ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

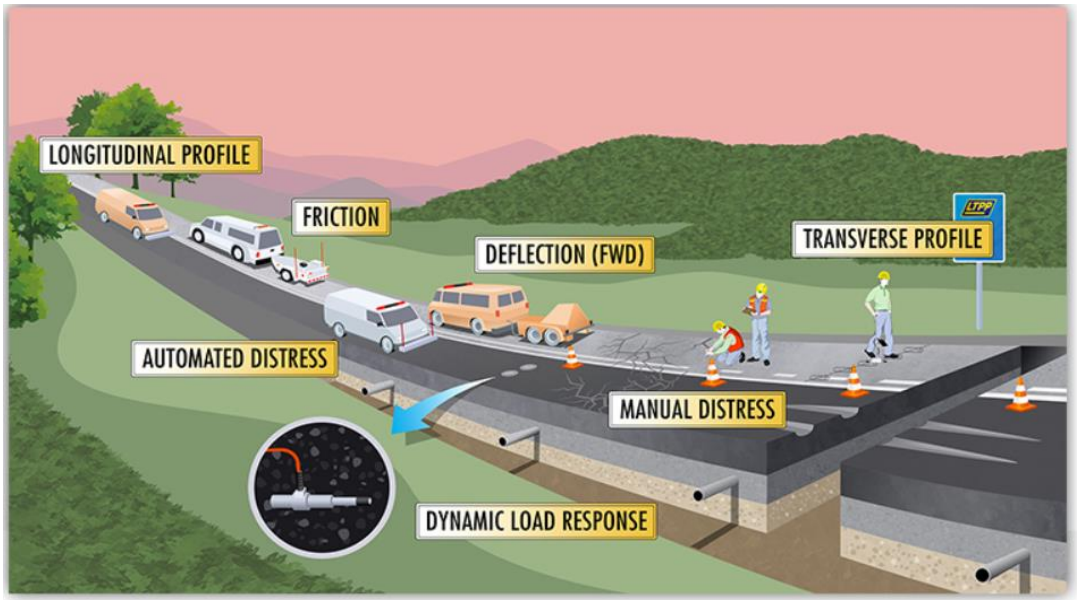
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΚΑΤΣΑΡΟΥ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

Επιβλέπουσα:

Πλατή Χριστίνα | Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2019

Κατσαρού Χ. (2019)
Διερεύνηση της Επίδρασης της Δυναμικής Φόρτισης στο Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων
Διπλωματική Εργασία
Εργαστήριο Οδοποιίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Katsarou Ch. (2019)
Investigation of the Effect of Dynamic Loading on the Design of Flexible Pavements
Diploma Thesis
Laboratory of Pavement Engineering, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες iii

Κατάλογος Εικόνων iv

Κατάλογος Πινάκων vii

Περίληψη ii

Abstract iii

1 Εισαγωγή 4
1.1 Αντικείμενο 4
1.2 Στόχος-Μεθοδολογία 5
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας 6

2 Παράμετροι Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμά- των 7
2.1 Σχεδιασμός Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων 7
2.2 Παράμετροι Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων 8
2.3 Συνήθεις Φθορές 9
2.4 Στατική Φόρτιση 13
2.5 Δυναμική Φόρτιση 14

3 Δυναμική Φόρτιση στο Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων 17
3.1 Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση 17
3.2 Παράμετροι Δυναμικής Φόρτισης 21
3.2.1 Ανάγκη διερεύνησης δυναμικής φόρτισης 21
3.2.2 Μετάβαση από τη στατική στη δυναμική φόρτιση 22
3.2.3 Δυναμική απόκριση εύκαμπτων οδοστρωμάτων 23
3.2.4 Συχνότητα φόρτισης 27
3.2.5 Θερμοκρασία 31

4 Εργαλεία Ανάλυσης Δυναμικής Φόρτισης 33
4.1 Επισκόπηση 33
4.2 Λογισμικό 3D-Move Analysis 38

5 Πειραματική Διαδικασία 45
5.1 Περιγραφή της διαδικασίας 45
5.2 Καθορισμός Σταθερών Παραμέτρων Σχεδιασμού 47
5.2.1 Φορτίο/Πίεση τροχού 47
5.2.2 Κυκλοφορία 47
5.2.3 Φέρουσα ικανότητα βάσης/υπόβασης και έδρασης 47
5.2.4 Αξιοπιστία 48
5.3 Καθορισμός Μεταβλητών Παραμέτρων Σχεδιασμού 48
5.3.1 E* ασφαλτομίγματος 48
5.3.2 Συχνότητα 49
5.3.3 Θερμοκρασία 52
5.4 Καθορισμός Διατομής Αναφοράς 52

6 Στατική Φόρτιση - Ανάλυση Ευαισθησίας 54

7 Δυναμική Φόρτιση – Ανάλυση Ευαισθησίας 62

8 Συγκριτική Ανάλυση 70
8.1 Σύγκριση ως προς τη Θερμοκρασία 70
8.2 Σύγκριση ως προς την Ταχύτητα 75
8.3 Σύγκριση ως προς τα Εντατικά Μεγέθη 76

9 Σχόλια-Συμπεράσματα 81

10 Βιβλιογραφία 85

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, για τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την διάρκεια των φοιτητικών χρόνων μου, καθώς και τις υποδείξεις και πολύτιμες συμβουλές τους.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα μου, Επίκουρο Καθηγήτρια κ. Χριστίνα Πλατή, για την εμπιστοσύνη που έδειξε εξαρχής στο πρόσωπο μου, αναθέτοντας μου την παρούσα διπλωματική εργασία και την ευκαιρία που μου έδωσε, μέσα από αυτήν, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Η καθοδήγηση, η οργάνωση και η εκτίμηση που μου έδειξε αποτέλεσαν για εμένα πολύτιμη βοήθεια από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Κωνσταντίνα Γεωργούλη, Διδάκτορα Μηχανικό του ΕΜΠ, η οποία συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, μέσω της υποστήριξης της στη διεξαγωγή της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ολόψυχη αγάπη και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια, και όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, ιδιαίτερα τη Φιλοθέη και τη Μαρία, για την ηθική συμπαράσταση και την κατανόηση κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειας μου.

Κατσαρού Χαρίκλεια,

Αθήνα, 3/2019

ΕΜΠ

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΡΟΧΟΥ (ELSHAER 2009)..... 8
ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ 9
ΕΙΚΌΝΑ 2.3: ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ..... 10
ΕΙΚΟΝΑ 2.4: ΡΩΓΜΕΣ ΤΥΠΟΥ ΑΛΙΓΑΤΟΡΑ 12
ΕΙΚΟΝΑ 2.5: ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ..... 13
ΕΙΚΟΝΑ 2.6: ΟΡΘΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΗΜΙΧΩΡΟ ΛΟΓΩ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (HUANG 2004) 14
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΚΑΙ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ (WWW.PAVEMENTINTERACTIVE.ORG) 17
ΕΙΚΟΝΑ 3.2: ΣΤΑΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ (ΛΟΪΖΟΣ, ΠΛΑΤΗ 2016) 19
ΕΙΚΟΝΑ 3.3: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ (ΛΟΪΖΟΣ, ΠΛΑΤΗ 2016)..... 19
ΕΙΚΟΝΑ 3.4: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (KHAVASSEFAT P. 2014) 22
ΕΙΚΟΝΑ 3.5: ΠΡΟΒΟΛΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (KHAVASSEFAT P. ET AL 2015)..... 24
ΕΙΚΟΝΑ 3.6: ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 26
ΕΙΚΌΝΑ 3.7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ (NORMAL STRAINS, MICRONS) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (TIME, SEC) (ULLOA ET AL 2013) 29
ΕΙΚΌΝΑ 3.8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (FREQUENCY, HZ) ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΡΗΓΟΡΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ FOURIER (FAST FOURIER TRANSFORM OR FFT) (ULLOA ET AL 2013) 29
ΕΙΚΟΝΑ 3.9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (EX ΚΑΙ EY) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ 3D-MOVE ΚΑΙ ELSYM5 (SIDDHARTHAN RAJ V. 1998)..... 31
ΕΙΚΟΝΑ 3.10: ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ (FWD) 32
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ/ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ MEPDG (NCHRP 2004)..... 34
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: ΑΡΧΙΚΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΚΑΛΩΣΟΡΙΣΜΑΤΟΣ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML)..... 38
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: ΤΟ ΚΥΡΙΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΤΟΥ 3D-MOVE ANALYSIS (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML)..... 39
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΞΟΝΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΙΕΣΗ ΕΠΑΦΗΣ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML)..... 40
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML)..... 41
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: ΚΑΜΠΥΛΕΣ E* ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ (MASTER CURVES) (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML)..... 41

ΕΙΚΟΝΑ 4.7: ΣΗΜΕΙΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML) 42
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML) 43
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (HTTP://WWW.ARC.UNR.EDU/SOFTWARE.HTML) 44
ΕΙΚΟΝΑ 5.1: ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 45
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ 49
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ ΣΕ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ (HAJJ ET AL 2011) 50
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΑΣΕΩΝ (BURMISTER) – ΤΑΧΥΤΗΤΑ 52
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ 53
ΕΙΚΟΝΑ 6.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=40 ΚΜ/Η) 54
ΕΙΚΟΝΑ 6.2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=50 ΚΜ/Η) 55
ΕΙΚΟΝΑ 6.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=60 ΚΜ/Η) 56
ΕΙΚΟΝΑ 6.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=70 ΚΜ/Η) 57
ΕΙΚΟΝΑ 6.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=80 ΚΜ/Η) 58
ΕΙΚΟΝΑ 6.6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=90 ΚΜ/Η) 59
ΕΙΚΟΝΑ 6.7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=15 ^{O}C) 60
ΕΙΚΟΝΑ 6.8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=20 ^{O}C) 60
ΕΙΚΟΝΑ 6.9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=25 ^{O}C) 61
ΕΙΚΟΝΑ 7.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=40 ΚΜ/Η) 62
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=50 ΚΜ/Η) 63
ΕΙΚΟΝΑ 7.3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=60 ΚΜ/Η) 64
ΕΙΚΟΝΑ 7.4: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=70 ΚΜ/Η) 65
ΕΙΚΟΝΑ 7.5: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=80 ΚΜ/Η) 66
ΕΙΚΟΝΑ 7.6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=90 ΚΜ/Η) 67
ΕΙΚΟΝΑ 7.7: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=15 ^{O}C) 68
ΕΙΚΟΝΑ 7.8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=20 ^{O}C) 68
ΕΙΚΟΝΑ 7.9: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=25 ^{O}C) 69
ΕΙΚΟΝΑ 8.1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=40 ΚΜ/Η) 70
ΕΙΚΟΝΑ 8.2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=50 ΚΜ/Η) 71
ΕΙΚΟΝΑ 8.3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=60 ΚΜ/Η) 71
ΕΙΚΟΝΑ 8.4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=70 ΚΜ/Η) 72
ΕΙΚΟΝΑ 8.5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=80 ΚΜ/Η) 72
ΕΙΚΟΝΑ 8.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=90 ΚΜ/Η) 73
ΕΙΚΟΝΑ 8.7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=15 ^{O}C) 75
ΕΙΚΟΝΑ 8.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=20 ^{O}C) 75
ΕΙΚΟΝΑ 8.9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (T=25 ^{O}C) 76

ΕΙΚΟΝΑ 8.10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 77
ΕΙΚΟΝΑ 8.11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 78
ΕΙΚΟΝΑ 8.12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (T=15 ^{O}C)..... 79
ΕΙΚΟΝΑ 8.13: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (T=20 ^{O}C)..... 79
ΕΙΚΟΝΑ 8.14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (T=25 ^{O}C)..... 80

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΑΙΤΙΑ ΦΘΟΡΑΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 10
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΔΡΟΜΟΥ (AASHTO 1993) 48
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ 51
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=40 ΚΜ/Η) 54
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=50 ΚΜ/Η) 55
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=60 ΚΜ/Η) 56
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=70 ΚΜ/Η) 57
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=80 ΚΜ/Η) 58
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=90 ΚΜ/Η) 59
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=40 ΚΜ/Η) 62
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=50 ΚΜ/Η) 63
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=60 ΚΜ/Η) 64
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=70 ΚΜ/Η) 65
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=80 ΚΜ/Η) 66
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΧΟΥΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (V=90 ΚΜ/Η) 67
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.2: ΤΙΜΕΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 77
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.3: ΤΙΜΕΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ 77
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4: ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΙΜΩΝ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 78

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση της Επίδρασης της Δυναμικής Φόρτισης στο Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Κατσαρού Χ. (Επιβλέπουσα: Πλατή Χ.)

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλλει στη διερεύνηση της επίδρασης της δυναμικής φόρτισης στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Επικεντρώνεται σε παραμέτρους της δυναμικής φόρτισης όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και κατ' επέκταση, η συχνότητα φόρτισης. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς οι εν λόγω παράμετροι επηρεάζουν το προϊόν σχεδιασμού, δηλαδή το οδόστρωμα. Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στις αρχές σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, τη θεώρηση της δυναμικής φόρτισης, καθώς και διάφορα εργαλεία ανάλυσης για το σχεδιασμό. Στη συνέχεια, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, η οποία πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, επιλέγεται μία διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου και πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, με θεώρηση στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης της διατομής αναφοράς μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας. Με τις αναλύσεις αυτές, διερευνάται ο βαθμός με τον οποίο οι εκάστοτε συνθήκες επηρεάζουν τα απαιτούμενα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων του θεωρούμενου οδοστρώματος. Τέλος, αξιολογούνται συνολικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Λέξεις Κλειδιά: δυναμική φόρτιση, δυναμική ανάλυση, εύκαμπτα οδοστρώματα, ιξωδοελαστικότητα, ταχύτητα οχήματος, συχνότητα φόρτισης, θερμοκρασία, ανάλυση ευαισθησίας.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF PAVEMENT ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Investigation of the Effect of Dynamic Loading on the Design of Flexible Pavements

Katsarou Ch. (Supervised by Plati Ch.)

Abstract

The present diploma thesis aims at investigating the effect of dynamic loading on the design of flexible pavements. It is focused on parameters of dynamic loading such as temperature, vehicle speed and by extension, loading frequency. Specifically, it is investigated how these parameters affect the design product, which is the pavement. First, a bibliographical review is undertaken to take into account all the previous scientific knowledge of the principles of flexible pavement design, as well dynamic loading considerations and various analysis tools for the design. Next, the experimental process, which was carried out on the purpose of the thesis, is described. This is applied on the design of a flexible highway pavement considering both, static and dynamic loading. Sensitivity analysis of the testing results is performed to identify how the thickness of the asphalt layer of the reference pavement cross-section changes due to the change in temperature or vehicle speed. In other words, it is assessed the extent to which each condition affects the required thicknesses of the pavement under consideration. Finally, the research results are evaluated overall.

Keywords: dynamic loading, dynamic analysis, flexible pavements, viscoelasticity, vehicle speed, loading frequency, temperature, sensitivity analysis**.**

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος και γενικά οι κατασκευές στην οδοποιία είναι από τα πιο ενδιαφέροντα θέματα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι πολιτικοί μηχανικοί, σε συνεργασία βέβαια και με άλλους φορείς. Οι προκλήσεις σε αυτόν τον τομέα κατασκευών είναι αρκετές, γιατί οι περισσότερες κατασκευές οδοστρωμάτων είναι δημόσιες και πρέπει να πληρούν όλες τις προδιαγραφές για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του κοινού.

Παρόλο που ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων εξελίχθηκε σταδιακά από τέχνη σε επιστήμη, η εμπειρία συνεχίζει να παίζει σημαντικό ρόλο μέχρι και σήμερα. Ως τις αρχές της δεκαετίας του 1920, το πάχος του οδοστρώματος υπολογιζόταν με βάση την εμπειρία. Με την πάροδο του χρόνου και την αποκτώμενη εμπειρία, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι, από διάφορους παγκόσμιους οργανισμούς, με σκοπό τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους του οδοστρώματος (Huang 2004).

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν διεξαχθεί, χρησιμοποιούν ένα πολυστρωματικό γραμμικό ελαστικό μοντέλο υπό στατική φόρτιση, για τον υπολογισμό του πάχους του οδοστρώματος. Το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο αναπτύχθηκε αρχικά από τον Burmister (1944) για γραμμικά ελαστικά συστήματα δύο στρώσεων και την επιβολή στατικού φορτίου. Το στατικό φορτίο είναι ένα σταθερό, κυκλικό φορτίο τροχού και μπορεί να εξηγηθεί από τη γεωμετρία και τη μάζα του ίδιου του φορτίου. Όμως, με την αύξηση του μεγέθους του ωφέλιμου φορτίου των βαρέων οχημάτων, καθώς και την αύξηση της ταχύτητας κίνησης, χρειάστηκε να διερευνηθούν η απόκριση και το πάχος του οδοστρώματος υπό δυναμική φόρτιση. Δυναμικό είναι ένα φορτίο που κινείται και αλλάζει. Το δυναμικό φορτίο συνεπάγεται αδράνεια, απόσβεση, δυσκαμψία και όρους μάζας. Η δυναμική φόρτιση μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη ζημιά στο οδόστρωμα από ό,τι θα έδειχνε η στατική φόρτιση. Η διερεύνηση των δυναμικών παραμορφώσεων του οδοστρώματος κάτω από κινούμενα κυκλοφοριακά φορτία έδειξε ότι οι δυναμικές επιδράσεις των κινούμενων φορτίων είναι σημαντικές και δεν πρέπει να αγνοούνται (Zafir et al 1994). Αυτή η διερεύνηση κατέδειξε τη χρησιμότητα της τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση ενός πολυστρωματικού συστήματος οδοστρώματος υπό δυναμικά φορτία.

Η δυνατότητα να εφαρμόζεται η δυναμική ανάλυση αντί της στατικής, συνεχίζει να αποτελεί αντικείμενο έρευνας υψηλού ενδιαφέροντος. Πιστεύεται ότι, η συγκριτική ανάλυση στατικής και δυναμικής φόρτισης, ως προς το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, καθώς και η θεώρηση οικονομοτεχνικών κριτηρίων στο σχεδιασμό του οδοστρώματος, θα επιτρέψει στο μηχανικό να επιλέξει τη βέλτιστη λύση προκειμένου να κάνει σωστή διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, η οποία να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για αντοχή και λειτουργικότητα της κατασκευής.

1.2 Στόχος-Μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλλει στη διερεύνηση της επίδρασης της δυναμικής φόρτισης στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Επικεντρώνεται σε παραμέτρους της δυναμικής φόρτισης όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και κατ' επέκταση, η συχνότητα φόρτισης. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς οι εν λόγω παράμετροι επηρεάζουν το προϊόν σχεδιασμού, δηλαδή το οδόστρωμα.

Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στις αρχές σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, τη θεώρηση της δυναμικής φόρτισης, καθώς και διάφορα εργαλεία ανάλυσης για το σχεδιασμό. Στη συνέχεια, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, η οποία πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, επιλέγεται μία διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου και πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, με θεώρηση στατικής και δυναμικής φόρτισης. Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης της διατομής αναφοράς μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας. Με τις αναλύσεις αυτές, προβλέπεται να διερευνηθεί ο βαθμός με τον οποίο οι εκάστοτε συνθήκες επηρεάζουν τα απαιτούμενα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων του θεωρούμενου οδοστρώματος. Τέλος, αξιολογούνται συνολικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται συνολικά από δέκα κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Συγκεκριμένα :

Στο **2ο κεφάλαιο** αναπτύσσονται οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και οι συνήθεις μορφές φθοράς που εμφανίζονται σε αυτά.

Στο **3ο κεφάλαιο** επισημαίνονται οι βασικές αρχές της δυναμικής φόρτισης στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και οι οικείες παράμετροι σχεδιασμού.

Στο **4ο κεφάλαιο** καταγράφονται μέσα από τη διεθνή βιβλιογραφία εργαλεία για την ανάλυση υπό δυναμική φόρτιση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην περιγραφή του λογισμικού 3D-Move Analysis, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο **5ο κεφάλαιο** περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται και οι σχετικές υποθέσεις ή παραδοχές.

Στο **6ο κεφάλαιο** πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας στατικής φόρτισης ως προς το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, στη θεωρούμενη διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.

Στο **7ο κεφάλαιο** πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας δυναμικής φόρτισης ως προς το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, στη θεωρούμενη διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.

Στο **8ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της στατικής και της δυναμικής φόρτισης.

Στο **9ο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και επισημαίνονται σημεία ενδιαφέροντος για περαιτέρω έρευνα.

Στο **10ο κεφάλαιο** περιέχονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

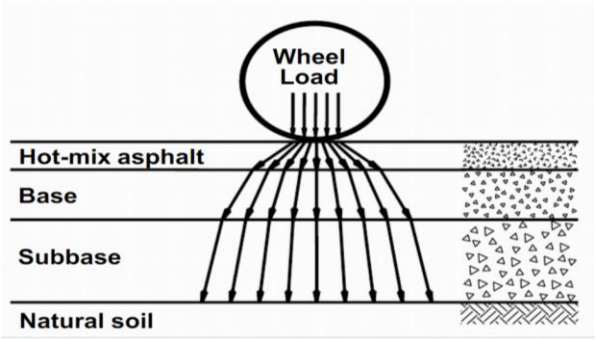
2 Παράμετροι Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

2.1 Σχεδιασμός Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον υπολογισμό του πάχους της κάθε στρώσης, οι οποίες σαν σύνολο συνθέτουν το οδόστρωμα (Νικολαΐδης 2011). Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι ο σχεδιασμός του οδοστρώματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξυπηρετεί αποτελεσματικά το σύνολο της κυκλοφορίας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία του κύκλου ζωής μίας οδικής υποδομής. Οι μελέτες των μηχανικών αναφορικά με το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων έχουν παγιώσει την αντίληψη ότι πρόκειται για ένα κλάδο δυναμικό, υπό την έννοια ότι καθώς με την πρόοδο των επιστημών νέες μέθοδοι και υλικά γνωστοποιούνται, η εγκυρότητα των ως τότε διαδικασιών κρίνεται αμφισβητήσιμη. Ωστόσο, οι βασικές αρχές σχεδιασμού παραμένουν αναλλοίωτες και άρρηκτα συνδεδεμένες με πολιτικά, οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα.

Η προστασία της στρώσης έδρασης είναι καίριας σημασίας στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Τα φορτία της κυκλοφορίας έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις ενός οδοστρώματος. Τα εν λόγω εντατικά μεγέθη πρέπει να καταλήγουν στη στρώση έδρασης απομειωμένα προς αποφυγή ενδεχόμενης αστοχίας της (Εικόνα 2.1). Βασική προϋπόθεση του σχεδιασμού είναι, επομένως, η μελέτη των εδαφών και των υλικών οδοστρωσίας, ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά τους σε φόρτιση. Για το λόγο αυτό, θεμελιώδης γνώσεις της εδαφομηχανικής κρίνονται απαραίτητες.



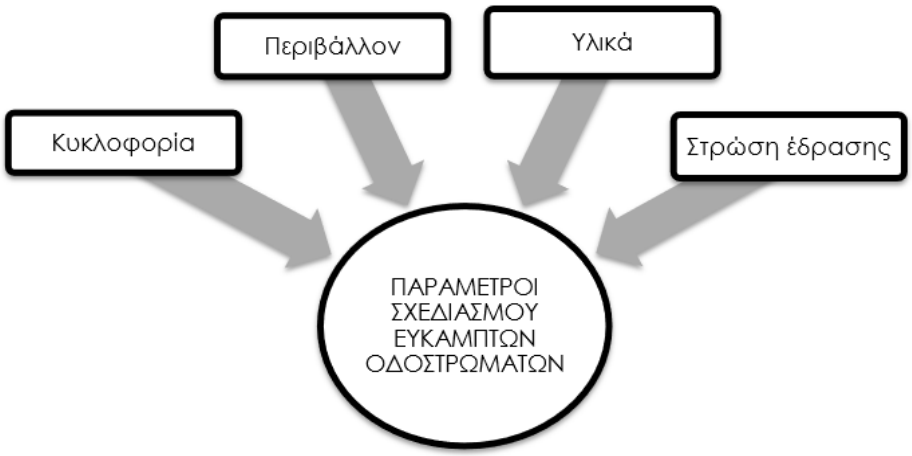
Εικόνα 2.1: Κατανομή φορτίου τροχού (Elshaer 2009)

Στα πρώτα στάδια της εξέλιξης, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων βασιζόταν στην τήρηση εμπειρικών κανόνων. Η εμπειρική προσέγγιση ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου και αποτέλεσε την κύρια προσέγγιση στο σχεδιασμό για τρείς περίπου δεκαετίες. Σε αυτό το διάστημα, πολλοί φορείς χρησιμοποιούσαν τυποποιημένες διατομές για τις περισσότερες οδούς - μία πρακτική που συχνά βασιζόταν σε οικονομικά κριτήρια. Αρχές της δεκαετίας του 1950, παρατηρείται αύξηση της κυκλοφορίας των βαρέων οχημάτων με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φθορές στην πλειοψηφία των οδοστρωμάτων. Η ακαταλληλότητα των τυποποιημένων διατομών έναντι του διαρκώς αυξανόμενου κυκλοφοριακού φόρτου, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη εκτενούς έρευνας για τη μελέτη των οδοστρωμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Μετά από 30 χρόνια χρήσης εμπειρικών μεθόδων, οι Dormon and Metcalf (1965) επιχείρησαν μία μηχανιστική – εμπειρική προσέγγιση στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Εισάγοντας τη θεωρία του Burmister σε διάφορα λογισμικά, υπολόγισαν τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη (τάσεις και παραμορφώσεις) ως συνάρτηση των ιδιοτήτων των υλικών, του πάχους των στρώσεων και των συνθηκών φόρτισης. Εν συνεχεία, συσχέτισαν τις μετρήσεις τους με την πραγματική συμπεριφορά του οδοστρώματος στο πεδίο, ενέργεια που δικαιολογεί το εμπειρικό μέρος της μεθόδου.

2.2 Παράμετροι Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Κατά το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδης εξωτερικοί παράγοντες (Εικόνα 2.2) που πρέπει να ληφθούν υπόψη, έτσι ώστε το οδόστρωμα που πρόκειται να κατασκευαστεί να είναι ικανό να επιτελέσει το σκοπό λειτουργίας του.



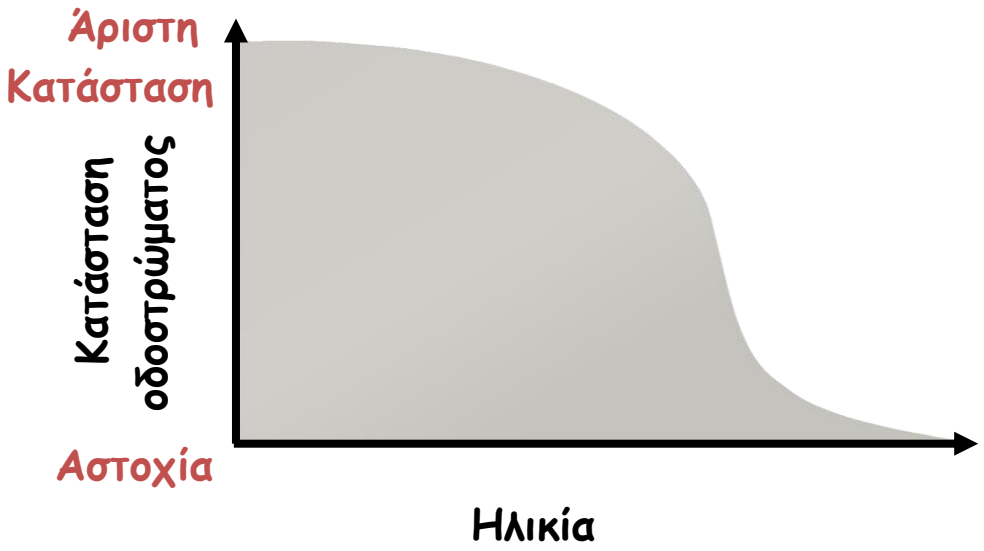
Εικόνα 2.2: Παράμετροι Σχεδιασμού Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

Αρχικά η στρώση έδρασης, δηλαδή το επίπεδο πάνω στο οποίο θεμελιώνεται το οδόστρωμα, έχει άμεσο αντίκτυπο στη δομική επάρκεια του οδοστρώματος. Επιπλέον, ο κυκλοφοριακός παράγοντας είναι βασική παράμετρος σχεδιασμού, διότι επιδρά τόσο στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος (τον καθορισμό δηλαδή του πάχους των επιμέρους στρώσεων), όσο και στη σύνθεσή του. Επίσης, περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η δράση παγετού ενδέχεται να επηρεάσουν την αντοχή του οδοστρώματος και κατ' επέκταση, τη διάρκεια ζωής του. Με άλλα λόγια, το περιβάλλον είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών πλήρωσης των στρώσεων.

2.3 Συνήθεις Φθορές

Γενικά, με τον όρο Φθορά (Distress) ονομάζουμε κάθε είδους ανωμαλία, η οποία υποβαθμίζει τις συνθήκες κύλισης των οχημάτων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι φθορές είναι συγχρόνως αιτίες και αποτελέσματα, διότι οι αρχικές φθορές αποτελούν συνήθως αιτία νέων φθορών του ίδιου ή διαφορετικού τύπου. Η εξέλιξη τους είναι ταχύτατη και οδηγούν σε αστοχία, αν δεν προγραμματιστεί συντήρηση και αποκατάσταση τους.

Η φθορά του οδοστρώματος είναι ατέλεια ή καταπόνηση που γίνεται αντιληπτή με απλή παρατήρηση και σχετίζεται με τον κύκλο ζωής (Εικόνα 2.3) για κάθε τύπο οδοστρώματος, για δεδομένες κυκλοφοριακές και καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 2.3: Κύκλος ζωής οδοστρώματος

Οι επιφανειακές φθορές μπορούν συνήθως να εντοπιστούν και να εκτιμηθούν από το ανθρώπινο μάτι (manual distress) ή αυτοματοποιημένες τεχνικές (automated distress). Υπάρχουν βέβαια και φθορές που σχετίζονται με τα υλικά υπόβασης, την αποχέτευση ή άλλες συνθήκες, οι οποίες δεν εντοπίζονται άμεσα (ΥΠΕΧΩΔΕ 2002).

Συνήθως τα αίτια που οδηγούν στη φθορά ενός οδοστρώματος είναι πάνω από ένα και ο συνδυασμός τους είναι αυτός που καθορίζει την τελική φθορά. Στον Πίνακα 2.1 γίνεται μία κατηγοριοποίηση των βασικότερων αιτιών φθοράς λόγω κυκλοφορίας, περιβάλλοντος, διαστασιολόγησης, ποιότητας των υλικών και των εργασιών προς εκτέλεση (Νικολαΐδης 2011).

Πίνακας 2.1: Αίτια φθοράς ανά κατηγορία

Κυκλοφορία	Κλίμα-Περιβάλλον	Διαστασιολόγηση Οδοστρώματος	Ποιότητα Υλικών	Εργασίες προς εκτέλεση
Μεγάλο μέγεθος φορτίων	Ακραίες Θερμοκρασίες	Υπερδιαστασιολόγηση στρώσεων	Κοκκομετρία εκτός προδιαγραφών	Ανεπαρκής συμπύκνωση
Μεγάλη διάρκεια φόρτισης	Παγετός	Υπερβολικά μικρό πάχος ασφαλτικής στρώσης	Αδρανή ανεπαρκούς αντοχής	Κακή συγκόλληση
Επαναληπτικά φορτία	Ανεπαρκής αποστράγγιση		Εσφαλμένη σύνθεση μίγματος	
Μικρό πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας			Ανεπαρκής ανάμιξη	

Γενικά, οι φθορές των οδοστρωμάτων κατατάσσονται και εκτιμούνται ανάλογα με τον τύπο, τη σοβαρότητα και την έκταση στην οποία παρατηρούνται. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι φθορές ταξινομούνται σε τρία επίπεδα ανάλογα με το βαθμό σοβαρότητας που εμφανίζουν, ενώ η έκτασή τους μετριέται ή εκτιμάται ως ποσοστό του μήκους που εμφανίζεται το πρόβλημα επί του συνολικού μήκους του απογραφόμενου τμήματος.

Με τον όρο σοβαρότητα φθοράς νοείται η εκτίμηση της έντασης της φθοράς ή ο βαθμός επικινδυνότητας που ενέχει. Οι φθορές ανάλογα με την ένταση που εμφανίζουν κατατάσσονται σε χαμηλού, μεσαίου και υψηλού βαθμού σοβαρότητας. Με τον όρο έκταση φθοράς νοείται η ποσοτική εκτίμηση του μεγέθους της φθοράς.

Σύμφωνα με το Strategic Highway Research Program 1989-1993, υπάρχουν διάφοροι τύποι φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων που μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- ρηγματώσεις
- παραμορφώσεις
- αποσαθρώσεις
- λείανση της επιφάνειας κύλισης

Οι αποσαθρώσεις και η λείανση της επιφάνειας κύλισης συνδέονται με το λειτουργικό χαρακτήρα του οδοστρώματος καθώς εμφανίζονται και αναπτύσσονται αποκλειστικά στην επιφανειακή στρώση (Poudel 2015). Αντιθέτως, οι ρηγματώσεις και οι παραμορφώσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τα δομικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων προσανατολίζεται στον περιορισμό της εμφάνισης αυτών των ειδών φθοράς, οι οποίες μειώνουν το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων και επηρεάζουν την αντοχή του οδοστρώματος.

Οι ρηγματώσεις της ασφαλτικής επιφάνειας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος οφείλονται στη συνδυασμένη δράση κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Η εμφάνιση ρηγματώσεων σε ένα τμήμα της οδού σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας επιδείνωσης της κατάστασης του οδοστρώματος. Στις περιπτώσεις όπου η ρηγμάτωση ξεκινάει από την επιφάνεια, το οδόστρωμα εξασθενεί και επιτρέπει τη διέλευση νερού μέσω των ρωγμών στις δομικά υποκείμενες στρώσεις του, προκαλώντας περαιτέρω φθορά και μεγαλύτερη ρηγμάτωση (top-down cracking). Σε άλλες περιπτώσεις, η ρηγμάτωση ξεκινάει από τις υποκείμενες στρώσεις και προοδευτικά επεκτείνεται προς την επιφάνεια

(bottom-up cracking-αλιγατορικές ρηγματώσεις). Στην προκειμένη, οι ρηγματώσεις είναι αποτέλεσμα της δομικής ανεπάρκειας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Οι ρωγμές του οδοστρώματος σταδιακά αυξάνονται σε έκταση, σοβαρότητα και συχνότητα και οδηγούν στην αποσύνθεση της επιφάνειας του οδοστρώματος (Εικόνα 2.4).

Εικόνα 2.4: Ρωγμές τύπου αλιγάτορα

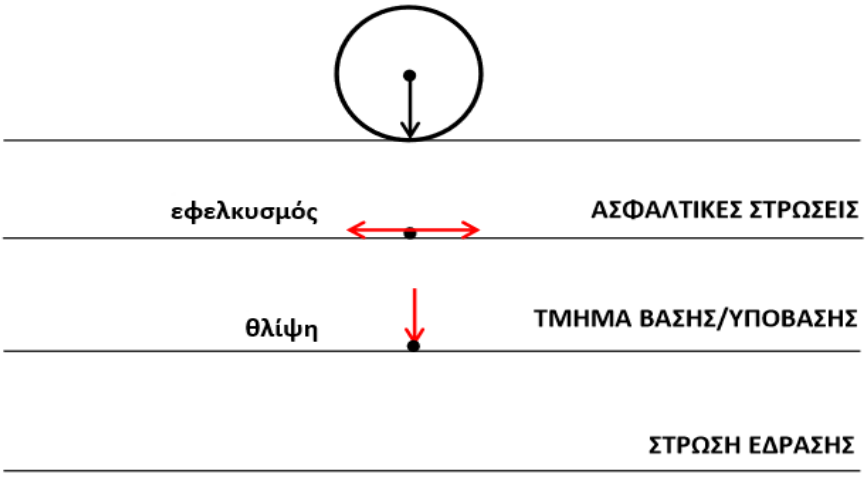
Γενικά, οι ρηγματώσεις αποτελούν μία πολύ συνηθισμένη φθορά του οδοστρώματος, η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού, διότι αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οδοστρώματος.

Οι παραμορφώσεις είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης διαφορικών καθιζήσεων στις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Η ανάπτυξη υπερβολικών μόνιμων παραμορφώσεων οδηγεί το οδόστρωμα σε αστοχία. Στις περιπτώσεις μάλιστα που η ύπαρξη παραμορφώσεων συνδυαστεί με την ύπαρξη ρηγματώσεων, ενώ το οδόστρωμα εξακολουθεί να εκτίθεται στην κυκλοφορία, τότε η διάρκεια ζωής του μειώνεται σημαντικά και καθίσταται επιτακτική ανάγκη η άμεση αποκατάσταση ή συντήρησή του. Γενικά, οι παραμορφώσεις του οδοστρώματος λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό, διότι αποτελούν ένδειξη προβλήματος στη γεωτεχνική υποδομή.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί η έννοια της φθοράς ενός οδοστρώματος, η οποία σχετίζεται με τον αριθμό των διελεύσεων (N) τυπικού φορτίου έως αστοχίας του οδοστρώματος. Η φθορά αντιπροσωπεύει τη φθορά συγκεκριμένης στρώσης του οδοστρώματος υπό τη διέλευση της κυκλοφορίας και χαρακτηρίζει τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Σύμφωνα με την υπόθεση Miner δίνεται από τη σχέση:

$$d=\frac{\nu\iota\sigma}{N\iota\sigma} <=1 \quad (2.1)$$

όπου, $n_{\iota\sigma}$ είναι οι προβλεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου και Νισ είναι οι επιτρεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου. Η φθορά στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων ελέγχεται και στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας (Εικόνα 2.5).



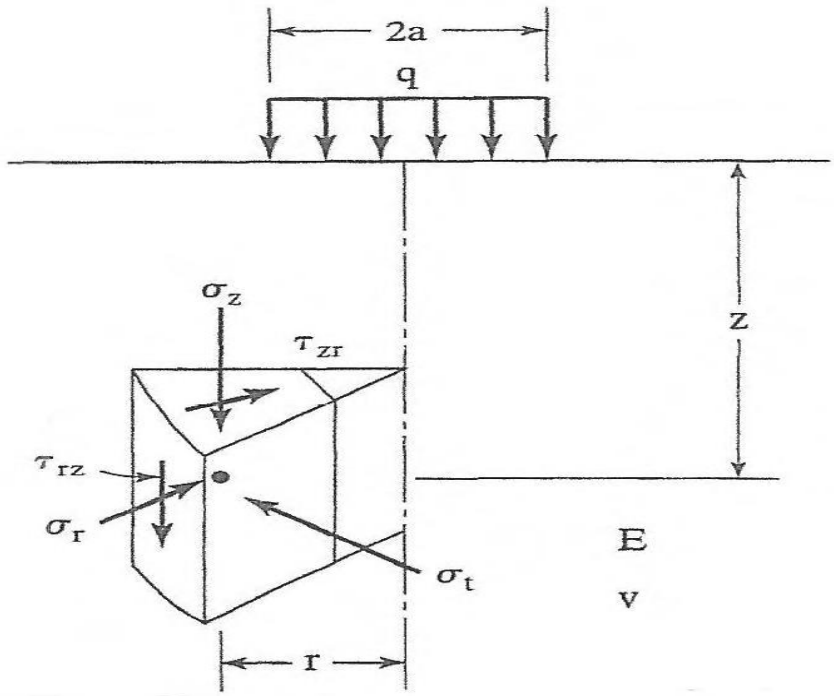
Εικόνα 2.5: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Οι επιτρεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων Ν εκφράζουν τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται για τη μία εκ των δύο κρίσιμων θέσεων αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, και συγκεκριμένα στον πυθμένα των ασφαλτικών.

2.4 Στατική Φόρτιση

Η απλούστερη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων επιτυγχάνεται με ένα γραμμικά ελαστικό ομογενή και ισότροπο ημίχωρο που φορτίζεται στατικά με ένα συγκεντρωμένο ή διανεμημένο φορτίο που δρα στην επιφάνειά του. Ο ελαστικός ημίχωρος έχει μία επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και ένα βάθος τα οποία εκτείνονται στο άπειρο. Το πρόβλημα της απόκρισης ενός ελαστικού ημιχώρου σε ένα κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο πάνω στην επιφάνειά του, επιλύθηκε από τον Boussinesq (1885), ο οποίος εξήγαγε αναλυτικές εκφράσεις για

μετατοπίσεις, τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις (ή απλά παραμορφώσεις) για κάθε σημείο του ημιχώρου (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ελαστικό ημίχωρο λόγω στατικής φόρτισης (Huang 2004)

Στην πραγματικότητα ένα εύκαμπτο οδόστρωμα δεν μπορεί να προσομοιωθεί με τον ομογενή ελαστικό ημίχωρο αφού αποτελεί ένα σύστημα στρώσεων. Μάλιστα οι στρώσεις αυτές διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η δυσκαμψία και πυκνότητα των στρώσεων να αυξάνεται από τα κάτω προς τα πάνω με την καλύτερη ποιότητα υλικού να αντιστοιχεί στην κορυφαία στρώση.

2.5 Δυναμική Φόρτιση

Οι περισσότεροι μέθοδοι ανάλυσης εύκαμπτου οδοστρώματος προβλέπουν τις αποκρίσεις του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας ομοιόμορφες καταπονήσεις ελαστικών-οδοστρώματος, κυκλικές περιοχές επαφής και σταθερή φόρτιση οχημάτων. Η φόρτιση του οχήματος συνήθως διαμορφώνεται ως στατική. Όμως, αυτές οι παραδοχές είναι ασυμβίβαστες με τις ρεαλιστικές συνθήκες φόρτισης και μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένο υπολογισμό απόκρισης οδοστρωμάτων και πρόβλεψη απόδοσης

οδοστρώματος. Ωστόσο, η πρόβλεψη απόδοσης του οδοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί με μία προσέγγιση ανάλυσης που προσομοιώνει την ακριβή αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος και ενσωματώνει κατάλληλους χαρακτηρισμούς υλικών οδοστρώματος.

Προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια η απόκριση του οδοστρώματος, απαιτείται ο κατάλληλος χαρακτηρισμός του υλικού. Το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ως ένα ιξωδοελαστικό υλικό, επειδή η απόκριση του σε επιβαλλόμενη φόρτιση ή παραμόρφωση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης.

Το οδόστρωμα στην πραγματικότητα υπόκειται σε φορτία κινούμενων τροχών, τα οποία εξαρτώνται από το χρόνο φόρτισης. Η βαριά φορτοεκφόρτωση φορτηγών είναι μία από τις κύριες αιτίες ταχείας επιδείνωσης του εύκαμπτου οδοστρώματος. Στην περιοχή επαφής ελαστικών-οδοστρώματος, τα ελαστικά των φορτηγών παράγουν εξαιρετικά μη ομοιόμορφες κατακόρυφες τάσεις επαφής καθώς και επιφανειακές εγκάρσιες και διαμήκεις εφαπτομενικές τάσεις. Έχει πρόσφατα αποδειχθεί ότι οι επιφανειακές εφαπτομενικές τάσεις επαφής, επηρεάζουν ιδιαίτερα τις αποκρίσεις του οδοστρώματος κοντά στην επιφάνεια. Οι τρισδιάστατες (3D) τάσεις επαφής έχουν ως αποτέλεσμα μία σύνθετη κατάσταση τάσης κοντά στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα βλάβης του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης της ρωγμής από πάνω προς τα κάτω (top-down cracking), ρηγμάτωση κοντά στην επιφάνεια και παραμένουσα παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση.

Ο Cebon (1986) δηλώνει ότι η δυναμική συνιστώσα ενός φορτίου τροχού μπορεί να αυξήσει την αστοχία από κόπωση κατά τέσσερις φορές και να προκαλέσει μόνιμη παραμόρφωση κατά τουλάχιστον 40%. Ακόμη και για το ομαλό οδόστρωμα, η απόκριση του οδοστρώματος αυξάνεται κατά 10% έως 15% υπό δυναμικό φορτίο. Οι Yoo and Al-Qadi (2007) ανέφεραν ότι η απόκριση του οδοστρώματος από τη δυναμική ανάλυση ήταν συνήθως υψηλότερη από ό, τι από τη στατική ανάλυση, ειδικά σε μεγάλη ταχύτητα και χαμηλή θερμοκρασία.

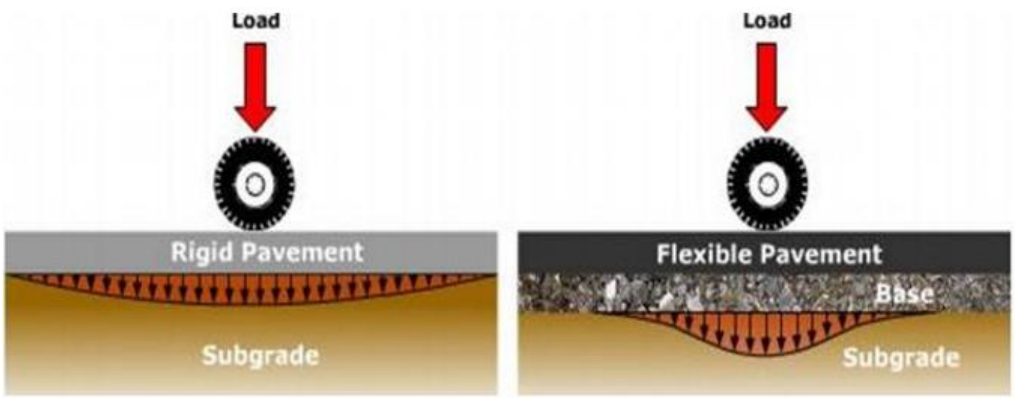
Θεωρώντας ότι όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία είναι απαραίτητα για την ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης του οδοστρώματος, αναπτύχθηκαν μοντέλα 3D πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element, FE) χρησιμοποιώντας τη δυναμική ανάλυση. Οι αναλύσεις ενσωμάτωσαν μετρούμενες τάσεις επαφής ελαστικού-οδοστρώματος, συνεχή κινούμενο φορτίο και τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος. Τα ανεπτυγμένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη αποκρίσεων οδοστρώματος κάτω από κινούμενα φορτία για διάφορα, πλήρους βάθους εύκαμπτα συστήματα οδοστρώματος, εκτεθειμένα σε

διάφορες διαμορφώσεις ελαστικών. Τα ανεπτυγμένα μοντέλα επικυρώθηκαν χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου.

3 Δυναμική Φόρτιση στο Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

3.1 Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Ο προσδιορισμός της απόκρισης εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε κυκλοφοριακά φορτία αποτελεί βασική συνιστώσα της διαδικασίας του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων καθώς και του τρόπου εκτίμησης των βλαβών τους. Γενική πληροφόρηση επί των οδοστρωμάτων και των τρόπων κατασκευής τους μπορεί να ευρεθεί στα βιβλία των Yoder and Witczak (1975), Huang (2004), Cebon (1999), Κοφίτσα (2001) και Νικολαΐδη (2002) καθώς και στα διάφορα εγχειρίδια-οδηγούς για σχεδιασμό οδοστρωμάτων, όπως αυτούς του American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 1993) των Η.Π.Α. ή Τμημάτων Συγκοινωνιακών Έργων διαφόρων πολιτειών των Η.Π.Α. (Caltrans 2015, TXDOT 2011, WSDOT 2015, SCDOT 2008). Ειδική πληροφόρηση επί των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ξεχωριστά μπορεί να βρεθεί στα βιβλία των Hunter (2000) και Delatte (2008), αντίστοιχα, καθώς και σε διάφορα εγχειρίδια Τμημάτων Συγκοινωνιακών Έργων διαφόρων πολιτειών των Η.Π.Α., όπως π.χ., FDOT (2015) και FDOT (2009) για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα, αντίστοιχα (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Τρόπος κατανομής τάσεων σε δύσκαμπτα και εύκαμπτα οδοστρώματα (www.pavementinteractive.org)

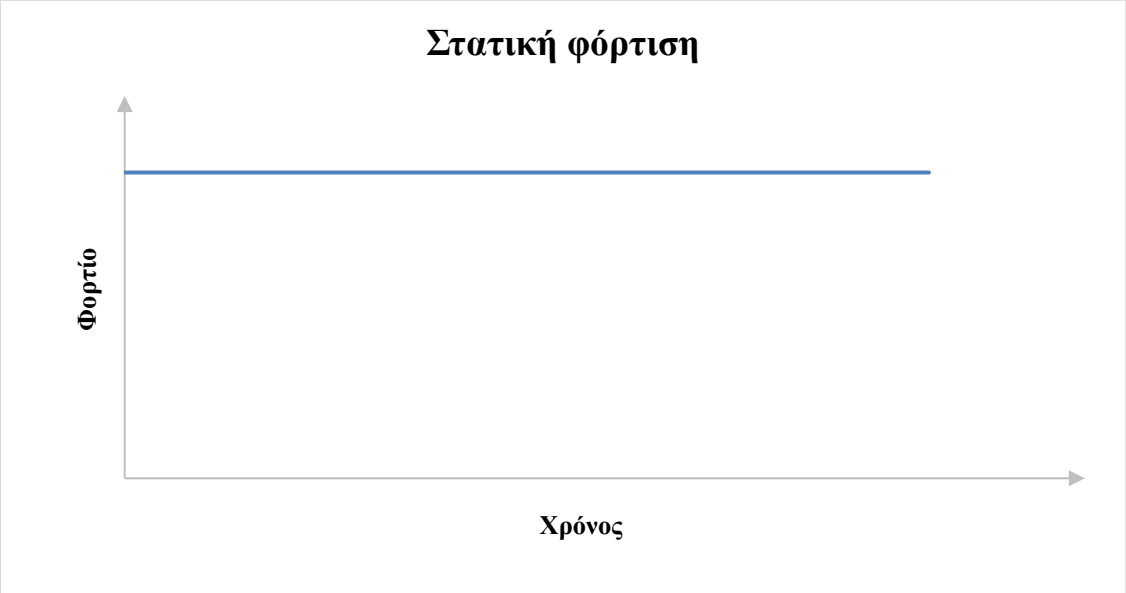
Από τις ανωτέρω δύο κατηγορίες οδοστρωμάτων, συντριπτικά μεγαλύτερη εφαρμογή στην πράξη (περίπου 90%) βρίσκουν τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία και αφορά η παρούσα διπλωματική εργασία. Μία σχετικά πρόσφατη και εμπεριστατωμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας επί της ανάλυσης και σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι αυτή του Monismith (2012).

Τα διάφορα οχήματα, τα οποία και αποτελούν τα φορτία που καλούνται να αναλάβουν τα οδοστρώματα, μπορεί να θεωρούνται για σχεδιαστικούς σκοπούς, ως ακίνητα ή κινούμενα. Ακίνητα φορτία μπορεί να είναι σταθερά ή να μεταβάλλονται με τον χρόνο. Σταθερά ακίνητα φορτία χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό λόγω της απλούστερης διαχείρισής τους, αλλά δεν παύουν να αποτελούν μία προσέγγιση. Μεταβαλλόμενα με το χρόνο ακίνητα φορτία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση πειραμάτων πίπτοντος φορτίου. Τα κινούμενα φορτία έχουν σταθερό μέγεθος και κινούνται με σταθερή ή μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Είναι προφανές ότι η προσομοίωση της φόρτισης οδοστρωμάτων με κινούμενα φορτία είναι η πλέον αξιόπιστη αν και απαιτεί αυξημένη δυσκολία προσομοίωσης και υπολογισμών. Μία πρόσφατη και εμπεριστατωμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας επί του προσδιορισμού της δυναμικής απόκρισης οδοστρωμάτων (εύκαμπτων και δύσκαμπτων) σε κινούμενα φορτία είναι αυτή των Beskou and Theodorakopoulos (2011). Η ανωτέρω ανασκόπηση περιλαμβάνει 181 βιβλία και άρθρα τα οποία αναλύονται με βάση τις ακόλουθες πέντε κατηγορίες: προσομοίωση του οδοστρώματος, προσομοίωση της συμπεριφοράς υλικού, μέθοδος επίλυσης του προβλήματος, χαρακτηριστικά της φόρτισης και σχετικές άλλες κατηγορίες, όπως π.χ. κινούμενα φορτία σε σιδηροδρομικές τροχιές.

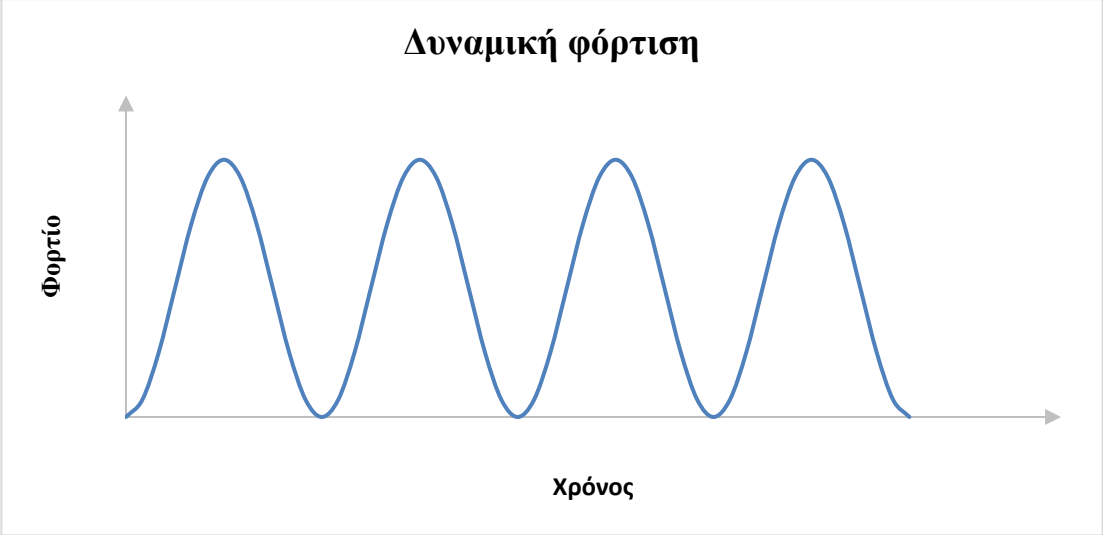
Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 35 περίπου ετών, συντελέστηκε εκτεταμένη έρευνα επί της ανάλυσης και σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων υπό την επίδραση ακίνητων ή κινούμενων φορτίων οχημάτων και μέσα στα πλαίσια ρεαλιστικών γεωμετριών και συμπεριφορών υλικών (Huang 2004, Cebon 1999, Monismith 2012, Beskou and Theodorakopoulos 2011). Αυτό επιτεύχθηκε αρχικά με την κατασκευή προγραμμάτων Η/Υ για τις ήδη υπάρχουσες ελαστικές θεωρίες τύπου Boussinesq (1885), Burmister (1944, 1945, 1958) και Odemark (1949) για εύκαμπτα οδοστρώματα με πολλές στρώσεις υπό την δράση συγκεντρωμένων και διανεμημένων στατικών φορτίων. Αργότερα κατασκευάστηκαν προγράμματα Η/Υ για την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), οι οποίες ήταν ικανές να διαχειριστούν οδοστρώματα πολλών στρώσεων ελαστικής ή ανελαστικής συμπεριφοράς υλικού υπό την δράση πολύπλοκων δυναμικών φορτίων (ακίνητων ή κινούμενων, συγκεντρωμένων ή

διανεμημένων) μέσα στα πλαίσια συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης ή τριών διαστάσεων.

Οι περισσότερες εργασίες που έχουν εκπονηθεί στο θέμα του προσδιορισμού της απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε στατικά ή δυναμικά (ακίνητα ή κινούμενα) φορτία (Εικόνα 3.2 και Εικόνα 3.3) αναφέρονται σε ελαστική συμπεριφορά υλικού, η οποία περιλαμβάνει γραμμική ιξωδοελαστικότητα (Huang 2004, Beskou and Theodorakopoulos 2011).



Εικόνα 3.2: Στατικό φορτίο (Λοΐζος, Πλατή 2016)



Εικόνα 3.3: Δυναμικό φορτίο (Λοΐζος, Πλατή 2016)

Λόγω της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης οχημάτων και οδοστρωμάτων, ακόμη και στην περίπτωση ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού, η χρήση αριθμητικών μεθόδων επίλυσης είναι επιτακτική. Έτσι μπορεί να μνημονεύσει κανείς την εργασία των Wang et al (2011) που αναφέρεται σε στατική φόρτιση και χρήση θεωριών συστήματος πολλών στρώσεων μητρωϊκής μορφής, τις εργασίες των Cho et al (1996), Jooste (2002) και Mulungye et al (2007) που αναφέρονται σε στατική φόρτιση και χρήση της ΜΠΣ, αυτές των Tu (2007) και Lu et al (2012) που αναφέρονται σε ακίνητο δυναμικό φορτίο και χρήση θεωριών συστήματος πολλών στρώσεων μητρωϊκής μορφής και τις εργασίες των Nazarian and Boddapati (1995) και Shoukry and William (1999) που αναφέρονται σε ακίνητο δυναμικό φορτίο και χρήση της ΜΠΣ. Επί πλέον μπορεί κανείς να μνημονεύσει τις εργασίες των Sousa et al (1988), Zafir et al (1994), Siddharthan et al (1998), Grundmann et al (1999), Lefeuve-Mesgouez et al (2002) και Lee et al (2013) που αναφέρονται σε κινούμενα φορτία και χρήση θεωριών συστήματος πολλών στρώσεων μητρωϊκής μορφής, τις εργασίες των Elseifi et al (2006), Yin et al (2007), Yoo and Al-Qadi (2007), Al-Qadi et al (2010), Ju (2009), Liao and Sargand (2010) και Khavassefat et al (2012) που αναφέρονται σε στατικά και κινούμενα φορτία και χρήση της ΜΠΣ. Η κατάστρωση των εξισώσεων κίνησης των ανωτέρω μεθόδων έγινε στο πεδίο συχνοτήτων ή στο πεδίο του χρόνου.

Παρατηρώντας τις ανωτέρω εργασίες για εύκαμπτα οδοστρώματα με γραμμικά ελαστική ή ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υλικού μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι i) καμία εργασία δεν θεωρεί όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων απόκρισης και ii) σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει γενική συμφωνία μεταξύ των συγγραφέων για το είδος και το μέγεθος της επίδρασης που έχει κάθε παράμετρος επί της απόκρισης, όπως, π.χ. η φύση της φόρτισης.

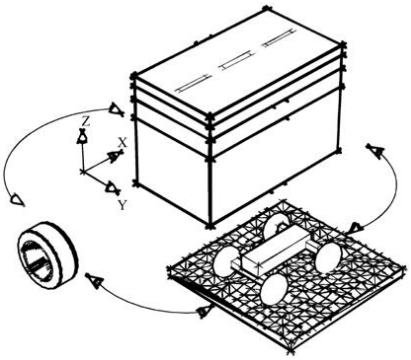
Η ελαστική συμπεριφορά των υλικών απλοποιεί το πρόβλημα προσδιορισμού της απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων, παρέχει την δυνατότητα βαθύτερης κατανόησης του φαινομένου, καθώς και τη δυνατότητα υπολογισμών με το χέρι, εάν το φορτίο είναι ακίνητο και στατικό (Huang 2004, Beskou and Theodorakopoulos 2011). Παρόλα αυτά, η θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς αποτελεί μία προσέγγιση και συνήθως δεν συμφωνεί με πειραματικά αποτελέσματα. Είναι φανερό ότι απαιτείται η χρήση ανελαστικών προσομοιωμάτων συμπεριφοράς των υλικών για την επίτευξη πιο ρεαλιστικών αναλύσεων και απόκτηση αποτελεσμάτων απόκρισης που να είναι κοντά στα αντίστοιχα πειραματικά.

Η χρήση της γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς για την ασφαλτική στρώση του οδοστρώματος και της γραμμικής ελαστικής για τις υπόλοιπες στρώσεις, βελτίωσε σημαντικά τα αποτελέσματα (Elseifi et al 2006, Yin et al 2007, Chabot et al 2010, Liao and Sargand 2010, Khavassefat et al 2012) με τη μέγιστη διαφορά μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων να είναι περίπου 15%. Στις ανωτέρω εργασίες έγινε χρήση της ΜΠΣ σε τρεις διαστάσεις με τα φορτία να είναι κινούμενα ή στατικά. Στατικά φορτία είναι συναρτήσεις του χρόνου αλλά ακίνητα με αποτέλεσμα η προσομοίωση να είναι απλούστερη, αλλά να μη λαμβάνεται έτσι υπόψη η αδράνεια και η απόσβεση του οδοστρώματος.

3.2 Παράμετροι Δυναμικής Φόρτισης

3.2.1 Ανάγκη διερεύνησης δυναμικής φόρτισης

Σχεδόν οι μισές εμπορευματικές μεταφορές στην Ευρώπη πραγματοποιούνται μέσω οδικών δικτύων. Δεδομένου ότι οι εμπορευματικές μεταφορές αποτελούν ουσιαστικό στοιχείο για την οικονομική ανάπτυξη των χωρών, ένα οδικό δίκτυο υψηλής ποιότητας δεν έχει μεγάλη σημασία μόνο για τον ίδιο τον τομέα των μεταφορών, αλλά είναι επίσης απαραίτητο για όλες τις συνδεδεμένες βιομηχανίες καθώς και για ολόκληρη την εθνική οικονομία. Στην Ευρώπη, υπάρχει επί του παρόντος μια συνεχιζόμενη συζήτηση σχετικά με τη χρήση μεγαλύτερων και βαρύτερων οχημάτων για τις οδικές εμπορευματικές μεταφορές, για την αύξηση της ικανότητάς της. Σύμφωνα με μελέτη του Σουηδικού Εθνικού Ινστιτούτου Έρευνας (VTI) για τις οδικές μεταφορές, το κόστος μεταφοράς μειώθηκε κατά 24% όταν αντικαταστάθηκαν τα τυποποιημένα φορτηγά της Ευρωπαικής Ένωσης (ΕΕ) με μακρύτερα και βαρύτερα σουηδικά φορτηγά (35% περισσότερο και 50% βαρύτερα) (Björketun et al 2008). Ωστόσο, οι απόψεις σχετικά με την επίπτωση αυτής της εναλλαγής είναι αρκετά διασκορπισμένες. Συγκεκριμένα, η δυναμική αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος (Εικόνα 3.4) γίνεται μία πιο κυρίαρχη αιτία αστοχίας στα οδοστρώματα, καθώς το μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων καθίσταται σημαντικά υψηλότερο.



Εικόνα 3.4: Μηχανισμός αλληλεπίδρασης οχήματος-οδοστρώματος (Khavassefat P. 2014**)**

Επισημαίνεται ότι οι καταστρεπτικές επιδράσεις της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος δεν είναι στην πραγματικότητα καλά κατανοητές, καθώς είναι σημαντικά διαφορετικές από τη διαμόρφωση φορτίου που χρησιμοποιείται στις τρέχουσες διαδικασίες σχεδιασμού.

3.2.2 Μετάβαση από τη στατική στη δυναμική φόρτιση

Οι μηχανιστικές διαδικασίες για τον υπολογισμό της απόκρισης του οδοστρώματος έχουν εξελιχθεί, δεδομένου ότι έλαβαν ευρεία προσοχή στο Πρώτο Διεθνές Συνέδριο Δομικών Σχεδίων Ασφαλτικού Οδοστρώματος το 1962. Τέτοιες διαδικασίες παρέχουν τα μέσα με τα οποία μπορεί να εκτιμηθεί η απόκριση του οδοστρώματος σε όρους τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων σε ένα σύστημα πολλαπλών στρώσεων όταν υποβάλλεται σε φορτία που επιβάλλονται από το όχημα. Πολλές από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες διαδικασίες ανάλυσης οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένων των πρόσφατων μοντέλων απόδοσης του Highway Research Program Superpave, χρησιμοποιούν την απόκριση του οδοστρώματος ως κρίσιμη είσοδο. Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης οχημάτων, των υλικών οδοστρώματος και της μεθόδου κατασκευής έχουν υποστεί πολλές αλλαγές με τα χρόνια. Για παράδειγμα, οι πιέσεις των ελαστικών έχουν αυξηθεί από 520 kPa σε >760 kPa που χρησιμοποιήθηκε στη δεκαετία του 1960. Ευρείας βάσης (super single) ελαστικά προτείνεται να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά διπλά ελαστικά. Νέα υλικά οδοστρώματος, όπως τροποποιημένα ασφαλτομίγματα γίνονται κοινά.

Η αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος είναι αρκετά περίπλοκη, η φορτιζόμενη περιοχή είναι μη κυκλική, με μη ομοιόμορφες κάθετες καθώς και σημαντικές διατμητικές συνιστώσες τάσεων επαφής. Επιπλέον, το φορτίο ελαστικού που προκαλεί τη σύνθετη

κατανομή τάσης επαφής είναι ένα κινούμενο φορτίο που μεταβάλλεται (δηλ. δυναμικό) καθώς διασχίζει το οδόστρωμα. Παλαιότερες μελέτες και άλλες έρευνες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του φορτίου αλληλεπίδρασης ελαστικού-οδοστρώματος που προκύπτουν από κινούμενο φορτηγό αποκαλύπτουν ότι διέπεται από τρεις σημαντικούς παράγοντες: (1) τραχύτητα του δρόμου, (2) ταχύτητα του οχήματος και (3) σύστημα ανάρτησης φορτηγών (Leblanc and Woodrooffe 1995).

Η επιτυχία μίας μηχανιστικής διαδικασίας εξαρτάται κυρίως από το πόσο ρεαλιστικά μπορεί να μοντελοποιήσει το φορτίο αλληλεπίδρασης ελαστικού-οδοστρώματος και την συμπεριφορά των υλικών του οδοστρώματος. Πολλές ευρέως χρησιμοποιούμενες μηχανιστικές διαδικασίες είναι πολύ απλούστερες (π.χ. ELSYM5, BISAR κ.λπ.) γιατί αντιμετωπίζουν την αλληλεπίδραση των ελαστικών ως στατικά, ομοιόμορφα και σταθερά κυκλικά φορτία. Η επίδραση της δυναμικής φύσης της φόρτισης αλληλεπίδρασης ή των διατμητικών τάσεων επαφής σπανίως λαμβάνονται υπόψη. Διάφοροι ερευνητές έχουν προσπαθήσει έτσι να μοντελοποιήσουν τη φόρτιση του οδοστρώματος πιο ρεαλιστικά (Sousa et al 1988, Papagiannakis et al 1996).

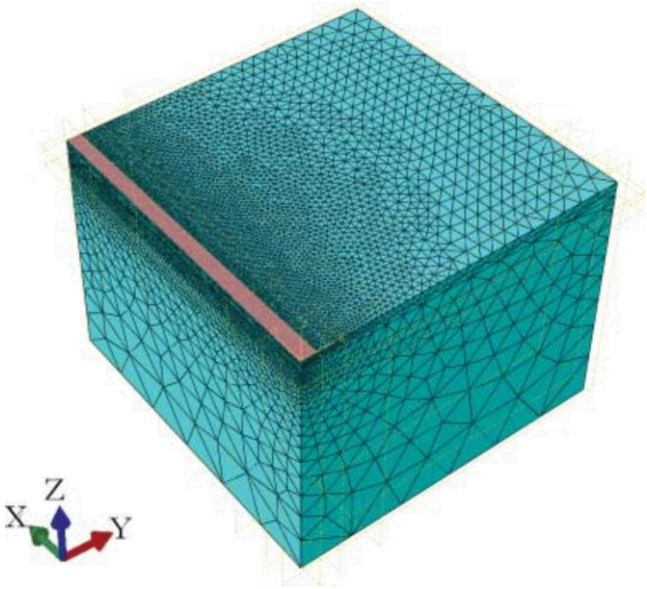
3.2.3 Δυναμική απόκριση εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Η κυκλοφοριακή φόρτιση είναι μία από τις κυριότερες αιτίες καταπονήσεων στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Οι δύο πιο συχνοί τρόποι καταπόνησης στα οδοστρώματα είναι η αστοχία στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (παραμένουσα παραμόρφωση) και η ρηγμάτωση από κόπωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται από την κυκλοφορία, στη δομή (COST 333, 1999).

Μία ακριβής περιγραφή της καταπόνησης που προκαλείται από τα οχήματα στα οδοστρώματα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της απόδοσης του οδοστρώματος στο πεδίο. Στην απόλυτη πλειοψηφία των τρεχουσών διαδικασιών σχεδιασμού και αξιολόγησης για εύκαμπτα οδοστρώματα, χρησιμοποιείται γραμμική ελαστική ανάλυση για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται από κινούμενα φορτία στη δομή. Η δομή του οδοστρώματος παρουσιάζεται ως ένα σύνολο ισότροπων γραμμικά ελαστικών στρωμάτων με άπειρη διάσταση στην οριζόντια διεύθυνση και με πεπερασμένο πάχος. Επιπλέον, η φορτιζόμενη περιοχή υποτίθεται ότι είναι κυκλική, τα δυναμικά φαινόμενα αγνοούνται και λαμβάνονται υπόψη μόνο τα φορτία που είναι κάθετα στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Ωστόσο, η ανάλυση που βασίζεται στις προαναφερθείσες υποθέσεις μπορεί να μην παρέχει ακριβή ποιοτική και ποσοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτικού οδοστρώματος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του οδοστρώματος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για το κινούμενο φορτίο. Όπως έχει αποδειχθεί από αρκετές μελέτες (Arraigada et al 2009, Kim et al 2009, Saevarsdottir and Erlingsson 2014) η συνεκτίμηση της ιξωδοελαστικότητας οδηγεί σε ακριβέστερη περιγραφή της μηχανικής απόκρισης του οδοστρώματος σε σύγκριση με την προσέγγιση ελαστικής στρώσης.

Η μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων στις δομές του οδοστρώματος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από διάφορους ερευνητές (Arraigada et al 2009, Khavassefat et al 2012) λόγω του προφανούς πλεονεκτήματος της μεθόδου από την άποψη της ικανότητας να ληφθούν υπόψη διάφορες πτυχές της συμπεριφοράς των υλικών, της αυθαίρετης γεωμετρίας των φορτιζόμενων περιοχών και των διαφορετικών τύπων της φόρτισης (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Προβολή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (Khavassefat P. et al 2015**)**

Παραδείγματος χάριν, έχει δειχθεί ότι λαμβάνοντας υπόψη την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των δομών του οδοστρώματος σε συνδυασμό με το πραγματικό εμβαδό του σχήματος μεταξύ της επαφής ελαστικού-οδού οδηγεί σε ακριβέστερες ποιοτικές και ποσοτικές προβλέψεις σχετικά με την απόδοση του οδοστρώματος στο πεδίο, σε σύγκριση με την παραδοσιακή ελαστική προσέγγιση (Al-Qadi et al 2005). Περαιτέρω, σε πολλές

μελέτες έχει διερευνηθεί η επίδραση της παρουσίας εφαπτομενικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια ελαστικού-οδού στην κατάσταση καταπόνησης που επιβάλλεται στο εύκαμπτο οδόστρωμα (Al-Qadi et al 2008, Drakos et al 2001, Wang and Al-Qadi 2009). Διαπίστωσαν ότι οι τάσεις διάτμησης επί της επιφάνειας του οδοστρώματος μπορεί να έχουν μία βαθιά επίδραση στα μοντέλα καταπόνησης που ξεκινούν κοντά στην επιφάνεια, δηλαδή, στην παραμένουσα παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση και στη ρηγμάτωση από πάνω προς τα κάτω (top-down cracking). Μία ακριβής περιγραφή των κάθετων και εφαπτομενικών κατανομών τάσεων επαφής μπορεί να μην επιτευχθεί χωρίς να γίνει πλήρης ανάλυση 3D της δομής του οδοστρώματος.

Παρόλο που η θεώρηση ενός ακριβούς μοντέλου με 3D γεωμετρία, πιο ρεαλιστική συμπεριφορά υλικού, δυναμική της δομής καθώς και ακριβείς τιμές τάσεων επαφής ελαστικών που λαμβάνονται υπόψη, είναι απαραίτητη για την καταγραφή πολλών τύπων καταπόνησης στις δομές του οδοστρώματος, οδηγεί σε ένα πολύ μακρύτερο χρόνο υπολογισμού. Οι Khavassefat et al (2012) πρότειναν μια υπολογιστικά αποτελεσματική διαδικασία που επιτρέπει την αξιολόγηση των τάσεων και των παραμορφώσεων που προκαλούνται στο ιξωδοελαστικό εύκαμπτο οδόστρωμα από την μεταβαλλόμενη κυκλοφορία. Η διαδικασία είναι υπολογιστικά ευνοϊκή, καθώς μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά. Είναι ωστόσο βασισμένη στη στατική λύση και συνεπώς δεν είναι σε θέση να καταγράψει τις δυναμικές επιδράσεις στην αλληλεπίδραση οχήματος-οδού.

Η δυναμική πτυχή της αλληλεπίδρασης οχήματος-οδού στα φορτία που ασκούνται στο οδόστρωμα δεν είναι αμελητέα, ειδικά με την αύξηση του βάρους και της πυκνότητας της κυκλοφορίας τα τελευταία χρόνια (European Commission, 2008). Επιπλέον, οι δονήσεις που προκύπτουν από δυναμικά φορτία είναι σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει σε θέματα όπως οι εκπομπές θορύβου, η ασφάλεια και η άνεση οδήγησης (Bilgiri and Way 2014, Degrande and Lombaert 2001). Ένα από τα κύρια στοιχεία του δυναμικού συστήματος αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-οχήματος είναι η τραχύτητα του οδοστρώματος. Η επιδείνωση της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια ζωής του οδηγεί σε υψηλότερη τραχύτητα επιφάνειας και συνεπώς αύξηση των δυναμικών φορτίων που ασκούνται στο οδόστρωμα (Kropác and Múcka, 2008). Η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας είναι αρχικά μικρή και αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Η πιο τραχεία (σκληρότερη) επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης διαφόρων τύπων ρωγμών στην επιφάνεια του δρόμου (Liu 2001).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ του κινούμενου φορτίου και του μοντέλου του εύκαμπτου οδοστρώματος πρέπει να μελετηθεί προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η δυναμική

απόκριση του οδοστρώματος στα κινούμενα φορτία. Το πρόβλημα των κινούμενων φορτίων έχει μελετηθεί από διάφορους ερευνητές σε διάφορους τομείς (De Barros and Luco 1994, Degrande and Lombaert 2001, Grundmann et al 1999, Lombaert et al 2000). Στο πεδίο του οδοστρώματος, η απόκριση του ιξωδοελαστικού οδοστρώματος κάτω από κινούμενα φορτία έχει μελετηθεί από τους Hajj et al (2006) και Chatti and Yun (1996) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με επιφανειακά φορτία. Το λογισμικό υπολογιστή SAPSI-M (Chatti and Yun 1996) υπολογίζει τη δυναμική απόκριση του εύκαμπτου οδοστρώματος κάτω από κινούμενα φορτία με τεχνικές μετασχηματισμού Fourier. Το 3D-Move ασχολείται με τρισδιάστατες επιφανειακές τάσεις, αλλά αγνοεί την δυναμική επίδραση που έχει η επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα η ομαλότητα (Hajj et al 2006). Σε ένα οδόστρωμα όπου ο δείκτης ομαλότητας είναι σχετικά μεγάλος (δηλαδή, μη ομαλό οδόστρωμα) προκαλείται μια μορφή δυναμικής φόρτισης με τη διέλευση του φορτίου λόγω της κατάστασης της επιφάνειας κύλισης (Εικόνα 3.6).

Εικόνα 3.6: Παραμόρφωση επιφάνειας κύλισης οδοστρώματος

Η προαναφερόμενη φόρτιση μεταφέρεται στο οδόστρωμα και οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων.

3.2.4 Συχνότητα φόρτισης

Η πρόβλεψη της απόδοσης των ασφαλτικών στρώσεων υφιστάμενων και νέων εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι ένα σημαντικό έργο των μηχανικών οδοστρώματος.

Έχει γίνει γενικά αποδεκτό ότι οι μηχανιστικές (ή μηχανιστικές-εμπειρικές) προσεγγίσεις σχεδιασμού οδοστρώματος είναι οι πλέον κατάλληλες για την αντιμετώπιση της επιρροής των κυριότερων παραγόντων όπως η φόρτιση οχημάτων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι ιδιότητες των υλικών, στις καταπονήσεις του οδοστρώματος. Πολλές μελέτες έχουν βρει καλή συσχέτιση μεταξύ των τρόπων καταπόνησης του ασφαλτομίγματος και των επαγόμενων από την κυκλοφορία αποκρίσεων στο οδόστρωμα. Αυτή είναι η βάση πολλών από τις διαδικασίες ανάλυσης απόκρισης οδοστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένου του οδηγού σχεδιασμού μηχανιστικών και εμπειρικών οδοστρωμάτων AASHTO (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) για νέα και αποκατεστημένα οδοστρώματα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος National Cooperative Highway Research Program 1-37A (NCHRP 2004). Οι μηχανιστικές (ή μηχανιστικές-εμπειρικές) διαδικασίες επιτρέπουν στους μηχανικούς οδοστρώματος να εξετάζουν μια ποικιλία υλικών οδοστρώματος και συνθηκών φόρτισης με έναν πιο θεμελιώδη τρόπο. Η ευαισθησία της πρόβλεψης καταπόνησης του οδοστρώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις επαγόμενες από την κυκλοφορία αποκρίσεις του οδοστρώματος. Οι κρίσιμες αποκρίσεις οδοστρώματος που χρησιμοποιούνται από το MEPDG για την πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης και της κόπωσης του ασφαλτομίγματος είναι η μέγιστη κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση και η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση (διαμήκης ή εγκάρσια) στην στρώση ασφαλτομίγματος, αντίστοιχα.

Το MEPDG χρησιμοποιεί ένα στατικό πολυστρωματικό λογισμικό ελαστικής ανάλυσης για να προσδιορίσει τις αποκρίσεις σε ένα εύκαμπτο σύστημα οδοστρωμάτων λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα φορτία κυκλοφορίας όσο και τους κλιματικούς παράγοντες. Αυτό απαιτεί ότι η ασφαλτική στρώση υποδιαιρείται σε πολλές στρώσεις και το μέτρο ελαστικότητας για δεδομένη θερμοκρασία οδοστρώματος και ταχύτητα κυκλοφορίας, καθορίζεται με βάση το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E*) σε σχέση με τα δεδομένα συχνότητας. Απαιτούνται δεδομένα για το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος που να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και το μέτρο ελαστικότητας E* λαμβάνεται με βάση την ισοδύναμη ή κυρίαρχη συχνότητα φόρτισης της στρώσης. Η ταχύτητα του οχήματος και το βάθος της στρώσης του οδοστρώματος

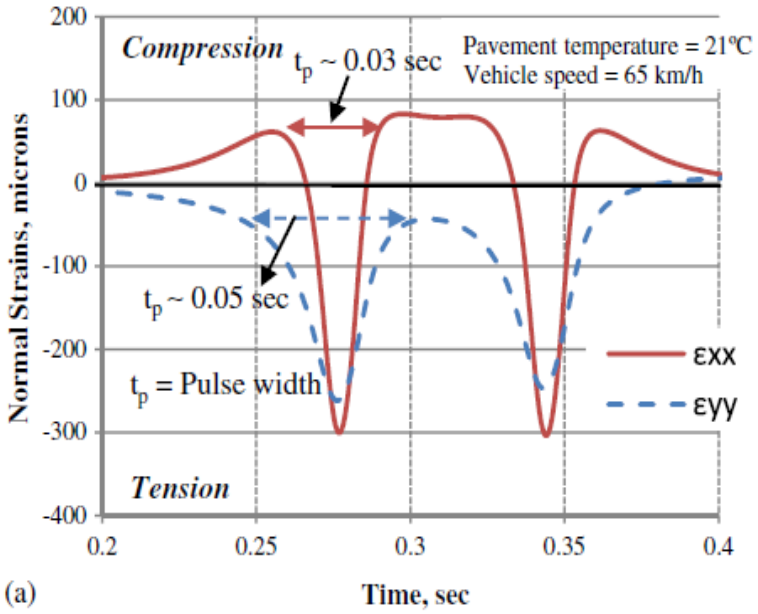
είναι οι κύριοι παράγοντες ελέγχου και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της διάρκειας παλμού φόρτισης (t_p). Ακολούθως, η ισοδύναμη συχνότητα φόρτισης (f_p) καθορίζεται λαμβάνοντας το αντίστροφο της υπολογιζόμενης διάρκειας παλμού φόρτισης (δηλαδή, $f_p = 1/t_p$). Στον υπολογισμό του t_p, μόνο η μεταβολή της κατακόρυφης τάσης (σ_{zz}) εξετάζεται στο MEPDG. Η λογική της μετατροπής της διάρκειας φόρτισης σε συχνότητα και η χρήση μίας συνιστώσας απόκρισης (σ_{zz}) μόνο, στην εκτίμηση του t_p έχει αποτελέσει αντικείμενο αντιπαράθεσης τα τελευταία χρόνια (Dongre et al 2006, Al-Qadi et al 2008, Underwood and Kim 2009). Για παράδειγμα, πρόσφατες αναλυτικές μελέτες από τους Underwood and Kim (2009) επισήμαναν ότι η διαδικασία MEPDG έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας ασφαλτομίγματος από εκείνες με πιο ρεαλιστικό χαρακτηρισμό ιξωδοελαστικού για το ασφαλτόμιγμα.

Οι Al-Qadi et al (2008) προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν την ισοδύναμη συχνότητα φόρτισης βάσει ιστορικών καταστάσεων καταπόνησης που μετρήθηκαν στο πεδίο. Η μελέτη χρησιμοποίησε ένα τμήμα οδοστρώματος και ιστορίες που μετρήθηκαν σε δύο βάθη στο χώρο δοκιμής πεδίου Virginia Smart Road. Υπάρχουν πολλές ανησυχίες, οι οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση του πλάτους παλμού φόρτισης που σχετίζεται με το σ_{zz} μόνο ως βάση για τον προσδιορισμό της f_p. Επιπλέον, ένας άλλος σημαντικός περιορισμός είναι κατά πόσο οι αποκρίσεις οδοστρώματος (π.χ. εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις στην ασφαλτική στρώση) μπορούν στην πραγματικότητα να εξομοιωθούν καλά με τη χρήση του E*, που λαμβάνεται από μία μοναδική συχνότητα f_p, που λαμβάνεται με μια διαδικασία που επικεντρώνεται μόνο στο σ_{zz}. Μπορεί να σημειωθεί ότι οι υπολογιζόμενες αποκρίσεις οδοστρώματος που χρησιμοποιούν το f_p δεν έχουν συγκριθεί με εκείνες που μετρήθηκαν για να επαληθευτεί η εγκυρότητα της μεθοδολογίας. Αυτό είναι ένα σημαντικό μέλημα, διότι οι επαγόμενες από την κυκλοφορία αποκρίσεις οδοστρώματος είναι κρίσιμες εισροές στην πρόβλεψη καταπονήσεων του οδοστρώματος στο MEPDG.

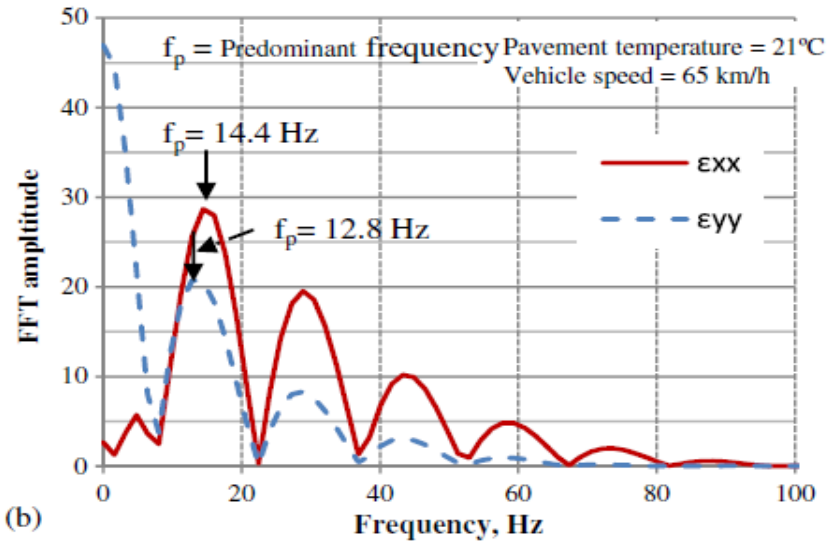
Πολλές προηγούμενες έρευνες σχετικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά σύνθετων δομικών συστημάτων έχουν αποκαλύψει σαφώς τη χρησιμότητα της "κυρίαρχης ή θεμελιώδους συχνότητας", ιδιαίτερα του μεγάλου πλεονεκτήματος στην απλοποίηση της δυναμικής ανάλυσης αυτού του σύνθετου δομικού συστήματος.

Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια του παλμού καταπόνησης είναι η ταχύτητα φόρτισης και το πάχος του οδοστρώματος, με της επίδραση της ταχύτητας να κυριαρχεί. Επιπλέον, οι συγγραφείς πρότειναν να ερευνηθεί η χρήση της τεχνικής γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT)

για να χειριστούμε τη μετατροπή από το πεδίο χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων (Εικόνα 3.7 και Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα παραμορφώσεων (Normal Strains, microns) συναρτήσει του χρόνου (Time, sec) (Ulloa et al 2013**)**

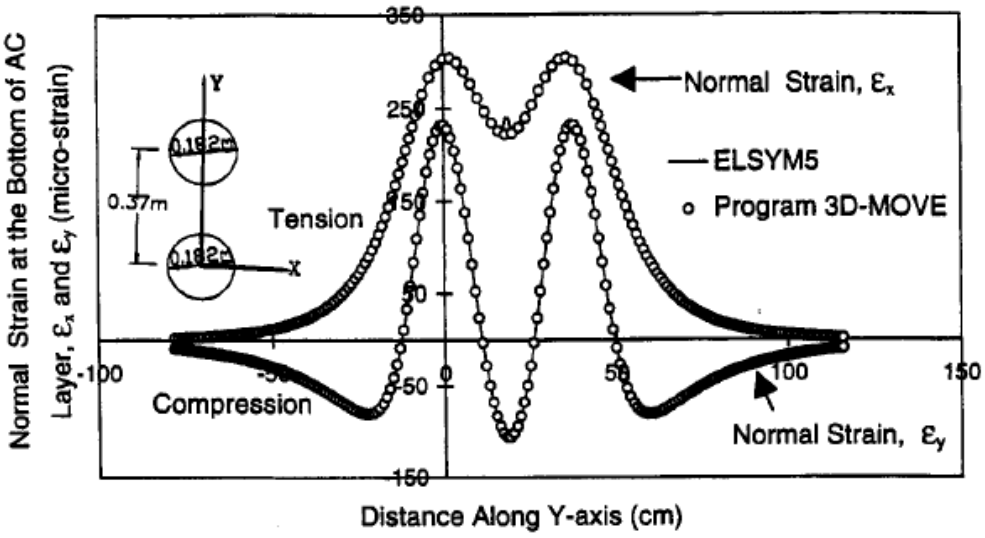


Εικόνα 3.8: Διάγραμμα παραμορφώσεων συναρτήσει της συχνότητας (Frequency, Hz) με τη χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform or FFT) (Ulloa et al 2013**)**

Η έρευνα θα πρέπει να επικεντρώνεται στη διερεύνηση της κυρίαρχης συχνότητας, f_p (ή των συχνοτήτων), που σχετίζεται με την ασφαλτική στρώση που ελέγχει τη δυναμική απόκριση του οδοστρώματος. Εάν οι κυρίαρχες συχνότητες υπάρχουν, τότε απαιτείται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ολόκληρου του ασφαλτομίγματος μόνο σε αυτές τις συχνότητες, για την αξιολόγηση των αποκρίσεων του οδοστρώματος. Για την ανάληψη αυτής της έρευνας, απαιτείται ένα μοντέλο απόκρισης οδοστρώματος που είναι ικανό να χειρίζεται στρωματοποιημένα συστήματα στην περιοχή συχνοτήτων, έτσι ώστε οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ασφαλτικού μίγματος να μπορούν να υπολογιστούν απευθείας χωρίς τη χρήση των αμφισβητήσιμων μετατροπών χρόνου-συχνότητας φόρτισης. Η ανάλυση 3D-Move, η οποία είναι ένα μηχανικό μοντέλο πεπερασμένων στρώσεων, έχει υιοθετηθεί για το σκοπό αυτό. Είναι πιο ρεαλιστικό δεδομένου ότι μπορεί να χειριστεί συνθήκες κυκλοφοριακής φόρτισης και λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του οχήματος και οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλτικών μιγμάτων (Siddharthan et al 1998, 2000, 2002).

Στην ανάλυση 3D-Move, το οδόστρωμα σχεδιάζεται ως δομή αποτελούμενη από οριζόντιες στρώσεις που εκτείνονται μέχρι το άπειρο στην πλευρική κατεύθυνση, κάθε μία από τις οποίες ορίζεται από ένα σύνολο ομοιόμορφων ιδιοτήτων. Το λογισμικό ανάλυσης 3D-Move χαρακτηρίζει κάθε στρώση οδοστρώματος ως ελαστικό ή ιξωδοελαστικό υλικό. Στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, οι στρώσεις βάσης και έδρασης θεωρούνται ελαστικά υλικά ενώ η ασφαλτική στρώση αντιμετωπίζεται ως ένα ιξωδοελαστικό υλικό. Οι ιδιότητες που απαιτούνται για το ελαστικό υλικό είναι το μέτρο ελαστικότητας (E), ο λόγος Poisson (ν) και ο λόγος απόσβεσης (ζ). Οι ιδιότητες του ελαστικού υλικού είναι σταθερές και δεν μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας. Από την άλλη πλευρά, οι ιδιότητες του ιξωδοελαστικού υλικού θα ποικίλουν ως συνάρτηση της συχνότητας. Για τα ιξωδοελαστικά υλικά, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E*) και ο λόγος απόσβεσης (ζ) πρέπει να παρέχονται ως συνάρτηση της συχνότητας, ενώ ο λόγος Poisson (ν) θεωρείται σταθερός.

Η προγνωστική ικανότητα του 3D-Move υπό στατική γραμμική ελαστική κατάσταση με κυκλικές περιοχές φορτίου έχει επαληθευτεί έναντι του ELSYM5, το οποίο είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό ελαστικών στρώσεων (Εικόνα 3.9).



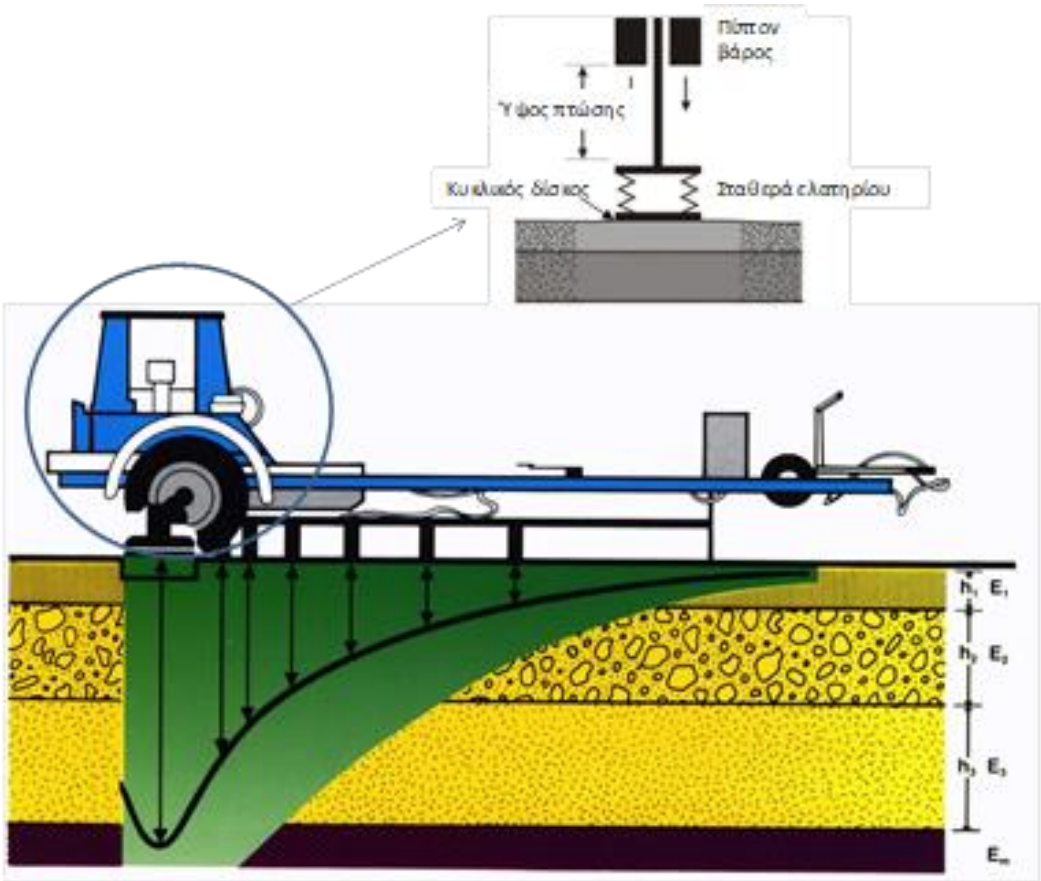
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης (εχ και εy) συναρτήσει της απόστασης στον άξονα Y με τη χρήση των προγραμμάτων 3D-MOVE και ELSYM5 (Siddharthan Raj V. 1998**)**

Έχουν επίσης πραγματοποιηθεί προσπάθειες που περιλάμβαναν την επαλήθευση πεδίου συγκρίνοντας μια ποικιλία ανεξάρτητα μετρημένων αποκρίσεων οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις) με αυτές που υπολογίστηκαν από το 3D-Move (Siddharthan et al 2002, 2005). Αυτές οι συγκρίσεις πεδίου ήταν ευνοϊκές. Επιπλέον, η δυνατότητα πρόβλεψης του 3D-Move επαληθεύτηκε (εντός 6%) με ένα άλλο ιξωδοελαστικό πολυστρωματικό αναλυτικό μοντέλο ViscoRoute (Chabot et al 2010). Αυτές οι μελέτες επαλήθευσης έχουν επικυρώσει την εφαρμοσιμότητα και την ευελιξία του 3D-Move.

3.2.5 Θερμοκρασία

Διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις έχουν προταθεί για την περιγραφή της θερμοκρασιακής εξάρτησης του ασφαλτομίγματος. Καθώς οι διαφορετικές θερμοκρασίες μπορούν να αλλάξουν τις ιδιότητες των υλικών του ασφαλτομίγματος, είναι σημαντικό να αναλυθούν οι αλλαγές θερμοκρασίας του οδοστρώματος. Οι Arraigada et al (2014) διεξήγαγαν επιταχυνόμενη δοκιμή οδοστρώματος για τη μέτρηση της δομικής απόκρισης του οδοστρώματος με διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας, τα αποτελέσματα των οποίων έδειξαν ότι τα μέτρα της παραμόρφωσης του οδοστρώματος αυξήθηκαν με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

αναπτύχθηκαν για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του εύκαμπτου οδοστρώματος υπό κρουστική φόρτιση με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer ή FWD) (Εικόνα 3.10), η οποία έλαβε υπόψη τη θερμοκρασία, και το αποτέλεσμα έδειξε ότι η επίδραση της θερμοκρασίας στις εφελκυστικές παραμορφώσεις έγινε πιο σημαντική στην περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.10: Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Οι Wang et al (2016) ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των αποκρίσεων οδοστρώματος που προκλήθηκαν από κρουστική δυναμική φόρτιση και τη φόρτιση κινούμενων οχημάτων ταυτόχρονα με τη διερεύνηση της θερμοκρασίας της ασφαλτικής στρώσης. Ένα μοντέλο παραμενουσών παραμορφώσεων για το ασφαλτικό οδόστρωμα προτάθηκε από τους Kim et al (2017), το οποίο έλαβε υπόψη τη θερμοκρασία του οδοστρώματος.

4 Εργαλεία Ανάλυσης Δυναμικής Φόρτισης

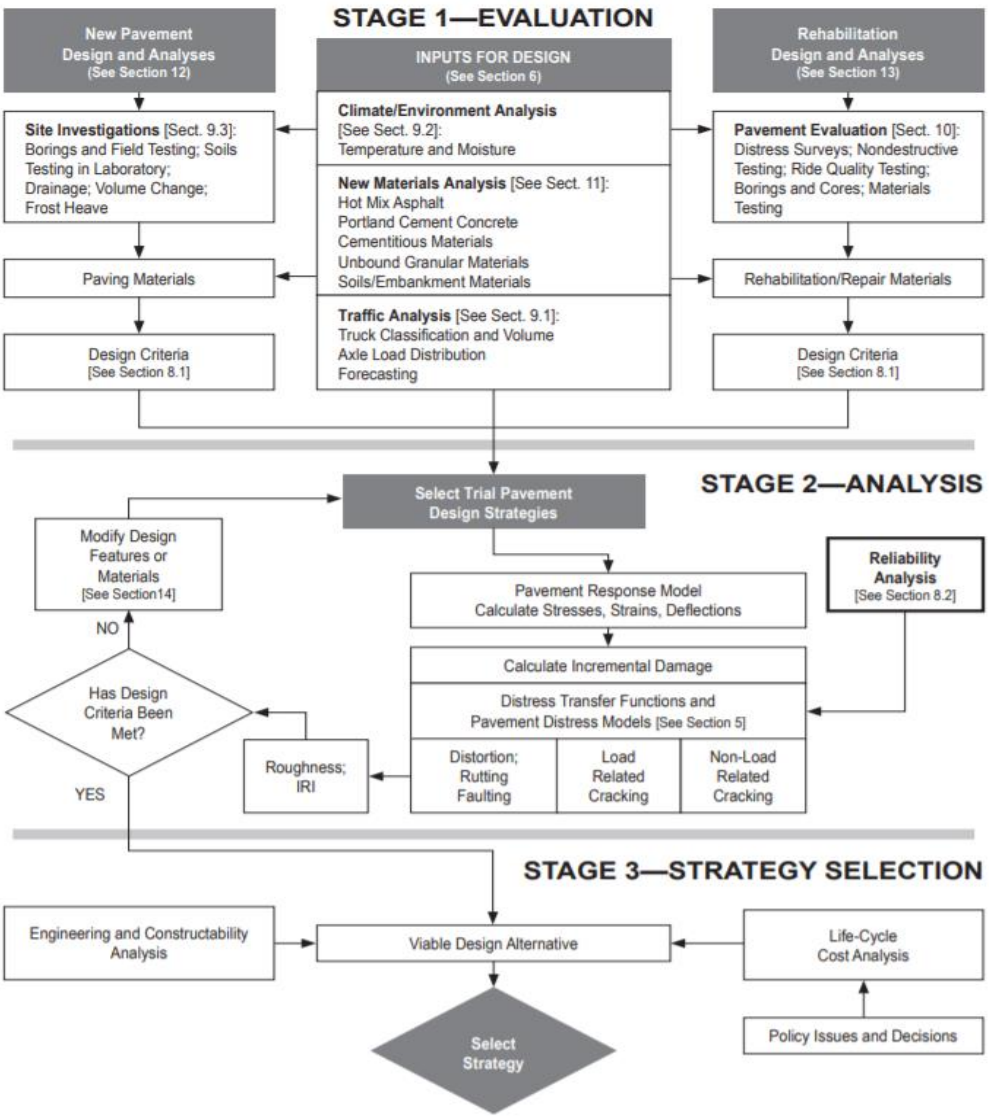
4.1 Επισκόπηση

Τα λογισμικά ανάλυσης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην οδοποιία. Με την εφαρμογή των λογισμικών, ο υπολογιστικός χρόνος της διαδικασίας σχεδιασμού ελαχιστοποιήθηκε, καθώς και το σφάλμα σε σύγκριση με το χειροκίνητο υπολογισμό. Τα λογισμικά μπορούν να δώσουν υψηλή ακρίβεια και ποιότητα αποτελέσματος για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Ορισμένα από αυτά είναι:

1. MEPDG
2. 3D-Move Analysis
3. CalME
4. SAPSI-M
5. DYNA3D (LS-DYNA)
6. ABAQUS
7. ANSYS

1. MEPDG (National Cooperative Highway Research Program, NCHRP 2004)

   Ο γενικός στόχος του Μηχανιστικού-Εμπειρικού Οδηγού Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) είναι να παρέχει ένα πρακτικό εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση νέων και αποκατεστημένων δομών οδοστρώματος, βασισμένο στις μηχανιστικές-εμπειρικές αρχές (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Διαδικασία Ανάλυσης/Σχεδιασμού στο MEPDG (NCHRP 2004**)**

Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία ανάλυσης και σχεδιασμού υπολογίζει τις αποκρίσεις του οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις) και χρησιμοποιεί αυτές τις αποκρίσεις για υπολογίσει τη φθορά με την πάροδο του χρόνου. Ο Μηχανιστικός-Εμπειρικός Οδηγός Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων κάνει χρήση του μέτρου δυσκαμψίας E* για να προσομοιώσει τη χρονική και θερμοκρασιακή εξάρτηση του ασφαλτομίγματος. Για να υπολογίσει τη χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος, ο οδηγός συστήνει τον υπολογισμό της συχνότητας των εφαρμοζόμενων φορτίων ως συνάρτηση της ταχύτητας του οχήματος και της δομής του οδοστρώματος. Σε αυτή την προσέγγιση, χρησιμοποιείται αρχικά η μέθοδος Odemark για ισοδυναμία πάχους για να μετασχηματίσει τη δομή του οδοστρώματος σε ένα σύστημα μίας στρώσης.

2. 3D-Move Analysis (University of Nevada, Reno)

   Το Πανεπιστήμιο της Νεβάδα (UNR) ανέπτυξε το λογισμικό 3D-Move για την ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το 3D-Move χρησιμοποιεί την προσέγγιση πεπερασμένων στρώσεων για να υπολογίσει τις αποκρίσεις του οδοστρώματος. Είναι πιο ρεαλιστικό δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του οχήματος και οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλτικών μιγμάτων (Siddharthan et al 1998, 2000, 2002). Το λογισμικό 3D-Move περιγράφεται περαιτέρω στο επόμενο υποκεφάλαιο, δεδομένου ότι οι αναλύσεις ευαισθησίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του.

3. CalME (California Department of Transportation or Caltrans 2015)

   Το CalME είναι ένα λογισμικό υπολογιστή που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Μεταφορών της Καλιφόρνια (Caltrans) για ανάλυση και σχεδιασμό αποκατάστασης, χρησιμοποιώντας ασφαλτικές επικαλύψεις, και για νέα εύκαμπτα οδοστρώματα. Το CalME αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 χρησιμοποιώντας ερευνητικά προϊόντα από το Strategic Highway Research Program (SHRP, 1989-1993), επακόλουθη έρευνα και ανάπτυξη, που χρηματοδοτήθηκε από το Caltrans, και μοντέλα και δεδομένα από ερευνητικά προγράμματα από όλο τον κόσμο. Το CalME αναπτύχθηκε για να καλύψει τις ακόλουθες ανάγκες για ένα μηχανιστικό-εμπειρικό εργαλείο ανάλυσης για χρήση στην Καλιφόρνια:

   - Έμφαση στην αποκατάσταση και τη συντήρηση ενός οδοστρώματος, το οποίο αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% του προγράμματος οδοστρώματος του Caltrans, παρά νέα οδοστρώματα.
   - Έμφαση στη χρήση δεδομένων επιτόπιων δοκιμών για υπάρχοντα οδοστρώματα [συγκεκριμένα, παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)] σε αντίθεση με τις εργαστηριακές δοκιμές.
   - Ικανότητα να λαμβάνεται υπόψη η μόνιμη παραμόρφωση στις επικαλύψεις, και τα τροποποιημένα ασφαλτικά μίγματα, ειδικά τροποποιημένα με πολυμερή μίγματα.

- Δυνατότητα προσομοίωσης βλάβης και πρόβλεψης της απόκρισης του οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις) κατά τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος.
- Συμβατότητα με τη βαθμονόμηση με τη χρήση δεδομένων επιταχυνόμενων δοκιμών οδοστρώματος (που έγινε εφικτό από την προηγούμενη δυνατότητα)
- Διαθεσιμότητα πηγαίου κώδικα στους: Caltrans και συνεργαζόμενους οργανισμούς, για κατανόηση και τροποποίηση.

4. SAPSI-M (Chatti and Yun 1996)

   Το SAPSI-M είναι ένα λογισμικό ανάλυσης γραμμένο σε FORTRAN. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τη δυναμική απόκριση ενός ιξωδοελαστικού στρωματοποιημένου συστήματος που υπόκειται σε επιφανειακά κυκλικά φορτία. Οι ιδιότητες της στρώσης, οι οποίες περιλαμβάνουν το μέτρο δυσκαμψίας, το μέτρο διάτμησης, το λόγο απόσβεσης και το λόγο Poisson μπορούν να μεταβάλλονται με τις συχνότητες διέγερσης των φορτίων. Επιπλέον, για να διευκολυνθούν οι τροποποιήσεις και η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά μεγέθη μνήμης υπολογιστή, το λογισμικό χρησιμοποιεί την τεχνική δυναμικής κατανομής. Αυτό επιτρέπει την εύκολη αύξηση των διαστάσεων του προγράμματος, εάν είναι επιθυμητό, χωρίς μεγάλη προσπάθεια. Οι μεταβλητές εξόδου του προγράμματος μπορεί να είναι οι εξής:

   - Μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες των στρώσεων
   - Τάσεις
   - Παραμορφώσεις

5. DYNA3D (LS-DYNA) (Livermore Software Technology Corporation, J. Hallquist 1999)

   Το DYNA3D αναπτύχθηκε στο Lawrence Livermore National Laboratories. Η δημόσια έκδοση χρησιμοποιείται ακόμα από το Lawrence Livermore National Laboratories αλλά επί του παρόντος δε διαθέτουν μηχανισμούς υποστήριξης χρηστών ή διανομής λογισμικού. Μία εμπορική έκδοση του DYNA3D (LS-DYNA) κυκλοφορεί και υποστηρίζεται από το Livermore Software Technology

Corporation. Παρόλο που το DYNA3D και το LS-DYNA έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για αναλύσεις οδοστρωμάτων – ιδιαίτερα για τρισδιάστατες δυναμικές αναλύσεις οδοστρωμάτων, δεν είχαν αρχικά αναπτυχθεί για εφαρμογές μηχανικής οδοστρωμάτων. Αντιθέτως, (ειδικότερα η LS-DYNA) έχουν γίνει όλο και περισσότερο εξειδικευμένες και ανεπτυγμένες για προσομοιώσεις συντριβής οχημάτων, ανάλυση μεταλλικών σχηματισμών και άλλες 3D μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις μεγάλης καταπόνησης και παραμόρφωσης.

6. ABAQUS (ABAQUS 2011)

   Το ABAQUS είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει πραγματικές καταστάσεις φόρτισης οδοστρώματος (κινούμενα φορτία σε διάφορες ταχύτητες). Το ABAQUS χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων (Hibbitt et al 1998). Τα πραγματικά χαρακτηριστικά του υλικού αναπαραστάθηκαν με διάφορα μοντέλα υλικών. Τα ασφαλτικά μίγματα μοντελοποιήθηκαν ως ιξωδοελαστικά υλικά. Το λογισμικό ABAQUS χρησιμοποιεί διάφορα μέτρα ελαστικότητας για να προσομοιώσει τις φυσικές αλληλεπιδράσεις φορτίων και υλικών, όπως αυτά ορίζονται από το χρήστη. Οι βασικές μεταβλητές εισόδου του χρήστη περιλαμβάνουν τη γεωμετρία του μοντέλου, τις ιδιότητες των υλικών και τη φόρτιση.

7. ANSYS (ANSYS 2010)

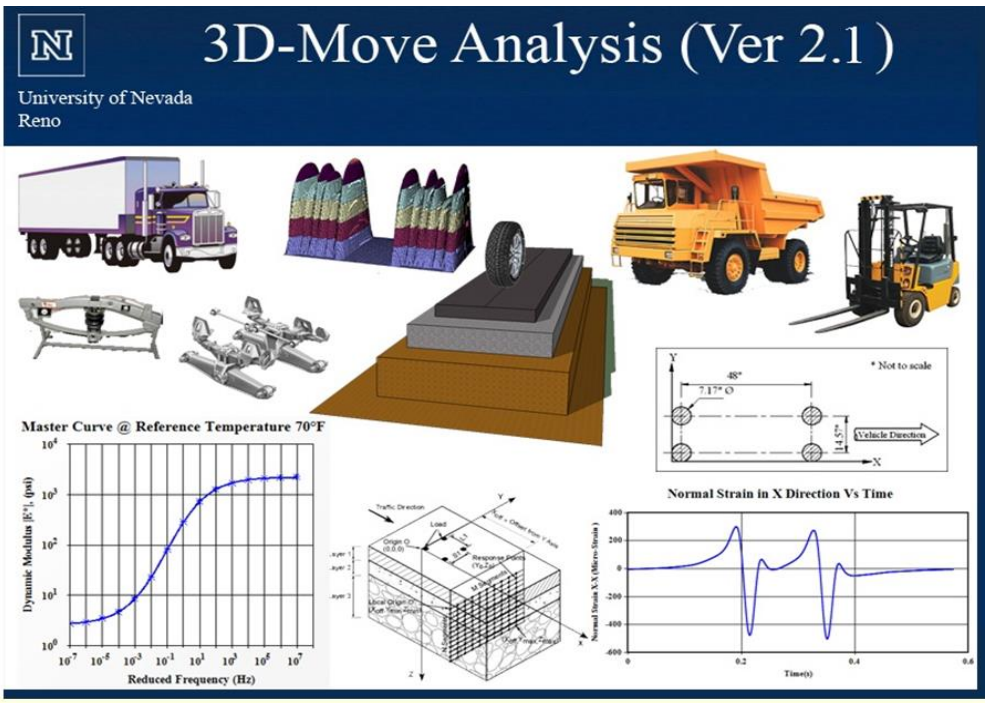
   Το ANSYS (Swanson **An**alysis **Sys**tems) αναπτύχθηκε από τον John Swanson το 1970. Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυναμική απόκριση εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε κινούμενα οχήματα, απαιτείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Οι αναλύσεις αυτές συχνά πραγματοποιούνται στο πλαίσιο του προγράμματος ANSYS. Υπάρχουν τρία βασικά βήματα για την εκτέλεση της ανάλυσης χρησιμοποιώντας το ANSYS. Αυτά είναι:

   1. Ο καθορισμός του τύπου, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των υλικών.
   2. Ο καθορισμός του φορτίου και οι προδιαγραφές της ανάλυσης (στατική, δυναμική κλπ.)
   3. Η επίλυση, η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του εύκαμπτου οδοστρώματος.

4.2 Λογισμικό 3D-Move Analysis

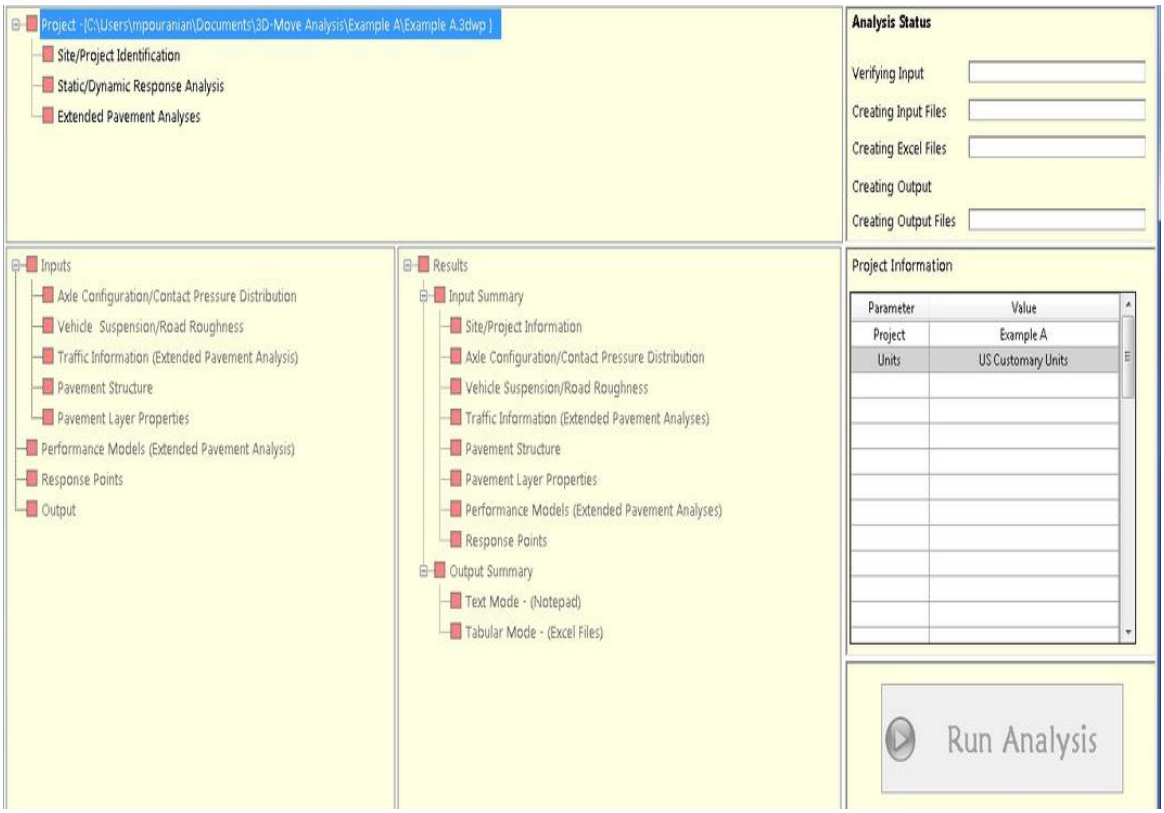
Με τη χρήση του 3D-Move δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης στατικής και δυναμικής φόρτισης. Η διαδικασία ανάλυσης παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν.

Με την έναρξη του λογισμικού, θα εμφανιστεί στην οθόνη το εξής αρχικό παράθυρο καλωσορίσματος (Εικόνα 4.2):



Εικόνα 4.2: Αρχικό παράθυρο καλωσορίσματος (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

Μόλις δοθεί όνομα στην ανάλυση, το λογισμικό είναι ικανό να παραλάβει όλες τις μεταβλητές εισόδου (Εικόνα 4.3).

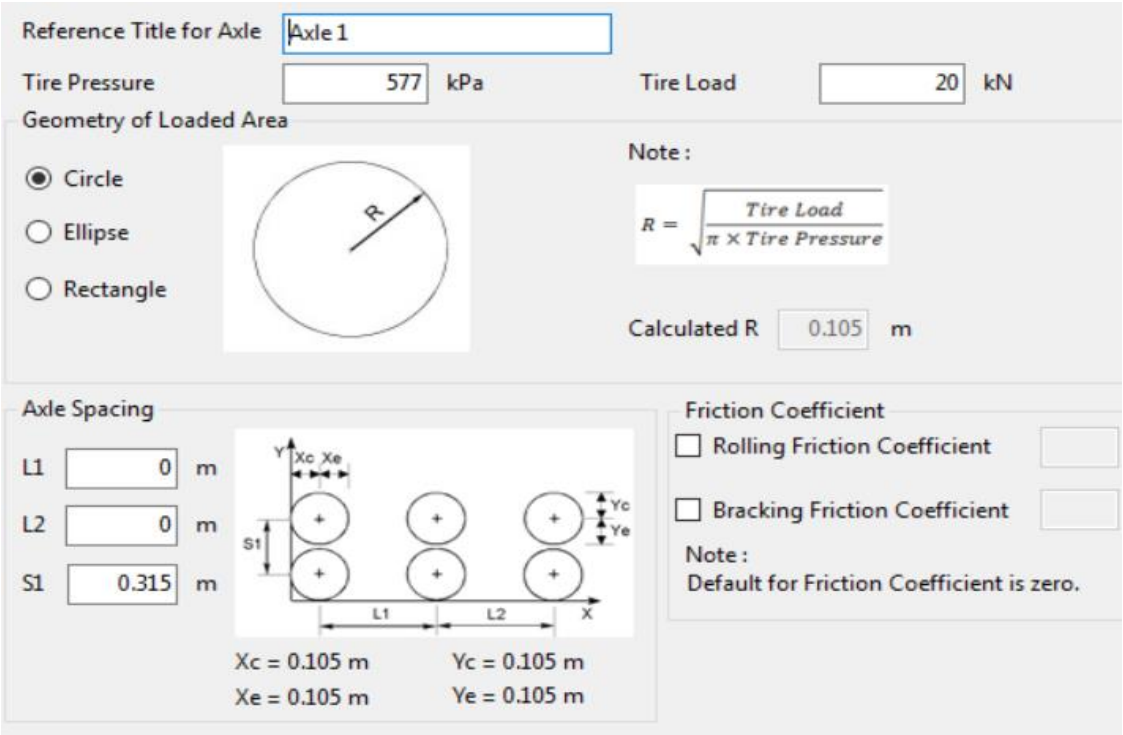


Εικόνα 4.3: Το κύριο παράθυρο του 3D-Move Analysis (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

Το λογισμικό ανάλυσης 3D-Move δουλεύει σε οποιοδήποτε από τα δύο συστήματα μονάδων. Αυτά είναι:

1. US Customary Units (in, lb, °F, mph)
2. SI Units (m, kN, ^{o}C, km/h)

Το πρώτο βήμα είναι η διαμόρφωση του άξονα του οχήματος, όπου εισάγονται τα δεδομένα που φαίνονται στην Εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: Διαμόρφωση άξονα οχήματος και πίεση επαφής (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

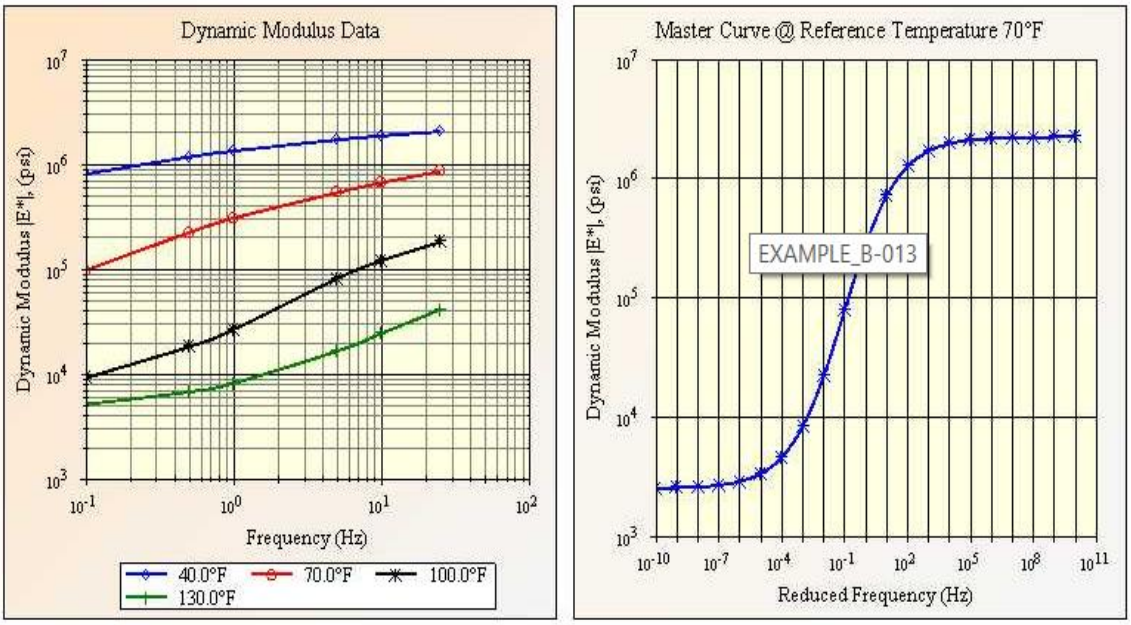
Το λογισμικό ανάλυσης 3D-Move χαρακτηρίζει κάθε στρώση οδοστρώματος ως ελαστικό ή ιξωδοελαστικό υλικό. Στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, οι στρώσεις βάσης και έδρασης θεωρούνται ελαστικά υλικά, ενώ η ασφαλτική στρώση θεωρείται ιξωδοελαστικό υλικό. Οι ιδιότητες του ελαστικού υλικού είναι σταθερές και δεν μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας. Από την άλλη πλευρά, οι ιδιότητες του ιξωδοελαστικού υλικού μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας. Για τα ιξωδοελαστικά υλικά, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E*) και ο λόγος απόσβεσης (ζ) πρέπει να παρέχονται ως συνάρτηση της συχνότητας, ενώ ο λόγος Poisson (ν) θεωρείται σταθερός (Εικόνα 4.5).

No of Temperatures 3 No of Frequencies 5 Reference Temperature 15 °C

Temperature (°C)	Dynamic Modulus |E*|, (kPa)				
	0.1 Hz	0.5 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz
15	5439000	7344000	8127000	9896000	10679000
20	3653000	5443000	6325000	8510000	9304000
25	2592000	4153000	4938000	7005000	7847000

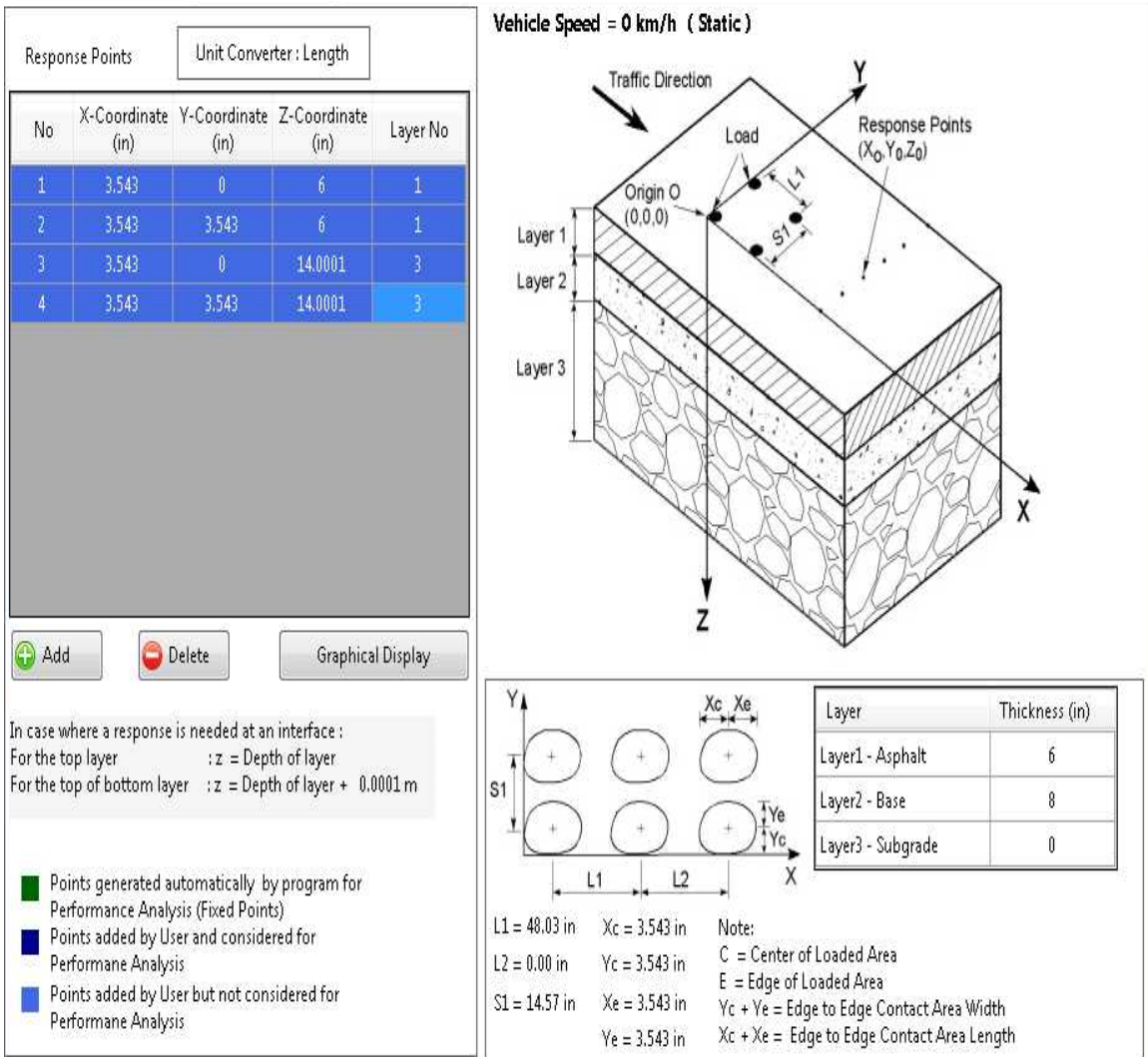
Εικόνα 4.5: Ιδιότητες στρώσης για ιξωδοελαστικά υλικά (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

Ακολουθεί η διαμόρφωση της κεντρικής καμπύλης του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E* (E* Master Curve). Αριστερά, έχουν δημιουργηθεί οι κεντρικές καμπύλες του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της συχνότητας για κάθε μία από τις θερμοκρασίες ανάλυσης. Δεξιά, έχει δημιουργηθεί η κεντρική καμπύλη για τη θερμοκρασία αναφοράς (Εικόνα 4.6).

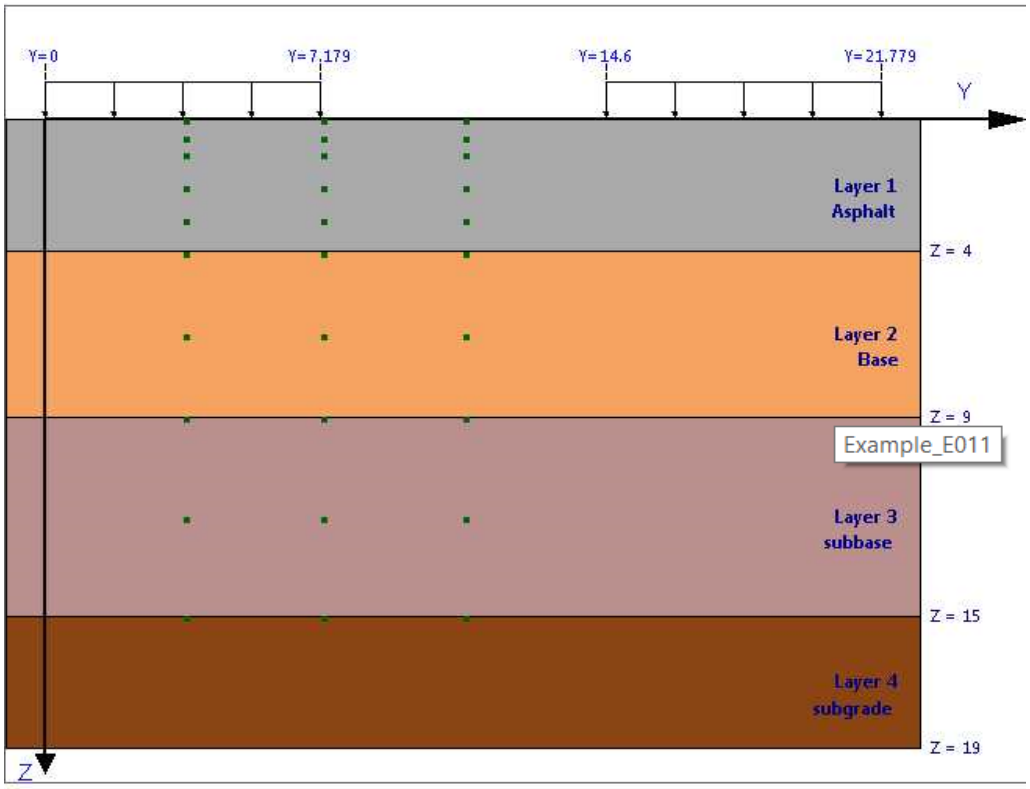


Εικόνα 4.6: Καμπύλες E* και Κεντρικές Καμπύλες (Master Curves)
(**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

Πριν ολοκληρωθεί η ανάλυση και παράγουμε αποτελέσματα, ελέγχουμε τα σημεία απόκρισης (Response Points). Τα σημεία απόκρισης είναι θέσεις με γνωστές τις τιμές των αποκρίσεων του οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις, μετατοπίσεις) (Εικόνα 4.7 και Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.7: Σημεία απόκρισης (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

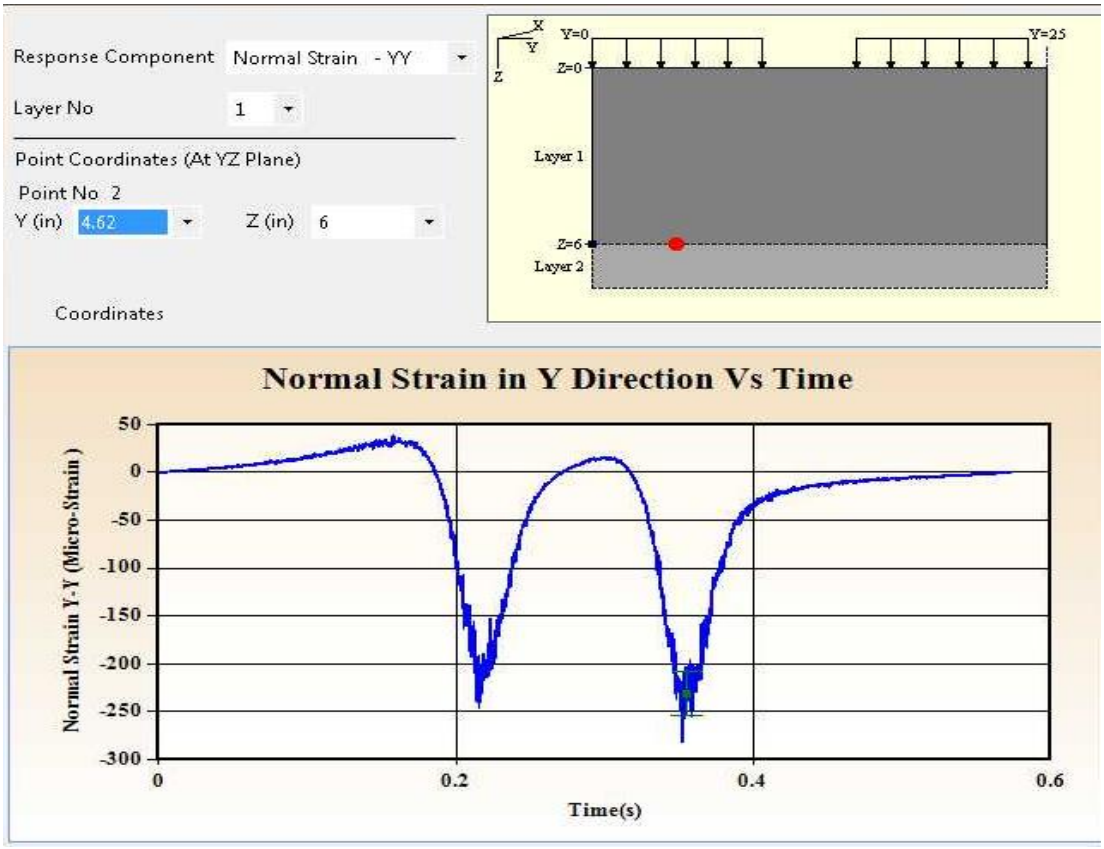


Εικόνα 4.8: Γραφική απεικόνιση σημείων απόκρισης (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8 οι αποκρίσεις του οδοστρώματος υπολογίζονται σε τρία διαφορετικά σημεία: στο κέντρο του τροχού, στην άκρη του τροχού και στο κέντρο των δύο τροχών.

Το τελευταίο βήμα είναι η εκτέλεση της ανάλυσης. Το λογισμικό θα δημιουργήσει φακέλους πλήρους σύνοψης των μεταβλητών εισόδου και εξόδου στο Microsoft Excel, μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης.

Μόνο για τη δυναμική ανάλυση, είναι διαθέσιμος ο γραφικός τρόπος απεικόνισης των αποκρίσεων του οδοστρώματος (Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9: Γραφικός τρόπος απεικόνισης αποκρίσεων οδοστρώματος στη δυναμική φόρτιση (**http://www.arc.unr.edu/software.html**)

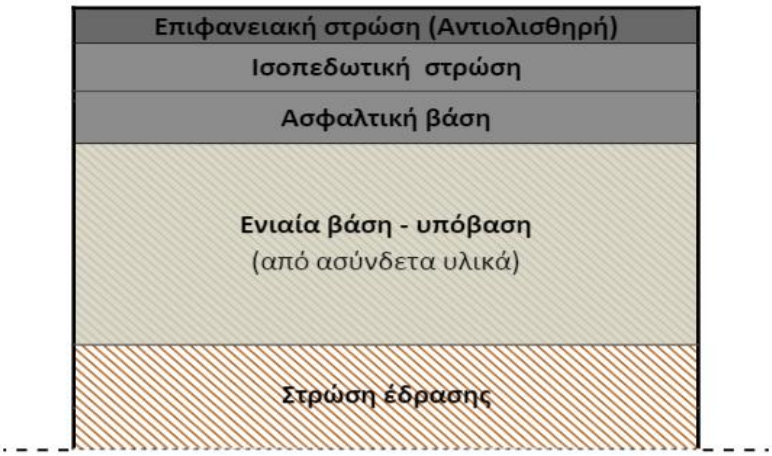
Οι μεταβλητές του λογισμικού που μας επιτρέπουν να ποσοτικοποιήσουμε την κόπωση της ασφαλτικής στρώσης είναι η Ρηγμάτωση (Predicted Distress %) και ο Δείκτης Φθοράς (Damage %).

5 Πειραματική Διαδικασία

5.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Η ανάλυση της δυναμικής φόρτισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων ενισχύει την εισαγωγή παραμέτρων μεταβλητής φύσης στο σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και τη συχνότητα φόρτισης.

Από τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, διαπιστώνεται ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασία T (^{o}C), η ταχύτητα V (km/h) και κατ' επέκταση, η συχνότητα f (Hz). Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διατομή σχεδιασμού του οδοστρώματος. Για τη διερεύνηση της επίδρασης των υπόψη παραμέτρων στο σχεδιασμό του οδοστρώματος, στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Επιλέγεται μία διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος σε συνθήκες μεταβλητής θερμοκρασίας 15, 20 και 25 ^{o}C, και μεταβλητής ταχύτητας 40, 50, 60, 70, 80 και 90 km/h. Στη δεδομένη διατομή πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των τριών θερμοκρασιών και των έξι ταχυτήτων. Η ανάλυση γίνεται με θεώρηση διατομής τριών στρώσεων, μεταβλητού πάχους ασφαλτικής στρώσης, στρώση βάσης/υπόβασης με πάχος 30cm και στρώση έδρασης με άπειρο βάθος (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Διατομή μελέτης εύκαμπτου οδοστρώματος

Σκοπός των αναλύσεων είναι να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο οι εν λόγω παράμετροι επιδρούν στη διαστασιολόγηση της διατομής αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Οι αναλύσεις ευαισθησίας, λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική κυκλοφορία που προβλέπεται για τη διατομή αναφοράς κατά την περίοδο σχεδιασμού της, περιγράφονται στα επόμενα στάδια.

Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για τη στατική και τη δυναμική φόρτιση μεταβάλλοντας την τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης έτσι ώστε η διατομή αναφοράς να πληρεί το κριτήριο σχεδιασμού, δηλαδή τιμή ρηγμάτωσης ίση ή μικρότερη του 20%. Το κριτήριο αυτό τέθηκε λαμβάνοντας υπόψη το νόμο κόπωσης που χρησιμοποιεί το λογισμικό ανάλυσης 3D-Move. Ο νόμος κόπωσης αναπτύχθηκε στα πλαίσια του National Cooperative Highway Research Program (NCHRP 1-37A) και είναι ο εξής:

$$\mathbf{N_f = 0.00432\ C\ C_H\, k_{f1}\, \beta_{f1} \left(\frac{1}{\varepsilon t}\right)^{kf2\ \ \beta f2} \left(\frac{1}{E}\right)^{kf3\ \ \beta f3}} \qquad (5.1)$$

$\beta_{f1} = \beta_{f2} = \beta_{f3} = 1$

$k_{f1} = 1$

$k_{f2} = 3.9492$

$k_{f3} = 1.281$

Όπου,

N_f : αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία σε κόπωση

ε_t : εφελκυστική παραμόρφωση στην κρίσιμη θέση (mm/mm)

E : μέτρο δυσκαμψίας υλικού (kPa)

$$\mathbf{C = 10^{4.84\left(\frac{Vb}{Va+Vv} - 0.69\right)}} \qquad (5.2)$$

Vb: ποσοστό ασφάλτου (= 9.8%)

Va: ποσοστό κενών (= 5%)

$$\mathbf{C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49\ Hac)}}}} \qquad (5.3)$$

Hac : πάχος ασφαλτικής στρώσης (mm)

Ο παραπάνω νόμος κόπωσης έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε, όταν η ρηγμάτωση είναι ίση με 50%, η εξεταζόμενη διατομή αναφοράς να αστοχεί, δηλαδή ο Δείκτης Φθοράς να είναι ίσος με 1. Δεδομένου τούτου, το κριτήριο αστοχίας έναντι ρηγμάτωσης 20%, που θεωρείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, κρίνεται υπέρ της ασφάλειας της κατασκευής, καθώς και οι υπολογιζόμενες τιμές φθοράς αναμένεται να είναι μικρές.

5.2 Καθορισμός Σταθερών Παραμέτρων Σχεδιασμού

5.2.1 Φορτίο/Πίεση τροχού

Λαμβάνοντας υπόψη το τυπικό αξονικό φορτίο σχεδιασμού (8.14 tn), το φορτίο του τροχού είναι ίσο με 20 kN και η πίεση του τροχού είναι ίση με 577 kPa.

5.2.2 Κυκλοφορία

Οι διατομές μελέτης του οδοστρώματος που διερευνώνται αφορούν σε αυτοκινητόδρομο δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση. Για την κυκλοφορία σχεδιασμού διατίθενται κυκλοφοριακά στοιχεία. Συγκεκριμένα, δίνονται:

Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία: 3880 ESALs
Ποσοστό Βαρέων Οχημάτων στη Λωρίδα Σχεδιασμού: 90 %
Ρυθμός Αύξησης: 0 %
Συνολικές Διελεύσεις: $2{,}5\times10^{7}$ ESALs

5.2.3 Φέρουσα ικανότητα βάσης/υπόβασης και έδρασης

Για την υπόψη διερεύνηση επιλέγεται βάση/υπόβαση με σταθερό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 450 MPa και έδραση με σταθερό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 200 MPa. Ο λόγος Poisson λαμβάνεται σταθερός για όλες τις στρώσεις και ίσος με 0.35.

5.2.4 Αξιοπιστία

Ως αξιοπιστία της διαδικασίας σχεδιασμού ενός οδοστρώματος (Reliability or R%) ορίζεται η πιθανότητα, το οδόστρωμα που σχεδιάζεται να συμπεριφερθεί ικανοποιητικά κάτω από τις κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες για την περίοδο σχεδιασμού.

Η σπουδαιότητα ενός έργου καθορίζει το επίπεδο αξιοπιστίας που θα επιλεγεί. Γενικά, σε οδοστρώματα με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο και σε περιοχές όπου η διακοπή της κυκλοφορίας για λόγους αποκατάστασης του οδοστρώματος κρίνεται δύσκολη, απαιτείται η επιλογή υψηλών ποσοστών αξιοπιστίας κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται ορισμένα προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας για διάφορες κατηγορίες οδών.

Πίνακας 5.1: Επίπεδα αξιοπιστίας ανά κατηγορία δρόμου (AASHTO 1993)

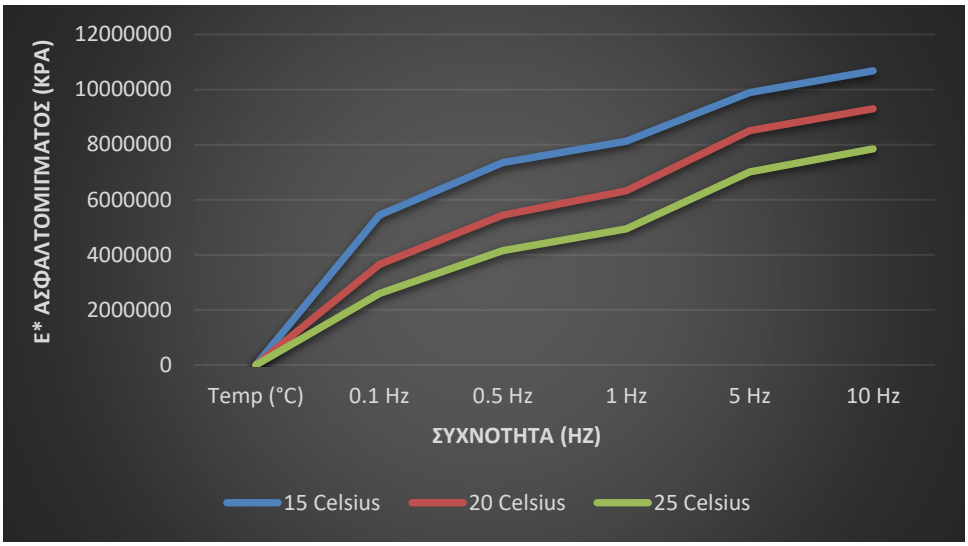
Κατηγορία δρόμου	Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας, R	
	Αστικές περιοχές	Υπεραστικές περιοχές
Αυτοκινητόδρομοι	85-99%	80-99.9%
Κύριες αρτηρίες	80-99%	75-95%
Δευτερεύουσες αρτηρίες	80-95%	75-95%
Δρόμοι τοπικής σημασίας	50-80%	50-80%

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η αξιοπιστία λήφθηκε ίση με 95%, με θεώρηση αυτοκινητόδρομου.

5.3 Καθορισμός Μεταβλητών Παραμέτρων Σχεδιασμού

5.3.1 E* ασφαλτομίγματος

Στην παρούσα διερεύνηση επιλέχθηκε ένα συμβατικό ασφαλτικό υλικό. Το υλικό χαρακτηρίζεται από μία τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E*), η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης (Εικόνα 5.2).



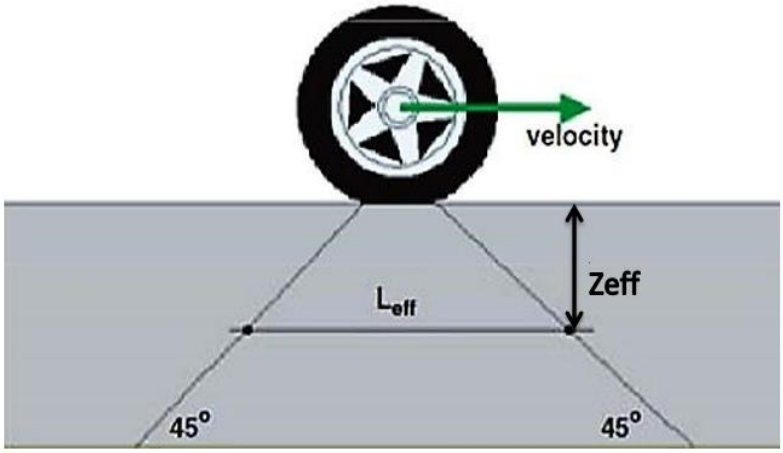
Εικόνα 5.2: Μεταβολή δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει συχνότητας και θερμοκρασίας

Η Εικόνα 5.2 περιγράφει τη μεταβολή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για τις επιμέρους συχνότητες φόρτισης. Παρατηρείται ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του μέτρου δυσκαμψίας για σταθερή συχνότητα, ενώ η αύξηση της συχνότητας προκαλεί αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας για σταθερή θερμοκρασία.

5.3.2 Συχνότητα

Η μεταβολή της συχνότητας επιδρά στη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, αλλά και στη φθορά τους, μέσω της επιρροής της στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η σύνδεση της συχνότητας με την ταχύτητα διέλευσης ενός φορτίου. Η συχνότητα συνδέεται με τη διάρκεια του φορτίου (χρόνος φόρτισης), η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων και ανάλογη του ενεργού μήκους Leff (effective length) (Ghanizadeh and Fakhri 2014) (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Ενεργό μήκος σε οδόστρωμα (Hajj et al 2011**)**

Το ενεργό μήκος συνδέεται με το βάθος επιρροής του φορτίου (Zeff) μέσω της εξίσωσης:

$$\mathbf{Leff = 2 \times (\alpha_c + Zeff)} \quad (5.4)$$

Όπου,

α_c : η ακτίνα του ισοδύναμου φορτίου αναφοράς (=0.105 m)

Το βάθος επιρροής του φορτίου (Zeff) υπολογίζεται με τη μέθοδο Odemark.

Το ενεργό μήκος συνδέεται επίσης με την ταχύτητα κίνησης (Vs) μέσω της εξίσωσης:

$$\mathbf{t} = \frac{\boldsymbol{Leff}}{\mathbf{17.6} \times \boldsymbol{Vs}} \quad (5.5)$$

όπου,

Leff: ενεργό μήκος (ίντσες)

Vs: ταχύτητα κίνησης (mph)

t: ο χρόνος επαφής ελαστικού με το οδόστρωμα (sec)

Ο χρόνος επαφής ελαστικού με το οδόστρωμα συνδέεται με τη συχνότητα φόρτισης μέσω της εξίσωσης:

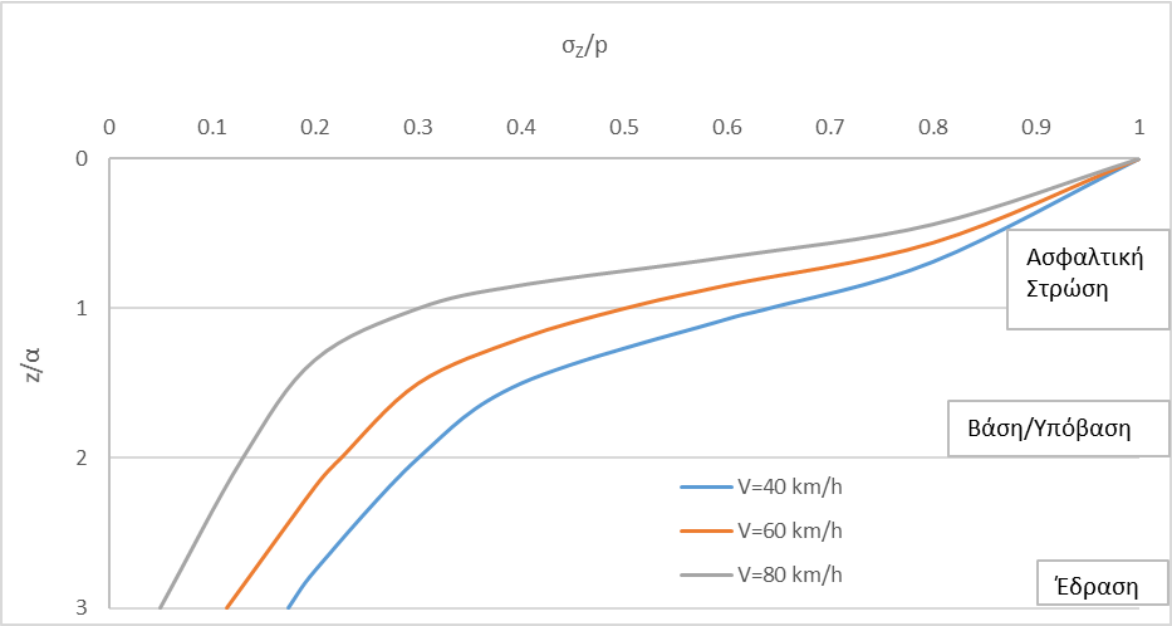
$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{t}} \quad (5.6)$$

Με εφαρμογή των ανωτέρω τύπων, επιλέγοντας ταχύτητες μελέτης 40, 50, 60, 70, 80 και 90 km/h προκύπτουν οι αντίστοιχες συχνότητες φόρτισης, με τις οποίες θα υπολογιστούν οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E*) για κάθε ταχύτητα και θερμοκρασία. Για μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων από τις δοσμένες (Πίνακας 5.2) πραγματοποιείται εκθετική παλινδρόμηση για την απόκτηση της τιμής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.2: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας συναρτήσει συχνότητας και θερμοκρασίας

Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος E*(kPa)					
T (°C)	0.1 Hz	0.5 Hz	1 Hz	5 Hz	10 Hz
15	5439000	7344000	8127000	9896000	10679000
20	3653000	5443000	6325000	8510000	9304000
25	2592000	4153000	4938000	7005000	7847000

Γενικά, μικρότεροι χρόνοι επαφής αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες συχνότητες φόρτισης και μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης. Η ταχύτητα επηρεάζει τη λειτουργία του οδοστρώματος διότι μπορεί απλουστευτικά να μεταφραστεί ως χρόνος επαφής με το οδόστρωμα. Για τον οδοποιό η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων (μικρή διάρκεια επαφής με το οδόστρωμα) συνεπάγεται μικρό βάθος κατανομής των τάσεων (z/α) και ικανοποιητικό βαθμό προστασίας της θεμελίωσης. Αντιθέτως, η κίνηση σε χαμηλές ταχύτητες, όπου ο χρόνος επαφής με το οδόστρωμα είναι μεγαλύτερος, επιβαρύνει το έδαφος καθώς τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές (Εικόνα 5.4).

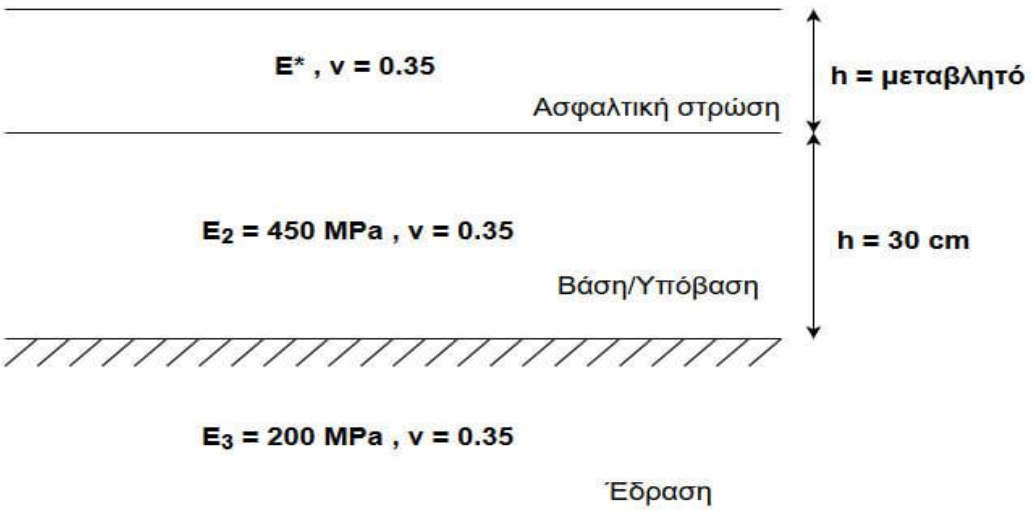


Εικόνα 5.4: Διάγραμμα κατανομής τάσεων (Burmister) – ταχύτητα

5.3.3 Θερμοκρασία

Στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη οι θερμοκρασίες των 15, 20 και 25 ^{o}C. Στόχος είναι να διερευνηθούν οι διαφοροποιήσεις που θα επιφέρει η αλλαγή της θερμοκρασίας σχεδιασμού στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος.

5.4 Καθορισμός Διατομής Αναφοράς



Εικόνα 5.5: Διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος

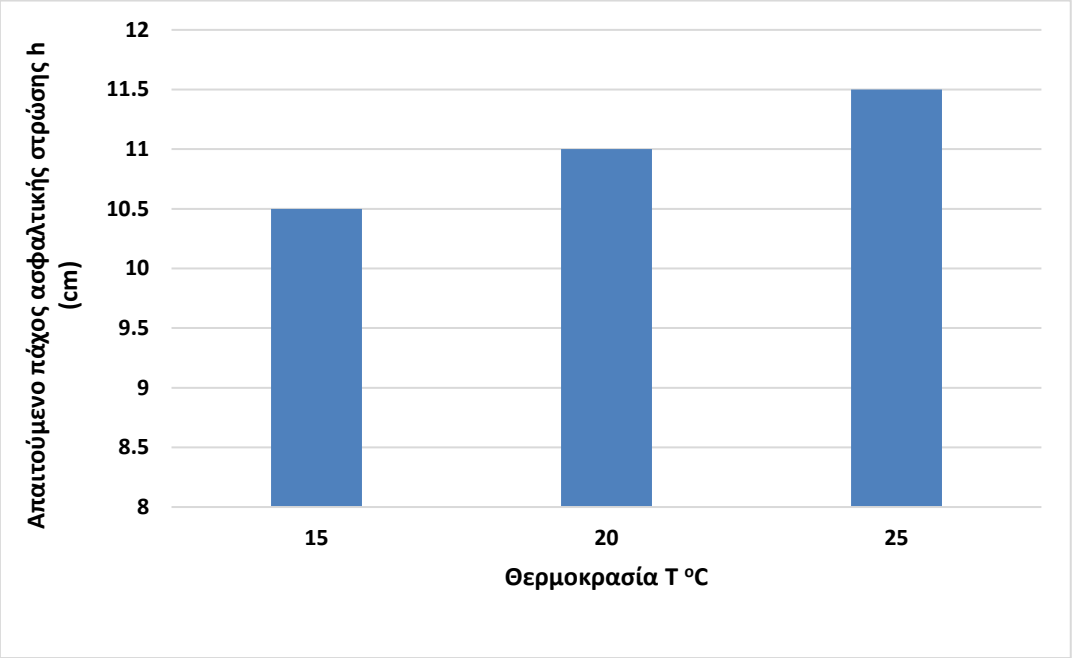
Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των υλικών, ορίζεται ως πειραματική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 5.5. Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται, καθώς επίσης και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E* της ασφαλτικής στρώσης, λόγω της μεταβολής της ταχύτητας ή της θερμοκρασίας. Το πάχος της βάσης/υπόβασης παραμένει σταθερό και ίσο με 30 cm, καθώς επίσης και το μέτρο ελαστικότητάς της, που είναι ίσο με 450 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας της έδρασης είναι σταθερό και ίσο με 200 MPa και ο λόγος Poisson λήφθηκε σταθερός για όλες τις στρώσεις, και ίσος με 0.35.

6 Στατική Φόρτιση - Ανάλυση Ευαισθησίας

Αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ως προς το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για τη στατική φόρτιση. Τα απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν, με βάση το κριτήριο σχεδιασμού που τέθηκε και τις παραδοχές που έχουν γίνει στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας, για κάθε ταχύτητα ξεχωριστά, στους παρακάτω πίνακες και εικόνες (Εικόνα 6.1 - 6.6 και Πίνακας 6.1 – 6.6).

Πίνακας 6.1: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=40 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
40	15	10.5	18.45
40	20	11	18.16
40	25	11.5	18.32

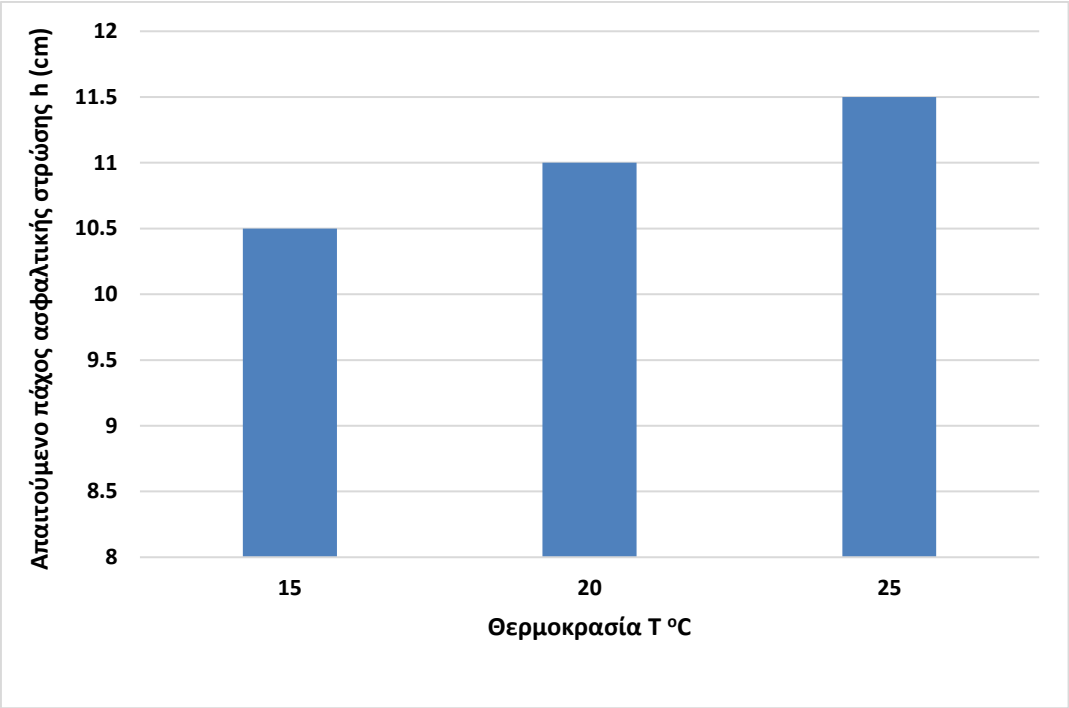


Εικόνα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=40 km/h)

Για ταχύτητα 40 km/h: από τον Πίνακα 6.1 και την Εικόνα 6.1 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 ºC. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 ºC σε 25 ºC έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 6.2: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=50 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T ºC	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
50	15	10.5	18.08
50	20	11	17.73
50	25	11.5	17.87

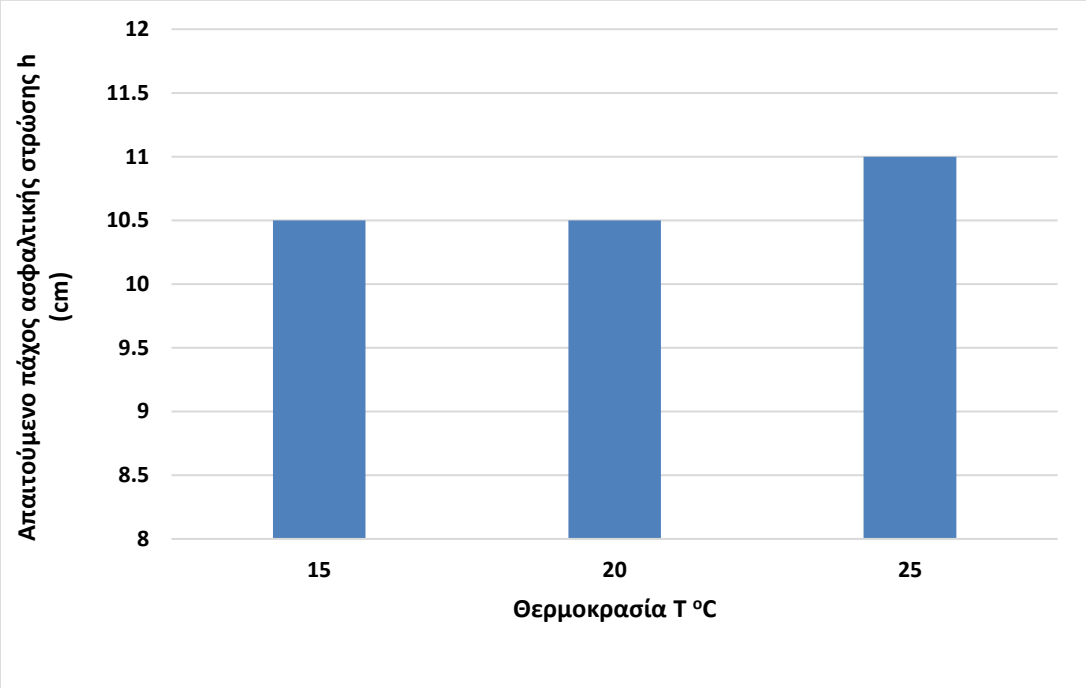


Εικόνα 6.2: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=50 km/h)

Για ταχύτητα 50 km/h: από τον Πίνακα 6.2 και την Εικόνα 6.2 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 ºC. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 ºC σε 25 ºC έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 6.3: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
60	15	10.5	17.79
60	20	10.5	19.75
60	25	11	19.9

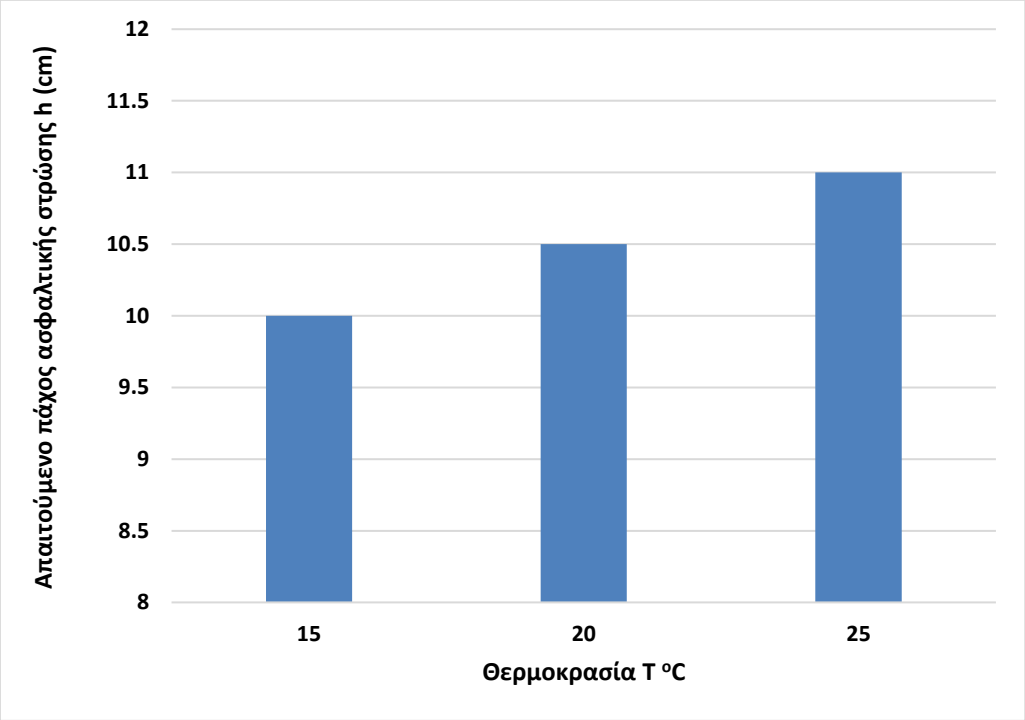


Εικόνα 6.3: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)

Για ταχύτητα 60 km/h: από τον Πίνακα 6.3 και την Εικόνα 6.3 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παραμένει σταθερό και ίσο με 10.5cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 °C σε 20 °C και αυξάνεται κατά 0.5cm για αύξηση από 20 °C σε 25 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 0.5cm.

Πίνακας 6.4: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=70 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
70	15	10	19.79
70	20	10.5	19.44
70	25	11	19.59

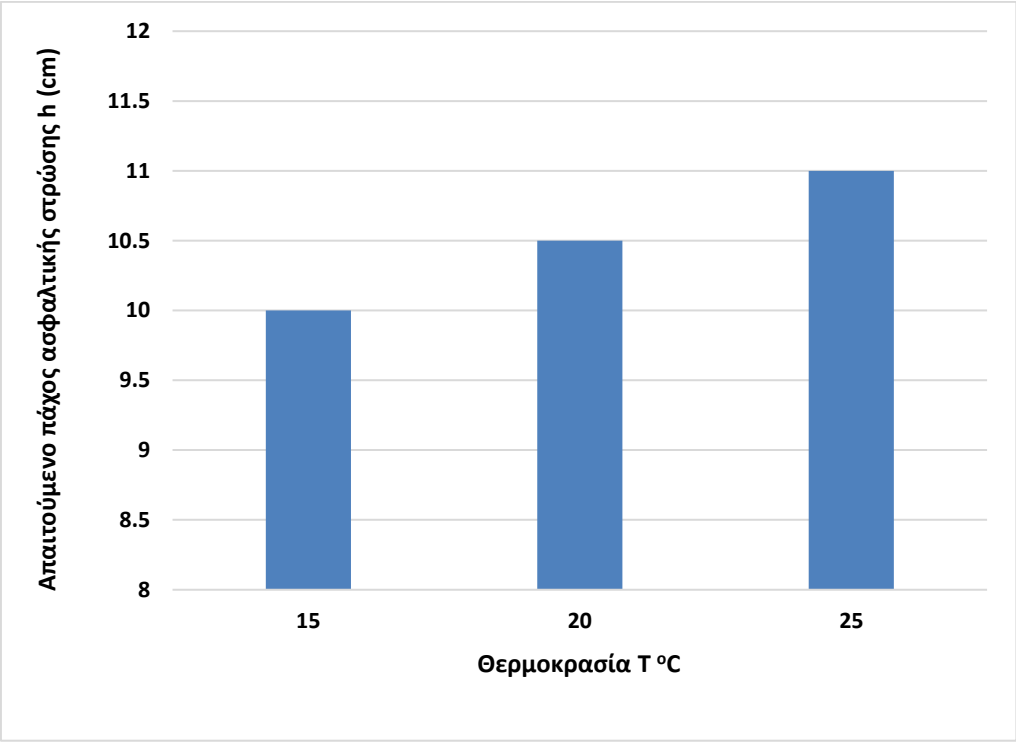


Εικόνα 6.4: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=70 km/h)

Για ταχύτητα 70 km/h: από τον Πίνακα 6.4 και την Εικόνα 6.4 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 6.5: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=80 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
80	15	10	19.57
80	20	10.5	19.18
80	25	11	19.32

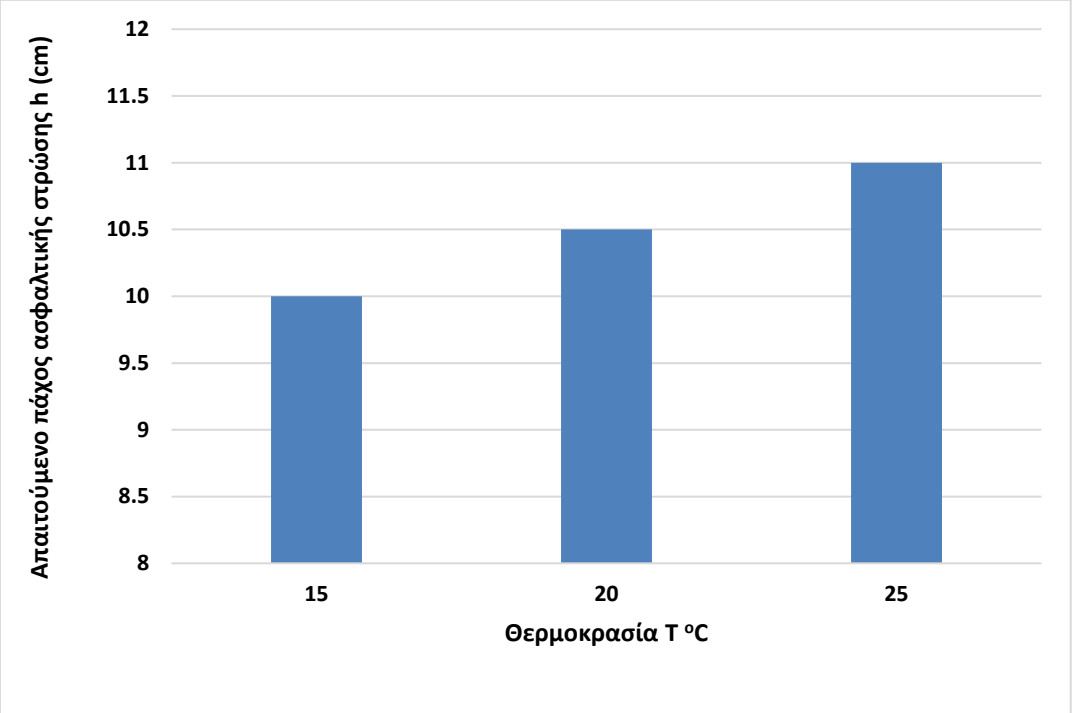


Εικόνα 6.5: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=80 km/h)

Για ταχύτητα 80 km/h: από τον Πίνακα 6.5 και την Εικόνα 6.5 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 6.6: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=90 km/h)

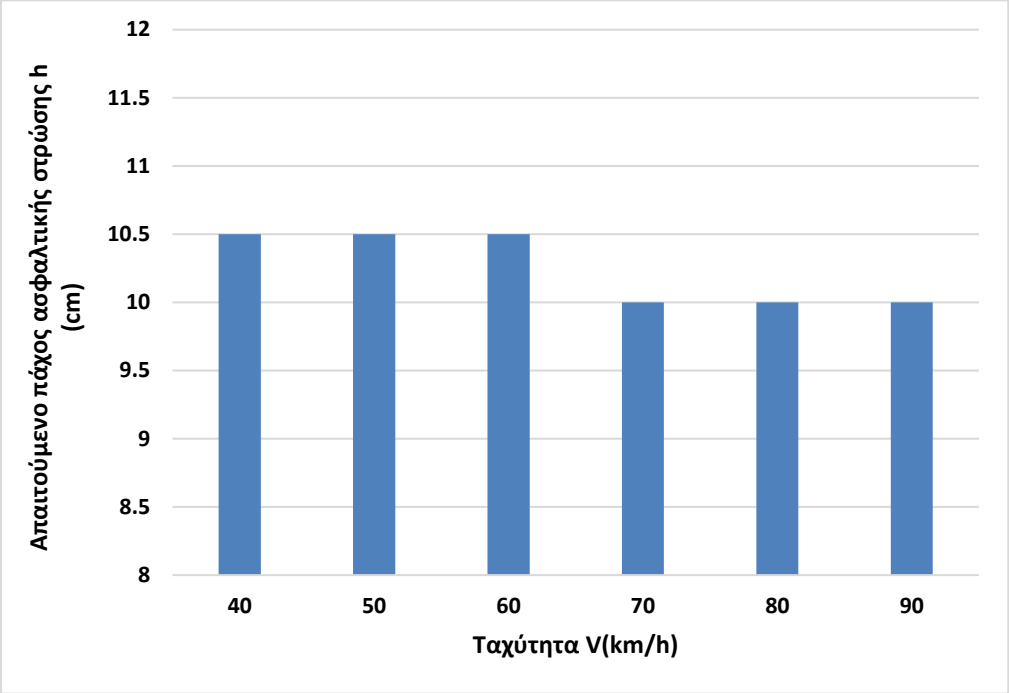
Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
90	15	10	19.38
90	20	10.5	18.95
90	25	11	19.08



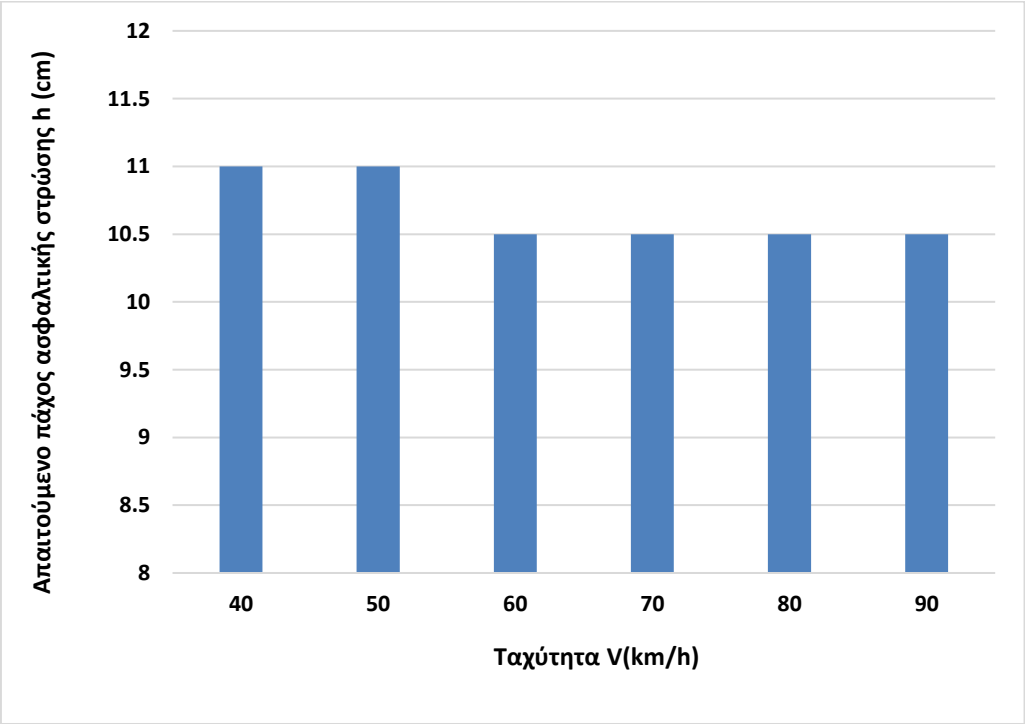
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=90 km/h)

Για ταχύτητα 90 km/h: από τον Πίνακα 6.6 και την Εικόνα 6.6 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

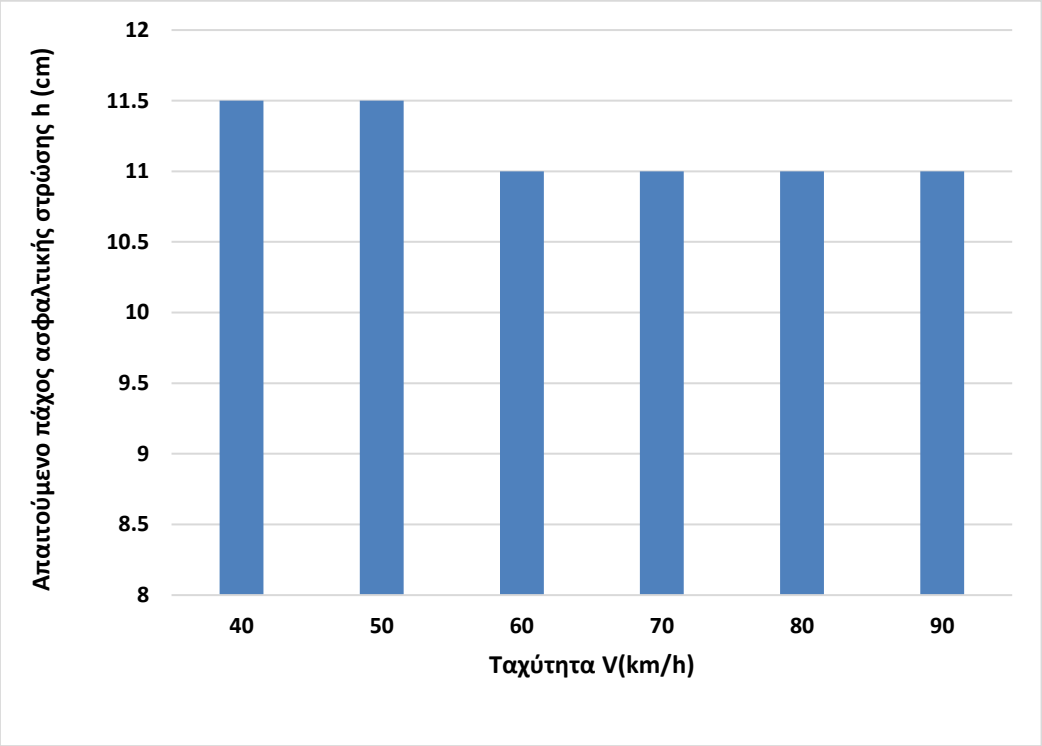
Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης. Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας στη μεταβολή του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης, έχουν κατασκευαστεί τα διαγράμματα μεταβολής του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης συναρτήσει των ταχυτήτων μελέτης, για κάθε θερμοκρασία ανάλυσης ξεχωριστά (Εικόνα 6.7, 6.8, 6.9).



Εικόνα 6.7: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=15 ^{o}C)



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=20 ^{o}C)



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=25 ^{o}C)

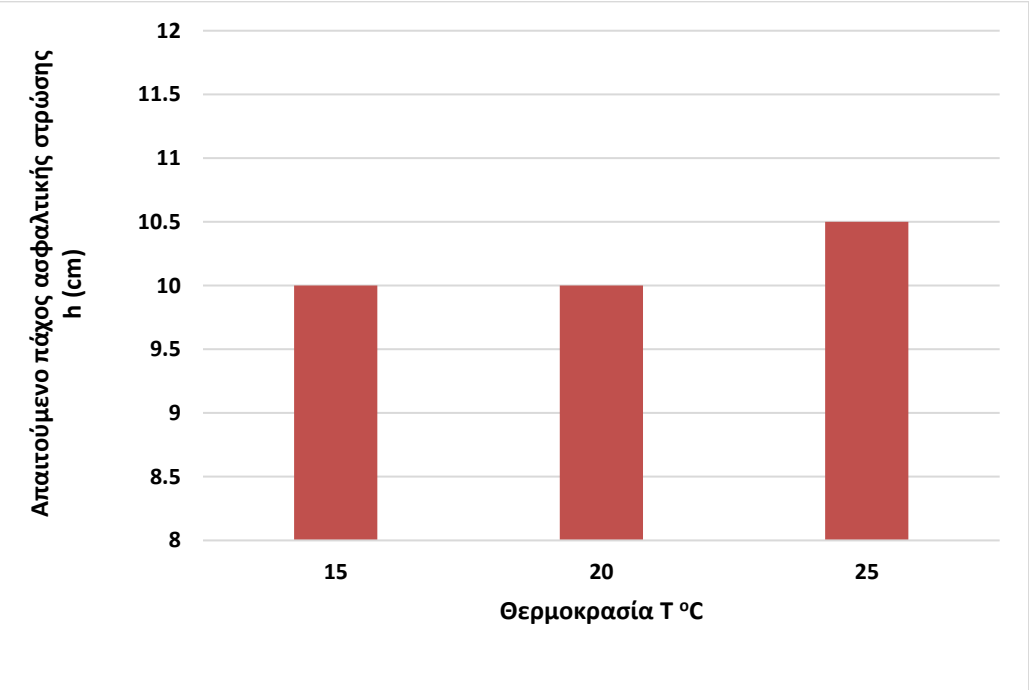
Από τις Εικόνες 6.7, 6.8 και 6.9, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, η ταχύτητα έχει μικρή επίδραση στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης. Για τους 15 ^{o}C το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι ίσο με 10.5cm για τις ταχύτητες 40, 50 και 60 km/h και 10cm για τις ταχύτητες 70, 80 και 90 km/h. Για τους 20 ^{o}C το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι ίσο με 11cm για τις ταχύτητες 40 και 50 km/h και 10.5cm για τις ταχύτητες 60, 70, 80 και 90 km/h. Για τους 25 ^{o}C το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι ίσο με 11.5cm για τις ταχύτητες 40 και 50 km/h και 11cm για τις ταχύτητες 60, 70, 80 και 90 km/h. Αυτό συμβαίνει, γιατί ταχύτητα εισήχθη έμμεσα στη στατική φόρτιση, μέσω του υπολογισμού της συχνότητας, για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E* της ασφαλτικής στρώσης.

7 Δυναμική Φόρτιση – Ανάλυση Ευαισθησίας

Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας ως προς το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για τη δυναμική φόρτιση. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας και της ταχύτητας, στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, έχουν κατασκευαστεί οι παρακάτω πίνακες και διαγράμματα (Εικόνα 7.1 - 7.9 και Πίνακας 7.1 – 7.6).

Πίνακας 7.1: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=40 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
40	15	10	18.86
40	20	10	19.61
40	25	10.5	18.3

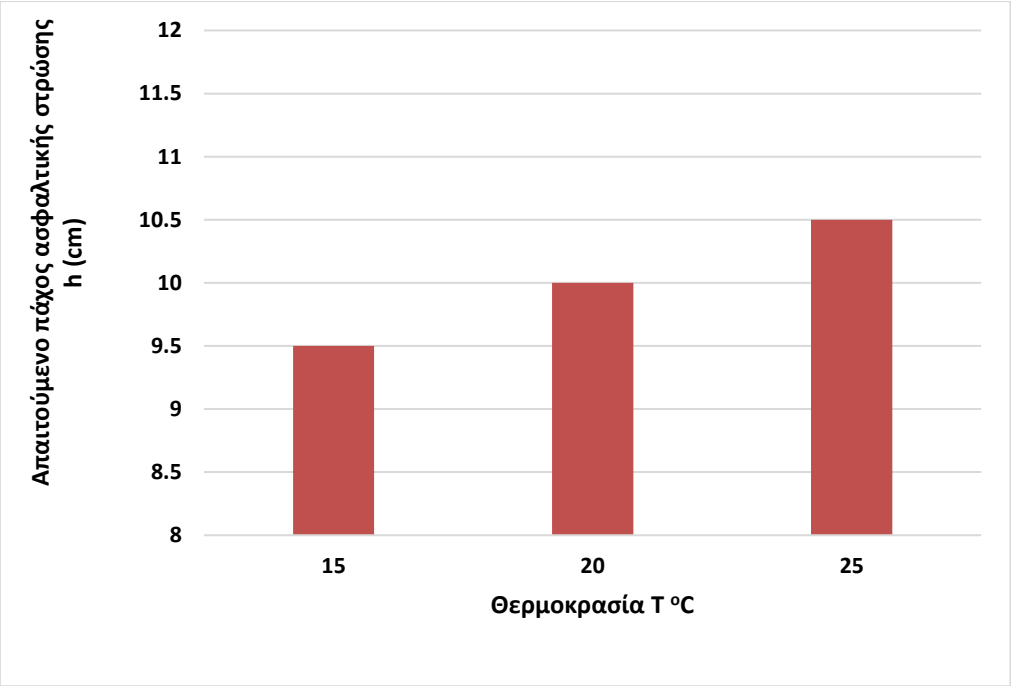


Εικόνα 7.1: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=40 km/h)

Για ταχύτητα 40 km/h: από τον Πίνακα 7.1 και την Εικόνα 7.1 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παραμένει σταθερό και ίσο με 10cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 ^{o}C σε 20 ^{o}C και αυξάνεται κατά 0.5cm για αύξηση από 20 ^{o}C σε 25 ^{o}C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 ^{o}C σε 25 ^{o}C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 0.5cm.

Πίνακας 7.2: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=50 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T ^{o}C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
50	15	9.5	19.8
50	20	10	19.3
50	25	10.5	18.1

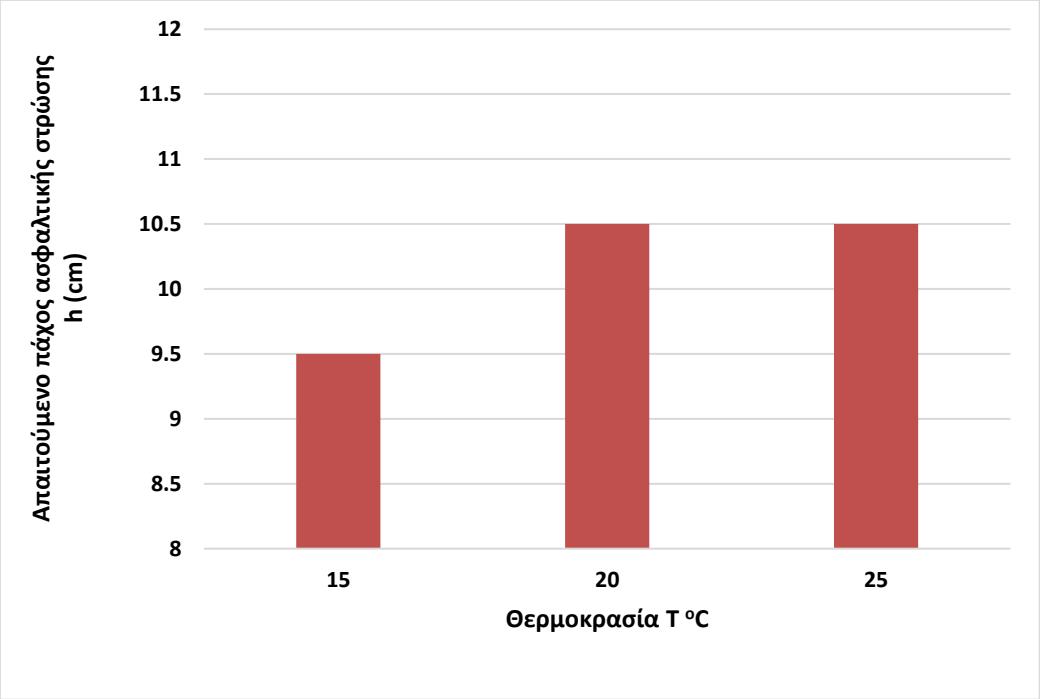


Εικόνα 7.2: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=50 km/h)

Για ταχύτητα 50 km/h: από τον Πίνακα 7.2 και την Εικόνα 7.2 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm, κάθε φορά που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5 ^{o}C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 ^{o}C σε 25 ^{o}C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 7.3: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
60	15	9.5	19.88
60	20	10.5	17.85
60	25	10.5	17.97

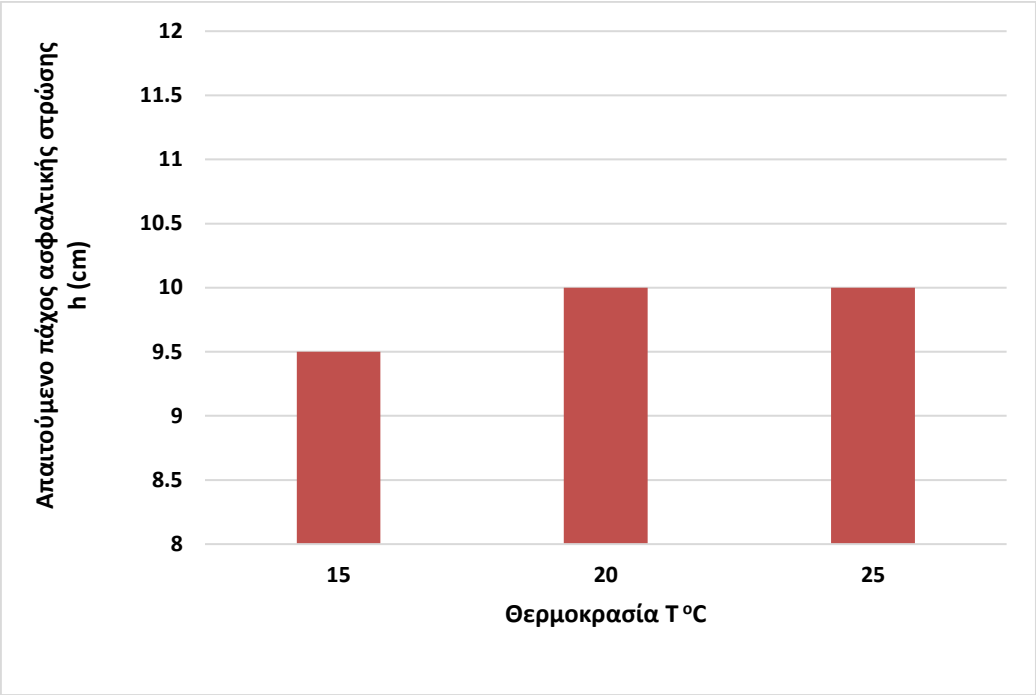


Εικόνα 7.3: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)

Για ταχύτητα 60 km/h: από τον Πίνακα 7.3 και την Εικόνα 7.3 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 1cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 °C σε 20 °C και παραμένει σταθερό και ίσο με 10.5cm για αύξηση από 20 °C σε 25 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 7.4: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=70 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
70	15	9.5	19.16
70	20	10	19.92
70	25	10	20

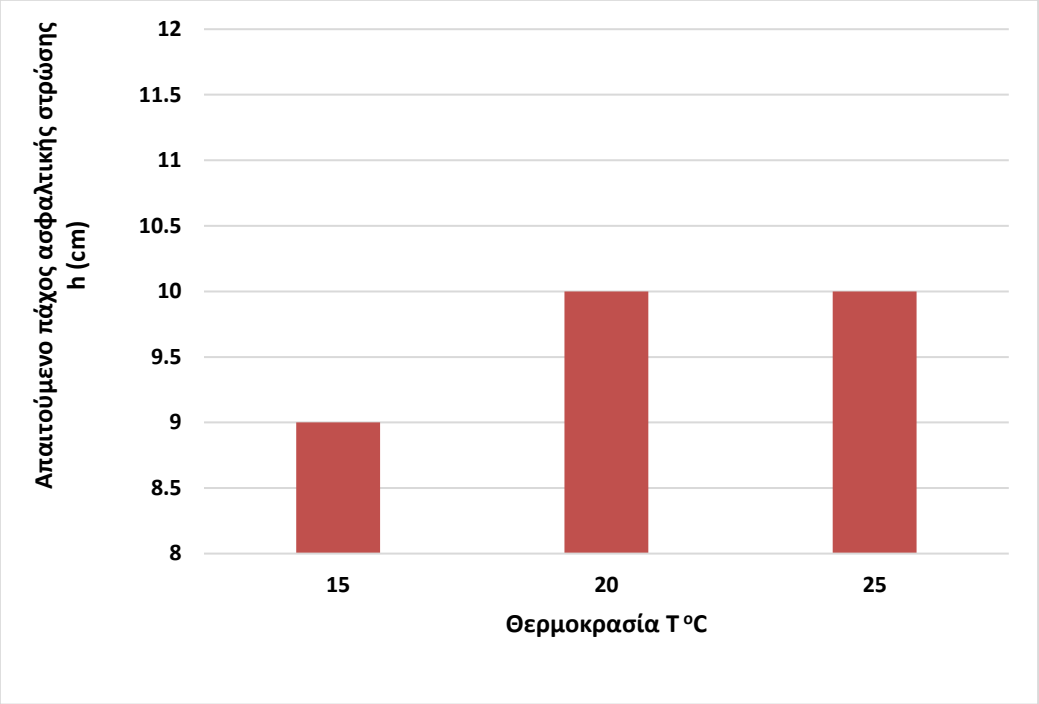


Εικόνα 7.4: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=70 km/h)

Για ταχύτητα 70 km/h: από τον Πίνακα 7.4 και την Εικόνα 7.4 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 0.5cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 °C σε 20 °C και παραμένει σταθερό και ίσο με 10cm για αύξηση από 20 °C σε 25 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 0.5cm.

Πίνακας 7.5: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=80 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
80	15	9	19.91
80	20	10	19.89
80	25	10	19.97

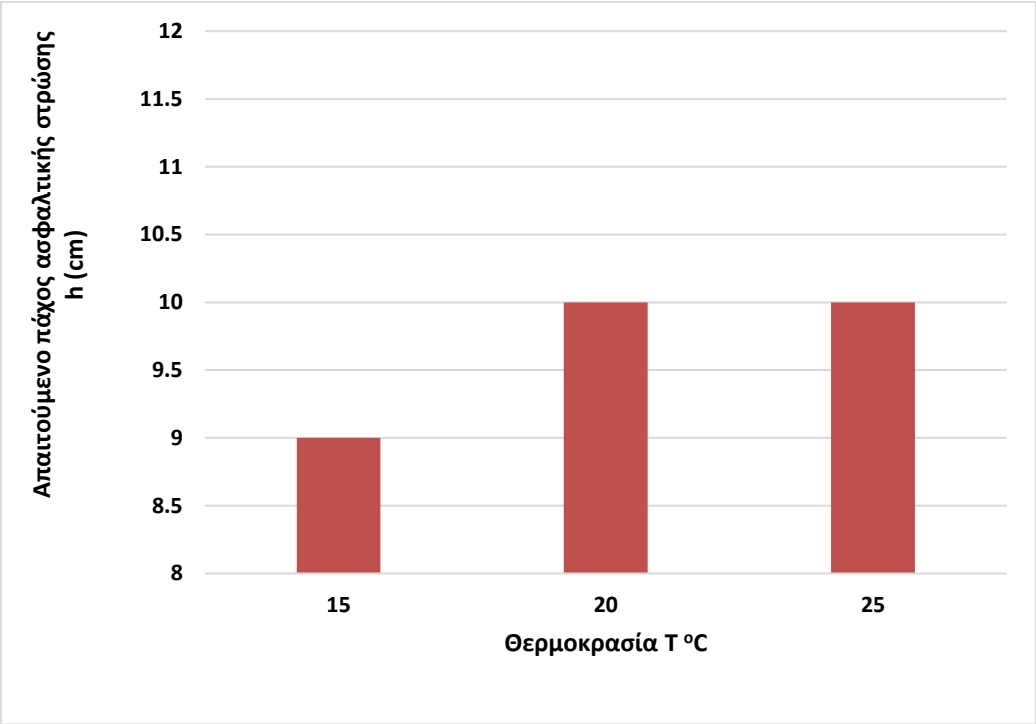


Εικόνα 7.5: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=80 km/h)

Για ταχύτητα 80 km/h: από τον Πίνακα 7.5 και την Εικόνα 7.5 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 1cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 °C σε 20 °C και παραμένει σταθερό και ίσο με 10cm για αύξηση από 20 °C σε 25 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Πίνακας 7.6: Πίνακας μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=90 km/h)

Ταχύτητα V(km/h)	Θερμοκρασία T °C	Πάχος h(cm)	Ρηγμάτωση %
90	15	9	19.71
90	20	10	19.82
90	25	10	19.91

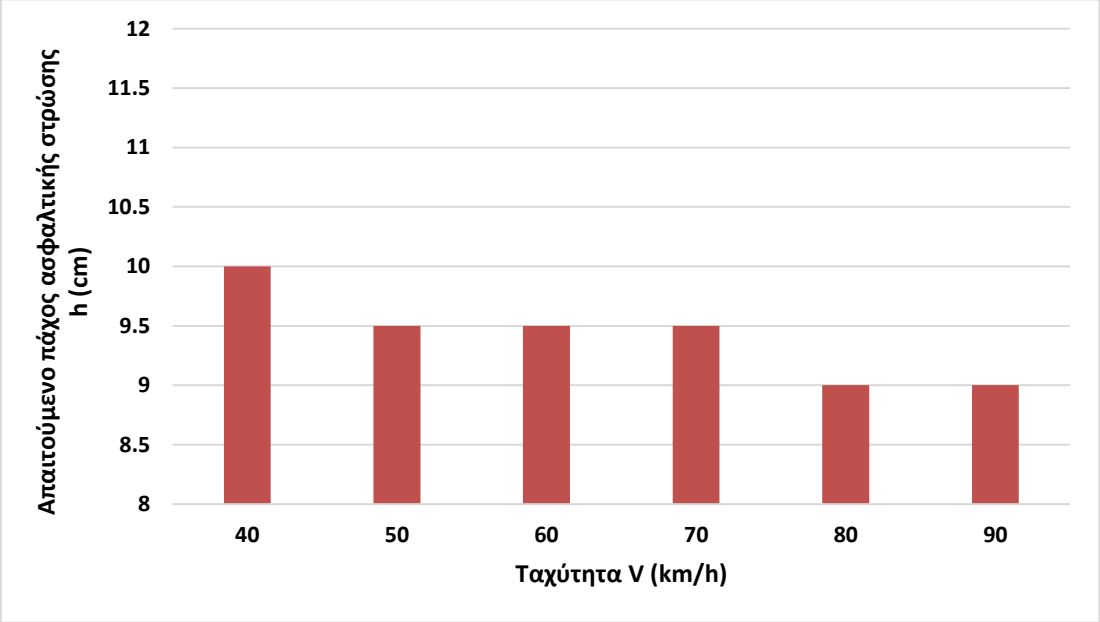


Εικόνα 7.6: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=90 km/h)

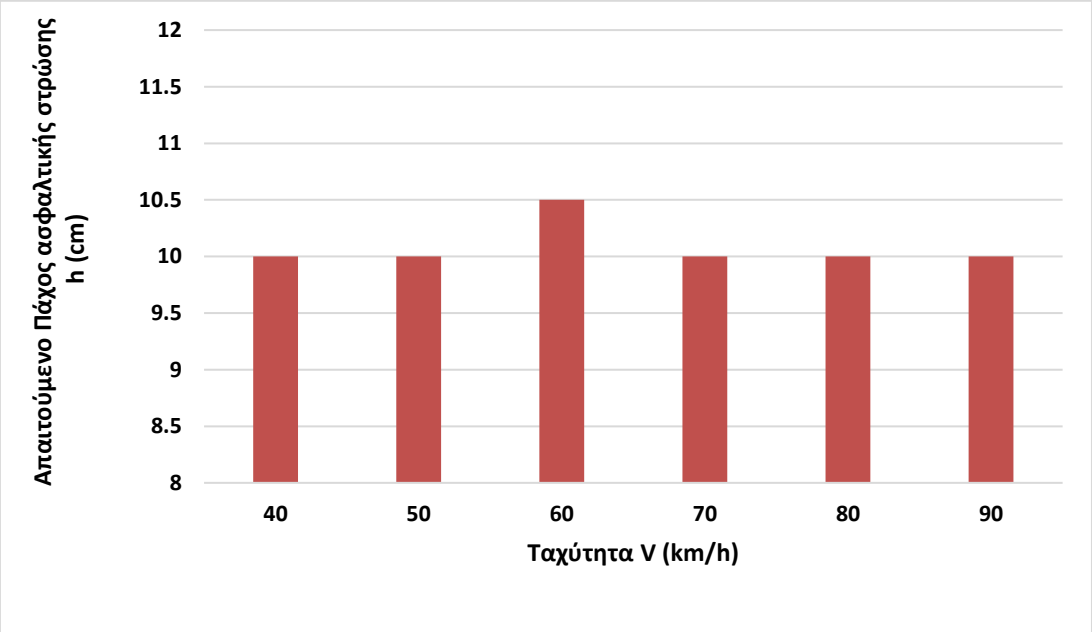
Για ταχύτητα 90 km/h: από τον Πίνακα 7.6 και την Εικόνα 7.6 παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης αυξάνεται κατά 1cm για αύξηση θερμοκρασίας από 15 °C σε 20 °C και παραμένει σταθερό και ίσο με 10cm για αύξηση από 20 °C σε 25 °C. Συνολικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 1cm.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης. Η ιξωδοελαστική φύση της ασφάλτου είναι αυτή που προκαλεί την ευαισθησία της, σε θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

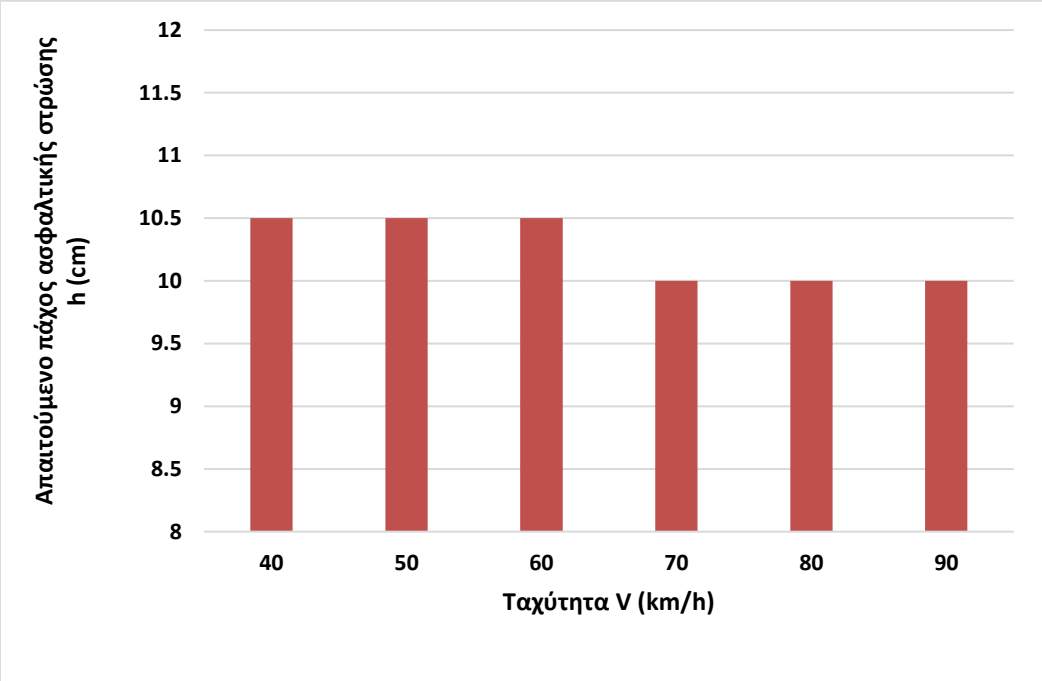
Όσον αφορά την ταχύτητα, η ταχύτητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη δυναμική φόρτιση, γιατί το δυναμικό φορτίο είναι ένα φορτίο που μεταβάλλεται, δηλαδή κινείται και αλλάζει. Τα επόμενα διαγράμματα αναπαριστούν τη μεταβολή του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης συναρτήσει των ταχυτήτων μελέτης, για κάθε θερμοκρασία ανάλυσης ξεχωριστά (Εικόνα 7.7, 7.8 και 7.9).



Εικόνα 7.7: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=15 ºC)



Εικόνα 7.8: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=20 ºC)



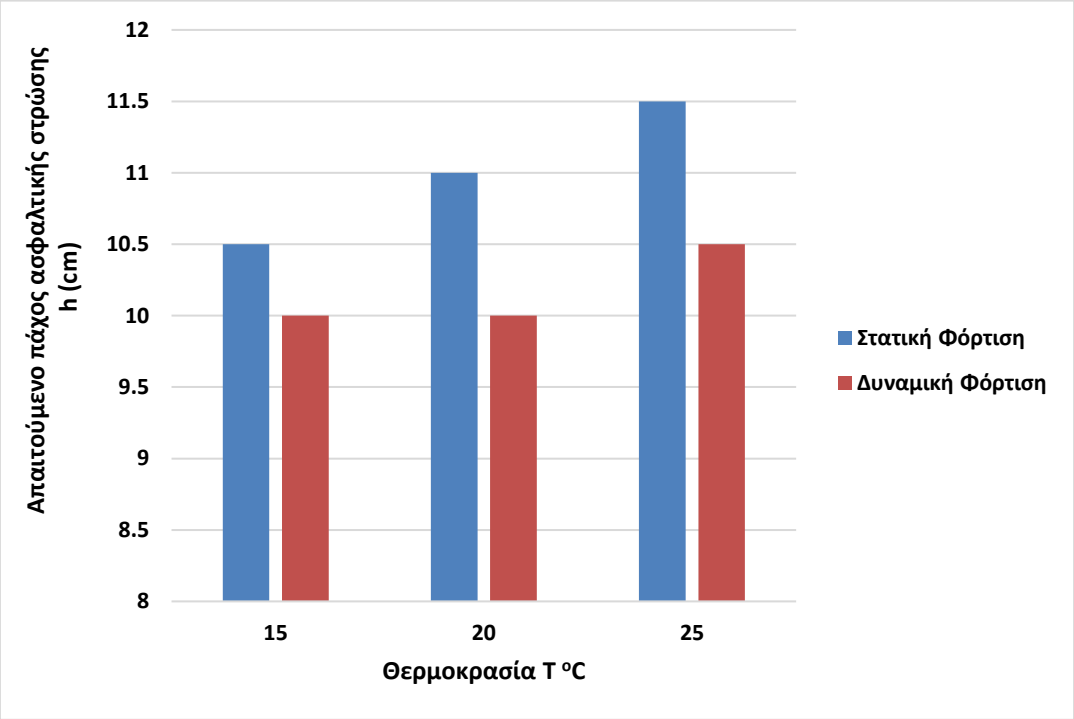
Εικόνα 7.9: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=25 ^{o}C)

Από τις Εικόνες 7.7, 7.8 και 7.9 παρατηρούμε ότι, στη χαμηλότερη θερμοκρασία ανάλυσης, δηλαδή τους 15 ^{o}C, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης μειώνεται κατά 1cm συνολικά, για αύξηση της ταχύτητας από 40 σε 90 km/h. Αυτό δε συμβαίνει στις θερμοκρασίες 20 και 25 ^{o}C, όπου η συνολική μείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης, για αύξηση της ταχύτητας από 40 σε 90 km/h, ισούται με 0.5cm. Αυτό σημαίνει ότι καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, παραμένει σχετικά σταθερό.

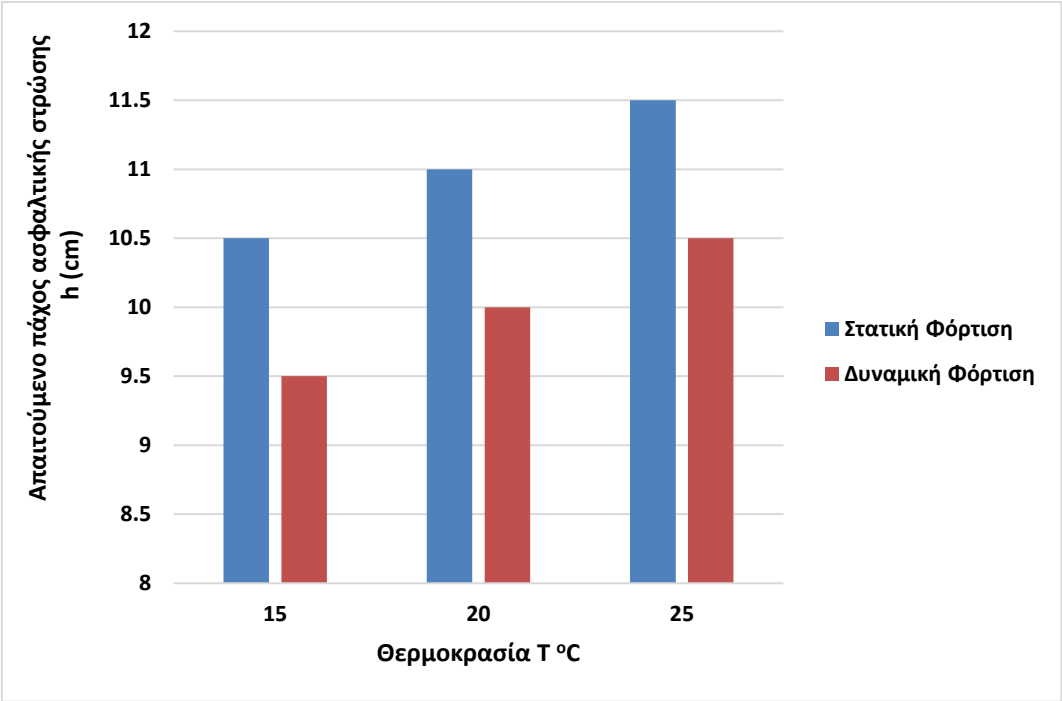
8 Συγκριτική Ανάλυση

8.1 Σύγκριση ως προς τη Θερμοκρασία

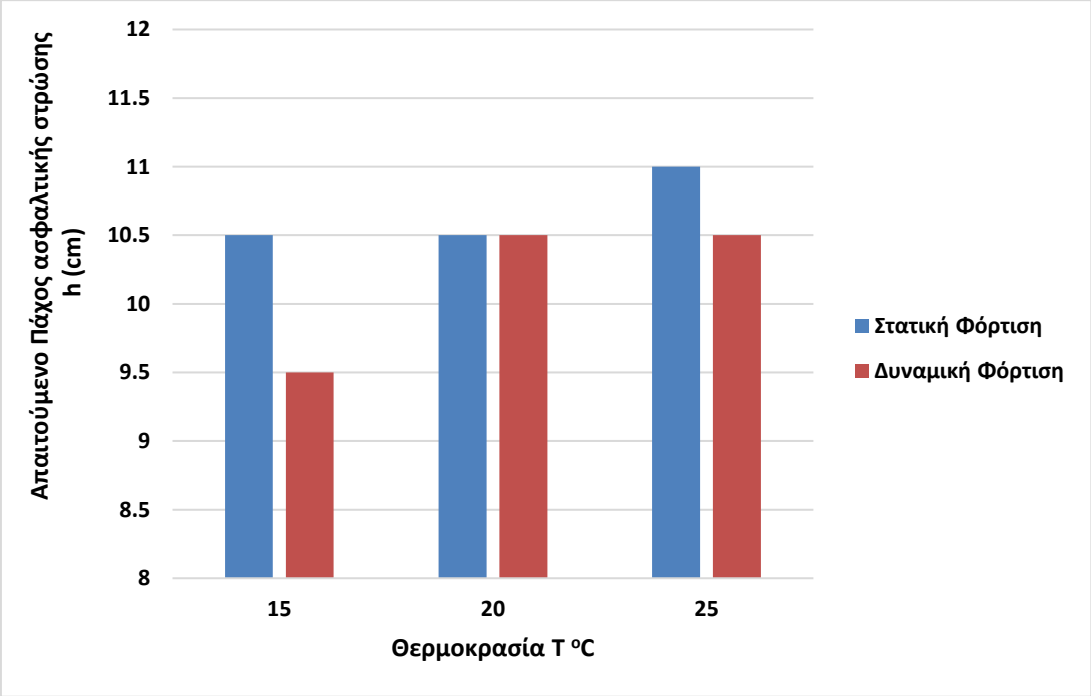
Η έννοια του οικονομικού έργου για όλη τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος καθιστά επιτακτική την ανάγκη συγκριτικής ανάλυσης των απαιτούμενων παχών ασφαλτικής στρώσης της στατικής και της δυναμικής φόρτισης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης του απαιτούμενου πάχους ασφαλτικής στρώσης μεταξύ της στατικής και της δυναμικής φόρτισης, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, για κάθε ταχύτητα μελέτης ξεχωριστά (Εικόνα 8.1 – 8.6).



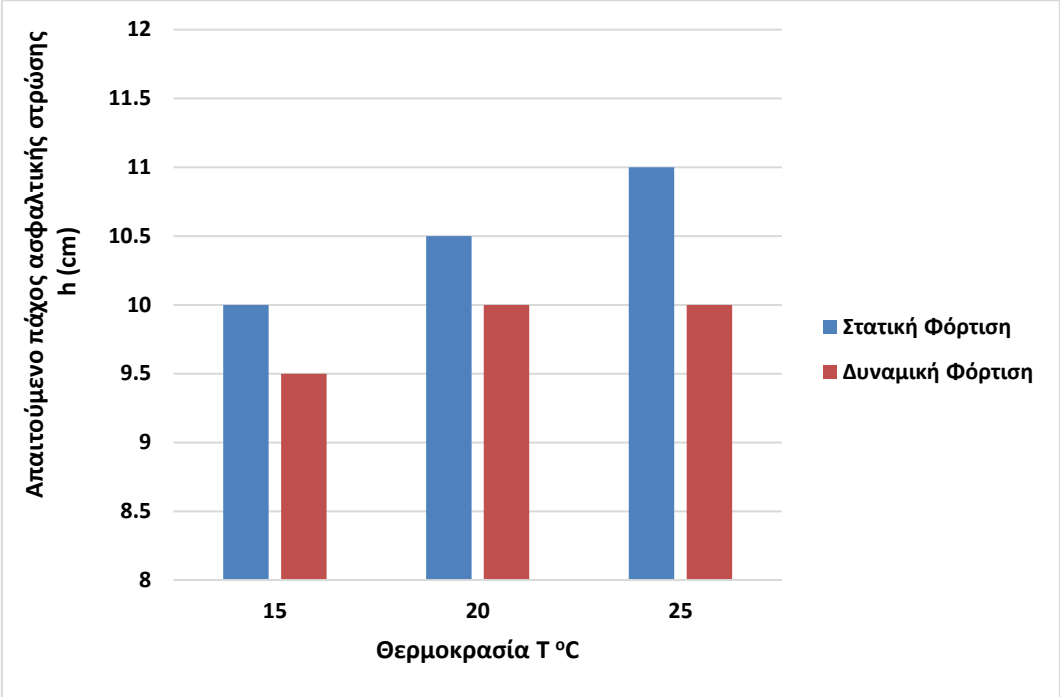
Εικόνα 8.1: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=40 km/h)



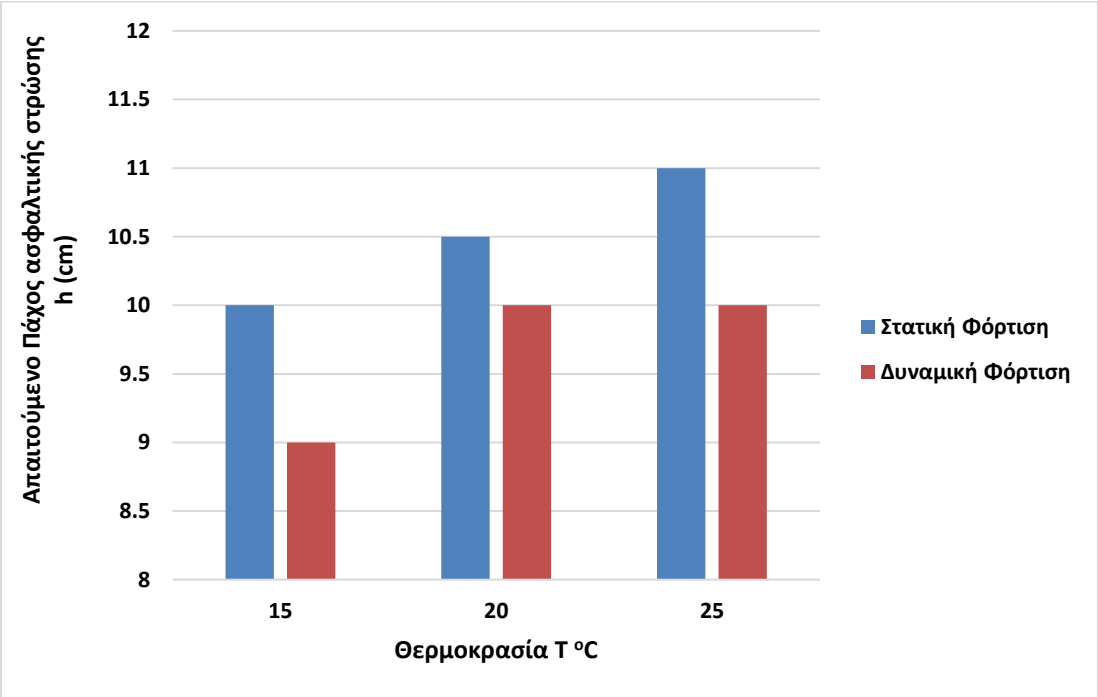
Εικόνα 8.2: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=50 km/h)



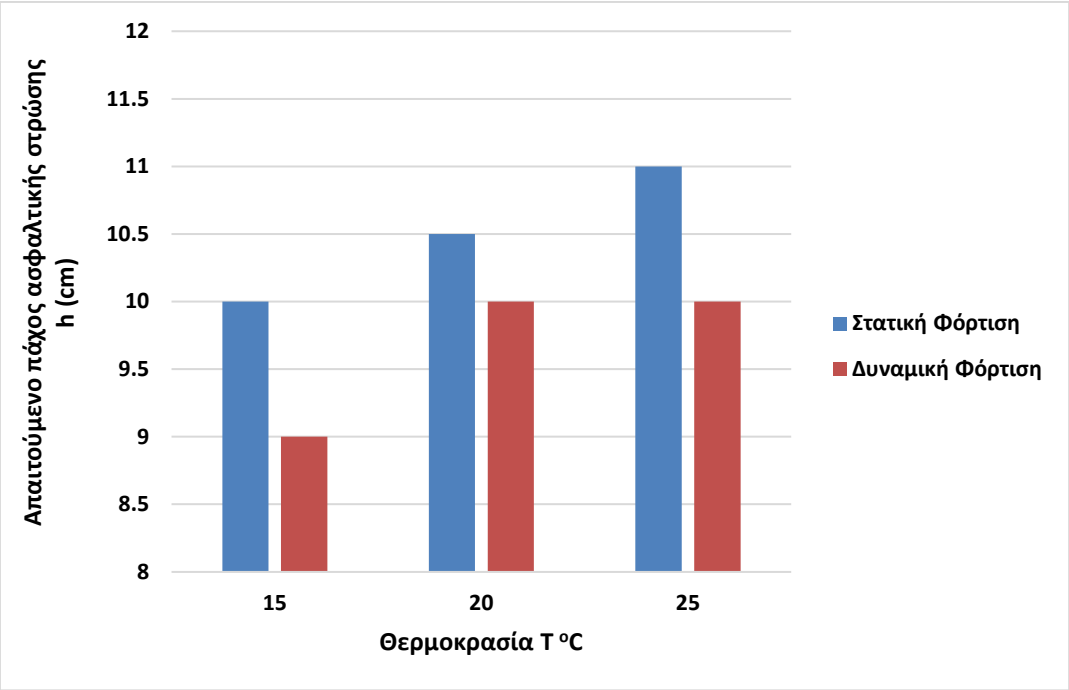
Εικόνα 8.3: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)



Εικόνα 8.4: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=70 km/h)



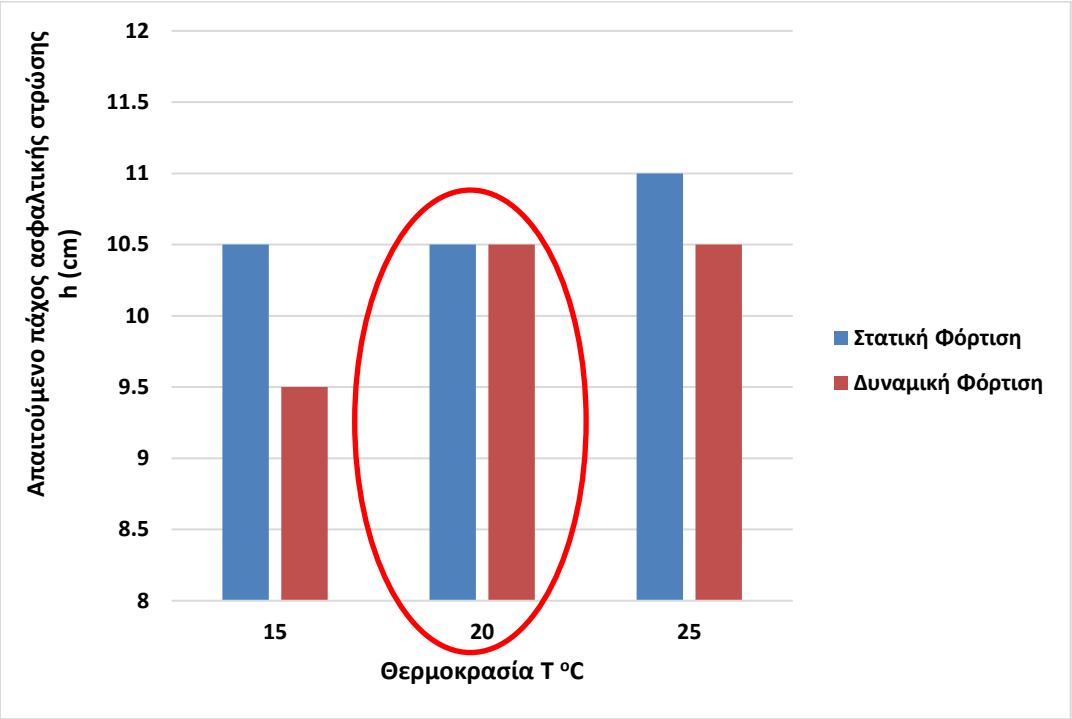
Εικόνα 8.5: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=80 km/h)



Εικόνα 8.6: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=90 km/h)

Από τις Εικόνες 8.1 έως 8.6, παρατηρούμε ότι, το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης στη στατική φόρτιση είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στη δυναμική φόρτιση για όλες τις θερμοκρασίες ανάλυσης και όλες τις ταχύτητες μελέτης, εκτός από την περίπτωση των 60 km/h και 20 °C, όπου τα δύο απαιτούμενα πάχη είναι ίσα (Εικόνα 8.3). Ωστόσο, οι διαφορές στα απαιτούμενα πάχη κυμαίνονται από 0.5cm έως 1cm. Στην ταχύτητα 50 km/h, παρατηρείται για κάθε θερμοκρασία, διαφορά απαιτούμενου πάχους ασφαλτικής στρώσης μεταξύ στατικής και δυναμικής φόρτισης, ίση με 1cm. Επομένως, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί περαιτέρω, η μεταβολή που προκαλεί η δυναμική φόρτιση στο απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης, σε χαμηλές ταχύτητες κίνησης. Επιπλέον, για τις ταχύτητες 80 και 90 km/h προέκυψαν τα ίδια απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης στη στατική φόρτιση, καθώς επίσης και στη δυναμική φόρτιση.

Αναφέρθηκε προηγουμένως η περίπτωση των 60 km/h και 20 ºC (Εικόνα 8.3).

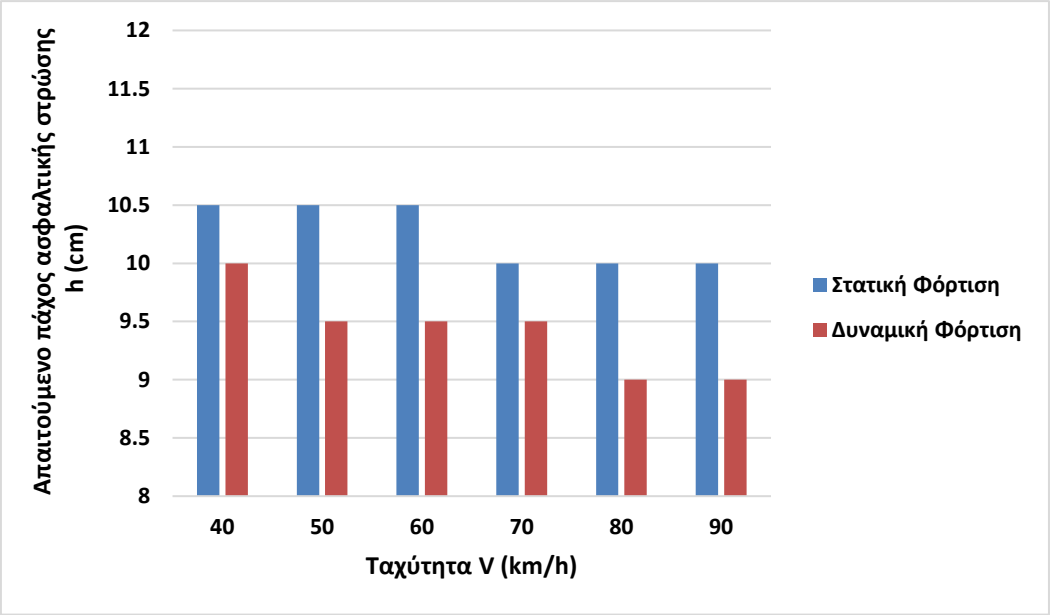


Εικόνα 8.3: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (V=60 km/h)

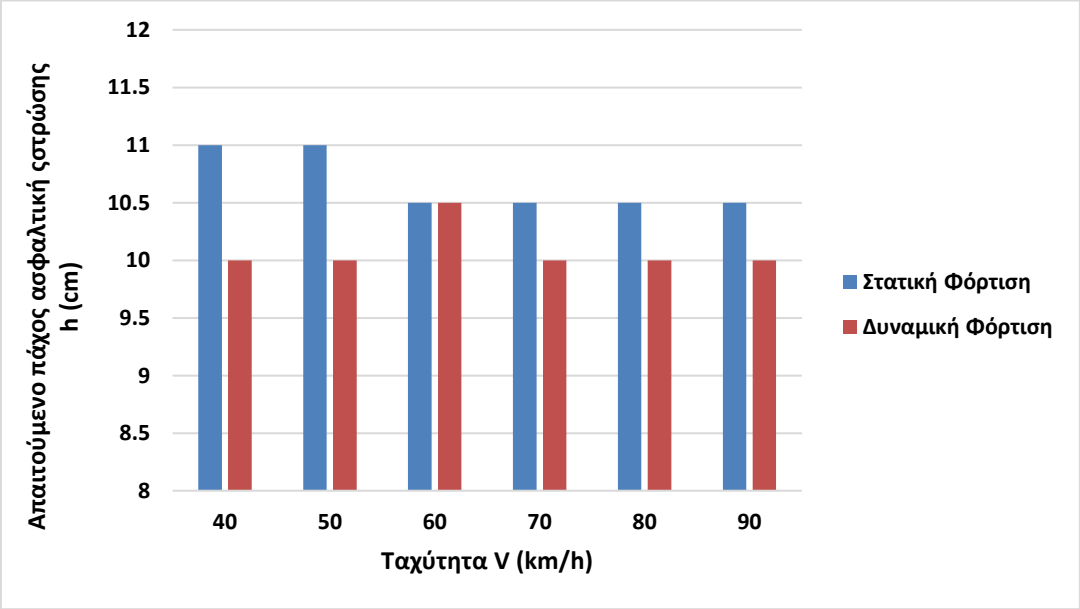
Στην Εικόνα 8.3, παρατηρούμε ότι το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης λόγω της στατικής φόρτισης είναι ίσο με το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης λόγω της δυναμικής φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι για τη συγκεκριμένη διατομή αναφοράς και τις παραδοχές που έχουν γίνει στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο σχεδιασμός του οδοστρώματος μπορεί να γίνει είτε με στατική είτε με δυναμική φόρτιση. Το στοιχείο αυτό, οδήγησε στην ανάγκη επιπλέον συγκριτικών αναλύσεων.

8.2 Σύγκριση ως προς την Ταχύτητα

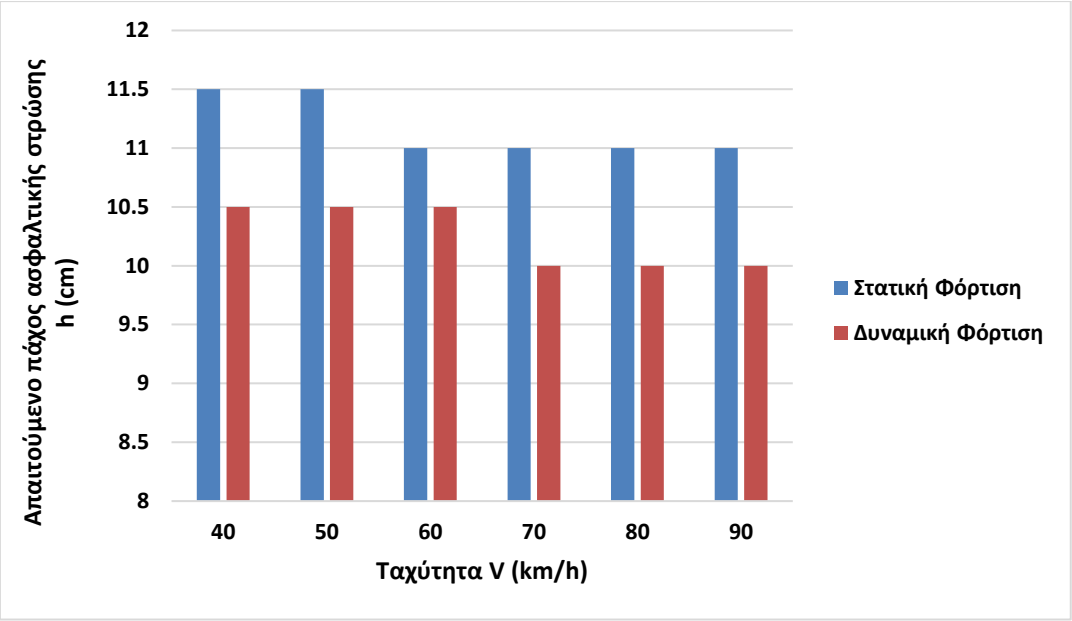
Για να γίνει κατανοητή, η μεταβολή του απαιτούμενου πάχους ασφαλτικής στρώσης μεταξύ της στατικής και της δυναμικής φόρτισης, λόγω της αύξησης της ταχύτητας μελέτης, έχουν κατασκευαστεί τα παρακάτω διαγράμματα, για κάθε θερμοκρασία ανάλυσης ξεχωριστά (Εικόνα 8.7 – 8.9).



Εικόνα 8.7: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=15 ºC)



Εικόνα 8.8: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=20 ºC)



Εικόνα 8.9: Σύγκριση πάχους ασφαλτικής στρώσης (T=25 ºC)

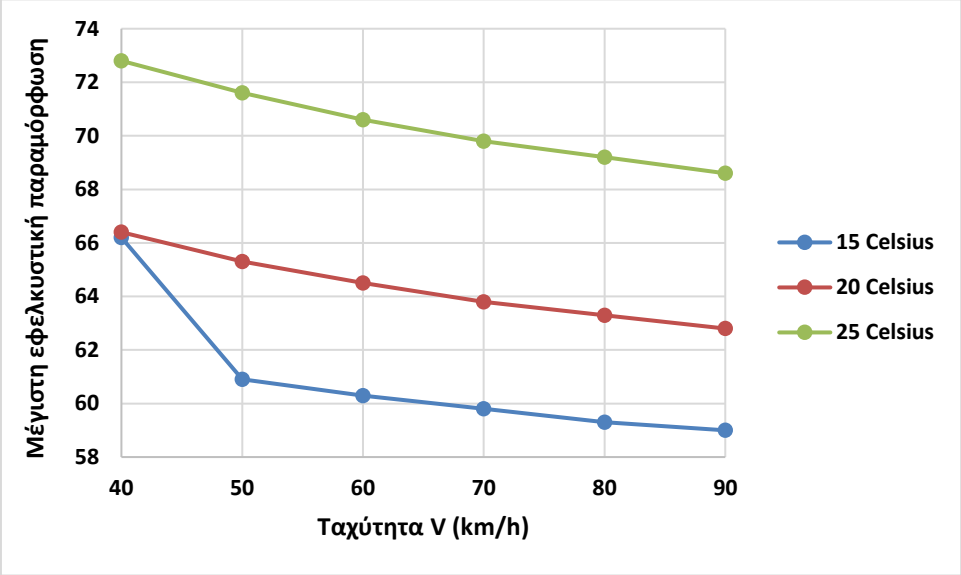
Από τις Εικόνες 8.7, 8.8 και 8.9 παρατηρούμε ότι, για τους 25 ºC, η διαφορά απαιτούμενου πάχους ασφαλτικής στρώσης μεταξύ στατικής και δυναμικής φόρτισης είναι 1cm, για κάθε ταχύτητα, εκτός από την 60 km/h, που η διαφορά μειώνεται στα 0.5cm. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στους 15 ºC, όπου η διαφορά είναι 1cm, για τις ταχύτητες 50, 60, 80, 90 km/h και 0.5cm για τις ταχύτητες 40 και 70 km/h. Όσο για τους 20 ºC, η διαφορά είναι 0.5cm, για τις ταχύτητες 70, 80, 90 km/h και 1cm για τις ταχύτητες 40 και 50 km/h.

8.3 Σύγκριση ως προς τα Εντατικά Μεγέθη

Από όλα τα απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης που προέκυψαν, παρατηρήθηκε ότι για απαιτούμενο πάχος 10cm επιτυγχάνεται το κριτήριο σχεδιασμού που τέθηκε, για την πλειονότητα των συνθηκών φόρτισης. Επομένως, για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης 10cm, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου στατικές και δυναμικές αναλύσεις, με μεταβλητή εξόδου τις τιμές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης (Πίνακας 8.2 και 8.3 και Εικόνα 8.10 και 8.11).

Πίνακας 8.1: Τιμές μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης στη στατική φόρτιση

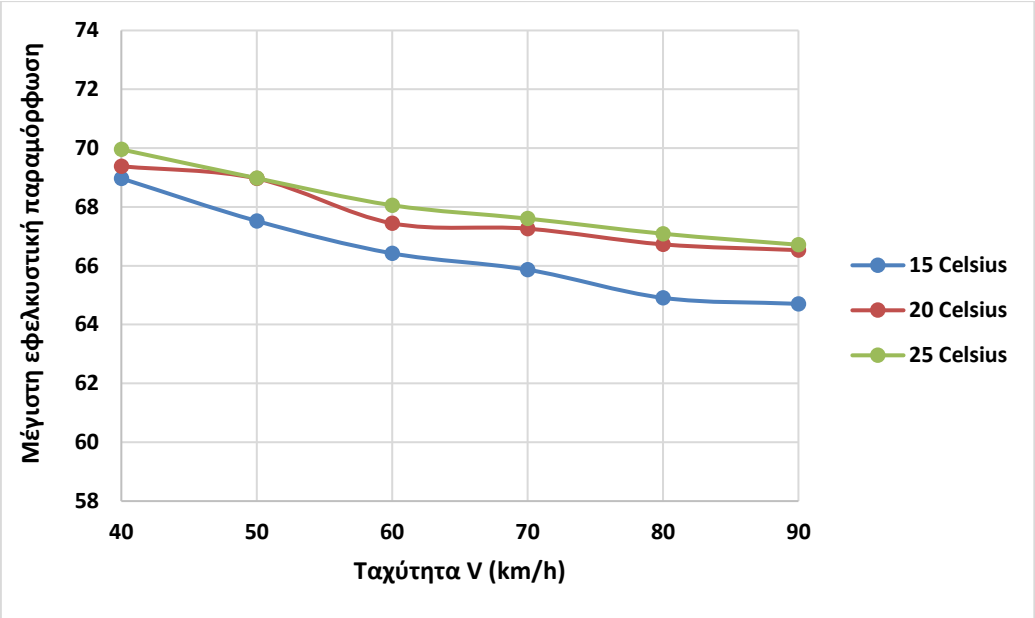
Static Loading	15 Celsius	20 Celsius	25 Celsius
V	Normal Strain Y-Y	Normal Strain Y-Y	Normal Strain Y-Y
(km/h)	(μstrain)	(μstrain)	(μstrain)
40	-66.2	-66.4	-72.8
50	-60.9	-65.3	-71.6
60	-60.3	-64.5	-70.6
70	-59.8	-63.8	-69.8
80	-59.3	-63.3	-69.2
90	-59	-62.8	-68.6



Εικόνα 8.10: Διάγραμμα μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης για τη στατική φόρτιση

Πίνακας 8.2: Τιμές μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης στη δυναμική φόρτιση

Dynamic Loading	15 Celsius	20 Celsius	25 Celsius
V	Normal Strain Y-Y	Normal Strain Y-Y	Normal Strain Y-Y
(km/h)	(μstrain)	(μstrain)	(μstrain)
40	-68.97	-69.383	-69.956
50	-67.523	-68.967	-68.978
60	-66.422	-67.445	-68.057
70	-65.866	-67.261	-67.604
80	-64.909	-66.727	-67.089
90	-64.705	-66.531	-66.714

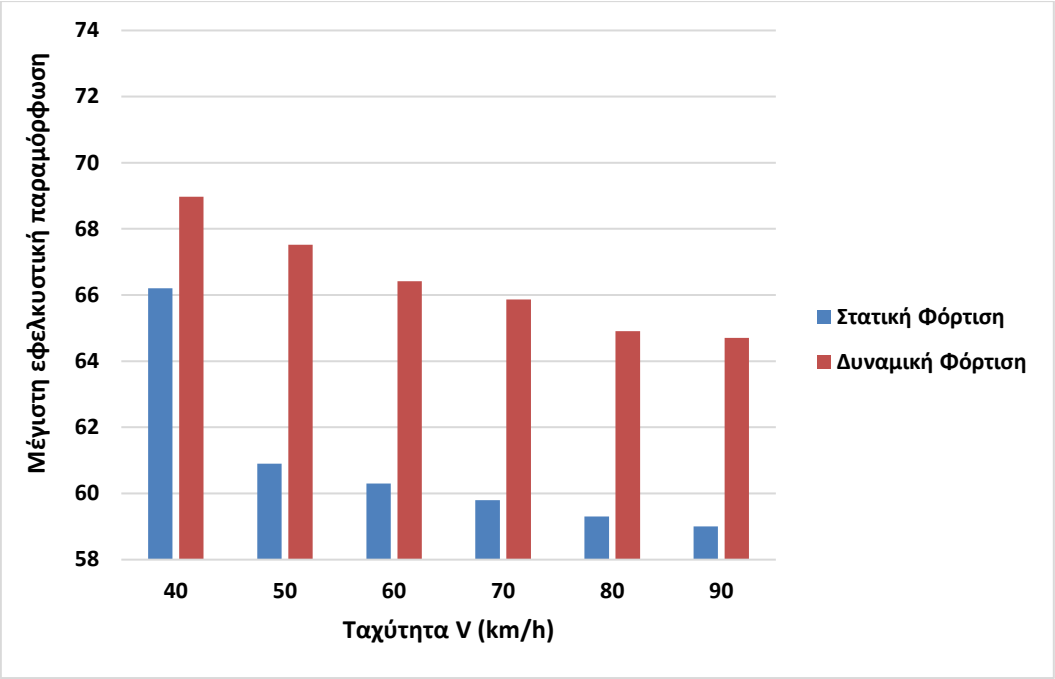


Εικόνα 8.11: Διάγραμμα μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης για τη δυναμική φόρτιση

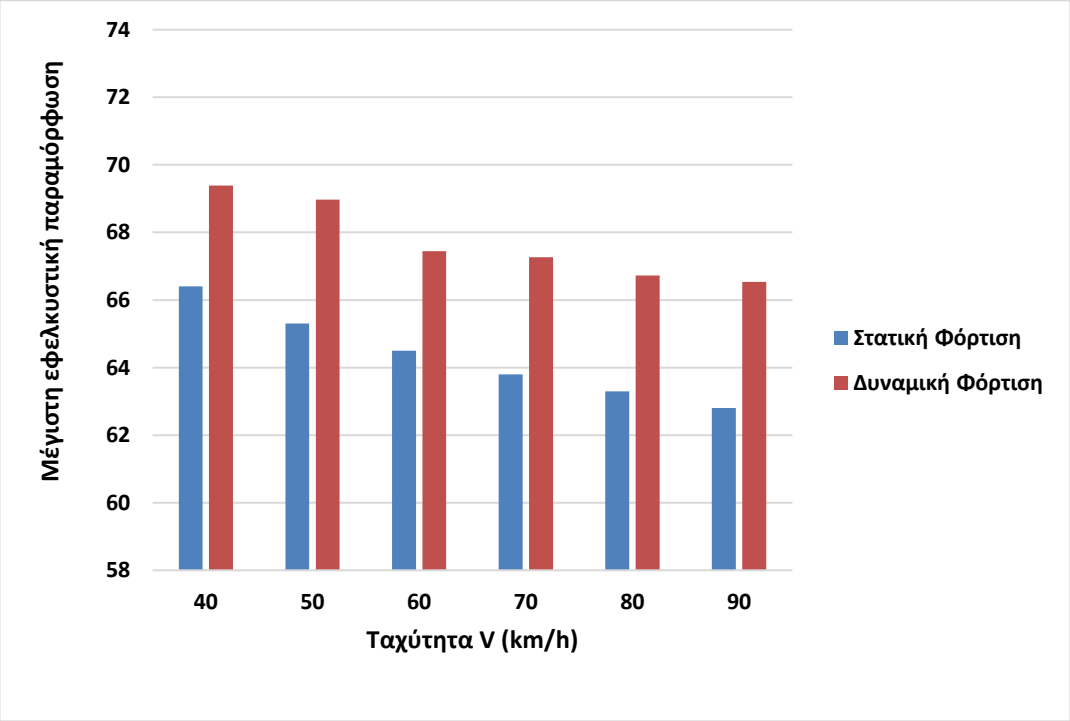
Η διαφορά των τιμών των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων της δυναμικής φόρτισης από τις αντίστοιχες τιμές της στατικής φόρτισης παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.4 και στις Εικόνες 8.12, 8.13 και 8.14.

Πίνακας 8.3: Διαφορά τιμών μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης δυναμικής και στατικής φόρτισης

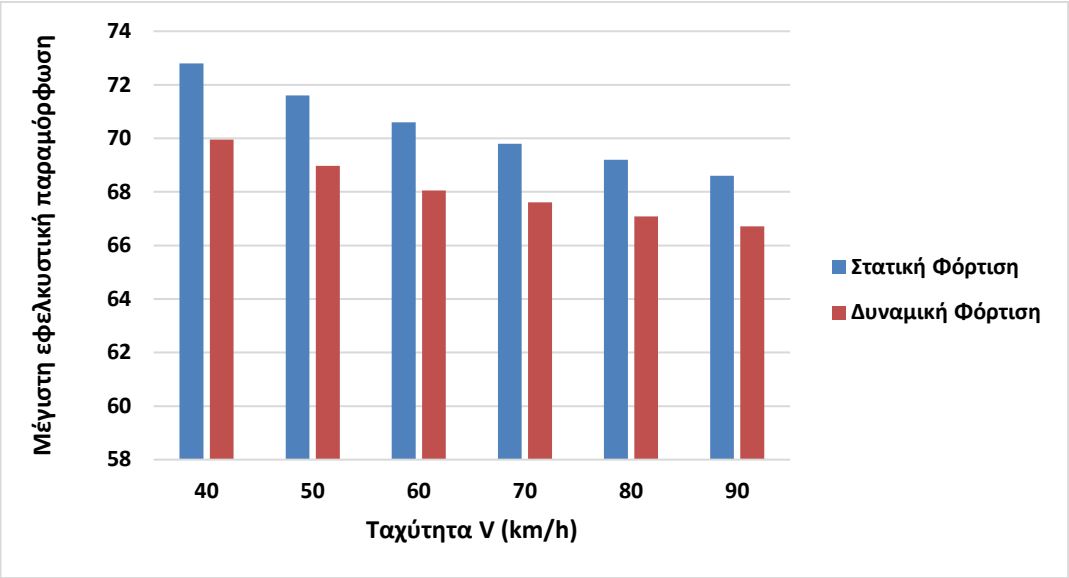
V	15 Celsius	20 Celsius	25 Celsius
(km/h)	Διαφορά (μstrain)	Διαφορά (μstrain)	Διαφορά (μstrain)
40	2.77	2.983	-2.844
50	6.623	3.667	-2.622
60	6.122	2.945	-2.543
70	6.066	3.461	-2.196
80	5.609	3.427	-2.111
90	5.705	3.731	-1.886



Εικόνα 8.12: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στατικής και δυναμικής φόρτισης (T=15 ºC)



Εικόνα 8.13: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στατικής και δυναμικής φόρτισης (T=20 ºC)



Εικόνα 8.14: Σύγκριση μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στατικής και δυναμικής φόρτισης (T=25 ^{o}C)

Η δυναμική ανάλυση έδωσε μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη (μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης) από τη στατική ανάλυση στις θερμοκρασίες 15 ^{o}C και 20 ^{o}C. Ισχύει το αντίθετο για τους 25 ^{o}C. Η μέγιστη διαφορά στις τιμές των δύο αναλύσεων εντοπίζεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία ανάλυσης που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή στους 15 ^{o}C.

Τα παραπάνω εξαγόμενα συμφωνούν με τη διεθνή βιβλιογραφία, και συγκεκριμένα με τους Yoo and Al-Qadi (2007), οι οποίοι έχουν αναφέρει ότι η απόκριση του οδοστρώματος από τη δυναμική ανάλυση ήταν συνήθως υψηλότερη από ό, τι από τη στατική ανάλυση, ειδικά σε χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή ταχύτητα.

9 Σχόλια-Συμπεράσματα

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η επίδραση της δυναμικής φόρτισης στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στη δυναμική φόρτιση διερευνώνται στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος και συγκεκριμένα η θερμοκρασία, η ταχύτητα και κατ' επέκταση, η συχνότητα φόρτισης. Για τη διερεύνηση του βαθμού επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προσδιορίστηκε μία διατομή αναφοράς. Στη διατομή αναφοράς πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας, αξιολογώντας τη μεταβολή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας ή της ταχύτητας με κριτήριο σχεδιασμού ρηγμάτωση ίση ή μικρότερη του 20%. Οι αναλύσεις έγιναν συγκριτικά για στατική και δυναμική φόρτιση.

Από την επεξεργασία των στοιχείων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Ως προς την ταχύτητα, και για σταθερή θερμοκρασία, παρατηρείται ότι, κατά τη δυναμική φόρτιση η μεταβολή της τιμής της επηρεάζει το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης και κατ' επέκταση, τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων. Για την ίδια θερμοκρασία, η αύξηση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης κατά 0.5 έως 1cm.

Ως προς τη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από την ταχύτητα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης, τόσο για τη στατική, όσο και για τη δυναμική φόρτιση. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα ασφαλτικά υλικά, λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς τους, παρουσιάζουν ευαισθησία στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τόσο σε επίπεδο αντοχής, όσο και παραμορφωσιμότητας. Δείκτης της φέρουσας ικανότητας των ασφαλτικών στρώσεων είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E*, το οποίο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στις αναλύσεις

διαπιστώνεται ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ανά 5 ^{o}C (από τους 15 ^{o}C στους 25 ^{o}C) τα απαιτούμενα πάχη της ασφαλτικής στρώσης έχουν ένα εύρος τιμών από 9 έως 11.5cm.

Ως προς τη συχνότητα, η αύξηση της συχνότητας για σταθερή θερμοκρασία, συνεπάγεται αύξηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E*, άρα και της φέρουσας ικανότητας των διατομών. Ενδιαφέρον παρουσίασε η συσχέτιση της συχνότητας με την ταχύτητα κίνησης των οχημάτων στη δυναμική φόρτιση, όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο 5. Ο χρόνος φόρτισης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης και επειδή η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου φόρτισης του οδοστρώματος, η συχνότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης.

Στη δυναμική φόρτιση παρατηρήθηκε ότι, στους 20 ^{o}C, η αύξηση της συχνότητας λόγω της αύξησης της ταχύτητας από 40 σε 90 km/h, δεν επηρέασε το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης, το οποίο παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10cm, εκτός από την ταχύτητα 60 km/h, που είναι ίσο με 10.5 cm. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στους 25 ^{o}C, όπου, για εύρος ταχύτητας από 40 έως 60 km/h, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10.5cm, ενώ για εύρος ταχύτητας από 70 έως 90 km/h, το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10cm. Δε συμβαίνει το ίδιο στους 15 ^{o}C, όπου η αύξηση της συχνότητας έχει ως αποτέλεσμα συνολική μεταβολή απαιτούμενου πάχους ίση με 1cm.

Μέσω της συχνότητας, η έννοια της ταχύτητας εισήχθη και στη στατική φόρτιση για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης. Όμως, επειδή η στατική φόρτιση εξαρτάται έμμεσα από την ταχύτητα, η μεταβολή στα απαιτούμενα πάχη της ασφαλτικής στρώσης λόγω της μεταβολής της συχνότητας, δεν είχε σημαντικές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, για τους 15 ^{o}C και εύρος ταχύτητας από 40 έως 60 km/h, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10.5cm, ενώ για εύρος ταχύτητας από 70 έως 90 km/h, παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10 cm. Για τους 20 ^{o}C, και εύρος ταχύτητας από 40 έως 50 km/h, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παρέμεινε σταθερό και ίσο με 11cm, ενώ για εύρος ταχύτητας από 60 έως 90 km/h, παρέμεινε σταθερό και ίσο με 10.5cm. Τέλος, για τους 25 ^{o}C, και εύρος ταχύτητας από 40 έως 50 km/h, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης παρέμεινε σταθερό και ίσο με 11.5cm, ενώ για εύρος ταχύτητας από 60 έως 90 km/h, παρέμεινε σταθερό και ίσο με 11cm. Παρατηρούμε ότι, για κάθε θερμοκρασία ανάλυσης, το

απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης στη στατική φόρτιση, μεταβάλλει την τιμή του, κατά τη μετάβαση από την ταχύτητα 40 σε 50 km/h ή από 50 σε 60 km/h. Με την παραδοχή ότι οι ταχύτητες 60, 70, 80 και 90 km/h θεωρούνται υψηλές και οι ταχύτητες 40 και 50 km/h θεωρούνται χαμηλές, συμπεραίνουμε ότι, το πάχος λόγω της στατικής φόρτισης, διαφοροποιείται μεταβαίνοντας από την περιοχή υψηλών ταχυτήτων στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων, για κάθε θερμοκρασία ανάλυσης.

Τονίζεται ότι, για τη συγκεκριμένη διατομή αναφοράς, προέκυψε ότι η στατική φόρτιση είναι αυτή που δίνει μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη ασφαλτικής στρώσης. Το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης λόγω της στατικής φόρτισης είναι αυξημένο κατά 0.5cm έως 1cm, σε σχέση με το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης λόγω της δυναμικής φόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις πάντως, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης για σταθερή θερμοκρασία και αύξηση της ταχύτητας, παραμένει σταθερό ή μειώνεται. Αντίστοιχα, για σταθερή ταχύτητα και αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται.

Οι μικρές διαφορές των παχών της ασφαλτικής στρώσης μεταξύ στατικής και δυναμικής φόρτισης, αποτέλεσαν αντικείμενο προβληματισμού. Ειδικότερα, για την περίπτωση των 60 km/h και 20 ^{o}C, προέκυψε ότι η στατική και η δυναμική φόρτιση δίνουν το ίδιο απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης. Το στοιχείο αυτό, οδήγησε στην ανάγκη επιπλέον συγκριτικών αναλύσεων.

Θεωρώντας σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης 10cm, υπολογίστηκαν οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, τόσο στη στατική, όσο και στη δυναμική φόρτιση. Διαπιστώθηκε ότι η απόκριση της δυναμικής φόρτισης ήταν μεγαλύτερη από την απόκριση της στατικής φόρτισης στους 15 ^{o}C και 20 ^{o}C, ενώ συνέβη το αντίθετο στους 25 ^{o}C. Ωστόσο, οι διαφορές ήταν μικρές, της τάξης του -2 έως +7 μstrain. Με τη βοήθεια αυτής της παρατήρησης καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα:

Τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη από την ανάλυση της δυναμικής φόρτισης προέκυψαν μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της στατικής φόρτισης σε χαμηλές θερμοκρασίες ανάλυσης. Επιπλέον, το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης για όλες τις συνθήκες που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέκυψε μεγαλύτερο στη στατική φόρτιση. Τα παραπάνω εξαγόμενα έχουν άμεση συσχέτιση, γιατί η αύξηση του απαιτούμενου

πάχους της ασφαλτικής στρώσης, με βασικούς άξονες την ασφάλεια και την οικονομία, επιφέρει μείωση της ρηγμάτωσης και της φθοράς της ασφαλτικής στρώσης, άρα και της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης. Η συγκριτική ανάλυση στατικής και δυναμικής φόρτισης ως προς το απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες (>25 ^{o}C) αποτελεί αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Αναλύσεις ευαισθησίας σε διαφορετικές διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων, με σκοπό την εξαγωγή πληρέστερων συμπερασμάτων αναφορικά με τον τρόπο επίδρασης των μεταβλητών παραμέτρων σχεδιασμού στο απαιτούμενο πάχος ασφαλτικής στρώσης.
- Αναλύσεις ευαισθησίας σε διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων, διαφοροποιώντας το κριτήριο σχεδιασμού προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης, τόσο στη στατική, όσο και στη δυναμική φόρτιση.
- Αναλύσεις ευαισθησίας σε διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σε υψηλότερες θερμοκρασίες ανάλυσης (>25 ^{o}C), ώστε να διερευνηθεί η μεταβολή του απαιτούμενου πάχους της ασφαλτικής στρώσης και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη, συγκριτικά για στατική και δυναμική φόρτιση, σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες.

10 Βιβλιογραφία

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

ABAQUS. (2011). *ABAQUS 6.11 Analysis User's Manual.* Dassault Systémes, Providence, RI, U.S.A.

Al-Qadi , I., Wang , H., & Tutumluer , E. (2010). Dynamic analysis of thin asphalt pavements by using cross-anisotropic stress-dependent properties for granular layer. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2154(1),* 156-163.

Al-Qadi, I., Wang, H., Yoo, P., & Dessouky, S. (2008). Dynamic analysis and in situ validation of perpetual pavement response to vehicular loading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2087(1),* 29–39.

Al-Qadi, I., Xie, W., & Elseifi, M. (2008). Frequency determination from vehicular loading time pulse to predict appropriate complex modulus in MEPDG. *Transportation Research Record: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 77,* 739–772.

Al-Qadi, I., Yoo, P., Elseifi, M., & Janajreh, I. (2005). Effects of tire configurations on pavement damage. *Transportation Research Record: Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 74,* 921–962.

ANSYS. (2010). *ANSYS User's Guide, Release 13, ANSYS Inc. .* Southpointe, Canonsburg, PA, USA.

Arraigada, M., Partl, M., Martinez, F., & Angelone, S. (2009). Evaluation of accelerometers to determine pavement deflections under traffic loads. *Journal of Materials and Structures, 42,* 779–790.

Arraigada, M., Pugliessi, A., Partl, M., & Martinez, F. (2014). Effect of full-size and down-scaled accelerated traffic loading on pavement behavior. *Journal of Materials and Structures, 47(8),* 1409-1424.

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.

Bilgiri, K., & Way, G. (2014). Noise-damping characteristics of different pavement surface wearing courses. *Journal of Road Material and Pavement Design, 15(4),* 925-941.

Björketun, U. et al. (2008). The effects of long and heavy trucks on the transport system. Report on a government assignment, VTI rapport 605A.

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

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.

Burmister, D. (1958). Evaluation of pavement systems of the WASHO road test by layered systems method. *Transportation Research Board: Highway Research Board, Bulletin, 177,* 26-54.

Caltrans. (2015). *Highway Design Manual.* California Department of Transportation, Sacramento, CA, U.S.A.

Cebon, D. (1986). Road Damaging Effects of Dynamic Axle Loads. *Transportation Research Record: International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions,* 37-53.

Cebon, D. (1999). *Handbook of Vehicle-Road Interaction.* London : Taylor & Francis.

Chabot, A., Chupin, O., Deloffre, L., & Duhamel , D. (2010). Viscoroute 2.0: Tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement. *Journal of Road Materials and Pavement Design 11(2),* 227-250.

Chatti, K., & Yun, K. (1996). SAPSI-M: Computer program for analyzing asphalt concrete pavements under moving arbitrary loads. *Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, 1539(1),* 88–95.

Cho, Y., McCullough, B., & Weissmann , J. (1996). Considerations on finite element method application in pavement structural analysis. *Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, 1539,* 96-101.

COST 333. (1999). *Development of new bituminous pavement design method: Final Report of the Action. Directorate General Transport, Office for Official Publications of the European Communities.* Brussels.

De Barros, F., & Luco, J. (1994). Response of a Layered Viscoelastic Half-space to a Moving Point Load. *Journal of Wave Motion*, 19(2), 189–210.

Degrande, G., & Lombaert, G. (2001). An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations based on the dynamic reciprocity theorem. *The Journal of the Acoustical Society of America, 110(3),* 1379–1390.

Dellatte, N. (2008). *Concrete Pavement Design, Construction and Performance.* London: Taylor & Francis.

Dongre, R., D'Angelo, J., & Myers, L. (2006). Conversion of testing frequency to loading time: Impact on performance predictions obtained from mechanistic-empirical pavement design guide. *Transportation Research Board 85th Annual Meeting.* Washington DC, United States.

Dormon, G., & Metcalf, C. (1965). Design curves for flexible pavements based on layered system theory. *Transportation Research Board: Highway Research Record, 71,* 69-84.

Drakos, C., Roque, R., & Birgisson, B. (2001). Effects of Measured Tire Contact Stresses on Near Surface Rutting. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1764(1),* 59-69.

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

Elshaer, M. (2009). *Technical Report Stresses and Strains In Flexible Pavements Using Computer Program. PhD Thesis.* Cairo University, Egypt.

European Commission. (2008). *Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC.* Directorate-General Energy and Transport, European Commission, Brussels.

FDOT. (2009). *Rigid Pavement Design Manual.* Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, U.S.A. .

FDOT. (2015). *Flexible Pavement Design Manual.* Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, U.S.A.

Ghanizadeh, A., & Fakhri, M. (2014). Prediction of Frequency for Stimulation of Asphalt Mix Fatigue Tests Using MARS and ANN. *The Scientific World Journal, 2014(34),* 1-16.

Grundmann, H., Lieb , M., & Trommer , E. (1999). The response of a layered half-space to traffic loads moving along its surface. *Journal of Archive of Applied Mechanics, 69(1),* 55-67.

Hajj, E., Ulloa , A., Sebaaly, P., & Siddharthan, R. (2011). Equivalent Loading Frequencies to Simulate Asphalt Layer Pavement Responses Under Dynamic Traffic Loading. *Transportation Research Board, AFD80, Committee Meeting.* Washington D.C. Retrieved from << http://www.arc.unr.edu/%5C/Presentations/EYHajj_Eq_Loading_Freq_AFD80_Jan252011.pdf>>.

Hajj, E., Sebaaly, P., & Siddharthan, R. (2006). Response of Asphalt Pavement Mixture under a Slow Moving Truck. *In Asphalt Concrete: Simulation, Modeling, and Experimental Characterization, Journal of Geotechnical Special Publication of ASCE, 146,* 134–146.

Hibbitt, Karlsson, & Sorensen. (1998). *ABAQUS/Standard User's Manual (Version 5.8), Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc.* Pawtucket, RI.

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

Hunter, R. (2000). *Asphalts in Road Construction.* London.

Jooste, F. (2002). Flexible pavement response evaluation using the semi-analytical finite element method. *Journal of Road Materials and Pavement Design, 3(2),* 211-225.

Ju, S. (2009). Finite element investigation of traffic induced vibrations. *Journal of Sound and Vibration, 321(3),* 837-853.

Khavassefat, P. (2014). *Vehicle-Pavement Interaction, Doctoral Thesis.* KTH Royal Institute of Technology, Department of Transport Science, Stockholm, Sweden.

Khavassefat, P., Jelagin , D., & Birgisson, B. (2012). A computational framework for viscoelastic analysis of flexible pavements under moving loads. *Journal of Materials and Structures, 45(11),* 1655-1671.

Khavassefat, P., Jelagin, D., & Birgisson, B. (2015). Dynamic response of flexible pavements at vehicle-road interaction. *Journal of Road Materials and Pavement Design, 16*(2), 256-276.

Kim, J., Roque, R., & Byron, T. (2009). Viscoelastic analysis of flexible pavements and its effects on top-down cracking. *Journal of Materials in Civil Engineering, 21(7),* 324–332.

Kim, W., Le, V., Lee, H., & Phan, H. (2017). Calibration and validation of a rutting model based on shear stress to strength ratio for asphalt pavements. *Journal of Construction and Building Materials, 149*, 327-337.

Kropác, O., & Mucka, P. (2008). Deterioration model of longitudinal road unevenness based on its power spectral density indices. *Journal of Road Materials and Pavement Design, 9(3)*, 389–420.

Leblanc, P., & Woodrooffe, J. (1995). Spatial correlation of dynamic wheel loads. P*roceedings of 4th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, 4*, 281-290, University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, USA.

Lee, J., Kim , J., & Tassoulas, J. (2013). Dynamic analysis of a layered half-space subjected to moving line loads. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 47*, 16-31.

Lefeuve-Mesgouez , G., Peplow, A., & LeHouedec, D. (2002). Surface vibration due to a sequence of high speed moving harmonic rectangular loads. *Journal of Soil Dynamics and Earhquake Engineering, 22(6)*, 459-473.

Liao, J., & Sargand , S. (2010). Viscoelastic FE modeling and verification of a U.S. 30 perpetual pavement test section. J*ournal of Road Materials and Pavement Design, 11(4)*, 993-1008.

Liu, C. (2001). Pavement response to moving loads. *Journal of Road Materials and Pavement Design, 2(3)*, 263–282.

Livermore Software Technology, C. (1999). *LS-DYNA Keyword User's Manual, (Version 950).* Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.

Lombaert, G., Degrande, G., & Clouteau, D. (2000). Numerical modelling of free field traffic induced vibrations. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19(7)*, 473–488.

Lu, Z., Yao , H., Wu, W., & Cheng , P. (2012). Dynamic stress and deformation of a layered road structure under vehicle traffic loads: experimental measurements and numerical calculations. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 39*, 100-112.

Monismith, C. (2012). Flexible pavement analysis and design-A half century of achievement, Geotechnical Engineering State of the Art and Practice: Journal of Geotechnical Special Publication of ASCE, 226, 187-220.

Mulungye, R., Owende, P., & Mellon , K. (2007). Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades. *Journal of Materials and Design, 28(3),* 739-756.

Nazarian, S., & Boddapati, K. (1995). Pavement-falling weight deflectometer interaction using dynamic finite-element analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1482,* 33-43.

NCHRP. (2004). Guide for mechanistic-empirical designof new and rehabilitated structures. Final Report for Project 1-37A. *Transportation Research Board, National Research Council.* Washington, DC.

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

Papagiannakis, A., Amoah, N., & Taha, R. (1996). Formulation for viscoelastic response of pavements under moving dynamic loads. *Journal of Transportation Engineering of ASCE, 122(2),* 140-145.

Poudel, N. (2015). *Failure in Flexible Pavement, Pavement Engineering and Drainage System, Nepal Engineering College. Retrieved from << https://www.slideshare.net/nabaraj101/flexible-pavement-failure>>.*

Saevarsdottir, T., & Erlingsson, S. (2014). Modelling of responses and rutting profile of a flexible pavement structure in a heavy vehicle simulator test. *Journal of Road Material and Pavement Design,* 16(1), 1-18.

SCDOT. (2008). *Pavement Design Guidelines.* South Carolina Department of Transportation, Columbia, SC, U.S.A.

Shoukry, S., & William, G. (1999). Performance evaluation of backcalculation algorithms through three-dimensional finite-element modelling of pavement structures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1655(1),* 152-160.

SHRP. (August 1989). *Materials Reference Library, Asphalt Selection Process, Report SHRP-A/IR-89-002.*

Siddharthan, R., El-Mously, M., Krishnamenon, N., & Sebaaly, P. (2002). Validation of a pavement response model using full-scale field tests. *International Journal of Pavement Engineering, 3(2),* 85–93.

Siddharthan, R., Krishnamenon, N., & Sebaaly, P. (2000). Finite-layer approach to pavement response evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1709(1),* 43-49.

Siddharthan, R., Sebaaly, P., El-Desouky, M., Strand, D., & Huft, D. (2005). Heavy off-road vehicle tire-pavement interactions and response. *Journal of Transportation Engineering, 131*(3), 239–247.

Siddharthan, R., Yao, J., & Sebaaly, P. (1998). Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution. *Journal of Transportation Engineering of ASCE, 124(6)*, 557-566.

Sousa, J., Lysmer , J., Chen , S., & Monismith, C. (1988). Effects of dynamic loads on performance of asphalt concrete pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1207*, 145-168.

Tu, W. (2007). Response modelling of pavement subjected to dynamic surface loading based on stress-based multi-layered plate, Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering, Ohio State University, Columbus, OH, U.S.A.

TXDOT. (2011). *Pavement Design Guide.* Texas Department of Transportation, Austin, TX, U.S.A.

Ulloa, A., Hajj, E., Siddharthan, R., & Sebaaly, P. (2013). Equivalent loading frequencies for dynamic analysis of asphalt pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering, 25*(9), 1162-1170.

Underwood, B., & Kim, Y. (2009). Determination of the appropriate representative elastic modulus for asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering, 10(2)*, 77–86.

Wang , D., Roesler , J., & Guo , D. (2011). Innovative algorithm to solve axisymmetric displacement and stress fields in multilayered pavement systems. *Journal of Transportation Engineering of ASCE, 137(4)*, 287-295.

Wang, H., & Al-Qadi, I. (2009). Combined effect of moving wheel loading and three-dimensional contact stresses on perpetual pavement responses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2095*, 53–61.

Wang, H., & Li, M. (2016). Comparative study of asphalt pavement responses under FWD and moving vehicular loading. *Journal of Transportation Engineering, 142*(12), 04016069.

WSDOT. (2015). *Design Manual.* Washington State Department of Transportation, Olympia, WA, U.S.A.

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.

Yoder, & Witczak. (2011). *Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων*. Αθήνα: Εκδόσεις: Μ. Γκιούρδας.

Yoo, P., & Al-Qadi, I. (2007). Effect of Transient Dynamic Loading on Flexible Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1990(1)*, 129–140.

Yoo, P., & Al-Qadi, I. (2007). Effect of Surface Tangential Contact Stresses Effect on Flexible Pavement Response. *Transportation Research Record: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 76*, 663–692.

Zafir, Z., Siddharthan, R., & Sebaaly, P. (1994). Dynamic pavement strain histories from moving traffic load. *Journal of Transportation Engineering of ASCE, 120(5)*, 821-842.

Κοφίτσας, Ι. (2001). *Στοιχεία Οδοποιΐας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.

Λοΐζος , Α., & Πλατή, Χ. (2016). *Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα.* Αθήνα.

Νικολαιδης, Α. (2011). *Οδοποιία: Οδοστρώματα - Υλικά - Έλεγχος Ποιότητας, 3η Έκδοση*. Θεσσαλονίκη.

ΥΠΕΧΩΔΕ. (2002). *Οδηγός Επίβλεψης Μελετών και Κατασκευών.* Ελλάδα.

Sites

3D-Move Analysis, *http://www.arc.unr.edu/software.html*

https://www.pavementinteractive.org/