



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΦΡΑΓΚΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ ΣΟΦΟΚΛΗΣ-ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΛΟΪΖΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, κύριο Ανδρέα Λοΐζο για την καθοδήγηση και τη συνολική επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτωρ ΕΜΠ, κύριο Κωνσταντίνο Γκυρτή για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια συνεργασίας και το γενικότερο ενδιαφέρον του για την πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου, για την πνευματική στήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αξιολογείται η επίδραση της θεωρούμενης συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων (ελαστική ή ιξωδοελαστική) στην εντατική καταπόνηση και στη συμπεριφορά εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν εντατικές αναλύσεις σε διατομές από υφιστάμενα εύκαμπτα οδοστρώματα νεαρής ηλικίας, των οποίων τα χαρακτηριστικά αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Αξιοποιώντας τα δεδομένα αυτά διενεργήθηκαν οι ελαστικές και ιξωδοελαστικές εντατικές αναλύσεις με τη χρήση του λογισμικού 3D MOVE ANALYSIS. Υπολογίστηκαν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Η τελευταία συνδέεται με το φαινόμενο της κόπωσης των οδοστρωμάτων και για το λόγο αυτό, έγινε επιπλέον διερεύνηση της θεωρούμενης συμπεριφοράς στο φαινόμενο αυτό μέσω διεθνών μοντέλων της αστοχίας από κόπωση. Οι σχετικές αναλύσεις και τα συμπεράσματα περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

ABSTRACT

In the present thesis, the effect of the asphalt concrete behavior (elastic versus viscoelastic) on the stress-strain state and the performance of flexible pavements is evaluated. For this purpose, stress-strain analysis was performed on several subsections of in-service flexible pavements of young age and the data were derived from the Laboratory of Pavement Engineer of NTUA. Using these data, elastic and viscoelastic stress-strain analysis was performed with 3D MOVE ANALYSIS software. With this software, the strain-state of the pavement was calculated on the critical failure positions, giving emphasis to the horizontal tensile stain at the bottom of the asphalt layers. The latter is connected to flexible pavement's fatigue phenomenon; as a result, an additional investigation was made through international fatigue predicting models. The calculations, analysis and the related discussion are included in this thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1	ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	6
1.2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	7
1.3	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
2	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	9
2.1	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	9
2.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ E^*	11
2.3	ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ	15
2.4	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E^*	17
3	ΚΟΠΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	22
3.1	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	22
3.2	ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΜΙΝΕΡ	24
3.3	ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ	26
3.4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ	27
3.5	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΟΠΩΣΗΣ	29
4	ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	37
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	37
4.2	ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	40
4.2.1	ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	40
4.2.2	ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	41
5	ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	44
5.1	ΑΝΤΛΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ	44
5.2	ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D MOVE ANALYSIS	45
5.3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	51
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
6.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	53
6.2	ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	53
6.3	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	60
6.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ	68
6.4.1	ASPHALT INSTITUTE MODEL (MS-1)	68
6.4.2	MERPDG MODEL	73
6.4.3	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ SHEN-CARPENTER	78

7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο πλαίσιο της λειτουργίας ενός οδοστρώματος, η λειτουργική και δομική του συμπεριφορά είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Ειδικότερα η δομική του κατάσταση είναι ένα ζήτημα που απασχολεί το μηχανικό ήδη από την φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος, καθώς είναι απαραίτητο αυτό να φέρει με ασφάλεια τις προβλεπόμενες διελεύσεις αξονικών φορτίων. Επιπλέον κατά τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος (λειτουργία), ο μηχανικός απαιτείται να αξιολογεί ορθά την δομική επάρκεια του οδοστρώματος, ώστε να μπορεί να σχεδιάζει την εκάστοτε στρατηγική συντήρησής του. Κατά την αξιολόγηση αυτή, ιδιαίτερη σημασία έχει ο σωστός προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών για κάθε επιμέρους στρώση του οδοστρώματος, διαδικασία η οποία γίνεται μέσω ανάλυσης στοιχείων που συλλέγονται από το πεδίο κυρίως μέσω μη καταστρεπτικών συστημάτων. Η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία αποτελούνται από ασφαλικές στρώσεις, βάση από ασύνδετα υλικά και στρώση έδρασης.

Αξιοποιώντας λοιπόν στοιχεία μηχανικής απόκρισης (δηλαδή υποχωρήσεις) και στοιχεία στρωματογραφίας (δηλαδή πάχη στρώσεων), τα οποία προκύπτουν από τη συλλογή στοιχείων στο πεδίο, προκύπτει κατόπιν ανάλυσης πληροφορία για τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, η οποία καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών. Αφού προσδιοριστούν αυτά, ακολουθεί εκτίμηση των εντατικών μεγεθών στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος (πυθμένας ασφαλικών στρώσεων και επιφάνεια στρώσης έδρασης). Η πρώτη σχετίζεται με την αντοχή του οδοστρώματος σε κόπωση ασφαλομιγμάτων, που αποτελεί ένδειξη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επομένως, οι εντατικές αναλύσεις ακολουθούνται από την ανάλυση συμπεριφοράς του οδοστρώματος που σχετίζονται με την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του.

Εύκολα είναι αντιληπτή η σημασία υπολογισμού του μέτρου δυσκαμψίας των υλικών του οδοστρώματος, καθώς οι επιμέρους παραδοχές που γίνονται επιδρούν στο αποτέλεσμα της ανάλυσης. Συνηθέστερα, γίνεται η παραδοχή για γραμμική ελαστική συμπεριφορά όλων των υλικών. Όμως, στα ασφαλομίγματα το μέτρο δυσκαμψίας που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να αναπαριστά με τον πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο την ιξωδοελαστική φύση του ασφαλομίγματος, δηλαδή θα πρέπει να περιγράφει την εξάρτηση της δυσκαμψίας του από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης. Τούτο προκύπτει από τη συμβολή του συνδετικού υλικού που έχει ιξώδη συμπεριφορά, αναγκάζοντας το ασφαλόμιγμα να συμπεριφέρεται τελικά ως ιξωδοελαστικό υλικό, επηρεαζόμενο τόσο από τις ελαστικές ιδιότητες των αδρανών όσο και από τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου.

Ωστόσο, διαφοροποιώντας τη θεωρούμενη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, διαφοροποιείται και η εκτίμηση της απόκρισης και της συμπεριφοράς του οδοστρώματος στο πεδίο. Οι ασφαλικές στρώσεις των οδοστρωμάτων υπό την επίδραση των αξονικών φορτίων υπόκεινται σε συνεχή καταπόνηση με αποτέλεσμα την ανάπτυξη των εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα τους που προκαλούν σταδιακή ανάπτυξη ρωγμών. Επομένως, θεώρηση διαφορετικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων ενδεχομένως να διαφοροποιεί (α) τόσο την εκτίμηση των εντατικών μεγεθών, όσο και (β) την εκτίμηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε κόπωση.

Παράλληλα, η συνεχής παρακολούθηση οδοστρωμάτων επιτρέπει στους φορείς διαχείρισης οδών να καθορίσουν το χρόνο κατά τον οποίο θα παρέμβουν στο οδόστρωμα και τον τύπο των ενεργειών αποκατάστασης, έτσι ώστε να μην γίνει οικονομικά ασύμφορη η συντήρηση του. Αναδεικνύεται λοιπόν η σύνδεση που υπάρχει μεταξύ των παραδοχών ανάλυσης οδοστρωμάτων και του σκέλους της λήψης αποφάσεων για τη διαχείρισή τους.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, σκοπός της εν λόγω διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης του είδους της εντατικής ανάλυσης στην προκύπτουσα καταπόνηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Η διερεύνηση περιλαμβάνει τις δύο κυρίαρχες θεωρήσεις συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, την ελαστική και την ιξωδοελαστική. Ελέγχεται συνεπώς η επίδραση αυτών (α) στα μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο δυσκαμψίας), (β) στα εντατικά μεγέθη (παραμορφώσεις) και (γ) στις επιτρεπόμενες αξονικές διελεύσεις έναντι κόπωσης.

Για την επίτευξη του στόχου, αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα ανάστροφου υπολογισμού (μηχανικά χαρακτηριστικά διατομών) και πυρηνοληψίας (δεδομένα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας) 45 διατομών από το εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ που αφορούν σε δύο εύκαμπτα οδοστρώματα νεαρής ηλικίας. Σε κάθε διατομή διενεργήθηκαν αναλύσεις ακολουθώντας την ελαστική θεωρία και την ιξωδοελαστική θεωρία για τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων. Το σύνολο των εντατικών αναλύσεων που έλαβαν χώρα έγινε μέσω του λογισμικού 3D MOVE ANALYSIS. Η ανάλυση σε κόπωση έγινε, κατόπιν ανασκόπησης, από τρία διεθνή βαθμονομημένα μοντέλα. Τα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία απαρτίζεται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού. Αναφορικά με τα υπόλοιπα:

Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και η σημαντικότητα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στην έκφραση αυτής.

Στο 3^ο Κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων παρέχοντας τις απαιτούμενες πληροφορίες για την κατανόηση του φαινομένου. Επιπλέον σημειώνονται οι πιο καθοριστικοί παράγοντες που την επηρεάζουν. Τέλος αναφέρονται οι διάφορες προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί αλλά και κάποια από τα μοντέλα πρόβλεψης των κύκλων φόρτισης (αξονικές διελεύσεις) μέχρι την αστοχία.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αναδεικνύεται η σημασία της αξιολόγησης των οδοστρωμάτων, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο συμβαίνει αυτή στο πεδίο. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι δύο κυρίαρχες θεωρήσεις που έχουν γίνει στην διπλωματική εργασία για τη συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων (ελαστική και ιξωδοελαστική θεωρία) στο πλαίσιο της αξιολόγησης οδοστρωμάτων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία.

Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σύμφωνα με την ερευνητική διαδικασία.

Στο 7^ο Κεφάλαιο διατυπώνονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Στο 8^ο Κεφάλαιο γίνεται παράθεση των βιβλιογραφικών πηγών που αξιοποιήθηκαν στην εργασία.

2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

2.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Η ιξωδοελαστικότητα αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ασφαλτικών υλικών. Γενικά, τα ιδανικά στερεά είναι υλικά που παραμορφώνονται ελαστικά. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για τις παραμορφώσεις, ανακτάται πλήρως όταν αφαιρεθούν οι τάσεις που τις προκαλούν. Αντίθετα τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται πλαστικά. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, μεταπίπτει σε θερμική ενέργεια (viscous dissipation) και δεν ανακτάται όταν αφαιρεθούν οι τάσεις. Η ιδιαίτερη φύση του ασφαλτομίγματος οφείλεται στα συστατικά του, αφού η άσφαλτος προσδίδει τον ιξώδη χαρακτήρα, ενώ τα αδρανή τον ελαστικό χαρακτήρα. Τα ασφαλτικά μίγματα είναι κατά συνέπεια ιξωδοελαστικά υλικά και σε ασκούμενη μηχανική τάση παρουσιάζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική παραμόρφωση. Έχουν δηλαδή χαρακτηριστικά ιξωδών υγρών και ελαστικών στερεών.

Η ανάγκη ποσοτικοποίησης αυτής της συμπεριφοράς οδήγησε στη δημιουργία του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, το οποίο περιγράφει την επίδραση της συχνότητας φόρτισης και της θερμοκρασίας στη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος, οι οποίοι αποτελούν και τους πιο καθοριστικούς παράγοντες της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας στο πλαίσιο του μηχανιστικού-εμπειρικού οδηγού διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων (Guide for Mechanical-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, MEPDG). Απαραίτητη για τον υπολογισμό του είναι η επιβολή θλιπτικού μονοαξονικού φορτίου ημιτονοειδούς μορφής, όπως ορίζεται από την επόμενη σχέση.

$$\sigma = \sigma_o * \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Η παραμόρφωση που προκύπτει έχει την εξής μορφή.

$$\varepsilon = \varepsilon_o * \sin(\omega t - \delta) \quad (2.2)$$

Όπου:

σ_o : η μέγιστη τάση

ε_o : η μέγιστη παραμόρφωση, που προκύπτει ως αποτέλεσμα εφαρμογής της μέγιστης τάσης

t: χρόνος φόρτισης (sec), $t=1/f$ (sec) όπου f συχνότητα φόρτισης (Hz)

ω : γωνιακή ταχύτητα για την οποία ισχύει, $\omega=2\pi f$ (rad/sec) όπου f συχνότητα φόρτισης

δ : γωνία υστέρησης, η οποία εκφράζει τη χρονική υστέρηση στην εμφάνιση της

μέγιστης παραμόρφωσης έπειτα από την εφαρμογή της μέγιστης τάσης (Huang 2004)

Επίσης σύμφωνα με τον Huang (2004) το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ισούται με το λόγο της τάσης προς την παραμόρφωση και όντας μιγαδικός αριθμός (λόγω υστέρησης στην εμφάνιση της μέγιστης παραμόρφωσης) αποτελείται από πραγματικό και φανταστικό μέρος.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E' + i * E'' \quad (2.3)$$

Το πραγματικό μέρος E' (storage modulus) αναπαριστά τις ελαστικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος, δηλαδή εκφράζει το ανακτώμενο τμήμα παραμόρφωσης κατά την αποφόρτιση του υλικού και ισούται:

$$E' = |E^*| * \cos(\delta) \quad (2.4)$$

Ενώ, το φανταστικό μέρος E'' (loss modulus) αναπαριστά τις ιξώδεις ιδιότητες τους ασφαλτομίγματος, δηλαδή εκφράζει το μη ανακτώμενο τμήμα της παραμόρφωσης και ισούται:

$$E'' = |E^*| * \sin(\delta) \quad (2.5)$$

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η απόλυτη τιμή του σύνθετου (μιγαδικού) μέτρου δυσκαμψίας E^* ορίζεται ως το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Huang 2004, Yoder & Witzcak 2011) και ισούται με τον λόγο μέγιστης τάσης προς μέγιστη παραμόρφωση υπό συνθήκες ημιτονοειδούς φόρτισης.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.1 Αναπαράσταση της εξάρτησης της δυσκαμψίας του οδοστρώματος από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης

2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ E^*

- ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται εργαστηριακά κατόπιν κατάλληλων δοκιμών που ποικίλλουν σε διάταξη αλλά και σε απαιτήσεις γεωμετρίας δοκιμίων. Στο παρελθόν τα δοκίμια ήταν τραπεζοειδούς διατομής και ο προσδιορισμός γινόταν με δύο τρόπους (Bonpnaure et al. 1977). Στον πρώτο τρόπο μέσω της επιβαλλόμενης τάσης και εκτίμησης της τελικής μετατόπισης μετά τη φόρτιση. Στον δεύτερο τρόπο μέσω της επιβαλλόμενης τάσης και της προκύπτουσας παραμόρφωσης. Αργότερα διαφοροποιήθηκε η γεωμετρία των δοκιμίων και χρησιμοποιήθηκαν νέα τεχνολογικά μέσα (αισθητήρες ακρίβειας LVDTs), ενώ καθιερώθηκαν δοκιμές για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Σε ορισμένες δοκιμές καταγράφεται η γωνία υστέρησης, που περιγράφει την καθυστέρηση της ανάπτυξης των αξονικών παραμορφώσεων συγκριτικά με τη φόρτιση (Robbins 2009).

Η κυρίαρχη δοκιμή προσδιορισμού του E^* είναι η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης κατά το πρότυπο AASHTO T342-11 (Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)). Κατά τη δοκιμή επιβάλλεται ελεγχόμενο θλιπτικό φορτίο με ανώτατο όριο τάσης τα 2800 kPa σε ένα εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Ειδικοί αισθητήρες LVDT που τοποθετούνται παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης σε ειδικά μεταλλικά στηρίγματα μετρούν την προκύπτουσα παραμόρφωση. Οι παραμορφώσεις μετριοούνται σε δύο θέσεις με απόσταση 180 μοίρες ή σε τρεις θέσεις με απόσταση 120 μοίρες ή σε τέσσερις θέσεις με απόσταση 90 μοίρες. Οι μετρήσεις γίνονται τουλάχιστον για τέσσερις θερμοκρασίες και έξι συχνότητες φόρτισης, οι οποίες κυμαίνονται από 0 έως 25 Hz.

Τα δοκίμια του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιούνται είναι κυλινδρικά και συμπυκνώνονται με γυροσκοπική μέθοδο πριν τη δοκιμή και λαμβάνουν τις απαιτούμενες διαστάσεις ($h=150$ mm και $d=100$ mm). Στη συνέχεια τοποθετούνται ατσάλινες κυκλικές πλάκες πάνω και κάτω από το δοκίμιο, για την μεταφορά του φορτίου από την συσκευή στο δοκίμιο. Τέλος, ενδιάμεσα από τις πλάκες και το δοκίμιο τοποθετούνται ειδικές μεμβράνες για την ελαχιστοποίηση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων τριβής. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις να είναι μεταξύ 50 και 150 microstrain. Με τον τρόπο αυτό το υλικό παραμένει εντός της περιοχής της γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Για κάθε κύκλο φόρτισης καταγράφονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που προκύπτουν ωστόσο για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας λαμβάνονται υπόψη, ως αντιπροσωπευτικοί, μόνο οι τελευταίοι πέντε κύκλοι φόρτισης.

- ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η μέθοδος αυτή καθιερώθηκε από τους Blaine & Burlot (1970) και πρόκειται για μη καταστρεπτική δοκιμή με τη χρήση μιας δονούμενης ράβδου για μεγάλο εύρος συχνοτήτων και θερμοκρασιών. Έπειτα από ανάλυση με κατάλληλη συσχέτιση για την ταχύτητα και το μήκος του κύματος γίνεται εφικτό να προσδιοριστεί το μιγαδικό μέτρο δυσκαμψίας και τον λόγο του Poisson. Η ανομοιομορφία και η επιρροή της θερμοκρασίας στο ασφαλτόμιγμα αποτελούν τον κυριότερο λόγο που χρειάζεται ανάλυση σε τόσο μεγάλα εύρη θερμοκρασιών κα συχνοτήτων (Hochuli et al 2001).

- ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

Οι εργαστηριακές δοκιμές είναι κατά κανόνα χρονοβόρες. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Για την προσέγγιση του E^* μέσω αλγορίθμων απαιτείται κυρίως πληροφορία των ογκομετρικών χαρακτηριστικών, αλλά και της κοκκομετρίας του δείγματος. Ήδη από το 1954 ο Van Der Poel ανέπτυξε το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης. Οι επικρατέστεροι αλγόριθμοι είναι οι Witczak 1-37A (1999), Witczak 1-40D (2006) και Hirsch (2003), οι οποίοι δίνονται παρακάτω.

WITCZAK 1-37A

$$\log(E^*) = -1.25 + 0.029 * \rho_{200} - 0.0018 * \rho_{200}^2 - 0.0028 * \rho_4 - 0.058 * Va - 0.0822 * \frac{V_{beff}}{V_{beff} + Va} + \frac{3.872 - 0.0021 * \rho_4 + 0.004 * \rho_{38} - 0.000017 * \rho_{38}^2 + 0.0055 * \rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.313351 * \log(f) - 0.393532 * \log(n)}} \quad (2.7)$$

$$\log(\log(n)) = A + VTS * \log(Tr) \quad (2.8)$$

$$n = \frac{|Gb|}{10} * \left(\frac{1}{\sin(\delta)} \right)^{4.8628} \quad (2.9)$$

Όπου E*: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος

n: ιξώδες της ασφάλτου

f: συχνότητα φόρτισης

ρ_{200} : διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος αδρανών από το κόσκινο No200

$\rho_4, \rho_{34}, \rho_{38}$: αθροιστικό συγκρατούμενο ποσοστό (%) κατά βάρος αδρανών από τα κόσκινα No4, No3/4'' και No3/8''

Va: ποσοστό κενών αέρος (%)

Vbeff: ενεργό ποσοστό ασφάλτου (%)

Tr: θερμοκρασία (Rankine)

A, VTS: παράμετροι γραμμικής παλινδρόμησης

|Gb|: δυναμικό διατμητικό μέτρο ασφάλτου

δ : γωνία υστέρησης διάτμηση

WITCZAK 1-40D

$$\log(E^*) = -0.349 - 0.754 * |Gb|^{-0.0052} * \left(6.65 - 0.032 * \rho_{200} + 0.0027 * \rho_{200}^2 + 0.011 * \rho_4 - 0.0001 * \rho_4^2 + 0.006 * \rho_{38} - 0.00014 * \rho_{38}^2 - 0.08 * Va - 1.06 * \frac{V_{beff}}{Va + V_{beff}} \right) + \frac{2.56 + 0.03 * Va + 0.71 * \frac{V_{beff}}{Va + V_{beff}} + 0.012 * \rho_{38} - 0.0001 * \rho_{38}^2 - 0.01 * \rho_{34}}{1 + e^{-0.7814 - 0.5785 * \log|Gb| + 0.8834 * \log(\delta)}} \quad (2.10)$$

Όπου E*: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος

n: ιξώδες της ασφάλτου

f: συχνότητα φόρτισης

ρ_{200} : διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος αδρανών από το κόσκινο No200

$\rho_{4, \rho_{34}, \rho_{38}}$: αθροιστικό συγκρατούμενο ποσοστό (%) κατά βάρος αδρανών από τα κόσκινα No4, No3/4'' και No3/8''

V_a : ποσοστό κενών αέρος (%)

V_{beff} : ενεργό ποσοστό ασφάλτου (%)

$|Gb|$: δυναμικό διατμητικό μέτρο ασφάλτου

δ : γωνία υστέρησης διάτμησης

HIRSCH

$$|E^*|_{mix} = P_c * \left[4200000 * \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 * |Gb| * \left(\frac{VFA * VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) * \left(\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3 * VFA * |Gb|} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA * 3 * |Gb|}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA * 3 * |Gb|}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (2.12)$$

Όπου $|E^*|_{mix}$: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

$|Gb|$: δυναμικό διατμητικό μέτρο ασφάλτου

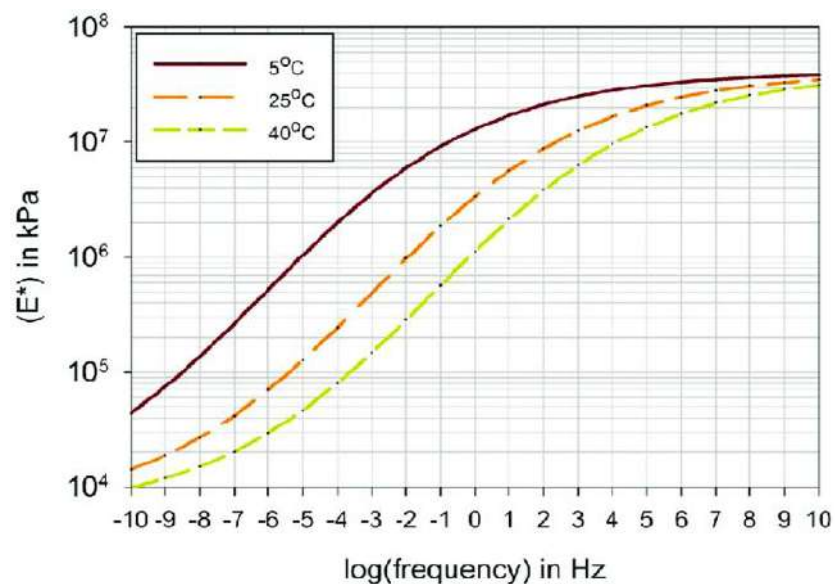
VMA: ποσοστό κενών μεταξύ των αδρανών (%)

VFA: ποσοστό κενών που έχουν γεμίσει με άσφαλτο (%)

P_c : συντελεστής επαφής αδρανών

2.3 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

Ανεξάρτητα από τον τρόπο υπολογισμού του E^* (δηλαδή στο εργαστήριο ή μέσω αλγορίθμων) χρειάζεται ένας τρόπος για την πλήρη αναπαράσταση του για διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Η δημιουργία των κεντρικών καμπυλών ήταν αποτέλεσμα της ανάγκης για περιγραφή της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Συνδυάζοντας τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος, αλλά και τις ιδιότητες των υλικών του οι Witczak & Fonseca (1996) ανέπτυξαν τη σιγμοειδή συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή εκφράζει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και ταυτόχρονα προβλέπει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πρόβλεψης του E^* για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και θερμοκρασιών. Το πλεονέκτημα αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί στο σχεδιασμό, σχεδιάζοντας το οδόστρωμα για διαφορετικούς φόρτους κυκλοφορίας και θερμοκρασίες (Lundy et al 2005). Επιπλέον το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια αξιολόγησης οδοστρωμάτων αφού η τιμή του είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ποιότητα του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.2 Τυπική μορφή κεντρικών καμπυλών για 3 διαφορετικές θερμοκρασίες

Για να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση αυτή απαιτείται ο καθορισμός μια θερμοκρασίας αναφοράς, πάνω στην οποία μετατοπίζονται οι τιμές του E^* για όλες τις υπόλοιπες θερμοκρασίες. Από τη μία, τα σημεία με θερμοκρασία ελέγχου μεγαλύτερη από την θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται προς τα αριστερά (χαμηλότερες συχνότητες). Από την άλλη, τα σημεία με θερμοκρασία ελέγχου μικρότερη από την θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται προς τα δεξιά (υψηλότερες συχνότητες). Τα σημεία που τυγχάνει να έχουν

θερμοκρασία ελέγχου ίδια με τη θερμοκρασία αναφοράς παραμένουν αμετάβλητα (Clyne et al 2004).

Η βαθμονόμηση της σιγμοειδούς συνάρτησης προκύπτει από τη μέθοδο ελαχιστοποίησης του αθροίσματος τετραγώνων των διαφορών της πραγματικής και της προβλεπόμενης τιμής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Ουσιαστικά πρόκειται για μια διαδικασία βελτιστοποίησης που πραγματοποιείται μέσω του Solver στο Microsoft Excel μέχρις ότου το άθροισμα να ελαχιστοποιηθεί. Η σιγμοειδής συνάρτηση έχει την κάτωθι μορφή:

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(fr)}} \quad (2.13)$$

Όπου E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (ksi)

$\delta + \alpha$: η μέγιστη τιμή του $\log(E^*)$

δ : η ελάχιστη τιμή του $\log(E^*)$

β, γ : παράμετροι σχήματος της συνάρτησης

fr : η μειωμένη συχνότητα (Hz)

Αναλυτικότερα η παράμετρος β καθορίζει την οριζόντια θέση του σημείου καμπής της σιγμοειδούς συνάρτησης και η παράμετρος γ το ρυθμό μεταβολής μεταξύ των ελαχίστων και των μέγιστων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας Lundy et al (2005).

Επιπλέον η συνάρτηση μετατόπισης είναι μια λογαριθμική σχέση μεταξύ της συχνότητας φόρτισης f (Hz) (από τη δεδομένη κυκλοφορία και θερμοκρασία) και της μειωμένης συχνότητας fr (Hz).

$$\log(fr) = \log(a(T)) + \log(f) \quad (2.14)$$

Ο λογάριθμος του παράγοντα μετατόπισης $a(T)$ είναι πολυώνυμο της θερμοκρασίας. Με τον τρόπο αυτό έγινε εμφανής η συσχέτιση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και της θερμοκρασίας από τους Witczak & Bari (2004).

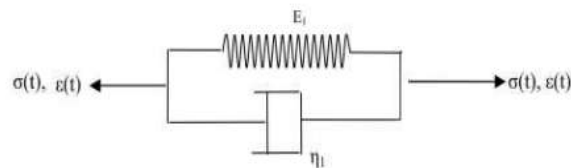
$$\log(a(T)) = a * T^2 + b * T + c \quad (2.15)$$

Να σημειωθεί ότι στο Solver γίνεται ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των παραμέτρων $\alpha, \beta, \gamma, \delta, a, b, c$ και απαιτείται ο λογάριθμος μετατόπισης να είναι μηδέν για θερμοκρασίες ελέγχου ίδιες με τη θερμοκρασία αναφοράς.

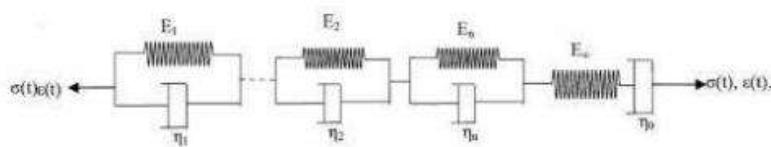
2.4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E^*

Στο πλαίσιο αναλύσεων οδοστρωμάτων, πέρα από την γνώση του E^* απαιτείται και η προσομοίωσή του. Η προσομοίωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω καταστατικών μοντέλων εκτίμησης. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει σειρές από ελατήρια και αποσβεστήρες που εκφράζουν την ιξώδη και την ελαστική συνιστώσα της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα τα ελατήρια αναπαριστούν τις ελαστικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος και οι αποσβεστήρες αναπαριστούν τις ιξώδεις ιδιότητες του (Huang 2004). Η διαφοροποίηση των μοντέλων έγκειται στην επιλογή του τρόπου σύνδεσης των ελατηρίων, σε σειρά ή παράλληλα. Σε κάποια από τα μοντέλα ο τρόπος σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων είναι μικτός. Με βάση τον εκάστοτε συνδυασμό, προκύπτει μια συγκριμένη μαθηματική εξίσωση υπολογισμού του E^* . Το πλεονέκτημα αυτών των μοντέλων έναντι των αριθμητικών, είναι ότι χρησιμοποιούν φυσικά στοιχεία για να περιγράψουν τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του μίγματος γεγονός που βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών. Οι βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις των Olard & Benedetto (2003) και Xu & Solamanian (2009) συνοψίζουν τα περισσότερα μοντέλα, που αναφέρονται παρακάτω:

- Μοντέλο Kelvin: Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα ελατήριο συνδεδεμένο παράλληλα με έναν γραμμικό αποσβεστήρα (εικόνα 2.3).

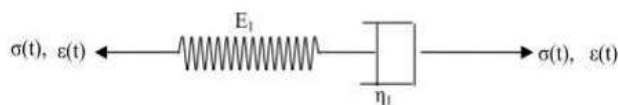


Εικόνα 2.3 Μοντέλο Kelvin (Xu & Solamanian 2009)

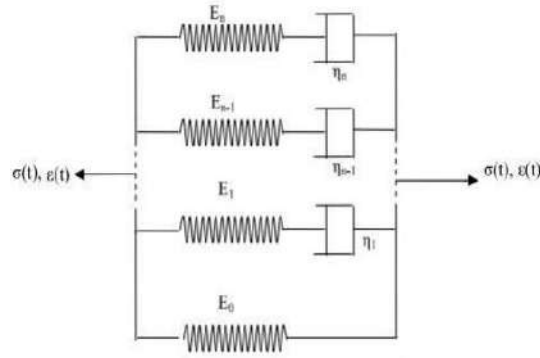


Εικόνα 2.4 Γενικευμένο μοντέλο Kelvin (Xu & Solamanian 2009)

- Μοντέλο Maxwell: Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα ελατήριο συνδεδεμένο σε σειρά με ένα γραμμικό αποσβεστήρα (εικόνα 2.5).



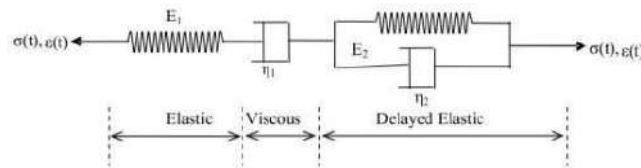
Εικόνα 2.5 Μοντέλο Maxwell (Xu & Solamanian 2009)



Εικόνα 2.6 Γενικευμένο μοντέλο Maxwell (Xu & Solamanian 2009)

Τα δύο αυτά μοντέλα θεωρούνται αρκετά απλοποιητικά και δεν αποδίδουν ρεαλιστικά τη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν οι γενικευμένες μορφές των ως άνω μοντέλων. Το γενικευμένο μοντέλο Kelvin (εικόνα 2.4) αποτελείται από πολλά μοντέλα Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το γενικευμένο μοντέλο Maxwell (εικόνα 2.6) αποτελείται από πολλά μοντέλα Maxwell συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους όπως φαίνονται παρακάτω.

- Μοντέλο Burger: Το μοντέλο Burger αποτελείται από ένα μοντέλο Maxwell και ένα μοντέλο Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 Μοντέλο Burger (Xu & Solamanian 2009)

Το μοντέλο Kelvin αναπαριστά την υστέρηση στην ελαστική απόκριση (delayed elastic response), το ελατήριο του μοντέλου Maxwell την στιγμιαία ελαστική απόκριση (instantaneous elastic response) και ο αποσβεστήρας αναπαριστά την ιξώδη απόκριση. Σύμφωνα με το μοντέλο Burger, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E * (i\omega) = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2^2 + \omega^2 * n_2^2}\right) - \left(\frac{1}{\omega * n_1} + \frac{\omega * n_2}{E_2^2 + \omega^2 * n_2^2}\right) i} \quad (2.16)$$

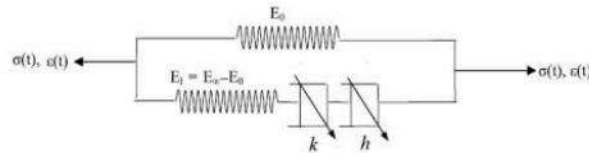
Όπου:

E_1, E_2 : μέτρα ελαστικότητας των ελατηρίων

n_1, n_2 : παράμετροι ιξώδους των αποσβεστήρων

w : γωνιακή συχνότητα, $w=2\pi f$ όπου f η συχνότητα φόρτισης

- Μοντέλο Huet-Sayegh: Το μοντέλο Huet-Sayegh αποτελείται από δυο παράλληλους κλάδους. Ο πρώτος κλάδος αποτελείται από δύο μεταβλητούς αποσβεστήρες και ένα ελατήριο σε σειρά, ενώ ο δεύτερος κλάδος από ένα ελατήριο μόνο (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8 Μοντέλο Huet-Sayegh (Xu & Solamanian 2009)

Σύμφωνα με τα μοντέλο Huet-Sayegh το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E^* = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta(iw\tau)^{-k} + (iw\tau)^{-h}} \quad (2.17)$$

Όπου:

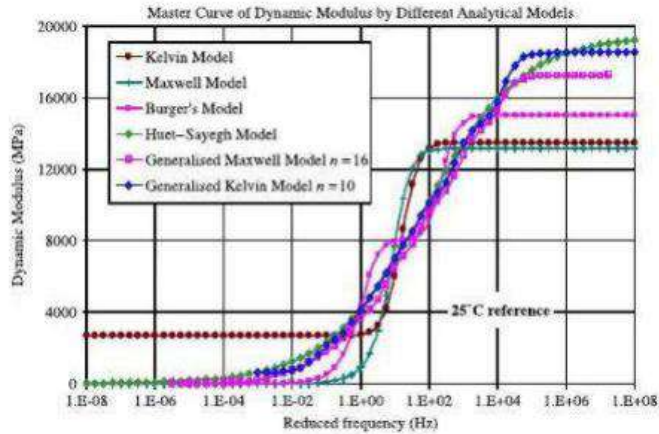
E_0, E_1 : μέτρα ελαστικότητας των ελατηρίων

δ, k, h : σταθερές που σχετίζονται με τους αποσβεστήρες όπου $1 > h > k > 0$

w : γωνιακή συχνότητα, ισχύει $w=2\pi f$ όπου f η συχνότητα φόρτισης

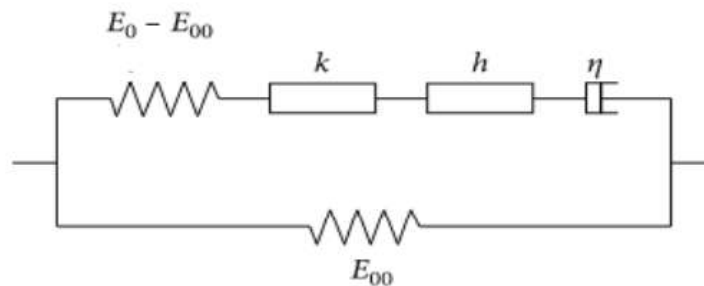
τ : παράμετρος που εκφράζει την εξάρτηση του μοντέλου από τη θερμοκρασία, ισχύει $\tau = \exp(a + b \cdot T + c \cdot T^2)$

Από σχετική συγκριτική έρευνα (Xu and Solamanian 2009), έχει αναφερθεί ότι το μοντέλο Huet-Sayegh, συγκριτικά με τα υπόλοιπα, έχει την πιο ομαλή κεντρική καμπύλη, γεγονός που του δίνει την δυνατότητα να προβλέπει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας πέρα από το εύρος των δεδομένων συχνοτήτων και θερμοκρασιών από τις μετρήσεις, δηλαδή ακόμη και σε πολύ χαμηλές ή πολύ υψηλές συχνότητες φόρτισης (εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9 Κεντρικές καμπύλες των καταστατικών μοντέλων

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μόνιμη παραμόρφωση του συνδετικού υλικού του ασφαλτικού μίγματος οι Olard & Benedetto (2003), επέκτειναν το μοντέλο Huet-Sayegh προσθέτοντας ένα γραμμικό αποσβεστήρα σε σειρά με τους άλλους δύο μεταβλητούς (εικόνα 2.10). Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε "2S2P1D", τα αρχικά του οποίου προέρχονται από τα στοιχεία που το αποτελούν δηλαδή 2 ελατήρια (Springs), 2 παραβολικούς αποσβεστήρες (Parabolic dashpots) και 1 γραμμικό αποσβεστήρα (linear Dashpot).



Εικόνα 2.10 Μοντέλο 2S2P1D (Olard & Benedetto 2003)

Σύμφωνα με το μοντέλο 2S2P1D το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E^* = E_{\infty} + \frac{E_0 - E_{\infty}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2.18)$$

Όπου:

E_0, E_∞ : σταθερές που σχετίζονται με την ελαστικότητα των ελατηρίων

δ, β, k, h : σταθερές που σχετίζονται με τους αποσβεστήρες όπου $1 > h > k > 0$

w : γωνιακή συχνότητα, ισχύει $w = 2\pi f$ όπου f η συχνότητα φόρτισης

τ : παράμετρος που εκφράζει την εξάρτηση του μοντέλου από τη θερμοκρασία,

$$\text{ισχύει } \tau = e^{(a+b*T+c*T^2)}$$

Είναι προφανές ότι η επιλογή του καταστατικού μοντέλου ανάλυσης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος θα έχει άμεση επίπτωση στην ανάλυση εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος συνολικά. Το γεγονός αυτό εισάγει προκλήσεις στο μηχανικό οδοστρωμάτων, καθώς η επιλογή ενός μοντέλου έναντι κάποιου άλλου επηρεάζει το αποτέλεσμα της διαδικασίας σχεδιασμού ενός νέου οδοστρώματος καθώς και την ανάλυση ενός υφιστάμενου στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησής του. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων λαμβάνεται υπόψη μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης που περιεγράφηκε στην ενότητα 2.3.

3 ΚΟΠΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ


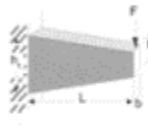
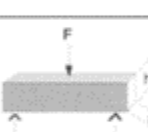
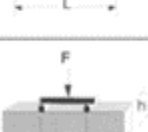
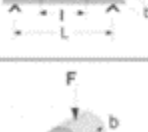
3.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Η κόπωση είναι μια από τις τρεις βασικότερες καταπονήσεις (αυλάκωση, ρωγμές από κόπωση και ρωγμές λόγω χαμηλής θερμοκρασίας) στα εύκαμπτα οδοστρώματα, έχοντας ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των υλικών του οδοστρώματος και γενικότερα της υποδομής αυτού. Τα υλικά του οδοστρώματος υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από τα διερχόμενα οχήματα. Μεγαλύτερη συχνότητα φόρτισης οδηγεί σε γρηγορότερη μείωση της δυσκαμψίας του οδοστρώματος και η επακόλουθη συσσώρευση βλαβών οδηγεί συντομότερα στην σταδιακή αστοχία.

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση έχει περάσει από πολλά στάδια τα τελευταία 50 χρόνια και υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες προσέγγισης του φαινομένου μέσα από εργαστηριακές δοκιμές σε πρισματικά ή κυλινδρικά δοκίμια, όπως: απλή κάμψη, κάμψη σε πολλαπλά σημεία, τριαξονική φόρτιση, δοκιμή θραύσης, αντιδιαμετρική θλίψη κ.α. Ενδεικτική είναι η δοκιμή κάμψης σε 4 σημεία, διότι η κάμψη των σημείων γίνεται ταυτόχρονα και η διατμητική τάση που αναπτύσσεται είναι αμελητέα, συνεπώς απλοποιεί τη διαδικασία της ανάλυσης.

Στις εργαστηριακές δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη καταπόνησης, δηλαδή δοκιμές υπό ελεγχόμενες συνθήκες τάσεων ή υπό ελεγχόμενες παραμορφώσεις. Συνήθως εξαιτίας της πολυπλοκότητας των συνθηκών των φορτίσεων χρησιμοποιούνται συνδυαστικές μέθοδοι. Παρόλα αυτά πληθώρα από μελέτες έχουν δείξει ότι δοκιμές ελεγχόμενων παραμορφώσεων προσεγγίζουν εξαιρετικά τις συνθήκες για λεπτά οδοστρώματα με πάχος ασφαλτικών στρώσεων μικρότερο των 50 mm. Αυτό συμβαίνει διότι η παραμόρφωση στην (λεπτή) ασφαλτική στρώση επηρεάζεται από τις υποκείμενες στρώσεις και όχι από τη μείωση της δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης. Από την άλλη οδοστρώματα με μεγάλο πάχος, μεγαλύτερο των 152mm, προσεγγίζονται καλύτερα από δοκιμές ελεγχόμενων τάσεων, αφού το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου αναλαμβάνεται από την ανώτερη στρώση. Για τα οδοστρώματα ενδιάμεσου πάχους συνηθίζονται οι δοκιμές μεικτής καταπόνησης.

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό των χαρακτηριστικών έναντι κόπωσης, έγινε μια συντονισμένη προσπάθεια οργανωμένη από την τεχνική επιτροπή της RILEM. Σε αυτή συμμετείχαν πολλοί ερευνητές από διαφορετικές χώρες και τα αποτελέσματά τους παρουσιάστηκαν στη δημοσίευση Di Benedetto et al. (2004). Εξετάστηκαν 11 διαφορετικοί μέθοδοι για την διερεύνηση των χαρακτηριστικών της κόπωσης σε πυκνά και καλά διαβαθμισμένα ασφαλτομίγματα. Οι εργαστηριακές δοκιμές που επιλέχθηκαν ήταν και επιβαλλόμενων τάσεων, αλλά και επιβαλλόμενων παραμορφώσεων (εικόνα 3.1).

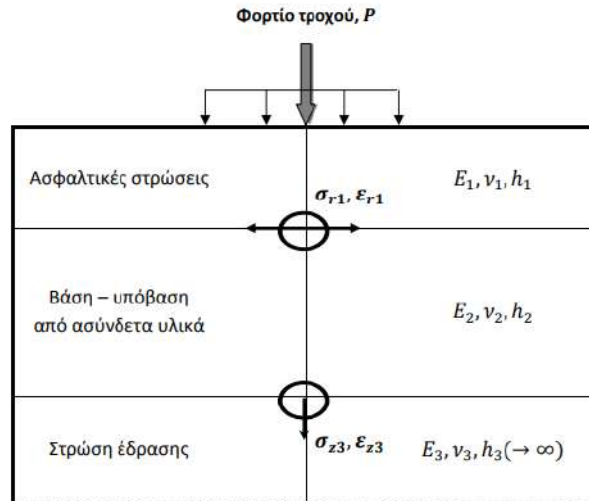
Type	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΤΥΠΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ
T/C		Μονοαξονική θλίψη "ομογενές"
2PB		Κάμψη σε 2 σημεία "μη ομογενές"
3PB		Κάμψη σε 3 σημεία "μη ομογενές"
4PB		Κάμψη σε 4 σημεία "μη ομογενές"
ITT		Δοκιμή Έμμεσου Εφελκυσμού "μη ομογενές"

Εικόνα 3.1 Τυπικές διατομές δοκιμών και είδος φόρτισης για τον προσδιορισμό μηχανικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την κόπωση (Di Benedetto et al 2004)

Κατά τη διάρκεια πειραματικής δοκιμής κόπωσης ασφαλτομιγμάτων, οι δύο φάσεις της αρχικής φθοράς και της διάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ότι εμφανίζονται διαδοχικά, ή για ορισμένες γεωμετρικές δοκιμές, παράλληλα στο χρόνο. Εκτός από την υποβάθμιση που προκύπτει από την έναρξη της φθοράς και τη διάδοση, άλλα φαινόμενα, που δεν πρέπει να είναι ερμηνεύονται ως κόπωση, μπορεί να συμβάλουν στη μείωση της δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια δοκιμής κόπωσης.

Στην πράξη, από τη φόρτιση μέσω των τροχών αναπτύσσονται τόσο εφελκυστικές όσο και κατακόρυφες παραμορφώσεις στο οδόστρωμα. Η ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων στη βάση της ασφαλτικής στρώσης (εικόνα 3.2) οδηγεί στη δημιουργία μικρορωγμών που διαδίδονται μέσα στο υλικό υπό την επίδραση επαναλαμβανόμενων φορτίων κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα την έναρξη κόπωσης του οδοστρώματος. Η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε κόπωση επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους και κυρίως τον τύπο και τη σύνθεση του ασφαλτομίγματος, τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της ασφάλτου, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (θερμοκρασία ασφαλτικών στρώσεων) και τις συνθήκες φόρτισης. Ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων αποτελεί την πρώτη κρίσιμη θέση αστοχίας του εύκαμπτου

οδοστρώματος. Σημειώνεται ότι η δεύτερη θέση αφορά στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης όπου αναπτύσσονται θλιπτικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 3.2 Ανάπτυξη παραμορφώσεων σε τυπική διατομή οδοστρώματος από τη φόρτιση τροχού και θέσεις κρίσιμων εντατικών μεγεθών

Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται είναι σημαντικές, αλλά δεν συνδέονται με το φαινόμενο της κόπωσης. Αν οι θλιπτικές παραμορφώσεις στη στρώση έδρασης ξεπεράσουν κάποιες οριακές τιμές είναι πλέον μόνιμες (παραμένουσες παραμορφώσεις-δεύτερη μορφή αστοχίας). Στην εν λόγω διπλωματική εργασία δεν θα ελεγχθεί αυτός ο τύπος αστοχίας.

3.2 ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΜΙΝΕΡ

Η πρόβλεψη της φθοράς του οδοστρώματος εξαιτίας της κόπωσης βασίζεται στην αρχή του Miner. Το φαινόμενο συσσώρευσης ρωγμών υπό επαναλαμβανόμενα φορτία θεωρούνταν ότι έχει σχέση με το έργο που καταναλωνόταν από το υλικό κατά τη φόρτιση, πράγμα που διευκόλυνε την περαιτέρω ανάπτυξη ρωγμών. Ο λόγος του αριθμού των κύκλων φόρτισης μιας δεδομένης χρονοϊστορίας (σταθερού πλάτους) προς το συνολικό αριθμό των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία αποτελεί τον δείκτη φθοράς του οδοστρώματος. Μέσω της εξίσωσης του Wohler η χρονοϊστορία της φόρτισης μετατρέπεται σε διάγραμμα τάσης-κύκλων φόρτισης. Αντιστοιχίζονται οι τιμές των διαφόρων πλατών τάσεων στην καμπύλη κόπωσης και λαμβάνεται ένας αριθμός κύκλων φόρτισης για κάθε φορτίο ξεχωριστά, υπολογίζεται ο δείκτης φθοράς για κάθε φορτίο και στη συνέχεια αθροίζονται οι δείκτες όλων των φορτίων. Όταν ο δείκτης αυτός φτάσει

στο 100% τότε το υλικό αστοχεί εξαιτίας της κόπωσης (M.A. Miner, Cumulative damage in fatigue, J. Appl. Mech. 12 (1945)).

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3.1)$$

Όπου

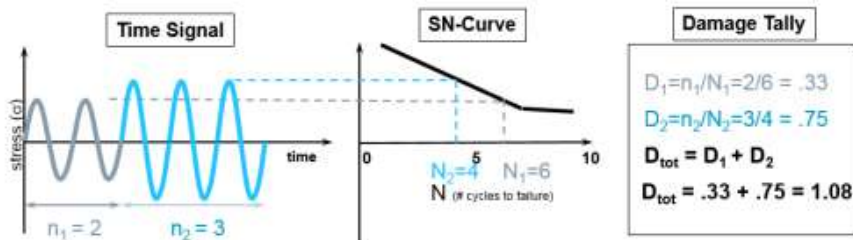
D : Δείκτης φθοράς

N_i : κύκλοι φόρτισης υλικού μέχρι την αστοχία

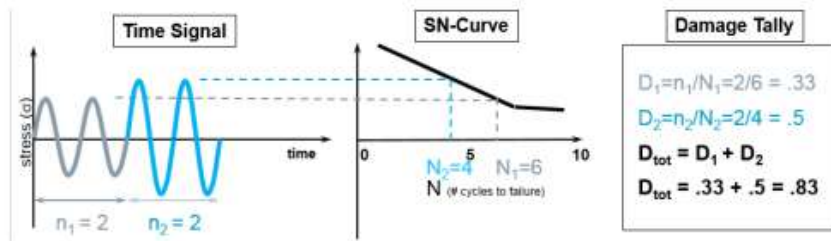
n_i : κύκλοι φόρτισης υλικού του δεδομένου φορτίου

k : αριθμός των διαφορετικών επιπέδων πλάτους φόρτισης

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη D (εικόνες 3.3-3.4).



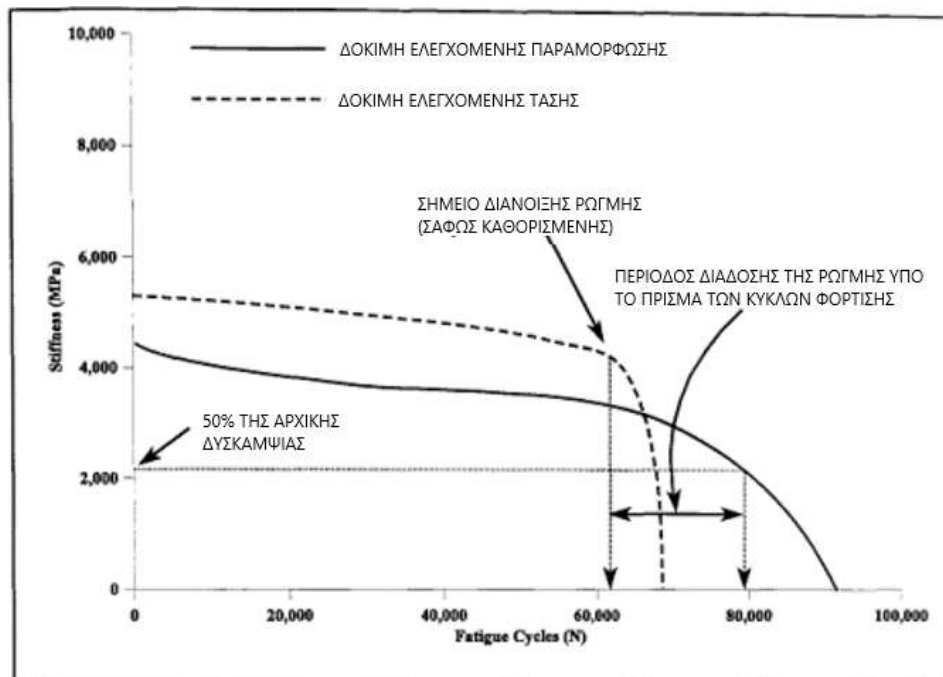
Εικόνα 3.3 Υλικό που αστοχεί βάσει της αρχής Miner



Εικόνα 3.4 Υλικό που δεν αστοχεί βάσει της αρχής Miner

3.3 ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Γενικότερα θεωρείται ότι το οδόστρωμα αστοχεί όταν η δυσκαμψία του μειώνεται και φτάνει στο 50% της αρχικής (εικόνα 3.5). Το μέγεθος που ενδιαφέρει κατά την ανάλυση είναι οι κύκλοι φόρτισης μέχρι την αστοχία, N_f . Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού γίνεται μέσω των μοντέλων κόπωσης. Αρχικά αναπτύχθηκαν μοντέλα που περιείχαν μέσα μόνο την επίδραση των παραμορφώσεων, αργότερα όμως αναπτύχθηκαν πιο ολοκληρωμένα μοντέλα που περιλάμβαναν την επιρροή της δυσκαμψίας και των ογκομετρικών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 3.5 Μείωση της δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία

$$SDR = \frac{N_i * S_i}{S_0} \quad (3.2)$$

Όπου:

SDR: ρυθμός μεταβολής δυσκαμψίας (stiffness degradation ratio)

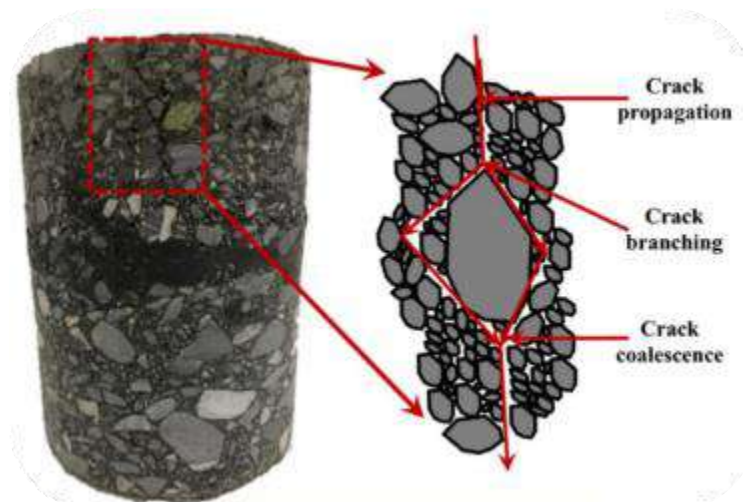
N_i : κύκλος φόρτισης

S_i : δυσκαμψία στον κύκλο i

S_0 : αρχικός δείκτης δυσκαμψίας ($i=50$)

3.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε η κόπωση αποτελεί μια από τις τρεις βασικότερες καταπονήσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Κατά τη φόρτιση του οδοστρώματος από τα οχήματα αναπτύσσονται ρωγμές στις θέσεις που αναπτύσσονται οι κρίσιμες παραμορφώσεις. Η έκταση των ρωγμών και ο ρυθμός διάδοσης εξαρτώνται κυρίως από τη δυσκαμψία της στρώσης και το εκάστοτε φορτίο. Μόλις εμφανιστεί η μικρορωγμή στην κρίσιμη θέση, εξαιτίας της συνεχόμενης φόρτισης από τα διερχόμενα οχήματα ξεκινάει η διαδικασία εξάπλωσης της σε όλη τη στρώση διερχόμενη από τις αδύναμες περιοχές μεταξύ των χονδρόκοκκων υλικών. Η μοντελοποίηση των δύο φάσεων φθοράς (γέννηση και διάδοση ρωγμής) σε ένα ενιαίο μοντέλο είναι δύσκολη, αφού κατά τη διάδοση της ρωγμής το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ανισότροπα και δεν ακολουθεί την κλασική θεωρία θραύσης. Η ανισότροπη συμπεριφορά του οφείλεται στις πολλές φάσεις του ασφαλτομίγματος (συνδετικό υλικό, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα κλάσματα αδρανών).



Εικόνα 3.6 Μηχανισμός ρηγάτωσης (top-down cracking) από πυρήνα

Σύμφωνα με την κλασική αντίληψη για την κόπωση, η ανάπτυξη εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων υποδεικνύει ότι οι ρωγμές κόπωσης εμφανίζονται στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων και διαδίδονται προς την επιφάνεια (bottom-up cracking). Ωστόσο, εφελκυσμός παρατηρείται και στην επιφάνεια του οδοστρώματος, στοιχείο που δείχνει ότι οι ρωγμές μπορεί να εμφανίζονται πρώτα στην επιφάνεια και στη συνέχεια να διαδίδονται προς τον πυθμένα (top-down cracking).

Έτσι, οδηγούμαστε σε δύο κυρίαρχα είδη ρωγμών κόπωσης:

- Με τη διάδοση ρωγμής από την επιφάνεια προς τον πυθμένα (top-down cracking) σχετίζονται οι διαμήκεις ρωγμές (longitudinal cracking) (εικόνα 3.7)
- Με τη διάδοση ρωγμής από τον πυθμένα προς την επιφάνεια (bottom-up cracking) σχετίζονται οι αλιγατορικές ρωγμές (alligator cracking) (εικόνα 3.8)

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις ρωγμές τύπου bottom-up cracking.



Εικόνα 3.7 Εμφάνιση ρωγμών από κόπωση στην επιφάνεια λόγω top-down cracking



Εικόνα 3.8 Εμφάνιση αλιγατορικών ρωγμών από κόπωση στην επιφάνεια λόγω bottom-up cracking

3.5 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΟΠΩΣΗΣ

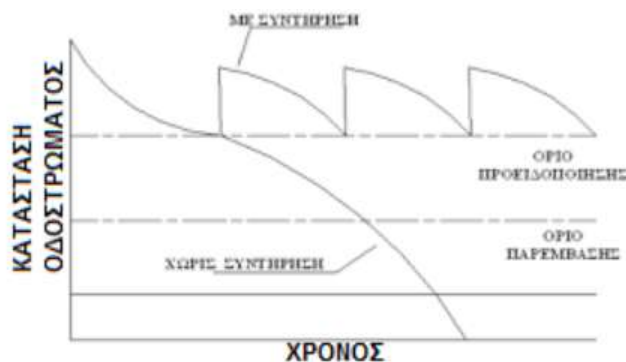
Οι προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί για την αναπαράσταση του φαινομένου της κόπωσης μέσω μοντέλων διαχωρίζονται σε 4 κατηγορίες.

- Φαινομενολογική Προσέγγιση
- Μηχανική Συνεχούς Μέσου
- Κλασική Θεωρία Θραύσης
- Ενεργειακή Προσέγγιση

Στην εν λόγω διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η φαινομενολογική και η ενεργειακή προσέγγιση.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η ανάγκη βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες είναι χρονοβόρες και οικονομικά ασύμφωρες, οδήγησε στην δημιουργία των νόμων κόπωσης. Οι νόμοι κόπωσης αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο, αφού με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών μετατόπισης στο πεδίο (transfer functions) κάνουν προβλέψεις για υφιστάμενα οδοστρώματα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η πρόβλεψη της πλέον κατάλληλης χρονικής στιγμής για επέμβαση στο οδόστρωμα, ώστε αυτό να μην έχει φτάσει σε αστοχία. Ιδανικά η επέμβαση πρέπει να γίνει αρκετά νωρίτερα, ώστε το κόστος να μην είναι ασύμφορο, όπως προκύπτει από την εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9 Διάγραμμα πρόβλεψης κατάλληλου χρόνου συντήρησης

Με την πάροδο των ετών έχουν δημιουργηθεί πολλά μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο της κόπωσης. Χρησιμοποιούνται τόσο για το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων όσο και για τον έλεγχο υφιστάμενων.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι για τη φαινομενολογική προσέγγιση. Η απλή μαθηματική προσέγγιση είναι μέσω της εξίσωσης:

$$Nf = \alpha * \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^b \quad (3.3)$$

Όπου:

Nf: αριθμός κύκλων φόρτισης ως την αστοχία

ε_0 : αρχική εφελκυστική παραμόρφωση στη βάση των ασφαλικών

a,b: πειραματικές παράμετροι

Άλλα μοντέλα κόπωσης χρησιμοποιούν εκτός από τις παραμορφώσεις και το μέτρο δυσκαμψίας για τις προβλέψεις τους και εκφράζονται ως:

$$Nf = \alpha * \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^b * \left(\frac{1}{S_0}\right)^c \quad (3.4)$$

Όπου:

Nf: αριθμός κύκλων φόρτισης ως την αστοχία

ε_0 : εφελκυστική παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή

S_0 : αρχικός δείκτης δυσκαμψίας

a,b,c: πειραματικές παράμετροι

Τέλος υπάρχουν μοντέλα κόπωσης που περιλαμβάνουν και τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος:

$$Nf = a * \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^b * \left(\frac{1}{S_0}\right)^c * \left(\frac{Vb}{Vb+AV}\right)^d \quad (3.5)$$

Όπου:

Nf: αριθμός κύκλων φόρτισης ως την αστοχία

ε_0 : εφελκυστική παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή

S_0 : αρχικός δείκτης δυσκαμψίας

a,b,c,d: πειραματικές παράμετροι

Vb: όγκος συνδετικού υλικού (%)

AV: όγκος κενών (%)

Στη βάση ανάπτυξης της φαινομενολογικής προσέγγισης, περιγράφονται στη συνέχεια δύο κλασσικοί νόμοι αστοχίας σε κόπωσης.

Asphalt Institute Model (MS-1)

Πρόκειται για ένα μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για πολλά χρόνια, μέχρι την αναθεωρημένη έκδοση του από τον NCHRP (2004).

$$Nf = 0.00432 * C * (\epsilon t)^{-3.291} * (E)^{-0.854} \quad (3.6)$$

$$M = 4.84 * \left(\frac{Vb}{Va+Vb} - 0.69 \right) \quad (3.7)$$

$$C = 10^M \quad (3.8)$$

Όπου:

Nf: κύκλοι φόρτισης ως την αστοχία

C: συντελεστής προσαρμογής με βάση τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά Va, Vb

ϵt : εφελκυστική αντοχή στην κρίσιμη περιοχή

E: μέτρο δυσκαμψίας

MEPDG (Revised MS-1)

Πρόκειται για αναθεωρημένη έκδοση του MS-1 από τον NCHRP (2004). Στον νόμο αυτό συμπεριλήφθηκε και η επίδραση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, που φάνηκε πως παίζει καθοριστικό ρόλο για την καλύτερη πρόβλεψη των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία. Ουσιαστικά μέσω της θεώρησης του πάχους, μπορεί να προσαυξηθεί η αντοχή έναντι κόπωσης που προβλέπεται μέσω των εργαστηριακών δοκιμών ώστε να προσεγγίζεται καλύτερα η συμπεριφορά πεδίου.

$$Nf = 0.00432 * \beta f1 * C * (\epsilon t)^{-3.9492} * (E)^{-1.281} \quad (3.9)$$

$$\beta f1 = k1' * \beta f1' \quad (3.10)$$

$$k1' = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 3.49 * hac}}} \quad (3.11)$$

Όπου:

Nf: κύκλοι φόρτισης ως την αστοχία

$\beta f1$: παράμετρος

$\beta f1'$: παγκόσμια σταθερά βαθμονόμησης

$k1'$: παράμετρος επίδρασης πάχους ασφαλτικής στρώσης

hac: πάχος ασφαλικής στρώσης

C: συντελεστής προσαρμογής από το πεδίο

εt: εφελκυστική αντοχή στην κρίσιμη περιοχή

E: μέτρο δυσκαμψίας

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Με την πάροδο του χρόνου διαπιστώθηκε ότι σημαντικός παράγοντας είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης του δοκιμίου. Οι προσεγγίσεις απώλειας ενέργειας εισάγουν τη σχέση της ενέργειας που καταναλώνεται μέσα στο υλικό εξαιτίας των βλαβών που δημιουργούνται (ρηγμάτωσης) με τους κύκλους φόρτισης μέχρι την αστοχία. Έτσι, εκτός από τη φαινομενολογική προσέγγιση στην κόπωση έγιναν προσπάθειες δημιουργίας νόμων κόπωσης που θα περιείχαν μέσα τις ενεργειακές απώλειες.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ: «ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

Η ασφάλτος είναι ένα υλικό με ιξωδοελαστική συμπεριφορά, όπως προαναφέρθηκε, που καταναλώνει ενέργεια υπό φόρτιση με τη μορφή μηχανικού έργου και θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης η δυσκαμψία της ασφάλτου μειώνεται και εμφανίζονται οι πρώτες μικρορωγμές στο υλικό. Η απώλεια ενέργειας λοιπόν διαφέρει στους κύκλους φόρτισης. Μειώνεται στις δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης και αυξάνεται στις δοκιμές ελεγχόμενης τάσης. Διάφορες μελέτες (Ghuzland & Carpenter 2000, Ghuzland & Carpenter 2001, Shen & Carpenter 2007) έχουν δείξει ότι για να προκύψει φθορά στο υλικό πρέπει να υπάρχει κάποια αλλαγή στο βρόγχο υστέρησης άρα και στην απώλεια ενέργειας. Η απώλεια ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

$$W_i = \pi * \sigma_i * \epsilon_i * \sin(\varphi_i) \quad (3.12)$$

Όπου:

W_i : η απώλεια ενέργειας του κύκλου φόρτισης i

σ_i : το εύρος της τάσης του κύκλου φόρτισης i

ϵ_i : το εύρος των παραμορφώσεων του κύκλου φόρτισης i

φ_i : η γωνία φάσης του κύκλου φόρτισης i

Το προτεινόμενο κριτήριο αστοχίας κατά τους Pronk & Horman (1989) βασίζεται στο λόγο της απώλειας ενέργειας (DER- Dissipated Energy Ratio).

$$DER = \frac{\sum W_i}{w_i} \quad (3.13)$$

Όπου:

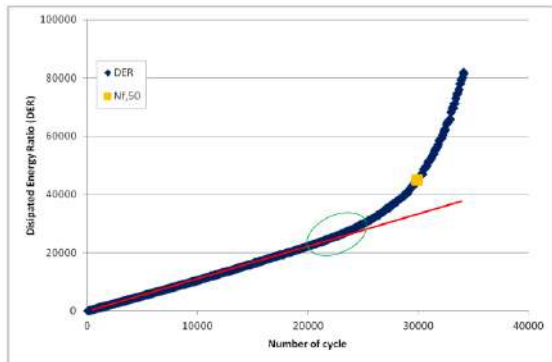
ΣWi : το άθροισμα της απώλειας ενέργειας μέχρι τον κύκλο i

Wi : η απώλεια ενέργειας στον κύκλο i ανά μονάδα όγκου

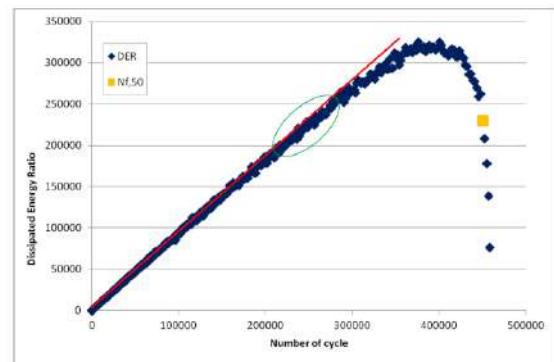
$$\Sigma Wi = \pi * \epsilon o^2 * \Sigma_{k=1}^i [Smixk * \sin(\varphi k)] \quad (3.14) \quad (\text{ελεγχόμενη παραμόρφωση})$$

$$\Sigma Wi = \pi * \sigma o^2 * \Sigma_{k=1}^i \frac{\sin(\varphi k)}{Smixk} \quad (3.15) \quad (\text{ελεγχόμενη τάση})$$

Για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων πρέπει να σχεδιαστεί το διάγραμμα της απώλειας ενέργειας με τους κύκλους φόρτισης. Αν η δοκιμή είναι ελεγχόμενης παραμόρφωσης η μορφή της καμπύλης είναι αρχικά ευθεία και μετά αύξουσα καμπύλη (εικόνα 3.10). Καθώς λοιπόν στο δοκίμιο επιβάλλονται παραμορφώσεις εκείνο καταναλώνει την ενέργεια συνεχώς μέχρι το τέλος της δοκιμής. Αν η δοκιμή είναι ελεγχόμενης τάσης η μορφή της καμπύλης είναι αρχικά ευθεία και μετά φθίνουσα καμπύλη (εικόνα 3.11). Αυτό σημαίνει ότι καθώς στο δοκίμιο επιβάλλονται τάσεις κάποια στιγμή αυτό δεν μπορεί να καταναλώσει την ενέργεια που του προσδίδεται οπότε αστοχεί. Οι κύκλοι φόρτισης μέχρι την αστοχία είναι στο σημείο που η απώλεια ενέργειας αποκλίνει από την αρχική ευθεία. Στο σημείο εκείνο οι μικρορωγμές διευρύνονται, που σημαίνει το τέλος της πρώτης φάσης (δημιουργία μικρορωγμών) και την αρχή της δεύτερης (διάδοση ρωγμής).



Εικόνα 3.10 Απώλεια ενέργειας συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης για δοκιμές ελεγχόμενων παραμορφώσεων



Εικόνα 3.11 Απώλεια ενέργειας συναρτήσσει των κύκλων φόρτισης για δοκιμές ελεγχόμενων τάσεων

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ: «ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

Εφόσον η απώλεια ενέργειας εξαρτάται από την ιστορία, για να υπολογιστεί η φθορά πρέπει να υπάρχει αλλαγή στην τιμή της απώλειας ενέργειας. Οι δημοσιεύσεις των Ghuzland & Carpenter (2000), Ghuzland & Carpenter (2003), and Shen & Carpenter (2007) προτείνουν τη χρήση του ρυθμού μεταβολής της απώλειας ενέργειας ως μια παράμετρο περιγραφής του φαινομένου της κόπωσης. Επίσης θεωρείται ως ο πλέον κατάλληλος δείκτης για τον υπολογισμό της φθοράς, αφού θεωρείται ότι μόνο όταν υπάρξει σταθερός ρυθμός μεταβολής της καταναλισκόμενης ενέργειας τότε έχουμε σταθερή διάδοση φθοράς.

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (3.16)$$

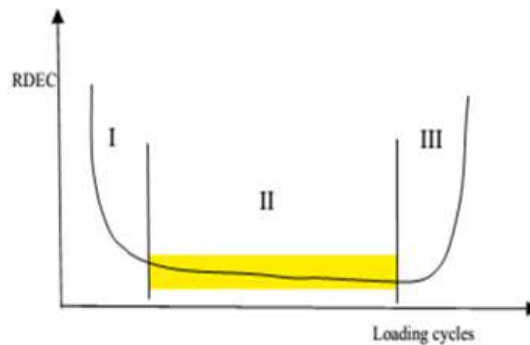
Όπου:

RDEC: ο ρυθμός μεταβολής της απώλειας ενέργειας-

DE_{n+1}: η απώλεια ενέργειας στον κύκλο n+1

DE_n: η απώλεια ενέργειας στον κύκλο n

Μετά από μία απότομη πτώση του, ο ρυθμός μεταβολής της απώλειας ενέργειας σταθεροποιείται (Plateau Value), στην οποία μια συγκεκριμένη τιμή ενέργειας μετατρέπεται σε φθορές (εικόνα 3.12). Στη συνέχεια ο ρυθμός αυξάνεται και πάλι απότομα μέχρι να επέλθει η πραγματική αστοχία του οδοστρώματος.

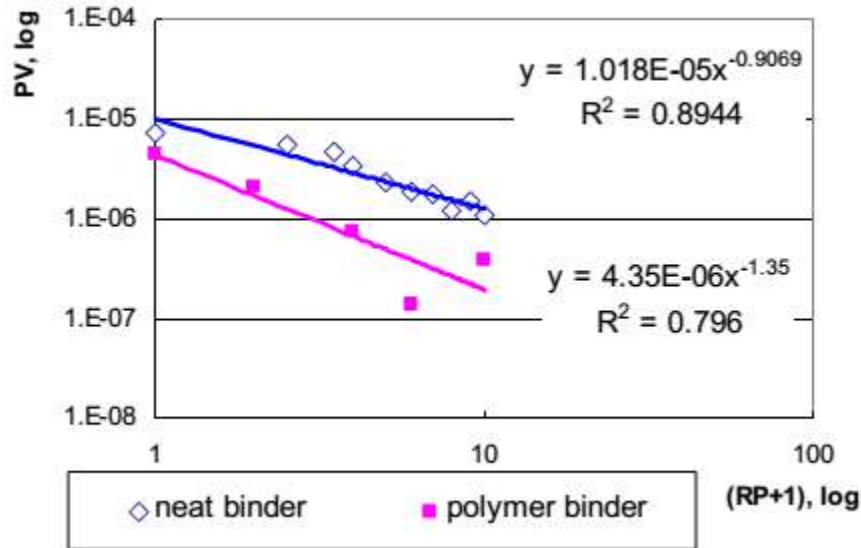


Εικόνα 3.12 Ρυθμός μεταβολής της απώλειας ενέργειας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης

Η τιμή που αντιστοιχεί στην κατά 50% μείωση της δυσκαμψίας βρίσκεται στη δεύτερη φάση. Συνεπώς καθοριστικό ρόλο στους υπολογισμούς έχει το Plateau Value. Μέσα από πολλές πειραματικές διαδικασίες έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός του λόγω της μεγάλης διασποράς των αποτελεσμάτων. Όταν ο ρυθμός μεταβολής

φτάσει στο σημείο αύξησης (μετάβαση από δεύτερη σε τρίτη φάση) έχει έρθει ήδη η πραγματική αστοχία τοπικά, καθώς είναι το σημείο που το δίκτυο μικρορωγμών έχει ενωθεί και διαδίδεται η μακρορωγμή.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ενδεικτικά η μεταβολή του Plateau Value για διάφορες τιμές περιόδου επαναφοράς (εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13 Επιρροή της περιόδου επαναφοράς στην αυτοθεραπεία του ασφαλτομίγματος

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση της αυτοθεραπείας (ανάμεσα στους κύκλους φόρτισης). Αυτή έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα της φόρτισης και κατ' επέκταση την περίοδο επαναφοράς, την ταχύτητα της κυκλοφορίας και τον τύπο των οχημάτων. Η αυτοθεραπεία είναι μία ιδιότητα των ασφαλτομιγμάτων, που τους δίνει τη δυνατότητα να επαναφέρουν τη δυσκαμψία και την αντοχή τους κλείνοντας τις μικρορωγμές που έχουν ανοίξει από την επαναλαμβανόμενη φόρτιση, ιδιαίτερα όταν μεσολαβούν χρονικά μεγάλα διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα η αυτοθεραπεία παρατηρείται λόγω αλλαγής στην εσωτερική δομή της ασφάλτου και λαμβάνει χώρα σε μοριακό επίπεδο. Μετά την αφαίρεση της εξωτερικής φόρτισης, δύο διαδικασίες θα υποβληθούν εσωτερικά στο μίγμα. Μία είναι η ιξωδοελαστική ανάκαμψη και η άλλη είναι η αυτοθεραπεία κατά τη διαδικασία ρηγμάτωσης.

Ενδεικτικός νόμος που συνδέει την τιμή του PV με τους κύκλους έναντι αστοχίας προτάθηκε από τους ερευνητές Shen & Carpenter ως ακολούθως.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ SHEN & CARPENTER

$$PV_{w/o} = 44.422 * \varepsilon^{5.140} * S^{2.993} * VP^{1.850} * GP^{-0.4063} \quad (3.17)$$

$$PV_h = PV_{w/o} * (RP + 1)^{slope} \quad (3.18) \qquad Nf = 0.4801 * PV^{-0.9007} \quad (3.19)$$

$$VP = \frac{AV}{AV+Vb} \quad (3.20)$$

$$GP = \frac{P_{nms}-P_{pcs}}{P_{200}} \quad (3.21)$$

Όπου ε = εφελκυστική παραμόρφωση στην κρίσιμη περιοχή

S = μέτρο δυσκαμψίας (MPa)

VP = ογκομετρική παράμετρος

AV = ποσοστό κενών αέρος στο μίγμα (%)

V_b = ογκομετρικό ποσοστό συνδετικού (%)

GP = παράμετρος κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών

P_{NMS} = ποσοστό των αδρανών που διέρχονται από το κόσκινο μέγιστου ανοίγματος (%)

P_{PCS} = ποσοστό αδρανών που διέρχονται από το κόσκινο κύριου ελέγχου (%)

P₂₀₀ = ποσοστό αδρανών που διέρχονται από το κόσκινο No.200 (%)

RP = περίοδος επαναφοράς (sec)

PV_{w/o} = τιμή (πλατό) του ρυθμού μεταβολής της διασκεδασμένης ενέργειας χωρίς την επίδραση της αυτοθεραπείας

Slope = κλίση της καμπύλης επούλωσης PV_{w/o}-(RP+1)

PV_h = τιμή (πλατό) του ρυθμού μεταβολής της διασκεδασμένης ενέργειας συμπεριλαμβανομένης και της αυτοθεραπείας

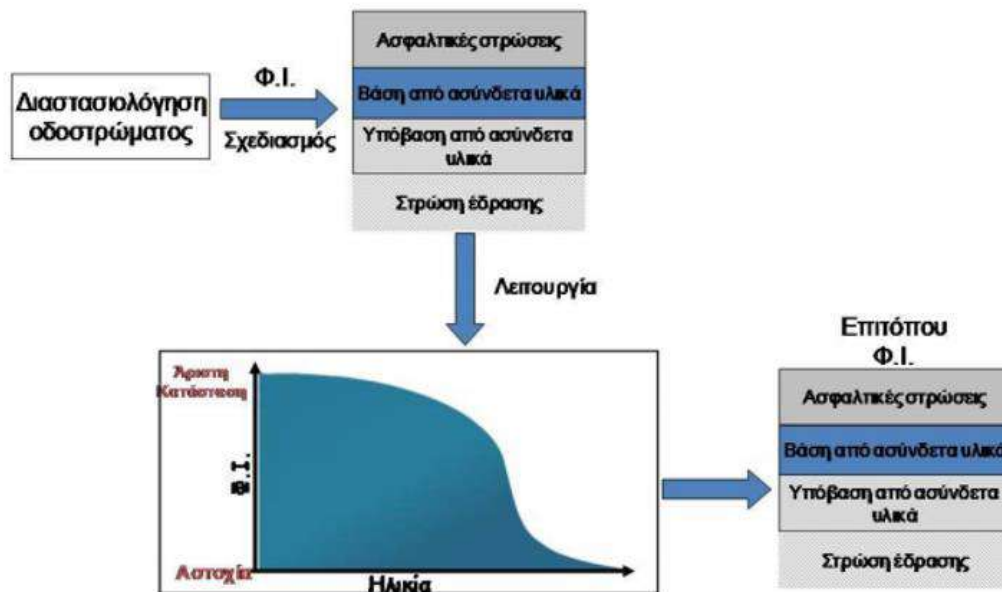
N_f = αριθμός κύκλων φόρτισης

4 ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της Φέρουσας Ικανότητας του (Φ.Ι) επιτόπου. Φέρουσα Ικανότητα ενός οδοστρώματος είναι η ικανότητα του οδοστρώματος να φέρει τα προβλεπόμενα αναπτυσσόμενα φορτία κυκλοφορίας για τη χρονική περίοδο για την οποία έχει σχεδιαστεί αλλά και στη συνέχεια της λειτουργίας του και πέρα του χρόνου σχεδιασμού, δεδομένων των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής. Σημαντική είναι η παρατήρηση τόσο της Φ.Ι του οδοστρώματος, αλλά και τη Φ.Ι κάθε επιμέρους στρώσης μέσω των επιμέρους μηχανικών χαρακτηριστικών καθεμίας.

Την δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος την επηρεάζουν αρκετοί παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η κυκλοφορία, η γήρανση των υλικών. Οι παράγοντες αυτοί μειώνουν τη Φ.Ι του οδοστρώματος και υποβαθμίζουν το επίπεδο εξυπηρέτησης του. Χρήζει μεγάλης σημασίας η σύγκριση της Φ.Ι σχεδιασμού και της Φ.Ι του πεδίου (insitu), ιδιαίτερα όταν γίνει παρακολούθησή του αμέσως μετά την κατασκευή, αλλά και μετέπειτα στην περίοδο λειτουργίας, η εκτίμηση της Φ.Ι. επιτρέπει την ορθολογικότερη διαχείρισή του.



Εικόνα 4.1 Δομική συμπεριφορά ασφαλτικού στρώματος (Λοΐζος & Πλατή 2013)

Ο προσδιορισμός της Φ.Ι απαιτεί τη γνώση αρκετών παραμέτρων. Τα πάχη των στρώσεων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά, κλιματολογικά και κυκλοφοριακά στοιχεία είναι απαραίτητα για τη σωστή εκτίμηση της. Η καλή εκτίμηση της Φ.Ι αμέσως μετά την κατασκευή οδηγεί στη δημιουργία ενός μητρώου παρακολούθησης του οδοστρώματος.

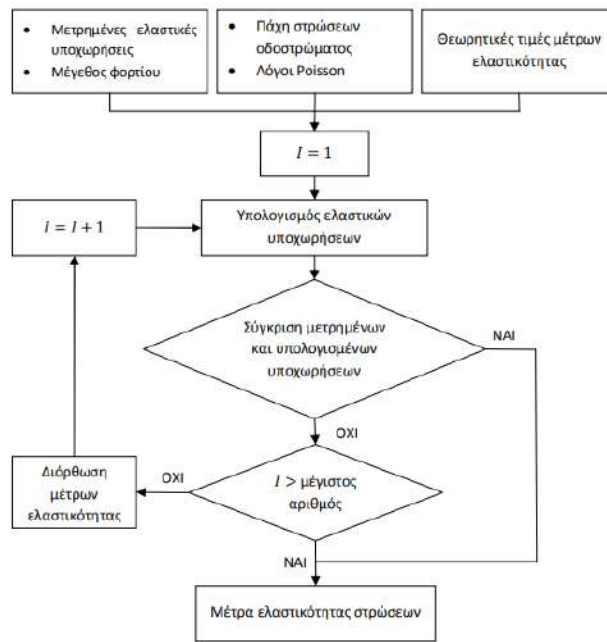
Οποιαδήποτε στιγμή στο μέλλον γίνει επανεξέταση της Φ.Ι μπορεί να συγκριθεί με την αρχική και να εκτιμηθεί η δομική του κατάσταση και πως αυτή μεταβλήθηκε.

Για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος είναι απαραίτητη η συλλογή στοιχείων από αυτό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται είτε με καταστροφικές μεθόδους είτε με μη καταστροφικές μεθόδους. Ως μη καταστρεπτικές δοκιμές αναφέρονται οι δοκιμές που εφαρμόζονται σε οδοστρώματα χωρίς να έχουν καταστρεπτική επίδραση σε αυτά. Πλέον για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται σύγχρονα μη καταστρεπτικά συστήματα (Non Destructive Tests – NDTs) όπως το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar, GRP), το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD) και το παραμορφωσίμετρο κινούμενου τροχού (Rolling Wheel Deflectometer, RWD). Παρόλη την τεχνολογική πρόοδο, η πυρηνοληψία (καταστρεπτική μέθοδος) βρίσκει ακόμα εφαρμογή ιδιαίτερα όταν χρειάζεται να γίνει δειγματοληπτικός εργαστηριακός έλεγχος.

Ως πάγια τακτική, το FWD συλλέγει στοιχεία υποχωρήσεων ως αποτέλεσμα επιβολής δυναμικής φόρτισης, ενώ το GPR οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των στρώσεων βάσει κατάλληλης διαδικασίας. Οι μετρημένες υποχωρήσεις σε συνδυασμό με δεδομένα για τα πάχη των στρώσεων χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό των επί τόπου μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis).

Ως ανάστροφος υπολογισμός ορίζεται η διαδικασία του έμμεσου προσδιορισμού του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των στρώσεων του οδοστρώματος (backcalculation of pavement layer moduli), έχοντας ως αφετηρία τα επιτόπου στοιχεία της ελαστικής απόκρισής του υπό την επιβολή της φόρτισης. Τα επιτόπου στοιχεία, δηλαδή οι ελαστικές τιμές των υποχωρήσεων που καταγράφουν τα γεώφωνα, οι θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής καθώς και τα πάχη των στρώσεων αποτελούν μεταβλητές εισόδου για τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού. Ουσιαστικά, πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία στην οποία γίνεται σύγκριση των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων (measured deflections) με εκείνες που προέρχονται από την υπολογιστική διαδικασία μέσω προτύπων απόκρισης (calculated deflections). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτή, ενεργοποιείται ένας αλγόριθμος στον οποίο σαν δεδομένα εισόδου, πέραν των προαναφερθέντων, δίνονται ενδεικτικές αρχικές τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων. Με αυτές τις τιμές εκκίνησης, γίνεται υπολογισμός των ελαστικών υποχωρήσεων για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η πρώτη σύγκριση με τις μετρημένες υποχωρήσεις. Εάν η σύγκλιση είναι ικανοποιητική, τότε οι τιμές εκκίνησης που δόθηκαν στα μέτρα ελαστικότητας θεωρούνται αποδεκτές, διαφορετικά τα μέτρα Ε αναπροσαρμόζονται και υπολογίζονται εκ νέου οι υποχωρήσεις. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων. Ως παράμετρο ελέγχου αυτής της σύγκλισης ορίζεται ένα

μέτρο εκτίμησης σφάλματος (που ενδέχεται να διαφέρει από μεθοδολογία σε μεθοδολογία), του οποίου μόλις η τιμή λάβει αποδεκτή τιμή, τότε η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται. Συνεπώς, οι τρέχουσες τιμές των μέτρων ελαστικότητας θεωρείται ότι ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Σε κάθε περίπτωση όμως απαραίτητη είναι η σωστή κρίση του μηχανικού για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αφού η λύση που έχει βρεθεί ενδέχεται να μην είναι η μοναδική. Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.



Εικόνα 4.2 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Λοΐζος & Πλατή 2013)

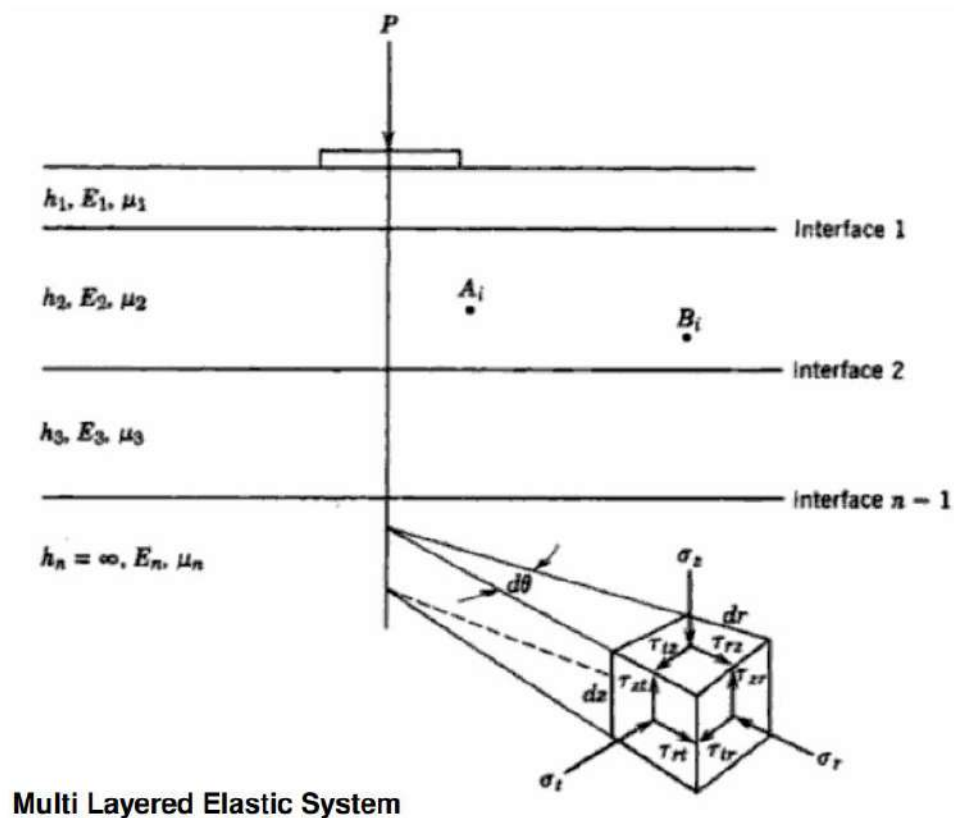
Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση της ελαστικής θεωρίας για τον ανάστροφο υπολογισμό δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, με γνωστά τα πάχη και τις ιδιότητες των υλικών μπορεί να διενεργηθεί ανάλυση εντατικής κατάστασης. Τα μεγέθη που προκύπτουν (δηλαδή οι παραμορφώσεις και το μέτρο δυσκαμψίας) εισέρχονται στους νόμους κόπωσης και αστοχίας, από τους οποίους υπολογίζεται η εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος και αποφασίζονται τυχόν ενέργειες συντήρησης.

4.2 ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

4.2.1 ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Το γενικευμένο σύστημα πολλαπλών ελαστικών στρώσεων (Multi-Layered Elastic Theory MLET) αποτελεί την απλούστερη μέθοδο προσδιορισμού των εντατικών μεγεθών ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Σύμφωνα με αυτήν, το εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελεί ένα σύστημα επάλληλων στρώσεων, που αποτελεί μετεξέλιξη της ανάλυσης με έναν ελαστικό ημίχωρο (θεωρία Boussinesq). Γι' αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε η θεωρία Burmister για σύστημα δύο στρώσεων, η οποία προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες με την βοήθεια κάποιων παραδοχών.



Εικόνα 4.3 Θεωρία ελαστικής ανάλυσης πολλαπλών επάλληλων στρώσεων (Λοϊζος & Πλατή 2018)

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας Burmister και κατ' επέκταση της MLET είναι:

- Οι ιδιότητες του υλικού κάθε στρώσης είναι ομογενής, δηλαδή δεν διαφέρουν μεταξύ του σημείου A_i και B_i .
- Κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος εκτός από την κατώτερη στρώση και όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση
- Κάθε στρώση είναι ισότροπη, δηλαδή η ιδιότητα σε ένα σημείο A_i είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή
- Δεν υπάρχουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια
- Οι λύσεις των τάσεων χαρακτηρίζονται από ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση: το λόγο Poisson ν και το μέτρο ελαστικότητας E .

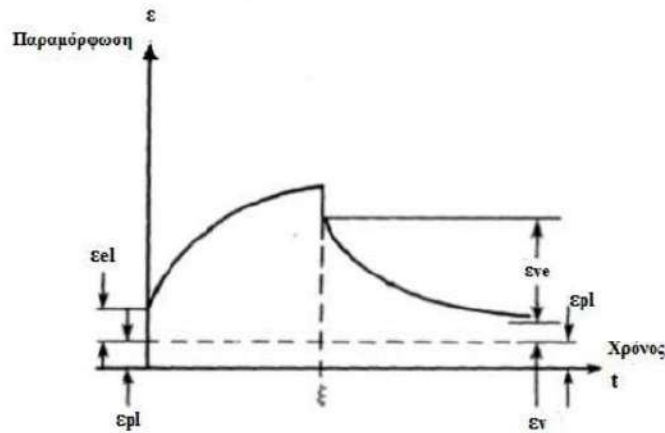
Εν γένει, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πολλαπλασιάζει τις δυσκολίες υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων με αποτέλεσμα να μην μπορούν να δημιουργηθούν νομογραφήματα ή πίνακες για όλους τους συνδυασμούς στρώσεων και φόρτισης (απλού ή διπλού τροχού). Έτσι πλέον έχει καθιερωθεί η χρήση λογισμικών ελαστικών αναλύσεων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων ή αναλυτικών διαδικασιών υπολογισμού.

4.2.2 **ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Η ελαστική ανάλυση έχει απλή και εύκολη εφαρμογή, όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική εντατική κατάσταση πάντοτε, διότι η φόρτιση δεν είναι στατική και το υλικό δεν είναι γραμμικά ελαστικό (Liao Y. 2007). Η φόρτιση του οδοστρώματος από τους τροχούς είναι δυναμική και τόσο οι κατακόρυφες όσο και οι διαμήκεις εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια είναι μη ομοιόμορφες. Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται από μία ελάχιστη τιμή σε μία μέγιστη και στη συνέχεια πάλι σε μια ελάχιστη γεγονός που εξηγείται από την δυναμική φόρτιση του οδοστρώματος.

Το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ως ελαστικό υλικό σε χαμηλές θερμοκρασίες, ως ιξώδες σε υψηλές και ως ιξωδοελαστικό στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (Ossa A. 2004). Έτσι, κατά τη φόρτιση του από ένα κινούμενο τροχό αναπτύσσονται τρία είδη παραμορφώσεων. Η ελαστική που ανακτάται με την αποφόρτιση, η ιξωδοελαστική η οποία είναι μερικώς ανακτήσιμη και η ιξωδοπλαστική παραμόρφωση η οποία είναι παραμένουσα που δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψιν λόγω των δυσκολιών υπολογισμού της.

- ϵ_{el} : Ελαστική παραμόρφωση
- ϵ_{pl} : Πλαστική παραμόρφωση
- ϵ_{ve} : Ιξωδοελαστική παραμόρφωση
- ϵ_v : Ιξώδης παραμόρφωση



Εικόνα 4.4 Παραμορφώσεις ιξωδοελαστικών υλικών (Kenis 1977)

Η ανάλυση βάσει την ελαστική θεωρία παραμένει αρκετά διαδεδομένη μέχρι και σήμερα στο σχεδιασμό και την ανάλυση υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Με τη σειρά της, η ιξωδοελαστική ανάλυση αν και έχει αναφερθεί ότι είναι ακριβέστερη, ενέχει κάποιους περιορισμούς που καθιστούν την συχνή υιοθέτησή της δυσχερή. Συγκεκριμένα, απαιτείται είτε εκτενής πυρηνοληψία ώστε να προσδιοριστεί εργαστηριακά το E^* , είτε ένα βαθμονομημένο μοντέλο για την εκτίμηση του E^* .

Σε κάθε περίπτωση, για την ορθή αξιολόγηση οδοστρωμάτων επιτακτική είναι η ανάγκη γνώσης κάποιων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, όπως το πάχος των στρώσεων, τα χαρακτηριστικά των υλικών (μέτρο ελαστικότητας, δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, κοκκομετρία) και οι συνθήκες φόρτισης, ανεξάρτητα από την θεωρία που επιλέγει ο μηχανικός για την ανάλυση.

Ιδιαίτερη βαρύτητα σε αυτή τη διπλωματική εργασία δίνεται στην επιλογή του είδους της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στο πλαίσιο αναλύσεων, η οποία έχει καθοριστική σημασία για την αξιολόγηση, αλλά και την επιλογή διαδικασίας συντήρησης. Θα ελεγχθεί δηλαδή, αν η επίδραση της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος έχει αντίκτυπο στα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφορικά με την εντατική καταπόνηση ασφαλτικών οδοστρωμάτων.

5 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 ΑΝΤΛΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΕΜΠ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω διπλωματική εργασία προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Πρόκειται για 45 διατομές των οποίων τα χαρακτηριστικά έχουν καταγραφεί μετά από λήψη πυρήνων (σε νεαρής ηλικίας οδοστρώματα) και διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού επί στοιχείων συλλογής με τα συστήματα FWD και GPR του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα αντλήθηκαν τα πάχη των στρώσεων στις θέσεις ελέγχου, τα μηχανικά χαρακτηριστικά που έχουν εκτιμηθεί κατόπιν ανάλυσης ανάστροφου υπολογισμού καθώς και θερμοκρασιακές καταγραφές στο εσωτερικό των ασφαλικών στρώσεων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με το FWD.

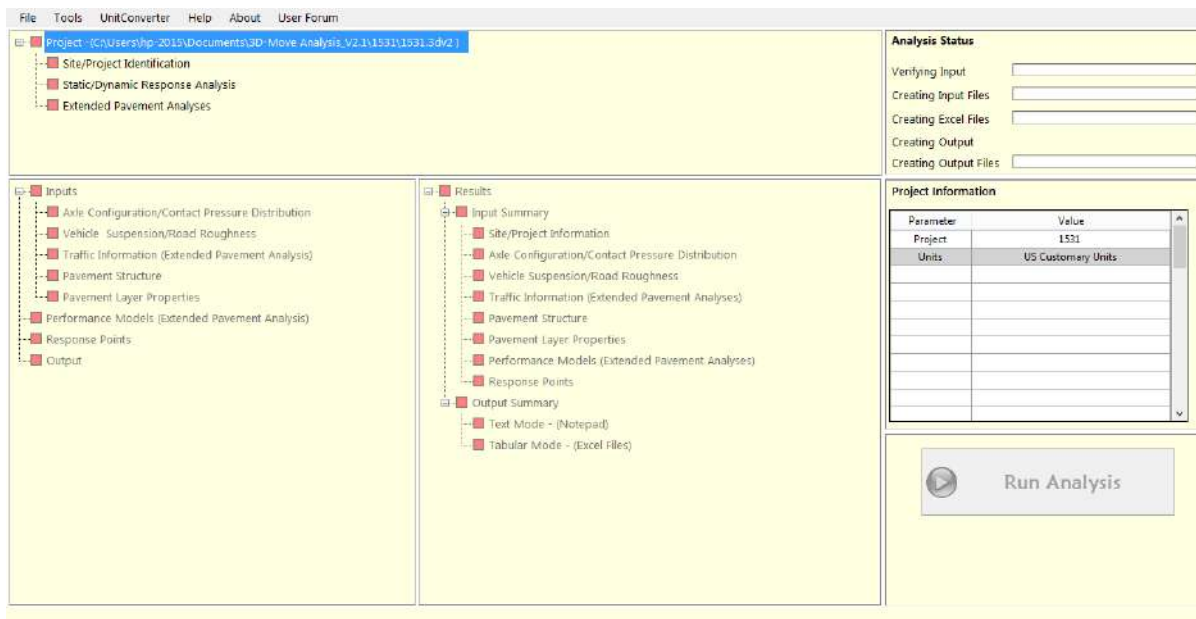
Επιπλέον αντλήθηκαν τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων από πυρήνες που ελήφθησαν στις ίδιες θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με το FWD.

Όσον αφορά στις σχετικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, θεωρήθηκε φόρτιση μονοαξονικού φορτίου με διπλούς τροχούς συνολικού βάρους 8 τόνων. Η ακτίνα τροχού θεωρήθηκε 0.105m και η απόσταση μεταξύ των τροχών προέκυψε 0.315m. Στην ανάλυση με θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων έγινε υπόθεση στατικής φόρτισης, ενώ στις ιξωδοελαστικές αναλύσεις θεωρήθηκε ταχύτητα διέλευσης του φορτίου ίση με 50 km/h, η οποία αντιστοιχήθηκε σε συχνότητα $f=11\text{Hz}$ μέσω διεθνούς συναφούς μοντέλου (Mollenhauer et al. 2009).

5.2 ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D MOVE ANALYSIS

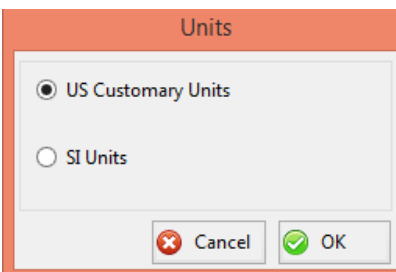
Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκαν εντατικές αναλύσεις μέσω του λογισμικού «3D MOVE ANALYSIS», το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος στο πανεπιστήμιο της Nevada (2007). Το λογισμικό προβλέπει την απόκριση εύκαμπτων οδοστρώματων για ελαστικές ή ιξωδοελαστικές αναλύσεις. Χρησιμοποιεί την προσέγγιση πεπερασμένων στρώσεων, η οποία αντιμετωπίζει κάθε στρώση ως συνεχές μέσο και εφαρμόζει τον μετασχηματισμό Fourier. Ως εκ τούτου μπορεί να χειριστεί περίπλοκες περιπτώσεις φορτίσεων, όπως πολλαπλά φορτία και μη ομοιόμορφη κατανομή επαφής ελαστικού-οδοστρώματος και γενικά έχει τη δυνατότητα ανάλυσης οποιουδήποτε ίχνους ελαστικού ακόμη και αυτών που αντιστοιχούν στα ελαστικά ευρείας βάσης. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες επίδρασης στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος, όπως την ταχύτητα κυκλοφορίας και την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Για τους παραπάνω λόγους, έχει αποδειχθεί ότι το συγκεκριμένο εργαλείο ανάλυσης είναι αξιόπιστο και ακριβές, και συνεπώς οι εντατικές αναλύσεις που περιεγράφηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του.

Στο κεντρικό παράθυρο του λογισμικού εισάγονται οι παράμετροι κάθε ανάλυσης.



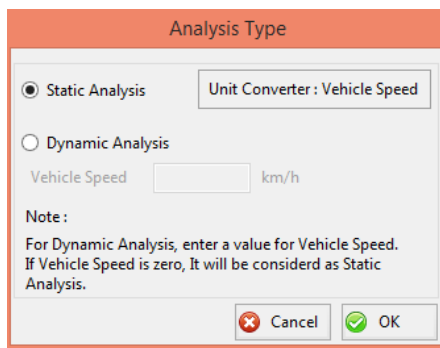
Εικόνα 5.1 Κεντρικό παράθυρο λογισμικού 3D MOVE ANALYSIS

Στην αρχή ο χρήστης καλείται να επιλέξει το σύστημα μονάδων, το οποίο θα χρησιμοποιήσει. Στις αναλύσεις της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το διεθνές σύστημα μονάδων S.I.



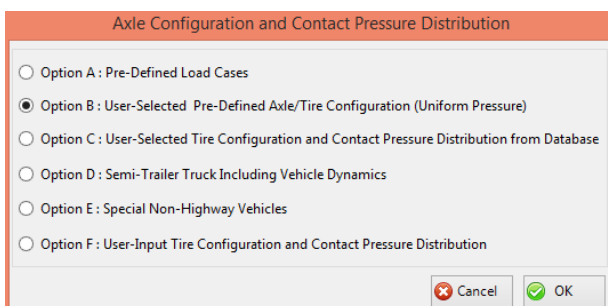
Εικόνα 5.2 Παράθυρο επιλογής συστήματος μονάδων

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του είδους της ανάλυσης της εντατικής κατάστασης. Όπως προαναφέρθηκε το λογισμικό μπορεί να εκτελέσει αναλύσεις ελαστικές και ιξωδοελαστικές.



Εικόνα 5.3 Παράθυρο επιλογής είδους ανάλυσης της εντατικής κατάστασης

Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι συνθήκες φόρτισης για κάθε ανάλυση. Για την εργασία επιλέχθηκε ομοιόμορφη πίεση από το θεωρηθέν αξονικό φορτίο.



Εικόνα 5.4 Παράθυρο επιλογής του τύπου φόρτισης

Option B : User-Selected Pre-Defined Axle/Tire Configuration (Uniform Pressure)

Reference Title for Axle:

Tire Pressure: kPa Tire Load: kN

Geometry of Loaded Area

Circle Ellipse Rectangle

Note:

$$R = \frac{\text{Tire Load}}{\pi \times \text{Tire Pressure}}$$

Calculated R: m

Axle Spacing

L1: m L2: m S1: m

Friction Coefficient

Rolling Friction Coefficient

Bracking Friction Coefficient

Note: Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

1. As many as, six Single Loaded Areas can be specified
2. A Single Tire can be represented by using S1 = L1 = L2 = 0
3. A Single Axle Dual Tire can be represented by L1 = L2 = 0 and S1 ≠ 0
4. A Tandem Pole Dual Tire can be represented by L2 = 0 and S1 ≠ 0, L1 ≠ 0
5. L1 > Xc+Xe, L2 > Xc+Xe, and S1 > Yc+Ye.

Cancel Previous Next OK

Εικόνα 5.5 Παράθυρο εισαγωγής των παραμέτρων της φόρτισης

Όπως φαίνεται και στην εικόνα στην περίπτωση του τυπικού αξονικού φορτίου δηλαδή μονός άξονας 8 ton επί διπλών τροχών, η πίεση τροχού ισούται με 577 kPa, το φορτίο του τροχού με 20 kN, και απόσταση μεταξύ των δύο τροχών είναι ίση με 0.315 m.

Έπειτα εισάγονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων στο παράθυρο διαλόγου της εικόνας 5.6. Σύμφωνα με την ελαστική και την ιξωδοελαστική θεωρία η στρώση έδρασης θεωρείται ότι έχει μη πεπερασμένο πάχος, οπότε σύμφωνα με τις οδηγίες του λογισμικού μπήκε η τιμή πάχους μηδέν.

Pavement Structure

Unit Converter: Length

Layer No	Layer Type	Material Characterization	Thickness (m)
1	Asphalt	Linear Elastic/Viscoelastic	
2	Base	Linear Elastic	
3	Subgrade	Linear Elastic	0

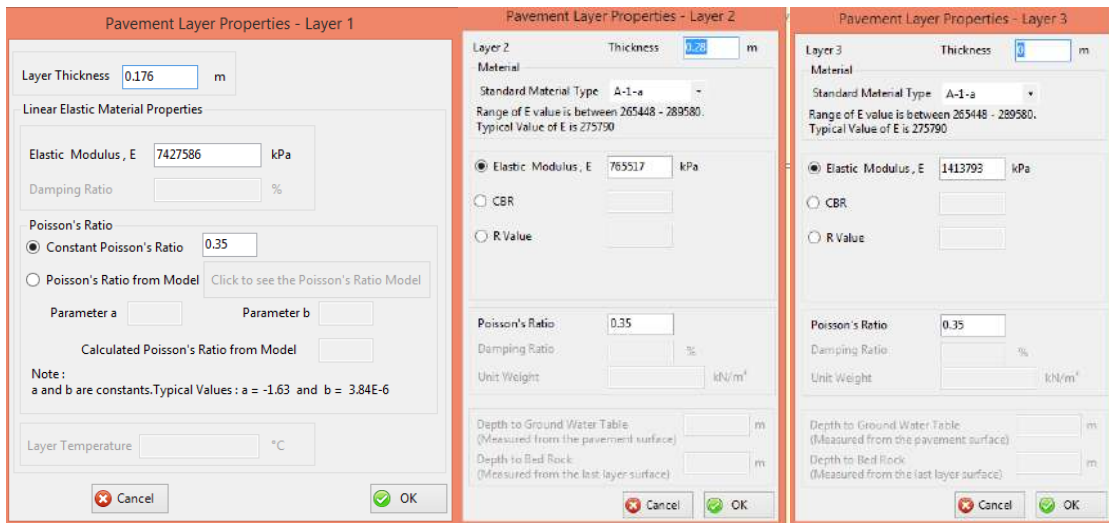
Note:

- Layer No.1 represents the top/surface layer
- For semi infinite depth, enter zero for last layer.

Add Delete Cancel OK

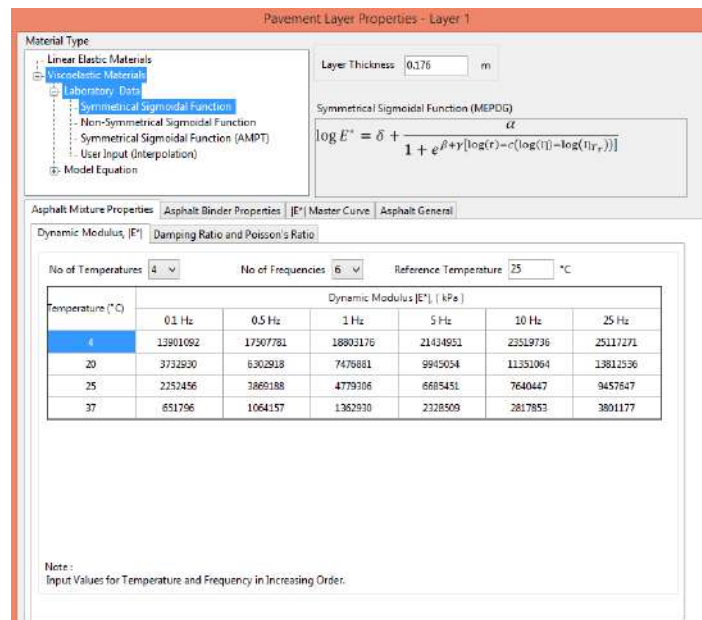
Εικόνα 5.6 Παράθυρο εισαγωγής του πάχους κάθε στρώσης

Σε περίπτωση που η ανάλυση είναι ελαστική εισάγονται για κάθε στρώση τα μηχανικά χαρακτηριστικά της. Ο λόγος Poisson θεωρήθηκε 0.35 για όλες τις στρώσεις του οδοστρώματος.

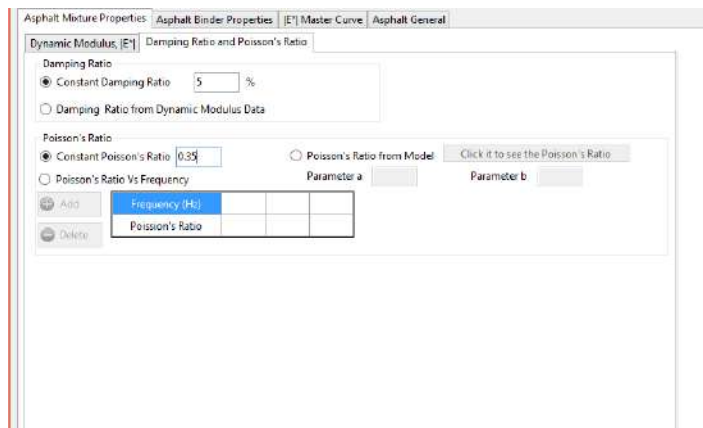


Εικόνα 5.7 Παράθυρο εισαγωγής των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε στρώσης

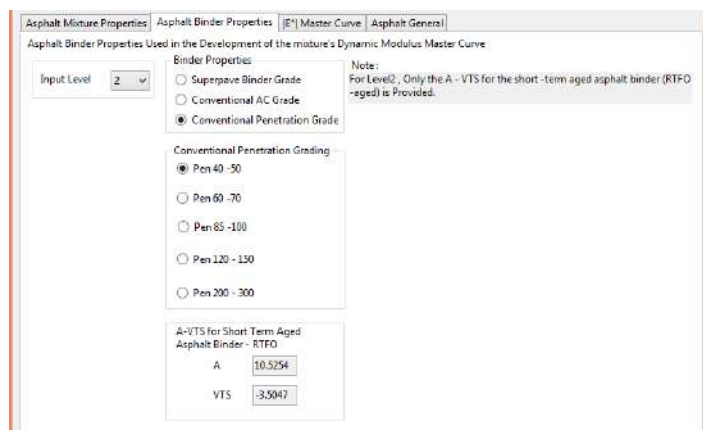
Σε περίπτωση που η ανάλυση της εντατικής κατάστασης είναι ιξωδοελαστική για την ασφαλτική στρώση πρέπει να συμπληρωθούν στοιχεία που αφορούν στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (εικόνες 5.8-5.12).



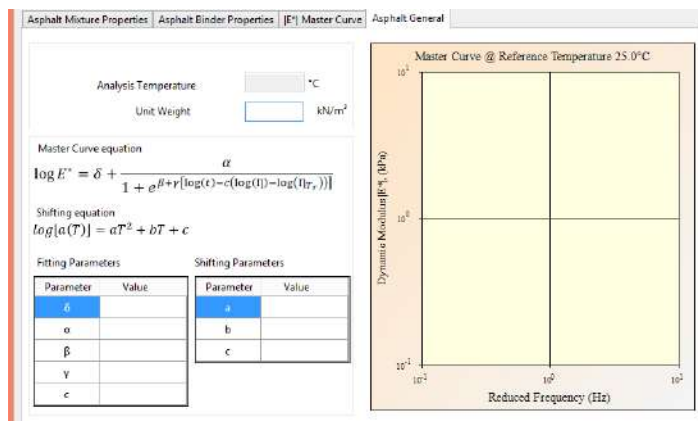
Εικόνα 5.8 Παράθυρο εισαγωγής εργαστηριακών αποτελεσμάτων φόρτισης υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας



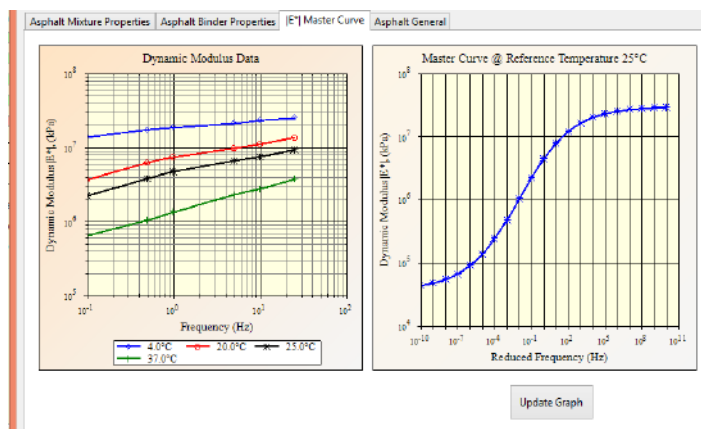
Εικόνα 5.9 Παράθυρο εισαγωγής απόσβεσης και λόγου Poisson



Εικόνα 5.10 Εισαγωγή παραμέτρων από δοκιμές διείδυσης

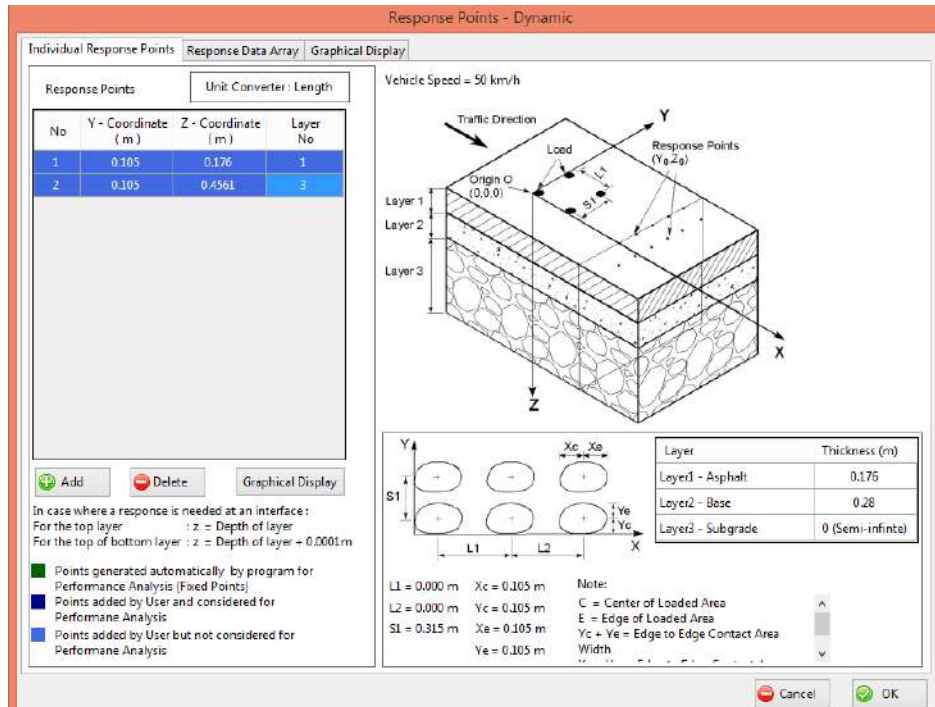


Εικόνα 5.11 Παράθυρο στο οποίο παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη



Εικόνα 5.12 Παράθυρο εισαγωγής ειδικού βάρους και θερμοκρασίας ανάλυσης

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών γίνεται σε δύο σημεία, στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13 Γραφική απεικόνιση της διατομής και των κρίσιμων σημείων αυτής

Κατόπιν υπολογισμού των εντατικών μεγεθών σύμφωνα με τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων (ελαστικής και ιξωδοελαστικής) έγινε τροφοδότηση των νόμων κόπωσης που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 (MS-1, MEPDG, Shen & Carpenter) και αξιολογήθηκαν οι διαφορές που προκύπτουν τόσο σε επίπεδο μηχανικής απόκρισης όσο και εκτίμησης επιτρεπόμενων αξονικών διελεύσεων.

5.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Οι νόμοι κόπωσης που ελέγχθηκαν ήταν του Asphalt Institute (MS-1), MEPDG (Revised MS-1) και η ενεργειακή προσέγγιση των Shen & Carpenter, που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.5.

Εκτός από τα αποτελέσματα των προηγούμενων αναλύσεων, απαραίτητα στοιχεία για τις αναλύσεις κόπωσης είναι τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος, δηλαδή το ποσοστό κενών αέρος επί του μίγματος (V_a) και το ποσοστό του συνδετικού υλικού στο μίγμα (V_b). Επιπλέον απαιτούνται δεδομένα για την κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, δηλαδή το ποσοστό των αδρανών που διέρχονται από το κόσκινο μέγιστου ανοίγματος (P_{NMS}), το ποσοστό αδρανών που διέρχονται από το

κόσκινο κύριου ελέγχου (P_{PCS}), το ποσοστό αδρανών που διέρχονται από το κόσκινο Νο.200 (P_{200}).

Παρακάτω αναφέρονται παράμετροι και παραδοχές επί των αναλύσεων κόπωσης:

- Στο μοντέλο MEPDG θεωρήθηκε ότι η τιμή του $\beta'f_1=1$ ως παγκόσμια σταθερά βαθμονόμησης.
- Στην ενεργειακή προσέγγιση των Shen-Carpenter ο συντελεστής αυτοθεραπείας $(RP+1)^{slope}=1$. Χρήζει ενδεχομένως περαιτέρω διερεύνηση η επιρροή αυτού του παράγοντα, ώστε οι αναλύσεις να αντικατοπτρίζουν πληρέστερα την πραγματική συμπεριφορά πεδίου όπου μεσολαβεί χρόνος μεταξύ των επιμέρους κύκλων φόρτισης.
- Για τις διατομές 1-15 θεωρήθηκαν τα εξής ογκομετρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά κοκκομετρίας: $V_a=4.4\%$, $V_b=11\%$, $PNMS=91\%$, $PPCS=20.02\%$, $P_{200}=3.4\%$
- Για τις διατομές 16-25 θεωρήθηκαν τα εξής ογκομετρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά κοκκομετρίας: $V_a=4.3\%$, $V_b=10.8\%$, $PNMS=100\%$, $PPCS=22\%$, $P_{200}=4.5\%$
- Για τις διατομές 26-45 θεωρήθηκαν τα εξής ογκομετρικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά κοκκομετρίας: $V_a=4.5\%$, $V_b=11.2\%$, $PNMS=100\%$, $PPCS=22\%$, $P_{200}=5.5\%$

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

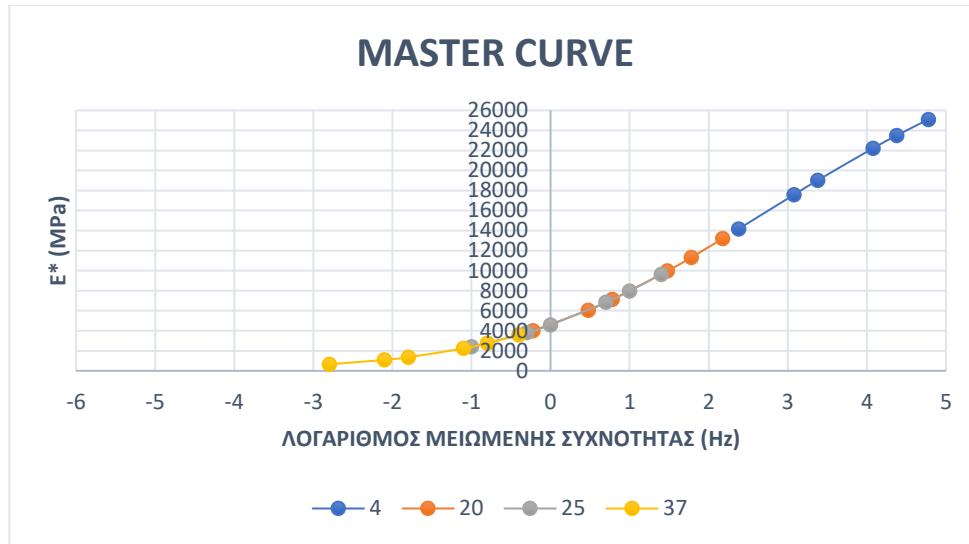
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Στόχος της διαδικασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης του είδους της επίδρασης της μηχανικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων στην ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Επί της ουσίας πρόκειται για τον έλεγχο της επίδρασης της ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στα μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο δυσκαμψίας), τα εντατικά μεγέθη (παραμορφώσεις) και τις επιτρεπόμενες διελεύσεις του οδοστρώματος σε κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων.

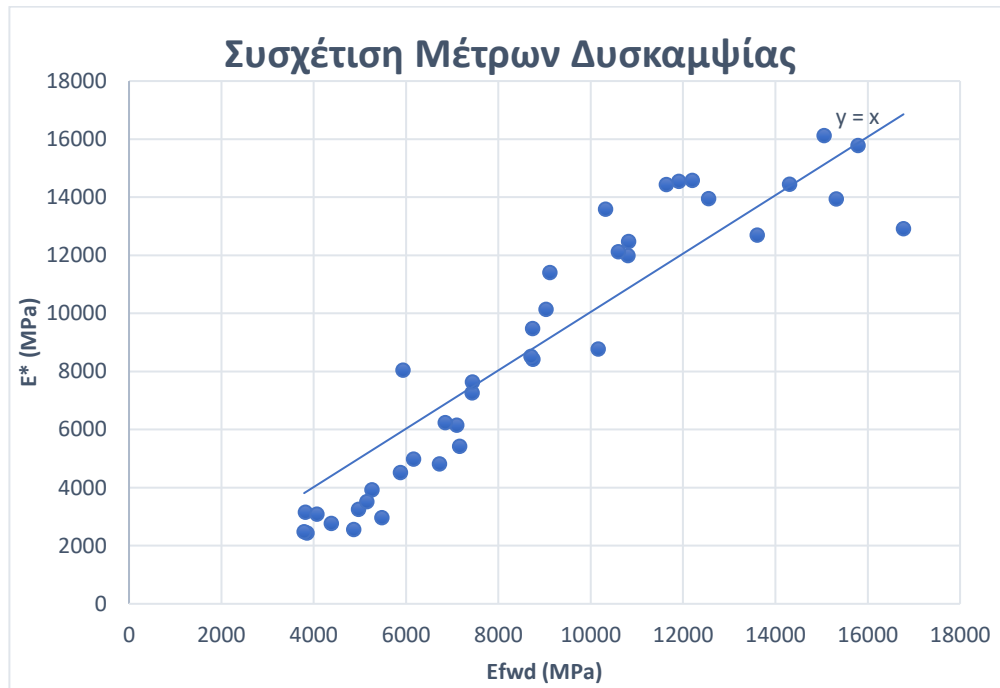
Η ελαστική ανάλυση όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.2 πρόκειται για ένα απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιείται ως πάγια πρακτική. Από την άλλη στη θεώρηση ιξωδοελαστικής εντατικής καταπόνησης απαιτείται η εύρεση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και η θεώρηση δυναμικής φόρτισης του οδοστρώματος. Επιπλέον η διαδικασία ανάλυσης στο λογισμικό δεν απαιτεί τον ίδιο χρόνο για την ολοκλήρωση μια ελαστικής και μιας ιξωδοελαστικής ανάλυσης.

6.2 ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας των αναλύσεων προέκυψε από τα δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βάση του εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που είναι απαραίτητο για τη διενέργεια των ιξωδοελαστικών αναλύσεων δημιουργήθηκε η κεντρική καμπύλη κάθε σημείου με θερμοκρασία αναφοράς 25 °C. Ενδεικτική κεντρική καμπύλη δίνεται στην εικόνα 6.1. Στο πλαίσιο της σύγκρισης των τιμών δυσκαμψίας με βάση την MLET (ανάστροφος υπολογισμός – FWD) και των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E^*) που έχουν αντιστοιχηθεί στις συνθήκες της θεωρούμενης ταχύτητας φόρτισης και της επιτόπου θερμοκρασίας, συντάχθηκε ο πίνακας 6.1. Στην εικόνα 6.2 φαίνεται η συσχέτιση του μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από ανάστροφο υπολογισμό (οριζόντιος άξονας) και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας από τις κεντρικές καμπύλες (κατακόρυφος άξονας) για κάθε διατομή.



Εικόνα 6.1 Ενδεικτική κεντρική καμπύλη διατομής 1



Εικόνα 6.2 Διάγραμμα Συσχέτισης Μέτρων Δυσκαμψίας

Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει κάποια σταθερή τάση μεταξύ των τιμών.

Παρατηρώντας τις τιμές των καταγεγραμμένων θερμοκρασιών στον πίνακα 6.1 που ακολουθεί εντοπίστηκε μεγάλο εύρος σε αυτές από πολύ χαμηλές (8,7 °C) έως πολύ υψηλές (39,6 °C). Είναι γνωστό ότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μείωση του ιξώδους της ασφάλτου. Συνεπώς δικαιολογείται η αρχική εικόνα που προέκυψε συγκρίνοντας τις τιμές των μεγεθών.

Πίνακας 6.1 Συγκριτικός πίνακας τιμών δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και από μετρήσεις

ΣΗΜΕΙΟ	E_{fld} (MPa)	E* (MPa)	Difference	Temp (°C)
1	7427	7260	167	26.5
2	7097	6145	952	26.7
3	6848	6240	608	27.0
4	7159	5421	1738	27.2
6	6159	4976	1183	31.0
7	5876	4513	1363	31.2
8	6724	4815	1909	31.5
9	5262	3920	1342	31.6
11	4972	3246	1726	35.6
12	5476	2967	2509	35.9
13	5152	3512	1640	36.2
14	4862	2559	2303	36.5
16	9028	10137	-1109	24.0
17	8738	9474	-736	24.0
18	8745	8418	327	24.0
19	9117	11400	-2283	24.0
21	4379	2768	1611	39.6
22	3855	2433	1422	39.6
23	3793	2481	1312	39.6
24	3820	3148	672	39.6
25	4069	3088	981	39.7
26	10804	11993	-1189	19.9
27	10597	12119	-1522	9.2
28	10163	8765	1398	22.8
29	16775	12911	3864	13.3
31	13603	12688	915	15.2
32	11907	14548	-2641	9.5
33	12548	13948	-1400	9.4
34	15320	13941	1379	9.1
35	14307	14449	-142	8.9
36	15789	15778	11	8.7
37	11639	14431	-2792	14.3
38	10818	12471	-1653	14.1
39	12197	14572	-2375	13.4
41	10321	13581	-3260	13.7
42	15051	16115	-1064	12.9
43	7440	7635	-195	19.4
44	8708	8516	192	19.3
45	5930	8043	-2113	20.1

Έτσι λοιπόν, διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος στις διαφορές των μέσων με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στο αποτέλεσμα της εντατικής ανάλυσης. Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου μέσω της κατανομής t-Student για συσχετισμένα ζεύγη. Ο έλεγχος έγινε και για τις δύο πλευρές της κατανομής, λόγω της ανομοιογένειας του πρόσημου των διαφορών. Η στατιστική ανάλυση έγινε σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

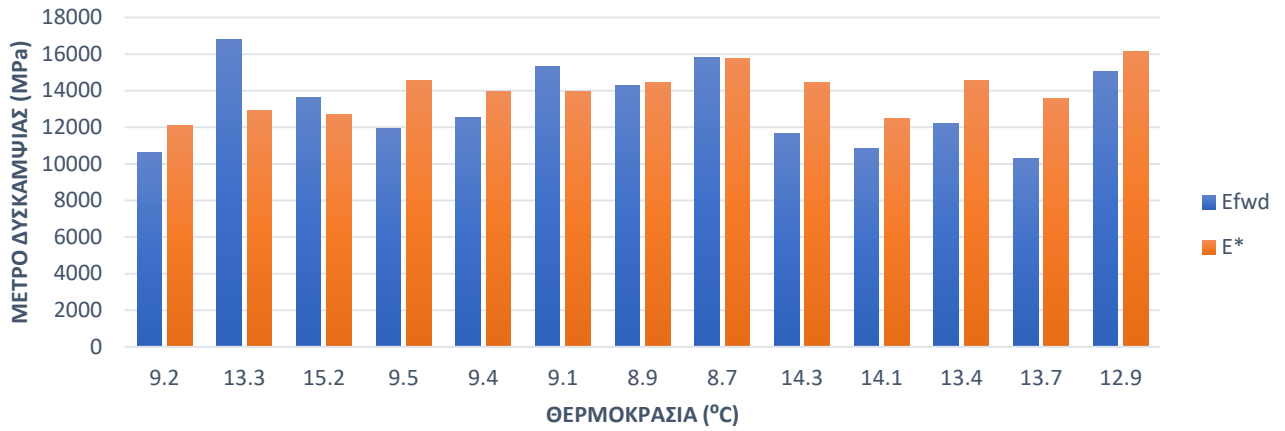
Πίνακας 6.2 Στατιστικός έλεγχος του μέτρου δυσκαμψίας για το συνολικό δείγμα

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για το σύνολο των θερμοκρασιών	<i>Efwd (Μρα)</i>	<i>E* (Μρα)</i>
Μέσος	8781.420926	8600.617686
Διακύμανση	13970183.99	20988757.45
Μέγεθος δείγματος	39	39
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	38	
t	0.667777663	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.25415559	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.68595446	
P(T<=t) δίπλευρη	0.50831118	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.024394164	

Παρατηρείται ότι η απόλυτη τιμή του υπολογισμένου t είναι μικρότερη από την απόλυτη τιμή του κρίσιμου t. Συνεπώς δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των τιμών τους.

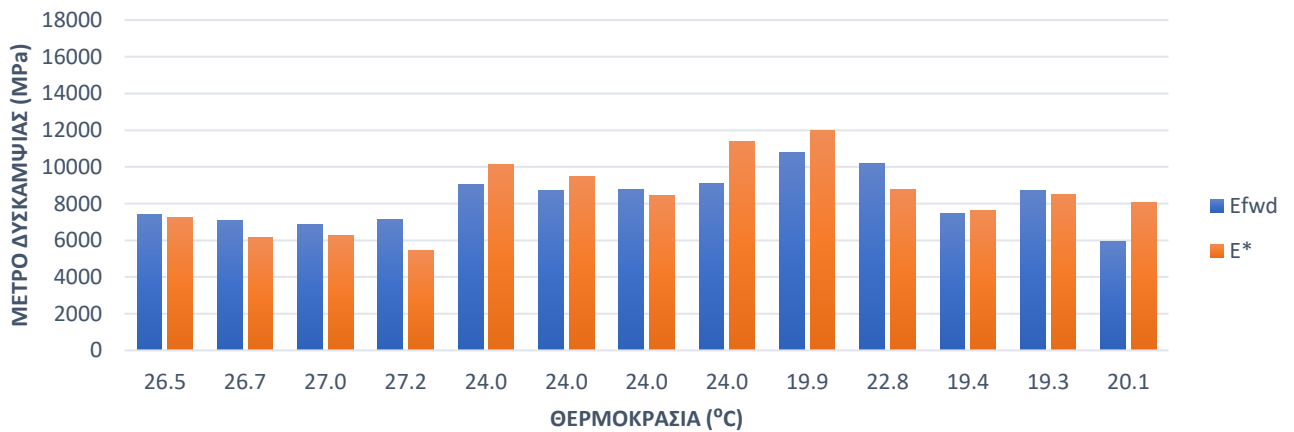
Εξαιτίας αυτού, αλλά και του μεγάλου εύρους θερμοκρασιών που παρατηρήθηκε έγινε περαιτέρω διερεύνηση στο δείγμα, το οποίο χωρίστηκε σε ομάδες βάσει την καταγεγραμμένης θερμοκρασίας. Οι ομάδες που προέκυψαν ήταν τρεις: (α) χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C) , (β) ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C) και (γ) υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C). Ο διαχωρισμός αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία εξαιτίας της επιρροής της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας όπως προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα η τρίτη θερμοκρασιακή ομάδα έχει ιδιαίτερη σημασία για μια χώρα όπως η Ελλάδα, στην οποία για πολλούς μήνες η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή σε πολλές περιοχές. Οι επιμέρους τιμές των μέτρων δυσκαμψίας παρατίθενται στα ραβδογράμματα των εικόνων 6.3, 6.4 και 6.5. Τέλος το στατιστικό τεστ επαναλήφθηκε σε καθεμία χωριστά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 6.3, 6.4 και 6.5.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΧΑΜΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ



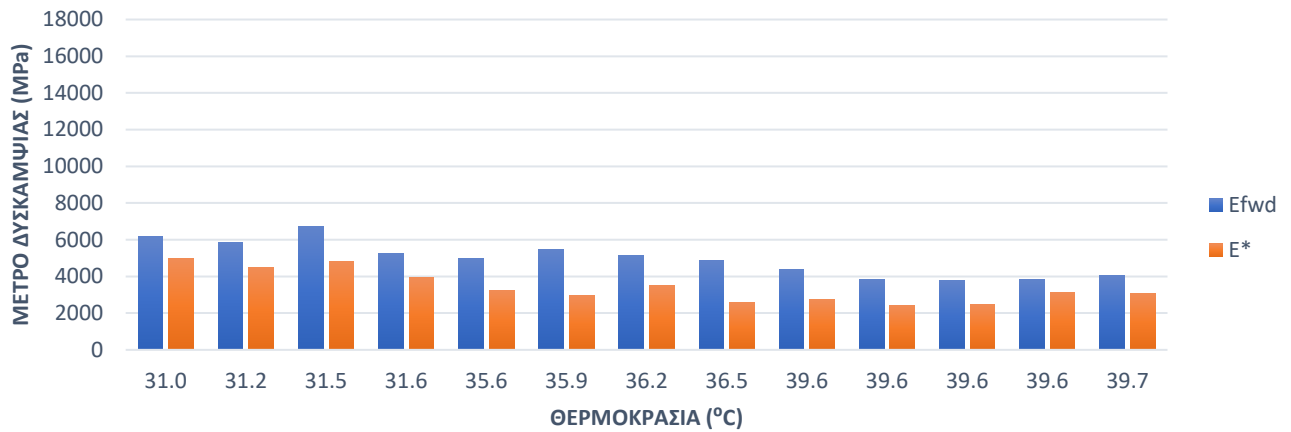
Εικόνα 6.3 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέτρου δυσκαμψίας χαμηλών θερμοκρασιών

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ



Εικόνα 6.4 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέτρου δυσκαμψίας ενδιάμεσων θερμοκρασιών

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ



Εικόνα 6.5 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέτρου δυσκαμψίας υψηλών θερμοκρασιών

Πίνακας 6.3 Στατιστικός έλεγχος του μέτρου δυσκαμψίας των διατομών με χαμηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C)	Efwd (Mpa)	E* (Mpa)
Μέσος	13144.06265	13965.5524
Διακύμανση	4585641.621	1466702.744
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-1.47942419	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.082396963	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.164793925	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.4 Στατιστικός έλεγχος του μέτρου δυσκαμψίας των διατομών με ενδιάμεσες θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C)	<i>E_{fwd}</i> (Mpa)	<i>E*</i> (Mpa)
Μέσος	8246.353974	8418.879634
Διακύμανση	1953024.75	3904883.375
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-0.495226695	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.314691917	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.629383834	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.5 Στατιστικός έλεγχος του μέτρου δυσκαμψίας των διατομών με υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C)	<i>E_{fwd}</i> (Mpa)	<i>E*</i> (Mpa)
Μέσος	4953.846154	3417.421021
Διακύμανση	900209.1527	771641.49
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	11.01362797	
P(T<=t) μονόπλευρη	6.24956E-08	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	1.24991E-07	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

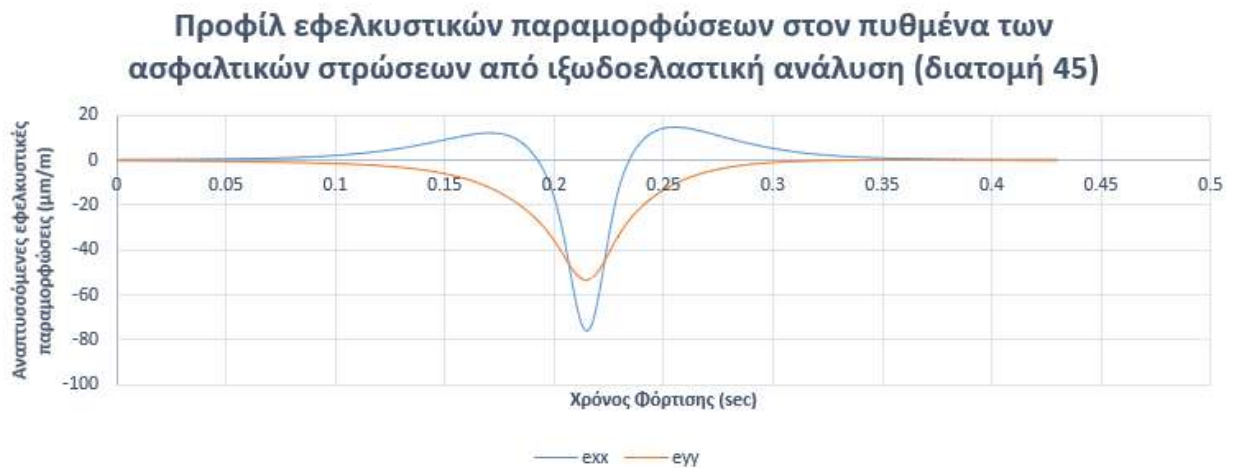
Στις χαμηλές και ενδιάμεσες θερμοκρασίες η απόλυτη τιμή του υπολογισμένου t είναι μικρότερη από την απόλυτη τιμή του κρίσιμου t. Συνεπώς δεν υπάρχει κάποια σημαντική στατιστική διαφορά στα μέτρα δυσκαμψίας σε αυτές τις θερμοκρασίες. Από την άλλη στις υψηλές θερμοκρασίες παρατηρείται υπέρβαση της απόλυτης τιμής του κρίσιμου t που φτάνει σε πενταπλάσια τιμή. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η στατιστική διαφορά των μέσων των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας είναι πολύ σημαντική στις θερμοκρασίες αυτές.

Άρα, οι προκαταρκτικές ενδείξεις ότι η ανάλυση του οδοστρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στη θεωρούμενη συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων αποδείχθηκαν σωστές. Επομένως, η διερεύνηση θα προχωρήσει με την εκτίμηση των εντατικών μεγεθών.

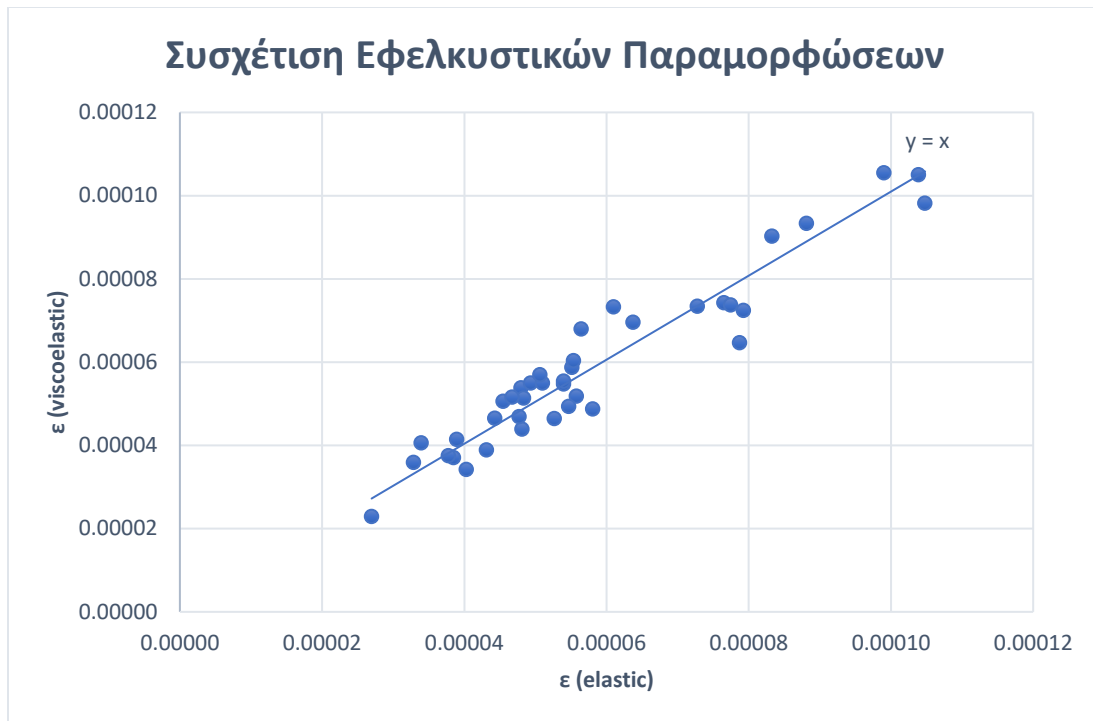
6.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Οι τιμές των παραμορφώσεων υπολογίστηκαν στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας και αφορούν στις οριζόντιες παραμορφώσεις στην βάση των ασφαλτικών στρώσεων (ε_{xk}, ε_{yg}) και στις κατακόρυφες παραμορφώσεις στην επιφάνεια του εδάφους (ε_{zz}).

Μετά από κάθε ανάλυση ελέγχθηκε η κατανομή των παραμορφώσεων σε όλες τις θέσεις τόσο στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων όσο και την επιφάνεια του εδάφους. Ενδεικτικά παρατίθεται το προφίλ των παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων που προέκυψε για μία διατομή (εικόνα 6.6). Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η μέγιστη παραμόρφωση στη διεύθυνση xk (διαμήκης) είναι μεγαλύτερη από αυτή στη διεύθυνση yg (εγκάρσια) για όλες τις διατομές και συνεπώς είναι αυτή που θα αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της συγκριτικής αξιολόγησης υπέρ της ασφαλείας (εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.6 Προφίλ εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων



Εικόνα 6.7 Συσχέτιση εφελκυστικών παραμορφώσεων

Ομοίως με το μέτρο δυσκαμψίας, έτσι και στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις δεν υπάρχει κάποια τάση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο θεωρήσεων. Οπότε και αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία με το μέτρο δυσκαμψίας για τη συγκριτική αξιολόγηση. Στον πίνακα 6.6 παρατίθενται οι μέγιστες παραμορφώσεις που προέκυψαν από την ανάλυση. Στη συνέχεια στον πίνακα 6.7 παρατίθενται μόνο οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και οι διαφορές μεταξύ ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, διότι η ιξώδης φύση του ασφαλτομίγματος υπερτερεί.

Πίνακας 6.6 Μέγιστες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

ΣΗΜΕΙΟ	elastic			viscoelastic		
	exx (μm/m)	eyy (μm/m)	ezz (μm/m)	exx (μm/m)	eyy (μm/m)	ezz (μm/m)
1	48	30	-32	54	38	-35
2	48	31	-30	51	35	-34
3	46	29	-34	51	35	-38
4	49	31	-27	55	38	-30
6	54	34	-33	55	39	-35
7	51	32	-32	55	38	-35
8	51	32	-30	57	40	-33
9	55	35	-32	59	41	-35
11	64	40	-35	70	50	-38
12	56	35	-30	68	48	-34
13	55	35	-34	60	42	-38
14	61	38	-30	73	51	-34
16	48	31	-34	44	31	-34
17	56	36	-30	52	37	-31
18	54	35	-32	55	39	-35
19	58	38	-31	49	36	-30
21	83	53	-42	90	66	-47
22	88	56	-39	93	68	-43
23	99	62	-29	105	77	-31
24	105	66	-41	98	73	-43
25	77	49	-48	74	53	-50
26	79	52	-65	72	51	-64
27	77	51	-30	74	49	-30
28	47	30	-38	52	37	-42
29	34	23	-56	41	28	-64
31	44	29	-68	47	32	-72
32	43	28	-60	39	26	-57
33	39	27	-20	37	27	-20
34	33	22	-12	36	25	-13
35	39	25	-26	42	27	-27
36	38	26	-51	38	27	-52
37	40	26	-35	34	24	-33
38	55	36	-60	49	34	-58
39	53	34	-56	46	32	-53
41	27	18	-36	23	16	-34
42	48	32	-22	47	33	-22
43	104	69	-42	105	75	-44
44	73	47	-34	73	51	-35
45	79	50	-40	65	44	-37

Πίνακας 6.7 Συγκριτικός πίνακας μέγιστων οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων

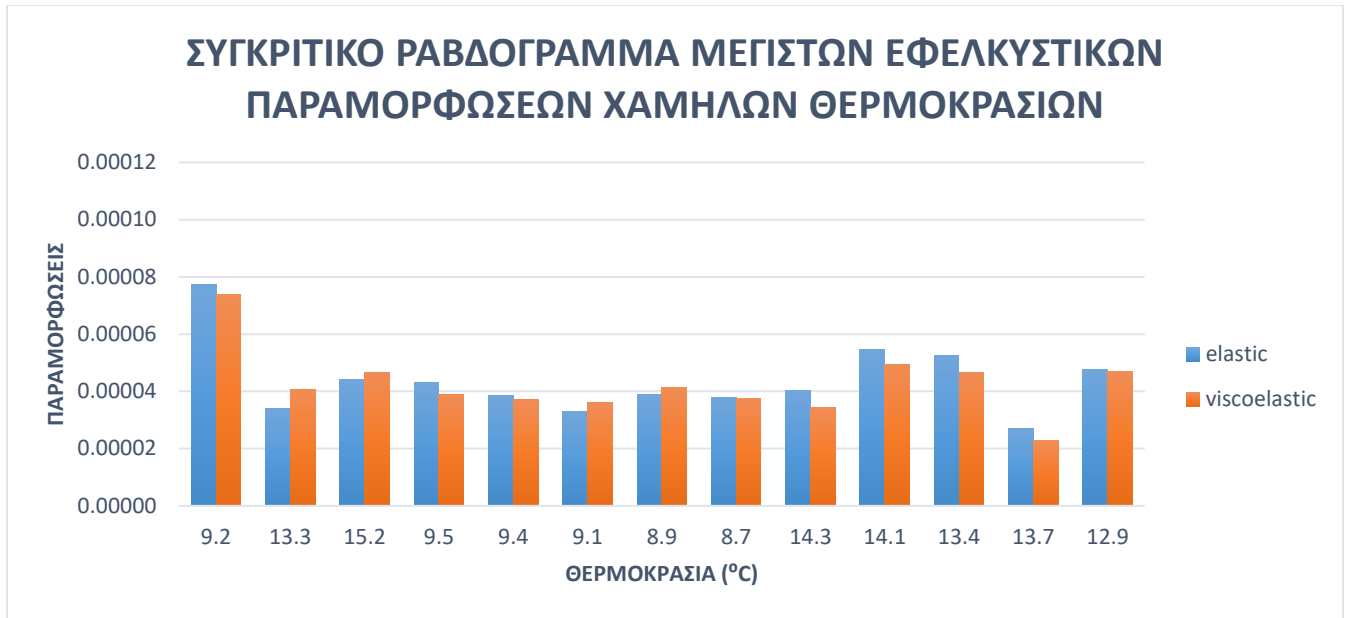
ΣΗΜΕΙΟ	ϵ (el) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	ϵ (visco) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Difference ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
1	48	54	-6	26.5
2	48	51	-3	26.7
3	46	51	-5	27.0
4	49	55	-6	27.2
6	54	55	-1	31.0
7	51	55	-4	31.2
8	51	57	-6	31.5
9	55	59	-4	31.6
11	64	70	-6	35.6
12	56	68	-12	35.9
13	55	60	-5	36.2
14	61	73	-12	36.5
16	48	44	4	24.0
17	56	52	4	24.0
18	54	55	-1	24.0
19	58	49	9	24.0
21	83	90	-7	39.6
22	88	93	-5	39.6
23	99	105	-6	39.6
24	105	98	7	39.6
25	77	74	3	39.7
26	79	72	7	19.9
27	77	74	3	9.2
28	47	52	-5	22.8
29	34	41	-7	13.3
31	44	47	-3	15.2
32	43	39	4	9.5
33	39	37	2	9.4
34	33	36	-3	9.1
35	39	42	-3	8.9
36	38	38	0	8.7
37	40	34	6	14.3
38	55	49	6	14.1
39	53	46	7	13.4
41	27	23	4	13.7
42	48	47	1	12.9
43	104	105	-1	19.4
44	73	73	0	19.3
45	79	65	14	20.1

Ομοίως διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος με κατανομή t Student σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η απόλυτη τιμή του υπολογισμένου t είναι μικρότερη από αυτή του κρίσιμου δίπλευρου t, έτσι και εδώ αποφασίστηκε περαιτέρω στατιστικός έλεγχος βάσει της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας.

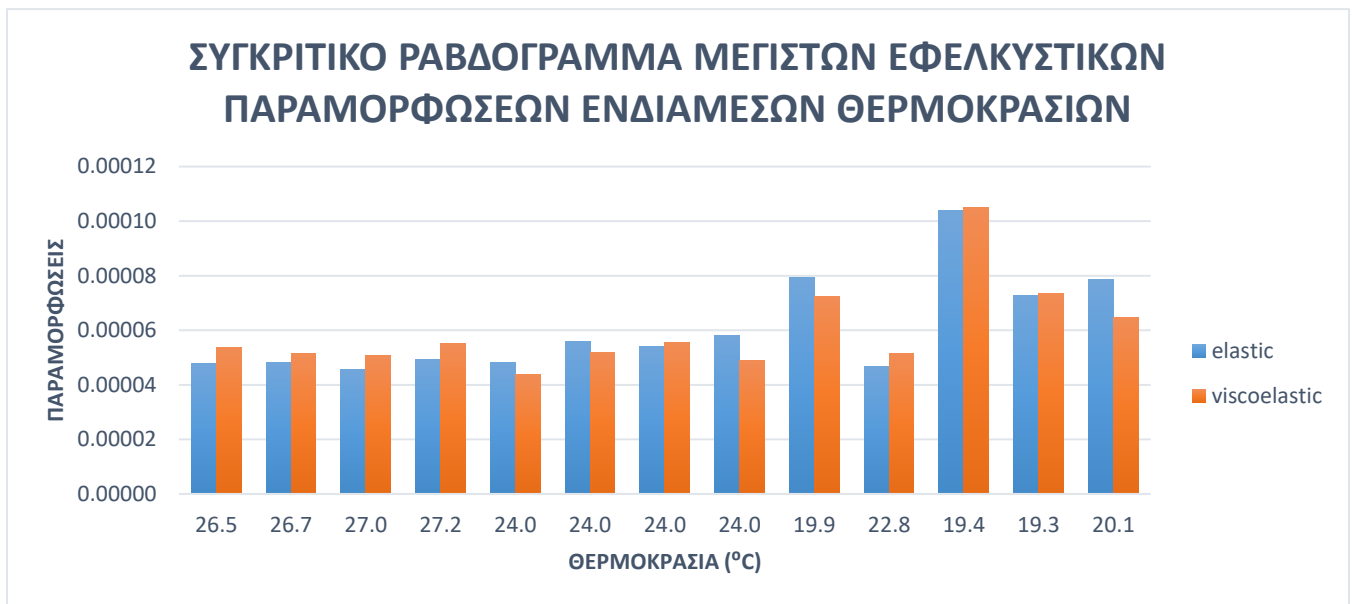
Πίνακας 6.8 Στατιστικός έλεγχος των παραμορφώσεων για το συνολικό δείγμα

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για το σύνολο των θερμοκρασιών	ϵ (el)	ϵ (visco)
Μέσος	0.000057	0.0000586
Διακύμανση	3.78E-10	3.91E-10
Μέγεθος δείγματος	39	39
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	38	
t	-0.858227135	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.198074091	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.68595446	
P(T<=t) δίπλευρη	0.396148182	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.024394164	

Παρακάτω παρατίθενται τα συγκριτικά ραβδογράμματα των υπολογισμένων εφελκυστικών παραμορφώσεων στις εικόνες 6.8, 6.9 και 6.10 και τα αποτελέσματα της στατιστικής μελέτης για τις τρεις θερμοκρασιακές ομάδες στους πίνακες 6.9, 6.10 και 6.11.

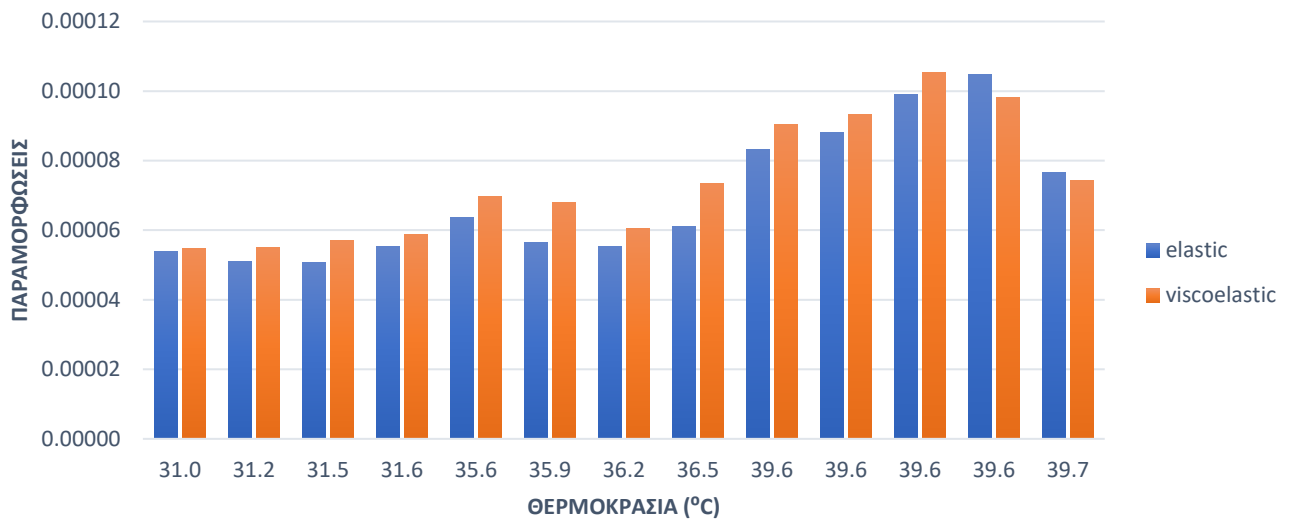


Εικόνα 6.8 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων χαμηλών θερμοκρασιών



Εικόνα 6.9 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων ενδιάμεσων θερμοκρασιών

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ



Εικόνα 6.10 Συγκριτικό ραβδόγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων υψηλών θερμοκρασιών

Πίνακας 6.9 Στατιστικός έλεγχος των παραμορφώσεων των διατομών με χαμηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C)	$\epsilon (el)$	$\epsilon (visco)$
Μέσος	0.0000438	0.0000424
Διακύμανση	1.62E-10	1.37E-10
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	1.203331056	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.126025498	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.252050996	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.10 Στατιστικός έλεγχος των παραμορφώσεων των διατομών με ενδιάμεσες θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C)	ϵ (el)	ϵ (visco)
Μέσος	0.0000606	0.0000598
Διακύμανση	3.15573E-10	2.62994E-10
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων βαθμοί ελευθερίας	0	
t	0.460217307	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.32679393	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.653587859	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.11 Στατιστικός έλεγχος των παραμορφώσεων των διατομών με υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C)	ϵ (el)	ϵ (visco)
Μέσος	0.0000692	0.0000737
Διακύμανση	3.60026E-10	3.09308E-10
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων βαθμοί ελευθερίας	0	
t	-3.223546079	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.003653129	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.007306257	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Όπως στα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου για το μέτρο δυσκαμψίας, έτσι και στις παραμορφώσεις φαίνεται ότι οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Οι διαφορές στις τιμές των μεγεθών μεταξύ ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης γίνονται πλέον εμφανείς με βάση τα αποτελέσματα της μηχανικής απόκρισης. Ως εκ τούτου, η ανάλυση σε κόπωση που θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο θα πρέπει να λάβει υπόψιν αυτή τη διαφοροποίηση, αφού οι παραμορφώσεις και το μέτρο δυσκαμψίας αποτελούν το βασικό δεδομένο εισόδου των μοντέλων κόπωσης.

6.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ

6.4.1 ASPHALT INSTITUTE MODEL (MS-1)

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με τα κεφάλαια 6.2 και 6.3. Στον πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία. Στην συνέχεια παρατίθενται τα ραβδογράμματα στις εικόνες 6.11, 6.12 και 6.13. Τέλος στους πίνακες 6.13, 6.14, 6.15 και 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης.

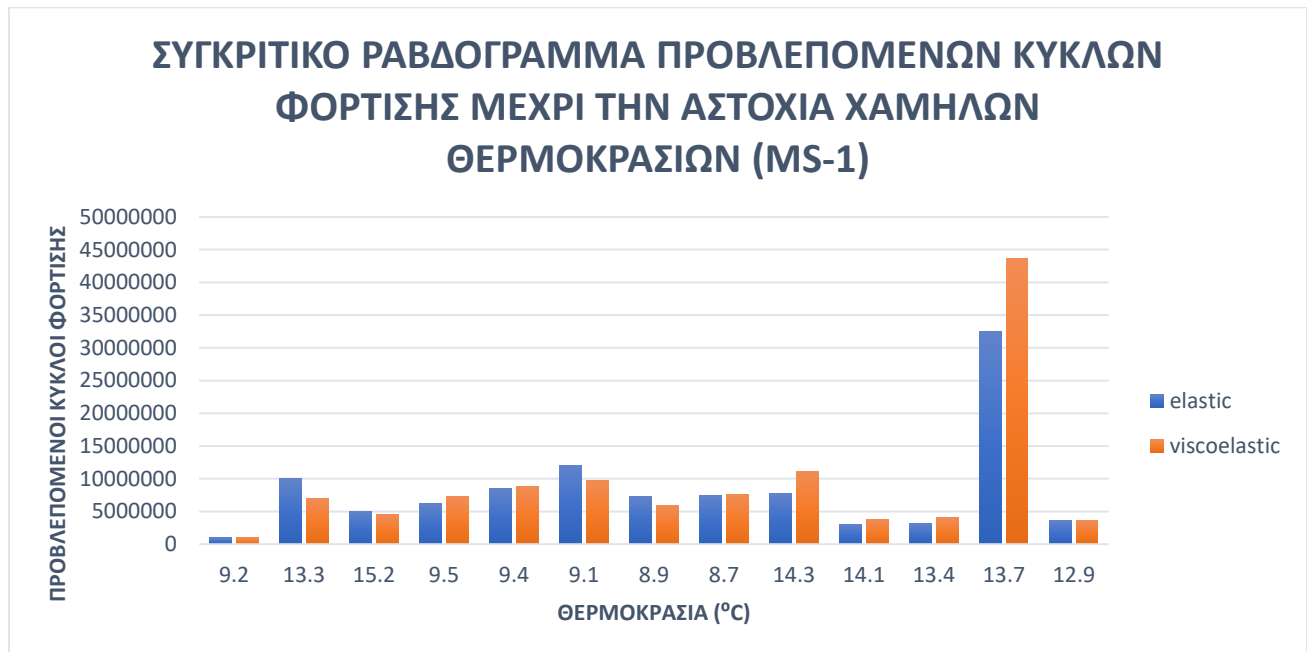
Πίνακας 6.12 Συγκριτικός πίνακας προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία (MS-1)

MS-1				
ΣΗΜΕΙΟ	Nf el	Nf visco	DIFFERENCE	Temp (°C)
1	6537418	4561687	1975731	26.5
2	6630862	6134220	496642	26.7
3	8366813	6355431	2011382	27.0
4	6143314	5456073	687241	27.2
6	5197966	5952688	-754722	31.0
7	6517858	6393417	124442	31.2
8	5952376	5371859	580518	31.5
9	5539431	5792358	-252927	31.6
11	3610374	3900914	-290539	35.6
12	4961704	4550881	410822	35.9
13	5578791	5816451	-237660	36.2
14	4256076	4020600	235475	36.5
16	5533378	6784172	-1250794	24.0
17	3503586	4151741	-648155	24.0
18	3900710	3690199	210511	24.0
19	2954723	4349055	-1394333	24.0
21	1689601	1915706	-226105	39.6
22	1563190	1914844	-351654	39.6
23	1079479	1260618	-181139	39.6
24	890313	1301622	-411309	39.6
25	2375189	3316489	-941300	39.7
26	899635	1108520	-208885	19.9
27	986007	1033856	-47849	9.2
28	5399597	4426047	973550	22.8
29	10050556	6999207	3051349	13.3
31	5017591	4521448	496143	15.2
32	6147681	7245210	-1097530	9.5
33	8519207	8843071	-323863	9.4
34	12100472	9764288	2336185	9.1
35	7335939	5909284	1426655	8.9
36	7454878	7604721	-149843	8.7
37	7816234	11142885	-3326651	14.3
38	3044787	3784128	-739341	14.1
39	3113598	4048348	-934750	13.4
41	32548955	43699771	-11150816	13.7
42	3606340	3587134	19207	12.9
43	508339	479087	29252	19.4
44	1431751	1416309	15443	19.3
45	1535067	2265525	-730458	20.1

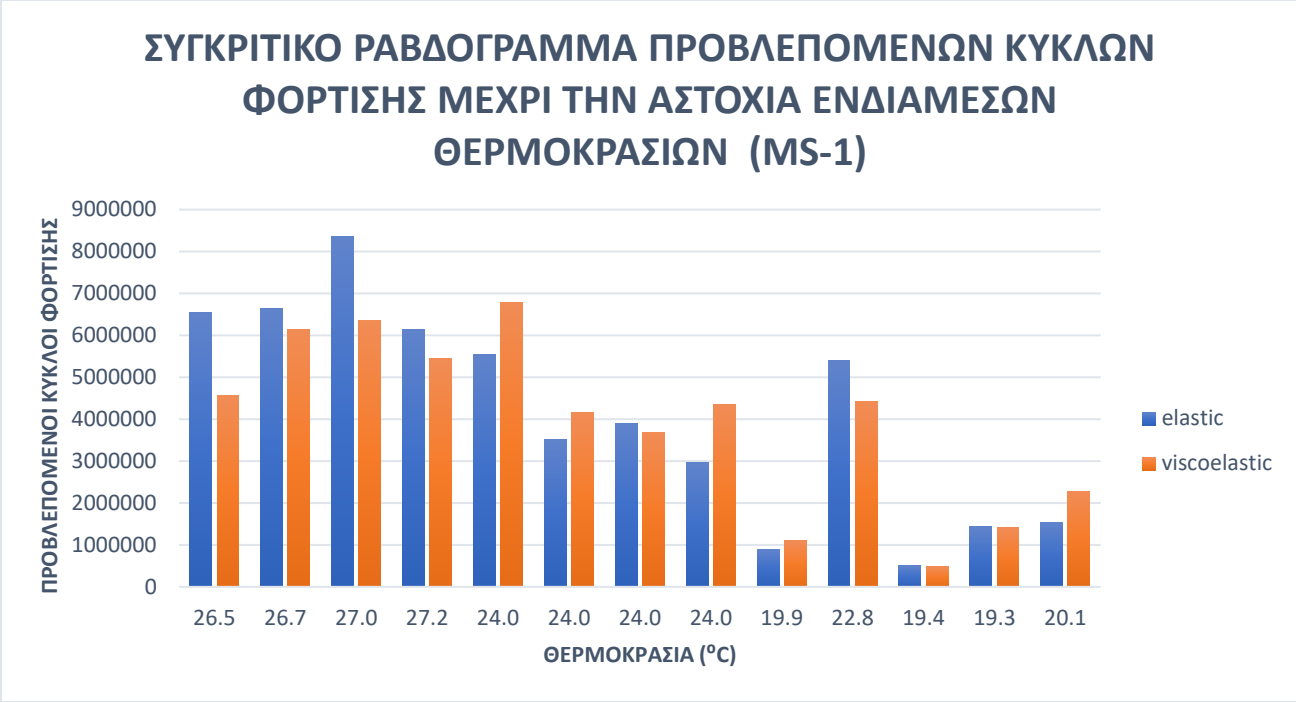
Πίνακας 6.13 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MS-1) για το συνολικό δείγμα

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για το σύνολο των θερμοκρασιών	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	5392302.208	5663329.805
Διακύμανση	2.74518E+13	4.51231E+13
Μέγεθος δείγματος	39	39
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων βαθμοί ελευθερίας	0	
t	-0.802285374	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.213688534	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.68595446	
P(T<=t) δίπλευρη	0.427377067	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.024394164	

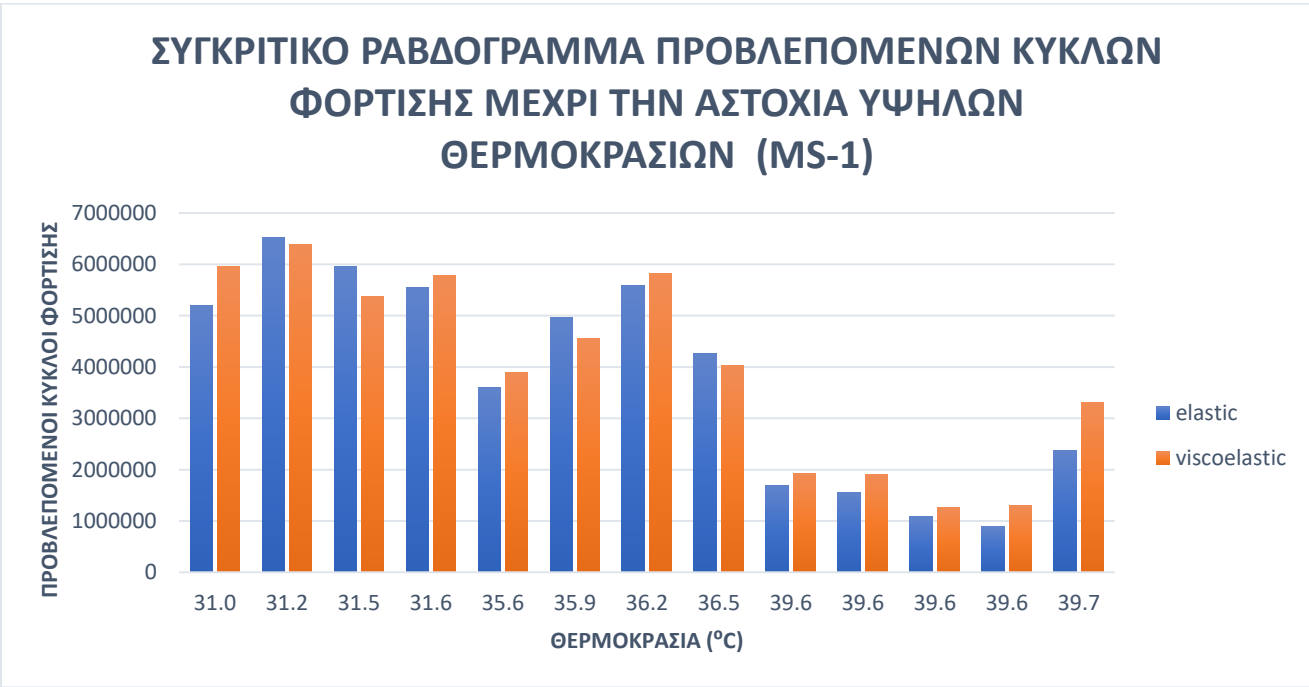
Η απόλυτη τιμή του υπολογισμένου t είναι μικρότερη του κρίσιμου t, άρα δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφορά. Το τεστ επαναλαμβάνεται για τις τρεις επιμέρους θερμοκρασιακές ομάδες.



Εικόνα 6.11 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία χαμηλών θερμοκρασιών (MS-1)



Εικόνα 6.12 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία ενδιάμεσων θερμοκρασιών (MS-1)



Εικόνα 6.13 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία υψηλών θερμοκρασιών (MS-1)

Πίνακας 6.14 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MS-1) των διατομών με χαμηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	8287865	9091026.961
Διακύμανση	6.27409E+13	1.16024E+14
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-0.827872407	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.21195086	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.423901721	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.15 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MS-1) των διατομών με ενδιάμεσες θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	4103476.308	3936774.223
Διακύμανση	6.4182E+12	4.2585E+12
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	0.560362469	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.292771101	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.585542201	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.16 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MS-1) των διατομών με υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	3785565.316	3962188.233
Διακύμανση	4.09242E+12	3.51462E+12
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-1.484448115	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.081738564	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.163477129	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

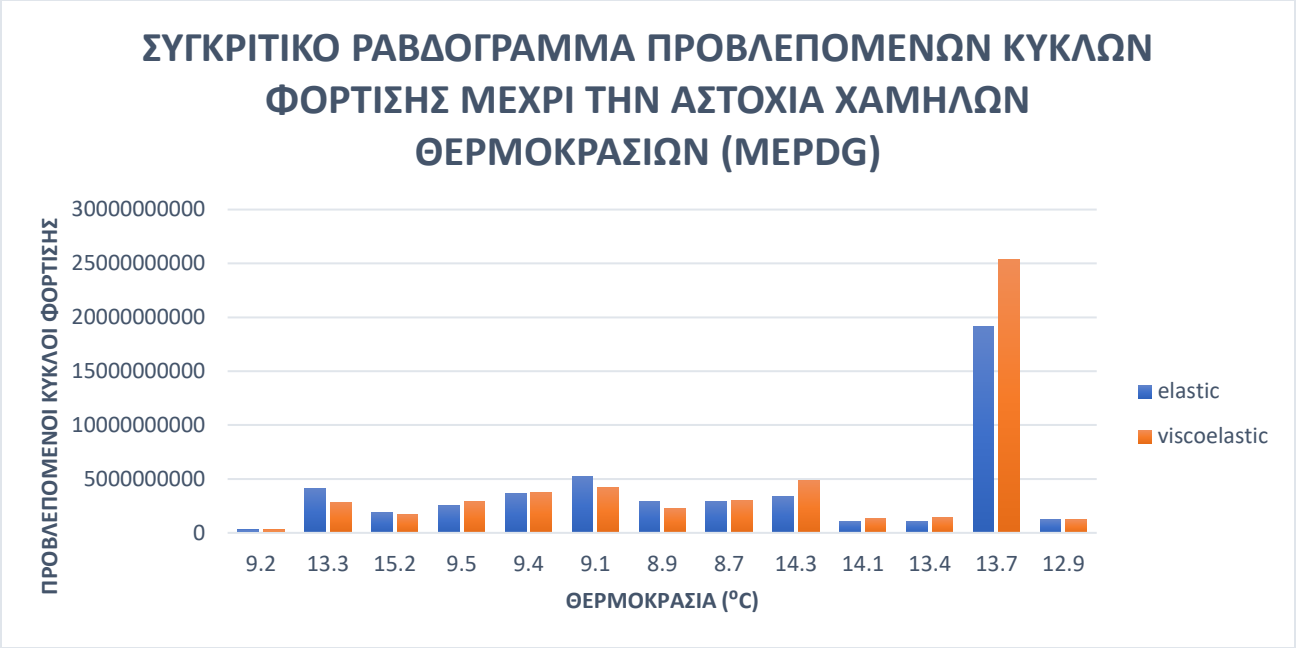
Σε αντίθεση με την έως τώρα αξιολόγηση της συμβολής της συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων στην μηχανική απόκριση, παρατηρείται εδώ ότι οι διαφορές των επιτρεπόμενων διελεύσεων που προκύπτουν από τις δύο θεωρήσεις είναι στατιστικά αμελητέες. Επιπλέον, ένα άλλο στοιχείο που χρήζει επισήμανσης είναι η αρκετά μεγάλη τάξης μεγέθους των επιτρεπόμενων διελεύσεων, η οποία ενδεχομένως οφείλεται στην νεαρή ηλικία των υπό διερεύνηση οδοστρωμάτων.

6.4.2 MEPRDG MODEL

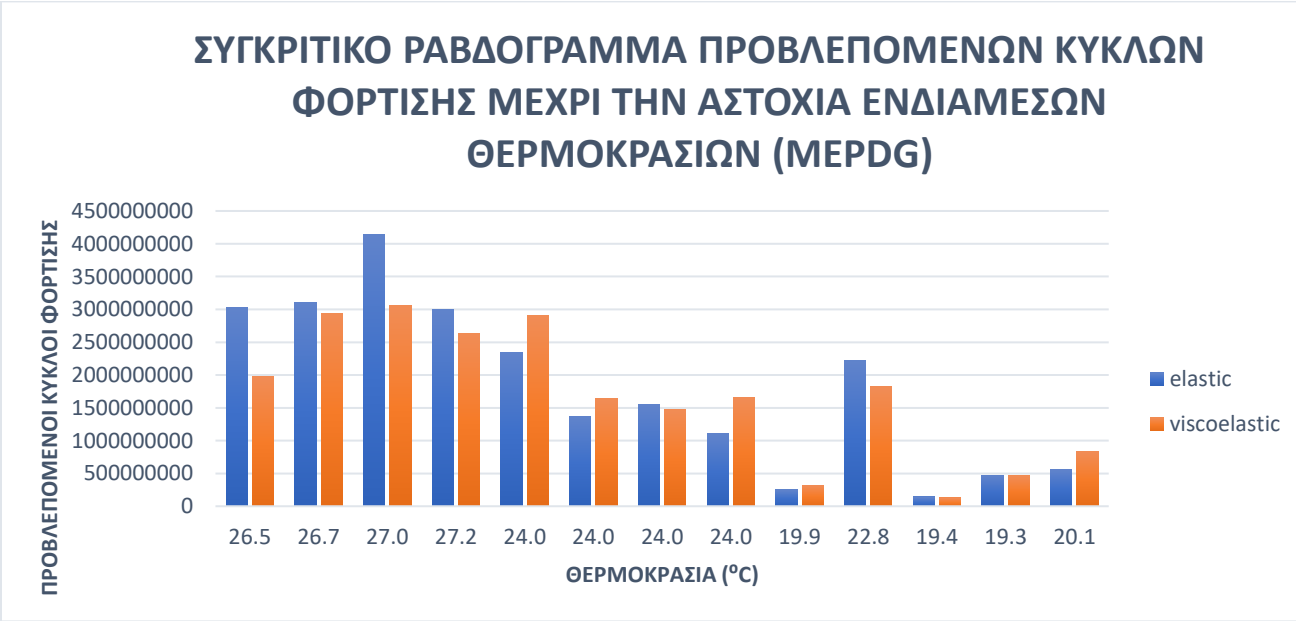
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην ανάλυση κόπωσης για το μοντέλο MEPRDG. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.17. Στη συνέχεια παρατίθενται τα ραβδογράμματα στις εικόνες 6.14, 6.15 και 6.16 και οι στατιστικές αναλύσεις στους πίνακες 6.18, 6.19, 6.20 και 6.21.

Πίνακας 6.17 Συγκριτικός πίνακας προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία (MEPDG)

MEPDG				
ΣΗΜΕΙΟ	Nf el	Nf visco	DIFFERENCE	Temp (°C)
1	3022319118	1973967926	1048351192	26.5
2	3110350691	2939395992	170954699	26.7
3	4149154397	3054953821	1094200577	27.0
4	2997065852	2637139724	359926128	27.2
6	2408232242	2992884233	-584651991	31.0
7	3197815928	3343355715	-145539788	31.2
8	2770456892	2668231177	102225715	31.5
9	2706209175	3078881840	-372672665	31.6
11	1642729979	2010659678	-367929699	35.6
12	2347087053	2475624393	-128537340	35.9
13	2744159344	3182556813	-438397469	36.2
14	2012848588	2215991907	-203143319	36.5
16	2348654061	2911586720	-562932659	24.0
17	1368596724	1643381028	-274784304	24.0
18	1556481241	1470527725	85953516	24.0
19	1103446302	1657083755	-553637453	24.0
21	680865054	890286296	-209421242	39.6
22	640794402	919768482	-278974080	39.6
23	412635824	554177047	-141541223	39.6
24	326854794	541776483	-214921689	39.6
25	1044089518	1672674463	-628584945	39.7
26	254689256	318573230	-63883974	19.9
27	285718179	292216457	-6498278	9.2
28	2221671634	1817721835	403949799	22.8
29	4118266411	2852845946	1265420464	13.3
31	1888009374	1696278749	191730625	15.2
32	2492730913	2883989442	-391258530	9.5
33	3638012813	3702883902	-64871090	9.4
34	5266747142	4171027172	1095719970	9.1
35	2939981128	2262242462	677738666	8.9
36	2922501185	2993666771	-71165586	8.7
37	3344720921	4844319280	-1499598359	14.3
38	1099429675	1376041721	-276612046	14.1
39	1095210995	1433909525	-338698530	13.4
41	19105927381	25360644516	-6254717135	13.7
42	1237747210	1208504341	29242870	12.9
43	141237340	128485214	12752126	19.4
44	469983853	466570899	3412954	19.3
45	563835507	831928225	-268092718	20.1

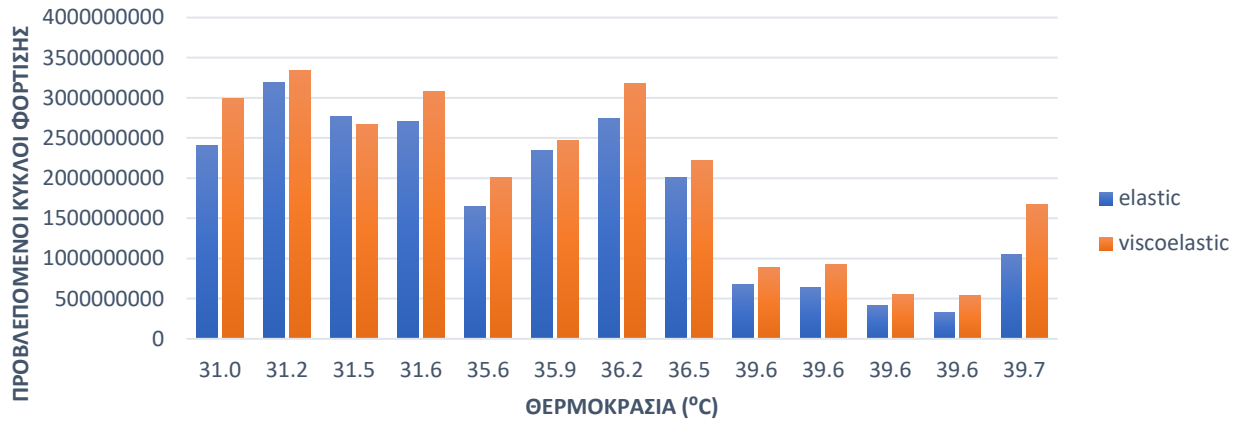


Εικόνα 6.14 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία χαμηλών θερμοκρασιών (ΜΕΡPDG)



Εικόνα 6.15 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία ενδιάμεσων θερμοκρασιών (ΜΕΡPDG)

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (MEPDG)



Εικόνα 6.16 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία υψηλών θερμοκρασιών (MEPDG)

Πίνακας 6.18 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MEPDG) για το συνολικό δείγμα

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για το σύνολο των θερμοκρασιών	Nf el	Nf visco
Μέσος	2453263285	2653250126
Διακύμανση	9.08083E+18	1.5219E+19
Μέγεθος δείγματος	39	39
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	38	
t	-1.10726762	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.13756913	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.68595446	
P(T<=t) δίπλευρη	0.27513826	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.024394164	

Οι διαφορές των επιτρεπόμενων διελεύσεων δεν είναι στατιστικά σημαντικές για το σύνολο του δείγματος.

Πίνακας 6.19 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MEPDG) των διατομών με χαμηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	3802692564	4236813099
Διακύμανση	2.30963E+19	4.19408E+19
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-0.831010918	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.211097319	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.422194638	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.20 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MEPDG) των διατομών με ενδιάμεσες θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	1792883537	1680870469
Διακύμανση	1.65066E+18	1.04274E+18
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	0.777535934	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.225949914	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.451899829	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.21 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (MEPDG) των διατομών με υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	1764213753	2042066810
Διακύμανση	1.04946E+18	1.06431E+18
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-5.024339519	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.000148485	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.000296971	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Παρά το γεγονός ότι οι διαφορές στις επιτρεπόμενες διελεύσεις προκύπτουν στατιστικά σημαντικές στις μεγάλες θερμοκρασίες, και πάλι παραμένει αξιοσημείωτο το γεγονός ότι τα δύο σύνολα τιμών παρουσιάζουν μεγάλη τάξη μεγέθους, που ενδεχομένως να αντιστοιχίζοταν σε πρακτικώς άπειρη εναπομένουσα διάρκεια ζωής.

6.4.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ SHEN-CARPENTER

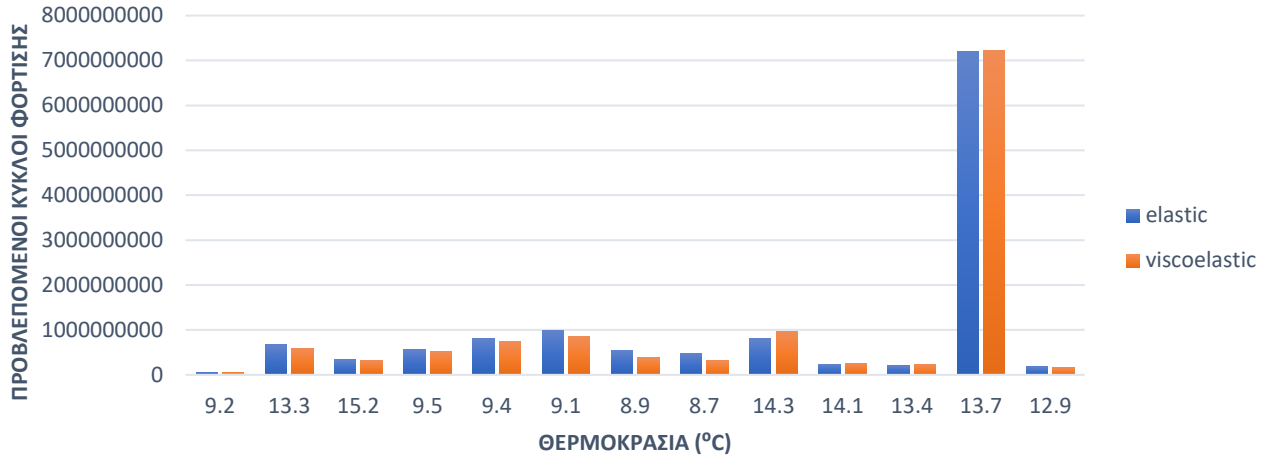
Η ενεργειακή προσέγγιση αποτελεί το τελευταίο τμήμα των αναλύσεων που διενεργήθηκαν. Στον πίνακα 6.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους κύκλους φόρτισης μέχρι την αστοχία. Στη συνέχεια παρατίθενται τα ραβδογράμματα στις εικόνες 6.17, 6.18 και 6.19 και οι στατιστικές αναλύσεις στους πίνακες 6.23, 6.24, 6.25 και 6.26.

Πίνακας 6.22 Συγκριτικός πίνακας προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία (S-C)

SHEN & CARPENTER

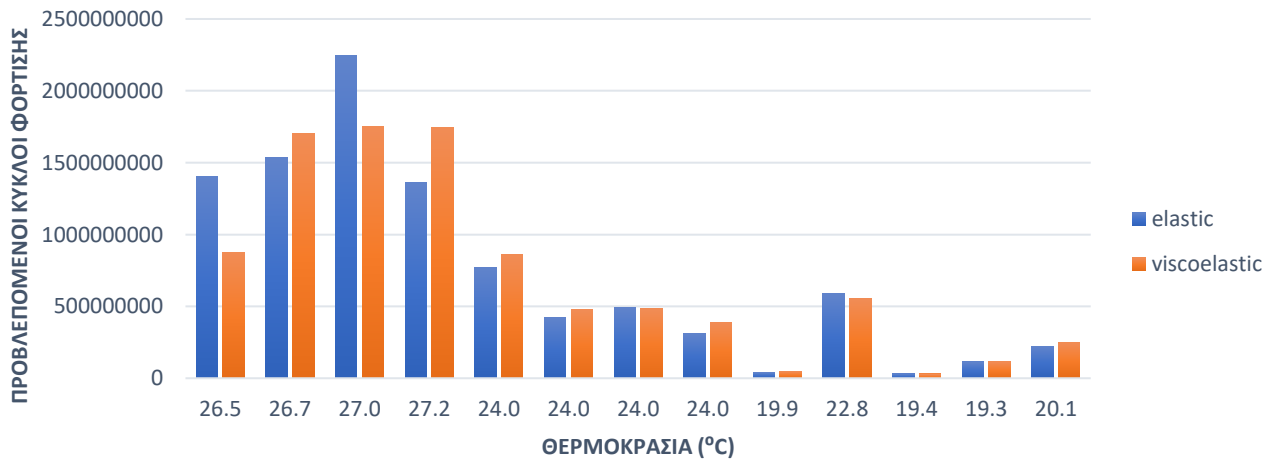
ΣΗΜΕΙΟ	Nf el	Nf visco	DIFFERENCE	Temp (°C)
1	1403775952	875482161	528293791	26.5
2	1533059238	1703925344	-170866106	26.7
3	2242535580	1750189776	492345803	27.0
4	1359092907	1742797863	-383704956	27.2
6	1345295809	2239233385	-893937576	31.0
7	1984106329	2865080626	-880974298	31.2
8	1427569076	2035210024	-607640948	31.5
9	1861224447	3077424815	-1216200367	31.6
11	1109209886	2338810381	-1229600495	35.6
12	1501966914	3324005764	-1822038849	35.9
13	1940345664	3647563941	-1707218277	36.2
14	1445774731	3482745388	-2036970658	36.5
16	767735149	859978168	-92243019	24.0
17	423808779	476853114	-53044335	24.0
18	492329096	482064639	10264457	24.0
19	312965701	386051120	-73085419	24.0
21	426528715	938340875	-511812160	39.6
22	462566182	1224259543	-761693360	39.6
23	281518673	660426076	-378907403	39.6
24	212373225	483888766	-271515541	39.6
25	768653177	1856692982	-1088039804	39.7
26	43136881	49506671	-6369790	19.9
27	50512913	44184533	6328380	9.2
28	588058662	554596755	33461907	22.8
29	666415726	592413491	74002235	13.3
31	343046931	328833058	14213873	15.2
32	557033427	520262214	36771212	9.5
33	815001100	733338492	81662608	9.4
34	990886473	843694546	147191927	9.1
35	542870338	394597884	148272453	8.9
36	479219181	311258671	167960510	8.7
37	807997627	964893554	-156895926	14.3
38	239264931	262646085	-23381154	14.1
39	206378725	228872158	-22493432	13.4
41	7192501075	7223191704	-30690629	13.7
42	185327825	166089615	19238210	12.9
43	33749522	29872456	3877066	19.4
44	114474488	116569916	-2095427	19.3
45	224235841	245848107	-21612266	20.1

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΧΑΜΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (SHEN-CARPENTER)



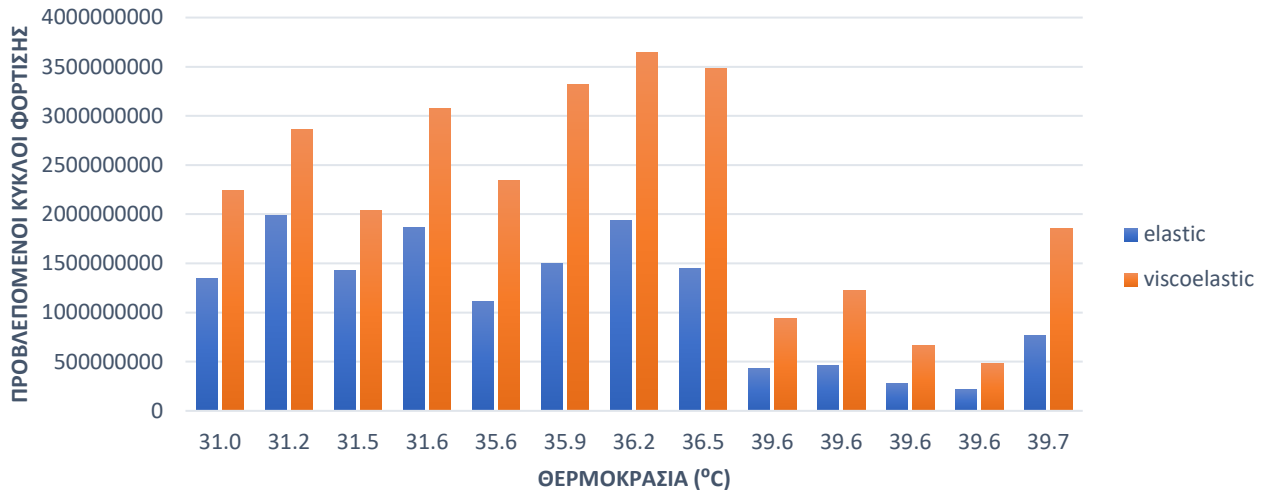
Εικόνα 6.17 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία χαμηλών θερμοκρασιών (SHEN-CARPENTER)

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΕΝΔΙΑΜΕΣΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (SHEN-CARPENTER)



Εικόνα 6.18 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία ενδιάμεσων θερμοκρασιών (SHEN-CARPENTER)

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΡΑΒΔΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (SHEN-CARPENTER)



Εικόνα 6.19 Συγκριτικό ραβδόγραμμα προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία υψηλών θερμοκρασιών (SHEN-CARPENTER)

Πίνακας 6.23 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (S-C) για το συνολικό δείγμα

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για το σύνολο των θερμοκρασιών	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	958526843.6	1283633196
Διακύμανση	1.42504E+18	2.05308E+18
Μέγεθος δείγματος	39	39
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	38	
t	-3.313204649	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.001016251	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.68595446	
P(T<=t) δίπλευρη	0.002032503	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.024394164	

Στην ενεργειακή προσέγγιση του φαινομένου παρατηρείται σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των τιμών στο σύνολο του δείγματος.

Πίνακας 6.24 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (S-C) των διατομών με χαμηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για χαμηλές θερμοκρασίες (8-19 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	1005881252	970328923.5
Διακύμανση	3.53424E+18	3.60403E+18
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	1.432044527	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.088830227	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.177660455	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.25 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (S-C) των διατομών με ενδιάμεσες θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για ενδιάμεσες θερμοκρασίες (19-30 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	733765984.4	713364314.7
Διακύμανση	4.76597E+17	4.07343E+17
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	0.302214312	
P(T<=t) μονόπλευρη	0.383831359	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	0.767662718	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Πίνακας 6.26 Στατιστικός έλεγχος των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης (S-C) των διατομών με υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχος t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για υψηλές θερμοκρασίες (30-40 °C)	<i>Nf el</i>	<i>Nf visco</i>
Μέσος	1135933295	2167206351
Διακύμανση	4.10555E+17	1.18562E+18
Μέγεθος δείγματος	13	13
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	12	
t	-6.663396417	
P(T<=t) μονόπλευρη	1.15755E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1.782287556	
P(T<=t) δίπλευρη	2.3151E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2.17881283	

Παρατηρείται και ότι στην ενεργειακή θεώρηση προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μόνο στις υψηλές θερμοκρασίες, όπως και στον νόμο MEPDG. Και πάλι η τάξη μεγέθους των επιτρεπόμενων διελεύσεων είναι ιδιαίτερος υψηλή.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της θεωρούμενης συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων στην προκύπτουσα εντατική καταπόνηση και την συμπεριφορά των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκαν εντατικές αναλύσεις σε 45 διατομές από νεαρά σε ηλικία εύκαμπτα οδοστρώματα. Τα απαραίτητα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν για τη διενέργεια εντατικών αναλύσεων, αλλά και της ανάλυσης σε κόπωση χρησιμοποιώντας διεθνή βαθμονομημένα μοντέλα. Από τη διαδικασία προέκυψε ότι:

- Η επιλογή του είδους της εντατικής ανάλυσης σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, στην οποία οι υψηλές θερμοκρασίες δεσπόζουν στο μεγαλύτερο μέρος της για αρκετό χρονικό διάστημα χρήζει ιδιαίτερης σημασίας στο πλαίσιο της αξιολόγησης αλλά και της λήψης αποφάσεων για τη διαχείρισή τους.
- Αξιοποιώντας το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών παρατηρήθηκε διαφορετική επίδραση της επιλεγμένης θεωρίας ανάλυσης στα αποτελέσματα των εντατικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, στις χαμηλές και ενδιάμεσες θερμοκρασίες παρατηρήθηκε ότι η θεωρία ανάλυσης δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το μέτρο δυσκαμψίας. Στην κατηγορία των υψηλών θερμοκρασιών όμως, παρατηρήθηκε ότι το μέτρο δυσκαμψίας από τον ανάστροφο υπολογισμό είναι μεγαλύτερο του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.
- Εξαιτίας της διαφοράς που προέκυψε στο μέτρο δυσκαμψίας, κρίθηκε αναγκαίος και ο έλεγχος των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων για κάθε θεωρία ανάλυσης και κάθε θερμοκρασιακή ομάδα. Ομοίως με το μέτρο δυσκαμψίας στις χαμηλές και ενδιάμεσες θερμοκρασίες παρατηρήθηκαν στατιστικά αμελητέες διαφορές μεταξύ ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης. Στην ομάδα υψηλών θερμοκρασιών και πάλι υπάρχει διαφορά. Μάλιστα, οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις στην βάση των ασφαλτικών στρώσεων προέκυψαν μικρότερες κατά την ελαστική ανάλυση που αποτελεί άλλωστε και την πάγια τακτική διεθνώς. Κατά συνέπεια, αναδείχθηκε ως δυσμενέστερη η ιξωδοελαστική ανάλυση στο φάσμα των υψηλών θερμοκρασιών.
- Στην ανάλυση κόπωσης παρατηρήθηκε ότι στο μοντέλο του Asphalt Institute (MS-1) δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις επιτρεπόμενες διελεύσεις. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι ο νόμος αυτός δεν λαμβάνει υπόψη τη συμβολή του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων στους υπολογισμούς και τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων. Από την άλλη, στα μοντέλα MEPDG και Shen & Carpenter παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές στις επιτρεπόμενες διελεύσεις στην ομάδα υψηλών θερμοκρασιών κατ' αναλογία με όσα προαναφέρθηκαν για τα μέτρα δυσκαμψίας και τις παραμορφώσεις.

Η επίδραση της επιλεγμένης θεωρίας εντατικής ανάλυσης φαίνεται πως έχει καθοριστική σημασία στην συμπεριφορά του εύκαμπτου οδοστρώματος και κατ' επέκταση στην ορθή αξιολόγησή του. Πιο συγκεκριμένα, σε μία χώρα όπως η Ελλάδα έχει σημασία η διενέργεια ιξωδοελαστικών αναλύσεων, τουλάχιστον δειγματοληπτικά, αφού σε πολλές περιοχές και για μεγάλα χρονικά διαστήματα επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες. Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών, των εντατικών μεγεθών, και κατ' επέκταση των προβλεπόμενων κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία. Ο σωστός υπολογισμός των μεγεθών αυτών αποτελεί εφιαλτήριο για την ορθή αξιολόγηση του εύκαμπτου οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, ο μηχανικός θα μπορεί να λάβει τις σωστές αποφάσεις που θα οδηγήσουν στην συντήρηση ή αποκατάσταση του υφιστάμενου οδοστρώματος, όταν αυτό κριθεί αναγκαίο.

Όπως έχει αναφερθεί τα οδοστρώματα που μελετήθηκαν ήταν νεαρής ηλικίας. Ενδεχομένως, σε αυτόν τον παράγοντα να οφείλεται η εν γένει μεγάλη τάξη μεγέθους των επιτρεπόμενων διελεύσεων που προέκυψαν από τους τρεις νόμους. Ωστόσο, με βάση τις διαφορές που εντοπίστηκαν κατά περίπτωση, αναδεικνύεται η σημασία της εξαρχής παρακολούθησης των οδοστρωμάτων προκειμένου να διαμορφωθεί ένα μητρώο παρακολούθησής τους. Ο μηχανικός επιστρέφοντας στις διατομές αυτές μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, θα μπορεί να ελέγξει κατά πόσο έχουν αλλάξει τα εντατικά μεγέθη και το μέτρο δυσκαμψίας των υλικών του οδοστρώματος. Έτσι, θα έχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της μεταβολής της κατάστασης του οδοστρώματος στην καμπύλη συμπεριφοράς, ώστε να αποφανθεί εάν το οδόστρωμα χρήζει συντήρησης ή αποκατάστασης.

Με αφορμή τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να γίνει σε υφιστάμενα οδοστρώματα μεγαλύτερης ηλικίας αξιοποιώντας το τρέχον μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης. Ακόμη, διακριτό πεδίο διερεύνησης αποτελεί η εμβάθυνση στους νόμους κόπωσης κυρίως ως προς την ορθή επιλογή τιμών των επιμέρους παραμέτρων των νόμων (πχ παράγοντας αυτοθεραπείας στο μοντέλο των Shen and Carpenter).

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **A. Λοΐζος, Χ. Πλατή, 2019**, Σημειώσεις για το μάθημα ειδικά θέματα οδοστρωμάτων, Εκδόσεις ΕΜΠ
2. **A. Λοΐζος, Χ. Πλατή, 2018**, Σημειώσεις για το μάθημα σχεδιασμός οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων, Εκδόσεις ΕΜΠ
3. **A. Λοΐζος, Χ. Πλατή, 2019**, Σημειώσεις για το μάθημα αξιολόγηση και συντήρηση οδοστρωμάτων, Εκδόσεις ΕΜΠ
4. **S. Adhikari, S. Shen, and Z. You, 2009**, Evaluation of Fatigue Models of Hot-Mix Asphalt Through Laboratory Testing, Transportation Research Board of the National Academies, Journal of the Transportation Research Board, No. 2127
5. **S. Adhikari, S. Shen, Z. You, 2010**, Evaluation of Fatigue Models of Hot-Mix Asphalt through Laboratory Testing, Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2127
6. **H. Di Benedetto, C. de La Roche, H. Baaj, A. Pronk & R. Lundstrom, 2004**, 'Performance testing and evaluation of bituminous materials' Fatigue of bituminous mixtures, RILEM TC 182-PEB
7. **K. A. Ghuzland & S. Carpenter, 2000**, Energy-Derived, damage-based failure criterion for fatigue testing. Transportation Research Record - TRR, 1723
8. **K. A. Ghuzland & S. Carpenter, 2001**, Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach. Canadian Journal of Civil Engineering
9. **K. A. Ghuzland & S. Carpenter, 2003**, Traditional Fatigue Analysis of Asphalt Concrete Mixtures. TRB, Transportation Research Board 2003
10. **Y. H. Huang, 2004**, Pavement Analysis and Design, 2nd Edition
11. **H. Ker, Y. Lee, and P. Wu, 2008**, Development of Fatigue Cracking Prediction Models Using Long-Term Pavement Performance Database, Journal of Transportation Engineering, Vol. 134, No. 11
12. **Y. Liao, 2007**, Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its application to U.S. 30 perpetual pavement, Department of Civil Engineering & Russ College of Engineering and Technology
13. **J. Lundy, J. Sandoval-Gill, A. Brickman, B. Paterson, 2005**, Asphalt Mix Characterization Using Dynamic Modulus and Apa Testing, Federal Highway Administration, Oregon State University
14. **C. Maggiore, 2016**, Using dissipated energy approaches to define fatigue failure in asphalt mixtures, Project Asset Management - Airfield Pavement
15. **K. Mollenhauer, V. Mouillet, N. Pierard, M. Tusar, T. Gabet, 2012**, Laboratory aging of asphalt mixtures: simulation of reclaimed asphalt and application as test method for durability, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul
16. **C.L. Monismith, J.A. Deacon, 1969**, Fatigue of asphalt paving mixtures, ASCE Transp. Eng. J. 95
17. **NCHRP, 2004**, Guide for Mechanistic-Empirical Design OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES FINAL DOCUMENT APPENDIX II-1: CALIBRATION OF FATIGUE

CRACKING MODELS FOR FLEXIBLE PAVEMENTS, National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council

18. **F. Olard, H. Di Benedetto, 2003**, General '2S2PID' model and relation between the linear viscoelastic behavior of bituminous binders and mixes, Road Materials and Pavement Design Volume 4, 2003 - Issue 2
19. **T. Pellinen, D. Christensen, G. Rowe & M. Sharrock, 2004**, Fatigue-Transfer Functions How Do They Compare? TRB, National Research Council, Journal of the Transportation Research Board, No. 1896
20. **T. Pellinen, M. Witczak, R. F. Bonaquist, 2002**, Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with NonLinear Least Squares Optimization, Conference: 15th Engineering Mechanics Division Conference
21. **N. Saboo , B. Das, P. Kumar, 2016**, New phenomenological approach for modeling fatigue life of asphalt mixes, Construction and Building Materials 121 (2016)
22. **S Shen and S. Carpenter, 2007**, Development of an Asphalt Fatigue Model Based on Energy Principles, University of Illinois at Urbana-Champaign, oral presentation Dr. Shen
23. **S.R. Tangella, J. Craus, J.A. Deacon, C.L. Monismith, 1990**, Summary report on fatigue response of asphalt mixtures SHRP Report No. TM-UCB-A-003-A, University of California
24. **Y. Wang, A. Norouzi & Y. R. Kim, 2016**, Comparison of Fatigue Cracking Performance of Asphalt Pavements Predicted by Pavement ME and LVECD Programs, Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board, No. 2590
25. **H. Wen and X. Li, 2013**, Development of a Damage-Based Phenomenological Fatigue Model for Asphalt Pavements, JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING © ASCE / AUGUST 2013
26. **M. Witczak, J. Bari, 2004**, Development of a master curve (E^*) database for lime modified asphaltic mixtures, Department of Civil and Environmental Engineering, Arizona State University Research Project
27. **Q. Xu, M. Solaimanian, 2009**, Modeling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model, International Journal of Pavement Engineering, Volume 10, 2009 - Issue 6