλτομίγματα μέσω των μετρήσεων των δοκιμίων. Πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων και των δοκιμίων καθώς και με το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας από τις μετρήσεις του FWD και διερεύνηση των συσχετισμών μεταξύ τους. Το εύρος των πληροφοριών που παράγονται μέσω των μετρήσεων και αναλύσεων του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, αναδεικνύουν τις κεντρικές καμπύλες του E* σε βασικό εργαλείο για τον έλεγχο της ποιότητας των ασφαλτικών στρώσεων.

Abstract

In the present diploma thesis, the possibility of introducing dynamic modulus of HMA mixtures in the quality control processes of newly constructed pavements is investigated. For this purpose, lab experiment and in situ testing were conducted on two road sections of a new pavement. Each section is layered with two different HMA mixtures with different aggregate gradation for the asphalt base and top layer, so a total of four mixtures is used and tested in the experiment. The lab experiment consisted of compacting an adequate number of samples for each mixture using the gyratory compaction method. Then the air voids of the compacted samples were determined to ensure compliance with the restrictions set by the mix design, and the dynamic modulus of each sample was determined using the AASHTO T 342-11 standard method. The dynamic modulus value for each mixture was defined as the average value of each mixture's samples. The in-situ testing consisted of measurements using the Falling Weight Deflectometer (FWD) at five locations in each section, at different temperatures and then cores were extracted from the same locations. Backcalculation of the FWD deflections determined the in-situ stiffness modulus E_{FWD} and the cores were transferred to the Laboratory of Pavement Engineering of NTUA, were their dynamic modulus E^*_{core} was determined. Comparative evaluation of the three different moduli was performed using box plots, dispersion diagrams and the master curves of dynamic moduli from the cores and the lab compacted samples. The spectrum of valuable information on the condition of the HMA layers from the analysis of the dynamic modulus, showcases the importance of incorporating the dynamic modulus in the quality control procedures.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή **11**
1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος και αντικείμενο της έρευνας 11
1.2 Μεθοδολογία της εργασίας 12
1.3 Δομή εργασίας 13

2 Ασφαλτόμιγμα **15**
2.1 Σύσταση ασφαλτομίγματος 15
2.1.1 Άσφαλτος 15
2.1.2 Αδρανή 17
2.1.3 Ογκομετρική σύσταση ασφαλτομίγματος 18
2.2 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος 19
2.3 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος 21

3 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων **24**
3.1 Γενικά 24
3.2 Ορισμός 24
3.3 Κεντρική καμπύλη-Παράγοντας μετατόπισης 26
3.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός του E* 29
3.4.1 Απαιτούμενα χαρακτηριστικά εξοπλισμού και δοκιμίων 30
3.4.2 Βαθμονόμηση συσκευής και διαδικασία μέτρησης 31

4 Πειραματική διαδικασία **33**
4.1 Γενικά 33
4.2 Εργαστηριακό πείραμα 33
4.2.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων 33
4.2.2 Συμπύκνωση και κοπή δοκιμίων 34
4.2.3 Κενά αέρα δοκιμίων 36
4.2.4 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας δοκιμίων 38
4.3 Οδικό πείραμα 40
4.3.1 Μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους 40
4.3.2 Πυρηνοληψία και προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας 42

5 Επεξεργασία και ανάλυση πειραματικών δεδομένων **44**
5.1 Γενικά 44
5.2 Σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus) 44
5.3 Δημιουργία κεντρικών καμπυλών 46
5.4 Επεξεργασία μετρήσεων FWD 60

6 Συγκριτική αξιολόγηση **63**
6.1 Εισαγωγή 63
6.2 Εύρος τιμών μέτρων δυσκαμψίας 64
6.3 Σύγκριση master curve E^*_{comp} και E^*_{core} 69
6.4 Σύγκριση τιμών 74

7 Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα **81**

8 Βιβλιογραφία **83**

Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Οι δύο μορφές ασφάλτου 16
2.2 Εργαστηριακές δοκιμές ασφάλτου 16
2.3 Δοκιμές χονδρόκοκκων αδρανών 17
2.4 Σχηματική απεικόνιση VMA 18
2.5 Σχηματική απεικόνιση ογκομετρικής σύνθεσης ασφαλτομίγματος 19
2.6 Μηχανική συμπεριφορά ασφάλτου συναρτήσει του χρόνου φόρτισης και της θερμοκρασίας 20
2.7 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος 21
2.8 Στατικό πρότυπο μελέτης οδοστρώματος 22
2.9 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας 23

3.1 Γωνία υστέρησης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης σε ημιτονοειδή φόρτιση 26
3.2 Παράδειγμα μετατόπισης σημείων για τη δημιουργία κεντρικής καμπύλης 27
3.3 Σιγμοειδής συνάρτηση και οι συντελεστές της 29
3.4 Σύστημα δοκιμών NAT 30

4.1 Κοκκομετρία αδρανών από Άραξο 34
4.2 Κοκκομετρία αδρανών από Αθίκια 34
4.3 Γυροσκοπική συμπίεση δοκιμίων 35
4.4 Κοπή δοκιμίων 36
4.5 Δοκιμή Rice 37
4.6 Προετοιμασία δοκιμίων 38
4.7 Δοκίμιο ελέγχου θερμοκρασίας 39
4.8 Δοκιμή δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας 39
4.9 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους 41
4.10 Σχηματική απεικόνιση συστήματος και υποχωρήσεων 41
4.11 Επιταχυνσιόμετρα - γεώφωνα FWD 42

5.1 Στρώσεις πυρήνων 45
5.2 Σύνολο δοκιμίων (αριστερά) και πυρήνων (δεξιά) που μετρήθηκαν στο εργαστήριο 46
5.3 Υπολογιστικό φύλλο πυρήνα 48+050 47
5.4 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+050 στους 20°C 47
5.5 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα 48+050 για διάφορες θερμοκρασίες 48
5.6 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+150 στους 20° 49
5.7 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+250 στους 20° 49
5.8 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+300 στους 20° 50
5.9 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+400 στους 20° 50
5.10 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+500 στους 20° 51

5.11 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+590 στους 20° 51
5.12 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+650 στους 20° 52
5.13 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+750 στους 20° 52
5.14 Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+850 στους 20° 53
5.15 Κεντρικές καμπύλες ασφαλτομιγμάτων με αδρανή από τα Αθίκια 54
5.16 Κεντρικές καμπύλες ασφαλτομιγμάτων με αδρανή από τον Άραξο 54
5.17 Υπολογιστικό φύλλο E*comp πυρήνα 48+050 54
5.18 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+050 στους 20° 55
5.19 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+150 στους 20° 55
5.20 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+250 στους 20° 56
5.21 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+300 στους 20° 56
5.22 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+400 στους 20° 57
5.23 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+500 στους 20° 57
5.24 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+590 στους 20° 58
5.25 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+650 στους 20° 58
5.26 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+750 στους 20° 59
5.27 Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+850 στους 20° 59
5.28 Διάγραμμα φόρτισης στη θέση 48+050 60

6.1 Στατιστικά στοιχεία box plot 65
6.2 Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 26°C 66
6.3 Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 30°C 67
6.4 Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 36°C 67
6.5 Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο στους 24°C 68
6.6 Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο στους 40°C 68
6.7 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+050 69
6.8 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+150 70
6.9 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+250 70
6.10 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+300 71
6.11 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+400 71
6.12 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+500 72
6.13 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+590 72
6.14 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+650 73
6.15 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+750 73
6.16 Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+850 74
6.17 Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 26°C 75
6.18 Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 30°C 75
6.19 Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 36°C 76
6.20 Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Άραξο στους 24°C 76
6.21 Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Άραξο στους 40°C 77
6.22 Διάγραμμα αναλογίας μέτρων στα ασφαλτομίγματα από Αθίκια 78
6.23 Διάγραμμα αναλογίας μέτρων ασφαλτομιγμάτων από Άραξο 78
6.24 Διάγραμμα διασποράς τιμών E^*_{core}-E^*_{FWD} 79
6.25 Διάγραμμα διασποράς τιμών E^*_{core}-E^*_{comp} 80

Κατάλογος Πινάκων

3.1 Προτεινόμενος χρόνος προετοιμασίας δοκιμίων 32
3.2 Τυπικά επίπεδα φορτίου 32
3.3 Αριθμός κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα 32

4.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων 34
4.2 Κωδικοί ονομασίας πυρήνων 42
4.3 Πάχη στρώσεων πυρήνων 43

5.1 Συχνότητα φόρτισης FWD 61
5.2 Μέτρα δυσκαμψίας E_{FWD} (MPa) τμήματος με αδρανή από Αθίκια 62
5.3 Μέτρα δυσκαμψίας E_{FWD} (MPa) τμήματος με αδρανή από Άραξο 62

6.1 Τιμές για ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια 64
6.2 Τιμές για ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο 64
6.3 Μέσες τιμές λόγων των μέτρων ανά θερμοκρασία δοκιμής 65

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος και αντικείμενο της έρευνας

Το οδικό δίκτυο μίας χώρας είναι αίτιο αλλά και αποτέλεσμα της ανάπτυξής της. Η κατασκευή ενός νέου οδοστρώματος είναι μία στρατηγική επιλογή με μακροχρόνια ωφέλη σε ορίζοντα δεκαετιών. Πρόκειται για μία πολύπλοκη διαδικασία αφού από τη στιγμή της απόφασης κατασκευής ενός νέου οδοστρώματος μέχρι την παράδοσή του στην κυκλοφορία παρεμβάλλονται πολλαπλά στάδια υλοποίησης.

Αρχικό στάδιο της διαδικασίας είναι η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, κατά την οποία προσδιορίζονται τα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων. Έπειτα ακολουθεί η μελέτη σύνθεσης, η οποία έχει ως στόχο την εύρεση των υλικών και των αναλογιών τους για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε στρώσης που ορίζονται στη διαστασιολόγηση. Αμέσως μετά την κατασκευή του οδοστρώματος, για την παράδοση του στην κυκλοφορία, απαιτείται έλεγχος διασφάλισης της ποιότητας του οδοστρώματος ώστε να διαπιστωθεί η ποιότητα της κατασκευής κατά την οριστική παραλαβή. Ο προσδιορισμός της αρχικής κατάστασης του οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς εγείρεται ο προβληματισμός αν το οδόστρωμα που τελικά κατασκευάζεται στην πράξη (in-situ) ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της διαστασιολόγησης.

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στον έλεγχο της ποιότητας των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος. Κατά τις συμβατικές διαδικασίες ελέγχου, τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι η ογκομετρική σύσταση και η πυκνότητα των ασφαλτομιγμάτων. Στην περίπτωση που η διαστασιολόγηση βασίζεται σε αναλυτικές μεθόδους, βασική παράμετρο σχεδιασμού αποτελεί το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνεται στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας. Η θεώρηση των ίδιων μηχανικών χαρακτηριστικών στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας με αυτά που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, επιτρέπει την πιο ακριβή εκτίμηση της επίδρασης που μπορεί να έχει ένα υλικό υποδεέστερης ή ανώτερης ποιότητας στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων καθορίζει τη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων αλλά και ολόκληρου του οδοστρώματος, αφού στα εύκαμπτα οδοστρώματα οι ασφαλτικές στρώσεις αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων ώστε αυτές να μεταβιβάζονται σημαντικά απομειωμένες στις υποκείμενες στρώσεις. Επομένως το μέτρο δυσκαμψίας (S_m) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας των ασφαλτικών στρώσεων νέου οδοστρώ-

ματος.

Σύμφωνα με τους πρόσφατους οδηγούς διαστασιολόγησης εξελιγμένου αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων, όπως η νέα μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από τον οργανισμό AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), απαραίτητη και βασική παράμετρος σχεδιασμού νέων αλλά και αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων αποτελεί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E* των ασφαλτομιγμάτων. Επομένως, η εισαγωγή του E* σαν βασική παράμετρο ελέγχου αμέσως μετά την κατασκευή των ασφαλτικών στρώσεων κρίνεται απαραίτητη τόσο για τον έλεγχο της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων όσο και για την αξιολόγηση του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας του, μέσω του προσδιορισμού της αρχικής κατάστασης (σημείο μηδέν - zero point). Τα παραπάνω έχουν άμεση εφαρμογή σε έργα οδοστρωμάτων των οποίων η διαστασιολόγηση βασίζεται στις γενικές αρχές της μεθόδου MEPDG ή εφόσον το σύστημα παρακολούθησης και αξιολόγησης των οδοστρωμάτων το επιτρέπει.

Η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι ιξωδο-ελαστική, δηλαδή επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο (ή συχνότητα) φόρτισης. Η δυνατότητα κατασκευής της κεντρικής καμπύλης (master curve) του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας έχει σαν αποτέλεσμα την πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Αυτό αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα του E* έναντι άλλων εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας (όπως το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus)ή το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης M_R (Resilient Modulus). Υπό το πρίσμα των παραπάνω, ανακύπτει ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας, που είναι η διερεύνηση εισαγωγής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων.

1.2 Μεθοδολογία της εργασίας

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα σε δύο τμήματα νεο-κατασκευασθέντος οδοστρώματος εύκαμπτου τύπου. Παρασκευάστηκαν δοκίμια στο εργαστήριο, με τη γυροσκοπική μέθοδο, με ποσότητα μιγμάτων που είχε κρατηθεί από τις εγκαταστάσεις παραγωγής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο. Επίσης έγινε πυρηνοληψία και στα δύο τμήματα και πάρθηκαν πέντε πυρήνες από το κάθε τμήμα. Δημιουργώντας και συγκρίνοντας τις κεντρικές καμπύλες (master curves) των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο με αυτές των πυρήνων από το έργο, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των ασφαλτομιγμάτων που ορίζονται από τη μελέτη σύνθεσης και αυτών που τελικά κατασκευάστηκαν.

Δεδομένου ότι η πυρηνοληψία είναι μία καταστρεπτική και χρονοβόρα μέθοδος η οποία παρέχει σημειακή πληροφόρηση και εφαρμόζεται σε περιορισμένη έκταση, η χρήση συστημάτων μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing - NDT) για την αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Η εκτίμηση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του ανάστροφου υπολογισμού των καταγραφών με το σύστημα παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD). Υπό το πρίσμα αυτό, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης του E* και του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν στα υπό διερεύνηση οδικά τμήματα καταγραφές με το σύστημα FWD στα σημεία όπου μετέπειτα

έγινε πυρηνοληψία.

1.3 Δομή εργασίας

Η εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια στο σύνολό της, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής αυτής.

- Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται μία γενική περιγραφή των ασφαλτομιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται εν συντομία τα βασικά συστατικά και χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων. Επίσης γίνεται μία σύντομη αναφορά στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων και στην τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με τις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του.

- Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής αναφορά στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Αρχικά δίνεται ο ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, τι περιγράφει και πως προσδιορίζεται μαθηματικά. Στη συνέχεια αναλύεται η σημασία και ο τρόπος δημιουργίας των κεντρικών καμπυλών και του παράγοντα μετατόπισης. Τέλος περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο.

- Στο 4ο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή και χωρίζεται σε δύο σκέλη. Το εργαστηριακό και το οδικό πείραμα. Στο εργαστηριακό πείραμα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, η διαδικασία συμπύκνωσης των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας τους. Στο οδικό πείραμα συμπεριλαμβάνονται η πυρηνοληψία και οι μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD) καθώς και ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας αντιστοίχως.

- Στο 5ο κεφάλαιο περιγράφεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας. Αρχικά υπολογίζεται το σύνθετο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus) για τις χαρακτηριστικές θέσεις ελέγχου. Στη συνέχεια κατασκευάζονται οι κεντρικές καμπύλες για τις ίδιες θέσεις τόσο για τους πυρήνες όσο και από τα σύνθετα μέτρα δυσκαμψίας. Τέλος υπολογίζεται η συχνότητα φόρτισης του FWD και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού των μετρήσεων.

- Στο 6ο κεφάλαιο γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εργασίας. Παρουσιάζονται και αναλύονται τα εύρη τιμών των διαφορετικών μέτρων δυσκαμψίας σε διαγράμματα τύπου box plot, γίνεται η σύγκριση των κεντρικών καμπυλών σε κοινά διαγράμματα και παρουσιάζονται διάφορες συσχετίσεις μεταξύ των δυναμικών μέτρων και του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας σε διαφορετικά γραφήματα.

- Στο 7ο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανακεφαλαίωση του συνόλου της εργασίας και διατυπώνονται τα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

- Στο 8ο κεφάλαιο φαίνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ασφαλτόμιγμα

2.1 Σύσταση ασφαλτομίγματος

Με τον όρο ασφαλτόμιγμα, εννοείται το μίγμα της ασφάλτου και των αδρανών που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ασφαλτικών στρώσεων. Τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος είναι αποτέλεσμα των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών αλλά και της αναλογίας τους στο μίγμα.

2.1.1 Άσφαλτος

Η άσφαλτος χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό των αδρανών στο ασφαλτόμιγμα. Προέρχεται είτε από την επεξεργασία αργού πετρελαίου μέσω διύλισης, είτε από φυσικά κοιτάσματα πετρελαίου (εικόνα 2.1). Τα φυσικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου διαφέρουν αναλόγως του τρόπου επεξεργασίας του αργού πετρελαίου ή ακόμα και από την προέλευσή της αν πρόκειται για ορυκτή άσφαλτο. Βασικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου είναι:

- Η ανθεκτικότητά της στο πέρασμα του χρόνου. Η άσφαλτος αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, αυξάνεται ο συντελεστής ιξώδους και γίνεται πιο σκληρή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκλήρυνση (hardening) της ασφάλτου. Κατά τη σκλήρυνση το ασφαλτόμιγμα μπορεί αρχικά να παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία όμως η άσφαλτος γίνεται όλο και σκληρότερη και συνεπώς όλο και πιο εύθραυστη με αποτέλεσμα το σχηματισμό ρωγμών στο οδόστρωμα αφού χάνει την ελαστικότητά της.

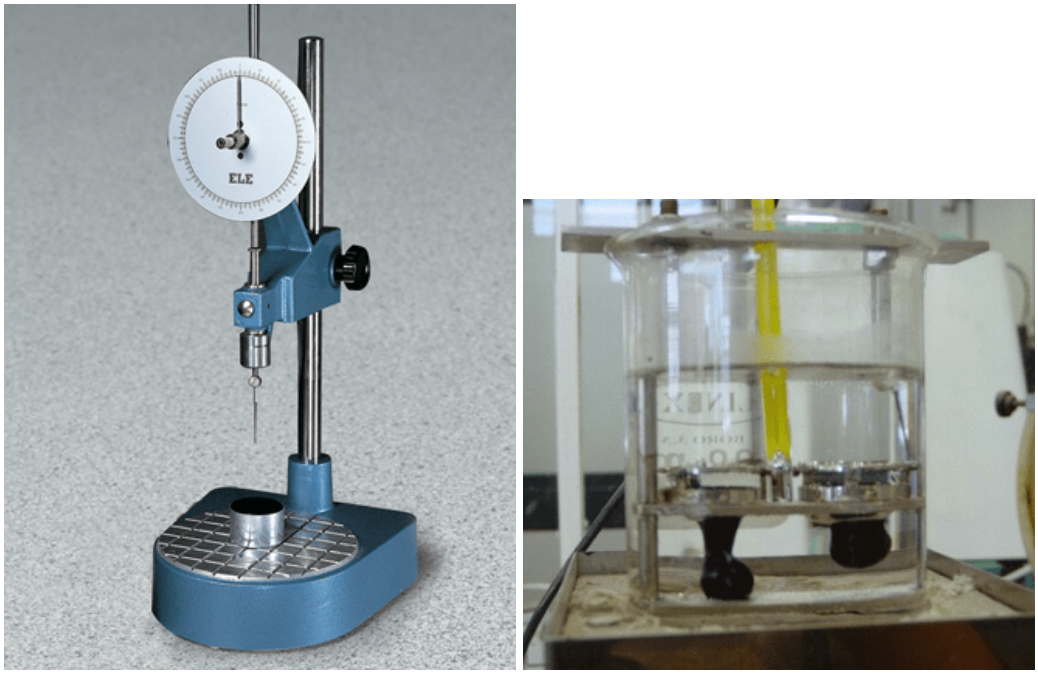
- Η ρεολογία της, δηλαδή η σχέση μεταξύ της ”ροής” και της παραμόρφωσης της ασφάλτου. Αν η άσφαλτος παραμορφώνεται εύκολα τότε μπορεί να προκύψουν προβλήματα αυλάκωσης ή τοπικής ανάδυσης της ασφάλτου στο οδόστρωμα. Αντιθέτως αν είναι δύσκαμπτη τότε το ασφαλτόμιγμα θα είναι πιο πιθανό να εμφανίσει ρωγμές.

- Η καθαρότητα. Στο ασφαλτόμιγμα η άσφαλτος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο καθαρή από άλλα χημικά συστατικά ή προσμίξεις, καθώς αυτά δεν συντελούν στον δεσμευτικό ρόλο της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα και μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά το σύνολο του μίγματος.

(a) Φυσική άσφαλτος (b) Επεξεργασμένη άσφαλτος

Εικόνα 2.1: Οι δύο μορφές ασφάλτου

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ασφάλτου οι οποίες καθορίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Για τη χρησιμοποίηση της ασφάλτου σε έργα οδοποιίας υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις σε διάφορες δοκιμές για κάθε κατηγορία ασφάλτου. Οι βασικότερες από αυτές τις δοκιμές είναι η δοκιμή διεισδυτικότητας (εικόνα 2.2a), η δοκιμή ολκιμότητας, η δοκιμή μάλθωσης (εικόνα 2.2b), ο δείκτης διεισδυτικότητας ή το ιξώδες της ασφάλτου.



(a) Δοκιμή διεισδυτικότητας (b) Δοκιμή μάλθωσης

Εικόνα 2.2: Εργαστηριακές δοκιμές ασφάλτου

2.1.2 Αδρανή

Το μίγμα αδρανών που χρησιμοποιείται στο ασφαλτόμιγμα αποτελείται από χονδρόκοκκα (χαλίκι, γαρμπίλι), λεπτόκοκκα (άμμος) και παιπάλη. Όσον αφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά των αδρανών, είναι αυτά που θα επηρεάσουν άμεσα το ασφαλτόμιγμα και υπάρχουν διάφορες εργαστηριακές, εμπειρικές κυρίως μετρήσεις, που δίνουν μία πρώτη εικόνα σχετικά με τη συμπεριφορά των αδρανών. Ενδεικτικά, κάποιοι έλεγχοι που γίνονται στα αδρανή ανάλογα το μέγεθός τους είναι:

- Στα χονδρόκοκκα αδρανή:
  - Έλεγχος έναντι θρυμματισμού από τριβή και κρούση μέσω της συσκευής Los Angeles (εικόνα 2.3a).
  - Έλεγχος έναντι αποσάθρωσης (δοκιμή υγείας) των αδρανών (εικόνα 2.3b).
  - Έλεγχος της μορφής των κόκκων. Τα αδρανή ελέγχονται για το ποσοστό των επιμηκών ή πλακοειδών κόκκων τους μέσω της συσκευής που φαίνεται στην εικόνα 2.3c.

(a) Δοκιμή LA (b) Δοκιμή υγείας (c) Έλεγχος μορφής κόκκων

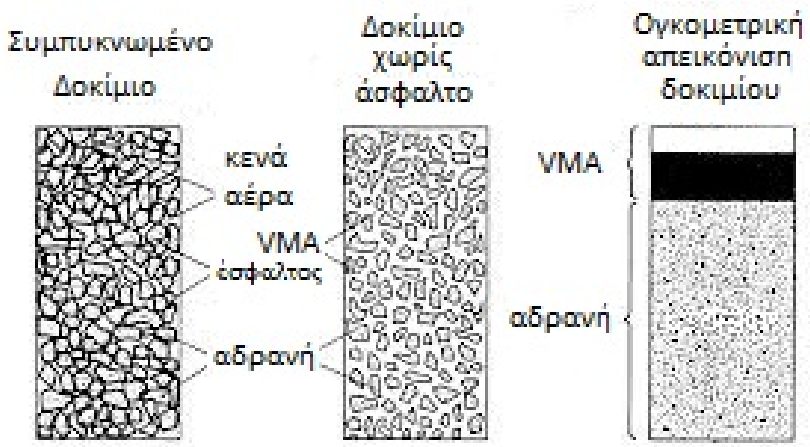
Εικόνα 2.3: Δοκιμές χονδρόκοκκων αδρανών

- Στα λεπτόκοκκα αδρανή γίνεται η δοκιμή ισοδύναμου άμμου. Με τη δοκιμή αυτή βρίσκεται το ποσοστό των πολύ λεπτών κόκκων, διαστάσεων αργίλου, που μπορεί να αποδειχθούν βλαβερά για το μίγμα.
- Στην παιπάλη γίνεται έλεγχος καθαρότητας έναντι αργίλου ή οργανικών προσμίξεων.

Ο κύριος παράγοντας στην επιλογή του κατάλληλου μίγματος των αδρανών είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Δηλαδή τα ποσοστά χονδρόκοκκων, λεπτόκοκκων και παιπάλης που θα χρησιμοποιηθούν στο μίγμα. Η κοκκομετρική διαβάθμιση επηρεάζει το ασφαλτόμιγμα σε πολλούς παράγοντες όπως τη σταθερότητά του, την αντοχή του, τη δυσκαμψία του, την εργασιμότητα του ή την αντιολισθητική ικανότητα του(Roberts et al., 1996).

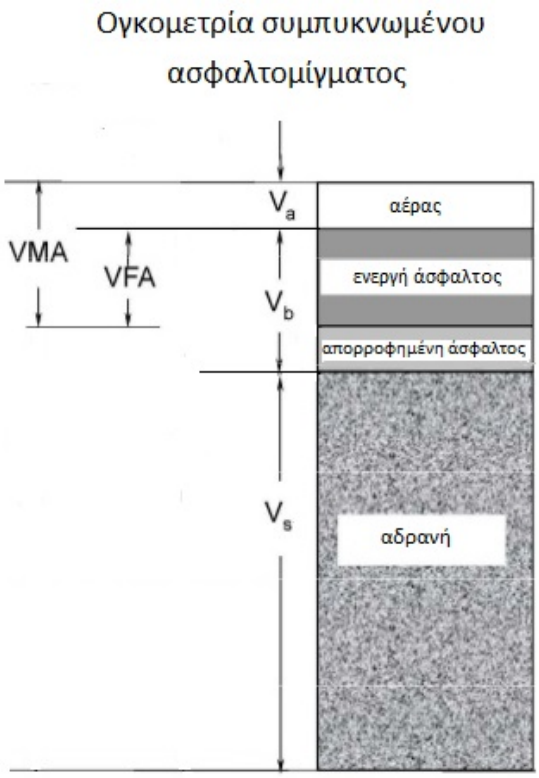
2.1.3 Ογκομετρική σύσταση ασφαλτομίγματος

Ο σχεδιασμός των ασφαλτομιγμάτων, πέραν της επιλογής των υλικών, συνιστάται και στην επιλογή των ποσοστών ασφάλτου, αδρανών και κενών αέρα που θα δώσουν τις επιθυμητές ιδιότητες στο μίγμα. Για μία καλύτερη εικόνα της σύστασης του ασφαλτομίγματος θα πρέπει να προσδιοριστεί το ποσοστό των κενών αέρα που καλύφθηκαν με άσφαλτο, πέρα από το απλό ποσοστό κενών αέρα στο μίγμα. Για το λόγο αυτό χρειάζονται τα κενά στο σκελετό των αδρανών (Voids in the Mineral Aggregate, VMA) Το VMA ενός συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος ουσιαστικά είναι τα κενά ανάμεσα στα αδρανή συμπεριλαμβανομένης της ασφάλτου (εικόνα 2.4). Ένα ψηλό VMA θα επηρεάσει αρνητικά την αντοχή του ασφαλτομίγματος, ενώ ένα χαμηλό VMA μπορεί να μην αφήσει αρκετό χώρο στην άσφαλτο να επικαλύψει τα αδρανή.



Εικόνα 2.4: Σχηματική απεικόνιση VMA

Πρέπει να σημειωθεί πως τα αδρανή, ως εδαφικά υλικά είναι πορώδη και συνεπώς ένα μέρος της ασφάλτου θα απορροφηθεί από αυτά και δεν θα συμβάλλει στη συνδετική δράση της ασφάλτου στο μίγμα. Τα κενά που καλύφθηκαν με άσφαλτο η οποία έχει ενεργό δράση ονομάζονται VFA (Voids Filled with Asphalt). Στην εικόνα 2.5 φαίνονται καθαρά οι διάφοροι όγκοι που απαρτίζουν το ασφαλτόμιγμα.



Εικόνα 2.5: Σχηματική απεικόνιση ογκομετρικής σύνθεσης ασφαλτομίγματος

Όπου:

- V_s : ο όγκος του σώματος των αδρανών
- V_b : ο όγκος της συνολικής ασφάλτου στο μίγμα
- V_a : ο όγκος των κενών αέρα

2.2 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος

Το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ιξωδο-ελαστικά λόγω της φύσης της ασφάλτου. Για μικρούς χρόνους φόρτισης και μικρές θερμοκρασίες συμπεριφέρεται ελαστικά, ενώ για μεγάλες θερμοκρασίες ή/και μεγάλους χρόνους φόρτισης έχει ιξώδη συμπεριφορά. Έτσι, η απόκριση του ασφαλτομίγματος θα εμπεριέχει ανακτήσιμα και μη ανακτήσιμα στοιχεία στο εύρος των φορτίσεων που θα δεχτεί στο χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος. Συνεπώς το ασφαλτόμιγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από τη θεμελιώδη χαρακτηριστική ιδιότητα των ελαστικών υλικών που εκφράζεται με το μέτρο ελαστικότητας, γνωστό και ως μέτρο Young.

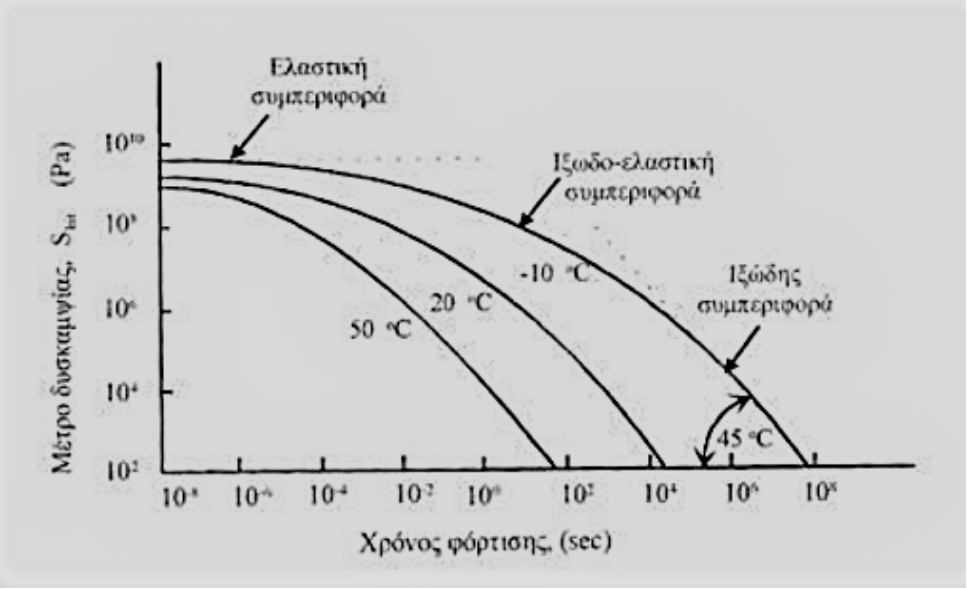
Το 1954 προσπαθώντας να περιγράψει τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου ο Van der Poel εισήγαγε την έννοια του μέτρου δυσκαμψίας. Το μέτρο δυσκαμψίας (S_m) ορίζεται ως ο λόγος της τάσης προς την ανηγμένη παραμόρφωση (εξίσωση 2.1) και διαφέρει του μέτρου ελαστικότητας στο ότι επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ή/και ο χρόνος φόρτισης, τόσο το

μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.6. Τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου μεταφέρονται και στο ασφαλτόμιγμα, επομένως το S_m είναι ένα μέτρο απόκρισης του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση φορτίων.

$$S_m = (\frac{\sigma}{\varepsilon})_{t,T} \tag{2.1}$$

Όπου:

- σ: η επιβαλλόμενη τάση
- ε: η ανηγμένη παραμόρφωση
- t: ο χρόνος φόρτισης
- T: η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος



Εικόνα 2.6: Μηχανική συμπεριφορά ασφάλτου συναρτήσει του χρόνου φόρτισης και της θερμοκρασίας

Στους αναλυτικούς υπολογισμούς της μηχανικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων υπάρχει ένας διαχωρισμός του μέτρου δυσκαμψίας. Το πρώτο μετράται σε χαμηλές θερμοκρασίες και για μικρούς χρόνους φόρτισης και ονομάζεται ελαστικό μέτρο δυσκαμψίας (elastic stiffness), διότι οι συνθήκες μέτρησης πλησιάζουν τις συνθήκες ελαστικής συμπεριφοράς της ασφάλτου. Το δεύτερο μετράται σε υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλους χρόνους φόρτισης και ονομάζεται ιξώδες μέτρο δυσκαμψίας (viscous stiffness), διότι οι συνθήκες πλησιάζουν αυτές της ιξώδους συμπεριφοράς της ασφάλτου.

Το ελαστικό μέτρο δυσκαμψίας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κρίσιμων τάσεων και παραμορφώσεων που δημιουργούνται στο οδόστρωμα. Οι κρίσιμες τάσεις και παραμορφώσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Το ιξώδες μέτρο δυσκαμψίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης του ασφαλτομίγματος έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων και κατά συνέπεια συνεισφέρει στην εκτίμηση των συνολικών παραμενουσών παραμορφώσεων του οδοστρώματος. Έτσι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα κατανόησης της συμπεριφοράς όχι μόνο των ασφαλτικών στρώσεων, αλλά και του συνόλου του οδοστρώματος.

2.3 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Το οδόστρωμα είναι μία πολυστρωματική κατασκευή με διαφορετικά υλικά και διαφορετικά χαρακτηριστικά σε κάθε στρώση (εικόνα 2.7). Τα οδοστρώματα διακρίνονται σε εύκαμπτα ή δύσκαμπτα ανάλογα με τα είδη των στρώσεων που τα συνιστούν. Στην εργασία αυτή θα αναφερθούμε μόνο σε εύκαμπτα οδοστρώματα τα οποία αποτελούνται από:

- Τη στρώση έδρασης, η οποία αποτελεί το φυσικό έδαφος πάνω στο οποίο γίνεται η διάστρωση των υπερκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος.
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο το οποίο μπορεί να είναι θραυστό ή και συλλεκτό, με συγκεκριμένη όμως διαβάθμιση.
- Τη στρώση βάσης, η οποία κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο θραυστό αμμοχάλικο συγκεκριμένης διαβάθμισης
- Τις ασφαλτικές στρώσεις, οι οποίες κατασκευάζονται από ασφαλτόμιγμα με συγκεκριμένες απαιτήσεις και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι ασφαλτικές στρώσεις χωρίζονται με τη σειρά τους σε:
  - Ασφαλτική βάση
  - Ισοπεδωτική στρώση
  - Στρώση κυκλοφορίας ή επιφανειακή στρώση. Πρόκειται για την ανώτερη στρώση και είναι αυτή με τις απαιτήσεις αντιολισθηρότητας καθώς οι χρήστες έρχονται σε άμεση επαφή μόνο με αυτή τη στρώση.

(a) Πραγματική διατομή

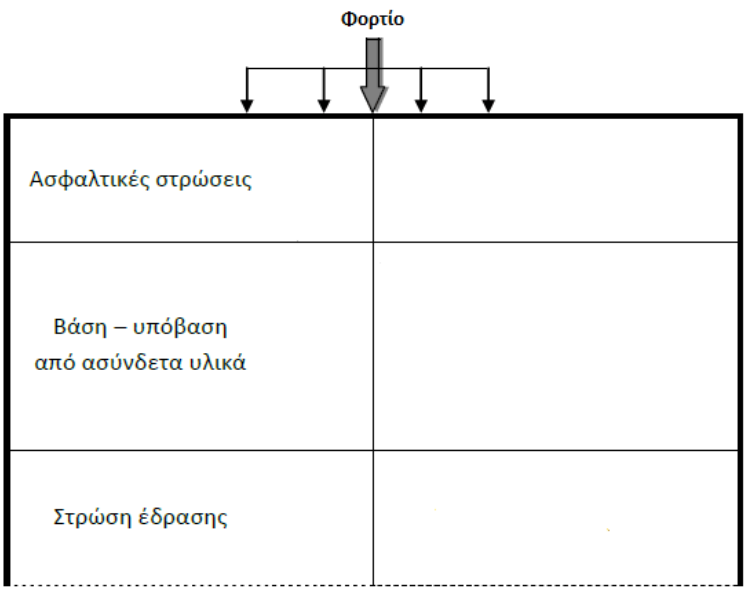
(b) Σχηματική απεικόνιση

Εικόνα 2.7: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε ένα οδόστρωμα πρέπει να προσδιοριστεί η κατάλληλη θεωρία ανάλυσης καθώς και το στατικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το οδόστρωμα. Για τα ασφαλτικά οδοστρώματα χρησιμοποιούνται κυρίως δύο θεωρίες. Αυτή του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημίχωρου που αναπτύχθηκε από τον Boussinesq το 1875 και η πιο σύγχρονη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων εδραζόμενων επί ελαστικού ημίχωρου που αναπτύχθηκε από τον Burmister το 1947.

Στο γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων γίνονται διάφορες παραδοχές όπως ότι η κάθε στρώση είναι ισότροπη, ομογενής και ελαστική. Άλλη μία σημαντική παραδοχή είναι πως ο υπολογισμός των τάσεων χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας (E) και το λόγο του Poisson (ν) για τα υλικά της κάθε στρώσης. Στην πραγματικότητα καμία από αυτές τις παραδοχές δεν είναι αληθινή, όμως έχει αποδειχθεί από πειράματα δυναμικής φόρτισης των οδοστρωμάτων, ότι υπάρχει αρκετά καλή προσέγγιση των στρωμάτων με πραγματικώς ελαστικά λόγω των μικρών χρόνων φόρτισης (Λοΐζος και Πλατή, 2015).

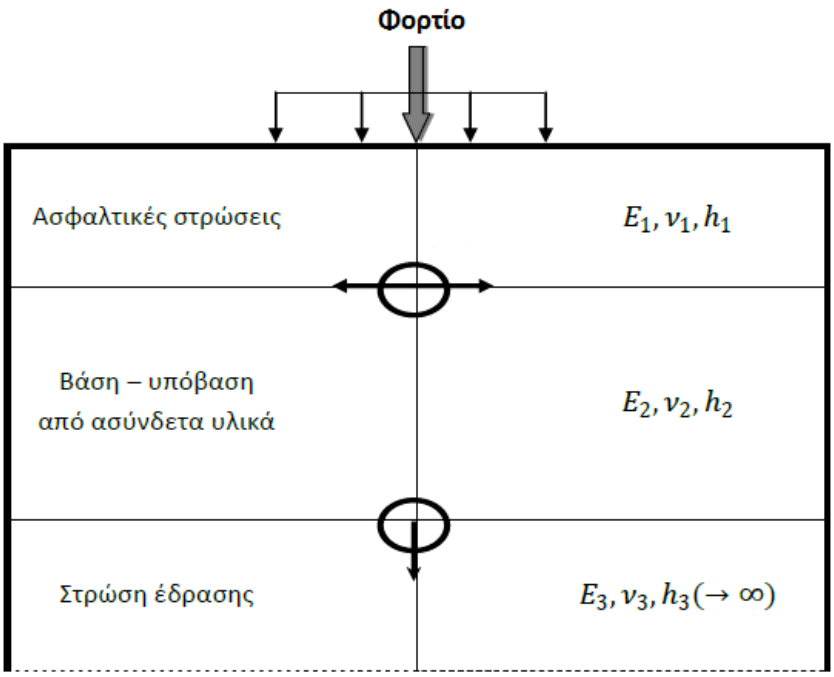
Όσον αφορά στο στατικό πρότυπο, ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα μπορεί να προσομοιωθεί από τρεις στρώσεις (όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8), πεπερασμένου πάχους και απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια έννοια (βάση, υπόβαση και ασφαλτικές στρώσεις), οι οποίες εδράζονται σε μια στρώση με απεριόριστες οριζόντιες διαστάσεις αλλά και πάχος (στρώση έδρασης). Αν τα υλικά της βάσης και της υπόβασης δεν διαφέρουν ποιοτικά μπορούν να θεωρηθούν ως μία ενιαία στρώση και έτσι να έχουμε τελικά ένα σύστημα τριών στρώσεων.



Εικόνα 2.8: Στατικό πρότυπο μελέτης οδοστρώματος

Σύμφωνα με τη θεωρία σε ένα οποιοδήποτε σημείο μίας οποιασδήποτε στρώσης αναπτύσσονται εννέα τάσεις, τρεις ορθές και έξι διατμητικές. Η κρίσιμη θέση φόρτισης για ένα κινούμενο φορτίο είναι στον κατακόρυφο άξονά του καθώς στη θέση αυτή οι ορθές τάσεις μετατρέπονται σε κύριες. Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση του οδοστρώματος είναι δύο. Στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Τα κρίσιμα μεγέθη που αναπτύσσονται είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις στη στρώση έδρασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9.

Οι ασφαλτικές στρώσεις λόγω των αξονικών φορτίων που δέχονται υπόκεινται σε ένα συνεχή εφελκυσμό της κάτω ίνας της στρώσης. Το μέγεθος της εφελκυστικής ανηγμένης παραμόρφωσης που αναπτύσσεται για συγκεκριμένο φορτίο εξαρτάται από τη δυσκαμψία της στρώσης (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Η εφελκυστική αυτή παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει κόπωση του ασφαλτομίγματος, η οποία εμφανίζεται με τη μορφή ρηγμάτωσης. Η ρηγμάτωση αυτή ξεκινά από το κάτω μέρος των ασφαλτικών στρώσεων και προχωρά προς τα πάνω (bottom-up cracking) μέχρι να εμφανιστεί στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις στη στρώση έδρασης είναι αυτές που κυρίως προκαλούν παραμένουσες παραμορφώσεις στο οδόστρωμα, οι οποίες εμφανίζονται ως βυθίσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.9: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας

Οι ασφαλτικές στρώσεις πρέπει να είναι ικανές να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις και των δύο δομικών αστοχιών. Πρέπει να παραλαμβάνουν τα φορτία της κυκλοφορίας χωρίς να αστοχούν λόγω του εφελκυσμού στη βάση τους, αλλά και να βοηθούν στην απομείωση των πιέσεων στις κατώτερες στρώσεις, μειώνοντας τις συνολικές παραμένουσες παραμορφώσεις και τον κίνδυνο αστοχίας της βάσης έδρασης. Είναι εμφανής λοιπόν η σημασία της δομικής κατάστασης των ασφαλτικών στρώσεων και κατ'επέκταση η σημασία του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων

3.1 Γενικά

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας έχει αναδειχθεί σε βασικό χαρακτηριστικό ανάλυσης και σχεδιασμού των οδοστρωμάτων τις τελευταίες δεκαετίες. Ο οδηγός MEPDG (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide) που αναπτύχθηκε για τον οργανισμό AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) στην Αμερική, αναφέρει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ως το κύριο χαρακτηριστικό δυσκαμψίας των ασφαλτικών υλικών. Αυτό γιατί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας λαμβάνει υπόψην του την εξάρτηση της μηχανικής συμπεριφοράς της ασφάλτου από τη θερμοκρασία και το χρόνο.

3.2 Ορισμός

Το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων ορίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία αλλά και στις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές (EN 12697-26) ως complex modulus (E*). Το complex modulus, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί στα ελληνικά ως ”μιγαδικό μέτρο απόκρισης” είναι ένας μιγαδικός αριθμός. Το μέτρο |E*| του μιγαδικού αυτού αριθμού ονομάζεται δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται απλά ως E* (Yoder και Witczak, 1975)(Witczak et al., 2002).

Το complex modulus δίνει τη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων για γραμμικά, ιξωδοελαστικά υλικά, κάτω από συνθήκες συνεχούς ημιτονοειδούς φόρτισης για διάφορες συχνότητες. Τα ασφαλτομίγματα για μικρά επίπεδα παραμόρφωσης (<=100με) έχουν γραμμική, ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά (Schwartz, 2005) και επομένως μπορεί να προσδιοριστεί η μηχανική τους συμπεριφορά μέσω του complex modulus.

Κάθε μιγαδικός αριθμός έχει ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος. Το πραγματικό μέρος του complex modulus αναπαριστά την ελαστική ακαμψία και το φανταστικό αναπαριστά την εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang, 2004). Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται από τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση και τη μέγιστη ανακτήσιμη αξονική παραμόρφωση (Huang, 2004), όπως φαίνεται στη σχέση 3.1

$$E^* = \sqrt{(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\cos\phi)^2 + (\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\sin\phi)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \tag{3.1}$$

Όπου είναι:

- E*: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi)
- σ_0: μέγιστη τάση (psi)
- ε_0: μέγιστη παραμόρφωση (με)
- φ: γωνία υστέρησης (rad)

Η γωνία υστέρησης περιγράφει τη χρονική καθυστέρηση που υπάρχει μεταξύ της επιβολής της τάσης (σ) και της εμφάνισης της αξονικής παραμόρφωσης (ε), όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1. Πρόκειται για μία απεικόνιση της εξάρτησης της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων από το χρόνο. Πλήρως ελαστικά υλικά έχουν γωνία φάσης 0° και καθαρά ιξώδη υλικά έχουν γωνία φάσης 90°, ενώ τα ασφαλτομίγματα επιδεικνύουν μία ενδιάμεση συμπεριφορά (Garcia και Thompson, 2007). Για τη μονοαξονική ημιτονοειδή φόρτιση ισχύει ότι:

- Η τάση περιγράφεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(t\omega + \phi) \tag{3.2}$$

- Η προκύπτουσα παραμόρφωση από τη σχέση:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(t\omega) \tag{3.3}$$

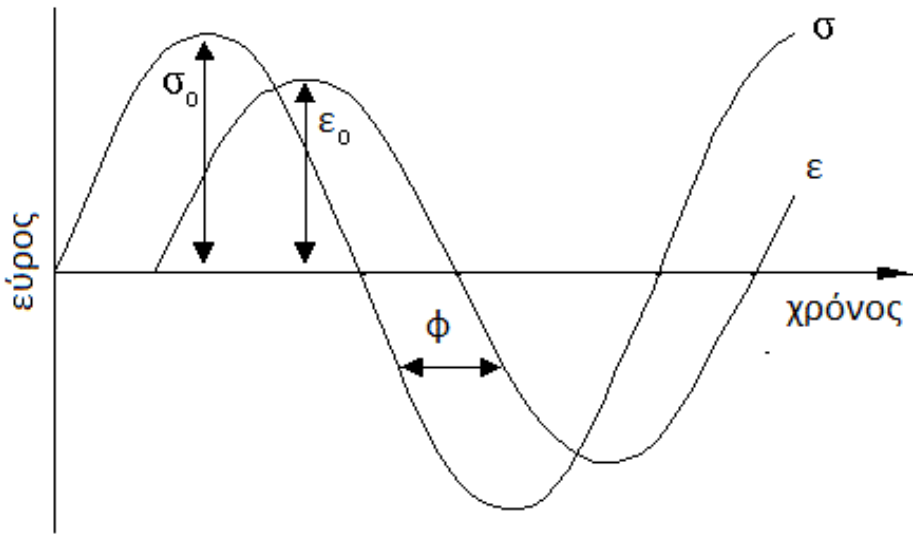
Όπου:

- σ_0: μέγιστη τάση (psi)
- ε_0: μέγιστη παραμόρφωση (με)
- φ: γωνία υστέρησης (rad)
- t: χρόνος (sec)
- ω: γωνιακή ταχύτητα (rad/sec)

Η γωνιακή ταχύτητα συνδέεται με τη συχνότητα φόρτισης f (Hz) με τη σχέση 3.4 όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\omega = 2\pi f \tag{3.4}$$

Έτσι φαίνεται πως τα ασφαλτομίγματα εξαρτώνται από τη συχνότητα φόρτισης και κατ'επέκταση από το χρόνο φόρτισης. Όλα τα παραπάνω δείχνουν την εξάρτηση του E* με το χρόνο. Όσον αφορά την εξάρτηση του E* με τη θερμοκρασία, εργαστηριακές έρευνες έδειξαν ότι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία των ασφαλτομιγμάτων προκαλούν αλλαγές στο εύρος των ανακτήσιμων παραμορφώσεων, επηρεάζοντας έτσι και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Bonnaure et al., 1977).



Εικόνα 3.1: Γωνία υστέρησης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης σε ημιτονοειδή φόρτιση

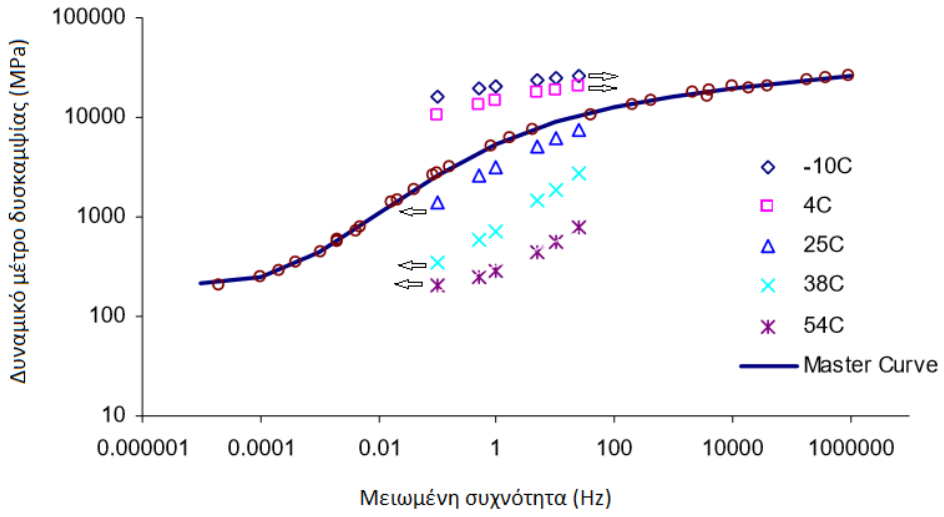
3.3 Κεντρική καμπύλη-Παράγοντας μετατόπισης

Οι δοκιμές των ασφαλτομιγμάτων στο εργαστήριο γίνονται σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σε συγκεκριμένες συχνότητες. Επιτόπου δοκιμές στο έργο όμως μπορεί να έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες και συχνότητες. Δεδομένης της εξάρτησης των ασφαλτομιγμάτων από το χρόνο και τη θερμοκρασία γίνεται κατανοητό ότι αποτελέσματα δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα. Το πρόβλημα αυτό για δοκιμές του μέτρου δυσκαμψίας, λύνεται μέσω των κεντρικών καμπυλών (master curves). Η κεντρική καμπύλη αντιπροσωπεύει την απόκριση των ασφαλτομιγμάτων σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς (αυθαίρετα επιλεγμένη), για ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων ή χρόνων φόρτισης (Christensen και Anderson, 1992).

Οι κεντρικές καμπύλες βασίζονται στην αρχή της επαλληλίας του χρόνου με τη θερμοκρασία (time temperature superposition)(Ferry, 1961). Η αρχή αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε θερμο-ρεολογικά απλά υλικά (Thermorheologically Simple, TRS) με την εισαγωγή μίας παραμέτρου σύνδεσης του χρόνου με τη θερμοκρασία που ονομάζεται μειωμένη συχνότητα (reduced frequency, f_r) ή μειωμένος χρόνος (reduced time, t_r). Έχει αποδειχθεί ότι τα ασφαλτομίγματα όταν βρίσκονται στο φάσμα της γραμμικής ιξωδο-ελαστικής τους κατάστασης συμπεριφέρονται ως υλικά TRS (Kim και Lee, 1995)(Goodrich, 1991).

Για τη δημιουργία μίας κεντρικής καμπύλης πρώτα επιλέγεται αυθαίρετα μία θερμοκρασία αναφοράς. Έπειτα σημεία που δείχνουν το μέτρο δυσκαμψίας μετατοπίζονται οριζοντίως αναλόγως της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή, με τον οριζόντιο άξονα να αντιπροσωπεύει τη μειωμένη συχνότητα (ή το μειωμένο χρόνο) και τον κατακόρυφο την τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα σημεία όπου η θερμοκρασία δοκιμής είναι μικρότερη της θερμοκρασίας αναφοράς μετατοπίζονται προς τα δεξιά (μεγαλύτερη μειωμένη συχνότητα), ενώ σημεία με μεγαλύτερη θερμοκρασία μετατοπίζονται προς τα αριστερά (μικρότερη μειωμένη συχνότητα) και σημεία με θερμοκρασία δοκιμής ίση με τη θερμοκρασία αναφοράς παραμένουν στην ίδια θέση (Pellinen et al., 2002). Έτσι τα σημεία του μέτρου δυσκαμψίας από δοκιμές σε διαφορετικές θερμοκρασίες σχηματίζουν μία ενιαία καμπύλη. Στην εικόνα 3.2 φαίνονται τα σημεία από τις μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες και η κεντρική καμπύλη μετά τη μετατόπιση

τους.



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα μετατόπισης σημείων για τη δημιουργία κεντρικής καμπύλης

Η μετατόπιση των σημείων ορίζεται από το συντελεστή μετατόπισης a(T) ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Ουσιαστικά ο συντελεστής μετατόπισης δείχνει πόσο ευαίσθητο είναι το υλικό στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής μετατόπισης τόσο πιο ευαίσθητο στις θερμοκρασιακές μεταβολές είναι το υλικό (Cross et al., 2007). Ο συντελεστής μετατόπισης μαζί με τη συχνότητα φόρτισης της δοκιμής δίνουν τη μειωμένη συχνότητα που αποτελεί τον οριζόντιο άξονα σε ένα γράφημα κεντρικής καμπύλης, όπως φαίνεται από τη σχέση 3.5.

$$f_r = \frac{f}{a(T)} \iff log(f_r) = log(f) - log(a(T)) \tag{3.5}$$

Όπου:

- f_r: μειωμένη συχνότητα
- f: συχνότητα φόρτισης δοκιμής
- a(T): συντελεστής μετατόπισης

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μετατόπισης έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μαθηματικοί τύποι. Οι κυριότεροι είναι η εξίσωση των Williams-Landel-Ferry, η εξίσωση του Arrhenius και η πολυωνυμική εξίσωση δευτέρου βαθμού (Pellinen et al., 2004)(Witzcak, 2005)(Kutay et al., 2011)(Varma et al., 2013). Από τις μεθόδους αυτές η πολυωνυμική εξίσωση είναι αυτή με τη μεγαλύτερη ακρίβεια.

- Η εξίσωση των Williams-Landel-Ferry:

$$log(a(T)) = \frac{c_1(T - T_{ref})}{c_2 + T - T_{ref}} \tag{3.6}$$

Όπου:

  - T: η θερμοκρασία δοκιμής (K)
  - T_{ref}: η θερμοκρασία αναφοράς (K)
  - c_1,c_2: αδιάστατες εμπειρικές σταθερές

- Η εξίσωση του Arrhenius:

$$log(a(T)) = C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \tag{3.7}$$

  Όπου:

  - T: η θερμοκρασία δοκιμής (K)
  - T_{ref}: η θερμοκρασία αναφοράς (K)
  - C: μία σταθερά (K)

- Πολυώνυμο 2ου βαθμού:

$$log(a(T)) = aT_{ref}^2 + bT_{ref} + c \tag{3.8}$$

  Όπου:

  - T_{ref}: η θερμοκρασία αναφοράς (°F)
  - a,b,c: συντελεστές δευτεροβάθμιας εξίσωσης

Μία κεντρική καμπύλη μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω μίας πολυωνυμικής συνάρτησης (Pellinen και WItczak, 2002). Όμως ένα μοναδικό πολυωνυμικό μαθηματικό μοντέλο δεν είναι κατάλληλο για την προσαρμογή της κεντρικής καμπύλης λόγω της κύρτωσης της στις χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να φανεί προβληματικό σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να προβλέψουμε τη συμπεριφορά του υλικού εκτός του πεδίου των μετρήσεων (Pellinen et al., 2002). Το πρόβλημα αυτό λύθηκε από έρευνες που έγιναν στο πανεπιστήμιο του Maryland που έδειξαν ότι οι κεντρικές καμπύλες μπορούν να αναπαρασταθούν από σιγμοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στη σχέση 3.9 (2002 Design Guide, 2004).

Στην πράξη η καμπύλη δημιουργείται μέσω της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών της μετρημένης τιμής του E*, από την προβλεπόμενη που υπολογίζεται από τη σχέση 3.9. Μέσω βελτιστοποίησης βρίσκονται οι συντελεστές α,β,γ,δ της συνάρτησης. Επίσης είναι δυνατόν να βρεθούν ταυτόχρονα και οι συντελεστές a,b,c του a(T) μαζί με τους συντελεστές της σιγμοειδούς.

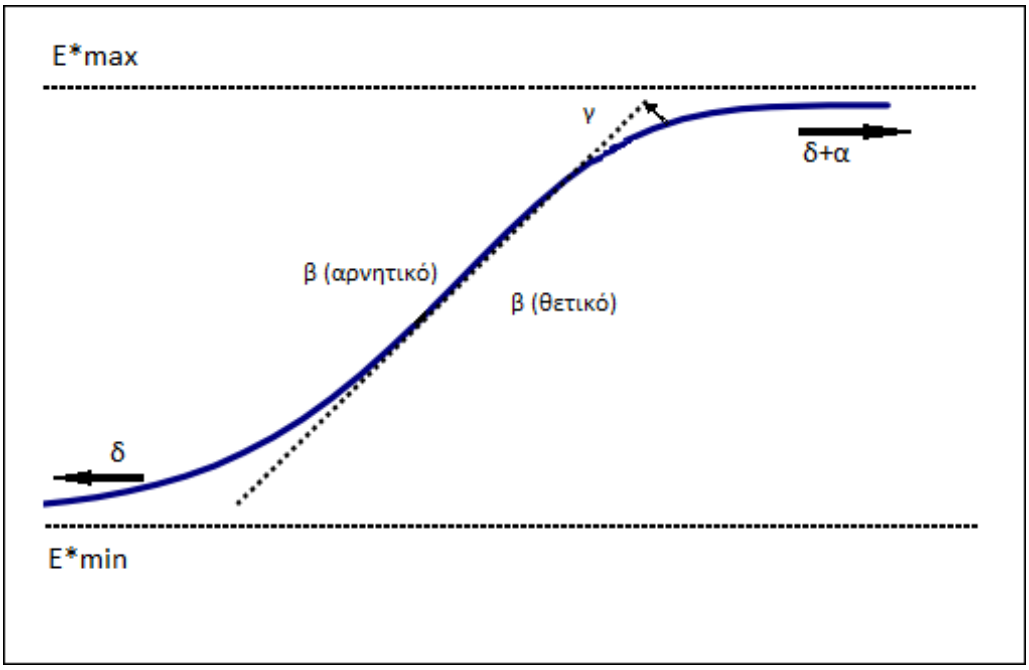
$$log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma log(f_r)}} \tag{3.9}$$

Όπου:

- E*: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας
- f_r: η μειωμένη συχνότητα
- δ: ελάχιστη τιμή του μέτρου

- δ+α: μέγιστη τιμή του μέτρου
- β,γ: συντελεστές σχήματος της σιγμοειδούς καμπύλης

Στην παραπάνω σχέση, η παράμετρος γ ορίζει πόσο απότομη κλίση θα έχει η καμπύλη, ενώ η παράμετρος β την οριζόντια θέση του σημείου καμπής όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Οι παράμετροι δ και α εξαρτώνται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, το ποσοστό ασφάλτου και το ποσοστό κενών αέρος στο ασφαλτόμιγμα. Οι παράμετροι β και γ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου και το μέγεθος των δ και α (2002 Design Guide, 2004). Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς συνάρτησης για τη μαθηματική περιγραφή της κεντρικής καμπύλης ενισχύεται και από τις φυσικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Το πάνω άκρο της καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά το μέγιστο μέτρο δυσκαμψίας που εξαρτάται κυρίως από τη δυσκαμψία της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο το μέτρο δυσκαμψίας είναι η κοκκομετρία των αδρανών και αυτό φαίνεται στο κάτω άκρο της σιγμοειδούς. Έτσι η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφει τη φυσική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος κατά τη μηχανική δοκιμή πίεσης, σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών (Pellinen και Witczak, 2002)



Εικόνα 3.3: Σιγμοειδής συνάρτηση και οι συντελεστές της

3.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός του E*

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται στο εργαστήριο ακολουθώντας το διεθνές πρότυπο T 342-11 του AASHTO (Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt).

Η μέθοδος προσδιορίζει:

- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί
- Τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν

- Τη διαδικασία βαθμονόμησης της συσκευής επιβολής του φορτίου
- Τη διαδικασία της μέτρησης

3.4.1 Απαιτούμενα χαρακτηριστικά εξοπλισμού και δοκιμίων

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός αποτελείται από ένα σύστημα δοκιμής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ένα μηχάνημα γυροσκοπικής συμπύκνωσης καθώς και μηχανήματα περιμετρικής και εγκάρσιας κοπής των δοκιμίων. Το σύστημα της δοκιμής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας εμπεριέχει τη συσκευή επιβολής του φορτίου και το θάλαμο ελεγχόμενου περιβάλλοντος, και ελέγχεται πλήρως από ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος μετράει και καταγράφει τα επιβαλλόμενα φορτία και τις προκύπτουσες παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η συσκευή επιβολής του φορτίου πρέπει να είναι ικανή να αποδώσει ελεγχόμενη, ημιτονοειδή, θλιπτική φόρτιση σε συχνότητες από ο,1 έως 25Hz και για φορτίο έως 2800kPa. Το σφάλμα μεταξύ της επιβαλλόμενης ημιτονοειδούς φόρτισης και της ημιτονοειδούς συνάρτησης που την περιγράφει καλύτερα πρέπει να είναι μικρότερο από 5%. Ο θάλαμος ελεγχόμενου περιβάλλοντος πρέπει να ελέγχει και να κρατάει σταθερή τη θερμοκρασία των δοκιμίων προς μέτρηση. Το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες γίνεται η δοκιμή είναι από -10 έως 60°C με επιτρεπόμενο σφάλμα 0,5°C. Το φορτίο κατά τη διάρκεια της μέτρησης ελέγχεται μέσω ενός ηλεκτρονικού κελύφους (load cell) το οποίο πρέπει να έχει ελάχιστο εύρος τιμών από 0 έως 25kN. Οι παραμορφώσεις παρακολουθούνται μέσω ειδικών αισθητήρων μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης υψηλής ακριβείας. Τα εξαρτήματα αυτά ονομάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία LVDT (Linear Variable Differential Transformers). Σε κάθε δοκίμιο μπορούν να τοποθετηθούν 2,3 ή 4 LVDTs ανά 180,120 ή 90 μοίρες αντίστοιχα μέσω ειδικών βάσεων οι οποίες συγκολλούνται επάνω στο δοκίμιο σε συγκεκριμένο ύψος. Τέλος για το σύστημα της δοκιμής χρειάζονται δύο μεταλλικές, επίπεδες, κυκλικές πλάκες διαμέτρου 104 έως 105mm για να συγκρατούν το δοκίμιο. Μεταξύ των μεταλλικών πλακών και του δοκιμίου τοποθετούνται δύο λεπτές μεμβράνες από latex ή Teflon για να μειώνεται οποιαδήποτε τριβή. Το σύστημα και τα επιμέρους τμήματά του φαίνονται στην εικόνα 3.4. Πέρα από το σύστημα δοκιμής ο οδηγός T 342-11 του AASHTO καθορίζει και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν τα δοκίμια προς εξέταση.

(a) Μηχάνημα επιβολής φορτίου

(b) Θάλαμος ελεγχόμενης θερμοκρασίας

Εικόνα 3.4: Σύστημα δοκιμών ΝΑΤ

Αρχικά, το μηχάνημα γυροσκοπικής συμπύκνωσης πρέπει να μπορεί να παρασκευάσει δοκίμια ύψους 170mm σύμφωνα με τη μέθοδο T-312 του AASHTO. Τα δοκίμια κατασκευάζονται τοποθετώντας ασφαλτόμιγμα σε μεταλλικές μήτρες διαμέτρου 152,4mm (6in) και η συμπύκνωση σταματάει όταν φτάσουν το επιθυμητό ύψος των 170mm. Έπειτα κόβονται περιμετρικά με μηχάνημα πυρηνοληψίας σε διάμετρο από 100 έως 104mm. Αφού έχουν κοπεί περιμετρικώς, τα δοκίμια κόβονται και εγκάρσια με τροχό ώστε να έχουν ύψος από 147,5 έως 152,5mm. Οι βάσεις των δοκιμίων πρέπει να μην έχουν κυματισμούς που ξεπερνούν τα 0,05mm κατά οποιαδήποτε διάμετρο και πρέπει να είναι κάθετες στο διαμήκη άξονά τους. Μετά την κοπή μετρούνται τα ποσοστά κενών αέρος στα δοκίμια σύμφωνα με τον οδηγό T-269 του AASHTO και δεν πρέπει να διαφέρουν πάνω από 0,5% από το επιθυμητό ποσοστό. Τα δοκίμια μετά τη διαδικασία κοπής έχουν κατά 1,5 με 2,5% χαμηλότερο ποσοστό κενών αέρος από αυτό που είχαν με το πέρας της συμπύκνωσης. Για να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό κενών αέρος πρέπει να γίνουν δοκιμές συμπύκνωσης με διαφορετικές ποσότητες ασφαλτομίγματος.

3.4.2 Βαθμονόμηση συσκευής και διαδικασία μέτρησης

Πριν από οποιαδήποτε μέτρηση σε δοκίμια πρέπει να έχει εξασφαλιστεί η σωστή βαθμονόμηση και ρύθμιση του συστήματος μέτρησης. Η αρχική βαθμονόμηση του συστήματος γίνεται με την τοποθέτηση του από την κατασκευάστρια εταιρεία και έπειτα πρέπει να επαναλαμβάνεται τουλάχιστον μία φορά το χρόνο ή μετά από 200 δοκιμές. Ακόμη πρέπει να ελέγχεται το σύστημα συλλογής δεδομένων έναντι αυξημένης γωνίας φάσης μεταξύ της επιβολής του φορτίου και της προκύπτουσας παραμόρφωσης. Επίσης πρέπει να ελέγχονται οι μετρητές της παραμόρφωσης (LVDTs) και η συσκευή επιβολής του φορτίου έναντι αποκλίσεων της αρχικής ρύθμισης του συστήματος λόγω επανειλημμένων μετρήσεων. Τέλος ελέγχεται η ικανότητα του θαλάμου να κρατάει την επιθυμητή θερμοκρασία μέσα στα αποδεκτά πλαίσια. Με την εκκίνηση του συστήματος μέτρησης και πριν τη μέτρηση δοκιμίων γίνεται μία δοκιμαστική μέτρηση με ειδικό ελαστομερές το οποίο έχει γνωστή απόκριση έναντι της ημιτονοειδούς φόρτισης και ελέγχεται η σωστή λειτουργία του συστήματος δοκιμής. Αν η δοκιμή του ελαστομερούς έχει τα αναμενόμενα προκαθορισμένα αποτελέσματα τότε η συσκευή λειτουργεί ορθά.

Για την ανάπτυξη κεντρικών καμπυλών χρειάζεται να γίνει η δοκιμή σε διαφορετικές συχνότητες φόρτισης και θερμοκρασίες. Ο οδηγός καθορίζει 6 διαφορετικές συχνότητες, 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25Hz καθώς και 5 θερμοκρασίες, -10, 4, 21, 37 και 54°C. Η δοκιμή πρέπει να γίνει και για τους 30 δυνατούς συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας. Ξεκινώντας από τη μικρότερη θερμοκρασία καταγράφεται η απόκριση των δοκιμίων σε όλες τις διαφορετικές συχνότητες με φθίνουσα σειρά. Έπειτα τα δοκίμια τοποθετούνται στο θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας για την επόμενη σειρά μετρήσεων στην αμέσως μεγαλύτερη θερμοκρασία. Για κάθε θερμοκρασία ο οδηγός προτείνει να πραγματοποιηθούν αρχικά 200 κύκλοι φόρτισης σε συχνότητα 25Hz για την προετοιμασία του δοκιμίου. Επίσης με το πέρας των μετρήσεων για μία συχνότητα απαιτείται μία περίοδος παύσης της φόρτισης δύο λεπτών.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι οδηγίες σχετικά με το χρόνο που χρειάζονται τα δοκίμια για να φτάσουν στην κάθε θερμοκρασία, τα επίπεδα φόρτισης για κάθε θερμοκρασία καθώς και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα.

Πίνακας 3.1: Προτεινόμενος χρόνος προετοιμασίας δοκιμίων

Θερμοκρασία δοκιμίου (°C)	**Χρόνος από θερμοκρασία δοκιμίου (25°C)**	**Χρόνος από δοκιμή σε προηγούμενη θερμοκρασία**
-10	όλη τη νύχτα	όλη τη νύχτα
4	όλη τη νύχτα	4 ώρες
21	1 ώρα	3 ώρες
37	2 ώρες	2 ώρες
54	3 ώρες	1 ώρα

Πίνακας 3.2: Τυπικά επίπεδα φορτίου

Θερμοκρασία δοκιμίου (°C)	**Εύρος τιμών (kPa)**
-10	1400 έως 2800
4	700 έως 1400
21	350 έως 700
37	140 έως 250
54	35 έως 70

Πίνακας 3.3: Αριθμός κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα

Συχνότητα φόρτισης (Hz)	**Αριθμός κύκλων φόρτισης**
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματική διαδικασία

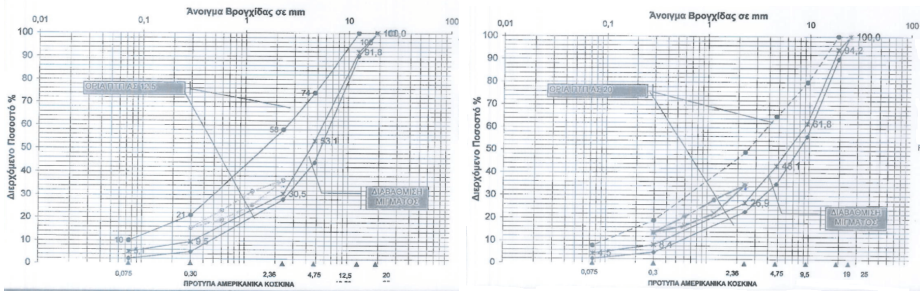
4.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί βασικός στόχος της εργασίας αυτής είναι η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Στο συγκεκριμένο έργο έχουν χρησιμοποιηθεί αδρανή από δύο διαφορετικά λατομεία σε διαφορετικές χιλιομετρικές θέσεις. Κρατήθηκε ποσότητα μίγματος και από τις δύο εγκαταστάσεις παραγωγής, ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο έργο. Με τα ασφαλτομίγματα αυτά παράχθηκαν στο εργαστήριο του Ε.Μ.Π., μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, δοκίμια στα οποία στη συνέχεια έγινε μέτρηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και αναπτύχθηκαν οι κεντρικές καμπύλες για κάθε μίγμα. Επίσης πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD) καθώς και πυρηνοληψία στα δύο τμήματα του οδοστρώματος με τα διαφορετικά αδρανή. Οι πυρήνες αυτοί μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο, όπου και προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας τους και δημιουργήθηκε η κεντρική καμπύλη για κάθε πυρήνα. Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας η οποία χωρίζεται στο εργαστηριακό και το οδικό πείραμα.

4.2 Εργαστηριακό πείραμα

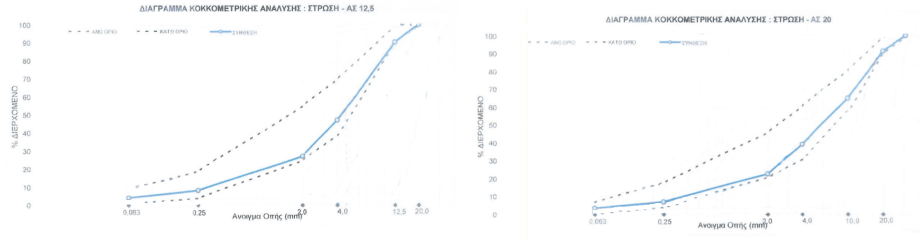
4.2.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων

Το εργαστηριακό πείραμα αφορά τις ενέργειες κατασκευής, ελέγχου και μέτρησης των δοκιμίων που παράχθηκαν στο εργαστήριο με τα διαφορετικά μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο. Για τις ασφαλτικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκαν αδρανή κοκκομετρικής διαβάθμισης σύμφωνα με την πρότυπη τεχνική προδιαγραφή (ΠΤΠ) ΑΣ 20 ως ασφαλτική βάση και ΑΣ 12.5 ως ανώτερη ασφαλτική στρώση. Επίσης κατασκευάστηκαν τα μίγματα αυτών των κοκκομετριών από δύο διαφορετικά λατομεία, στα Αθίκια Κορινθίας και στον Άραξο Αχαΐας. Έτσι, συνολικά έχουμε τέσσερα διαφορετικά ασφαλτομίγματα. Στις εικόνες 4.1 και 4.2 φαίνονται οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των τεσσάρων μιγμάτων.



(a) ΠΤΠ ΑΣ12.5 (b) ΠΤΠ ΑΣ20

Εικόνα 4.1: Κοκκομετρία αδρανών από Άραξο



(a) ΠΤΠ ΑΣ12.5 (b) ΠΤΠ ΑΣ20

Εικόνα 4.2: Κοκκομετρία αδρανών από Αθίκια

Η άσφαλτος και στα τέσσερα μίγματα ως προς τη διεισδυτικότητα είναι τύπου 40/50. Τα ποσοστά κενών αέρα κατά βάρος ασφαλτομίγματος καθώς και η θερμοκρασία μάλθωσης για κάθε μίγμα φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων

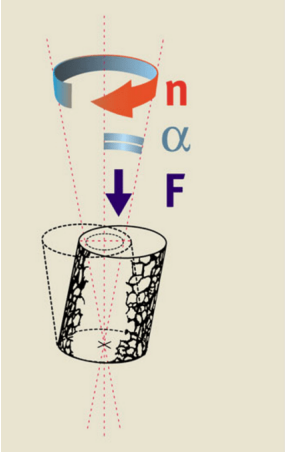
Τύπος ασφαλτομίγματος	**Ποσοστό κενών %**	**Θερμοκρασία μάλθωσης (°C)**
Άραξος ΑΣ 12.5	4.30	56
Άραξος ΑΣ 20	4.20	55
Αθίκια ΑΣ 12.5	4.20	56.3
Αθίκια ΑΣ 20	4.00	56.3

4.2.2 Συμπύκνωση και κοπή δοκιμίων

Από τα χαλαρά ασφαλτομίγματα παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο οδοποιίας του ΕΜΠ 22 δοκίμια ασφαλτομίγματος, χρησιμοποιώντας τη γυροσκοπική μέθοδο (gyratory compaction) σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12697-31 2007. Το μηχάνημα γυροσκοπικής συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.3a. Κατά τη διαδικασία συμπύκνωσης γνωστή ποσότητα ασφαλτομίγματος σε υψηλή θερμοκρασία που το καθιστά εργάσιμο μπαίνει στις ειδικές μεταλλικές μήτρες συμπύκνωσης διαμέτρου 150mm και ύψους 200mm. Εκεί μέσω μεταλλικής πλάκας η οποία παραμένει πάντα σε οριζόντια θέση ασκείται κάθετη δύναμη στο πάνω μέρος της μήτρας ενώ ο διαμήκης άξονας της περιστρέφεται με σταθερή γωνία ως προς την κατακόρυφο. Η σχηματική απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της συσκευής φαίνεται στην εικόνα 4.3b. Η συσκευή είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου παρακολουθείται η διαδικασία και μπορεί να

καθοριστεί ο βαθμός συμπύκνωσης με βάση τον αριθμό περιστροφών ή την απαιτούμενη πυκνότητα. Η συμπύκνωση για την κατασκευή των δοκιμίων σταμάτησε για μία προκαθορισμένη πυκνότητα και αφού επιτεύχθηκε το απαιτούμενο ύψος δοκιμίου που ήταν τα 170mm.

(a) Συσκευή γυροσκοπικής συμπίεσης



Όπου:
•n: αριθμός περιστροφών
•α: γωνία περιστροφής
•F: κάθετη δύναμη

(b) Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας

(c) Κατασκευασθέν δοκίμιο

Εικόνα 4.3: Γυροσκοπική συμπίεση δοκιμίων

Μετά τη συμπύκνωση των δοκιμίων έγινε η κοπή τους περιφερειακά με μηχάνημα πυρηνοληψίας και με τροχό κόπηκαν καθέτως ώστε να έχουν ύψος ίσο με 150mm. Η διαδικασία κοπής και το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.4. Με την κοπή των δοκιμίων αλλάζει η ογκομετρική σύσταση αφού με την αφαίρεση της εξωτερικής επιφάνειας που έχει μεγαλύτερα κενά, μειώνεται το ποσοστό κενών αέρα. Συνεπώς μετά την κοπή των δοκιμίων πρέπει να μετρηθούν τα ποσοστά κενών αέρα ώστε να βρεθούν τα δοκίμια που βρίσκονται σε καλύτερη αντιστοιχία με τη μελέτη σύνθεσης του έργου.

(a) Κοπή περιμετρικά

(b) Κοπή καθέτως

(c) Τελική μορφή

Εικόνα 4.4: Κοπή δοκιμίων

4.2.3 Κενά αέρα δοκιμίων

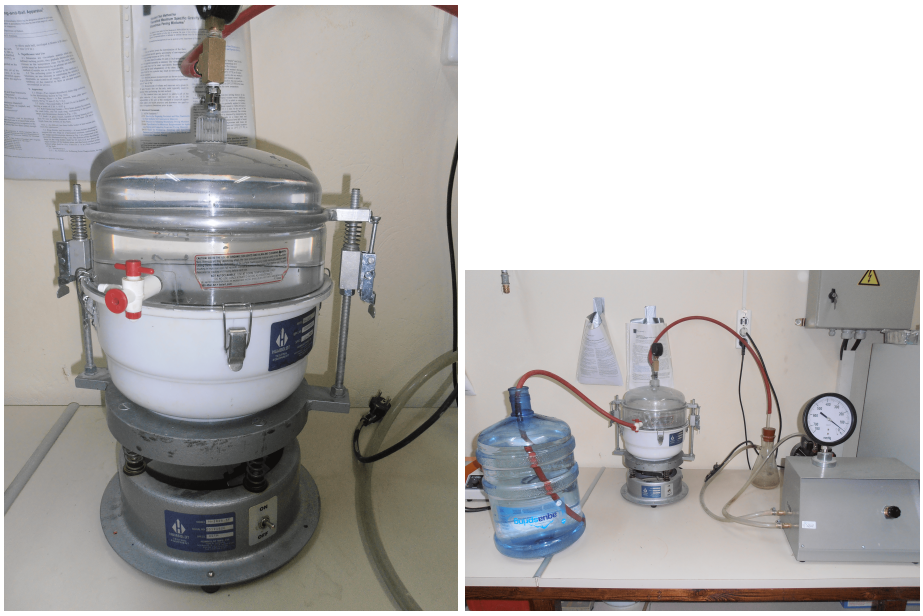
Για τον προσδιορισμό των κενών αέρα πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος του χαλαρού ασφαλτομίγματος. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε η δοκιμή Rice, της οποίας η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 4.5. Η διαδικασία μέτρησης ξεκινάει με το διαχωρισμό των κόκκων του ασφαλτομίγματος με τα χέρια και την τοποθέτηση γνωστής ποσότητας μίγματος στο πυκνόμετρο. Έπειτα το πυκνόμετρο γεμίζει με νερό θερμοκρασίας 25°C και ακολουθεί η δόνηση της συσκευής για 15 λεπτά για να φύγει τυχόν αέρας που έχει εγκλωβιστεί μεταξύ των κόκκων. Το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος υπολογίζεται από τον τύπο 4.1 (Λοΐζος και Πλατή, 2015). Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για κάθε ένα από τα τέσσερα μίγματα.

$$G_{mm} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \tag{4.1}$$

Όπου:

- m_1: η μάζα του πυκνομέτρου (kg)
- m_2: η μάζα του πυκνομέτρου και του ασφαλτομίγματος (kg)
- m_3: η μάζα του πυκνομέτρου με το ασφαλτόμιγμα και το νερό στους 25°C (kg)

- V_p: ο όγκος του πυκνομέτρου (m^3)
- ρ_w: η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου (kg/m^3)



(a) Πυκνόμετρο (b) Πλήρης διάταξη

Εικόνα 4.5: Δοκιμή Rice

Στη συνέχεια προσδιορίστηκε το φαινόμενο ειδικό βάρος των συμπυκνωμένων δοκιμίων. Τα δοκίμια μετά την κοπή τους ζυγίστηκαν σε τρείς συνθήκες. Πρώτα μετρήθηκε το βάρος τους σε ξηρή κατάσταση. Έπειτα εμβαπτίστηκαν σε νερό θερμοκρασίας 25°C για 30 λεπτά και ζυγίστηκαν μέσα στο νερό. Τέλος ζυγίστηκαν αφού βγήκαν από το νερό και σκουπίστηκαν ελαφρώς επιφανειακά. Το φαινόμενο ειδικό βάρος των δοκιμίων υπολογίστηκε μέσω της σχέσης 4.2.

$$G_{mb} = \frac{W_D * \rho_w}{W_{SSD} - W_{sub}} \tag{4.2}$$

Όπου:

- W_D: το βάρος του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση (Dry Weight)(kg)
- W_{sub}: το βάρος του δοκιμίου εμβαπτισμένο στο νερό (Submerged Weight)(kg)
- W_{SSD}: το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (Saturated Surface Dry Weight)(kg)
- ρ_w: η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου (kg/m^3)

Τέλος υπολογίστηκε το ποσοστό των κενών αέρος στα δοκίμια μέσω της σχέσης 4.3.

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100 \tag{4.3}$$

Όπου:

- V_a: το ποσοστό κενών αέρος (%)
- G_{mb}: το φαινόμενο ειδικό βάρος των δοκιμίων (kg/m^3)
- G_{mm}: το μέγιστο ειδικό θεωρητικό βάρος του χαλαρού ασφαλτομίγματος (kg/m^3)

4.2.4 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας δοκιμίων

Γνωρίζοντας τα ποσοστά κενών αέρος για όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν επιλέχθηκαν αυτά που πλησίασαν περισσότερο στις προδιαγραφές της μελέτης σύνθεσης για την επόμενη φάση του εργαστηριακού πειράματος που είναι ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίστηκε στο εργαστήριο οδοποιίας του Ε.Μ.Π. με το σύστημα Nottingham Asphalt Tester (NAT) σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμής T 342-11 AASHTO 2007. Το NAT αποτελείται από ένα θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας στον οποίο βρίσκεται μία συσκευή άσκησης ημιτονοειδούς φόρτισης διαφόρων συχνοτήτων και είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου με κατάλληλο λογισμικό παρακολουθείται η δοκιμή και καταγράφονται τα αποτελέσματά της.

Για τη διεξαγωγή της μέτρησης πρέπει πρώτα στα δοκίμια να εφαρμοστούν αντιδιαμετρικές βάσεις για τη στήριξη των αισθητήρων που μετρούν την παραμόρφωση του δοκιμίου. Μέσω της συσκευής που φαίνεται στην εικόνα 4.6a και με τη χρήση κόλλας υψηλής αντοχής τοποθετούνται 4 μεταλλικές βάσεις στα δοκίμια, δύο ζεύγη αντιδιαμετρικών βάσεων σε σταθερή κάθετη απόσταση μεταξύ τους. Έπειτα στις μεταλλικές βάσεις προσαρμόζονται πλαστικές θήκες οι οποίες είναι σχεδιασμένες για να συγκρατούν τα όργανα μέτρησης της παραμόρφωσης. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 4.6b. Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν στη δοκιμή T 342-11 είναι πολύ μικρές και για την ακριβή μέτρησή τους χρησιμοποιούνται αισθητήρες ακριβείας που ονομάζονται Linear Variable Differential Transformers (LVDTs).

(a) Συσκευή προσαρμογής βάσεων

(b) Τελική μορφή δοκιμίου

Εικόνα 4.6: Προετοιμασία δοκιμίων

Η δοκιμή προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας γίνεται για διάφορες θερμοκρασίες. Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε η δοκιμή στους 4,10,20,25 και 37°C στις συχνότητες 25,10,5,1,0.5 και 0.1 Hz για κάθε θερμοκρασία. Τα δοκίμια έμεναν στον θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας του NAT μέχρι να αποκτήσουν την επιθυμητή θερμοκρασία πριν από κάθε μέτρηση. Η ένδειξη της θερμοκρασίας του θαλάμου δεν είναι αρκετή για να μας δώσει πληροφορίες σχετικά με το εσωτερικό των δοκιμίων όμως. Για το

λόγο αυτό μέσα στο θάλαμο υπάρχει και ειδικό δοκίμιο ελέγχου (εικόνα 4.7), το οποίο έχει ενσωματωμένο εσωτερικά ένα ηλεκτρονικό θερμόμετρο ακριβείας ώστε να διασφαλίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία και στο εσωτερικό των δοκιμίων.

Εικόνα 4.7: Δοκίμιο ελέγχου θερμοκρασίας

Αφού τα δοκίμια φτάσουν την επιθυμητή θερμοκρασία δοκιμής, πριν τη φόρτιση των δοκιμίων γίνεται μία δοκιμαστική μέτρηση (calibration test) σε δοκίμιο από ελαστομερές (εικόνα 4.8a) το οποίο έχει γνωστά χαρακτηριστικά για να υπάρχει έλεγχος ότι το σύστημα δουλεύει σωστά και δεν έχει αποκλίσεις. Εφόσον η δοκιμή ελέγχου αποδώσει τα αναμενόμενα αποτελέσματα στο ελαστομερές, η συσκευή είναι έτοιμη προς χρήση (εικόνα 4.8b).

(a) Μέτρηση δοκιμίου ελέγχου (b) Μέτρηση εργαστηριακού δοκιμίου

Εικόνα 4.8: Δοκιμή δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Τα δοκίμια υπόκεινται σε ημιτονοειδή φόρτιση αρχικά στην υψηλότερη συχνότητα των 25Hz και συνεχίζεται μειώνοντας τη συχνότητα μέχρι τη χαμηλότερη του 0,1Hz. Το φορτίο που ασκείται στα δοκίμια μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία δοκιμής ώστε τα δοκίμια να βρίσκονται στο ιξωδοελαστικό τμήμα απόκρισής τους. Επίσης πρώτα μετράται η απόκριση των δοκιμίων στη χαμηλότερη θερμοκρασία, όπου έχουμε τις μικρότερες παραμένουσες παραμορφώσεις και έπειτα η θερμοκρασία ανεβαίνει μέχρι να φτάσει την ανώτερη καθορισμένη θερμοκρασία δοκιμής. Η τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας κάθε ασφαλτομίγματος ορίστηκε ως ο μέσος όρος των τιμών του συνόλου των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με κάθε ασφαλτόμιγμα.

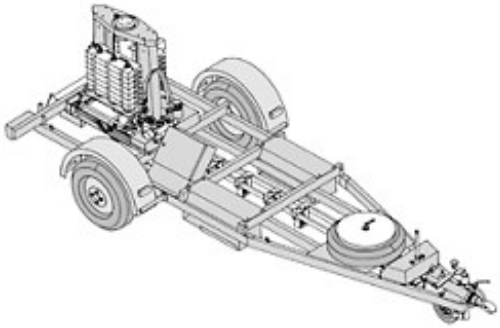
4.3 Οδικό πείραμα

Όπως έχει προαναφερθεί, η σχέση μεταξύ του οδοστρώματος στη φάση μελέτης του έργου με το οδόστρωμα που τελικά κατασκευάστηκε είναι ζωτικής σημασίας. Έτσι για τον έλεγχο του οδοστρώματος που τελικά κατασκευάστηκε πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα από το εργαστήριο οδοποιίας του Ε.Μ.Π στο νέο αυτό οδόστρωμα. Το οδικό πείραμα είχε δύο κύριες διαδικασίες, την πραγματοποίηση μετρήσεων με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD) σε συγκεκριμένες θέσεις του οδοστρώματος και μετέπειτα την πυρηνοληψία στις ίδιες θέσεις. Πιο συγκεκριμένα για την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις και οι πυρήνες από δέκα χαρακτηριστικές θέσεις, πέντε για κάθε τμήμα του δρόμου που κατασκευάστηκε με διαφορετικά αδρανή. Με την κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων των πυρήνων και των καταγραφών του FWD μπορεί να βρεθεί η συσχέτιση των δύο αυτών στοιχείων, στην αρχή του χρόνου σχεδιασμού του οδοστρώματος, η οποία θα αποτελεί βασικό παράγοντα για τη διαχείριση του πλάνου συντήρησης του έργου.

4.3.1 Μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους

Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους είναι από τα πιο ολοκληρωμένα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών των οδοστρωμάτων (εικόνα 4.9). Πρόκειται για ένα προηγμένο εργαλείο που αναπαριστά την πραγματική φόρτιση που δέχονται τα οδοστρώματα από την κυκλοφορία, και μετρά την απόκριση τους. Η διάταξη της συσκευής αποτελείται από ένα πίπτον βάρος (εικόνα 4.10a), το οποίο αφήνεται από συγκεκριμένο ύψος και με τη δύναμη της βαρύτητας προσκρούει μέσω πλαστικών ελατηρίων σε μία κυκλική πλάκα διαμέτρου 300mm που βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Ακριβώς κάτω από την κυκλική πλάκα αλλά και σε καθορισμένες αποστάσεις από αυτή βρίσκονται επιταχυνσιόμετρα-γεώφωνα (εικόνα 4.11), τα οποία μετρούν τις ψευδοελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος. Επίσης κατά τη δοκιμή μετράται και η θερμοκρασία του οδοστρώματος καθώς η θερμοκρασία έχει καθοριστική επιρροή στην απόκριση του οδοστρώματος.

Οι μετρήσεις με το μηχάνημα FWD προσομοιώνουν καλύτερα από όλες τις μεθόδους τη δυναμική φόρτιση που δέχονται τα οδοστρώματα. Ο χρόνος φόρτισης κατά τη δοκιμή κυμαίνεται από 25 έως 40 msec που προσεγγίζει τον πραγματικό χρόνο φόρτισης του οδοστρώματος από την κυκλοφορία. Μέσω της παλμικής φόρτισης από το πίπτον βάρος και την ακριβή καταγραφή των παραμορφώσεων σε διάφορες αποστάσεις από το σημείο φόρτισης μπορούμε με κατάλληλη επεξεργασία των στοιχείων που καταγράφονται κατά τη δοκιμή να εκτιμήσουμε το μέτρο δυσκαμψίας του οδοστρώματος. Αλλάζοντας το βάρος ή και το ύψος της πτώσης μπορούμε να προσομοιάσουμε πολλές διαφορετικές φορτίσεις.



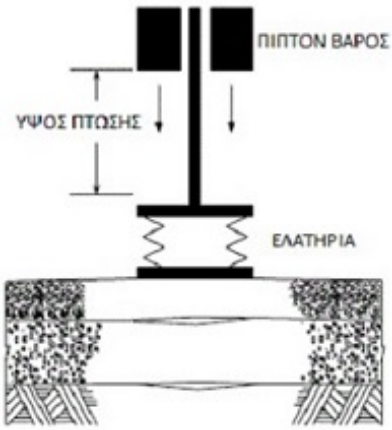
(a) Σχηματική απεικόνιση του FWD

(b) Η συσκευή του ΕΜΠ

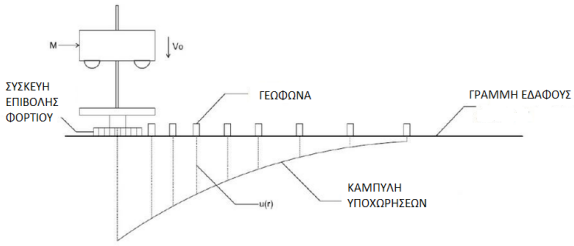
Εικόνα 4.9: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους

Η δοκιμή με FWD φορτίζει δυναμικά το οδόστρωμα, όμως η ανάλυση των μετρήσεων (back analysis) για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας έγινε με στατικές μεθόδους στο πλαίσιο της εργασίας αυτής. Αν και η ανάλυση των μετρήσεων του FWD για την εξαγωγή του μέτρου δυσκαμψίας του οδοστρώματος αποτελεί αντικείμενο ερευνών των τελευταίων χρόνων, λογισμικά που χρησιμοποιούν δυναμικές μεθόδους για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας είναι αρκετά χρονοβόρα και αντικρούουν ένα βασικό πρωτέρημα του FWD που είναι η γρήγορη επισκόπηση της κατάστασης του οδοστρώματος.

Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος από τις μετρήσεις του FWD είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Οι αρχικές παράμετροι του αλγορίθμου προσδιορισμού είναι μία θεωρητική αρχική τιμή του μέτρου ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και τα πάχη των στρώσεων. Από αυτά υπολογίζονται οι θεωρητικές υποχωρήσεις (calculated deflections) και συγκρίνονται με τις πραγματικές υποχωρήσεις (measured deflections) που έχουν καταγραφεί από τα γεώφωνα. Αν οι θεωρητικές υποχωρήσεις πλησιάζουν τις πραγματικές, εντός αποδεκτών ορίων, τότε το μέτρο ελαστικότητας που είχε ορισθεί στην αρχή της διαδικασίας θεωρείται το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης. Σε διαφορετική περίπτωση ορίζεται διαφορετικό αρχικό μέτρο ελαστικότητας και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι οι υποχωρήσεις να συγκλίνουν. Για τη σωστή διαδικασία ανάλυσης (back calculation) των μετρήσεων του FWD είναι επόμενο ότι η εμπειρία του χρήστη για τη σωστή πρώτη εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας είναι αναγκαία.



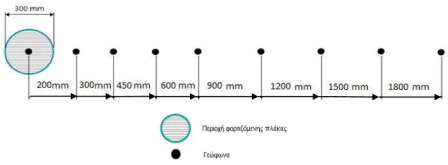
(a) Μηχανισμός πίπτοντος βάρους



(b) Διάταξη συσκευής και υποχωρήσεις

Εικόνα 4.10: Σχηματική απεικόνιση συστήματος και υποχωρήσεων

(a) Διάταξη γεωφώνων



(b) Αποστάσεις γεωφώνων

Εικόνα 4.11: Επιταχυνσιόμετρα - γεώφωνα FWD

4.3.2 Πυρηνοληψία και προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων με το FWD πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία σε δέκα χαρακτηριστικές θέσεις, πέντε από το τμήμα του οδοστρώματος με αδρανή από τα Αθίκια και πέντε από το τμήμα που κατασκευάστηκε με αδρανή από τον Άραξο. Οι ονομασίες των πυρήνων από κάθε τμήμα φαίνονται στον πίνακα 4.2 και προκύπτουν από τη χιλιομετρική τους θέση. Το οδόστρωμα κατασκευάστηκε με δύο διαφορετικά ασφαλτομίγματα, ένα με αδρανή κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΤΠ ΑΣ20 ως ασφαλτική βάση και από επάνω διαστρώθηκε ασφαλτόμιγμα με αδρανή κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΤΠ ΑΣ12.5 για τη στρώση κυκλοφορίας.

Πίνακας 4.2: Κωδικοί ονομασίας πυρήνων

Πυρήνες με αδρανή από Αθίκια	**Πυρήνες με αδρανή από Άραξο**
48+050	93+500
48+150	93+590
48+250	93+650
48+300	93+750
48+400	93+850

Για τη μετέπειτα ανάλυση είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα πάχη των στρώσεων. Έτσι μετρήθηκαν τα πάχη σε 4 αντιδιαμετρικά σημεία κάθε πυρήνα και ορίστηκε ο μέσος όρος τους ως ενιαίο πάχος στρώσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Πάχη στρώσεων πυρήνων

Κωδικός πυρήνα	**Πάχος στρώσης ΑΣ20 (mm)**	**Πάχος στρώσης ΑΣ12.5 (mm)**
48+050	115	54
48+150	123.3	54.3
48+250	121.3	55
48+300	121	55.8
48+400	112.5	58.3
93+500	104	55.8
93+590	117.3	55.3
93+650	107.8	56.3
93+750	115	53.8
93+850	109.3	60.3

Τέλος στους πυρήνες έγινε δοκιμή με το σύστημα NAT (Nottingham Asphalt Tester) του εργαστηρίου οδοποιίας του Ε.Μ.Π. σύμφωνα με τις προδιαγραφές T 342-11 του οδηγού AASHTO 2001. Οι συχνότητες και οι θερμοκρασίες στις οποίες έγινε η δοκιμή είναι ίδιες με αυτές που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, ώστε να γίνει η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έτσι θα υπάρχει μία εικόνα σύγκρισης μεταξύ των ασφαλτομιγμάτων της μελέτης και αυτών που τελικά κατασκευάστηκαν. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, η ανάλυσή τους καθώς και η σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων και των πυρήνων αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επεξεργασία και ανάλυση πειραματικών δεδομένων

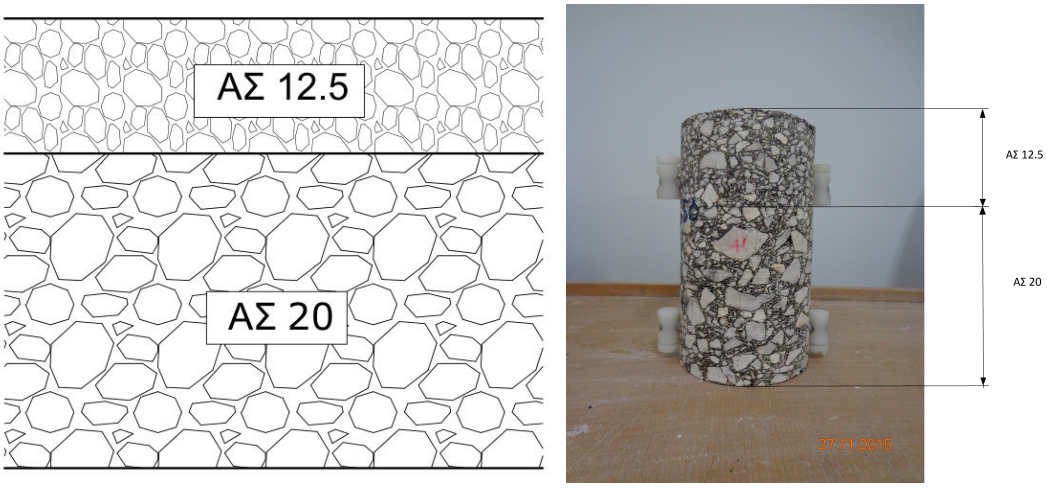
5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανάλυση και η επεξεργασία των στοιχείων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Πρόκειται για το σύνολο των ενεργειών επεξεργασίας και προετοιμασίας των δεδομένων από τις μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας, ώστε να οδηγηθούμε σε μία συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε επόμενο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα προσδιορίζεται το σύνθετο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus) όλων των πυρήνων. Επίσης γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων του FWD ώστε να εκτιμηθεί το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας στις χαρακτηριστικές θέσεις όπου έγινε και πυρηνοληψία μετέπειτα. Τέλος κατασκευάζονται οι κεντρικές καμπύλες (master curves) από το σύνολο των δοκιμών δυναμικής φόρτισης τόσο για τα παρασκευασμένα δοκίμια, όσο και για τους πυρήνες.

5.2 Σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus)

Για την κατασκευή του οδοστρώματος που μελετάται στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά ασφαλτομίγματα, όπως έχει προαναφερθεί. Επιπροσθέτως, σε όλη την έκταση του έργου υπάρχει ασφαλτική βάση και ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας με αδρανή διαφορετικής κοκκομετρίας. Έτσι όλοι οι πυρήνες στους οποίους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας έχουν δύο διακριτές στρώσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1.

Αντιθέτως, τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο είναι κατασκευασμένα εξ'ολοκλήρου με ένα από τα τέσσερα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο έργο. Έγιναν μετρήσεις προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε όλους τους πυρήνες καθώς και σε ένα πλήθος δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Έτσι υπάρχει μία εικόνα του μέτρου δυσκαμψίας του οδοστρώματος που κατασκευάστηκε μέσω των μετρήσεων των πυρήνων, και των ασφαλτομιγμάτων που προέβλεπε η μελέτη σύνθεσης μέσω των μετρήσεων των δοκιμίων. Υπενθυμίζεται ότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων έχει οριστεί από τον μέσο όρο των μετρήσεων όλων των δοκιμίων του ίδιου ασφαλτομίγματος. Σε επόμενη ενότητα υπάρχει αναλυτικότερη εικόνα της επεξεργασίας των μετρήσεων δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και των αποτελεσμάτων τους, τόσο για τα δοκίμια όσο και για τους πυρήνες.



(a) Σχηματική απεικόνιση στρώσεων (b) Πυρήνας

Εικόνα 5.1: Στρώσεις πυρήνων

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των πυρήνων με τα δοκίμια πρέπει να γίνει μία μετατροπή των μετρήσεων ώστε να δημιουργηθεί μία αντιστοιχία των δοκιμίων του εργαστηρίου που είναι μίας, ενιαίας στρώσης με τους πυρήνες του πραγματικού έργου που έχουν δύο ασφαλτικές στρώσεις που επηρεάζουν διαφορετικά την απόκριση του οδοστρώματος. Το σύνολο των δοκιμίων και των πυρήνων στους οποίους έγιναν μετρήσεις δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, καθώς και η διαφορά των στρώσεων μεταξύ τους φαίνεται και στην εικόνα 5.2. Ως εργαλείο μετατροπής της απόκρισης των δοκιμίων ώστε να έρθουν σε αντιστοιχία με τους πυρήνες επιλέχθηκε το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus). Με δεδομένα τα πάχη των δύο στρώσεων κάθε πυρήνα και το μέτρο δυσκαμψίας κάθε ασφαλτομίγματος, που έχει προκύψει από τις μετρήσεις των δοκιμίων, μπορεί να δημιουργηθεί ένας συνδυασμός που να αντιστοιχεί με τους πραγματικούς πυρήνες. Έτσι θα μπορεί να συγκριθεί κάθε πυρήνας του πραγματικού οδοστρώματος με το αντίστοιχο σύνθετο μέτρο που αντιπροσωπεύει το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων της μελέτης κατασκευής.

Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας υπολογίστηκε μέσω του τύπου 5.1 που φαίνεται παρακάτω.

$$E_{comp} = \left(\frac{h_1}{h_t} * E_1^{1/3} + \frac{h_2}{h_t} * E_2^{1/3} \right)^3 \tag{5.1}$$

Όπου:

- E_{comp}: το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας
- h_1: το πάχος της ανώτερης ασφαλτικής στρώσης
- h_2: το πάχος της ασφαλτικής βάσης
- h_t: το συνολικό πάχος του πυρήνα
- E_1: το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας της ανώτερης στρώσης
- E_2: το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής βάσης

Εικόνα 5.2: Σύνολο δοκιμίων (αριστερά) και πυρήνων (δεξιά) που μετρήθηκαν στο εργαστήριο

5.3 Δημιουργία κεντρικών καμπυλών

Το βασικότερο πλεονέκτημα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι ότι δίνει μία εικόνα της απόκρισης του οδοστρώματος για διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία των κεντρικών καμπυλών από τα δεδομένα των μετρήσεων. Συγκρίνοντας τις κεντρικές καμπύλες γίνεται δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ μετρήσεων που μπορεί να έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές συνθήκες. Στην οδοποιία είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως η μηχανική συμπεριφορά ενός νεοκατασκευασθέντος οδοστρώματος διαφέρει της συμπεριφοράς που προέβλεπε η μελέτη του έργου. Με την ανάπτυξη των κεντρικών καμπυλών από τους πυρήνες και από τα δοκίμια του εργαστηρίου ή πιο σωστά με τα σύνθετα μέτρα δυσκαμψίας των δοκιμίων θα υπάρχει μία άμεση εικόνα σύγκρισης.

Οι κεντρικές καμπύλες είναι διαγράμματα που στον οριζόντιο άξονα έχουν τη μειωμένη συχνότητα και στον κατακόρυφο την τιμή του μέτρου δυσκαμψίας. Η μειωμένη συχνότητα σχετίζεται με το χρόνο φόρτισης ενώ η μετατόπιση των σημείων των μετρήσεων για να σχηματίσουν την κεντρική καμπύλη καθορίζεται από το συντελεστή μετατόπισης a(T) ο οποίος εξαρτάται από το πόσο επηρεάζεται το υλικό από αλλαγές στη θερμοκρασία. Ο χρόνος και η θερμοκρασία είναι δύο παράγοντες που έχουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των οδοστρωμάτων και οι κεντρικές καμπύλες καθορίζονται από την επίδραση και των δύο. Κάθε κεντρική καμπύλη γίνεται για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς την οποία επιλέγει ο αναλυτής.

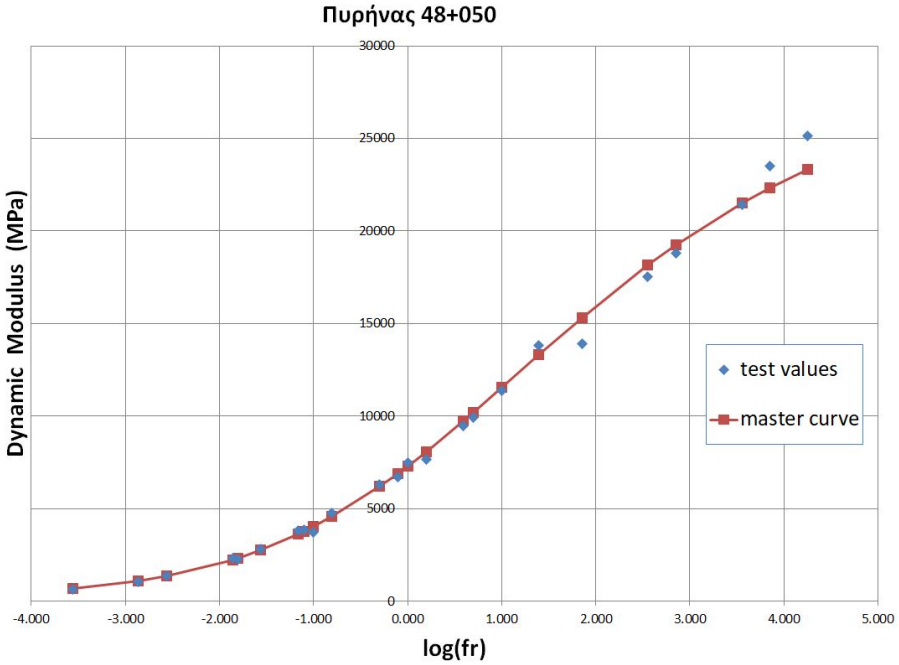
Για τη δημιουργία της κεντρικής καμπύλης πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές της σιγμοειδούς καμπύλης α,β,γ,δ καθώς και οι συντελεστές a,b,c του συντελεστή μετατόπισης. Όλοι οι συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν ταυτόχρονα με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας υπολογιστικών φύλλων (spreadsheet), (όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3), με τα δεδομένα των μετρήσεων. Στο υπολογιστικό φύλλο εισάγονται ως δεδομένα οι θερμοκρασίες της δοκιμής, οι συχνότητες φόρτισης και οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας που μετρήθηκαν στο εργαστήριο κατά τη δοκιμή. Έπειτα υπολογίζονται οι λογάριθμοι της μειωμένης συχνότητας και το θεωρητικό μέτρο δυσκαμψίας που υπολογίζεται μέσω της σχέσης 3.9. Ταυτόχρονα το σύνολο των συντελεστών υπολογίζονται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας έτσι ώστε το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς

μετρημένων και θεωρητικών τιμών του μέτρου δυσκαμψίας να είναι το ελάχιστο δυνατό.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Παράγοντας μετατόπισης log a(T)			Master Curve						Tref (oC)	Tref (oF)	log a(T)
2										30	86	-1.56505
3	a	b	c	α	β	γ	δ			35	95	-2.28420
4	0.000261	-0.127106	7.437384	2.455248	-1.153029	0.510881	1.159054			26	78.8	-0.95931
5										20	68	0.00000
6												
7	T (oC)	f (Hz)	E* (Mpa)	E* (ksi)	log (E*)	T (F)	log α(T)	$\log(f_r)$= log(f)+logα(T)	Predicted log(E*)	Σφάλμα ([I]-[E])^2	E* (ksi) predicted	E* (MPa) predicted
8	4	25	25117	3643	3.561453	39.2	2.856	4.253	3.529	0.001	3382	23316
9	4	10	23520	3411	3.532913	39.2	2.856	3.856	3.511	0.000	3241	22349
10	4	5	21435	3109	3.492603	39.2	2.856	3.555	3.494	0.000	3122	21522
11	4	1	18803	2727	3.435712	39.2	2.856	2.856	3.446	0.000	2795	19272
12	4	0.5	17508	2539	3.404712	39.2	2.856	2.555	3.421	0.000	2635	18165
13	4	0.1	13901	2016	3.30453	39.2	2.856	1.856	3.347	0.002	2222	15318
14	20	25	13813	2003	3.301754	68	0.000	1.398	3.286	0.000	1930	13309
15	20	10	11351	1646	3.216517	68	0.000	1.000	3.223	0.000	1672	11531
16	20	5	9945	1442	3.159088	68	0.000	0.699	3.170	0.000	1479	10200
17	20	1	7477	1084	3.035201	68	0.000	0.000	3.025	0.000	1060	7307
18	20	0.5	6303	914	2.961023	68	0.000	-0.301	2.954	0.000	899	6196
19	20	0.1	3733	541	2.733531	68	0.000	-1.000	2.768	0.001	586	4040
20	25	25	9458	1372	3.137264	77	-0.804	0.594	3.150	0.000	1414	9746
21	25	10	7640	1108	3.0446	77	-0.804	0.196	3.069	0.001	1172	8081
22	25	5	6685	970	2.986612	77	-0.804	-0.105	3.001	0.000	1002	6909
23	25	1	4779	693	2.840846	77	-0.804	-0.804	2.823	0.000	665	4582
24	25	0.5	3869	561	2.749101	77	-0.804	-1.105	2.738	0.000	547	3771
25	25	0.1	2252	327	2.514137	77	-0.804	-1.804	2.528	0.000	337	2327
26	37	25	3801	551	2.741399	98.6	-2.560	-1.162	2.721	0.000	526	3629
27	37	10	2818	409	2.611399	98.6	-2.560	-1.560	2.603	0.000	401	2763
28	37	5	2329	338	2.528559	98.6	-2.560	-1.861	2.510	0.000	324	2233
29	37	1	1363	198	2.295955	98.6	-2.560	-2.560	2.292	0.000	196	1350
30	37	0.5	1064	154	2.188487	98.6	-2.560	-2.861	2.199	0.000	158	1090
31	37	0.1	652	95	1.975593	98.6	-2.560	-3.560	1.992	0.000	98	678
32									ΣΥΝΟΛΙΚΟ	0.008		

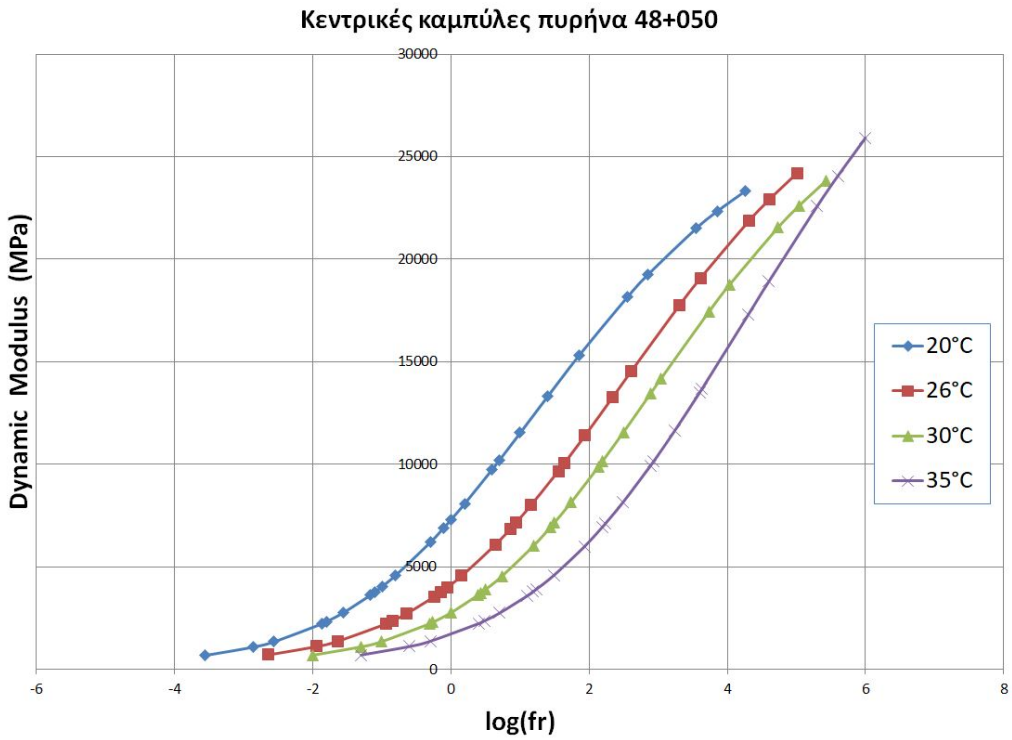
Εικόνα 5.3: Υπολογιστικό φύλλο πυρήνα 48+050

Από αυτό το υπολογιστικό φύλλο μπορεί να δημιουργηθεί η κεντρική καμπύλη του πυρήνα 48+050 που φαίνεται στην εικόνα 5.4. Στο διάγραμμα φαίνονται τα σημεία της κεντρικής καμπύλης (master curve) αλλά και τα σημεία των μέτρων δυσκαμψίας που μετρήθηκαν κατά τη δοκιμή στο εργαστήριο (test values).



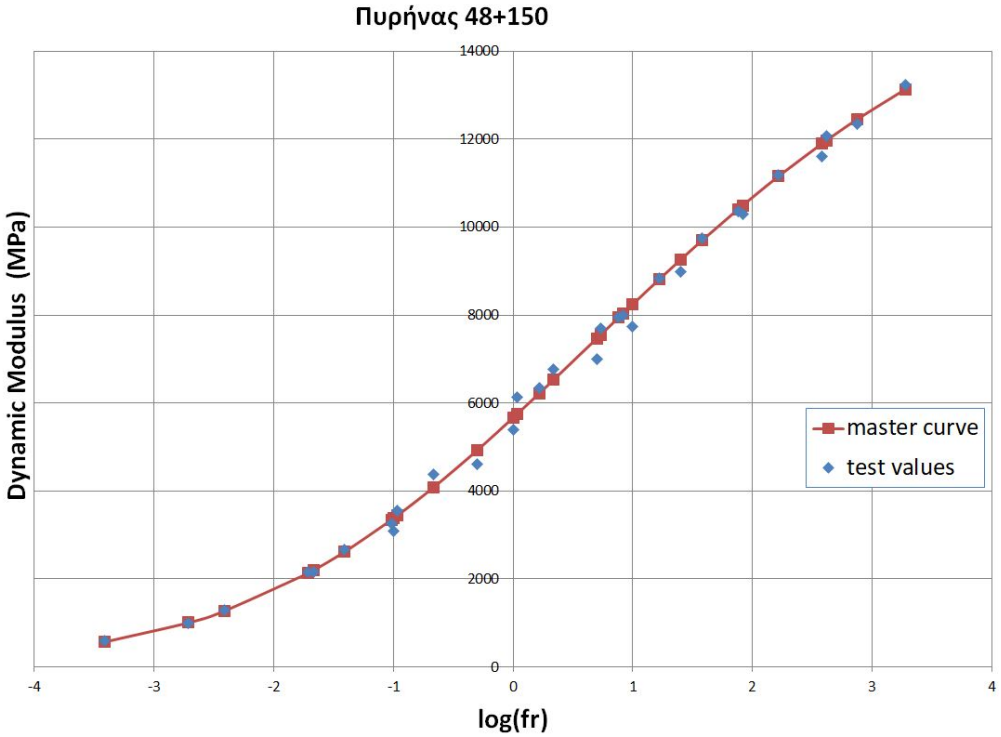
Εικόνα 5.4: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+050 στους 20°C

Δημιουργώντας τις κεντρικές καμπύλες με διαφορετικές θερμοκρασίες αναφοράς και συνδυάζοντας αυτές σε ένα γράφημα, γίνεται εμφανής η επιρροή της θερμοκρασίας στην αντοχή των ασφαλτομιγμάτων. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 5.5 όπου οι κεντρικές καμπύλες του πυρήνα 48+050 για διαφορετικές θερμοκρασίες αναφοράς έχουν τοποθετηθεί σε ένα γράφημα για την άμεση συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

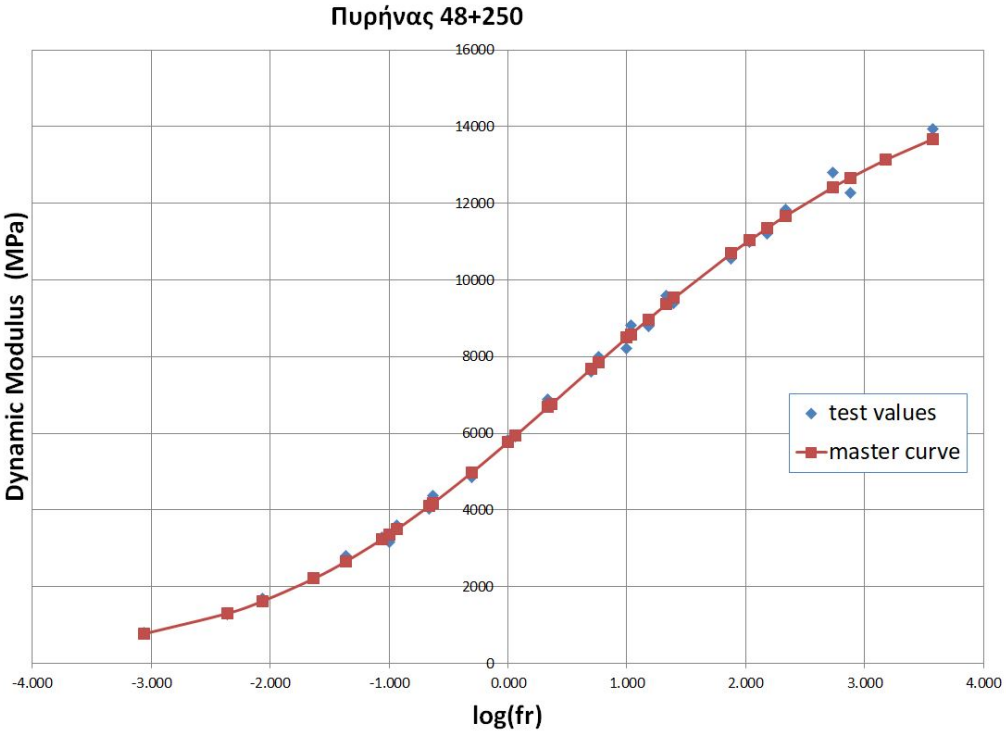


Εικόνα 5.5: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα 48+050 για διάφορες θερμοκρασίες

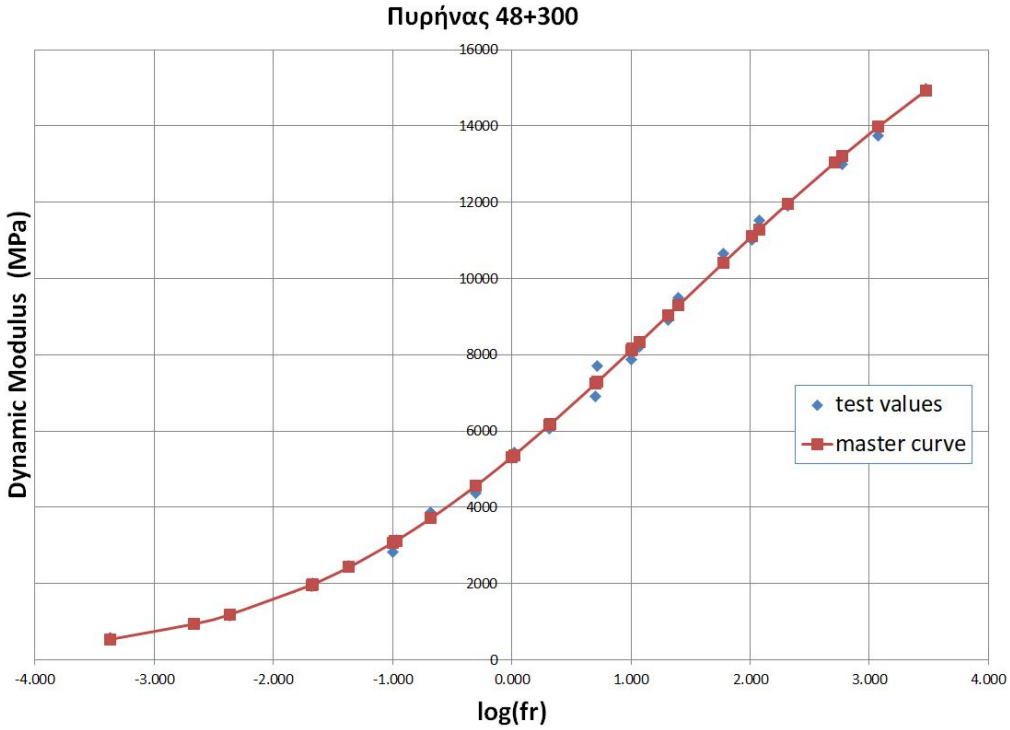
Με την ίδια διαδικασία δημιουργήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω οι κεντρικές καμπύλες για όλους τους πυρήνες, με επιλεγμένη θερμοκρασία αναφοράς τους 20°C που είναι μία αντιπροσωπευτική μέση τιμή για το κλίμα της Ελλάδας.



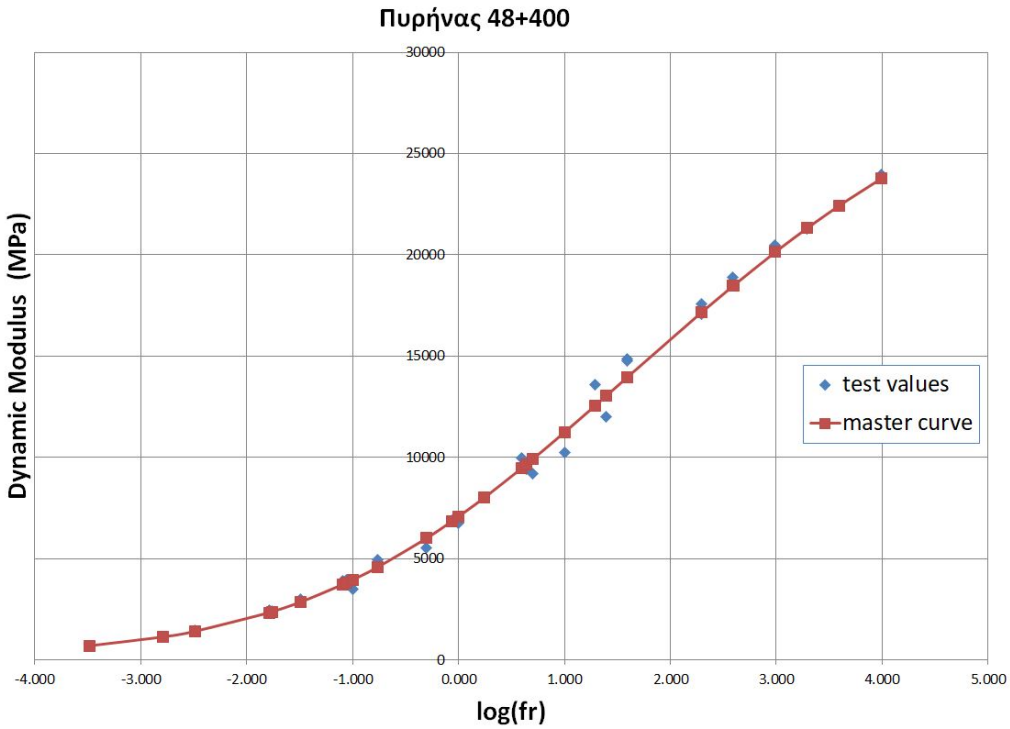
Εικόνα 5.6: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+150 στους 20°



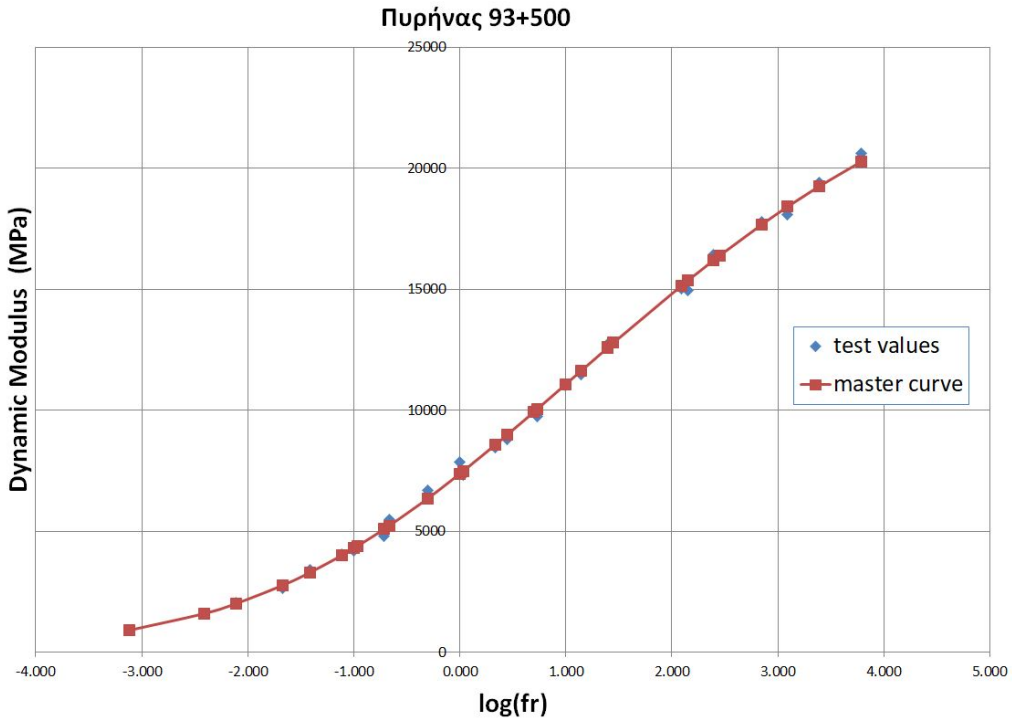
Εικόνα 5.7: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+250 στους 20°



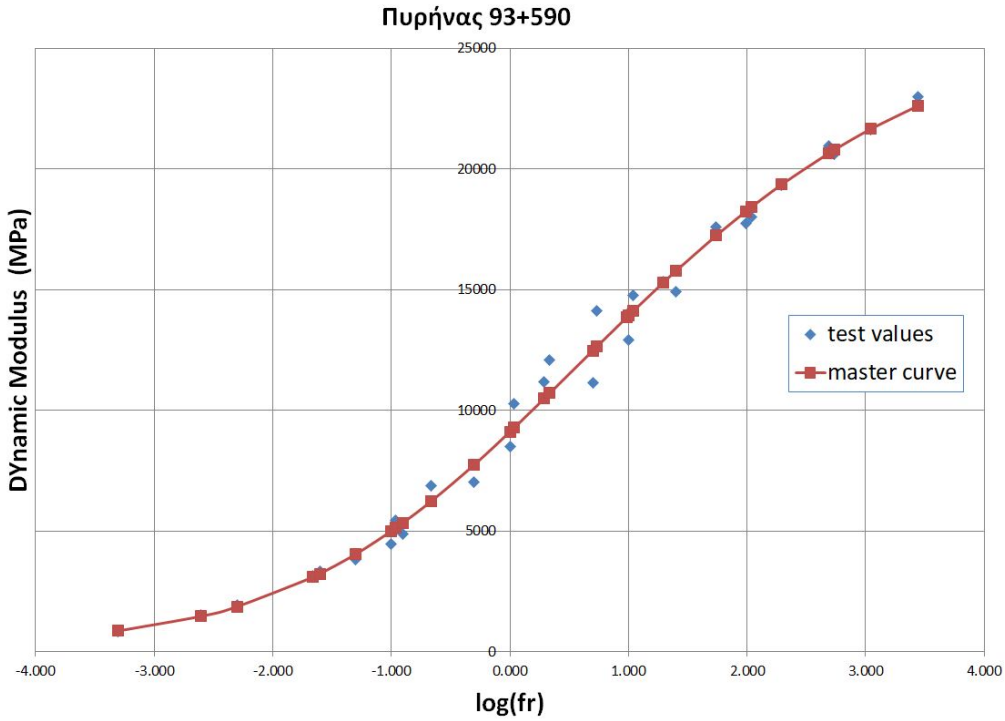
Εικόνα 5.8: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+300 στους 20°



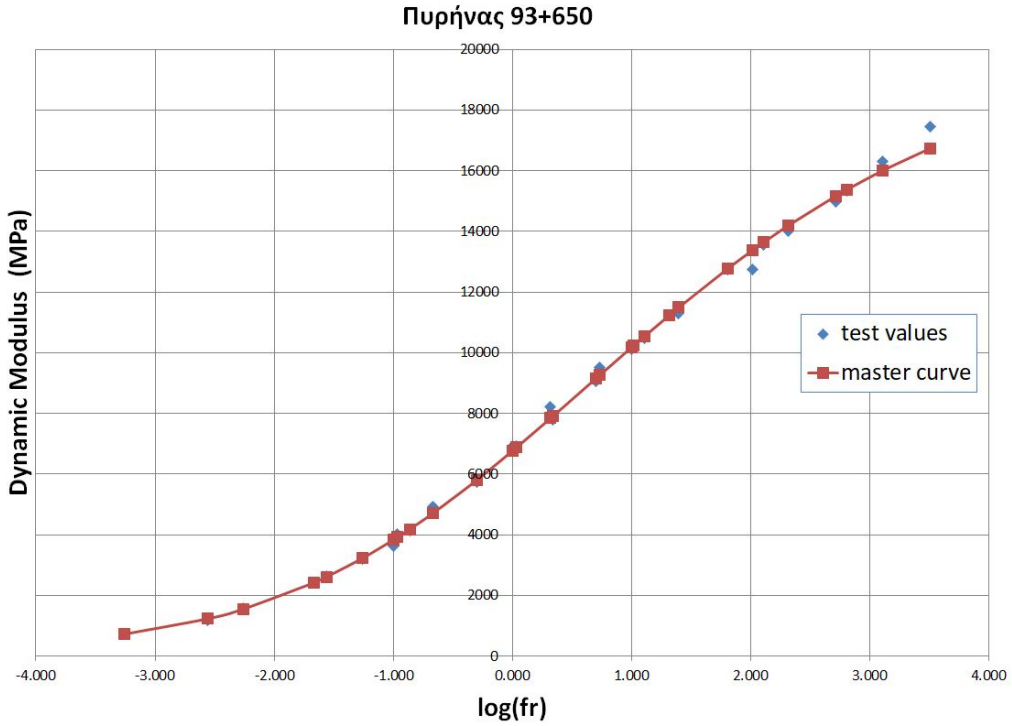
Εικόνα 5.9: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 48+400 στους 20°



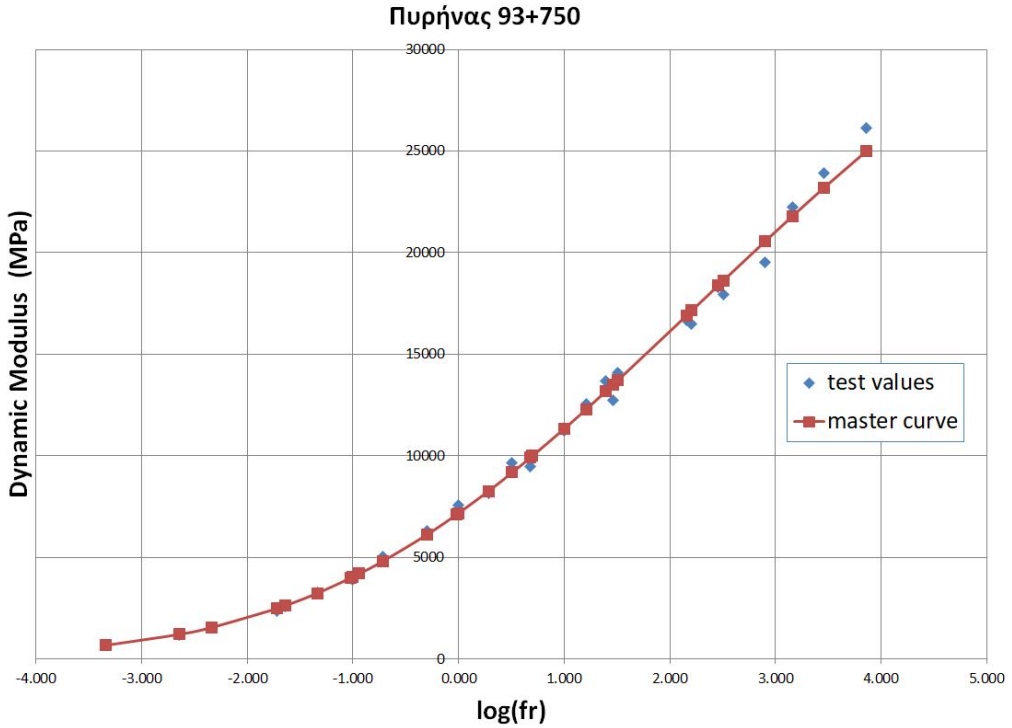
Εικόνα 5.10: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+500 στους 20°



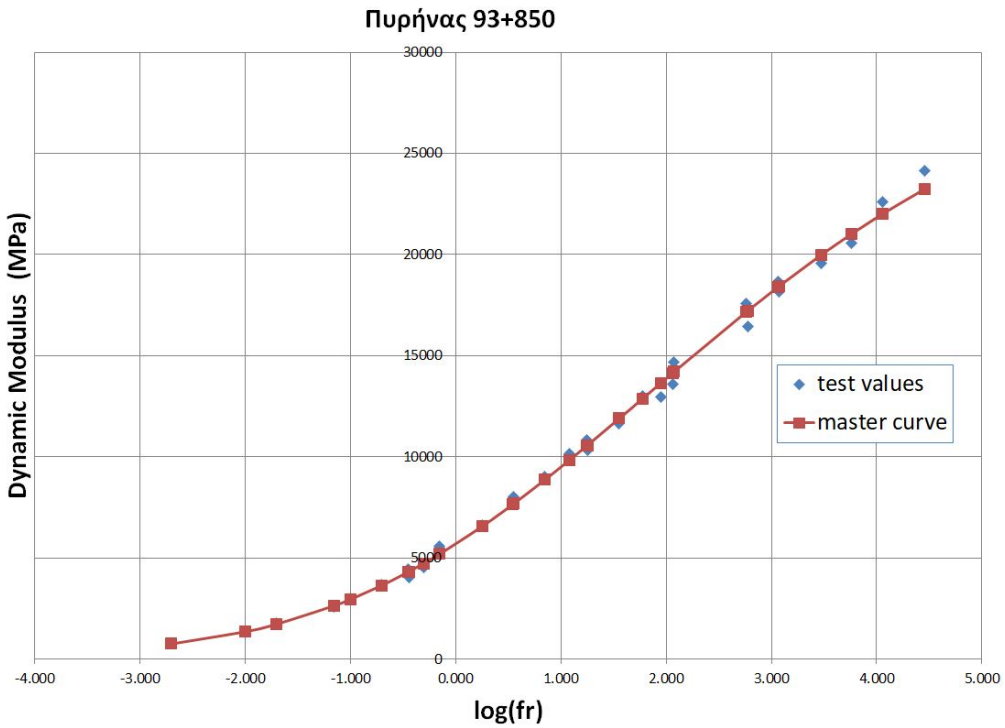
Εικόνα 5.11: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+590 στους 20°



Εικόνα 5.12: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+650 στους 20°



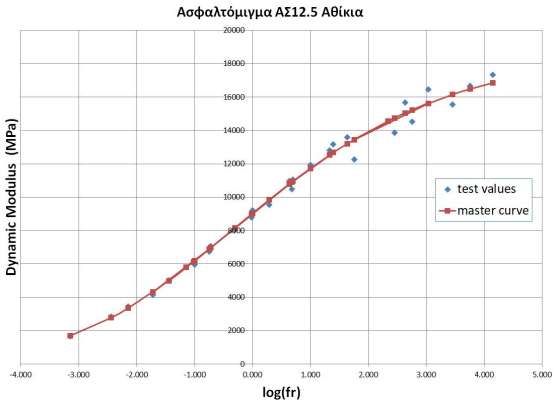
Εικόνα 5.13: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+750 στους 20°



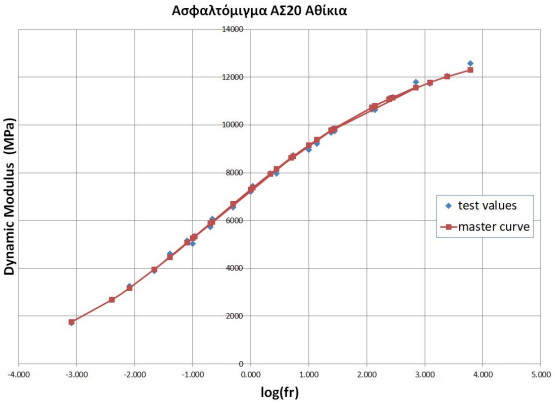
Εικόνα 5.14: Κεντρική καμπύλη πυρήνα 93+850 στους 20°

Για τη σύγκριση των πυρήνων και κατ'επέκταση του πραγματικού οδοστρώματος με αυτό της μελέτης του έργου πρέπει να δημιουργηθούν κεντρικές καμπύλες με τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων της μελέτης σύνθεσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό των σύνθετων μέτρων δυσκαμψίας που αντιστοιχούν σε κάθε πυρήνα. Για τον υπολογισμό του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας πρέπει να προηγηθεί η επεξεργασία και η ανάλυση των εργαστηριακών μετρήσεων των δοκιμίων για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας κάθε ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιήθηκε στο έργο. Έγιναν εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο T 342-11 του AASHTO σε τέσσερα δοκίμια από κάθε ασφαλτόμιγμα δηλαδή σε σύνολο 16 δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο οδοποιίας του Ε.Μ.Π. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθε τεσσάρων δοκιμίων από το ίδιο ασφαλτόμιγμα συγκεντρώθηκαν σε ένα υπολογιστικό φύλλο με την τιμή του μέτρου δυσκαμψίας κατά τη δοκιμή (test value) να είναι ο μέσος όρος τους και έτσι κατέστη δυνατή η δημιουργία της κεντρικής καμπύλης κάθε ασφαλτομίγματος. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία αναφοράς τους 20°C.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν υπολογιστικά φύλλα για τη δημιουργία των κεντρικών καμπυλών των σύνθετων μέτρων δυσκαμψίας. Στη θέση του μέτρου δυσκαμψίας κατά τις μετρήσεις εισήχθησαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των δύο ασφαλτομιγμάτων κοκκομετρίας ΑΣ12.5 και ΑΣ20. Επίσης γνωρίζοντας τα πάχη των στρώσεων κάθε πυρήνα υπολογίζεται το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας μέσω του τύπου 5.1 για όλες τις συχνότητες και θερμοκρασίες της δοκιμής. Ως παράδειγμα, το υπολογιστικό φύλλο για τη δημιουργία της κεντρικής καμπύλης σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας (συμβολιζόμενο ως E*comp) που αντιστοιχεί στον πυρήνα 48+050 φαίνεται στην εικόνα 5.17.

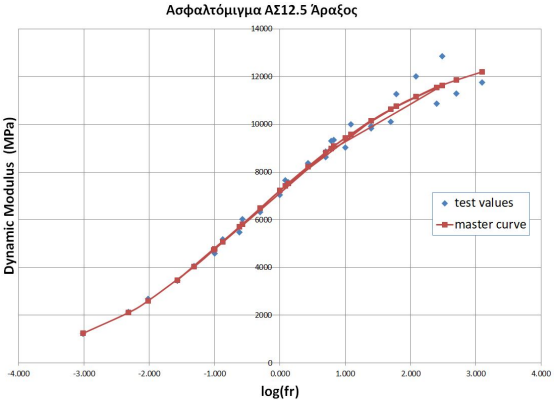


(a) Κεντρική καμπύλη ΑΣ12.5

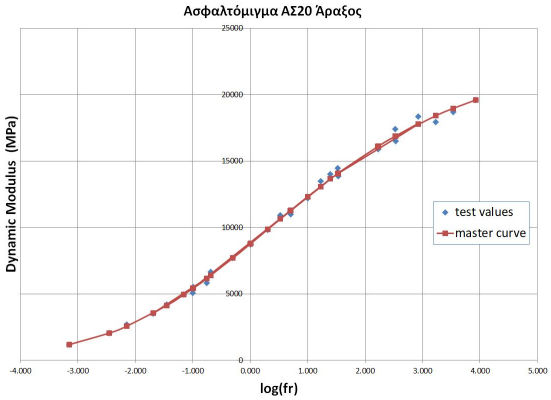


(b) Κεντρική καμπύλη ΑΣ20

Εικόνα 5.15: Κεντρικές καμπύλες ασφαλτομιγμάτων με αδρανή από τα Αθίκια



(a) Κεντρική καμπύλη ΑΣ12.5



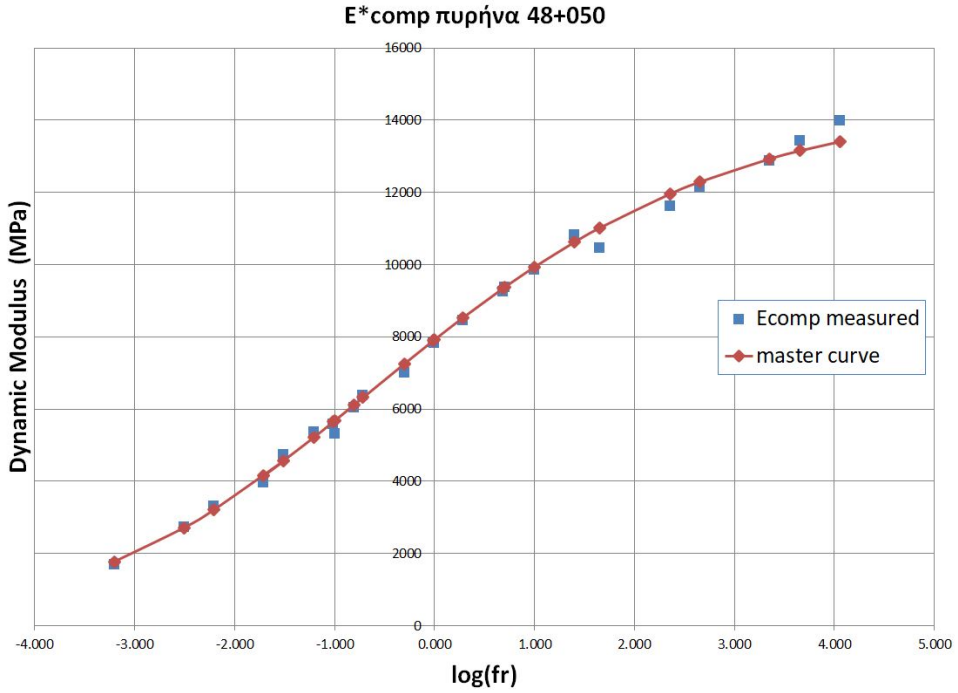
(b) Κεντρική καμπύλη ΑΣ20

Εικόνα 5.16: Κεντρικές καμπύλες ασφαλτομιγμάτων με αδρανή από τον Άραξο

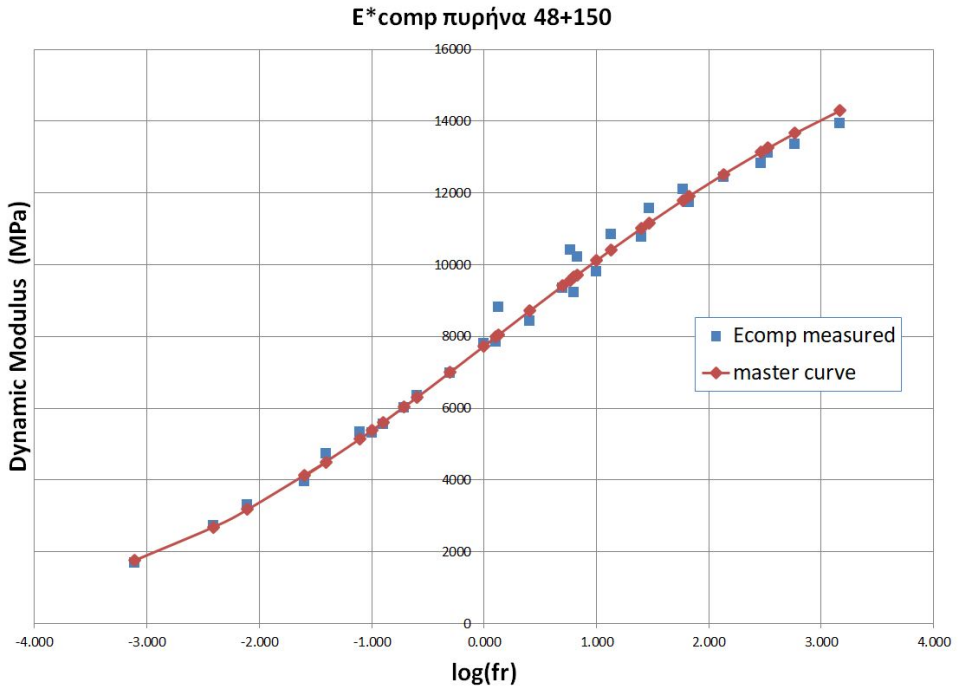
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Παράγοντας μετατόπισης log a(T)			Master Curve							Πάχη πυρήνα	
2											h1= 54	
3	a	b	c	α	β	γ	δ				h2= 115	
4	0.000339	-0.128568	7.175221	2.229341	-2.000132	0.510974	1.096823				ht= 169	
5												
6	T (oC)	f (Hz)	E* tested ΑΣ 12.5 (ksi)	E* tested ΑΣ20 (ksi)	E* comp (ksi)	Log (E* composite)	T (F)	log α(T)	log(fr)= log(f)+logα(T)	Predicted log(E*)	Σφάλμα ([K]-[G])^2	E* (MPa) predicted
7	4	25	2512	1825	2029	3.3073	39.2	2.656	4.054	3.289	0.000	13406
8	4	10	2418	1748	1947	3.2893	39.2	2.656	3.656	3.281	0.000	13154
9	4	5	2254	1701	1867	3.2710	39.2	2.656	3.355	3.273	0.000	12932
10	4	1	2107	1613	1761	3.2459	39.2	2.656	2.656	3.251	0.000	12293
11	4	0.5	2011	1544	1684	3.2265	39.2	2.656	2.355	3.239	0.000	11958
12	4	0.1	1777	1403	1516	3.1807	39.2	2.656	1.656	3.204	0.001	11025
13	20	25	1910	1424	1569	3.1957	68	0.000	1.398	3.188	0.000	10621
14	20	10	1730	1299	1428	3.1547	68	0.000	1.000	3.159	0.000	9938
15	20	5	1603	1254	1360	3.1334	68	0.000	0.699	3.133	0.000	9373
16	20	1	1338	1046	1134	3.0547	68	0.000	0.000	3.060	0.000	7924
17	20	0.5	1164	950	1015	3.0067	68	0.000	-0.301	3.022	0.000	7258
18	20	0.1	864	730	771	2.8872	68	0.000	-1.000	2.916	0.001	5680
19	25	25	1520	1265	1343	3.1280	77	-0.715	0.683	3.132	0.000	9342
20	25	10	1385	1156	1226	3.0885	77	-0.715	0.285	3.093	0.000	8536
21	25	5	1276	1080	1141	3.0571	77	-0.715	-0.016	3.059	0.000	7890
22	25	1	1027	879	924	2.9659	77	-0.715	-0.715	2.962	0.000	6323
23	25	0.5	884	774	808	2.9075	77	-0.715	-1.016	2.913	0.000	5645
24	25	0.1	600	564	576	2.7601	77	-0.715	-1.715	2.779	0.000	4148
25	37	25	975	831	876	2.9423	98.6	-2.206	-0.808	2.948	0.000	6112
26	37	10	840	749	777	2.8906	98.6	-2.206	-1.206	2.879	0.000	5223
27	37	5	730	668	687	2.8370	98.6	-2.206	-1.507	2.822	0.000	4576
28	37	1	499	473	481	2.6825	98.6	-2.206	-2.206	2.669	0.000	3220
29	37	0.5	410	390	396	2.5979	98.6	-2.206	-2.507	2.596	0.000	2719
30	37	0.1	241	249	246	2.3915	98.6	-2.206	-3.206	2.411	0.000	1776
31										ΣΥΝΟΛΙΚΟ	0.004	

Εικόνα 5.17: Υπολογιστικό φύλλο E*comp πυρήνα 48+050

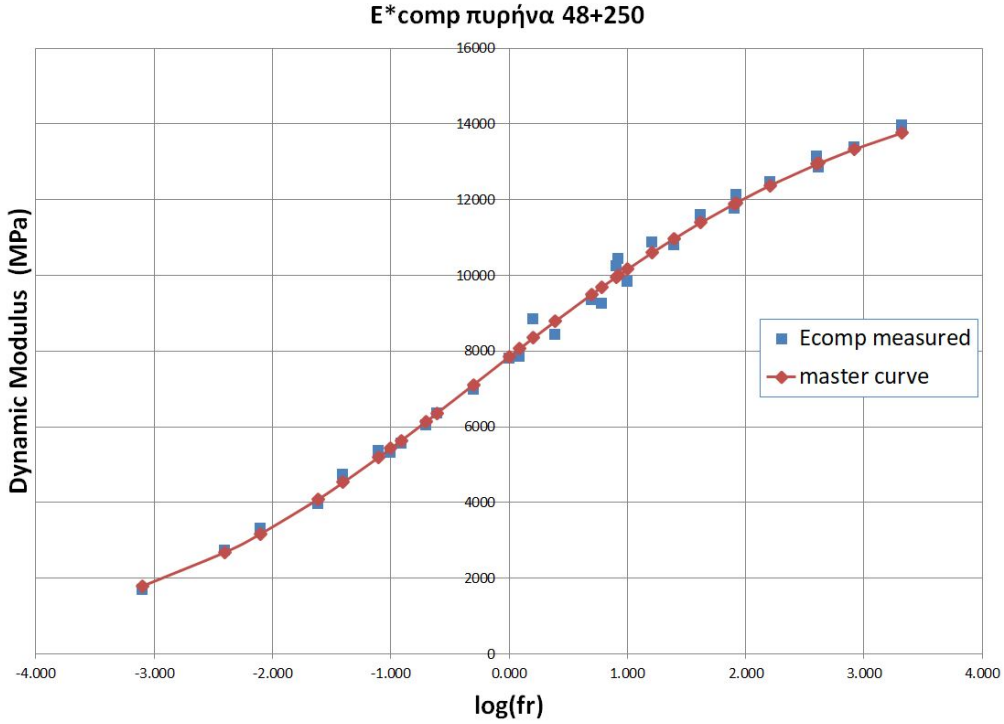
Με τον ίδιο τρόπο όπως με τους πυρήνες και τα ασφαλτομίγματα δημιουργήθηκαν οι κεντρικές καμπύλες των σύνθετων μέτρων δυσκαμψίας για κάθε πυρήνα που παρουσιάζονται παρακάτω. Στη θέση των σημείων του μέτρου δυσκαμψίας κατά τη δοκιμή (test values) έχει τοποθετηθεί το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας το οποίο υπολογίζεται από τις μετρήσεις των δοκιμίων για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης κατά τη δοκιμή και συμβολίζεται στο γράφημα ως Ecomp measured.



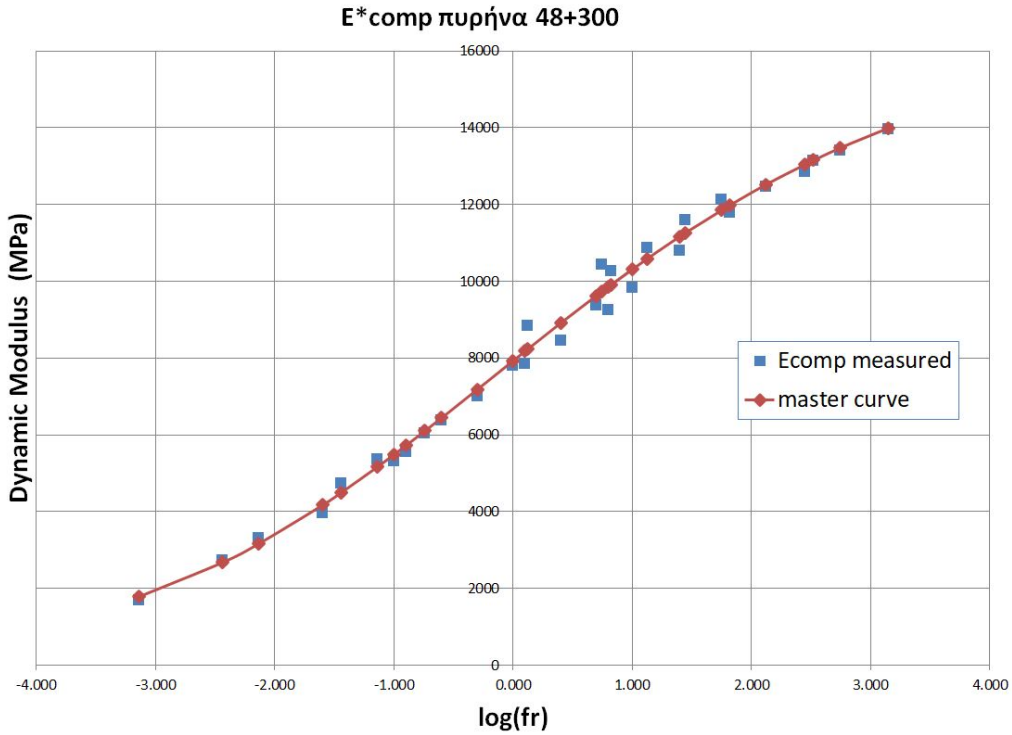
Εικόνα 5.18: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+050 στους 20°



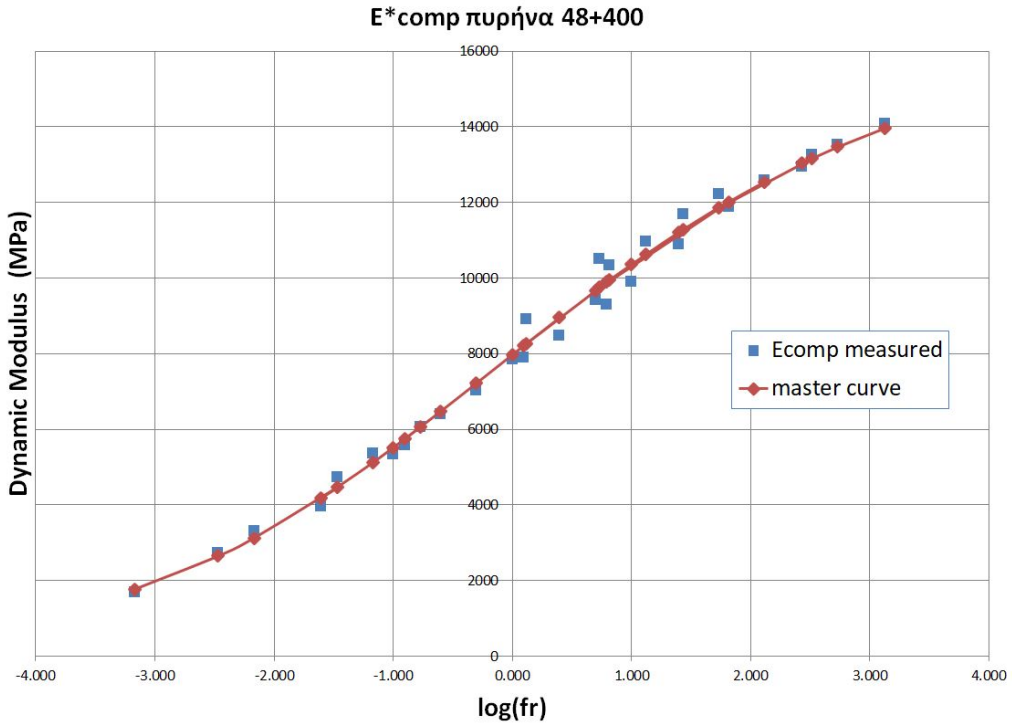
Εικόνα 5.19: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+150 στους 20°



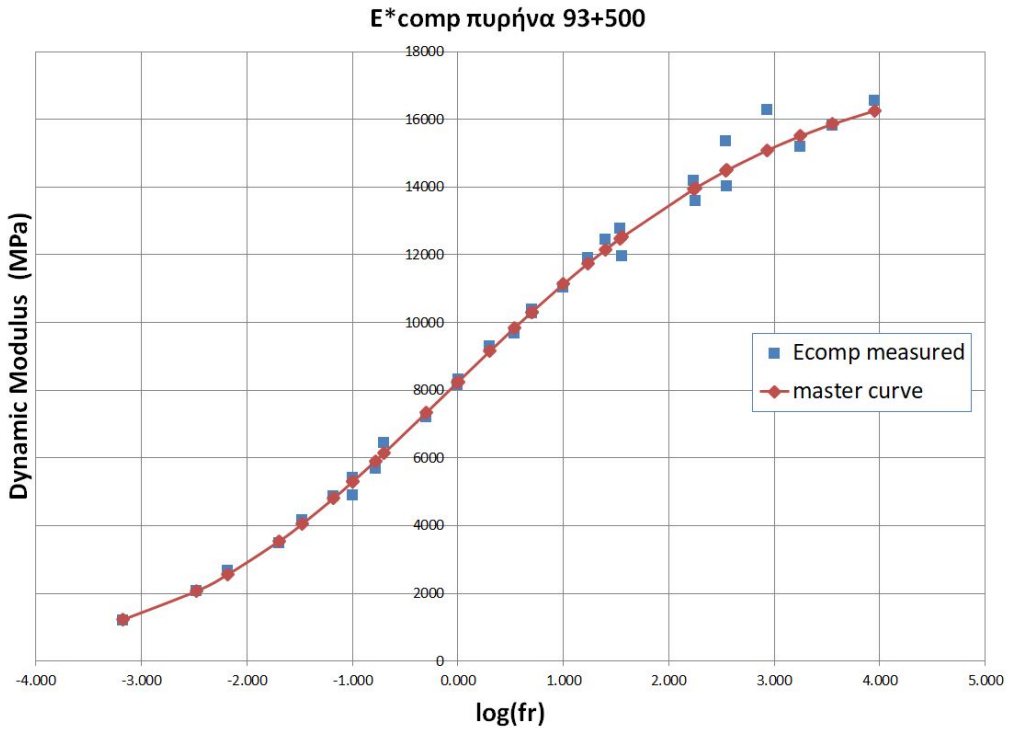
Εικόνα 5.20: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+250 στους 20°



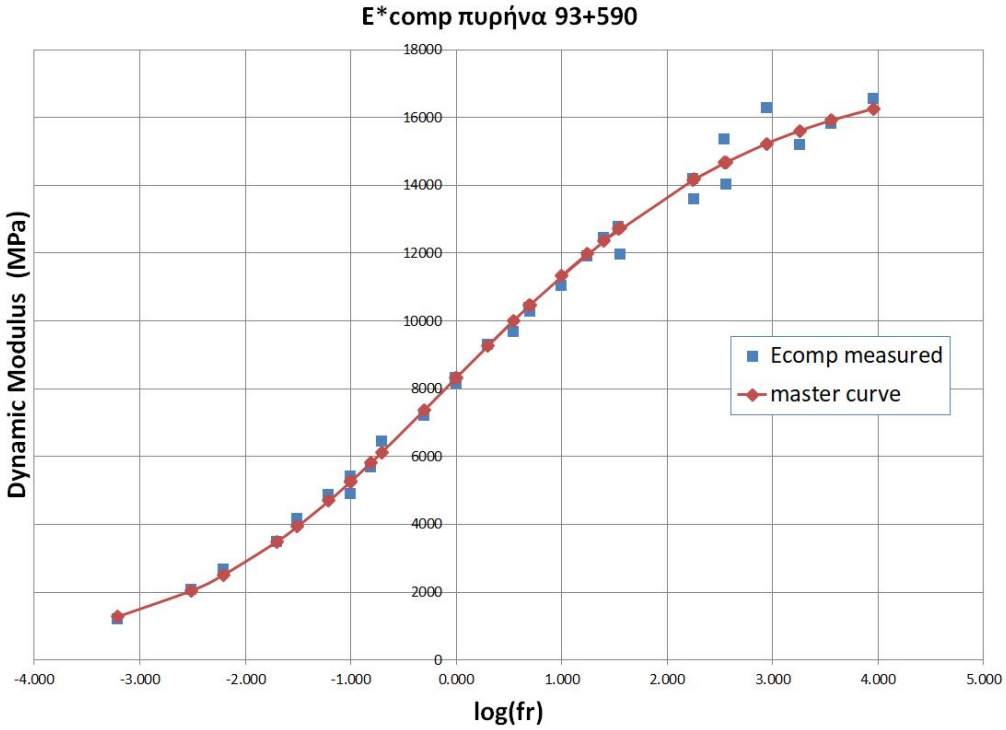
Εικόνα 5.21: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+300 στους 20°



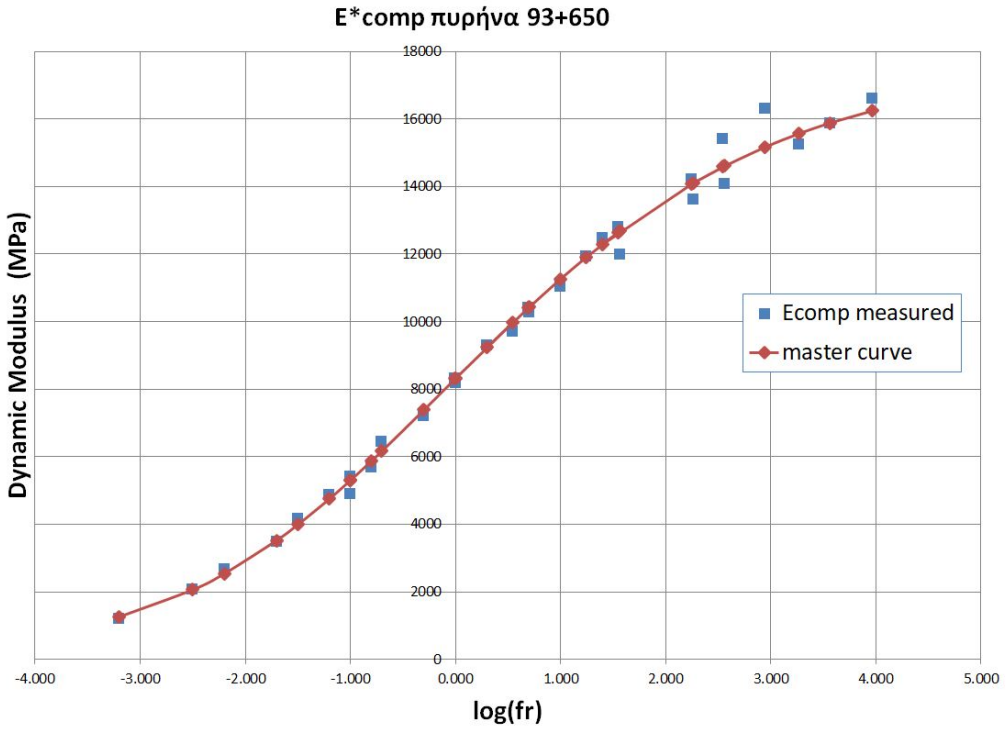
Εικόνα 5.22: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 48+400 στους 20°



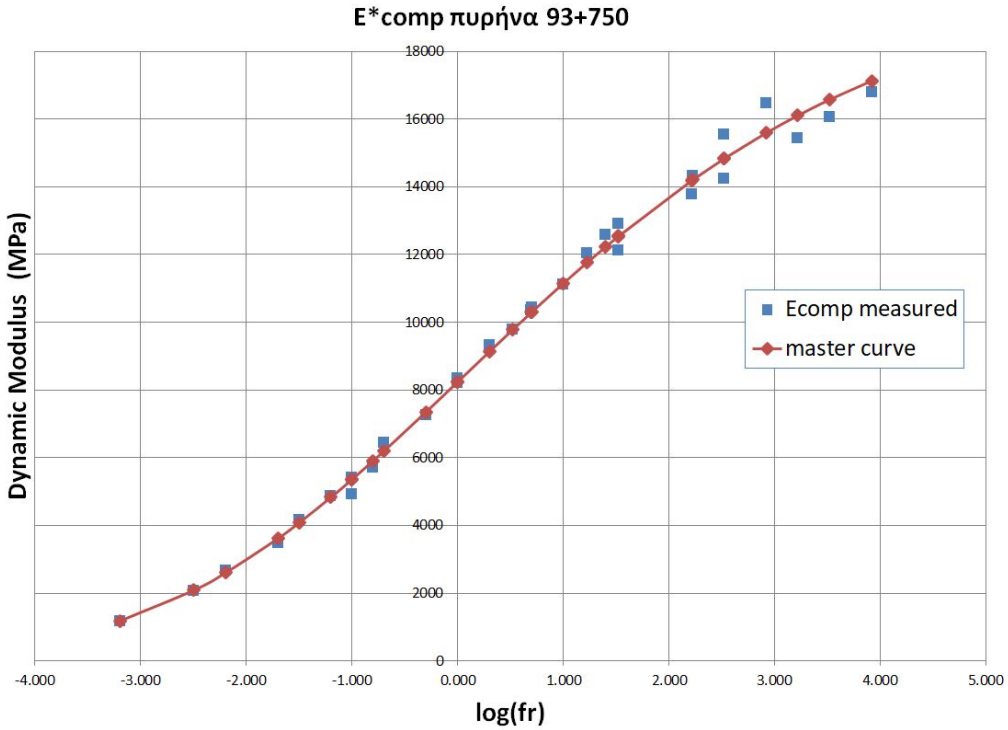
Εικόνα 5.23: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+500 στους 20°



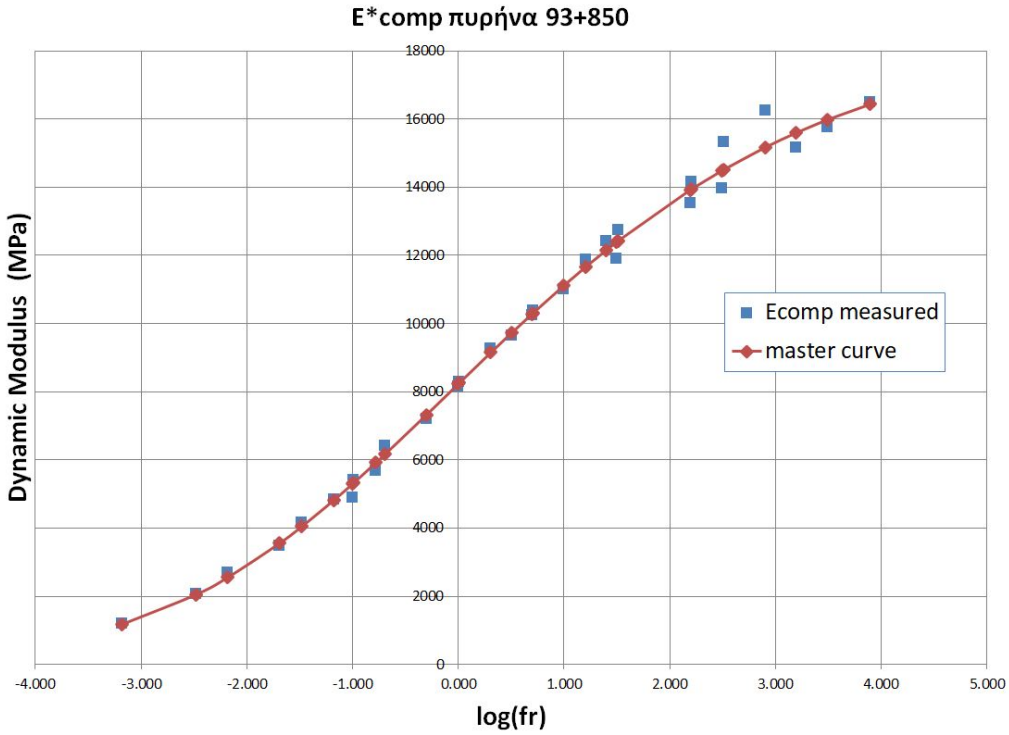
Εικόνα 5.24: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+590 στους 20°



Εικόνα 5.25: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+650 στους 20°



Εικόνα 5.26: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+750 στους 20°



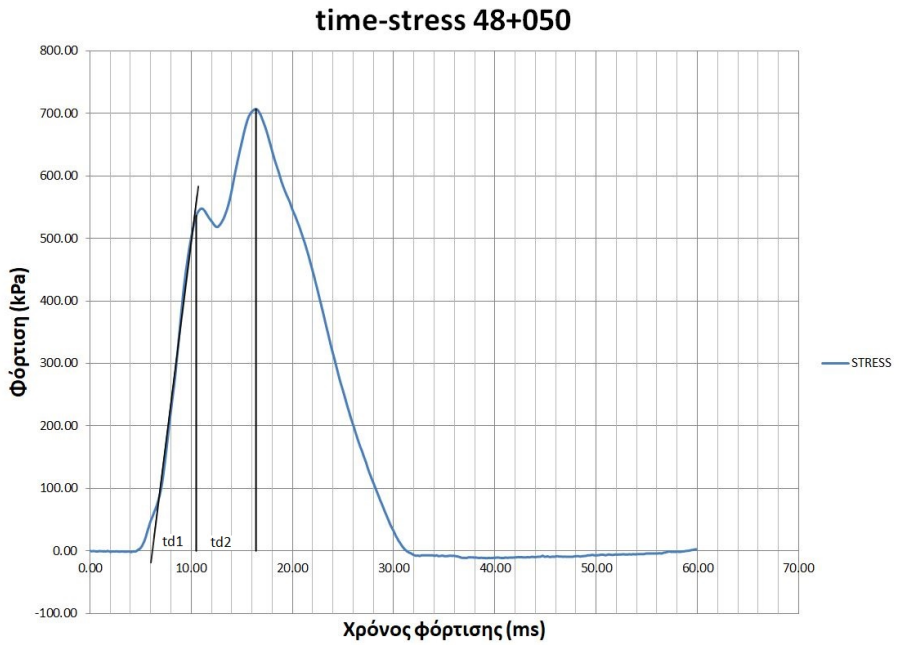
Εικόνα 5.27: Κεντρική καμπύλη E*comp πυρήνα 93+850 στους 20°

5.4 Επεξεργασία μετρήσεων FWD

Τελευταίο μέρος της επεξεργασίας της πειραματικής διαδικασίας είναι η ανάλυση των καταγραφών που πραγματοποιήθηκαν με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD). Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων ώστε να καταστεί δυνατή η εισαγωγή του FWD στη διαδικασία συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων από το σύνολο οδικού και εργαστηριακού πειράματος.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των πυρήνων και των δοκιμίων ασφαλτομιγμάτων προσδιορίστηκε στο εργαστήριο από μετρήσεις σε πλήθος διαφορετικών συχνοτήτων και θερμοκρασιών και έτσι δημιουργήθηκαν οι κεντρικές καμπύλες. Στις κεντρικές καμπύλες είναι δυνατή η αναγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε οποιαδήποτε συχνότητα και θερμοκρασία χρειαστεί. Οι μετρήσεις με το FWD έγιναν με μία συχνότητα και σε μία θερμοκρασία κάθε φορά, σε σημεία στα οποία έγινε πυρηνοληψία μετέπειτα. Για να γίνει λοιπόν συγκριτική αξιολόγηση του πειράματος χρειάζεται να μεταφραστούν οι κεντρικές καμπύλες που έχουν ήδη δημιουργηθεί στις συνθήκες μετρήσεων του FWD. Οι θερμοκρασίες καταγράφονται κατά τη μέτρηση όπως έχει προαναφερθεί, έτσι το μόνο στοιχείο που λείπει είναι η συχνότητα της φόρτισης του FWD.

Η φόρτιση που προκαλεί το πίπτον βάρος του μηχανισμού είναι παλμική και σε διάγραμμα χρονικής διάρκειας φόρτισης - επιβαλλόμενου φορτίου (time-stress) έχει τραπεζοειδή μορφή. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης καταγράφεται η χρονοϊστορία (time history) της φόρτισης και έτσι είναι δυνατή η δημιουργία των διαγραμμάτων αυτών. Τα χρονικά τμήματα από την αρχή της αύξησης της φόρτισης μέχρι το πρώτο σημείο αλλαγής κυρτότητας και μέχρι τη μέγιστη φόρτιση είναι αυτά που χρειάζονται για τον υπολογισμό της συχνότητας φόρτισης. Τα σημεία που καθορίζουν τα χρονικά τμήματα βρίσκονται γραφικά και για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τέτοια διαγράμματα για όλες τις θέσεις που έγιναν μετρήσεις με το FWD και μέτα έγινε και πυρηνοληψία, δηλαδή σε σύνολο δέκα θέσεων. Παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος για τη μέτρηση στη χιλιομετρική θέση 48+050 με βοηθητικές γραμμές για το διαχωρισμό των δύο χρονικών τμημάτων φαίνεται στην εικόνα 5.28.



Εικόνα 5.28: Διάγραμμα φόρτισης στη θέση 48+050

Για τον υπολογισμό της συχνότητας πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η διάρκεια της φόρτισης t_b η οποία έχει δύο τμήματα t_{b1} και t_{b2} τα οποία εξαρτώνται από τα δύο χρονικά τμήματα t_{d1}, t_{d2} που υπολογίζονται γραφικά από τα διαγράμματα. Παρακάτω φαίνονται οι μαθηματικοί τύποι που συνδέουν τα χρονικά διαστήματα των διαγραμμάτων με το χρόνο φόρτισης.

$$t_b = t_{b1} + t_{b2} \tag{5.2}$$

$$t_{b1} = \frac{2 \cdot t_{d1}}{\pi} \tag{5.3}$$

$$t_{b2} = t_{d2} \tag{5.4}$$

Και η συχνότητα φόρτισης (f_{FWD}) υπολογίζεται από τον τύπο 5.5 αφού μετατραπεί ο χρόνος φόρτισης t_b σε δευτερόλεπτα από ms:

$$f_{FWD} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot t_b} \tag{5.5}$$

Δημιουργώντας τα σχεδιαγράμματα φόρτισης - χρόνου φόρτισης για κάθε ένα από τα δέκα σημεία προς εξέταση προσδιορίστηκαν τα χρονικά διαστήματα t_{d1} και t_{d2} και εν συνεχεία υπολογίστηκαν οι συχνότητες φόρτισης, όπου και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1: Συχνότητα φόρτισης FWD

Χιλιομετρική θέση	**t_{d1} (ms)**	**t_{d2} (ms)**	**f_{FWD} (Hz)**
48+050	4.50	5.90	18.16
48+150	4.40	5.70	18.72
48+250	4.50	5.80	18.37
48+300	4.60	5.80	18.23
48+400	4.10	5.90	18.70
93+500	4.70	5.90	17.90
93+590	4.60	5.80	18.23
93+650	4.80	5.70	18.18
93+750	4.60	5.80	18.23
93+850	4.10	6.10	18.27

Μέσω ανάστροφου υπολογισμού υπολογίστηκε το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας στις 10 θέσεις που εξετάζονται στην εργασία αυτή. Όπως έχει προαναφερθεί έγιναν δοκιμές σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες στο τμήμα του οδοστρώματος που είναι διαστρωμένο με αδρανή από τα Αθίκια και σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες για το τμήμα με αδρανή από τον Άραξο. Στους πίνακες 5.2 και 5.3 φαίνονται τα μέτρα δυσκαμψίας (συμβολιζόμενα ως E_{FWD}) για κάθε θερμοκρασία δοκιμής.

Πίνακας 5.2: Μέτρα δυσκαμψίας E_{FWD} (MPa) τμήματος με αδρανή από Αθίκια

Χιλιομετρική θέση	**Θερμοκρασία**		
	26°C	**30°C**	**35°C**
48+050	5622	4798	3940
48+150	5683	4714	4440
48+250	5651	5318	4404
48+300	5766	4623	4118
48+400	4988	4465	3603

Πίνακας 5.3: Μέτρα δυσκαμψίας E_{FWD} (MPa) τμήματος με αδρανή από Άραξο

Χιλιομετρική θέση	**Θερμοκρασία**	
	24°C	**40°C**
93+500	7505	3411
93+590	6671	3164
93+650	6470	3146
93+750	6822	3267
93+850	7594	3614

Τα μέτρα αυτά, που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό των μετρήσεων του FWD, είναι επιτόπου μέτρα δυσκαμψίας του οδοστρώματος. Οι μετρήσεις με το FWD είναι μία μη καταστρεπτική για το οδόστρωμα διαδικασία και μπορούν να πραγματοποιηθούν με ευκολία και χωρίς να διακοπεί η κυκλοφορία στο οδόστρωμα. Συνεπώς, είναι δυνατόν για κάθε σημείο που θέλουμε να εξετάσουμε να υπάρχουν πολλές τιμές του μέτρου δυσκαμψίας E_{FWD} οι οποίες δεν είναι όμως άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ τους. Μία σύγκριση του E_{FWD} ενός σημείου σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες δείχνει μόνο την εξάρτηση του οδοστρώματος από τις θερμοκρασιακές συνθήκες.

Έχοντας δημιουργήσει τις κεντρικές καμπύλες των δοκιμίων των ασφαλτομιγμάτων (μέσω των σύνθετων μέτρων δυσκαμψίας) και των πυρήνων, μπορεί να γίνει αναγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στις θερμοκρασίες και τις συχνότητες που έχουν γίνει οι μετρήσεις του FWD. Έτσι θα είναι δυνατή η άμεση σύγκριση μεταξύ του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας (E_{FWD}), του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων (E^*_{core}), και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων μέσω του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας (E^*_{comp}). Η διαδικασία αναγωγής των στοιχείων των δυναμικών μέτρων δυσκαμψίας των πυρήνων και των δοκιμίων στις συνθήκες των μετρήσεων του FWD αναλύεται παρακάτω.

Έχοντας ήδη υπολογίσει τους συντελεστές της σιγμοειδούς καμπύλης καθώς και τους συντελεστές του παράγοντα μετατόπισης στα υπολογιστικά φύλλα όπως αυτό της εικόνας 5.3 για τους πυρήνες, ή της εικόνας 5.17 για τα δοκίμια, η αναγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας γίνεται με τη χρήση του τύπου 3.9. Τα δεδομένα που εισάγονται στη μεθοδολογία είναι η θερμοκρασία και η συχνότητα της φόρτισης του FWD, καθώς οι συντελεστές α,β,γ,δ και a,b,c παραμένουν ίδιοι. Αυτό που αλλάζει είναι η μειωμένη συχνότητα η οποία υπολογίζεται για τις συνθήκες του FWD και έτσι μέσω του τύπου 3.9 δίνεται η θεωρητική τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στις συνθήκες που ορίσαμε. Οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή φαίνονται στο επόμενο κεφάλαιο, όπου και γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συγκριτική αξιολόγηση

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας. Η σύγκριση γίνεται γύρω από τρεις βασικούς παράγοντες.

- το σύνθετο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^*_{comp}, που αντιπροσωπεύει τα ασφαλτομίγματα της μελέτης σύνθεσης του έργου
- Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των πυρήνων E^*_{core}, που αντιπροσωπεύει το κατασκευασθέν οδόστρωμα
- το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας E_{FWD} από τις μετρήσεις με το FWD.

Αρχικά υπολογίζεται και παρουσιάζεται το εύρος τιμών των τριών διαφορετικών μέτρων μέσω γραφημάτων πλαισίου (box plots) για όλες τις θερμοκρασίες στις οποίες έγιναν μετρήσεις με FWD έτσι ώστε να υπάρχουν στοιχεία και για τα τρία διαφορετικά μέτρα δυσκαμψίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι κεντρικές καμπύλες των πυρήνων με τα αντίστοιχα σύνθετα δυναμικά μέτρα ώστε να αξιολογηθεί η κατασκευή του οδοστρώματος σε σχέση με τη μελέτη. Τέλος παρουσιάζονται γραφήματα που περιέχουν και τα τρία διαφορετικά μέτρα για την άμεση σύγκριση των τιμών τους και την προσπάθεια εύρεσης ενός συντελεστή σύνδεσης των μέτρων.

Επισημαίνεται ότι το σύνολο των αποτελεσμάτων διαχωρίζεται στα δύο τμήματα του οδικού έργου τα οποία διαστρώθηκαν με ασφαλτομίγματα με αδρανή από τα δύο διαφορετικά λατομεία. Ουσιαστικά γίνονται οι ίδιες συγκριτικές διαδικασίες μεταξύ πυρήνων, μιγμάτων και μετρήσεων με FWD ξεχωριστά για κάθε τμήμα. Συγκρίσεις μεταξύ των δύο τμημάτων δεν είναι αντικείμενο της εργασίας αυτής, αλλά τυχόν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των σχέσεων των διαφορετικών μέτρων δυσκαμψίας στα δύο τμήματα μπορούν να δώσουν στοιχεία άξια προς σχολιασμό ή περαιτέρω έρευνα.

6.2 Εύρος τιμών μέτρων δυσκαμψίας

Το σύνολο των τιμών των δυναμικών μέτρων δυσκαμψίας φαίνεται στους πίνακες 6.1 και 6.2. Οι τιμές αυτές είναι ανηγμένες στις συνθήκες των μετρήσεων που έγιναν με το FWD ώστε να υπάρχει άμεση αντιστοιχία. Με τα στοιχεία των πινάκων αυτών δημιουργήθηκε και ο πίνακας 6.3 που δείχνει τις μέσες τιμές των λόγων E^*_{FWD}/E^*_{comp} και E^*_{FWD}/E^*_{core} ξεχωριστά για τα δύο τμήματα.

Πίνακας 6.1: Τιμές για ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια

Χιλιομετρική θέση	E_{FWD}	E^*_{comp}	E^*_{core}	E_{FWD}/E^*_{comp}	E_{FWD}/E^*_{core}
T=26°C					
48+050	5622	8651	8187	0.65	0.69
48+150	5683	8839	6584	0.64	0.86
48+250	5651	8827	6811	0.64	0.83
48+300	5766	8891	6059	0.65	0.95
48+400	4988	8886	7671	0.56	0.65
T=30°C					
48+050	4798	7392	5675	0.65	0.85
48+150	4714	7519	5005	0.63	0.94
48+250	5318	7484	5350	0.71	0.99
48+300	4623	7516	4486	0.62	1.03
48+400	4465	7482	5420	0.60	0.82
T=36°C					
48+050	3940	6155	3761	0.64	1.05
48+150	4440	6087	3438	0.73	1.29
48+250	4404	6026	3974	0.73	1.11
48+300	4118	5936	3006	0.69	1.37
48+400	3603	5862	3538	0.61	1.02

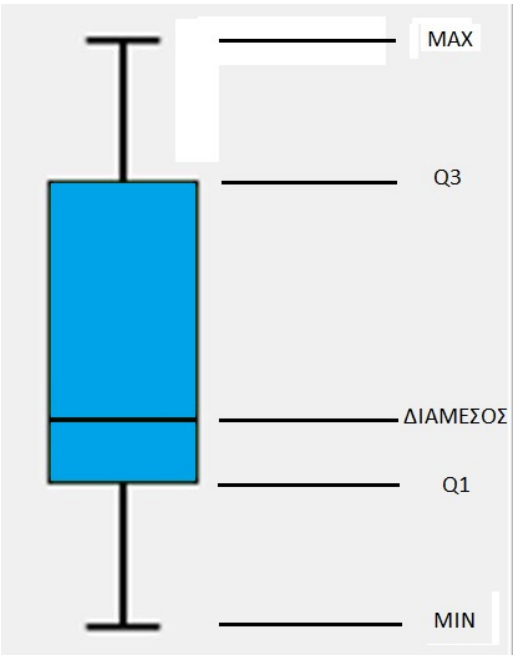
Πίνακας 6.2: Τιμές για ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο

Χιλιομετρική Θέση	E_{FWD}	E^*_{comp}	E^*_{core}	E_{FWD}/E^*_{comp}	E_{FWD}/E^*_{core}
T=24°C					
93+500	7505	10280	9996	0.73	0.75
93+590	6671	10463	12630	0.64	0.53
93+650	6470	10407	9249	0.62	0.70
93+750	6822	10295	9933	0.66	0.69
93+850	7594	10303	10552	0.74	0.72
T=40°C					
93+500	3411	4692	3899	0.73	0.87
93+590	3164	4583	3702	0.69	0.85
93+650	3146	4676	3034	0.67	1.04
93+750	3267	4754	3083	0.69	1.06
93+850	3614	4739	3537	0.76	1.02

Πίνακας 6.3: Μέσες τιμές λόγων των μέτρων ανά θερμοκρασία δοκιμής

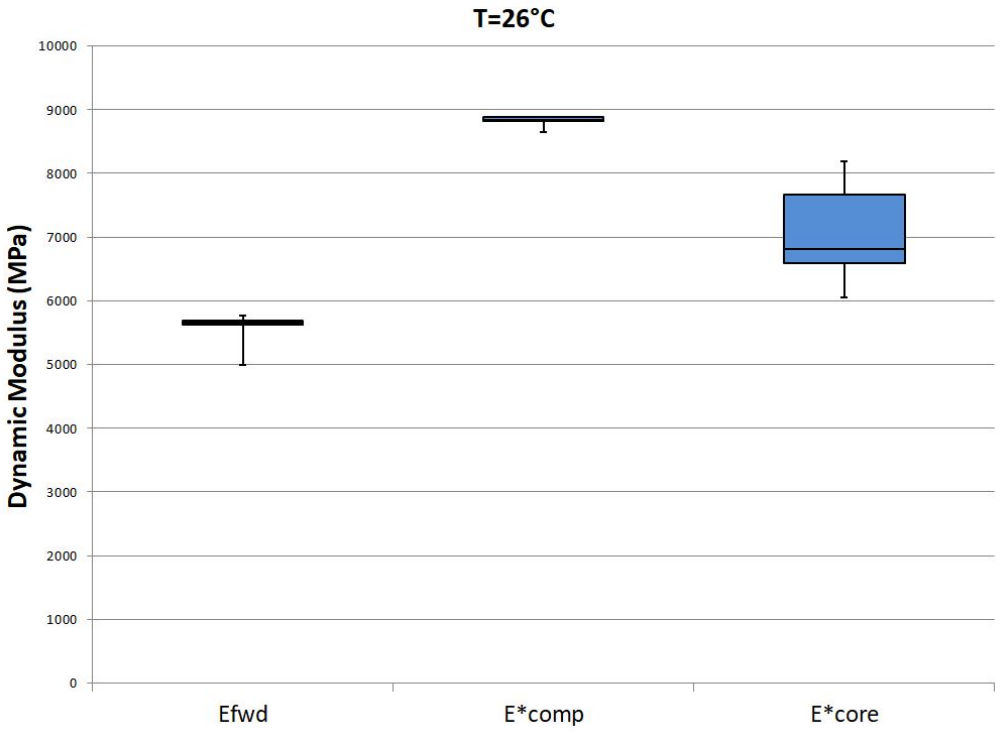
Θερμοκρασία	E^*_{comp}/E^*_{core}	E_{FWD}/E^*_{comp}	E_{FWD}/E^*_{core}
Ασφαλτομίγματα από Αθίκια			
T=26°C	1.26	0.63	0.80
T=30°C	1.45	0.64	0.93
T=36°C	1.71	0.68	1.17
Ασφαλτομίγματα από Άραξο			
T=24°C	1.00	0.68	0.68
T=40°C	1.37	0.71	0.97

Στα διαγράμματα πλαισίου (box plots) εμπεριέχονται πολλά στατιστικά χαρακτηριστικά των προς εξέταση τιμών. Η κάτω γραμμή αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του εύρους, η άνω γραμμή στη μέγιστη, η μεσαία γραμμή δείχνει τη διάμεσο του δείγματος. Στο χρωματισμένο ορθογώνιο η άνω γραμμή αντιπροσωπεύει το τρίτο τεταρτημόριο (Q3) του δείγματος, αυτό σημαίνει ότι 75% των τιμών του δείγματος είναι κάτω από τη γραμμή αυτή. Αντιστοίχως, η κάτω γραμμή του ορθογωνίου αντιπροσωπεύει το πρώτο τεταρτημόριο (Q1), που σημαίνει ότι το 25% των τιμών του δείγματος βρίσκονται κάτω από αυτή τη γραμμή. Στην εικόνα 6.1 φαίνονται όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά που εξάγονται από την ερμηνεία των γραφημάτων τύπου boxplot.



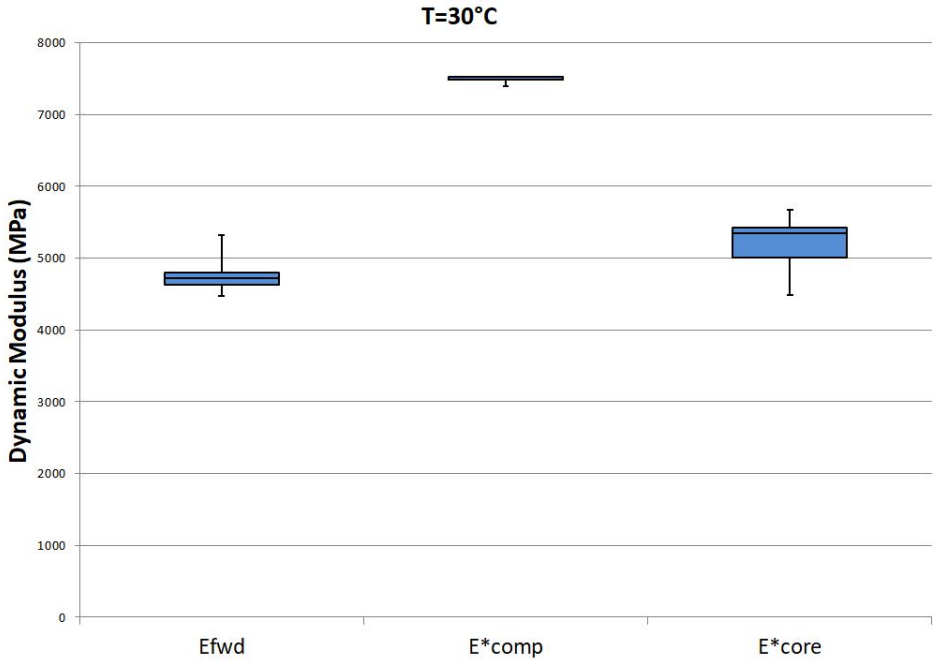
Εικόνα 6.1: Στατιστικά στοιχεία box plot

Ο διαχωρισμός των γραφημάτων έγινε με βάση τις θερμοκρασίες αλλά και με τα διαφορετικά, λόγω προέλευσης των αδρανών, ασφαλτομίγματα. Συνολικά κατασκευάστηκαν τρία γραφήματα για το οδικό τμήμα που κατασκευάστηκε με αδρανή από τα Αθίκια για θερμοκρασίες 26,30 και 36°C, και δύο γραφήματα για το κομμάτι που κατασκευάστηκε με αδρανή από τον Άραξο για θερμοκρασίες 24 και 40°C. Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 6.2 έως 6.6



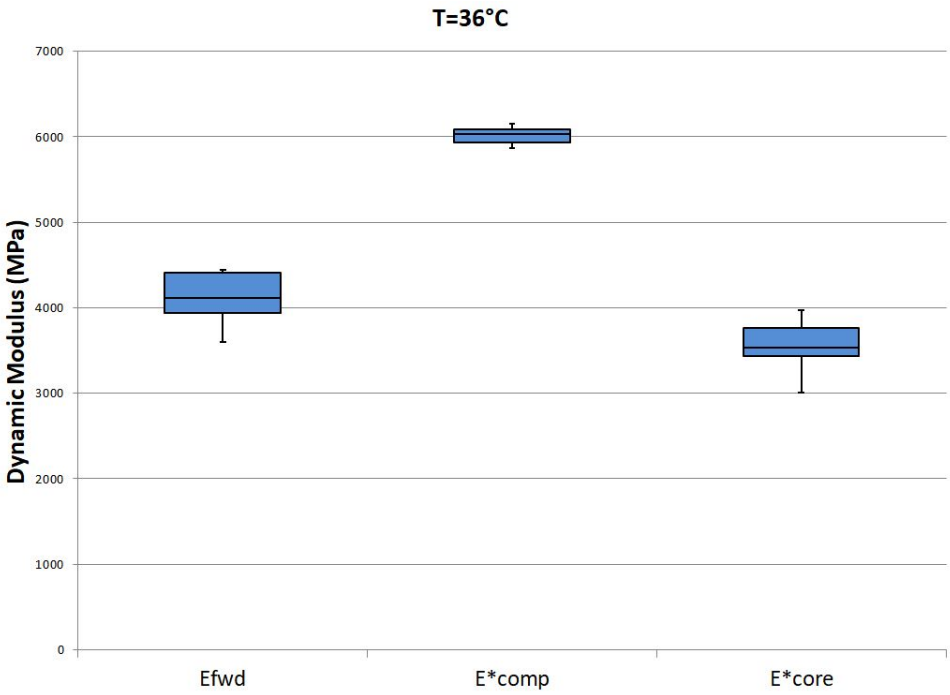
Εικόνα 6.2: Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 26°C

Στην εικόνα 6.2 φαίνεται ότι οι τιμές του E^*_{comp} παρουσιάζουν τη μικρότερη διασπορά και τις υψηλότερες τιμές από τις τρεις κατηγορίες. Τη μεγαλύτερη διασπορά παρουσιάζουν οι τιμές των E^*_{core} με μικρότερες τιμές από αυτές του E^*_{comp} αλλά σταθερά μεγαλύτερες από τις τιμές του E_{FWD}.



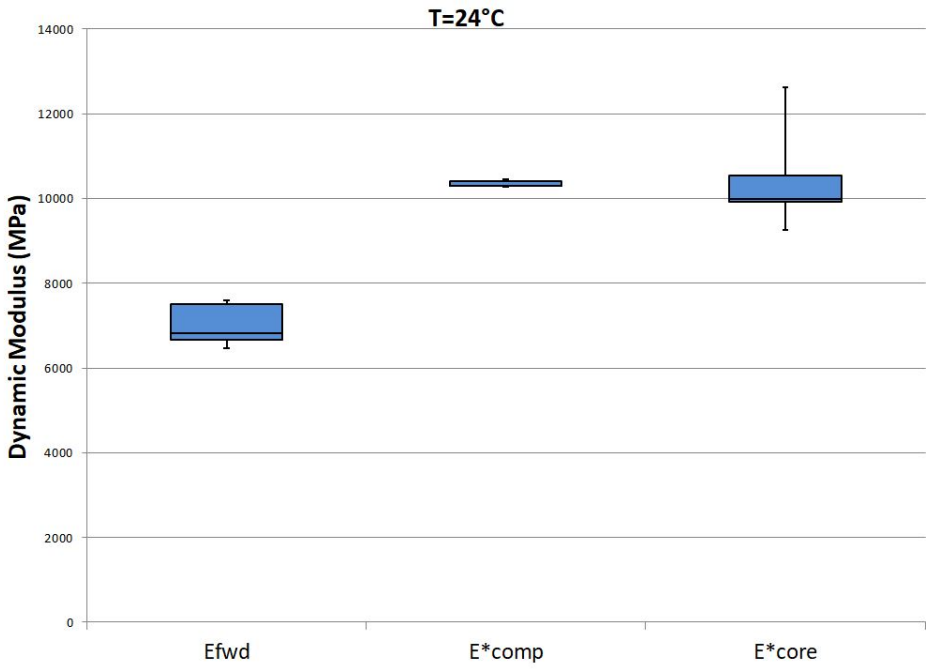
Εικόνα 6.3: Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 30°C

Στην εικόνα 6.3 φαίνεται και πάλι πόσο μικρή διασπορά έχουν οι τιμές του E^*_{comp} ενώ συνεχίζουν να έχουν τις μεγαλύτερες τιμές. Οι τιμές του E^*_{core} έχουν μικρότερη διασπορά από αυτή στους 26°C και φαίνεται να μειώνεται η διαφορά που παρουσιάζουν με τις τιμές του E_{FWD}.



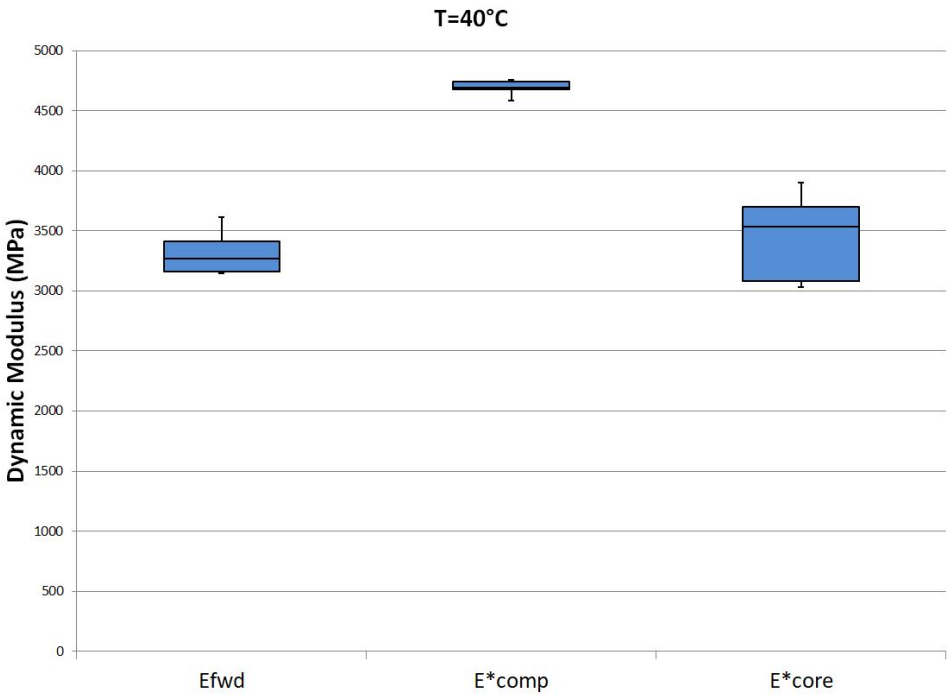
Εικόνα 6.4: Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Αθίκια στους 36°C

Στους 36°C οι τιμές του E_{FWD} δείχνουν αυξημένη διασπορά και συνεχίζουν την τάση της μείωσης της διαφοράς με αυτές του E^*_{core}, ξεπερνώντας αυτές για πρώτη φορά.



Εικόνα 6.5: Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο στους 24°C

Στην εικόνα 6.5 οι τιμές του E^*_{comp} δείχνουν και πάλι τη μικρότερη διασπορά και έχουν μικρή διαφορά από αυτές του E^*_{core}. Η τιμή του E^*_{core} που ξεπερνάει τα 12000MPa δεν είναι στοιχείο λάθους μέτρησης, αφού τέτοιες αποκλίσεις δεν είναι απίθανο να συμβούν σε πραγματικό έργο.



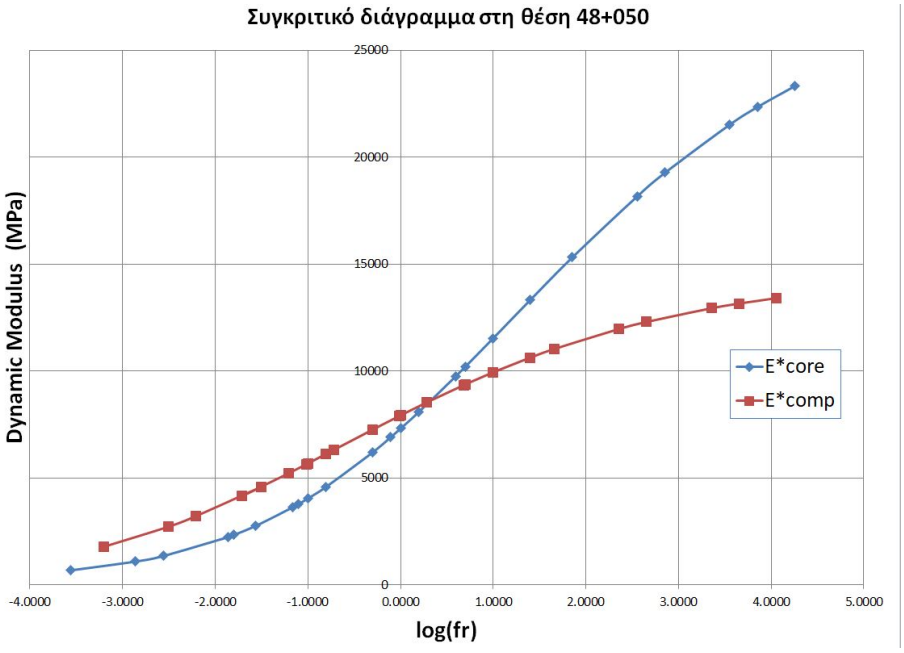
Εικόνα 6.6: Ασφαλτομίγματα με αδρανή από Άραξο στους 40°C

Στην τελευταία εικόνα φαίνεται και πάλι η τάση των τιμών E_{FWD} να πλησιάζουν τις τιμές του E^*_{core} με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Από το σύνολο των γραφημάτων φαίνεται πως οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από τα σύνθετα μέτρα δυσκαμψίας των δοκιμίων παρουσιάζουν τη μικρότερη διασπορά. Αντιθέτως τα δυναμικά μέτρα δυσκαμψίας των πυρήνων δείχνουν ότι έχουν τη μεγαλύτερη διασπορά σε όλες τις θερμοκρασίες και για τα δύο οδικά τμήματα. Αυτό δείχνει πως οι ελεγχόμενες συνθήκες παρασκευής των δοκιμίων στο εργαστήριο διαφέρουν με τις πραγματικές συνθήκες διάστρωσης του οδοστρώματος. Τα δοκίμια δείχνουν να έχουν πολύ μικρότερο εύρος τιμών σε σχέση με τους πυρήνες ή τις μετρήσεις από το FWD που αφορούν το πραγματικό έργο και τις διαφοροποιήσεις που μπορεί να υπάρχουν σε ένα οδόστρωμα κατά την κατασκευή του. Επίσης φαίνεται πως με την αύξηση της θερμοκρασίας οι τιμές του E_{FWD} και του E^*_{core} πλησιάζουν πολύ περισσότερο. Οι τιμές του E^*_{comp} δείχνουν να επηρεάζονται λιγότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην επόμενη ενότητα γίνεται μία εμβάθυνση στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μελέτης και τελικής κατασκευής μέσω των κεντρικών καμπυλών των πυρήνων και των δοκιμίων.

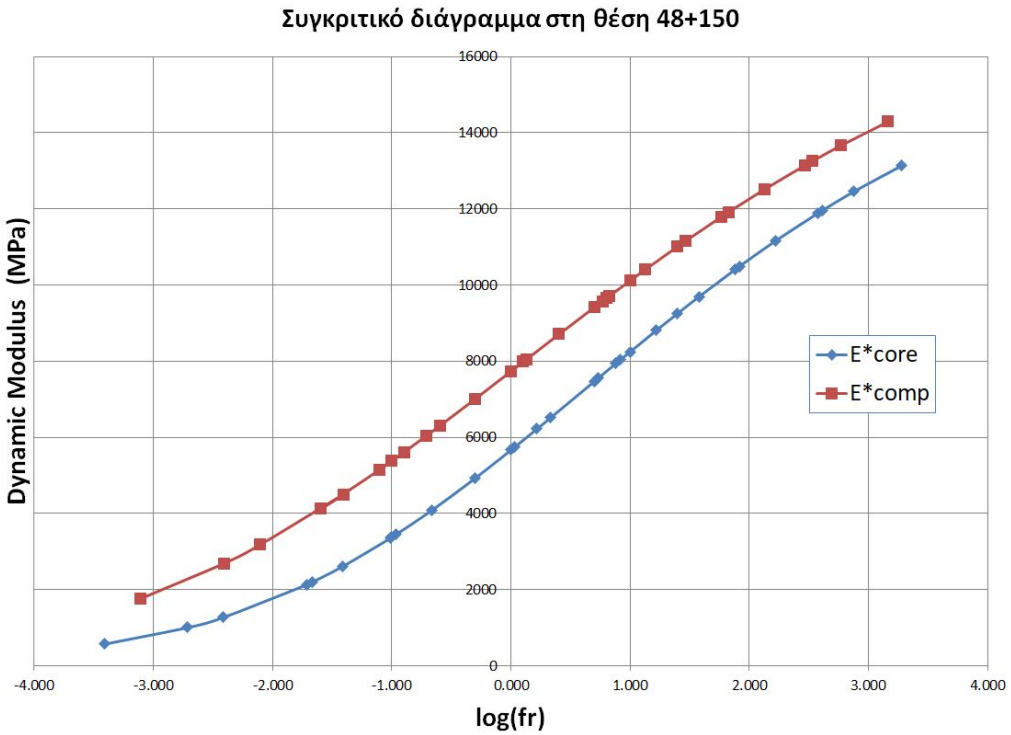
6.3 Σύγκριση master curve E^*_{comp} και E^*_{core}

Για την άμεση σύγκριση των κεντρικών καμπύλων των E^*_{core} και E^*_{comp} δημιουργήθηκαν κοινά γραφήματα όπου απεικονίζονται οι κεντρικές καμπύλες και των δύο παράλληλα. Οι κεντρικές καμπύλες, σε κάθε χιλιομετρική θέση προς εξέταση, δημιουργήθηκαν από τα ανεξάρτητα μεταξύ τους υπολογιστικά φύλλα πυρήνων και σύνθετων μέτρων δυσκαμψίας, τοποθετώντας στον κοινό άξονα της μειωμένης συχνότητας, τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Όλες οι κεντρικές καμπύλες έγιναν με θερμοκρασία αναφοράς τους 20°C.

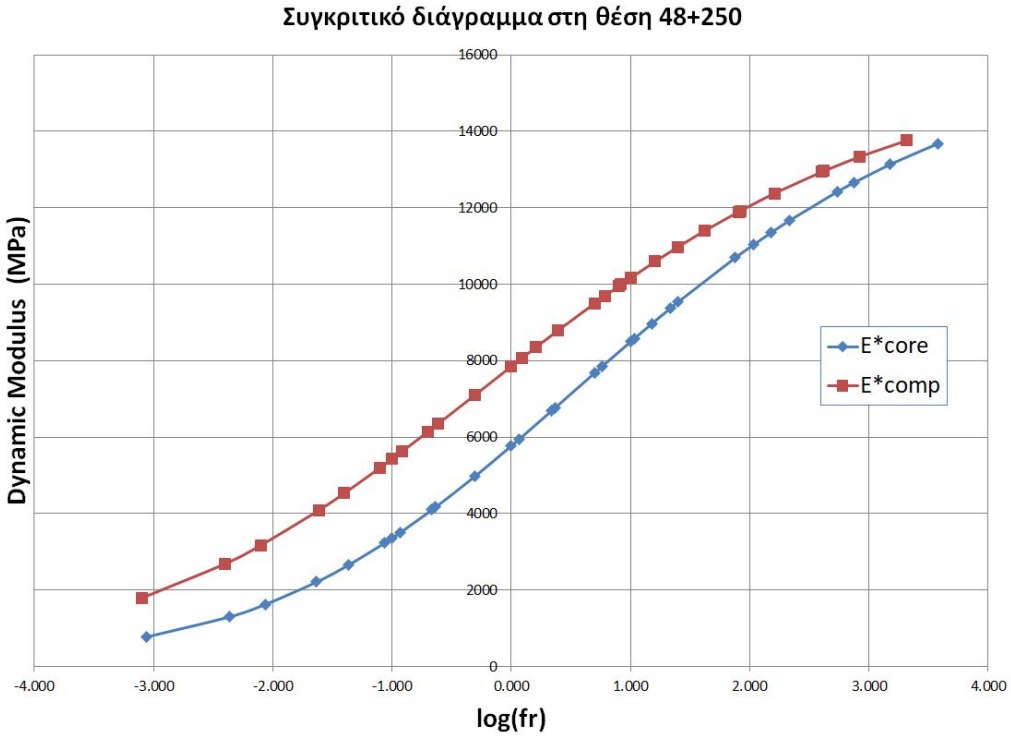


Εικόνα 6.7: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+050

Στην εικόνα 6.7 φαίνεται ως οι τιμές του E^*_{comp} είναι μεγαλύτερες από αυτές του E^*_{core} για ορισμένες τιμές όμως της μειωμένης συχνότητας. Σε μεγαλύτερες τιμές του $\log(f_r)$, που σημαίνει σε μεγαλύτερες συχνότητες ή/και σε μικρότερες θερμοκρασίες, η τιμή του E^*_{core} ξεπερνάει το E^*_{comp} και μάλιστα με τη διαφορά των δύο να μεγαλώνει αναλόγως της αύξησης του $\log(f_r)$.

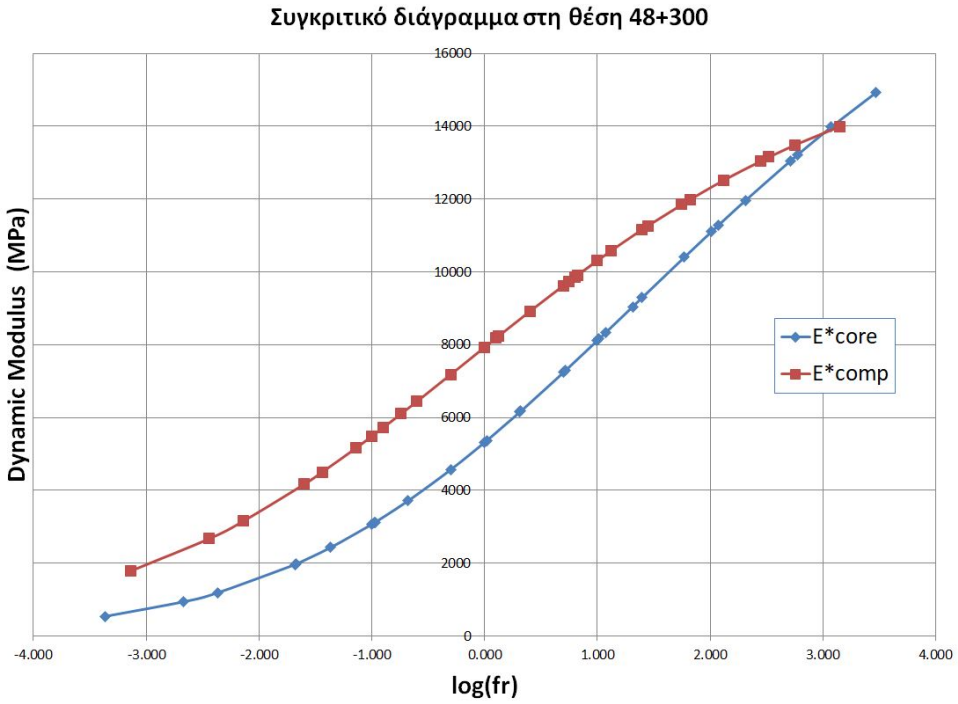


Εικόνα 6.8: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+150



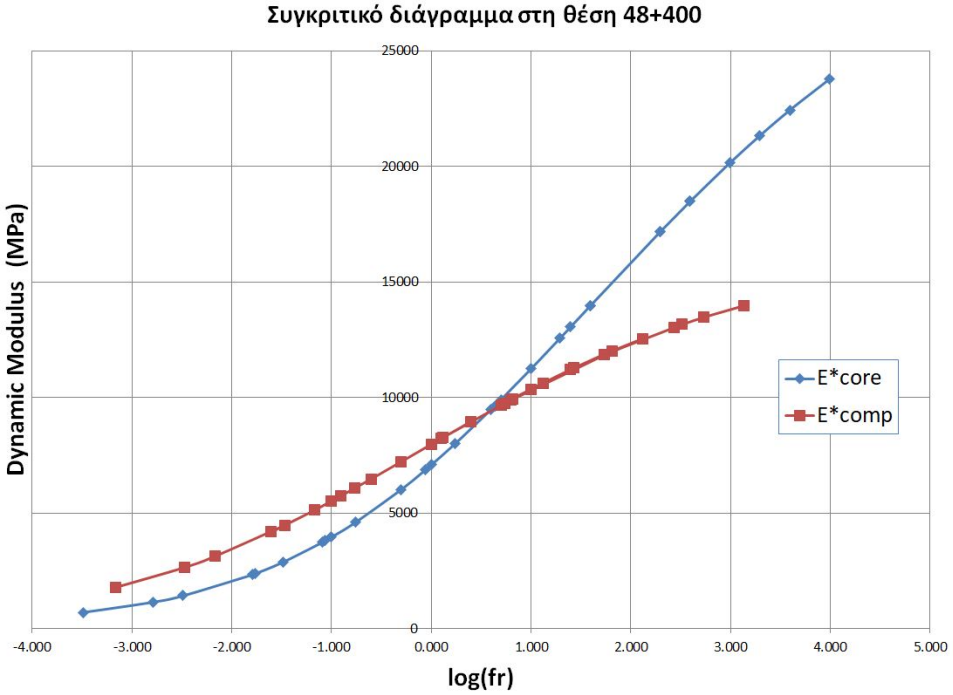
Εικόνα 6.9: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+250

Στις θέσεις 48+150 και 48+250 οι δύο κεντρικές καμπύλες δεν τέμνονται σε κανένα σημείο. Οι δύο σχεδόν παράλληλες καμπύλες δείχνουν ξεκάθαρα πως το E^*_{comp} είναι σταθερά μεγαλύτερο από το E^*_{core}.



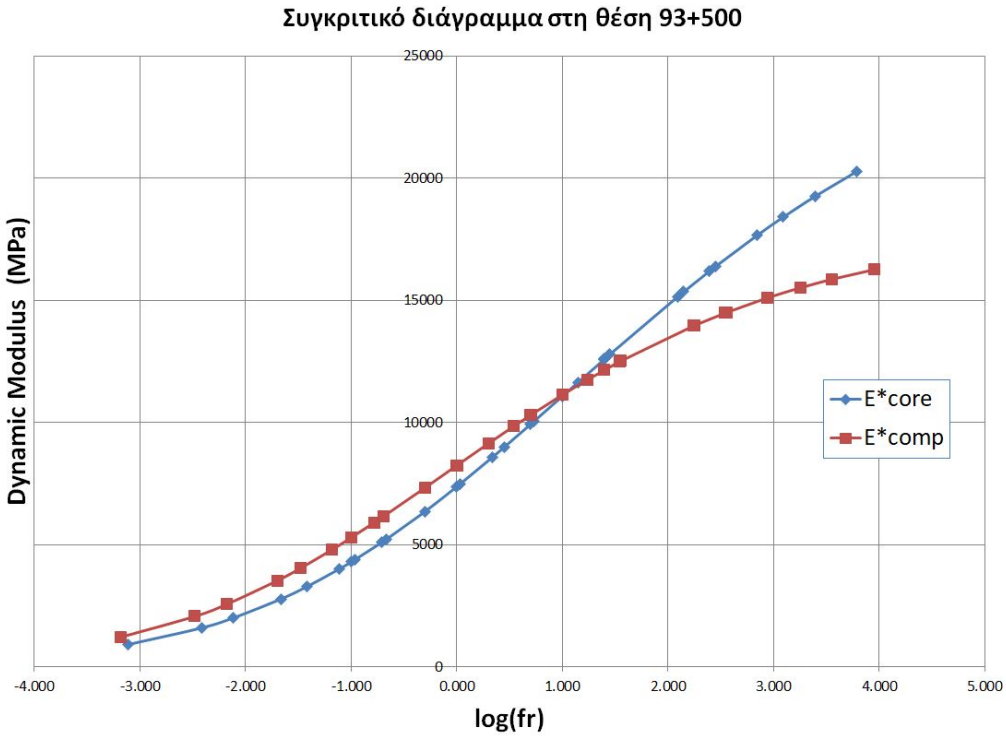
Εικόνα 6.10: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+300

Στη θέση 48+300 οι καμπύλες κρατούν μία σταθερή απόσταση μέχρι τις πιο υψηλές τιμές της μειωμένης συχνότητας, όπου και τέμνονται και το E^*_{core} ξεπερνάει το E^*_{comp}.



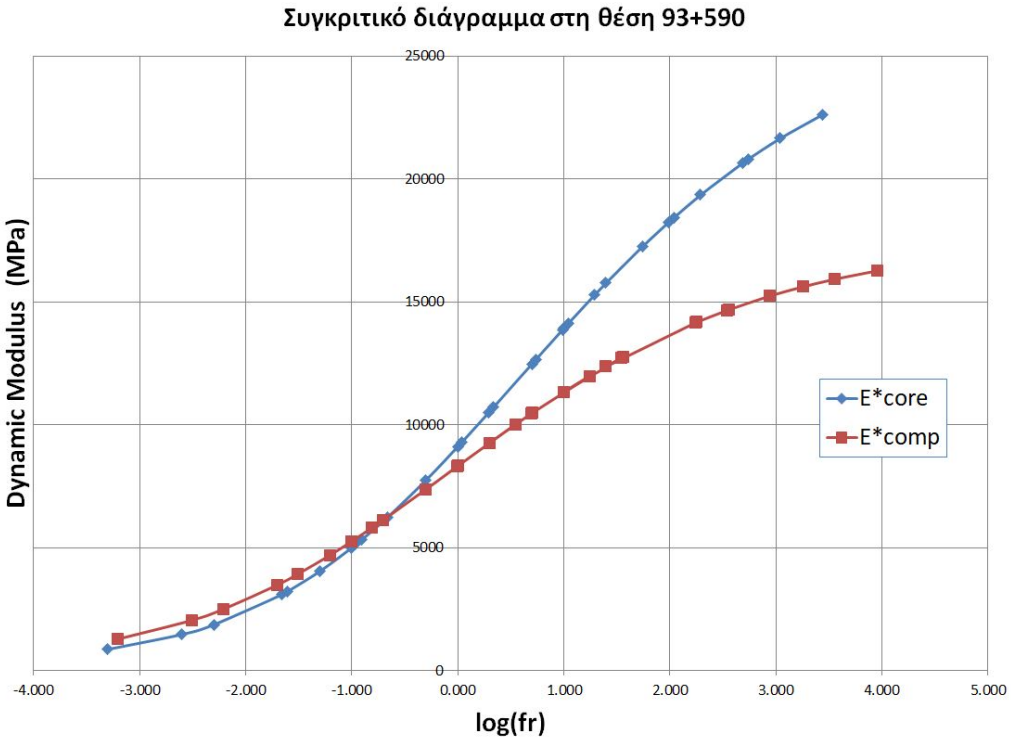
Εικόνα 6.11: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 48+400

Στη θέση 48+400 οι κεντρικές καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με αυτή της θέσης 48+050, όπου το E^*_{core} ξεπερνάει το E^*_{comp} στις μεγαλύτερες τιμές του $\log(f_r)$ με τη διαφορά τους να αυξάνεται αναλόγως της αύξησης της μειωμένης συχνότητας.



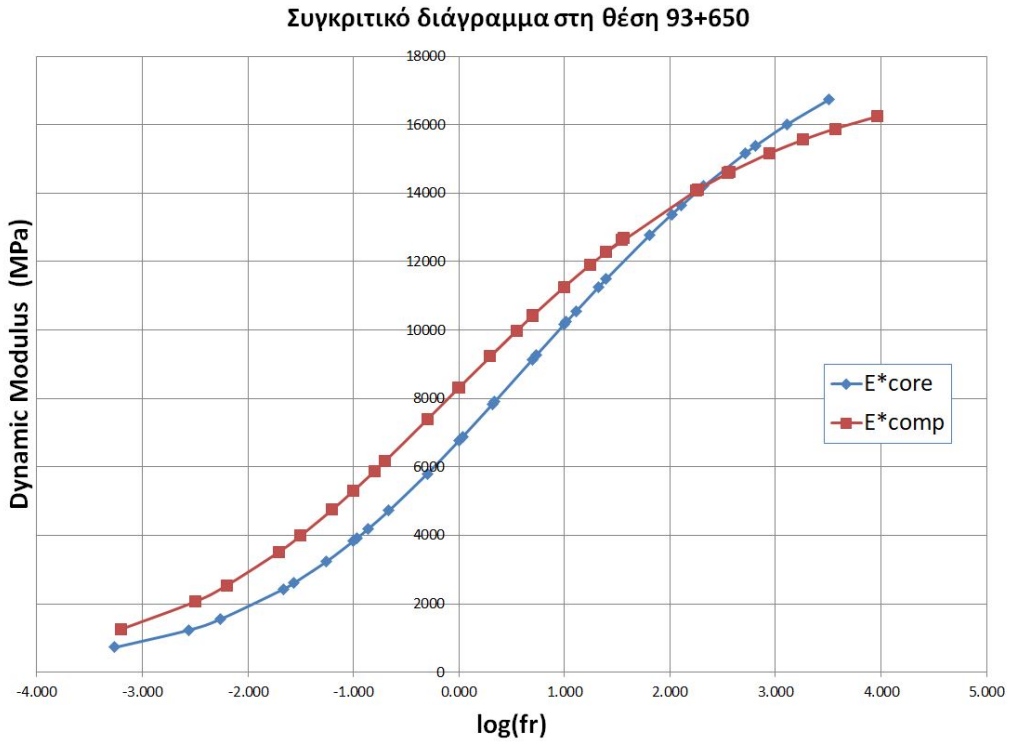
Εικόνα 6.12: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+500

Στη θέση 93+500 οι δύο καμπύλες έχουν σχεδόν ίδιες τιμές για τις χαμηλότερες τιμές του $\log(f_r)$. Μετά από ένα σημείο όμως το E^*_{core} ξεπερνάει το E^*_{comp}.



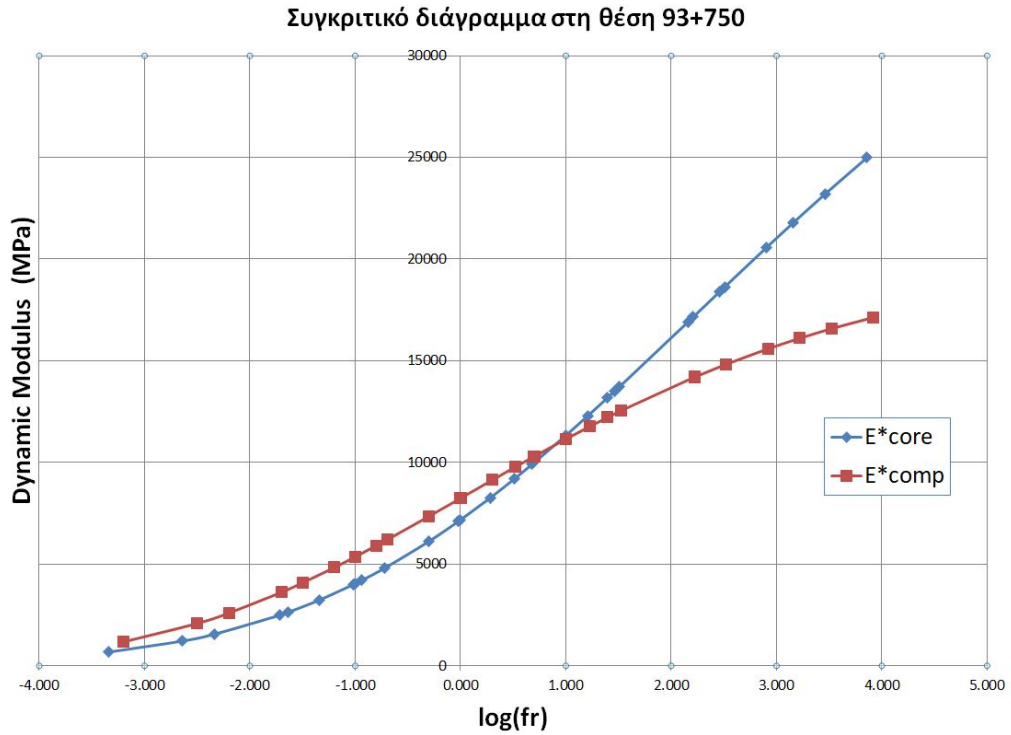
Εικόνα 6.13: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+590

Στη θέση 93+590 το E^*_{core} παίρνει μεγαλύτερες τιμές του E^*_{comp} από πολύ πιο μικρές τιμές του $\log(f_r)$.

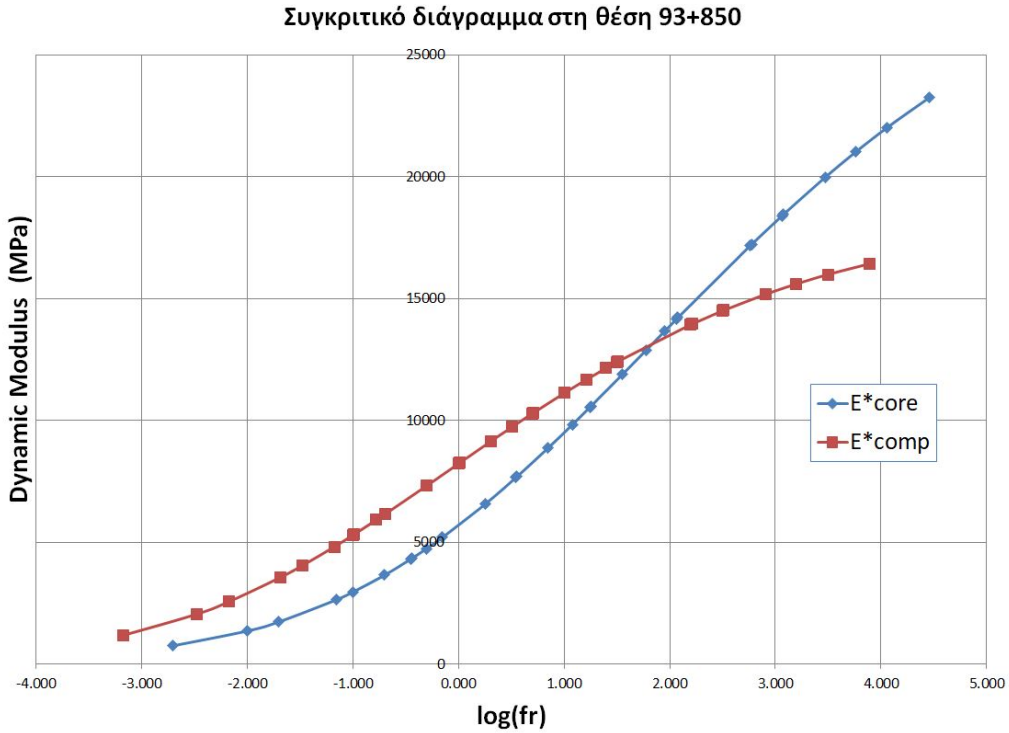


Εικόνα 6.14: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+650

Στις θέσεις 93+650, 93+750 και 93+850 συνεχίζεται η ίδια τάση που δείχνει αυτό το τμήμα του οδοστρώματος, με τα μέτρα E^*_{core} να παίρνουν μεγαλύτερες τιμές από τα E^*_{comp} μετά από κάποια τιμή του $\log(f_r)$.



Εικόνα 6.15: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+750



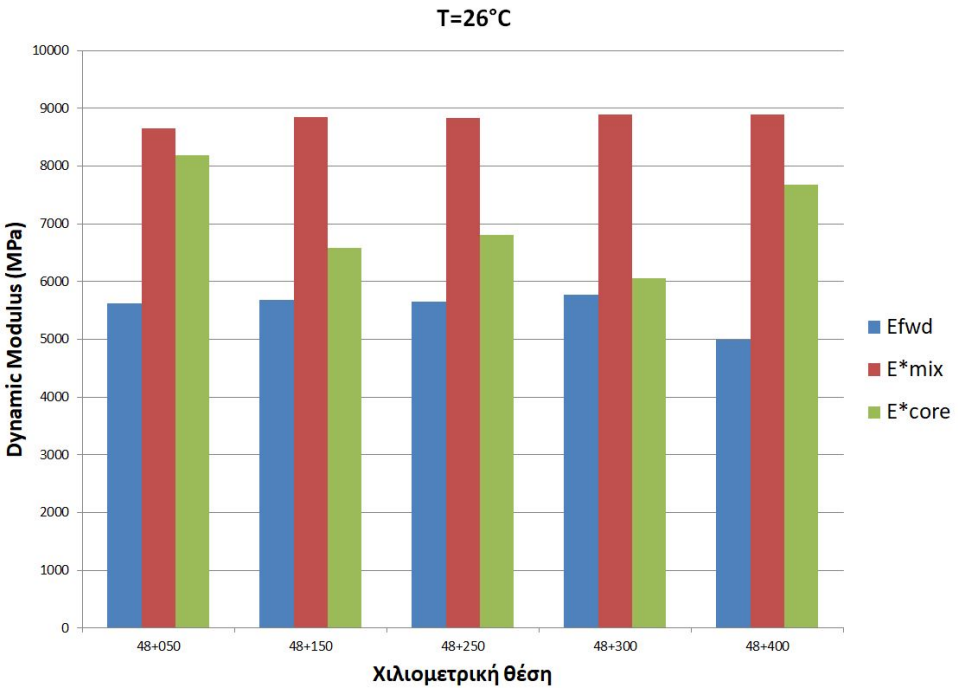
Εικόνα 6.16: Κεντρικές καμπύλες πυρήνα-δοκιμίου στη θέση 93+850

Ως γενικότερη παρατήρηση, τα αποτελέσματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία βρίσκονται οι θέσεις 48+150 και 48+250, όπου οι καμπύλες δεν τέμνονται σε κανένα σημείο και το E^*_{comp} είναι σταθερά μεγαλύτερο του E^*_{core}. Στη συνέχεια στις θέσεις 48+300 και 93+650 οι καμπύλες τέμνονται σε αρκετά υψηλή μειωμένη συχνότητα που σημαίνει ότι οι πυρήνες δείχνουν μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μόνο σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή υψηλών συχνοτήτων και χαμηλών θερμοκρασιών. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν όλες οι άλλες θέσεις στις οποίες το E^*_{comp} είναι σχεδόν ίσο ή λίγο μεγαλύτερο του E^*_{core} για μικρές τιμές της μειωμένης συχνότητας, ενώ για μεγαλύτερες η εικόνα αλλάζει με την καμπύλη του E^*_{core} να δίνει σταθερά μεγαλύτερες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι οι πυρήνες έχουν μεγαλύτερο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας σε μικρές θερμοκρασίες ή/και σε υψηλές συχνότητες φόρτισης στις θέσεις αυτές. Συμπεράσματα για το οδόστρωμα σε συγκεκριμένες συνθήκες (θερμοκρασίας, χρόνου φόρτισης) είναι πολύ εύκολο να εξαχθούν όπως φαίνεται από την ανάλυση και αυτό δείχνει πόσο χρήσιμο εργαλείο για την επισκόπηση της δομικής κατάστασης των ασφαλτικών στρώσεων είναι τα master curves.

6.4 Σύγκριση τιμών

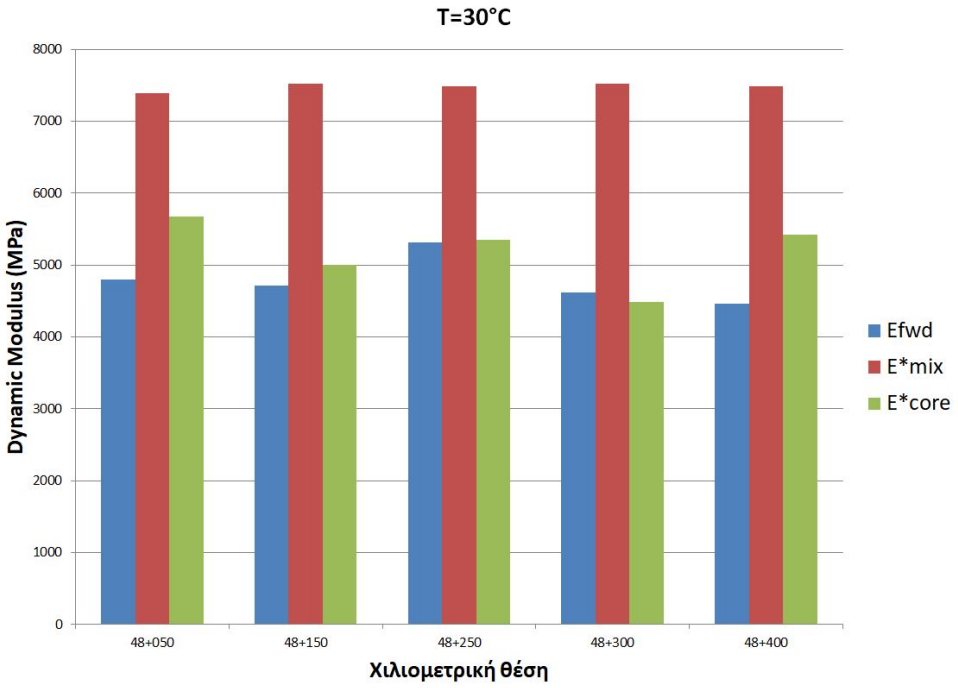
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διάφορα γραφήματα που δείχνουν τις σχέσεις των τριών διαφορετικών μέτρων δυσκαμψίας. Τα γραφήματα δημιουργήθηκαν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που βρίσκονται στους πίνακες 6.1, 6.2 και 6.3. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν ραβδογράμματα με τα τρία διαφορετικά μέτρα δυσκαμψίας σε όλες τις θέσεις και θερμοκρασίες για τα δύο οδικά τμήματα ξεχωριστά. Επίσης δημιουργήθηκε το διάγραμμα διασποράς (dispersion diagram) των τιμών του E^*_{core} και του E^*_{comp}, όπου και φαίνεται η συσχέτιση των δύο μέτρων. Η συσχέτιση του E^*_{core} με το E_{FWD} θα βοηθήσει για τη γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης των ασφαλτικών στρώσεων στο μέλλον με

ελαχιστοποίηση νέας πυρηνοληψίας. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε και το διάγραμμα διασποράς για τις τιμές του E^*_{core} και E^*_{FWD}. Τέλος δημιουργήθηκαν διαγράμματα που δείχνουν τη συσχέτιση των λόγων των μέτρων σε σχέση με τη θερμοκρασία.



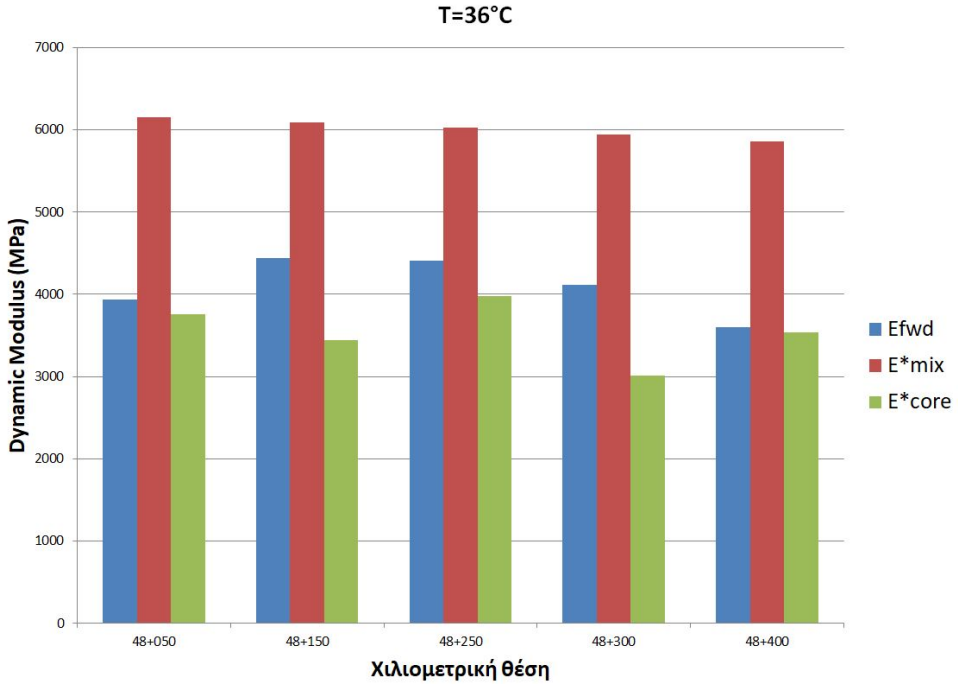
Εικόνα 6.17: Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 26°C

Στο ραβδόγραμμα της εικόνας 6.17 φαίνεται πως τα E^*_{comp} και E^*_{FWD} έχουν σταθερή σχεδόν τιμή στα πέντε σημεία, στοιχείο που φαινόταν και από το box plot για τη θερμοκρασία αυτή (εικόνα 6.2).



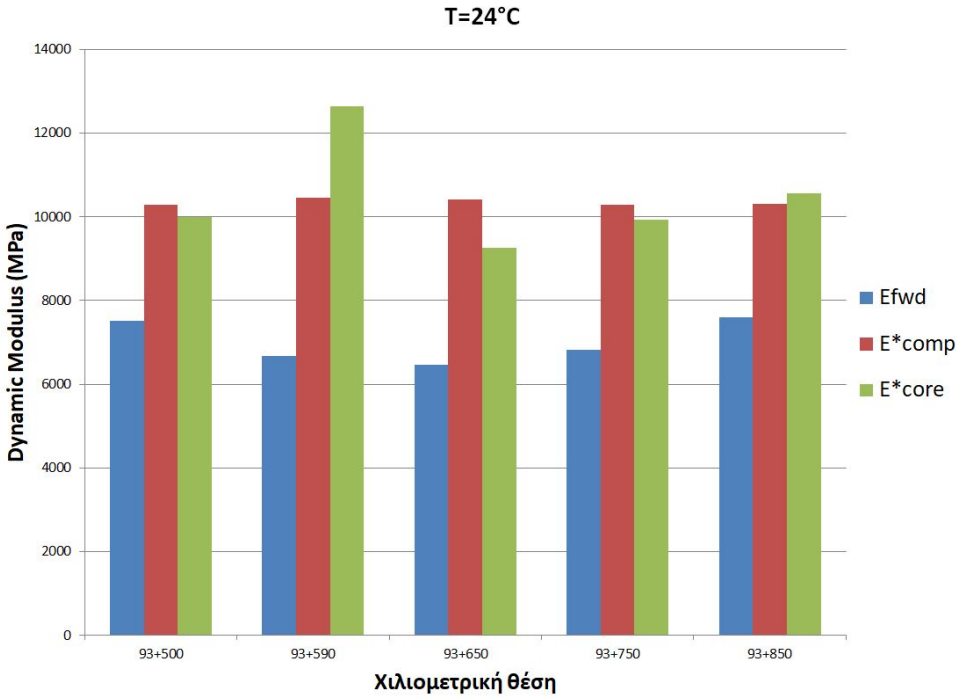
Εικόνα 6.18: Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 30°C

Η ίδια τάση παρουσιάζεται και στους 30°C, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.18. Εδώ όμως παρατηρείται επίσης ότι το E^*_{core} έχει μειωθεί αρκετά και οι τιμές του πλησιάζουν αυτές του E^*_{FWD}.



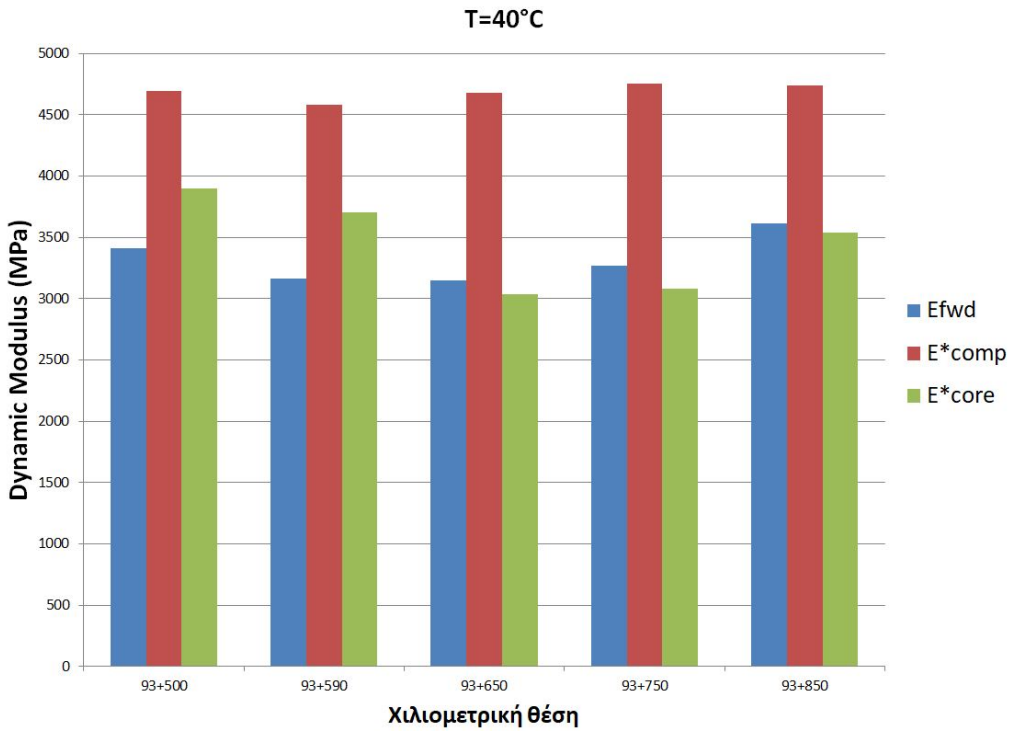
Εικόνα 6.19: Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Αθίκια στους 36°C

Στους 36°C παρατηρούμε ότι το E^*_{comp} συνεχίζει να δείχνει μικρή διασπορά και έχει σταθερά μεγαλύτερες τιμές από τα άλλα δύο μέτρα. Το E^*_{core} πλέον έχει μειωθεί τόσο ώστε το E^*_{FWD} να παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές.



Εικόνα 6.20: Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Άραξο στους 24°C

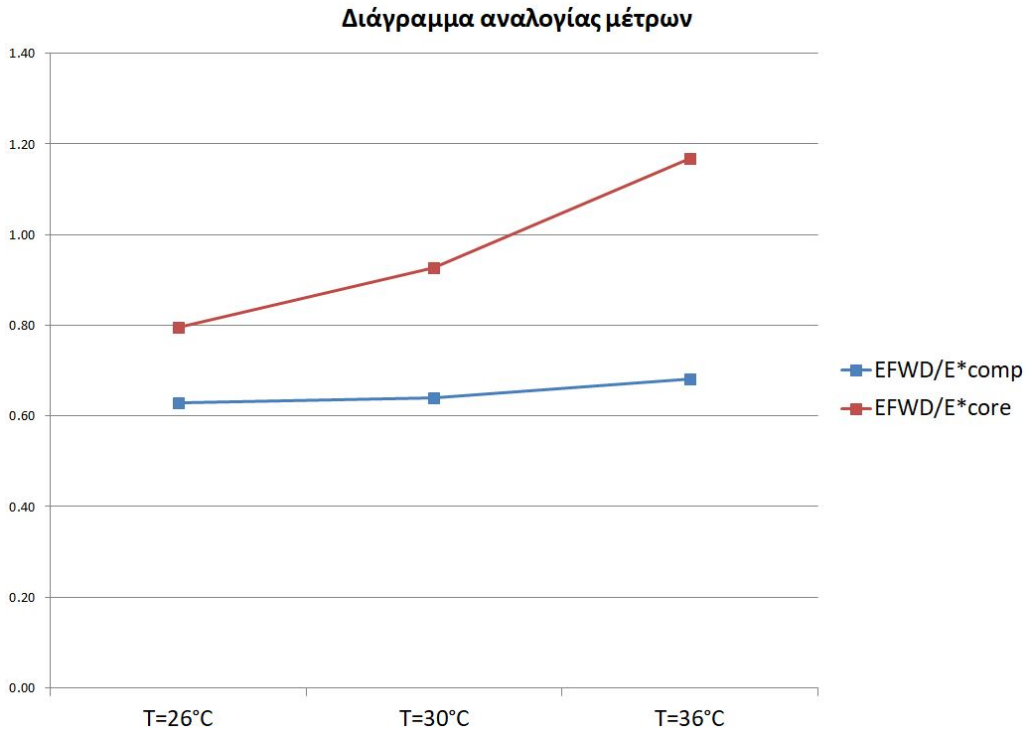
Στην εικόνα 6.20 παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα για τα ασφαλτομίγματα με αδρανή από τον Άραξο στη θερμοκρασία των 24°C. Εδώ φαίνεται το E^*_{core} να δίνει μεγαλύτερες τιμές από ότι στο άλλο οδικό τμήμα, με δύο από τα πέντε σημεία να είναι μεγαλύτερο του E^*_{comp}.



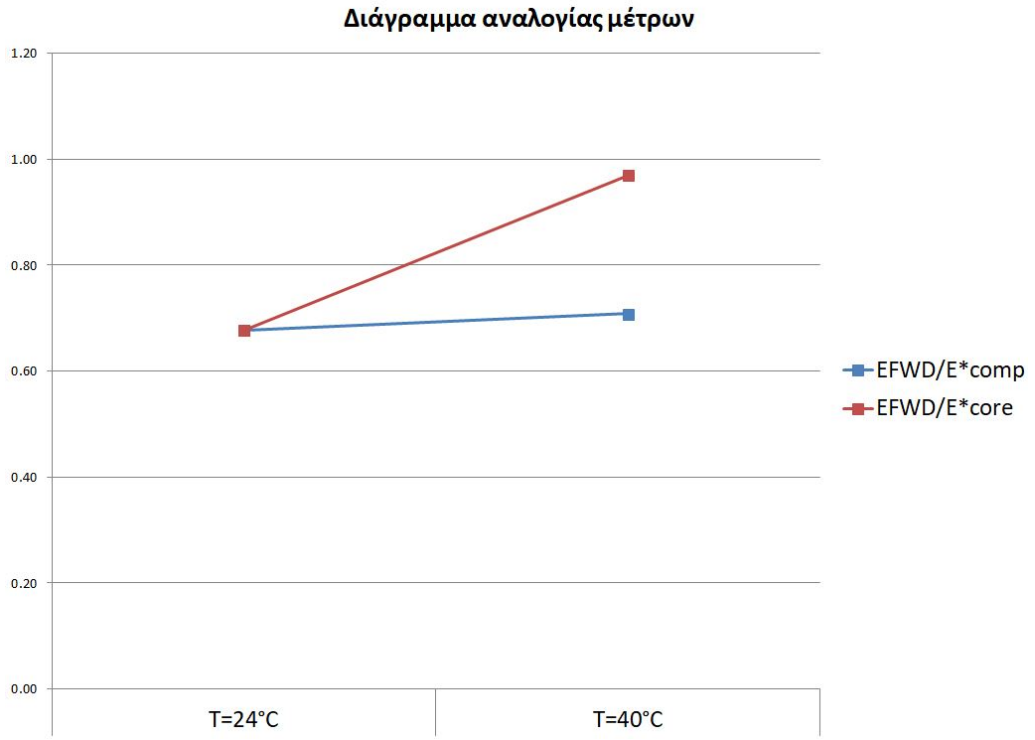
Εικόνα 6.21: Ραβδόγραμμα ασφαλτομιγμάτων από Άραξο στους 40°C

Στους 40°C το E^*_{core} έχει μειωθεί αισθητά σε σχέση με τα άλλα δύο μέτρα. Αξιοσημείωτο είναι ότι στη χιλιομετρική θέση 93+850 στους 24°C το E^*_{core} είχε τη μεγαλύτερη τιμή, ενώ το ίδιο σημείο στους 40°C είναι το μικρότερο από τα τρία μέτρα.

Η αλλαγή στις αναλογίες των τριών μέτρων σε σχέση με τη θερμοκρασία φαίνεται στις εικόνες 6.22 και 6.23. Στα δύο διαγράμματα αυτά φαίνεται πως το E^*_{FWD} και το E^*_{comp} έχουν σχεδόν σταθερή αναλογία σε όλες τις θερμοκρασίες. Αντιθέτως το E^*_{core} φαίνεται να μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό με την άνοδο της θερμοκρασίας από τα άλλα δύο μέτρα, αφού ο λόγος E^*_{FWD} προς E^*_{core} αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Βεβαίως για να μπορεί να θεωρηθεί ως τάση χρειάζονται περισσότερες μετρήσεις σε περισσότερες θερμοκρασίες για να δούμε αν το φαινόμενο αυτό επιμένει. Παρ'όλα αυτά, οι μέχρι τώρα μετρήσεις δείχνουν ότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των πυρήνων είναι πιο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές αλλαγές δίνοντας μεγαλύτερες μειώσεις σε σχέση με το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων αλλά και με το μέτρο δυσκαμψίας από τις μετρήσεις του FWD.



Εικόνα 6.22: Διάγραμμα αναλογίας μέτρων στα ασφαλτομίγματα από Αθίκια

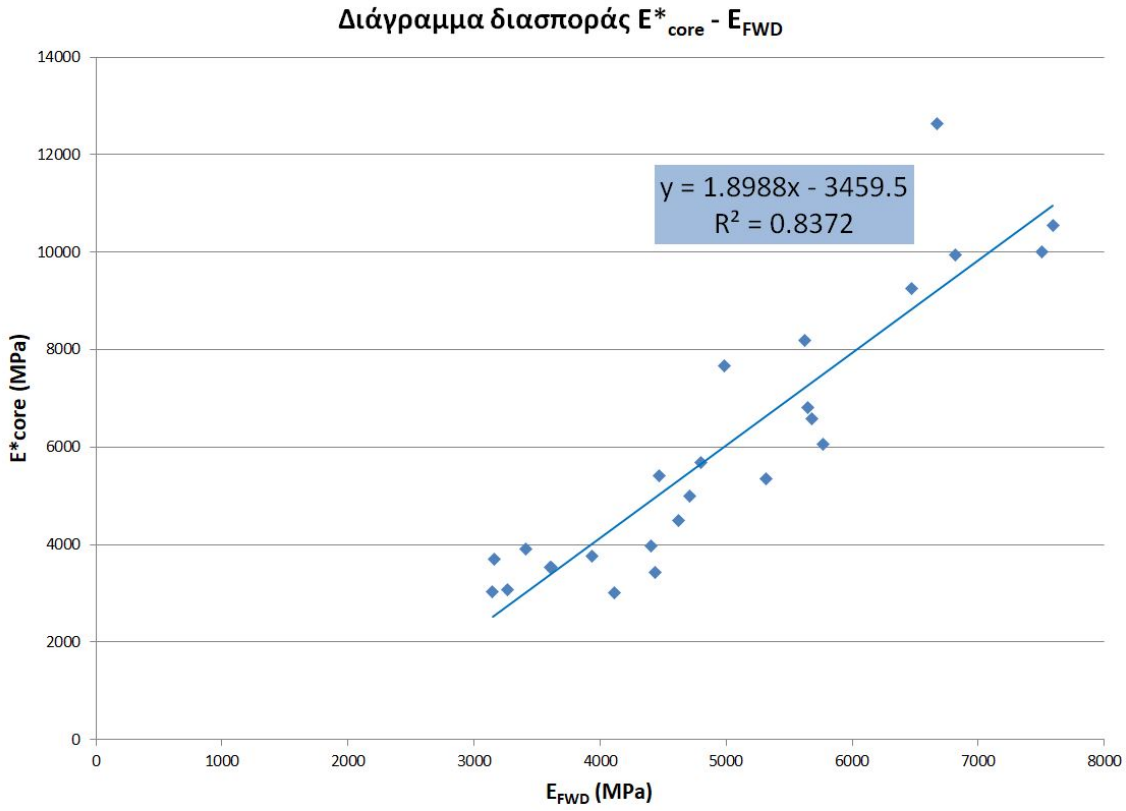


Εικόνα 6.23: Διάγραμμα αναλογίας μέτρων ασφαλτομιγμάτων από Άραξο

Τέλος για να ανακαλύψουμε αν υπάρχει μία ικανοποιητική συσχέτιση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος με βάση την επεξεργασία των πυρήνων και των μετρήσεων του FWD, συγκεντρώθηκαν όλες οι τιμές των E^*_{core} και E^*_{FWD} και υπολογίστηκε η γραμμική τους συσχέτιση. Σημειώνεται ότι συγκεντρώθηκαν οι τιμές και από τα δύο οδικά τμήματα που έχουν διαστρωθεί με διαφορετικά αδρανή. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής περισσότερα σημεία ελέγχου δεν ήταν δυνατό να εξεταστούν και έτσι δημιουργήθηκε ένα ενιάιο σύνολο από τις τιμές των E^*_{core} και E^*_{FWD} και για τις πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η εξίσωση που περιγράφει καλύτερα τη σχέση των δύο μέτρων είναι:

$$E^*_{core} = 1.8988 \cdot E_{FWD} - 3459.5 \tag{6.1}$$

Η σχέση αυτή δείχνει μία αρκετά καλή συσχέτιση αφού έχει συντελεστή R^2=0.84. Υπενθυμίζεται ότι η επιτυχής συσχέτιση του E^*_{core} και του E^*_{FWD} θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή παρακολούθηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος χωρίς, ή με μειωμένη λήψη νέων πυρήνων. Το γραφικό αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 6.24.

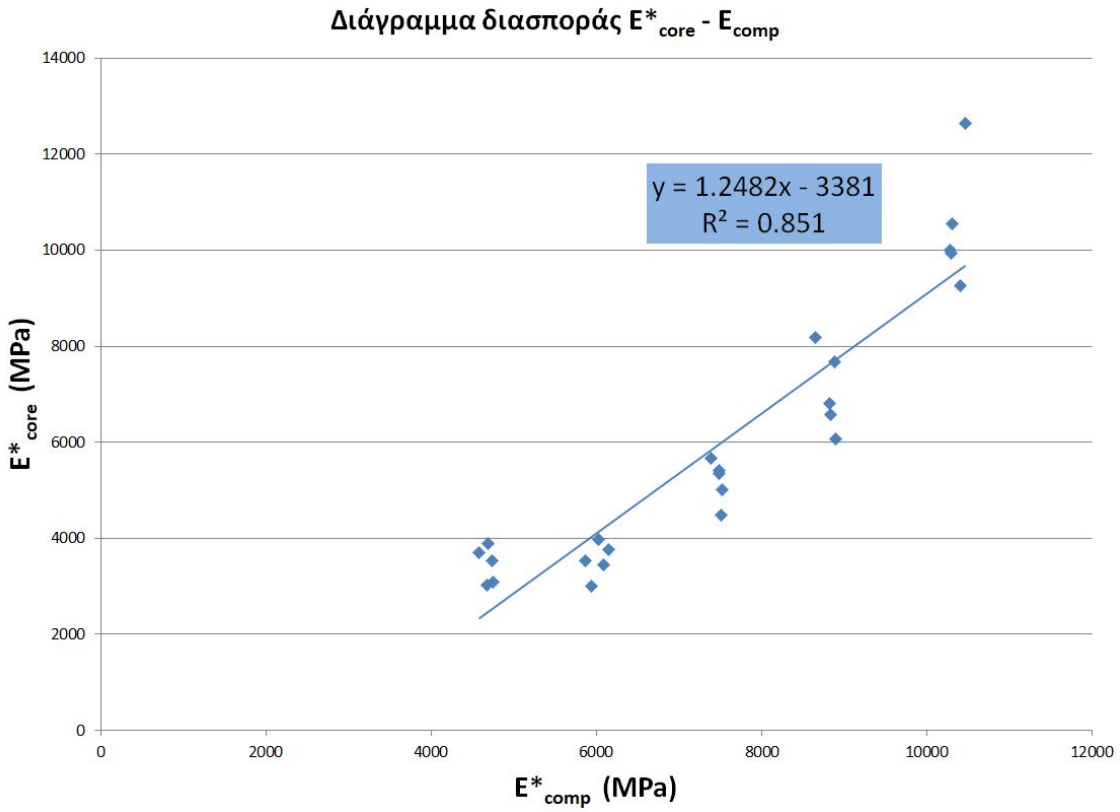


Εικόνα 6.24: Διάγραμμα διασποράς τιμών E^*_{core}-E^*_{FWD}

Τέλος δημιουργήθηκε ακόμα ένα διάγραμμα διασποράς για τις τιμές του E^*_{core} και του E^*_{comp}, για τη γραμμική συσχέτιση των δύο μέτρων. Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση των δύο μέτρων είναι:

$$E^*_{core} = 1.2482 \cdot E_{comp} - 3381 \tag{6.2}$$

και έχει συντελεστή R^2=0.85, που δείχνει και πάλι σχετικά καλή συσχέτιση των τιμών.



Εικόνα 6.25: Διάγραμμα διασποράς τιμών E^*_{core}-E^*_{comp}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται ακολούθως:

- Οι κεντρικές καμπύλες (master curves) του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αποτελούν πολύτιμο εργαλείο στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας των ασφαλτικών στρώσεων καθώς αποτυπώνουν τη συμπεριφορά τους για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

- Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας παρέχει πληροφορίες για το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων (composite modulus), αφού ο εργαστηριακός προσδιορισμός του E* απαιτεί τα δοκίμια προς εξέταση να έχουν πάχος μεγαλύτερο των 15cm. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα έναντι άλλων δοκιμών, αφού δεν απαιτείται ο διαχωρισμός των πυρήνων σε τμήματα μικρότερου πάχους, αλλά υπάρχει αντιστοιχία με τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης όπου το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων αποκρίνεται στη φόρτιση της κυκλοφορίας. Υπάρχει επίσης αντιστοιχία και με τις επιτόπου μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, αφού το σύστημα FWD καταγράφει τις υποχωρήσεις του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων.

- Ο λόγος E_{FWD}/E^*_{core} δείχνει μικρή διακύμανση για κάθε θερμοκρασία. Επομένως, αναλόγως της θερμοκρασίας των επιτόπου καταγραφών στο μέλλον, είναι δυνατή η άμεση εκτίμηση του E* στην υπόψη θερμοκρασία.

- Η συσχέτιση μεταξύ του E^*_{core} και του E_{FWD} χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή με βάση την τιμή του συντελεστή συσχέτισης R^2 η οποία είναι ίση με 0.84. Από τη σχέση που αναπτύχθηκε, είναι δυνατή η εκτίμηση του E* από επιτόπου μετρήσεις με το σύστημα FWD, για οποιαδήποτε θερμοκρασία βρίσκεται εντός του εύρους τιμών που ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα εργασία (24 έως 40°C).

Προτάσεις

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να είναι:

- Ο εμπλουτισμός των πειραματικών δεδομένων μέσω:
  - της πραγματοποίησης δοκιμών σε οδικά τμήματα που διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλτικών στρώσεων.
  - της πραγματοποίησης καταγραφών με το σύστημα FWD σε πλήθος θερμοκρασιών.
- Η διερεύνηση της μεθοδολογίας που πρέπει να ακολουθηθεί για την εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στον έλεγχο οδοστρωμάτων με μικρό πάχος ασφαλτικών στρώσεων (<15cm).
- Ο ανάστροφος υπολογισμός του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των καταγραφών του FWD χρησιμοποιώντας δυναμικές μεθόδους ανάλυσης με απώτερο στόχο τη δημιουργία κεντρικών καμπυλών που να αντιπροσωπεύουν την υπάρχουσα κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Βιβλιογραφία

Γεωργούλη Κ. (2016). *Ανάπτυξη αλγορίθμων εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων.* Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Οδοποιίας.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2015). *Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα.* Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2015). *Σημειώσεις για το μάθημα ειδικά θέματα οδοστρωμάτων.* Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοΐζος Α. (2012). *Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων. Τεύχος Β': Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων.* Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Μάνθος Ε.Δ. (2009) *Μέτρο δυσκαμψίας και παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικών σκυροδεμάτων.* Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Πολυτεχνική σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Μεταφορών, συγκοινωνιακής υποδομής, διαχείρισης έργων και ανάπτυξης.

Πομόνη Μ. (2014). *Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενου οδοστρώματος.* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Οδοποιίας.

AASHTO T342-11 (2011). *Standard Test method for the Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA).* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO T269 (2014). *Standard Method of Test for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO T312 (2015). *Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.*

American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A manual of Practice.* American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

Bonnaure F., Gest G., Gravois A. και Uge P. (1977). *A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures.* Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 96.

Busmister D.M. (1945). *The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I.* Journal of Applied Physics 16, The American Institute of Physics, USA.

Christensen D.W. και Anderson D.A. (1992). *Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements (with discussion).* Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61.

Cross S.A., Jakatimath Y. και Sumesh K.C. (2007). *Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures.* Oklahoma State University, School of Civil & Environmental Engineering, USA.

EN 12697-26:2012 (2012). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness.* European Standard.

EN 12697-31:2007 (2007). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Specimen preparation by gyratory compactor.* European Standard.

Ferry J.D. (1961). *Viscoelastic Properties of Polymers.* John Wiley & Sons, Inc. USA

Garcia G. και Thompson M. (2007). *HMA Dynamic modulus Predictive Models - A review.* Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, USA.

Goodrich J.L. (1991). *Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties (with discussion).* Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 60.

Huang Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design.* Pearson Education, Inc, London, United Kingdom.

Kim Y.R. και Lee Y.C. (1995). *Interrelationships among stiffnesses of asphalt-aggregate mixtures (with discussion).* Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64.

Kim Y.R., Lee Y.C. και Hibbs B.O. (1995). *Temperature correction of deflections and backcalculated asphalt concrete moduli.* Transportation Research Record No. 1473,

Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.

Kutay M.E., Chatti K. και Lei L. (2011). *Backcalculation of Dynamic Modulus from FWD Deflection Data.* Transportation Research Record No. 2227, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.

Leiva F. (2012). *Advanced computing techniques in structural evaluation of flexible pavements using the Falling Weight Deflectometer.* Doctorate dissertation, Auburn University, Alabama, USA.

Loulizi A., Flintsch G.W. και McGhee K. (2007). *Determination of the In-Place Hot-Mix Asphalt Layer Modulus for Rehabilitation Projects Using a Mechanistic-Empirical Procedure.* TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.

Pellinen T. και Witczak M.W. (2002). *Use of Stiffness of Hot-Mix Asphalt as a Simple Performance Test.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1789, Washington, DC.

Pellinen T., Witczak M.W. και Bonaquist R. (2002). *Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-linear Least Squares Optimization Technique.* Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Columbia University, New York.

Robbins M.M. (2009). *An investigation into dynamic modulus of hot-mix asphalt and its contributing factors*. Master thesis, Auburn University, Alabama, USA.

Roberts J.D. και Martin T.C. (1996). *Recommendations for monitoring pavement performance: National Strategic Research Project*. ARRB Group Limited, Australia.

Schwartz C. (2005). *Evaluation of the Witczak Dynamic Modulus Prediction Model.* Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.

Varma S., Kutay M.E. και Chatti K. (2013). *Data requirements from Falling Weight Deflectometer tests for accurate backcalculation of dynamic modulus master curve of asphalt pavements.* Proceeding of the Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, ASCE, Los Angeles.

Yoder E.J. και Witczak M.W. (1975). *Principles of pavement design.* John Wiley & Sons, Inc. USA

Zhang C. (2005). *Comparative study of the physical and mechanistic properties of HMA mixture: field vs laboratory*. Master thesis, Louisiana State University, Department of Civil and Environmental Engineering.