



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΟΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

Επιβλέπων: Λοΐζος Ανδρέας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτωρα ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Γκυρτή για την πολύτιμη βοήθεια του, τις συμβουλές του και το γενικότερο ενδιαφέρον του για την πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, για τη στήριξη που μου προσέφεραν το τελευταίο διάστημα.

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με έμφαση στις ασφαλικές στρώσεις. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου πειράματα καταστρεπτικά και μη, κατά την χρονική στιγμή όπου έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του οδοστρώματος. Χρησιμοποιήθηκαν τα μη καταστρεπτικά συστήματα του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων ΕΜΠ ενώ πραγματοποιήθηκαν και πυρηνοληψίες για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E^*) των ασφαλτομιγμάτων στο εργαστήριο. Παράλληλα, αξιοποιήθηκε και η θεωρητική κεντρική καμπύλη του E^* για το τυποποιημένο υλικό που είχε θεωρηθεί στη φάση σχεδιασμού. Οι συναφείς αναλύσεις εντατικής κατάστασης επικεντρώθηκαν στη σύγκριση των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και των κατακόρυφων επιφανειακών υποχωρήσεων του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά για τα ασφαλτομίγματα. Τα αποτελέσματα των συναφών αναλύσεων περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά: ασφαλτικό οδόστρωμα, αναλύσεις εντατικής κατάστασης, δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (E^*), ελαστική ανάλυση, ιξωδοελαστική ανάλυση.

Abstract

In the present thesis, the evaluation of the mechanical behavior of asphalt pavements was investigated focusing on the asphalt layers. To this end, destructive and non-destructive tests were carried out in the field, at the time shortly after pavement construction. The non-destructive systems (NDT) of the NTUA Laboratory of Pavement Engineering were used and cores were also extracted to determine the dynamic modulus (E^*) in the laboratory. At the same time, the theoretical dynamic modulus master curve of the standardized material considered in the design phase was also used. Analysis of the stress-strain state of the pavement focused on comparing the horizontal tensile strains at the bottom of asphalt layers and the vertical surface deflections, considering both elastic and viscoelastic behavior for the asphalt mixtures. The results of the related analysis are included in this thesis.

Keywords: asphalt pavement, strain analysis, dynamic modulus (E^*), elastic analysis, viscoelastic analysis.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή

1.1 Διατύπωση του προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο – Μεθοδολογία	3
1.3 Δομή εργασίας.....	4

2. Εύκαμπτο οδόστρωμα και ασφαλομίγματα

2.1 Τυπική διατομή	5
2.2 Στοιχεία φόρτισης και κρίσιμες θέσεις αστοχίας	7
2.3 Κύκλος ζωής οδοστρώματος.....	9
2.4 Μηχανική συμπεριφορά ασφαλομιγμάτων	11
2.4.1 Σύστημα FWD	14
2.4.1.1 Γενική περιγραφή.....	14
2.4.1.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου	17
2.4.1.3 Μειονεκτήματα μεθόδου	17
2.4.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός	18

3. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλομίγματος

3.1 Ορισμός.....	20
3.2 Κεντρικές καμπύλες	22
3.3 Τυπικές μέθοδοι προσδιορισμού.....	24
3.3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	25
3.3.2 Δοκιμής κάμψης δύο σημείων	26

4. Εργαλεία δομικής αξιολόγησης οδοστρώματος

4.1 Διαδικασία δομικής αξιολόγησης.....	30
4.2 Προσδιορισμός εντατικής κατάστασης	30
4.2.1 Θεωρία συστήματος επάλληλων ελαστικών στρώσεων.....	30
4.2.2 Ανάγκη διεύρυνσης μεθόδων και εργαλείων υπολογισμού	34
4.2.3 Μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς	35

5. Ερευνητική διαδικασία

5.1 Καθορισμός οδοστρώματος μελέτης.....	38
5.2 Στοιχεία σχεδιασμού πειραματικού οδοστρώματος	39
5.2.1 Κριτήρια σχεδιασμού	40
5.3 Άντληση πειραματικών στοιχείων από τη βάση δεδομένων	42
5.3.1 Περιγραφή επιτόπου πειράματος	43

5.3.2 Περιγραφή εργαστηριακού πειράματος.....	44
5.3.3 Σύνοψη στοιχείων προς περαιτέρω ανάλυση	45
5.4 Αναλύσεις εντατικής κατάστασης	48
5.4.1 Λογισμικό 3D-Move analysis	48
5.4.2 Είδη αναλύσεων	52
6. Αποτελέσματα	
6.1 Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης με βάση τα στοιχεία που αφορούν στο πεδίο	54
6.1.1 Κεντρικές καμπύλες.....	54
6.1.2 Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις.....	57
6.1.3 Επιφανειακές υποχωρήσεις.....	61
6.2 Επίδραση της μεθόδου προσδιορισμού του E^* στην ιξωδοελαστική ανάλυση.....	63
6.2.1 Κεντρική καμπύλη τυποποιημένου υλικού	63
6.2.2 Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις.....	65
6.2.3 Επιφανειακές υποχωρήσεις.....	68
6.3 Συνολική επισκόπηση παραμορφώσεων και υποχωρήσεων	70
7. Συμπεράσματα	72
8. Βιβλιογραφία	75

1.Εισαγωγή

1.1 Διατύπωση του προβλήματος

Είναι γνωστό ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός εύκαμπτου οδοστρώματος επηρεάζονται από την κυκλοφορία και τις καιρικές συνθήκες και συνέπεια τούτων επηρεάζεται και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του. Το στοιχείο αυτό ενδέχεται να σχετίζεται με (α) την ικανότητα του οδοστρώματος να φέρει με ασφάλεια τα αξονικά φορτία της κυκλοφορίας, στοιχείο που συνδέεται με τη φέρουσα ικανότητά του, (β) τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που σχετίζονται με την προσφερόμενη ποιότητα κύλισης, και (γ) τα δύο παραπάνω.

Εστιάζοντας, στα θέματα φέρουσας ικανότητας, η συμβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους υλικών καθώς και του συνόλου του οδοστρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας παρουσιάζονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Αναφορικά με την πρώτη, το ασφαλτόμιγμα θα πρέπει να έχει επαρκή αντοχή έναντι εφελκυστικών παραμορφώσεων, ώστε αυτό να μην αστοχήσει σε κόπωση αλλά και να εξασφαλίζει επαρκή απομείωση των εντατικών μεγεθών που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Ως εκ τούτου, απαραίτητη είναι η γνώση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ζωής του για την ορθή διενέργεια δομικής αξιολόγησης στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησής του.

Η συνήθης πρακτική για τη δομική αξιολόγηση οδοστρώματος περιλαμβάνει ανάλυση σε επιτόπου στοιχεία συλλογής με μη καταστρεπτικές δομικές (Non Destructive Tests - NDT), οι οποίες είναι πιο δημοφιλείς διότι δεν καταστρέφουν τη δομή και την ομοιογένεια των στρώσεων του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιούνται μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD) και στοιχεία στρωματογραφίας (πάχη). Τα στοιχεία αυτά τροφοδοτούν τις διαδικασίες ανάστροφου υπολογισμού προκειμένου να εκτιμηθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και να υπολογιστούν εν συνεχεία τα εντατικά μεγέθη. Η συνηθέστερη θεώρηση στην παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνει παραδοχή για γραμμικά ελαστικά υλικά.

Όμως, έχει αποδειχθεί από έρευνες ότι η συμπεριφορά των ασφαλομιγμάτων απέχει από τη θεωρία ελαστικότητας διότι το ασφαλομίγμα συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά, δηλαδή η συμπεριφορά του εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης. Επομένως, αντί του συμβατικού μέτρου ελαστικότητας, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλομίγματος εκφράζεται από το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (E^*), το οποίο προσδιορίζεται εργαστηριακά από πληθώρα δοκιμών. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εισέρχεται στην αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς υφιστάμενων οδοστρωμάτων η θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για τα ασφαλομίγματα. Κατά συνέπεια, μπορούν να ληφθούν υπόψη στο πλαίσιο της ανάλυσης περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, καθώς και κυκλοφοριακοί παράγοντες που αφορούν στην ταχύτητα, η οποία συνδέεται με τη συχνότητα φόρτισης. Για την υλοποίηση της ιξωδοελαστικής ανάλυσης είναι απαραίτητη η λήψη πυρήνων αλλά και χρονοβόρες εργαστηριακές δοκιμές που ενδέχεται να μην είναι δημοφιλείς, ιδιαίτερα στο πλαίσιο δομικής αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

Ωστόσο, η θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για τα ασφαλομίγματα ενδέχεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα των εντατικών αναλύσεων. Περαιτέρω, τυχόν διαφοροποίηση στα αποτελέσματα εντατικής κατάστασης αναμένεται να έχει κάποια επίδραση στο πλαίσιο αξιολόγησης οδοστρωμάτων και άρα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων με στόχο τη διαχείριση της συντήρησής του. Τα παραπάνω αποκτούν ιδιαίτερο νόημα όταν πρόκειται να αξιολογηθεί η αρχική κατάσταση του οδοστρώματος, δηλαδή αμέσως μετά την κατασκευή (αυτό το χρονικό σημείο μπορεί να αναφέρεται απλοποιητικά ως σημείο 0). Στο σημείο 0, η διαθέσιμη πληροφορία θα επηρεάσει την εξέλιξη της μετέπειτα συμπεριφοράς του οδοστρώματος στο πλαίσιο δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων για την παρακολούθησή του. Συνεπώς, έγκειται στην κρίση του μηχανικού να ελέγξει τα αποτελέσματα των επιμέρους μεθόδων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων.

1.2 Αντικείμενο – Μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- Η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στις ασφαλικές στρώσεις, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά εργαλεία ανάλυσης και παραδοχές για τη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλομιγμάτων. Στην διενέργεια εντατικών αναλύσεων δόθηκε έμφαση στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην κατακόρυφη επιφανειακή υποχώρηση του οδοστρώματος.
- Ακόμη διερευνάται η τυχόν επιρροή της μεθόδου προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E^*) στα αποτελέσματα της ιξωδοελαστικής ανάλυσης.

Σημειώνεται, ότι για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης, πραγματοποιήθηκε καταρχήν μια βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τη μηχανική συμπεριφορά οδοστρωμάτων και ασφαλομιγμάτων βάσει επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών. Επίσης, αξιοποιήθηκαν στοιχεία συλλογής από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ τα οποία αφορούσαν σε διενέργεια NDT δοκιμών και πυρηνοληψιών σε νέο πειραματικό οδόστρωμα, αμέσως μετά την κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα αξιοποιήθηκαν στοιχεία στρωματογραφίας, στοιχεία υποχωρήσεων του οδοστρώματος και μηχανικών χαρακτηριστικών (που προέκυψαν από διαδικασίες ανάστροφου υπολογισμού) και στοιχεία για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^* των ασφαλομιγμάτων των πυρήνων. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν και οι θεωρητικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το τυποποιημένο υλικό που είχε θεωρηθεί στη φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος βάσει μιας διεθνώς αναγνωρισμένης μεθόδου.

1.3 Δομή εργασίας

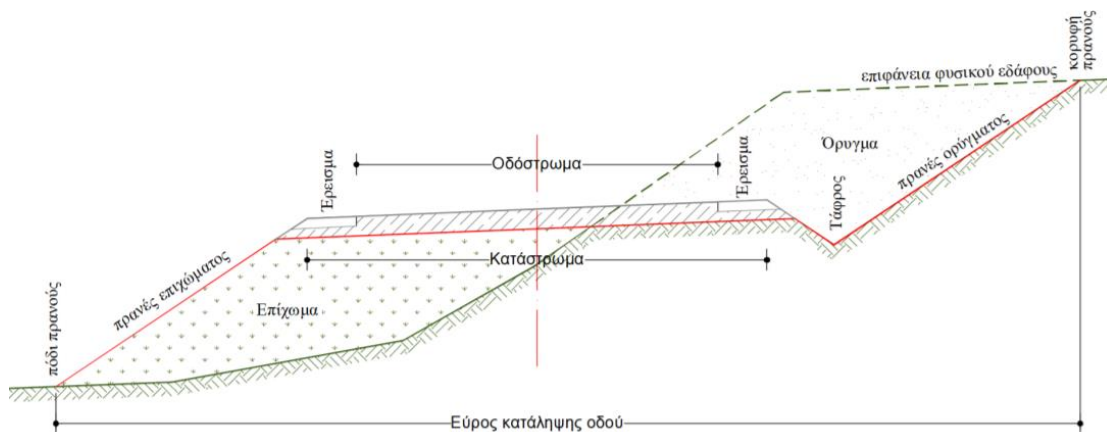
Η παρούσα εργασία συμπεριλαμβανομένου του παρόντος περιλαμβάνει επτά κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα:

- Το 2^ο κεφάλαιο αφορά στις βασικές αρχές που διέπουν το σχεδιασμό και την ανάλυση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και στις επιτόπου μεθόδους αξιολόγησης της μηχανικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων με έμφαση στα ασφατομίγματα.
- Το 3^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασφατομιγμάτων και ειδικότερα στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθώς και σε τυπικές μεθόδους προσδιορισμού του.
- Το 4^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στα εργαλεία δομικής αξιολόγησης και ανάλυσης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων με θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφατομιγμάτων.
- Το 5^ο κεφάλαιο περιγράφει την ερευνητική διαδικασία που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με την ανάλυση στοιχείων συλλογής από επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές σε ασφατομίγματα πειραματικού οδοστρώματος.
- Το 6^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας με παράλληλο σχολιασμό.
- Στο 7^ο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Τέλος, ακολουθεί η Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

2. Εύκαμπτο οδόστρωμα και ασφαλτομίγματα

2.1 Τυπική διατομή

Το φυσικό έδαφος είναι δύσκολο να φέρει τα φορτία της κυκλοφορίας των οχημάτων χωρίς να υποστεί σημαντική παραμόρφωση. Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή μιας υποδομής που θα αποτελείται από πολλαπλές επάλληλες στρώσεις με υλικά ανώτερης ποιότητας, οι οποίες θα απομειώνουν σημαντικά το μέγεθος των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται από αυτά τα φορτία. Το σύνολο των επάλληλων στρώσεων συγκροτούν το οδόστρωμα. Το οδόστρωμα συνιστά μια πολυστρωματική κατασκευή η οποία εδράζεται είτε στο έδαφος είτε σε μια στρώση επιχώματος (εικόνα 2.1). Η τελική στρώση του εδάφους η οποία εκτός από την απαιτούμενη γεωμετρική διαμόρφωση έχει υποστεί και την απαιτούμενη συμπίκνωση ώστε να μπορεί να δεχθεί τα φορτία κυκλοφορίας αποτελεί την στρώση έδρασης, η οποία θεμελιώνει το οδόστρωμα.

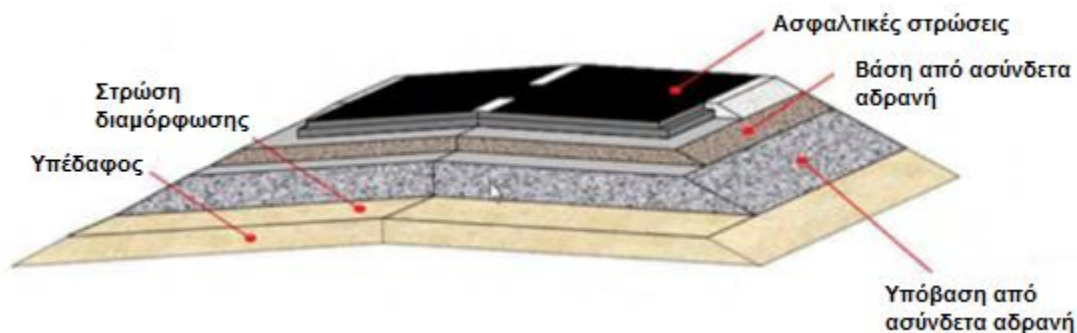


Εικόνα 2.1. Γαιώδες επίχωμα και όρυγμα

Το τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από την στρώση έδρασης, τις στρώσεις υπόβασης και βάσης από ασύνδετα υλικά (αμμοχάλικα), καθώς και τις ασφαλικές στρώσεις που αποτελούνται από ασφαλτομίγματα όπως στην εικόνα 2.2. Ο ρόλος του οδοστρώματος πέρα από την ασφαλή παραλαβή των φορτίων είναι η εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας κύλισης των οχημάτων για όλο το χρονικό διάστημα της λειτουργίας του. Για να επιτευχθούν αυτά πρέπει να εξασφαλίζονται τα παρακάτω:

- Η μεταβίβαση των φορτίων των οχημάτων προς το έδαφος, να οδηγεί σε βαθμιαία απομείωση των εντατικών μεγεθών, ώστε να αποτρέπονται τυχόν μόνιμες παραμορφώσεις στο υπέδαφος.
- Η δομική επάρκεια του οδοστρώματος, ως προς τις επαναλαμβανόμενες καταπονήσεις από την κυκλοφορία και το περιβάλλον, να είναι επαρκής για την αποφυγή ρηγματώσεων, παραμορφώσεων και αποφλοιώσεων.
- Η προστασία του εδάφους θεμελίωσης του οδοστρώματος από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος (κλιματολογικές συνθήκες), οι οποίες θα προκαλέσουν απώλεια φέρουσας ικανότητας και μόνιμες παραμορφώσεις.
- Η διατήρηση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου επιπέδου αντισισθητικών χαρακτηριστικών της στρώσεως κύλισης (Παναγοπούλου, 2011).

Με το πέρασ των ετών και την εξέλιξη των υλικών έχουν καθοριστεί πολλοί τύποι οδοστρωμάτων τα οποία διαχωρίζονται ως προς τα χρησιμοποιούμενα υλικά και το είδος της κυκλοφοριακής φόρτισης που αναμένεται να εξυπηρετήσουν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το εύκαμπτο οδόστρωμα.



Εικόνα 2.2. Δομή τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος

Η στρώση έδρασης είναι η στρώση διαμόρφωσης του φυσικού εδάφους όπου εδράζεται το οδόστρωμα και ανάλογα με τις υπάρχουσες εδαφικές συνθήκες έχει πάχος είτε 50-70 εκ. αποτελούμενη από επιλεγμένο εδαφικό υλικό ή αμμοχάλικο, είτε 40-60 εκ. αποτελούμενη από μία ή δύο στρώσεις από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό.

Η υπόβαση είναι η στρώση πάνω από τη στρώση έδρασης και αποτελείται από θραυστά υλικά ικανοποιητικής αντοχής, τα χαρακτηριστικά των οποίων δεν είναι

απαραίτητο να έχουν τόσο υψηλές απαιτήσεις όσο τα υλικά των βάσεων. Σκοπός των στρώσεων υπόβασης είναι η κατασκευή ενός οδοστρώματος διατομής μεγάλου πάχους με σχετικά χαμηλό κόστος, καθώς επίσης και η διανομή των φορτίων κυκλοφορίας που παραλαμβάνει από την υπερκείμενη στρώση βάσης σε μεγαλύτερο πλάτος πριν μεταβιβαστούν στο έδαφος (ΕΑΡΑ, 2010).

Η βάση κατασκευάζεται μεταξύ της υπόβασης και των ασφαλικών στρώσεων. Στη στρώση αυτή χρησιμοποιούνται θραυστά αμμοχάλικα υψηλότερων απαιτήσεων ποιότητας, προκειμένου να αντέχουν στις μεγαλύτερες καταπονήσεις, να διανέμουν αποτελεσματικά και να μεταβιβάζουν τα κυκλοφοριακά και περιβαλλοντικά φορτία με τέτοιο τρόπο ώστε οι υποκείμενες στρώσεις να μην εκτίθενται σε υπερβολικές καταπονήσεις και πιέσεις (ΕΑΡΑ, 2010).

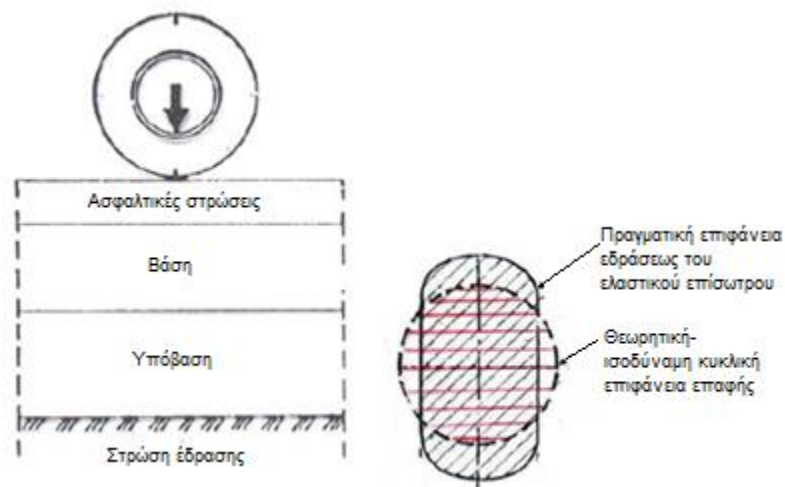
Οι ασφαλικές στρώσεις ενός οδοστρώματος περιλαμβάνουν, γενικά, την ασφαλική βάση (base course), την ισοπεδωτική στρώση, τη συνδετική στρώση (binder course) και την επιφανειακή στρώση (surface course), η οποία απαιτείται να είναι αντιολισθηρή σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές των έργων οδοστρωσίας (ΕΑΡΑ, 2010). Η ενοποιημένη ασφαλική στρώση αποτελεί το ανώτερο τμήμα του οδοστρώματος και πρέπει να αντέχει στον υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο χωρίς να εμφανίζει εκτεταμένες ρηγματώσεις και τροχοαυλακώσεις, ενώ παράλληλα πρέπει να παρέχει άνεση στο χρήστη και συγχρόνως να εξασφαλίζει επαρκή αντίσταση έναντι ολίσθησης. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν την άσφαλτο και τα αδρανή υλικά, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται κενά με αέρα. Προκειμένου να συνδεθούν τα αδρανή σε ένα συνεκτικό μίγμα, η άσφαλτος συνιστά το συνδετικό υλικό (Yoder et al., 1987).

2.2 Στοιχεία φόρτισης και κρίσιμες θέσεις αστοχίας

Για την διαστασιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι απαραίτητη η γνώση των αξονικών φορτίων που αναμένεται να καταπονήσουν το οδόστρωμα για την περίοδο σχεδιασμού του. Το είδος των αξονικών φορτίων ποικίλει από όχημα σε όχημα, καθώς επίσης και ο αριθμός των αξόνων και η διάταξη των ελαστικών. Το φορτίο του εκάστοτε οχήματος και η κατανομή του μέσω των αξόνων είναι άμεσα συνυφασμένα με την καταπόνηση του οδοστρώματος. Για τον πλήρη καθορισμό της μορφής του φορτίου που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος λαμβάνονται υπόψη παράγοντες

όπως το μέγεθος του φορτίου, η πίεση του ελαστικού του τροχού και η επιφάνεια επαφής τροχού οδοστρώματος.

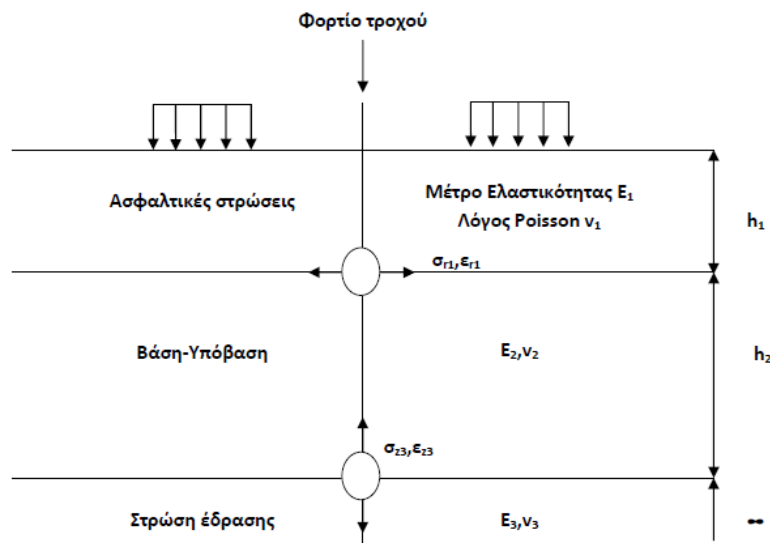
Όσον αφορά στο σχήμα της επιφάνειας επαφής, παρόλο που η ελλειπτική μορφή θεωρείται ως πιο ακριβής, μια τέτοια προσέγγιση θα δυσχέραινε τον υπολογισμό των φορτίων. Για το λόγο αυτό έχει επικρατήσει η θεώρηση κυκλικής φόρτισης (εικόνα 2.3). Τέλος γίνεται η παραδοχή πως οι πιέσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την έκταση της επιφάνειας επαφής (ομοιόμορφα κατανεμημένη σε κύκλο) όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Λοΐζος & Πλατή, 2018).



Εικόνα 2.3. Εξασκούμενη πίεση στην επιφάνεια του οδοστρώματος

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί ο προσδιορισμός των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η φέρουσα ικανότητά ενός οδοστρώματος, καθώς και η μελέτη της δομικής καταπόνησης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η δυνατότητα μεταβίβασης των φορτίων κυκλοφορίας. Ο προσδιορισμός των κρίσιμων θέσεων ενός οδοστρώματος αποτελεί κύριο τμήμα της αξιολόγησης της συμπεριφοράς του και της δομικής του κατάστασης έναντι των επιβαλλόμενων φορτίων. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Η πρώτη εντοπίζεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων όπου εμφανίζονται προβλήματα που αφορούν στην αντοχή σε ρηγμάτωση λόγω κοπώσεως του ασφαλτομίγματος, ενώ η δεύτερη στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, όπου το οδόστρωμα αστοχεί λόγω εκτεταμένων παραμορφώσεων της στρώσης έδρασης. Αντίστοιχα, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη των παραπάνω θέσεων είναι η οριζόντια εφελκυστική τάση και παραμόρφωση ($\sigma_{r1}, \epsilon_{r1}$) και η κατακόρυφη τάση και παραμόρφωση ($\sigma_{z3}, \epsilon_{z3}$) (εικόνα 2.4) (Λοΐζος & Πλατή, 2018). Ο υπολογισμός αυτών

των κρίσιμων εντατικών μεγεθών τροφοδοτεί τους νόμους κόπωσης των ασφατομιγμάτων και τους νόμους αστοχίας-παραμορφωσιμότητας της στρώσης έδρασης. Έτσι με βάση αυτούς τους νόμους συνδέονται οι τάσεις παραμορφώσεις με τον επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων για τις οποίες σχεδιάζεται το οδόστρωμα. Επομένως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ποιότητα των ανώτερων στρώσεων προκειμένου αφενός να παρέχουν υψηλή αντοχή και αφετέρου να εξασφαλίζουν την επαρκή απομείωση των εντατικών μεγεθών καθώς αυτές μεταβιβάζονται από τις ανώτερες στις κατώτερες στρώσεις.

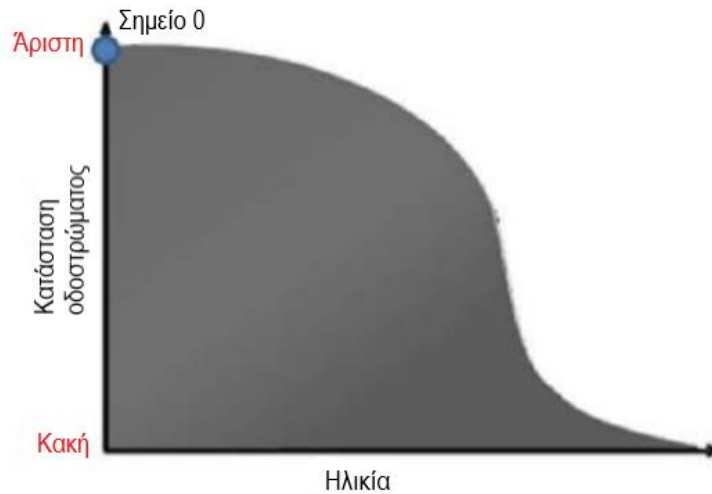


Εικόνα 2.4. Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Ειδικότερα, οι ασφατικές στρώσεις που έρχονται σε άμεση επαφή με τα φορτία κυκλοφορίας, καταπονούνται περισσότερο από τις υποκείμενες στρώσεις.

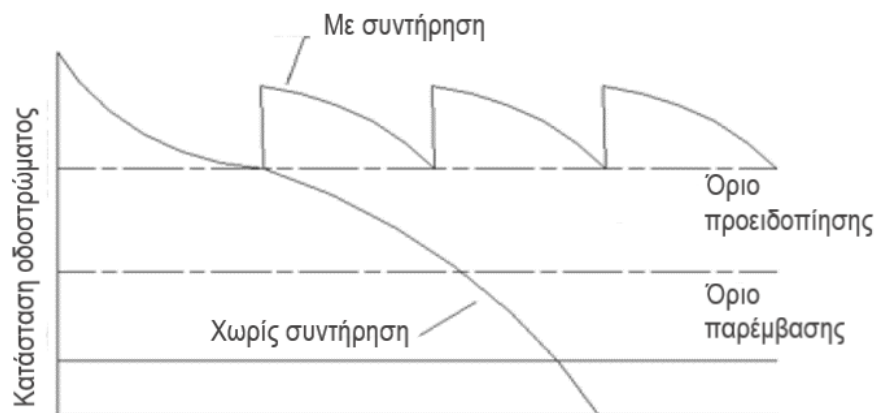
2.3 Κύκλος ζωής οδοστρώματος

Στο πλαίσιο του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος, η κατάσταση των οδοστρωμάτων διερευνάται μέσω της δομικής και της λειτουργικής αξιολόγησης (Yoder et al., 1975), καθώς με το πέρας των ετών τα οδοστρώματα υποβαθμίζονται λόγω των περιβαλλοντικών επιδράσεων αλλά και των κυκλοφοριακών φορτίων, και η αρχική κατάσταση ενός οδοστρώματος φθίνει, όπως προκύπτει από την καμπύλη της εικόνας 2.5.



Εικόνα 2.5. Προσδιορισμός σημείου μηδέν εύκαμπτου οδοστρώματος

Κατόπιν συστηματικής παρακολούθησης, απαιτείται ενδιάμεση παρέμβαση ώστε να παρέχεται ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος. Προς τούτο, πραγματοποιείται περιοδική αξιολόγηση της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος και στη συνέχεια προγραμματισμός ενεργειών επέμβασης και αποκατάστασης. Η διαχείριση της συντήρησης ενός οδοστρώματος έχει σκοπό αφενός τη διασφάλιση της αρχικά προβλεπόμενης διάρκειας ζωής του οδοστρώματος με τις κλασικές μεθόδους βαριάς συντήρησης/αποκατάστασης και αφετέρου τη διενέργεια προληπτικής και περιοδικής συντήρησης με στόχο την επέκταση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος πέραν του χρόνου που αντιστοιχεί στον αρχικό σχεδιασμό, όπως προκύπτει από την εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6. Κύκλος ζωής οδοστρώματος

Υπό το πρίσμα αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι τα οδοστρώματα συνεχίζουν να λειτουργούν ακόμη και μετά το πέρας του αρχικού σχεδιασμού τους. Γίνεται φανερό πως η διατήρηση του οδοστρώματος σε ένα καλό επίπεδο εξυπηρέτησης επιτυγχάνεται μέσω της περιοδικής παρακολούθησής του και της προληπτικής συντήρησής του. Με τον όρο συντήρηση νοείται το σύνολο των εργασιών που έχουν σκοπό την διατήρηση του οδοστρώματος, όσο το δυνατόν πλησιέστερα, στην αρχική του κατάσταση. Οι συναφείς εργασίες ενδέχεται να περιλαμβάνουν αποκατάσταση επιφανειακών φθορών, συστηματική και έγκαιρη σφράγιση ρωγμών, τοπική εξυγίανση (μπάλωμα), καθαρισμός επιφάνειας, ανανέωση διαγραμμίσεων κτλ (Νικολαΐδης, 2002).

Γίνεται αντιληπτό ότι για την ορθολογικότερη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων, τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής σκοπιάς, είναι απαραίτητη η γνώση της εξέλιξης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος με το πέρασμα του χρόνου. Προς τούτο, ιδιαίτερη σημασία αποκτά η γνώση της αρχικής κατάστασης του οδοστρώματος, δηλαδή στο σημείο μηδέν. Όπως προκύπτει από την εικόνα 2.5, το σημείο 0 της καμπύλης αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $t=0$, δηλαδή αφορά στο χρόνο αμέσως μετά την κατασκευή ενός νέου οδοστρώματος και πριν αυτό δοθεί στην κυκλοφορία, όπου η κατάσταση του είναι άριστη. Στοιχεία που αφορούν στην αρχική κατάσταση του οδοστρώματος (τόσο της δομικής όσο και της λειτουργικής) συμβάλλουν αφενός στην αξιολόγηση της ανάγκης επανασχεδιασμού του οδοστρώματος, σε περίπτωση που δεν πληρούνται οι δομικές απαιτήσεις της μελέτης σχεδιασμού και αφετέρου στη διαμόρφωση μιας βάσης δεδομένων που θα είναι χρήσιμη για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του και τη διαχείριση της συντήρησής του (δομικής και λειτουργικής).

2.4 Μηχανική συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών στις ασφαλικές στρώσεις είναι καθοριστικής σημασίας τόσο κατά το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων όσο και κατά την αξιολόγηση συμπεριφοράς υφιστάμενων οδοστρωμάτων, εφόσον τα ασφαλτομίγματα πρέπει να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα για το οδόστρωμα. Κατά συνέπεια, η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων αποκτά βαρύνουσα σημασία ειδικότερα στα υφιστάμενα οδοστρώματα είτε η αξιολόγηση λαμβάνει χώρα στο σημείο μηδέν είτε σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του

οδοστρώματος. Ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων γίνεται τόσο σε κλίμακα πεδίου (δηλαδή επιτόπου), όσο σε κλίμακα εργαστηρίου.

Ο επιτόπου προσδιορισμός της συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιείται με μια σειρά από συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών αλλά και με δειγματοληπτικούς ελέγχους με την βοήθεια πυρήνων όπως στην εικόνα 2.7, από το υφιστάμενο οδόστρωμα (Ευαγγελίδης κ.α., 2004).



Εικόνα 2.7. Πυρηνοληψία υφιστάμενου οδοστρώματος

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι πλεονεκτούν έναντι των παραδοσιακών καταστρεπτικών μεθόδων, καθώς η λήψη πυρήνων που είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος αφενός καταστρέφει την δομή και την ομοιογένεια του οδοστρώματος και αφετέρου παρέχει σημειακά αποτελέσματα. Αντίθετα τα μη καταστρεπτικά συστήματα δίνουν την δυνατότητα μιας πιο σφαιρικής άποψης καθώς παρέχουν αποτελέσματα σε μεγαλύτερο εύρος του υπό εξέταση οδοστρώματος.

Τα μη καταστρεπτικά συστήματα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το είδος επιβολής του φορτίου στην επιφάνεια του υφιστάμενου οδοστρώματος (στατικό ή δυναμικό) και την μεθοδολογία καταγραφής των μετρήσεων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που επιβάλλουν στατικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν τη μέγιστη ελαστική υποχώρηση. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται σε όλο το μήκος της οδού σε συγκεκριμένες αποστάσεις. Ενδεικτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ, περιλαμβάνουν το Deflectograph (εικόνα 2.8), το Dynaflex, κ.α..



Εικόνα 2.8. Σύστημα Deflectograph

Έπειτα χρησιμοποιείται το σύστημα παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος ελαφρού βάρους (Light Falling Weight Deflectometer- LFWD) όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.9 το οποίο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στον έλεγχο κατασκευής των ασύνδετων στρώσεων.



Εικόνα 2.9. Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος ελαφρού βάρους (LFWD)



Εικόνα 2.10. Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)

Το πλέον σύγχρονο σύστημα παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer-FWD) το οποίο φαίνεται στην εικόνα 2.10. Η ακριβής λειτουργία του συστήματος αυτού θα αναλυθεί αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.

2.4.1 Σύστημα FWD

2.4.1.1 Γενική περιγραφή

Το σύστημα FWD χρησιμοποιείται από την δεκαετία του 80 σύμφωνα με τις Εθνικές Ακαδημίες Επιστημών του Πανεπιστημίου της Ουάσιγκτον. Το FWD χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των παραμορφώσεων του οδοστρώματος υπό μορφή υποχωρήσεων. Συγκεκριμένα καταγράφει τις ελαστικές υποχωρήσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος ως απόκριση στην επιβολή ενός παλμικού φορτίου που προσομοιάζει το φορτίο ενός κινούμενου τροχού βαρέως οχήματος. Το σύστημα FWD φαίνεται στην εικόνα 2.11.



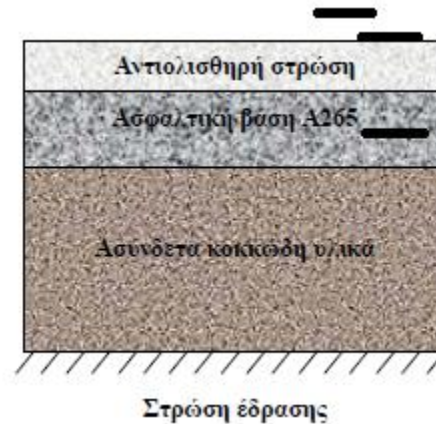
Εικόνα 2.11. Σύστημα καταγραφής FWD του ΕΜΠ

Τα δεδομένα που καταγράφονται από το FWD, σε συνδυασμό με τα πάχη των στρώσεων (που προκύπτουν είτε από πυρηνοληψίες είτε από αναλύσεις στοιχείων γεωραντάρ), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των επιτόπου μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών μέσω διαδικασιών ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Περαιτέρω, η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος επιτρέπει τη διενέργεια αναλύσεων εντατικής κατάστασης προκειμένου να εκτιμηθεί η αναμενόμενη διάρκεια ζωής (NCHRP, Alavi et al., 2008).

Ως προς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, το FWD απελευθερώνει ένα γνωστό βάρος που αφήνεται να πέσει από ένα δεδομένο ύψος πάνω σε μεταλλική πλάκα που εφάπτεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, παράγοντας ένα φορτίο στο οδόστρωμα

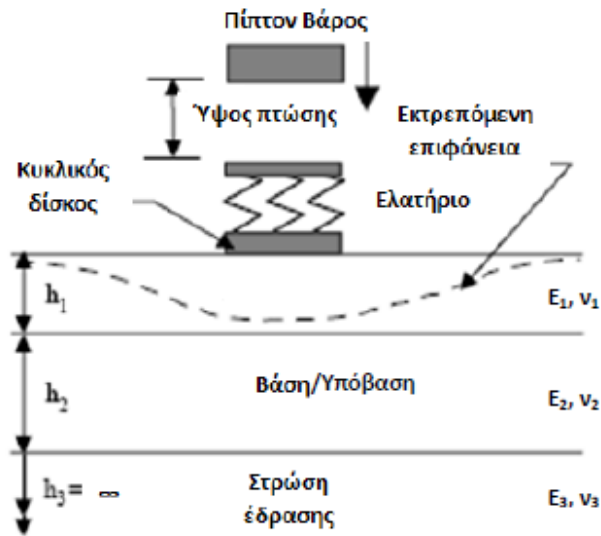
που είναι παρόμοιο σε μέγεθος και διάρκεια με το φορτίο του κινούμενου τροχού. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό με κατάλληλα γεώφωνα.

Οι ψευδό-ελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κ.α.) είναι δυνατόν να δώσουν μια πλήρη πληροφόρηση για τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται μετρήσεις, τις οποίες και καταγράφει το FWD: α) της θερμοκρασίας του αέρα και β) της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12.



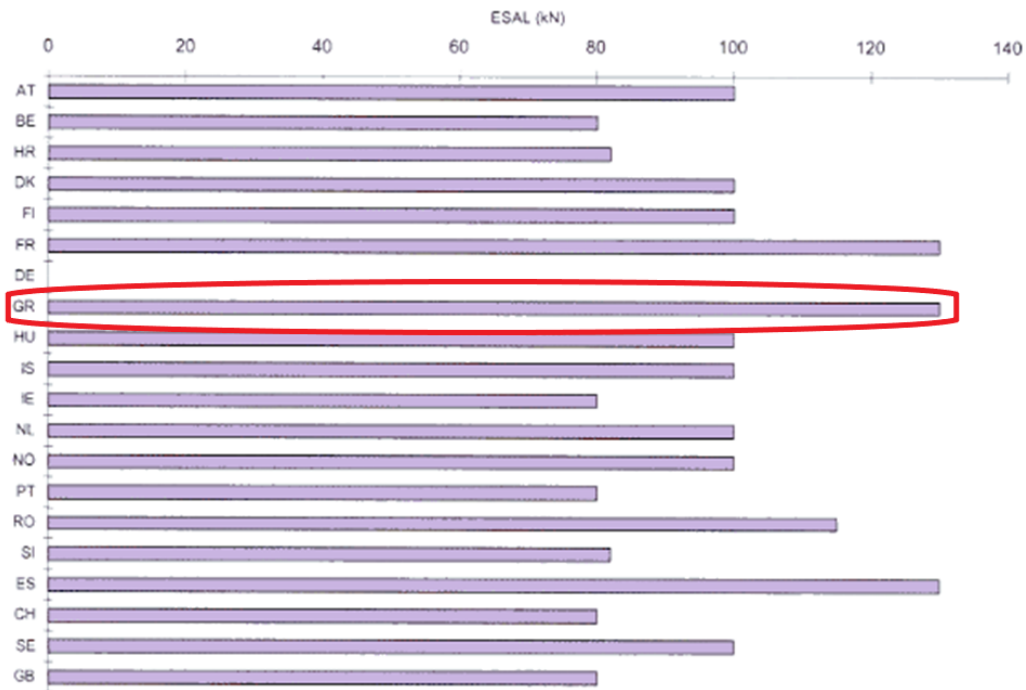
Εικόνα 2.12. Σημεία μέτρησης θερμοκρασιών δοκιμής FWD

Επιπλέον απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων, ο οποίος πραγματοποιείται με θερμόμετρο διανοίγοντας κατάλληλη οπή στο οδόστρωμα (εικόνα 2.13). Σημειώνεται πως οι μετρήσεις της θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθούν και σε άλλα βάθη ανάλογα με τις απαιτήσεις τόσο των μελετητών όσο και των αλγορίθμων που έχουν διεθνώς αναπτυχθεί για την αναγωγή των υποχωρήσεων ή των μέτρων ελαστικότητας σε μια θερμοκρασία αναφοράς (Λοϊζος & Πλατή, 2018).



Εικόνα 2.13. Μέτρηση δοκιμής FWD (Rakesh et al., 2006)

Το εύρος των αξονικών φορτίων σχεδιασμού που χρησιμοποιείται σήμερα στην Ευρώπη παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (εικόνα 2.14) (Guidelines for the Use of the Falling Weight 2000).



Εικόνα 2.14. Σχεδιασμός φορτίων αξόνων που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη (CC-GSW-04008.2000)



Εικόνα 2.15. Παραμορφώσιμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)

Το επίπεδο φορτίου που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των υποχωρήσεων είναι συνήθως είτε 40, 50, ή 65 kN (εικόνα 2.15) και η επιλογή του συνδέεται ενίοτε και με το φορτίο σχεδιασμού.

2.4.1.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος πλεονεκτεί καταρχήν λόγω της μη καταστρεπτικής φύσης της. Επίσης πλεονεκτεί στο γεγονός πως χρησιμοποιείται μικρός αριθμός ατόμων προκειμένου να πραγματοποιηθεί. Το εύρος του επιπέδου φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 7 και 120 kN. Είναι σχεδιασμένη για οδοστρώματα πολλαπλών χρήσεων με εφαρμογές που κυμαίνονται από μη ασφαλτοστρωμένες οδούς μέχρι και αεροδρόμια. Παρέχει ικανοποιητική επαναληψιμότητα, ικανότητα μέτρησης της μεταφοράς φορτίου εκατέρωθεν αρμών ή ρωγμών σε δύσκαμπτα οδοστρώματα, καθώς και ικανοποιητική παραγωγικότητα που ανέρχεται έως και 60 σημεία δοκιμής ανά ώρα. Είναι ιδανικό για μηχανιστικές και αναλυτικές προσεγγίσεις σχεδιασμού. Και τέλος υπάρχει ρεαλιστική προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης των τροχών (548_Dynatest_FWD_HWD).

2.4.1.3 Μειονεκτήματα μεθόδου

Παρόλα τα πλεονεκτήματα τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω το συγκεκριμένο σύστημα έχει ένα πολύ υψηλό αρχικό κόστος. Επιπλέον είναι επιτακτική η ανάγκη αποκλεισμού της κυκλοφορίας προκειμένου να πραγματοποιηθεί με ασφάλεια η δοκιμή.

Τέλος το ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα χρειάζεται περιοδική βαθμονόμηση, η οποία είναι μεν απαραίτητη για την αναπαραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ωστόσο αυξάνει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του μηχανήματος (548_Dynatest_FWD_HWD).

2.4.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Ο εργαστηριακός έλεγχος των ασφαλτομιγμάτων απαιτεί την λήψη δοκιμίων (πυρήνων) από το υφιστάμενο οδόστρωμα, τα οποία στην συνέχεια μεταφέρονται στο εργαστήριο όπως στην εικόνα 2.16 και υποβάλλονται σε κατάλληλες δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Αναλυτικές πληροφορίες για επιμέρους δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων παρέχονται στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.16. Πυρήνες ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο

Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η διαδικασία αυτή παρέχει σημειακή πληροφόρηση για την δομική κατάσταση του οδοστρώματος, παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες στην εφαρμογή, δεδομένου ότι η πυρηνοληψία είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα και απαιτεί τη διακοπή της κυκλοφορίας και τη λήψη ειδικών μέτρων ασφαλείας. Τέλος σημειώνεται πως με την παραπάνω διαδικασία, εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού δειγμάτων που συλλέγονται, προκύπτει συνήθως ένα ανεπαρκές στατιστικό δείγμα για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση (Λοΐζος & Πλατή, 2018).

Έχοντας ως στόχο τη σημαντική μείωση των παραδοσιακών μεθόδων οι μηχανικοί οδοστρωμάτων έδωσαν περισσότερη έμφαση στις μη καταστρεπτικές μεθόδους (NDT) για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων αφού τις τελευταίες δεκαετίες έχει εισαχθεί και ο όρος του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^* που ως θεμελιώδης παράμετρος των ασφαλομιγμάτων προσδιορίζεται εργαστηριακά.

3. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι μια βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων στην γραμμική ιξωδοελαστική περιοχή ενώ χρησιμοποιείται περαιτέρω στα μοντέλα μηχανικής απόκρισης για την εκτίμηση της εντατικής κατάστασης. Η δοκιμή προσδιορισμού υιοθετήθηκε ως η "Modulus Test of Choice" από το Ινστιτούτο Ασφάλτου στα τέλη της δεκαετίας του 1960 από τον Kallas, Shook και Witczak. Σε συνέχεια της δοκιμής ASTM στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μετονομάζεται σε ASTM D3496. Πιο πρόσφατα, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (E^*) έχει βελτιωθεί από τον Witczak και άλλους σε Κρατικό Πανεπιστήμιο της Αριζόνα (Dugan et al., 2003).

Τυπικά, μέσω του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας χαρακτηρίζεται μόνο η αρχική κατάσταση του μίγματος κατά τη φάση σχεδιασμού ή της παραγωγής. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι το μέτρο δυσκαμψίας της ασφατικής στρώσης ποικίλει κατά τη διάρκεια ζωής της καθώς το μείγμα παρουσιάζει κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και άλλες φυσικοχημικές μεταβολές (όπως οξειδωτική γήρανση) (Oshone et al., 2017).

3.1 Ορισμός

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος ορίζεται από την Ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 12697-26 ως "complex modulus". Ο όρος αυτός δεν έχει αποδοθεί ακόμα με ελληνικούς όρους. Η μετάφραση του όρου θα μπορούσε να είναι "δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος". Το σύνθετό μέτρο απόκρισης ασφαλτομίγματος είναι συνάρτηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του. Κατά την επιβολή ημιτονοειδούς μονοαξονικού θλιπτικού φορτίου σε χρόνο t , η τάση φόρτισης είναι της μορφής

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.1)$$

Και η προκύπτουσα παραμόρφωση της μορφής

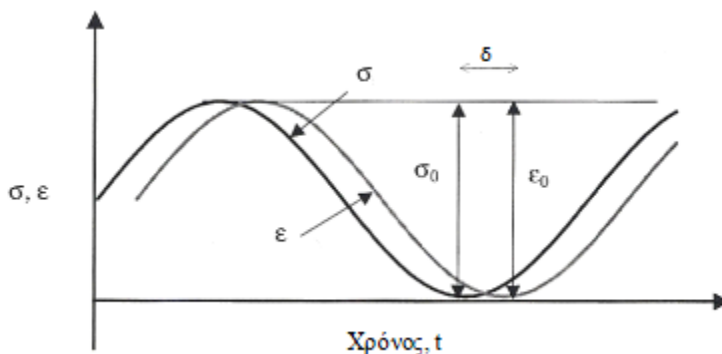
$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \quad (3.2)$$

Όπου:

ε_0 : η μέγιστη παραμόρφωση κατά την εφαρμογή της τάσης σ_0

ω : η γωνιακή ταχύτητα η οποία συνδέεται με την συχνότητα φόρτισης

δ : η γωνία υστέρησης της παραμόρφωσης σε σχέση με την τάση, που εκφράζει την καθυστέρηση εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης ως αποτέλεσμα της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του υλικού.



Εικόνα 3.1. Συνθήκες φόρτισης κατά τον ορισμό του δυναμικού μέτρου απόκρισης

Η γωνία υστέρησης που γίνεται εμφανής στο παραπάνω σχήμα, είναι η χρονική καθυστέρηση της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης από την επιβολή της μέγιστης τάσης (Huang et al., 1993).

Ο λόγος τάσης προς παραμόρφωση ορίζει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^* . Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ορίζεται σαν η απόλυτη τιμή του μιγαδικού μέτρου, το οποίο ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (3.3)$$

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει το E^* δίνεται στην εξίσωση

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos(\delta) + i \cdot \sin(\delta)) \quad (3.4)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αποτελείται από δύο διακριτά μέρη:

- το πραγματικό $E_1 = |E^*| \cdot \cos(\delta)$ (3.5)

- το φανταστικό $E_2 = |E^*| \cdot \sin(\delta)$ (3.6)

Το E_1 αποτελεί το ελαστικό μέρος και στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάται με τον όρο "storage modulus" ή "μέτρο αποθήκευσης". Ενώ το E_2 αποτελεί το ιξώδες μέρος και στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάται με τον όρο "loss modulus" ή "μέτρο απώλειας" (H.Di Benedetto et al.,2001). Σημειώνεται εδώ, ότι οι όροι "πραγματικό" και "φανταστικό" προέρχονται από τη μαθηματική ορολογία.

3.2 Κεντρικές καμπύλες

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας του ιξωδοελαστικού υλικού, ο ιξωδοελαστικός χαρακτήρας του ασφατομίγματος εκφράζεται μέσω της κύριας καμπύλης η οποία αντιστοιχεί σε μία θερμοκρασία αναφοράς ενώ λαμβάνει υπόψη την επαλληλία θερμοκρασίας και συχνότητας προκειμένου να είναι εφικτός ο προσδιορισμός του E^* για κάθε δυνατό συνδυασμό τους. Η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας περιγράφεται από ορισμένα μαθηματικά μοντέλα.

Ειδικότερα, το μαθηματικό μοντέλο της σιγμοειδούς συνάρτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και της γωνίας φάσης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων σε μια θερμοκρασία αναφοράς (Fonseca et al., 1996). Το μοντέλο αυτό προκύπτει από ένα μη γραμμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την κύρια καμπύλη στον οδηγό σχεδιασμού AASHTO 2002, ο τύπος του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω (National Cooperative Highway Research Program 2004).

$$\text{Log}(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma (\log f r)}} \quad (3.7)$$

Όπου:

E^* : το δυναμικό μέτρο του ασφατικού μίγματος

$\text{Log} f_r = \log f + \log a_T$: η μειωμένη συχνότητα που λαμβάνει υπόψη την πραγματική συχνότητα και τη θερμοκρασία

δ : ο λογάριθμος της ελάχιστης τιμής του δυναμικού μέτρου

α : ο λογάριθμος της μέγιστης τιμής δυναμικού συντελεστή

β και γ : οι παράμετροι που περιγράφουν τη σιγμοειδή συνάρτηση

$\text{Log } a(T) = t / t_r$: Ο συντελεστής μετατόπισης συνάρτηση της θερμοκρασίας

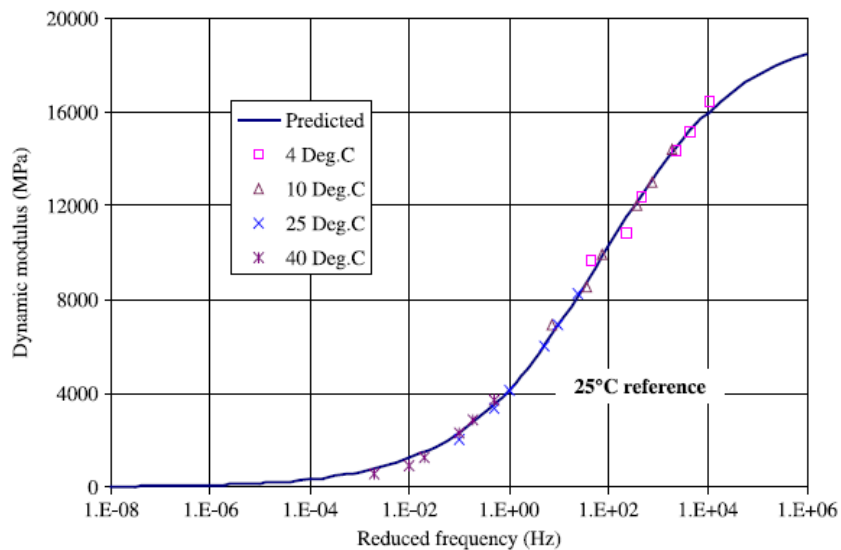
Όπου:

t : χρόνος φόρτωσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής

t_r : χρόνος φόρτωσης σε θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 70 ° C)

T : θερμοκρασία κύκλου φόρτωσης

Η κύρια καμπύλη του δυναμικού συντελεστή καθορίζεται σε διάφορες θερμοκρασίες (4, 10, 20, 25, 40°C) και συχνότητες δοκιμής (25, 15, 10, 5, 1, 0.1 Hz) (Bonaquist et al., 2005). Για να κατασκευαστεί η βασική καμπύλη του δυναμικού μέτρου οι καμπύλες μετατοπίζονται κατά μήκος του άξονα συχνοτήτων χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω η κύρια καμπύλη του δυναμικού συντελεστή και της γωνίας φάσης στη θερμοκρασία αναφοράς των 25 °C.



Εικόνα 3.2. Τυπική μορφή κεντρικής καμπύλης (Bonaquist, Christensen, 2005)

Χρησιμοποιώντας την κύρια καμπύλη, μπορεί να προκύψει το E^* για οποιονδήποτε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας μέσω του μεγέθους της μειωμένης συχνότητας (NCHRP 9-29 2004). Επίσης μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα από διαφορετικές δοκιμές, με διαφορετικές συνθήκες διεξαγωγής αυτών. Οι φυσικές παρατηρήσεις υποστηρίζουν τη χρήση μιας σιγμοειδούς συνάρτησης για την

περιγραφή της συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων. Στο άνω άκρο της η καμπύλη δεσμεύεται από τον περιορισμό της δυσκαμψίας του συνδετικού υλικού σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ στο κάτω άκρο η δυσκαμψία του μίγματος ρυθμίζεται από τις επιδράσεις των αδρανών. Η παράμετρος γ επηρεάζει την κλίση της συνάρτησης (δηλαδή το ρυθμό μεταβολής μεταξύ των ελάχιστων και των μέγιστων τιμών) και η παράμετρος β επηρεάζει την οριζόντια θέση του σημείου καμπής (Lundy et al., 2005).

Τέλος το βασικότερο πλεονέκτημα της γνώσης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων είναι ότι στη φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος μπορεί να ενσωματωθεί η ταχύτητα κυκλοφορίας των οχημάτων (συχνότητα φόρτισης).

3.3 Τυπικές μέθοδοι προσδιορισμού

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται κατά κανόνα εργαστηριακά με υλικό που έχει παρασκευαστεί και συμπυκνωθεί στο εργαστήριο στην κατάλληλη γεωμετρία που απαιτεί η εκάστοτε δοκιμή. Στο πέρασμα των ετών, διαφορετικοί εργαστηριακοί τρόποι μέτρησης αναπτύχθηκαν. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 12697-26 οι μέθοδοι υπολογισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, που περιλαμβάνουν δοκιμές κάμψης (σε τραπεζοειδή ή πρισματικά δοκίμια), δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (σε κυλινδρικά δοκίμια) και δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (σε κυλινδρικά δοκίμια).

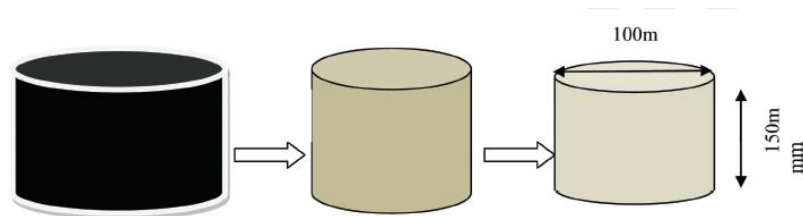
Στις παρακάτω υποενότητες δίνεται έμφαση σε δύο δοκιμές, τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό του E^* σε πυρήνες ασφαλομίγματος που εξήχθησαν από το πειραματικό οδόστρωμα. Η δεύτερη αφορά στην μέθοδο προσδιορισμού του E^* που χρησιμοποιήθηκε για το χαρακτηρισμό του ασφαλομίγματος στη φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από επιμέρους δοκιμές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό, εκτός από το μείγμα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν, από την διαδικασία κατασκευής των δειγμάτων αλλά και τον εξοπλισμό και τη διαδικασία διεξαγωγής των δοκιμών (Poulikakos et al., 2014).

3.3.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Σε δοκίμια ασφαλτομιγμάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης δεδομένου του ιξωδοελαστικού χαρακτήρα του ασφαλτομίγματος. Η φόρτιση που επιβάλλεται είναι δυναμική (παλμική ή ημιτονοειδούς μορφής) ώστε να προσομοιωθεί ο δυναμικός χαρακτήρας της φόρτισης του οδοστρώματος.

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ή πυρήνες που λήφθηκαν από πραγματικό οδόστρωμα στο πεδίο όπως στην εικόνα 3.3. Σε κάθε υπό έλεγχο δοκίμιο επικολλώνται δύο ατσάλινες κυκλικές πλάκες, μία σε κάθε πλευρά του. Οι πλάκες συνδέονται μέσω σφαιρικών συνδέσμων και ενός συστήματος επιβολής φορτίου με μια μηχανή θλίψης-εφελκυσμού (εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.3. Σκαρίφημα διαμόρφωσης δείγματος



Εικόνα 3.4. Συσκευή επιβολής μονο-αξονικής θλίψης

Στο δοκίμιο επιβάλλεται ημιτονοειδής φόρτιση και καταγράφεται η τάση και η παραμόρφωση που οδηγεί στον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Οι μετρήσεις γίνονται κατ' ελάχιστο σε τέσσερις θερμοκρασίες και σε κάθε θερμοκρασία ελέγχου κατ' ελάχιστο σε έξι συχνότητες φόρτισης. Η συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιείται για ένα προκαθορισμένο εύρος παραμορφώσεων στόχου, καθώς είναι αδύνατος ο ορισμός ενός συγκεκριμένου επιπέδου παραμορφώσης (Huang et al., 2016).

Θερμοκρασία (°C)	Συχνότητα (Hz)
Μονοαξονική θλίψη 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	25, 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.01

Εικόνα 3.5. Στοιχεία δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Σύμφωνα με τον ISSN 0169-9288 λόγω της φύσης της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη, το δείγμα παρουσιάζει ένα συνδυασμό αποκρίσεων. Η ρηγμάτωση πραγματοποιείται στο μεσαίο τμήμα των δοκιμίων, κοντά στο κέντρο. Ενώ όλες οι ρηγματώσεις είναι επίπεδες.

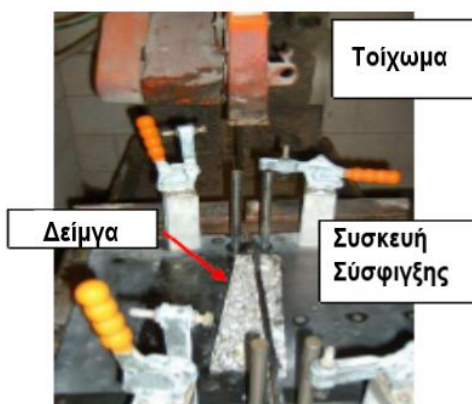
Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός πως η διαδικασία είναι απλή και εύκολη. Ακόμη, το εύρος συχνοτήτων είναι αρκετά μεγάλο δίνοντας την δυνατότητα πραγματοποίησης της δοκιμής σε πολύ χαμηλές συχνότητες φόρτισης (Huang et al., 2016).

3.3.2 Δοκιμής κάμψης δύο σημείων

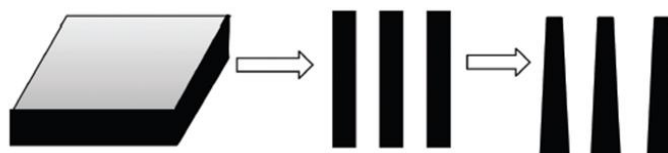
Η δοκιμή κάμψης δύο σημείων χρησιμοποιείται ευρέως για τη μέτρηση της αντοχής σε κόπωση και της αντοχής σε κάμψη για ασφαλικά υλικά μέσω τραπεζοειδών δειγμάτων. Εκτελείται με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικού εξοπλισμού. Αυτή η δοκιμή μπορεί να διεξάγεται σε δύο τρόπους ελέγχου. "Ελεγχόμενη καταπόνηση (μετατόπιση)" και "ελεγχόμενη τάση (φορτίο)". (Cocurullo et al., 2008).

Η χρήση της δοκιμής είναι συχνή σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες. Τα αποτελέσματα μιας διεργαστηριακής μελέτης του Rilem έδειξαν πως η κλασική προσέγγιση ελέγχου δυσκαμψίας και κόπωσης επηρεάζεται σημαντικά από τον τύπο δοκιμής και τη λειτουργία φόρτισης (ελεγχόμενη πίεση ή τάση), όπως παρουσιάστηκαν από τους Di Benedetto et al., 2004. Η δοκιμή πραγματοποιείται για την ταξινόμηση των ασφαλικών μιγμάτων με βάση το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Poulikakos et al., 2014).

Η διαδικασία διαμόρφωσης των τραπεζοειδών δειγμάτων συνίσταται στην τοποθέτηση των δειγμάτων κατά μήκος οριζόντιων επιπέδων (εικόνα 3.6). Τα δείγματα προκύπτουν από κατάλληλη τομή σε πλάκες ασφαλιμίγματος όπως προκύπτει από την εικόνα 3.7 (Maggiore, 2014).



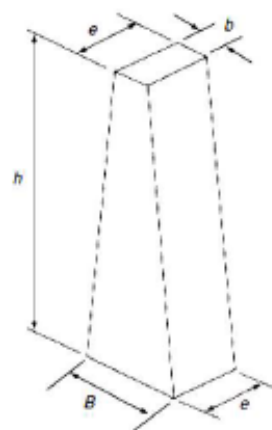
Εικόνα 3.6. Κοπή συμπαγούς ασφαλτομίγματος για διαμόρφωση τραπεζοειδών δοκιμίων



Εικόνα 3.7. Σκίτσο διαμόρφωσης δείγματος

Οι διαστάσεις του τραπεζοειδούς δείγματος προκύπτουν συνήθως με βάση τον τύπο του ασφαλτομίγματος και ειδικότερα το ονομαστικό μέγεθος του μέγιστου κόκκου των αδρανών του ασφαλτομίγματος (D) σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 12697-24: 2004, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα 3.8.

Διαστάσεις δείγματος	Τύπος μίγματος		
	$D \leq 14 \text{ mm}$	$14 < D \leq 20 \text{ mm}$	$20 < D \leq 40 \text{ mm}$
B	$56 \pm 1 \text{ mm}$	$70 \pm 1 \text{ mm}$	$70 \pm 1 \text{ mm}$
b	$25 \pm 1 \text{ mm}$	$25 \pm 1 \text{ mm}$	$25 \pm 1 \text{ mm}$
e	$25 \pm 1 \text{ mm}$	$25 \pm 1 \text{ mm}$	$50 \pm 1 \text{ mm}$
h	$250 \pm 1 \text{ mm}$	$250 \pm 1 \text{ mm}$	$250 \pm 1 \text{ mm}$



Εικόνα 3.8. Γεωμετρία τραπεζοειδών δειγμάτων

Τα τραπεζοειδή δείγματα συνδέονται με τις χαλύβδινες τελικές πλάκες χρησιμοποιώντας επωξειδική ρητίνη όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 3.9, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτησή τους στον εξοπλισμό της δοκιμής. Αυτή η λειτουργία εκτελείται σε ειδικό εξοπλισμό για την εξασφάλιση της σωστής τοποθέτησης του

δείγματος στη βάση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης ρητίνης, όπως φαίνεται στο σχήμα (Maggiore, 2014).



Εικόνα 3.9. Μηχανή για την συγκόλληση τραπεζοειδών δειγμάτων σε πλάκες

Η ρηγμάτωση συνήθως συμβαίνει στο 1/3 του ύψους του δείγματος μετρώντας από το κατώτατο σημείο, επειδή αυτή είναι η περιοχή στην οποία αναμένεται να αστοχήσει το δείγμα λόγω κάμψης όπως προκύπτει από το διάγραμμα της εικόνας 3.10 (Rowe, 1993, 1994).



Εικόνα 3.10. Ρηγμάτωση στο τραπεζοειδές δείγμα

	Θερμοκρασία (°C)	Επίπεδο τάσης (με)	Συχνότητα (Hz)
Two-point bend	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	100	40, 35, 30, 25, 20, 15, 10

Εικόνα 3.11. Στοιχεία δοκιμής κάμψης δυο σημείων

Αναφορικά με τη διενέργεια της δοκιμής κάμψης δύο σημείων, αυτή διεξάγεται συνήθως σε επίπεδο παραμόρφωσης ίσο με 100 με και σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 0 °C έως 40 °C. Η συχνότητα της δοκιμής δύο σημείων είναι γενικά υψηλή, από 10 έως 40 Hz (εικόνα 3.11). Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή ή η

συχνότητα υψηλή, η μάζα του ασφαλικού δείγματος είναι πιο άκαμπτη και ως εκ τούτου η παραμόρφωση και η διαταραχή του δείγματος είναι μικρότερη. Για το λόγο αυτό, η δοκιμή διεξάγεται από τη χαμηλή στην υψηλή θερμοκρασία και σε κάθε θερμοκρασία από την υψηλή στη χαμηλή συχνότητα (Huang et al., 2016).

Επίσης, αναφορικά με τον τρόπο φόρτισης της μεθόδου, ο συνδυασμός κάμψης και διάτμησης είναι πιο κοντά στην πραγματική κατάσταση των φορτίων που φέρει το οδόστρωμα υπό πραγματική κυκλοφορία. Έτσι ελέγχεται αυστηρά το επίπεδο της παραμόρφωσης σε αντίθεση με την προηγούμενη δοκιμή.

Από την άλλη πλευρά, σημαντικά μειονεκτήματα αφορούν τόσο στην προετοιμασία για την τραπεζοειδή δέσμη των δειγμάτων όσο και στην αφαίρεση τους αφού αυτές οι διαδικασίες παρουσιάζονται αρκετά περίπλοκες. Επίσης, στις πολύ χαμηλές συχνότητες η διεξαγωγή της δοκιμής είναι αδύνατη. Ο έλεγχος της παραμόρφωσης είναι χειροκίνητος, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και τη διάρκεια της διαδικασίας δοκιμής (Huang et al., 2016).

Ως προς τις συνθήκες φόρτισης, το δείγμα σε δοκιμή κάμψης δύο σημείων είναι κατά κύριο λόγο σε λειτουργία διάτμησης. Στον προσδιορισμό της αντοχής του ασφαλομίγματος, τα αδρανή τείνουν να διαχωρίζονται, εξασθενώντας την αλληλοσύνδεση του συνολικού σκελετού. Κατά συνέπεια, οι πιέσεις στο εσωτερικό του ασφαλικού μίγματος εξαρτώνται περισσότερο από τη συνοχή της ασφάλτου, έτσι η μηχανική ιδιότητα του επηρεάζεται περισσότερο από το ασφαλικό υλικό.

4. Εργαλεία δομικής αξιολόγησης οδοστρώματος

4.1 Διαδικασία δομικής αξιολόγησης

Η δομική αξιολόγηση επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του εύκαμπτου οδοστρώματος. Για τον προσδιορισμό της απαιτείται η συνεκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του οδοστρώματος, όπως τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, τα υλικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως το μέτρο Ελαστικότητας και ο λόγος Poisson (Λοϊζος & Πλατή, 2018). Η συνήθης πρακτική περιλαμβάνει συλλογή στοιχείων υποχωρήσεων με το FWD και στοιχείων στρωματογραφίας με το GPR. Τα στοιχεία αυτά τροφοδοτούν τις διαδικασίες ανάστροφου υπολογισμού για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Η διαδικασία αξιολόγησης μπορεί να σταματήσει στο σκέλος των μηχανικών χαρακτηριστικών (δηλαδή των μέτρων ελαστικότητας). Παρά ταύτα, περαιτέρω αναλύσεις εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος (δηλαδή των παραμορφώσεων) δίνουν πληρέστερη εικόνα αναφορικά με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, στοιχεία που καθορίζουν τη διαχείριση της συντήρησης του οδοστρώματος.

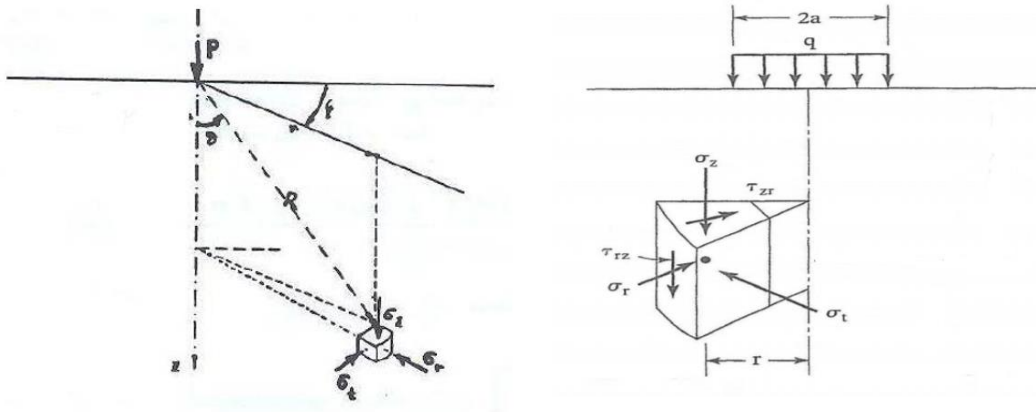
4.2 Προσδιορισμός εντατικής κατάστασης

Ο προσδιορισμός της εντατικής κατάστασης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφορετικών εργαλείων ανάλυσης. Τέτοια εργαλεία είναι η ελαστική και η ιξωδοελαστική ανάλυση. Η μηχανική απόκριση των οδοστρωμάτων έχει πρωταρχική σημασία στην ανάλυση και το σχεδιασμό. Για εύκαμπτα οδοστρώματα απαιτείται να προσδιοριστεί η οριζόντια παραμόρφωση εφελκυσμού στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και η κατακόρυφη παραμόρφωση θλίψης στην κορυφή της στρώσης έδρασης (Koohmishi, 2013).

4.2.1 Θεωρία συστήματος επάλληλων ελαστικών στρώσεων

Η ελαστική ανάλυση έχει τις ρίζες της στον ομοιογενή ημίχωρο του Boussinesq. Ένας γραμμικά ελαστικός ομογενής και ισότροπος ημίχωρος προσομοιώνει αρχικά την μηχανική συμπεριφορά οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων ο οποίος φορτίζεται στατικά με ένα συγκεντρωμένο φορτίο που δρα στην επιφάνειά του. Ο ελαστικός ημίχωρος

αναπτύσσεται σαν μια επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και ένα βάθος τα οποία εκτείνονται στο άπειρο. Έτσι το 1885 ο Boussinesq (εικόνα 4.1) προσπάθησε να επιλύσει το πρόβλημα απόκρισης ενός ελαστικού ημιχώρου σε ένα κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο αλλά και σε ομοιόμορφο κυκλικό φορτίου πάνω στην επιφάνειά του, εξαγάγοντας αναλυτικές εκφράσεις για μετατοπίσεις, τάσεις και παραμορφώσεις για κάθε σημείο του ημιχώρου (Huang, 2004).

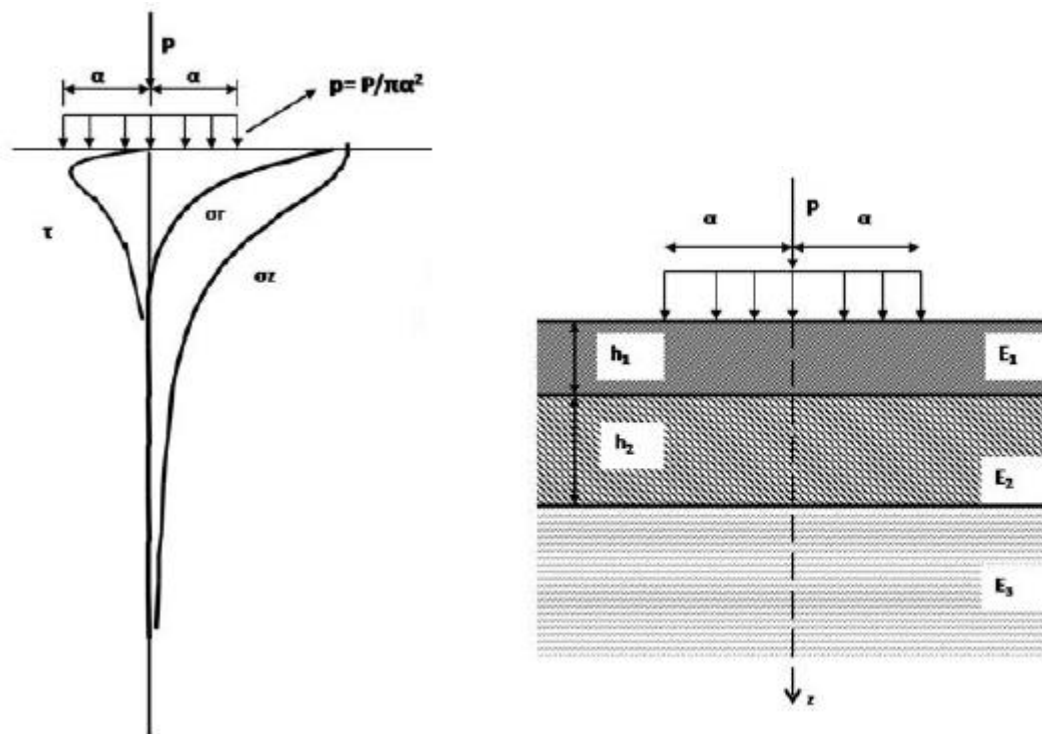


Εικόνα 4.1. Αναπτυσσόμενες τάσεις Boussinesq στην περίπτωση (α) συγκεντρωμένου, (β) κυκλικού φορτίου

Η μετάβαση από τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου (Boussinesq) στη θεωρία δύο ή τριών επάλληλων στρώσεων ενός οδοστρώματος βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή των γραμμικών ελαστικών μέσων (Burmister, 1943) όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από στρώσεις ώστε τα μέτρα ελαστικότητας να ελαττώνονται με το βάθος. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των τάσεων και των υποχωρήσεων στο υπέδαφος σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν σε ιδεατό ομοιογενές μέσο.

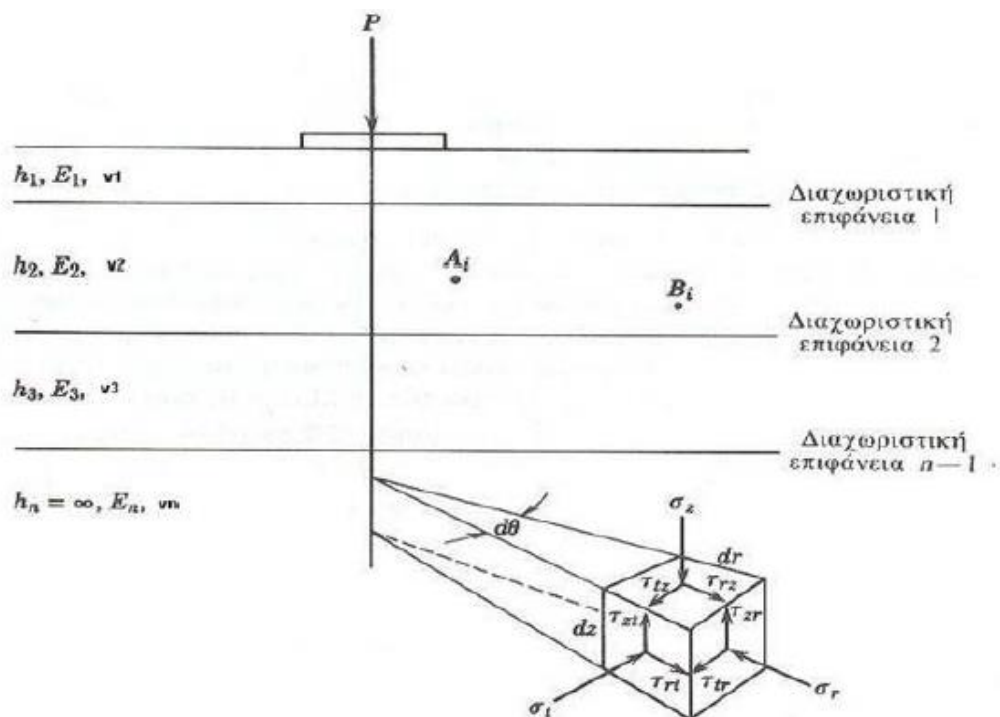
Έτσι, η θεωρία του Burmister έρχεται για να δώσει λύσεις του προβλήματος με συνθήκες που προσεγγίζουν τις πραγματικές. Κατά τη λύση του προβλήματος δυο στρώσεων γίνονται ορισμένες αναγκαίες παραδοχές σχετικά με τις οριακές συνθήκες συνέχειας. Τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά. Η επιφανειακή στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο. Η υποκείμενη στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο πλευρικά και κατακόρυφα.

Οι οριακές συνθήκες καθώς και οι συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση να μην υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός περιοχής φόρτισης (Λοΐζος & Πλατή, 2018).



Εικόνα 4.2. Μετάβαση από ημίχωρο (Boussinesq) σε πολύστρωμα (Burmister)

Στην εικόνα 4.3 απεικονίζεται η γενική μορφή ενός ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων.



Εικόνα 4.3. Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Γενικά, η αναλυτική λύση της κατάστασης παραμόρφωσης, στηρίζεται σε διαφορες παραδοχές, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

- Το υλικό κάθε στρώσης είναι ομογενές, δηλαδή η ιδότητα στο σημείο A_i είναι η ίδια όπως στο σημείο B_i .
- Κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος πέραν της κατώτερης στρώσης ενώ όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση.
- Το υλικό είναι ισότροπο, δηλαδή η ιδιότητα σε ένα σημείο είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό.
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή.
- Δεν υπάρχουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια.
- Οι λύσεις χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση: το λόγο Poisson ν και το μέτρο ελαστικότητας E .

Παρά την υπολογιστική ευκολία χρήσης της θεωρίας αυτής σε πληθώρα εφαρμογών, η θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς αποτελεί μία προσέγγιση η οποία συχνά έρχεται σε αντίθεση με αποτελέσματα που εξάγονται από εργαστηριακά πειράματα ή από οργανομετρήσεις εντατικής κατάστασης επιτόπου. Όσον αφορά στα ασφαλομίγματα, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν είναι γραμμικά ελαστικά υλικά και η

συμπεριφορά τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης. Γίνεται φανερό ότι απαιτείται η χρήση διαφορετικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς των υλικών για την επίτευξη πιο ρεαλιστικών αναλύσεων και αποτελεσμάτων απόκρισης που να είναι κοντά στα αντίστοιχα πειραματικά.

4.2.2 Ανάγκη διεύρυνσης μεθόδων και εργαλείων υπολογισμού

Στην πραγματικότητα ένα οδόστρωμα υπόκειται σε φορτία κινούμενων τροχών. Στην περιοχή επαφής ελαστικών-οδοστρώματος, τα ελαστικά παράγουν ανομοιόμορφες κατακόρυφες τάσεις επαφής καθώς και επιφανειακές εγκάρσιες και διαμήκεις εφαπτομενικές τάσεις. Οι τρισδιάστατες τάσεις επαφής έχουν ως αποτέλεσμα μία σύνθετη κατάσταση τάσης κοντά στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Έτσι είναι ένα ιξωδοελαστοπλαστικό υλικό που στην πράξη έχει και πλαστικές παραμορφώσεις. Ωστόσο, η πλαστική παραμόρφωση συχνά θεωρείται αμελητέα και αγνοείται εφόσον υπολογιστικά ο προσδιορισμός της είναι ιδιαίτερα επίπονος. Άλλωστε, τα περισσότερα υλικά, όπως και τα ασφαλικά συμπεριφέρονται σχεδόν γραμμικά σε ένα συγκεκριμένο εύρος τάσεων, παραμορφώσεων, χρόνου, θερμοκρασίας και μη γραμμικά για διαφορετικές τιμές των παραπάνω μεταβλητών. Οι αρχές της ιξωδοελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς για να εξηγήσουν τη μηχανική συμπεριφορά πολυμερών ή παρόμοιων υλικών με εκτενέστερες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί. Η χρησιμότητά τους αποτέλεσε ένα σημαντικό υπόβαθρο για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ασφάλτου και τη σύνδεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ασφαλτικού υλικού με το χρόνο και τη θερμοκρασία. Έτσι το ασφαλτικό σκυρόδεμα θεωρείται γραμμικά ιξωδοελαστικό υλικό (Garba, 2002). Η κατανόηση των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των ασφαλικών μιγμάτων είναι σημαντική τόσο για το σχεδιασμό όσο και την ανάλυση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Περαιτέρω εμβάθυνση στα θέματα ανάλυσης της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος συνιστά ο συνδυασμός ιξωδοελαστικής ανάλυσης του ασφαλομίγματος με παράλληλη θεώρηση των τρισδιάστατων συνθηκών στην επιφάνεια ελαστικού-οδοστρώματος (Shakiba et al., 2017).

Η χρήση της γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για τα ασφαλομίγματα του οδοστρώματος και της γραμμικής ελαστικής για τις υπόλοιπες στρώσεις, βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα (Elseifi et al., 2006, Yin et al., 2007). Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η επίδραση της χρήσης των ρεολογικών

Ιξωδοελαστικών μοντέλων μπορεί να είναι, πιο σημαντική για τις παραμορφώσεις στο κάτω τμήμα των ασφαλτικών στρώσεων από ότι για τις μετατοπίσεις του οδοστρώματος σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, η επιλογή ενός εργαλείου ανάλυσης αναμένεται να έχει επίδραση στο αποτέλεσμα των αναλύσεων εντατικής κατάστασης και περαιτέρω επίδραση στη διαδικασία λήψης αποφάσεων στο πλαίσιο της αξιολόγησης και της διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων.

4.2.3 Μοντέλα ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς

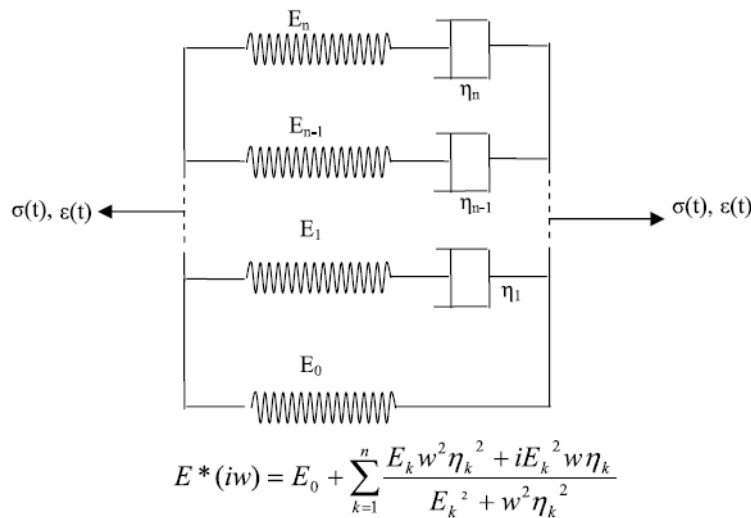
Διαφορετικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξετάσουν οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες ασφάλτου υπό σταθερή ή μεταβλητή τάση ή παραμόρφωση στο χρόνο. Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι ο τύπος του μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων ασφάλτου έχει σημαντική επίδραση στην εκτίμηση της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων που ενδέχεται να είναι σημαντικά διαφορετική σε σχέση με όταν λαμβάνεται υπόψη η ελαστική συμπεριφορά για όλες τις στρώσεις του οδοστρώματος (Koozhmishi, 2013). Ως εκ τούτου, συνίσταται προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων από διαφορετικά μοντέλα, τα οποία είναι χρήσιμα για μια καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς ενός ασφαλτομίγματος καθώς και για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των τάσεων-παραμορφώσεων (Yin et al., 2008).

Από συναφείς μελέτες σύγκρισης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, έχει αναφερθεί ότι η ευαισθησία των παραμορφώσεων στη θερμοκρασία είναι η μεγαλύτερη για το ελαστικό μοντέλο και η μικρότερη για τα ιξωδοελαστικά μοντέλα (Meljun et al., 2017). Από την άλλη, σε άλλες μελέτες έχει αναφερθεί ότι η απόκριση του οδοστρώματος από τη ιξωδοελαστική ανάλυση είναι υψηλότερη από ότι από τη ελαστική ανάλυση, ειδικά σε μεγάλη ταχύτητα και χαμηλή θερμοκρασία (Yoo et al., 2007). Παρά ταύτα, δεν υπάρχει σαφής τάση μεταξύ των δύο αναλύσεων δεδομένου του φάσματος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης στο οποίο εκτίθεται ένα οδόστρωμα.

Μεταξύ των υφιστάμενων μοντέλων, υπενθυμίζεται πως η σιγμοειδής καμπύλη που αναφέρθηκε στο 3^ο κεφάλαιο, αποτελεί τη βάση των υπολογισμών με το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί στο στάδιο της πειραματικής διερεύνησης. Περαιτέρω, υπάρχουν καταστατικά μοντέλα τα οποία αντανakλούν την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος χρησιμοποιώντας ελατήρια και αποσβεστήρες που εκφράζουν

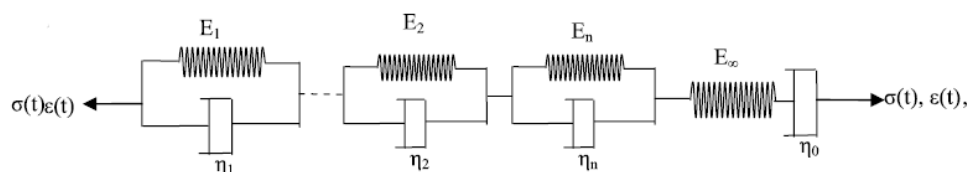
αντίστοιχα την ελαστική και ιξώδη συμπεριφορά του υλικού. Διαφορετικοί συνδυασμοί στη διάταξη των ελατηρίων και των αποσβεστήρων (διάταξη σε σειρά ή παράλληλη διάταξη) οδηγούν σε διαφορετικά μοντέλα. Ορισμένα από αυτά περιγράφονται ενδεικτικά ως ακολούθως.

Το μοντέλο του Maxwell αποτελείται από ένα γραμμικό ελατήριο και αποσβεστήρα, τα οποία συνδέονται σε σειρά όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4. Το γενικευμένο μοντέλο του Maxwell περιγράφεται από πολλά μοντέλα Maxwell συνδεδεμένα παράλληλα. Προβλέπει την τάση υπό σταθερά μεταβαλλόμενη παραμόρφωση για κάθε στοιχείο.



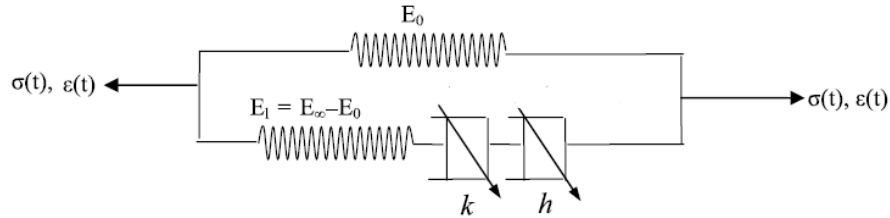
Εικόνα 4.4. Γενικευμένο μοντέλο Maxwell

Αντίστοιχα, το μοντέλο του Kelvin αποτελείται από ένα γραμμικό ελατήριο και αποσβεστήρα, τα οποία συνδέονται παράλληλα. Έτσι, το γενικευμένο μοντέλο του Kelvin, αποτελείται από πολλά μοντέλα Kelvin συνδεδεμένα σε σειρά που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5. Και τα δύο μοντέλα περιγράφουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά ενός ιξωδοελαστικού υλικού, ενώ η βαθμονόμησή τους γίνεται με βάση διαθέσιμες πειραματικές τιμές του E^* (Olard et al., 2003).



$$E^*(i\omega) = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{E_j + i\eta_j \omega} + \frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{i\eta_0 \omega} \right]^{-1}$$

Εικόνα 4.5. Γενικευμένο μοντέλο Kelvin



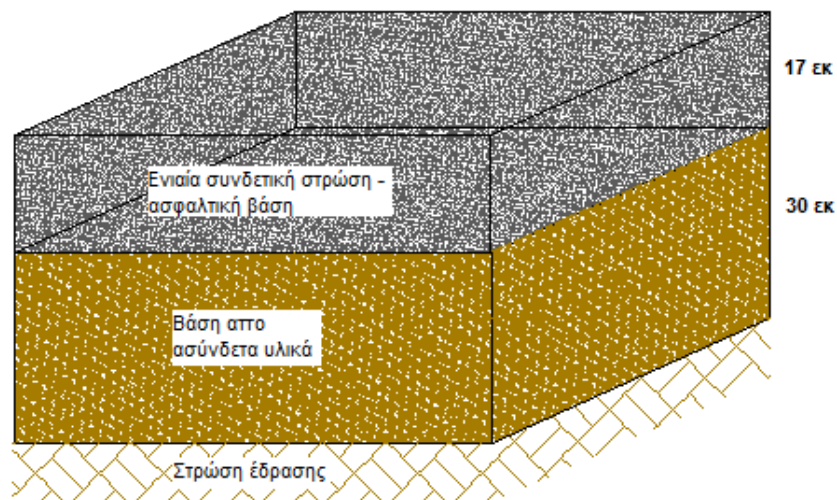
Εικόνα 4.6. Γενικευμένο μοντέλο Huet-Sayegh

Το γενικευμένο μοντέλο Huet-Sayegh (εικόνα 4.6) προτάθηκε από τον Huet (1963) για τον χαρακτηρισμό της ιξωδοελαστικής ιδιότητας του ασφαλτικού υλικού. Οι Olard and Benedetto (2003) επέκτειναν το μοντέλο προσθέτοντας ένα γραμμικό ελατήριο σε σειρά με δύο μεταβλητούς αποσβεστήρες όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.6 προκειμένου να υπολογιστεί η παραμόρφωση του ασφαλτικού συνδετικού υλικού του μείγματος. Διαπιστώνεται ότι το μοντέλο Huet -Sayegh θα μπορούσε να περιγράψει το δυναμικό μέτρο σωστά σε ένα ευρύ φάσμα μειωμένων συχνοτήτων (Χυ & Solaimanian, 2009).

5. Ερευνητική διαδικασία

5.1 Καθορισμός οδοστρώματος μελέτης

Η διατομή αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας αφορά σε οδόστρωμα το οποίο έχει σχεδιαστεί με την μέθοδο LCPC-SETRA που αναπτύχθηκε στη Γαλλία και χρησιμοποιείται διεθνώς. Για λόγους απλούστευσης θα αναφέρεται στο εξής ως Γαλλική μέθοδος σχεδιασμού. Όπως διαφαίνεται στο παρακάτω σκαρίφημα η διατομή αναφοράς αποτελείται από την στρώση έδρασης, την βάση από ασύνδετα υλικά καθώς και την ενιαία συνδετική στρώση - ασφαλτική βάση. Η χρονική στιγμή διεξαγωγής του πειράματος αντιστοιχεί στο σημείο μηδέν, δηλαδή αφορά στο χρόνο αμέσως μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής (LCPC-SETRA, 1994).



Εικόνα 5.1. Τυπική διατομή αναφοράς στο πειραματικό οδόστρωμα

Σημειώνεται επίσης ότι κατά τη διενέργεια του πειράματος δεν είχε διαστρωθεί η αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας του πειραματικού οδοστρώματος, κατά συνέπεια το πείραμα έλαβε χώρα στην επιφάνεια της ασφαλτικής συνδετικής στρώσης, σύμφωνα με το εικονιζόμενο σκαρίφημα. Τα πάχη που έχουν σημειωθεί στο σκαρίφημα αντιστοιχούν στα πάχη σχεδιασμού.

5.2 Στοιχεία σχεδιασμού πειραματικού οδοστρώματος

Η μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων LCPC-SETRA ανήκει στην κατηγορία των μηχανιστικών - εμπειρικών μεθοδολογιών. Τέτοιες θεωρούνται όσες εστιάζουν στα φυσικά αίτια που προκαλούν τις τάσεις στις κρίσιμες θέσεις ενός οδοστρώματος (μηχανιστικό μέρος) και εν συνεχεία τις συγκρίνουν με τις τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα ίδιου τύπου στο πεδίο (εμπειρικό μέρος) (Newcomb et al., 2001). Η αρχή της κατασκευής οδοστρωμάτων στηρίζεται σε δυο βασικούς πυλώνες: πρώτον στον σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο, για τον έλεγχο όλων των παραμέτρων παραγωγής και την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μιγμάτων και δεύτερον στο σχεδιασμό του οδοστρώματος, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα της διασποράς των αποτελεσμάτων των επιμέρους δοκιμών, καθώς και την αξιολόγηση της επίδρασης της κυκλοφορίας (Balay et al., 2012).

Ο De L'Hortet το 1948 επιχείρησε να εξηγήσει την συμπεριφορά των οδοστρωμάτων συγκρίνοντας τα εμπειρικά στοιχεία της μεθόδου CBR με τα αποτελέσματα που εξάγονται από τις αναλυτικές εξισώσεις του Boussinesq. Έτσι μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο οι Γάλλοι ερευνητές ξεκίνησαν να επεξεργάζονται την μηχανιστική προσέγγιση σχεδιασμού έχοντας ως κύριο θεωρητικό υπόβαθρο την αρχή του Burmister (1943) για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων. Το 1959, οι Jeuffroy και Bachelez δημοσίευσαν μία σειρά γραφημάτων με την βοήθεια των οποίων εξέταζαν την συμπεριφορά συστημάτων τριών στρώσεων σύμφωνα με μία μέθοδο παρόμοια με αυτή του Burmister. Με το πέρασμα των ετών ο Γαλλικός Οργανισμός Αυτοκινητοδρόμων (French Highways Administration) δημοσίευσε το 1971 τον κατάλογο Πρότυπων Δομών Οδοστρωμάτων (Catalogue of Standard Pavement Structures) κι έτσι δημιουργήθηκε σταδιακά η ανάγκη τυποποίησης των υλικών για τη θεώρησή τους στον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων τα οποία θα εμφάνιζαν μεγαλύτερη δυσκαμψία και θα παρείχαν σταθερότερη δομή. Με άξονα τον συγκεκριμένο κατάλογο τα οδοστρώματα σχεδιάζονταν με βάση δύο κριτήρια, τα οποία συνδέονται με τις δύο κρίσιμες μορφές αστοχίας που έχουν ήδη αναφερθεί προγενέστερα. Το πρώτο αποτελεί ένα όριο θλιπτικής τάσης στη στρώση έδρασης, και το δεύτερο ένα όριο εφελκυστικών τάσεων της ασφαλτικής στρώσης.

Το 1977 δημοσιεύτηκε ο δεύτερος και πιο ενημερωμένος κατάλογος (Catalogue of Standard New Pavement Structures) ο οποίος περιείχε την προσθήκη δύο επιπλέον στοιχείων, τη δομή οδοστρώματος η οποία λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά της

εξυγιαντικής στρώσης στη μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος και τον υπολογισμό του πάχους των ασφαλικών στρώσεων συναρτήσει μίας συγκεκριμένης πιθανότητας αστοχίας. Έπειτα ακολούθησαν κι άλλες προσθήκες και βελτιώσεις με την δημοσίευση δύο ακόμη εγχειριδίων τα οποία είναι το Design Guide for the Strengthening of Flexible Pavements 1977 και το Manual for the Design of New Low Traffic Pavements 1981.

Έτσι περί το 1981 η μέθοδος σχεδιασμού LCPC-SETRA (LCPC,1981) ήταν η πιο ολοκληρωμένη μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων στην Ευρώπη. Πρόκειται για μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της διαδικασίας σχεδιασμού, η οποία αποδεσμεύτηκε από τους περιορισμούς αμιγώς εμπειρικών μεθόδων και προσανατολίστηκε σε μηχανιστικά κριτήρια, εστιάζοντας στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (Reddy et al., 2005).

5.2.1 Κριτήρια σχεδιασμού

Στη Γαλλία, στο εργαστήριο LCPC έχει αναπτυχθεί ένα λογισμικό σχεδιασμού οδοστρώματος. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, τα χαρακτηριστικά των υλικών και την κυκλοφορία. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εκτιμάται στο εργαστήριο, σύμφωνα με πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές, επαναλαμβανόμενες, και αναπαραγώγιμες δοκιμές με υλικά από το οδόστρωμα και αντίστοιχα την πραγματική συμπεριφορά τους στο πεδίο (LCPC-SETRA, 1994).

Οι συνθήκες κυκλοφορίας, οι κλιματολογικές συνθήκες καθώς και οι συνθήκες φόρτισης, μεταφράζονται σε μια έννοια ισοδύναμης κυκλοφορίας με αριθμό διελεύσεων των αξόνων αναφοράς (130 kN) και για ισοδύναμη θερμοκρασία (η οποία είναι ίση με 15°C λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ετήσια θερμοκρασία) (Balay et al.,2012). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατός ο καθορισμός του πάχους της δομής στο πλαίσιο της διαστασιολόγησής του λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφορία και την επιθυμητή φέρουσα ικανότητα, σύμφωνα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά.

Η διαδικασία σχεδιασμού οδοστρώματος περιγράφεται σε λεπτομερές τεχνικό οδηγό σχεδιασμού, που ενσωματώνει σύμφωνα με το πρότυπο Alize-Lcpc τις τρεις

παραμέτρους εισόδου ως εξής: (α) φέρουσα ικανότητα, (β) υλικά οδοστρώματος και (γ) κυκλοφορία.

Φέρουσα ικανότητα

Η τυποποίηση στη μελέτη εδαφικών υλικών και των συναφών μεθόδων αξιολόγησης καθώς και η υλοποίηση τους στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων που έχει ξεκινήσει από τη δεκαετία του εξήντα κατέστησε δυνατή την επίτευξη αρκετά ακριβούς γνώσης της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των υλικών της στρώσης έδρασης ενός οδοστρώματος. Η ταξινόμηση των εδαφών και η χρήση τους σε στρώσεις βάσης οδοστρωμάτων, περιγράφεται λεπτομερώς στον τεχνικό οδηγό με τον τίτλο "Réalisation des remblais et des couches deform". Έτσι, σύμφωνα με διάφορα κριτήρια όπως η φύση του εδάφους, τα χαρακτηριστικά υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους και οι πιθανές τεχνικές επεξεργασίες για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του, καθορίζουν την επιθυμητή αντοχή της στρώσης έδρασης και με βάση αυτή προκύπτει το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος της υπερκείμενης έδρασης του οδοστρώματος. Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες για την φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Balay et al., 2012).

	PF1	PF2	PF3	PF4
Όρια των τάξεων (Mpa)	20	50	120	200
Μονάδα σχεδιασμού (Mpa)	20	50	120	200

Εικόνα 5.2. Κατηγορίες φέρουσας ικανότητας

Υλικά οδοστρώματος

Αρχικά, οι οδηγίες και άλλες τεχνικές σημειώσεις που δημοσιεύονταν τυποποιούσαν τα υλικά για την κατασκευή των οδοστρωμάτων. Σήμερα, η έννοια της τυποποίησης έχει αντικατασταθεί από τα πρότυπα. Όταν όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα επαρκούς γνώσης της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών για ένα ευρύ φάσμα που πρόκειται να επικρατήσει στο πεδίο (πχ. συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης για την περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων) τότε είθισται να λαμβάνονται υπόψη τυποποιημένες τιμές (ή τιμές αναφοράς) στους υπολογισμούς της μεθόδου. Για παράδειγμα, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών υλικών προσδιορίζεται

σε συνθήκες θερμοκρασίας 15 °C και συχνότητας 10Hz η οποία αντιστοιχεί στη ταχύτητα των 72km/h (Chabot et al.,2010).

Κυκλοφορία

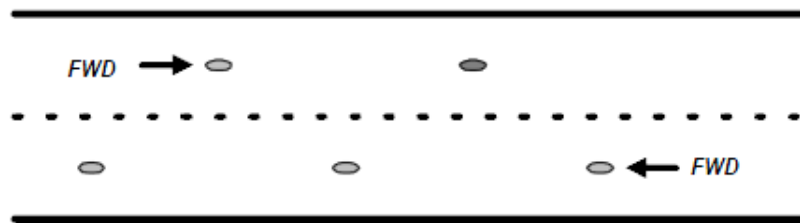
Στη μέθοδο αυτή, η αθροιστική κυκλοφορία κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος μετατρέπεται σε ισοδύναμο αριθμό αξόνων αναφοράς, οι οποίοι προκαλούν την ίδια δομική βλάβη στο οδόστρωμα σε σχέση με την πραγματική σύνθετη κυκλοφορία. Ως άξονας αναφοράς θεωρείται ο μόνος άξονας με διπλούς τροχούς 130 kN (3.25 kN ανά τροχό). Σε επίπεδο ανάλυσης, το φορτίο εφαρμόζεται σε δυο κυκλικές επιφάνειες επαφής καθεμία από τις οποίες έχει ακτίνα 12.5cm, και η απόσταση από κέντρο σε κέντρο τροχού είναι ίση με 37.5 cm ενώ ασκείται ομοιόμορφη πίεση επαφής ίση με 0.662 MPa στο υποκείμενο οδόστρωμα. Τα επιβατικά οχήματα δε λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό διότι η επίδρασή τους στο οδόστρωμα είναι αμελητέα συγκριτικά με εκείνη των βαρέων οχημάτων τα οποία ταξινομούνται με βάση τη μέση ημερήσια κυκλοφορία ΕΜΗΚ που αντιστοιχεί στη λωρίδα με τον υψηλότερο κυκλοφοριακό φόρτο, κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας (Balay et al., 2012).

5.3 Άντληση πειραματικών στοιχείων από τη βάση δεδομένων

Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης, χρειάστηκε να αξιοποιηθούν στοιχεία από μετρήσεις και δοκιμές πεδίου στο πειραματικό οδόστρωμα. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε επιτόπου δοκιμές (με το σύστημα FWD) και δειγματοληπτική πυρηνοληψία για την διεξαγωγή εργαστηριακής δοκιμής. Το σύνολο των στοιχείων που χρειάστηκαν για την εργασία αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας – Οδοστρωμάτων ΕΜΠ. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και στα πάχη των στρώσεων. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (uniaxial compression - UC) στους πυρήνες. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν στοιχεία για τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιήθηκαν στην φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στη δοκιμή κάμψης δύο σημείων (2 Point Bending - 2PB).

5.3.1 Περιγραφή επιτόπου πειράματος

Για τις δοκιμές οι οποίες εκτελέσθηκαν στο νέο μη κυκλοφορημένο οδόστρωμα σε πιλοτικό τμήμα μήκους 500 μέτρων, αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τη δοκιμή FWD σε 5 θέσεις και σε αποστάσεις, από 60 έως 100 μέτρα (εικόνα 5.3).

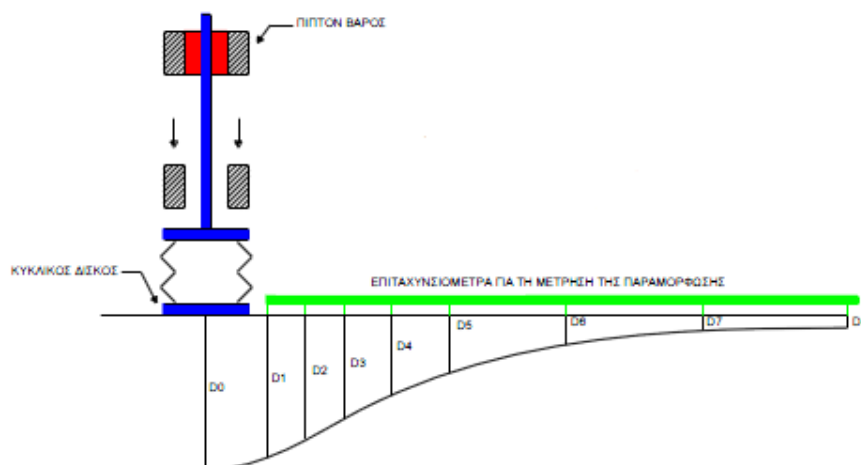


Εικόνα 5.3. Σημεία δοκιμής FWD σε δρόμο δύο λωρίδων

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι ελαστικές υποχωρήσεις (D_i) κάτω από το φορτίο (εικόνα 5.4) και σε αποστάσεις από 0mm έως και 1800mm όπως προκύπτει από τον πίνακα 5.1. Οι μεταβολές στην δύναμη που ασκείται στο οδόστρωμα επιτυγχάνονται μεταβάλλοντας τα βάρη και τα ύψη. Τα επίπεδα ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 13 έως 222 kN, ανάλογα με τον τύπο του εξοπλισμού (Schmalzer, 2006). Το φορτίο στόχου που παράγεται από ένα FWD είναι παρόμοιο με αυτό που παράγεται από έναν τροχό που κινείται με ταχύτητα 60 έως 80 km/h (FEHRL, 1996). Ο παλμός φορτίου στόχου που χρησιμοποιείται για την ανάλυση είναι συνήθως είτε 40 είτε 50 kN (τυπικό φορτίο τροχού).

Πίνακας 5.1. Αποστάσεις μεταξύ γεωφώνων δοκιμής FWD

A/A	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Απόσταση (mm)	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800



Εικόνα 5.4. Σχηματική απεικόνιση δοκιμής FWD

Τέλος, η θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων, που μετρήθηκε με διάνοιξη οπών, ήταν 24 °C για όλες τις θέσεις ελέγχου.

5.3.2 Περιγραφή εργαστηριακού πειράματος

Για τη μέθοδο μονοαξονικής θλίψης (UC) χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια τα οποία προέκυψαν από πυρηνοληψία σε 5 θέσεις σε νέο οδικό άξονα, κοινής διαμέτρου αλλά διαφορετικού ύψους λόγω του πάχους των στρώσεων. Η πυρηνοληψία πραγματοποιήθηκε στις ίδιες θέσεις με την δοκιμή πίπτοντος βάρους. Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας έγινε μέσω της συσκευής που φαίνεται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5. Μηχανή θλίψης-εφελκυσμού

Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης πραγματοποιήθηκε για τις θερμοκρασίες μεταξύ των 4 °C και των 37 °C και τις συχνότητες μεταξύ 0,1 Hz και 25 Hz. Σε κάθε κύκλο φόρτισης, καταγράφονται οι τάσεις και οι προκύπτουσες παραμορφώσεις. Παρόλα αυτά, για να προκύψει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τελευταίοι 5 κύκλοι φόρτισης ως οι πιο αντιπροσωπευτικοί και τελικά με βάση αυτά τα δεδομένα κατασκευάζονται οι κεντρικές καμπύλες και εξάγονται οι τιμές του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^*_{lab} . Οι αντίστοιχες πληροφορίες για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^*_{lab} από την δοκιμή κάμψης 2 σημείων αντλήθηκαν από τη μέθοδο σχεδιασμού IFSTTAR για τα τυποποιημένα υλικά που θεωρήθηκαν στο σχεδιασμό.

5.3.3 Σύνοψη στοιχείων προς περαιτέρω ανάλυση

Κατά την διαδικασία αναλύσεων εισήχθησαν δεδομένα στο λογισμικό δυναμικής ανάλυσης που αναλύεται διεξόδικα στην υποενότητα 5.4.1 τα οποία προέκυψαν από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π. για την σύγκριση της ελαστικής και της ιξωδοελαστικής ανάλυσης. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα πάχη των ασφαλικών στρώσεων και της βάσης από αδύνδετο αμμοχάλικο. Τα πάχη των ασφαλικών στρώσεων προέκυψαν από πυρηνοληψία, ενώ το πάχος της βάσης θεωρήθηκε σταθερό για όλες τις θέσεις ελέγχου.

Πίνακας 5.2. Πάχη στρώσεων των 5 θέσεων ανάλυσης

5 θέσεις ανάλυσης			
Θέση	Χ.Θ.	Πάχος ασφ. από πυρήνες (cm)	Πάχος βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο (cm)
P1	93+500	16.8	30
P2	93+590	17.7	
P3	93+650	17.6	
P4	93+750	17.1	
P5	93+850	17.7	

Ο πίνακας 5.3 περιέχει τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν για την ελαστική ανάλυση. Οι τιμές αυτές αναφέρονται στα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού βασισμένου στη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Για τη βάση και τη στρώση

έδρασης χρησιμοποιήθηκαν σταθμισμένα μέτρα ελαστικότητας, σταθερά σε όλες τις θέσεις.

Πίνακας 5.3. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ελαστικής ανάλυσης

Δυναμικό μέτρο Δυσκαμψίας			
Θέση	E* ασφ (Mpa)	E* βάσης (Mpa)	E* στρ.έδρ. (Mpa)
P1	7505	500	200
P2	7484		
P3	6470		
P4	6822		
P5	7594		

Ενώ αντιθέτως το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για την ιξωδοελαστική ανάλυση προέκυψε από εργαστηριακές δοκιμές, σε θερμοκρασίες και συχνότητες που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οδοτρωμάτων του Ε.Μ.Π. Οι τιμές του E* αναλύονται στον παρακάτω πίνακα 5.5 όσον αφορά στην δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Πίνακας 5.4. Παράμετροι ανάλυσης εργαστηριακών δοκιμών μονοαξονικής θλίψης UC

Συχνότητα (Hz)	0.1	0.5	1	5	10	25
Θερμοκρασία (°C)	4	10	20	25	37	

Πίνακας 5.5. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (E*- Mpa)

Θέση P1							
T \ f		0.1	0.5	1	5	10	25
4		12731	15035	16428	18087	19384	20610
10		8795	11476	12813	14939	16389	17773
20		4180	6702	7861	10027	11039	12656
25		2634	4385	5475	7328	8443	9757
37		919	1573	2053	3399	4046	4807
Θέση P2							
4		13962	17140	18375	20852	21745	22772
10		10415	13799	15217	18239	19387	20744
20		5027	7760	9117	12471	13924	15781
25		3117	5154	6265	9288	10718	12650
37		856	1469	1866	3219	4022	5303
Θέση P3							
4		10468	12738	13563	15329	16309	17445
10		8206	10207	11245	12738	14018	14984
20		3635	5739	6910	9060	10129	11289
25		2407	4016	4921	6920	7786	9516
37		734	1195	1573	2644	3195	4129
Θέση P4							
4		12746	16669	18322	22234	23914	26136
10		9642	12561	14110	16476	17943	19532
20		3915	6308	7546	9823	11257	13662
25		2360	4055	5016	7093	8157	9467
37		690	1189	1553	2607	3276	4220
Θέση P5							
4		13597	17566	18653	20573	22625	24146
10		10170	12991	14662	16450	18161	19565
20		4028	6620	7999	10329	11640	12957
25		2571	4425	5569	7649	8999	10839
37		759	1345	1749	2984	3673	4544

Αντίστοιχα για την δοκιμή κάμψης δύο σημείων το Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας παρέχεται από πρότυπα της μεθόδου σχεδιασμού IFSTTAR οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6. Οι θερμοκρασίες και οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν για να εξηχθεί το συναμικό μέτρο δυσκαμψίας αναλύονται στον πίνακα παρακάτω 5.7.

Πίνακας 5.6. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας δοκιμής κάμψης 2 σημείων (E^* - Mpa)

T \ f	2	3	5	10	25
4	16579	17195	18004	19164	20815
10	11836	12464	13307	14550	16388
18	6500	7024	7750	8870	10635
20	5288	5758	6417	7450	9113
25	3470	3859	4418	5320	6830
37	965	1126	1368	1783	2534

Πίνακας 5.7. Παράμετροι ανάλυσης εργαστηριακών δοκιμών 2PB

Συχνότητα (Hz)	2	3	5	10	25	
Θερμοκρασία (°C)	4	10	18	20	25	37

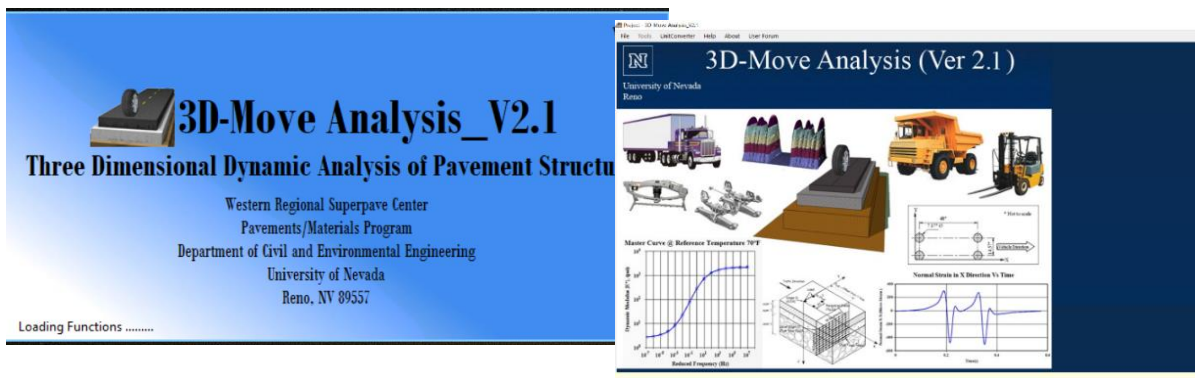
5.4 Αναλύσεις εντατικής κατάστασης

Οι αναλύσεις εντατικής κατάστασης στο σώμα του οδοστρώματος με βάση τα στοιχεία συλλογής που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό 3D-Move, το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Νεβάδα (Siddhartan et al. 2000). Η ερευνητική διαδικασία με το λογισμικό αυτό περιγράφεται στην ακόλουθη υποενότητα.

5.4.1 Λογισμικό 3D-Move analysis

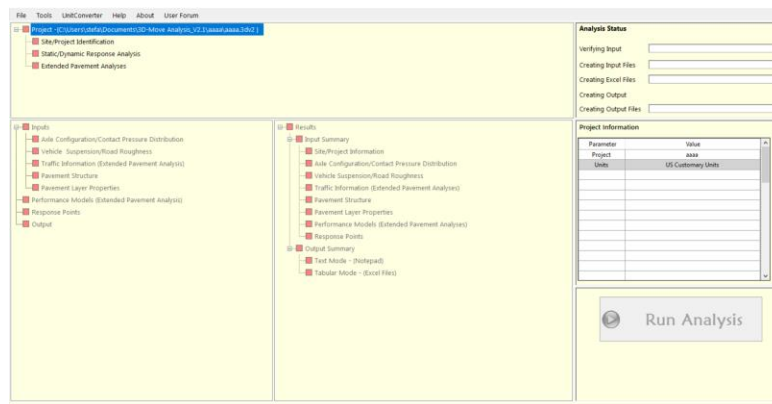
Το Πανεπιστήμιο της Νεβάδα ανέπτυξε το λογισμικό 3D-Move για την ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το μοντέλο ανάλυσης μπορεί να λάβει υπόψη σημαντικούς παράγοντες απόκρισης. Ως εκ τούτου, μπορεί να χειριστεί σύνθετα επιφανειακά φορτία, όπως πολλαπλά φορτία και μη ομοιόμορφη κατανομή επαφής ελαστικών.

Με τη χρήση του λογισμικού είναι δυνατή η ανάλυση τόσο της στατικής όσο και της δυναμικής φόρτισης (εικόνα 5.6). Η διαδικασία ανάλυσης παρουσιάζεται παρακάτω:



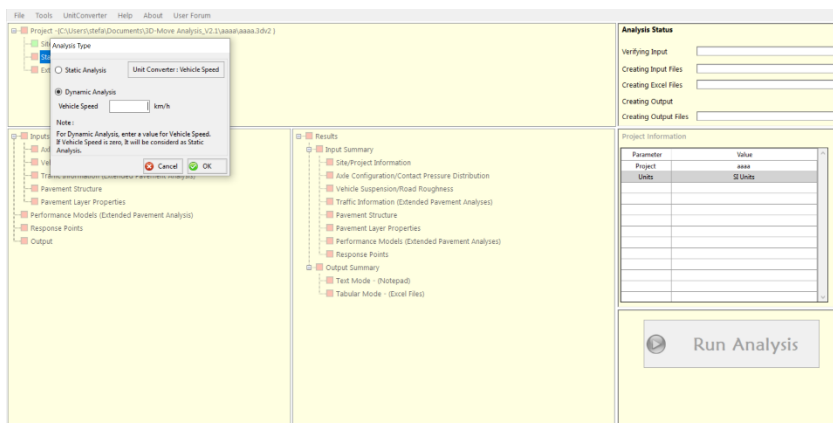
Εικόνα 5.6. Αρχικά παράθυρα λογισμικού

Κατά την έναρξη πρέπει να εισαχθεί το όνομα του αρχείου που επιθυμεί ο αναλυτής προκειμένου να εισαχθούν όλες οι παράμετροι για την ανάλυση όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7. Βασικό παράθυρο

Αρχικά το λογισμικό λειτουργεί σε σύστημα μονάδων US Customary Units (in, lb, °F, mph) και SI Units (m, kN, °C, km/h). Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ δυναμικής και στατικής φόρτισης (εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8. Επιλογή δυναμικής ή στατικής ανάλυσης

Έπειτα, εισάγονται η ταχύτητα ανάλυσης (δυναμική ανάλυση), το φορτίο και η διαμόρφωση αξόνων του οχήματος όπως στην εικόνα 5.9.

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

Reference Title for Axle: _____

Tire Pressure: 707 kPa Tire Load: 50 kN

Geometry of Loaded Area:

☒ Circle ☐ Ellipse ☐ Rectangle

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

Calculated R: 0.130 m

Axle Spacing:

L1: 0 m L2: 0 m S1: 0 m

Friction Coefficient:

☐ Rolling Friction Coefficient: _____

☐ Braking Friction Coefficient: _____

Note: Default for Friction Coefficient is zero.

Note:

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

Cancel Previous Next OK

Εικόνα 5.9. Επιλογή διαμόρφωσης αξόνων του οχήματος

Στη συνέχεια καθορίζεται η μηχανική συμπεριφορά των επιμέρους υλικών. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, η ασφαλτική στρώση θεωρείται είτε ελαστικό είτε ιξωδοελαστικό υλικό, ενώ τα υλικά στις στρώσεις βάσης - υπόβασης και έδρασης θεωρούνται ελαστικά. Οι παράμετροι αυτές εισάγονται σε ένα παράθυρο διαλόγου αντίστοιχο με το παρακάτω (εικόνα 5.10).

Pavement Structure

Unit Converter: Length

Layer No.	Layer Type	Material Characterization	Thickness (m)
1	Asphalt	Linear Elastic/Viscoelastic	0.177
2	Base	Linear Elastic	0.30
3	Subbase	Linear Elastic	0

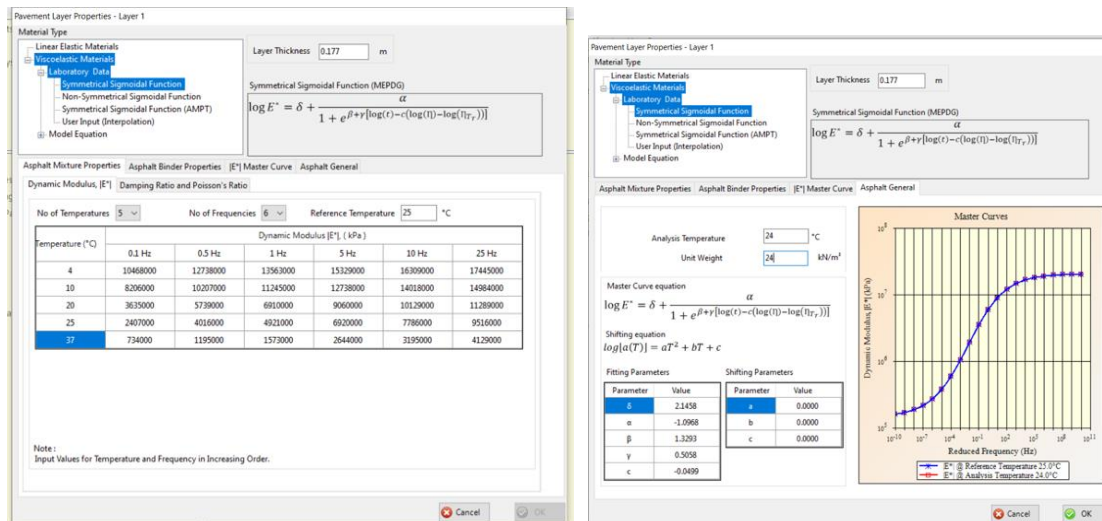
Note:

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

Add Delete Cancel OK

Εικόνα 5.10. Εισαγωγή στρώσεων οδοστρώματος

Για τα ιξωδοελαστικά υλικά, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E^*) εισάγονται ως συνάρτηση της συχνότητας και της θερμοκρασίας, ο λόγος Poisson (ν) θεωρείται σταθερός (εικόνα 5.11).

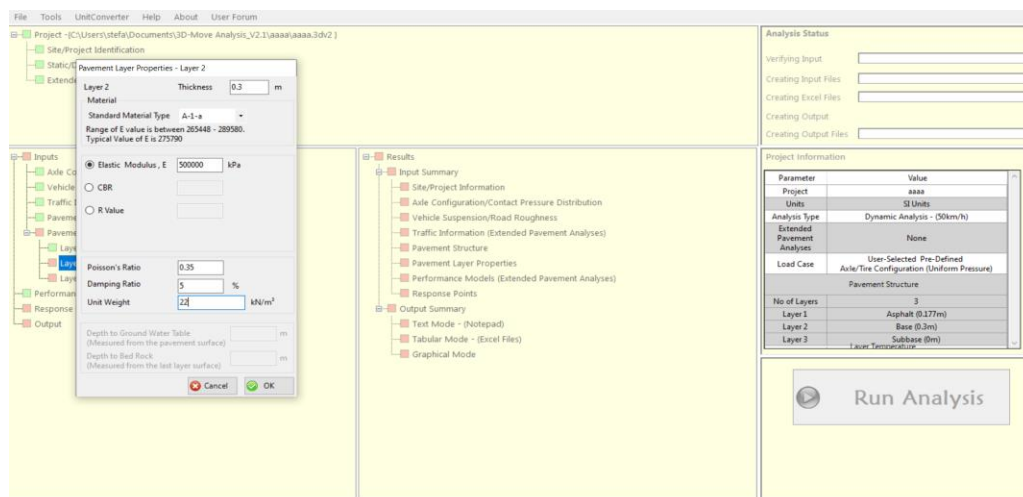


Εικόνα 5.11. Εισαγωγή παραμέτρων ασφαλτικής στρώσης

Εν συνεχεία, προκύπτει για την περίπτωση ιξωδοελαστικής ανάλυσης, η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της συχνότητας για τη θερμοκρασία αναφοράς με βάση την παρακάτω εξίσωση. Ακόμη εκτιμώνται οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης.

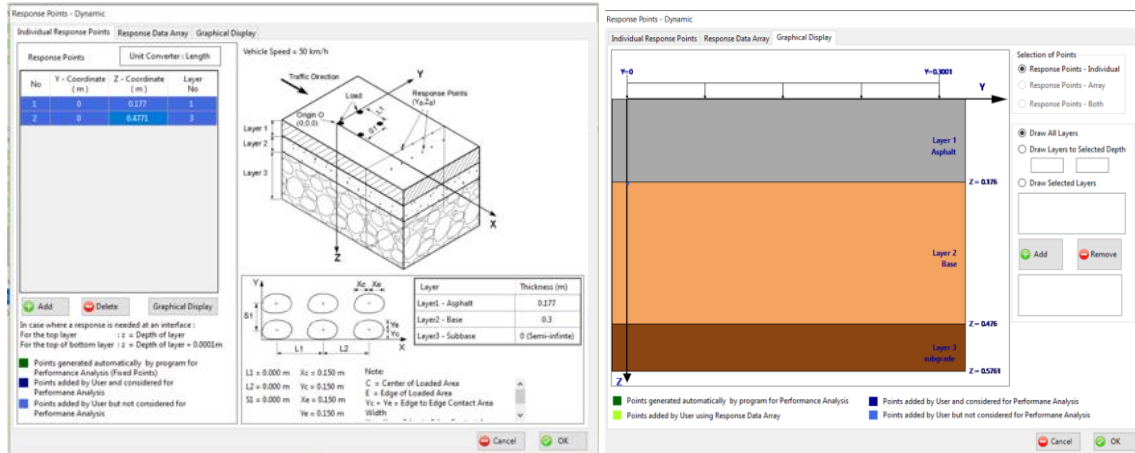
$$\text{Log}(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log f_r)}}$$
(5.1)

Ωστόσο μεταβλητές εισάγονται και για τις στρώσης βάσης - υπόβασης και έδρασης με σταθερό μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson και θερμοκρασία αναφοράς όπως παρακάτω εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12. Εισαγωγή παραμέτρων βάσης, στρώσης έδρασης

Το τελευταίο βήμα πριν από την ανάλυση εντατικής κατάστασης, είναι η εισαγωγή των συντεταγμένων των σημείων στα οποία είναι επιθυμητός ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών. Και πραγματοποιείται η εκτέλεση της ανάλυσης (εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13. Εισαγωγή θέσεων απόκρισης

Το λογισμικό δημιουργεί φακέλους των μεταβλητών εισόδου και εξόδου σε πινακοποιημένη μορφή.

5.4.2 Είδη αναλύσεων

Επισημαίνεται ότι πραγματοποιήθηκαν τρεις επιμέρους αναλύσεις σε κάθε θέση ελέγχου:

- Ελαστική ανάλυση

Στην ελαστική ανάλυση τα μέτρα ελαστικότητας θεωρήθηκαν σταθερά. Ειδικότερα, το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων αντιστοιχεί στην επιτόπου μετρημένη θερμοκρασία. Το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων μεταβάλλεται σε κάθε θέση ανάλυσης, ενώ το πάχος της βάσης παραμένει σταθερό και ίσο με 0,30 μέτρα.

- Ιξωδοελαστική ανάλυση UC

Σε αυτήν την ανάλυση, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων προέκυψε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στους πυρήνες. Τα μέτρα

ελαστικότητας της βάσης και της στρώσης έδρασης έλαβαν τις τυπικές τιμές του πίνακα 5.2

- Ιξωδοελαστική ανάλυση 2PB

Σε αυτήν την ανάλυση, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων προέκυψε από την θεωρητική κεντρική καμπύλη με βάση τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων. Κατά συνέπεια, σε κάθε θέση ελέγχου, το E^* παρέμεινε σταθερό. Τα μέτρα ελαστικότητας της βάσης και της έδρασης έλαβαν τις τυπικές τιμές του πίνακα 5.2.

Η σύγκριση των δύο δοκιμών μέσω της ιξωδοελαστικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε και για τις πέντε θέσεις σε νέο οδικό δίκτυο.

Η θεώρηση μηχανιστικών αρχών ανάλυσης επικεντρώνεται στην ανάλυση των επιφανειακών υποχωρήσεων και των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα της στρώσης ασφαλικών στρώσεων. Ακολούθως, η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αφορά:

- Στη σύγκριση της ελαστικής και της ιξωδοελαστικής ανάλυσης με βάση τα στοιχεία που αφορούν το πεδίο.
- Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων ιξωδοελαστικής ανάλυσης που προέκυψαν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού του E^* .
- Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα και από τα τρία είδη αναλύσεων.

6. Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων συλλογής. Για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ελαστική ανάλυση (δοκιμή πίπτοντος βάρους) όπου τα μέτρα ελαστικότητας προέκυψαν από διαδικασίες ανάστροφου υπολογισμού αλλά και από την ιξωδοελαστική ανάλυση (δοκιμή μονοαξονικής θλίψης και κάμψης δύο σημείων).

6.1 Σύγκριση ελαστικής και ιξωδοελαστικής ανάλυσης με βάση τα στοιχεία που αφορούν στο πεδίο

6.1.1 Κεντρικές καμπύλες

Κατασκευάστηκαν οι κεντρικές καμπύλες του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει της συχνότητας για τη θερμοκρασία αναφοράς αλλά και τις παραμέτρους της εξίσωσης 3.7 (εικόνα 6.1) η οποία περιγράφεται αναλυτικά στην υποενότητα 3.2.

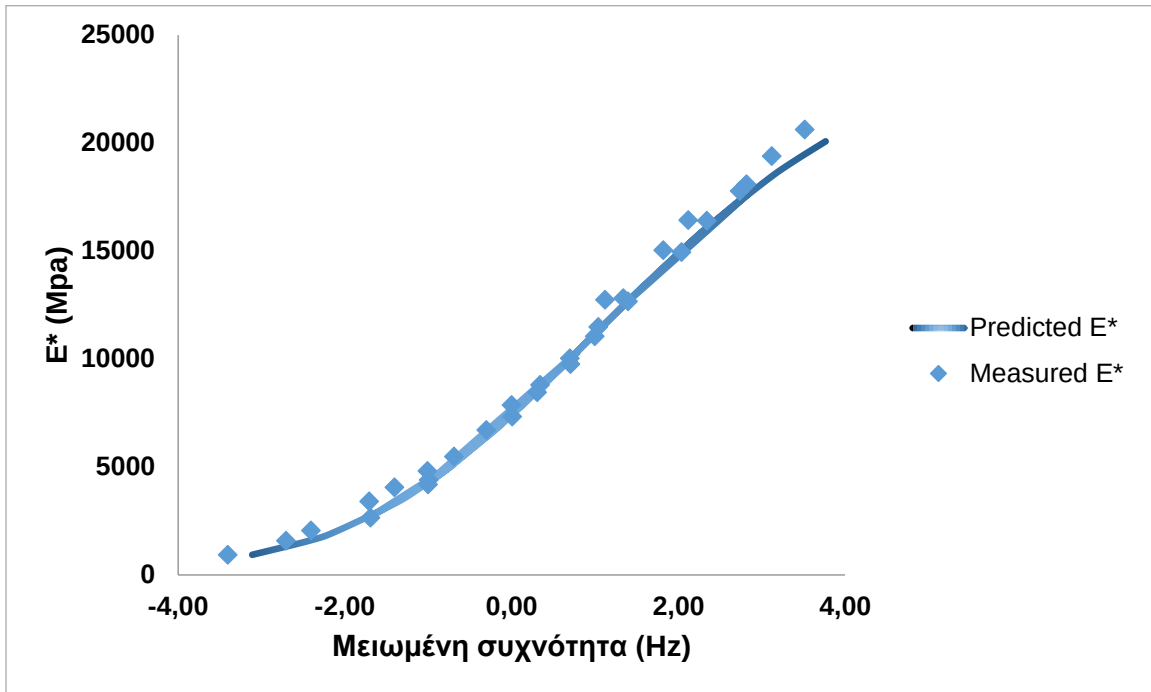
Θέση	Παράγοντες μετατόπισης $\log a(T)$			master curve			
	a	b	c	α	β	γ	δ
P1	0.0002224	-0.10603	6.181485	2.871177	-1.45904	0.472011	0.70164
P2	-0.000104	-0.0584	4.453691	2.384792	-1.38405	0.57857	1.214433
P3	-0.000011	-0.07209	5.614192	2.406102	-1.03506	0.555382	1.060327
P4	0.0001506	-0.10145	6.918718	4.379556	-1.29991	0.355125	-0.59789
P5	0.0002268	-0.11148	7.239481	3.438327	-1.22481	0.435498	0.219774

Εικόνα 6.1. Παράμετροι εξίσωσης κεντρικής καμπύλης 5 σημείων

Οι καμπύλες κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασία αναφοράς $T_0=24^{\circ}\text{C}$ και στην οποία μετατοπίστηκαν όλα τα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα όλα τα σημεία που αναπαριστούν τις τιμές που προκύπτουν για θερμοκρασίες ελέγχου υψηλότερες από τη θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται προς τα αριστερά (χαμηλότερες συχνότητες) και τα αντίστοιχα σημεία που προκύπτουν για θερμοκρασίες ελέγχου χαμηλότερες από τη θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται προς τα δεξιά.

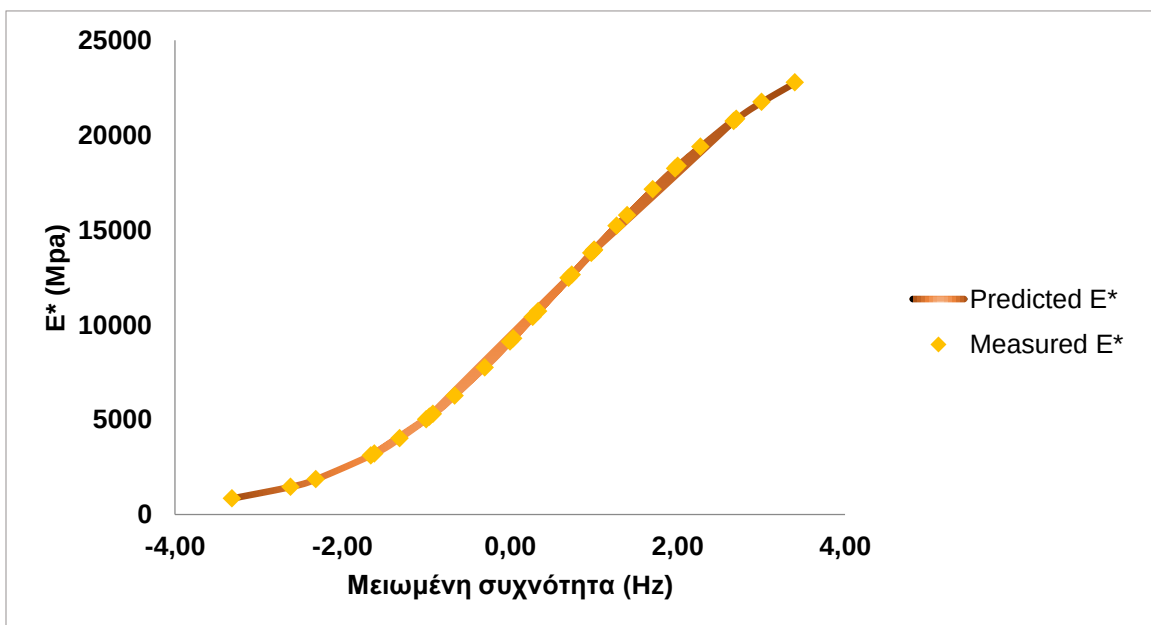
Ακολουθούν τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν για τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τις πέντε διαφορετικές θέσεις (εικόνες 6.2- 6.6).

Σημείο P1:



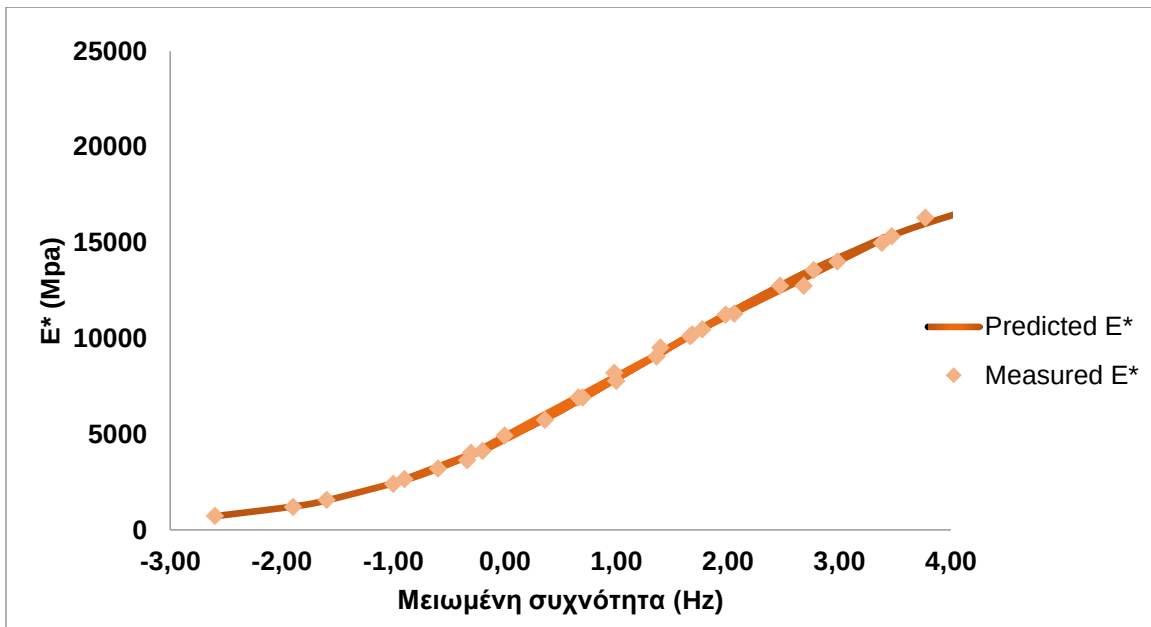
Εικόνα 6.2. Κεντρική καμπύλη στο σημείο P1

Σημείο P2:



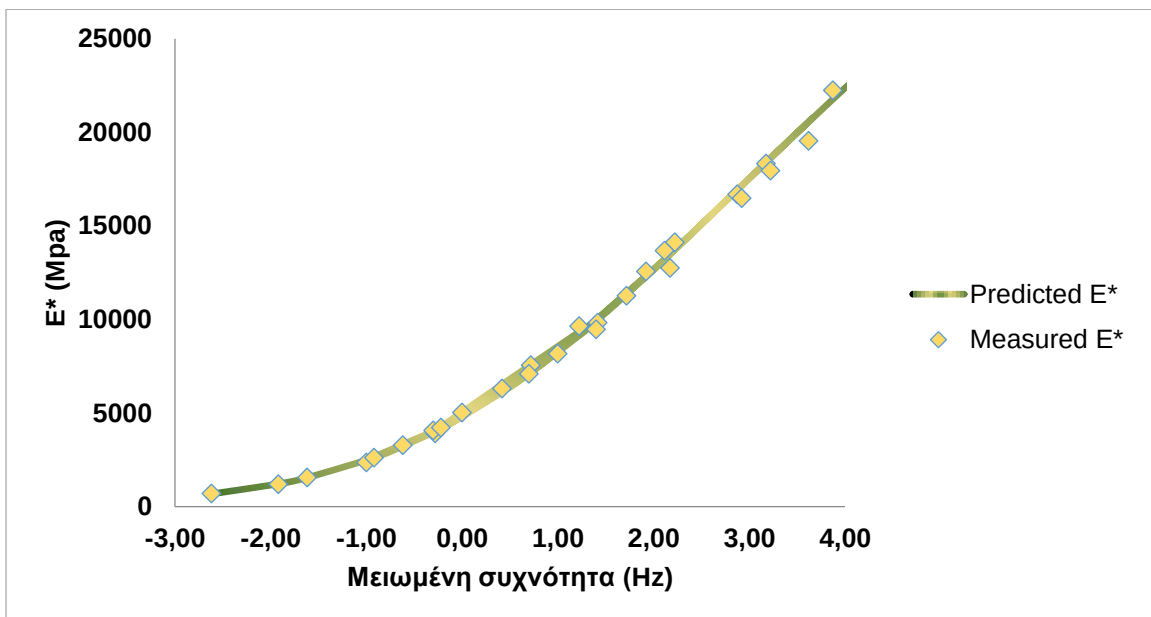
Εικόνα 6.3. Κεντρική καμπύλη στο σημείο P2

Σημείο P3:



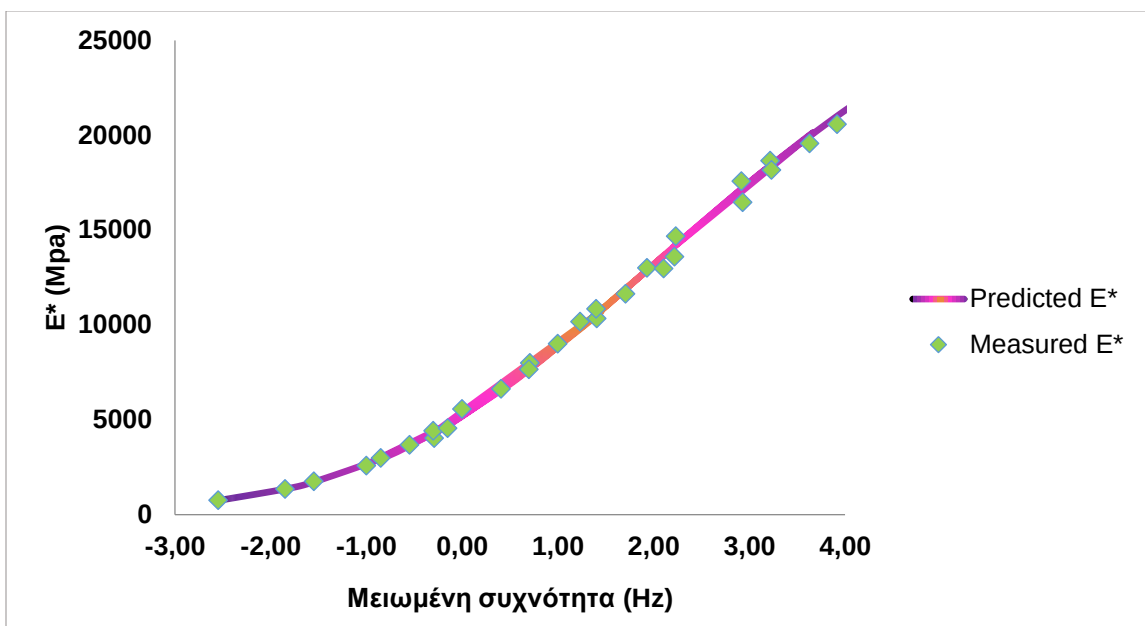
Εικόνα 6.4. Κεντρική καμπύλη στο σημείο P3

Σημείο P4:



Εικόνα 6.5. Κεντρική καμπύλη στο σημείο P4

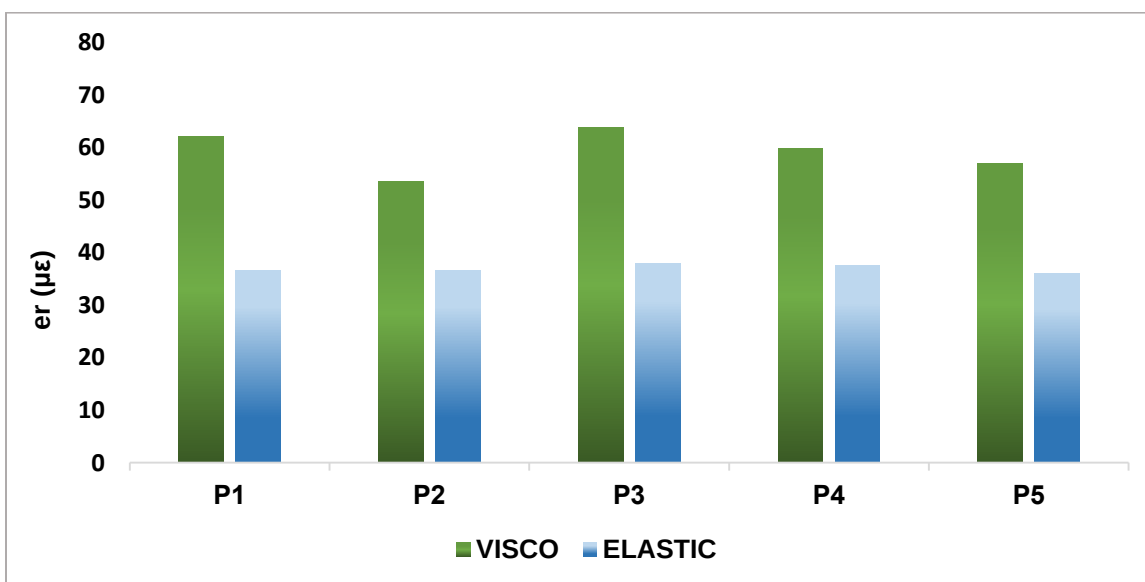
Σημείο P5:



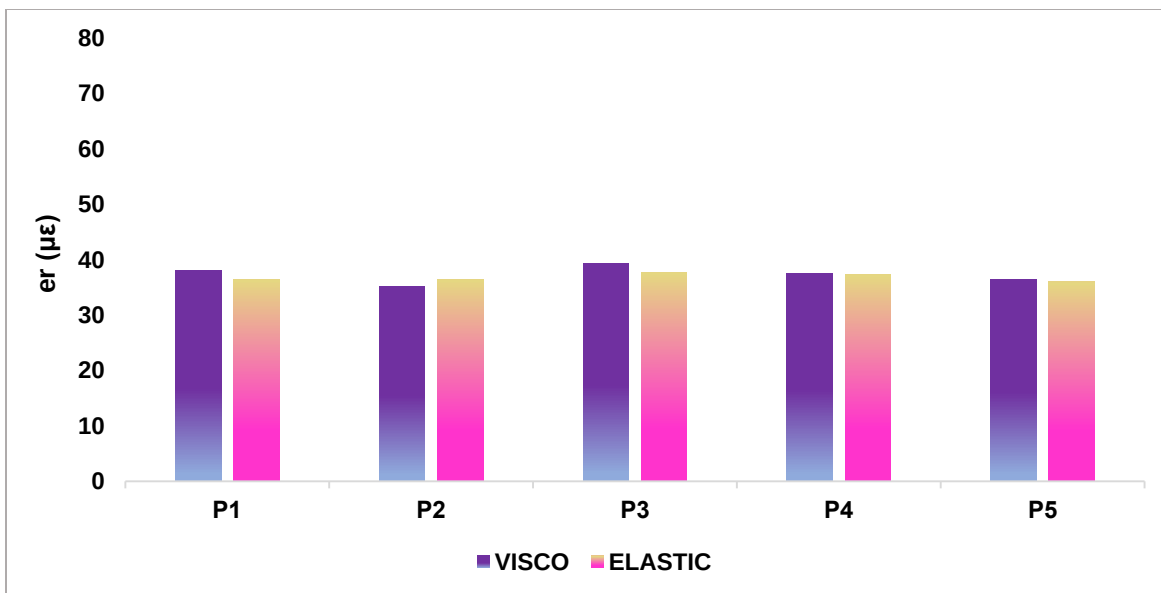
Εικόνα 6.6. Κεντρική καμπύλη στο σημείο P5

6.1.2 Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις

Αρχικά διεξάγεται σύγκριση μεταξύ των εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων στις διαφορετικές θέσεις. Η σύγκριση αυτή λαμβάνει χώρα τόσο στον άξονα x-x όσο και στον άξονα y-y όπως στις εικόνες 6.7 και 6.8 αντίστοιχα.



Εικόνα 6.7. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τον άξονα x-x

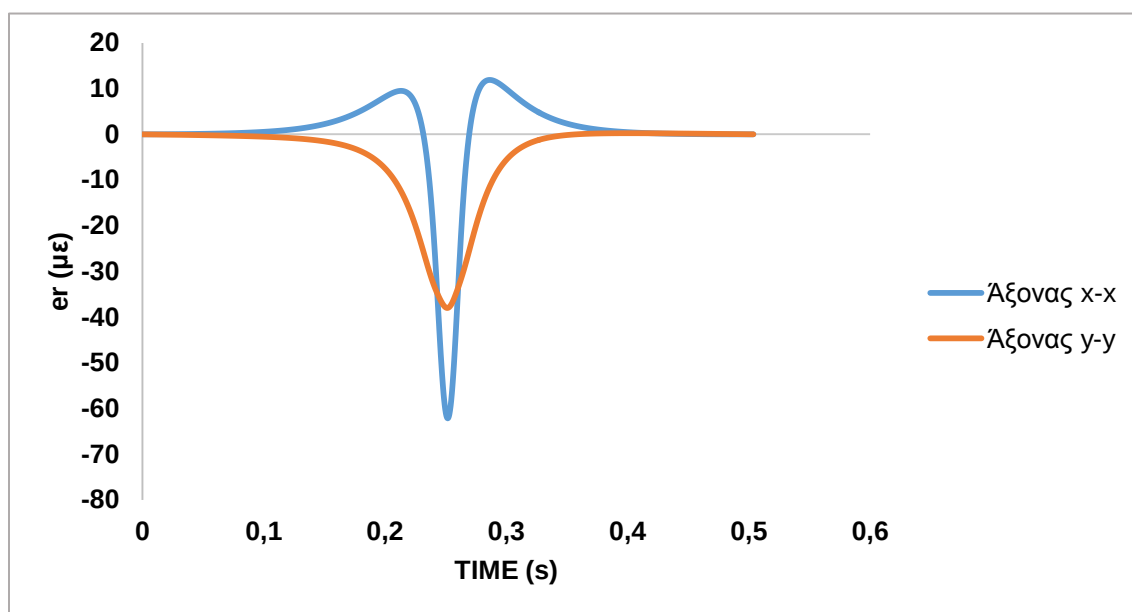


Εικόνα 6.8. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τον άξονα y-y

Παρατηρούμε πως οι παραμορφώσεις κατά την ελαστική ανάλυση είναι μειωμένες σε σχέση με αυτές της ιξωδοελαστικής ανάλυσης τόσο κατά τον άξονα x-x όσο και κατά τον άξονα y-y. Επίσης οι παραμορφώσεις διαφοροποιούνται σε κάθε σημείο καθώς αυτά έχουν διαφορετικό πάχος. Η μέγιστη παραμόρφωση σημειώθηκε στο σημείο P3 στον άξονα x-x κατά την ιξωδοελαστική ανάλυση έχοντας την τιμή των 63,80 με. Καθώς αντίστοιχα και στον άξονα y-y η μέγιστη τιμή παρατηρείται επίσης στο σημείο P3.

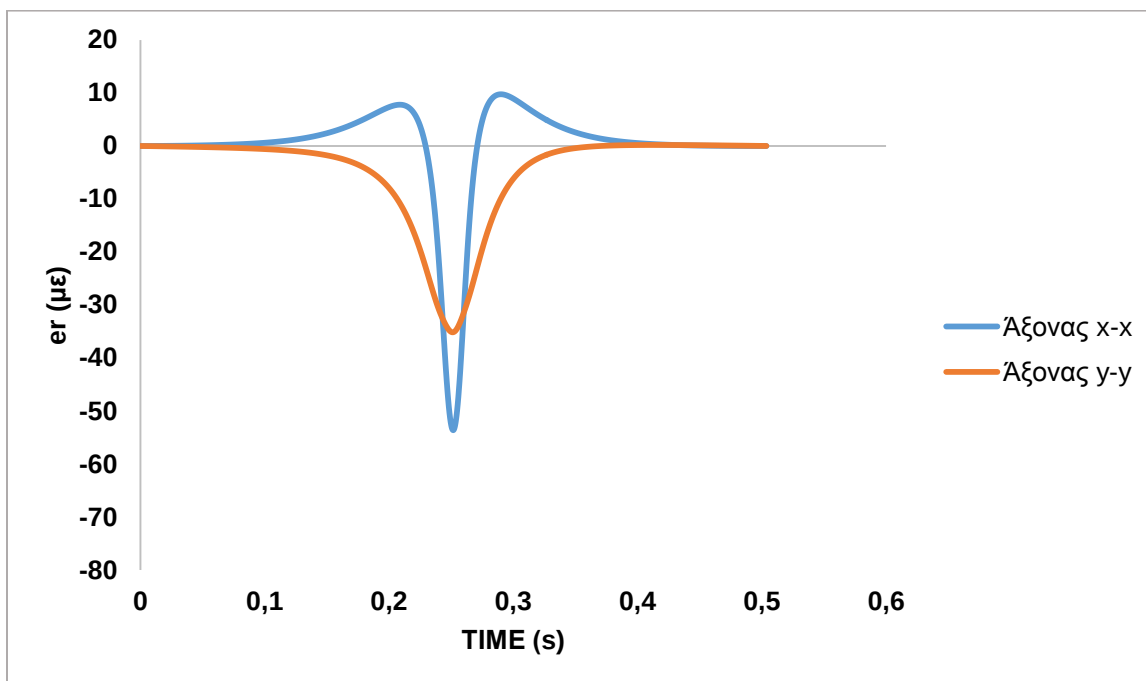
Ενδεικτικά στα παρακάτω διαγράμματα (εικόνες 6.9-6.13) παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα προφίλ των οριζόντιων παραμορφώσεων κάθε σημείου για την ιξωδοελαστική ανάλυση στην ταχύτητα των 60 km/h.

Σημείο P1:



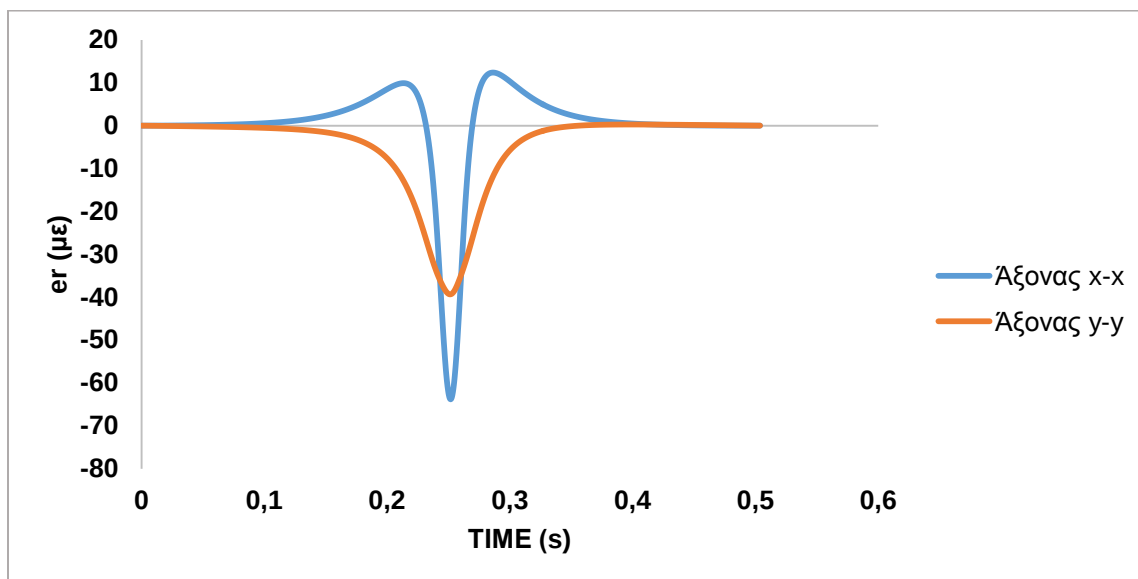
Εικόνα 6.9. Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σημείου P1

Σημείο P2:



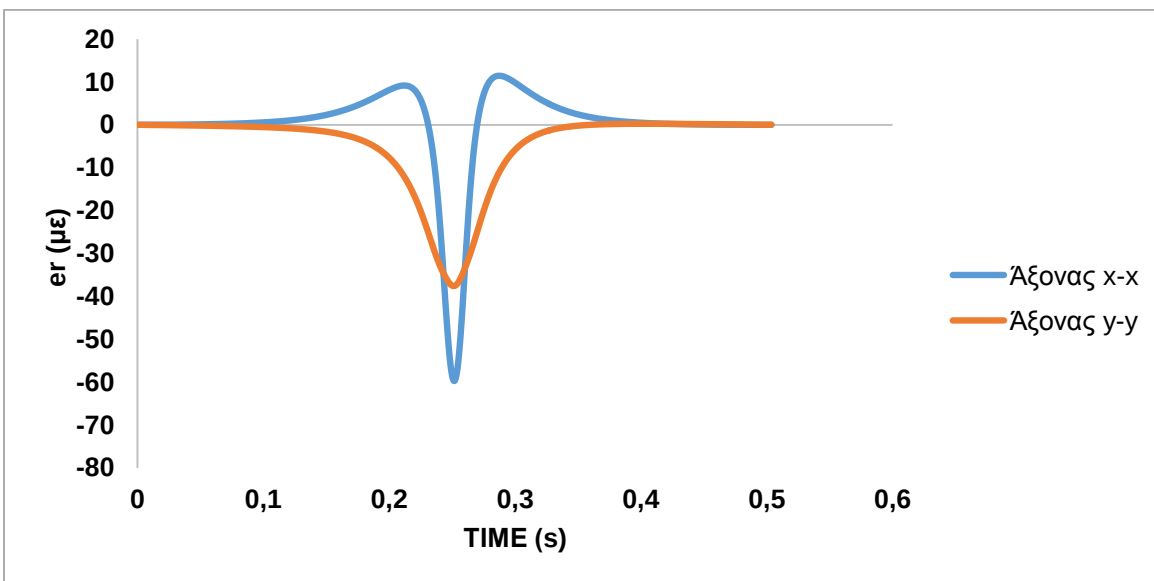
Εικόνα 6.10. Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σημείου P2

Σημείο P3:



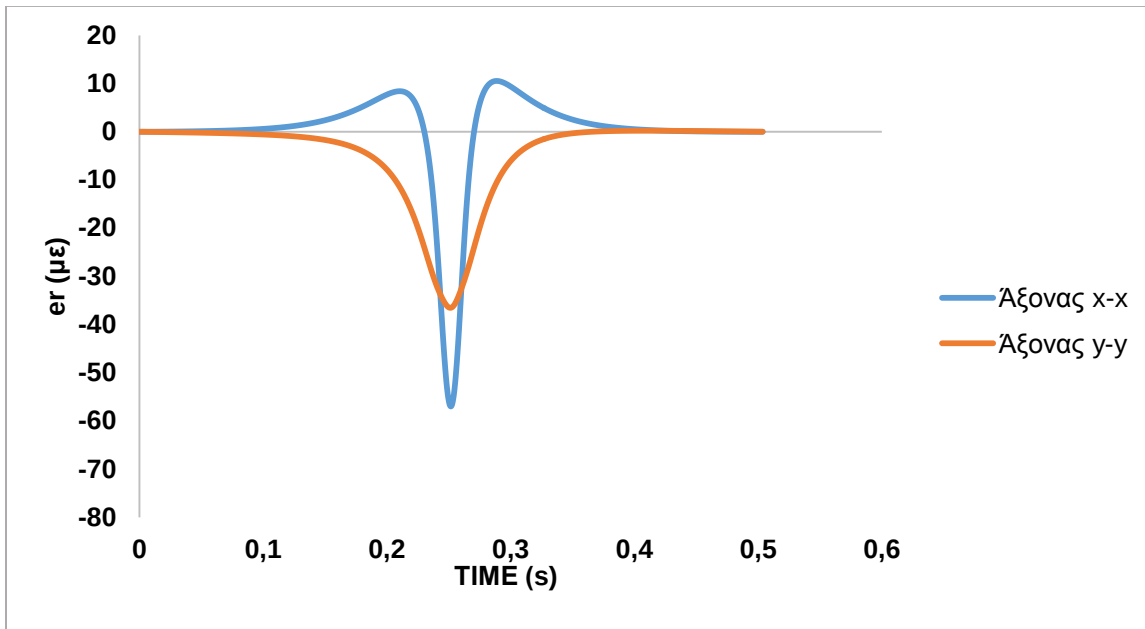
Εικόνα 6.11. Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σημείου P3

Σημείο P4:



Εικόνα 6.12. Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σημείου P4

Σημείο P5:

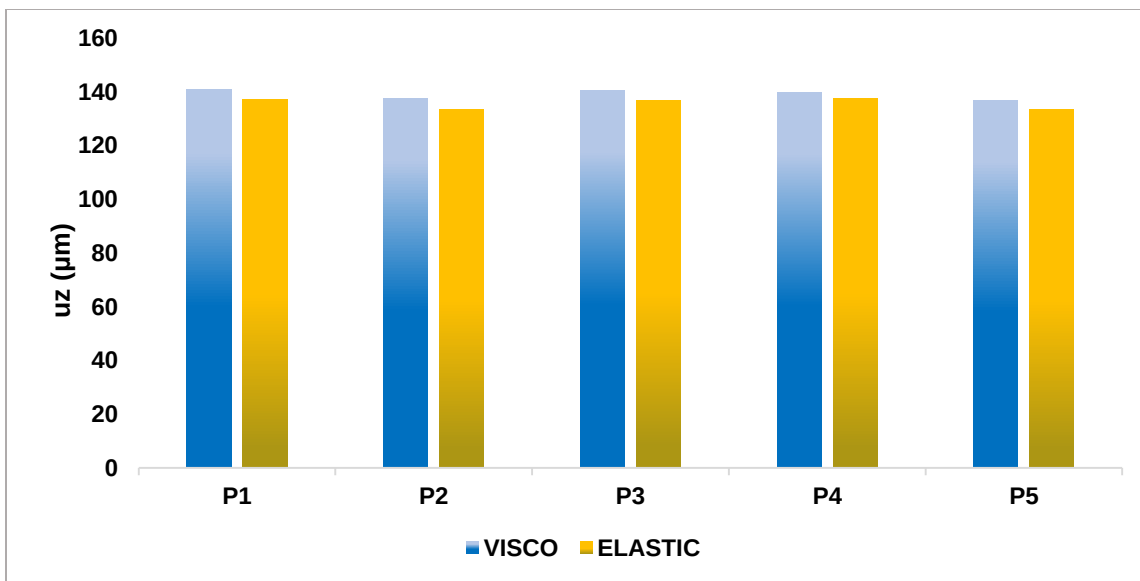


Εικόνα 6.13. Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις σημείου P5

Ως προς τη σύμβαση των προσήμων, οι θετικές παραμορφώσεις αντιστοιχούν σε θλίψη ενώ οι αρνητικές αντιστοιχούν σε εφελκυσμό. Παρατηρείται ότι τα προφίλ των παραμορφώσεων παρουσιάζουν θλιπτικές παραμορφώσεις στη διαμήκη διεύθυνση λίγο πριν και λίγο μετά τη διέλευση του αξονικού φορτίου. Αντίθετα, η παραμόρφωση στην εγκάρσια διεύθυνση είναι εξ ολοκλήρου εφελκυστική.

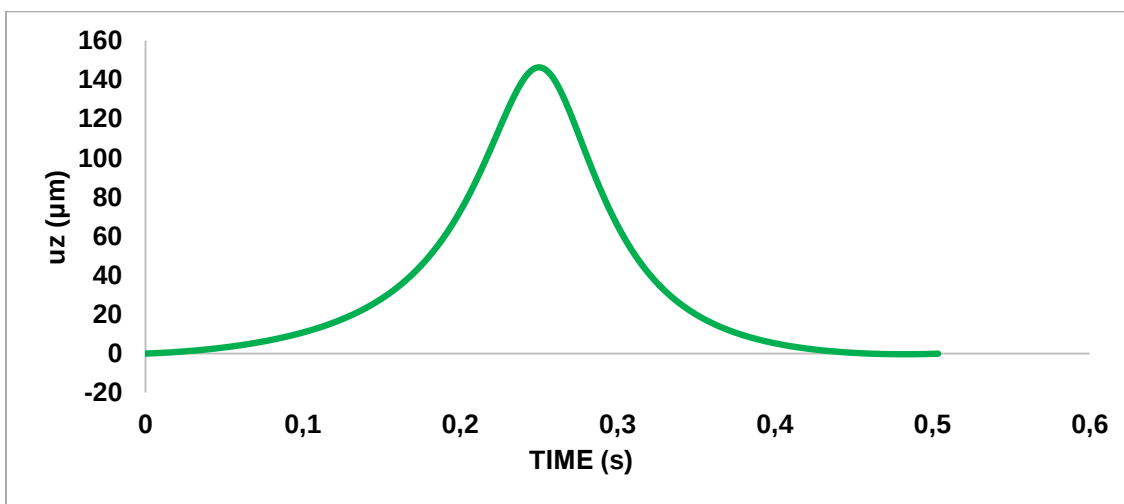
6.1.3 Επιφανειακές υποχωρήσεις

Για τα αποτελέσματα των οριζόντιων επιφανειακών υποχωρήσεων ακολουθούν τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία αφορούν στον άξονα z-z (εικόνα 6.14).



Εικόνα 6.14. Επιφανειακές υποχωρήσεις σημείων

Παρατηρείται πως και οι επιφανειακές υποχωρήσεις κατά την ιξωδοελαστική ανάλυση είναι αυξημένες σε σχέση με την ελαστική ανάλυση.



Εικόνα 6.15. Επιφανειακές υποχωρήσεις σημείου P1

Οι μέγιστες υποχωρήσεις προέκυψαν στο σημείο P1 με τιμή 140,94 μm . Ενδεικτικά στην εικόνα 6.15 παρουσιάζεται αναλυτικότερα το προφίλ των επιφανειακών υποχωρήσεων του σημείου P1 για την ιξωδοελαστική ανάλυση στην ταχύτητα των 60 km/h.

6.2 Επίδραση της μεθόδου προσδιορισμού του E^* στην ιξωδοελαστική ανάλυση

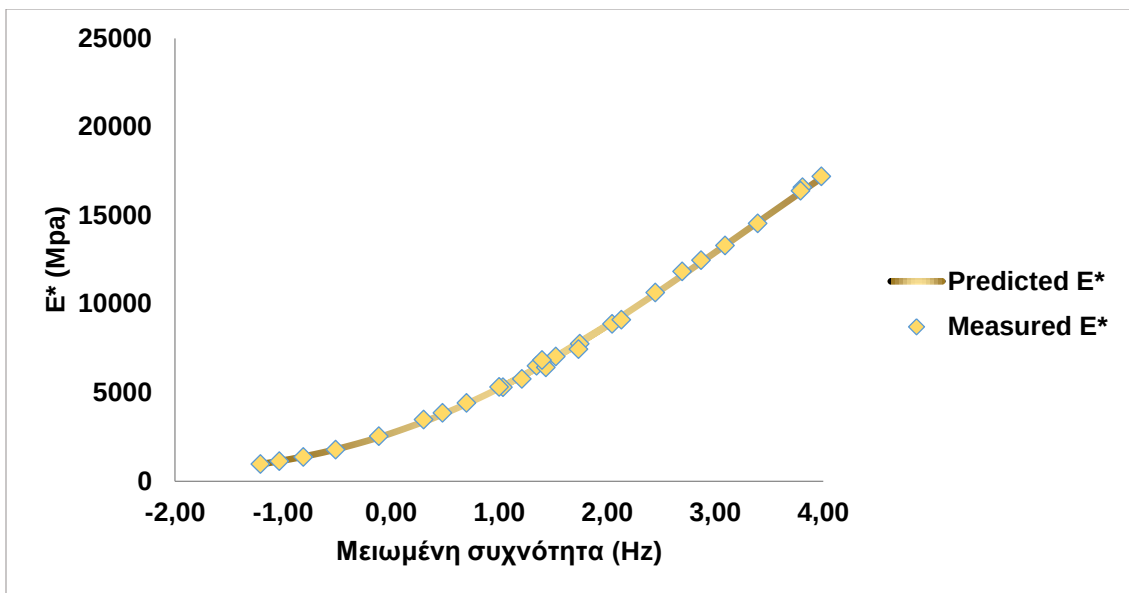
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μεταξύ δυο δοκιμών ιξωδοελαστικής ανάλυσης, της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης και δοκιμής κάμψης δύο σημείων προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση κάθε μιας από τις παραπάνω στη διενέργεια δομικής αξιολόγησης του νέου οδοστρώματος. Η δοκιμή κάμψης δύο σημείων (2PB) αφορά στο χαρακτηρισμό του τυποποιημένου υλικού στη φάση σχεδιασμού. Γίνεται λοιπόν η υπόθεση εργασίας, ότι λόγω της χρονικής στιγμής της αξιολόγησης ($t=0$), χρησιμοποιούνται οι θεωρητικές τιμές του E^* προκειμένου να σχολιαστούν τα αποτελέσματα, στην περίπτωση που δεν είχε γίνει πυρηνοληψία. Επομένως, αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δύο εργαστηριακών δοκιμών (2PB - UC), που αφορούν στην ιξωδοελαστική ανάλυση.

6.2.1 Κεντρική καμπύλη τυποποιημένου υλικού

Ακολουθεί η κεντρική καμπύλη που αφορά στην δοκιμή κάμψης δύο σημείων όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.17 η οποία αφορά στο τυποποιημένο υλικό που θεωρήθηκε στο σχεδιασμό του οδοστρώματος με την μέθοδο IFSTTAR. Οι καμπύλες κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασία αναφοράς $T_0=24\text{ }^{\circ}\text{C}$ αλλά και τις παραμέτρους της εξίσωσης 3.7 (εικόνα 6.16) και στην οποία μετατοπίστηκαν όλα τα δεδομένα.

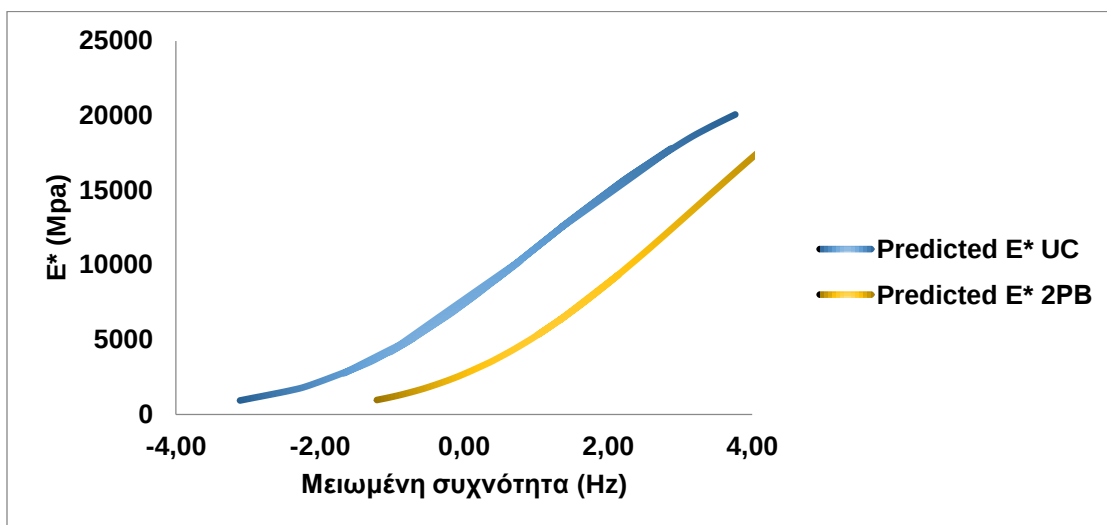
Παράγοντες μετατόπισης $\log a(T)$			master curve			
a	b	c	α	β	γ	δ
0.000385	-0.1375	8.30708	6.145719	-1.50584	0.355646	-2.437102

Εικόνα 6.16. Παραμέτροι εξίσωσης κεντρικής καμπύλης 2PB



Εικόνα 6.17. Κεντρική καμπύλη δοκιμής 2PB

Στην εικόνα 6.18 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των κεντρικών καμπυλών των δύο δοκιμών που ανήκουν στην ιξωδοελαστική ανάλυση. Παρατηρείται πως η κεντρική καμπύλη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης έχει αυξημένες τιμές για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για τον αντίστοιχο αριθμό συχνοτήτων με την δοκιμή κάμψης δύο σημείων. Εφόσον οι δοκιμές αφορούν σε διαφορετικά υλικά, προκύπτει ότι το υλικό που χρησιμοποιήθηκε επιτόπου έχει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από το τυποποιημένο που υποτέθηκε στο σχεδιασμό.

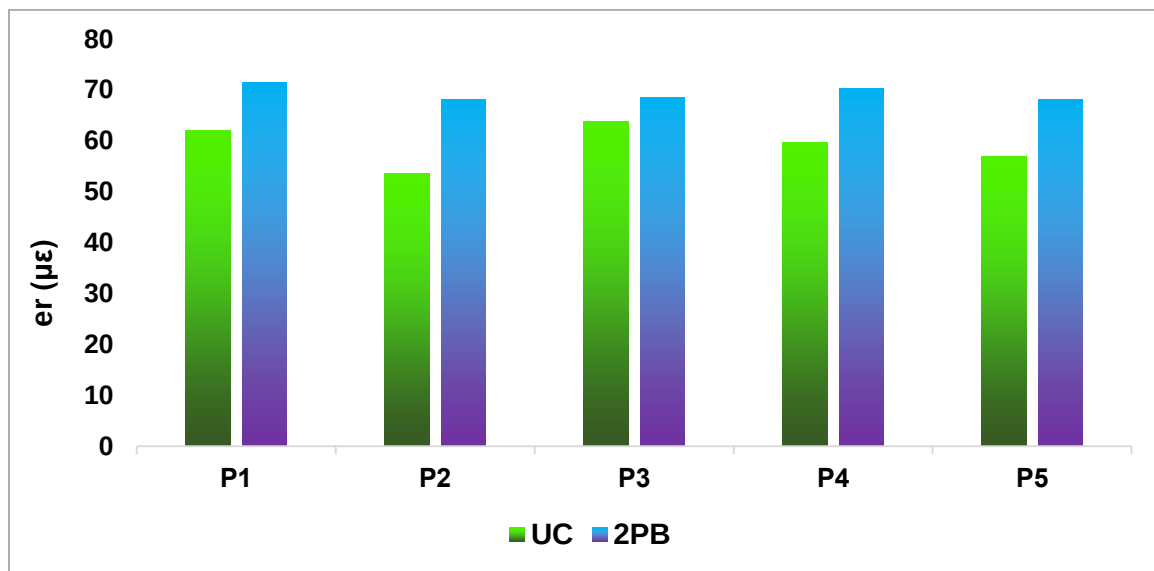


Εικόνα 6.18. Κεντρικές καμπύλες δοκιμής 2PB και UC

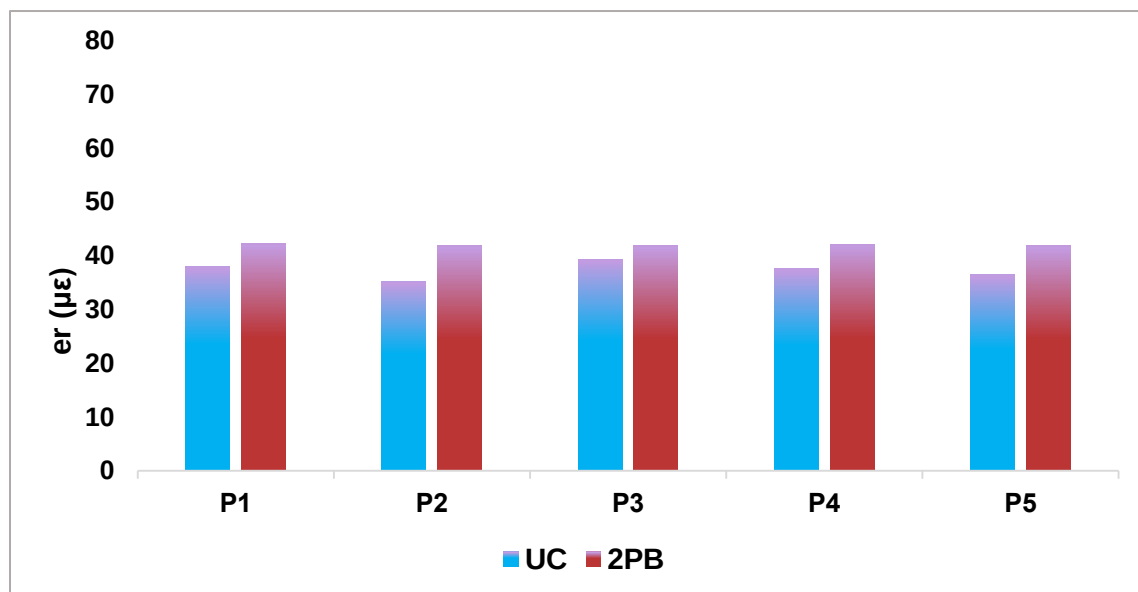
Με βάση τα ανωτέρω, πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί εντατικής κατάστασης με την ιξωδοελαστική ανάλυση.

6.2.2 Οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις

Κατά την σύγκριση των δυο δοκιμών, η δοκιμή κάμψης δύο σημείων οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων γεγονός που υποδηλώνει πως το κατασκευασμένο οδόστρωμα έχει ενδεχομένως καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το σχεδιασθέν. Η μέγιστη τιμή καταγράφεται στο σημείο P1 το οποίο έχει το μικρότερο πάχος ασφαλικών στρώσεων όπως προκύπτει από τις εικόνες 6.19 και 6.20.



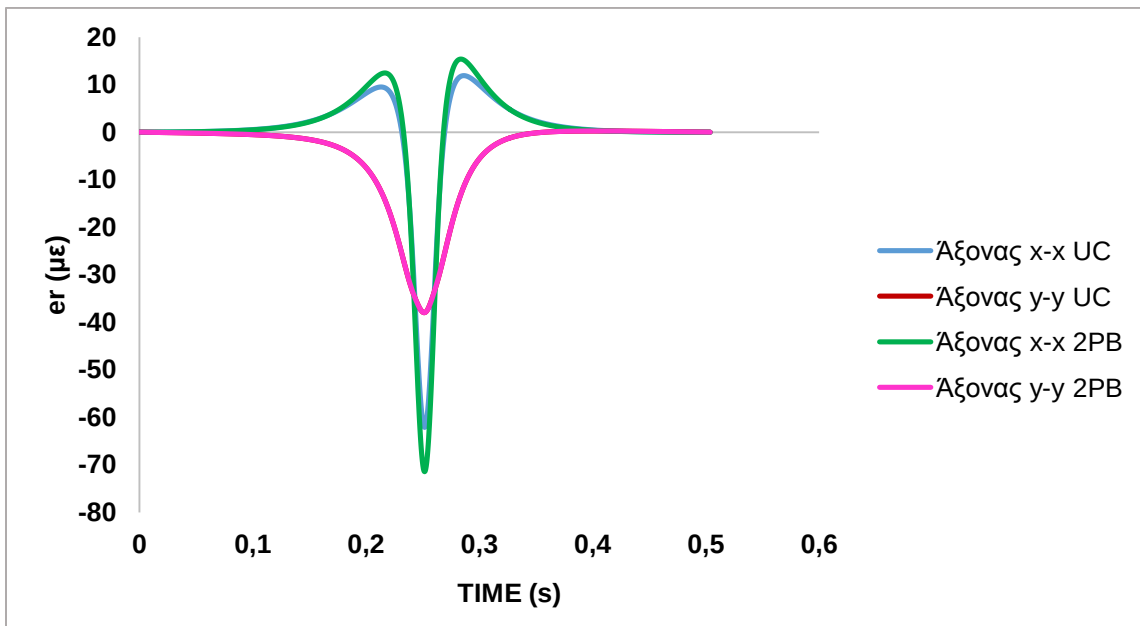
Εικόνα 6.19. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τον άξονα x-x



Εικόνα 6.20. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά τον άξονα y-y

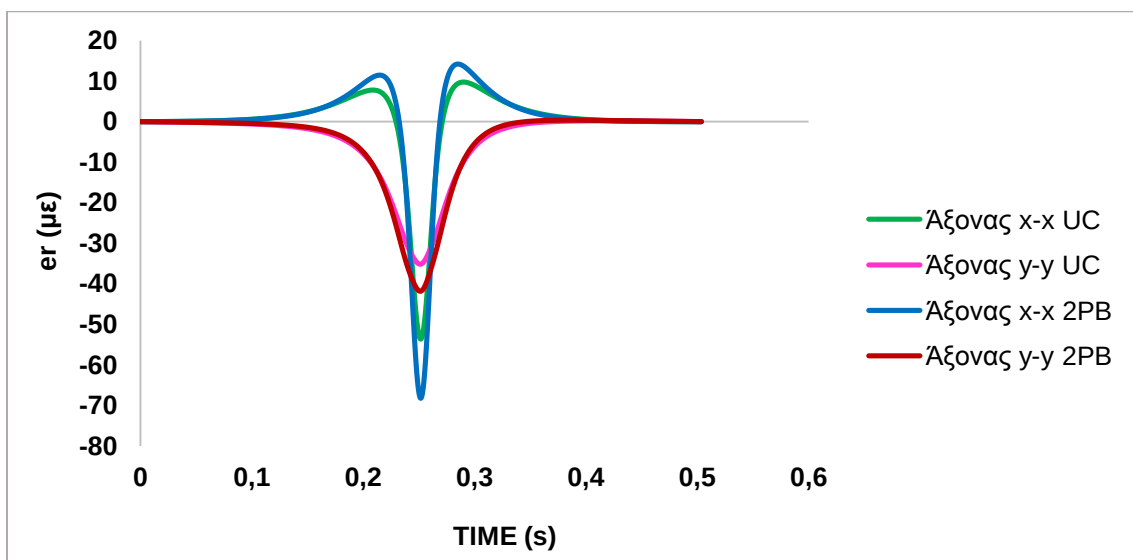
Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι οι οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες για τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων και στις δύο διευθύνσεις. Ακολουθούν ενδεικτικά (εικόνες 6.21- 6.25) τα προφίλ των οριζόντιων παραμορφώσεων και για τις δύο μεθόδους για τις πέντε διαφορετικές θέσεις.

Σημείο P1:



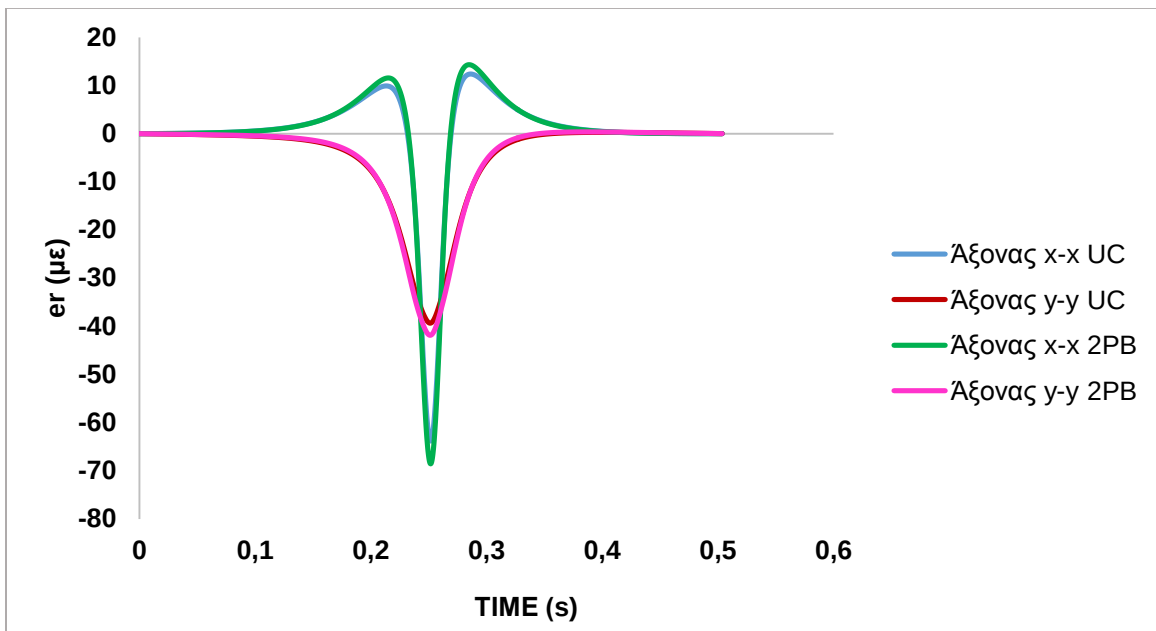
Εικόνα 6.21. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο σημείο P1

Σημείο P2:



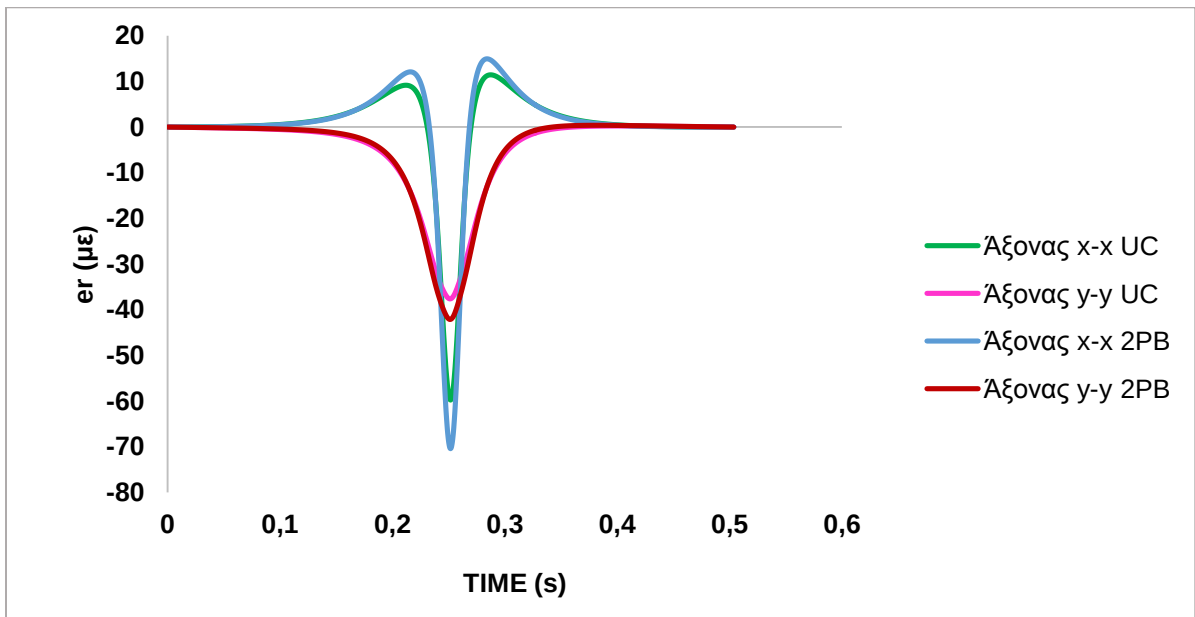
Εικόνα 6.22. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο σημείο P2

Σημείο P3:



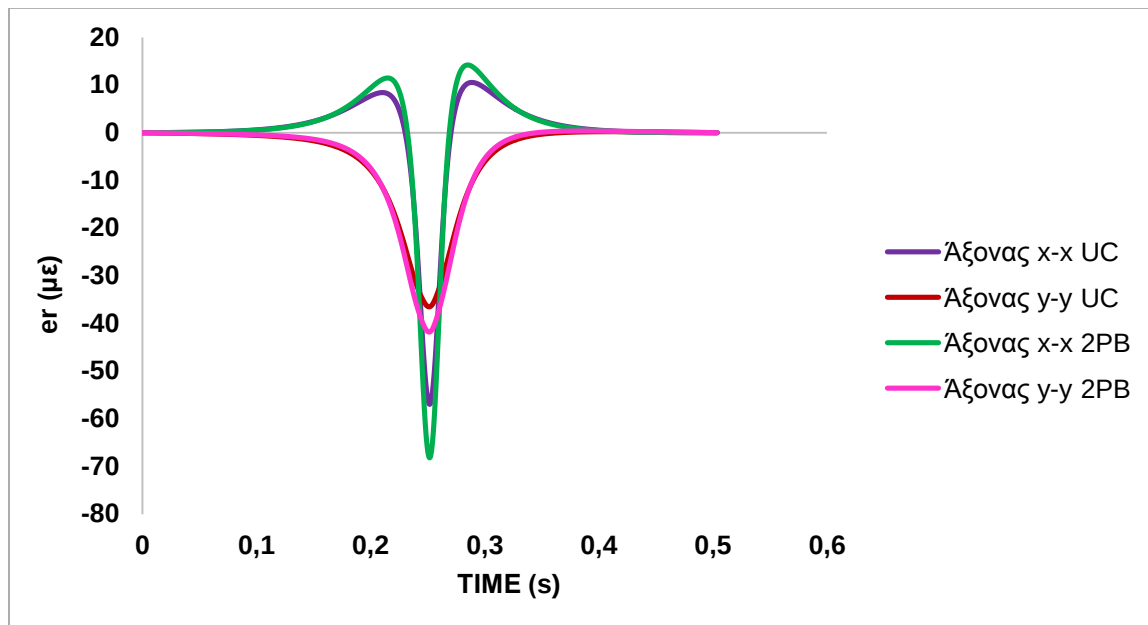
Εικόνα 6.23. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο σημείο P3

Σημείο P4:



Εικόνα 6.24. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο σημείο P4

Σημείο P5:

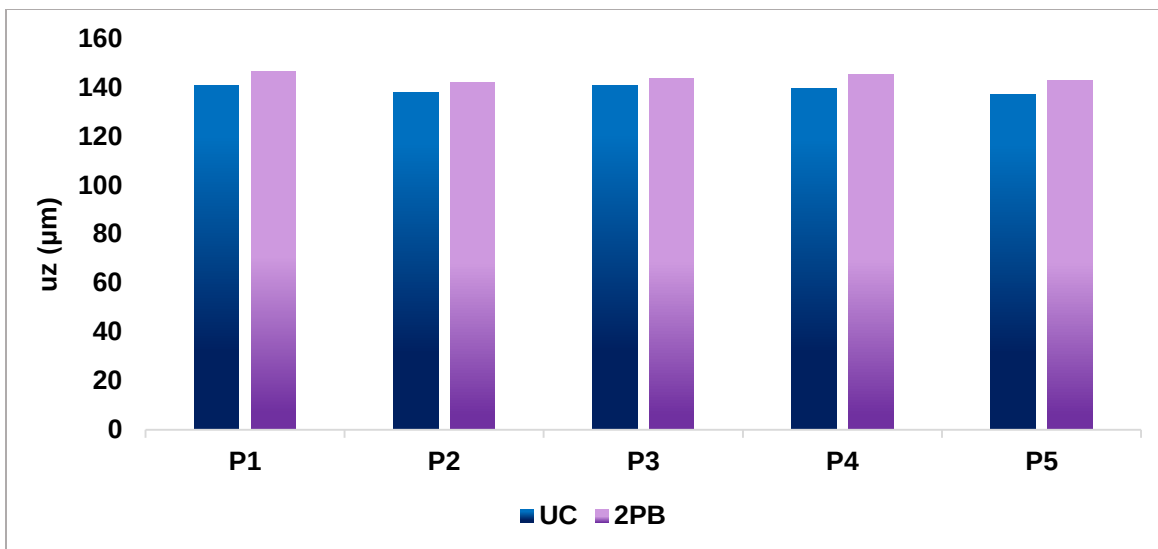


Εικόνα 6.25. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο σημείο P5

Γενικά, χρειάζεται να έχει κανείς υπόψη ότι οι διαφορές που παρατηρούνται στα διαγράμματα οφείλονται στο ότι τα υλικά είναι διαφορετικά. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία, στην περίπτωση που κάποιος ήθελε να πραγματοποιήσει αξιολόγηση οδοστρώματος χωρίς την χρήση πυρήνων, δηλαδή να βασιζόταν στο E^* του θεωρητικού υλικού με βάση το σχεδιασμό.

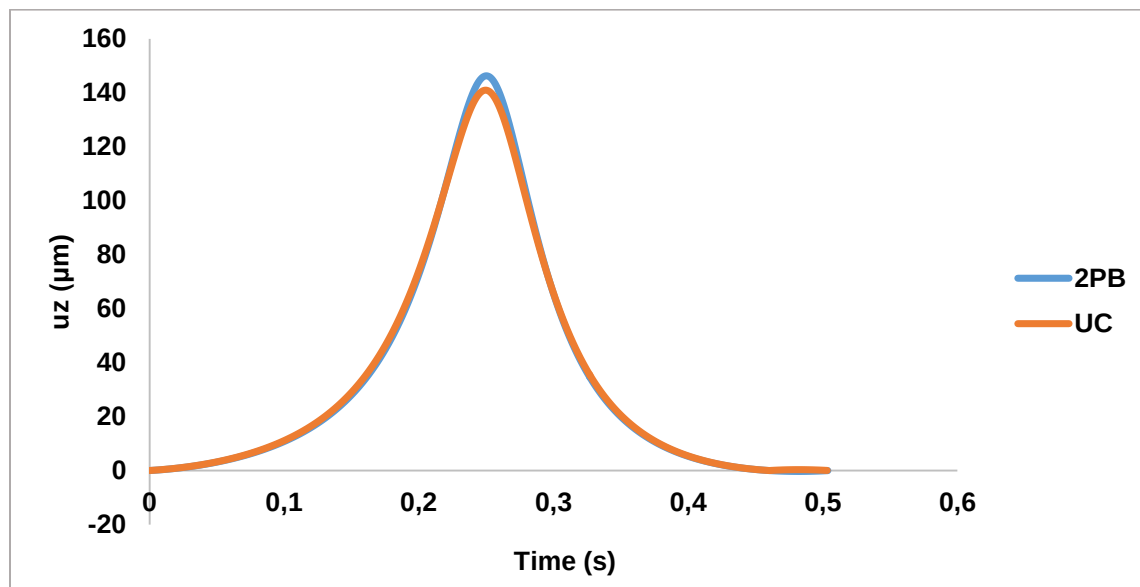
6.2.3 Επιφανειακές υποχωρήσεις

Από τη σύγκριση των μέγιστων επιφανειακών υποχωρήσεων που φαίνεται στην εικόνα 6.23, προκύπτει ότι οι δύο μέθοδοι οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα υποχωρήσεων, ωστόσο οι διαφορές είναι της τάξης 5 έως 6 μm . Η μεγαλύτερη τιμή της υποχώρησης εντοπίζεται στο σημείο P1 και είναι ίση με 146,26 μm .



Εικόνα 6.26. Σύγκριση επιφανειακών υποχωρήσεων

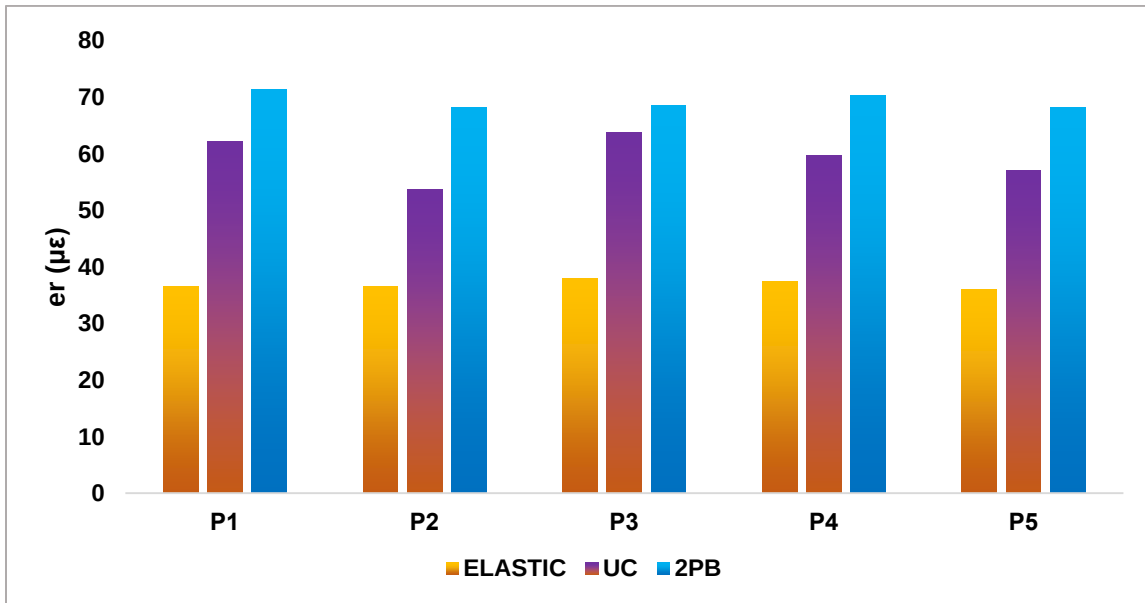
Τα προφίλ των υποχωρήσεων κατά την ιξωδοελαστική ανάλυση στο σημείο με την μεγαλύτερη επιφανειακή υποχώρηση δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές όπως προκύπτει από την εικόνα 6.27.



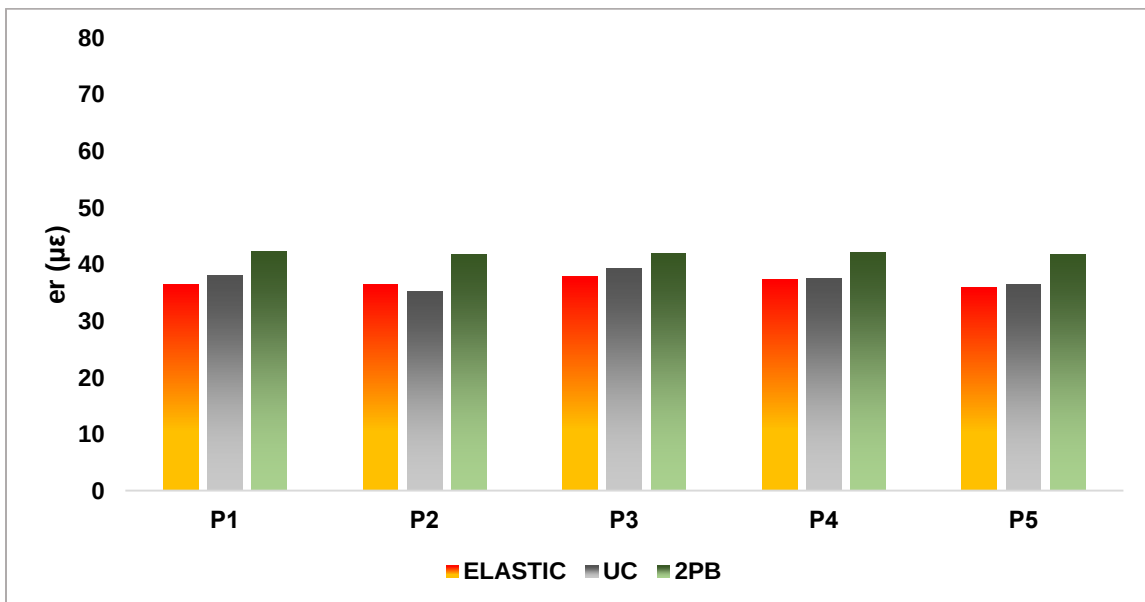
Εικόνα 6.27. Σύγκριση επιφανειακών υποχωρήσεων στο σημείο P1

6.3 Συνολική επισκόπηση παραμορφώσεων και υποχωρήσεων

Όπως προκύπτει από την σύγκρισή των δύο μεθόδων ανάλυσης γίνεται αντιληπτό πως κατά την δοκιμή κάμψης δύο σημείων (ιξωδοελαστική ανάλυση) οι οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι αυξημένες και στις δύο διευθύνσεις όπως στις εικόνες 6.28 και 6.29.

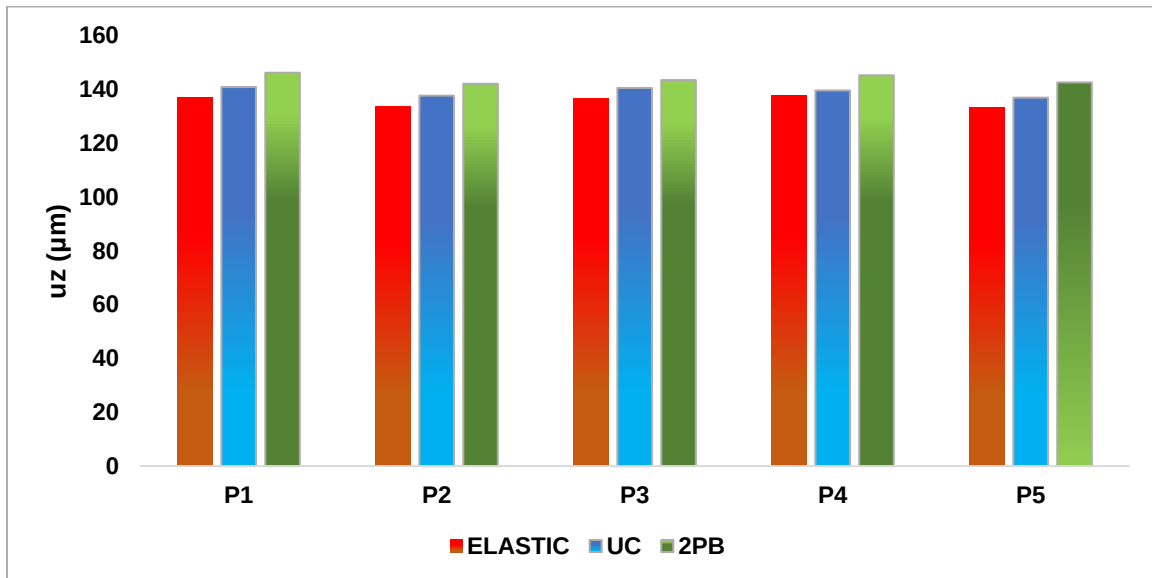


Εικόνα 6.28. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον άξονα x-x



Εικόνα 6.29. Σύγκριση οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον άξονα y-y

Επίσης οι επιφανειακές υποχωρήσεις είναι αυξημένες κατά την δοκιμή κάμψης δύο σημείων από την σύγκριση των αναλύσεων, όπως στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 6.30. Σύγκριση επιφανειακών υποχωρήσεων

7. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στις ασφατικές στρώσεις, λαμβάνοντας υπόψη επιτόπου και εργαστηριακά στοιχεία. Για τις αναλύσεις εντατικής κατάστασης, θεωρήθηκε τόσο η ελαστική όσο και η ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφατομιγμάτων, η οποία αναδείχθηκε μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση ως ιδιαίτερα σημαντική. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αναλύσεων προέκυψε ότι:

- Η επιρροή του τύπου ανάλυσης (ελαστική ή ιξωδοελαστική) είναι περισσότερο εμφανής στις οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφατικών στρώσεων συγκριτικά με τις κατακόρυφες επιφανειακές υποχωρήσεις. Το γεγονός αυτό κρίνεται λογικό εφόσον η ιξωδοελαστική ανάλυση είναι άμεσα συνυφασμένη με την συμπεριφορά του ασφατομίγματος, η οποία εκφράζεται με τις οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις. Αντίθετα, οι επιφανειακές υποχωρήσεις αντανakλούν την συνολική εικόνα του οδοστρώματος και στην παρούσα διερεύνηση δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές.
- Ειδικότερα, όσον αφορά στις οριζόντιες παραμορφώσεις κατά την διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, οι οποίες χαρακτηρίζουν την αντοχή του ασφατομίγματος έναντι κόπωσης, παρατηρήθηκε πως οι τιμές στην ιξωδοελαστική ανάλυση (όπου το E^* προέκυψε από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης) είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της ελαστικής ανάλυσης (όπου το E προέκυψε από ανάλυση στοιχείων FWD). Κατά την διαμήκη διεύθυνση οι τιμές της ελαστικής ανάλυσης εμφανίζουν μια μείωση της τάξεως των 24 με σε σχέση με αυτές της ιξωδοελαστικής, ενώ κατά την εγκάρσια διεύθυνση οι διαφορές κυμαίνονται σε μικρότερες τιμές περί τα 2 με.
- Παρόμοια είναι η εικόνα από την ανάλυση των επιφανειακών υποχωρήσεων αλλά οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις δύο μεθόδους ανάλυσης ήταν πολύ μικρότερες. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των υποχωρήσεων είναι αυξημένες στην ιξωδοελαστική ανάλυση περίπου κατά 4 μm και στα πέντε σημεία όπου έγιναν δοκιμές.

- Περαιτέρω διερευνήθηκε η πιθανή χρήση της θεωρητικής καμπύλης του E^* για το υλικό των ασφαλικών στρώσεων που θεωρήθηκε στον σχεδιασμό. Στην περίπτωση αυτή διερευνήθηκε η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος ελλείψει πυρήνων, οι οποίοι επειδή καταστρέφουν το οδόστρωμα δεν είναι πάντα μια επιθυμητή λύση. Η παραδοχή αυτή θα μπορούσε ενδεχομένως να θεωρηθεί λογική λόγω του χρόνου διενέργειας της αξιολόγησης (δηλαδή ακριβώς μετά την αξιολόγηση της κατασκευής). Δεν θα ήταν αποδεκτή σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή υφιστάμενου οδοστρώματος εφόσον η συμπεριφορά του διαφοροποιείται σημαντικά με τη διέλευση των ετών (πχ γήρανση υλικών, εμφάνιση επιφανειακών φθορών...). Και αυτό συμβαίνει καθώς η πυρηνοληψία παραμένει απαραίτητη για την αξιολόγηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Παρά ταύτα, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διερεύνησης, προέκυψε ότι τα αποτελέσματα της ελαστικής ανάλυσης παραμένουν επίσης μικρότερα σε σχέση με της ιξωδοελαστικής ανάλυσης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η ιξωδοελαστική ανάλυση εμφανίζεται πιο συντηρητική από την ελαστική ανάλυση. Η παρατήρηση αυτή αφορά στα συγκεκριμένα στοιχεία οδοστρώματος και υλικών που εξετάστηκαν και στις αναλύσεις με το συγκεκριμένο εργαλείο.
- Προχωρώντας σε μία σύγκριση των επιμέρους μεθόδων προσδιορισμού του E^* , παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα των οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων κυμαίνονται περίπου στην τάξη μεγέθους. Ωστόσο, η δοκιμή κάμψης δύο σημείων οδήγησε σε μεγαλύτερες τιμές σε εύρος μεταξύ των 5 και 9 με, γεγονός που υποδηλώνει ότι η εργαστηριακή μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος έχει επίδραση στη διαμόρφωση της κεντρικής καμπύλης αλλά και περαιτέρω στον υπολογισμό των κρίσιμων εντατικών μεγεθών. Τέλος, όσον αφορά στην σύγκριση μεταξύ των επιφανειακών υποχωρήσεων παρατηρήθηκαν μικρότερες τιμές κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε εύρος που κυμαίνεται από 6 έως 8 μm .
- Κλείνοντας, εάν ληφθούν υπόψη συνδυαστικά τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει πως διαφορετικές μέθοδοι επιδρούν στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^* άρα και στην αξιολόγηση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος. Το στοιχείο αυτό μαζί με το ζήτημα επιλογής διαφορετικών τύπων ανάλυσης (πχ ελαστική ή ιξωδοελαστική), επιδρά τελικά στην διαδικασία αξιολόγησης του

οδοστρώματος και στην εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής του για τη διαχείριση της συντήρησής του σε βάθος χρόνου.

Κατόπιν τούτων, διαμορφώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα όσον αφορά σε θέματα ανάλυσης και αξιολόγησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, προτείνεται:

- Συγκριτική διερεύνηση για ελαστική και ιξωδοελαστική ανάλυση με θεώρηση μεγαλύτερου φάσματος θερμοκρασιών.
- Διερεύνηση δυνατότητας ένταξης διαφορετικών εργαλείων ανάλυσης και αξιολόγηση των παρατηρούμενων διαφορών.
- Επέκταση της παρούσας διερεύνησης λαμβάνοντας υπόψη άλλα υλικά ασφαλομίγματος και διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

8. Βιβλιογραφία

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

Νικολαΐδης Α.Φ., (2002): Οδοποιία, Οδοστρώματα-Υλικά, Έλεγχος ποιότητας, ISBN 960-91849-0-1, Δεύτερη έκδοση, Θεσσαλονίκη.

Παναγοπούλου Ι.Μ., (2011): Σύστημα οικονομικής και περιβαλλοντικής διαχείρισης οδοστρωμάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

AASHTO (1993): Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.

AASHTO 2002 (2007): Final report from the Florida Department of Transportation, Evaluation of the Dynamic Complex Modulus and Indirect Diametral Test for Implementing the Design Guide for Pavement Structures in Florida.

Balay J. M., Brosseaud Y., Bara B., Castaneda E., (2012): Adaptation of the French pavement design to countries in South America. Congrès 8eme jornadas international des Asfalto, France. 14p.

Beskou N., Theodorakopoulos D., (2011): Dynamic effects of moving loads on road pavements: A review, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(4), 547-567.

Boussinesq J., (1885): Applications des Potentiels a L'Etude de l'Equilibre et du Movement des Solides Elastiques. Gauthier Villars, Paris.

Bonaquist R., Christensen D. W., (2005): A Practical Procedure for Developing Dynamic Modulus Master Curves for Pavement Structural Design. Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting. Washington, DC.

Burmister D., (1944): The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. Transportation Research Board: Highway Research Board Proceedings, 23, 126-148.

Burmister D., (1945): The general theory of stresses and displacements in layered systems I, II, III. Journal of Applied Physics, 16(2), 89-94, 126-127, 296-302.

Benedetto H.Di., Pearl M.N, Franken L., C De La Roche Saint Andre., (2001): Stiffness testing for bituminous mixtures, Materials and Structures, Vol. 34, pp 66-70.

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.

Cocurullo A, Airey G. D., Collop A. C. and Sangiorgi C., (2008): Indirect Tensile versus Two Point Bending Fatigue Testingll. ICE Transport, Vol.161, Issue TR4, pp. 207-220, 2008. ISSN 0965-092X.

Complex Modulus Testing of Asphalt Concrete (1996): Account of a RILEM Interlaboratory Test Program. Paper presented to the Transportation Research Board Meeting, Washington.

Dougan E., Stephens J. E., Mahoney J., Hansen, (2003): E* - dynamic modulus -Test Protocol – Problems and Solutions, University of Connecticut Connecticut Transportation Institute 179 Middle Turnpike.

EAPA (European Asphalt Pavement Association), (2010): “What is Asphalt.”

Elseifi M., Al-Qadi I., Yoo P., (2007): Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements. *Journal of Engineering Mechanics*, 132 (2), 172-178.

EN 12697-26, (2004): Bituminous mixtures-Test methods for Hot Mix Asphalt-Part 26: Stiffness, European Committee for Standardization.

EN 12697-24, (2007): Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue.

Francken L., Verstraeten J., (1994): Interlaboratory test program.Part II, Repeated loading tests, Draft Report, RILEM TC 152-PBM.

Francken L., Partl, M. N. and RILEM TC 152-PBM, (1996): Complex Modulus Testing of Asphalt Concrete, Account of a RILEM Interlaboratory Test Program. Paper presented to the Transportation Research Board Meeting, Washington.

Garba R., (2002): Permanent Deformation Properties of Asphalt Concrete Mixtures, Thesis submitted to the Department of Road and Railway Engineering, Norwegian University of Science and Technology, in partial fulfilment of the requirements for Dr.Ing degree.

Guidelines for the Use of the Falling Weight Deflectometer in Ireland (2000): CC-GSW-04008

Huang Y.H., (1993): Pavement Analysis and Design. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.

Huang Y.H., (2004): Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Huang Y., Liu Z., Wang X., Li Sh., (2016): Comparative study on dynamic modulus of asphalt mix with two-point bend and uniaxial compression, Changsha University of Science and Technology, Changsha, P.R.

ISSN 0169-9288., (2001): The uniaxial tension test, Asphalt Concrete Response (ACRe), ir. S.M.J.G. Erkens and ing. M.R. Poot.

Koohmishi M., (2013): Comparison of pavement layers responses with considering different models for asphalt concrete viscoelastic properties, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Teheran, Teheran.

LCPC/SETRA Ed., (1992): Realisation des remblais et des couches de forme - Fasc. 1 et 2, 98p +102p.

LCPC-SETRA (1994): Conception de dimensionnement des structures de chaussées: Guide technique national, France.

LCPC/SETRA Ed., (1997): French design manual for pavement structures, 250 p.

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

Maggiore C., Airey G., (2013): Evaluation of stiffness and fatigue using 2 Point Bending and Indirect Tensile Fatigue tests, University Park, Nottingham.

Maggiore C., (2014): A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue. PhD thesis, University of Nottingham.

Mejlun Ł., Judycki J., Dołżycki B., (2017): Comparison of elastic and viscoelastic analysis of asphalt pavement at high temperature, Gdansk University of Technology, Gdańsk.

Molenaar A.A.A., Houben Ir. L.J.M., (2011): Cement-bound road base materials, Report 7-11-218-1 Delft University of Technology, PowerCem Technologies.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2008): Falling Weight Deflectometer Usage. Washington, DC.

NCHRP (2004): Guide for Mechanistic –Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures NCHRP 1-37A Final Report NCHRP, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

Newcomb D.E., Buncher M., Huddleston I.J., (2001): Concepts of Perpetual Pavements, Transportation Research Board, National Research Center, Washington, pp. 4-11.

Odemark N., (1949): Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity. Transportation Research Record.

Olard F. and Benedetto, H.D., (2003): General ‘2S2P1D’ model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes. Road Materials and Pavement Design: An International Journal, 4, 185–224.

Oshone M., Elshaer M., Dave E., Daniel J.S., (2017): Evolution of asphalt modulus from falling weight deflectometer tests and challenges associated with its interpretation and applications: A case study using LTPP data, University of New Hampshire, Durham, NH.

Rowe G. M., (1993): Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 62. SHRP-A-404 1994. —Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Washington.

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.

Sargand S., (2002): Three dimensional modeling of flexible pavements.

Rep. No. FHWA/HWY-02/2002.

Schmalzer, P. N., FHWA-HRT-06-132 (2006): LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements, Version 4.1.

Siddhartan R., Krishnamenon N., Sebaaly P., (2000): Pavement Response Evaluation Using Finite-Layer Approach, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1709 43–49.

Yin H., Solaimanian M., Kumar T., Stoffels S., (2007): The effects of loading time on flexible pavement dynamic response: a finite element analysis. Journal of Mechanics of Time-Dependent Materials, 11(3-4), 265-288.

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