



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

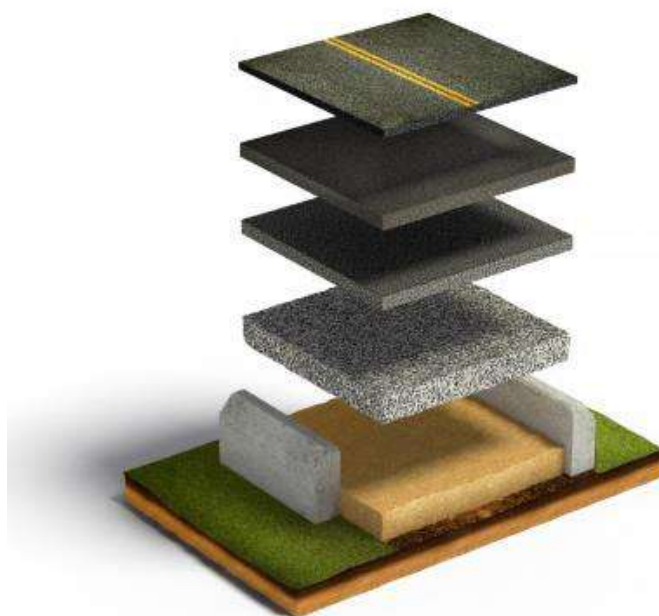
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΪΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΚΑΙΝΟΥΡΓΙΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Πλατή Χριστίνα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Μάρτιος 2020

Στον αγαπημένο μου πατέρα, Παναγιώτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν και συντέλεσαν με διαφορετικό τρόπο ο καθένας, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Πλατή Χριστίνα, Αναπληρώτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., αρχικά για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αλλά και για τη συνεχή υποστήριξη και τη συνολική καθοδήγηση και οργάνωση σε κάθε στάδιό της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Γεωργούλη Κωνσταντίνα, Διδάκτορα Μηχανικό του Ε.Μ.Π., για τις πολύτιμες συμβουλές και τη καθοριστική βοήθεια κατά την ανάλυση και συγγραφή της διπλωματικής μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου που βρίσκονται συνέχεια στο πλευρό μου και την πολύτιμη βοήθεια τους που μου τη δίνουν απλόχερα όποτε τη χρειαστώ.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ στη μητέρα μου Σοφία και την αδερφή μου Αναστασία για την αμέριστη αγάπη και συμπαράστασή τους, που μου δίνει δύναμη και κουράγιο για την επίτευξη των στόχων μου και στον πατέρα μου Παναγιώτη που ακόμα με καθοδηγούν οι συμβουλές του και μου δίνουν κίνητρο ώστε να εξελίσομαι συνεχώς.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων στη δυναμική ανάλυση που επηρεάζουν την απόκριση και κατά συνέπεια το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Επικεντρώνεται σε παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα των οχημάτων και η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης. Συγκεκριμένα, διερευνάται πως οι εν λόγω παράμετροι επηρεάζουν το οδόστρωμα ώστε να καταλήξουμε στο βέλτιστο σχεδιασμό του οδοστρώματος. Καταγράφονται γενικά στοιχεία και θεωρήσεις όσον αφορά τις αρχές σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και τη δυναμική ανάλυση. Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, επιλέγονται δύο κατηγορίες διατομών αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος και πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, μέσω του προγράμματος 3D Move Analysis. Οι διατομές αυτές αφορούν οδόστρωμα χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου αντίστοιχα. Για την κάθε κατηγορία λαμβάνονται τρεις διατομές με διαφοροποίηση ως προς τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης καθώς μεταβάλλεται το πάχος της βάσης/υπόβασης. Οι αναλύσεις ευαισθησίας πραγματοποιούνται με εναλλαγές της θερμοκρασίας σχεδιασμού και της ταχύτητας των οχημάτων. Με τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων, προβλέπεται να διερευνηθεί ο βαθμός με τον οποίο οι εκάστοτε συνθήκες επηρεάζουν τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη. Τα σχετικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα των αναλύσεων ευαισθησίας περιλαμβάνονται στα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά: Δυναμική φόρτιση, παράμετροι δυναμικής ανάλυσης, ασφάλεια, βελτιστοποίηση, σχεδιασμός, οικονομία.

ABSTRACT

The present diploma thesis aims at investigating the evaluation of the parameters in dynamic analysis for designing flexible pavements. It is focused on parameters such as temperature, vehicle speed and capacity of the soil of the subgrade. Specifically, it is investigated how these parameters affect the pavement and the way to get to the best design pavement. First, general information and considerations are written based on the principles of design pavement and dynamic analysis. For the need of experimental process, two basic types of flexible pavements are chosen for the sensitivity analysis through the program of 3D Move Analysis. These types include low traffic road and highway. For each road three different types are taken concerning as the capacity of the soil increases and the thickness of subgrade decreases. The sensitivity analyses are made with temperature and vehicle speed alternatives. With these analyses, it is planned to investigate the extent to which each of the conditions affects the pavement. The relevant results and conclusion are included within this thesis.

Keywords: dynamic analysis, parameters of dynamic analysis, safety, design pavement, pavement optimization

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	1
1.2	ΣΤΟΧΟΣ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	2
1.3	ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
2.	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	4
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	4
2.2	ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	5
2.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	6
3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	9
3.1	ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ	9
3.2	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	11
3.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	14
3.3.1	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ	14
3.3.2	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	15
3.3.3	ΤΑΧΥΤΗΤΑ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	16
3.4	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	18
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	23
4.1	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	23
4.2	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	25
4.3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	33
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	36
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	36
5.2	ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΟΥ	39
5.2.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	39
5.2.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	48
5.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	51
5.3	ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΥΨΗΛΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΟΥ	53
5.3.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	53
5.3.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	62
5.3.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	65
5.4	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	68

5.4.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	68
5.4.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ.....	70
5.4.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ	72
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
7	Βιβλιογραφία.....	83

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (Πηγή: (ΕΑΡΑ, 2014))	5
Εικόνα 3.1: Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ελαστικό χώρο λόγω αξονοσυμμετρικής στατικής φόρτισης (Πηγή: (HuangY. , 2004))	9
Εικόνα 3.2: Θεωρία δύο στρώσεων κατά Burmister (Πηγή: (Mugdha, 2001))	10
Εικόνα 3.3: Σύστημα τριών στρώσεων (Πηγή: (Yanking, Ni, Lei, &Weiqiao, 2014))	10
Εικόνα 3.4: Επίδραση δυναμικής φόρτισης στην επιφανειακή στρώση (Πηγή: (Zubeck&Dore, 2008))	12
Εικόνα 3.5: Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (Πηγή: (Acikgoz&Rauf, 2010))	13
Εικόνα 3.6: Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού (Πηγή:(Acikgoz & Rauf, 2010))	13
Εικόνα 3.7: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα (Πηγή: (Λοίζος & Πλατή, 2016))	15
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα υποχώρησης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης (Πηγή: (Khavasefat, Jelagin, &Birgisson, 2014))	17
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της συχνότητας (Πηγή: (Ghanizadeh&Fakhri, 2017))	17
Εικόνα 3.10: Μηχανισμός αλληλεπίδρασης οχήματος-οδοστρώματος (Πηγή: (KhavassefatP. , 2014))	19
Εικόνα 4.1: Αρχικό παράθυρο εργασίας 3DMoveAnalysis (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))	27
Εικόνα 4.2: Κεντρικό παράθυρο του 3DMoveAnalysis (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))	28
Εικόνα 4.3: Διαμόρφωση άξονα σχήματος και πίεσης επαφής (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))	28
Εικόνα 4.4: Ιδιότητες στρώσης για ιξωδοελαστικά υλικά (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))	29
Εικόνα 4.5: Κεντρικές καμπύλες και καμπύλη E^* (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))	30
Εικόνα 4.6: Σημεία απόκρισης (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))	32
Εικόνα 4.7: Γραφική απεικόνιση σημείων απόκρισης (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))	32
Εικόνα4.8: Μέτρο δυσκαμψίας ασφατομίγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας και της φόρτισης...	35
Εικόνα 5.1: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο κέντρο του φορτίου του τροχού για διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου	36
Εικόνα 5.2: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στην άκρη του τροχού για διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου	36

Εικόνα 5.3: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης ενδιάμεσα των δύο τροχών σε διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου.....	37
Εικόνα 5.4: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο κέντρο του φορτίου του τροχού για διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου	37
Εικόνα 5.5: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στην άκρη του τροχού για διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.....	38
Εικόνα 5.6: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης ενδιάμεσα των δύο τροχών σε διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.....	38
Εικόνα 5.7: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X1 ($V=60\text{km/h}$)	39
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X1 ($V=100\text{km/h}$)	40
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X2 ($V=60\text{km/h}$)	41
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X2 ($V=100\text{km/h}$)...	41
Εικόνα 5.11: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X3 ($V=60\text{km/h}$).....	42
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X3 ($V=100\text{km/h}$)...	42
Εικόνα 5.13: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X1 ($V=60\text{km/h}$)	44
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X1 ($V=100\text{km/h}$)	44
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X2 ($V=60\text{km/h}$)	45
Εικόνα 5.16: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X2 ($V=100\text{km/h}$)	45
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X3 ($V=60\text{km/h}$)	47
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X3 ($V=100\text{km/h}$)	47
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X1.....	48
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X2.....	48
Εικόνα 5.21: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X3.....	49

Εικόνα 5.22: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X1.....	49
Εικόνα 5.23: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X2.....	50
Εικόνα 5.24: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X3.....	50
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 (V=60km/h)	51
Εικόνα 5.26: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων X1, X2, X3 (V=100km/h).....	51
Εικόνα 5.27: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 (V=60km/h)	52
Εικόνα 5.28: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 (V=100km/h)	52
Εικόνα 5.29: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y1 (V=60km/h).....	54
Εικόνα 5.30: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y1 (V=100km/h)...	54
Εικόνα 5.31: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y2 (V=60km/h).....	55
Εικόνα 5.32: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y2 (V=100km/h)...	55
Εικόνα 5.33: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y3 (V=60km/h).....	57
Εικόνα 5.34: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Y3 (V=100km/h)...	57
Εικόνα 5.35: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y1 (V=60km/h)....	58
Εικόνα 5.36: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y1 (V=100km/h)	58
Εικόνα 5.37: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y2 (V=60km/h)....	60
Εικόνα 5.38: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y2 (V=100km/h)	60
Εικόνα 5.39: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y3 (V=60km/h)....	61
Εικόνα 5.40: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Y3 (V=100km/h)	61
Εικόνα 5.41: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y1.....	62

Εικόνα 5.42: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y2	63
Εικόνα 5.43: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y3	63
Εικόνα 5.44: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y1	64
Εικόνα 5.45: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y2	64
Εικόνα 5.46: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y3	65
Εικόνα 5.47: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών Y1, Y2, Y3 (V=60km/h)	65
Εικόνα 5.48: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών Y1, Y2, Y3 (V=100km/h)	66
Εικόνα 5.49: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών Y1, Y2, Y3 (V=60km/h)	67
Εικόνα 5.50: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών Y1, Y2, Y3 (V=100km/h)	67
Εικόνα 5.51: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης (V=60km/h)	68
Εικόνα 5.52: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης (V=100km/h)	68
Εικόνα 5.53: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων (V=60km/h)	69
Εικόνα 5.54: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων (V=100km/h)	70
Εικόνα 5.55: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της παραμένουσας παραμόρφωσης με αύξηση της ταχύτητας	71
Εικόνα 5.56: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση της ταχύτητας	72
Εικόνα 5.57: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=60km/h)	73
Εικόνα 5.58: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=100km/h)	73
Εικόνα 5.59: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=60km/h)	74
Εικόνα 5.60: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=100km/h)	74
Εικόνα 5.61: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=60km/h)	75
Εικόνα 5.62: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=100km/h)	76

Εικόνα 5.63: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR ($V=60\text{km/h}$).....	77
Εικόνα 5.64: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR($V=100\text{km/h}$).....	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά διατομής οδοστρώματος χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου	24
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά διατομής οδοστρώματος υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου	24
Πίνακας 4.3: Δεδομένα κυκλοφορίας για το οδόστρωμα χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου	34
Πίνακας 4.5: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας συναρτήσει συχνότητας και θερμοκρασίας.....	35
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X1.....	39
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X2.....	40
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X3.....	42
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X1.....	43
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X2.....	45
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X3.....	46
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y1.....	53
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y2.....	55
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y3.....	56
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y1.....	58
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y2.....	59
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y3.....	61

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Το εύκαμπτο οδόστρωμα είναι ένα σύστημα πολλαπλών στρώσεων το οποίο αποτελείται από τις ασφατικές στρώσεις και τις στρώσεις ασύνδετων υλικών που εδράζονται στη στρώση έδρασης. Η διαστασιολόγηση (σχεδιασμός) ενός εύκαμπτου οδοστρώματος συνίσταται στον καθορισμό των υλικών και των παχών των επιμέρους στρώσεων για δεδομένο κυκλοφοριακό φόρτο και περιβαλλοντικές συνθήκες. Στόχος είναι ο σχεδιασμός μιας δομής που να μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια την αναμενόμενη, για την περίοδο σχεδιασμού, κυκλοφορία. Ο κλάδος του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων είναι πολυπαραμετρικός και δυναμικός με την έννοια ότι συνεχώς εξελίσσεται. Κατά συνέπεια έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι διαστασιολόγησης, οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς τη μεθοδολογία υπολογισμού της απόκρισης του οδοστρώματος, δηλαδή τον αναλυτικό υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων.

Σύμφωνα με την κλασσική θεωρία των επάλληλων ελαστικών στρώσεων, ο αναλυτικός υπολογισμός της απόκρισης του οδοστρώματος βασίζεται σε κάποιες παραδοχές όπως ότι η φόρτιση είναι στατική και ότι τα υλικά των επιμέρους στρώσεων είναι ομοιογενή, ιστροπικά και γραμμικά ελαστικά(Huang Y. , 2004).

Ωστόσο, στην πραγματικότητα η φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός οχήματος δεν είναι στατική λόγω της ταχύτητας κίνησης του οχήματος. Επιπλέον, το ασφαλτόμιγμα, από το οποίο αποτελούνται οι ασφατικές στρώσεις, παρουσιάζει ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Επομένως, οι μηχανικές του ιδιότητες, και κατά επέκταση η μηχανική συμπεριφορά του, είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη θερμοκρασία και τη συχνότητα (ή το χρόνο) φόρτισης. Ο αναλυτικός υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι πιο ακριβής, αν και πιο πολύπλοκος, λαμβάνοντας υπόψη την ιξωδοελαστική φύση του ασφαλτομίγματος.

Με στόχο την όσο το δυνατό καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης και της απόκρισης του οδοστρώματος, έχει αναπτυχθεί πλήθος μεθόδων διαστασιολόγησης όπου πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων(Yoo, Al-Qadi, Hao, & Dessouky, 2008). Κατά τη δυναμική ανάλυση, η οποία αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης της υπόψη διπλωματικής εργασίας, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ταχύτητας του οχήματος και της θερμοκρασίας σχεδιασμού στη μηχανική συμπεριφορά των ασφατικών στρώσεων και κατά επέκταση στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων της δυναμικής ανάλυσης που επηρεάζουν την απόκριση και κατά συνέπεια το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται πειραματική διαδικασία όπου επιλέγονται δύο βασικές κατηγορίες ευκάμπτου οδοστρώματος: χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Για κάθε κατηγορία θεωρούνται τρεις διατομές αναφοράς που διαφέρουν ως προς τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και το πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρούνται κατά προσέγγιση ισοδύναμες ως προς τη μηχανική φθορά. Στη συνέχεια εφαρμόζεται αναλυτικός υπολογισμός της απόκρισης των ασφαλικών στρώσεων μέσω δυναμικής ανάλυσης και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας θεωρώντας δύο διαφορετικές ταχύτητες κίνησης των οχημάτων και τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ποσοτικοποίηση της επίδρασης της μεταβολής της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων και της θερμοκρασίας σχεδιασμού, στο μέγεθος της αναπτυσσόμενης ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης και της παραμένουσας παραμόρφωσης της ασφαλικής στρώσης. Επίσης, διερευνάται η επίδραση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους στα προαναφερθέντα μεγέθη.

1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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

Το 2^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις γενικές αρχές που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των ευκάμπτων οδοστρωμάτων.

Το 3^ο κεφάλαιο περιγράφει την ανάλυση των οδοστρωμάτων με θεώρηση της δυναμικής φόρτισης.

Το 4^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την πειραματική διαδικασία για τις θεωρούμενες διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Το 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας των υπό διερεύνηση εντατικών μεγεθών ως προς τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους για τις θεωρούμενες διατομές.

Το 6^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις ευαισθησίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το 7^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

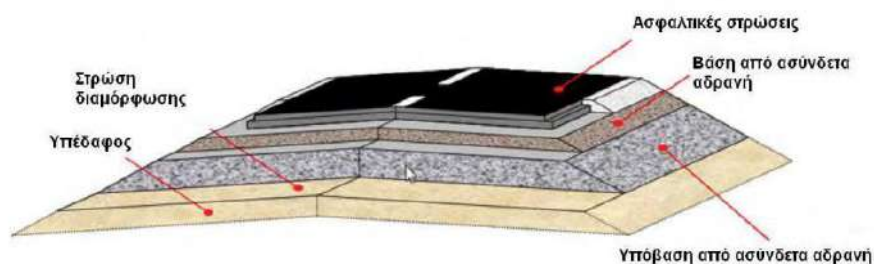
Το οδόστρωμα είναι μία σύνθετη κατασκευή που έχει να επιτελέσει διάφορες λειτουργίες οι οποίες είναι ανόμοιες μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό κάνει την κατασκευή αρκετά πολύπλοκη. Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον καθορισμό του πάχους της κάθε στρώσης που όλες μαζί συνθέτουν το οδόστρωμα. Ο αντικειμενικός σκοπός του οδοστρώματος είναι να παραλάβει τα φορτία της κυκλοφορίας και να τα καταναίμει στο υπέδαφος. Βασική επιδίωξη είναι οι μεταβιβαζόμενες στο έδαφος τάσεις να μειώνονται σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να μην επιφέρουν ουσιαστικές παραμορφώσεις ή μετατοπίσεις στην εδαφική στρώση του υπεδάφους. Συνεπώς, πρέπει να υπάρχει σωστός σχεδιασμός κατά τη φάση μελέτης σχεδιασμού, αρτιότητα κατά το στάδιο κατασκευής και επαρκής και περιοδική παρακολούθηση του οδοστρώματος για τον προσδιορισμό τόσο της λειτουργικής όσο και της δομικής κατάστασης του (Λοίζος & Πλατή, 2016).

Ο καθορισμός του πάχους της κάθε στρώσης εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος και τη συχνότητα του επιβαλλόμενου φορτίου, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης, τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους και τις κλιματολογικές συνθήκες. Επίσης και ένας αριθμός άλλων παραγόντων θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη έτσι ώστε να καθορίζεται η τελική βέλτιστη διατομή του οδοστρώματος. Οι παράγοντες αυτοί είναι: το κόστος, η κατασκευή, η συντήρηση και η διάρκεια ζωής. Λόγω του γεγονότος πως η αποκατάσταση των οδοστρωμάτων είναι μια δαπανηρή διαδικασία, πρέπει να υπάρχει μέριμνα ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια η έκταση και η σοβαρότητα των φθορών καθώς και ο ρυθμός υποβάθμισής τους (Molenaar, 2006). Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος, δεν είναι μία απλή υπολογιστική διαδικασία που υπακούει σε μία συγκεκριμένη μεθοδολογία αλλά μία τεχνοοικονομική διαδικασία αρκετά δύσκολη.

Για τη διαστασιολόγηση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων υπάρχουν διάφορες σύγχρονες αναλυτικές και ημιαναλυτικές μεθοδολογίες. Όλες βασίζονται στη θεωρία της ελαστικότητας, στην τεράστια εμπειρία που αποκτήθηκε από τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων στην πράξη αλλά και στο μεγάλο αριθμό ερευνητικών εργασιών που εκπονήθηκαν στα διάφορα εργαστήρια. Αναλυτικές μεθοδολογίες χαρακτηρίζονται αυτές που ο μελετητής υπολογίζει τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε διάφορα κρίσιμα σημεία της δομής του οδοστρώματος και κατόπιν τις συγκρίνει με τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπτά μεγέθη που καθορίζονται από τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Ημιαναλυτικές μεθοδολογίες χαρακτηρίζονται αυτές που τα πάχη των στρώσεων καθορίζονται από διαγράμματα ή νομογραφήματα.

2.2 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

Η δομή του ευκάμπτου οδοστρώματος αποτελείται από ένα σύνολο στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Ο συνηθέστερος τύπος οδοστρώματος που συναντάται στη χώρα μας είναι το εύκαμπτο οδόστρωμα, το οποίο περιλαμβάνει ασφαλτικές στρώσεις, τη στρώση βάσης, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης. Ορισμένες φορές, λόγω ύπαρξης πολύ ασθενούς εδάφους, κατασκευάζεται και εξυγιαντική στρώση μεταξύ υπόβασης και στρώσης έδρασης.



Εικόνα 2.1: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (Πηγή: (ΕΑΡΑ, 2014))

Οι ασφαλτικές στρώσεις διακρίνονται στην ανώτερη στρώση που ονομάζεται στρώση κυκλοφορίας, στη συνδετική στρώση και στην ασφαλική βάση. Η επιφανειακή στρώση είναι η ασφαλική στρώση που έρχεται σε επαφή με τους τροχούς των οχημάτων και πρέπει να παρέχει άριστη και ασφαλή επιφάνεια κύλισης. Η συνδετική στρώση είναι μία μεταβατική στρώση ανάμεσα στη βάση και την επιφανειακή στρώση. Η στρώση αυτή παρέχει μια ομαλή επιφάνεια, με τις επιθυμητές κλίσεις, επί της οποίας διαστρώνεται η στρώση της κυκλοφορίας. Η ασφαλική βάση κατασκευάζεται σε μία ή περισσότερες στρώσεις. Είναι η στρώση που ουσιαστικά παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις και προσδίδει στο οδόστρωμα δυσκαμψία και αντοχή σε κόπωση.

Η στρώση της βάσης, η οποία μπορεί να κατασκευαστεί από περισσότερες από μία στρώση, αποτελείται συνήθως από συμπυκνωμένο (θραυστό) ασύνδετο αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.

Το πάχος της υπόβασης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην αναπτύσσονται υψηλές θλιπτικές και διατμητικές τάσεις στο έδαφος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της υπόβασης

είναι συνήθως από συμπυκνωμένο ασύνθετο (θραυστό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης ή και φυσικό αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.

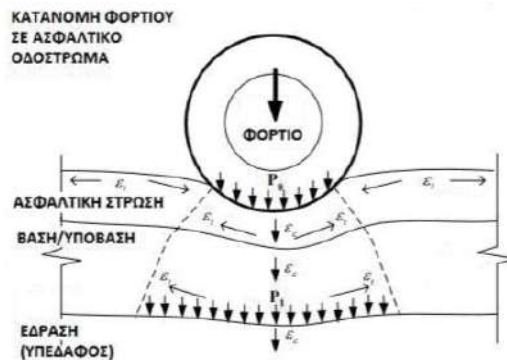
Η στρώση έδρασης είναι το διαμορφωμένο και συμπυκνωμένο έδαφος πάνω στο οποίο εδράζονται οι προηγούμενες στρώσεις. Η αντοχή και η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι καθοριστικής σημασίας στη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος, δεδομένου ότι από αυτήν εξαρτώνται άμεσα τα πάχη των υπερκείμενων στρώσεων.

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας, στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πολλοί είναι οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος και επηρεάζουν τη συμπεριφορά του. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι: ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι συνθήκες του περιβάλλοντος (όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και ο παγετός) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών (Bilgiri&Way, 2014).

Η κυκλοφορία, και πιο συγκεκριμένα η αθροιστική κυκλοφορία η οποία αναμένεται να εξυπηρετήσει το οδόστρωμα κατά την περίοδο σχεδιασμού του, αποτελεί σημαντική παράμετρο. Ο κυκλοφοριακός φόρτος αποτελεί το μέγεθος και τη συχνότητα του επιβαλλόμενου φορτίου, από τον αριθμό, το μέγεθος και το είδος των αξόνων των οχημάτων(Muller, 2000). Τα οχήματα που εξυπηρετεί ένα οδόστρωμα ποικίλουν και έχουν διαφορετικό αριθμό αξόνων και διαφορετικό φορτίο το καθένα από αυτά. Ανάλογα με το φορτίο του κάθε οχήματος και την κατανομή του σε άξονες, προκύπτει και η καταστροφική του ικανότητα έναντι του οδοστρώματος. Επειδή η καταστροφική ικανότητα των επιβατικών οχημάτων είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή των εμπορικών, τα φορτία που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων συνήθως αναφέρονται σε εμπορικά οχήματα(AASHTO, 1993). Το αξονικό φορτίο ενός οχήματος είναι αυτό που σχετίζεται άμεσα με το σχεδιασμό οδοστρωμάτων (Clyde&Machemehl, 1974). Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η κατανομή του φορτίου σε ασφαλικό οδόστρωμα.



Εικόνα 2.2:Κατανομή φορτίου σε ασφαλτικό οδόστρωμα (Πηγή: (Chen, Huang, &Chang, 2009))

Η καταστρεπτική επίδραση των αξονικών φορτίων με μικρότερο ή μεγαλύτερο φορτίο από αυτό των 80kN εκφράστηκε με ισοδύναμους συντελεστές. Αποτέλεσμα έχει να εκφράζεται ο κυκλοφοριακός φόρτος με μια μεταβλητή αυτή του Ισοδύναμου Τυπικού Άξονα. Επιτρέπει, δηλαδή, τη μετατροπή μίας μικτής κυκλοφορίας με διαφορετικά φορτία και διαμόρφωση του άξονα σε ένα κοινό αριθμό κυκλοφορίας σχεδιασμού. Για τον καθορισμό των Συντελεστών Ισοδυναμίας ορίζεται:

$$\sum I = \frac{N_t}{N_j} = \left(\frac{P_j}{P_t} \right)^\gamma = \alpha \quad (2.1)$$

Όπου:

N_j :ο αριθμός διελεύσεων με φορτίο P_j για να προκαλέσει συγκεκριμένη φθορά του οδοστρώματος

N_t : ο αριθμός διελεύσεων τυπικού άξονα με φορτίο $P_t=80\text{kN}$ για να επιφέρει ισοδύναμη φθορά του οδοστρώματος

γ : αριθμητική μεταβλητή όπου λαμβάνει τιμές 3.6-4.6 ανάλογα με τις διατάξεις των ελαστικών, διαφορετικά αξονικά φορτία και διαφορετικές αναρτήσεις τροχών. Σε πολλές χώρες χρησιμοποιείται η τιμή 4.

Ο υπολογισμός του συνολικού ΙΤΑ ανά ημέρα ή έτος, είναι το αλγεβρικό άθροισμα που προκύπτει από τη μετατροπή του κάθε άξονα σε τυπικό άξονα. Η μη αναμενόμενη αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, πλέον από αυτής που εκτιμάται στο στάδιο της μελέτης, έχει αντίκτυπο στη δομική επάρκεια του οδοστρώματος.

Η παρουσία υγρασίας (νερού)στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή και εδαφικά υλικά συντελεί στη σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας των υπόψη στρώσεων, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να παραληφθούν τα φορτία της κυκλοφορίας. Η παρουσία νερού στο οδόστρωμα

προέρχεται από δύο ευρείες κατηγορίες: από τα υπόγεια ύδατα και από τη διήθηση των επιφανειακών υδάτων. Τα υπόγεια ύδατα ορίζονται ως το νερό που υπάρχει στο φυσικό έδαφος στη ζώνη κορεσμού κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Η διήθηση ορίζεται ως το επιφανειακό νερό το οποίο εισέρχεται στο οδόστρωμα μέσω αρμών ή ρωγμών που παρατηρούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, μέσω των κενών του ίδιου του οδοστρώματος, ή από τάφρους κατά μήκος της πλευράς του οδοστρώματος.

Η θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων. Γενικά, υψηλές τιμές θερμοκρασίας έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους της ασφάλτου και αυξημένο το ενδεχόμενο εμφάνισης παραμενουσών παραμορφώσεων στην ασφαλική στρώση. Αντίθετα, στις χαμηλές θερμοκρασίες η ασφάλτος γίνεται ψαθυρή με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρηγματώσεων στην επιφάνεια της ασφαλικής στρώσης.

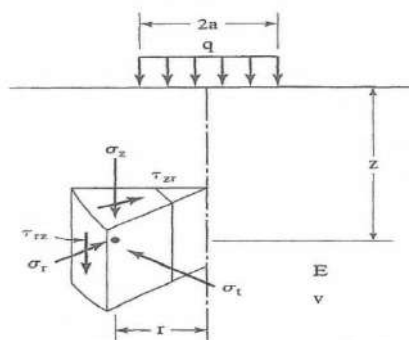
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων που αποτελούν τις βασικές παραμέτρους κατά τη διαστασιολόγηση είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Η δομή του εύκαμπτου οδοστρώματος είναι τέτοια ώστε τα υλικά ανώτερης ποιότητας να τοποθετούνται προς τις υπερκείμενες στρώσεις. Επομένως, οι ασφαλικές στρώσεις αποτελούνται από υλικά ανώτερης ποιότητας και έχουν τη μεγαλύτερη φέρουσα αντοχή, ενώ η στρώση έδρασης αποτελεί τη στρώση με τη μικρότερη φέρουσα αντοχή, πάνω στην οποία όμως θα εδρασθεί η δομή του οδοστρώματος. Επομένως, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι οι στρώσεις είναι δομικά επαρκείς για την παραλαβή των φορτίων και την απομείωση τους ώστε να ελαχιστοποιείται η καταπόνηση της εδαφικής στρώσης.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

3.1 ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

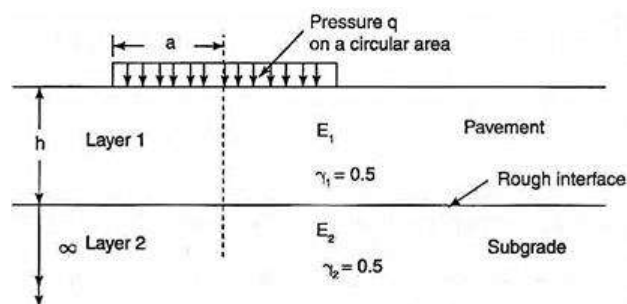
Ο προσδιορισμός της απόκρισης ευκάμπτων οδοστρωμάτων σε κυκλοφοριακά φορτία αποτελεί βασική συνιστώσα της διαδικασίας σχεδιασμού των οδοστρωμάτων αυτών καθώς και του τρόπου εκτίμησης των φθορών τους. Ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα είναι βασικότερη προϋπόθεση και επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες, αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα.

Αρχικά, όλες οι μέθοδοι υπολογισμού που έχουν αναπτυχθεί αναφέρονται σε στατική επιβολή των φορτίων με χρήση αναλυτικών μεθόδων. Η απλούστερη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς ευκάμπτων οδοστρωμάτων υπό την επίδραση φορτίου επιτυγχάνεται με ένα γραμμικά ελαστικό ομογενή και ισότροπο ημίσφαιρο που φορτίζεται στατικά με ένα συγκεντρωμένο ή κατανεμημένο φορτίο που δρα στην επιφάνειά του. Ο ελαστικός ημίσφαιρος έχει μία επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και ένα βάθος τα οποία εκτείνονται στο άπειρο. Το πρόβλημα της απόκρισης ενός ελαστικού ημίσφαιρου σε ένα κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο πάνω στην επιφάνειά του, επιλύθηκε πρώτα από τον Boussinesq ο οποίος εξήγαγε αναλυτικές εκφράσεις για υποχωρήσεις, τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις (ή και απλά παραμορφώσεις) για κάθε σημείο του ημίσφαιρου (Boussinesq, 1885) (Εικόνα 3.1).



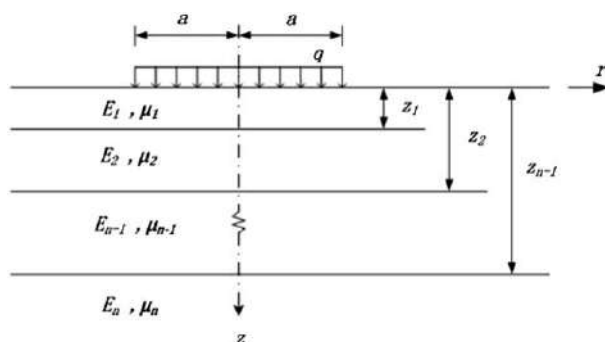
Εικόνα 3.1: Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ελαστικό χώρο λόγω αξονοσυμμετρικής στατικής φόρτισης (Πηγή: (HuangY., 2004))

Ο Burmister πρώτος ανέπτυξε αναλυτική λύση βασισμένη στη θεωρία ελαστικότητας για ένα σύστημα δύο στρώσεων και κατόπιν την ανέπτυξε για σύστημα τριών στρώσεων (Burmister, D., 1945). Παρόλο που η θεωρία αυτή δεν κάλυπτε την περίπτωση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη θεωριών για εύκαμπτα οδοστρώματα με δύο στρώσεις (Burmister, 1958) (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Θεωρία δύο στρώσεων κατά Burmister (Πηγή: (Mugdha, 2001))

Η λύση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια νομογραφημάτων για την πρώτη στρώση και χρήση πινάκων για τη δεύτερη. Για τη περίπτωση τριών στρώσεων συνίσταται η χρήση προσεγγιστικών αναλυτικών εκφράσεων που έχουν προταθεί από τον Odemark (Odemark, 1949) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει μετατροπή της πρώτης στρώσης σε ισοδύναμη στρώση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης (δηλαδή του υπεδάφους) και στη συνέχεια μετατροπή της δεύτερης στρώσης με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης. Έτσι και πάλι δημιουργείται μία ελαστική, ισότροπη και ομογενής στρώση της οποίας το ισοδύναμο πάχος είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους παχών που προέκυψαν από τις μετατροπές. Τα συστήματα τριών ή και περισσότερων στρώσεων προσομοιάζουν επακριβώς την πραγματική κατάσταση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων δεδομένου ότι σε ένα τυπικό οδόστρωμα υπάρχουν περισσότερες από δύο στρώσεις (Lu&Yao, 2013), (Lee, Kim, &Tassoulas, 2013), (Liao&Sargand, 2010).



Εικόνα 3.3: Σύστημα τριών στρώσεων (Πηγή: (Yanking, Ni, Lei, &Weiqiao, 2014))

Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πολλαπλασιάζει τις δυσκολίες υπολογισμού των τάσεων και παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αδύνατη η ύπαρξη νομογραφημάτων ή πινάκων που να καλύπτουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταβολής των χαρακτηριστικών των στρώσεων. Εάν στην παραπάνω δυσκολία προστεθεί και ο πραγματικός τρόπος φόρτισης των

οδοστρωμάτων γιατί η δυναμική φόρτιση αφορά κινούμενα φορτία που συνεχώς αλλάζουν τότε είναι απολύτως αδύνατο να υπολογισθούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις από πίνακες ή νομογραφήματα.

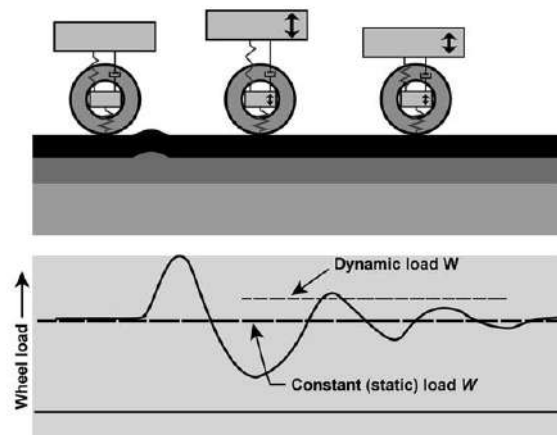
Στην πλειονότητα των τρεχουσών διαδικασιών σχεδιασμού και αξιολόγησης για εύκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιείται γραμμική ελαστική ανάλυση για την αξιολόγηση των τάσεων και παραμορφώσεων που προκαλούνται από τη διέλευση φορτίων. Ωστόσο, αυτοί οι τύποι αναλύσεων ενδέχεται να μην παρέχουν ακριβή ποιοτική και ποσοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων (Cheng, Newcombe, & Siddharthan, 2009). Οι περισσότεροι μέθοδοι ανάλυσης εύκαμπτου οδοστρώματος προβλέπουν τις αποκρίσεις του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας ομοιόμορφες καταπονήσεις ελαστικών, κυκλικές περιοχές επαφής και σταθερή φόρτιση οχημάτων. Η φόρτιση του οχήματος συνήθως προσομοιώνεται ως στατική. Όμως, αυτές οι παραδοχές είναι ασυμβίβαστες με τις ρεαλιστικές συνθήκες φόρτισης και μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένο υπολογισμό απόκρισης οδοστρωμάτων και πρόβλεψη συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Ωστόσο, η πρόβλεψη συμπεριφοράς του οδοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί με μία προσέγγιση ανάλυσης που προσομοιώνει την ακριβή αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος και ενσωματώνει κατάλληλους χαρακτηρισμούς των υλικών.

3.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Δυναμικά είναι όλα τα φορτία των οποίων το μέτρο, η διεύθυνση και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου (Khavassefat, Jelagin, & Birgisson, 2012). Σε αντίθεση με τη στατική ανάλυση, που ενέχει μόνο τις εσωτερικές ελαστικές δυνάμεις, η δυναμική ανάλυση είναι πολύ πιο σύνθετη, καθώς εκτός από τις ελαστικές δυνάμεις περιέχει δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις απόσβεσης ενέργειας. Υπό αυτήν την έννοια, η στατική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης.

Έχει διαπιστωθεί, ότι στα υλικά των οδοστρωμάτων, όπως γενικά σε όλα τα υλικά, η επανάληψη της φόρτισης επηρεάζει την αντοχή τους. Ακόμα και επαναλαμβανόμενη φόρτιση μέτριας έντασης, μπορεί να προκαλέσει αστοχία του υλικού λόγω κόπωσης αν ο αριθμός των επαναλήψεων είναι αρκετά μεγάλος. Έτσι προκύπτουν τα προβλήματα της συσχέτισης της πραγματικής κυκλοφορίας με το πλήθος “περασμάτων” του τροχού για τον υπολογισμό σε συγκεκριμένη θέση και η διερεύνηση της επιρροής του αριθμού επαναλήψεων της φόρτισης με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος (Sawant, 2008). Είναι προφανές ότι η προσομοίωση της φόρτισης οδοστρωμάτων με κινούμενα φορτία αποτελεί την περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση αν και απαιτεί αυξημένη δυσκολία προσομοίωσης και υπολογισμών. Όταν λαμβάνεται υπόψη η ανομοιομορφία της

επιφάνειας του οδοστρώματος, το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του οχήματος με μία ανώμαλη επιφάνεια είναι μία δυναμική φόρτιση όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Επίδραση δυναμικής φόρτισης στην επιφανειακή στρώση (Πηγή: (Zubeck&Dore, 2008))

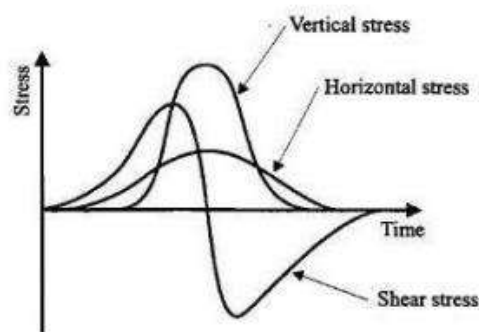
Η μελέτη της δυναμικής απόκρισης των οδοστρωμάτων έχει λάβει σημαντική προσοχή στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, γι' αυτό και έχει αποτελέσει στόχο για εκτεταμένη έρευνα τα τελευταία χρόνια (Monismith, 2012), (Cebon, 1986), (Beskou&Theodorakopoulos, 2011), (Huang Y. , 2004), (Yoo, Al-Qadi, Hao, & Dessouky, 2008). Οι Beskou και Theodorakopoulos έκαναν πρόσφατα μία εμπεριστατωμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας επί του προσδιορισμού της δυναμικής απόκρισης οδοστρωμάτων σε κινούμενα φορτία (Beskou&Theodorakopoulos, 2011).

Τα δυναμικά φορτία γενικά υποτίθεται ότι αυξάνουν τη φθορά του οδοστρώματος κατά περίπου 20-30% (Cebon, 1986). Συνεπώς, οι δυναμικές επιδράσεις στην αλληλεπίδραση οχήματος-οδοστρώματος έχουν σημαντική επίδραση στις καταπονήσεις που προκαλούνται στις ασφατικές στρώσεις και πρέπει συνεπώς να ληφθούν υπόψη για την επίτευξη ακριβών προβλέψεων της διάρκειας ζωής των κατασκευών οδοστρώματος. Ο Cebon δηλώνει ότι η δυναμική συνιστώσα ενός φορτίου τροχού μπορεί να αυξήσει την αστοχία σε κόπωση κατά τέσσερις φορές και να προκαλέσει παραμένουσα παραμόρφωση κατά τουλάχιστον 40% (Cebon, 1986). Οι Yoo and Al-Qadi 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 (Yoo, Al-Qadi, Hao, & Dessouky, 2008).

Η ανάγκη σωστής συμπεριφοράς του οδοστρώματος έχει οδηγήσει σε ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης φθορών, από τη δυναμική ανάλυση, στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Σε συνδυασμό με έναν αριθμό παραμέτρων όπως η σοβαρότητα των φθορών, η ηλικία του οδοστρώματος, οι κυκλοφοριακές συνθήκες, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το έδαφος, τα υλικά, τα

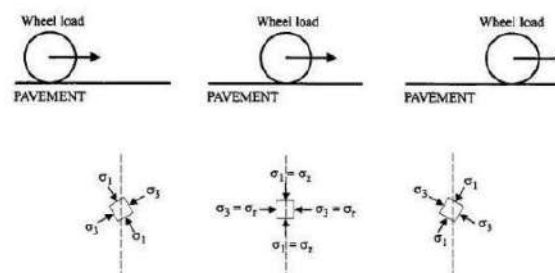
πάχη και η ποιότητα της κατασκευής έχουν οδηγήσει σε μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν την εξέλιξη της σοβαρότητας της φθοράς με το χρόνο σε σχέση με τους παράγοντες επιρροής. Τα μοντέλα πρόβλεψης φθορών αποτελούν σημαντικά στοιχεία καθώς προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. (Paterson, 1987) (Darter&Hudson, 1973) (Mishalani&Madanta, 2002).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5, οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο με τη διαφορά ότι η καμπύλη φόρτισης για τις οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερη και με μικρότερη ένταση από την καμπύλη των κατακόρυφων τάσεων. Επίσης η διατμητική τάση παρουσιάζει μια αντιστροφή προσήμου (θλίψη-εφελκυσμός) στο σημείο όπου ο τροχός διέρχεται πάνω από το σημείο.



Εικόνα 3.5: Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελύσεως φορτίου (Πηγή: (Acikgoz&Rauf, 2010))

Στην παρακάτω εικόνα 3.6 απεικονίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας και η περιστροφή των κύριων τάσεων. Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, λοιπόν, υφίσταται κυρίως δυναμική καταπόνηση από τα επαναλαμβανόμενα φορτία της κυκλοφορίας. Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται από μία ελάχιστη τιμή σε μία μέγιστη και στη συνέχεια πάλι σε μια ελάχιστη.



Εικόνα 3.6: Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού (Πηγή:(Acikgoz & Rauf, 2010))

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δυναμική φόρτιση του οδοστρώματος μέχρι τη μέγιστη τιμή, στην αποφόρτιση του και στην εμφάνιση οριζοντίων και διατμητικών τάσεων.

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.3.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Βασική αρχή όλων των αναλυτικών μεθόδων διαστασιολόγησης είναι η μηχανική φθορά να είναι μικρότερη της μονάδας και στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας, προκειμένου να μην επέλθει αστοχία κατά την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος. Η μηχανική φθορά σύμφωνα με το Miner προσδιορίζεται από τη σχέση 3.1.

$$d = \frac{n_{IS}}{N_{IS}} \leq 1 \quad (3.1)$$

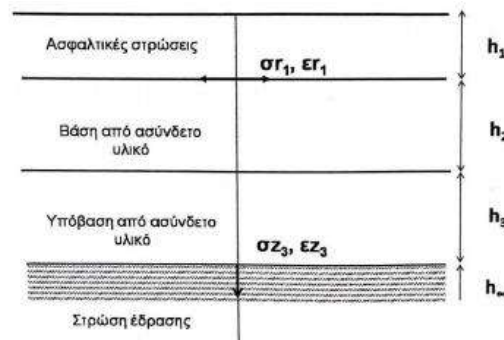
Όπου:

d: η μηχανική φθορά

n_{IS} : οι προβλεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα (ESALs: Equivalent Single Axle Loads)

N_{IS} : οι επιτρεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας: ο πυθμένας των ασφατικών στρώσεων και η κορυφή της στρώσης έδρασης (Εικόνα 3.7). Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη είναι οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις και οι κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις, αντίστοιχα. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση του οδοστρώματος οδηγεί σε κόπωση του ασφαλτομίγματος με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών στον πυθμένα της ασφατικής βάσης, οι οποίες σταδιακά διαδίδονται στις ασφατικές στρώσεις και εμφανίζονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος υπό την μορφή κατά μήκος ρηγματώσεων. Η αστοχία της στρώσης έδρασης εμφανίζεται με τη μορφή παραμενουσών παραμορφώσεων (τροχοαυλάκωση).



Εικόνα 3.7: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα (Πηγή: (Λοίζος & Πλατή, 2016))

Ωστόσο, η παραμένουσα παραμόρφωση μπορεί να οφείλεται σε αστοχία όχι μόνο της στρώσης έδρασης αλλά και των ασφαλτικών στρώσεων. Λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος, κατά την αποφόρτιση η παραμόρφωση δεν ανακτάται πλήρως. Επομένως, σε κάθε κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης αναπτύσσονται παραμένουσες παραμορφώσεις.

Οι μέθοδοι διαστασιολόγησης που βασίζονται στη θεωρία των επάλληλων ελαστικών στρώσεων, δε λαμβάνουν υπόψη την ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων στις ασφαλτικές στρώσεις σαν κριτήριο σχεδιασμού. Αντίθετα, οι μέθοδοι διαστασιολόγησης που βασίζονται στη δυναμική ανάλυση, την αναγνωρίζουν και την υιοθετούν σαν κριτήριο σχεδιασμού. Αυτό είναι εφικτό μέσω της εισαγωγής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (dynamic modulus E^*) σαν βασική παράμετρο για την περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας περιγράφει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

3.3.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Σε υψηλές θερμοκρασίες το ασφαλτομίγμα συμπεριφέρεται σαν ιξώδες υλικό, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες σαν ελαστικό υλικό. Η μηχανική συμπεριφορά ενός ασφαλτομίγματος εκφράζεται μέσω του μέτρου δυσκαμψίας το οποίο προκύπτει από το γενικό τύπο:

$$S_m = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{T,t} \quad (3.2)$$

Όπου:

S_m : μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος

σ : η επιβαλλόμενη τάση,

ε : η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση,

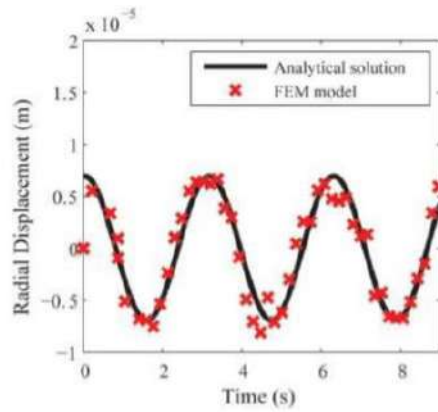
T : η θερμοκρασία ασφαλτομίγματος

t : ο χρόνος φόρτισης

Η δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. (Huang, Chan, Yan, & Richards, 2009).

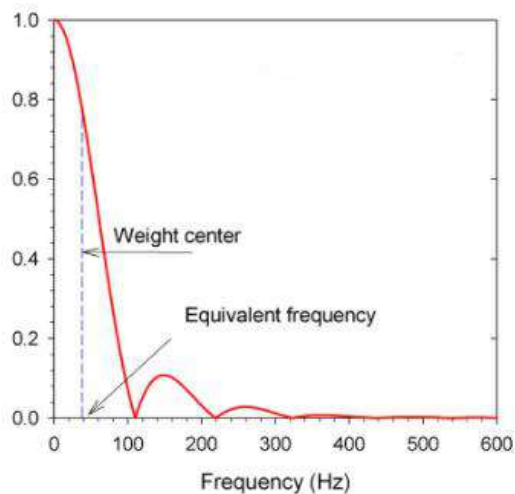
3.3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων συνδέεται με τη συχνότητα (και το χρόνο φόρτισης), η οποία επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος των ασφαλικών στρώσεων και κατά συνέπεια όλου του οδοστρώματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την καταπόνηση του οδοστρώματος είναι η ταχύτητα και η συχνότητα φόρτισης. Η επανάληψη της φόρτισης είναι και αυτή συνάρτηση της ταχύτητας των οχημάτων. Υψηλές ταχύτητες κίνησης των οχημάτων, αντιστοιχούν σε μικρό χρόνο φόρτισης και μεγάλη συχνότητα φόρτισης. Η υψηλή ταχύτητα κίνησης των οχημάτων συνεπάγεται μικρό βάθος κατανομής των τάσεων και ικανοποιητικό βαθμό προστασίας της θεμελίωσης. Αντιθέτως, η κίνηση σε χαμηλές ταχύτητες επιβαρύνει το έδαφος καθώς τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές. Η μείωση της συχνότητας οδηγεί σε σταδιακή μείωση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Η υποχώρηση που αναπτύσσεται από ένα κινούμενο φορτίο τροχού, σε οποιοδήποτε βάθος του οδοστρώματος, θεωρείται ότι έχει περίπου τη μορφή μίας ημιπεριόδου ημιτονοειδούς καμπύλης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα υποχώρησης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης (Πηγή: (Khavasefat, Jelagin, & Birgisson, 2014))

Αντίστοιχη είναι και η μορφή της καμπύλης της ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της διάρκειας φόρτισης όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της συχνότητας (Πηγή: (Ghanizadeh & Fakhri, 2017))

Η συχνότητα επανάληψης είναι πάντοτε μεγαλύτερη του χρόνου που απαιτείται για να αναπτυχθεί και να μηδενισθεί η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση.

3.4 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανάλυση της συμπεριφοράς των ασφαλικών μιγμάτων, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων (Saevardsdottir&Erlingsosn, 2014). Η γνώση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς και γενικότερα της μηχανικής συμπεριφοράς της ασφάλτου είναι ουσιαστικής σημασίας γιατί έτσι μπορούν να υπολογιστούν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις και γενικότερα να υπολογιστούν οι θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες τόσο της ασφάλτου όσο και των αντίστοιχων ασφαλτομιγμάτων (Evandro, Holanda, PereiradeAraujo, &Soares, 2006). Όπως έχει αποδειχθεί από αρκετές μελέτες η συνεκτίμηση της ιξωδοελαστικότητας οδηγεί σε ακριβέστερη περιγραφή της μηχανικής απόκρισης του οδοστρώματος σε σύγκριση με την προσέγγιση ελαστικής στρώσης (Kim, Phan, Le, &Lee, 2017).

Σε αντίθεση με πολλά υλικά των οποίων οι ιδιότητες είναι σταθερές, η συμπεριφορά της ασφάλτου υπό την επίδραση της διάρκειας της φόρτισης και της θερμοκρασίας μεταβάλλεται από ελαστική σε ιξώδη. Όταν η επιβολή της τάσης είναι για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή συμπεριφέρεται ως καθαρά ελαστικό υλικό. Αντίθετα, όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα και η θερμοκρασία είναι υψηλή, η συμπεριφορά της ασφάλτου είναι ιξώδης. Μεταξύ των δύο παραπάνω ακραίων καταστάσεων, η συμπεριφορά της ασφάλτου είναι ιξωδοελαστική και οι μηχανικές της ιδιότητες εξαρτώνται τόσο από τη θερμοκρασία όσο και από το χρόνο επιβολής και τάσης.

Υπό σταθερό στατικό φορτίο, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από τον ερπυσμό ή το συντελεστή χαλάρωσης που δίνεται από τα ακόλουθες εξισώσεις:

$$D(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3.3)$$

$$E(t)=\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (3.4)$$

Όπου $D(t)$ είναι ο ερπυσμός, $\varepsilon(t)$ είναι η παραμόρφωση, σ_0 η εφαρμοζόμενη σταθερή τάση, $E(t)$ το μέτρο δυσκαμψίας, $\sigma(t)$ είναι η τάση, ε_0 η σταθερή παραμόρφωση και t ο χρόνος. Δεδομένου ότι τα ιξωδοελαστικά υλικά παρουσιάζουν εξαρτώμενη από το χρόνο και την ταχύτητα συμπεριφορά, οι αποκρίσεις τους δεν εξαρτώνται μόνο από το εφαρμοζόμενο φορτίο ή παραμόρφωση σε μία συγκεκριμένη στιγμή, αλλά από ολόκληρη τη παραμόρφωση (Christensen, 1982). Η σχέση παραμόρφωσης-τάσης προκύπτει για τη μονοαξονική εντατική κατάσταση:

$$\varepsilon(t)=\int_0^t D(t-\tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (3.5)$$

$$\sigma(t)=\int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (3.6)$$

όπου t είναι ο χρόνος σε οποιαδήποτε στιγμή και τ είναι ο χρόνος τη στιγμή που ξεκινάει η φόρτιση.

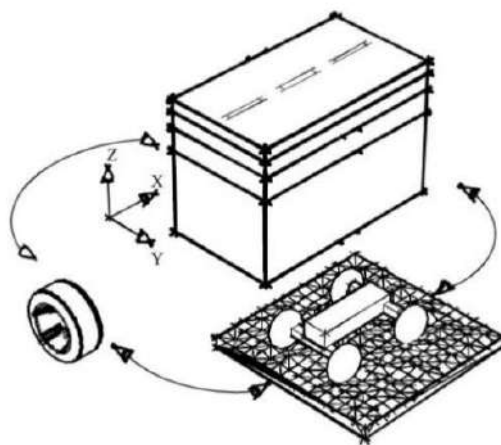
Ξεκινώντας από την εξίσωση (3.5) μπορεί να βρεθεί η παραμόρφωση εφόσον είναι γνωστά η τάση και ο ερπυσμός. Οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ιξωδοελαστική συμπεριφορά είναι η εξίσωση Prony (Lakes, 1999). Η συνάρτηση ερπυσμού και ο συντελεστής παραμόρφωσης είναι:

$$D(t)=D_0+\sum_{i=1}^N D_i(1-e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (3.7)$$

$$E(t)=E_\infty+\sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (3.8)$$

Όπου $D_0, D_i, E_\infty, E_i, \tau_i$ και τ_i είναι οι συντελεστές του Prony και N είναι ο αριθμός των όρων.

Η δυναμική αλληλεπίδραση οδοστρώματος-οχήματος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αίτια αστοχίας, καθώς το μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων είναι σημαντικά υψηλότερο.



Εικόνα 3.10: Μηχανισμός αλληλεπίδρασης οχήματος-οδοστρώματος (Πηγή: (KhavassefatP. , 2014))

Η δυναμική απόκριση του συστήματος υποθέτοντας ότι η δομή του οδοστρώματος αποτελείται από υλικό με γραμμική συμπεριφορά, για παράδειγμα γραμμικά ιεωδοελαστικά στρώματα, σε μηχανικά φορτία μπορούν αν υπολογιστούν από την παρακάτω εξίσωση, υπό την προϋπόθεση ότι είναι γνωστή η εξίσωση:

$$\bar{f}(k_x, y, z, \omega) = \bar{F}_x(k_x, y, z, \omega) * \bar{h}(k_x, y, z, \omega) \quad (3.9)$$

Όπου $\bar{h}(k_x, y, z, \omega)$ είναι η εξίσωση για την απόκριση του εύκαμπτου οδοστρώματος και $\bar{F}_x(k_x, y, z, \omega)$ είναι το δυναμικό κινούμενο φορτίο που προκαλείται από το όχημα στο οδόστρωμα με ρυθμό αυξημένης συχνότητας. Υποθέτοντας ότι το φορτίο κινείται κατά μήκος του άξονα x στην επιφάνεια, η περιγραφή φορτίου στον τρισδιάστατο χώρο με t ως διάνυσμα του χρόνου και v η ταχύτητα του κινούμενου οχήματος μπορεί να παρουσιαστεί ως:

$$F(x, y_o, z_o, t) = F_x(x-vt) * F_y(y_o) * F_t(t) \quad (3.10)$$

Εφαρμόζοντας διπλό μετασχηματισμό Fourier στην παραπάνω εξίσωση, η περιγραφή του φορτίου σε σύγκριση με τη συχνότητα κυμαίνεται ως (Lombaert D. C., 2004):

$$\bar{F}(k_x, y_o, z_o, \omega) = F_y(y_o) * F_z(z_o) * \tilde{F}(k_x) * [\int_{-\infty}^{+\infty} F_t(t) * e^{-it(\omega - k_s v)} dt] \quad (3.11)$$

Ο όρος $\int_{-\infty}^{+\infty} F_t(t) * e^{-it(\omega - k_s v)} dt$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier που μετατοπίζεται με συχνότητα του εξαρτώμενου από το χρόνο εύρους του κινούμενου φορτίου (Lombaert D. , 2001). Εφαρμόζοντας και κάνοντας αντικατάσταση στη συχνότητα, η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\bar{f}(k_x, y, z, \omega) = \tilde{F}_x(k_x) * \tilde{F}_t(\omega - k_x v) * F_y(y_o) * F_z(z_o) * \bar{h}(k_x, y, z, \omega) \quad (3.12)$$

Όπου $\tilde{F}_x(k_x) = \tilde{F}_x(\omega/v)$ είναι η περιγραφή φορτίου και $\tilde{F}_t(\omega - k_x v)$ είναι η συχνότητα φόρτισης. Το δυναμικό φορτίο παρουσιάζεται με τον ακόλουθο ορισμό όταν η τραχύτητα της επιφάνειας είναι $\xi(k_x)$ και η συνάρτηση απόκρισης του οχήματος $h_f(k_x)$ είναι:

$$\bar{F}(k_x, y_o, z_o, \omega) = h_f(k_x) * \xi(k_x) * F_y(y_o) * F_z(z_o) * \tilde{F}_t(\omega - k_x v) \quad (3.13)$$

Οι εξισώσεις που σχετίζονται με τη δυναμική απόκριση δείχνουν ότι το έργο των εξωτερικών δυνάμεων δεν εξισορροπείται από τις εσωτερικές δυνάμεις αλλά εξισορροπείται από τις αδρανείς δυνάμεις. Όταν οι μικρές παραμορφώσεις ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες, η έκφραση για ένα δεδομένο στοιχείο μπορεί να γραφεί ως:

$$\int_{V_e} \delta \tilde{u}^t b dV + \int_{S_e} \delta \tilde{u}^t q dS + \sum_{i=1}^n \delta \tilde{u}_i^t p_i = \int_{V_e} (\delta \varepsilon^t \sigma + \delta \tilde{u}^t \rho \ddot{u} + \delta \tilde{u}^t k \dot{u}) dV \quad (3.14)$$

Όπου $\delta \tilde{u}$ και $\delta \varepsilon$ είναι η διαφορά παραμορφώσεων, b η δύναμη, q οι εφαρμογές στην επιφάνεια, p_i το συγκεντρωμένο φορτίο, σ η τάση, ρ η πυκνότητα του υλικού και k είναι η παράμετρος απόσβεσης του υλικού.

$$\tilde{u} = N * u \quad (3.15)$$

Όπου N είναι ένας πίνακας συμπληρωμένος από τις κατακόρυφες μετατοπίσεις. Η παράμετρος ε μπορεί να εκφραστεί μέσω:

$$\varepsilon = B * u \quad (3.16)$$

όπου B είναι ο πίνακας με τις σχετικές μετατοπίσεις και παραμορφώσεις. Εφαρμόζοντας την παράγωγο του u με μόνη συνάρτηση το χρόνο:

$$\dot{\tilde{u}} = N * \dot{u} \quad (3.17)$$

$$\ddot{\tilde{u}} = N * \ddot{u} \quad (3.18)$$

Μέσω της εξίσωσης (3.15) και (3.18) η εξίσωση (3.14) γίνεται:

$$\delta u^t (\int_{V_e} B^t \sigma dV + \int_{V_e} \rho N^t N dV \ddot{u} + \int_{V_e} \kappa N^t N dV \dot{u} - \int_{V_e} N^t b dV - \int_{S_e} N^t q dS) - \sum_{i=1}^n p_i \delta u^t = 0 \quad (3.19)$$

Δεδομένου ότι η κατάσταση ισορροπίας μπορεί να ικανοποιηθεί με οποιαδήποτε μετατόπιση δu , μπορεί η παραπάνω εξίσωση προκειμένου να αποκτήσει τη δυναμική ισορροπία να γραφεί:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + gu = f(t) \quad (3.20)$$

Όπου M η μάζα, C είναι η απόσβεση και g η ακαμψία. Οι εξωτερικές δυνάμεις $f(t)$, g , M και C δίνονται από:

$$f = \int_{V_e} N^t b dV + \int_{S_e} N^t q dS + \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.21)$$

$$g = \int_{V_e} B^t \sigma dV \quad (3.22)$$

$$C = \int_{V_e} \kappa N^t N dV \quad (3.23)$$

$$M = \int_{V_e} \rho N^t N dV \quad (3.24)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν τόσο για τη γραμμική όσο και για τη γραμμική συμπεριφορά του υλικού, όπου είναι απαραίτητο η σ να είναι μία μη γραμμική συνάρτηση του ρυθμού καταπόνησης. Η απάντηση των δυναμικών προβλημάτων περιλαμβάνει τη λύση της εξίσωσης $M\ddot{u} + C\dot{u} + gu = f(t)$ για u , $\dot{u}$ και $\ddot{u}$. Η εξίσωση της κίνησης είναι ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων δεύτερης τάξης και μπορεί να επιλυθεί με οποιαδήποτε κοινή μέθοδο για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Στη μηχανική προτιμούμε αριθμητικές μεθόδους προσαρμοσμένες στα προβλήματά μας.

Ωστόσο, όταν το πρόβλημα είναι μη γραμμικό, επομένως όταν οι M , C , g είναι ανεξάρτητα από το χρόνο τότε υπάρχει γραμμικό πρόβλημα δυναμικής φόρτισης. Εάν η συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από το χρόνο, τότε υπάρχει μη γραμμικό πρόβλημα δυναμικής φόρτισης (Cook, 1989).

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η διερεύνηση των παραμέτρων της δυναμικής ανάλυσης επηρεάζουν την απόκριση και κατά συνέπεια το σχεδιασμό των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Η θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), η συχνότητα (Hz) (ή ο χρόνος) φόρτισης (sec) και η ταχύτητα του οχήματος (km/h) επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων και κατά επέκταση στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων. Για τη διερεύνηση της επίδρασης των υπόψη παραμέτρων στο σχεδιασμό του οδοστρώματος, στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Επιλέγονται δύο βασικές κατηγορίες διατομών χαμηλού (1940ESALs) και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου (3880ESALs) σε συνθήκες:

- μεταβλητής θερμοκρασίας 15°C , 20°C , 25°C
- μεταβλητής ταχύτητας 60km/h και 100km/h
- μεταβλητής φέρουσας ικανότητας εδάφους με δείκτες CBR 5%, CBR 15% και CBR25%

Στις διατομές πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας θεωρώντας δύο διαφορετικές ταχύτητες κίνησης και τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες σχεδιασμού. Για την κάθε κατηγορία θεωρούνται τρεις διατομές αναφοράς που διαφέρουν ως προς τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και το πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να θεωρούνται κατά προσέγγιση ισοδύναμες ως προς τη μηχανική φθορά. Σκοπός των αναλύσεων είναι να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο οι εν λόγω παράμετροι επιδρούν στη συμπεριφορά της κάθε διατομής στις διαφορετικές συνθήκες κυκλοφοριακής φόρτισης. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι διατομές προς ανάλυση:

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά διατομής οδοστρώματος χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου

ΔΙΑΤΟΜΗ Χ1			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.08m	CBR	1940ESALs
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.25m	25%	
ΔΙΑΤΟΜΗ Χ2			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.08m	CBR	1940ESALs
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.30m	15%	
ΔΙΑΤΟΜΗ Χ3			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.08m	CBR	1940ESALs
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.35m	5%	

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά διατομής οδοστρώματος υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου

ΔΙΑΤΟΜΗ Υ1			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.24m	CBR	3880ESALS
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.25m	25%	
ΔΙΑΤΟΜΗ Υ2			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.24m	CBR	3880ESALS
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.30m	15%	
ΔΙΑΤΟΜΗ Υ3			
ΣΤΡΩΣΗ	ΠΑΧΟΣ	CBR	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ
ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ	0.24m	CBR	3880ESALS
ΒΑΣΗ/ΥΠΟΒΑΣΗ	0.35m	5%	

4.2 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Τα λογισμικά ανάλυσης ευκάμπτων οδοστρωμάτων αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην οδοποιία. Με την εφαρμογή τους, ο υπολογιστικός χρόνος ελαχιστοποιήθηκε δίνοντας υψηλή ακρίβεια και ποιότητα αποτελέσματος για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Είναι αναπόσπαστα στοιχεία για τη λήψη αποφάσεων καθώς είναι χρήσιμα για τις απαντήσεις τι, που και πότε θα πραγματοποιηθεί μία εργασία κατασκευής εκ νέου ή συντήρησης. Το κάθε πρόγραμμα ανάλυσης στοιχείων προσπαθεί να προσομοιάσει οποιαδήποτε πραγματική πολύπλοκη φυσική κατάσταση με επαρκή ακρίβεια. Για περαιτέρω διερεύνηση έχουν καταγραφεί από τη διεθνή βιβλιογραφία πολλά λογισμικά που αποτυπώνουν την τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση των πολυστρωματικών διατομών (Mugdha, 2001). Πολλά πανεπιστήμια και πολλές εταιρείες έχουν δημιουργήσει πολλά λογισμικά για τη βελτίωση της κατασκευής των οδοστρωμάτων, κάποια εκ των οποίων είναι:

SAPSI-M:

Το SAPSI-Μείναι ένα λογισμικό ανάλυσης γραμμένο σε FORTRAN που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τη δυναμική απόκριση ενός ιξωδοελαστικού συστήματος στρώσεων που υπόκεινται σε επιφανειακά κυκλικά φορτία (Yun, 1996). Οι μεταβλητές εξόδου του προγράμματος είναι οι μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες των στρώσεων, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις. Δεν είναι πολύ φιλικό προς το χρήστη κάτι που το καθιστά μη δημοφιλές και λιγότερο εύχρηστο.

DYNA3D(LS-DYNA):

Το DYNA3D αναπτύχθηκε στο Lawrence Livermore National Laboratories το 1976. Η δημόσια έκδοση χρησιμοποιείται ακόμα μόνο εκεί χωρίς να διαθέτουν κάποια υποστήριξη χρηστών ή διανομής λογισμικού. Παρόλο που κατασκευάστηκε για χρήση σε αναλύσεις οδοστρωμάτων, όπου και χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν, πλέον χρησιμοποιείται περισσότερο για προσομοιώσεις συντριβής, αναλύσεις μεταλλικών σχηματισμών και άλλες αναλύσεις μεγάλης καταπόνησης και παραμόρφωσης (LS-DYNA, 2007).

ABAQUS:

Το ABAQUSείναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσομοίωσης γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων. Το λογισμικό χρησιμοποιεί διάφορα μέτρα ελαστικότητας για να προσομοιώσει τις φυσικές αλληλεπιδράσεις φορτίων και υλικών. Οι μεταβλητές εισόδου για το χρήστη περιλαμβάνουν τη γεωμετρία του μοντέλου, τις ιδιότητες των υλικών και τη

φόρτιση(ABAQUS, 2011). Είναι σχεδιασμένο ως εργαλείο μοντελοποίησης γενικής χρήσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέραν προβλημάτων τάσης/παραμόρφωσης. Υστερεί στο ότι δεν είναι φιλικό προς το χρήστη και χρειάζεται βαθιά κατανόηση μη γραμμικής ανάλυσης κάτι που το καθιστά λιγότερο εύχρηστο.

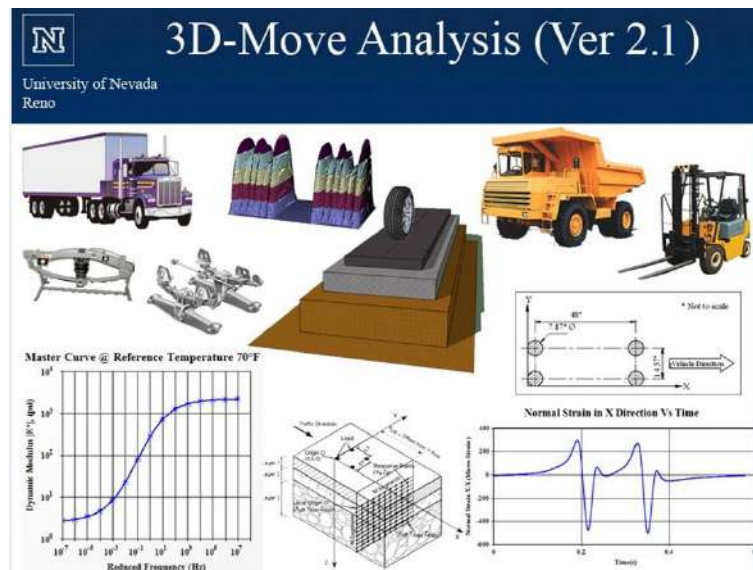
ANSYS:

Το ANSYS (Swanson Analysis Systems) αναπτύχθηκε από τον John Swanson το 1970. Είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος, πραγματοποιούνται αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστεί η δυναμική απόκριση ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Λαμβάνει υπόψη για την εκτέλεση των αναλύσεων: τον καθορισμό του τύπου, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των υλικών, τον καθορισμό του φορτίου και τις προδιαγραφές της ανάλυσης και την επίλυση, η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων του εύκαμπτου οδοστρώματος(ANSYS, 2010)

3D MoveAnalysis:

Το πανεπιστήμιο της Νεβάδα (UNR) ανέπτυξε το λογισμικό 3D Move Analysis για την ανάλυση ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Χρησιμοποιεί την προσέγγιση πεπερασμένων στρώσεων για να υπολογίσει τις αποκρίσεις του οδοστρώματος. Είναι πιο ρεαλιστικό γιατί λαμβάνει υπόψη σημαντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα του οχήματος και οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται στην παρούσα διπλωματική εργασία για τις αναλύσεις ευαισθησίας, του οποίου λεπτομέρειες παρατίθενται παρακάτω.

Το 3D Move Analysis αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια ερευνητικού προγράμματος το 2007 όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1. Στόχος ήταν η αξιοποίηση καινοτόμων μεθόδων για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και την πρόβλεψη στις αστοχίες του οδοστρώματος (Seyyedmahdi, 2015).

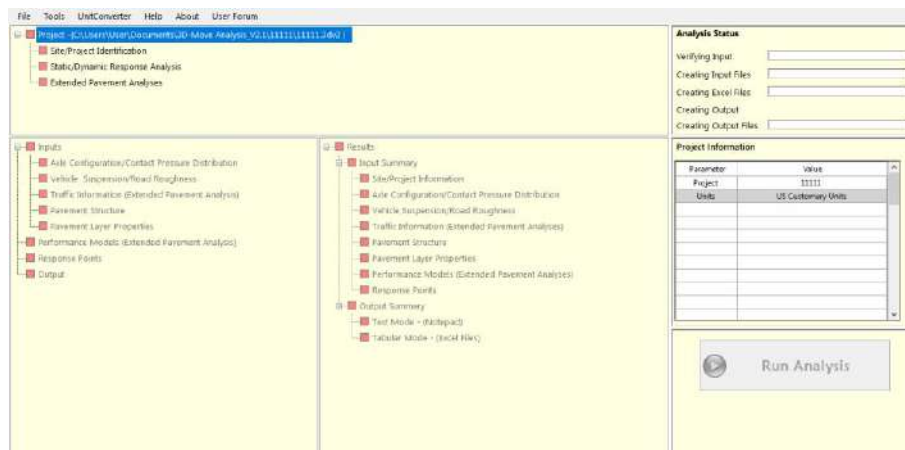


Εικόνα 4.1: Αρχικό παράθυρο εργασίας 3D Move Analysis (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))

Οι επιμέρους στρώσεις θεωρούνται ως συνεχές μέσο και αξιοποιείται η τεχνική μετασχηματισμού Fourier. Επομένως, μπορεί να χειριστεί πολύπλοκες επιφανειακές φορτίσεις όπως πολλαπλά φορτία και μη ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης των ελαστικών.

Δεδομένου ότι το αποτύπωμα των ελαστικών μπορεί να είναι οποιουδήποτε σχήματος, αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για την ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που παράγονται από ελαστικά ευρείας βάσης (Siddharthan, 2000). Η μέθοδος πεπερασμένων στρώσεων είναι υπολογιστικά πιο αποδοτική από τα μοντέλα κινούμενων φορτίων με βάση τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων κατά Al-Qadi και Wang (HaoWangI. L., 2009), (HaoWangE. T., 2010). Δεδομένου ότι οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να προσαρμοστούν στην κάθε ανάλυση, είναι ένα ιδανικό εργαλείο για να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά της ασφαλτικής στρώσης και επίσης να μελετηθεί η απόκριση του οδοστρώματος ως συνάρτηση της ταχύτητας του οχήματος.

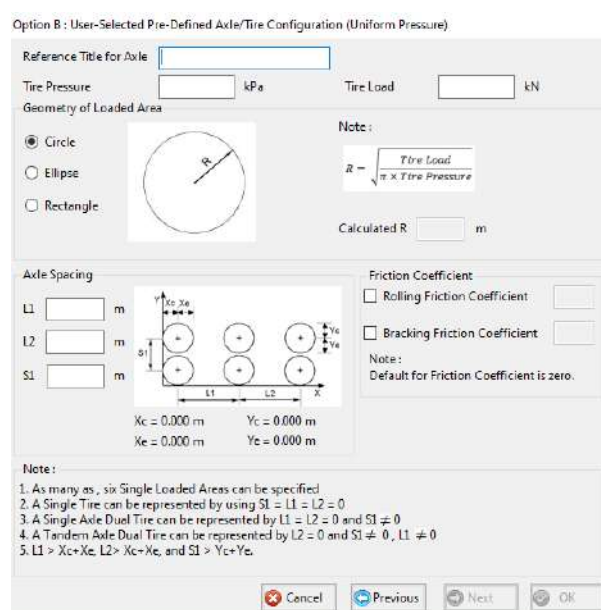
Η διαδικασία ανάλυσης παρουσιάζεται λεπτομερώς παρακάτω. Σε όλη τη διάρκεια που πραγματοποιείται η ανάλυση υπάρχει ένα κεντρικό παράθυρο εργασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Κεντρικό παράθυρο του 3D Move Analysis (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))

Αρχικά, επιλέγεται με ποιο από τα δύο συστήματα μονάδων θα γίνει η επεξεργασία δεδομένων στην ανάλυση. Το πρόγραμμα δηλαδή δίνει τη δυνατότητα τα δεδομένα να είναι είτε σε US Customary Units όπου οι μονάδες μέτρησης θα είναι σε in, lb , °F και mph είτε σε SI Units όπου οι μονάδες μέτρησης θα είναι σε m, kN, °C και σε km/h.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης στατικής και δυναμικής φόρτισης. Αν η ανάλυση είναι στατική επιλέγεται μηδενική ταχύτητα ενώ αν είναι δυναμική φόρτιση επιλέγεται η ταχύτητα του οχήματος. Πρώτο βήμα είναι η διαμόρφωση του άξονα του οχήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Διαμόρφωση άξονα οχήματος και πίεσης επαφής (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))

Επιλέγεται η ημερήσια κυκλοφορία ανάλογα με τον τύπο οδοστρώματος που αναλύεται και την περίοδο σχεδιασμού (συνήθως επιλέγεται είκοσι χρόνια).

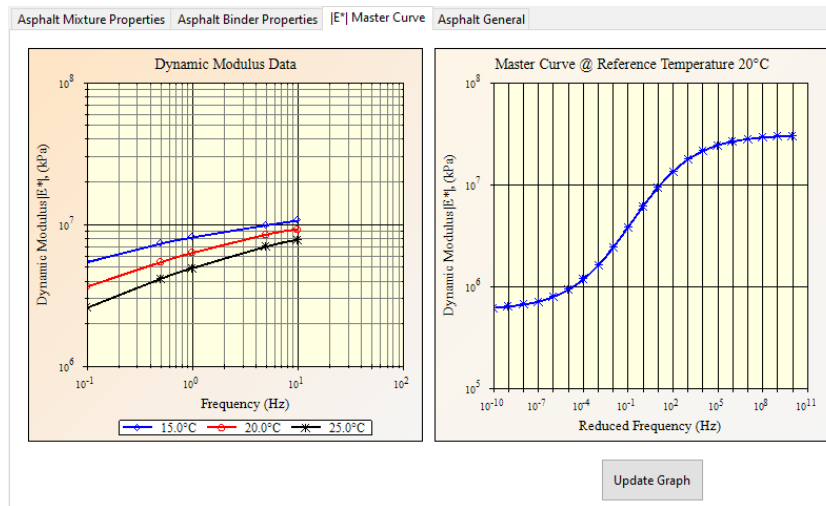
Στη συνέχεια, επιλέγεται η διατομή του οδοστρώματος και εισάγεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης και της στρώσης βάσης/υπόβασης. Το λογισμικό χαρακτηρίζει κάθε στρώση οδοστρώματος ως ελαστικό ή ιξωδοελαστικό υλικό. Στην περίπτωση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, οι στρώσεις βάσεις και έδρασης θεωρούνται ελαστικά υλικά, ενώ η ασφαλτική στρώση θεωρείται ιξωδοελαστικό υλικό. Οι ιδιότητες του ελαστικού υλικού είναι σταθερές και δεν μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας, ενώ οι ιδιότητες του ιξωδοελαστικού υλικού μεταβάλλονται ως συνάρτηση της συχνότητας όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4. Για τα ιξωδοελαστικά υλικά, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E^* και ο λόγος απόσβεσης παρέχονται ως συνάρτηση της συχνότητας. Ο λόγος Poissonn θεωρείται σταθερός.

Asphalt Mixture Properties Asphalt Binder Properties E* Master Curve Asphalt General					
Dynamic Modulus, E* Damping Ratio and Poisson's Ratio					
No of Temperatures	3	No of Frequencies	5	Reference Temperature	°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 4.4: Ιδιότητες στρώσης για ιξωδοελαστικά υλικά (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))

Προκειμένου για τον πλήρη χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος είναι απαραίτητη η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^* , master curve, η οποία περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υλικού συναρτήσει τόσο της θερμοκρασίας όσο και της συχνότητας. Τα δεδομένα των δοκιμών που έχουν προκύψει για διάφορες θερμοκρασίες μετατοπίζονται σε σχέση με το χρόνο φόρτισης ή τη συχνότητα, έτσι ώστε οι διάφορες καμπύλες να ευθυγραμμιστούν για να σχηματιστεί μία ενιαία καμπύλη όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4. Ο τύπος δίνεται :

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{rr}))]}} \quad (4.1)$$



Εικόνα 4.5: Κεντρικές καμπύλες και καμπύλη E^* (Πηγή: (Seyyedmahdi, 2015))

Εισάγουμε τα ποσοστά ασφάλτου και τα ποσοστά κενών, τα οποία είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της κόπωσης. Ο νόμος της κόπωσης δίνεται από τον τύπο:

$$N_f = 0.00432 * C * C_H * k_{f1} * \beta_{f1} * \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{k_{f2} \beta_{f2}} * \left(\frac{1}{E}\right)^{k_{f3} \beta_{f3}} \quad (4.2)$$

$$C = 10^{4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_v} - 0.69 \right)} \quad (4.3)$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 H_{ac})}}} \quad (4.4)$$

Όπου :

- N_f : ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία σε κόπωση
- ϵt : η εφελκυστική παραμόρφωση στην κρίσιμη θέση σε mm/mm
- E : το μέτρο δυσκαμψίας υλικού σε kPa
- $\beta_{f1} = \beta_{f2} = \beta_{f3} = 1$
- $k_{f1} = 1$
- $k_{f2} = 3.9492$
- $k_{f3} = 1.281$
- V_b : το ποσοστό ασφάλτου
- V_a : το ποσοστό κενών
- H_{ac} : το πάχος ασφαλτικής στρώσης σε mm

Η ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων ελλοχεύει κινδύνους για το οδόστρωμα. Για την ασφαλική στρώση ο τύπος είναι:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_z \cdot \beta_{r1} \cdot 10^{k_{r1}} \cdot (33.8 \cdot T)^{\beta_{r2} \cdot k_{r2}} \cdot N^{\beta_{r3} \cdot k_{r3}} \quad (4.5)$$

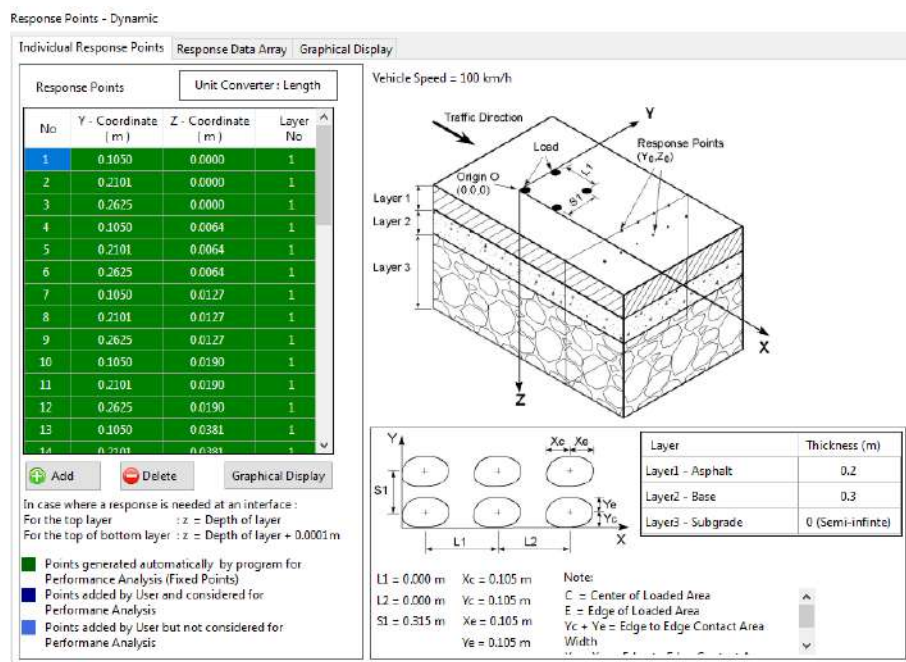
$$k_z = (C_1 + 39.701 \cdot C_2 \cdot D) \cdot 0.328196^{39.3701 \cdot D} \quad (4.6)$$

$$C_1 = -161.0453 \cdot H_{ac}^2 - 68.2323 \cdot H_{ac} + 27.428 \quad (4.7)$$

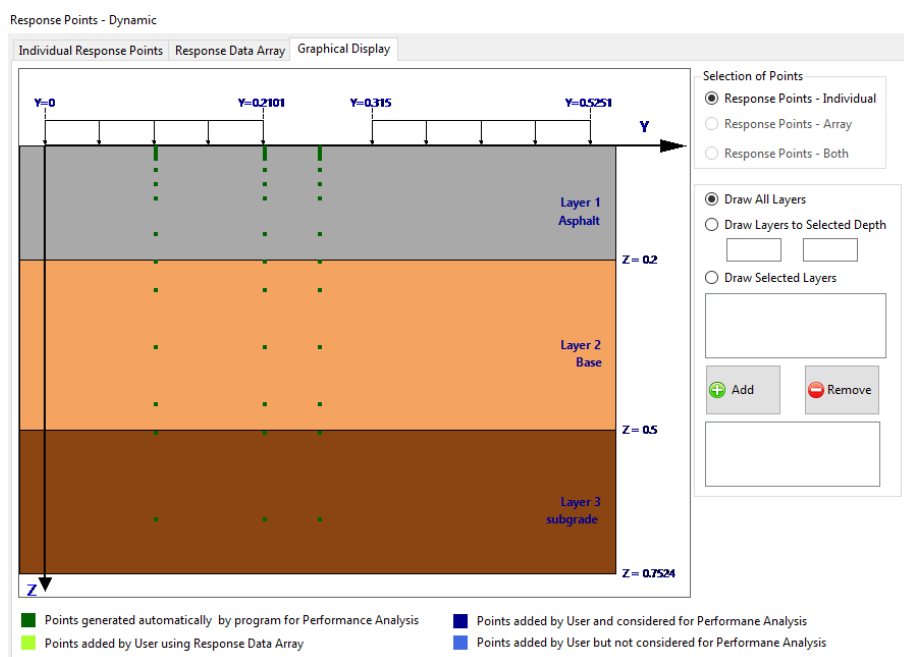
Όπου:

- N: ο αριθμός κύκλων φόρτισης
- T: η θερμοκρασία της ανάλυσης ευαισθησίας (°C)
- ε_p : η συσσωρευμένη κατακόρυφη μόνιμη καταπόνηση (mm/mm)
- ε_r : η κατακόρυφη ελαστική τάση που επιβλήθηκε σε εργαστηριακή δοκιμή για την απόκτηση των ιδιοτήτων του υλικού (mm/mm)
- k_z : συντελεστής για το βάθος της στρώσης έδρασης
- D: βάθος από την επιφάνεια (mm)
- $\beta_{r1} = \beta_{r2} = \beta_{r3} = 1$
- $k_{r1} = -3.35412$
- $k_{r2} = 1.5606$
- $k_{r3} = 0.4791$

Πριν ολοκληρωθεί η ανάλυση και παραχθούν τα αποτελέσματα, επιλέγουμε τα σημεία απόκρισης. Τα σημεία απόκρισης είναι θέσεις με γνωστές τις τιμές των αποκρίσεων του οδοστρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Σημεία απόκρισης (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))



Εικόνα 4.7: Γραφική απεικόνιση σημείων απόκρισης (Πηγή:(Seyyedmahdi, 2015))

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7 οι αποκρίσεις του οδοστρώματος υπολογίζονται σε τρία διαφορετικά σημεία: στο κέντρο του τροχού, στην άκρη του τροχού και στο κέντρο των δύο τροχών.

Τέλος, εκτελείται η ανάλυση. Μόνο για τη δυναμική ανάλυση, είναι διαθέσιμος ο γραφικός τρόπος απεικόνισης των αποκρίσεων του οδοστρώματος.

4.3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Για τις αναλύσεις ευαισθησίας των διατομών που έχουν επιλεχθεί, παρακάτω παρατίθενται οι παράμετροι που θα χρειαστούν για την κάθε ανάλυση.

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

Όσον αφορά στη φέρουσα ικανότητα βάσης/υπόβασης για τις συγκεκριμένες αναλύσεις λαμβάνεται σταθερό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 300MPa και σταθερό λόγο Poissonίσο με 0.35.

Όσον αφορά στη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, η διαφοροποίηση των διατομών επιλέχθηκε για τον έλεγχο των αποκρίσεων του οδοστρώματος σε διαφορετικής κατηγορίας εδαφών. Το έδαφος ανάλογα αν είναι κακής ποιότητας έχει ένα CBR μικρότερο του 5, μέτριας ποιότητας CBR 6%-20% και καλής ποιότητας με CBR μεγαλύτερο του 20%. Γι' αυτό το λόγο στις αναλύσεις επιλέγεται χαμηλότερης διαβάθμισης έδαφος με CBR 5%, μέτριας ποιότητας με CBR 15% και καλής διαβάθμισης με CBR 25% (Association, 2008).

Για τις διατομές πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας για ταχύτητα $V=60\text{km/h}$ και για ταχύτητα $V=100\text{km/h}$.

Για την κυκλοφορία σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη τα εξής στοιχεία:

Πίνακας 4.3: Δεδομένα κυκλοφορίας για το οδόστρωμα χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου

Μέση ημερήσια κυκλοφορία	1940ESALs
Ποσοστό βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού	90%
Ρυθμός αύξησης	0%
Συνολικές διελεύσεις	$12.57 \cdot 10^7$ ESALs
Περίοδος σχεδιασμού	20έτη

Πίνακας 4.4: Δεδομένα κυκλοφορίας για το οδόστρωμα υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου

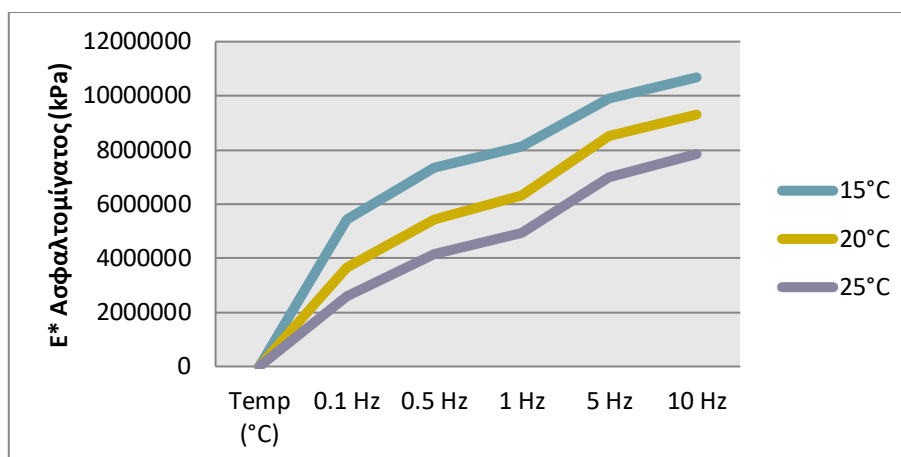
Μέση ημερήσια κυκλοφορία	3880ESALs
Ποσοστό βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού	90%
Ρυθμός αύξησης	0%
Συνολικές διελεύσεις	$12.57 \cdot 10^7$ ESALs
Περίοδος σχεδιασμού	20έτη

Τα δεδομένα για τη **φόρτιση** δίνονται από τον πίνακα:

Πίνακας 4.4: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας συναρτήσει συχνότητας και θερμοκρασίας

E* Ασφαλτομίγματος (kPa)					
Θερμοκρασία (°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

Από την εικόνα 4.8 παρατηρείται ότι η μείωση της συχνότητας και αντίστοιχα αύξηση του χρόνου φόρτισης οδηγεί σε σταδιακή μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Το γεγονός αυτό φανερώνει την αρνητική επίδραση του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μειώνεται με την αύξησή της,.



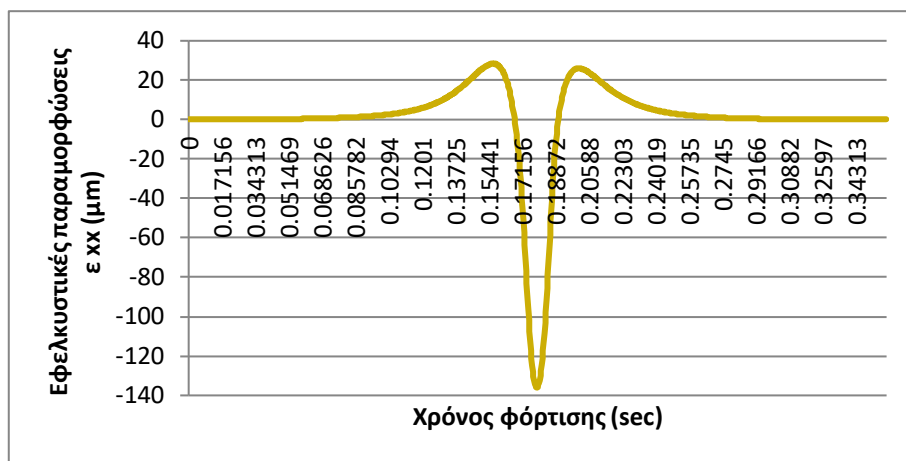
Εικόνα 4.8: Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας και της φόρτισης

Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται για όλες τις αναλύσεις ευαισθησίας των διατομών.

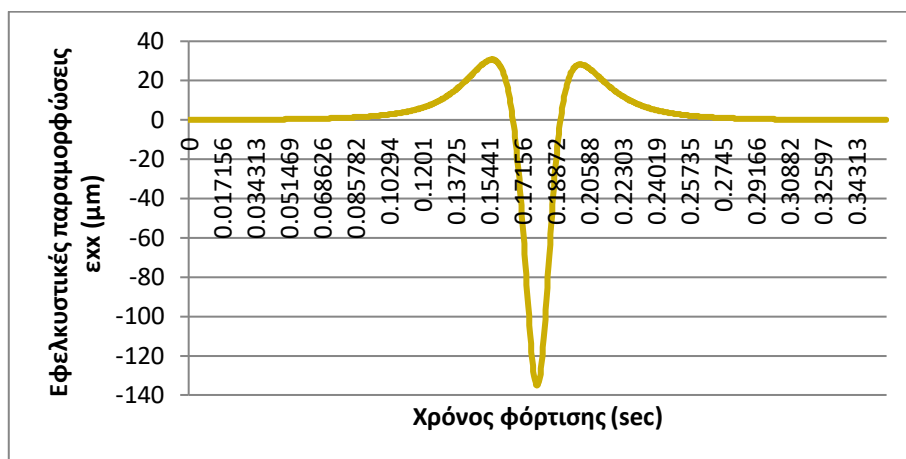
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

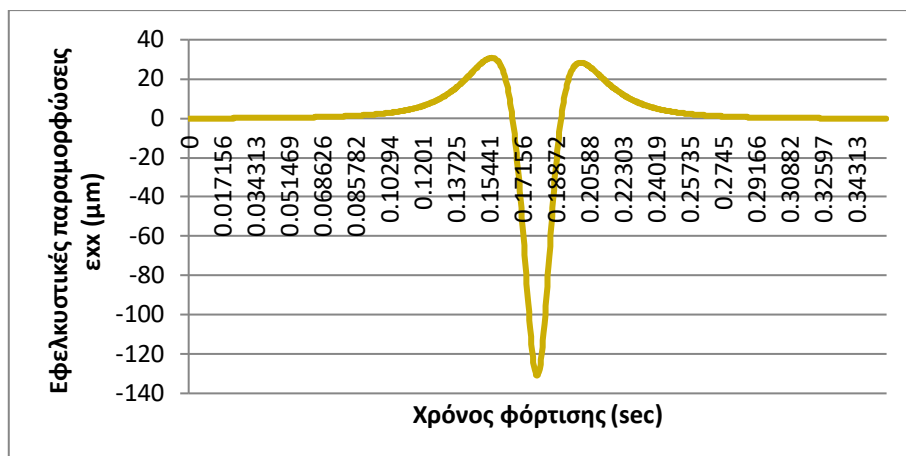
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι αναλύσεις ευαισθησίας πραγματοποιούνται ως προς τις παραμένουσες και μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις. Όσον αφορά στον προσδιορισμό των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στις εικόνες 5.1-5.3 αναπτύσσονται τα διαγράμματα εφελκυστικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου φόρτισης στο κέντρο του φορτίου του τροχού, στην άκρη του τροχού και ενδιάμεσα των δύο τροχών, αντίστοιχα, για διατομή οδοστρώματος χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου.



Εικόνα 5.1: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο κέντρο του φορτίου του τροχού για διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου

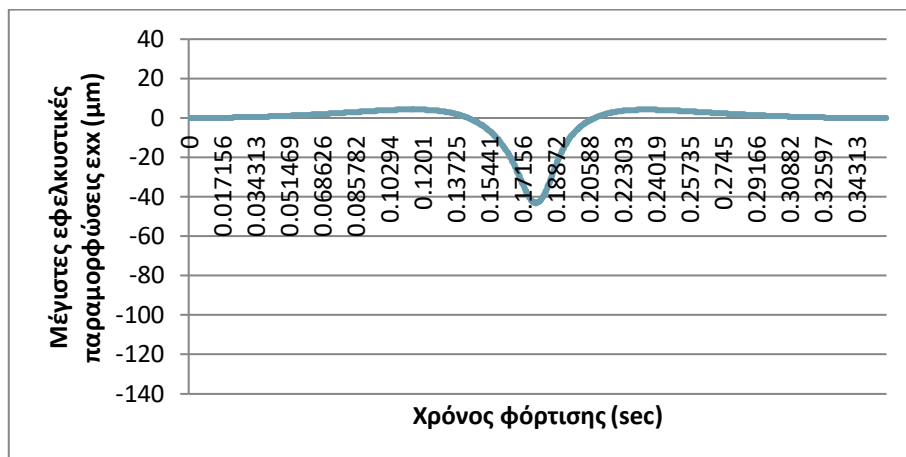


Εικόνα 5.2: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στην άκρη του τροχού για διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου

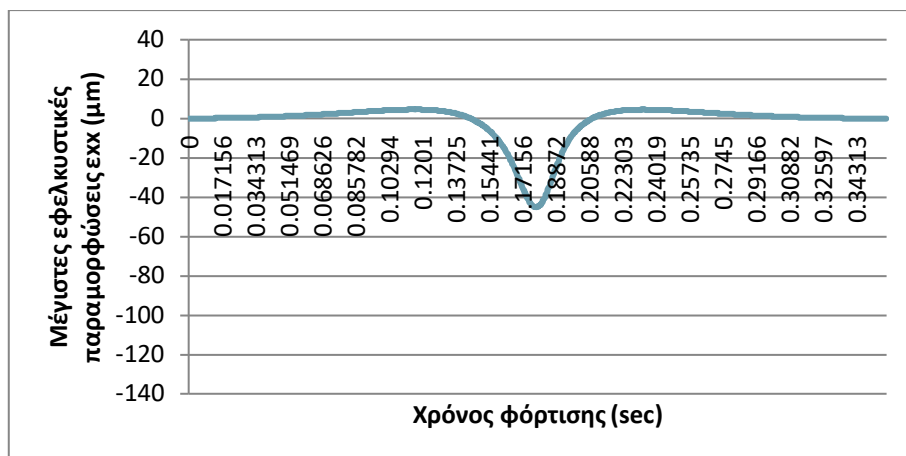


Εικόνα 5.3: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης ενδιάμεσα των δύο τροχών σε διατομή χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

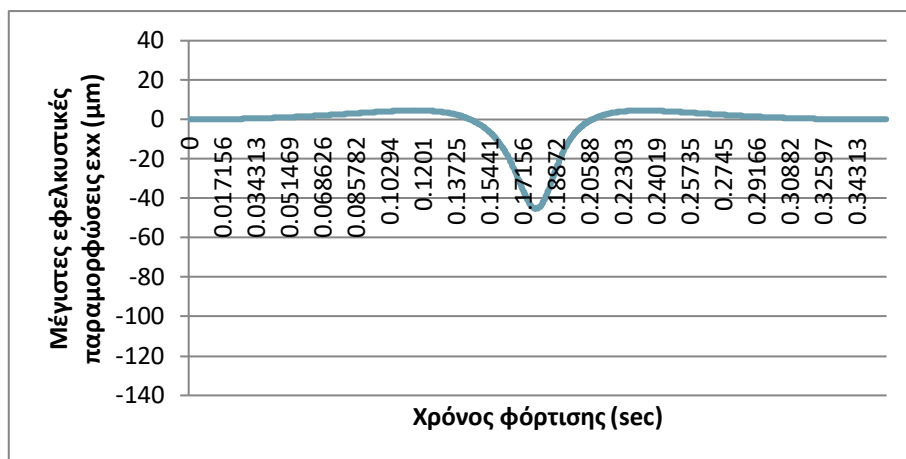
Όσον αφορά στον προσδιορισμό των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων στις εικόνες 5.4-5.6 αναπτύσσονται τα διαγράμματα εφελκυστικών παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου φόρτισης στο κέντρο του φορτίου του τροχού, στην άκρη του τροχού και ενδιάμεσα των δύο τροχών, αντίστοιχα, για διατομή οδοστρώματος υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.



Εικόνα 5.4: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο κέντρο του φορτίου του τροχού για διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου



Εικόνα 5.5: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στην άκρη του τροχού για διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου



Εικόνα 5.6: Τυπική κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης ενδιάμεσα των δύο τροχών σε διατομή υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Παρατηρείται ότι οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις σε όλες τις διατομές για το οδόστρωμα χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου καταγράφονται στο κέντρο του φορτίου του τροχού. Αντίστοιχα, στις διατομές για το οδόστρωμα υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις καταγράφονται στη μέση των δύο τροχών. Αυτό συμβαίνει, γιατί ανάλογα με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης και τη φόρτιση η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση μπορεί να καταγραφεί και σε διαφορετικό σημείο κοντά στους τροχούς.

5.2 ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΟΥ

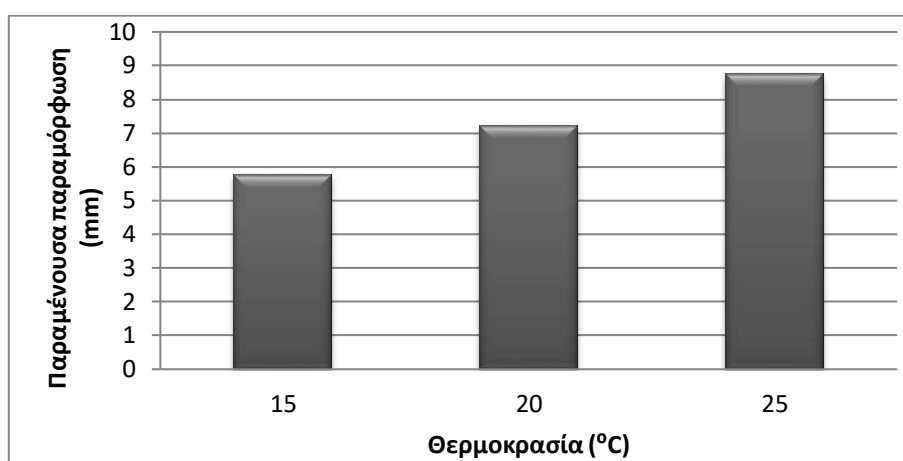
5.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων:

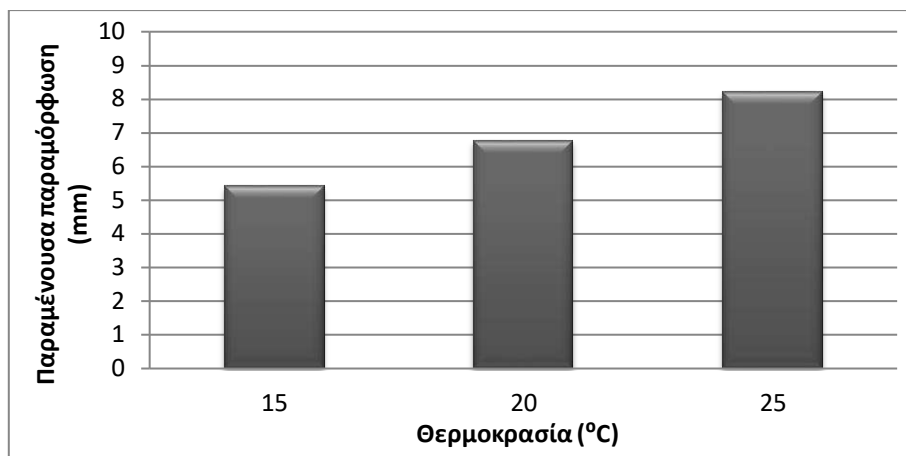
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής Χ1 (πάχος ασφάλτου 0.08m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.25m, CBR 25%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.1 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.7 και 5.8:

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Χ1

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	5.76mm	60km/h
20°C	7.19mm	
25°C	8.73mm	
15°C	5.42mm	100km/h
20°C	6.76mm	
25°C	8.21mm	



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Χ1 (V=60km/h)



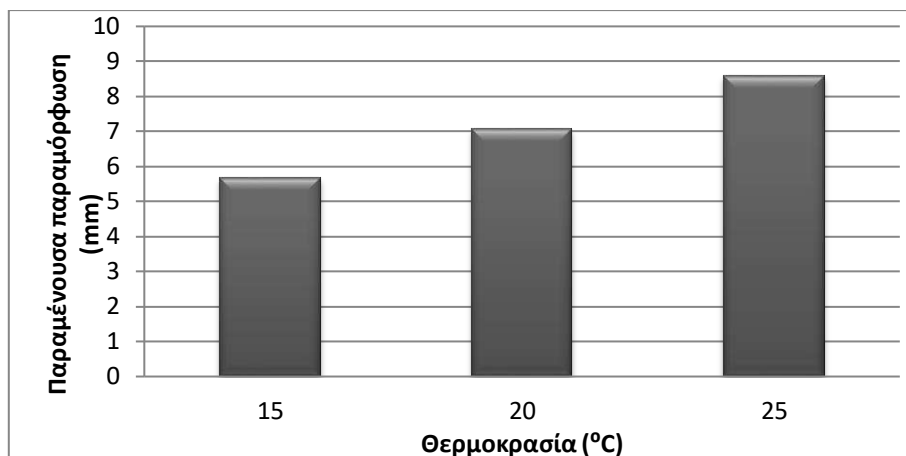
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X1 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.1 και της εικόνας 5.7, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=60km/h, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C. Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 21%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.1 και της εικόνας 5.8, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=100km/h, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C. Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 21%.

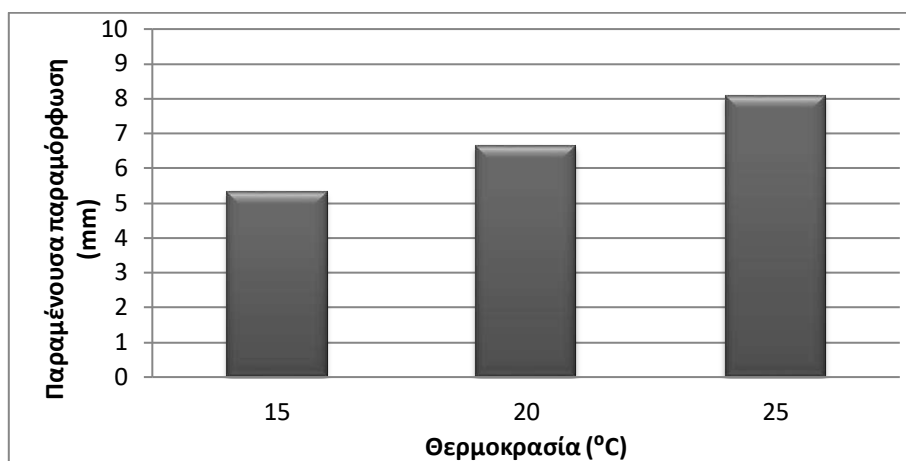
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής X2 (πάχος ασφάλτου 0.08m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.30m, CBR 15%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.2 και εμφανίζονται στα διαγράμματα 5.9 και 5.10:

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X2

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	5.67mm	60km/h
20°C	7.07mm	
25°C	8.59mm	
15°C	5.34mm	100km/h
20°C	6.66mm	
25°C	8.09mm	



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X2 (V=60km/h)



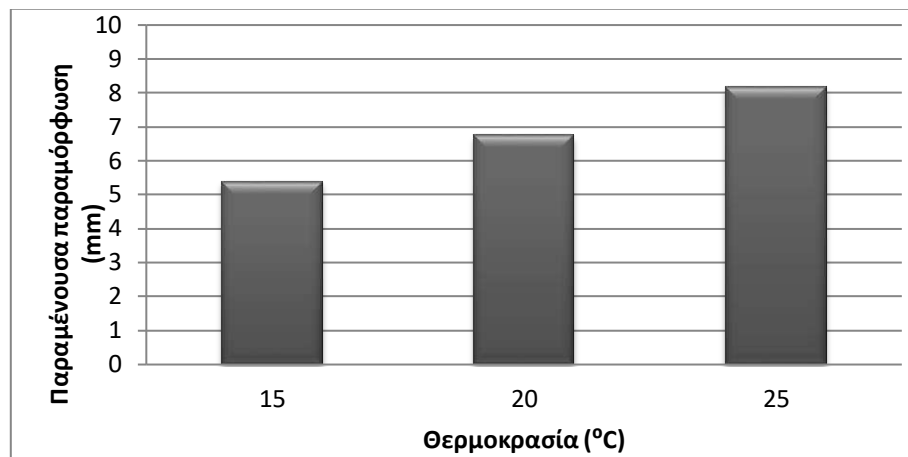
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X2 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.2 και της εικόνας 5.9, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C . Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 22%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.2 και της εικόνας 5.10, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=100\text{km/h}$, οδηγεί εξίσου σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C . Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 22%.

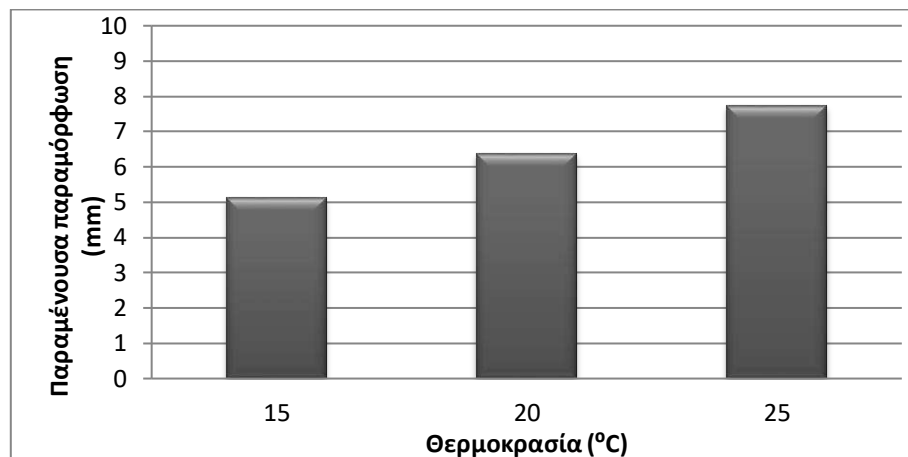
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής X3 (πάχος ασφάλτου 0.08m , πάχος βάσης/υπόβασης 0.35m , CBR 5%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.3 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.11 και 5.12:

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X3

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	5.40mm	60km/h
20°C	6.74mm	
25°C	8.18mm	
15°C	5.11mm	100km/h
20°C	6.38mm	
25°C	7.74mm	



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X3 (V=60km/h)



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής X3 (V=100km/h)

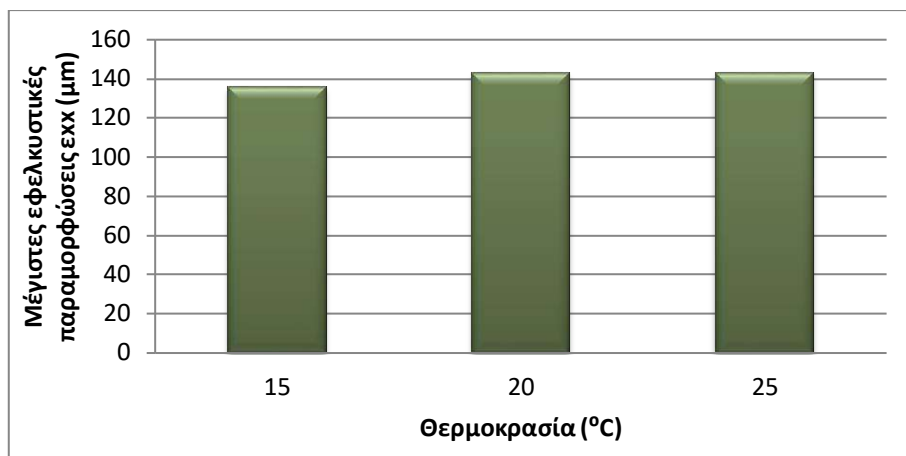
Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3 και της εικόνας 5.11, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C . Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 22%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3 και της εικόνας 5.9, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C . Από τους 15°C στους 20°C η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25% και από τους 20°C στους 25°C περίπου στο 21%.

Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:

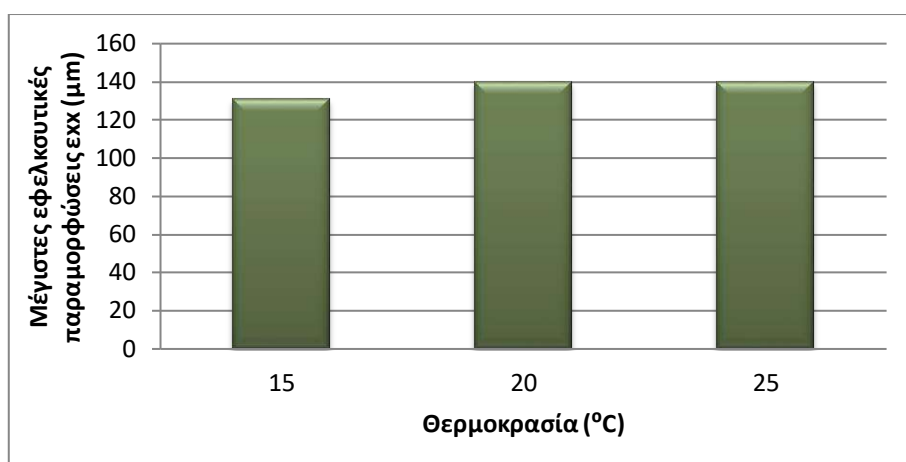
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής Χ1 (πάχος ασφάλτου 0.08m , πάχος βάσης/υπόβασης 0.25m , CBR 25%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.4 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.13 και 5.14:

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Χ1

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	$136.06\mu\text{m}$	60km/h
20°C	$142.91\mu\text{m}$	
25°C	$143.09\mu\text{m}$	
15°C	$130.74\mu\text{m}$	100km/h
20°C	$139.83\mu\text{m}$	
25°C	$140.10\mu\text{m}$	



Εικόνα 5.13: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X1 (V=60km/h)



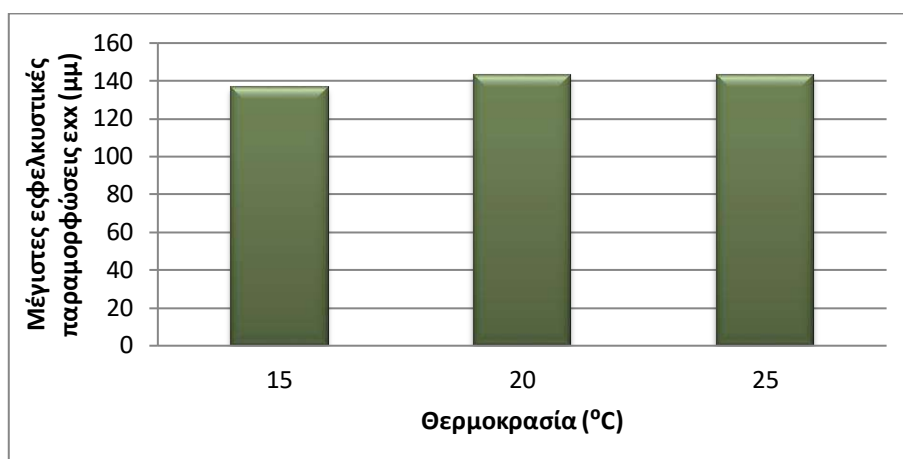
Εικόνα 5.14: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X1 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 και της εικόνας 5.13, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=60km/h, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 5%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.15%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 και της εικόνας 5.14, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=100km/h, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 7%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.20%.

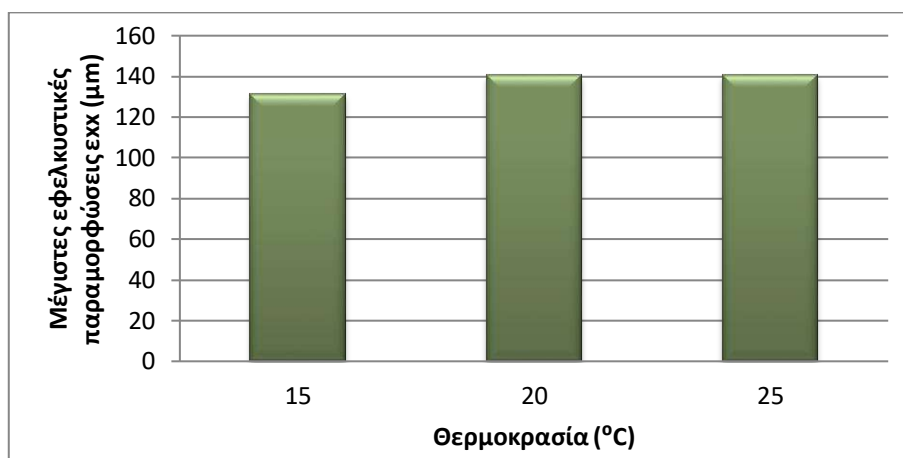
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής X2 (πάχος ασφάλτου 0.08m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.30m, CBR 15%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.5 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.15 και 5.16:

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X2

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	136.58μm	60km/h
20°C	143.42μm	
25°C	143.60μm	
15°C	131.39μm	100km/h
20°C	140.44μm	
25°C	140.71μm	



Εικόνα 5.15: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X2 (V=60km/h)



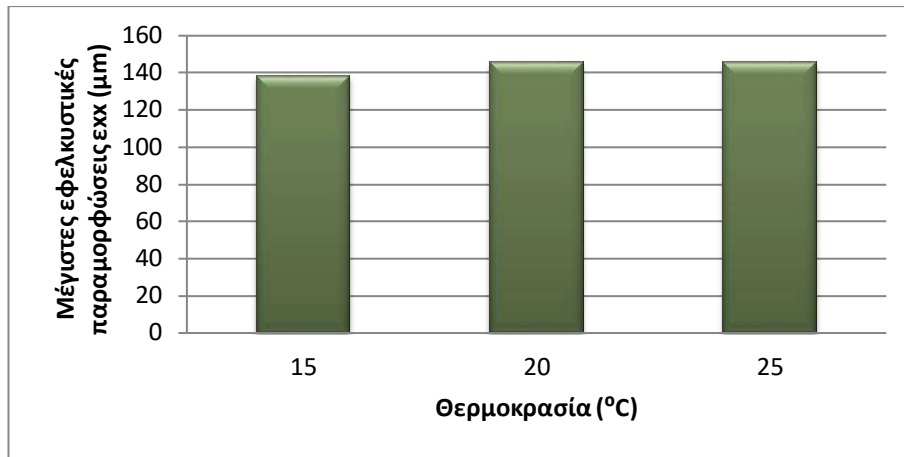
Εικόνα 5.16: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X2 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.5 και της εικόνας 5.15, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 5%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.13%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.5 και της εικόνας 5.16, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 6.5%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.20%.

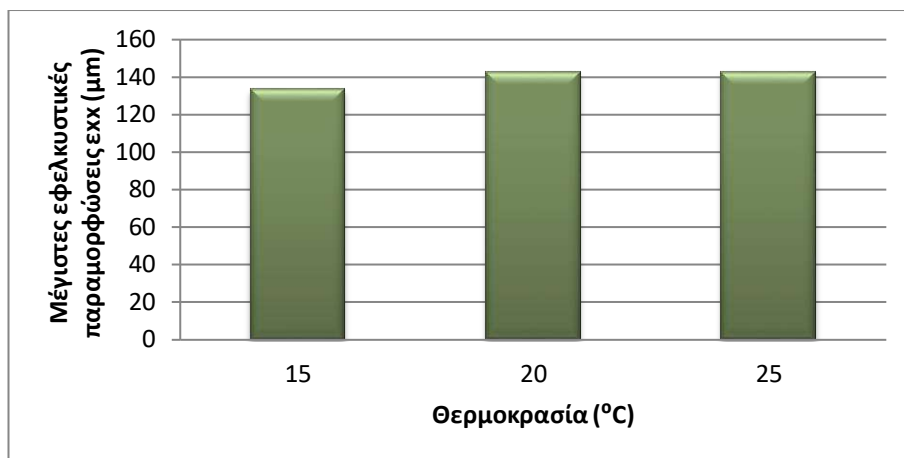
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής X3 (πάχος ασφάλτου 0.08m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.35m, CBR 5%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.6 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.17 και 5.18:

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X3

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	138.62μm	60km/h
20°C	145.50μm	
25°C	145.68μm	
15°C	133.71μm	100km/h
20°C	142.75μm	
25°C	143.01μm	



Εικόνα 5.17: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X3 (V=60km/h)



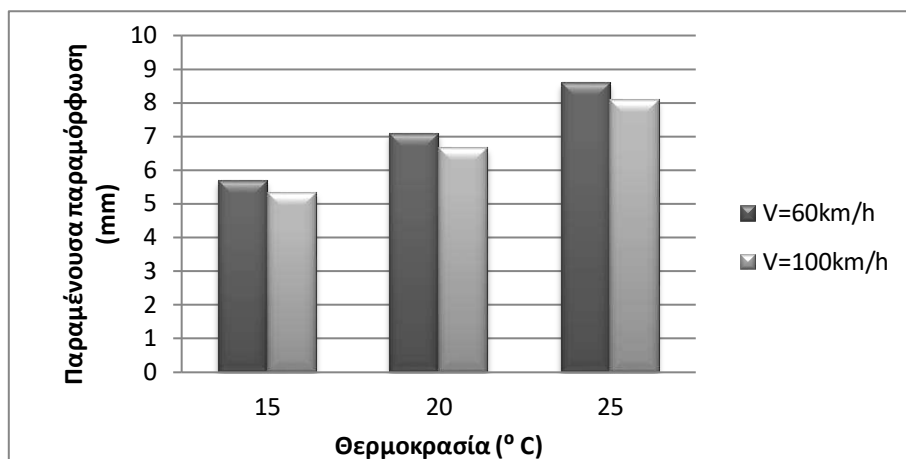
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής X3 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.6 και της εικόνας 5.17, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=60km/h, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 5%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.12%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.6 και της εικόνας 5.18, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για V=100km/h, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από 15°C σε 20°C η αύξηση κυμαίνεται περίπου στο 7%, ενώ από τους 20°C στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 0.18%.

5.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

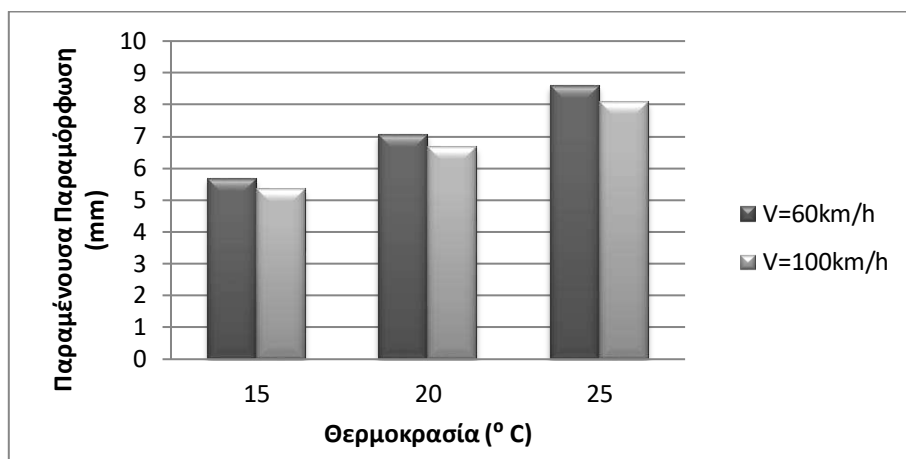
Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.19-5.21 οι μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων:



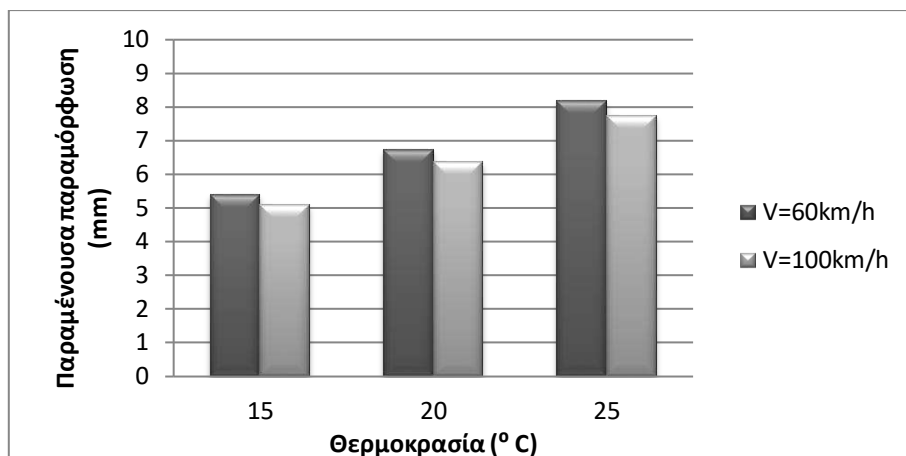
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X1

Με βάση τον πίνακα 5.1 και την εικόνα 5.19, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση σε ένα εύρος τάξης του 6.00%. Η αντίστοιχη μείωση είναι ίδια σε όλες τις θερμοκρασίες που έχουν πραγματοποιηθεί οι αναλύσεις.



Εικόνα 5.20: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X2

Με βάση τον πίνακα 5.2 και την εικόνα 5.20, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Αντίστοιχα η μείωση κυμαίνεται σε ένα εύρος τάξης του 6.00%. Η αντίστοιχη μείωση είναι ίδια σε όλες τις μεταβλητές θερμοκρασίες που έχουν πραγματοποιηθεί οι αναλύσεις.

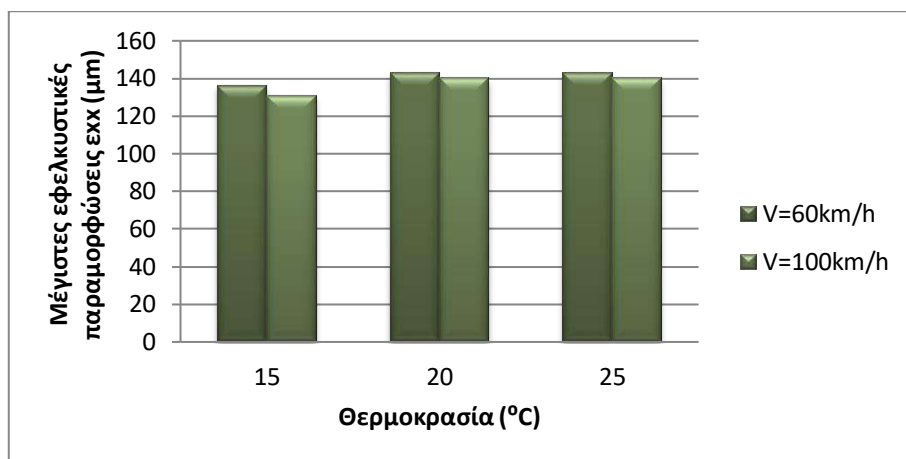


Εικόνα 5.21: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής X3

Με βάση τον πίνακα 5.1 και την εικόνα 5.21, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η μείωση κυμαίνεται σε ένα εύρος τάξης περίπου του 5.50%. Αντίστοιχη είναι η μείωση για όλες τις θερμοκρασίες που έχουν πραγματοποιηθεί οι αναλύσεις.

Αποτελέσματα εφελκυστικών παραμορφώσεων:

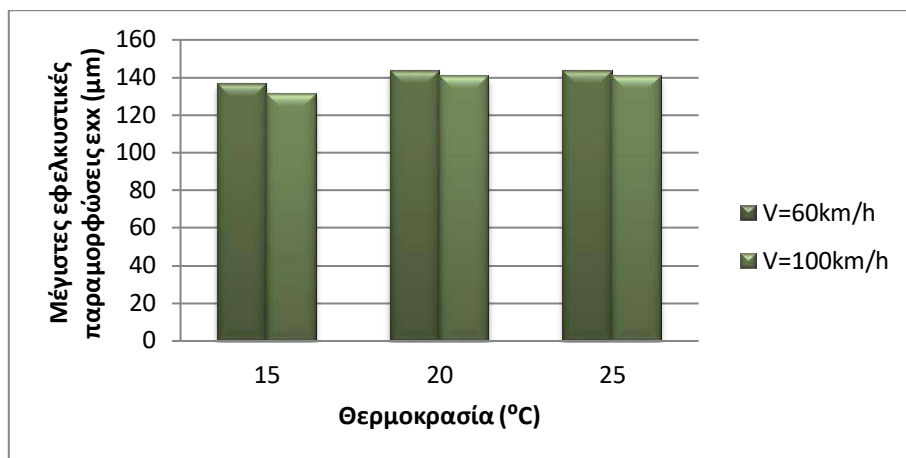
Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.22-5.24 οι μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.22: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X1

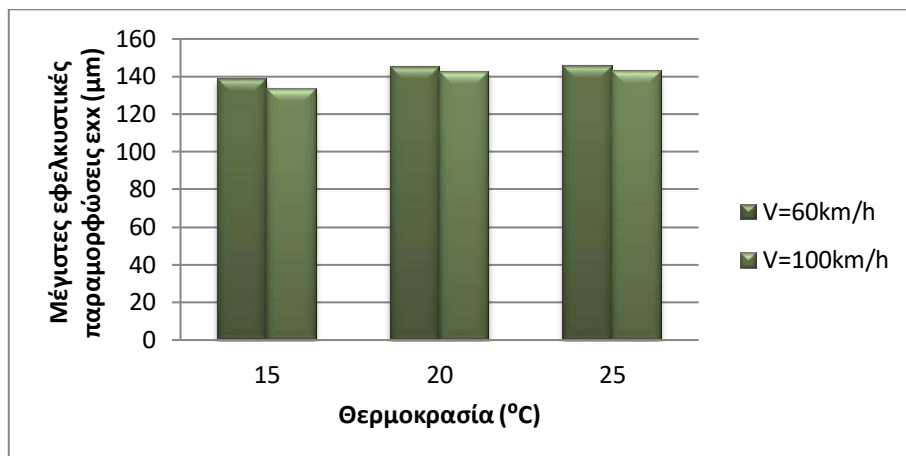
Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 και την εικόνα 5.22, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, με σταθερή θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στη θερμοκρασία των 15°C η μείωση υπολογίζεται περίπου στο 4%, στη

θερμοκρασία των 20°C υπολογίζεται στο 2.5% και στη θερμοκρασία των 25°C η μείωση υπολογίζεται στο 2%.



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X2

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 και την εικόνα 5.23, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στη θερμοκρασία των 15°C η μείωση υπολογίζεται περίπου στο 4%, στη θερμοκρασία των 20°C υπολογίζεται στο 2.5% και στη θερμοκρασία των 25°C η μείωση υπολογίζεται στο 2%.



Εικόνα 5.24: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής X3

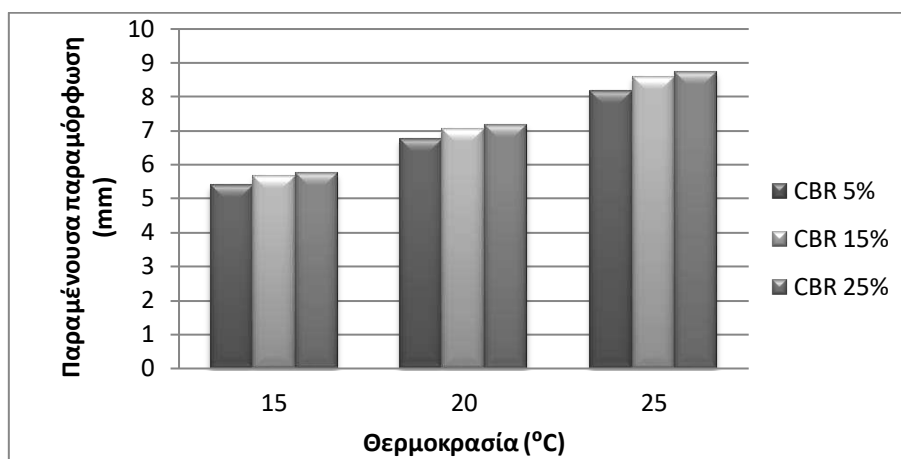
Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 και την εικόνα 5.24, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε μείωση των

εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στη θερμοκρασία των 15°C η μείωση υπολογίζεται περίπου στο 3.5%, στη θερμοκρασία των 20°C και των 25°C η μείωση υπολογίζεται στο 2%.

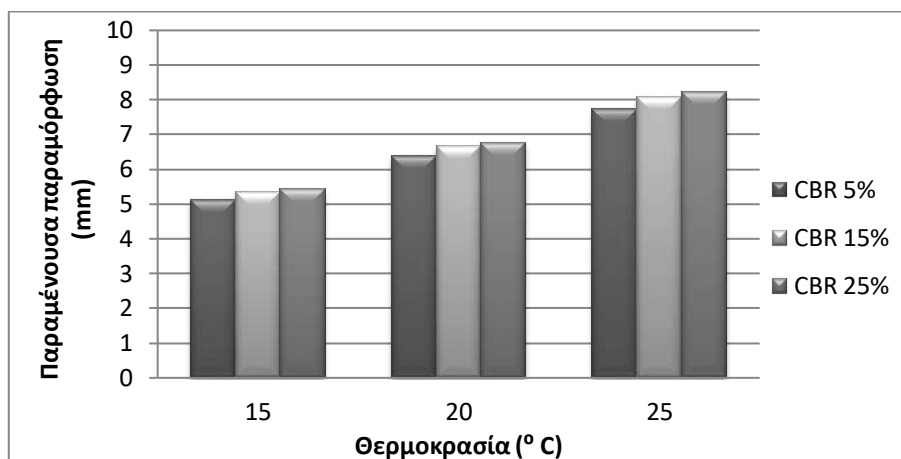
5.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων.

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της φέρουσας ικανότητας έδρασης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.25 και 5.26 οι μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.25: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 (V=60km/h)



Εικόνα 5.26: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 (V=100km/h)

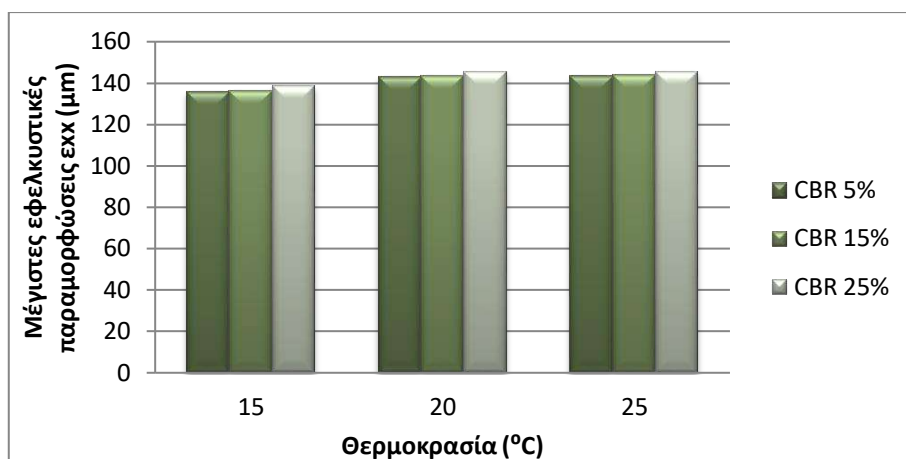
Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.1, 5.2, 5.3 και της εικόνας 5.25, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Στην περίπτωση που ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για V=60km/h, η αύξηση καταγράφεται γύρω στο 5%. Στην περίπτωση που ο δείκτης CBR αυξάνεται

από 15% σε 25%, για $V=60\text{km/h}$, η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 2%. Οι αυξήσεις είναι ίδιες για όλες τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

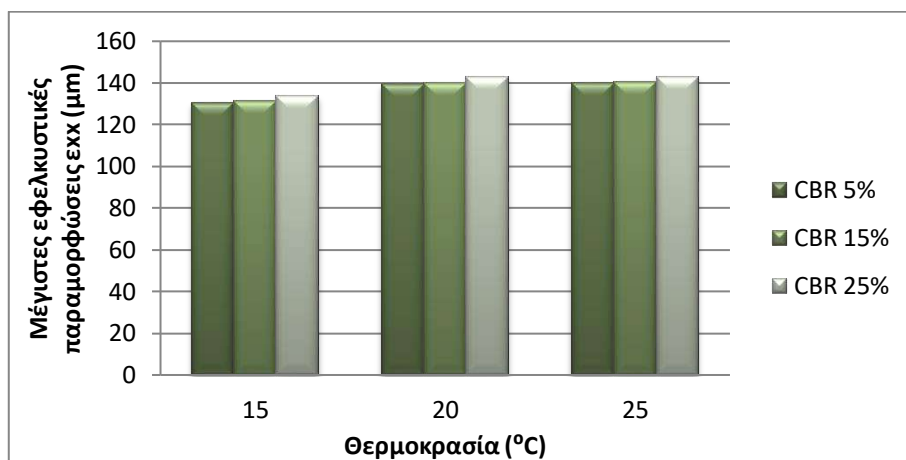
Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.1, 5.2, 5.3 και της εικόνας 5.26, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η αύξηση κυμαίνεται στο 4.5% αν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για $V=100\text{km/h}$, ενώ περίπου 1.5% καταγράφεται όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%, για $V=100\text{km/h}$. Οι αυξήσεις είναι ίδιες για όλες τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Αποτελέσματα εφελκυστικών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.27 και 5.28 οι μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.27: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 ($V=60\text{km/h}$)



Εικόνα 5.28: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών X1, X2, X3 ($V=100\text{km/h}$)

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.4, 5.5, 5.6 και της εικόνας 5.27, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, επιφέρει μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Η μείωση κυμαίνεται στο 1.5% αν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για $V=60\text{km/h}$, ενώ περίπου 0.5% καταγράφεται όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%, για $V=60\text{km/h}$. Οι απομειώσεις είναι ίδιες για όλες τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.4, 5.5, 5.6 και της εικόνας 5.28, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, επιφέρει μια μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Η μείωση κυμαίνεται στο 2% αν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για $V=100\text{km/h}$, ενώ περίπου 0.5% καταγράφεται όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%, για $V=100\text{km/h}$. Οι απομειώσεις είναι ίδιες για όλες τις μεταβολές της θερμοκρασίας.

5.3 ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΥΨΗΛΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΥ ΦΟΡΤΟΥ

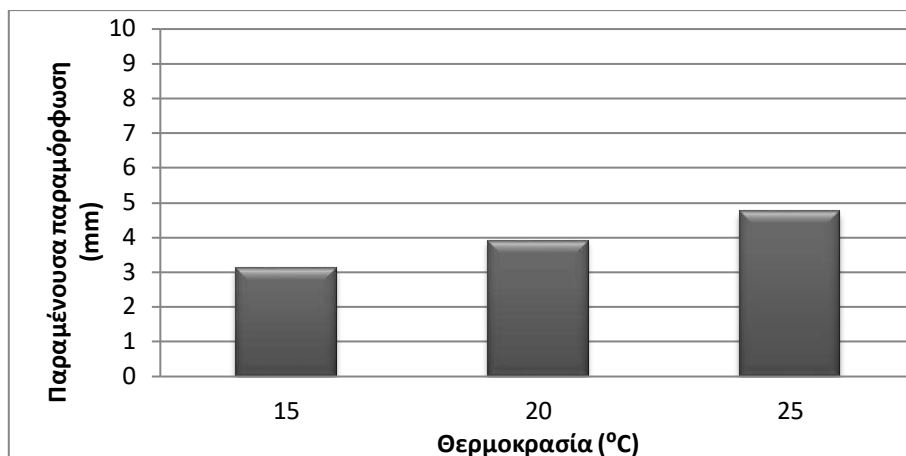
5.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων:

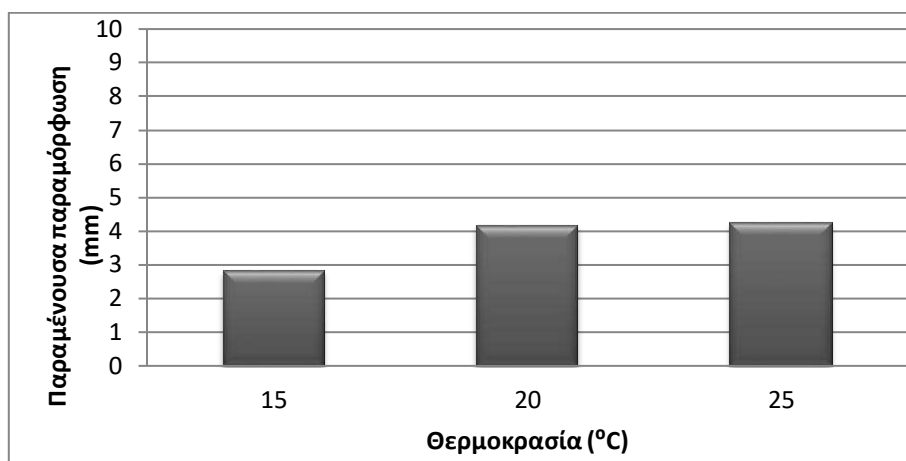
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής Υ1 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.30m, CBR 25%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.7 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.29 και 5.30:

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Υ1

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	3.13mm	60km/h
20°C	3.91mm	
25°C	4.75mm	
15°C	2.81mm	100km/h
20°C	4.16mm	
25°C	4.25mm	



Εικόνα 5.29: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ1 (V=60km/h)



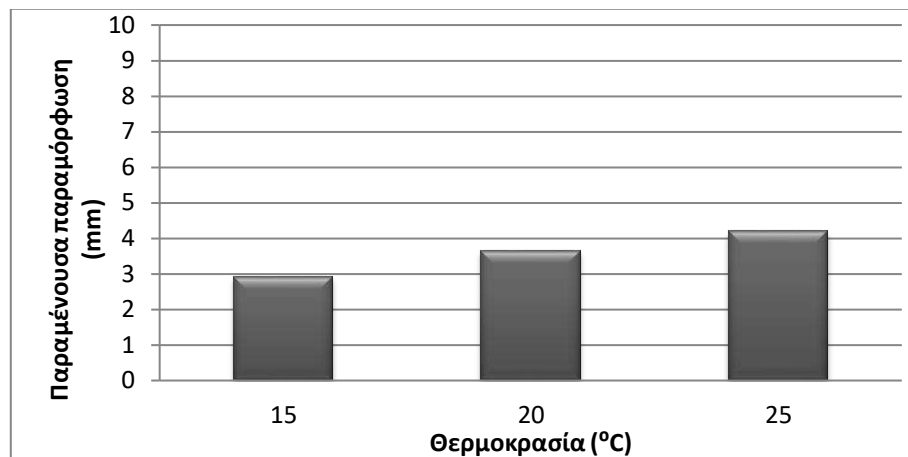
Εικόνα 5.30: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ1 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και της εικόνας 5.29, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C. Από τους 15°C στους 20°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 22%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και της εικόνας 5.30, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C. Η αύξηση από τους 15°C στους 20°C, για V=100km/h, κυμαίνεται στο 48% και από τους 20°C στους 25°C, για V=100km/h, μόλις 2.50%.

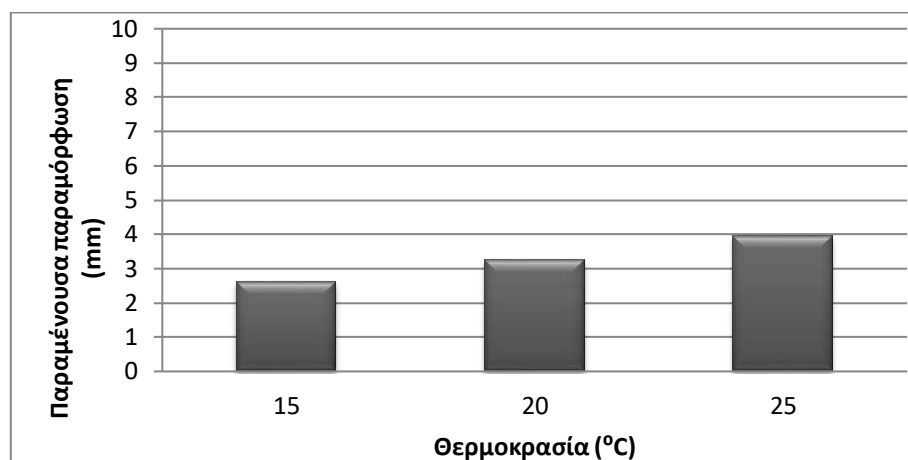
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής Υ2 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.35m, CBR 15%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.8 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.31 και 5.32:

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Υ2

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	2.93mm	60km/h
20°C	3.66mm	
25°C	4.19mm	
15°C	2.61mm	100km/h
20°C	3.26mm	
25°C	3.96mm	



Εικόνα 5.31: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ2 (V=60km/h)



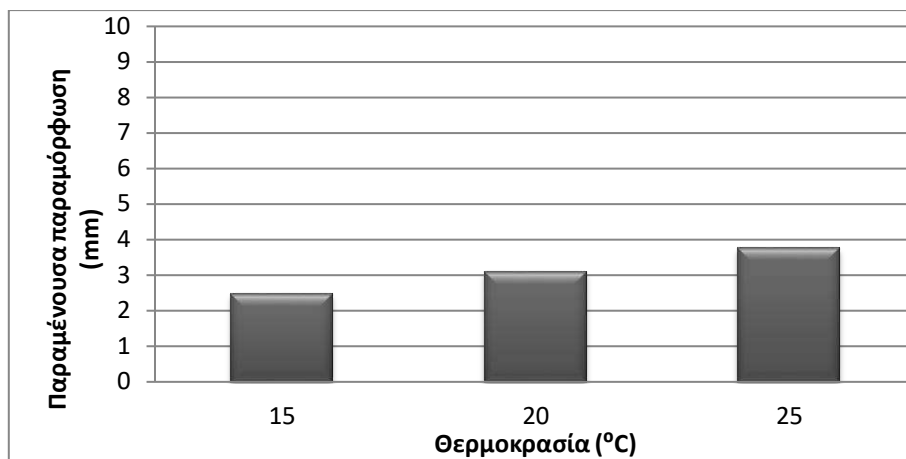
Εικόνα 5.32: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ2 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.8 και της εικόνας 5.31, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C. Από τους 15°C στους 20°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 15%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.8 και της εικόνας 5.32, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας μεταμόρφωσης. Από τους 15°C στους 20°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 22%.

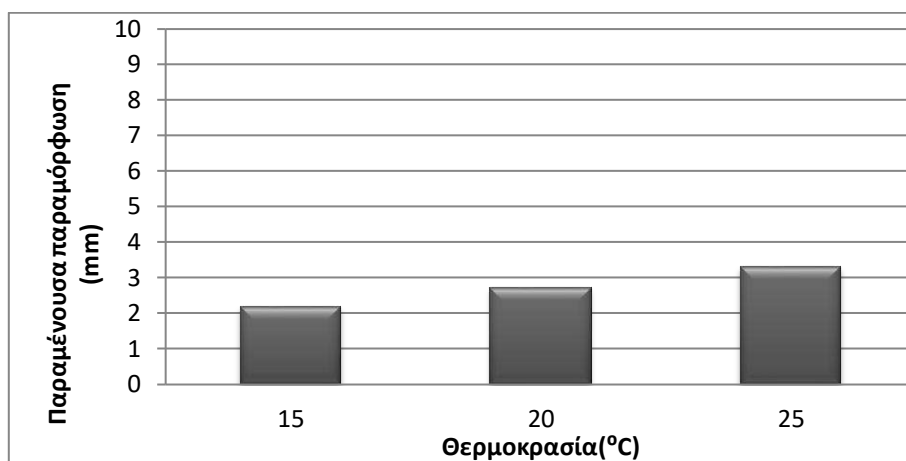
Από την ανάλυση ευαισθησίας της διατομής Υ3 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.40m, CBR 5%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι παραμένουσες παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.9 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.33 και 5.34:

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Υ3

Θερμοκρασία T	AC Rutting	Ταχύτητα V
15°C	2.48mm	60km/h
20°C	3.10mm	
25°C	3.76mm	
15°C	2.20mm	100km/h
20°C	2.74mm	
25°C	3.33mm	



Εικόνα 5.33: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ3 (V=60km/h)



Εικόνα 5.34: Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-θερμοκρασίας διατομής Υ3 (V=100km/h)

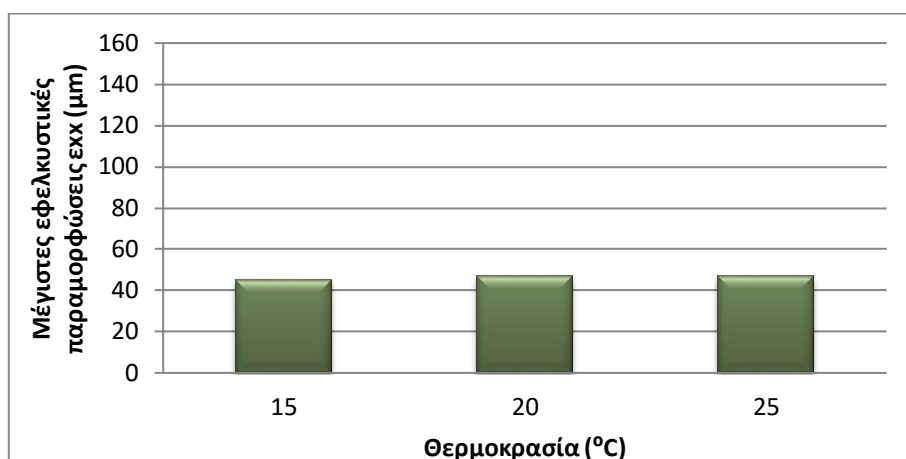
Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.9 και της εικόνας 5.33, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Από τους 15°C στους 20°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 22%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.9 και της εικόνας 5.34, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Από τους 15°C στους 20°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 25%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 22%.

Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:

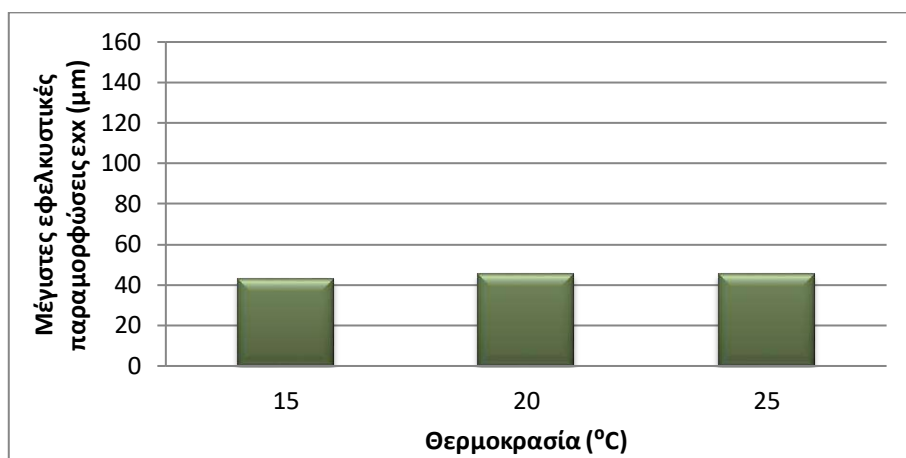
Από την ανάλυση της ευαισθησίας της διατομής Υ1 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.30m, CBR 25%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.10 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.35 και 5.36:

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Υ1

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	45.277μm	60km/h
20°C	46.766μm	
25°C	46.798μm	
15°C	42.882μm	100km/h
20°C	45.139μm	
25°C	45.196μm	



Εικόνα 5.35: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ1 (V=60km/h)



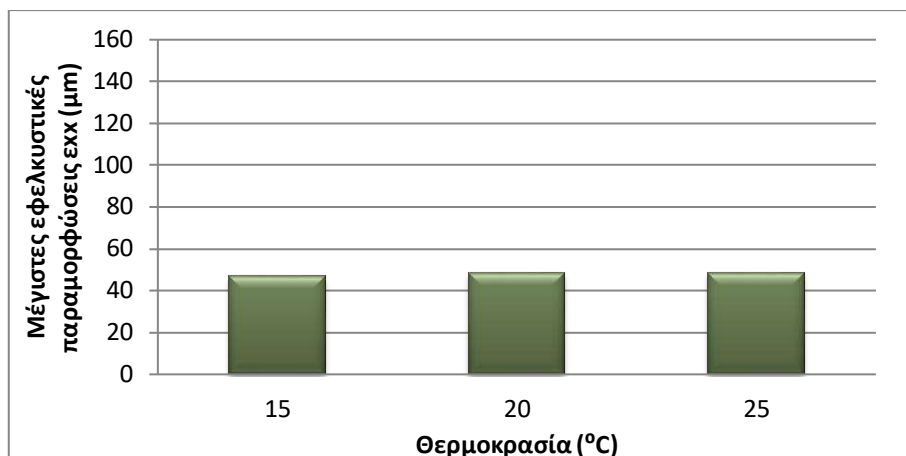
Εικόνα 5.36: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ1 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.10 και της εικόνας 5.35, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για $V=60\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 3.5%. Από τους 20°C στους 25°C, για $V=60\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.1%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.10 και της εικόνας 5.36, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για $V=100\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 5.5%. Από τους 20°C στους 25°C, για $V=100\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.13%.

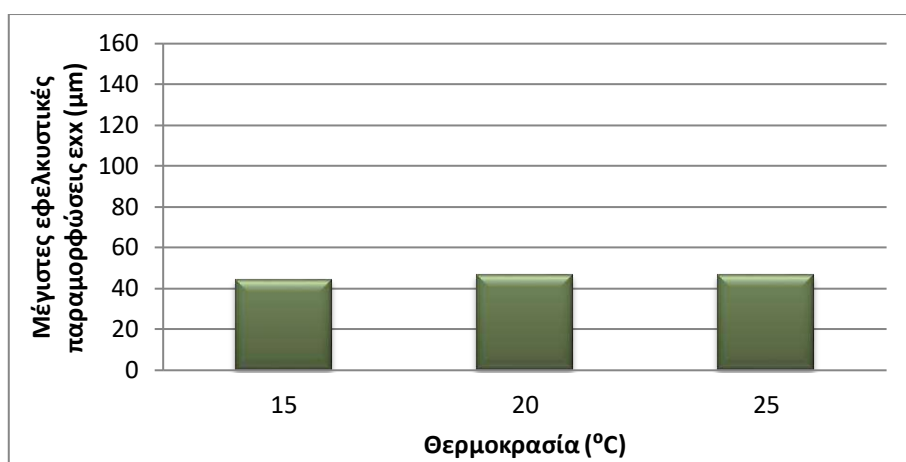
Από την ανάλυση της ευαισθησίας της διατομής Υ2 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.35m, CBR 15%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.11 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.37 και 5.38:

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Υ2

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	47.011μm	60km/h
20°C	48.493μm	
25°C	48.524μm	
15°C	44.582μm	100km/h
20°C	46.839μm	
25°C	46.896μm	



Εικόνα 5.37: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ2 (V=60km/h)



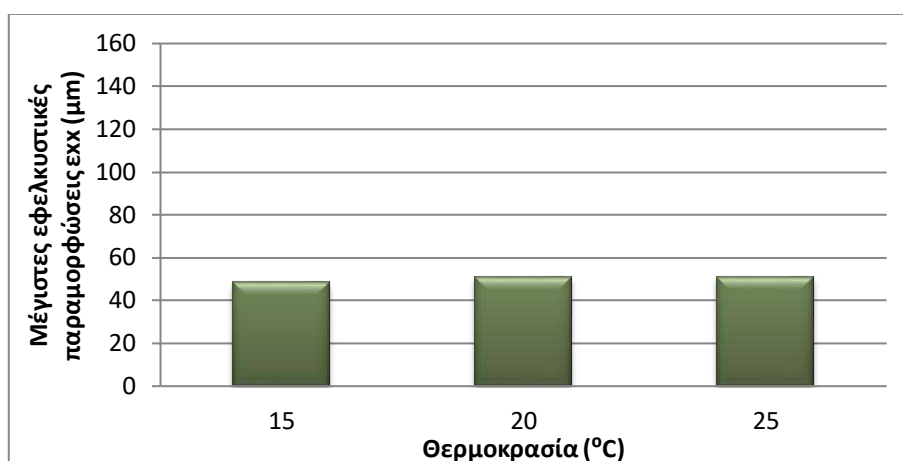
Εικόνα 5.38: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ2 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.11 και της εικόνας 5.37, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 3.5%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=60km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.1%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.11 και της εικόνας 5.38, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 5%. Από τους 20°C στους 25°C, για V=100km/h, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.13%.

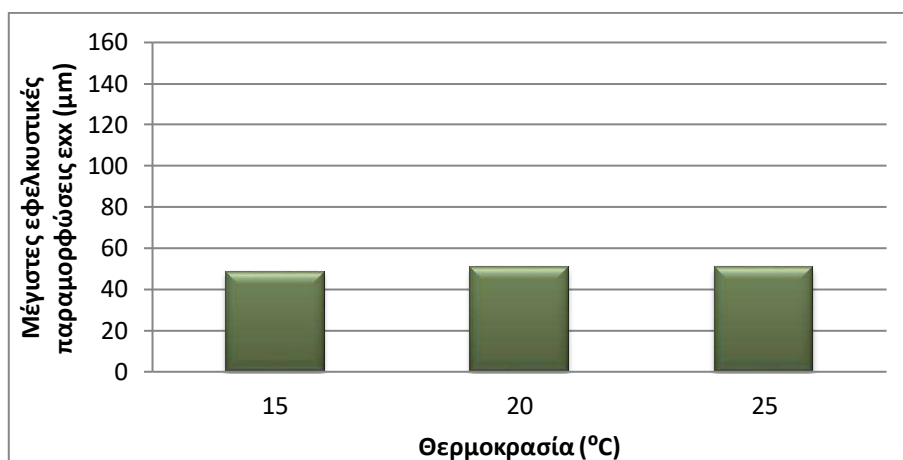
Από την ανάλυση της ευαισθησίας της διατομής Υ3 (πάχος ασφάλτου 0.24m, πάχος βάσης/υπόβασης 0.40m, CBR5%) έναντι θερμοκρασίας με σταθερή ταχύτητα υπολογίστηκαν, για την ασφαλική στρώση, οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις που περιλαμβάνονται στον πίνακα 5.12 και εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.39 και 5.40:

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Υ3

Θερμοκρασία T	Εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{xx}	Ταχύτητα V
15°C	48.664μm	60km/h
20°C	50.925μm	
25°C	51.148μm	
15°C	48.612μm	100km/h
20°C	50.868μm	
25°C	50.925μm	



Εικόνα 5.39: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ3 (V=60km/h)



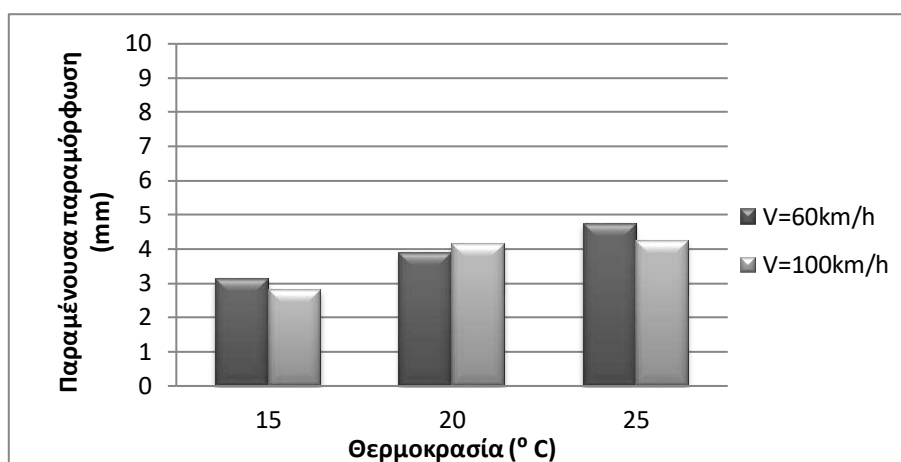
Εικόνα 5.40: Διάγραμμα εφελκυστικών παραμορφώσεων-θερμοκρασίας διατομής Υ3 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.12 και της εικόνας 5.39, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για $V=60\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 4.5%. Από τους 20°C στους 25°C, για $V=60\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.5%. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.12 και της εικόνας 5.40, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τους 15°C στους 20°C, για $V=100\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 4.5%. Από τους 20°C στους 25°C, για $V=100\text{km/h}$, η αύξηση υπολογίζεται περίπου στο 0.15%.

5.3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

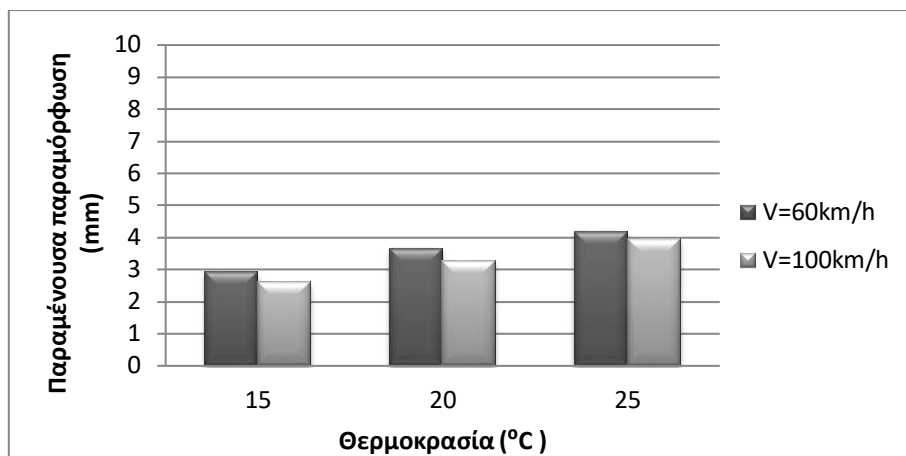
Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.41-5.43 οι μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων:



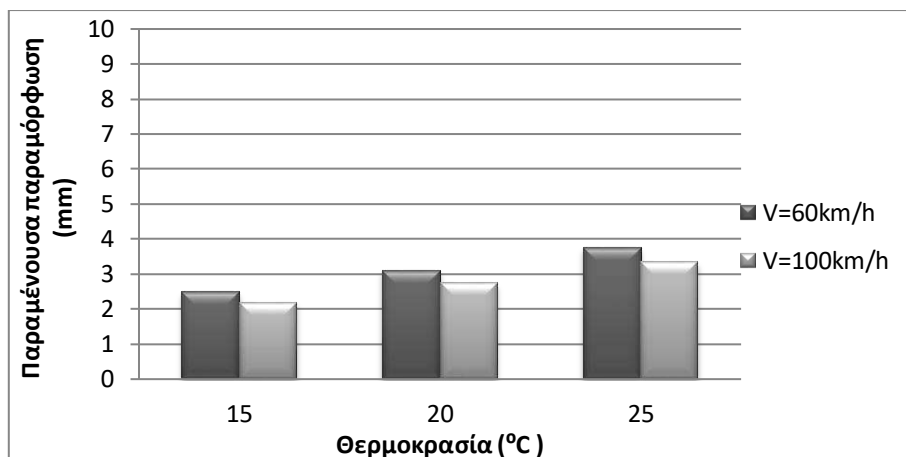
Εικόνα 5.41: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Υ1

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και της εικόνας 5.41, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Παρατηρείται, επίσης, ότι στους 15°C και στους 25°C υπάρχει μία μείωση της παραμόρφωσης όπως οι υπόλοιπες διατομές αλλά αντίθετα στους 20°C διακρίνεται μία μικρή αύξηση. Η μείωση κυμαίνεται περίπου στο 12% ενώ η αύξηση περίπου στο 6.5%.



Εικόνα 5.42: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y2

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και της εικόνας 5.42, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Καταγράφεται ότι η αύξηση της ταχύτητας από 60km/h σε 100km/h με σταθερή θερμοκρασία είτε στους 15°C, είτε στους 20°C οδηγεί σε μείωση της τάξης του 10%. Στη θερμοκρασία των 25°C η μείωση καταγράφεται στο 5.50%.

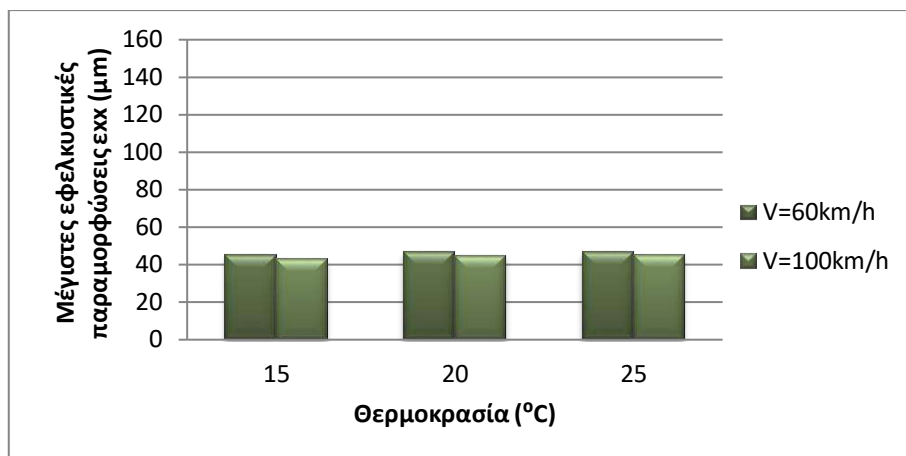


Εικόνα 5.43: Διάγραμμα μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης διατομής Y3

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7 και της εικόνας 5.43, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Η μείωση καταγράφεται περίπου στο 11% για όλες τις μεταβλητές θερμοκρασίες.

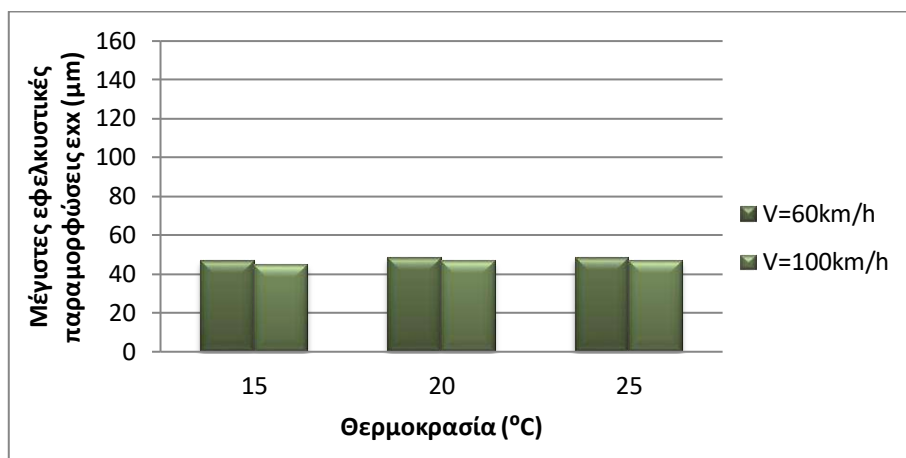
Αποτελέσματα εφελκυστικών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.44-5.46 οι μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:



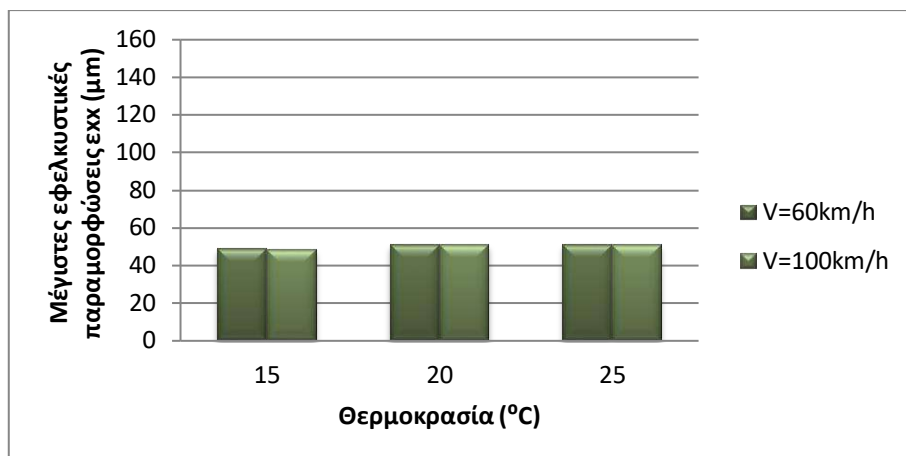
Εικόνα 5.44: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y1

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.10 και της εικόνας 5.44, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στη θερμοκρασία των 15°C, η μείωση κυμαίνεται στο 5.5%. Στις θερμοκρασίες 20°C και 25°C η μείωση κυμαίνεται στο 3.5%.



Εικόνα 5.45: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Y2

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.10 και της εικόνας 5.45, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στη θερμοκρασία των 15°C, η μείωση κυμαίνεται στο 5.5%. Στις θερμοκρασίες 20°C και 25°C η μείωση κυμαίνεται στο 3.5%.



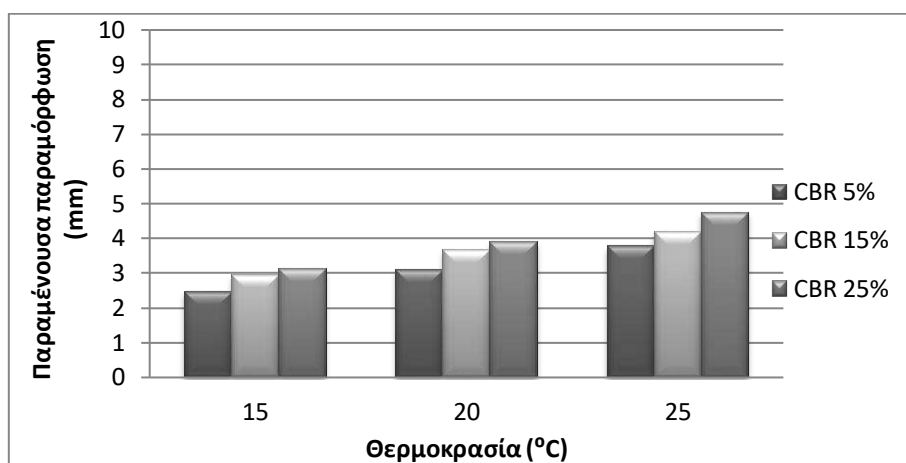
Εικόνα 5.46: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομής Υ3

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.10 και της εικόνας 5.46, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας, με δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Στις θερμοκρασίες 15°C και 20°C η μείωση κυμαίνεται στο 0.15%. Στη θερμοκρασία των 25°C η μείωση κυμαίνεται στο 0.5%.

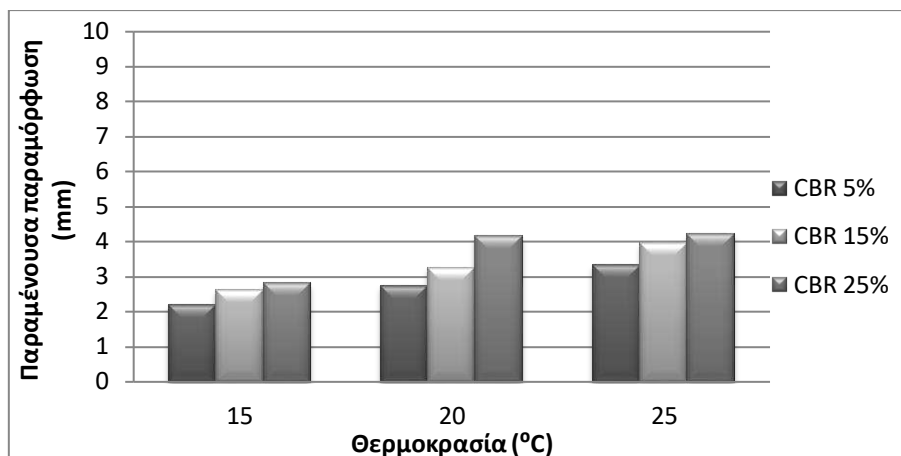
5.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.47 και 5.48 οι μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.47: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών Υ1, Υ2, Υ3 (V=60km/h)



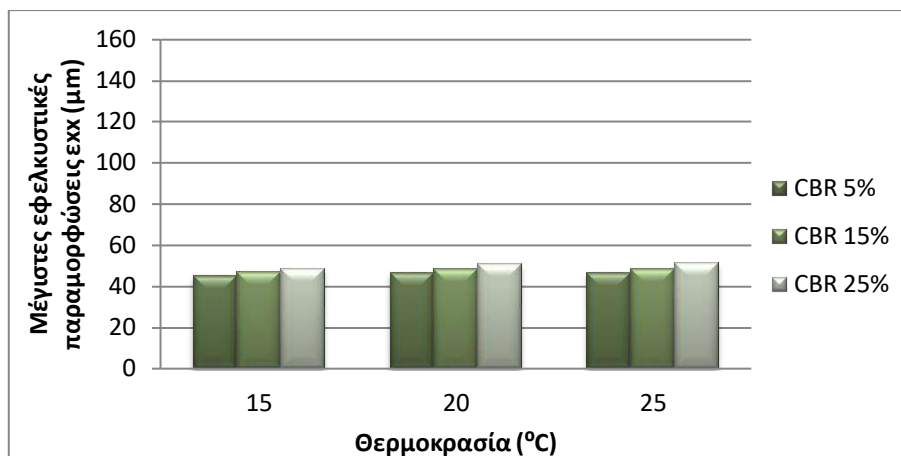
Εικόνα 5.48: Διάγραμμα μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων διατομών Y1, Y2, Y3 ($V=100\text{km/h}$)

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.7, 5.8, 5.9 και της εικόνας 5.47, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Στην περίπτωση των 15°C και 20°C , για $V=60\text{km/h}$, όπου ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15% παρατηρείται μία αύξηση γύρω στο 20%, ενώ στους 25°C η αύξηση καταγράφεται στο 12%. Στις αντίστοιχες θερμοκρασίες, 15°C και 20°C , όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25% η αύξηση που καταγράφεται περίπου στο 7%. Στην περίπτωση των 25°C , η αύξηση στις παραμένουσες παραμορφώσεις κυμαίνεται στο 12%.

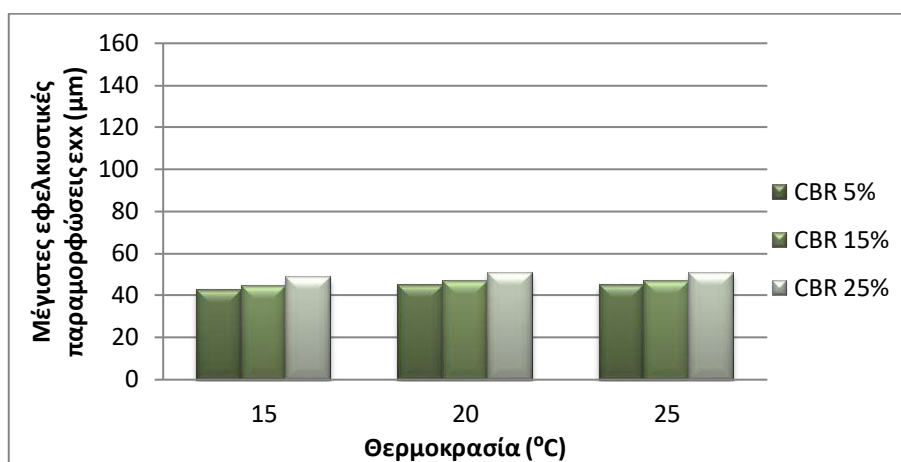
Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.7, 5.8, 5.9 και της εικόνας 5.48, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας με την αύξηση του δείκτη CBR από 5% σε 15%, για $V=100\text{km/h}$, καταγράφεται μία αύξηση περίπου της τάξεως του 20%. Στη θερμοκρασίες 15°C και 25°C , για $V=100\text{km/h}$, με την αύξηση της φέρουσας ικανότητας από 15% σε 25% παρατηρείται μία αύξηση 8%. Στη θερμοκρασία των 20°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 30%.

Αποτελέσματα μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.49 και 5.50 οι μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων:



Εικόνα 5.49: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών Υ1, Υ2, Υ3 (V=60km/h)



Εικόνα 5.50: Διάγραμμα μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων διατομών Υ1, Υ2, Υ3 (V=100km/h)

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.10, 5.11, 5.12 και της εικόνας 5.49, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για V=60km/h, στη θερμοκρασία 15°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 3.5%, στη θερμοκρασία 20°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 5% και στη θερμοκρασία 25°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 5.5%. Όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%, η αύξηση σε όλες τις μεταβλητές θερμοκρασίες κυμαίνεται στο 4%.

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 5.10, 5.11, 5.12 και της εικόνας 5.50, παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 5% σε 15%, για V=100km/h, στη θερμοκρασία 15°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 8.5% και στις

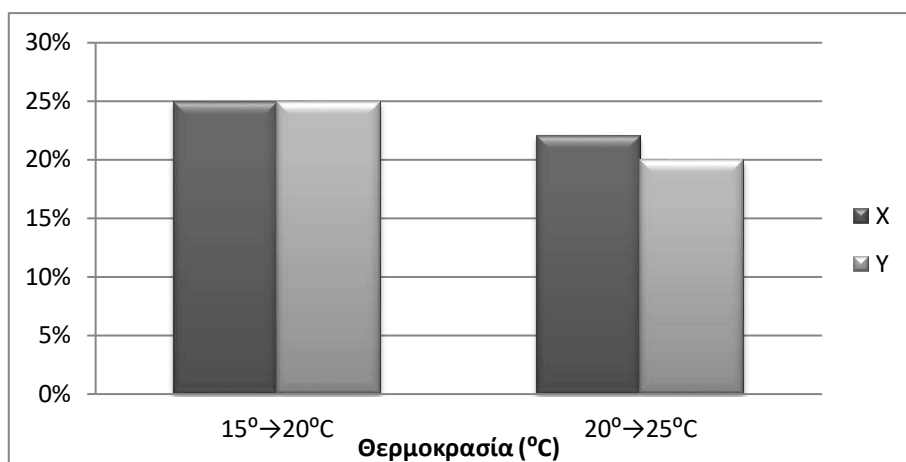
Θερμοκρασίες 20°C και 25°C η αύξηση καταγράφεται περίπου στο 8%. Όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%, για V=100km/h, η αύξηση σε όλες τις μεταβλητές θερμοκρασίες κυμαίνεται στο 4%.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

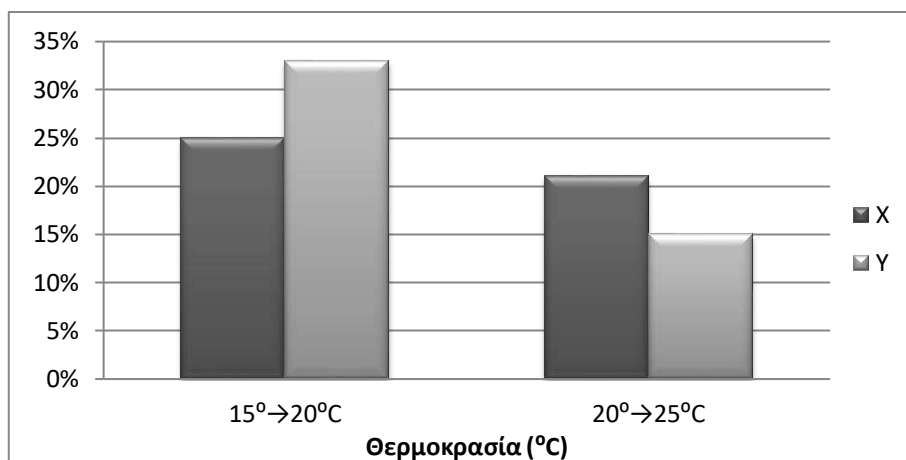
5.4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Παραμένουσες παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της θερμοκρασίας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.51 και 5.52 οι ποσοστιαίες μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:



Εικόνα 5.51: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης (V=60km/h)

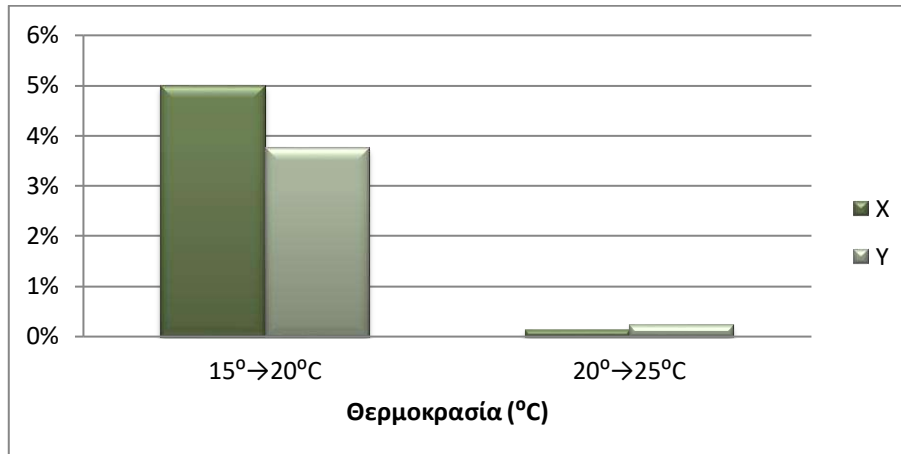


Εικόνα 5.52: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμένουσας παραμόρφωσης (V=100km/h)

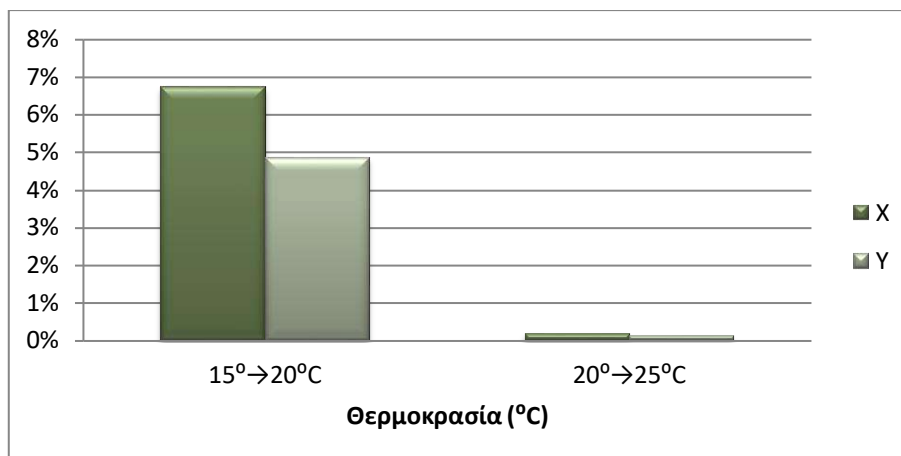
Με βάση την εικόνα 5.51 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε περίπου ίδιες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων τόσο στο χαμηλού όσο και στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, η αύξηση από 15°C σε 20°C οδηγεί στην ίδια ποσοστιαία μεταβολή των 25% και για τις δύο διατομές. Η αύξηση από 20°C σε 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 22% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 15% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Με βάση την εικόνα 5.52 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε περίπου ίδιες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων τόσο στο χαμηλού όσο και στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα. Συγκεκριμένα, η αύξηση από 15°C σε 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 25% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 33% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Η αύξηση από 20°C σε 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 21% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 15% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της θερμοκρασίας εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.53 και 5.54 οι ποσοστιαίες μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:



Εικόνα 5.53: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων ($V=60\text{km/h}$)



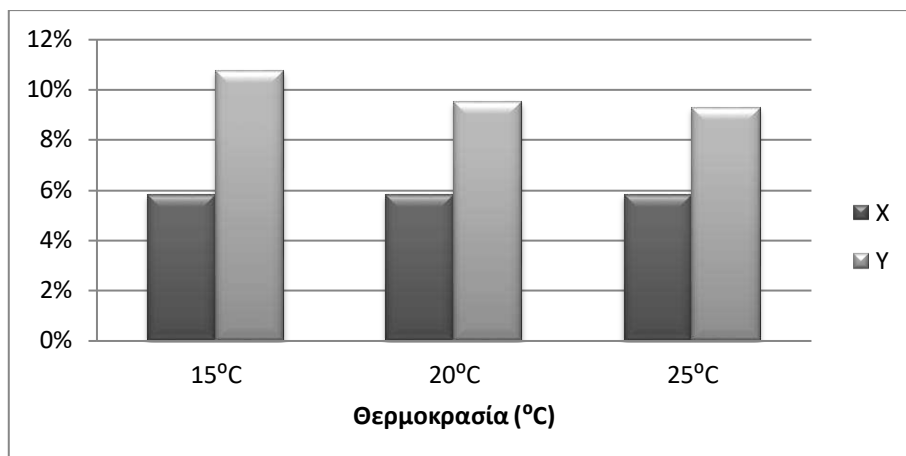
Εικόνα 5.54: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων ($V=100\text{km/h}$)

Με βάση την εικόνα 5.53 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε περίπου ίδιες ποσοστιαίες μεταβολές μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων τόσο στο χαμηλού όσο και στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα για τις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, η αύξηση από 15°C σε 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.75% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Η αύξηση από 20°C σε 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.13% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 0.23% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Με βάση την εικόνα 5.54 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, για $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε περίπου ίδιες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων τόσο στο χαμηλού όσο και στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα για τις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, η αύξηση από 15°C σε 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 6.75% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 4.88% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Η αύξηση από 20°C σε 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.19% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 0.12% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

5.4.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Παραμένουσες παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζεται στο διάγραμμα της εικόνας 5.55 οι ποσοστιαίες μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:

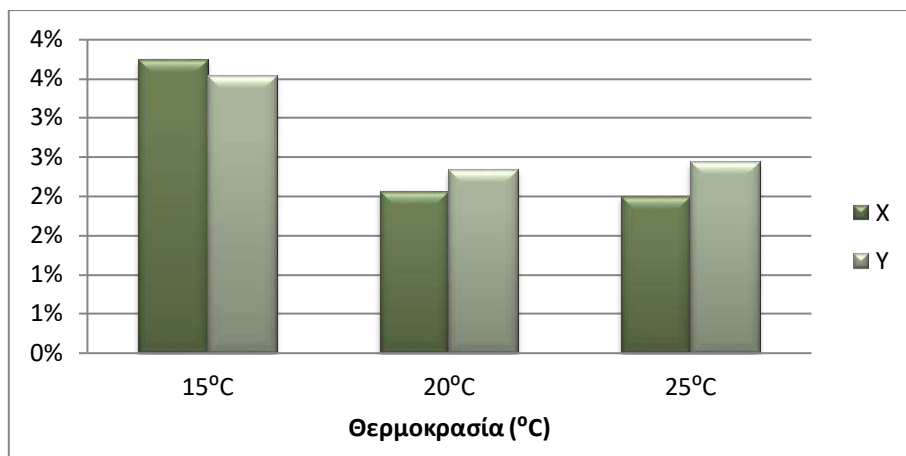


Εικόνα 5.55: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της παραμένουσας παραμόρφωσης με αύξηση της ταχύτητας

Με βάση την εικόνα 5.55 παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας, από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε περίπου διπλάσιες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα σε σχέση με το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5.83% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 10.76% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5.83% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 9.53% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5.83% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 9.31% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της ταχύτητας εμφανίζεται στο διάγραμμα της εικόνας 5.56 οι ποσοστιαίες μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:



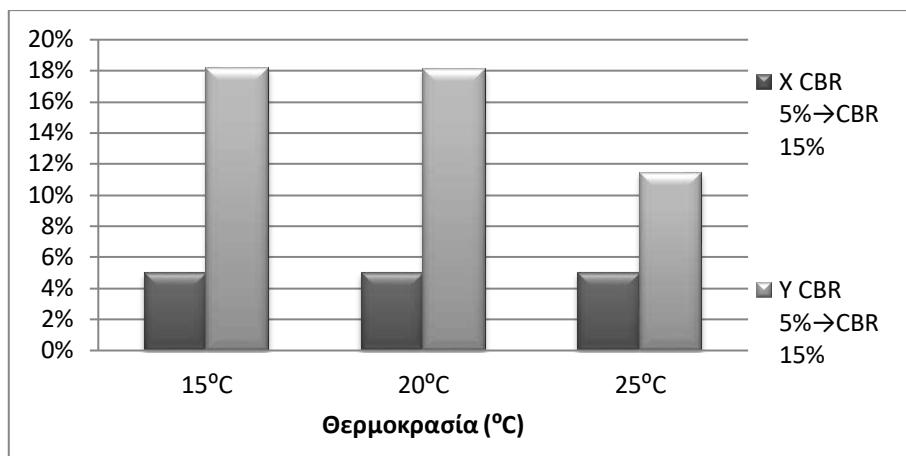
Εικόνα 5.56: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση της ταχύτητας

Με βάση την εικόνα 5.56 παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας, από 60km/h σε 100km/h, για δεδομένη θερμοκρασία, οδηγεί σε περίπου ίδιες ποσοστιαίες μεταβολές μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων τόσο για το χαμηλού όσο και για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 3.75% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.54% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 2.05% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 2.34% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 2% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 2.45% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

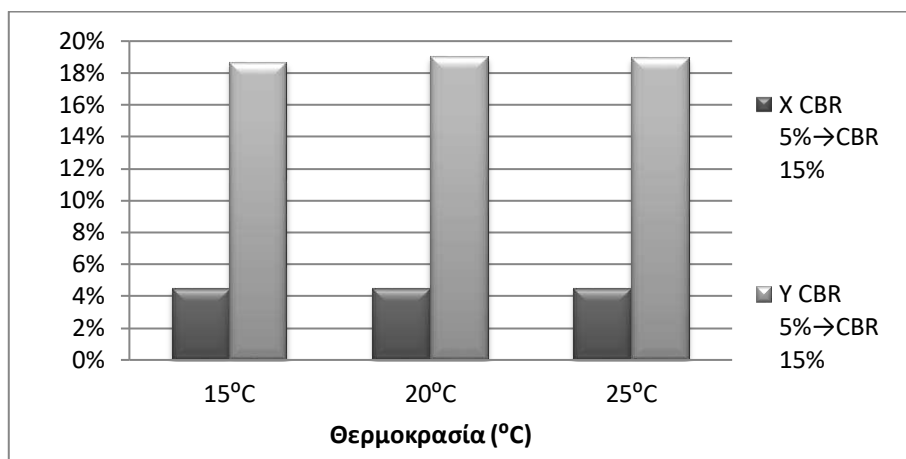
5.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Παραμένουσες παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.57-5.60 οι ποσοστιαίες μεταβολές των παραμενουσών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:



Εικόνα 5.57: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=60km/h)

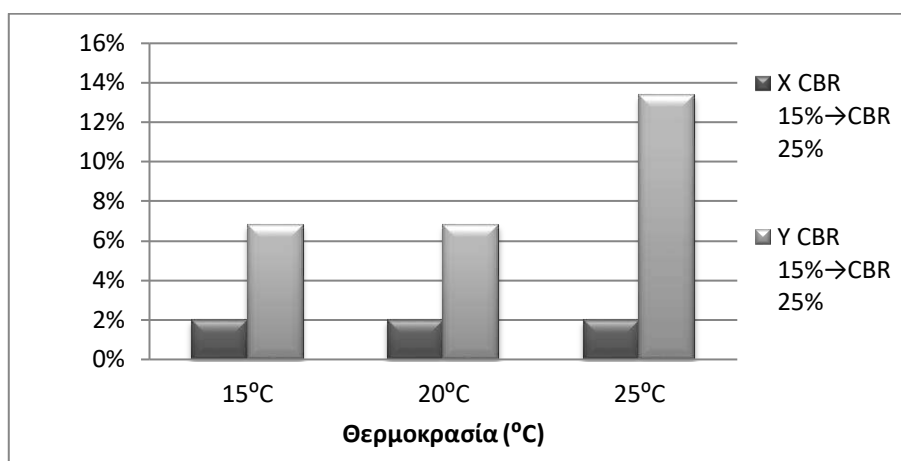


Εικόνα 5.58: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=100km/h)

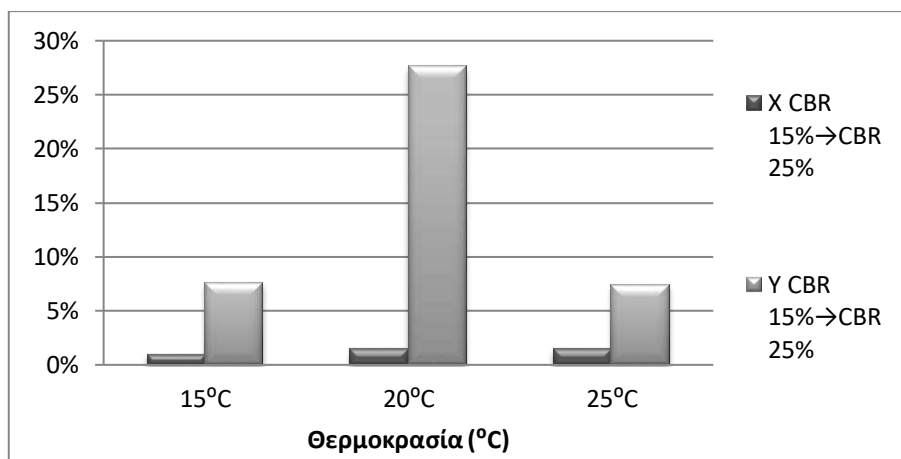
Με βάση την εικόνα 5.57 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλό σε σχέση με το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 18.15% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 18.10% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 11.44% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Με βάση την εικόνα 5.58 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες

μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλού σε σχέση με το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 4.5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 18.64% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 4.5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 18.98% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 4.5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 18.92% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.



Εικόνα 5.59: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=60km/h)



Εικόνα 5.60: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμενουσών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR (V=100km/h)

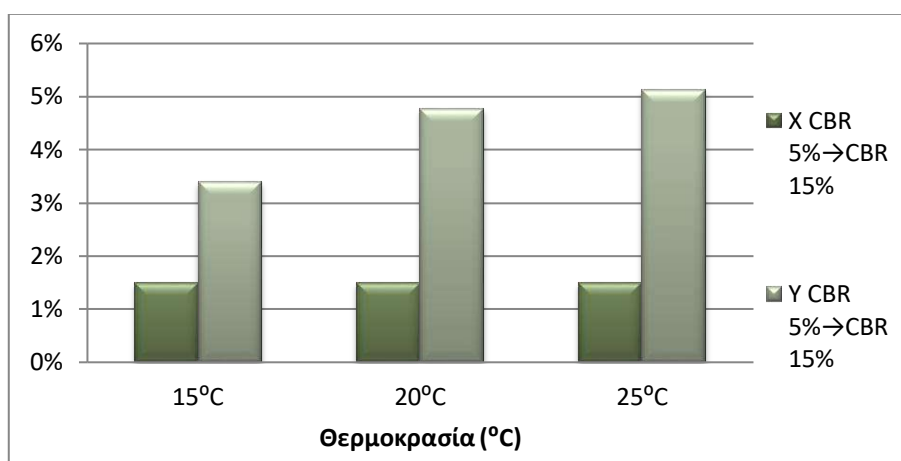
Με βάση την εικόνα 5.59 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και V=60km/h, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλού σε σχέση με το χαμηλού

κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 2% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 6.83% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 2% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 6.83% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 2% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 13.37% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

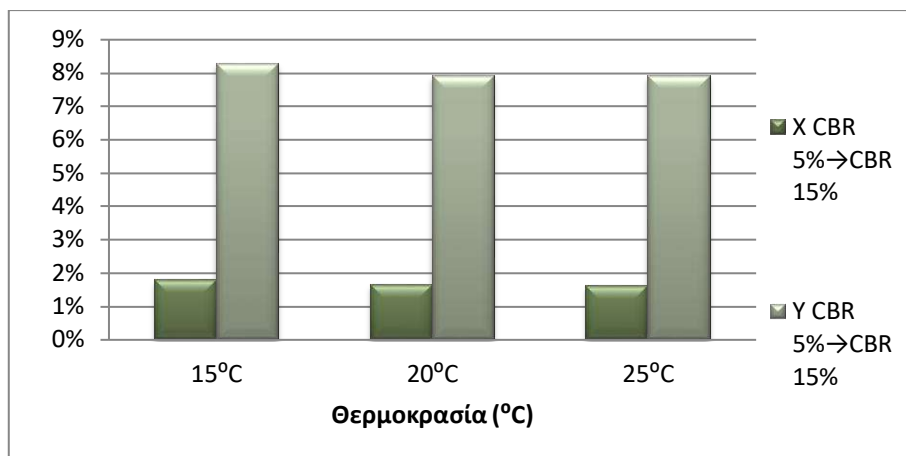
Με βάση την εικόνα 5.60 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλό σε σχέση με το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 7.66% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 27.61% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.5% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 7.33% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

Μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις:

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας έναντι της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.61-5.64 οι ποσοστιαίες μεταβολές των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων για τις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:



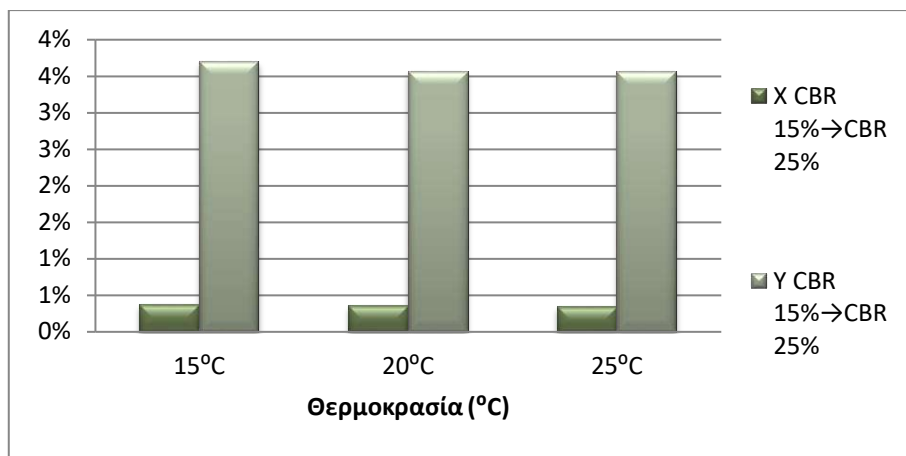
Εικόνα 5.61: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR ($V=60\text{km/h}$)



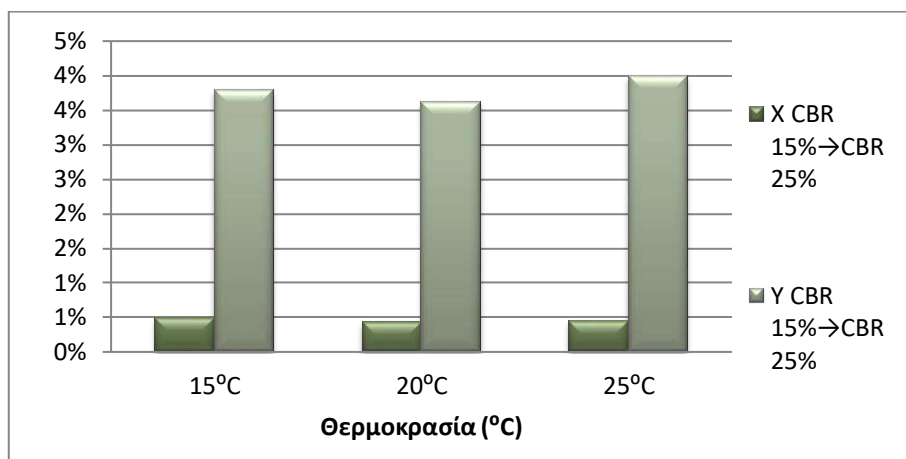
Εικόνα 5.62: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR ($V=100\text{km/h}$)

Με βάση την εικόνα 5.61 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων για το υψηλό σε σχέση με το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.50% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.40% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.5% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 4.78% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.5% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 5.13% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου.

Με βάση την εικόνα 5.62 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλό σε σχέση με το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.80% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 8.30% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.65% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 7.92% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 1.6% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 7.91% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου.



Εικόνα 5.63: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR ($V=60\text{km/h}$)



Εικόνα 5.64: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων με αύξηση δείκτη CBR ($V=100\text{km/h}$)

Με βάση την εικόνα 5.64 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=60\text{km/h}$, οδηγεί σε μεγαλύτερες ποσοστιαίες μεταβολές μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων για το υψηλό σε σχέση με το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.38% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.70% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.36% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.56% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.35% για το χαμηλό κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.56% για το υψηλό κυκλοφοριακού φόρτου.

Με βάση την εικόνα 5.65 παρατηρείται ότι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, για δεδομένη θερμοκρασία και $V=100\text{km/h}$, οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες ποσοστιαίες

μεταβολές παραμενουσών παραμορφώσεων για το υψηλού σε σχέση με το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα στις ίδιες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, στη θερμοκρασία των 15°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.50% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.80% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 20°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.43% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 3.63% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Στη θερμοκρασία των 25°C οδηγεί στην ποσοστιαία μεταβολή των 0.44% για το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και των 4% για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση επιμέρους παραμέτρων στη δυναμική ανάλυση για το σχεδιασμό των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Οι βασικές παράμετροι που αξιολογήθηκαν είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα του οχήματος και η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης. Για τη διερεύνηση του βαθμού επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων προσδιορίστηκαν δύο βασικές κατηγορίες που αφορούν σε χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα. Για την κάθε κατηγορία θεωρήθηκαν τρεις διατομές αναφοράς που διαφέρουν ως προς τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και το πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης. Στις διατομές αναφοράς πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας, αξιολογώντας τις μεταβολές των εντατικών μεγεθών στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν τα αποτελέσματα για τις παραμένουσες παραμορφώσεις και τις μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις για την ασφαλική στρώση στις διατομές χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών προέκυψε ότι οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις σε όλες τις διατομές για το οδόστρωμα χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου καταγράφονται στο κέντρο του φορτίου του τροχού. Αντίστοιχα, στις διατομές για το οδόστρωμα υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις καταγράφονται στη μέση των δύο τροχών.

Με βάση τα ανωτέρω από τις αναλύσεις ευαισθησίας προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Όσον αφορά το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα:

Ως προς τη θερμοκρασία, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις παρατηρείται ότι, για δεδομένη ταχύτητα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις παρατηρείται ότι, για δεδομένη ταχύτητα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μικρή αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα ασφατικά υλικά, λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς τους, παρουσιάζουν ευαισθησία στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τόσο σε επίπεδο αντοχής, όσο και παραμορφωσιμότητας. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατομίγματος μειώνεται με αποτέλεσμα τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές.

Ως προς την ταχύτητα, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί μικρή μείωση της παραμένουσας

παραμόρφωσης. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί εξίσου σε μικρή μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων συνδέεται με τη συχνότητα και το χρόνο φόρτισης. Μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης συνεπάγεται μεγαλύτερες συχνότητες φόρτισης και αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, με αποτέλεσμα τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα μεγέθη να λαμβάνουν μικρότερες τιμές.

Ως προς τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις παρατηρείται ότι όσο ο δείκτης CBR αυξάνεται, δηλαδή όσο κατευθυνόμαστε σε καλύτερη ποιότητα εδάφους υπάρχει μικρή αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Αυτό αν και παράδοξο αιτιολογείται από το γεγονός ότι η επιλογή μίας στρώσης έδρασης με μεγαλύτερο δείκτη CBR γίνεται στην πράξη με γνώμονα τη μείωση των παχών των υπερκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος που στην προκειμένη περίπτωση αφορά στη μείωση του πάχους της στρώσης βάσης/υπόβασης. Συνεπώς, φαίνεται ότι η μείωση του πάχους της στρώσης βάσης/υπόβασης προκαλεί τη σχετική αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων η οποία βέβαια είναι πολύ μικρής κλίμακας (περίπου 5%). Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι η αύξηση του δείκτη CBR, κατευθυνόμενοι δηλαδή σε καλύτερης ποιότητας έδαφος, οδηγεί σε αρκετά μικρή μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση που συνδέεται με την αυξημένη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης.

Όσον αφορά το οδόστρωμα υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου:

Ως προς τη θερμοκρασία, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις παρατηρείται ότι, για δεδομένη ταχύτητα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι, για δεδομένη ταχύτητα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μικρή αύξηση στις εφελκυστικές παραμορφώσεις. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα ασφαλτικά υλικά, λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς τους, παρουσιάζουν ευαισθησία στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τόσο σε επίπεδο αντοχής, όσο και παραμορφωσιμότητας. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μειώνεται με αποτέλεσμα τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές.

Ως προς την ταχύτητα, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μικρή μείωση των παραμενουσών παραμορφώσεων. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μικρή μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων συνδέεται με τη

συχνότητα και το χρόνο φόρτισης. Μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης συνεπάγεται μεγαλύτερες συχνότητες φόρτισης και αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, με αποτέλεσμα τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα μεγέθη να λαμβάνουν μικρότερες τιμές.

Ως προς τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, όσον αφορά τις παραμένουσες παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι η αύξηση του δείκτη CBR, δηλαδή όσο κατευθυνόμαστε σε καλύτερη ποιότητα εδάφους, οδηγεί σε μικρή αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Όπως και στην περίπτωση του οδοστρώματος χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου, αυτό αν και παράδοξο αιτιολογείται από το γεγονός ότι η επιλογή μίας στρώσης έδρασης με μεγαλύτερο δείκτη CBR γίνεται στην πράξη με γνώμονα τη μείωση των παχών των υπερκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος που στην προκειμένη περίπτωση αφορά στη μείωση του πάχους της στρώσης βάσης/υπόβασης. Συνεπώς, φαίνεται ότι η μείωση του πάχους της στρώσης βάσης/υπόβασης προκαλεί τη σχετική αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων που στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά σημαντική (περίπου 15-20%). Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι η αύξηση του δείκτη CBR, κατευθυνόμενοι δηλαδή σε καλύτερης ποιότητας έδαφος, οδηγεί σε αρκετά μικρή μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων για την ασφαλική στρώση που συνδέεται με την αυξημένη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης.

Σύγκριση μεταξύ χαμηλού και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδοστρωμάτων:

Ως προς τη θερμοκρασία, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις, η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε ίδιες περίπου ποσοστιαίες μεταβολές, τόσο για το χαμηλού όσο και για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, η αύξηση της θερμοκρασίας, για δεδομένη ταχύτητα, οδηγεί σε ίδιες περίπου ποσοστιαίες μεταβολές τόσο για το χαμηλού όσο και για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα, με βήμα αύξησης της θερμοκρασίας τους 5°C. Ειδικότερα, μικρότερα ποσοστά μεταβολής των μέγιστων εφελκυστικών παραμορφώσεων παρατηρούνται για αύξηση της θερμοκρασίας από 20°C στους 25°C.

Ως προς την ταχύτητα, όσον αφορά τις παραμένουσες παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε σχεδόν διπλάσιες μεταβολές στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα σε σχέση με το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, για δεδομένη θερμοκρασία, η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε ίδιες περίπου ποσοστιαίες μεταβολές τόσο στο υψηλού όσο και το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα.

Ως προς τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους, όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι η αύξηση του δείκτη CBR, κατευθυνόμενοι δηλαδή σε καλύτερης ποιότητας έδαφος, η ποσοστιαία μεταβολή (απομείωση) των παραμορφώσεων στο υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα είναι σχεδόν τριπλάσια συγκρίνοντας με το χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα. Όσον αφορά στις εφελκυστικές παραμορφώσεις, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο δείκτης CBR, οι ποσοστιαίες μεταβολές των εφελκυστικών παραμορφώσεων του υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδοστρώματος είναι σχεδόν τριπλάσιες από τις αντίστοιχες του χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδοστρώματος. Σε όλες τις παραμορφώσεις μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται όταν ο δείκτης CBR αυξάνεται από 15% σε 25%.

Συνοψίζοντας ως προς τα ανωτέρω προκύπτει γενικά ότι τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στο χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα είναι πολύ μεγαλύτερα, για όλες τις παραμέτρους, σε σχέση με τα αντίστοιχα για το υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω των χαρακτηριστικών των αντίστοιχων διατομών. Από την άλλη οι μικρές ποσοστιαίες μεταβολές των εντατικών μεγεθών στο χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου οδόστρωμα, λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, υποδεικνύουν ότι ενδεχομένως δεν έχει νόημα η θεώρηση δυναμικής φόρτισης στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας, όπως είναι για παράδειγμα σε δευτερεύουσες οδούς. Αντίθετα σε οδοστρώματα υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου, όπως είναι για παράδειγμα σε υπεραστικούς αυτοκινητοδρόμους, η θεώρηση της δυναμικής φόρτισης μπορεί να διασφαλίσει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων, συνυπολογίζοντας τις πραγματικές συνθήκες θερμοκρασίας και κυκλοφορίας, με θεώρηση πάντα της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης.

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας, προτάσεις για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Αναλύσεις ευαισθησίας σε διατομές ευκάμπτων οδοστρωμάτων, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 25°C) ή σε πολύ χαμηλές (κάτω των 15°C).
- Αναλύσεις ευαισθησίας για την επίδραση της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος υπό δυναμική ανάλυση.
- Αναλύσεις ευαισθησίας για την επίδραση στην κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων υπό την επίδραση της δυναμικής ανάλυσης

7 Βιβλιογραφία

AASHTO. (1993). Guide for design for pavement structure. Washington D.C.: Highway research board.

ABAQUS. (2011). ABAQUS 6.11.Analysis user's manual. U.S.A.: Karlsson & Sorensen.

Acikgoz, O., & Rauf, R. (2010). Analysis of parameters affecting permanent deformation in road pavement. Sweden: Chalmers university of technology.

Al-Qadi, I., Yoo, P. J., Hao, W., & Dessouky, S. (2007). Dynamic analysis and in situ validation of perpetual pavement response to vehiicular loading. In . University of Illinois at Urbana-Champaign: Advances Transportation research and engineering laboratory, Department of civil and environmental engineering.

ANSYS. (2010). ANSYS User's guide release 13. Canonsburg: Southpointe Technology Drive.

Association, T. M. (2008). Hot mix asphalt pavement design guide. Fallston: P/T Enterprises.

Beskou, N., & Theodorakopoulos, D. (2011). Dynamic effects of moving loads on road pavements. Soil dynamics and earthquake engineering.31(4), 547-567.

Bilgiri, K., & Way, G. (2014). Noise-damping characteristics of different pavement surface wearing courses. Road materials and pavement design.15 (4), 925-941.

Boussinesq, J. (1885). Applications des potentiels a l' etude de l' equilibre et du mouvement des solides elastiques. Paris: Gauthier Villars.

Burmister, D. (1958). Evaluation of pavement systems of the WASHO road test by layered systems method. Bulletin, 177 (1) , 26-54.

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.

Cebon, D. (1986). Road damaging effects of dynamic axle loads. Transportation research record:International symposium on heavy vehicle weights and dimensions.

Chen, J.-S., Huang, C.-C., & Chang, Y.-J. (2009). Mechanical responses and modeling of rutting in flexible pavements. Vol.7 (The 8th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies,2009), Taiwan, 1475-1490

- Cheng, L. O., Newcombe, D., & Siddharthan, R. (2009).** Comparison of dynamic and static back calculation moduli for three-layer pavements. *Transportation Research Record*.1293 (9), 86-92.
- Christensen, R. (1982).** Theory of viscoelasticity. New York: Lawrence Livermore National Laboratory and Stanford University.
- Clyde, E. L., & Machemehl, R. (1974).** Dynamic traffic loading of pavements. Texas: University of Texas.
- Cook, M. P. (1989).** Concepts and applications of finite element analysis.
- Darter, M. I., & Hudson, R. W. (1973).** Probabilistic design concepts applied to flexible pavement system design. Texas: University of Texas.
- EAPA, E. A. (2014).** The use of warm mix asphalt. Brussels: European Asphalt Pavement Association.
- Evandro, P. J., Holanda, A., Pereira de Araujo, T., & Soares, J. (2006).** Dynamic analysis of asphalt pavements. XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering.
- Ghanizadeh, A. R., & Fakhri, M. (2017).** Quasi-static analysis of flexible pavements based on predicted frequencies using fast Fourier transform and artificial neural network. *International journal of pavement research and technology*.11 (1) , 47-57.
- Hao Wang, E. T. (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.
- Hao Wang, I. L. (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 (1) , 53-61.
- Huang, B., Chan, C. Y., Yan, X., & Richards, S. (2009).** Relationship between highway pavement condition, crash frequency and crash type. *Journal of transportation safety & security*.1 (4), 268-281.
- Huang, Y. (2004).** Pavement analysis and design, second edition. University of Kentucky: Upper Saddle River.
- Khavasefat, P., Jelagin, D., & Birgisson, B. (2014).** Dynamic response of flexible pavements at vehicle-road interaction. *Road materials and pavement design*.16 (2) , 256-276.

Khavasfati, P. (2014). Pavement response to moving loads. *Road Materials and Pavement Design*. 2 (3), 263-282.

Khavasfati, P., Jelagin, D., & Birgisson, B. (2012). A computational framework for viscoelastic analysis of flexible pavements under moving loads. *Materials and structures*. 45 (1), 1655-1671.

Kim, M., Phan, T. H., Le, V. P., & Lee, H. J. (2017). Calibration and validation of a rutting model based on shear stress to strength ratio for asphalt pavements. *Construction and Building Materials*. 149 (1), 327-337.

Lakes, R. S. (1999). Viscoelastic solids. Wisconsin: University of Wisconsin.

Lee, J., Kim, J., & Tassoulas, J. (2013). Dynamic analysis of a layered half-space subjected to moving line loads. *Soil dynamics and earthquake engineering*. 47 (1), 16-31.

Liao, J., & Sargand, S. (2010). Viscoelastic FE modeling and verification of a U.S. 30 perpetual pavement test section. *Road Materials and Pavement Design*. 11 (3), 993-1008.

Lombaert, D. C. (2004). The non-stationary freefield response for a moving load with a random amplitude. *Journal of sound and vibration*. 278 (3), 611-635.

Lombaert, D. (2001). Study of determining factors for traffic induced vibrations in buildings. Katholieke Universiteit Leuven.

LS-DYNA. (2007). Keyword user's manual volume. Volume I. Version 971. California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Lu, Z., & Yao, H. (2013). Effects of the dynamic vehicle-road interaction on the pavement vibration due to road traffic. *Journal of Vibroengineering*. 15 (3), 1291-1301.

Mishalani, R., & Madanta, S. (2002). Computation of infrastructure probabilities using stochastic duration models. *Journal of infrastructure systems*. 8 (4), 1076-1084.

Molenaar, A. (2006). Structural evaluation and strengthening of flexible pavements using deflection measurements and visual condition surveys. *Structural design of pavements*. CT 4860 (Part IV).

Monismith, C. (2012). Flexible pavement analysis and design-A half century of achievement. GeoCongress. Oakland, California: Geotechnical engineering state of the art and practice.

Mugdha, P. (2001). How to design flexible pavements: top 4 methods/Transportation engineering.

Muller, K. (2000). Directives for the standardisation of pavements for traffic areas. Malta: Ministry for transport and communications.

Odemark, N. (1949). Investigations as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity. Sweden: Transportation Research Record.

Paterson, W. D. (1987). Road deterioration and maintenance effects-models for planning and maintenance standards series. Public disclosure authorized.

Saevarsdottir, T., & Erlingsson, S. (2014). Modelling of responses and rutting profile of a flexible pavement structure in a heavy vehicle simulator. Road materials and pavement design. 16 (1), 1-18.

Sawant, V. (2008). Dynamic analysis of rigid pavement with vehicle-pavement interaction. International journal of pavement engineering. 10(1), 63-72.

Seyyedmahdi, N. (2015). 3D Move Simulation of TSDDs for Pavement Characterizations. Reno: University of Nevada.

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

Yanking, Z., Ni, Y., Lei, W., & Weiqiao, Z. (2014). Viscoelastic response solutions of multilayered asphalt pavements. Journal of engineering mechanics.140 (10) , 1943-7889.

Yoo, P. J., Al-Qadi, I., Hao, W., & 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.

Yun, K. C. (1996). Sapsi-M:Computer program for analyzing asphalt concrete pavements under moving arbitrary load. Transportation research record:Journal transportation research board.1539 (1), 88-95.

Zubeck, H., & Dore, G. (2008). Cold regions pavement engineering. Reston: American society of civil engineers.

Λοΐζος, Α., & Πλατή, Χ. (2016). Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα.Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Sites

<http://www.arc.unr.edu/software.html>

<http://www.asphaltinstitute.org/>

<https://epa.org/>

<https://highways.dot.gov/>