



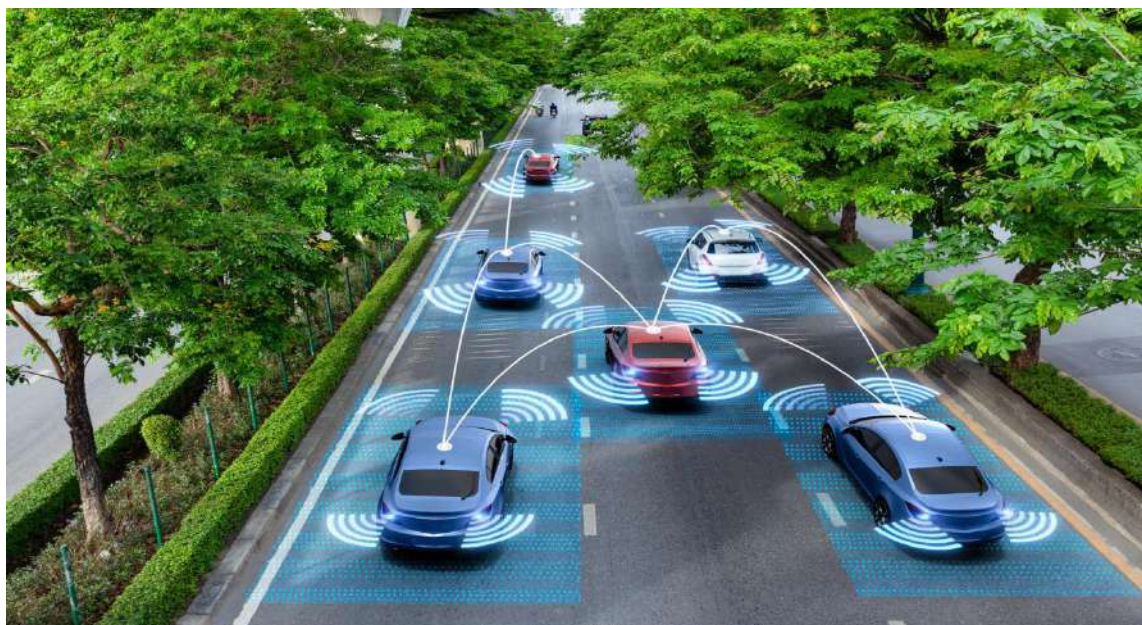
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

### Διπλωματική Εργασία

## Διερεύνηση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων



Κλάδου Βάγια-Μαρία

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά την κα. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την άριστη συνεργασία και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Κωνσταντίνα Γεωργούλη, Διδάκτορα Μηχανικό του Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της παρούσας Εργασίας καθώς και για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας και επικοινωνίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την κατανόηση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ενώ η εξέλιξη της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων την τελευταία δεκαετία είναι ραγδαία, ο αντίκτυπος τους στην μηχανική συμπεριφορά των υφιστάμενων οδοστρωμάτων είναι ασαφής. Λαμβάνοντας υπόψη τους αυξημένους οικονομικούς πόρους που απαιτούνται για τη συντήρηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, η ανάγκη διερεύνησης της επιρροής των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στα οδοστρώματα κρίνεται επείγουσα. Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των συμβατικών και των αυτόνομων βαρέων οχημάτων είναι η πλευρική μετατόπιση του τροχού, όπου στην περίπτωση των αυτόνομων αναμένεται να είναι μηδενική. Δεδομένων τούτων, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στην κόπωση των ασφαλικών στρώσεων υφιστάμενων οδοστρωμάτων, μέσω πειραματικής ανάλυσης δύο εύκαμπτων διατομών με 56 διαφορετικούς συνδυασμούς δομής της ασφαλικής στρώσης (διακύμανση πάχους και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων). Η πλευρική μετατόπιση προσομοιώνεται με βάση τρεις μαθηματικές κατανομές: τη μηδενική, την κανονική και την ομοιόμορφη κατανομή. Υπολογίζεται για κάθε πειραματική διατομή, κάθε δυνατό συνδυασμό πάχους – μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικής στρώσης και κατανομή προσομοίωσης, η κόπωση των ασφαλικών στρώσεων μέσω του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας.

Λέξεις κλειδιά: Αυτόνομα βαρέα οχήματα, Πλευρική μετατόπιση τροχού, Επίδραση υπαρχόντων οδοστρωμάτων, Κόπωση ασφαλικών στρώσεων-Ρηγμάτωση.

## **ABSTRACT**

While the evolution of autonomous vehicle technology in the last decade is rapid, their impact on the mechanical behavior of existing pavement infrastructure is unclear. Taking into consideration the increased financial resources required to maintain existing pavements, the need to understand the impact of autonomous trucks on pavement infrastructure is urgent. The main difference between conventional and autonomous trucks is the lateral displacement of the wheel, where in the case of autonomous trucks is expected to be zero (zero wheel wander). The aim of the present diploma thesis is to better understand the effect of wheel wander on the fatigue of the asphalt layers of existing pavement infrastructure. This is accomplished through experimental analysis of two flexible pavement structures with 56 different combinations of asphalt layer structure (variation of thickness and stiffness of the asphalt layer). The wheel wander is simulated based on three mathematical distributions: zero, normal and uniform distribution. Fatigue cracking is quantified for each pavement infrastructure, combination and distribution.

Key words: Autonomous trucks, Wheel wander, Impact on existing pavement infrastructure, Fatigue cracking.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Στόχος-Μεθοδολογία .....	2
1.3 Δομή .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....	4
2.1 Γενικά .....	4
2.2 Τεχνολογία .....	5
2.3 Πλεονεκτήματα.....	7
2.4 Αυτόνομα οχήματα και οδοστρώματα.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ .....	11
3.1 Γενικά .....	11
3.2 Επίδραση της πλευρικής μετατόπισης στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων .....	12
3.2.1 Συμπεριφορά οδοστρώματος υπό την επίδραση φόρτισης.....	12
3.2.2 Η πλευρική μετατόπιση τροχού ως παράμετρος σχεδιασμού.....	17
3.2.3 Επίδραση της μετατόπισης τροχού στις βασικές μορφές αστοχίας του οδοστρώματος.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	27
4.1 Πειραματικές διατομές .....	27
4.2 Κυκλοφορία σχεδιασμού .....	28
4.3 Κατανομές για την προσομοίωση της πλευρικής μετατόπισης τροχού .....	29
4.4 Ανάλυση οδοστρωμάτων .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	37
5.1 Πειραματική Διατομή - Δ1.....	37
5.1.1 Μηδενική κατανομή .....	37
5.1.2 Κανονική κατανομή .....	39
5.1.3 Ομοιόμορφη κατανομή.....	41
5.2 Πειραματική Διατομή - Δ2.....	44
5.2.1 Μηδενική κατανομή .....	44



5.2.2	Κανονική κατανομή.....	46
5.2.3	Ομοιόμορφη κατανομή.....	48
5.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	50
5.4	Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	52
5.4.1	Πειραματική Διατομή - Δ1 .....	52
5.4.2	Πειραματική Διατομή - Δ2 .....	55
5.4.3	Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	59
5.5	Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη θεώρηση της πλευρικής μετατόπισης ....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....		63
6.1	Συμπεράσματα.....	63
6.2	Περαιτέρω έρευνα.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		67

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Απεικόνιση αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο .....	4
Εικόνα 2.2: Επίπεδα αυτονομίας.....	5
Εικόνα 2.3: Σύστημα αντίληψης.....	7
Εικόνα 2.4: Ασύρματη επικοινωνία των χρηστών της οδού .....	8
Εικόνα 2.5: Αύξηση του διαθέσιμου χρόνου για τον άνθρωπο.....	9
Εικόνα 2.6: Νέες προοπτικές μετακίνησης .....	9
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού .....	11
Εικόνα 3.2: Δομή τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος .....	13
Εικόνα 3.3: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος.....	13
Εικόνα 3.4: Ρωγμές λόγω κόπωσης ασφαλτικών στρώσεων .....	14
Εικόνα 3.5: Απεικόνιση της παραμένουσας παραμόρφωσης στο οδόστρωμα ...	16
Εικόνα 3.6: Συσχέτιση πλευρικής μετατόπισης τροχού με τη φθορά .....	19
Εικόνα 4.1: Πειραματική διατομή 1-Δ1 .....	27
Εικόνα 4.2: Πειραματική διατομή 2-Δ2 .....	27
Εικόνα 4.3: Απεικόνιση τυπικού αξονικού φορτίου .....	28
Εικόνα 4.4: Απεικόνιση του οχήματος στη λωρίδα για μηδενική μετατόπιση του τροχού.....	29
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα τυποποιημένης κανονικής κατανομής.....	30
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα κανονικής κατανομής-Μεθοδολογία.....	30
Εικόνα 4.7: Θέσεις πλευρικής μετατόπισης τροχού-κανονική κατανομή.....	31
Εικόνα 4.8: Διάγραμμα ομοιόμορφης κατανομής.....	32
Εικόνα 4.9: Εναπομένον πλάτος για πλευρική μετατόπιση στην ομοιόμορφη κατανομή.....	32
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα ομοιόμορφης κατανομής-Μεθοδολογία .....	33
Εικόνα 4.11: Θέσεις πλευρικής μετατόπισης τροχού-ομοιόμορφη κατανομή....	33
Εικόνα 5.1 : D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1) .....	37

Εικόνα 5.2 : F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1) .....	38
Εικόνα 5.3 : D(%)-Κανονική κατανομή(Δ1).....	39
Εικόνα 5.4 : F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ1) .....	40
Εικόνα 5.5 : D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1) .....	42
Εικόνα 5.6 : F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1) .....	43
Εικόνα 5.7 : D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2) .....	44
Εικόνα 5.8 : F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2) .....	45
Εικόνα 5.9 : D(%)-Κανονική κατανομή(Δ2).....	46
Εικόνα 5.10 : F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ2) .....	47
Εικόνα 5.11 : D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2) .....	48
Εικόνα 5.12 : F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2).....	49
Εικόνα 5.13 : Διαφορά του $D_{\Delta 1}$ -(M-O) .....	52
Εικόνα 5.14 : Διαφορά του $D_{\Delta 1}$ -(M-O) .....	53
Εικόνα 5.15 : Διαφορά του $D_{\Delta 1}$ -(M-K).....	53
Εικόνα 5.16 : Διαφορά του $D_{\Delta 1}$ -(M-K).....	53
Εικόνα 5.17 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 1}$ -(M-O) .....	54
Εικόνα 5.18 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 1}$ -(M-O) .....	54
Εικόνα 5.19 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 1}$ -(M-K).....	55
Εικόνα 5.20 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 1}$ -(M-K).....	55
Εικόνα 5.21 : Διαφορά του $D_{\Delta 2}$ -(M-O) .....	56
Εικόνα 5.22 : Διαφορά του $D_{\Delta 2}$ -(M-O) .....	56
Εικόνα 5.23 : Διαφορά του $D_{\Delta 2}$ -(M-K).....	57
Εικόνα 5.24 : Διαφορά του $D_{\Delta 2}$ -(M-K).....	57
Εικόνα 5.25 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 2}$ -(M-O) .....	57
Εικόνα 5.26 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 2}$ -(M-O) .....	58
Εικόνα 5.27 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 2}$ -(M-K).....	58
Εικόνα 5.28 : Διαφορά του $F.C_{\Delta 2}$ -(M-K).....	59

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Βασικά στοιχεία ερευνών για πλευρική μετατόπιση τροχού .....	23
Πίνακας 5.1 : Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1) .....	37
Πίνακας 5.2 : Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1) .....	38
Πίνακας 5.3 : Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1).....	38
Πίνακας 5.4 : Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1).....	39
Πίνακας 5.5 : Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ1) .....	40
Πίνακας 5.6 : Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ1) .....	40
Πίνακας 5.7 : Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ1) .....	41
Πίνακας 5.8 : Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ1) .....	41
Πίνακας 5.9 : Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1).....	42
Πίνακας 5.10 : Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1).....	42
Πίνακας 5.11 : Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1) .....	43
Πίνακας 5.12 : Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1) .....	43
Πίνακας 5.13 : Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2) .....	44
Πίνακας 5.14 : Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2) .....	45
Πίνακας 5.15 : Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1) .....	45
Πίνακας 5.16 : Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2) .....	46
Πίνακας 5.17 : Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ2) .....	47
Πίνακας 5.18 : Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ2) .....	47
Πίνακας 5.19 : Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ2) .....	48
Πίνακας 5.20 : Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ2) .....	48
Πίνακας 5.21 : Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2).....	49
Πίνακας 5.22 : Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2).....	49
Πίνακας 5.23 : Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2) .....	50
Πίνακας 5.24 : Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2) .....	50
Πίνακας 5.25 : Στατιστικά αποτελέσματα- Δ1 .....	61
Πίνακας 5.26 : Στατιστικά αποτελέσματα-Δ2.....	61



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Δεδομένων της συνεχούς έρευνας και των επενδύσεων στο τομέα των αυτόνομων οχημάτων, αναμένεται πως τα αυτόνομα οχήματα θα εισαχθούν στο οδικό δίκτυο στο εγγύς μέλλον. Παρά τα οφέλη των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια, στην οικονομία και στο περιβάλλον, οι επιπτώσεις των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στη μηχανική συμπεριφορά των υφιστάμενων οδοστρωμάτων δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Λαμβάνοντας υπόψη πως τα οδοστρώματα αποτελούν πάγιο περιουσιακό στοιχείο κάθε χώρας και παράλληλα απαιτούν αυξημένους οικονομικούς πόρους για συντήρηση, είναι επιτακτική ανάγκη να προσδιοριστεί πλήρως η επίδραση των αυτόνομων οχημάτων στη δομική επάρκεια των υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

Ο χρόνος ζωής των οδοστρωμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένος με την κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων. Τα αυτόνομα βαρέα οχήματα αναμένεται να μεταβάλλουν τις συνθήκες φόρτισης των υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, εξαιτίας των λειτουργιών που διαθέτουν, με βασικότερη τη λειτουργία διατήρησης πορείας κίνησης (lane centering-lane keeping), έχουν τη δυνατότητα να κινούνται στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας, χωρίς ο τροχός τους να μετατοπίζεται πλευρικά στο πλάτος αυτής. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η επαναλαμβανόμενη φόρτιση του οδοστρώματος σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος της λωρίδας. Δεδομένων των παραπάνω, αναμένεται πρόωρη εμφάνιση αστοχιών στα υφιστάμενα οδοστρώματα είτε με τη μορφή ρηγματώσεων (fatigue cracking), είτε με τη μορφή παραμενουσών παραμορφώσεων (pavement deformation-rutting). Παράλληλα πιθανολογείται μείωση του χρόνου ζωής των υφιστάμενων οδοστρωμάτων καθώς και επιδείνωση της οδικής ασφάλειας και του επιπέδου εξυπηρέτησης που προσφέρουν.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία έχει αποδειχθεί πως ο παράγοντας της πλευρικής μετατόπισης τροχού επηρεάζει έντονα τη μηχανική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Μέσω ερευνών (Noorvand et al, 2017; Zhou et al, 2019; Chen et al, 2019) έχει αποδειχθεί πως η μηδενική μετατόπιση τροχού προκαλεί τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στα οδοστρώματα, αυξάνοντας τόσο την ρηγμάτωση όσο και την παραμένουσα παραμόρφωση που παρατηρείται στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Δεδομένου ότι τα αυτόνομα οχήματα προσφέρουν τη δυνατότητα ρύθμισης της πλευρικής μετατόπισης τροχού μέσω εξελιγμένων συστημάτων προγραμματισμού, διερευνάται η κατάλληλη μαθηματική κατανομή βάσει της οποίας είναι δυνατό να προσομοιωθεί η πλευρική μετατόπιση τροχού. Έχει προκύψει βιβλιογραφικά πως η ομοιόμορφη κατανομή είναι αυτή που επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα στα οδοστρώματα τόσο σε όρους κόπωσης (ρηγμάτωση), όσο και παραμενουσών παραμορφώσεων, χρησιμοποιώντας αποτελεσματικότερα το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας για πλευρική μετατόπιση τροχού.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των προαναφερθέντων ερευνών, σχετικά με την επιρροή της πλευρικής μετατόπισης τροχού στις βασικές μορφές αστοχίας των οδοστρωμάτων, παρουσιάζουν αποκλίσεις. Αυτές μπορούν να αποδοθούν τόσο στη διατομή οδοστρώματος που μελετήθηκε (πάχος, μηχανικά χαρακτηριστικά, υλικά), όσο και στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα εξαιτίας των αξονικών φορτίων κυκλοφορίας.

## **1.2 Στόχος-Μεθοδολογία**

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η σαφέστερη κατανόηση της επιρροής του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης τροχού στην κόπωση των ασφαλικών στρώσεων των οδοστρωμάτων μέσω πειραματικής ανάλυσης.

Για την επίτευξη του στόχου προηγείται μια ενδελεχής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά στα αυτόνομα οχήματα και την επίδραση τους στα οδοστρώματα. Για την ανάλυση επιλέγονται δύο εύκαμπτες πειραματικές διατομές διαφορετικές ως προς τη στρώση έδρασης, με τη δεύτερη να εδράζεται σε μικρότερης φέρουσας ικανότητας γεωτεχνική υποδομή. Ταυτόχρονα, και στις δύο διατομές, μεταβάλλεται τόσο το πάχος, όσο και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης. Σκοπός της επιλογής αυτής είναι η δυνατότητα εξαγωγής γενικευμένων συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της πλευρικής μετατόπισης τροχού τόσο στη φθορά, όσο και στο ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας, με πεδίο εφαρμογής διαφοροποιημένες διατομές οδοστρώματος. Κατά την πειραματική ανάλυση, η πλευρική μετατόπιση προσομοιώνεται για τρεις κατανομές: τη μηδενική (αναμενόμενη κατανομή αυτόνομων βαρέων οχημάτων), την κανονική (υφιστάμενη κατανομή συμβατικών βαρέων οχημάτων) και την ομοιόμορφη (προτεινόμενη κατανομή αυτόνομων βαρέων οχημάτων).

Επισημαίνεται ότι απώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη θεώρηση του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης στο σχεδιασμό νέων και στην αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

## **1.3 Δομή**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων, καθώς και η συχνότητα κίνησης τους στο οδικό δίκτυο σε παγκόσμιο επίπεδο. Περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία αυτών και ορίζονται τα επίπεδα αυτονομίας. Τέλος, αναλύονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους και τονίζεται η επιτακτική ανάγκη διερεύνησης της επίδρασης τους στα υφιστάμενα οδοστρώματα λόγω των διαφορετικών συνθηκών επιβαλλόμενης φόρτισης.

Στο κεφάλαιο 3 ορίζεται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ο παράγοντας της πλευρικής μετατόπισης του τροχού, αποσαφηνίζεται η επιρροή του στον σχεδιασμό και στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων και παρουσιάζεται η μεθοδολογία κατά την οποία εισάγεται στην ανάλυση και στον υπολογισμό των βασικών μορφών αστοχίας των οδοστρωμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία βασικές έρευνες που διερευνούν την επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στη μηχανική συμπεριφορά και στη δομική επάρκεια υφιστάμενων οδοστρωμάτων με θεώρηση συγκεκριμένων διατομών οδοστρώματος.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές διατομές βάσει των οποίων διερευνήθηκε η επίδραση της πλευρικής μετατόπισης τροχού στην συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και ειδικότερα, στην κόπωση του ασφαλτικών στρώσεων. Περιγράφονται οι μαθηματικές κατανομές προσομοίωσης της πλευρικής μετατόπισης, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των μεγεθών της φθοράς και της κόπωσης.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της φθοράς και της κόπωσης ανά πειραματική διατομή και ανά κατανομή προσομοίωσης. Τέλος, παρατίθενται σχόλια και παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων καθώς και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τη θεώρηση του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης στον σχεδιασμό και στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων.

Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

### 2.1 Γενικά

Τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα μέσω εξελιγμένων προγραμμάτων και αλγορίθμων να αντιλαμβάνονται το αστικό-συγκοινωνιακό περιβάλλον και να κινούνται στους οδικούς άξονες με περιορισμένη ή καμία παρέμβαση από τον ανθρώπινο παράγοντα (Εικόνα 2.1).

(<https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>)



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο

Την τελευταία δεκαετία, οι έρευνες γύρω από τα αυτόνομα οχήματα έχουν εντατικοποιηθεί. Πλήθος εταιριών και πανεπιστημιακών ιδρυμάτων επικεντρώνονται στην έρευνα για την εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων. Στόχος είναι η τελειοποίηση του συστήματος λειτουργίας των αυτόνομων οχημάτων, ώστε στο εγγύς μέλλον να ενταχθούν με ασφάλεια στο οδικό δίκτυο (Badue et al, 2021).

Σήμερα, αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο σχεδιάζουν τα οχήματα τους με αυξημένες λειτουργίες αυτονομίας. Πλήθος οχημάτων που κυκλοφορούν στα οδικά δίκτυα διαθέτουν λειτουργίες αυτονομίας όπως (Ahangar et al, 2021):

- ✓ Σύστημα διατήρησης πορείας κίνησης (lane keeping assist),
- ✓ Προσαρμοζόμενο σύστημα ελέγχου ταχύτητας (adaptive cruise control),
- ✓ Σύστημα αυτόματης πέδησης έκτακτης ανάγκης (automatic emergency braking)
- ✓ Τεχνολογία στάθμευσης (self-parking technology),
- ✓ Σύστημα αποφυγής σύγκρουσης (collision brake).

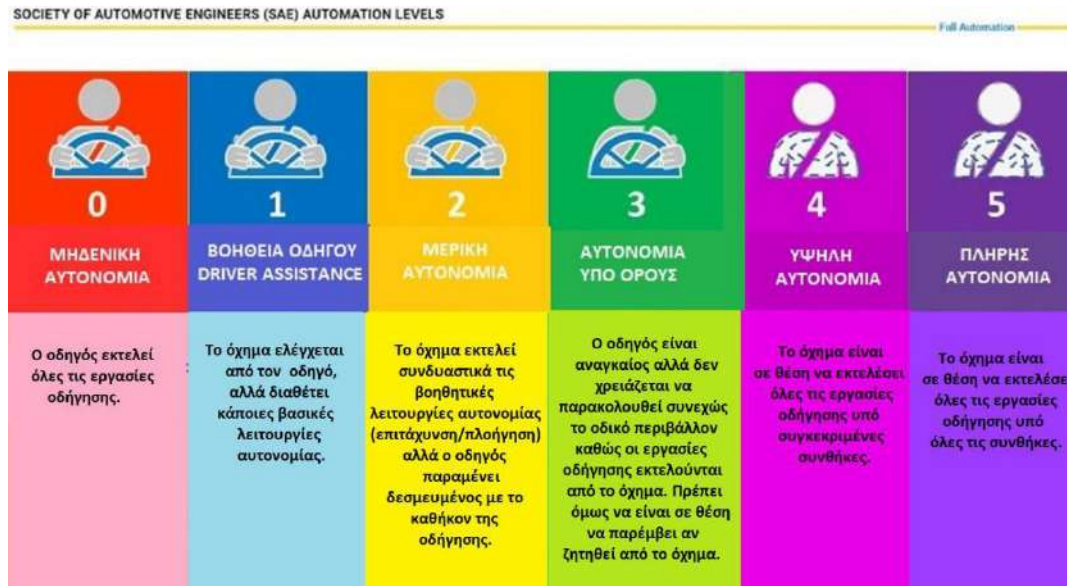
Η δοκιμή των αυτόνομων οχημάτων στους οδικούς άξονες έχει ξεκινήσει και καθημερινά συμβατικά και αυτόνομα οχήματα κυκλοφορούν ταυτόχρονα στο οδικό

δίκτυο σε πολιτείες της Αμερικής, στην Κίνα, στην Ιαπωνία και στην Ευρώπη (συγκεκριμένα στην Ολλανδία, Νορβηγία, Σουηδία, Φινλανδία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Αυστρία, Γαλλία, Ισπανία). Είναι γεγονός πως τα αυτόνομα οχήματα θα αλλάξουν τον συγκοινωνιακό ιστό όπως τον γνωρίζουμε μέχρι τώρα και θα καθορίσουν το μέλλον των οδικών μεταφορών τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Προβλέπεται πως μέχρι το 2030-2035, οι καταναλωτές θα στραφούν στα αυτόνομα οχήματα, αυξάνοντας σταδιακά την αγορά τους, ενώ παράλληλα θα θεσπιστούν νέοι κανονισμοί και νόμοι που θα πλαισιώνουν την κυκλοφορία των αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο. Μέχρι το 2040, εκτιμάται πως τα αυτόνομα οχήματα θα αποτελούν το 75% των οχημάτων στο οδικό δίκτυο ενώ μέχρι το 2050 θα έχουν αντικαταστήσει πλήρως τα συμβατικά οχήματα (Ondruš et al, 2020, <https://onlinemasters.ohio.edu/blog/the-future-of-driving/>).

## 2.2 Τεχνολογία

Σύμφωνα με την Society of Automotive Engineers (SAE, 2018) ορίζονται 6 επίπεδα αυτονομίας που ξεκινούν από το επίπεδο 0 (καμία αυτονομία - no autonomy) έως το επίπεδο 5 (πλήρης αυτονομία - full autonomy), όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.2. Όσο αυξάνονται τα επίπεδα αυτονομίας τόσο μειώνεται ο ενεργός ρόλος του οδηγού στο όχημα (Ondruš et al, 2020).



Εικόνα 2.2: Επίπεδα αυτονομίας

Αναλυτικά τα επίπεδα αυτονομίας περιγράφονται ακολούθως:

**Επίπεδο 0:** Αναφέρεται σε μηδενική αυτονομία του οχήματος. Ο οδηγός είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες του οχήματος. Παρόλα αυτά το όχημα διαθέτει ορισμένες λειτουργίες αυτονομίας που βοηθούν τον οδηγό όπως το σύστημα

πέδησης έκτακτης ανάγκης (emergency braking system), σύστημα παρακολούθησης τυφλού σημείου (blind spot warning) και η προειδοποίηση παρέκκλισης από την λωρίδα (lane departure warning).

**Επίπεδο 1:** Αποτελεί το ελάχιστο επίπεδο αυτονομίας. Το όχημα μέσω των λειτουργιών που διαθέτει προσφέρει βοήθεια στον οδηγό είτε στην εργασία της πλοήγησης του οχήματος (steering) είτε στις εργασίες επιτάχυνσης/επιβράδυνσης του (acceleration/brake). Το όχημα και σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται από τον οδηγό.

**Επίπεδο 2:** Ο οδηγός χρησιμοποιεί ταυτόχρονα τις βοηθητικές λειτουργίες για την πλοήγηση του οχήματος και για την επιτάχυνση/επιβράδυνση του σε σχέση με το επίπεδο 1. Παρόλα αυτά, δεν είναι απαλλαγμένος από την πλοήγηση του οχήματος.

Και στα 3 πρώτα επίπεδα, οι λειτουργίες αυτονομίας είναι υποστηρικτικές και ο οδηγός είναι πλήρως υπεύθυνος για τη πλοήγηση του οχήματος.

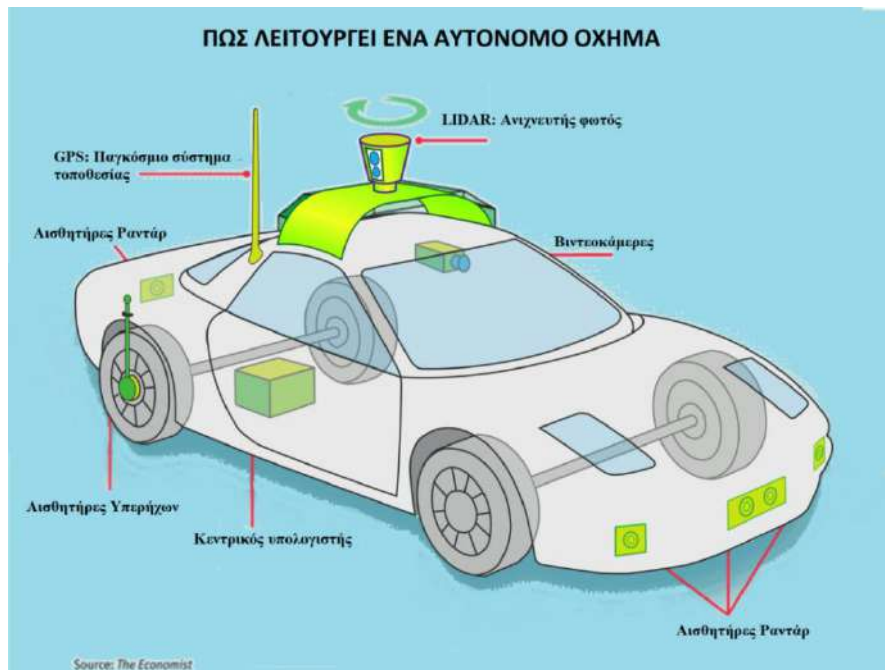
**Επίπεδο 3:** Το όχημα έχει την δυνατότητα να αντιληφθεί το οδικό περιβάλλον και διαθέτει λειτουργίες πλοήγησης, επιβράδυνσης και επιτάχυνσης. Ο οδηγός όμως, δεν απελευθερώνεται από την οδήγηση και πρέπει να είναι σε θέση να παρέμβει σε περίπτωση ανάγκης.

**Επίπεδο 4:** Το όχημα είναι σε θέση να χειριστεί όλες τις εργασίες οδήγησης, υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Σε περιπτώσεις όπως ακραία καιρικά φαινόμενα, το όχημα δεν είναι σε θέση να εκτελέσει τις λειτουργίες πλοήγησης με ασφάλεια. Επομένως, όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες ο οδηγός απελευθερώνεται από την οδήγηση και το όχημα είναι υπεύθυνο για την οδήγηση.

**Επίπεδο 5:** Το όχημα είναι ικανό να εκτελεί όλες τις εργασίες της οδήγησης και να αντιμετωπίζει κάθε κατάσταση. Ο οδηγός εισάγει την διεύθυνση προορισμού.

Σήμερα στους οδικούς άξονες σε παγκόσμιο επίπεδο, η πλειονότητα των οχημάτων που κυκλοφορούν ανήκουν στις 3 πρώτες κατηγορίες αυτονομίας (Επίπεδο 0, Επίπεδο 1, Επίπεδο 2). Παράλληλα, διεξάγονται δοκιμές κυκλοφορίας αυτόνομων οχημάτων κατηγορίας 3 και 4 στους οδικούς άξονες της Ευρώπης, Κίνας, Ιαπωνίας και Αμερικής -[όπως ήδη αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 2.1](#)- από εταιρίες που στοχεύουν ειδικά στην εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων (driving technology development company - self-driving car companies) και από αυτοκινητοβιομηχανίες συμβατικών μέχρι τώρα οχημάτων. Τα αυτόνομα οχήματα κατηγορίας 5, βρίσκονται μέχρι σήμερα στο επίπεδο των εργαστηριακών δοκιμών ενώ προβλέπεται πως μέχρι το 2030 θα είναι διαθέσιμα στην αγορά.

Τα αυτόνομα οχήματα διαθέτουν 2 βασικά συστήματα, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη ρύθμιση και τον προγραμματισμό της κίνησής τους στο οδικό περιβάλλον και τους οδικούς άξονες. Αυτά είναι το σύστημα αντίληψης (perception system) ([Εικόνα 2.3](#)) και το σύστημα λήψης αποφάσεων (decision making system).



Εικόνα 2.3: Σύστημα αντίληψης

Με τη βοήθεια αισθητήρων και καμερών τοποθετημένων σε διάφορα μέρη του οχήματος, τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να αντιλαμβάνονται το οδικό περιβάλλον και τους χρήστες της οδού (perception system) και να δημιουργούν τρισδιάστατους (3D) χάρτες που απεικονίζουν με σαφήνεια το περιβάλλον γύρω τους. Στη συνέχεια με τη βοήθεια λογισμικού-και μέσω αλγορίθμων- που είναι εγκατεστημένο σε αυτά, δέχονται τα δεδομένα εισόδου από τους αισθητήρες και δημιουργούν την διαδρομή που θα ακολουθήσουν για να μετακινηθούν από το σημείο αφετηρίας στο σημείο προορισμού (decision making system) (Badue et al, 2021).

## 2.3 Πλεονεκτήματα

Σύμφωνα με έρευνες, τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση των αυτόνομων οχημάτων είναι πολλαπλά (Fagnant & Kockelman, 2015; <https://onlinemasters.ohio.edu/blog/the-future-of-driving/>; Chen et al, 2020 <https://kambria.io/blog/the-history-and-evolution-of-self-driving-cars/>). Ενδεικτικά αναφέρονται τα παρακάτω:

✓ Η μείωση των ατυχημάτων και η επίτευξη της μέγιστης ασφάλειας στο οδικό δίκτυο. Σύμφωνα με το τμήμα μεταφορών των ΗΠΑ (U.S Department Of Transportation: [Crash Data Systems | NHTSA](https://www.nhtsa.gov/crash-data-systems)) το 90% των ατυχημάτων που συμβαίνουν ετησίως οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος. Με τη χρήση των αυτόνομων οχημάτων, δίνεται η δυνατότητα εξάλειψης αντίστοιχων ατυχημάτων και δημιουργίας ενός ασφαλέστερου οδικού δικτύου, σώζοντας 30.000 ανθρώπινες ζωές ετησίως.

✓ Η μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης στο οδικό δίκτυο και της κατανάλωσης καυσίμου. Τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να αντλαμβάνονται το περιβάλλον του οδικού δικτύου αλλά και να επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα μέσω εξελιγμένης τεχνολογίας (V2V: Vehicle to Vehicle communication) (Εικόνα 2.4). Έτσι, είναι δυνατό να ταξιδεύουν αποτελεσματικότερα, προγραμματισμένα με τις βέλτιστες αποστάσεις μεταξύ τους, αποφεύγοντας φαινόμενα σταμάτα-ξεκίνα (stop and go) στο οδικό δίκτυο. Ακόμα, μέσω της επικοινωνίας που διαθέτουν (V2V: Vehicle to Vehicle, V2I: Vehicle to infrastructure), θα είναι σε θέση να γνωρίζουν τους οδικούς άξονες με έντονη συμφόρηση και θα επιλέγουν εναλλακτικές διαδρομές μετακίνησης.



Εικόνα 2.4: Ασύρματη επικοινωνία των χρηστών της οδού

Συνολικά, αυτή η συμπεριφορά οδήγησης των αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο θα οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών του καυσίμου.

✓ Η δυνατότητα αύξησης της χωρητικότητας της λωρίδας (lane capacity) και η δυνατότητα κίνησης των αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο με ασφάλεια σε μεγαλύτερες ταχύτητες και ασύρματη επικοινωνία μεταξύ τους (V2V), με την εταιρία κατασκευής τους (V2I) και με τους άλλους χρήστες της οδού (V2X). Πρόσφατη μελέτη του Πανεπιστημίου της Κολούμπια (Tientrakool et al, 2011) έδειξε πως αν σε συγκεκριμένη λωρίδα κυκλοφορίας ενός αυτοκινητόδρομου κυκλοφορούσαν εξ' ολοκλήρου αυτόνομα οχήματα (Lane distribution: 100% autonomous cars), τότε η χωρητικότητα αυτής θα αυξανόταν κατά 12.000 οχήματα ανά ώρα οδήγησης με ταχύτητα 75 miles/hour δηλαδή 120 km/hour.

✓ Η μείωση των απαιτούμενων χώρων στάθμευσης και η αύξηση των διαθέσιμων χώρων για τον άνθρωπο.

✓ Η μείωση της ιδιοκτησίας των οχημάτων, λόγω των αυτόνομων οχημάτων κοινής χρήσης (Shared Autonomous Vehicles) που πρόκειται να αποτελέσουν πραγματικότητα στο οδικό δίκτυο μελλοντικά.

✓ Η μείωση του χρόνου μεταφοράς (travel time) και η γρηγορότερη μετακίνηση του ανθρώπου από το σημείο αφετηρίας στο σημείο προορισμού.

✓ Η απελευθέρωση του ανθρώπου από την οδήγηση, του παρέχει την δυνατότητα να αυξήσει τον διαθέσιμο χρόνο του και να ασχοληθεί με άλλες δραστηριότητες κατά τη διάρκεια της μετακίνησης (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Αύξηση του διαθέσιμου χρόνου για τον άνθρωπο

✓ Η ανεξαρτησία μετακίνησης στους ηλικιωμένους αλλά και στους ανθρώπους με αναπηρία. Στο μέλλον κανείς δεν θα αποκλείεται από την ασφαλή μετακίνηση (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Νέες προοπτικές μετακίνησης

Αφού προσδιορίστηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης των αυτόνομων οχημάτων είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί και η επίδραση των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στα υφιστάμενα οδοστρώματα.

## 2.4 Αυτόνομα οχήματα και οδοστρώματα

Βασική παράμετρος στον σχεδιασμό νέων αλλά και στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υφιστάμενων οδοστρωμάτων, είναι η κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων. Τα βαρέα οχήματα κατηγορίας 4 και άνω, όπως ορίζονται από Federal Highway Administration ([FWHA](#)), έχουν καταστρεπτική επίδραση στο οδόστρωμα λόγω του αυξημένου τους φορτίου και σχετίζονται με τη δομική επάρκεια του οδοστρώματος. Τα βαρέα οχήματα διαφοροποιούνται και κατατάσσονται σε κατηγορίες με βάση το πλάτος και το είδος του άξονα (axle type and axle width) και

με βάση την διαμόρφωση των τροχών-ελαστικών (tire type). Βάσει της κατανομής της κυκλοφορίας των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού, υπολογίζεται η επιπόνηση και η αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Τα αυτόνομα βαρέα οχήματα αναμένεται να έχουν διαφορετική επίδραση στην επιπόνηση των οδοστρωμάτων, συγκριτικά με τις υπάρχουσες συνθήκες φόρτισης που επιβάλλουν τα συμβατικά οχήματα. Συγκεκριμένα τα συμβατικά βαρέα οχήματα δεν διατηρούν την θέση τους κατά μήκος της λωρίδας κυκλοφορίας, αλλά διέρχονται από τυχαίες εγκάρσιες θέσεις στο πλάτος αυτής. Αντίστοιχα, το σύνολο των φορτίων διανέμεται στο πλάτος της λωρίδας, φορτίζοντας το οδόστρωμα σε περισσότερες από μία θέσεις. Αντίθετα, τα αυτόνομα βαρέα οχήματα, μέσω των εξελιγμένων λειτουργιών που διαθέτουν είναι προγραμματισμένα να διατηρούν την θέση τους στο κέντρο της λωρίδας. Άμεσο αποτέλεσμα, είναι η συνεχής και επαναλαμβανόμενη φόρτιση του οδοστρώματος σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος της λωρίδας, αφού το σύνολο των βαρέων οχημάτων θα διέρχεται από αυτά. Επομένως, με την εισαγωγή των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στο ήδη υπάρχον οδικό δίκτυο, θα διαφοροποιηθούν τόσο οι συνθήκες καταπόνησης των οδοστρωμάτων όσο και η κατανομή του φορτίου στην επιφάνεια αυτού. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η επίδραση της εισαγωγής των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στα εν λειτουργία οδοστρώματα και αν τελικά η επίδραση αυτή θα είναι θετική ή αρνητική. Αναμένεται πως τα αυτόνομα βαρέα οχήματα θα επιδράσουν αρνητικά στα υπάρχοντα οδοστρώματα λόγω της επαναλαμβανόμενης διέλευσης αυτών από συγκεκριμένα σημεία της λωρίδας.

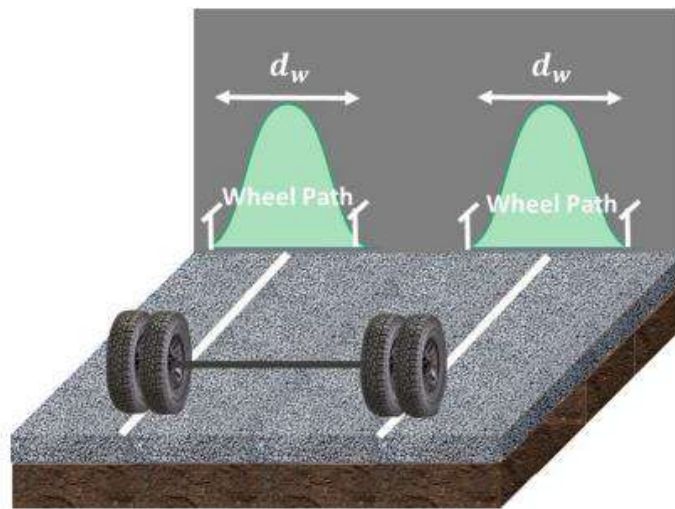
Οι έρευνες που διερευνούν την επίδραση των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στα υφιστάμενα οδοστρώματα είναι ελάχιστες (Noorvand et al, 2017; Chen et al, 2019; Zhou et al, 2019) σε σχέση με εκείνες που σχετίζονται με την τεχνολογία και τον τρόπο λειτουργίας τους. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες τα αυτόνομα οχήματα εξελίσσονται τεχνολογικά και αναπτύσσονται τα συστήματα λειτουργίας τους με ταχείς ρυθμούς. Στόχος της εντατικής έρευνας γύρω από την τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων αποτελεί η εισαγωγή τους στο υπάρχον οδικό δίκτυο και η σταδιακή άρση των συμβατικών οχημάτων. Ενώ τα υφιστάμενα οδοστρώματα θα είναι εκείνα που θα υποδεχτούν τα αυτόνομα οχήματα μελλοντικά, η επίδραση αυτών στα υφιστάμενα οδοστρώματα δεν έχει διερευνηθεί.

Δεδομένου ότι τα υφιστάμενα οδοστρώματα έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης, είναι ανάγκη να μελετηθεί αν θα είναι σε θέση να διατηρήσουν τη δομική τους επάρκεια ή αν θα απαιτηθούν οικονομικοί πόροι για τη συντήρησή τους λόγω πρόωρης φθοράς. Τα οδοστρώματα αποτελούν πάγιο περιουσιακό στοιχείο κάθε χώρας και η διατήρησή της δομικής επάρκειάς τους είναι προτεραιότητα. Για το λόγο αυτό η έρευνα της επίδρασης των αυτόνομων οχημάτων στα οδοστρώματα είναι πρωταρχική και αναγκαία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ

### 3.1 Γενικά

Η πλευρική μετατόπιση του τροχού ορίζεται ως η κατανομή της εγκάρσιας (πλευρικής) θέσης του φορτίου του τροχού εντός της λωρίδας κυκλοφορίας. Γενικά, τα συμβατικά βαρέα οχήματα δεν διέρχονται από μία συγκεκριμένη θέση στην λωρίδα κυκλοφορίας, αλλά ο τροχός τους μετατοπίζεται πλευρικά σε εγκάρσιες τυχαίες θέσεις στο πλάτος αυτής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 με τη βοήθεια της μεταβλητής  $d_w$  που περιγράφει την μετατόπιση του τροχού (MEPDG, Fatigue Cracking, 2004).



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού

ΠΗΓΗ: [Gungor & Al-Qadi, 2020]

Η πλευρική μετατόπιση του τροχού εξαρτάται άμεσα από τον τύπο των οχημάτων, το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας και τον κυκλοφοριακό φόρτο (traffic volume). Έχει παρατηρηθεί πως τα βαρέα οχήματα τείνουν να τοποθετούνται στα άκρα της λωρίδας κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιούν αποτελεσματικά το πλάτος αυτής (Luo, 2012 ; Noorvand et al, 2017).

Η πλευρική μετατόπιση του τροχού των οχημάτων είναι δυνατό να προσδιοριστεί επιτόπου στο οδόστρωμα με τη βοήθεια καμερών (video processing) ή κατάλληλων αισθητήρων που τοποθετούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (road instrumentation) (Gungor, 2018).

Το 1993-1994, οι Blab & Litzka (1995), πραγματοποίησαν μετρήσεις της πλευρικής μετατόπισης του τροχού σε 27 διαφορετικά οδικά τμήματα της Αυστρίας. Μέσω της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η πλευρική μετατόπιση του τροχού μπορεί να προσομοιωθεί με καλή προσέγγιση μέσω της κατανομής Laplace.



Σύμφωνα με τους Gunay (1999) και Kim (2009), μετά από αντίστοιχες μετρήσεις σε υφιστάμενα οδοστρώματα, η καταλληλότερη κατανομή για την προσομοίωση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού είναι η κανονική κατανομή (Chen et al, 2019).

Αντίστοιχη έρευνα πραγματοποιήθηκε το 2016, στο οδικό δίκτυο της Σουηδίας, όπου η πλευρική μετατόπιση του τροχού στην λωρίδα κυκλοφορίας μετρήθηκε σε δείγμα 270.000 οχημάτων. Τα αποτελέσματα χωρίστηκαν σε 3 υποκατηγορίες οχημάτων, ανάλογα με το πλάτος τροχού του άξονα (axle track width) και για κάθε μία από αυτές συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα. Η κανονική κατανομή και σε αυτή την περίπτωση περιέγραφε καλύτερα τα αποτελέσματα της πλευρικής μετατόπισης του τροχού και για τις 3 υποκατηγορίες (Mcgarvey, 2016).

Δεδομένων των παραπάνω, η πλευρική μετατόπιση του τροχού των συμβατικών οχημάτων, μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω της κανονικής κατανομής. Η συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής δίνεται από τη Σχέση 3.1:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2*\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

όπου:

f(x): συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

x: πλευρική μετατόπιση του τροχού

μ: μέση τιμή (λαμβάνεται ίση με το 0)

σ: τυπική απόκλιση

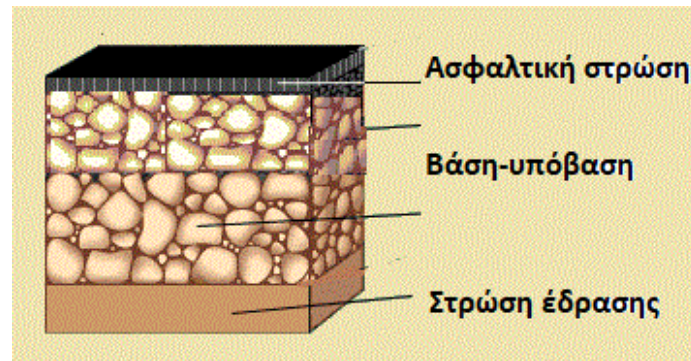
Το όχημα αρχικά κινείται στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας (μ=0) και μετατοπίζεται πλευρικά εντός αυτής με τυπική απόκλιση (σ). Σύμφωνα με το Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) η τυπική απόκλιση ισούται με 25 cm (10 inch).

## **3.2 Επίδραση της πλευρικής μετατόπισης στη συμπεριφορά των οδοστρώματων**

### **3.2.1 Συμπεριφορά οδοστρώματος υπό την επίδραση φόρτισης**

Με σκοπό την ανάλυση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος λόγω της φόρτισης (κυκλοφορία) είναι απαραίτητη η απεικόνιση του στατικού προτύπου αυτού μέσω κατάλληλου προσομοιώματος. Ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα προσομοιώνεται από τρεις στρώσεις πεπερασμένου πάχους (h1-ασφαλτικής στρώσης, h2-βάσης, h3-υπόβασης), οι οποίες εδράζονται πάνω σε μία στρώση με απεριόριστο πάχος (στρώση έδρασης). Στην περίπτωση που τα υλικά της βάσης και της υπόβασης δεν διαφοροποιούνται τότε οι στρώσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν σαν μία ενιαία στρώση (Λοΐζος και Πλατή, 2018). Επομένως, ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα

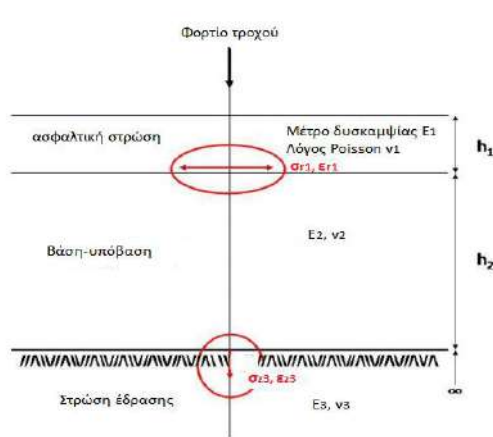
αποτελείται από τις ακόλουθες επιμέρους στρώσεις όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2: την ασφαλτική στρώση, την ενοποιημένη στρώση βάσης-υπόβασης από ασύνδετα αμμοχάλικα και τη στρώση έδρασης. Κάθε μία από τις στρώσεις καθορίζεται πλήρως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της: το μέτρο δυσκαμψίας-ελαστικότητας ( $E$ ) και τον λόγο Poisson ( $\nu$ ).



Εικόνα 3.2: Δομή τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος

Υπό την επίδραση της κυκλοφορίας, το οδόστρωμα καταπονείται από πλήθος αξονικών φορτίων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων σε όλες τις στρώσεις του οδοστρώματος. Αντίστοιχες επιπλοήσεις δέχεται το οδόστρωμα εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιδράσεων σε αυτό, με βασικότερη την επιρροή της θερμοκρασίας.

Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στις παραπάνω κρίσιμες θέσεις είναι οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις ( $\sigma_{r1}$ ,  $\epsilon_{r1}$ ) που οδηγούν στην εμφάνιση ρηγματώσεων στο οδόστρωμα (I) και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις ( $\sigma_{z3}$ ,  $\epsilon_{z3}$ ) που οδηγούν στην εμφάνιση παραμενουσών παραμορφώσεων στο οδόστρωμα, αντίστοιχα. (Λοίζος και Πλατή, 2018).

Αναλυτικότερα:

1. Η κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις διελεύσεις των αξονικών φορτίων. Υπό την επίδραση των φορτίων των τροχών αναπτύσσονται στις ασφαλτικές στρώσεις οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις, η μέγιστη τιμή των οποίων εμφανίζεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Η ανάπτυξη επαναλαμβανόμενων εφελκυστικών τάσεων και παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων οδηγεί στην κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων, η οποία εκδηλώνεται υπό τη μορφή ρηγματώσεων στο οδόστρωμα (Εικόνα 3.4), (Α.Λοίζος και Χ.Πλατή, 2018 ; ΜΕΡPDG, Fatigue Cracking, 2004).



Εικόνα 3.4: Ρωγμές λόγω κόπωσης ασφαλτικών στρώσεων

Η φθορά (Damage: D) στην περίπτωση της κόπωσης ορίζεται ως ο λόγος των προβλεπόμενων διελεύσεων για κάθε διαφορετικό φορτίο και τύπο άξονα ( $n_i$ ), ως προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις αυτού του φορτίου μέχρι την αστοχία ( $N_i$ ), όπως φαίνεται στη Σχέση 3.2.

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.2)$$

Οι προβλεπόμενες διελεύσεις ( $n_i$ ) προκύπτουν με βάση τα δεδομένα της κυκλοφορίας για το υπό αξιολόγηση οδόστρωμα.

Οι επιτρεπόμενες διελεύσεις κάθε φορτίου μέχρι την αστοχία ( $N_i$ ) υπολογίζονται με βάση τη Σχέση 3.3.

$$N_i = 0.2091 * \beta_1 * \left( \frac{\frac{V_a}{V_a + V_b} - 0.69}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 3.49 * h}}} \right) * \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^{\beta_2 * 3.9492} * \left( \frac{1}{E} \right)^{\beta_3 * 1.281} \quad (3.3)$$

όπου:

$V_a$ : το ποσοστό κενών αέρα

$V_b$ : το ποσοστό ασφάλτου

$E$ : το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης

$\epsilon$ : η εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης

$h$ : το πάχος της ασφαλικής στρώσης

$\beta_1$ : 249.008

$\beta_2$ : 1.2334

$\beta_3$ : 1

Αφού υπολογιστεί η φθορά ( $D_i$ ) για κάθε διαφορετικό συνδυασμό φορτίου και άξονα, υπολογίζεται η συνολική φθορά του οδοστρώματος αθροιστικά μέσω της Σχέσης του Miner (Σχέση 3.4).

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \quad (3.4)$$

όπου:

$D$ : συνολική φθορά

$n$ : σύνολο συνδυασμών φορτίου-άξονα

$D_i$ : φθορά για κάθε συνδυασμό

Τέλος, η κόπωση των ασφαλικών στρώσεων ποσοτικοποιείται μέσω του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας με βάση τη Σχέση 3.5.

$$F.C = \frac{6000}{1 + e^{C_1 * C_{1'} + C_2 * C_{2'} * \log(D * 100)}} * \left(\frac{1}{60}\right) \quad (3.5)$$

όπου:

$F.C$ : ποσοστό ρηγματωμένης επιφάνειας (%) - (Fatigue Cracking)

$D$ : φθορά

$C_1$ : 1.0

$C_{1'}$ :  $-2 * C_2$

$C_2$ : 1.0

$C_{2'}$ :  $-2.40874 - 39.748 * (1 + h)^{-2.856}$

II. Υπό την επίδραση των φορτίων των τροχών αναπτύσσονται στο οδόστρωμα κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις. Η ανάπτυξη

επαναλαμβανόμενων κατακόρυφων τάσεων και παραμορφώσεων οδηγεί στην κατακόρυφη υποχώρηση της στρώσης έδρασης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Με τον όρο παραμένουσα παραμόρφωση ορίζεται η μη ανακτώμενη παραμόρφωση του οδοστρώματος που προκαλείται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση ενός συγκεκριμένου φορτίου (τύπος οχήματος, είδος-πλάτος άξονα και διαμόρφωση τροχών) από μία συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση της παραμένουσας παραμόρφωσης στο οδόστρωμα

Παραδοσιακά, κρίσιμη θέση αστοχίας έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων είναι η στρώση έδρασης. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί πως η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση που εμφανίζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι αποτέλεσμα συσσωρευμένων-αθροιστικών κατακόρυφων υποχωρήσεων που συμβαίνουν σε όλες τις στρώσεις του οδοστρώματος (ασφαλτικές στρώσεις, βάση, υπόβαση, στρώση έδρασης).

Το MEPDG, υπολογίζει ξεχωριστά την κατακόρυφη υποχώρηση για κάθε μία από τις στρώσεις του οδοστρώματος και εισάγει ένα ακόμα κριτήριο αστοχίας για την αξιολόγηση της δομικής επάρκειας των ασφαλτικών στρώσεων (MEPDG, Permanent Deformation, 2004).

Η πλαστική παραμόρφωση κάθε στρώσης προκύπτει με βάση τις Σχέσεις 3.6, 3.7, 3.8 και 3.9.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = k_z * \beta_{r1} * 10^{-3.3541} * T^{1.5606 * \beta_{r2}} * N^{0.479 * \beta_{r3}} \quad (3.6)$$

$$k_z = (C_1 + C_2 * depth) * 0.328196^{depth} \quad (3.7)$$

$$C_1 = -0.1039 * h^2 + 2.4868 * h - 17.34 \quad (3.8)$$

$$C_2 = 0.0172 * h^2 - 1.7331 * h + 27.428 \quad (3.9)$$

όπου:

$\epsilon_p$ : συσσωρευμένη πλαστική παραμόρφωση για N επαναλήψεις αξονικών φορτίων

$\epsilon_r$ : κατακόρυφη παραμόρφωση που υπολογίζεται μέσω προγράμματος ανάλυσης των τάσεων και των παραμορφώσεων

$\beta_{r1}$ : 0.69

$\beta_{r2}$ : 1

$\beta_{r3}$ : 1

T: θερμοκρασία οδοστρώματος

N: αριθμός διερχόμενων αξονικών φορτίων

h: πάχος στρώσης

depth: βάθος υπολογισμού της πλαστικής παραμόρφωσης

Τέλος, με την βοήθεια της Σχέσης 3.10, υπολογίζεται η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση που παρατηρείται στο οδόστρωμα λόγω κατακόρυφης υποχώρησης σε κάθε στρώση του οδοστρώματος.

$$PD = \sum_{m=1}^n \epsilon_p^m * h^m \quad (3.10)$$

όπου:

PD: παραμένουσα παραμόρφωση (mm)-Permanent Deformation

$\epsilon_p$ : συνολική πλαστική παραμόρφωση για κάθε στρώση

h: πάχος στρώσης

n: πλήθος στρώσεων

### 3.2.2 Η πλευρική μετατόπιση τροχού ως παράμετρος σχεδιασμού

Στην εμπειρική μέθοδο AASHTO (AASHTO, 1993 design), που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 και υιοθετήθηκε διεθνώς για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων, ο παράγοντας της πλευρικής μετατόπισης είχε ληφθεί υπόψη έμμεσα μέσω της τιμής των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ESALs) στην περίοδο σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, το γεγονός ότι τα πειράματα είχαν διεξαχθεί σε οδοστρώματα (εύκαμπτα-δύσκαμπτα) υπό πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, είχε ως φυσικό επακόλουθο την παρουσία της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στην λωρίδα κυκλοφορίας.

Η επιρροή του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης σήμερα λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση των οδοστρωμάτων και στον υπολογισμό της φθοράς μέσω μαθηματικών μοντέλων και εξισώσεων που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό. Η εισαγωγή της επιρροής του τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην αξιολόγηση των οδοστρωμάτων, καθιερώθηκε το 2004 μέσω του MEPDG (MEPDG, Fatigue Cracking, 2004), σύγχρονου εργαλείου αξιολόγησης οδοστρωμάτων.

Συγκεκριμένα, το MEPDG λαμβάνοντας υπόψη πως ο τροχός των οχημάτων μετατοπίζεται πλευρικά στην λωρίδα κυκλοφορίας, υποθέτει πως τα συνολικά φορτία κυκλοφορίας ( $n_i$ ) που θα διέλθουν από το εκάστοτε οδόστρωμα κατανέμονται σε εγκάρσιες θέσεις στο πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας. Οι θέσεις αυτές προκύπτουν με βάση την κανονική κατανομή και είναι 5 ( $z=-1.28155*\sigma$ ,  $z=-0.5244*\sigma$ ,  $z=0$ ,  $z=+1.28155*\sigma$ ,  $z=+0.5244*\sigma$ ), όπως φαίνονται στην Εικόνα 3.6. Σύμφωνα με το MEPDG σε κάθε μία από αυτές τις 5 χαρακτηριστικές θέσεις διέρχεται το 20% της συνολικής κυκλοφορίας. Για κάθε μία από αυτές τις θέσεις υπολογίζεται η φθορά που υφίσταται το υπό μελέτη σημείο στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

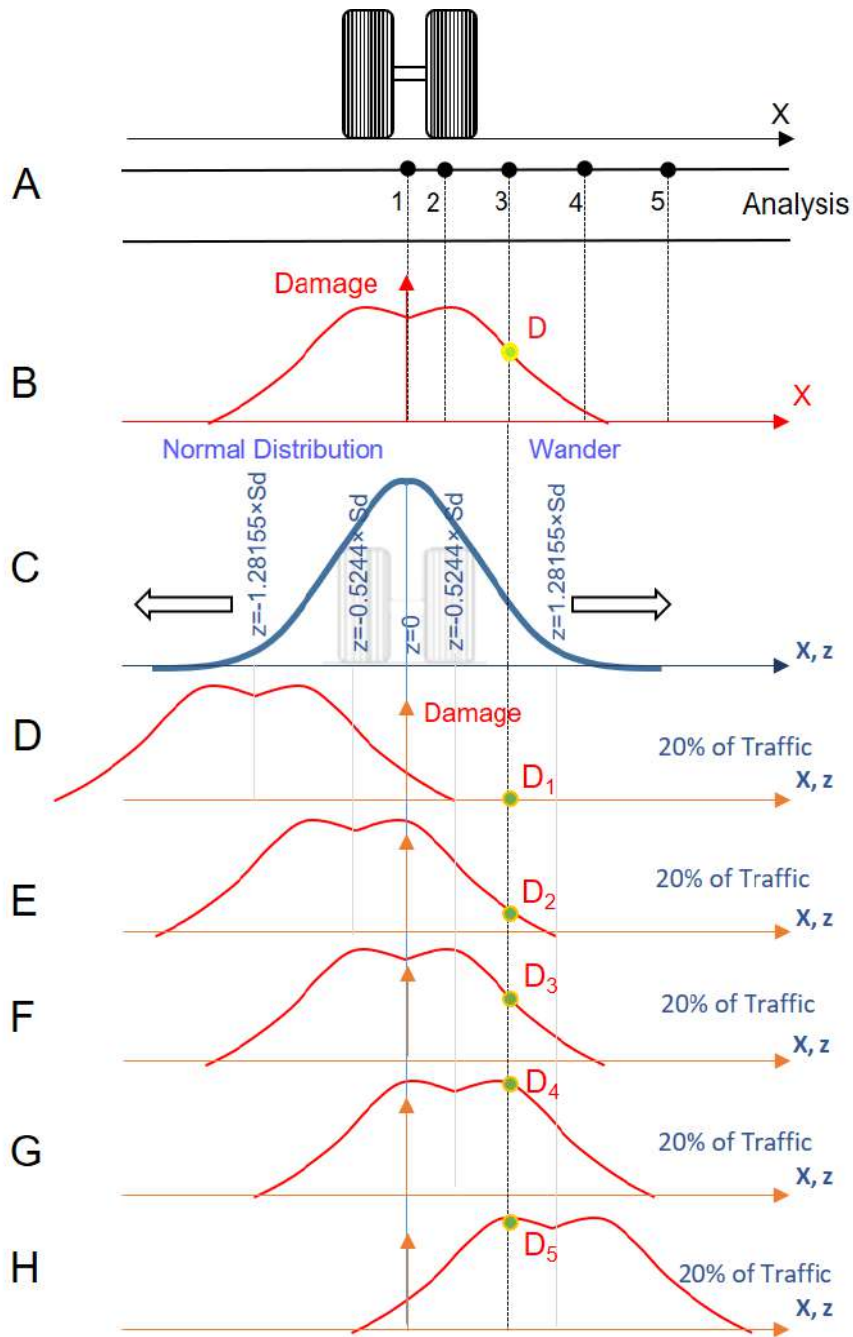
Στην περίπτωση της κόπωσης και για το αξονικό φορτίο της Εικόνας 3.6 (μονός άξονας-δίδυμοι τροχοί) το υπό-μελέτη κρίσιμο σημείο είναι το κέντρο του δίδυμου τροχού. Παρόλα αυτά στην Εικόνα 3.6, παρουσιάζεται ο υπολογισμός της συνολικής φθοράς στο σημείο 3. Παρατηρείται πως όταν το 20% της συνολικής κυκλοφορίας διέρχεται από την θέση ( $z=-1.28155*\sigma$ ) προκαλείται φθορά D1, στο υπό μελέτη σημείο 3. Αντίστοιχα όταν το 20% της συνολικής κυκλοφορίας διέρχεται από την θέση ( $z=-0.5244*\sigma$ ,  $z=0$ ,  $z=+1.28155*\sigma$ ,  $z=+0.5244*\sigma$ ), προστίθεται επιπλέον φθορά στο σημείο 3 (D2, D3, D4, D5 αντίστοιχα).

Τελικά, η συνολική φθορά στο σημείο 3 προκύπτει αθροιστικά σύμφωνα με τη Σχέση 3.11.

$$D_{(3)} = 0.2 * D_1 + 0.2 * D_2 + 0.2 * D_3 + 0.2 * D_4 + 0.2 * D_5 \quad (3.11)$$

Στην περίπτωση της μηδενικής μετατόπισης του τροχού, το σύνολο της κυκλοφορίας διέρχεται από το κέντρο της λωρίδας, με αποτέλεσμα η φθορά στο σημείο 3 να υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 3.12.

$$D (3) = 1 * D \quad (3.12)$$



Εικόνα 3.6: Συσχέτιση πλευρικής μετατόπισης τροχού με τη φθορά

Η παραπάνω διαδικασία, χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό της φθοράς στην περίπτωση της κόπωσης. Στην περίπτωση των παραμενουσών παραμορφώσεων, το MEPDG αναφέρει πως μέσω του λογισμικού τροποποιούνται οι τιμές της παραμένουσας παραμόρφωσης εξαιτίας της πλευρικής μετατόπισης του τροχού, παρόλα αυτά δεν παρέχονται οδηγίες από τον οδηγό του λογισμικού σχετικά με την διαδικασία που αυτές τροποποιούνται (Gungor,2018).



### 3.2.3 Επίδραση της μετατόπισης τροχού στις βασικές μορφές αστοχίας του οδοστρώματος

Οι Noorvand et al (2017) διερεύνησαν την επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στη συμπεριφορά και στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Στην υπόψη έρευνα, θεωρήθηκε τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα με πάχος ασφαλικής στρώσης ίσο με 15 cm και μέτρο δυσκαμψίας ίσο με 700, 2500 και 6000 kPa. Θεωρήθηκε ενιαία στρώση βάσης-υπόβασης πάχους 20 cm και μέτρου ελαστικότητας 250 kPa και στρώση έδρασης μέτρου ελαστικότητας 50 kPa. Η πλευρική μετατόπιση του τροχού προσομοιώθηκε για 3 κατανομές, για την κανονική -σύμφωνα με την οποία περιγράφεται ικανοποιητικά η πλευρική μετατόπιση των συμβατικών οχημάτων-, για τη μηδενική -η οποία αποτελεί την αναμενόμενη κατανομή των αυτόνομων οχημάτων- και την ομοιόμορφη -η οποία προτάθηκε στην υπόψη μελέτη και αποτελεί μία εν δυνάμει κατανομή των αυτόνομων οχημάτων-. Η ανάλυση του οδοστρώματος και ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων της ασφαλικής στρώσης πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού του MEPDG. Αφού υπολογίστηκαν οι τάσεις στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, εκτιμήθηκε η φθορά (D) στην κρίσιμη θέση αστοχίας τόσο για τη μηδενική μετατόπιση του τροχού (Σχέση 3.12) όσο και για τη μετατόπιση του τροχού σύμφωνα με την κανονική κατανομή (Σχέση 3.11). Εν συνεχεία υπολογίστηκε η ρηγμάτωση (F.C-%) (Σχέση 3.5) και η παραμένουσα παραμόρφωση που παρατηρείται στο οδόστρωμα (PD-mm) (Σχέση 3.10). Για την πλευρική μετατόπιση του τροχού σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή αναπτύχθηκε και προτάθηκε κατάλληλη μεθοδολογία τόσο για τον υπολογισμό της ρηγματωμένης επιφάνειας, όσο και για τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων. Θεωρήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια μεικτής κυκλοφορίας αυτόνομων και συμβατικών βαρέων οχημάτων στο υπό αξιολόγηση οδόστρωμα, με σκοπό την αναζήτηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης στο πάχος των ασφαλικών στρώσεων.

Αφού υπολογίστηκαν οι τιμές της ρηγματωμένης επιφάνειας και της παραμένουσας παραμόρφωσης για κάθε μία από τις 3 κατανομές, δημιουργήθηκαν διαγράμματα στα οποία απεικονίζονταν τα τελικά αποτελέσματα σε συνάρτηση με τον αριθμό διελεύσεων μέχρι την αστοχία. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών προέκυψαν συντελεστές ισοδυναμίας που συνέδεαν τον αριθμό των διελεύσεων για την ομοιόμορφη και τη μηδενική κατανομή με τον αριθμό των διελεύσεων για την κανονική κατανομή. Έτσι υπολογίστηκε για το υπό μελέτη οδόστρωμα σε πόσες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου για ομοιόμορφη και μηδενική κατανομή αντιστοιχεί μία διέλευση για την κανονική κατανομή, για τις δύο βασικές μορφές αστοχίας του οδοστρώματος.

Στην υπόψη έρευνα προέκυψε πως η μηδενική πλευρική μετατόπιση του τροχού προκαλεί την ίδια αστοχία (ρηγμάτωση, παραμένουσα παραμόρφωση) σε λιγότερες διελεύσεις του φορτίου σε σχέση με την κανονική κατανομή, ενώ αντίθετα η

πλευρική μετατόπιση με βάση την ομοιόμορφη κατανομή προκαλεί την ίδια αστοχία για περισσότερες διελεύσεις του φορτίου. Σε συνέχεια της παραπάνω διαπίστωσης, μελέτησαν την επίδραση των διαφορετικών σεναρίων της μεικτής κυκλοφορίας στο πάχος της ασφαλικής στρώσης. Στο σύνολο τους τα αποτελέσματα δείχνουν πως το πάχος της ασφαλικής στρώσης μειώνεται όταν τα αυτόνομα οχήματα μετατοπίζονται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή ενώ αυξάνεται όταν η πλευρική μετατόπιση του τροχού είναι μηδενική. Επομένως, διαφαίνεται πως η πλευρική μετατόπιση του τροχού με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, μπορεί να επιδράσει θετικά στα οδοστρώματα, επιμηκώνοντας τον χρόνο ζωής του υφιστάμενου οδοστρώματος και μετατοπίζοντας σε μεταγενέστερο χρόνο την ανάγκη για συντήρηση.

Παρόμοια έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Chen et al (2019) όπου διερευνήθηκε η επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Στην υπόψη έρευνα μελετήθηκε τμήμα του αυτοκινητόδρομου της Κίνας, Shanghai-Hangzhou-Ningbo Highway, με πάχος ασφαλικής στρώσης 18 cm. Μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές μαθηματικές κατανομές προσομοίωσης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού. Συγκεκριμένα αυτές ήταν: η μηδενική κατανομή (Mode 0), η ομοιόμορφη κατανομή που καλύπτει το σύνολο της λωρίδας κυκλοφορίας (Mode 1), η κανονική κατανομή (double-peak Gaussian curve-Mode 2) και τέλος η ομοιόμορφη κατανομή που αφορά την πλευρική μετατόπιση κάθε τροχού ανεξάρτητα (two-section uniform distribution-Mode 3). Στην υπόψη έρευνα αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκε η εντατική ανάλυση του οδοστρώματος και λήφθηκε υπόψη η πλευρική μετατόπιση του τροχού. Μέσω του μοντέλου που δημιουργήθηκε και με χρήση της Σχέσης του Miner (Σχέση 3.4), υπολογίστηκε η φθορά και τελικά το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας λόγω κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων (Fatigue Cracking: F.C - %). Αντίστοιχα υπολογίστηκε η παραμένουσα παραμόρφωση που παρατηρείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (P.D). Τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν για 5 διαφορετικά ποσοστά κυκλοφορίας των αυτόνομων οχημάτων στο υπό μελέτη οδικό άξονα (0%,25%,50%,75%,100%).

Στην υπόψη έρευνα, προέκυψε πως η μηδενική μετατόπιση του τροχού (Mode 0) αυξάνει την παραμένουσα παραμόρφωση στην επιφάνεια του οδοστρώματος με αποτέλεσμα να απαιτείται συντήρηση του οδοστρώματος 1.56 χρόνια νωρίτερα από το προβλεπόμενο. Το προβλεπόμενο διάστημα συντήρησης ορίζεται για την κυκλοφορία των συμβατικών οχημάτων στο υπό αξιολόγηση οδοστρώμα όταν ο τροχός τους μετατοπίζεται με βάση την κανονική κατανομή. Αντίθετα, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά σύμφωνα με τις υπόλοιπες 3 κατανομές (Mode 1, 2, 3) δεν παρατηρείται άμεση ανάγκη συντήρησης του οδοστρώματος. Μάλιστα, όταν η πλευρική μετατόπιση προσομοιώνεται με βάση την ομοιόμορφη κατανομή (Mode 3) προκύπτουν τα ευμενέστερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, όταν το ποσοστό των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο ξεπερνά το 50%, αναμένεται ότι η ανάγκη συντήρησης του οδοστρώματος μετακινείται κατά 2.3 χρόνια.

Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα όσον αφορά την εκδήλωση της ρηγμάτωσης στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με ευμενέστερα αποτελέσματα για την ομοιόμορφη κατανομή (Mode 3) και δυσμενέστερα για τη μηδενική κατανομή (Mode 0). Αναλυτικότερα, η αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης είναι 2.7 φορές μεγαλύτερη όταν ο τροχός δεν μετατοπίζεται πλευρικά (Mode 0) ενώ μειωμένη κατά 35% όταν μετατοπίζεται με βάση την ομοιόμορφη κατανομή (Mode 3). Μάλιστα, τονίζεται πως όσο αυξάνεται το ποσοστό των βαρέων αυτόνομων οχημάτων τόσο μειώνεται η αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης ασφαλικών στρώσεων.

Τέλος, αντίστοιχη έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Zhou et al (2019) με σκοπό την αναζήτηση της βέλτιστης προσομοίωσης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού για βελτίωση της οδικής ασφάλειας και επιμήκυνση της ζωής του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος στην περιοχή του Austin στο Texas με πάχος ασφαλικής στρώσης ίσο με 20 cm. Το μέτρο ελαστικότητας της βάσης-υπόβασης λήφθηκε ίσο με 350 MPa ενώ της στρώσης έδρασης ίσο με 56 MPa. Στην υπόψη μελέτη υπολογίστηκε στο πεδίο η πλευρική μετατόπιση του τροχού για τα αυτόνομα βαρέα οχήματα μέσω κατάλληλου προγράμματος. Η πλευρική μετατόπιση περιγράφηκε με βάση την κανονική κατανομή και η τυπική απόκλιση προέκυψε ίση με 7.5 cm, δηλαδή 3 φορές μικρότερη σε σχέση με την τυπική απόκλιση των συμβατικών οχημάτων (25 cm). Ακόμα, προσομοιώθηκε η πλευρική μετατόπιση του τροχού των αυτόνομων βαρέων οχημάτων σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή.

Έτσι διαμορφώθηκαν τα εξής σενάρια:

- i. πως το 100% των διερχόμενων οχημάτων ήταν συμβατικά και ο τροχός του μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή ( $\sigma=25$  cm)
- ii. πως το 100% των διερχόμενων οχημάτων ήταν αυτόνομα και ο τροχός τους μετατοπίζεται με βάση την κανονική ( $\sigma=7.5$  cm) και την ομοιόμορφη κατανομή.

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις υπολογίστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού Texas Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis Program, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της ασφαλικής στρώσης. Υπολογίστηκε η φθορά και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C-%) αλλά και η παραμένουσα παραμόρφωση (PD-mm) στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Παρουσιάστηκαν με μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα της ρηγμάτωσης και της παραμένουσας παραμόρφωσης που παρατηρήθηκαν στο οδόστρωμα μεταξύ της κανονικής κατανομής των συμβατικών οχημάτων ( $\sigma=25$  cm), της κανονικής κατανομής των αυτόνομων οχημάτων ( $\sigma=7.5$  cm) αλλά και της ομοιόμορφης κατανομής των αυτόνομων οχημάτων. Σε κάθε ένα από αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζονται η χρονική περίοδος (σε μήνες), για τους οποίους υπερβαίνεται το όριο του ποσοστού ρηγμάτωσης και της παραμένουσας παραμόρφωσης και απαιτείται άμεση συντήρηση του οδοστρώματος.

Στην υπόψη έρευνα, προέκυψε πως όταν η πλευρική μετατόπιση του τροχού των βαρέων αυτόνομων οχημάτων ακολουθεί την κανονική κατανομή, η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία εξαιτίας της κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων μειώνεται σε ποσοστό της τάξης του 22%, ενώ η παραμένουσα παραμόρφωση αυξάνεται κατά 30% σε σχέση με την κανονική κατανομή που ακολουθούν τα συμβατικά οχήματα.

Αντίστοιχα, για τη μετατόπιση σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή προέκυψε πως η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία εξαιτίας της κόπωσης (pavement fatigue life) αυξάνεται κατά 16% σε σχέση με την κανονική κατανομή των συμβατικών οχημάτων και 49% σε σχέση με την κανονική κατανομή των αυτόνομων οχημάτων. Τέλος, προέκυψε πως η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία εξαιτίας κατακόρυφων υποχωρήσεων (pavement rutting life), αυξάνεται κατά 24% σε σχέση με την κανονική κατανομή των συμβατικών οχημάτων και κατά 102% σε σχέση με την κανονική κατανομή των αυτόνομων οχημάτων.

Στον Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα βασικά στοιχεία των ερευνών που αναφέρθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Πίνακας 3.1: Βασικά στοιχεία ερευνών για πλευρική μετατόπιση τροχού

Noorvand et al 2017	
Ασφαλτική στρώση- Δομή	Πάχος: 15 cm Μέτρο δυσκαμψίας: 700, 2500, 6000 kPa
Προσομοίωση πλευρικής μετατόπισης	i. Κανονική κατανομή-συμβατικά βαρέα οχήματα ( $\sigma=25$ cm) ii. Μηδενική κατανομή-αυτόνομα βαρέα οχήματα iii. Ομοιόμορφη κατανομή-αυτόνομα βαρέα οχήματα
Ανάλυση οδοστρώματος- Μεθοδολογία	Λογισμικό MEPDG
Αποτελέσματα (F.C %) Αποτελέσματα(P.D-mm)	Μηδενική κατανομή: Προκαλεί την ίδια αστοχία (F.C, PD) με την κανονική κατανομή αλλά σε λιγότερες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου. Αρνητική επίδραση στο οδόστρωμα-Άμεση ανάγκη συντήρησης. Ομοιόμορφη κατανομή: Προκαλεί την ίδια αστοχία (F.C, PD) με την κανονική κατανομή αλλά για περισσότερες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου. Θετική επίδραση στα υπάρχοντα

	οδοστρώματα και επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους. Δυνατότητα κατασκευής οδοστρωμάτων με μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης.
Chen et al 2019	
Ασφαλτική στρώση- Δομή	Πάχος: 18 cm
Προσομοίωση πλευρικής μετατόπισης- Αυτόνομα βαρέα οχήματα	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Μηδενική κατανομή (Mode 0)</li> <li>ii. Ομοιόμορφη κατανομή (Mode 1)</li> <li>iii. Κανονική κατανομή (Mode 2)</li> <li>iv. Ομοιόμορφη κατανομή {two-section uniform} (Mode 3)</li> </ul>
Ανάλυση οδοστρώματος- Μεθοδολογία	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων - (Finite Element Analysis)
Αποτελέσματα (F.C-%)	<p>Μηδενική κατανομή: Η αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης είναι 2.7 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που παρατηρείται στο οδόστρωμα για τα συμβατικά οχήματα.</p> <p>Ομοιόμορφη κατανομή (Mode 3): Η αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης μειώνεται κατά 35%.</p>
Αποτελέσματα (P.D-mm)	<p>Μηδενική κατανομή: Αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης που εμφανίζεται στο οδόστρωμα - Απαιτήση συντήρησης 1.56 χρόνια νωρίτερα από το προβλεπόμενο.</p> <p>Ομοιόμορφη κατανομή (Mode 3): Ευμενέστερα αποτελέσματα. Καθυστέρηση συντήρησης οδοστρώματος κατά 2.3 χρόνια.</p>
Zhou et al (2019)	
Ασφαλτική στρώση- Δομή	Πάχος: 20 cm

Προσομοίωση πλευρικής μετατόπισης	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Κανονική κατανομή-συμβατικά βαρέα οχήματα (<math>\sigma=25</math> cm)</li> <li>ii. Κανονική κατανομή-αυτόνομα βαρέα οχήματα(<math>\sigma=7.5</math> cm)</li> <li>iii. Ομοιόμορφη κατανομή-αυτόνομα βαρέα οχήματα</li> </ul>
Ανάλυση οδοστρώματος-Μεθοδολογία	<p>Υπολογισμός της πλευρικής μετατόπισης του τροχού των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στο πεδίο.</p> <p>Ανάλυση με βάση το λογισμικό Texas Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design.</p>
Αποτελέσματα (F.C-%)	<p>Κανονική κατανομή (<math>\sigma=7.5</math>cm): Η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία μειώνεται κατά 22% σε σχέση με την κανονική κατανομή των συμβατικών οχημάτων (<math>\sigma=25</math> cm).</p> <p>Ομοιόμορφη κατανομή: Η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία αυξάνεται κατά 16% σε σχέση με την κανονική κατανομή (<math>\sigma=25</math>cm) και κατά 49% σε σχέση με την κανονική κατανομή (<math>\sigma=7.5</math>).</p>
Αποτελέσματα (P.D-mm)	<p>Κανονική κατανομή (<math>\sigma=7.5</math>cm): Αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης κατά 30% σε σχέση με την κανονική κατανομή των συμβατικών οχημάτων.</p> <p>Ομοιόμορφη κατανομή: Η χρονική περίοδος μέχρι την αστοχία αυξάνεται κατά 24% σε σχέση με την κανονική κατανομή (<math>\sigma=25</math>cm) και κατά 102% σε σχέση με την κανονική κατανομή (<math>\sigma=7.5</math> cm).</p>

Δεδομένων των παραπάνω, προκύπτει πως η μηδενική πλευρική μετατόπιση έχει δυσμενή επίδραση στο οδόστρωμα, μειώνοντας το χρόνο ζωής του και αυξάνοντας την ανάγκη για συντήρηση. Αντίθετα, όταν ο τροχός του οχήματος μετατοπίζεται πλευρικά σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή έχει θετική επίδραση στο οδόστρωμα από άποψη συντήρησης και διάρκειας ζωής. Στην έρευνα των Zhou et al 2019, τονίζεται πως η ομοιόμορφη κατανομή αποτελεί το βέλτιστο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στα αυτόνομα βαρέα οχήματα. Ακόμα, στην έρευνα των Noorvand et al (2017), τονίζεται πως μέσω προγραμμάτων και αλγορίθμων, είναι δυνατό να καθοριστούν οι θέσεις της μετατόπισης του τροχού ενός αυτόνομου βαρέου οχήματος, με κύριο σκοπό τη

βελτίωση της επίδρασης των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στη δομική επάρκεια των υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

Συμπερασματικά, στο σύνολό τους οι μελέτες καταλήγουν στην ομοιόμορφη κατανομή ως ευμενέστερη κατανομή προσομοίωσης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού παρόλα αυτά τα συμπεράσματα που εξάγονται διαφοροποιούνται τόσο ως προς το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C-%), όσο και ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση (PD-mm) που παρατηρείται στο οδόστρωμα. Η διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων μπορεί να αποδοθεί στα διαφορετικά πάχη, υλικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που έχουν ληφθεί υπόψη σε κάθε έρευνα. Συγκεκριμένα, σε κάθε έρευνα η διατομή του οδοστρώματος είναι συγκεκριμένη και αφορά συγκεκριμένα τμήματα υφιστάμενων οδικών δικτύων. Ακόμα, η διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων μπορεί να οφείλεται και στην διαφορετική μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος και κατ' επέκταση των τιμών της κόπωσης (ρηγματωμένης επιφάνειας) και της παραμένουσας παραμόρφωσης. Είναι γεγονός πως δεν υφίσταται μία συγκεκριμένη μεθοδολογία, με βάση την οποία μελετάται η επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στις βασικές μορφές αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.1 Πειραματικές διατομές

Με στόχο την πληρέστερη κατανόηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στην κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος (Εικόνες 4.1-4.2).



Εικόνα 4.1: Πειραματική διατομή 1-Δ1



Εικόνα 4.2: Πειραματική διατομή 2-Δ2

Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης των δύο διατομών κυμαίνεται από 8 έως 20cm (με βήμα 2 cm), ενώ το μέτρο δυσκαμψίας κυμαίνεται από 3.000 έως 10.000 MPa (με βήμα 1.000 MPa). Άρα για κάθε διατομή προκύπτουν 56 διαφορετικοί συνδυασμοί πάχους ασφαλτικής στρώσης και μέτρου δυσκαμψίας.

Όσον αφορά στις υποκείμενες στρώσεις τα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους είναι σταθερά ανά διατομή. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στη διατομή 1, το πάχος της ενοποιημένης στρώσης βάσης-υπόβασης είναι ίσο με 25 cm και το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 600 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης είναι ίσο με 250 MPa. Αντίστοιχα, στη διατομή 2 το πάχος της ενοποιημένης στρώσης βάσης-υπόβασης είναι 30 cm, ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 200 MPa και 80 MPa, για τη στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης, αντίστοιχα.



Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διατομών είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά της στρώσης έδρασης, με τη διατομή 2 να εδράζεται σε γεωτεχνική υποδομή μικρότερης φέρουσας ικανότητας.

Οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν οι δύο πειραματικές διατομές μεταξύ τους, καθώς και η διακύμανση του πάχους και του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων σε κάθε διατομή, αναμένεται να συμβάλουν:

A) στην καλύτερη κατανόηση και στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στη μηχανική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων σε όρους κόπωσης και

B) στην εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων για την πλευρική μετατόπιση τροχού με πεδίο εφαρμογής πλήθους οδοστρωμάτων.

## 4.2 Κυκλοφορία σχεδιασμού

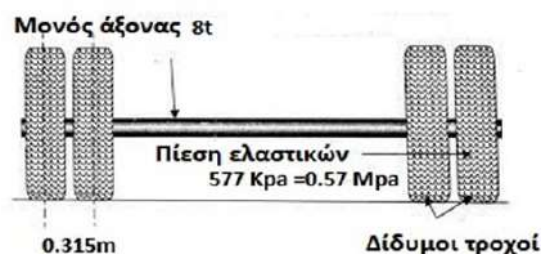
Η κυκλοφορία σχεδιασμού εκφρασμένη σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (Equivalent Standard Axle Load) για περίοδο σχεδιασμού 20 χρόνια θεωρήθηκε ίση με:

Για την πειραματική διατομή 1 ( $\Delta 1$ )  $\rightarrow$  ESALs=25.142.400 (EMHK=3.880 οχήματα/μέρα)

Για την πειραματική διατομή 2 ( $\Delta 2$ )  $\rightarrow$  ESALs=2.514.240 (EMHK=388 οχήματα /μέρα)

Για το τυπικό αξονικό φορτίο (μονός άξονας με δίδυμους τροχούς και φορτίο 8t) θεωρήθηκε όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3:

- i. Φορτίο τροχού ίσο με 20 KN
- ii. Ακτίνα τροχού ίση με 0.105 m
- iii. Πίεση στο οδόστρωμα 577 kPa
- iv. Απόσταση μεταξύ των κέντρων των δίδυμων τροχών ίση με 0.315 m



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση τυπικού αξονικού φορτίου

## 4.3 Κατανομές για την προσομοίωση της πλευρικής μετατόπισης τροχού

Οι κατανομές οι οποίες θεωρήθηκαν για την προσομοίωση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού είναι οι ακόλουθες:

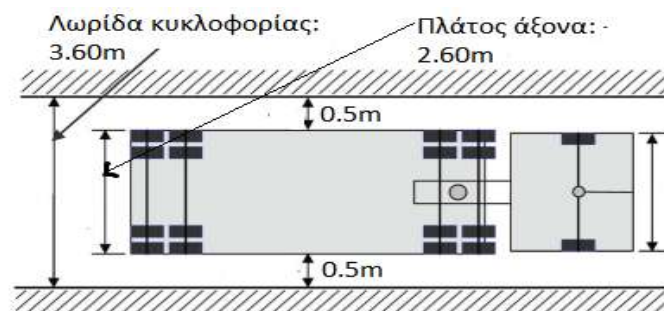
I. Μηδενική Κατανομή (αναμενόμενη κατανομή για τα αυτόνομα βαρέα οχήματα)

II. Κανονική Κατανομή (κατανομή των συμβατικών βαρέων οχημάτων)

III. Ομοιόμορφη Κατανομή (εν δυνάμει κατανομή για τα αυτόνομα βαρέα οχήματα, υπό διερεύνηση)

I. **Μηδενική Κατανομή:** Όταν το όχημα τοποθετείται στο κέντρο της λωρίδας και δεν μετατοπίζεται πλευρικά σε εγκάρσιες θέσεις στο πλάτος αυτής, τότε η πλευρική μετατόπιση του τροχού προσομοιώνεται με βάση τη μηδενική κατανομή.

Σε αυτή την περίπτωση το όχημα διέρχεται επαναλαμβανόμενα από το κέντρο της λωρίδας και οι τροχοί του (ο δεξιότερος και ο αριστερότερος) διατηρούν σταθερή απόσταση από το άκρο αυτής αντίστοιχα. Έχοντας ως δεδομένο πλάτος λωρίδας 3.60 m και πλάτος άξονα 2.60 m, προκύπτει πως η απόσταση αυτή ισούται με 0.5 m όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4.



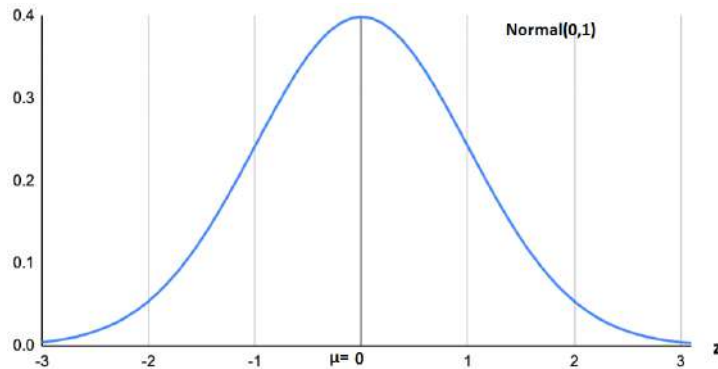
Εικόνα 4.4: Απεικόνιση του οχήματος στη λωρίδα για μηδενική μετατόπιση του τροχού

ΠΗΓΗ: [Gungor, 2018]

Επομένως, στην περίπτωση της μηδενικής πλευρικής μετατόπισης του τροχού, η συνολική κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων θα διέλθει από μία συγκεκριμένη θέση. Αναμένεται πως στην περίπτωση της μηδενικής μετατόπισης του τροχού θα παρατηρηθεί αυξημένη φθορά στην κρίσιμη θέση αστοχίας, αυξάνοντας αντίστοιχα και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (κόπωση).

II. **Κανονική Κατανομή:** Για πλευρική μετατόπιση τροχού σύμφωνα με την κανονική κατανομή θεωρήθηκε τυπική απόκλιση ίση με 25 cm όπως προτείνει και το MEPDG. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής δίνεται από τη Σχέση 3.1.

Για τον προσδιορισμό των θέσεων από όπου θα διέλθει ο τροχός του οχήματος χρησιμοποιείται η τυποποιημένη κανονική κατανομή. Το διάγραμμα αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5 όπου η κορυφή του διαγράμματος ταυτίζεται με τη μέση τιμή. Στην πλευρική μετατόπιση, η μέση τιμή αφορά την απόσταση του τροχού από τα όρια της λωρίδας κυκλοφορίας (50cm) όταν το όχημα τοποθετείται στο κέντρο αυτής. Η τιμή της μέσης τιμής λαμβάνεται ίση με 0.

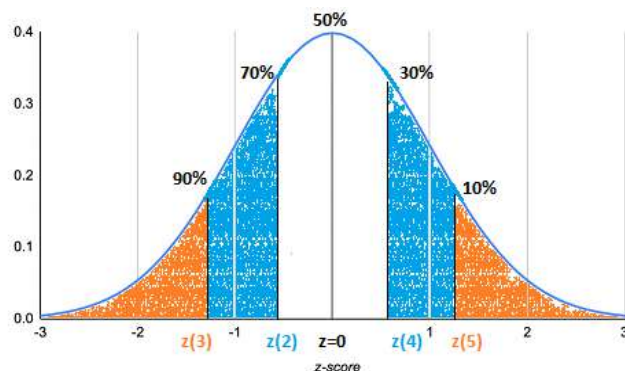


Εικόνα 4.5: Διάγραμμα τυποποιημένης κανονικής κατανομής

Η μεταβλητή  $z=(x-\mu/\sigma)$  ακολουθεί την τυποποιημένη κανονική κατανομή. Το  $z$  προκύπτει από τον πίνακα της τυποποιημένης κανονικής κατανομής. Με βάση τη μεταβλητή  $z$  θα προσδιοριστούν οι θέσεις διέλευσης των φορτίων στην περίπτωση μετατόπισης τροχού σύμφωνα με την κανονική κατανομή.

Για τον προσδιορισμό των θέσεων αυτών, λήφθηκε υπόψη η μέθοδος που προτείνει το MEPDG (MEPDG, Fatigue Cracking, 2004). Συγκεκριμένα, υποδιαιρείται το τμήμα κάτω από την καμπύλη της τυποποιημένης κανονικής κατανομής σε 4 ίσα διαστήματα. Έτσι, προκύπτουν 5 θέσεις, σε κάθε μία από τις οποίες θα διέλθει το 20% της συνολικής κυκλοφορίας. Γνωρίζοντας πως για  $z=0$  αντιστοιχεί το 50% των παρατηρήσεων, τα διαστήματα που προκύπτουν είναι 10%-30%, 30%-50%, 50%-70% και 70%-90%.

Για κάθε ένα από αυτά τα ποσοστά (10%, 30%, 50%, 70%, 90%), υπολογίζεται η τυποποιημένη μεταβλητή  $z$ , με την βοήθεια του πίνακα της τυποποιημένης κανονικής κατανομής (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα κανονικής κατανομής-Μεθοδολογία

Τα σημεία 2 και 4, 3 και 5 είναι συμμετρικά. Για το λόγο αυτό περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της τυπικής μεταβλητής  $z$  για τα σημεία 2 και 3. Ο πίνακας της τυποποιημένης κανονικής κατανομής δίνει την πιθανότητα  $P(Z \leq z)$  δηλαδή την πιθανότητα για την οποία μία τυποποιημένη μεταβλητή  $Z$  βρίσκεται στο διάστημα  $z(3)$  ή στο διάστημα  $z(2)$  αντίστοιχα.

Αφού η αντίστοιχη πιθανότητα είναι γνωστή (εμβαδόν του  $\Phi(z(3))$  και του  $\Phi(z(2))$  σκιαγραφημένου χωρίου), υπολογίζεται με την βοήθεια του πίνακα της τυποποιημένης κανονικής κατανομής, η μεταβλητή  $z$ .

Όταν  $\Phi(z(3))=0.9 \longrightarrow$

Εμβαδον $\Phi(z)$	$z$
0.89973	1.28
0.9	$z(3)=;$
0.90147	1.29

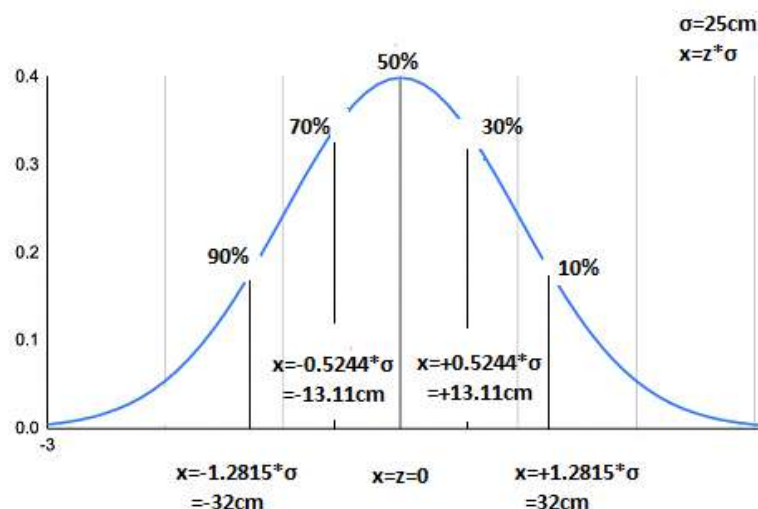
Η τιμή της μεταβλητής προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των τιμών και ισούται με  $z(3)=-1.28155$ . Η τιμή του  $x$  προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την μεταβλητή  $z$  με την τυπική απόκλιση που λήφθηκε ίση με 25 cm. Άρα  $x(3)=-1.28155*25 \text{ cm}=-32\text{cm}$ . Αντίστοιχα για την συμμετρική θέση 5,  $x(5)=+32 \text{ cm}$ .

Όταν  $\Phi(z(2))=0.7 \longrightarrow$

Εμβαδον $\Phi(z)$	$z$
0.69847	0.52
0.7	$z(2)=;$
0.70194	0.53

Η τιμή της μεταβλητής προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των τιμών και ισούται με  $z(2)=-0.5244$ . Αντίστοιχα προκύπτει  $x(2)=-0.5244*25 \text{ cm}=-13.11\text{cm}$  και  $x(4)=+13.11 \text{ cm}$ .

Στην Εικόνα 4.7, απεικονίζονται οι θέσεις της πλευρικής μετατόπισης του τροχού για την κανονική κατανομή.

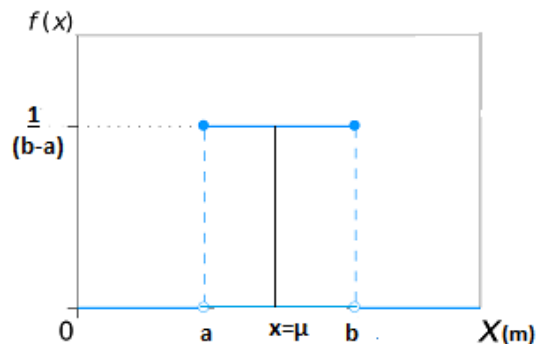


Εικόνα 4.7: Θέσεις πλευρικής μετατόπισης τροχού-κανονική κατανομή

III. **Ομοιόμορφη Κατανομή:** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ομοιόμορφης κατανομής δίνεται από τη Σχέση 4.1:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{όταν } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{όταν } x < a \text{ ή } x > b \end{cases} \quad (4.1)$$

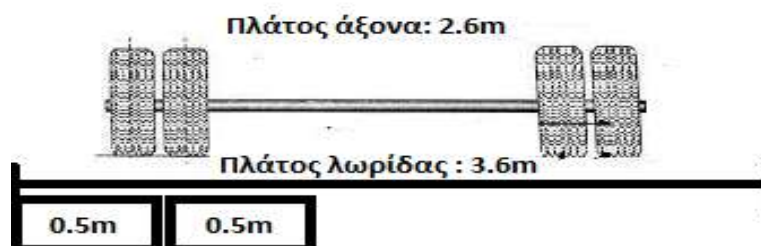
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απεικονίζεται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με βάση  $b-a$  και ύψος  $1/(b-a)$  (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα ομοιόμορφης κατανομής

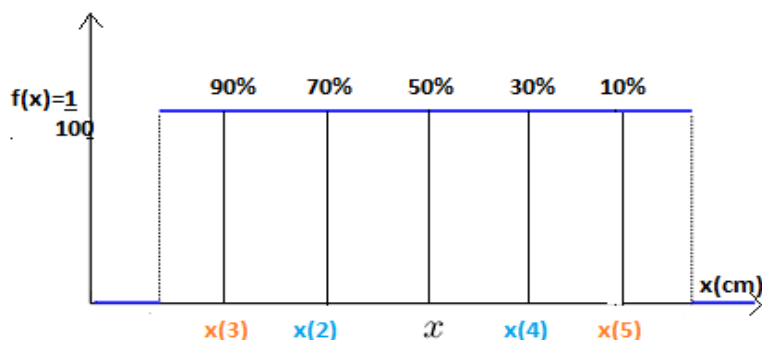
Η μέση τιμή ( $\mu$ ) στην ομοιόμορφη κατανομή τοποθετείται στη μέσο του διαστήματος ( $a-b$ ) και χωρίζει το διάγραμμα της ομοιόμορφης κατανομής σε δύο ίσα ορθογώνια παραλληλόγραμμα. Η μέση τιμή ισούται με 0. Το διάγραμμα της ομοιόμορφης κατανομής υποδιαιρείται σε 4 ίδια διαστήματα 10-30%, 30-50%, 50-70% και 70-90%. Έτσι προκύπτουν 5 θέσεις, σε κάθε μία από τις οποίες θα διέλθει το 20% της συνολικής κυκλοφορίας.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των θέσεων που αντιστοιχούν στις παραπάνω πιθανότητες διαφοροποιείται σε σχέση με την κανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, από το συνολικό πλάτος της λωρίδας αφαιρέθηκε το πλάτος του άξονα και έτσι προέκυψε το εναπομένον πλάτος για την πλευρική μετατόπιση του τροχού στο πλάτος της λωρίδας (Εικόνα 4.9). Αναλυτικότερα για πλάτος λωρίδας ίσο με 3.60 m και πλάτος άξονα ίσο με 2.60 m, προκύπτει εναπομένον πλάτος για μετατόπιση ίσο με 1 m, δηλαδή 0.5 m μετατόπιση δεξιά και αριστερά αντίστοιχα σε σχέση με την θέση του οχήματος όταν βρίσκεται στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας ( $\mu=0$ ) (Noorvand et al, 2017).



Εικόνα 4.9: Εναπομένον πλάτος για πλευρική μετατόπιση στην ομοιόμορφη κατανομή

Έτσι, προκύπτει για το διάγραμμα της ομοιόμορφης κατανομής πώς  $f(x)=1/(100\text{cm})=0.01$ . Με χρήση του ορθογωνίου διαγράμματος της ομοιόμορφης και με γνωστά τα ποσοστά (Εικόνα 4.10), υπολογίζονται οι θέσεις της πλευρικής μετατόπισης του τροχού για την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα ομοιόμορφης κατανομής-Μεθοδολογία

Οι θέσεις 2 και 4, 3 και 5 είναι συμμετρικές.

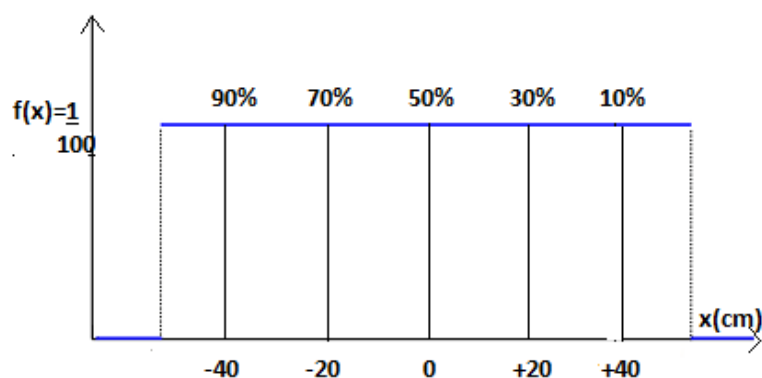
Για την **θέση 5=θέση 3**, αναζητείται εκείνο το  $x$  για το οποίο η πιθανότητα να βρίσκεται στο διάστημα  $x(5)$  να είναι ίση με το 10%. Αυτή η πιθανότητα υπολογίζεται άμεσα από το εμβαδόν του ορθογωνίου παραλληλογράμμου.

$$P(x > x(5)) = 0.1 \rightarrow (50 - x(5)) * f(x) = 0.1 \rightarrow (50 - x(5)) * 0.01 = 0.1 \rightarrow 50 - x(5) = 10 \rightarrow x(5) = 40\text{cm}$$

Αντίστοιχα για την **θέση 4=θέση 2**.

$$P(x > x(4)) = 0.3 \rightarrow (50 - x(4)) * f(x) = 0.3 \rightarrow (50 - x(4)) * 0.01 = 0.3 \rightarrow 50 - x(4) = 30 \rightarrow x(4) = 20\text{cm}$$

Στην Εικόνα 4.11 απεικονίζονται οι θέσεις της πλευρικής μετατόπισης του τροχού για την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 4.11: Θέσεις πλευρικής μετατόπισης τροχού-ομοιόμορφη κατανομή

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής, οι θέσεις που προέκυψαν για την πλευρική μετατόπιση του τροχού εκτείνονται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών σε σχέση με εκείνες στην περίπτωση της κανονικής κατανομής. Φαίνεται πως όταν ο τροχός μετατοπίζεται με βάση την ομοιόμορφη

κατανομή, το όχημα χρησιμοποιεί το πλάτος της λωρίδας αποτελεσματικότερα, καλύπτοντας μεγαλύτερο μέρος αυτής.

#### 4.4 Ανάλυση οδοστρωμάτων

Η ανάλυση των οδοστρωμάτων περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην κρίσιμη θέση αστοχίας (πυθμένης ασφαλικών στρώσεων). Στη συνέχεια τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη αξιοποιούνται για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων και ακολούθως της φθοράς (D). Μέσω κατάλληλης συνάρτησης η φθορά αξιοποιείται για την εκτίμηση του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C-%) λόγω κόπωσης ασφαλικών στρώσεων. Η ανάλυση βασίζεται στην μεθοδολογία κατά την οποία το MEPDG εισάγει την πλευρική μετατόπιση του τροχού στον υπολογισμό της φθοράς (Εικόνα 3.6) με την μόνη διαφορά πως το σημείο υπολογισμού των εντατικών μεγεθών διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, για την μορφή αστοχίας που μελετάται (κόπωση ασφαλικών στρώσεων) και το τυπικό αξονικό φορτίο, κρίσιμο σημείο αστοχίας είναι το κέντρο του δίδυμου τροχού (σημείο 1-Εικόνα 3.6).

Για την εντατική ανάλυση των οδοστρωμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D-Move Analysis. Το υπόψη πρόγραμμα ανάλυσης έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο της Νεβάδα (Siddhartan et al, 2000). Οι επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος θεωρούνται ως συνεχές μέσο και αξιοποιείται η τεχνική μετασχηματισμού του Fourier.

Στο πρόγραμμα εισήχθησαν τα δεδομένα εισόδου που αφορούν:

- i. τη διαμόρφωση του άξονα (Φορτίο άξονα-tire load, Πίεση στο οδόστρωμα-tire pressure)
- ii. την κυκλοφορία (ΕΜΗΚ, Ποσοστό βαρέων οχημάτων στην λωρίδα κυκλοφορίας-90%, Περίοδος σχεδιασμού, Συνολικοί Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες)
- iii. τη δομή του οδοστρώματος (υποκείμενες στρώσεις και πάχη)
- iv. τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης (Μέτρο δυσκαμψίας-ασφαλική στρώση, Μέτρο ελαστικότητας-υποκείμενες στρώσεις, Λόγος Poisson  $\nu=0.35$  για όλες τις στρώσεις, Θερμοκρασία οδοστρώματος:  $T=20^{\circ}\text{C}$ )

Με σκοπό τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο κρίσιμο σημείο αστοχίας (κέντρο δίδυμου τροχού) για κάθε θέση διέλευσης των αξονικών φορτίων, εισήχθησαν στο πρόγραμμα οι συντεταγμένες του x (δηλαδή οι θέσεις εισαγωγής των φορτίων για την κανονική και την ομοιόμορφη κατανομή) και τα βάθη z (δηλαδή το πάχος της ασφαλικής στρώσης σε κάθε περίπτωση 8-20 cm).

Εξήχθησαν από το πρόγραμμα ανάλυσης οι εφελκυστικές τάσεις-παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο πυθμένα της ασφαλικής στρώσης στο κρίσιμο σημείο αστοχίας για κάθε μία από τις θέσεις διέλευσης των φορτίων. Η φθορά στο κρίσιμο σημείο αστοχίας και η κόπωση στην περίπτωση της μηδενικής κατανομής εξαγόταν από το πρόγραμμα.

Με βάση τις παραδοχές που ελήφθησαν υπόψη για την κυκλοφορία (ισοδύναμοι τυπικοί άξονες), η φθορά προκύπτει ως ο λόγος των συνολικών προβλεπόμενων διελεύσεων του τυπικού αξονικού φορτίου για την περίοδο σχεδιασμού ( $n$ ) ως προς τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες διελεύσεις του τυπικού αξονικού φορτίου ( $N$ ) (Σχέση 3.2).

Ο παράγοντας  $n$  που αφορά τις προβλεπόμενες διελεύσεις ισούται με:

$$n(\Delta 1) = 25.142.400 \text{ ESALs } (\Delta 1 = \text{Διατομή 1})$$

$$n(\Delta 2) = 2.514.240 \text{ ESALs } (\Delta 2 = \text{Διατομή 2})$$

Ο παράγοντας  $N$  που αφορά τις επιτρεπόμενες διελεύσεις μέχρι την αστοχία υπολογίζεται με την βοήθεια της Σχέσης 3.3. Για την εφαρμογή της, θεωρήθηκε:

1.  $V_a$ : ποσοστό κενών αέρα ίσο με 5%
2.  $V_b$ : ποσοστό ασφάλτου ίσο με 9%
3.  $h$ : πάχος ασφαλικής στρώσης ίσο με 8-20 cm/2 cm
4.  $E$ : μέτρο δυσκαμψίας ίσο με 3.000-10.000 MPa/1000 MPa
5.  $\epsilon$ : εφελκυστική παραμόρφωση αναπτυσσόμενη στο κρίσιμο σημείο αστοχίας για τις θέσεις πλευρικής μετατόπισης τροχού
6.  $\beta_1$ : 249.008
7.  $\beta_2$ : 1.2334
8.  $\beta_3$ : 1

Με γνωστές τις εφελκυστικές παραμορφώσεις και με τη βοήθεια της Σχέσης 3.3, υπολογίστηκαν οι επιτρεπόμενες διελεύσεις μέχρι την αστοχία για κάθε θέση πλευρικής μετατόπισης του τροχού. Με γνωστά τα  $n_i$  και  $N_i$  για κάθε θέση υπολογίστηκε η φθορά, και τελικά υπολογίστηκε η συνολική φθορά που εντοπίζεται στο κρίσιμο σημείο αστοχίας (κέντρο δίδυμου τροχού) με εφαρμογή της Σχέσης 4.2 για την κανονική και 4.3 για την ομοιόμορφη κατανομή.

$$D_{\text{total}} = 0.2 * D_{(x=0)} + 2 * 0.2 * D_{(x=\pm 13.1 \text{ lcm})} + 2 * 0.2 * D_{(x=\pm 32 \text{ cm})} \quad (4.2)$$

$$D_{\text{total}} = 0.2 * D_{(x=0)} + 2 * 0.2 * D_{(x=\pm 20 \text{ cm})} + 2 * 0.2 * D_{(x=\pm 40 \text{ cm})} \quad (4.3)$$

Τέλος, εφαρμόστηκε ο νόμος της κόπωσης, σύμφωνα με την Σχέση 3.5 .



Έτσι για κάθε διατομή, και κάθε πιθανό συνδυασμό πάχους ασφαλικής στρώσης και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικής στρώσης, υπολογίστηκαν οι τιμές της φθοράς και της κόπωσης για πλευρική μετατόπιση του τροχού σύμφωνα με τις 3 κατανομές που μελετήθηκαν (κανονική, μηδενική και ομοιόμορφη). Δηλαδή η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε συνολικά για 7 πάχη ασφαλικής στρώσης με μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας (8 διαφορετικά μέτρα δυσκαμψίας) και για 2 μαθηματικές κατανομές προσομοίωσης (ομοιόμορφη-κανονική), ήτοι 112 αναλύσεις για κάθε πειραματική διατομή.

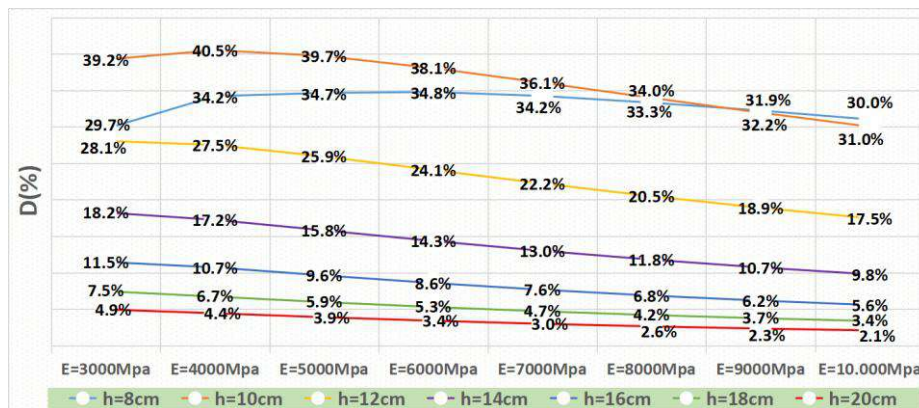
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ως προς τη φθορά (D) και την κόπωση (F.C) για κάθε διατομή ανά κατανομή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Πειραματική Διατομή - Δ1

#### 5.1.1 Μηδενική κατανομή

Στην Εικόνα 5.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς για τη μηδενική μετατόπιση του τροχού ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 5.1: D(%) - Μηδενική κατανομή (Δ1)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.1: Μεταβολή D(%) - Μηδενική κατανομή (Δ1)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	9.5	6.3	5.1	3.3	1.8	0.7	-0.3	-1.0
h=12cm	-11.2	-13.0	-13.8	-14.0	-13.8	-13.5	-13.1	-12.6
h=14cm	-9.8	-10.3	-10.1	-9.7	-9.2	-8.7	-8.2	-7.7
h=16cm	-6.8	-6.5	-6.2	-5.8	-5.3	-4.9	-4.5	-4.2
h=18cm	-4.0	-4.0	-3.7	-3.3	-3.0	-2.7	-2.4	-2.2
h=20cm	-2.5	-2.3	-2.1	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm παρατηρείται αύξηση της φθοράς, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

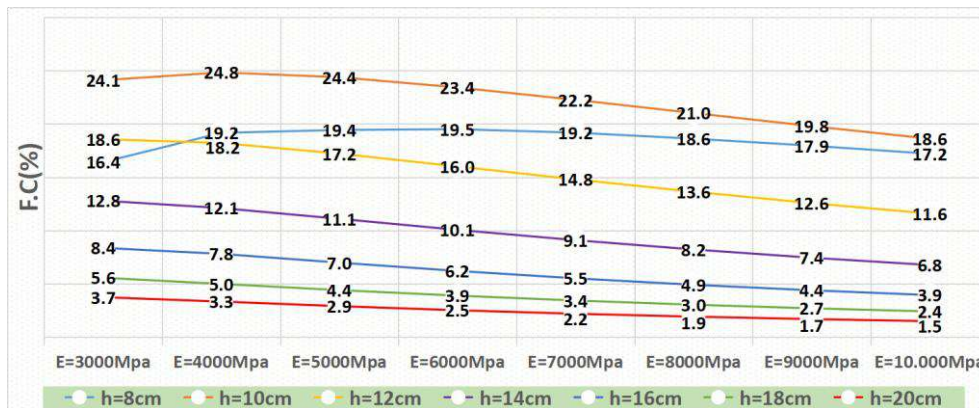
Στον Πίνακα 5.2, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.2: Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	4.5	1.3	-0.6	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5
E=5000Mpa	0.4	-0.8	-1.6	-1.4	-1.1	-0.8	-0.5
E=6000Mpa	0.1	-1.7	-1.9	-1.5	-1.0	-0.7	-0.5
E=7000Mpa	-0.5	-2.0	-1.9	-1.4	-0.9	-0.6	-0.4
E=8000Mpa	-0.9	-2.1	-1.7	-1.2	-0.8	-0.5	-0.4
E=9000Mpa	-1.1	-2.0	-1.6	-1.1	-0.7	-0.4	-0.3
E=10.000Mpa	-1.2	-1.9	-1.4	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.3-2.1. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.1).

Στην Εικόνα 5.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης για τη μηδενική μετατόπιση του τροχού ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.



Εικόνα 5.2: F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.3, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.3: Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	7.7	5.7	4.9	3.9	3.1	2.4	1.8	1.4
h=12cm	-5.5	-6.6	-7.2	-7.4	-7.5	-7.4	-7.2	-7.0
h=14cm	-5.8	-6.1	-6.1	-5.9	-5.7	-5.4	-5.1	-4.8
h=16cm	-4.4	-4.3	-4.1	-3.9	-3.6	-3.3	-3.1	-2.8
h=18cm	-2.8	-2.8	-2.6	-2.3	-2.1	-1.9	-1.7	-1.5
h=20cm	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm αλλά και από 12 cm σε 14

cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm παρατηρείται αύξηση της κόπωσης, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

Στον Πίνακα 5.4, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

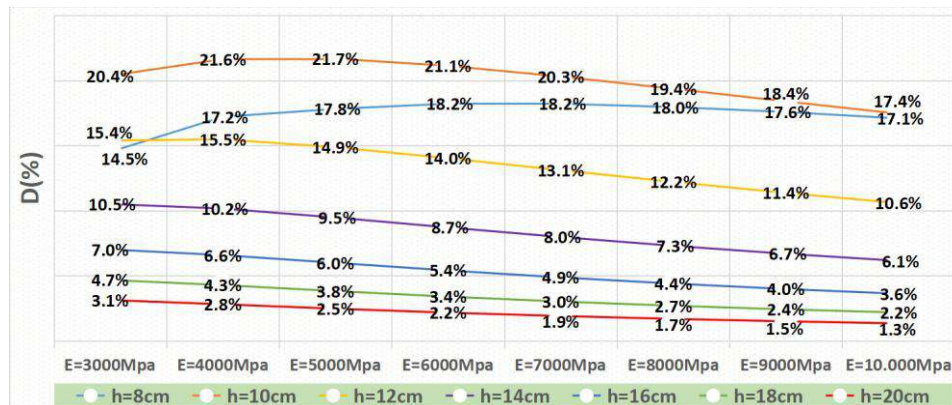
Πίνακας 5.4: Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή( $\Delta 1$ )

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	2.7	0.7	-0.4	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4
E=5000Mpa	0.3	-0.5	-1.0	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4
E=6000Mpa	0.1	-1.0	-1.2	-1.0	-0.8	-0.5	-0.4
E=7000Mpa	-0.3	-1.2	-1.2	-1.0	-0.7	-0.5	-0.3
E=8000Mpa	-0.6	-1.2	-1.2	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3
E=9000Mpa	-0.7	-1.2	-1.1	-0.8	-0.5	-0.3	-0.2
E=10.000Mpa	-0.8	-1.2	-1.0	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.2-1.2. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.3).

### 5.1.2 Κανονική κατανομή

Στην Εικόνα 5.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται με βάση την κανονική κατανομή.



Εικόνα 5.3: D(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 1$ )

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.5, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.5: Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ1)

KANONΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	5.9	4.4	3.9	2.9	2.1	1.4	0.8	0.4
h=12cm	-5.0	-6.2	-6.8	-7.1	-7.2	-7.2	-7.0	-6.9
h=14cm	-4.9	-5.3	-5.4	-5.3	-5.1	-4.9	-4.7	-4.4
h=16cm	-3.5	-3.6	-3.5	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.5
h=18cm	-2.3	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4
h=20cm	-1.5	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς παρατηρείται όταν το πάχος της ασφατικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm παρατηρείται αύξηση της φθοράς, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

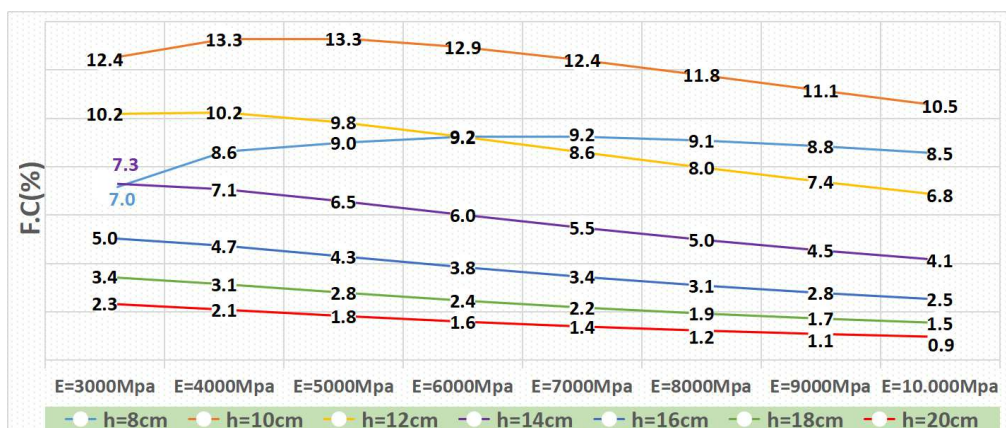
Στον Πίνακα 5.6, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφατικής στρώσης.

Πίνακας 5.6: Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή(Δ1)

KANONΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	2.7	1.3	0.1	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3
E=5000Mpa	0.6	0.0	-0.6	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3
E=6000Mpa	0.4	-0.6	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3
E=7000Mpa	0.0	-0.8	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3
E=8000Mpa	-0.3	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2
E=9000Mpa	-0.4	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2
E=10.000Mpa	-0.5	-1.0	-0.8	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.2-1.0. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφατικής στρώσης (Πίνακας 5.5).

Στην Εικόνα 5.4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης ανάλογα το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφατικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή.



Εικόνα 5.4: F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ1)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.7, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.7: Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 1$ )

KANONIKH	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	5.5	4.7	4.3	3.7	3.2	2.7	2.3	2.0
h=12cm	-2.3	-3.0	-3.5	-3.7	-3.8	-3.8	-3.8	-3.7
h=14cm	-2.9	-3.2	-3.3	-3.2	-3.1	-3.0	-2.8	-2.7
h=16cm	-2.3	-2.3	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6
h=18cm	-1.6	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
h=20cm	-1.1	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm παρατηρείται αύξηση της κόπωσης, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

Στον Πίνακα 5.8, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

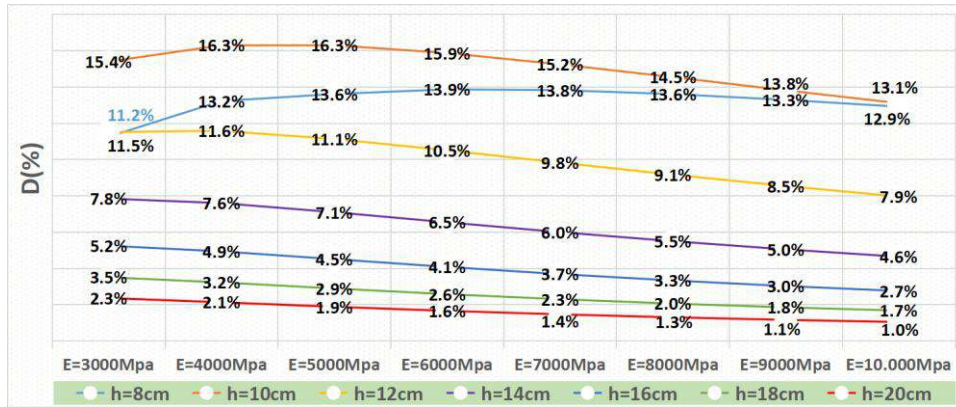
Πίνακας 5.8: Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 1$ )

KANONIKH	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	1.6	0.8	0.1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
E=5000Mpa	0.4	0.0	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3
E=6000Mpa	0.2	-0.4	-0.6	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2
E=7000Mpa	0.0	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
E=8000Mpa	-0.2	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2
E=9000Mpa	-0.2	-0.6	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-0.3	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.1-0.6. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.7).

### 5.1.3 Ομοιόμορφη κατανομή

Στην Εικόνα 5.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 5.5: D(%) -Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.9, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.9: Μεταβολή D(%) -Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	4.1	3.1	2.7	2.0	1.4	0.9	0.5	0.2
h=12cm	-3.9	-4.7	-5.2	-5.4	-5.4	-5.4	-5.3	-5.1
h=14cm	-3.7	-4.0	-4.0	-4.0	-3.8	-3.7	-3.5	-3.3
h=16cm	-2.6	-2.7	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9
h=18cm	-1.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
h=20cm	-1.1	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm, παρατηρείται αύξηση της φθοράς, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

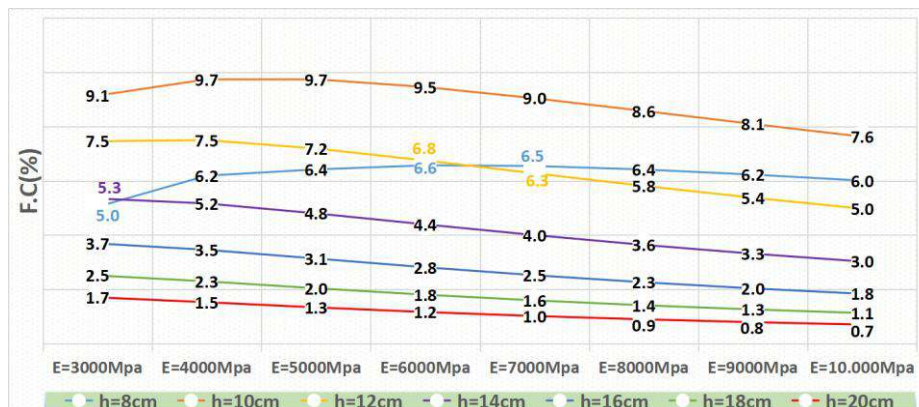
Στον Πίνακα 5.10, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.10: Μεταβολή D(%) -Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	2.0	0.9	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2
E=5000Mpa	0.4	0.0	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
E=6000Mpa	0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2
E=7000Mpa	0.0	-0.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
E=8000Mpa	-0.2	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2
E=9000Mpa	-0.3	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-0.4	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.1-0.7. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (Πίνακας 5.9).

Στην Εικόνα 5.6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 5.6: F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.11, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.11: Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	4.1	3.5	3.3	2.9	2.5	2.2	1.9	1.6
h=12cm	-1.7	-2.2	-2.6	-2.7	-2.8	-2.8	-2.7	-2.7
h=14cm	-2.1	-2.3	-2.4	-2.4	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9
h=16cm	-1.7	-1.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2
h=18cm	-1.2	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7
h=20cm	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm. Για αύξηση του πάχους από 8 cm σε 10 cm, παρατηρείται αύξηση της κόπωσης, ενώ όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας αυτή η αύξηση μειώνεται αισθητά.

Στον Πίνακα 5.12, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.12: Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ1)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	1.1	0.6	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
E=5000Mpa	0.2	0.0	-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2
E=6000Mpa	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2
E=7000Mpa	0.0	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
E=8000Mpa	-0.1	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
E=9000Mpa	-0.2	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-0.2	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1

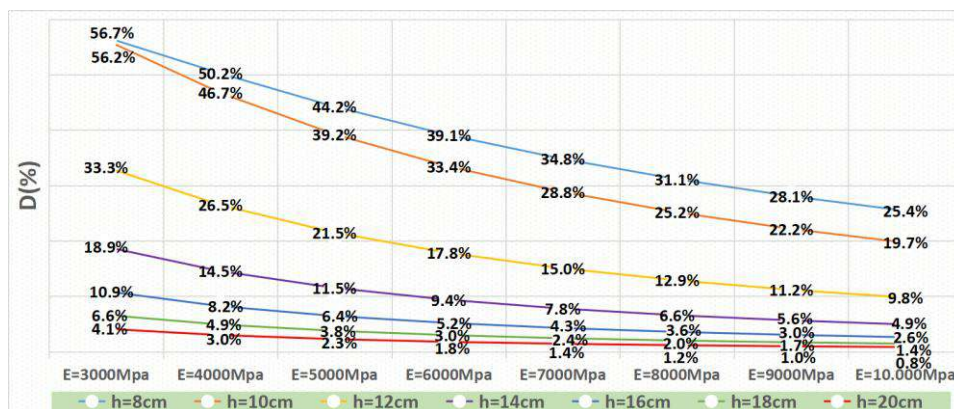


Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.1-0.5. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (Πίνακας 5.11).

## 5.2 Πειραματική Διατομή - Δ2

### 5.2.1 Μηδενική κατανομή

Στην Εικόνα 5.7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς για τη μηδενική μετατόπιση του τροχού ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 5.7: D(%) - Μηδενική κατανομή (Δ2)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.13, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.13: Μεταβολή D(%) - Μηδενική κατανομή (Δ2)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	-0.5	-3.5	-5.0	-5.7	-5.9	-6.0	-5.9	-5.7
h=12cm	-22.9	-20.3	-17.7	-15.6	-13.8	-12.3	-11.0	-9.9
h=14cm	-14.4	-11.9	-10.0	-8.5	-7.3	-6.3	-5.5	-4.9
h=16cm	-8.0	-6.3	-5.1	-4.2	-3.5	-3.0	-2.6	-2.3
h=18cm	-4.3	-3.3	-2.7	-2.2	-1.8	-1.6	-1.3	-1.2
h=20cm	-2.5	-1.9	-1.5	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς υφίσταται όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm και από 12 cm σε 14 cm.

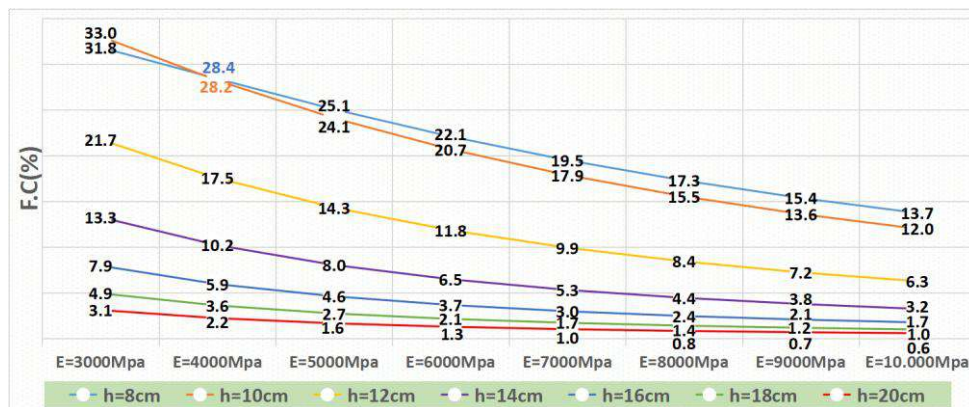
Στον Πίνακα 5.14, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.14: Μεταβολή D(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-6.5	-9.5	-6.8	-4.4	-2.7	-1.7	-1.1
E=5000Mpa	-6.0	-7.5	-5.0	-3.0	-1.8	-1.1	-0.7
E=6000Mpa	-5.1	-5.8	-3.7	-2.2	-1.3	-0.8	-0.5
E=7000Mpa	-4.3	-4.6	-2.8	-1.6	-0.9	-0.6	-0.3
E=8000Mpa	-3.6	-3.7	-2.2	-1.2	-0.7	-0.4	-0.3
E=9000Mpa	-3.1	-3.0	-1.7	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2
E=10.000Mpa	-2.6	-2.5	-1.4	-0.7	-0.4	-0.2	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.1-9.5. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.13).

Στην Εικόνα 5.8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης για την μηδενική μετατόπιση του τροχού ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.



Εικόνα 5.8: F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.15, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.15: Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ1)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	1.2	-0.2	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.8	-1.7
h=12cm	-11.3	-10.7	-9.8	-8.8	-7.9	-7.1	-6.4	-5.7
h=14cm	-8.5	-7.3	-6.3	-5.4	-4.6	-4.0	-3.5	-3.0
h=16cm	-5.3	-4.3	-3.4	-2.8	-2.3	-2.0	-1.7	-1.5
h=18cm	-3.0	-2.3	-1.9	-1.5	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8
h=20cm	-1.8	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm και από 12 cm σε 14 cm.

Στον Πίνακα 5.16, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.

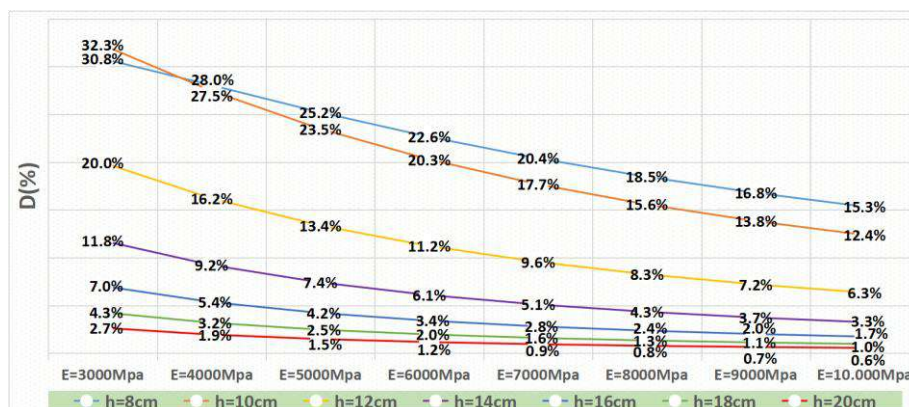
Πίνακας 5.16: Μεταβολή F.C(%)-Μηδενική κατανομή(Δ2)

ΜΗΔΕΝΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-3.4	-4.8	-4.2	-3.1	-2.0	-1.3	-0.9
E=5000Mpa	-3.3	-4.1	-3.2	-2.2	-1.3	-0.9	-0.6
E=6000Mpa	-3.0	-3.4	-2.5	-1.6	-0.9	-0.6	-0.4
E=7000Mpa	-2.6	-2.8	-1.9	-1.2	-0.7	-0.4	-0.3
E=8000Mpa	-2.2	-2.3	-1.5	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2
E=9000Mpa	-1.9	-1.9	-1.2	-0.7	-0.4	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-1.6	-1.6	-1.0	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.1-4.8. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (Πίνακας 5.15).

## 5.2.2 Κανονική κατανομή

Στην Εικόνα 5.9, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται με βάση την κανονική κατανομή.



Εικόνα 5.9: D(%) -Κανονική κατανομή(Δ2)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.17, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.

Πίνακας 5.17: Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 2$ )

KANONΙΚΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	1.4	-0.6	-1.7	-2.4	-2.7	-2.9	-3.0	-3.0
h=12cm	-12.3	-11.3	-10.1	-9.1	-8.1	-7.3	-6.6	-6.0
h=14cm	-8.2	-7.0	-6.0	-5.1	-4.5	-3.9	-3.5	-3.1
h=16cm	-4.7	-3.9	-3.2	-2.7	-2.3	-2.0	-1.7	-1.5
h=18cm	-2.8	-2.2	-1.7	-1.4	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8
h=20cm	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12 cm.

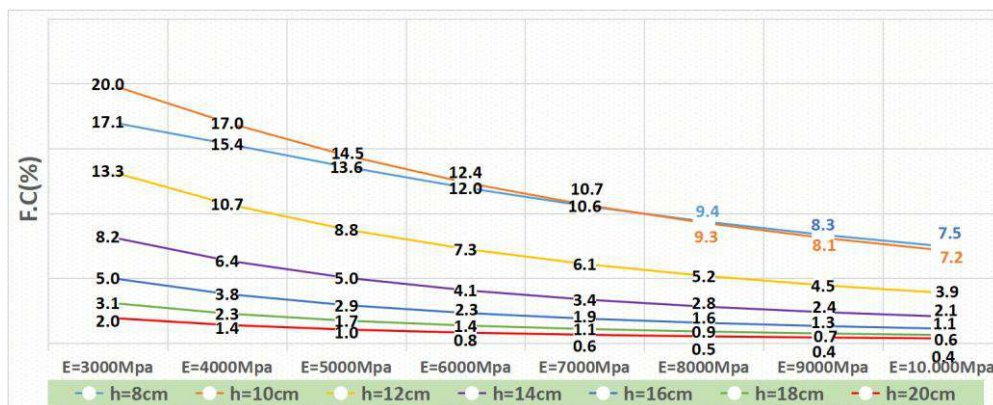
Στον Πίνακα 5.18, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.18: Μεταβολή D(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 2$ )

KANONΙΚΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-2.8	-4.8	-3.8	-2.6	-1.7	-1.1	-0.7
E=5000Mpa	-2.8	-4.0	-2.8	-1.8	-1.1	-0.7	-0.5
E=6000Mpa	-2.6	-3.2	-2.1	-1.3	-0.8	-0.5	-0.3
E=7000Mpa	-2.2	-2.6	-1.7	-1.0	-0.6	-0.4	-0.2
E=8000Mpa	-1.9	-2.1	-1.3	-0.8	-0.4	-0.3	-0.2
E=9000Mpa	-1.7	-1.7	-1.0	-0.6	-0.3	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-1.5	-1.5	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.1-4.8. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.17).

Στην Εικόνα 5.10, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή.



Εικόνα 5.10: F.C.(%)-Κανονική κατανομή( $\Delta 2$ )

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.19, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.19: Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ2)

KANONIKH	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	2.9	1.6	0.9	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3
h=12cm	-6.7	-6.3	-5.7	-5.1	-4.6	-4.1	-3.7	-3.3
h=14cm	-5.1	-4.4	-3.7	-3.2	-2.7	-2.4	-2.1	-1.8
h=16cm	-3.2	-2.6	-2.1	-1.8	-1.5	-1.3	-1.1	-0.9
h=18cm	-1.9	-1.5	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
h=20cm	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης υφίσταται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12cm.

Στον Πίνακα 5.20, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

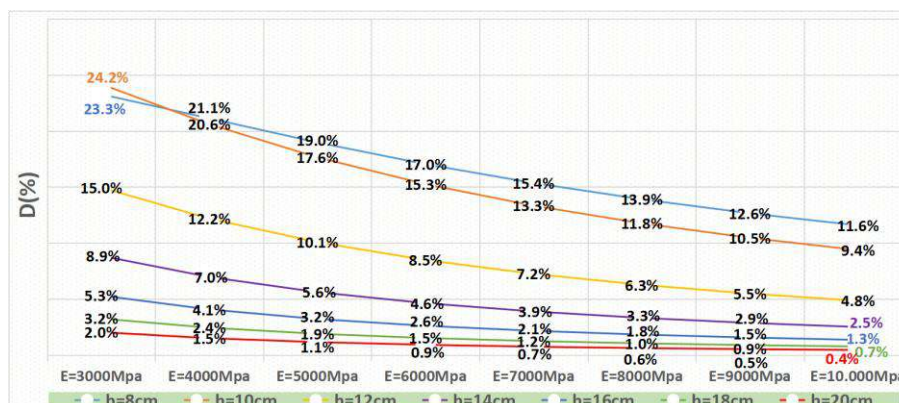
Πίνακας 5.20: Μεταβολή F.C(%)-Κανονική κατανομή(Δ2)

KANONIKH	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-1.7	-3.0	-2.6	-1.9	-1.3	-0.8	-0.6
E=5000Mpa	-1.8	-2.5	-2.0	-1.3	-0.9	-0.5	-0.4
E=6000Mpa	-1.6	-2.1	-1.5	-1.0	-0.6	-0.4	-0.2
E=7000Mpa	-1.4	-1.7	-1.2	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2
E=8000Mpa	-1.2	-1.4	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1
E=9000Mpa	-1.0	-1.2	-0.7	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1
E=10.000Mpa	-0.9	-1.0	-0.6	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας, η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.1-3.0. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.19).

### 5.2.3 Ομοιόμορφη κατανομή

Στην Εικόνα 5.11, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φθοράς ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται με βάση την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 5.11: D(%) - Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η φθορά. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η φθορά.

Στον Πίνακα 5.21, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.21: Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	0.9	-0.5	-1.3	-1.8	-2.0	-2.1	-2.2	-2.2
h=12cm	-9.2	-8.4	-7.6	-6.8	-6.1	-5.5	-5.0	-4.5
h=14cm	-6.1	-5.2	-4.5	-3.9	-3.4	-3.0	-2.6	-2.3
h=16cm	-3.5	-2.9	-2.4	-2.0	-1.7	-1.5	-1.3	-1.2
h=18cm	-2.1	-1.6	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
h=20cm	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12cm.

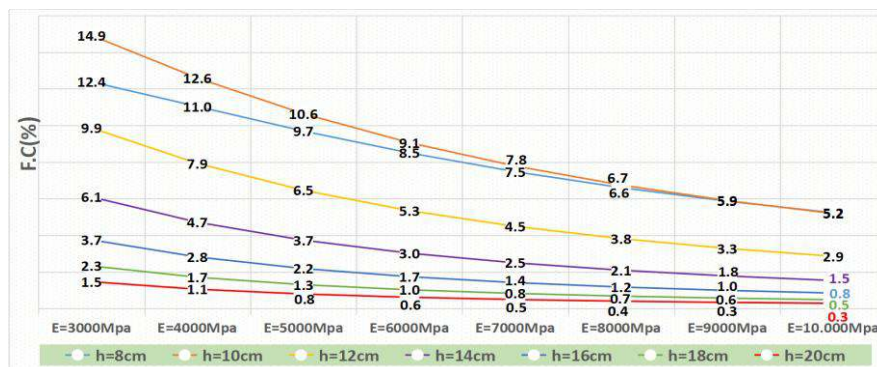
Στον Πίνακα 5.22, παρουσιάζεται η μείωση της φθοράς που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.22: Μεταβολή D(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-2.2	-3.6	-2.8	-1.9	-1.2	-0.8	-0.5
E=5000Mpa	-2.2	-3.0	-2.1	-1.4	-0.9	-0.5	-0.3
E=6000Mpa	-1.9	-2.4	-1.6	-1.0	-0.6	-0.4	-0.2
E=7000Mpa	-1.7	-1.9	-1.2	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2
E=8000Mpa	-1.5	-1.6	-1.0	-0.6	-0.3	-0.2	-0.1
E=9000Mpa	-1.3	-1.3	-0.8	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1
E=10.000Mpa	-1.1	-1.1	-0.6	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της φθοράς είναι της τάξης του 0.1-3.6. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της φθοράς σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.21).

Στην Εικόνα 5.12, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κόπωσης ανάλογα με το πάχος και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 5.12: F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας και για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης τόσο μειώνεται η κόπωση. Αντίστοιχα όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται η κόπωση.

Στον Πίνακα 5.23, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.23: Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	E=3000 Mpa	E=4000 Mpa	E=5000 Mpa	E=6000 Mpa	E=7000 Mpa	E=8000 Mpa	E=9000 Mpa	E=10.000 Mpa
h=8cm								
h=10cm	2.5	1.6	0.9	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0
h=12cm	-5.1	-4.7	-4.2	-3.7	-3.3	-2.9	-2.6	-2.3
h=14cm	-3.8	-3.2	-2.7	-2.3	-2.0	-1.7	-1.5	-1.3
h=16cm	-2.3	-1.9	-1.6	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7
h=18cm	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4
h=20cm	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2

Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της κόπωσης παρατηρείται όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από 10 cm σε 12cm.

Στον Πίνακα 5.24, παρουσιάζεται η μείωση της κόπωσης που παρατηρείται στο οδόστρωμα με κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης.

Πίνακας 5.24: Μεταβολή F.C(%)-Ομοιόμορφη κατανομή(Δ2)

ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ	h=8cm	h=10cm	h=12cm	h=14cm	h=16cm	h=18cm	h=20cm
E=3000Mpa							
E=4000Mpa	-1.3	-2.3	-1.9	-1.4	-0.9	-0.6	-0.4
E=5000Mpa	-1.3	-1.9	-1.5	-1.0	-0.6	-0.4	-0.3
E=6000Mpa	-1.2	-1.6	-1.1	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2
E=7000Mpa	-1.0	-1.3	-0.9	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1
E=8000Mpa	-0.9	-1.0	-0.7	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1
E=9000Mpa	-0.7	-0.8	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1
E=10.000Mpa	-0.6	-0.7	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1

Παρατηρείται πως για κάθε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας η μείωση της κόπωσης είναι της τάξης του 0.1-2.3. Φαίνεται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά σε μικρότερο βαθμό στα αποτελέσματα της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (Πίνακας 5.23).

### 5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από την παραπάνω ανάλυση των πειραματικών διατομών Δ1 και Δ2 και την αξιολόγηση των σχετικών αποτελεσμάτων προκύπτουν τα εξής:

1. Όταν η πλευρική μετατόπιση του τροχού ακολουθεί τη μηδενική κατανομή, η τιμή της φθοράς είναι μεγαλύτερη. Κατά συνέπεια το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας λόγω κόπωσης ασφαλικών στρώσεων (F.C) είναι επίσης μεγαλύτερο. Αντίθετα, η ομοιόμορφη κατανομή της πλευρικής μετατόπισης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της φθοράς και κατ' επέκταση της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C).
2. Όταν το μέτρο δυσκαμψίας είναι σταθερό (E σταθερό) και μεταβάλλεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης, παρατηρείται μείωση των τιμών της φθοράς

και της κόπωσης (και για τις 3 κατανομές). Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα θεωρείται αναμενόμενο, καθώς η αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης οδηγεί σε μειωμένες εφελκυστικές τάσεις στο πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης με αποτέλεσμα τη μείωση της ρηγμάτωσης στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

3. Όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης είναι σταθερό (ή σταθερό) και μεταβάλλεται το μέτρο δυσκαμψίας, προκύπτει -βάσει των Πινάκων- μείωση στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης και για τις 3 κατανομές που εξετάζονται. Η παρούσα παρατήρηση συνδέεται με το γεγονός ότι αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας συνεπάγεται βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της ασφαλτικής στρώσης και τελικά μείωση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων σε αυτή. Παρόλα αυτά παρατηρείται πως η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας δεν μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό τις τιμές της φθοράς και της κόπωσης σε σχέση με την αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης.
4. Στην περίπτωση της Πειραματικής διατομής Δ1, όταν το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 8 cm σε 10 cm (E σταθερό), παρατηρείται και για τις 3 κατανομές, αύξηση των τιμών της φθοράς και της κόπωσης. Αντίστοιχα, για τα πάχη της ασφαλτικής στρώσης των 8 cm και 10 cm, με αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας έως την τιμή των 6.000 MPa δεν παρατηρείται μείωση των τιμών της φθοράς και της κόπωσης όπως θα ήταν αναμενόμενο. Επομένως προκύπτει πως η αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης από 8 cm σε 10 cm για τα φορτία κυκλοφορίας της πειραματικής διατομής 1, δεν μεταβάλλει την απόκριση του οδοστρώματος σε όρους κόπωσης.
5. Η μεγαλύτερη μείωση στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης συμβαίνει όταν μεταβάλλεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης (E σταθερό) από 10 cm σε 12 cm και από 12 cm σε 14 cm.
6. Τέλος, όσο αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης (E σταθερό) τόσο μειώνεται η διαφορά στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης και για τις 3 κατανομές. Για αύξηση του πάχους από 18 cm σε 20 cm, προκύπτει πως οι τιμές της φθοράς και της κόπωσης είναι παραπλήσιες και για τις 3 κατανομές. Συγκεκριμένα, για τις τιμές της φθοράς φαίνεται πως η μεγαλύτερη μείωση (από 18 cm-20 cm) στην ομοιόμορφη κατανομή ισούται με 1.1 για την Δ1 και 1.2 για την Δ2, στην κανονική με 1.5 για τη Δ1 και 1.6 για τη Δ2 και τέλος στη μηδενική με 2.5 για τη Δ1 και τη Δ2. Αντίστοιχα για τις τιμές της κόπωσης φαίνεται πως η μεγαλύτερη μείωση στην ομοιόμορφη κατανομή ισούται με 0.8 για τη Δ1 και 0.9 για τη Δ2, στην κανονική ισούται με 1.1 για τη Δ1 και 1.2 για τη Δ2 και στη μηδενική με 1.8 για τη Δ1 και τη Δ2. Συμπερασματικά προκύπτει πως στην περίπτωση σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων, μια τέτοια αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης είναι περιττή, και μπορεί να οδηγήσει σε αντιοικονομικό έργο. Μάλιστα για την διατομή 2, όταν τα μέτρα δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης κυμαίνονται από 6.000-10.000 MPa και το πάχος της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται από 18 σε 20 cm, η διαφορά μεταξύ των



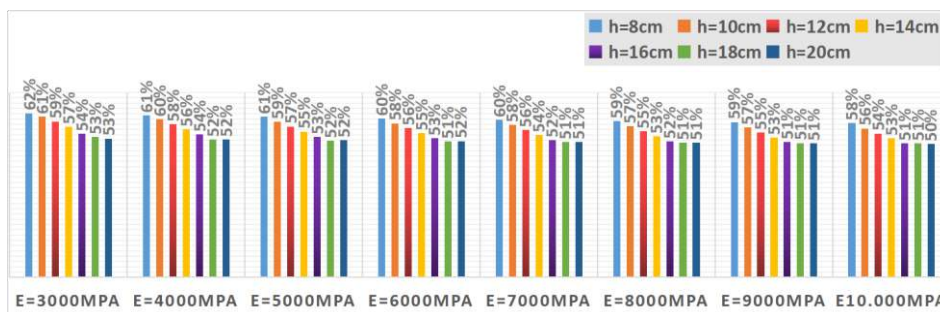
τιμών της φθοράς και της κόπωσης και στις 3 κατανομές είναι μηδενική. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την παραπάνω διαπίστωση πως μια τέτοια αύξηση του πάχους δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την απόκριση του οδοστρώματος σε φθορά και κόπωση.

## 5.4 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η διαφορά των τιμών της φθοράς και της κόπωσης μεταξύ των κατανομών, θεωρήθηκε η μηδενική κατανομή ως κατανομή αναφοράς. Με βάση αυτή υπολογίστηκε η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της φθοράς και της κόπωσης όταν ο τροχός του οχήματος μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη και την κανονική κατανομή αντίστοιχα.

### 5.4.1 Πειραματική Διατομή - Δ1

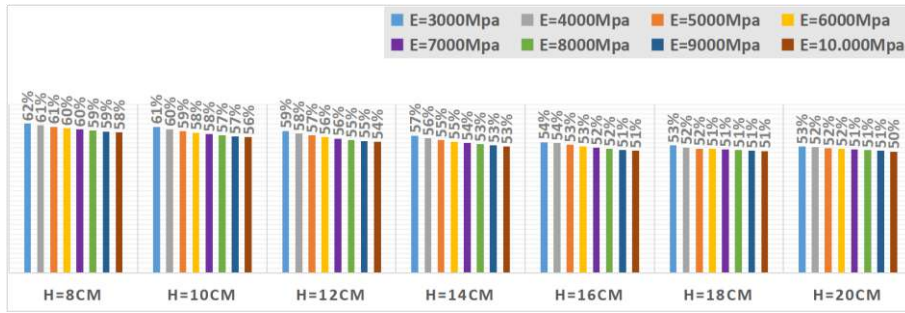
Στην Εικόνα 5.13, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 1 (Δ1). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.13: Διαφορά του  $D_{\Delta 1}-(M-O)$

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, οι τιμές της φθοράς μειώνονται κατά 50-62% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

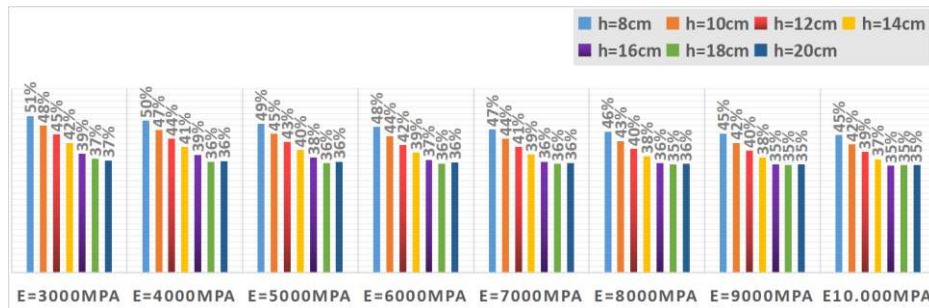
Στην Εικόνα 5.14, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 1 (Δ1). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.14: Διαφορά του  $D_{\Delta 1}-(M-O)$

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της φθοράς μεταξύ της μηδενικής και της ομοιόμορφης κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

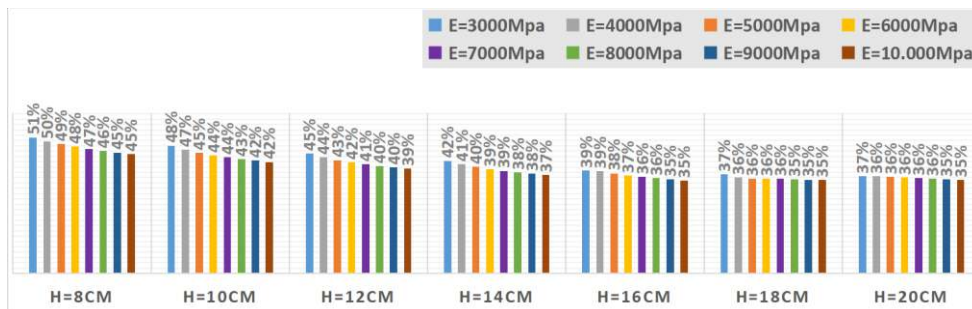
Στην Εικόνα 5.15, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 1 ( $\Delta 1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.15: Διαφορά του  $D_{\Delta 1}-(M-K)$

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή, οι τιμές της φθοράς μειώνονται κατά 35-51% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

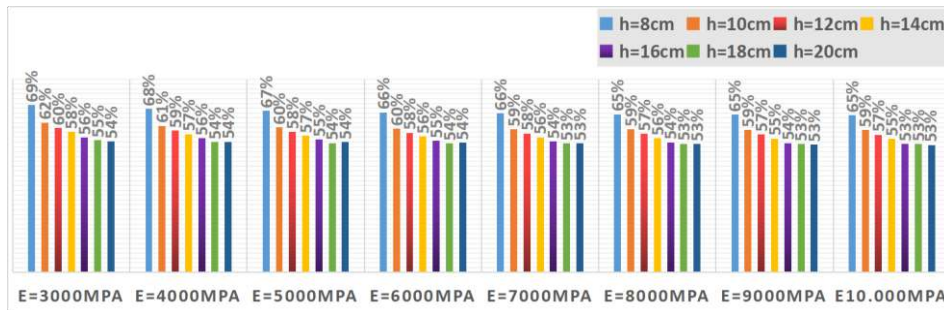
Στην Εικόνα 5.16, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη διατομή 1 ( $\Delta 1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.16: Διαφορά του  $D_{\Delta 1}-(M-K)$

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της φθοράς μεταξύ της μηδενικής και της κανονικής κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

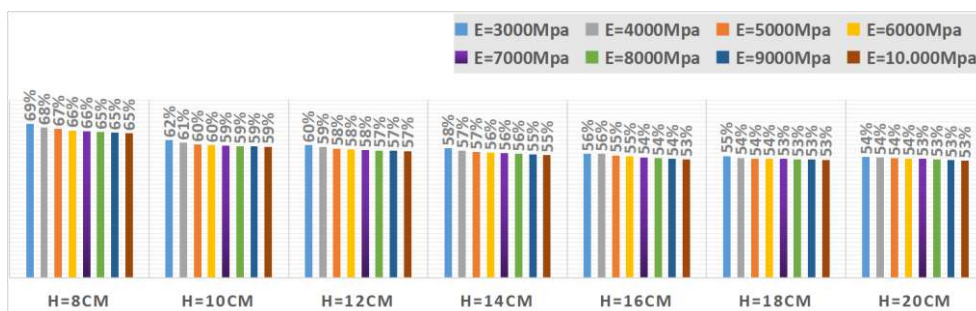
Στην Εικόνα 5.17, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 1 ( $\Delta 1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές



Εικόνα 5.17: Διαφορά του  $F.C_{\Delta 1}$ -(M-O)

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, οι τιμές της κόπωσης μειώνονται κατά 53-69% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

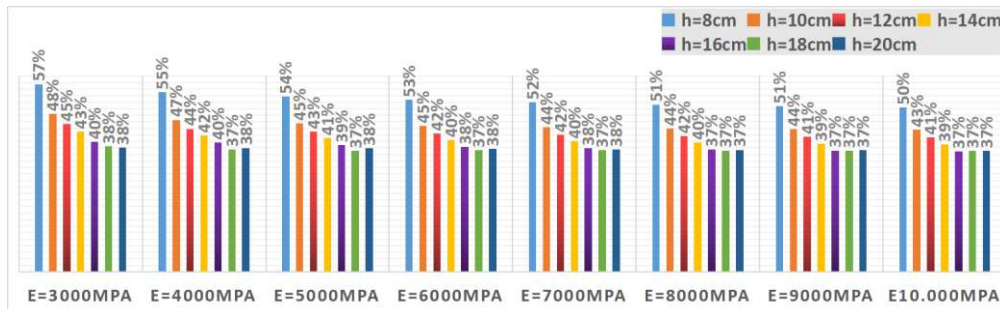
Στην Εικόνα 5.18, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 1 ( $\Delta 1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.18: Διαφορά του  $F.C_{\Delta 1}$ -(M-O)

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της κόπωσης μεταξύ της μηδενικής και της ομοιόμορφης κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

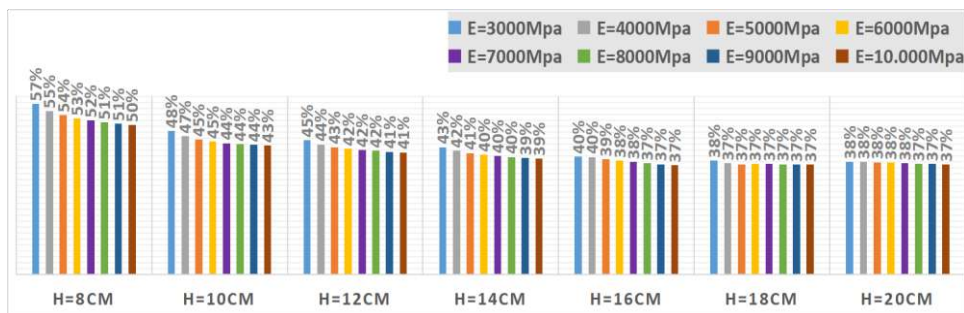
Στην Εικόνα 5.19, φαίνεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 1 ( $\Delta_1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.19: Διαφορά του  $F.C_{\Delta_1}$ -(M-K)

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή, οι τιμές της κόπωσης μειώνονται κατά 37-57% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

Στην Εικόνα 5.20, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη διατομή 1 ( $\Delta_1$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές.



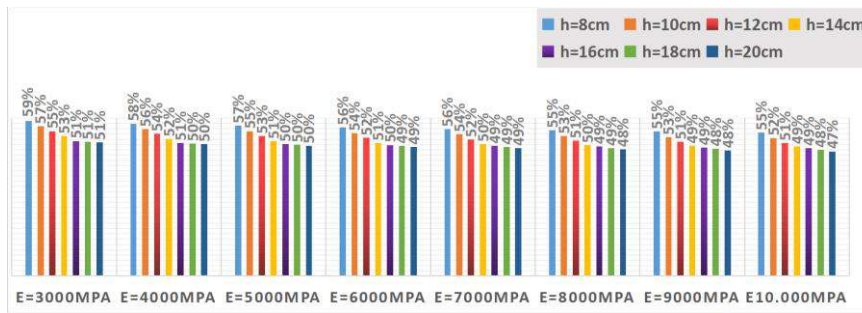
Εικόνα 5.20: Διαφορά του  $F.C_{\Delta_1}$ -(M-K)

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της κόπωσης μεταξύ της μηδενικής και της κανονικής κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

## 5.4.2 Πειραματική Διατομή - $\Delta_2$

Στην Εικόνα 5.21, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 2 ( $\Delta_2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της

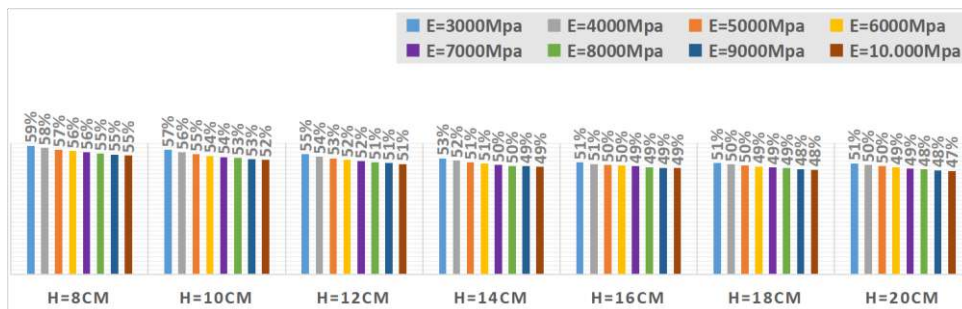
ασφαλτικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.21: Διαφορά του  $D_{\Delta 2}$ -(M-O)

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, οι τιμές της φθοράς μειώνονται κατά 47-59% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

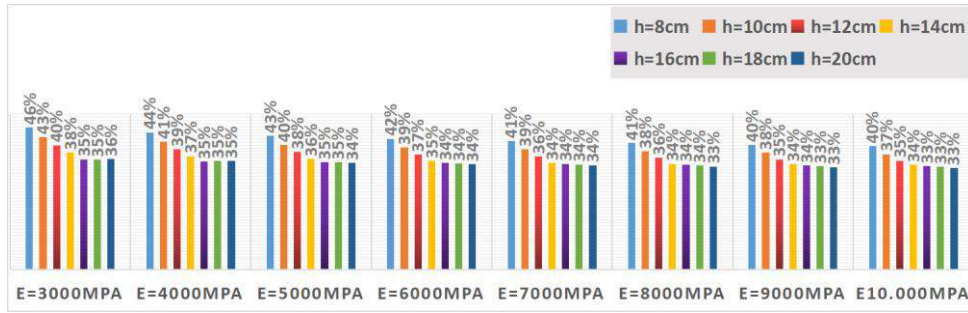
Στην Εικόνα 5.22, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 2 ( $\Delta 2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.22: Διαφορά του  $D_{\Delta 2}$ -(M-O)

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της φθοράς μεταξύ της μηδενικής και της ομοιόμορφης κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

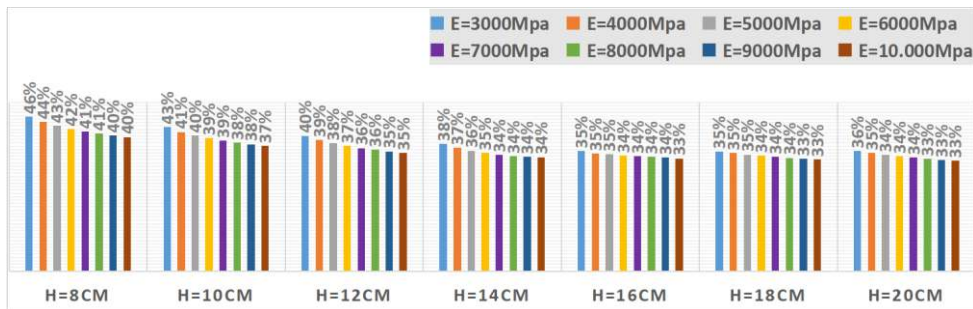
Στην Εικόνα 5.23, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 2 ( $\Delta 2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.23: Διαφορά του  $D_{\Delta 2}-(M-K)$

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή, οι τιμές της φθοράς μειώνονται κατά 33-46% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

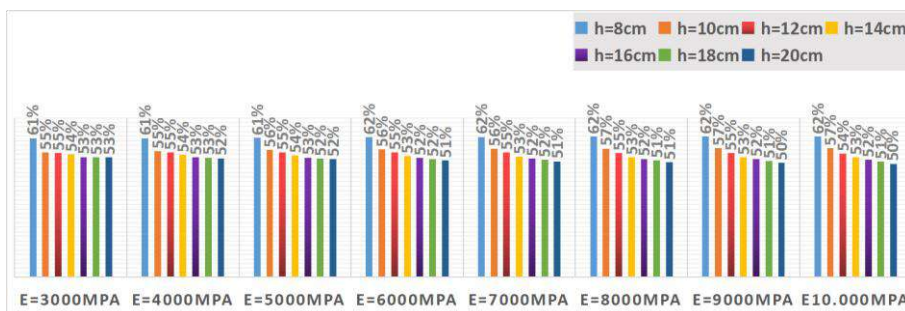
Στην Εικόνα 5.24, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της φθοράς (D) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 2 ( $\Delta 2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.24: Διαφορά του  $D_{\Delta 2}-(M-K)$

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της φθοράς μεταξύ της μηδενικής και της κανονικής κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

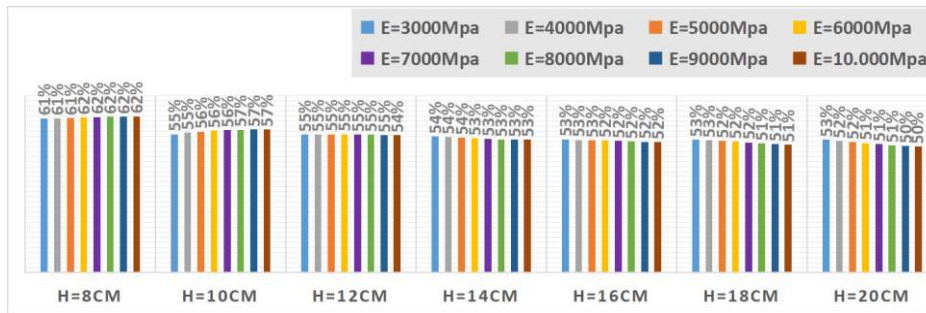
Στην Εικόνα 5.25, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 2 ( $\Delta 2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.25: Διαφορά του  $F.C_{\Delta 2}-(M-O)$

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, οι τιμές της κόπωσης μειώνονται κατά 50-61% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

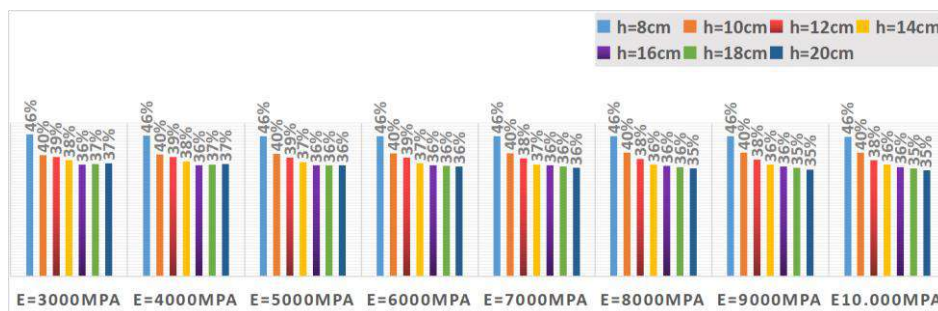
Στην Εικόνα 5.26, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της ομοιόμορφης κατανομής (O) για τη Διατομή 2 ( $\Delta_2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.26: Διαφορά του F.C<sub>Δ2</sub>-(M-O)

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της κόπωσης μεταξύ της μηδενικής και της ομοιόμορφης κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

Στην Εικόνα 5.27, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 2 ( $\Delta_2$ ). Συγκεκριμένα για σταθερό μέτρο δυσκαμψίας και για αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για τις 2 κατανομές.

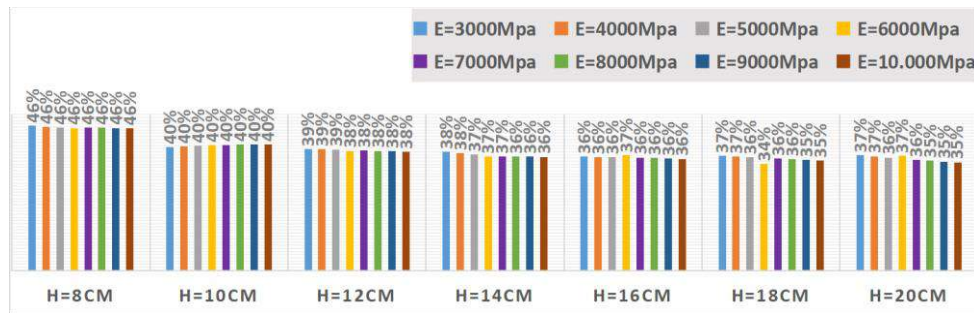


Εικόνα 5.27: Διαφορά του F.C<sub>Δ2</sub>-(M-K)

Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή, οι τιμές της κόπωσης μειώνονται κατά 35-46% σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού.

Στην Εικόνα 5.28, παρουσιάζεται η διαφορά των τιμών της κόπωσης (F.C) μεταξύ της μηδενικής (M) και της κανονικής κατανομής (K) για τη Διατομή 2 ( $\Delta_2$ ). Συγκεκριμένα

για σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης και για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας φαίνεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις 2 κατανομές.



Εικόνα 5.28: Διαφορά του F.C<sub>Δ2</sub>-(M-K)

Για αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας (h σταθερό) παρατηρείται πως η ποσοστιαία διαφορά των τιμών της κόπωσης μεταξύ της μηδενικής και της κανονικής κατανομής είναι σταθερή με μικρές αποκλίσεις.

### 5.4.3 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα εξής:

1. Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την κανονική κατανομή, οι τιμές της φθοράς (D) μειώνονται κατά 35-51% για τη Δ1 και 33-46% για τη Δ2 σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού, ενώ οι τιμές της κόπωσης (F.C) μειώνονται κατά 37-57% για τη Δ1 και 35-46% για τη Δ2.
2. Όταν ο τροχός μετατοπίζεται πλευρικά με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, οι τιμές της φθοράς μειώνονται κατά 50-62% για τη Δ1 και 47-59% για τη Δ2 σε σχέση με τη μηδενική μετατόπιση του τροχού, ενώ οι τιμές της κόπωσης μειώνονται κατά 53-69% για τη Δ1 και 50-62% για τη Δ2.
3. Η μέγιστη μείωση στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης παρατηρείται και για τις δύο κατανομές (ομοιόμορφη-κανονική) για πάχος ασφαλτικής στρώσης ίσο με 8 cm και μέτρο δυσκαμψίας ίσο με 3.000 MPa. Η ελάχιστη μείωση αντίστοιχα στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης παρατηρείται για πάχος ασφαλτικής στρώσης ίσο με 20 cm και μέτρο δυσκαμψίας ίσο με 10.000 MPa. Εξάγεται το συμπέρασμα πως τα οδοστρώματα μικρότερου πάχους επωφελούνται εντονότερα από μία κατανομή μη μηδενική, αφού σε αυτά παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση των τιμών φθοράς και κόπωσης.
4. Σε κάθε αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης (8-10 cm, 10-12 cm, 12-14 cm, 14-16 cm)-(E σταθερό), η διαφορά μεταξύ των τιμών της φθοράς για κάθε συνδυασμό κατανομών, μειώνεται. Στην περίπτωση της κανονικής και της μηδενικής κατανομής, η μείωση παρουσιάζει μια σταθερή τιμή της τάξης του 2-3%, ενώ στην περίπτωση της ομοιόμορφης με τη μηδενική κατανομή η μείωση παρουσιάζει μια σταθερή τιμή της τάξης του 1-2%. Για αύξηση του



πάχους από 16-18 cm και από 18-20 cm (Ε σταθερό) δεν παρατηρείται επιπλέον μείωση στη διαφορά των τιμών φθοράς μεταξύ των κατανομών.

5. Όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται από τα 8 cm στα 10 cm (Ε σταθερό), παρουσιάζεται η μέγιστη μείωση της διαφοράς μεταξύ των τιμών της κόπωσης για τις δύο κατανομές. Συγκεκριμένα, αυτή η μείωση είναι ίση με 7-9% για τη Δ1 και 5-6% για τη Δ2, για την κανονική με τη μηδενική κατανομή, ενώ για την ομοιόμορφη με τη μηδενική κατανομή είναι ίση με 6-8% για τη Δ1 και 5-6% για τη Δ2. Η διαφορά των τιμών της κόπωσης μεταξύ των κατανομών για κάθε αύξηση του πάχους από 10-12 cm, από 12-14 cm και από 14-16 cm, συνεχίζει να ακολουθεί φθίνουσα πορεία της τάξης του 1-2% (για μηδενική-ομοιόμορφη) και 1-3% (για μηδενική-κανονική) αντίστοιχα. Για κάθε επόμενη αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης (16-18 cm, 18-20 cm), φαίνεται πως οι τιμές της κόπωσης μεταξύ των κατανομών (κανονική-μηδενική και ομοιόμορφη-μηδενική) διαφέρουν σταθερά.

## 5.5 Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη θεώρηση της πλευρικής μετατόπισης

Δεδομένου ότι τα αυτόνομα οχήματα προσφέρουν την δυνατότητα ρύθμισης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού μέσω εξελιγμένων συστημάτων προγραμματισμού που διαθέτουν ή μέσω αλγορίθμων (Noorvand et al, 2017; Zhou et al, 2019; Gungor & Al.Qadi, 2020; Georgouli et al, 2021), διερευνάται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας η δυνατότητα θεώρησης της πλευρικής μετατόπισης σαν παράμετρο στο σχεδιασμό και στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μία προκαταρκτική προσπάθεια να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της φθοράς για την εκάστοτε θεωρούμενη κατανομή της πλευρικής μετατόπισης τροχού ως προς τη μηδενική κατανομή πλευρικής μετατόπισης.

Για το σκοπό αυτό ορίζεται ένας συντελεστής D.F (Damage Factor) ως το πηλίκο της φθοράς (D) με θεώρηση της κατανομής της πλευρικής μετατόπισης τροχού (κανονικής, ομοιόμορφης, κατανομής Laplace κλπ.) ως προς τη φθορά ( $D_o$ ) για μηδενική μετατόπιση τροχού. (Σχέση 5.1)

$$D.F = \frac{D}{D_o} \quad (5.1)$$

Στη συνέχεια ο παραπάνω συντελεστής D.F αξιοποιείται ως δεδομένο εισόδου στη κυκλοφορία σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή D.F με τη συνολική κυκλοφορία σχεδιασμού για μηδενική μετατόπιση τροχού ( $n_o$ ) υπολογίζεται η ισοδύναμη κυκλοφορία σχεδιασμού ( $n_i$ ) με θεώρηση πλευρικής μετατόπισης τροχού. (Σχέση 5.2)

$$n_i = D.F * n_o \quad (5.2)$$

Στη συνέχεια, με βάση την κυκλοφορία σχεδιασμού μπορεί να γίνει ο αναλυτικός υπολογισμός του οδοστρώματος, τόσο στο πλαίσιο του σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων, όσο και στο πλαίσιο πρόβλεψης της συμπεριφοράς υφιστάμενων οδοστρωμάτων.

Με σκοπό την εφαρμογή της μεθοδολογίας που ορίστηκε στα αποτελέσματα της φθοράς που προέκυψαν, υπολογίζεται για κάθε πειραματική διατομή και για κάθε συνδυασμό πάχους και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικής στρώσης, ο λόγος της φθοράς της κανονικής και της ομοιόμορφης κατανομής ως προς την φθορά της μηδενικής κατανομής. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation) (Πίνακες 5.25-5.26). Ο συντελεστής μεταβλητότητας προκύπτει ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης ως προς το μέσο όρο και χαρακτηρίζει την ομοιογένεια του δείγματος. Αν ο συντελεστής μεταβλητότητας προκύπτει μικρότερος από 10% (CV<10%), τότε το δείγμα θεωρείται ομοιογενές.

Πίνακας 5.25: Στατιστικά αποτελέσματα- Δ1

	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 1</b>	
	$D_{\text{κανονική}}/D_o$	$D_{\text{ομοιόμορφη}}/D_o$
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0.6	0.5
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.045	0.034
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ	8%	8%

Πίνακας 5.26: Στατιστικά αποτελέσματα-Δ2

	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ 2</b>	
	$D_{\text{κανονική}}/D_o$	$D_{\text{ομοιόμορφη}}/D_o$
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	0.6	0.5
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0.032	0.029
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ	5%	6%

Με βάση τα στοιχεία ανάλυσης, σε κάθε περίπτωση, ο C.V προέκυψε μικρότερος από 10%, και επομένως ο μέσος όρος θεωρείται αντιπροσωπευτική τιμή. Επομένως ο συντελεστής D.F προκύπτει ίσος με:

$$D.F = D_{\text{κανονική}} / D_o = 0.6 \quad (5.3)$$

$$D.F = D_{\text{ομοιόμορφη}} / D_o = 0.5 \quad (5.4)$$

Η ισοδύναμη κυκλοφορία σχεδιασμού ( $n_i$ ) με θεώρηση πλευρικής μετατόπισης τροχού σύμφωνα με την κανονική και την ομοιόμορφη κατανομή προκύπτει με εφαρμογή της Σχέσης 5.2. Αναλυτικότερα:

$$n_{i_{\text{κανονική}}} = D.F * n_o = 0.6 * n_o \quad (5.5)$$

$$n_{i_{\text{ομοιόμορφη}}} = D.F * n_o = 0.5 * n_o \quad (5.6)$$

Στην περίπτωση αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων, είναι δυνατό μέσω των Σχέσεων 5.5 και 5.6, να υπολογιστεί άμεσα ο δείκτης φθοράς και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας για πλευρική μετατόπιση με βάση την κανονική και την ομοιόμορφη κατανομή.

Στην περίπτωση σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων, είναι δυνατό να υπολογιστεί μία (συνολική) ισοδύναμη κυκλοφορία σχεδιασμού ανάλογα με τη θεώρηση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού των αυτόνομων οχημάτων (Σχέση 5.5-5.6). Βάσει αυτής θα καθορίζεται η διατομή του οδοστρώματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Δεδομένης της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων προβλέπεται ότι μέχρι το 2040, αυτά θα έχουν εισαχθεί στο υφιστάμενο οδικό δίκτυο. Όμως φαίνεται ότι μέχρι στιγμής, η επίδραση των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στην μηχανική συμπεριφορά των υφιστάμενων οδοστρωμάτων παραμένει ασαφής. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι διάφορες έρευνες επικεντρώνονται στην ανάλυση και αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων των αυτόνομων οχημάτων, καθώς και στα συστήματα τεχνολογίας που διαθέτουν. Αντίθετα, η διερεύνηση της επίδρασης των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στα οδοστρώματα βρίσκεται σε αρχικό στάδιο παρά το γεγονός ότι αναμένεται τα αυτόνομα βαρέα οχήματα -εξαιτίας των τεχνολογιών που διαθέτουν- να μεταβάλλουν τις συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, εξαιτίας της λειτουργίας διατήρησης της πορείας κίνησης, προβλέπεται πως το σύνολο των αυτόνομων βαρέων οχημάτων θα διέρχεται από το κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας, χωρίς ο τροχός τους να μετατοπίζεται πλευρικά στο πλάτος αυτής (μηδενική μετατόπιση τροχού).

Ειδικότερα, βάσει ερευνών που εξετάζουν την επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στα οδοστρώματα (Noorvand et al, 2017; Zhou et al, 2019; Chen et al, 2019), προκύπτει πως η μηδενική μετατόπιση τροχού επιφέρει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς τις βασικές μορφές αστοχίας που παρατηρούνται στα οδοστρώματα. Παράλληλα, στις υπόψη έρευνες διερευνάται και η προσομοίωση της πλευρικής μετατόπισης τροχού σύμφωνα με την ομοιόμορφη κατανομή, βάσει της οποίας παρατηρείται βελτίωση της δομικής επάρκειας και της μηχανικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Παρόλα αυτά στις υπόψη έρευνες, μελετήθηκε συγκεκριμένη διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, με αποτέλεσμα τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (fatigue cracking) και της παραμένουσας παραμόρφωσης (permanent deformation) να μην έχουν εφαρμογή σε γενικευμένες διατομές οδοστρωμάτων, αλλά να επικεντρώνονται σε συγκεκριμένα τμήματα οδικών δικτύων.

Η παραπάνω διαπίστωση ενίσχυσε την ανάγκη εκπόνησης πειραματικής ανάλυσης για τη διερεύνηση του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης τροχού στην κόπωση των ασφαλικών στρώσεων των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική ανάλυση σε διαφορετικές διατομές οδοστρωμάτων, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης τροχού στην αστοχία (ρηγμάτωση) λόγω κόπωσης ασφαλικών στρώσεων. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν δύο εύκαμπτες πειραματικές διατομές, Δ1 και Δ2, διαφορετικές ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της στρώσης έδρασης (πειραματική διατομή Δ2-μικρότερη φέρουσα ικανότητα γεωτεχνικής υποδομής). Για κάθε μία από τις πειραματικές διατομές μεταβαλλόταν τόσο το πάχος ανά 2 cm λαμβάνοντας τιμές

από 8 έως 20 cm, όσο και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης ανά 1.000 MPa λαμβάνοντας τιμές από 3.000 έως 10.000 MPa. Η πλευρική μετατόπιση του τροχού προσομοιώθηκε με βάση τρεις κατανομές: τη μηδενική, την κανονική και την ομοιόμορφη. Για κάθε πειραματική διατομή και κατανομή προσομοίωσης, υπολογίστηκε η φθορά και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας, για όλους τους συνδυασμούς πάχους και μέτρου δυσκαμψίας που ελήφθησαν υπόψη.

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πειραματικής ανάλυσης προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- i. Η μηδενική μετατόπιση του τροχού, προκαλεί την μέγιστη φθορά στο οδόστρωμα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατανομές. Συγκριτικά με την κανονική κατανομή, σύμφωνα με την οποία προσομοιώνεται η πλευρική μετατόπιση των συμβατικών βαρέων οχημάτων και βάσει της οποίας έχουν σχεδιαστεί τα υφιστάμενα οδοστρώματα, η φθορά και η κόπωση αυξάνονται αισθητά. Συγκεκριμένα, η φθορά (D) αυξάνεται κατά 33-51% και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C) λόγω κόπωσης κατά 35-57%. Το αποτέλεσμα αυτό στοιχειοθετεί το ενδεχόμενο να απαιτηθεί συντήρηση των οδοστρωμάτων νωρίτερα από τον προβλεπόμενο χρόνο. Επομένως, η είσοδος βαρέων αυτόνομων οχημάτων με μηδενική πλευρική μετατόπιση, για παράδειγμα στο υπάρχον οδικό δίκτυο της Ελλάδας, θα προκαλέσει προβλήματα ασφάλειας και αναπόφευκτα θα απαιτήσει αυξημένους οικονομικούς πόρους για την συντήρηση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων.
- ii. Η ομοιόμορφη κατανομή, από την άλλη μεριά επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα φθοράς και κόπωσης σε σχέση με τη μηδενική κατανομή, μειώνοντας την φθορά (D) κατά 47-62% και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C) κατά 50-69%. Η πλευρική μετατόπιση του τροχού με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, έχει την δυνατότητα να βελτιώσει αισθητά την απόκριση των οδοστρωμάτων από άποψη ρηγματώσεων, να μειώσει την φθορά, αλλά και να αυξήσει τον χρόνο ζωής των υφιστάμενων οδοστρωμάτων, καθυστερώντας τις ανάγκες για συντήρηση. Ο προγραμματισμός της πλευρικής μετατόπισης του τροχού των αυτόνομων βαρέων οχημάτων με βάση την ομοιόμορφη κατανομή, αποτελεί μία ισχυρή σύσταση, καθώς φαίνεται ότι επιδρά θετικά στην μηχανική συμπεριφορά των υπάρχοντων οδοστρωμάτων.
- iii. Για τη διατομή με στρώση έδρασης ενισχυμένης φέρουσας ικανότητας, παρατηρήθηκε για κάθε κατανομή προσομοίωσης πλευρικής μετατόπισης τροχού (μηδενική, κανονική, ομοιόμορφη) μη αναμενόμενη συμπεριφορά στις τιμές της φθοράς και της κόπωσης. Συγκεκριμένα, με αύξηση του πάχους ασφαλτικής στρώσης από 8 cm σε 10 cm και σταθερό μέτρο δυσκαμψίας, η φθορά (D) και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας αυξανόταν (F.C). Επιπροσθέτως για τα εν λόγω πάχη (8, 10 cm) με αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας μέχρι τα 6.000 MPa παρατηρήθηκε αύξηση της φθοράς (D) και της ρηγματωμένης επιφάνειας (F.C) αντίστοιχα. Συμπερασματικά προκύπτει πως

μια τέτοια αύξηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης όσο και του μέτρου δυσκαμψίας επιδρά αρνητικά στη μηχανική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.

- iv. Η ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη θεώρηση της πλευρικής μετατόπισης τόσο στο σχεδιασμό, όσο και στην αξιολόγηση των οδοστρωμάτων δίνει τη δυνατότητα μέσω ενός συντελεστή (D.F) η προβλεπόμενη κυκλοφορία που ορίζεται με μηδενική κατανομή της πλευρικής μετατόπισης να μετατραπεί σε μία ισοδύναμη κυκλοφορία στην οποία η υπόψη κατανομή μπορεί να είναι κανονική, ομοιόμορφη, Laplace ή άλλη. Έτσι, στην περίπτωση αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων, είναι δυνατό να υπολογιστεί άμεσα ο δείκτης φθοράς και το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας για πλευρική μετατόπιση κάποιας άλλης κατανομής. Επίσης, στην περίπτωση σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων, είναι δυνατό να υπολογιστεί μία (συνολική) ισοδύναμη κυκλοφορία σχεδιασμού ανάλογα με την θεώρηση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού των αυτόνομων οχημάτων, η οποία θα καθορίζει και την απαιτούμενη διατομή του οδοστρώματος. Βέβαια, περαιτέρω έλεγχοι ως προς την εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας κρίνονται απαραίτητοι.

## 6.2 Περαιτέρω έρευνα

Βάσει των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία, προτείνεται περαιτέρω έρευνα σχετικά με την επίδραση του παράγοντα της πλευρικής μετατόπισης των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στην δομική επάρκεια των υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Αναλυτικότερα:

- i. Διερεύνηση της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στην εμφάνιση παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος μέσω πειραματικών αναλύσεων σε επιπρόσθετα διαφοροποιημένες διατομές οδοστρωμάτων. Εκτιμάται ότι διερευνώντας και την υπόψη μορφή αστοχίας, θα αποσαφηνιστεί πλήρως η επίδραση της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στα υφιστάμενα οδοστρώματα και θα καταστεί σαφές πως η είσοδος των αυτόνομων βαρέων οχημάτων στο οδικό δίκτυο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την εισαγωγή της πλευρικής μετατόπισης του τροχού στον προγραμματισμό των οχημάτων.
- ii. Η τεχνολογία που διαθέτουν τα αυτόνομα οχήματα τους δίνει την δυνατότητα να κινούνται στο οδικό δίκτυο σε ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ τους, αυξάνοντας παράλληλα την ταχύτητα κίνησής τους. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να συσχετιστεί η ταχύτητα των βαρέων αυτόνομων οχημάτων με την πλευρική μετατόπιση του τροχού και να μελετηθεί πως αυτοί οι παράγοντες συνολικά θα επιδρούν στις βασικές μορφές αστοχίας των οδοστρωμάτων και στην εκδήλωση αυτών στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων.
- iii. Μελέτη της επίδρασης της πλευρικής μετατόπισης του τροχού σε διαφορετικές διατομές οδοστρωμάτων (ημι-εύκαμπτα / ημι-άκαμπτα / δύσκαμπτα), καθώς οι

κρίσιμες θέσεις αστοχίας διαφοροποιούνται σε σχέση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahangar M.N., Ahmed Q.Z., Khan F.A. & Hafeez M., (2021), *A Survey of Autonomous Vehicles: Enabling Communication Technologies and Challenges, Sensors* (Basel, Switzerland), Volume 21, Issue 3, Accession number: 33494191.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7864337/>

Badue C., Guidolini R., Vivacqua Carneiro R., Azevedo P., Cardoso V.B., Forechi A., Jesus L., Berriel R., Paixão T.M., Mutz F., De Paula Veronese L., Oliveira-Santos T. & De Souza A.F., (2021), *Self-driving cars: A survey*, *Expert Systems with Applications*, Volume 165, Accession number:113816.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095741742030628X?via%3Dihub>

Blab R. & Litzka J., (1995), *Measurements Of The Lateral Distribution Of Heavy Vehicles And Its Effects On The Design Of Road Pavements*, Pages 389-395.

<https://hvtforum.org/wp-content/uploads/2019/11/Measurements-Of-The-Lateral-Distribution-Of-Heavy-Vehicles-And-Its-Effects-On-The-Design-Of-Road-Pavements-Blab-.pdf>

Chen B., Sun D., Zhou J., Wong W., Ding Z., (2020), *A future intelligent traffic system with mixed autonomous vehicles and human-driven vehicles*, *Information Sciences*, Volume 529, Pages 59-72.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025520300736?via%3Dihub>

Chen F., Song M., Ma X., Zhu X., (2019), *Assess the impacts of different autonomous trucks' lateral control modes on asphalt pavement performance*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 103, Pages 17-29.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X18312646?via%3Dihub>

Fagnant D.J. & Kockelman K., (2015), *Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations*, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 77, Pages 167-181.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0965856415000804?via%3Dihub>

Georgouli K., Plati C., Loizos A., (2021), *Autonomous vehicles wheel wander: Structural impact on flexible pavements*, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 8, Issue 3, Pages 388-398.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209575642100043X>

Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures final document (2004), Appendix II-1: *Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements*. Pages 1-28.



<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices II.pdf>

Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures final document (2004), Appendix GG-1: *Calibration of permanent deformation models for flexible pavements*. Pages 1-10.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices gg.pdf>

Gungor O.E., 2018, *Final Report: A literature review on wheel wander*, Illinois Asphalt Pavement Association, Pages 1-10.

[https://il-asphalt.org/files/2915/1743/1516/Erman\\_Gungor\\_2017\\_UIUC.pdf](https://il-asphalt.org/files/2915/1743/1516/Erman_Gungor_2017_UIUC.pdf)

Gungor O.E & Al-Qadi I., (2020), *Wander 2D: a flexible pavement design framework for autonomous and connected trucks*. International Journal of Pavement Engineering, Pages 1-16.

[https://www.researchgate.net/publication/339891013\\_Wander\\_2D\\_a\\_flexible\\_pavement\\_design\\_framework\\_for\\_autonomous\\_and\\_connected\\_trucks](https://www.researchgate.net/publication/339891013_Wander_2D_a_flexible_pavement_design_framework_for_autonomous_and_connected_trucks)

Luo W., (2012), *Wheel Path Wandering based on field data*, Thesis , Pages 1-25.

<https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1520&context=etd>

Mallick R.B, El-Korchi T., (2013), *Pavement engineering: Principles and practice*, Second edition, Pages 32-40.

<http://docshare01.docshare.tips/files/26186/261864709.pdf>

Mcgarvey T., (2016), *Vehicle lateral position depending on road type and lane width: vehicle position surveys carried out on the Swedish road network*, Pages 13-31.

<http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:948156/FULLTEXT01.pdf>

Noorvand H., Karnati G. & Underwood S., (2017), *Autonomous Vehicles: Assessment of the Implications of Truck Positioning on Flexible Pavement Performance and Design*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Volume 2640, Pages 21-28.

[https://www.researchgate.net/publication/314224638\\_Autonomous\\_Vehicles\\_Assessment\\_of\\_the\\_Implications\\_of\\_Truck\\_Positioning\\_on\\_Flexible\\_Pavement\\_Performance\\_and\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/314224638_Autonomous_Vehicles_Assessment_of_the_Implications_of_Truck_Positioning_on_Flexible_Pavement_Performance_and_Design)

Ondruš J., Kolla E., Vertal' P. & Ž Šarić Ž., (2020), *How Do Autonomous Cars Work?*, Transportation Research Procedia, Volume 44, Pages 226-233.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520300995#cebibsec1>

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

<https://www.worldtransitresearch.info/research/1121/>

Tientrakool P., Ho Y. & Maxemchuk N.F., (2011), *Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance*, IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Pages 1-5.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6093130/authors#authors>

Zhou F., Hu S., Xue W., Flintsch G., (2019), *Final Report: Optimizing the lateral wandering of automated vehicles to improve roadway safety and pavement life*, Accession number: 01727055.

[https://safed.vtti.vt.edu/wp-content/uploads/2020/08/02-008\\_Final-Research-Report\\_Final.pdf](https://safed.vtti.vt.edu/wp-content/uploads/2020/08/02-008_Final-Research-Report_Final.pdf)

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., (2018), *Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων, Οδών και Αεροδρομίων*, Σελίδες 34-49; 55-70.

## ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

ANALYSIS SOFTWARE: <http://www.arc.unr.edu/Software.html>

FHWA: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13091/002.cfm>

SAE, 2018: <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-%E2%80%9Clevels-of-driving-automation%E2%80%9D-standard-for-self-driving-vehicles>

<https://www.synopsys.com/automotive/what-is-autonomous-car.html>

<https://www.nhtsa.gov/data/crash-data-systems>

<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20190110STO23102/self-driving-cars-in-the-eu-from-science-fiction-to-reality>

<https://onlinemasters.ohio.edu/blog/the-future-of-driving/>

<https://kambria.io/blog/the-history-and-evolution-of-self-driving-cars/>

[Autotalks' V2X for Autonomous Vehicles - YouTube](#)

<https://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/normal010-2.pdf>

<http://asphaltmagazine.com/autonomous-vehicles/>

AASHTO: <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>