



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΙΕΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΦΕΡΛΕΜΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ-ΝΕΦΕΛΗ

Επιβλέπων καθηγητής: ΛΟΪΖΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, κ. Ανδρέα Λοΐζο αρχικά για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, αλλά και για την συνολική καθοδήγηση και επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Γκυρτή για τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοριστική βοήθεια του για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη που μου προσέφεραν το τελευταίο διάστημα.

Περίληψη

Η διενέργεια αναλύσεων για την εκτίμηση της εντατικής κατάστασης στο σώμα του οδοστρώματος είναι μια διαδικασία που απαιτείται στο πλαίσιο του σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων καθώς και της αξιολόγησης της ανάγκης επανασχεδιασμού υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Η συνήθης πρακτική περιλαμβάνει θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς για τα ασφαλομίγματα, ωστόσο αυτά στην πράξη συμπεριφέρονται ιξωδοελαστικά. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση αυτής της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων στην εντατική κατάσταση των ασφαλικών οδοστρωμάτων στη φάση σχεδιασμού. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε αρχικά σύγκριση εντατικών αναλύσεων με θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλομίγματος, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές ιξωδοελαστικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους που σχετίζονται τόσο με την φύση του ασφαλομίγματος (θερμοκρασία στο μέσο της ασφαλικής βάσης και ταχύτητα φόρτισης) όσο και με την συνολική δομή του οδοστρώματος (πάχη και δυσκαμψίες υποκείμενων υλικών). Το σύνολο των παραπάνω αναλύσεων έγινε για τη συνήθη θεώρηση φόρτισης με το τυπικό αξονικό φορτίο. Παράλληλα, μελετήθηκε η επίδραση φόρτισης με αξονικό φορτίο επί απλών τροχών λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά του πλεονεκτήματα. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα των αναλύσεων περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά: ασφατικά οδοστρώματα, ιξωδοελαστική συμπεριφορά, εντατικές αναλύσεις, ασφαλομίγμα, παραμορφώσεις

Abstract

Performing analyses for the assessment of the pavement's stress-strain state is a required procedure for the design of new pavements and the redesign of existing pavements. The conventional method is based on the consideration of elastic behavior for the asphalt mixtures, however they behave in a viscoelastic manner. In the present thesis, the effect of asphalt mixture's viscoelastic behavior on the asphalt pavements' stress-strain state in the design phase was investigated. For this purpose, a strain comparison was initially made considering both elastic and viscoelastic behavior for the asphalt mixtures. At next, extensive parametric viscoelastic analyses were conducted taking into account parameters that are related to both the nature of the asphalt mixture (temperature at the mid-depth of the asphalt base layer and loading frequency) and the pavements structure (thicknesses and stiffness of the underlying materials). All the above analyses were conducted for the conventional loading of a dual wheel axle load. In turn, the effect of a single wheel axle load was also investigated considering its environmental advantages. The relevant results and conclusions of the analyses are included in this thesis.

Keywords: asphalt pavements, viscoelastic behavior, strain analysis, asphalt mixture, strains

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Διατύπωση προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία	3
1.3 Δομή εργασίας.....	4
2. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΨΙΑΣ.....	6
2.1 Ορισμός	6
2.2 Προσδιορισμός εργαστηριακά.....	8
2.3 Κεντρικές καμπύλες	10
2.4 Η σιγμοειδής συνάρτηση	11
2.5 Λοιπά καταστατικά μοντέλα εκτίμησης E^*	13
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	20
3.1 Θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων	20
3.2 Ζητήματα που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση	22
3.3 Παράγοντες επίδρασης στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη	24
3.4 Η σημασία των εντατικών αναλύσεων για το σχεδιασμό και την ανάλυση	28
3.4.1 Σχεδιασμός νέων οδοστρωμάτων	28
3.4.2 Αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων.....	30
4. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	33
4.1 Αναλύσεις	34
4.2 Λογισμικό "3D Move Analysis"	36
4.3 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας πειραματικού ασφαλτομίγματος	42
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	45
5.1 Γενική Περιγραφή	45
5.2 Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης.....	46
5.3 Παραμετρική διερεύνηση ιξωδοελαστικής ανάλυσης.....	49
5.3.1. Επίδραση θερμοκρασίας.....	49
5.3.2 Επίδραση ταχύτητας.....	51
5.3.3 Επίδραση πάχους ασφαλτικών στρώσεων.....	52
5.3.4 Επίδραση μέτρου ελαστικότητας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα.....	53
5.4 Μοντέλο πρόβλεψης παραμορφώσεων	54
5.4.1 Γενικά στοιχεία.....	54
5.4.2 Ανάπτυξη και αξιολόγηση μοντέλου.....	56
5.5 Επισκόπηση επιμέρους κατηγοριών οδών	59

5.5.1 Επίδραση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς.....	59
5.5.2 Αξιολόγηση προσαρμογής του μοντέλου στις επιμέρους κατηγορίες οδών	60
5.6 Διερεύνηση αλλαγής διάταξης φόρτισης.....	63
5.6.1 Επίδραση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς.....	63
5.6.2 Αξιολόγηση προσαρμογής μοντέλου σε εναλλακτικές διατάξεις φόρτισης.....	66
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Διατύπωση προβλήματος

Οι οδικές υποδομές αποτελούν πολύ σημαντικό στοιχείο της ανάπτυξης και της οικονομίας μιας χώρας, λειτουργώντας ως δείκτες κοινωνικής ευημερίας, καθώς εξυπηρετούν την μεταφορά αγαθών και ανθρώπων. Επομένως, ο αποτελεσματικός σχεδιασμός και συντήρηση των οδοστρωμάτων των οδικών υποδομών, ώστε αυτά να είναι δομικά επαρκή και ταυτόχρονα να παρέχουν ασφάλεια και άνεση στο χρήστη της οδού (π.χ. καλή ποιότητα κύλισης), αποτελούν ζητήματα μείζονος σημασίας διαχρονικά.

Εστιάζοντας στη δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος, κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας του, δηλαδή της ικανότητας του να φέρει τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί χωρίς να εμφανίσει εκτεταμένες αστοχίες. Τα ασφαλικά οδοστρώματα έχουν ως κρίσιμες θέσεις αστοχίας τον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και την επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Το οδόστρωμα επομένως θα πρέπει να παρέχει επαρκή αντοχή έναντι των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων και των κατακόρυφων θλιπτικών παραμορφώσεων που εμφανίζονται στην πρώτη και δεύτερη θέση αντίστοιχα. Προσδιορίζοντας την εντατική κατάσταση του οδοστρώματος, δηλαδή τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις θέσεις αυτές, μπορούν να τροφοδοτηθούν οι νόμοι κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων και αστοχίας της στρώσης έδρασης, από τους οποίους υπολογίζεται η εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος. Με βάση το δεδομένο αυτό, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός νέου οδοστρώματος αλλά και η αξιολόγηση της ανάγκης επανασχεδιασμού ενός υφιστάμενου οδοστρώματος στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησής του. Κατά συνέπεια, ο τρόπος με τον οποίο θα αξιολογηθεί η εντατική κατάσταση ενός οδοστρώματος έχει άμεση επίδραση στη διαδικασία λήψης αποφάσεων στα πλαίσια του σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων αλλά και της αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

Η συνήθης πρακτική για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι η χρήση της θεωρίας πολλαπλών ελαστικών στρώσεων (Multi Layer Elastic Theory-MLET) η οποία βασίζεται στην παραδοχή για ισότροπα, ομογενή και ελαστικά υλικά. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι η απόκριση των

ασφαλτομίγμάτων, τα οποία εντοπίζονται στις ασφαλικές στρώσεις του οδοστρώματος, αποκλίνει από τις παραδοχές της ελαστικής θεώρησης. Το ασφαλτόμιγμα αποτελείται από τα αδρανή και την άσφαλτο η οποία λειτουργεί ως συνδετικό υλικό του μίγματος. Η άσφαλτος σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλές συχνότητες φόρτισης συμπεριφέρεται σαν ιξώδες ρευστό, σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές συχνότητες φόρτισης σαν ελαστικό στερεό ενώ στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες, που αναμένεται να επικρατήσουν στο οδόστρωμα, εμφανίζει μικτή συμπεριφορά. Κατά συνέπεια η ιξώδης φύση του συνδετικού υλικού (δηλαδή της ασφάλτου) υπερισχύει και επομένως το ασφαλτόμιγμα χαρακτηρίζεται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία και την συχνότητα φόρτισης. Χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς αυτής, σε αντίθεση με την ελαστική, είναι ότι η παραμόρφωση δεν ανακτάται στιγμιαία κατά την αποφόρτιση αλλά αρχίζει να μειώνεται και μηδενίζεται μετά από άπειρο χρόνο εμφανίζοντας παραμένουσες παραμορφώσεις.

Για να ληφθεί υπόψη λοιπόν, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά για τις ασφαλικές στρώσεις χρησιμοποιείται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^* για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Μέσω του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας εκφράζεται η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (που αναμένεται να επικρατήσουν στο εσωτερικό του ασφαλτομίγματος, δηλαδή στο μέσο της ασφαλικής βάσης ενός οδοστρώματος) και συχνοτήτων φόρτισης (που σχετίζονται με την ταχύτητα και τον χρόνο φόρτισης των κινούμενων αξονικών φορτίων). Η θεώρηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης ενός οδοστρώματος αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση από την ελαστική θεώρηση, η οποία αν και είναι πιο εύκολη στην εφαρμογή οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται είναι απλοποιητικές. Οι δύο διαφορετικές θεωρήσεις συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος δεδομένου ότι αντιμετωπίζουν διαφορετικά τις ασφαλικές στρώσεις ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη και κατά συνέπεια να επηρεάσουν την διαδικασία σχεδιασμού ενός οδοστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις αυτές σε συνδυασμό με την ποικιλία των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες εκτίθεται ένα οδόστρωμα, τη διακύμανση στα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων υλικών αλλά και των συνθηκών

φόρτισης που το καταπονούν, η πολυπλοκότητα των εντατικών αναλύσεων αυξάνεται σημαντικά. Για παράδειγμα, η συνήθης θεώρηση φόρτισης στο σχεδιασμό και την ανάλυση οδοστρωμάτων περιλαμβάνει αξονικό φορτίο επί διπλών τροχών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια φαίνεται να αυξάνεται η χρήση αξονικών φορτίων επί απλών τροχών με ελαστικά ευρείας βάσης, καθώς έχει αποδειχθεί ότι πλεονεκτούν περιβαλλοντικά ως προς τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμου έναντι της συνήθους διάταξης των διπλών ελαστικών. Κατά συνέπεια, ενδιαφέρον έχει και ο τρόπος απόκρισης ενός οδοστρώματος στα διαφορετικά φορτία λαμβάνοντας υπόψη τις δύο θεωρήσεις που προαναφέρθηκαν για τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος.

1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της εντατικής κατάστασης ασφαλικών οδοστρωμάτων λαμβάνοντας υπόψη την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων που εντοπίζονται στις ασφαλικές στρώσεις. Για την υλοποίηση του στόχου της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιούνται τα εξής επιμέρους βήματα:

- Η διερεύνηση της επίδρασης της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στην εντατική κατάσταση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Προς τούτο, πραγματοποιείται σύγκριση εντατικών αναλύσεων με παραδοχή ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων. Συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τη φύση του ασφαλτομίγματος (θερμοκρασία στο μέσο της ασφαλικής βάσης, ταχύτητα φόρτισης) όσο και με το σύνολο της δομής του οδοστρώματος (πάχος βάσης και ασφαλικών στρώσεων, μέτρο ελαστικότητας της βάσης και της στρώσης έδρασης). Για τα ως άνω μεγέθη, έγινε θεώρηση χαρακτηριστικών και αντιπροσωπευτικών τιμών, έτσι ώστε αυτές να ανταποκρίνονται αφενός στις περιβαλλοντικές συνθήκες που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο, αφετέρου τα χαρακτηριστικά της δομής του οδοστρώματος να συνάδουν με την αντίστοιχη εμπειρία και πρακτική σε θέματα σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Για παράδειγμα, η επιλογή των παχών των ασφαλικών στρώσεων πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να

καλύπτει ένα ευρύ φάσμα οδών από χαμηλής κυκλοφορίας (όπου τα αναμενόμενα πάχη των ασφαλικών στρώσεων είναι σχετικά μικρά) έως οδούς υψηλής κυκλοφορίας (όπου τα αναμενόμενα πάχη των ασφαλικών στρώσεων είναι σχετικά μεγάλα).

- Η διερεύνηση της δυνατότητας δημιουργίας μοντέλου πρόβλεψης των κρίσιμων εφελκυστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων με στόχο τη βελτιστοποίηση και την επιτάχυνση των διαδικασιών διενέργειας εντατικών αναλύσεων με ιξωδοελαστική θεώρηση.
- Η διερεύνηση επίδρασης της ιξωδοελαστικής ανάλυσης στην ανάλυση εντατικής κατάστασης των διάφορων κατηγοριών οδών, δηλαδή οδοί χαμηλής κυκλοφορίας (π.χ. επαρχιακοί οδοί), οδοί ενδιάμεσης κυκλοφορίας και οδοί υψηλής κυκλοφορίας (π.χ. εθνικοί οδοί ή αυτοκινητόδρομοι).
- Τέλος, διερευνάται η επίδραση φόρτισης του οδοστρώματος από αξονικό φορτίο επί απλών τροχών (μονού τροχού) στην εντατική κατάσταση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αντί της συνηθέστερης θεώρησης του τυπικού αξονικού φορτίου (επί διπλών τροχών).

Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης αρχικά πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και τα εργαλεία εντατικής ανάλυσης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Έπειτα, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις εντατικής κατάστασης χρησιμοποιώντας ένα διεθνώς αποδεκτό λογισμικό δυναμικής ανάλυσης. Η έμφαση της ανάλυσης δίνεται στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, καθώς το μέγεθος αυτό συνδέεται με τη κλασσική μηχανιστική αντίληψη για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει συμπεριλαμβανόμενου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου, έξι κεφάλαια. Ειδικότερα:

Το **2^ο κεφάλαιο** αφορά στην περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων μέσω του μεγέθους που την εκφράζει, δηλαδή του δυναμικού

μέτρου δυσκαμψίας. Περιγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού του εργαστηριακά και αναφέρονται ορισμένα από τα καταστατικά μοντέλα που υπάρχουν για την εκτίμησή του.

Το **3^ο κεφάλαιο** επικεντρώνεται στις αναλύσεις εντατικής κατάστασης ασφαλικών οδοστρωμάτων, ξεκινώντας από την ελαστική θεωρία, τις αδυναμίες της, εντοπίζονται οι παράγοντες που επιδρούν στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος, και σχολιάζεται η ανάγκη χρήσης θεωριών και εργαλείων που οδηγούν σε ρεαλιστικότερη περιγραφή της εντατικής κατάστασης.

Το **4^ο κεφάλαιο** περιγράφει τα βήματα της ερευνητικής διαδικασίας για τις παραμετρικές αναλύσεις της εντατικής κατάστασης οδοστρώματος.

Το **5^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας με παράλληλο σχολιασμό.

Στο **6^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για τη εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΨΙΑΣ

2.1 Ορισμός

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί τα τελευταία χρόνια, την παράμετρο που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, από τον μηχανιστικό-εμπειρικό οδηγό διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων (Guide for Mechanical-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, MEPDG) που αναπτύχθηκε σε συνέχεια του οδηγού AASHTO 2002. Το μέτρο αυτό περιγράφει αποτελεσματικά την ιξωδοελαστική τους φύση.

Για τον προσδιορισμό του, απαιτείται η επιβολή θλιπτικού μονοαξονικού φορτίου ημιτονοειδούς μορφής (Εικόνα 2.1), όπου η τάση έχει την μορφή:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

Και η παραμόρφωση που προκύπτει έχει την μορφή:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \delta) \quad (2.2)$$

Όπου:

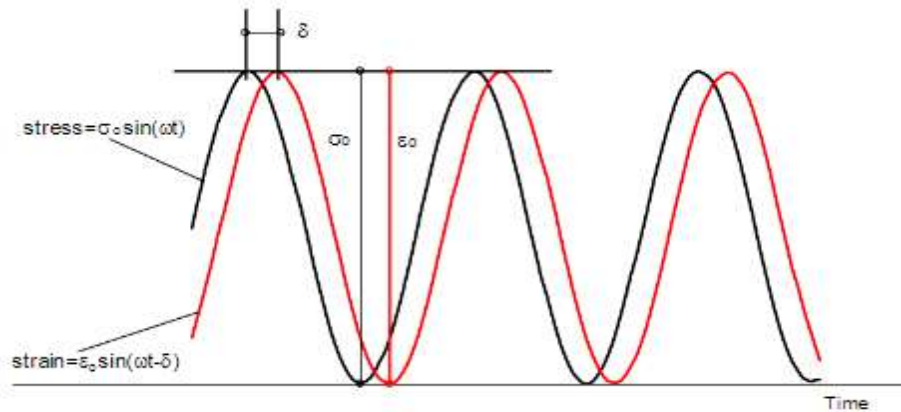
σ_0 : η μέγιστη τάση

ε_0 : η μέγιστη παραμόρφωση, που προκύπτει ως αποτέλεσμα εφαρμογής της μέγιστης τάσης

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

ω : γωνιακή ταχύτητα για την οποία ισχύει, $\omega=2\pi f$ 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)



Εικόνα 2.1: Συνθήκες ημιτονοειδούς φόρτισης (Garcia and Thomson, 2007)

Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας E^* ισούται με το λόγο τάσης προς παραμόρφωση και όπως κάθε μιγαδικός αριθμός, αποτελείται από δύο μέρη το πραγματικό και το φανταστικό (Huang 2004):

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

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:

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

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

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

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η απόλυτη τιμή του σύνθετου (μιγαδικού) μέτρου δυσκαμψίας E^* ορίζεται ως το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Huang 2004, Yoder and

Witzcak 2011) και ισούται με τον λόγο μέγιστης τάσης προς μέγιστη παραμόρφωση υπό συνθήκες ημιτονοειδούς φόρτισης.

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

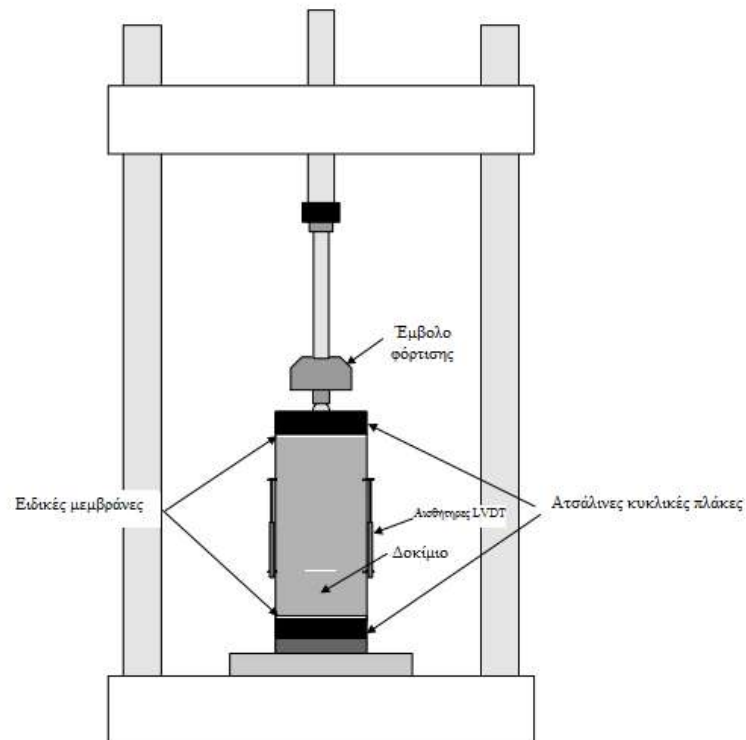
2.2 Προσδιορισμός εργαστηριακά

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται εργαστηριακά μέσω της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, όπως αυτή ορίζεται στο πρότυπο AASHTO T342-11, "Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)". Η δοκιμή πραγματοποιείται με ελεγχόμενη επιβολή θλιπτικού φορτίου ημιτονοειδούς μορφής μέσω εμβόλου, με ανώτατο όριο τάσης 2800 kPa, για διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες. Για κάθε ένα συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας η προκύπτουσα παραμόρφωση μετريέται από ειδικούς αισθητήρες (Linear Variable Differentials Transformers- LVDT), οι οποίοι τοποθετούνται παράλληλα στην διεύθυνση φόρτισης σε ειδικά μεταλλικά στηρίγματα (Εικόνα 2.2). 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.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής, χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια ασφαλτομίγματος, τα οποία πριν την δοκιμή συμπτυκνώνονται με τη γυροσκοπική μέθοδο και διαμορφώνονται σύμφωνα με τις προτεινόμενες διαστάσεις δηλαδή διάμετρο 100 mm και ύψος 150 mm. Έπειτα, τοποθετούνται πάνω και κάτω από το δοκίμιο ατσάλινες κυκλικές πλάκες που χρησιμεύουν 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 (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.2: Δοκίμιο προετοιμασμένο για δοκιμή (Cross et al. 2007)



Εικόνα 2.3: Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης (Dougan et al. 2003)

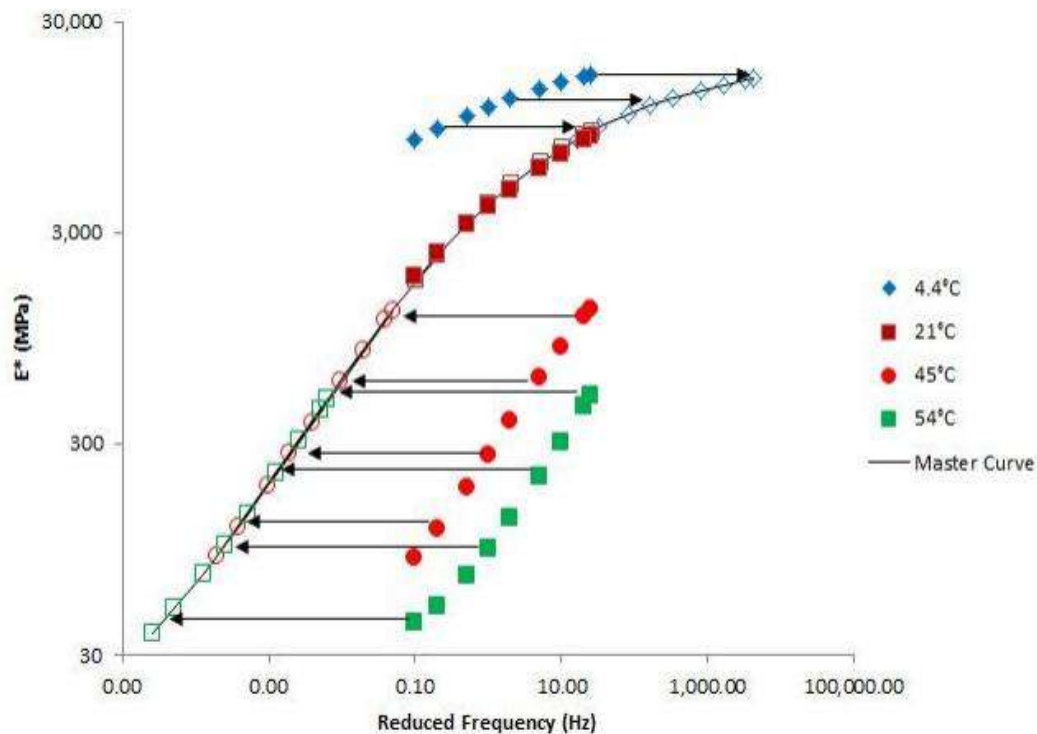
Η δοκιμή αυτή γίνεται υπό συνθήκες ελεγχόμενης τάσης έτσι ώστε η παραμόρφωση του δοκιμίου να κυμαίνεται στα 50 έως 150 microstrain. Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζει ότι η δοκιμή πραγματοποιείται εντός του εύρους της γραμμικής ιξωδοελαστικής ζώνης (Underwood et al. 2011).

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.

2.3 Κεντρικές καμπύλες

Η κεντρική καμπύλη αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ασφαλομίγματος, καθώς δίνεται εκτίμηση του E^* για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Η δημιουργία της βασίζεται στην αρχή επαλληλίας χρόνου–θερμοκρασίας, σύμφωνα με την οποία, η επίδραση του χρόνου στις ιδιότητες του υλικού μπορεί να αντικατασταθεί από την επίδραση της θερμοκρασίας και το αντίστροφο. Με αυτό τον τρόπο, η κεντρική καμπύλη μπορεί να οριστεί ως η συνάρτηση που περιγράφει την εξάρτηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από τη θερμοκρασία του ασφαλομίγματος και τον χρόνο φόρτισης.

Τα δεδομένα από τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας για τις διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες μετατοπίζονται σε σχέση με τον χρόνο φόρτισης ή την συχνότητα έτσι ώστε να σχηματίσουν μια ενιαία καμπύλη (Pellinen and Witczak 2002). Για τη δημιουργία της, επιλέγεται αυθαίρετα μια θερμοκρασία αναφοράς (η οποία εΐθισται να ταυτίζεται με μία εκ των θερμοκρασιών στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δοκιμή). Στην καμπύλη που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αναφοράς, μετατοπίζονται κατάλληλα όλες οι μετρημένες τιμές του E^* (Εικόνα 2.4). Το μέγεθος της απαιτούμενης μετατόπισης περιγράφει την θερμοκρασιακή εξάρτηση του υλικού (Witczak and Bari 2004, Lundy et al. 2005) και προσδιορίζεται από τον παράγοντα μετατόπισης $a(T)$ με τον οποίο πρέπει να διαιρεθεί ο χρόνος φόρτισης ή να πολλαπλασιαστεί η συχνότητα για να προκύψει ο μειωμένος χρόνος (t_r) ή η μειωμένη συχνότητα (f_r) αντίστοιχα.



Εικόνα 2.4: Δημιουργία κεντρικής καμπύλης (Diaz and Archila 2013)

2.4 Η σιγμοειδής συνάρτηση

Υπάρχουν αρκετά μαθηματικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσαρμοστούν τα πειραματικά δεδομένα και να δημιουργηθεί η κεντρική καμπύλη. Ωστόσο, στα πλαίσια του μηχανιστικού-εμπειρικού οδηγού MEPDG που προαναφέρθηκε, η κεντρική καμπύλη περιγράφεται μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Log}(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma(\log fr)}} \quad (2.7)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικτού μίγματος

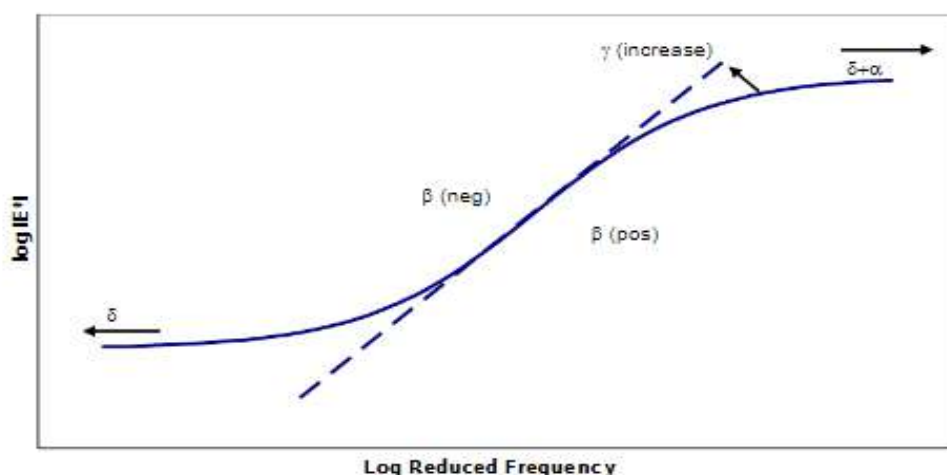
δ : ελάχιστη τιμή του E^*

$\delta + \alpha$: μέγιστη τιμή του E^*

β, γ : παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της σιγμοειδούς συνάρτησης

f_r : μειωμένη συχνότητα όπου $f_r = f \cdot a(T)$, με $\text{Log} a(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$ όπου a, b, c είναι οι συντελεστές δευτεροβάθμιας εξίσωσης και T η εκάστοτε θερμοκρασία ($^{\circ}\text{F}$)

Η παράμετρος γ , της σχέσης (2.7), επηρεάζει την κλίση της συνάρτησης δηλαδή τον ρυθμό μεταβολής μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων τιμών, ενώ η παράμετρος β επηρεάζει την οριζόντια θέση του σημείου καμπής (Lundy et al. 2005). Οι παράμετροι a, δ εξαρτώνται από χαρακτηριστικά του μίγματος, όπως η κοκκομετρία των αδρανών, το ποσοστό ασφάλτου και κενών. Οι παράμετροι β, γ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου και από τις τιμές των δ, a .



Εικόνα 2.5: Σιγμοειδής συνάρτηση (Pellinen and Witczak 2002)

Η καταλληλότητα χρήσης αυτού του μοντέλου προέκυψε από φυσικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Το άνω τμήμα της καμπύλης αναπαριστά το ανώτατο όριο του μέτρου δυσκαμψίας του μίγματος, το οποίο περιορίζεται από την δυσκαμψία του συνδετικού υλικού σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ στο κάτω τμήμα της καμπύλης το μέτρο πλησιάζει μια οριακή τιμή ισορροπίας η οποία επηρεάζεται από την επίδραση των αδρανών (Lundy et al. 2005).

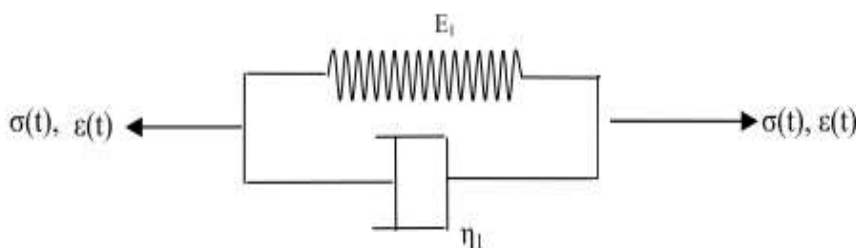
Συμπερασματικά, το πλεονέκτημα της κεντρικής καμπύλης είναι η δυνατότητα προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας για οποιοδήποτε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας με αποτέλεσμα να μπορεί να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων συνδυαστικά η επιρροή της θερμοκρασίας και η επιρροή της ταχύτητας κυκλοφορίας μέσω του χρόνου και της συχνότητας φόρτισης.

2.5 Λοιπά καταστατικά μοντέλα εκτίμησης E^*

Πέρα από τη σιγμοειδή συνάρτηση που αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν καταστατικά ή μηχανιστικά μοντέλα που προσομοιώνουν επίσης τη συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν φυσικά στοιχεία που εκφράζουν τόσο την ελαστική όσο και την ιξώδη συνιστώσα της συμπεριφοράς του ασφαλομίγματος. Αποτελούνται από ελατήρια που αναπαριστούν τις ελαστικές ιδιότητες του ασφαλομίγματος και από αποσβεστήρες που αναπαριστούν τις ιξώδεις ιδιότητες του (Huang 2004). Τα διάφορα μοντέλα προκύπτουν από τα δύο αυτά στοιχεία με διαφορετικούς συνδυασμούς στην σύνδεση τους, δηλαδή άλλοτε τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά άλλοτε παράλληλα. Επίσης, ορισμένες φορές 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.

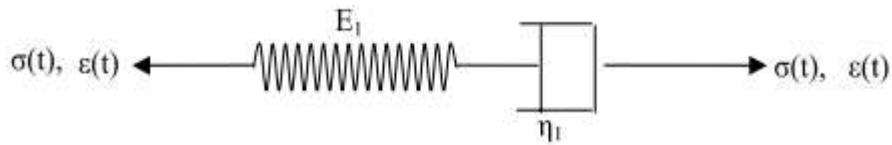
Τα πιο βασικά καταστατικά μοντέλα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Olard and Benedetto 2003, Xu and Solamanian 2009) αναφέρονται παρακάτω:

- **Μοντέλο Kelvin:** Το μοντέλο αυτό (Εικόνα 2.6) αποτελείται από ένα ελατήριο συνδεδεμένο παράλληλα με έναν γραμμικό αποσβεστήρα.



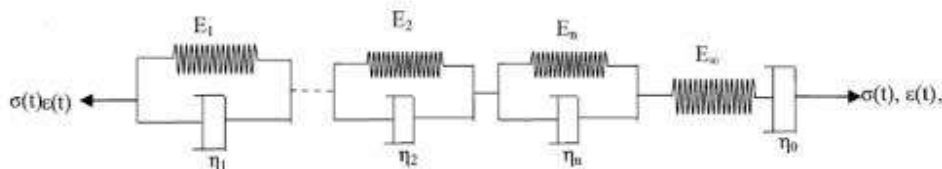
Εικόνα 2.6: Μοντέλο Kelvin (Xu and Solamanian 2009)

- **Μοντέλο Maxwell:** Το μοντέλο αυτό (Εικόνα 2.7) αποτελείται από ένα ελατήριο συνδεδεμένο σε σειρά με ένα γραμμικό αποσβεστήρα.

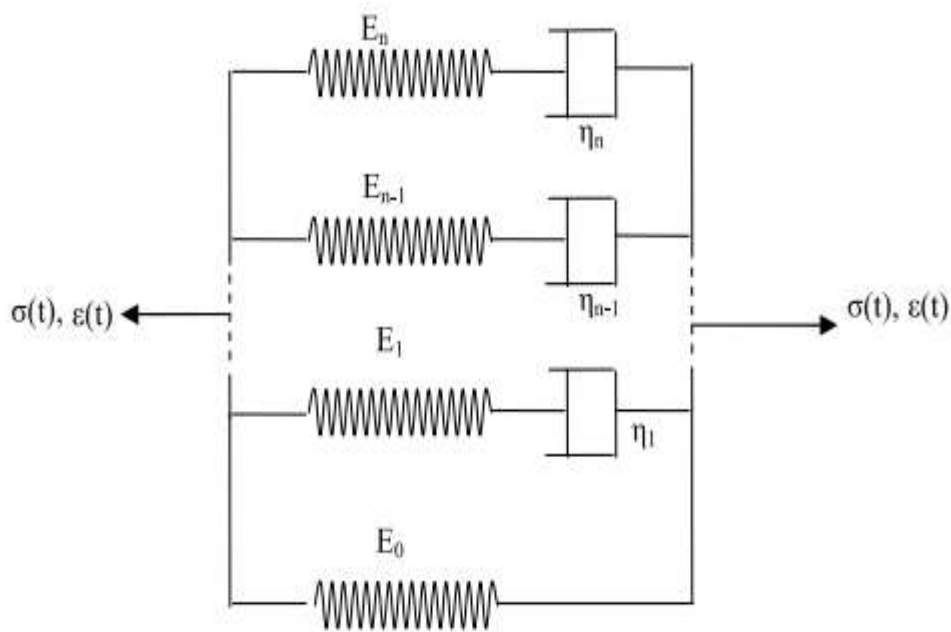


Εικόνα 2.7: Μοντέλο Maxwell (Xu and Solamanian 2009)

Τα μοντέλα αυτά ήταν από τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν κι ως εκ τούτου, είναι πολύ απλοποιητικά για να χαρακτηρίσουν ρεαλιστικά την συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν οι γενικευμένες μορφές των ως άνω μοντέλων. Το γενικευμένο μοντέλο Kelvin (Εικόνα 2.8) αποτελείται από πολλά μοντέλα Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το γενικευμένο μοντέλο Maxwell (Εικόνα 2.9) αποτελείται από πολλά μοντέλα Maxwell συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους όπως φαίνονται παρακάτω.

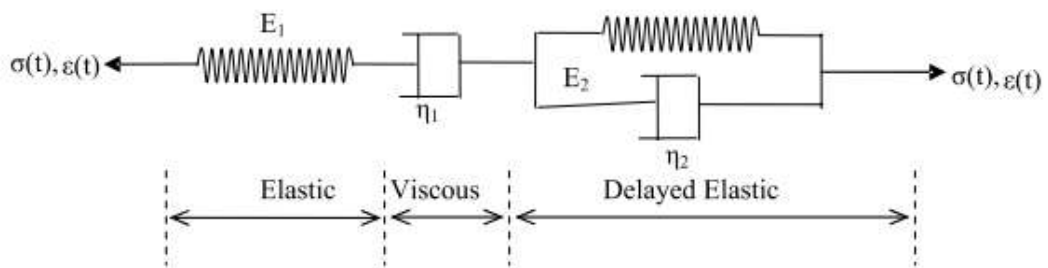


Εικόνα 2.8: Γενικευμένο μοντέλο Kelvin (Xu and Solamanian 2009)



Εικόνα 2.9: Γενιευμένο μοντέλο Maxwell (Xu and Solamanian 2009)

- **Μοντέλο Burger:** Το μοντέλο Burger αποτελείται από ένα μοντέλο Maxwell και ένα μοντέλο Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους.



Εικόνα 2.10: Μοντέλο Burger (Xu and 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:

$$E^*(i\omega) = \frac{1}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2^2 + \omega^2 n_2^2}\right) - \left(\frac{1}{\omega n_1} + \frac{\omega n_2}{E_2^2 + \omega^2 n_2^2}\right)i} \quad (2.8)$$

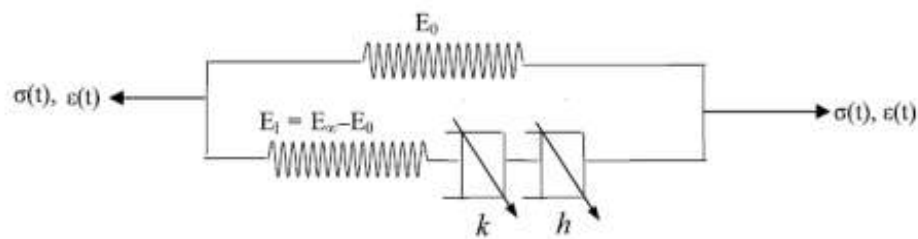
Όπου:

E_1, E_2 : μέτρα ελαστικότητας των ελατηρίων

n_1, n_2 : παράμετροι ιξώδους των αποσβεστήρων

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

- **Μοντέλο Huet-Sayegh:** Το μοντέλο Huet-Sayegh (Εικόνα 2.11) 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 2.11: Μοντέλο Huet-Sayegh (Xu and Solamanian 2009)

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

$$E^* = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2.9)$$

Όπου:

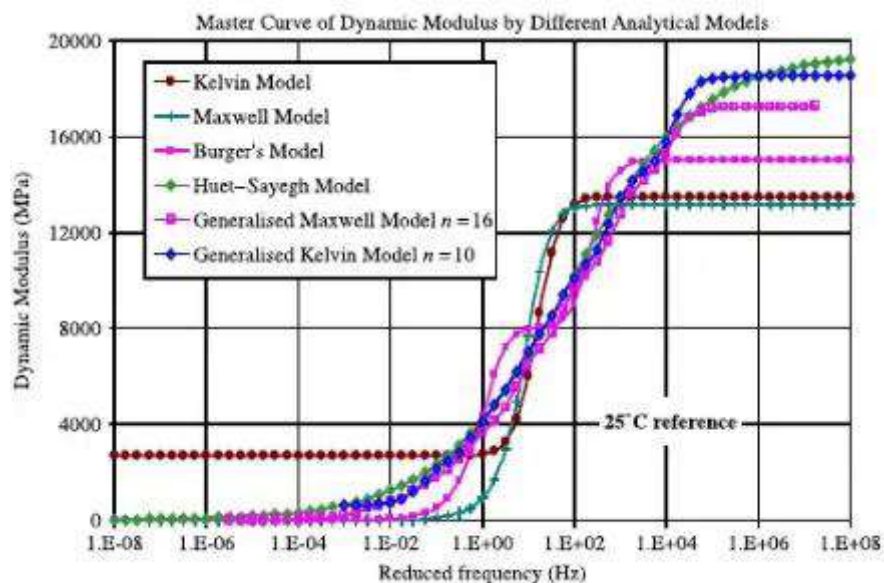
E_0, E_1 : μέτρα ελαστικότητας των ελατηρίων

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 (Εικόνα 2.12), 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 2.12: Κεντρικές καμπύλες των καταστατικών μοντέλων

(Xu and Solaimanian 2009)

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μόνιμη παραμόρφωση του συνδετικού υλικού του ασφαλικού μίγματος οι Olard and Benedetto (2003), επέκτειναν το μοντέλο Huet-Sayegh προσθέτοντας ένα γραμμικό αποσβεστήρα σε σειρά με τους άλλους δύο μεταβλητούς (Εικόνα 2.13). 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). Σύμφωνα με το μοντέλο 2S2P1D το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E^* = E_\infty + \frac{E_0 - E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2.10)$$

Όπου:

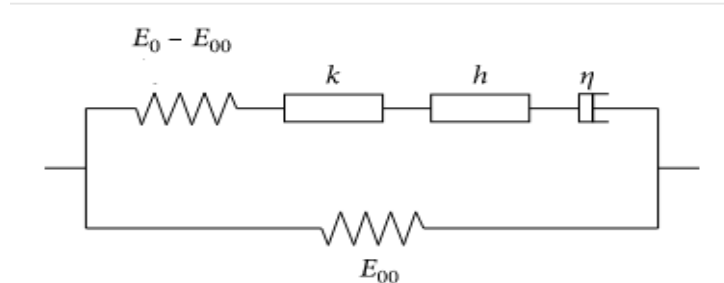
E_0, E_∞ : σταθερές που σχετίζονται με την ελαστικότητα των ελατηρίων

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

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

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

$$\tau = \exp(a + b \cdot T + c \cdot T^2)$$



Εικόνα 2.13: Μοντέλο 2S2P1D (Olard and Benedetto 2003)

Είναι προφανές ότι η επιλογή του καταστατικού μοντέλου ανάλυσης της συμπεριφοράς του ασφαλομίγματος θα έχει άμεση επίπτωση στην ανάλυση εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος συνολικά. Το γεγονός αυτό εισάγει προκλήσεις στο μηχανικό οδοστρώματων, 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

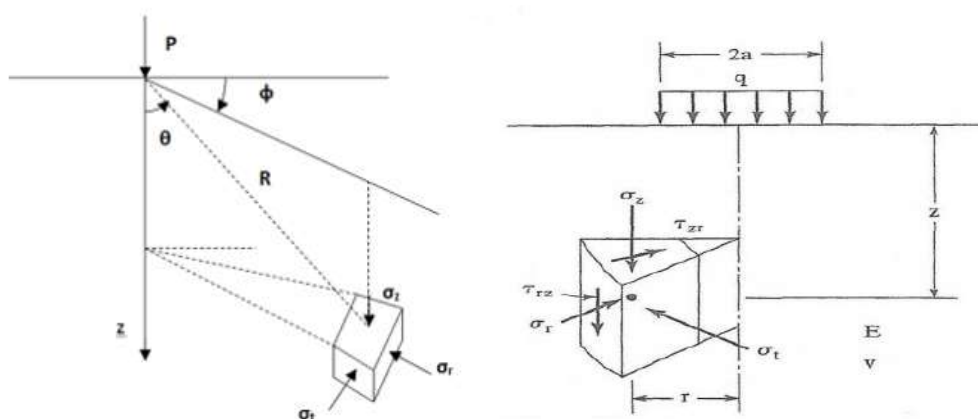
δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων λαμβάνεται υπόψη μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης που περιγράφηκε στην ενότητα 2.4

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η ανάλυση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα, δηλαδή των τάσεων και των παραμορφώσεων. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που απαιτείται να προσδιοριστούν για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και η κατακόρυφη θλιπτική στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Η ανάλυση της εντατικής κατάστασης μπορεί να γίνει μέσω διαφορετικών θεωριών όπως η θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων. Επιπλέον, και η συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών μπορεί να μελετηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά τους, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

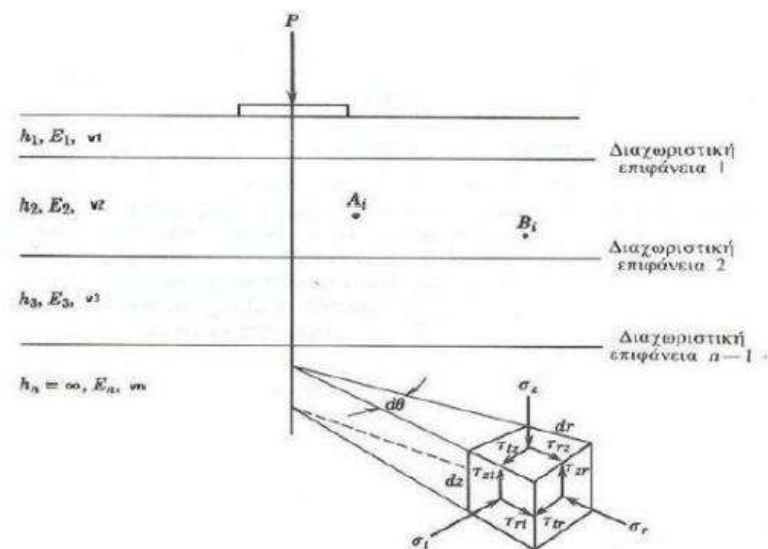
3.1 Θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων

Η απλούστερη και πιο γνωστή μέθοδος προσδιορισμού των εντατικών μεγεθών ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι η θεωρία συστήματος επάλληλων ελαστικών στρώσεων (Multi-Layered Elastic Theory- MLET). Οι ρίζες της θεωρίας αυτής παραπέμπουν στον ελαστικό ομογενή ισότροπο ημίχωρο του Boussinesq, ο οποίος εξήγαγε αναλυτικές εκφράσεις για τις μετατοπίσεις, τις τάσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις σε κάθε σημείο του ημίχωρου, για κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο και ομοιόμορφο φορτίο κατανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια που δρα στην επιφάνεια του (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ελαστικό ημίχωρο λόγω στατικής φόρτισης (Huang 2004)

Το εύκαμπτο οδόστρωμα ωστόσο αποτελεί ένα σύστημα επάλληλων στρώσεων, οπότε δεν μπορούσε να περιγραφεί αποτελεσματικά από τον ελαστικό ημίχωρο. Γι' αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε η θεωρία Burmister για σύστημα δύο στρώσεων, η οποία προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες με την βοήθεια κάποιων παραδοχών. Στη θεωρία αυτή βασίζεται και η λύση για το γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων (Εικόνα 3.2) που χρησιμοποιείται για την επίλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων, δεδομένου ότι στην πράξη, αυτά αποτελούνται από τρεις ή παραπάνω στρώσεις.



Εικόνα 3.2: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων (Λοΐζος και Πλατή 2018)

Αναφορικά με τις παραδοχές της MLET, κάθε στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται στο άπειρο πλευρικά και ότι έχει πεπερασμένο πάχος, πέραν της κατώτερης που εκτείνεται στο άπειρο κατακόρυφα. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η δράση στατικού φορτίου κυκλικής διατομής που ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο στην επιφανειακή στρώση. Επιπλέον, τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται (Huang 2004):

- Γραμμικά ελαστικά.
- Ομογενή, δηλαδή οι ιδιότητες είναι ίδιες σε όλα τα σημεία του πολυστρωματικού ημίχωρου.
- Ισότροπα, δηλαδή οι ιδιότητες σε κάθε σημείο είναι ίδιες σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό.

Οι ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ελαστικής λύσης σε κάθε στρώση είναι μόνο το μέτρο ελαστικότητας των υλικών και ο λόγος Poisson. Τέλος η λύση βασίζεται στις παραδοχές ότι δεν αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια και ότι στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ των επιμέρους στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή.

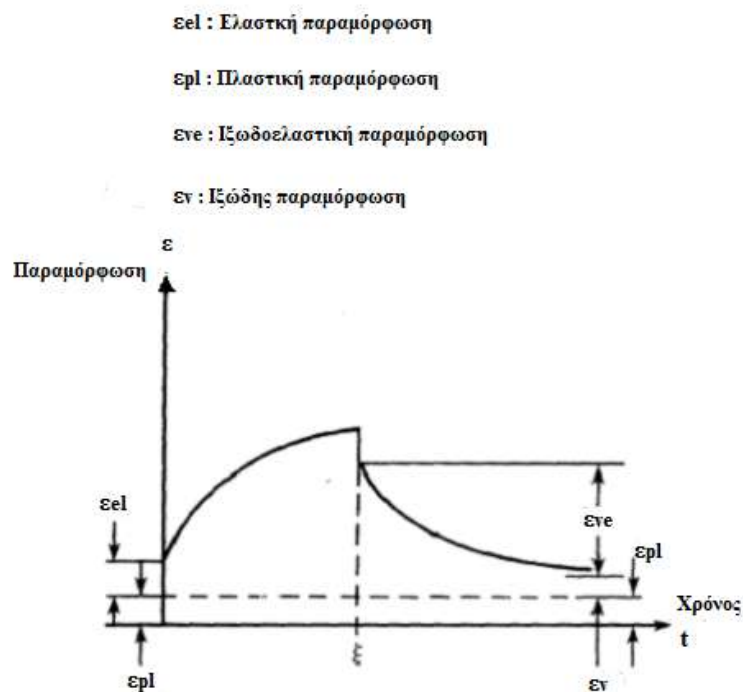
3.2 Ζητήματα που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση

Η ελαστική ανάλυση αν και είναι απλή και εύκολη στους υπολογισμούς και την εφαρμογή, θεωρείται πολύ απλοποιητική και οι παραδοχές της συχνά δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Τα δύο βασικά της προβλήματα είναι: (1) η θεώρηση στατικής φόρτισης και (2) η αντιμετώπιση των υλικών (άρα και των ασφαλτομιγμάτων) ως γραμμικά ελαστικά (Liao Y. 2007).

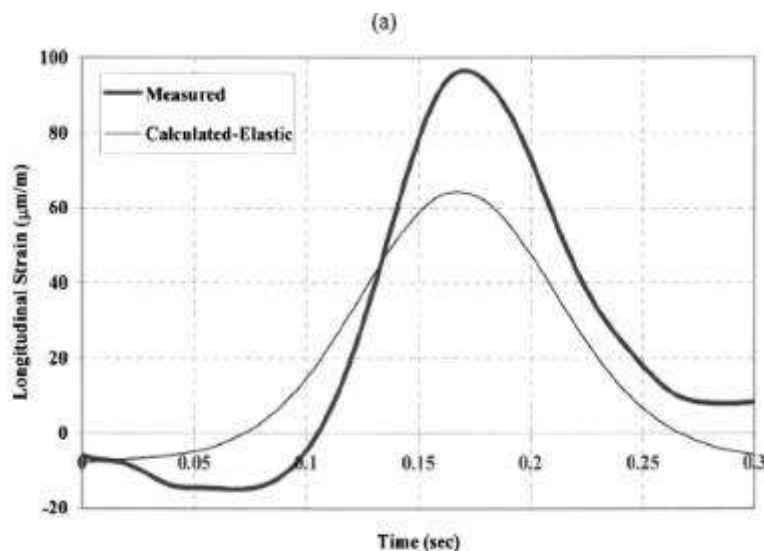
Είναι προφανές ότι η φόρτιση που δέχεται το οδόστρωμα δεν είναι στατική αλλά είναι δυναμική λόγω των κινούμενων τροχών από τα οχήματα που διέρχονται στην επιφάνεια του. Στην περιοχή επαφής των τροχών με το οδόστρωμα αναπτύσσονται εξαιρετικά μη ομοιόμορφες κατακόρυφες τάσεις επαφής καθώς και εγκάρσιες και διαμήκεις εφαπτομενικές τάσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μία σύνθετη εντατική κατάσταση κοντά στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Wang H. 2011). 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. Συνεκτιμώντας όλα τα ανωτέρω, έχει επισημανθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ότι η απόκριση του οδοστρώματος από τη δυναμική ανάλυση ήταν συνήθως υψηλότερη από τη στατική ανάλυση, ειδικά σε μεγάλη ταχύτητα και χαμηλή θερμοκρασία (Yoo et al. 2006).

Επιπλέον, είναι επίσης γνωστό ότι το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ως ελαστικό υλικό σε χαμηλές θερμοκρασίες, ως ιξώδες σε υψηλές θερμοκρασίες και ως ιξωδοελαστικό σε ενδιάμεσες ("κανονικές") θερμοκρασίες (Ossa A. 2004). Όταν ασκείται στην επιφάνεια των ασφαλικών στρώσεων ένα κινούμενο φορτίο αναπτύσσονται τρία διαφορετικά είδη παραμορφώσεων (strains): (1) η ελαστική, η οποία ανακτάται στιγμιαία με την αποφόρτιση, (2) η ιξωδοελαστική, η οποία είναι

μερικώς αναιρέσιμη, ενώ εμφανίζεται χρονική υστέρηση στην αναίρεσή της και τέλος, (3) η ιξωδοπλαστική, η οποία είναι παραμένουσα (Elseifi et al. 2006). Η συνολική καταπόνηση προκύπτει ως το άθροισμα των τριών αυτών παραμορφώσεων (Εικόνα 3.3). Ωστόσο, η πλαστική παραμόρφωση είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί κι ως εκ τούτου συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη. Λόγω της ιξώδους φύσης του συνδετικού υλικού, η επίδραση της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι σημαντική. Ειδικότερα, έχει προκύψει από πειράματα στην βιβλιογραφία ότι σε υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 20 °C) όπου οι ιξώδεις ιδιότητες των ασφαλτικών υλικών γίνονται πιο κυρίαρχες, η ελαστική ανάλυση δεν επαρκεί για να περιγράψει επαρκώς την απόκριση του οδοστρώματος καθώς υποεκτιμά την καταπόνηση του (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.3: Παραμορφώσεις ιξωδοελαστικών υλικών (Kenis 1977)



Εικόνα 3.4: Σύγκριση ελαστικής ανάλυσης με δεδομένα από μετρήσεις, $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Elseifi et al. 2006)

Με βάση τα παραπάνω, διαφαίνονται ορισμένες αδυναμίες της συμβατικής ανάλυσης με βάση την ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων που χρησιμοποιείται ως συνήθης πρακτική στο σχεδιασμό και την ανάλυση οδοστρωμάτων. Οι διεθνείς εξελίξεις στο θέμα της εντατικής κατάστασης οδοστρωμάτων περιλαμβάνουν τη χρήση της ιξωδοελαστικής ανάλυσης για το ασφαλτόμιγμα σε συνδυασμό με τη θεώρηση κινούμενων φορτίων. Περαιτέρω καινοτομία στην υπόψη διαδικασία αποτελεί η ταυτόχρονη θεώρηση των τρισδιάστατων τάσεων επαφής που επικρατούν στην επιφάνεια ελαστικού και οδοστρώματος για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος (Shakiba et al. 2017). Συνολικά, έχει παρατηρηθεί ότι η υιοθέτηση της γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για τα υλικά της ασφατικής στρώσης έχει βελτιώσει πολύ τα αποτελέσματα στο πλαίσιο σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων.

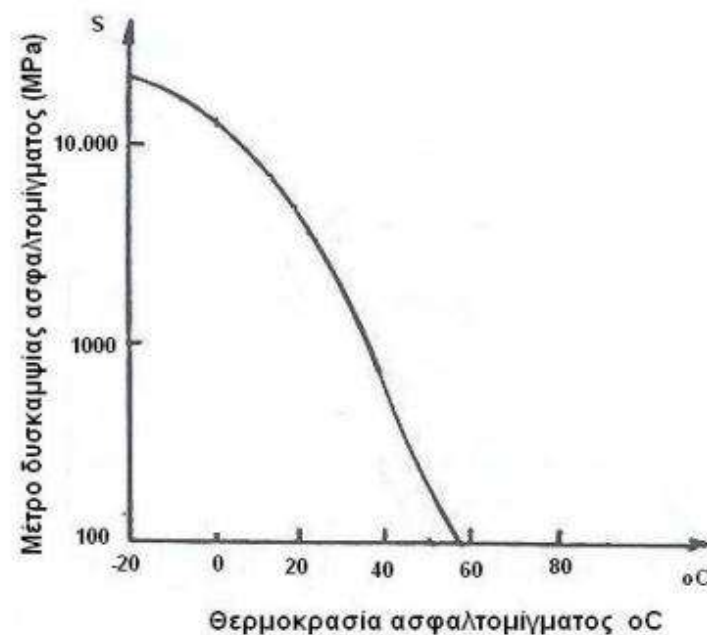
3.3 Παράγοντες επίδρασης στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη

Με σκοπό την διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας προηγήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τους παράγοντες που έχουν επίδραση στην ανάλυση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος. Εντοπίστηκαν παράγοντες που έχουν σχέση (α) με τη φύση των ασφατομιγμάτων, (β) τη δομή του οδοστρώματος συνολικά (σε επίπεδο γεωμετρίας και δομής των

υλικών), (γ) τις συνθήκες καταπόνησης του οδοστρώματος και τέλος (δ) των εργαλείων ανάλυσης που χρησιμοποιούνται. Προέκυψαν οι εξής:

(α) Αναφορικά με τη φύση του ασφαλτομίγματος, οι δύο βασικότεροι παράγοντες είναι:

- **Θερμοκρασία:** Όπως είναι ήδη γνωστό η θερμοκρασία στο εσωτερικό των ασφαλτικών στρώσεων επηρεάζει την δυσκαμψία τους λόγω της ιξωδοελαστικής τους φύσης. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών μειώνεται (Εικόνα 3.5). Σε υψηλές θερμοκρασίες η άσφαλτος γίνεται μαλακή και πιο ιξώδης, δηλαδή η ασφαλτική στρώση έχει μικρότερη αντίσταση και συνεπώς αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις (Zuo G. 2003, El-Maaty A. 2017).



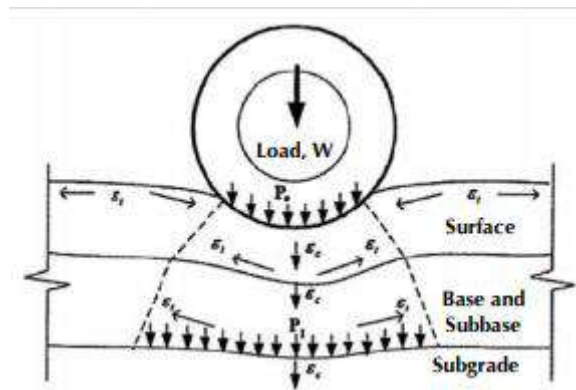
Εικόνα 3.5: Σχέση μέτρου δυσκαμψίας με θερμοκρασία (Λοΐζος και Πλατή 2018)

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των ασφαλτικών στρώσεων παρουσιάζουν διακύμανση ανάλογα με το βάθος. Όσο αυξάνεται το βάθος η θερμοκρασία που παρατηρείται είναι όλο και μικρότερη. Το σύνηθες είναι ως λειτουργική θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων να λαμβάνεται η θερμοκρασία που εντοπίζεται στο μέσο των ασφαλτικών

στρώσεων και συγκεκριμένα στο μέσον της ασφαλικής βάσης. Η θεώρηση αυτή υιοθετείται και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

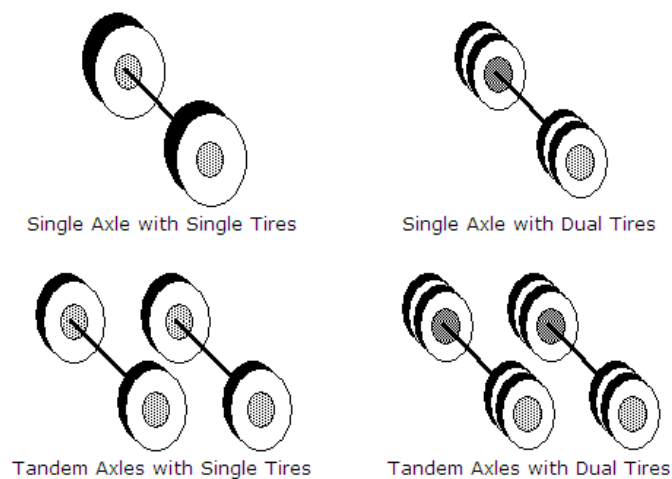
- **Ταχύτητα κυκλοφορίας:** Η ταχύτητα συνδέεται με το χρόνο και την συχνότητα φόρτισης που επίσης επηρεάζει την συμπεριφορά των ιξωδοελαστικών υλικών. Έχει παρατηρηθεί ότι μείωση της συχνότητας (δηλαδή η αύξηση του χρόνου φόρτισης) αντιστοιχεί σε μείωση του ενεργού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών υλικών. Δηλαδή, η κίνηση των βαρέων οχημάτων που γίνεται κατά κανόνα με χαμηλές ταχύτητες, αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο χρόνο φόρτισης και συνεπώς σε μικρότερη συχνότητα, με αποτελέσματα τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές. Αντιθέτως, η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων αντιστοιχεί σε μικρό χρόνο επαφής με το οδόστρωμα και συνεπώς μικρό βάθος κατανομής των τάσεων (Burnos P. 2017) γεγονός που προσφέρει ικανοποιητική προστασία στην στρώση έδρασης στην οποία θεμελιώνεται όλη η δομή του οδοστρώματος.

(β) Δομή του οδοστρώματος: Για τη διενέργεια των εντατικών αναλύσεων, χρειάζεται να είναι γνωστό το στατικό προσομοίωμα του οδοστρώματος. Ειδικότερα, οι στρώσεις του οδοστρώματος χαρακτηρίζονται από το πάχος τους, τον λόγο Poisson, και το μέτρο ελαστικότητας ή το ενεργό μέτρο δυσκαμψίας για τις ασφαλικές στρώσεις. Οι ιδιότητες αυτές καθορίζουν την φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος και την κατανομή των εντατικών μεγεθών (Εικόνα 3.6). Ως εκ τούτου, τυχόν διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία της διατομής του οδοστρώματος ή στα χρησιμοποιούμενα υλικά αναμένεται να έχουν επίδραση στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Γι' αυτό και η γνώση τους είναι ιδιαίτερα απαραίτητη είτε πρόκειται για σχεδιασμό νέου οδοστρώματος αλλά κυρίως για την δομική αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων.



Εικόνα 3.6: Κατανομή φορτίου (Leiva et al. 2017)

(γ) Φορτία κυκλοφορίας: Η καταπόνηση του οδοστρώματος οφείλεται στα φορτία των τροχών που διέρχονται από την επιφάνεια του. Ένα οδόστρωμα εξυπηρετεί πολλά οχήματα τα οποία ποικίλουν στον αριθμό και το μέγεθος των τροχών καθώς και στον αριθμό και τη διαμόρφωση των αξόνων (Εικόνα 3.7). Ανάλογα με το φορτίο του κάθε τροχού και την κατανομή του στους άξονες, προκύπτει και η καταστροφική του ικανότητα έναντι του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, τα βαρέα οχήματα είναι περισσότερο καταστρεπτικά σε σχέση με τα επιβατικά τα οποία προκαλούν αμελητέα καταπόνηση (Λοΐζος και Πλατή 2018).



Εικόνα 3.7: Συνδυασμοί τροχών και αξόνων (Mahoney 1984)

Επίσης σημαντική είναι και η απόσταση μεταξύ των τροχών, διότι στην περίπτωση που αυτή είναι μικρή, οι περιοχές επιρροής τους επικαλύπτουν η μία την άλλη και τότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επίδραση των φορτίων.

(δ) Εργαλεία ανάλυσης: Τέλος, καθοριστική είναι και η επίδραση των θεωριών και εργαλείων ανάλυσης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, καθώς οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η ανάπτυξη των επιμέρους λογισμικών ενδέχεται να διαφοροποιούνται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εντατική κατάσταση εμφανίζει σημαντικές διαφορές όταν τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ελαστικά με την περίπτωση όπου η ασφαλική στρώση θεωρείται ιξωδοελαστική. Ακόμη και στην περίπτωση της ιξωδοελαστικής ανάλυσης διαφορές στα εντατικά μεγέθη παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται τα διαφορετικά ρεολογικά μοντέλα που υπάρχουν για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των ιξωδοελαστικών υλικών (Nilson et al. 2002, Meljun et al. 2017). Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχει αναφερθεί ότι η επίδραση του ρεολογικού μοντέλου στην απόκριση του οδοστρώματος είναι σημαντικότερη όσο αφορά τις παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων από ότι για τις επιφανειακές υποχωρήσεις του οδοστρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Meljun et al. 2017). Το στοιχείο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου ότι οι παραμορφώσεις των ασφαλικών στρώσεων αποτελούν αφενός κριτήριο σχεδιασμού οδοστρωμάτων αλλά και κριτήριο για την αξιολόγηση ενίσχυσης ή επανασχεδιασμού υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

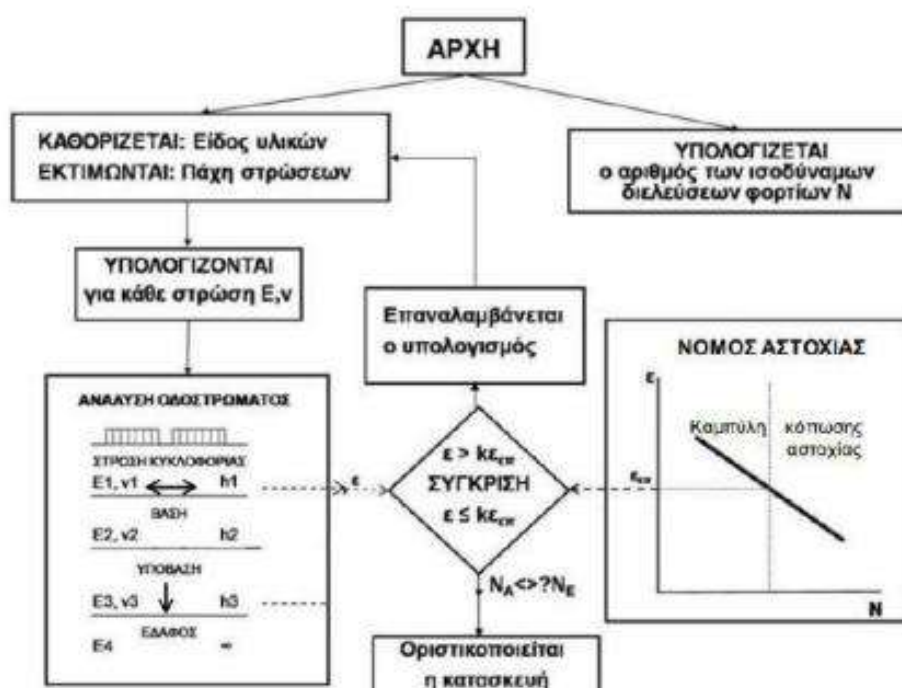
3.4 Η σημασία των εντατικών αναλύσεων για το σχεδιασμό και την ανάλυση

3.4.1 Σχεδιασμός νέων οδοστρωμάτων

Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των υλικών και του πάχους των επιμέρους στρώσεων του για δεδομένες συνθήκες κυκλοφορίας και διάρκεια ζωής. Η διαστασιολόγηση γίνεται με σκοπό οι στρώσεις να παρέχουν σε αυτό επαρκή φέρουσα ικανότητα καθώς και να περιορίσουν την καταπόνησή του σε ανεκτά επίπεδα με βάση τις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης. Παρά το γεγονός ότι ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος γινόταν τις προηγούμενες δεκαετίες εμπειρικά, έχει

αναπτυχθεί μια μηχανιστική αντίληψη για το σχεδιασμό των σύγχρονων οδοστρωμάτων, όπου δίδεται έμφαση στην εντατική κατάσταση που επικρατεί εντός της δομής του οδοστρώματος και η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με αναλυτικές μεθόδους για διάφορες περιβαλλοντικές και κυκλοφοριακές συνθήκες καθώς και ιδιότητες υλικών.

Βασικό βήμα στις αναλυτικές μεθόδους είναι ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος. Για τα ασφαλικά οδοστρώματα, οι θέσεις αυτές εντοπίζονται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη τροφοδοτούν τους νόμους κόπωσης ασφαλτομιγμάτων και αστοχίας της στρώσης έδρασης λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην συνέχεια συγκρίνονται με τα μέγιστα επιτρεπόμενα μεγέθη με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιλεγούν τα κατάλληλα υλικά και πάχη ώστε η καταπόνηση να μην υπερβεί τα επιτρεπτά όρια για την περίοδο σχεδιασμού (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Αναλυτικός υπολογισμός εύκαμπτου οδοστρώματος σε κόπωση της ασφαλτικής στρώσης (Λοΐζος και Πλατή 2018)

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων αποτελεί μια τεχνοοικονομική διαδικασία, και ως εκ τούτου, ο ακριβής προσδιορισμός της εντατικής τους κατάστασης συμβάλλει στην επιλογή καταλληλότερων υλικών και παχών ώστε να αποφεύγονται αντιστοιχοοικονομικές λύσεις.

3.4.2 Αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων

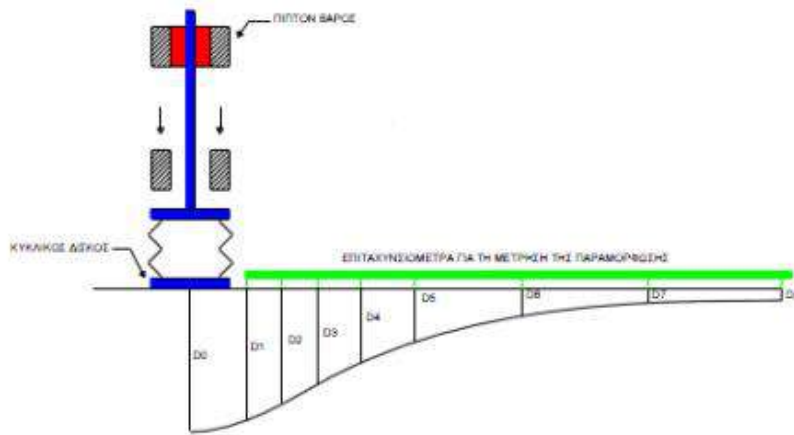
Πέρα από τον σχεδιασμό, η σημασία διενέργειας εντατικών αναλύσεων αναδεικνύεται και για την περίπτωση της δομικής αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησής τους. Μάλιστα σε αυτήν την περίπτωση, η γνώση των επιμέρους πληροφοριών που απαιτούνται για την εντατική ανάλυση (δηλαδή πάχη, χαρακτηριστικά υλικών, συνθήκες φόρτισης) είναι περισσότερο επιτακτική, εφόσον πρόκειται για μετρήσιμα μεγέθη και όχι για θεωρητικά.

Κατά συνέπεια, για να προκύψει γνώση των παραπάνω πληροφοριών, απαιτείται έλεγχος του οδοστρώματος επιτόπου. Η συνηθέστερη περίπτωση δομικής αξιολόγησης που εφαρμόζεται διεθνώς είναι η χρήση καταστρεπτικών δοκιμών (π.χ. πυρηνοληψίας) καθώς και μη καταστρεπτικών συστημάτων (Non-Destructive Testing) για τη συλλογή στοιχείων απόκρισης του οδοστρώματος.

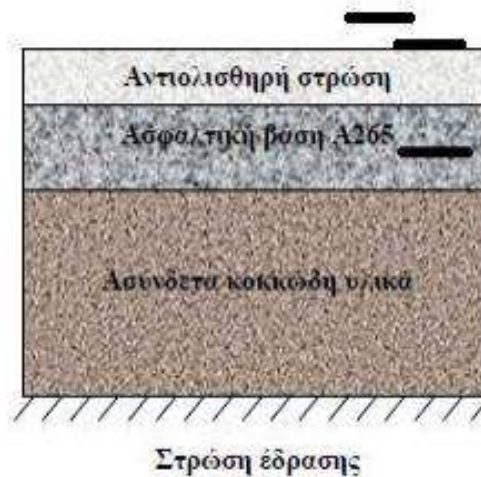
Η λήψη πυρήνων χρησιμεύει για τον προσδιορισμό του πάχους των ασφαλικών στρώσεων (εναλλακτικά η στρωματογραφία του οδοστρώματος προκύπτει μέσω γεωφυσικών μεθόδων, π.χ. γεωραντάρ), ενώ δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω εργαστηριακούς ελέγχους επί των πυρήνων προκειμένου να προσδιοριστούν θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Από την άλλη πλευρά, στο πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD), το οποίο μετράει τις ελαστικές υποχωρήσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος ως απόκριση στην επιβολή ενός παλμικού φορτίου το οποίο προσομοιώνει το φορτίο ενός κινούμενου τροχού (Εικόνα 3.9). Παράλληλα, πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς και της θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό των ασφαλικών στρώσεων, συγκεκριμένα στο μέσον της ασφαλικής

βάσης (Εικόνα 3.10) μέσω ειδικής οπής που διανοίγεται στο οδόστρωμα (Λοΐζος και Πλατή 2018).



Εικόνα 3.9: Σύστημα Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD)



Εικόνα 3.10: Σημεία μέτρηση θερμοκρασιών δοκιμής FWD

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

3.4.2.1 Περιορισμοί

Η μέθοδος που περιγράφηκε προηγουμένως, βασίζεται στην παραδοχή για γραμμικά ελαστικά υλικά. Για να υιοθετηθεί η ιξωδοελαστική θεώρηση συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος στην περίπτωση αξιολόγησης οδοστρωμάτων, απαιτείται ο προσδιορισμός του επιτόπου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^* των ασφαλικών στρώσεων. Ωστόσο, σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, είναι γνωστό ότι το E^* προσδιορίζεται στο εργαστήριο. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη η λήψη πυρήνων. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα, καταστρεπτική για το οδόστρωμα και επιπλέον απαιτεί τη διακοπή της κυκλοφορίας, κάτι το οποίο δεν είναι ούτε επιθυμητό αλλά ούτε και πρακτικό για υπάρχοντα οδοστρώματα σε λειτουργία.

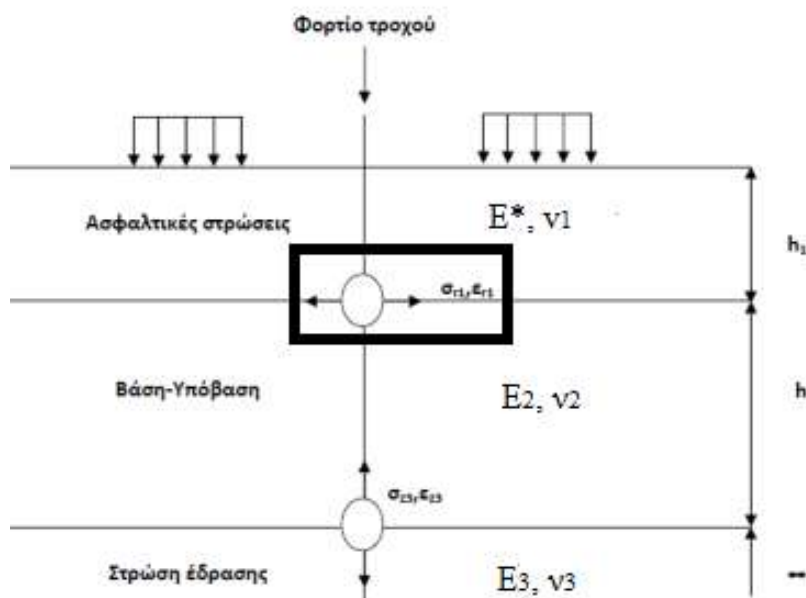
Επιπλέον, όπως είναι γνωστό, η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος μεταβάλλεται με φθίνουσα πορεία στη διάρκεια του χρόνου εξαιτίας της συνδυαστικής επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών και της επαναλαμβανόμενης φόρτισης λόγω αξονικών φορτίων. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η δομική αξιολόγηση του οδοστρώματος σε διάφορα στάδια της ζωής του με σκοπό ο μηχανικός οδοστρωμάτων να μπορεί να προγραμματίσει την ανάγκη ενίσχυσης ή επανασχεδιασμού του υφιστάμενου οδοστρώματος.

Άλλωστε, σκοπός της διαχείρισης και συντήρησης του οδοστρώματος είναι να διασφαλιστεί για την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος ένα αποδεκτό επίπεδο άνεσης και ασφάλειας, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της συστηματικής παρακολούθησης της δομικής και της λειτουργικής του κατάστασης. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, η οποία για λόγους πληρότητας και εξασφάλισης συνοχής στη διαδικασία της δομικής αξιολόγησης, πρέπει να είναι ενημερωμένη για την κατάσταση του οδοστρώματος ήδη αμέσως μετά τη κατασκευή του, όπου αυτό βρίσκεται σε άριστη κατάσταση.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω προκλήσεις και περιορισμούς γίνεται αντιληπτό, ότι ο μηχανικός οδοστρωμάτων οφείλει να συνδυάσει τις πληροφορίες που παίρνει χρησιμοποιώντας διαφορετικά συστήματα και θεωρίες ανάλυσης προκειμένου να μπορεί να οδηγηθεί σε μια ρεαλιστικότερη εκτίμηση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος με βιώσιμο τρόπο.

4. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της επίδρασης της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος στην εντατική κατάσταση των ασφαλικών οδοστρώματων. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για μια τυπική διατομή ενός ασφαλικού οδοστρώματος (Εικόνα 4.1), και η έμφαση της ανάλυσης δίνεται στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στο πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν σχετίζονται τόσο με την φύση του ασφαλτομίγματος, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό των ασφαλικών στρώσεων (T), συγκεκριμένα στο μέσο της ασφαλικής βάσης, και της ταχύτητας φόρτισης (V), όσο και με το σύνολο της διατομής δηλαδή το πάχος ασφαλικών στρώσεων (h_1), το πάχος της βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα (h_2), το μέτρο ελαστικότητας της βάσης (E_2) και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης (E_3).



Εικόνα 4.1: Διατομή αναφοράς

4.1 Αναλύσεις

Συγκεντρωτικά οι εντατικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι:

- **Ελαστικές αναλύσεις:** Πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά κάποιες ελαστικές αναλύσεις για σύγκριση με τις ιξωδοελαστικές προκειμένου να παρατηρηθούν τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των δυο ειδών αναλύσεων. Οι τιμές των παραμέτρων που θεωρήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τιμές παραμέτρων ελαστικών αναλύσεων

Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (cm)	10,14,1,18	10,14,1,18
Πάχος στρώσης βάσης (cm)	20,30,40	20,30,40
Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικών (MPa)	9500	2000
Μέτρο ελαστικότητας βάσης/ στρώσης έδρασης (MPa)	300/80,500/200	300/80,500/200
Θερμοκρασία (°C)	20	40
Ταχύτητα (Km/h)	80	80

- **Ιξωδοελαστικές αναλύσεις:** Η εμβάθυνση στην ιξωδοελαστική ανάλυση έγινε συνολικά μέσω 192 αναλύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των παραμέτρων που φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Τιμές παραμέτρων ιξωδοελαστικών αναλύσεων

Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (cm)	10, 14,1, 18
Πάχος στρώσης βάσης (cm)	20, 30, 40
Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος E* (MPa)	Βλ. Κεφάλαιο 4.3
Μέτρο ελαστικότητας βάσης (MPa)	300, 500
Μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (MPa)	80, 200
Θερμοκρασία (°C)	10, 20, 30 ,40
Ταχύτητα (Km/h)	50, 80, 110

Από τις αναλύσεις αυτές επιλέχθηκαν ενδεικτικά ορισμένοι συνδυασμοί παχών και υλικών προκειμένου αυτοί να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα οδών, από οδούς χαμηλής κυκλοφορίας (όπου τα αναμενόμενα πάχη ασφαλτικών στρώσεων είναι σχετικά μικρά) έως οδούς υψηλής κυκλοφορίας (όπου τα αναμενόμενα πάχη ασφαλτικών στρώσεων είναι σχετικά μεγάλα). Η κατηγοριοποίηση των οδών απλοποιητικά περιλαμβάνει οδούς χαμηλής κυκλοφορίας (low volume), ενδιάμεσης κυκλοφορίας (intemediate volume) και υψηλής κυκλοφορίας (high volume). Επισημαίνεται ότι ο διαχωρισμός αυτός γίνεται κανονικά έχοντας ως δεδομένο κυκλοφοριακά στοιχεία, ωστόσο σε θεωρητικό επίπεδο στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε η παραδοχή συνδυασμού των παχών και των χαρακτηριστικών των υλικών του Πίνακα 4.3 για τις ανάγκες διαχωρισμού στις επιμέρους κατηγορίες των οδών.

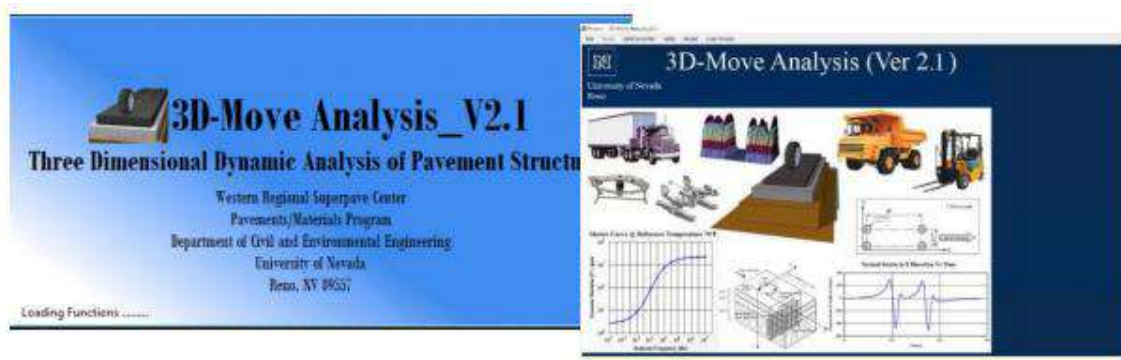
Πίνακα 4.3: Διατομές κατηγοριών οδών

	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (cm)	Πάχος στρώσης βάσης (cm)	Μέτρο ελαστικότητας βάσης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (MPa)
Χαμηλής κυκλοφορίας	10	20	300	80
	10	30	300	80
	10	30	500	200
	14.1	20	300	80
Ενδιάμεσης κυκλοφορίας	14.1	20	500	200
	14.1	30	300	80
	14.1	30	500	200
	14.1	40	300	80
Υψηλής κυκλοφορίας	14.1	40	500	200
	18	30	300	80
	18	30	500	200
	18	40	500	200

Επισημαίνεται ότι οι προαναφερθείσες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για το τυπικό αξονικό φορτίο (επί διπλών τροχών). Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση θεώρησης αξονικών φορτίων επί απλών τροχών, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληπτικές παραμετρικές αναλύσεις (ελαστικές και ιξωδοελαστικές) για τις τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 για διάταξη φόρτισης με τον απλό τροχό. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό δυναμικής ανάλυσης “3D-Move Analysis”, το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

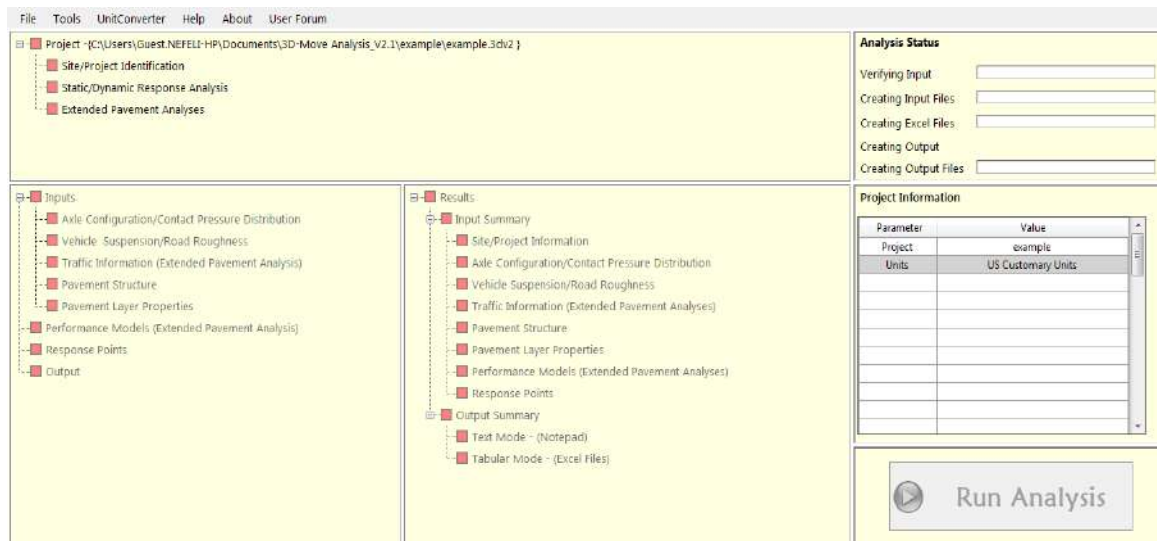
4.2 Λογισμικό "3D Move Analysis"

Το πανεπιστήμιο της Νεβάδα το 2007 στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος δημιούργησε το λογισμικό "3D Move Analysis" το οποίο χρησιμεύει στην πρόβλεψη της απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. 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 (Siddharthan 2000). Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες επίδρασης στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος, όπως η ταχύτητα κυκλοφορίας και η 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 περιγράφηκαν παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του.



Εικόνα 4.2: Αρχικά παράθυρα του "3D Move Analysis"

Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω ενός κεντρικού παράθυρου διαλόγου από το οποίο τοποθετούνται βήμα-βήμα οι παράμετροι της (Εικόνα 4.3).



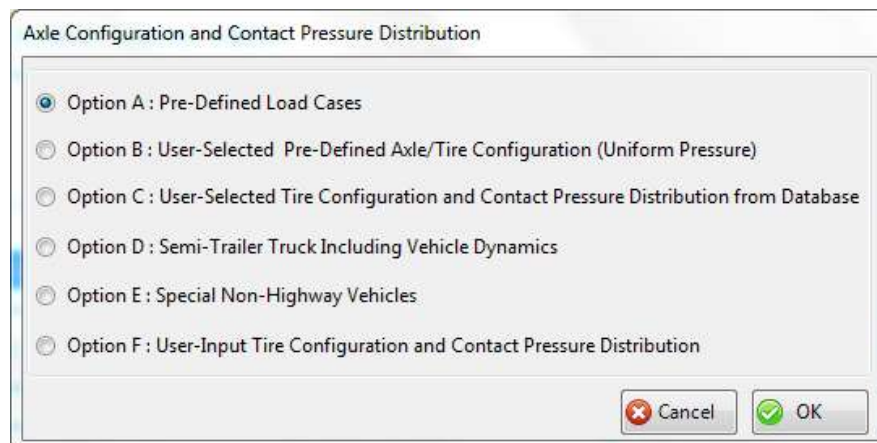
Εικόνα 4.3: Κεντρικό παράθυρο του "3D Move Analysis"

Αρχικά επιλέγεται το σύστημα μονάδων των δεδομένων εισαγωγής καθώς το πρόγραμμα παρέχει δύο επιλογές:

- US Customary Units όπου οι μονάδες μέτρησης είναι in, lb , °F , mph
- SI Units όπου οι μονάδες μέτρησης θα είναι m, kN, °C, km/h

Στη συνέχεια επιλέγεται το είδος της ανάλυσης καθώς το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα στατικής, η οποία επιλέγεται στα πλαίσια των ελαστικών αναλύσεων και δυναμικής ανάλυσης η οποία επιλέγεται στα πλαίσια των ιξωδοελαστικών αναλύσεων.

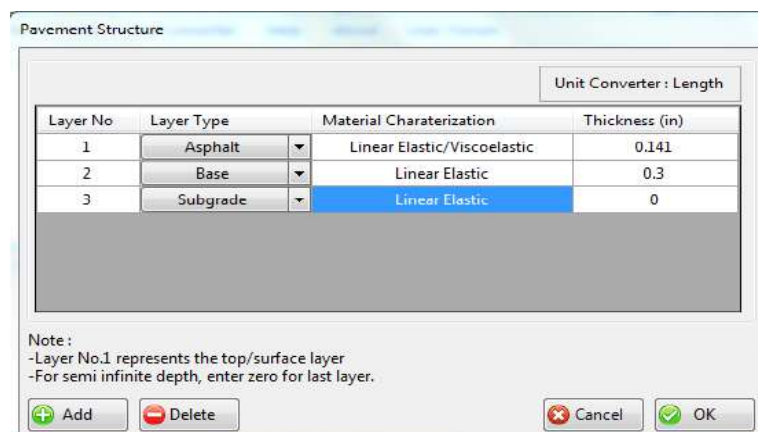
Έπειτα προσδιορίζονται οι συνθήκες φόρτισης (Εικόνα 4.4). Για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας επιλέγεται ομοιόμορφη κυκλική επιφάνεια κατανομή πίεσης ελαστικού.



Εικόνα 4.4: Παράθυρο επιλογής περίπτωση φόρτισης

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. Ενώ στην περίπτωση του αξονικού φορτίου 8 ton επί απλών τροχών ακτίνας 15 cm η πίεση τροχού ισούται με 566 kPa και το φορτίο του τροχού με 40 kN.

Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του πάχους των επιμέρους στρώσεων και ο καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών τους (Εικόνα 4.5 και 4.6). Σε όλες τις αναλύσεις η διατομή αποτελείται από τρεις στρώσεις, την ασφαλική στρώση, την ενοποιημένη στρώση βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα και την στρώση έδρασης. Η ασφαλική στρώση μπορεί να χαρακτηριστεί είτε από ελαστική είτε από ιξωδοελαστική συμπεριφορά ενώ οι υπόλοιπες στρώσεις θεωρείται ότι χαρακτηρίζονται από ελαστική συμπεριφορά.



Εικόνα 4.5: Παράθυρο εισαγωγής στρώσεων του οδοστρώματος

Pavement Layer Properties - Layer 2

Layer 2 Thickness: 0.3 in

Material

Standard Material Type: A-1-a
Range of E value is between 38500 - 42000.
Typical Value of E is 40000

☒ Elastic Modulus, E: 40000 psi

☐ CBR:

☐ R Value:

Poisson's Ratio: 0.35

Damping Ratio: 5 %

Unit Weight: 21 lb/in³

Depth to Ground Water Table (Measured from the pavement surface): in

Depth to Bed Rock (Measured from the last layer surface): in

Εικόνα 4.6: Παράθυρο εισαγωγής μηχανικών χαρακτηριστικών στρώσης βάσης-υπόβασης και στρώσης έδρασης

Ο λόγος Poisson θεωρείται σταθερός για όλες τις αναλύσεις και ίσος με 0.35 για όλες τις στρώσεις.

Στην περίπτωση που η ασφαλτική στρώση θεωρείται ότι χαρακτηρίζεται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά, απαιτείται η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης η οποία προκύπτει από δεδομένα εργαστηριακού προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης (Εξίσωση 2.7), η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Η καμπύλη κατασκευάζεται για θερμοκρασία αναφοράς που προσδιορίζεται από τον αναλυτή (Εικόνα 4.7). Για τη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Εργαστήριο Οδοποιίας-Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3 και η θερμοκρασία αναφοράς επιλέχθηκε ίση με 25°C.

Pavement Layer Properties - Layer 1

Material Type

- Linear Elastic Materials
- Viscoelastic Materials
 - Laboratory Data
 - Symmetrical Sigmoidal Function
 - Non-Symmetrical Sigmoidal Function
 - Symmetrical Sigmoidal Function (AMPT)
 - User Input (Interpolation)
 - Model Equation

Layer Thickness: 0.08 m

Symmetrical Sigmoidal Function (MEPDG)

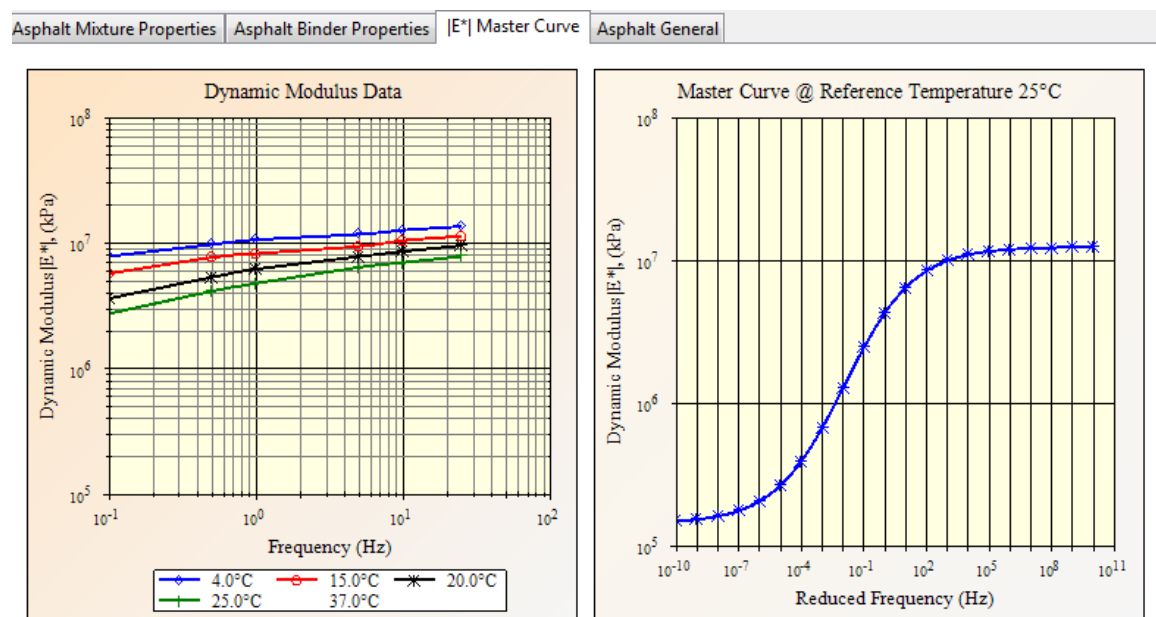
$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\log(\tau) - c(\log(\tau) - \log(\tau_r))]}}$$

Asphalt Mixture Properties | Asphalt Binder Properties | **[E*] Master Curve** | Asphalt General

Dynamic Modulus [E*] | Damping Ratio and Poisson's Ratio

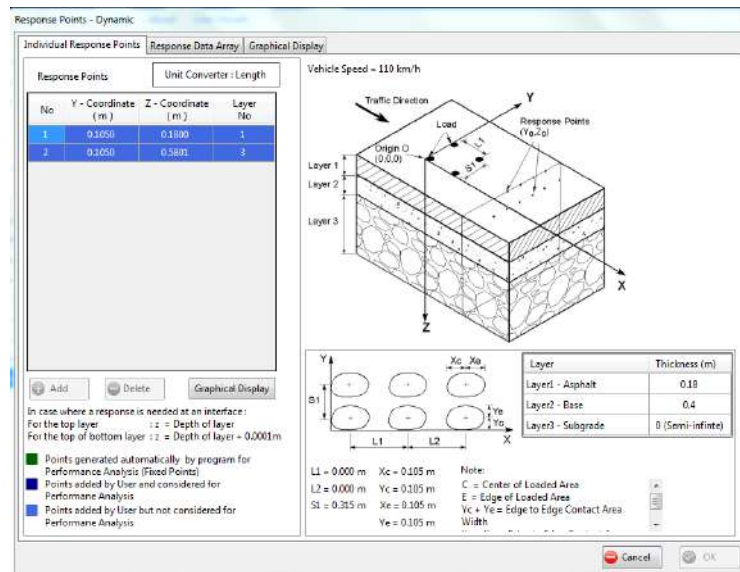
No of Temperatures: 5 | No of Frequencies: 6 | Reference Temperature: 25 °C

Temperature (°C)	Dynamic Modulus [E*] (kPa)					
	0.1 Hz	0.5 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz	25 Hz
4	7881000	9805000	10666000	11822000	12731000	13651000
15	5760000	7721000	8289000	9477000	10543000	11411000
20	3649000	5377000	6233000	7847000	8652000	9620000
25	2765000	4161000	4808000	6447000	7038000	7900000
37	685000	1052000	1315000	2145000	2289000	2617000



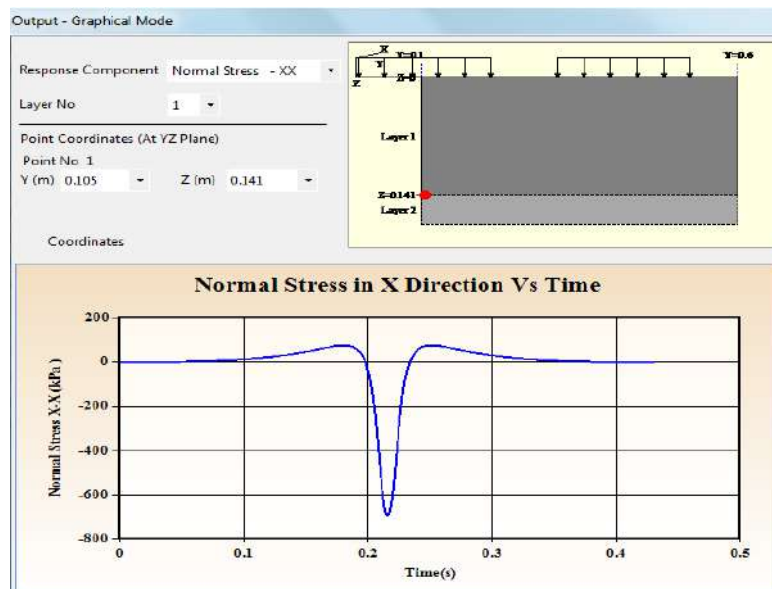
Εικόνα 4.7: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το ασφαλτόμιγμα (πάνω) και παράθυρο δημιουργίας κεντρικής καμπύλης (κάτω)

Τελευταίο βήμα πριν την πραγματοποίηση της εντατικής ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των σημείων της διατομής του οδοστρώματος για τα οποία είναι επιθυμητός ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Παράθυρο προσδιορισμού σημείων απόκρισης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα σημεία απόκρισης είναι ίδια για όλες τις αναλύσεις και αντιστοιχούν όπως προαναφέρθηκε σε μία εκ των δυο κρίσιμων θέσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος δηλαδή στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων.



Εικόνα 4.9: Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων

Μετά το τέλος της ανάλυσης το λογισμικό δημιουργεί φακέλους με τα αποτελέσματα των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων σε μορφή κειμένου αλλά και σε γραφική μορφή (Εικόνα 4.9).

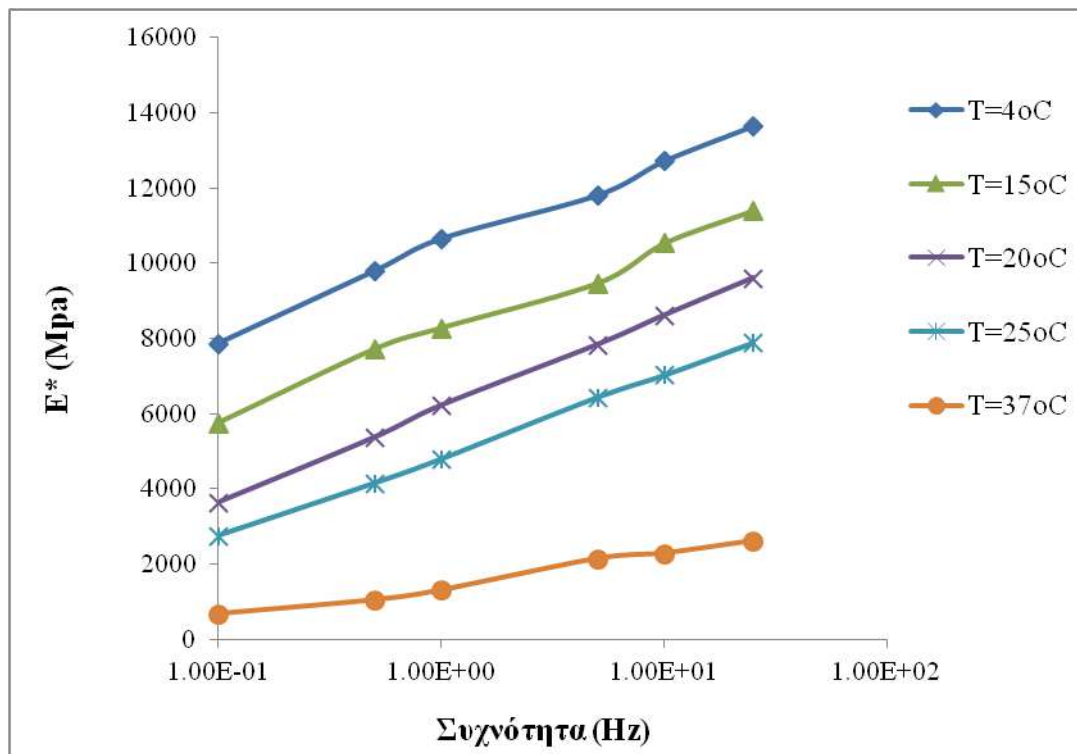
4.3 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας πειραματικού ασφαλτομίγματος

Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης, αξιοποιήθηκαν εργαστηριακά μετρημένες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε πυρήνα ασφαλτομίγματος που λήφθηκε στο πεδίο από πειραματικό οδόστρωμα κατά την χρονική στιγμή "μηδέν", δηλαδή αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής. Τα στοιχεία του E^* αντλήθηκαν από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας-Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Εργαστηριακά δεδομένα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

E^* Ασφαλτομίγματος (MPa)						
Θερμοκρασία (°C)	0.1Hz	0.5Hz	1Hz	5Hz	10Hz	25Hz
4	7881	9806	10666	11822	12731	13661
15	5760	7721	8289	9477	10543	11411
20	3649	5377	6233	7847	8632	9620
25	2765	4161	4808	6447	7038	7900
37	685	1053	1315	2145	2289	2617

Αρχικά παρουσιάζονται διαγραμματικά, στην Εικόνα 4.10, οι εργαστηριακά μετρημένες τιμές του E^* για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί σημαντική μείωση της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Το ίδιο συμβαίνει και με την μείωση της συχνότητας δηλαδή την αύξηση του χρόνου φόρτισης γεγονός που δείχνει την αρνητική επίδραση του χρόνου φόρτισης στην ασφαλική στρώση.



Εικόνα 4.10: Μέτρο δυσκαμψίας συναρτήσει συχνότητας και θερμοκρασίας

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τη σιγμοειδή συνάρτηση που περιγράφηκε στο 2^ο Κεφάλαιο κατασκευάστηκε η κεντρική καμπύλη (Εικόνα 4.11), ως μια πρώτη επεξεργασία των δεδομένων. Προκειμένου να γίνει η προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε μια ενιαία καμπύλη, για θερμοκρασία αναφοράς που επιλέγεται ίση με 25°C, απαιτείται ο υπολογισμός των συντελεστών του παράγοντα μετατόπισης (Εξίσωση 4.1) καθώς και των συντελεστών σιγμοειδούς συνάρτησης (Εξίσωση 4.2).

$$\log a(T) = A \cdot T^2 + B \cdot T + C \quad (4.1)$$

όπου T η εκάστοτε θερμοκρασία (°F)

$$\text{Log}(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma(\log f_r)}} \quad (4.2)$$

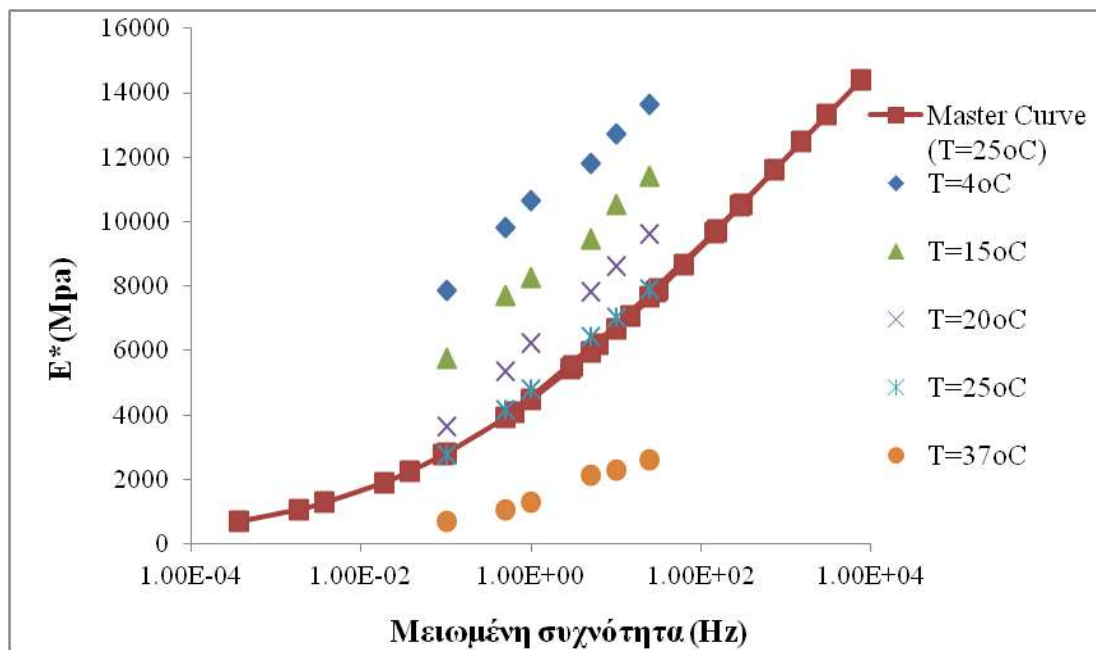
όπου $\log f_r = \log a(T) + \log f$, η μειωμένη συχνότητα (Hz)

Ο υπολογισμός των 7 συντελεστών (A,B,C,α,β,γ,δ) πραγματοποιείται ταυτόχρονα μέσω του εργαλείου solver του Excel το οποίο πραγματοποιεί μη γραμμική παλινδρόμηση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ώστε οι τιμές του E* που υπολογίζονται μέσω του μαθηματικού μοντέλου (Εξίσωση 4.2) να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από τις εργαστηριακά μετρημένες. Οι συντελεστές που

υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 ενώ η κεντρική καμπύλη φαίνεται στην Εικόνα 4.11.

Πίνακας 4.5: Συντελεστές κεντρικής καμπύλης

Παράγοντας μετατόπισης			Σιγμοειδής συνάρτηση			
A	B	C	α	β	γ	δ
0.0008	0.02614	2.66851	3.48667	1.2208	0.30612	0.12106

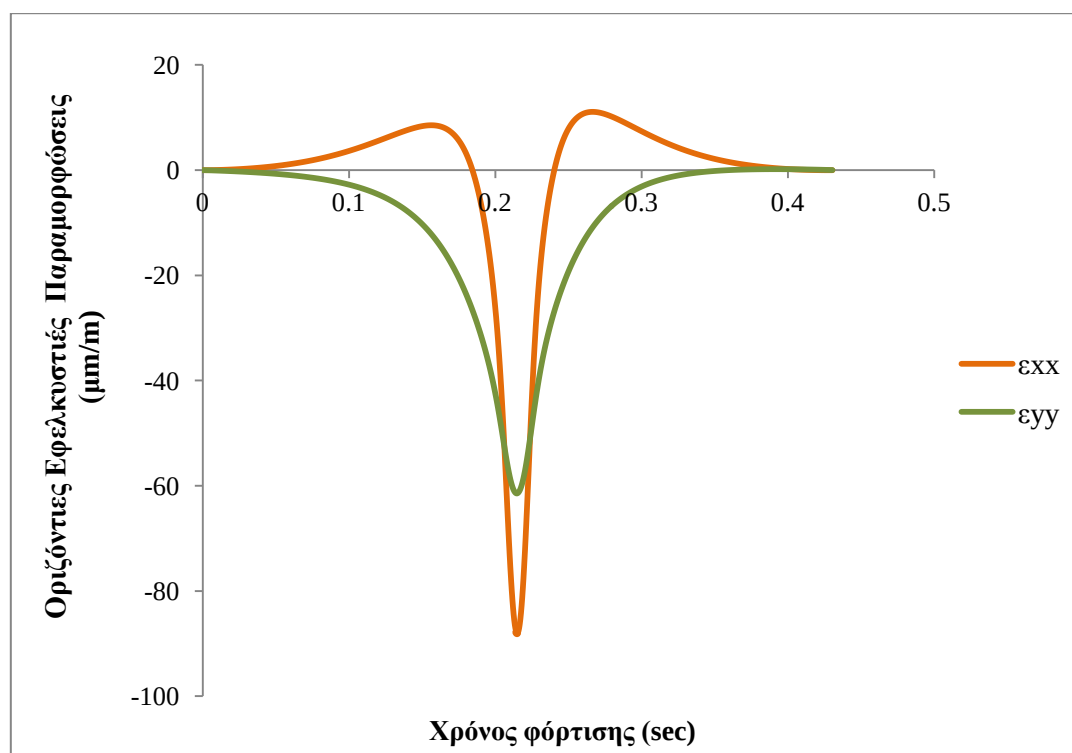


Εικόνα 4.11: Κεντρική καμπύλη ασφαλτομίγματος

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 Γενική Περιγραφή

Υπενθυμίζεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι παραμετρικές αναλύσεις επικεντρώθηκαν στις μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων καθώς αυτό είναι το κρίσιμο εντατικό μέγεθος που σχετίζεται με την απόκριση του ασφαλτομίγματος, κι ως εκ τούτου αναμένεται να επηρεάζεται από την χρήση της ιξωδοελαστικής ανάλυσης. Για τον προσδιορισμό των μέγιστων παραμορφώσεων, αναπτύσσονται αρχικά τα διαγράμματα των οριζόντιων παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου φόρτισης για τη θέση που αντιστοιχεί στο κέντρο του τροχού, καθώς αποτελεί την δυσμενέστερη θέση. Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ των εφελκυστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά την διαμήκη και εγκάρσια έννοια, όπως έχουν προκύψει από μία ιξωδοελαστική ανάλυση.



Εικόνα 5.1: Τυπική κατανομή οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (κέντρο του τροχού)

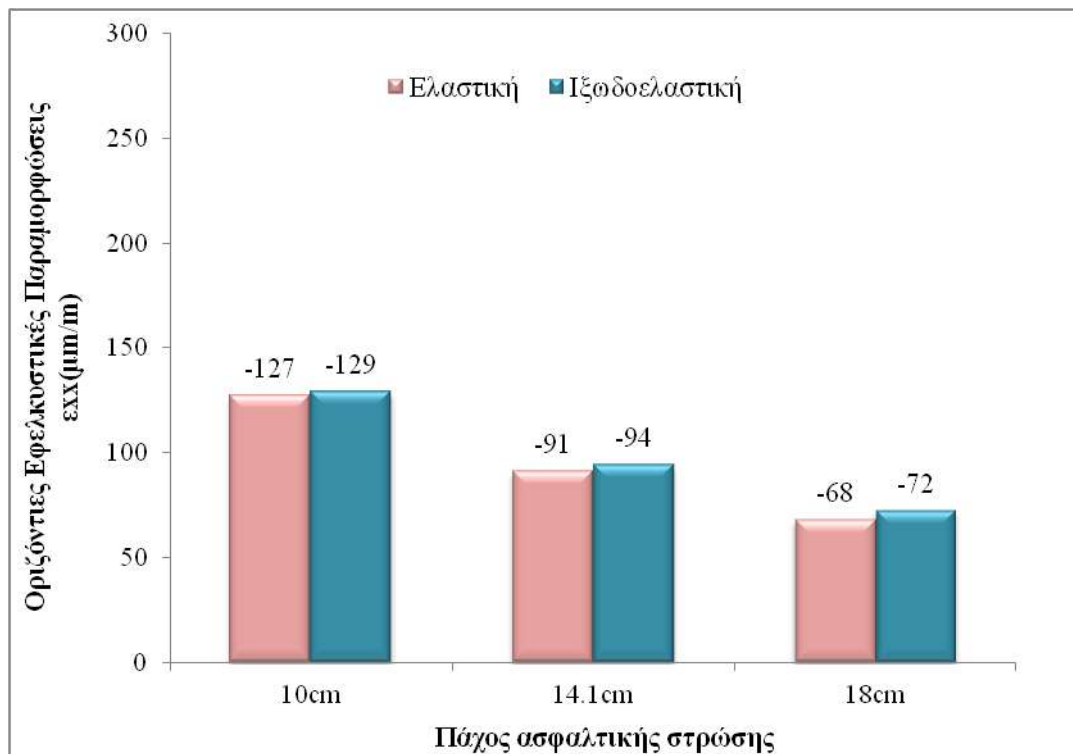
Το πρόγραμμα "3D Move Analysis" με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις ακολουθεί σύμβαση πρόσημων σύμφωνα με την οποία οι εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι αρνητικές ενώ οι θλιπτικές θετικές. Παρατηρείται ότι κατά την διαμήκη διεύθυνση (xx) εμφανίζεται εναλλαγή πρόσημου λίγο πριν και λίγο μετά την διέλευση του φορτίου. Η εγκάρσια διεύθυνση (yy) εμφανίζει μόνο εφελκυστικές παραμορφώσεις. Στο σύνολο των αναλύσεων παρατηρείται ότι οι διαμήκεις παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από τις εγκάρσιες με το λόγο μεταξύ τους να έχει μια μέση τιμή ίση με 1.4. Ο λόγος αυτός παρουσιάζει ένα συντελεστή διασποράς ίσο με 3.4% επομένως προκύπτει ότι η μέση τιμή είναι ενδεικτική για το σύνολο των αναλύσεων.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων ακολουθώντας τους επιμέρους στόχους της διπλωματικής εργασίας, όπως αυτοί διατυπώθηκαν στο εισαγωγικό κεφάλαιο.

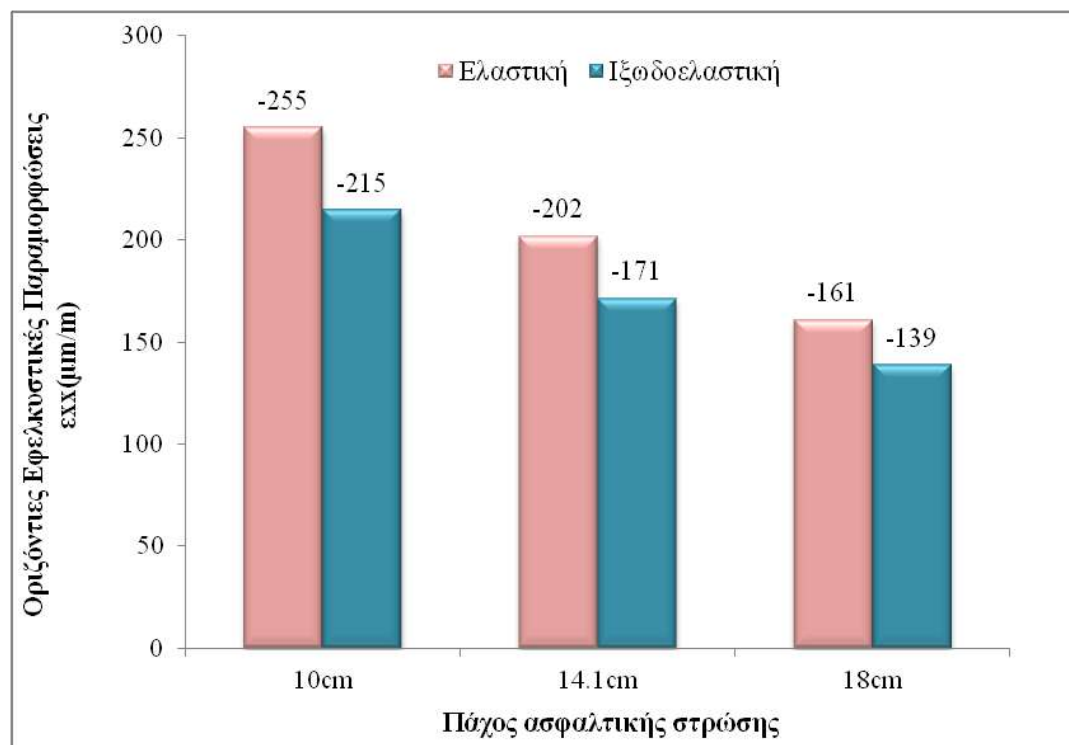
5.2 Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης

Αρχικά, πραγματοποιείται μια προκαταρκτική σύγκριση των δύο θεωρήσεων για ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων. Τα δύο διαφορετικά είδη ανάλυσης, ελαστική και ιξωδοελαστική, καθώς αντιμετωπίζουν διαφορετικά την συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων είναι λογικό να έχουν κάποια επίδραση στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος. Οι παραμετρικές αναλύσεις του Πίνακα 4.1 έγιναν και για τις δύο θεωρήσεις και στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικά σύνολα παραμορφώσεων για τις δύο θερμοκρασίες $T=20^{\circ}\text{C}$ και $T=40^{\circ}\text{C}$ και για πάχη ασφαλικών στρώσεων ίσα με 10, 14.1 και 18 cm (Εικόνες 5.2 και 5.3).

Για τη θερμοκρασία των 20°C (Εικόνα 5.2), τα δύο είδη αναλύσεων οδηγούν σε παραμορφώσεις με μικρές σχετικά διαφορές, με την ιξωδοελαστική θεώρηση να εμφανίζεται δυσμενέστερη. Μάλιστα, η μέγιστη διαφορά στις παραμορφώσεις βρέθηκε ίση με $4 \mu\text{m/m}$ για το μεγαλύτερο πάχος ασφαλικών στρώσεων που εξετάστηκε.



Εικόνα 5.2: Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης
(T=20°C , h2=30 cm, E2=300 Mpa, E3=80 Mpa, V=80 Km/h)



Εικόνα 5.3: Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης
(T=40°C , h2=30 cm, E2=300 Mpa, E3=80 Mpa, V=80 Km/h)

Για τη θερμοκρασία των 40°C (Εικόνα 5.3), οι διαφορές μεταξύ των υπολογιζόμενων παραμορφώσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες με την μέγιστη να φτάνει τα 40 $\mu\text{m/m}$, αυτήν την φορά για το μικρότερο πάχος ασφαλικών στρώσεων. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή (της θερμοκρασίας των 40°C), η ελαστική θεώρηση είναι αυτή που οδηγεί στις μεγαλύτερες παραμορφώσεις, γεγονός που ενδεχομένως να οφείλεται στην παραδοχή της στατικής φόρτισης η οποία είναι λογικό να προκαλεί μεγαλύτερη καταπόνηση στο οδόστρωμα.

Στο σύνολο των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι για θερμοκρασία των 20°C η μετάβαση από την ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση επιφέρει αύξηση των παραμορφώσεων έως 6%. Για θερμοκρασία των 40°C η μετάβαση από την ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση προκαλεί μείωση των παραμορφώσεων που κυμαίνεται από 14 έως 17%.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η στατιστική σημαντικότητα των διαφορών που εμφανίζουν οι παραμορφώσεις με βάση τις δύο θεωρήσεις για τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, εφαρμόστηκε ο στατιστικός έλεγχος t-test θεωρώντας ως μηδενική την υπόθεση ότι οι παρατηρούμενες διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Το κριτήριο αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης είναι η απόλυτη τιμή της στατιστικής συνάρτησης ελέγχου (t-statistic) να είναι μικρότερη από την τιμή της κατανομής (t-critical) για επίπεδο σημαντικότητας ίσο με 5%. Τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα t-test για διαφορές ελαστικής/ιξωδοελαστικής θεώρησης

Εξεταζόμενο μέγεθος	Πλήθος δείγματος	t-statistic	t-critical	Αποδοχή/Απόρριψη μηδενικής υπόθεσης
Παραμορφώσεις στους 20°C	11	3.6	2.2	Απόρριψη
Παραμορφώσεις στους 40°C	11	-11.3	2.2	Απόρριψη

Προκύπτει ότι και για τις δύο θερμοκρασίες (20°C και 40°C) οι διαφορές μεταξύ της ελαστικής και ιξωδοελαστικής θεώρησης για την συμπεριφορά των

ασφαλτομιγμάτων είναι στατιστικά σημαντικές, δηλαδή δεν είναι τυχαίες, γεγονός που υποδεικνύει την γενικότερη επίδραση των δύο θεωρήσεων στα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη.

Επισημαίνεται, ωστόσο ότι ακόμη και μικρές διαφορές στις παραμορφώσεις μπορούν εν δυνάμει να οδηγήσουν σε σημαντική διαφοροποίηση των επιτρεπομένων διελεύσεων αξονικών φορτίων, στοιχείο που συνδέεται άμεσα με την εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος σε μία πιο προχωρημένη ανάλυση με χρήση νόμων αστοχίας σε κόπωση. Λαμβάνοντας υπόψη το στοιχείο αυτό καθώς και τη διαφοροποίηση των δύο ειδών αναλύσεων στις μεγάλες θερμοκρασίες, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω εμβάθυνση στην επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στην εντατική απόκριση του οδοστρώματος.

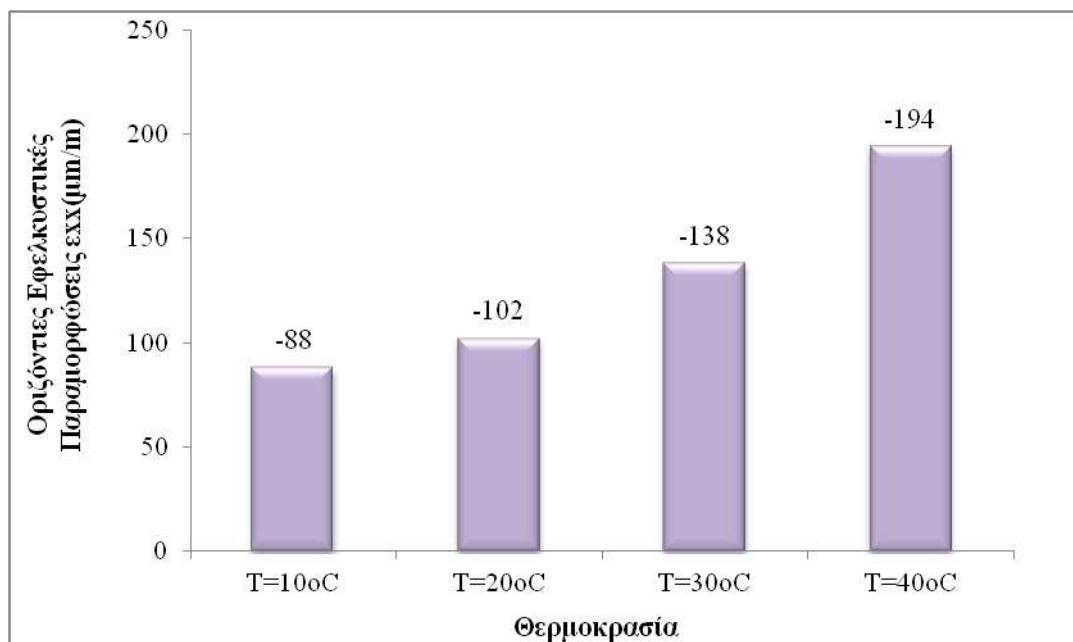
5.3 Παραμετρική διερεύνηση ιξωδοελαστικής ανάλυσης

Η σχετική εμβάθυνση πραγματοποιήθηκε μέσω παραμετρικών αναλύσεων βάσει του Πίνακα 4.2. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις, παρουσιάζοντας ενδεικτικά ορισμένες από αυτές, οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για το σύνολο των αναλύσεων. Παράλληλα γίνεται και σύντομος ποιοτικός σχολιασμός.

5.3.1. Επίδραση θερμοκρασίας

Ως γνωστόν η θερμοκρασία επηρεάζει την συμπεριφορά της ασφαλτικής στρώσης, η οποία συμπεριφέρεται ως ιξωδοελαστικό υλικό. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί την μείωση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων. Το στοιχείο αυτό επαληθεύτηκε από τις παραμετρικές αναλύσεις (Εικόνα 5.4).

Παρατηρείται στην Εικόνα 5.4 ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C, από τους 10°C μέχρι τους 40°C, οδήγησε σε αύξηση των οριζόντιων παραμορφώσεων κατά 16% (10-20°C), 35% (20-30°C) και 41% (30-40°C). Κατά συνέπεια, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι περισσότερο κυρίαρχη (όπως αναμενόταν) στις υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 5.4: Επίδραση θερμοκρασίας στις παραμορφώσεις του πυθμένα ασφαλτικών (h1=14.1 cm, h2=20 cm, E2=300 Mpa, E3=80 Mpa και V=50 Km/h)

Περαιτέρω, ελέγχθηκε η στατιστική σημαντικότητα (t-test) των διαφορών που εμφανίζουν τα ζεύγη παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες 10 και 20°C, 20 και 30°C, και τέλος 30 και 40°C, θεωρώντας ως μηδενική την υπόθεση ότι οι παρατηρούμενες διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Το κριτήριο αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης, όπως και προηγουμένως, είναι η απόλυτη τιμή της στατιστικής συνάρτησης ελέγχου (t-statistic) να είναι μικρότερη από την τιμή της κατανομής (t-critical) για επίπεδο σημαντικότητας ίσο με 5%. Τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

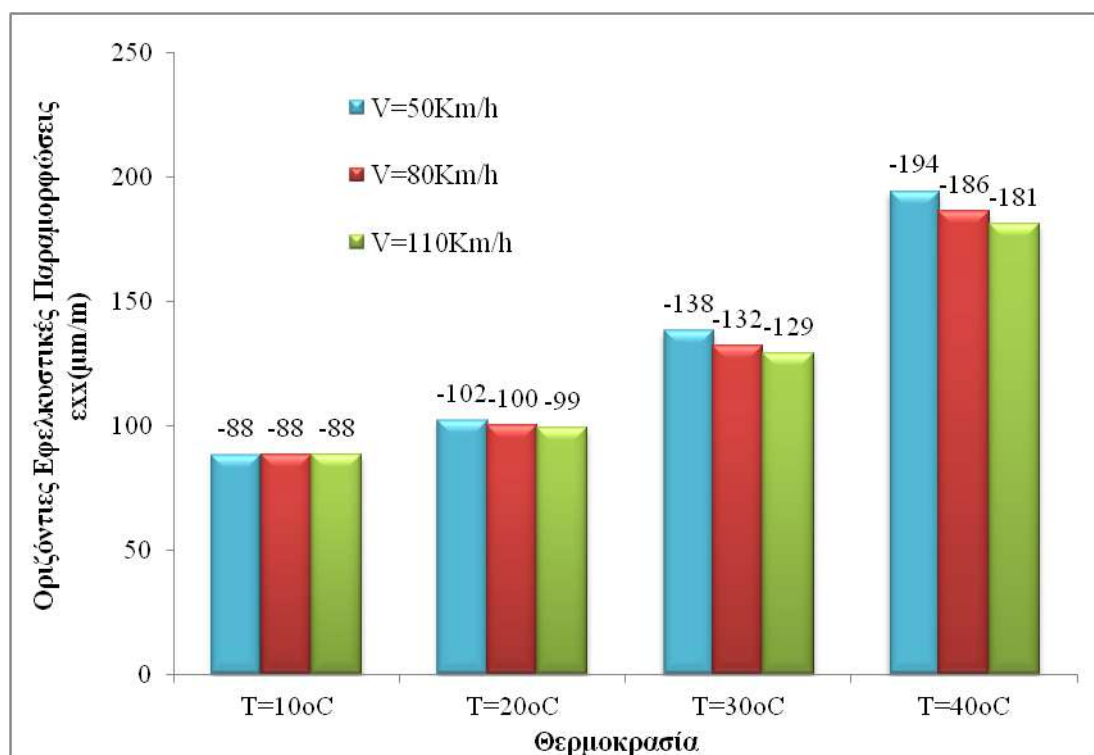
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα t-test για τις διαφορές θερμοκρασιών

Εξεταζόμενο μέγεθος	Πλήθος δείγματος	t-statistic	t-critical	Αποδοχή/Απόρριψη Μηδενικής υπόθεσης
Παραμορφώσεις στους 10 & 20°C	48	28.3	2	Απόρριψη
Παραμορφώσεις στους 20 & 30°C	48	27.6	2	Απόρριψη
Παραμορφώσεις στους 30 & 40°C	48	23.8	2	Απόρριψη

Δεδομένου, ότι σε κάθε περίπτωση οι διαφορές προέκυψαν στατιστικά σημαντικές αποφασίστηκε ο σχολιασμός της επίδρασης των υπόλοιπων παραγόντων να γίνει συνδυαστικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

5.3.2 Επίδραση ταχύτητας

Αναφορικά με την επίδραση της ταχύτητας, στην Εικόνα 5.5 παρατηρείται ότι για θερμοκρασία των 10°C, η επίδραση της ταχύτητας είναι μηδενική ενώ για θερμοκρασία από 20°C η επίδραση της αρχίζει να γίνεται εμφανής. Επίσης στην Εικόνα 5.5 φαίνεται ότι η επίδραση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.



Εικόνα 5.5: Επίδραση ταχύτητας στις παραμορφώσεις για τις διάφορες θερμοκρασίες ($h_1=14.1$ cm, $h_2=20$ cm, $E_2=300$ Mpa, $E_3=80$ Mpa)

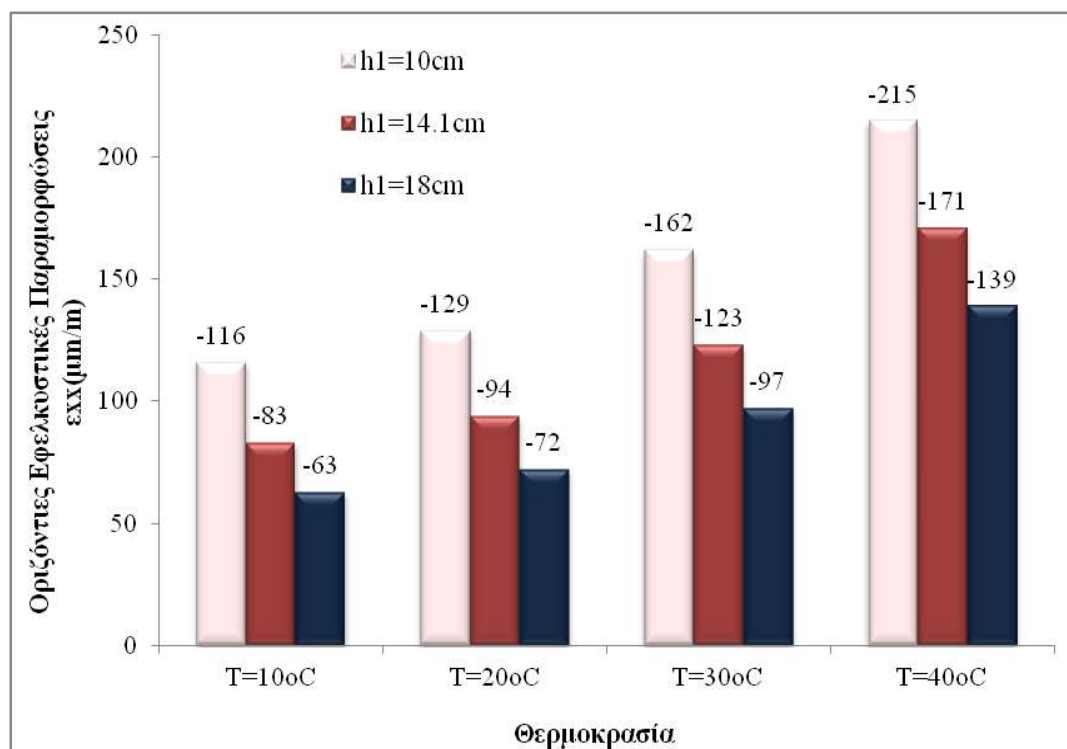
Συγκριτικά, η θερμοκρασία έχει αρκετά μεγαλύτερη επίδραση στις παραμορφώσεις από την ταχύτητα. Για παράδειγμα (Εικόνα 5.5), αυξάνοντας την θερμοκρασία από τους 10°C στους 40°C προκαλείται μεταβολή στις παραμορφώσεις έως και 106 μm/m ενώ η μέγιστη μεταβολή που προκαλείται λόγω της ταχύτητας φτάνει τα 15 μm/m, στους 40°C

Στο σύνολο των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C από τους 10 έως 40°C προκαλεί μεταβολές (αυξήσεις) στις παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 12 έως και 45% ενώ η μέγιστη μεταβολή που προκαλεί η μεταβολή της ταχύτητας, από τα 50 στα 110 Km/h, φτάνει το 8%.

5.3.3 Επίδραση πάχους ασφαλτικής στρώσης

Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι χαρακτηριστικό που καθορίζει την φέρουσα ικανότητα της στρώσης και συνεπώς της δομής του οδοστρώματος. Αύξηση του πάχους συνεπάγεται μείωση της καταπόνησης δηλαδή μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.

Όπως αναφέρθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, για τον χαρακτηρισμό της ασφαλτικής στρώσης διαθέτουμε εργαστηριακά δεδομένα για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για μόνο ένα υλικό. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από δοκιμή σε πυρήνα με πάχος ασφαλτικών ίσο με 14.1 cm. Στα πλαίσια της εργασίας θεωρήθηκε η παραδοχή ότι για τα άλλα πάχη που εξετάστηκαν (10 cm και 18 cm), τα χαρακτηριστικά του υλικού παραμένουν ίδια.



Εικόνα 5.6: Επίδραση πάχους ασφαλτικής στρώσης για τις διάφορες θερμοκρασίες (h₂=30 cm, E₂=300Mpa, E₃=80 Mpa, V=80 Km/h)

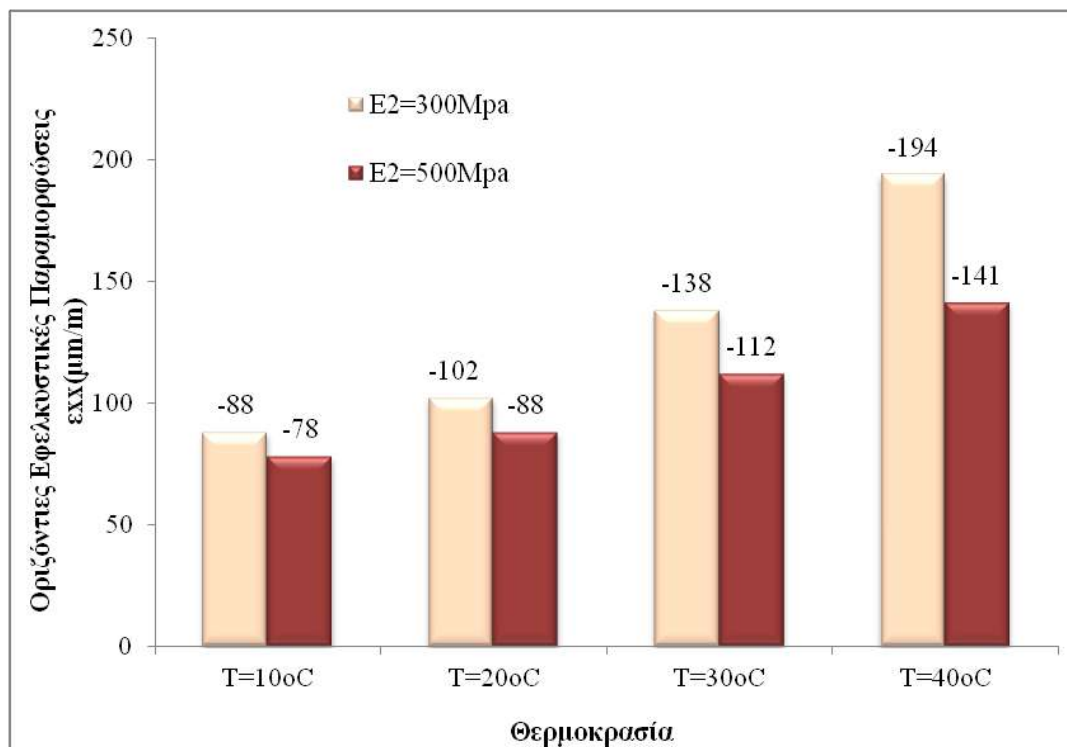
Στην Εικόνα 5.6 παρατηρείται ότι για θερμοκρασία των 10°C για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης από 10 σε 18 cm η μεταβολή στις παραμορφώσεις είναι 53 $\mu\text{m}/\text{m}$ ενώ για 40°C η αντίστοιχη μεταβολή φτάνει τα 76 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ωστόσο, οι αντίστοιχες σχετικές μεταβολές είναι 46% για τους 10°C και 35% για τους 40°C.

Στο σύνολο των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης από τα 10 στα 18 cm προκαλεί μείωση στις παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 30 έως 76 $\mu\text{m}/\text{m}$ οι οποίες αντιστοιχούν σε σχετικές μεταβολές από 33 έως 46%. Οι ενδιάμεσες μεταβολές του πάχους δηλαδή από τα 10 στα 14.1 cm ή από τα 14.1 στα 18 cm προκαλούν μείωση στις παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 15 έως 46 $\mu\text{m}/\text{m}$ οι οποίες αντιστοιχούν σε μεταβολές από 19 έως 30%.

5.3.4 Επίδραση μέτρου ελαστικότητας στρώσης από ασύνδετα αμμοχάλικα

Δεδομένου ότι η στρώση από ασύνδετα αμμοχάλικα έρχεται σε άμεση επαφή με τις ασφαλικές στρώσεις, το μέτρο ελαστικότητας της βάσης συνδέεται με την ικανότητα της δομής του οδοστρώματος να φέρει τα αξονικά φορτία, συνεπώς αναμένεται να έχει επίδραση στην ανάπτυξη των κρίσιμων παραμορφώσεων. Ειδικότερα, αν αυτό αυξηθεί οδηγεί σε μείωση της καταπόνησης, δηλαδή σε μείωση των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Η παρατήρηση αυτή είναι γενική και έχει ισχύ για όλες τις θερμοκρασίες. (Εικόνα 5.7).

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην Εικόνα 5.7 παρατηρείται ότι για θερμοκρασία των 10°C η διαφορά μεταξύ των παραμορφώσεων λόγω της θεώρησης δύο μέτρων ελαστικότητας είναι 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ ενώ για 40°C φτάνει τα 56 $\mu\text{m}/\text{m}$, οι οποίες αντιστοιχούν σε σχετικές μεταβολές 11 και 27% αντίστοιχα.



Εικόνα 5.7: Επίδραση μέτρου ελαστικότητας βάσης για τις διάφορες θερμοκρασίες ($h_2=30$ cm, $E_2=300$ Mpa, $E_3=80$ Mpa και $V=80$ Km/h)

Στο σύνολο των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι η θεώρηση των δύο διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας της βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα προκαλεί μεταβολές στις παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 10 έως 63 $\mu\text{m/m}$ οι οποίες αντιστοιχούν σε σχετικές μεταβολές 11 έως 30%.

5.4 Μοντέλο πρόβλεψης παραμορφώσεων

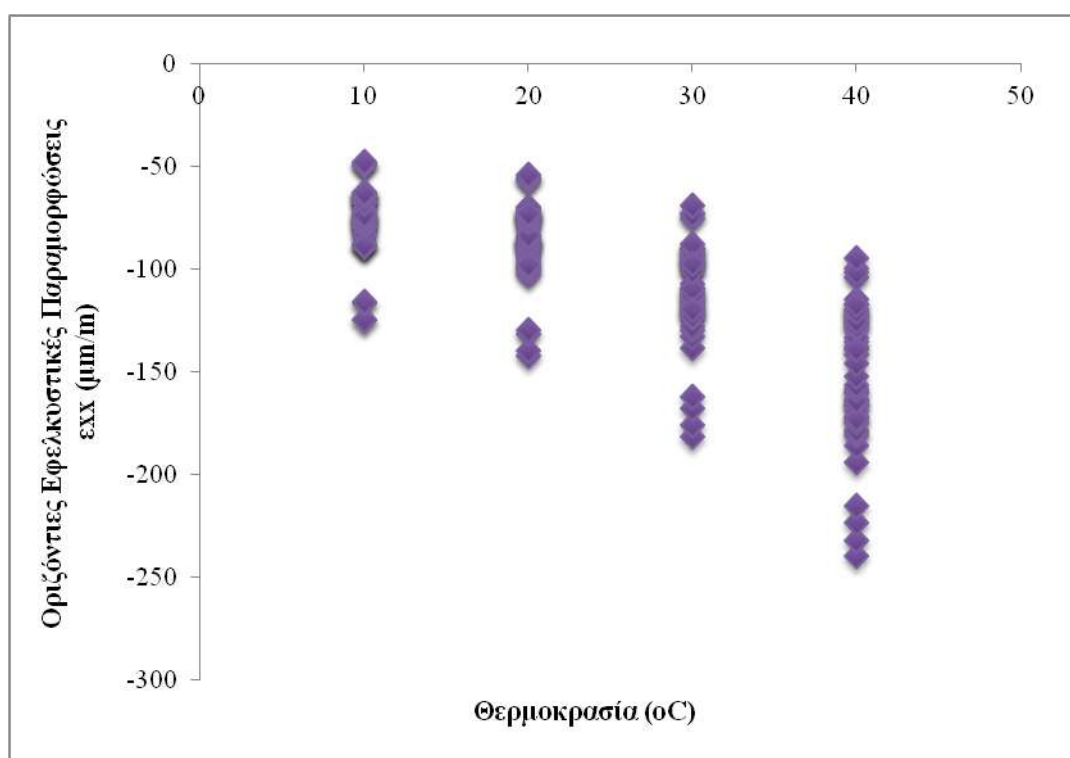
5.4.1 Γενικά στοιχεία

Από τις παραμετρικές αναλύσεις εντατικής κατάστασης με βάση την ιξωδοελαστική θεώρηση, παρατηρήθηκε ότι όλες οι εξεταζόμενες παράμετροι έχουν μία επίδραση στις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στις ασφατικές στρώσεις, η οποία είναι κατά περίπτωση είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη. Προκειμένου αυτή η επίδραση να ποσοτικοποιηθεί, προσδιορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της διαμήκου παραμόρφωσης (που ως μεγαλύτερη, θεωρήθηκε δυσμενέστερη) και καθεμιάς από τις υπό εξέταση παραμέτρους. Οι συντελεστές συσχέτισης R^2 φαίνονται στον Πίνακα 5.3. Επισημαίνεται ότι για τη συσχέτιση των μεγεθών, έχει ληφθεί υπόψη το

σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων. Επιπλέον, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.8, η μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Πίνακας 5.3: Συντελεστές συσχέτισης R^2 των παραμέτρων ανάλυσης

	T	V	h_1	h_2	E_2	E_3
ϵ_{xx}	0.54	0.01	0.21	0.05	0.17	0.07



Εικόνα 5.8: Μεταβολή παραμορφώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η σχετικά υψηλή (συγκριτικά με τις υπόλοιπες) συσχέτιση της παραμόρφωσης με τη θερμοκρασία είναι κάτι που επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που προηγήθηκαν αναφορικά με την ποιοτική ερμηνεία των διαγραμμάτων μεταβολής των παραμορφώσεων. Λαμβάνοντας υπόψη, τη διασπορά των τιμών των υπό εξέταση παραμέτρων συνδυαστικά με την αντίστοιχη διασπορά που μπορεί να προκύψει στην πράξη κατά το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων ή την αξιολόγηση υφιστάμενων, αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον η διερεύνηση μοντελοποίησης των ασφαλικών παραμορφώσεων.

5.4.2 Ανάπτυξη και αξιολόγηση μοντέλου

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά όλων των υπό εξέταση παραμέτρων, διερευνήθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης των παραμορφώσεων σύμφωνα με την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης. Η γενική μορφή του γραμμικού μοντέλου είναι:

$$\varepsilon_{xx} = a_1 * T + a_2 * V + a_3 * h_1 + a_4 * h_2 + a_5 * E_2 + a_6 * E_3 + a_7 \quad (5.1)$$

όπου:

$a_1, a_2, \dots, a_7$: συντελεστές βαθμονόμησης

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου απαιτούνται δύο διακριτές διαδικασίες. Η πρώτη συνιστά βαθμονόμηση του μοντέλου, δηλαδή εύρεση των τιμών των συντελεστών a_1 έως a_7 . Για τον προσδιορισμό τους, πραγματοποιήθηκε έλεγχος βελτιστοποίησης στο Microsoft Excel μέσω της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος του τετραγώνου των σφαλμάτων (Sum of Squared Errors - SSE) μεταξύ των υπολογισμένων και προβλεπόμενων παραμορφώσεων, το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.2)$$

όπου:

y_i : η παρατηρηθείσα τιμή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πρόκειται για την υπολογισμένη παραμόρφωση

$\hat{y}_i$: η εκτιμώμενη τιμή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πρόκειται για την προβλεπόμενη παραμόρφωση

n : το πλήθος των αναλύσεων

Η ελαχιστοποίηση του SSE συνάδει με τη μεγιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης R^2 , οποίος συνιστά έλεγχο καλής προσαρμογής του μοντέλου στα διαθέσιμα στοιχεία. Για την ως άνω διαδικασία, επιλέχθηκε τυχαία το 25% του συνόλου των αναλύσεων. Η επιλογή τους ωστόσο, έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριληφθούν περιπτώσεις από όλες τις εξεταζόμενες τιμές των παραμέτρων.

Η δεύτερη διαδικασία συνιστά αξιολόγηση του μοντέλου με έλεγχο ακρίβειας κατά την προσαρμογή του στο υπόλοιπο 75% των αναλύσεων. Ο έλεγχος ακρίβειας γίνεται μέσω υπολογισμού του συντελεστή Root Mean Square Percentage of Errors (RMSPE %), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$RMSPE(\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \cdot \frac{1}{n} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

όπου:

y_i : η παρατηρηθείσα τιμή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πρόκειται για την υπολογισμένη παραμόρφωση

$\hat{y}_i$: η εκτιμώμενη τιμή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πρόκειται για την προβλεπόμενη παραμόρφωση

n : το πλήθος των αναλύσεων

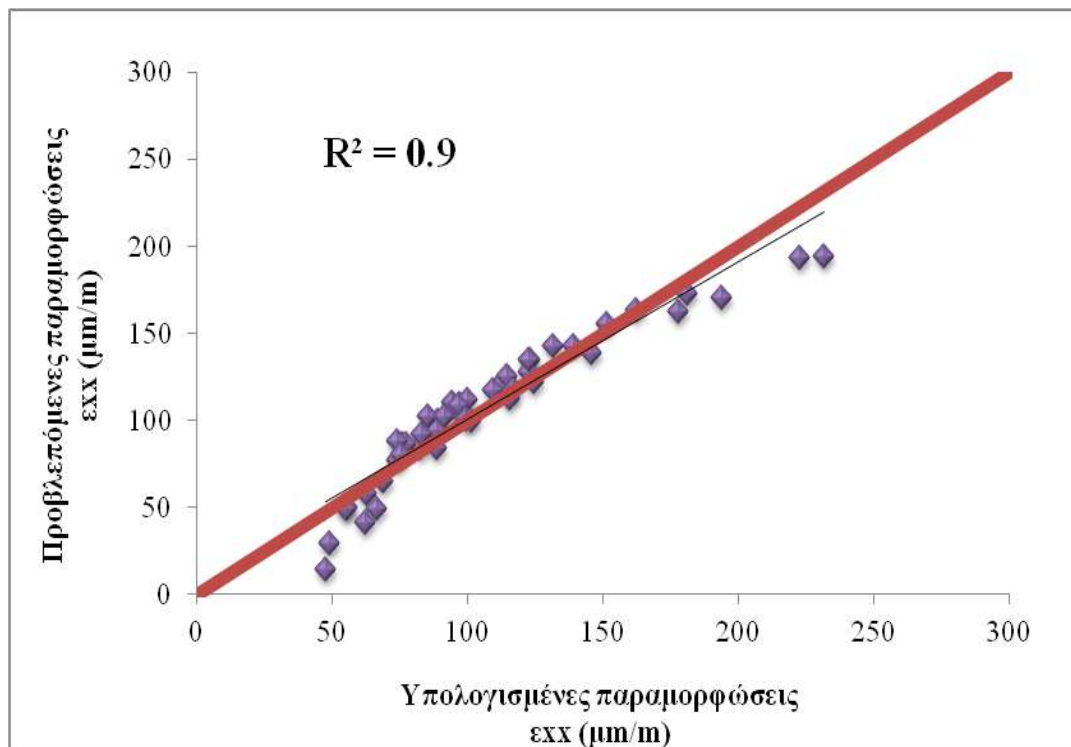
Γενικά, μικρές τιμές του RMSPE υποδεικνύουν ότι το μοντέλο έχει ικανοποιητική ακρίβεια.

Ακολουθώντας τις δύο διαδικασίες που περιγράφηκαν, οι συντελεστές βαθμονόμησης έλαβαν τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 5.4, ενώ για την προσαρμογή του μοντέλου, ο συντελεστής συσχέτισης βρέθηκε ίσος με 0.90 (Εικόνα 5.9), ο οποίος είναι ικανοποιητικός.

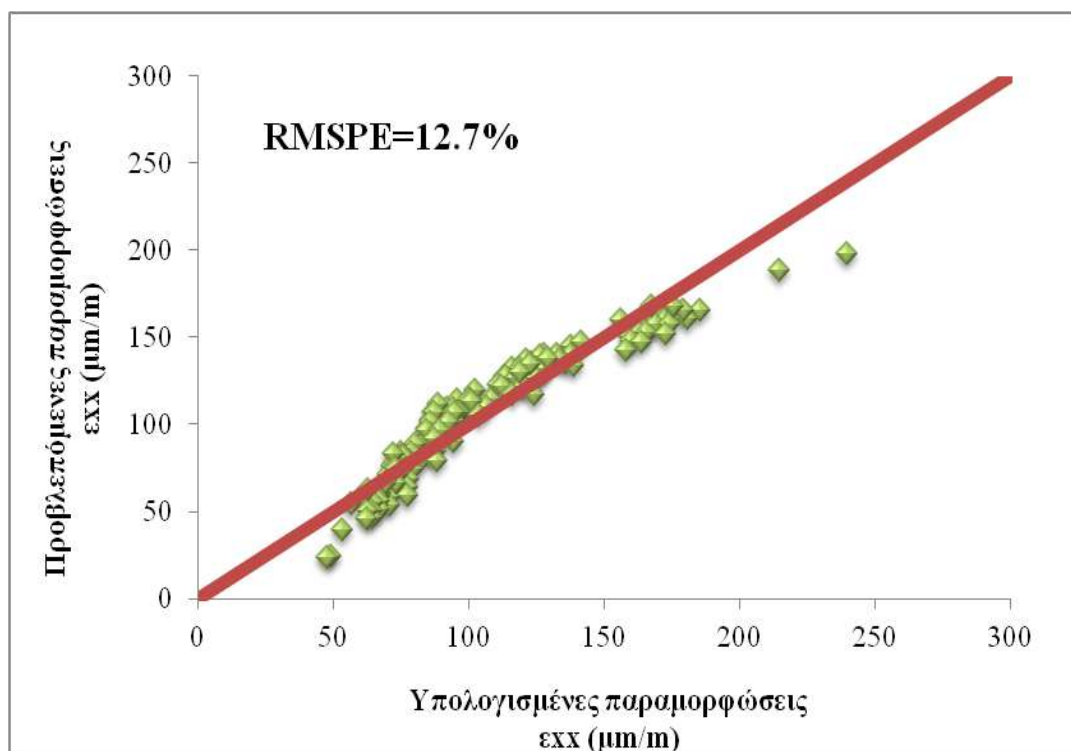
Πίνακας 5.4: Συντελεστές του μοντέλου πρόβλεψης

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
-6.84	-0.51	-0.13	-0.07	2.54	-0.16	226.79

Περαιτέρω, κατά την αξιολόγηση του μοντέλου στο υπόλοιπο 75% των αναλύσεων προέκυψε ότι RMSPE=12.7% (Εικόνα 5.10), στοιχείο που υποδεικνύει ότι το μοντέλο έχει ικανοποιητική ακρίβεια, κυρίως όσον αφορά τις τιμές που δόθηκαν στις εξεταζόμενες παραμέτρους κατά τις παραμετρικές αναλύσεις.



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα προσαρμογής του 25% αναλύσεων (ανάπτυξη μοντέλου)



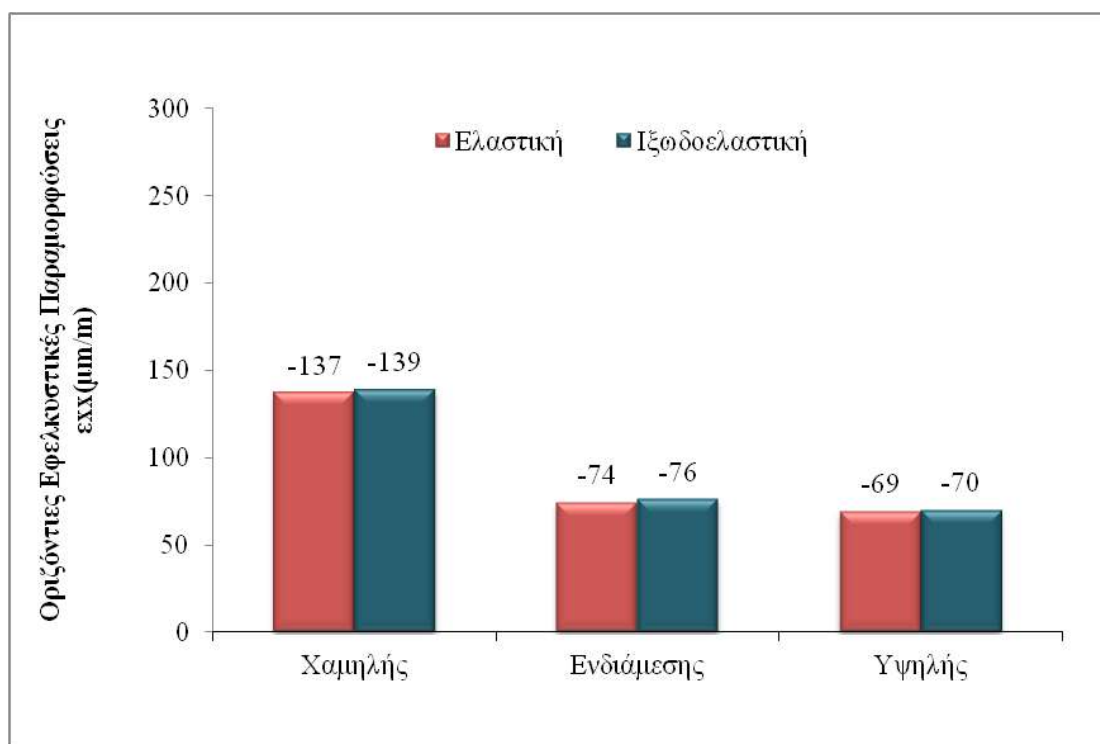
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα προσαρμογής του 75% αναλύσεων (αξιολόγηση μοντέλου)

5.5 Επισκόπηση επιμέρους κατηγοριών οδών

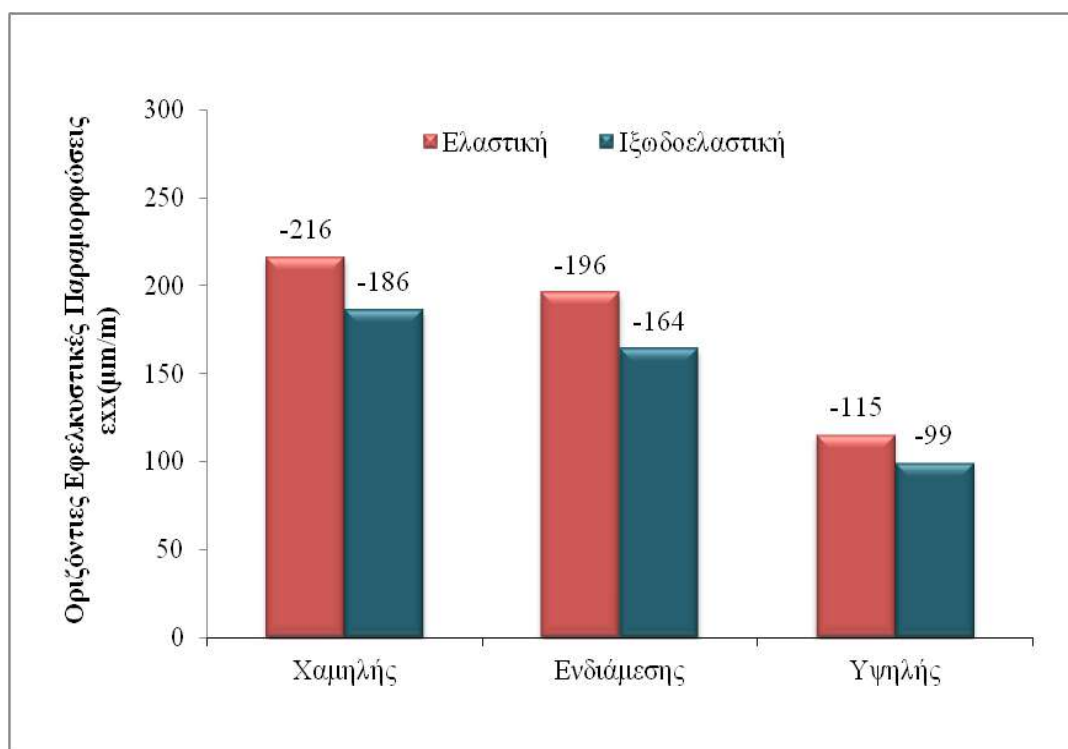
5.5.1 Επίδραση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς

Οι διατομές για τις διάφορες κατηγορίες οδών όπως ορίστηκαν παραπάνω ελέγχθηκαν συγκριτικά για παραδοχή ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος με σκοπό να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές και αποκλίσεις στα υπολογιζόμενα μεγέθη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενδεικτικά για μία από τις διατομές της κάθε κατηγορίας οδών η οποία όμως είναι αντιπροσωπευτική για το σύνολο.

Οι αναλύσεις έδειξαν ότι όλες οι κατηγορίες οδών εμφανίζουν αποκλίσεις στις υπολογιζόμενες παραμορφώσεις για την ελαστική και την ιξωδοελαστική ανάλυση και στους 20°C (Εικόνα 5.11) και στους 40°C (Εικόνα 5.12). Ωστόσο οι διαφορές αυτές είναι μεγαλύτερες για θερμοκρασία των 40°C από ότι για την θερμοκρασία των 20°C. Στην θερμοκρασία των 20°C, όλες οι κατηγορίες οδών εμφανίζουν σχετικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ των δυο παραδοχών συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 5.11: Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης για τις διάφορες κατηγορίες οδών (T=20°C)



Εικόνα 5.12: Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης για τις διάφορες κατηγορίες οδών (T=40°C)

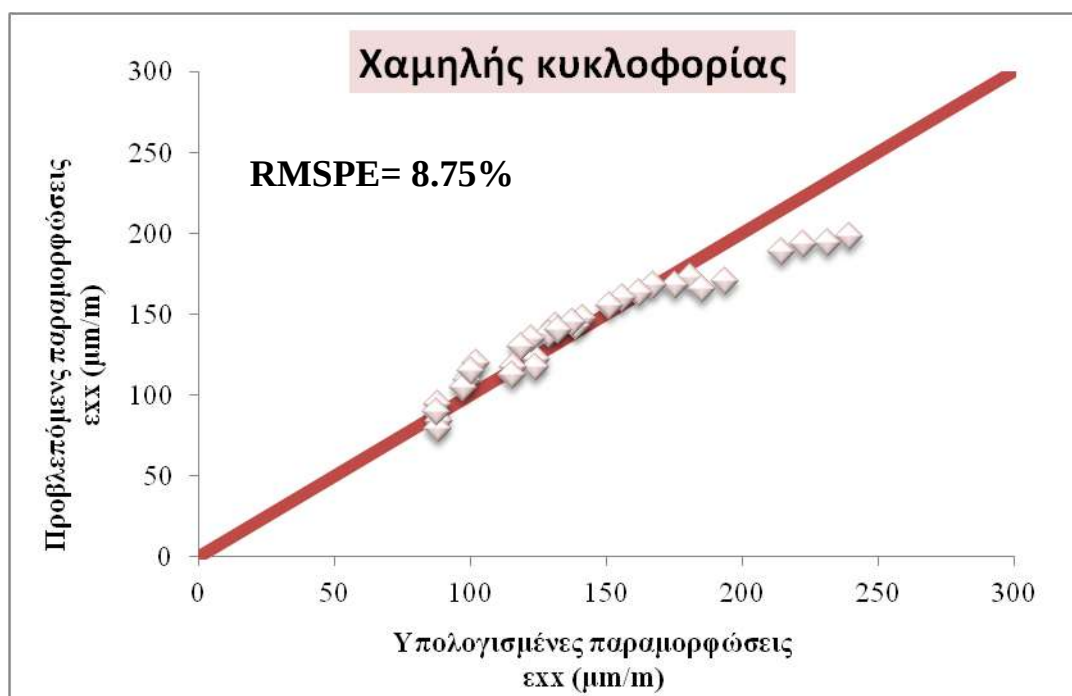
Στην θερμοκρασία των 40°C που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρείται ότι οι οδοί υψηλής κυκλοφορίας έχουν την μικρότερη απόκλιση μεταξύ των δύο αναλύσεων, με την διαφορά αυτή να είναι ίση με 16 μm/m. Ενώ οι διατομές χαμηλής και ενδιάμεσης κυκλοφορίας εμφανίζουν περίπου ίδια διαφορά μεταξύ ελαστικής και ιξωδοελαστικής θεωρήσης, 30 μm/m και 32 μm/m αντίστοιχα η οποία είναι διπλάσια από την αντίστοιχη για τις διατομές υψηλής κυκλοφορίας. Ωστόσο η μετάβαση από την ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση υπολογίζεται ότι προκαλεί ποσοστιαία μείωση των παραμορφώσεων ίση με 14% για τις διατομές χαμηλής και υψηλής κυκλοφορίας και 16% για τις διατομές ενδιάμεσης κυκλοφορίας. Μεγαλύτερη ευαισθησία στο είδος της ανάλυσης παρατηρείται στις οδούς ενδιάμεσης κυκλοφορίας, στοιχείο που έχει ενδιαφέρον εφόσον στην πράξη αρκετά πάχη ασφαλτομιγμάτων προσεγγίζουν την τιμή των 14cm.

5.5.2 Αξιολόγηση προσαρμογής του μοντέλου στις επιμέρους κατηγορίες οδών

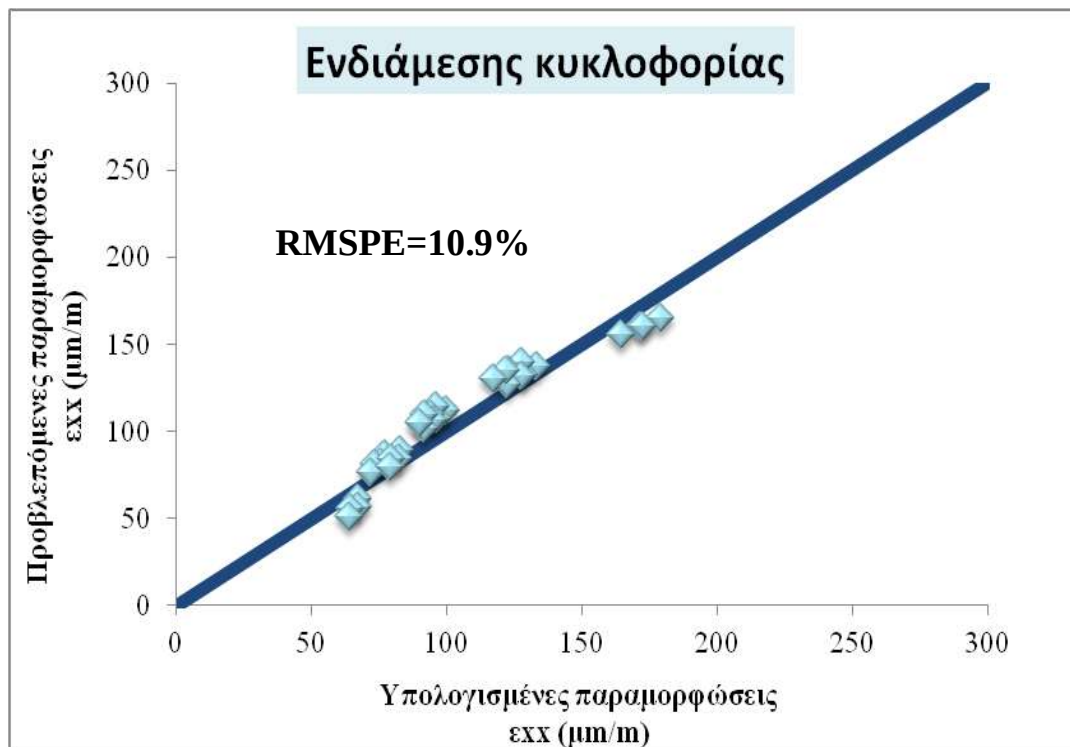
Η ακρίβεια του μοντέλου που δημιουργήθηκε παραπάνω αξιολογήθηκε επιπλέον και με βάση τη δυνατότητα προσαρμογής του στα διαθέσιμα στοιχεία από τις διάφορες

κατηγορίες οδών. Όπως προαναφέρθηκε οι κατηγορίες είναι οι οδοί χαμηλής κυκλοφορίας (low volume) όπως μια επαρχιακή οδός, οι οδοί ενδιάμεσης κυκλοφορίας (intermediate volume) και οι οδοί υψηλής κυκλοφορίας (high volume) όπως μια εθνική οδός ή ένας αυτοκινητόδρομος. Υπενθυμίζεται ότι ο διαχωρισμός, ο οποίος φαίνεται στον Πίνακα 4.3 έχει γίνει με βάση τα πάχη και τα χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων.

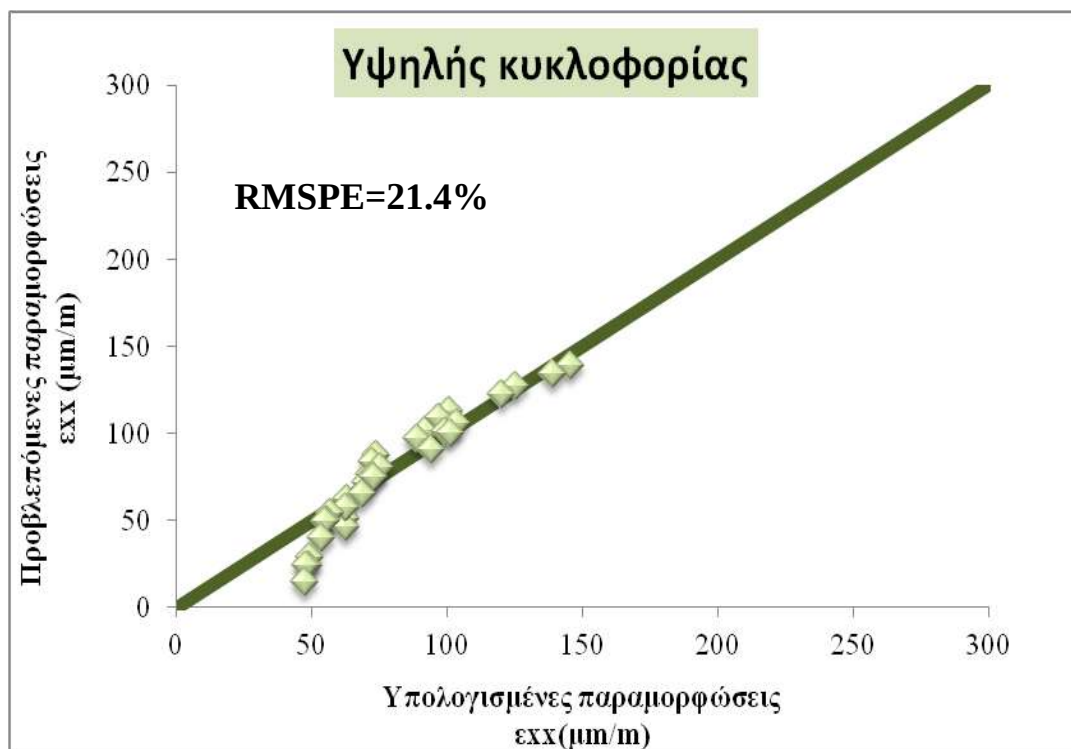
Προέκυψε ότι το μοντέλο για διατομές χαμηλής κυκλοφορίας (Εικόνα 5.13) δίνει ένα συντελεστή RMSPE ίσο με 8.75%, το οποίο είναι μικρότερο και από το RMSPE του μοντέλου που βρέθηκε προηγουμένως λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των αναλύσεων. Το στοιχείο αυτό υποδεικνύει μια καλή προσαρμογή. Ομοίως και οι διατομές ενδιάμεσης κυκλοφορίας (Εικόνα 5.14) δίνουν ένα συντελεστή RMSPE ίσο με 10.9%, που είναι επίσης μικρότερο από το RMSPE του μοντέλου που βρέθηκε προηγουμένως. Ωστόσο, στις διατομές υψηλής κυκλοφορίας προέκυψε ότι ο δείκτης RMSPE είναι ίσος με 21.4%, άρα το μοντέλο εμφάνισε μειωμένη ακρίβεια όταν προσαρμόστηκε μεμονωμένα στα διαθέσιμα στοιχεία για τις οδούς της συγκεκριμένης κατηγορίας (Εικόνα 5.15).



Εικόνα 5.13: Διάγραμμα προσαρμογής μοντέλου για οδούς χαμηλής κυκλοφορίας (low volume)



Εικόνα 5.14: Διάγραμμα προσαρμογής μοντέλου για οδούς ενδιάμεσης κυκλοφορίας (intermediate volume)



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα προσαρμογής μοντέλου για οδούς υψηλής κυκλοφορίας (high volume)

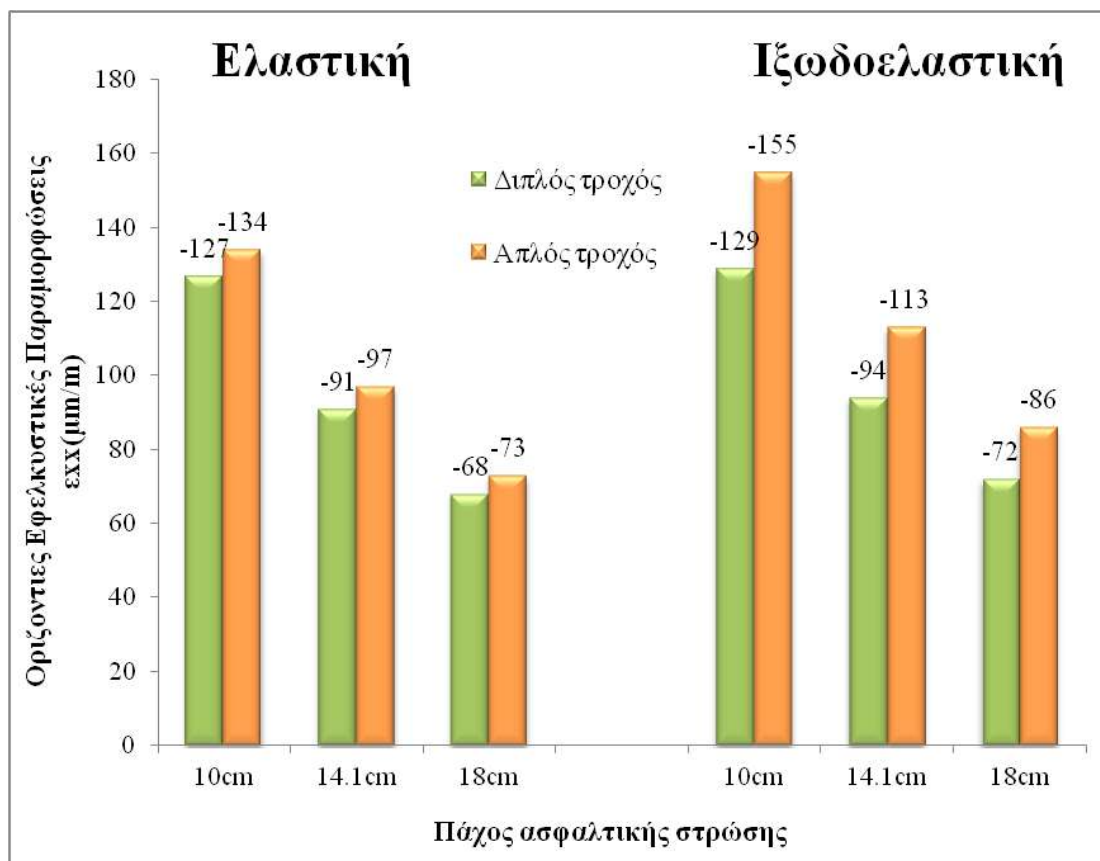
Αξιολογώντας, συνολικά την προσαρμογή του μοντέλου στις επιμέρους κατηγορίες των οδών, αξίζει να σημειωθεί ότι για τη βελτίωση της προσαρμογής του μοντέλου στις οδούς υψηλής κυκλοφορίας απαιτείται επαναβαθμονόμηση. Αυτό θα μπορούσε να γίνει αυξάνοντας περαιτέρω το διαθέσιμο δείγμα των εντατικών αναλύσεων.

5.6 Διερεύνηση αλλαγής διάταξης φόρτισης

5.6.1 Επίδραση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση θεώρησης αξονικών φορτίων επί απλών τροχών, οι παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αναλύσεων με θεώρηση τόσο ελαστικής όσο και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικά σύνολα παραμορφώσεων για τις δύο θερμοκρασίες $T=20^{\circ}\text{C}$ και $T=40^{\circ}\text{C}$ (Εικόνες 5.16 και 5.17).

Για θερμοκρασία των 20°C προέκυψε ότι η διάταξη φόρτισης με τον απλό τροχό οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το τυπικό αξονικό φορτίο με το διπλό τροχό στα πλαίσια της ελαστικής και της ιξωδοελαστικής ανάλυσης (Εικόνα 5.16) για το σύνολο των αναλύσεων. Παρατηρείται επίσης ότι η διαφορά αυτή μεταξύ των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων για τις δύο φορτίσεις είναι μεγαλύτερη στα πλαίσια της ιξωδοελαστικής ανάλυσης. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο φορτίσεων στην ανάλυση με παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος ισούται με $7\text{ }\mu\text{m/m}$ ενώ με παραδοχή ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς φτάνει τα $26\text{ }\mu\text{m/m}$.



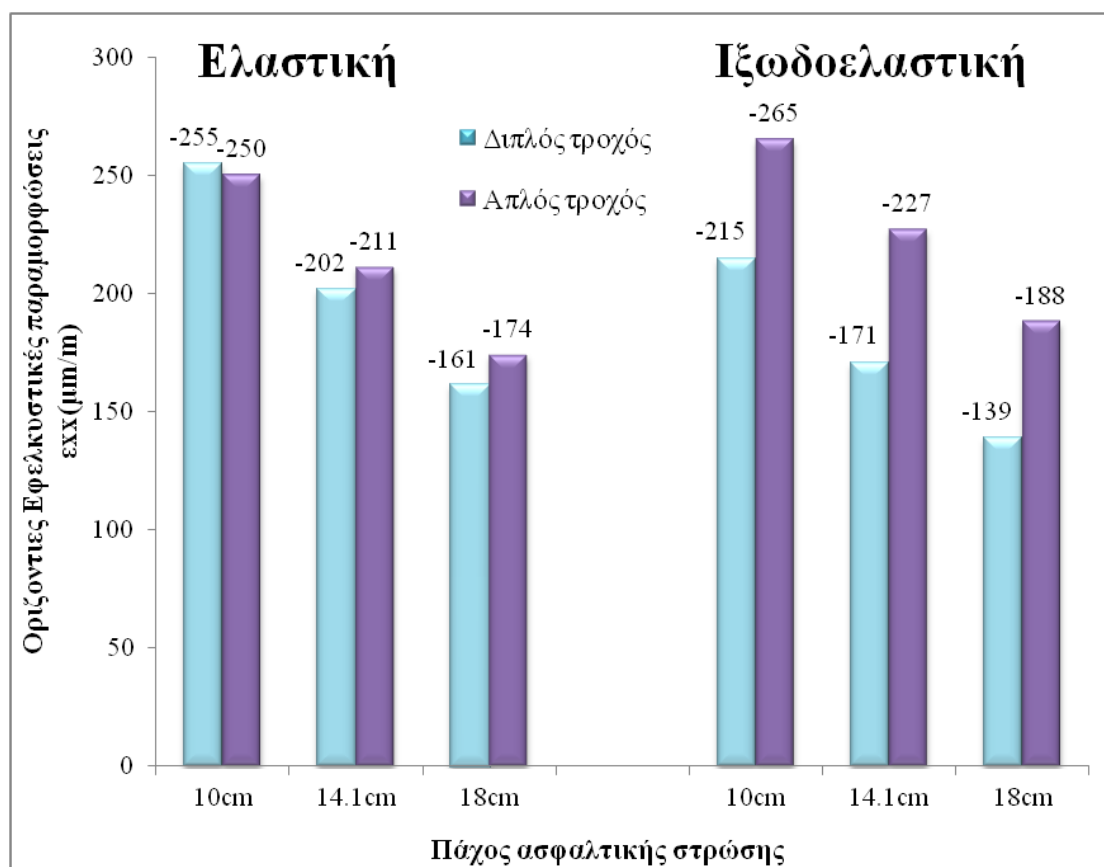
Εικόνα 5.16: Σύγκριση διπλού και απλού τροχού στα πλαίσια ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης ($T=20^{\circ}\text{C}$, $h_2=30\text{ cm}$, $E_2=300\text{ Mpa}$, $E_3=80\text{ Mpa}$, $V=80\text{ Km/h}$)

Τέλος προκύπτει ότι για θερμοκρασία των 20°C η μετάβαση από την ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση προκαλεί μεταβολές που είναι μεγαλύτερες για τη διάταξη φόρτισης με τον απλό τροχό από ότι για τη διάταξη φόρτισης με τον διπλό όπως φαίνεται και παρακάτω στον Πίνακα 5.5. Στη θερμοκρασία αυτή λοιπόν το αξονικό φορτίο επί απλών τροχών εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των υπολογιζόμενων παραμορφώσεων για ελαστική κα ιξωδοελαστική ανάλυση. Η διάταξη φόρτισης με τον απλό τροχό δηλαδή έχει μεγαλύτερη διακύμανση με βάση το είδος της ανάλυσης για την θερμοκρασία των 20°C .

Πίνακας 5.5: Μεταβολές παραμορφώσεων από ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση ($T=20^{\circ}\text{C}$)

Διάταξη φόρτισης	10cm	14.1cm	18cm
Απλός τροχός	+16%	+16%	+18%
Διπλός τροχός	+2%	+3%	+6%

Για θερμοκρασία των 40°C επίσης προκύπτει ότι η διάταξη φόρτισης με τον απλό τροχό οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από την διάταξη φόρτισης με τον διπλό τροχό του τυπικού αξονικού φορτίου και στην ελαστική και στην ιξωδοελαστική ανάλυση (Εικόνα 5.17). Η διαφορά αυτή είναι επίσης μεγαλύτερη στα πλαίσια θεώρησης ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτικών στρώσεων. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ των δύο φορτίσεων στην ανάλυση με θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς ισούται με 13 $\mu\text{m}/\text{m}$ ενώ με θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς φτάνει τα 56 $\mu\text{m}/\text{m}$. Τέλος παρατηρείται ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο φορτίσεων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για την θερμοκρασία των 20°C.



Εικόνα 5.17: Σύγκριση διπλού και απλού τροχού στα πλαίσια ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης ($T=40^{\circ}\text{C}$, $h_2=30\text{ cm}$, $E_2=300\text{ Mpa}$, $E_3=80\text{ Mpa}$, $V=80\text{ Km/h}$)

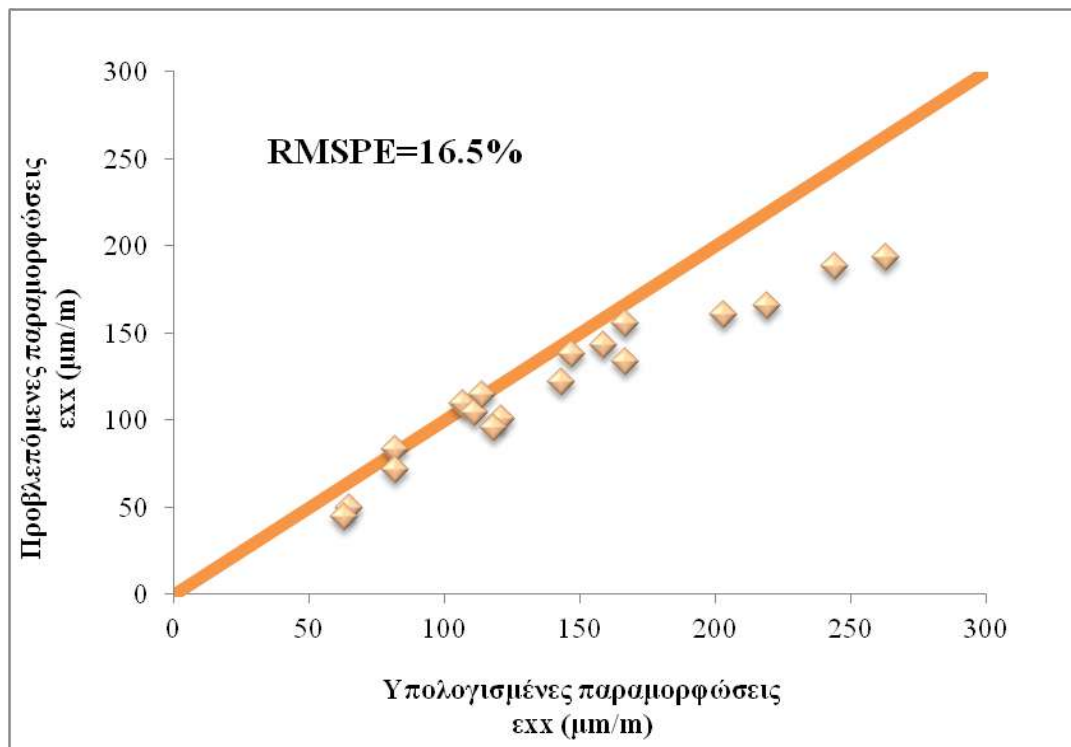
Τέλος προκύπτει ότι για θερμοκρασία των 40°C η μετάβαση από την ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση προκαλεί μεταβολές που είναι μεγαλύτερες αυτή την φορά για θεώρηση αξονικού φορτίου επί διπλών τροχών από ότι για θεώρηση αξονικού φορτίου επί απλών τροχών όπως φαίνεται και παρακάτω στον Πίνακα 5.6. Στη θερμοκρασία αυτή λοιπόν η διάταξη φόρτισης με τον διπλό τροχό είναι αυτή που εμφανίζει μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των υπολογιζόμενων παραμορφώσεων για θεώρηση ελαστικής κα ιξωδοελαστικής συμπεριφορά ασφατικών στρώσεων. Η διάταξη φόρτισης με τον διπλό τροχό δηλαδή έχει μεγαλύτερη διακύμανση με βάση το είδος της ανάλυσης για την θερμοκρασία των 40°C.

Πίνακας 5.6: Μεταβολές δύο παραμορφώσεων από ελαστική στην ιξωδοελαστική ανάλυση (T=40°C)

Διάταξη φόρτισης	10cm	14.1cm	18cm
Απλός τροχός	-6%	-7%	-8%
Διπλός τροχός	-16%	-15%	-14%

5.6.2 Αξιολόγηση προσαρμογής μοντέλου σε εναλλακτικές διατάξεις φόρτισης

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε παραπάνω αξιολογήθηκε επιπλέον και με βάση τη δυνατότητα προσαρμογής του στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για θεώρηση αξονικού φορτίου επί απλών τροχών. Προέκυψε δείκτης RMSPE ίσος με 16.5% (Εικόνα 5.18), ο οποίος θεωρείται σχετικά μεγάλος, γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο παρουσιάζει μειωμένη ακρίβεια όταν προσαρμόζεται σε εναλλακτική διάταξη φόρτισης, στην θεώρηση αξονικών φορτίων επί απλών τροχών στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 5.18: Διάγραμμα προσαρμογής μοντέλου για αξονικό φορτίο επί απλών τροχών

Παρατηρείται λοιπόν ότι η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης των παραμορφώσεων παρότι αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο θα μπορούσε να βελτιστοποιήσει τον σχεδιασμό και να ελαχιστοποιήσει τις δυσκολίες της ανάλυσης και διαχείρισης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος, στην πράξη είναι αρκετά περίπλοκο να δημιουργηθεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εξάρτηση του από ποικίλες παραμέτρους που σχετίζονται με την φύση του ασφαλτομίγματος, την δομή του οδοστρώματος αλλά και από τις συνθήκες φόρτισης όπως φαίνεται παραπάνω. Όπως έχει προαναφερθεί τα οχήματα που καταπονούν το οδόστρωμα ποικίλουν και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών φόρτισης συνεπώς είναι δύσκολο να κατασκευαστεί ένα μοντέλο που θα είναι σε θέση να προβλέπει την καταπόνηση που επιφέρει κάθε διαφορετική φόρτιση στο οδόστρωμα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την διερεύνηση της επίδρασης της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλομίγματος στην εντατική κατάσταση ασφαλικών οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές εντατικές αναλύσεις, θεωρώντας ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά για το ασφαλομίγμα, ενώ εξετάστηκε η επίδραση παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με την φύση του ασφαλομίγματος όσο και με την συνολική δομή του οδοστρώματος. Ακόμη, διερευνήθηκε η επίδραση εναλλακτικής μορφής φόρτισης πραγματοποιώντας εντατικές αναλύσεις με θεώρηση αξονικού φορτίου επί απλών τροχών έναντι των διπλών τροχών του τυπικού αξονικού φορτίου. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ότι:

- Μεταξύ της θεώρησης ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων παρουσιάζονται, όπως αναμενόταν, αποκλίσεις στην υπολογιζόμενη εντατική κατάσταση. Αναφορικά με την θερμοκρασία που αναμένεται να επικρατήσει στο μέσο της ασφαλικής βάσης, προέκυψαν σχετικά μικρές διαφορές για τις χαμηλές θερμοκρασίες (10-20°C) που εξετάστηκαν ενώ στις υψηλές (30-40°C) προέκυψαν αρκετά μεγαλύτερες. Μάλιστα, στις θερμοκρασίες των 10, 20, 30°C η θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλομίγματος οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από την θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς, ενώ στη θερμοκρασία των 40°C η ελαστική θεώρηση είναι αυτή που οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις από την θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οφείλεται στις συνθήκες στατικής φόρτισης οι οποίες εμφανίζονται δυσμενέστερες από τις πραγματικές συνθήκες της δυναμικής φόρτισης σε συνδυασμό με την υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ασφαλομίγματος στις υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, προκύπτει ότι η θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό της ασφαλικής βάσης επιδρά στην συμπεριφορά του οδοστρώματος και καθορίζει το μέγεθος των αποκλίσεων μεταξύ των δύο ειδών ανάλυσης. Μάλιστα, οι διαφορές των παραμορφώσεων για τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς ασφαλομίγματος, ενδεικτικά για τις θερμοκρασίες των 20°C και 40°C προέκυψαν στατιστικά σημαντικές, στοιχείο που αναμένεται να έχει επίδραση σε μια πιο

προχωρημένη ανάλυση για την εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής του οδοστρώματος μέσω νόμων αστοχίας σε κόπωση.

- Σχετικά με τους παράγοντες που σχετίζονται με την φύση του ασφαλτομίγματος (θερμοκρασία, ταχύτητα) καθοριστικότερος για την ανάλυση ενός οδοστρώματος στα πλαίσια της ιξωδοελαστικής θεώρησης είναι η θερμοκρασία που αναμένεται να επικρατήσει στο μέσο της ασφαλικής βάσης καθώς έχει την μεγαλύτερη επίδραση συγκριτικά με την ταχύτητα στις παραμορφώσεις. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C, από τους 10°C μέχρι 40°C, προκαλεί μεταβολές στις παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 12 έως 45% ενώ η μέγιστη μεταβολή που προκαλεί η ταχύτητα, μεταβαλλόμενη από τα 50 στα 110 Km/h, φτάνει έως 8%. Δεδομένων επίσης των στατιστικά σημαντικών διαφορών που εντοπίστηκαν στα ζεύγη παραμορφώσεων για τις θερμοκρασίες 10 με 20 °C, 20 με 30°C, 30 με 40°C προκύπτει ότι πρόκειται για βασικό παράγοντα και συνεπώς λήφθηκε υπόψη συνδυαστικά η συμβολή της θερμοκρασίας για την εξέταση της επίδρασης των υπολοίπων παραγόντων.
- Σχετικά με τους παράγοντες που σχετίζονται με την δομή του οδοστρώματος μεγαλύτερη επίδραση στις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις έχουν το πάχος των ασφαλικών στρώσεων και το μέτρο ελαστικότητας της βάσης από ασύνδετα υλικά. Η μεταβολή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων μεταξύ των δύο ακραίων τιμών που εξετάστηκαν, δηλαδή από 10 στα 18 cm, προκαλεί μείωση των παραμορφώσεων η οποία κυμαίνεται από 33 έως 45%. Ομοίως, η θεώρηση των δυο διαφορετικών μέτρων ελαστικότητας για το υλικό της βάσης από ασύνδετα υλικά, 300 και 500 MPa, προκαλεί μεταβολές των παραμορφώσεων που κυμαίνονται από 11 έως 30%. Δεδομένης της αυξημένης επίδρασης τους και της διακύμανσης των τιμών των υπόψη μεγεθών προκύπτει ανάγκη ακριβούς γνώσης των παραμέτρων αυτών στην περίπτωση που η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία επεκταθεί στην αξιολόγηση ενός υφιστάμενου οδοστρώματος.
- Οι επιμέρους κατηγορίες οδών όπως αυτές επιλέχτηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εμφάνισαν αποκλίσεις μεταξύ των δύο ειδών ανάλυσης. Επομένως, για όλες τις κατηγορίες οδών έγκειται ο προβληματισμός για την επιλογή του είδους της ανάλυσης, ανάλογα με την θεώρηση συμπεριφοράς

των ασφαλικών στρώσεων. Ειδικότερα στις υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκε ότι την μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζουν οι διατομές οδών ενδιάμεσης κυκλοφορίας.

- Η θεώρηση αξονικού φορτίου επί απλών τροχών οδηγεί σε δυσμενέστερη εντατική κατάσταση από τη θεώρηση αξονικού φορτίου επί διπλών τροχών. Το γεγονός αυτό παρατηρείται στις αναλύσεις με θεώρηση τόσο ελαστικής όσο και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων. Επομένως, η αυξημένη χρήση της διάταξης με απλό τροχό τα τελευταία χρόνια στην σύνθεση της κυκλοφορίας των οδών, λόγω των περιβαλλοντικών του πλεονεκτημάτων είναι πιθανό να οδηγεί σε δυσμενέστερη εντατική καταπόνηση προκαλώντας πρόωρες φθορές ή αστοχίες στο οδόστρωμα. Δεδομένου ότι ένα οδόστρωμα εκτίθεται σε φορτία με διαφορετικά μεγέθη και διατάξεις τροχών, προκύπτει η ανάγκη αναθεώρησης των συμβατικών μεθόδων σχεδιασμού και ανάλυσης που βασίζονται σε μία μοναδική διάταξη φόρτισης.
- Από τη διερεύνηση δημιουργίας μοντέλου πρόβλεψης των κρίσιμων εφελκυστικών παραμορφώσεων των ασφαλικών στρώσεων, προέκυψε ότι αυτό είναι εφικτό με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία. Η βαθμονόμηση του μοντέλου για το 25% του συνόλου των ιξωδοελαστικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν έγινε με συντελεστής συσχέτισης (R^2) ίσο με 0.9, ο οποίος είναι ικανοποιητικός. Στην συνέχεια για τον έλεγχο ακρίβειας προσαρμογής του μοντέλου στο υπόλοιπο 75% των αναλύσεων, ο συντελεστής Root Mean Square Percentage of Errors (RMSPE %) υπολογίστηκε ίσος με 12.7%, ο οποίος δείχνει ικανοποιητική ακρίβεια του μοντέλου κυρίως για τις τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα πλαίσια του σχεδιασμού ενός οδοστρώματος. Δύναται να επιταχύνει την διαδικασία εκτίμησης των κρίσιμων παραμορφώσεων για διάφορους συνδυασμούς παχών και υλικών. Διαθέτει επίσης δυνατότητες επέκτασης της εφαρμογής του στο πλαίσιο αξιολόγησης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος.
- Ωστόσο, η μη ακριβής προσαρμογή του μοντέλου αυτού στα στοιχεία της ανάλυσης που προέκυψαν από την θεώρηση αξονικού φορτίου επί απλών

τροχών ανέδειξε την μεγάλη πολυπλοκότητα της διαδικασίας μοντελοποίησης των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Η μεγάλη διακύμανση των συνθηκών φόρτισης του οδοστρώματος σε συνδυασμό με τη διαφοροποίηση των υλικών αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών, αυξάνουν ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα των εντατικών αναλύσεων.

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επέκταση της παρούσας διερεύνησης λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον υλικά ασφαλτομίγματος με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.
- Εμπλουτισμός των διαθέσιμων στοιχείων για την περαιτέρω βελτίωση και βαθμονόμηση του μοντέλου πρόβλεψης των παραμορφώσεων ώστε να επαρκεί για επιπλέον υλικά, θερμοκρασίες, ταχύτητες και συνθήκες φόρτισης καθώς και αξιολόγηση της ανάγκης για ενδεχόμενο διαχωρισμό του ώστε να προσαρμόζεται ακριβέστερα στις επιμέρους κατηγορίες οδών.
- Επέκταση χρήσης του μοντέλου για την πρόβλεψη των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στα πλαίσια αξιολόγησης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος με θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε δύναται να περιορίσει ενδεχομένως την ανάγκη εκτεταμένης πυρηνοληψίας, που απαιτείται για τον προσδιορισμό του επιτόπου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Η λήψη πυρήνων είναι μια διαδικασία χρονοβόρα και καταστρεπτική για την δομή του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, η ύπαρξη ενός κατάλληλα βαθμονομημένου μοντέλου πρόβλεψης των ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων, ακόμη και για την περίπτωση ισχύος του για συγκεκριμένο οδικό άξονα, μπορεί να απλοποιήσει τη δημιουργία μια βάσης δεδομένων που είναι χρήσιμη για την συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε όλη την διάρκεια ζωής του.
- Διερεύνηση επίδρασης διάφορων ρεολογικών μοντέλων που υπάρχουν για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^* στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Λοΐζος Α., Πλατή Χ., (2019): Σημειώσεις για το μάθημα ειδικά θέματα οδοστρωμάτων. ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοΐζος Α., Πλατή Χ., (2018): Σημειώσεις για το μάθημα σχεδιασμός οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων. ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοΐζος Α., Πλατή Χ., (2019): Σημειώσεις για το μάθημα αξιολόγηση και συντήρηση οδοστρωμάτων. ΕΜΠ, Αθήνα.

A.C. Pronk (2003): Revival of the Huet-Sayegh Response Model, DWW-2003-29, RHED, Delft.

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

AASHTO T342-1, (2011): Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Official.

Ahmad M. Abu Abdo, (2017): Effects of dual versus super single truck tire on flexible pavement performance; A mechanistic approach. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (3): 4136-4141.

Ahmed A., Erlingsson S., (2016): Viscoelastic response modeling of pavement under moving load. Transportation Research Procedia 14. 748-757.

Al-Qadi I., Hernandez J. , Gamez A. , Ziyadi M. , Gungor O., Kang S., (2018): Impact of Wide-Base Tires on Pavements: A National Study. Transportation Research Record 1-11. Transportation Research Board, 2018.

Al-Qadi I.L., Wang H., Yoo P., Dessouky S., (2008): Dynamic Analysis and In Situ Validation of Perpetual Pavement Response to Vehicular Loading. Transportation Research Record, 2087(1), 29-39.

Burnos P., Rys P., (2017): The Effect of Flexible Pavement Mechanics on the Accuracy of Axle Load Sensors in Vehicle Weigh-in-Motion Systems. Sensors, vol.17, no.9, p.2053.

Chabot A., Chupin O., Deloffre L., Duhamel D., (2010): Viscoroute 2.0: a tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement, Road Materials and Pavement Design, Volume X, No X/2009, pp.227-250.

Cross S., Jakatimath Y., Sumesh (2007): Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures. Oklahoma State University Civil & Environmental Engineering.

Diaz L., Archilla A., (2013): From Testing to Design: An Easy Way to Use and Interpret the Results from the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). International Journal of Pavement Research and Technology, 6:5, 527-538.

Dougan C., Stephens J., Mahoney J., Hansen, (2003): E*-Dynamic modulus test protocol-Problems and solutions. University of Connecticut, Connecticut Transportation Institute.

Ebrahim A., El-Maaty A., (2017): Temperature Change Implications for Flexible Pavement Performance and Life. International Journal of Transportation Engineering and Technology. Vol. 3, No. 1, 1-11.

Elseifi M., Al-Qadi I., Yoo P., (2006): Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements. Journal of Engineering Mechanics, 132:2, 172-178.

Garcia G., Thompson M., (2007): HMA Dynamic Modulus Predictive Models- A Review, Illinois Center for Transportation. Research Report FHWA-ICT-07-005.

Huang Y.H., (2004): Pavement Analysis and Design, 2nd Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.

Kenis, W.J., (1977): Predictive Design Procedures - A Design Method for Flexible Pavements Using the VESYS Structural Subsystem, Proceedings, Forth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, 101-130.

Koohmishi M., (2013): Comparison of pavement layers responses with considering different models for asphalt concrete viscoelastic properties. Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. XXI, No.2. 15-20.

Leiva F. , Pérez E., Aguiar J., Loría L. (2017): Permanent deformation model for pavement condition assessment. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol 32 , N°1, 37-46.

Liao Y., (2007): Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its application to U.S. 30 perpetual pavement. PhD diss., Faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

Lundy J., Sandoval-Gill J., Brickman A., Paterson B., (2005): Asphalt Mix Characterization Using Dynamic Modulus and Aashtu Testing, Oregon Department of Transportation Research Unit and Federal Highway Administration.

Mejlun L., Judycki J., Dolzycki B., (2017): Comparison of elastic and viscoelastic analysis of asphalt at high temperature. *Procedia Engineering* 172, 746 – 753.

NCHRP (2004): Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix CC-3: Updated Traffic Frequency Calculation for Asphalt Layers.

Nilsson R., Hopman P, Isacsson U., (2002): Influence of Different Rheological Models on Predicted Pavement Responses in Flexible Pavements. Vol.3, No.2 , 117-149.

Olard F., Benedetto H.D., (2003): General '2S2PID' model and relation between the linear viscoelastic behavior of bituminous binders and mixes, *Road material and Pavement Design: An international Journal*,4, 185-229.

Ossa A., (2004): Deformation behavior of bitumen and bituminous mixes. PhD diss., Cambridge University, Engineering Department.

Pellinen T. K., Witczak M. W., Bonaquist R. F., 2002: "Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with NonLinear Least Squares Optimization". *Geotechnical Special Publication*, pp.83-101..

Shakiba M., Gamez A., Al-Qadi I.L., Little D.N., (2017): Introducing realistic tire–pavement contact stresses into Pavement Analysis using Nonlinear Damage Approach (PANDA),. *International Journal of Pavement Engineering*, 18:11, 1027-1038.

Siddharthan, R. (2000): Finite-layer approach to pavement response evaluation. Transportation research record: Journal of the transportation research board, 1709 (1), 43-49.

Stacks D., (2019): Pavement Manual. Texas Department of Transportation.

Underwood B.S, Ashouri M., Kim R., (2011): Effect on Dynamic Modulus Measurement Protocol on Predicted Pavement Performance. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol.80, 65-100.

Wang H., (2011): Analysis of tire-pavement interaction and pavement responses using a decoupled modeling approach.

Witczak M., Bari J., (2004): Development of a master curve (E^*) database for lime modified asphaltic mixtures.

Xu Q., Solaimanian M., (2009): Modeling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model, International Journal of Pavement Engineering, Vol.10 N.6, 401-422.

Yoder E., Witczak M., (2011): Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων, Δεύτερη Αμερικάνικη Έκδοση. Εκδόσεις Γκιούρδας.

Zuo G. (2003): Impacts of Environmental Factors on Flexible Pavements. PhD diss. , University of Tennessee.

