



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΟΛΙΣΘΗΡΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ  
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



**ΠΡΟΒΑΤΑΡΗ ΕΛΕΝΗ**

**Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια**

**Αθήνα, Ιούλιος 2023**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και κυρίως για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και τις σημαντικές επισημάνσεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Αναστάσιο Στεργίου, μέλος ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του στην επεξεργασία και επεξήγηση των μετρήσεων πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική ανάλυση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη, την έμπρακτη συμπαράσταση και την υπομονή που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο διασφάλισης ασφαλούς λειτουργίας των οδών, η λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο. Ένα λειτουργικό χαρακτηριστικό που συνδέεται άμεσα με την οδική ασφάλεια είναι η ολισθηρότητα ή διαφορετικά, η αντίσταση σε ολίσθηση των επιφανειών των οδοστρωμάτων. Η αντίσταση σε ολίσθηση ενός οδοστρώματος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες στη διάρκεια ζωής του. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η παρακολούθηση και η αξιολόγησή της με διάφορες μεθόδους και συστήματα. Εκτός από την αντιολισθητική ικανότητα των ασφαλικών οδοστρωμάτων, που έχει ερευνηθεί ενδελεχώς, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Για την επίτευξη του στόχου, αρχικά, γίνεται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις συνιστώσες και τους μηχανισμούς δημιουργίας τριβής. Βάσει αυτής αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας των οδοστρωμάτων και αναδεικνύονται οι δυνατότητες αξιολόγησης που δίνουν τα διάφορα συστήματα μέτρησης της ολισθηρότητας. Στη συνέχεια, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε έρευνες σχετικά με την ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και τη διερεύνησή της σε σχέση με τα ασφαλικά οδοστρώματα. Για την ενίσχυση του στόχου της διπλωματικής πραγματοποιείται ανάλυση στοιχείων ολισθηρότητας από το πεδίο (μετρήσεις), που ανακτήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη σύγκριση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και την αξιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση βελτίωσης της υφής.

**Λέξεις κλειδιά:** δύσκαμπτο οδοστρώμα, ολισθηρότητα, υφή, Grip Tester

## **ABSTRACT**

In the context of ensuring the safe operation of roads, the functional condition of the road surface is a very important parameter. A functional characteristic that is directly related to road safety is the skid resistance of road surfaces. The skid resistance of a road surface is influenced by several factors during its lifetime. For this reason, it is necessary to monitor and evaluate it by various methods and systems. In addition to the skid resistance of asphalt pavements, which has been thoroughly investigated, the skid resistance of rigid pavements is also of interest. In the light of the above, the aim of this diploma thesis is to investigate the surface skid resistance of rigid pavements. To achieve this objective, firstly, a review of the international literature on the components and mechanisms of friction generation is carried out. On this basis, the factors influencing the skid resistance of the pavement surface are analysed and the evaluation possibilities offered by the various skid resistance measurement systems are highlighted. Subsequently, the focus is on research on the skid resistance of rigid pavements and its investigation in relation to asphalt pavements. To strengthen the objective of the thesis, an analysis of field skid resistance data (measurements) retrieved from the database of the NTUA Pavement Laboratory is carried out. Based on the results of the analyses, conclusions are drawn regarding the comparison of the skid resistance of asphalt and rigid pavements and the evaluation of rigid pavement after texture improvement intervention.

**Key words:** rigid pavement, concrete pavement, skid resistance, texture, Grip Tester

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία διπλωματικής.....	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2.	Αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρωμάτων.....	4
2.1	Γενικά στοιχεία.....	4
2.2	Συνιστώσες αντίστασης σε ολίσθηση .....	5
2.3	Παράγοντες επίδρασης στην αντίσταση σε ολίσθηση .....	9
2.3.1	Γενικά .....	9
2.3.2	Χαρακτηριστικά της επιφάνειας .....	10
2.3.3	Κυκλοφοριακές συνθήκες .....	14
2.3.4	Ιδιότητες ελαστικού .....	15
2.3.5	Περιβαλλοντικές συνθήκες .....	16
2.3.6	Λειτουργικές παράμετροι οχήματος.....	22
2.4	Μέθοδοι μέτρησης της αντίστασης σε ολίσθηση.....	23
2.4.1	Γενικά .....	23
2.4.2	Συσκευές συνεχούς μέτρησης στο πεδίο.....	24
2.4.3	Στατικές συσκευές μέτρησης .....	25
2.4.4	Συγκεντρωτικός πίνακας συσκευών μέτρησης ολισθηρότητας .....	27
3.	Ανάλυση ολισθηρότητας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	30
3.1	Συγκριτικά στοιχεία ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	30
3.1.1	Δομικά χαρακτηριστικά ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	30
3.1.2	Σύγκριση αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	31
3.2	Αντίσταση σε ολίσθηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων .....	35
3.2.1	Επιρροή μεθόδου δημιουργίας επιφανειακής υφής.....	35
3.2.2	Μακροπρόθεσμη αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρώματος από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή.....	44
3.2.3	Αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρώματος από ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας με ασβεστολιθικά αδρανή .....	47
3.2.4	Αντίσταση σε ολίσθηση διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	48
3.2.5	Αντιολισθητική ικανότητα και επίπεδο θορύβου δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	
3.2.6	Σύνοψη αποτελεσμάτων ερευνών.....	57

4.	Ανάλυση δεδομένων ολισθηρότητας .....	60
4.1	Γενικά στοιχεία.....	60
4.2	Συγκριτική ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	61
4.3	Αξιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση .....	71
5.	Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	76
6.	Βιβλιογραφία .....	80

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Σχέση μεταξύ του ποσοστού ατυχημάτων σε υγρές συνθήκες και της επιφανειακής τριβής οδοστρωμάτων.....	4
Εικόνα 2.2: Τυπικό σκαρίφημα των δυνάμεων που δρουν σε έναν περιστρεφόμενο τροχό ..	6
Εικόνα 2.3: Μηχανισμοί δημιουργίας αντίστασης σε ολίσθηση.....	9
Εικόνα 2.4: Μικρο και μακρο-υφή (Λοΐζος & Πλατή, 2021) .....	12
Εικόνα 2.5: Όροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της επιφανειακής υφής του οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	12
Εικόνα 2.6: Συσκευή στίλβωσης (αριστερά) και συσκευή απότριψης (δεξιά) (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	14
Εικόνα 2.7: Μεταβολή της αντίστασης σε ολίσθηση με το χρόνο και την κυκλοφορία (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	15
Εικόνα 2.8: Αντίσταση σε ολίσθηση και καιρικές συνθήκες (Λοΐζος & Πλατή, 2021) .....	19
Εικόνα 2.9: Φιλμ νερού στο οδόστρωμα (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	19
Εικόνα 2.10: Μέσο ποσοστό μείωσης της τιμής της αντίστασης σε ολίσθηση λόγω ρύπων (Lubis, et al., 2018) .....	21
Εικόνα 2.11: Βρετανικό εκκρεμές.....	25
Εικόνα 2.12: Συσκευή DFT.....	26
Εικόνα 2.13: Συσκευή Wehner-Schulze.....	27
Εικόνα 3.1: Εύκαμπτο οδόστρωμα (αριστερά) και ημι-εύκαμπτο οδόστρωμα (δεξιά) (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	31
Εικόνα 3.2: Δύσκαμπτο οδόστρωμα (Λοΐζος & Πλατή, 2021).....	31
Εικόνα 3.3: Μηνιαία μεταβολή της επιφανειακής τριβής των οδοστρωμάτων (Ahammed & Tighe, 2009).....	32
Εικόνα 3.4: Μέσο ποσοστό μείωσης της τιμής της αντίστασης σε ολίσθηση λόγω ρύπων (Lubis, et al., 2018) .....	35
Εικόνα 3.5:Επιφανειακές υφές πλακών (a) BuD, (b) BrD, (c) TT, (d) LT, (e) EAC8, (f) EAC11 (Gierasimiuk, et al., 2021) .....	36
Εικόνα 3.6: Στίλβωνας πλακών (Gierasimiuk, et al., 2021) .....	37
Εικόνα 3.7: Μέσες τιμές BPN με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Gierasimiuk, et al., 2021) .....	38
Εικόνα 3.8: Μέσες τιμές MPD με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Gierasimiuk, et al., 2021) ....	39
Εικόνα 3.9: Η συσκευή δοκιμής τριβής (αριστερά) και η χρησιμοποιούμενη συσκευή απότριψης (δεξιά) (Jalalkamali, et al., 2021) .....	41
Εικόνα 3.10: Σύγκριση των τιμών των συντελεστών τριβής για τις διάφορες υφές οδοστρώματος .....	41
Εικόνα 3.11: Μέση τιμή SN και κατάταξη των διαφορετικών μεθόδων δημιουργίας υφής για PCC οδοστρώματα (Ahammed & Tighe, 2009) .....	44
Εικόνα 3.12: Επιφάνεια δύσκαμπτου οδοστρώματος από (a) εγκάρσιο φρεζάρισμα, (b) κατά μήκος φρεζάρισμα και (c) σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Rith, et al., 2020).....	45
Εικόνα 3.13: Ποσοστό απώλειας κάθε αδρανούς λόγω τριβής (αριστερά) και μείωση BPN των διαφόρων πετρωμάτων μετά από τη δοκιμή στίλβωσης (δεξιά) (Rith, et al., 2020) .....	46
Εικόνα 3.14: Συσκευή δοκιμής raveling (Yoshitake, et al., 2016) .....	47
Εικόνα 3.15: Διαπερατό δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	49



Εικόνα 3.16: Σχέσεις μεταξύ των $N_{BR,D}$ και $D_T$ στο διαπερατό δύσκαμπτο σκυρόδεμα (Chen, et al., 2013).....	50
Εικόνα 3.17: Τύποι υφής οδοστρωμάτων. (a) Οδόστρωμα με τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα, (b) οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή, (c) αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα (χωρίς σύρσιμο), (d) αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα (με σύρσιμο τεχνητού χλοοτάπητα) (Fang, et al., 2020) .....	53
Εικόνα 3.18: Αποτελέσματα από την αντλιοσθητική ζώνη του δύσκαμπτου σκυροδέματος (Fang, et al., 2020).....	55
Εικόνα 3.19: Συσχέτιση αντίστασης σε ολίσθηση (SFC) και επιπέδου θορύβου (Fang, et al., 2020).....	56
Εικόνα 3.20: Συσχέτιση συνολικού επιπέδου θορύβου και αριθμού τριβής (Olek, et al., 2004).....	56
Εικόνα 4.1: Σύστημα Grip Tester .....	60
Εικόνα 4.2: Παροχή νερού κάτω από το πρότυπο ελαστικό .....	61
Εικόνα 4.3: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 162	
Εικόνα 4.4: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 262	
Εικόνα 4.5: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 363	
Εικόνα 4.6: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 463	
Εικόνα 4.7: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 564	
Εικόνα 4.8: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 664	
Εικόνα 4.9: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 765	
Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 1 .....	66
Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 2 .....	66
Εικόνα 4.12: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 3 .....	67
Εικόνα 4.13: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 4 .....	67
Εικόνα 4.14: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 5 .....	68
Εικόνα 4.15: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 6 .....	68
Εικόνα 4.16: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 7 .....	69
Εικόνα 4.17: Λειτουργία μεθόδου σφαιριδιοβολής .....	72
Εικόνα 4.18: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 1 .....	72
Εικόνα 4.19: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 2 .....	73
Εικόνα 4.20: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 1 .....	73
Εικόνα 4.21: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 2 .....	74

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Μεταβολές στο ρυθμό των ατυχημάτων σε σχέση με τις μεταβολές του συντελεστή τριβής.....	7
Πίνακας 2.2: Κατηγορίες επιφανειακής υφής οδοστρώματος.....	10
Πίνακας 2.3: Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής οδοστρώματος (Hall, et al., 2009); (Mataei, et al., 2016).....	28
Πίνακας 3.1: Προτεινόμενες ελάχιστες τιμές αντίστασης σε ολίσθηση (BPN) (Road Research Laboratory, 1969).....	34
Πίνακας 3.2: Ο μέσος όρος της τιμής αντίστασης σε ολίσθηση (BPN) πριν και μετά την έκθεση σε ρύπους.....	34
Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας τμήματος Δ-1.....	70
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τμήματος Δ-2.....	75

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Στη σημερινή εποχή η μετακίνηση με οχήματα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής των περισσότερων ανθρώπων, με αποτέλεσμα η αυτοκινητοβιομηχανία να εξελίσσει διαρκώς την τεχνολογία της. Η τεχνολογία των οχημάτων αναπτύσσεται προσφέροντας στους οδηγούς περισσότερες δυνατότητες, μεγαλύτερη ασφάλεια και υψηλότερες ταχύτητες. Το γεγονός αυτό καθιστά πολύ σημαντική για τους φορείς διαχείρισης των οδών την εξασφάλιση ασφαλών διαδρομών και άνετης οδήγησης. Βασικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή μείωση των ατυχημάτων, θανατηφόρων ή μη, αιτία των οποίων αποτελούν διάφορες παράμετροι της οδού, η οδική συμπεριφορά των οδηγών και τα χαρακτηριστικά των οχημάτων.

Για την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας των οδών πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος. Ένα από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, που έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει σημαντικά την ασφάλεια των χρηστών, είναι η ολισθηρότητα. Η ολισθηρότητα ή διαφορετικά, η αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος ορίζεται ως η έκφραση της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ ενός κινούμενου ελαστικού και της επιφάνειας κύλισης του οδοστρώματος κατά την πέδηση. Έρευνες έχουν δείξει ότι το επίπεδο της αντίστασης σε ολίσθηση συνδέεται με τον αριθμό και τη σοβαρότητα των οδικών ατυχημάτων, ιδίως σε υγρές συνθήκες. Για το λόγο αυτό οι φορείς διαχείρισης των οδών πρέπει να διατηρούν το επίπεδο της ολισθηρότητας εντός των αποδεκτών ορίων που ορίζονται στους κανονισμούς.

Η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος λόγω της επιρροής διαφόρων παραγόντων. Συγκεκριμένα, επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής υφής, την κυκλοφορία, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των οχημάτων. Έχει διαπιστωθεί ότι η μέγιστη αντίσταση σε ολίσθηση εμφανίζεται κάποιο διάστημα μετά τη διάστρωση του οδοστρώματος όπου έχουν αποκαλυφθεί τα αδρανή του μείγματος, ενώ στη συνέχεια μειώνεται λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως είναι η λείανση των αδρανών και η μόλυνση της επιφάνειας με ρύπους. Γενικά, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μέτρησης και μέθοδοι αξιολόγησης της ολισθηρότητας, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες αυτές επιτυγχάνεται η πληρέστερη αξιολόγηση της κατάστασης του

οδοστρώματος όσον αφορά στην ολισθηρότητα και η λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της συντήρησης των οδοστρωμάτων.

Πολλές έρευνες έχουν ασχοληθεί με την αντιολισθητική ικανότητα των ασφαλικών οδοστρωμάτων για τα οποία έχουν συνταχθεί προδιαγραφές αξιολόγησής τους. Αντίθετα, το ερευνητικό υλικό για την αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι περιορισμένο. Γενικά, φαίνεται ότι το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζει στη σύγκριση της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ δύσκαμπτων και ασφαλικών οδοστρωμάτων.

## **1.2 Στόχος και μεθοδολογία διπλωματικής**

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Για την επίτευξη του στόχου, αρχικά, γίνεται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις συνιστώσες και τους μηχανισμούς δημιουργίας τριβής. Βάσει αυτής αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας των οδοστρωμάτων και αναδεικνύονται οι δυνατότητες αξιολόγησης που δίνουν τα διάφορα συστήματα μέτρησης της ολισθηρότητας.

Το ενδιαφέρον της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επικεντρώνεται στην ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και στη διερεύνηση της συμπεριφορά τους σε σχέση με τα ασφατικά οδοστρώματα. Για την ενίσχυση του στόχου της διπλωματικής εργασίας γίνεται επεξεργασία δεδομένων που λήφθηκαν από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Επιπλέον, αξιολογείται η βελτίωση της ολισθηρότητας δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση αναβάθμισης της υφής του.

## **1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας**

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

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι συνιστώσες της αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος, οι

παράγοντες που την επηρεάζουν, τα συστήματα μέτρησης της ολισθηρότητας και οι αντίστοιχοι δείκτες ολισθηρότητας.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται έρευνες συγκριτικής ανάλυσης της ολισθηρότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και έρευνες σχετικές με την επιρροή της μεθόδου δημιουργίας υφής στην ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται ανάλυση στοιχείων πεδίου από διόδια αυτοκινητόδρομου, συγκριτική ανάλυση της ολισθηρότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και αξιολόγηση της βελτίωσης δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση.

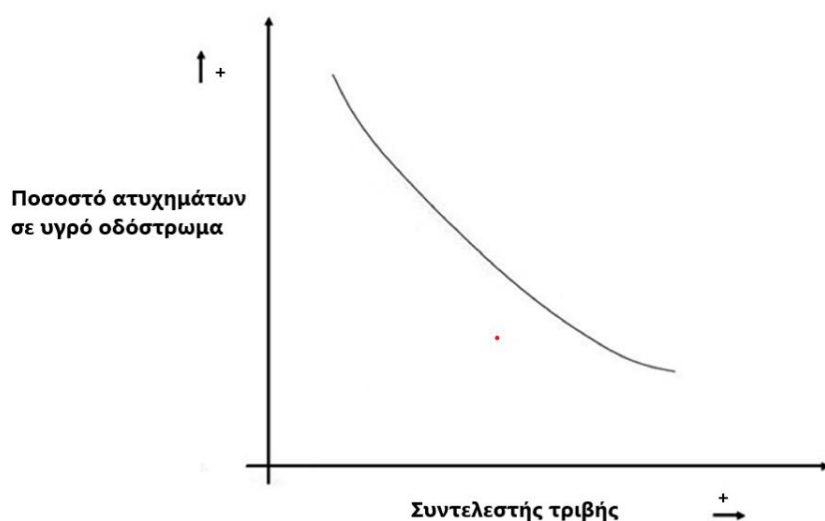
Στο **κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 6** παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

## 2. Αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρωμάτων

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν έναν από τους δέκα κυριότερους λόγους θανάτου στον κόσμο. Ένα από τα βασικότερα αίτια των ατυχημάτων είναι η ελλειπής αντίσταση σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων των οδών (Jalalkamali, et al., 2021). Η αντίσταση σε ολίσθηση είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ασφαλή διαχείριση της κυκλοφορίας των οδοστρωμάτων. Είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει τη συμβολή της επιφάνειας του οδοστρώματος στο συνολικό επίπεδο τριβής που είναι διαθέσιμο στο σημείο επαφής μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού του οχήματος κατά την επιτάχυνση, την πέδηση και τους ελιγμούς στροφής (Yun, et al., 2020). Επομένως, η αντιολισθητική ικανότητα πρέπει να διατηρείται σε αποδεκτό επίπεδο προκειμένου να μειωθούν τα τροχαία ατυχήματα και κυρίως η σοβαρότητά τους, ιδίως σε υγρές συνθήκες. Οι υγρές συνθήκες μειώνουν την αντιολισθητική ικανότητα το οποίο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά την οδήγηση (π.χ. ολίσθηση ή υδρολίσθηση), γεγονός που συμβάλλει σε υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων (Εικόνα 2.1) (Mataei, et al., 2016) (Rasol, et al., 2021). Για τον λόγο αυτό η ολισθηρότητα αναφέρεται συνήθως σε περιπτώσεις υγρού οδοστρώματος, διότι η πλειοψηφία των επιφανειών των οδοστρωμάτων παρέχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο αντιολισθηρότητας όταν αυτά είναι στεγνά (Λοΐζος & Πλατή, 2021).



Εικόνα 2.1: Σχέση μεταξύ του ποσοστού ατυχημάτων σε υγρές συνθήκες και της επιφανειακής τριβής οδοστρωμάτων

Η δύναμη τριβής εκφράζει την αντίσταση σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων, για αυτό πολλές χώρες έχουν καθορίσει μια ελάχιστη τιμή του συντελεστή τριβής στους κανονισμούς για τον σχεδιασμό οδών (Teekman, 2012). Οι ιδιότητες τριβής του οδοστρώματος έχουν σημαντική επίπτωση στην αντίδραση των οδηγών σε διάφορες συνθήκες (Jalalkamali, et al., 2021).

Η αντίσταση σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων εξαρτάται από την επιφανειακή υφή τους. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες τριβής του οδοστρώματος σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής υφής τα οποία είναι γνωστά ως μακρο-υφή και μικρο-υφή (Kummer & Meyer, 1963). Ο ορισμός της μικρο-υφής και της μακρο-υφής καθώς και η σχέση τους με την τριβή του οδοστρώματος έχουν βρεθεί στο επίκεντρο αρκετών ερευνών και θα αναλυθούν στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου (Mataei, et al., 2016).

## **2.2 Συνιστώσες αντίστασης σε ολίσθηση**

Η αντίσταση σε ολίσθηση είναι μια κρίσιμη παράμετρος της επιφάνειας του οδοστρώματος, η οποία μπορεί να προσφέρει καλύτερη κατανόηση του οδοστρώματος κατά τη λειτουργία του (Rasol, et al., 2021). Με τον όρο ολισθηρότητα ή διαφορετικά «αντίσταση σε ολίσθηση» εκφράζεται το φαινόμενο της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ ενός κινούμενου ελαστικού και της επιφάνειας κύλισης του οδοστρώματος όταν πραγματοποιείται πέδηση (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Η τριβή του οδοστρώματος ορίζεται ως η δύναμη που αντιστέκεται στις σχετικές κινήσεις μεταξύ ενός ελαστικού οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος (Hall, et al., 2009). Η δύναμη αντίστασης δημιουργείται καθώς το ελαστικό κυλά ή ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.2: Τυπικό σκαρίφημα των δυνάμεων που δρουν σε έναν περιστρεφόμενο τροχό

Η δύναμη αντίστασης χαρακτηρίζεται από ένα αδιάστατο συντελεστή τριβής ( $\mu$ ) ο οποίος υπολογίζεται βάσει των δυνάμεων της επιφάνειας του οδοστρώματος που ασκούνται σε ένα περιστρεφόμενο τροχό (Εικόνα 2.2). Συγκεκριμένα, ο συντελεστής τριβής είναι ο λόγος της εφαπτόμενης δύναμης τριβής ( $F$ ) μεταξύ του πέλματος του ελαστικού και της οριζόντιας επιφάνειας που διανύεται προς την κάθετη δύναμη ή αλλιώς το κατακόρυφο φορτίο του βάρους του τροχού ( $F_w$ ) και υπολογίζεται με την εξίσωση 2.1 (Rasol, et al., 2021); (Hall, et al., 2009).

$$\mu = \frac{F}{F_w} \quad (2.1)$$

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τη σχέση του συντελεστή τριβής της επιφάνειας του οδοστρώματος και των τροχαίων ατυχημάτων. Συμπέρασμα των οποίων είναι ότι η αύξηση του συντελεστή τριβής βελτιώνει την οδική ασφάλεια και συνεπώς μειώνει το ποσοστό των ατυχημάτων (Βλέπε Πίνακα 2.1) (Wallman & Åström, 2001) (Jalalkamali, et al., 2021).



Πίνακας 2.1: Μεταβολές στο ρυθμό των ατυχημάτων σε σχέση με τις μεταβολές του συντελεστή τριβής

Ποσοστό ατυχημάτων (Ατυχήματα ανά εκατομμύριο οχηματοχιλιόμετρα)	Εύρος συντελεστή τριβής
<b>0,80</b>	Λιγότερο από 0,15
<b>0,55</b>	Μεταξύ 0,15 και 0,24
<b>0,25</b>	Μεταξύ 0,25 και 0,34
<b>0,20</b>	Μεταξύ 0,35 και 0,44

Ένας από τους κύριους λόγους πολυπλοκότητας των μηχανισμών τριβής στην επαφή ελαστικού-στερεού υλικού είναι οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ελαστικού. Σύμφωνα με μελέτες ερευνητών στον τομέα της τριβής ελαστικού έχει προσδιοριστεί ότι οι τέσσερις ακόλουθοι μηχανισμοί εμπλέκονται στη δημιουργία της τριβής (Fwa, 2021):

- i. Απώλειες πρόσφυσης
- ii. Απώλειες υστέρησης
- iii. Απώλειες συνοχής
- iv. Απώλειες φθοράς

Οι απώλειες πρόσφυσης είναι το αποτέλεσμα της ενέργειας που σχετίζεται με την υπερνίκηση της διατμητικής αντοχής σε μια περιοχή επαφής ελαστικού-οδοστρώματος και της απώλειας ενέργειας που προκύπτει από τη διέγερση του ελαστικού, η οποία προκαλείται από το σπάσιμο των μοριακών δεσμών και το τέντωμα, τη χαλάρωση της δομής του πολυμερούς του ελαστικού. Οι απώλειες υστέρησης είναι η συνέπεια της ενέργειας που καταναλώνεται για την απορρόφηση της περιοδικής διέγερσης, δηλαδή παραμόρφωσης, της δομής του πολυμερούς του ελαστικού, καθώς το ελαστικό ολισθαίνει στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι απώλειες συνοχής οφείλονται στην παρουσία ρύπων στη διεπιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος. Τέλος, οι απώλειες φθοράς προκύπτουν από τις λειαντικές δράσεις της κυκλοφορίας που διαρρηγνύουν και απομακρύνουν σωματίδια από την επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος (Fwa, 2021).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η αντίσταση σε ολίσθηση και κατά συνέπεια η δύναμη αντίστασης χαρακτηρίζεται από το συντελεστή τριβής  $\mu$  και την εξίσωση 2.1. Λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς ανάπτυξης της αντίστασης ολίσθησης

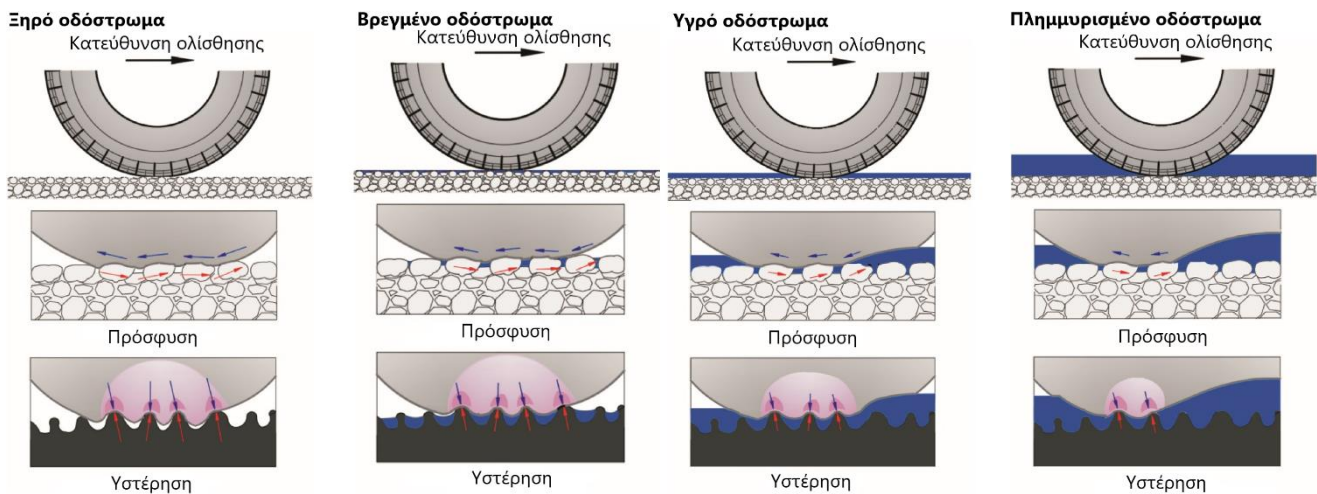
θεωρείται ότι όταν ένα όχημα κινείται με ταχύτητα  $V$  η αντίσταση ολίσθησης  $SN_V$  μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση 2.2:

$$SN_V = \frac{F}{F_W} = \frac{F_a + F_c + F_h + F_d}{F_W} \times 100 \quad (2.2)$$

Όπου  $SN_V$  είναι ο αριθμός ολίσθησης (skid number),  $F_W$  είναι το φορτίο του τροχού κάθετα στην επιφάνεια του οδοστρώματος και  $F$  η συνολική δύναμη αντίστασης στην κατεύθυνση κίνησης του ελαστικού, η οποία είναι το άθροισμα της δύναμης πρόσφυσης του ελαστικού  $F_a$ , της δύναμης συνοχής  $F_c$  που απαιτείται για τη διάσπαση των ρύπων στη διεπιφάνεια του ελαστικού, της δύναμης υστέρησης  $F_h$  που προκαλείται από την παραμόρφωση του ελαστικού, της δύναμης αέρα και αντίστασης ρευστού  $F_d$  (Fwa, 2021).

Η εξίσωση 2.2 είναι μια γενική έκφραση που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων σε διάφορες καταστάσεις: ξηρό, βρεγμένο, υγρό ή πλημμυρισμένο οδόστρωμα. Υπάρχουν ορισμένες σημαντικές διαφορές στους μηχανισμούς δημιουργίας αντίστασης σε ολίσθηση ενός οδοστρώματος σε διαφορετικές καταστάσεις (Εικόνα 2.3). Σε ένα ξηρό οδόστρωμα χωρίς ρύπους οι δυνάμεις  $F_c$  και  $F_d$  απουσιάζουν. Η αντίσταση σε ολίσθηση σε αυτή την κατάσταση προκύπτει από την πρόσφυση του ελαστικού  $F_a$  και την υστέρηση  $F_h$ . Τα ίδια ισχύουν και σε βρεγμένο οδόστρωμα με τη διαφορά ότι η παρουσία υγρασίας στην επιφάνεια και η ύπαρξη νερού στα επιφανειακά κενά δρουν αποδυναμώνοντας τη δύναμη πρόσφυσης του ελαστικού  $F_a$  και τη δύναμη υστέρησης  $F_h$ . Αυτό εξηγεί την απότομη μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση όταν ένα ξηρό οδόστρωμα βρέχεται.

Σε ένα υγρό ή πλημμυρισμένο οδόστρωμα, όπου υπάρχει στρώμα νερού στην επιφάνεια, η παρουσία ελεύθερου νερού μεταβάλλει το μηχανισμό επαφής ελαστικού-οδοστρώματος και επιπλέον εισάγει ένα πρόσθετο υδροδυναμικό μηχανισμό που προκαλεί παραμορφώσεις ελαστικού και παρεμβαίνει στους μηχανισμούς δημιουργίας ολισθηρότητας των  $F_a$ ,  $F_h$ . Το μέγεθος της παρεμβολής αυξάνεται καθώς το όχημα επιταχύνει. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός κινούμενου ελαστικού και του επιφανειακού νερού έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδροδυναμικών πιέσεων που παραμορφώνουν το ελαστικό τοίχωμα και μειώνουν την επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος, η οποία με τη σειρά της μειώνει τα μεγέθη  $F_a$  και  $F_h$  (Fwa, 2021).



Εικόνα 2.3: Μηχανισμοί δημιουργίας αντίστασης σε ολίσθηση

Με βάση τα παραπάνω και τα συμπεράσματα ερευνών διαπιστώνεται ότι η ολισθηρότητα είναι το αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο κύριων συνιστωσών της δύναμης τριβής, της πρόσφυσης και της υστέρησης. Επομένως, θεωρείται ότι οι υπόλοιπες συνιστώσες της τριβής του οδοστρώματος είναι ασήμαντες συγκριτικά με τις δύο κύριες, άρα η επαπτόμενη δύναμη τριβής μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των δυνάμεων τριβής της πρόσφυσης και της υστέρησης (Εξίσωση 2.3) (Hall, et al., 2009):

$$F = F_a + F_h \quad (2.3)$$

Αυτές οι δύο συνιστώσες της αντίστασης σε ολίσθηση σχετίζονται με δύο βασικές ιδιότητες της επιφάνειας του οδοστρώματος, τη μικρο-υφή και τη μακρο-υφή.

## 2.3 Παράγοντες επίδρασης στην αντίσταση σε ολίσθηση

### 2.3.1 Γενικά

Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν, άμεσα ή έμμεσα, τις αλλαγές που συμβαίνουν στην αντίσταση σε ολίσθηση του επιφανειακού οδοστρώματος. Συνοπτικά, οι κύριοι παράγοντες είναι (Rasol, et al., 2021):

- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, συγκεκριμένα η επιφανειακή υφή και τα χαρακτηριστικά των υλικών του οδοστρώματος
- Οι συνθήκες κυκλοφορίας, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος και η σύνθεση της κυκλοφορίας

- Οι ιδιότητες του ελαστικού, όπως η σχεδίαση του πέλματος και η πίεση πλήρωσης του ελαστικού
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες, συγκεκριμένα η θερμοκρασία, οι ρύποι, η ύπαρξη νερού, πάγου, χιονιού και η εποχιακή διακύμανση
- Οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος, δηλαδή η ταχύτητα ολίσθησης ως συνάρτηση της ταχύτητας κίνησης του οχήματος και της δύναμης πέδησης


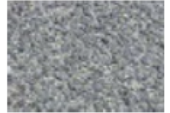


Οι παραπάνω παράγοντες συμβάλλουν τόσο στην αξιολόγηση της αντίστασης σε ολίσθηση του οδοστρώματος όσο και στην αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασής του.

### 2.3.2 Χαρακτηριστικά της επιφάνειας

#### 2.3.2.1 Επιφανειακή υφή

Η επιφανειακή υφή είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό του οδοστρώματος το οποίο αξιοποιείται για την αξιολόγηση της λειτουργικής του κατάστασης. Οι κλίμακες της επιφανειακής υφής καθορίστηκαν στο XVII Παγκόσμιο Συνέδριο Οδοποιίας στις Βρυξέλλες το 1987 από τον Παγκόσμιο Σύλλογο Οδοποιίας (PIARC). Η επιφανειακή υφή διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες ως συνάρτηση του μήκους κύματος ( $\lambda$ ) και του πλάτους (A) των αποκλίσεων. Οι τέσσερις κατηγορίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 (Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), 1987):

**Πίνακας 2.2: Κατηγορίες επιφανειακής υφής οδοστρώματος**

No.	Κατηγορία υφής	Μήκος κύματος, $\lambda$ (mm)	Πλάτος, A (mm)	Όψη υφής
1	Μικρο-υφή	$0 < \lambda < 0.5$	$0.001 < A < 0.5$	
2	Μακρο-υφή	$0.5 < \lambda < 50$	$0.1 < A < 20$	
3	Μέγα-υφή	$50 < \lambda < 500$	$1 < A < 50$	
4	Ομαλότητα	$\lambda > 500$	$1 < A < 200$	

Οι δύο κατηγορίες της επιφανειακής υφής που επηρεάζουν κυρίως την αντίσταση σε ολίσθηση είναι η μικρο-υφή και η μακρο-υφή, οι οποίες όπως αναφέρθηκε παραπάνω σχετίζονται με την πρόσφυση και την υστέρηση.

➤ Μικρο-υφή

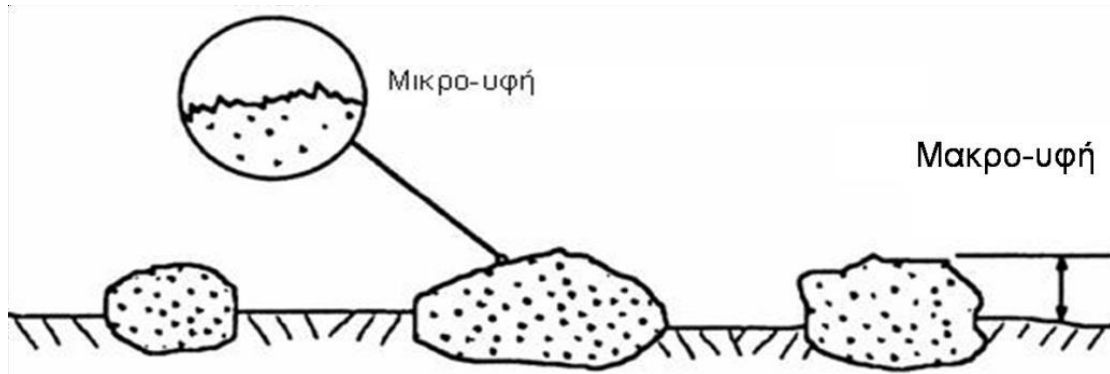
Η μικρο-υφή ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μια επίπεδη επιφάνεια με χαρακτηριστικές διαστάσεις κατά μήκος της επιφάνειας από 1nm έως 0,5mm (Wambold, et al., 1995); (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Βασίζεται στο μέγεθος, το σχήμα, την κλίση των αδρανών καθώς και στα υλικά της ασφάλτου ή του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πρόσφυσης. Η μικρο-υφή εξαρτάται από την αδρότητα της επιφάνειας των αδρανών (Εικόνα 2.4) (Widyatmoko, et al., 2013), συγκεκριμένα την αντίσταση σε στίλβωση των χονδρόκοκκων αδρανών και την περιεκτικότητα του μείγματος σε λεπτόκοκκα αδρανή (Gierasimiuk, et al., 2021). Είναι υπεύθυνη για το σπάσιμο του υμένα νερού στη ζώνη επαφής μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος, όπου δημιουργείται μια ξηρή ζώνη επαφής. Η μικρο-υφή είναι σημαντική σε όλες τις ταχύτητες κίνησης των οχημάτων. Η παράμετρος που περιγράφει έμμεσα τη μικρο-υφή είναι η τιμή του συντελεστή τριβής, η οποία προσδιορίζεται με τη χρήση δυναμικών συσκευών, όπως ο ακινητοποιημένος τροχός (locked-wheel) ή σταθερών συσκευών, όπως το Βρετανικό εκκρεμές και η δοκιμή DFT (Chu, et al., 2022); (Gierasimiuk, et al., 2021).

➤ Μακρο-υφή

Η μακρο-υφή ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μια επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος από 0,5mm έως 50mm και συσχετίζεται με την ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω προεξοχής των αδρανών από την επιφάνεια (Εικόνα 2.4) (Wambold, et al., 1995); (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Βασίζεται στην ύπαρξη κενών μεταξύ των σωματιδίων των αδρανών και λαμβάνει υπόψη το μεγαλύτερο μέγεθος, σχήμα και την κλίση των χονδρόκοκκων αδρανών του μείγματος (Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), 1987); (Rasol, et al., 2021). Επίσης, εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος αδρανών και επηρεάζει την αντίσταση σε ολίσθηση κυρίως σε υψηλές ταχύτητες οχημάτων (Gierasimiuk, et al., 2021).

Η μακρο-υφή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό που προκαλεί απώλεια υστέρησης (Rasol, et al., 2021). Ο δείκτης MPD (Mean Profile Depth) είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης για την έκφραση της μακρο-υφής του οδοστρώματος. Ο δείκτης MPD προκύπτει από τις μετρήσεις με υψηλής ταχύτητας συστήματα προφίλομέτρησης (Gierasimiuk, et al., 2021). Μια άλλη πολύ διαδεδομένη μέθοδος

μέτρησης της μακρο-υφής είναι η μέθοδος «της κηλίδας της άμμου» (Sand Patch) (Λοΐζος & Πλατή, 2021).



Εικόνα 2.4: Μικρο και μακρο-υφή (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζονται οι χαρακτηρισμοί της επιφάνειας του οδοστρώματος με βάση την συνύπαρξη ή μη των χαρακτηριστικών της μικρο-υφής και της μακρο-υφής.

	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	Υφή επιφάνειας	
		ΜακροΥφή	ΜικροΥφή
A		Τραχεία	Αδρή
B		Τραχεία	Λεία
Γ		Ομαλή	Αδρή
Δ		Ομαλή	Λεία

Εικόνα 2.5: Όροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της επιφανειακής υφής του οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

Παρόλο που οι παραπάνω δύο κατηγορίες της επιφανειακής υφής έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη δημιουργία αντίστασης σε ολίσθηση, η μέγα-υφή και η ομαλότητα είναι επίσης πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

➤ Μέγα-υφή

Η μέγα-υφή ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μια επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος από 50mm έως 500mm. Η μέγα-υφή αντιστοιχεί στις ανωμαλίες που σχετίζονται με αυλακώσεις, λακκούβες, απώλεια επιφανειακών λίθων και ρωγμές στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Mc Lean, 1995). Επηρεάζει το

επίπεδο θορύβου και την αντίσταση κύλισης περισσότερο από την αντίσταση σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων (Widyatmoko, et al., 2013).

➤ Ομαλότητα (ανομοιομορφία)

Η ομαλότητα ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μια επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος μεγαλύτερα από 500mm. Επηρεάζει την αντίσταση κύλισης, την ποιότητα οδήγησης και το κόστος λειτουργίας των οχημάτων. Παρέχει μια καλή συνολική μέτρηση της κατάστασης του οδοστρώματος και συνήθως υπολογίζεται μέσω του διεθνούς δείκτη ομαλότητας (IRI- International Roughness Index) (Widyatmoko, et al., 2013).

### 2.3.2.2 Χαρακτηριστικά υλικών οδοστρώματος

Τα αδρανή αντιπροσωπεύουν περίπου το 95% του συνολικού μείγματος υλικών του οδοστρώματος. Για αυτό το λόγο ο βαθμός επιρροής των χαρακτηριστικών των αδρανών, όπως το σχήμα, το γωνιώδες, η τριβή και η σκληρότητά τους, στην αντίσταση σε ολίσθηση είναι υψηλός. Πιο συγκεκριμένα, ο ρόλος τους στη μακρο-υφή είναι να προκαλούν τη δύναμη υστέρησης του ελαστικού και να επιτρέπουν την αποστράγγιση του νερού στην περιοχή επαφής του οδοστρώματος και του ελαστικού. Αντίστοιχα, τα αδρανή είναι υπεύθυνα για την παροχή μιας μικρο-υφής που διατηρεί ασφαλή επίπεδα τριβής στην επιφάνεια της οδού (Khasawneh, 2017); (Rasol, et al., 2021). Η στίλβωση των αδρανών είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες της υφής του οδοστρώματος που επηρεάζει τη λειτουργικότητα του οδοστρώματος και το επίπεδο της αντίστασης σε ολίσθηση (Rasol, et al., 2021).

Συγκεκριμένα, η αντίσταση στη στίλβωση αναφέρεται στην ικανότητα της επιφάνειας των αδρανών να μην στίλβωνονται από τη δράση των ελαστικών των οχημάτων και προσδιορίζεται με τη δοκιμή PSV (Polished Stone Value), η οποία πραγματοποιείται με τη συσκευή της Εικόνας 2.6. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε χονδρόκοκκα αδρανή υλικά, τα οποία τοποθετούνται σε ειδική κυρτή μήτρα (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Μία άλλη ιδιότητα των αδρανών που επηρεάζει την υφή του οδοστρώματος είναι η αντίσταση σε επιφανειακή απότριψη. Λόγω της κυκλοφορίας μεταβάλλεται το μέγεθος του αδρανούς, καταστρέφεται το γωνιώδες και η στρώση κυκλοφορίας χάνει τα αρχικά χαρακτηριστικά της. Η απώλεια λόγω τριβής εξαρτάται από την σκληρότητα του πετρώματος. Η αντίσταση των πετρωμάτων σε απότριψη υπό την επίδραση των ελαστικών των οχημάτων προσδιορίζεται με τη δοκιμή απότριψης (Aggregate Abrasion Value - AAV), η οποία πραγματοποιείται με τη συσκευή της Εικόνας 2.6 (Λοΐζος & Πλατή, 2021).



Εικόνα 2.6: Συσκευή στίλβωσης (αριστερά) και συσκευή απότριψης (δεξιά) (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

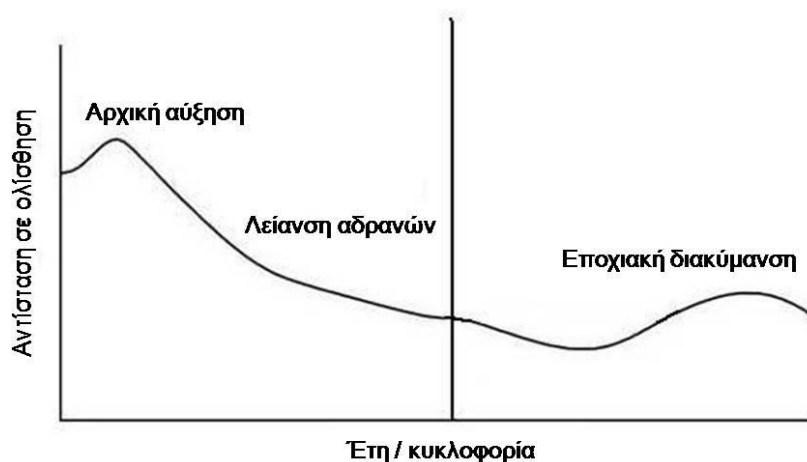
Λόγω της υποβάθμισης της μικρο- και μακρο-υφής του οδοστρώματος που προκαλείται από τη στίλβωση και την απότριψη των αδρανών, η αντίσταση σε ολίσθηση των εν λειτουργία οδοστρωμάτων μειώνεται με την ηλικία (Fwa, 2021).

### 2.3.3 Κυκλοφοριακές συνθήκες

Ο κυκλοφοριακός φόρτος και η σύνθεση της κυκλοφορίας, δηλαδή το ποσοστό βαρέων οχημάτων επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση σε ολίσθηση. Συγκεκριμένα, επηρεάζουν την εξέλιξη του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της ζωής του. Αρχικά, σε ένα νέο ασφαλτικό οδόστρωμα αμέσως μετά τη διάστρωση του ασφαλτομίγματος η αντίσταση σε ολίσθηση είναι σχετικά μικρή καθώς το συνδεδετικό υλικό καλύπτει τα αδρανή, με συνέπεια να μειώνεται η μικρο-υφή (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Ακολούθως για τα πρώτα δύο χρόνια, συνήθως, η τριβή της επιφάνειας του οδοστρώματος αυξάνεται καθώς τα κατάλοιπα κατασκευής, τα χαλαρά υλικά και το συνδεδετικό υλικό απομακρύνονται λόγω της κυκλοφορίας και των χαρακτηριστικών της βαριάς κυκλοφορίας, με αποτέλεσμα να αποκαλύπτονται τα αδρανή και να αυξάνεται η μικρο-υφή (Ahammed & Tighe, 2009). Επομένως, τα πρώτα χρόνια της ζωής του οδοστρώματος η αντιολισθητική ικανότητα παρέχεται κυρίως από τη μακρο-υφή (Li, et al., 2018). Το πλήρες όφελος της μικρο-υφής των αδρανών είναι διαθέσιμο μόλις η άσφαλτος ή η επικάλυψη τσιμέντου έχει απομακρυνθεί πλήρως από τα επιφανειακά αδρανή (Ahammed & Tighe, 2009).



Ωστόσο, στη συνέχεια η επίδραση της κυκλοφορίας αρχίζει να μειώνει την αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος λόγω της στίλβωσης και της απότριψης των αδρανών. Το επίπεδο τριβής μειώνεται έως ότου επιτευχθεί μια φάση ισορροπίας. Έρευνες έχουν δείξει ότι κατά τη διάρκεια της φάσης ισορροπίας, όσο διατηρείται σταθερός ο κυκλοφοριακός όγκος, οι εποχιακές και οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις είναι οι μόνες που προκαλούν διαφοροποίηση στο επίπεδο ολισθηρότητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7 (Pérez-Acebo, et al., 2020).



Εικόνα 2.7: Μεταβολή της αντίστασης σε ολίσθηση με το χρόνο και την κυκλοφορία (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

Τέλος, ένας παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει αύξηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε αυτή τη φάση είναι οι επιφανειακές φθορές του οδοστρώματος, όπως οι ρηγματώσεις και οι ρωγμές (Ahammed & Tighe, 2009).

#### 2.3.4 Ιδιότητες ελαστικού

Οι ιδιότητες των ελαστικών επηρεάζουν τη μεταβολή της αντίστασης σε ολίσθηση, τόσο σε ξηρό, όσο και σε υγρό οδόστρωμα. Διάφορες ιδιότητες των ελαστικών έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στις μετρήσεις της ολισθηρότητας, μερικές από αυτές είναι η θερμοκρασία, το πέλμα, οι διαστάσεις, η πίεση πλήρωσης, η σκληρότητα (ακαμψία) και οι αυλακώσεις του ελαστικού (Rasol, et al., 2021).

Η θερμοκρασία του ελαστικού δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του αλλά μεταβάλλεται με την ταχύτητα, την εποχιακή αλλαγή (χειμώνας, καλοκαίρι), το υλικό και τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του ελαστικού. Η τριβή πέδησης μειώνεται όταν η πίεση είναι χαμηλή στο εσωτερικό του ελαστικού καθώς το κέντρο του πέλματος γίνεται κοίλο με αποτέλεσμα τη στένωση των

καναλιών αποστράγγισης μέσω των αυλακώσεων του πέλματος και τη μείωση της επιφάνειας επαφής οδοστρώματος-ελαστικού (Hall, et al., 2009); (Rasol, et al., 2021). Επίσης, ο συντελεστής τριβής πέδησης αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του οχήματος και του φορτίου του άξονα διότι αυξάνεται η πίεση επαφής διευκολύνοντας τη διαφυγή του νερού. Ο συνδυασμός των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και οδοστρώματος προκαλεί ασθενείς συντελεστές τριβής πέδησης και αντίστασης κύλισης (Rasol, et al., 2021).

Πολύ σημαντικός είναι ο σχεδιασμός του πέλματος του ελαστικού, συγκεκριμένα ο τύπος, το σχέδιο και το βάθος των αυλακώσεων, καθώς και η κατάσταση του όσον αφορά στη φθορά και στην παλαιότητα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιδρούν στην αποστράγγιση του νερού που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το νερό που παγιδεύεται μεταξύ του οδοστρώματος και του ελαστικού μπορεί να απομακρυνθεί μέσω των καναλιών που δημιουργούνται από την επιφανειακή υφή του οδοστρώματος και τις αυλακώσεις του πέλματος. Το βάθος του πέλματος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα οχήματα που κινούνται πάνω σε παχύ υμένα νερού με υψηλές ταχύτητες (Hall, et al., 2009).

### **2.3.5 Περιβαλλοντικές συνθήκες**

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή επηρεάζουν σημαντικά την εποχιακή διακύμανση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα των καιρικών συνθηκών στην επιφάνεια του οδοστρώματος, όπως η ύπαρξη νερού, πάγου, σκόνης, επηρεάζει και μεταβάλλει την ολισθηρότητα του. Επομένως, αποτελούν σημαντική παράμετρο για τους φορείς διαχείρισης των οδοστρωμάτων προκειμένου να εξασφαλίσουν ασφαλείς συνθήκες οδήγησης. Οι πιο επιδραστικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι η θερμοκρασία, το νερό, οι ρύποι, το χιόνι/ο πάγος και ο αέρας.

#### **2.3.5.1 Θερμοκρασία**

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας λόγω των εποχιακών μεταβολών του κλίματος στην περιοχή του έργου επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την αντίσταση σε ολίσθηση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η αντίσταση σε ολίσθηση μετριέται συνήθως τους καλοκαιρινούς μήνες για τον προσδιορισμό της χαμηλότερης τιμής, η οποία είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων (Rasol, et al., 2021). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η ελαστικότητα (ευκαμψία) του ελαστικού αυξάνεται και οι απώλειες υστέρησης γίνονται μικρότερες καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία (Kogbara, et al.,

2016). Πέρα, όμως, από τις εποχιακές μεταβολές παρουσιάζονται βραχυπρόθεσμες μεταβολές κατά τη διάρκεια της ίδιας ημέρας λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας (Rasol, et al., 2021).

Οι περισσότερες έρευνες συμφωνούν ότι οι θερμοκρασίες των τεσσάρων στοιχείων που αλληλεπιδρούν στην διεπιφάνεια ελαστικού-οδοστρώματος, δηλαδή του αέρα, του νερού, του ελαστικού και του οδοστρώματος, επηρεάζουν την αντίσταση σε ολίσθηση (Shafii, 2009). Ωστόσο, η θερμοκρασία του νερού και η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό και μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη λειτουργία του οδοστρώματος αλλά όχι την τριβή του. Η θερμοκρασία του ελαστικού είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία του αέρα (Rasol, et al., 2021). Η συσχέτιση μεταξύ των θερμοκρασιών του αέρα, του οδοστρώματος και του ελαστικού έχει μοντελοποιηθεί με τις παρακάτω εξισώσεις (Hill & Henry, 1982):

$$T_t = 8.45 + 0.810 * T_A \quad (R^2 = 0.83) \quad (2.4)$$

$$T_t = 6.78 + 0.558 * T_P \quad (R^2 = 0.76) \quad (2.5)$$

$$T_A = 0.87 + 0.573 * T_P \quad (R^2 = 0.80) \quad (2.6)$$

Όπου  $T_t$ = θερμοκρασία ελαστικού (°C),  $T_P$ = θερμοκρασία επιφάνειας οδοστρώματος και  $T_A$ = θερμοκρασία αέρα (περιβάλλοντος).

Τα ελαστικά αυτοκινήτων είναι ιξωδοελαστικά υλικά και οι ιδιότητές τους μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από αλλαγές στη θερμοκρασία (Hall, et al., 2009). Επομένως, ακόμη και αν η θερμοκρασία του αέρα (περιβάλλοντος) δεν έχει άμεση επίδραση στην ολίσθησή, επηρεάζει τις ιδιότητες τριβής του ελαστικού, οι οποίες έχουν επίδραση στη μεταβολή της αντίστασης σε ολίσθηση της επιφάνειας του οδοστρώματος (Rasol, et al., 2021). Έρευνες δείχνουν ότι η τριβή οδοστρώματος-ελαστικών, γενικά, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας των ελαστικών, αν και αυτό είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί (Hall, et al., 2009). Η εξίσωση 2.7 δείχνει την επίδραση της θερμοκρασίας του ελαστικού στο συντελεστή τριβής πλευρικής δύναμης SFC (Surface Friction Coefficient). Επίσης, η εξίσωση 2.8 παρουσιάζει τη θερμοκρασία του ελαστικού αναλογικά με τη θερμοκρασία του αέρα και του οδοστρώματος (Oliver, 1989).

$$\frac{SFC_t}{SFC_{25}} = 0.563 + \frac{45.9}{(t + 8)} \quad R^2 = 0.83 \quad (2.7)$$

$$T_t = 12.3 + 0.48 * (T_A + T_P) \quad (2.8)$$

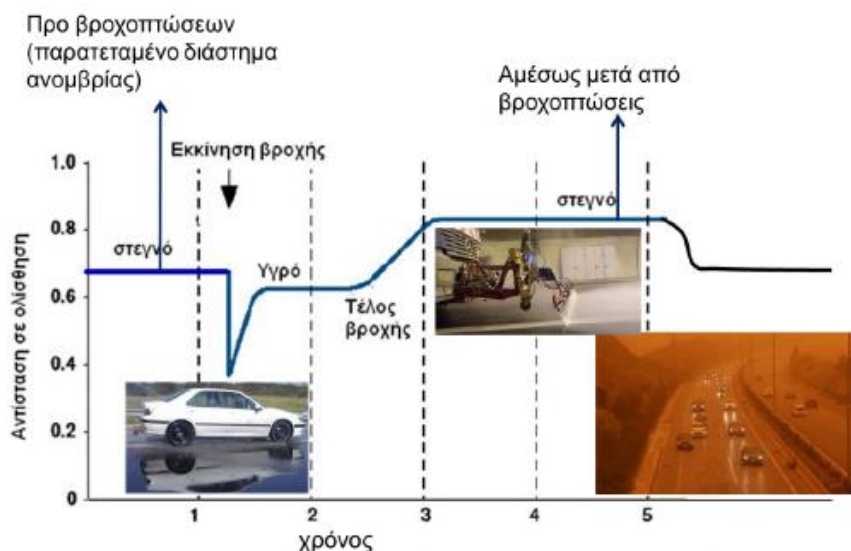
Όπου  $SFC_t$ = ο συντελεστής τριβής πλευρικής δύναμης σε θερμοκρασία  $t$  του ελαστικού,  $SFC_{25}$ = ο συντελεστής τριβής πλευρικής δύναμης σε θερμοκρασία 25°C,

$T_t$ = θερμοκρασία ελαστικού (°C),  $T_p$ = θερμοκρασία επιφάνειας οδοστρώματος και  $T_A$ = θερμοκρασία αέρα (περιβάλλοντος).

Τέλος, η μείωση της τριβής με την αύξηση της θερμοκρασίας έχει επίσης αποδοθεί σε αλλαγές στις ιδιότητες της ασφάλτου και στο ιξώδες του νερού. Η μείωση της υστέρησης, συνιστώσας της τριβής, μπορεί να αποδοθεί στη μειωμένη δυσκαμψία του ελαστικού που ολισθαίνει καθώς και της ασφάλτου σε υψηλές θερμοκρασίες. Η επιρροή της πρόσφυσης μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της αλλαγής του ιξώδους του νερού (Khasawneh & Liang, 2012).

#### 2.3.5.2 Νερό

Το νερό υπό μορφή βροχόπτωσης μπορεί να έχει θετική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, η βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει βραχυπρόθεσμη διακύμανση στη μέτρηση της ολισθηρότητας. Μελέτες έδειξαν ότι η αντίσταση σε ολίσθηση μειώνεται κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης ενώ η τιμή της αυξάνεται μετά τη βροχόπτωση (Rasol, et al., 2021). Οι μετρήσεις ολίσθησης που πραγματοποιούνται λίγο μετά τη βροχόπτωση μπορεί να δείχνουν υψηλότερες τιμές από εκείνες κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στους ρύπους, όπως η σκόνη, τα λάδια των οχημάτων, που καλύπτουν την επιφάνεια του οδοστρώματος και μειώνουν την αντιολισθητική ικανότητα. Η βροχόπτωση καθαρίζει την επιφάνεια από τους ρύπους αυξάνοντας την άμεση επαφή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι οι αριθμοί ολίσθησης μειώνονται και φτάνουν σε μια ελάχιστη τιμή μετά από 7 ημέρες χωρίς βροχόπτωση (Kogbara, et al., 2016). Οι παραπάνω μεταβολές της αντίστασης σε ολίσθηση απεικονίζονται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Αντίσταση σε ολίσθηση και καιρικές συνθήκες (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

Το νερό, πέρα από τη μορφή της βροχοπτώσης, μπορεί να βρίσκεται συσσωρευμένο, στάσιμο πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος και να δρα σαν λιπαντικό μειώνοντας σημαντικά την τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Η επίδραση του πάχους του φιλμ νερού στην τριβή είναι ελάχιστη σε χαμηλές ταχύτητες (<32χλμ/ώρα) και αρκετά έντονη σε υψηλότερες ταχύτητες (>40χλμ/ώρα). Ο συντελεστής τριβής του ελαστικού ενός οχήματος που ολισθαίνει σε υγρό οδόστρωμα μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του πάχους του φιλμ νερού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9 αυξανόμενης της ταχύτητας, σε συνδυασμό με το πάχος του «φιλμ» νερού στο οδόστρωμα, μειώνεται η επιφάνεια επαφής μεταξύ τροχού και οδοστρώματος και παρατηρείται αδυναμία πραγματοποίησης ελιγμών και πέδησης (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Επιπλέον, η επίδραση του πάχους του νερού εξαρτάται από τον σχεδιασμό και την κατάσταση του ελαστικού, με τα φθαρμένα ελαστικά να είναι πιο ευαίσθητα. Ακόμα και μια μικρή ποσότητα νερού μπορεί να μειώσει σημαντικά την τριβή του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, μελέτη έδειξε ότι 0,05mm νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να μειώσει τον συντελεστή τριβής κατά 20% έως 30% του συντελεστή τριβής ξηρού οδοστρώματος (Harwood, et al., 1987).



Εικόνα 2.9: Φιλμ νερού στο οδόστρωμα (Λοΐζος & Πλατή, 2021)

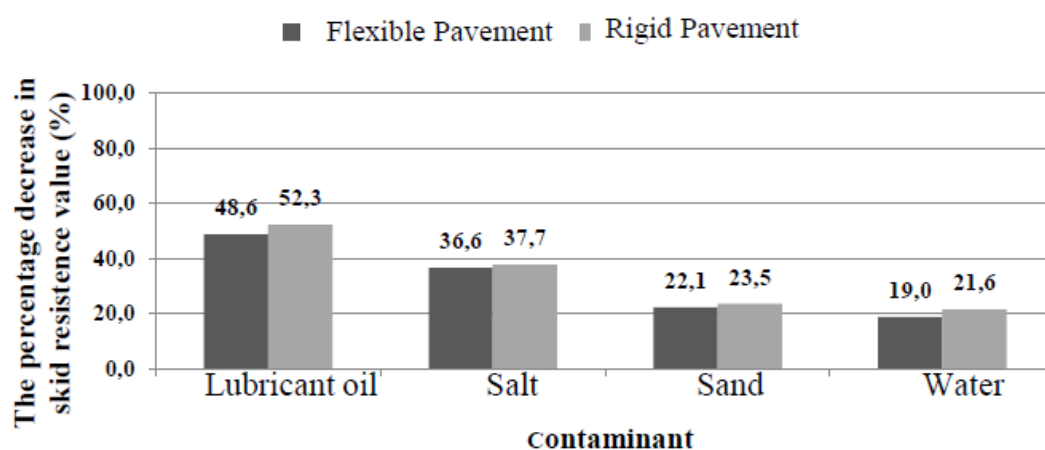
Όταν υπάρχουν σχετικά παχιά στρώματα νερού και τα οχήματα κινούνται με υψηλότερες ταχύτητες μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο της υδρολίσθησης (Hall, et al., 2009). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στην περίπτωση υγρού οδοστρώματος όπου δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα νερού ανάμεσα στο οδόστρωμα και το ελαστικό με αποτέλεσμα να χάνεται η επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος προκαλώντας απώλεια του ελέγχου της πορείας του οχήματος (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Πρόκειται για ένα σύνθετο φαινόμενο που επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως το πάχος του φιλμ νερού, την ταχύτητα του οχήματος, τη μακροϋφή του οδοστρώματος, το βάθος του πέλματος του ελαστικού, την πίεση πλήρωσης του ελαστικού και την επιφάνεια επαφής του ελαστικού (Hall, et al., 2009).

### 2.3.5.3 Ρύποι

Οι ρύποι είναι υλικά που καλύπτουν την επιφάνεια του οδοστρώματος και επηρεάζουν την αντίσταση σε ολίσθηση (Lubis, et al., 2018). Οι ρύποι που συνήθως συναντώνται στις οδούς είναι άμμος, πετρέλαιο, λιπαντικό αυτοκινήτων, νερό, χιόνι και πάγος (Hall, et al., 2009). Τα κατάλοιπα δρουν ως διεπιφάνεια επικάλυψης ή ως άμεση επαφή της επιφάνειας του οδοστρώματος με τους τροχούς του οχήματος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή της αντίστασης σε ολίσθηση (Lubis, et al., 2018). Έχει μελετηθεί η επίδραση των ρύπων στα αδρανή της επιφάνειας του οδοστρώματος, συγκεκριμένα η προσθήκη κατάλοιπων σε διάφορα αδρανή που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη στίλβωση είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά τους. Η προσθήκη σκληρών αλλά λεπτόκοκκων ρύπων μείωσε σημαντικά τη μετρούμενη αντίσταση στην ολίσθηση, καθώς βοήθησε τη στίλβωση της επιφάνειας των αδρανών. Από την άλλη μεριά, η προσθήκη χονδροκόκκων αλλά σκληρών κατάλοιπων βελτίωσε σημαντικά τη μετρούμενη αντίσταση στην ολίσθηση καθώς βοήθησε στην χάραξη και την τραχύτητα της επιφάνειας (Wilson, 2013).

Επίσης, μια άλλη έρευνα των (Lubis, et al., 2018) πραγματοποιήθηκε σχετικά με την επίδραση του νερού, της άμμου, του λιπαντικού λαδιού και του αλατιού στην αντιολισθητική ικανότητα ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι με βάση την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή ολισθηρότητας, η τιμή της αντίστασης σε ολίσθηση στο ασφαλικό και στο δύσκαμπτο οδόστρωμα πριν από την έκθεση σε ρύπους ήταν ακόμα επαρκής αλλά μετά την έκθεση ήταν ανεπαρκής. Επίσης, φάνηκε ότι τα συγκεκριμένα κατάλοιπα επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος και

ειδικότερα η κατάταξη των ρύπων από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση ήταν νερό, άμμος, αλάτι, λιπαντικό λάδι (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Μέσο ποσοστό μείωσης της τιμής της αντίστασης σε ολίσθηση λόγω ρύπων (Lubis, et al., 2018)

#### 2.3.5.4 Χιόνι και πάγος

Το χιόνι και ο πάγος στην επιφάνεια του οδοστρώματος αποτελούν την πιο επικίνδυνη κατάσταση για την πέδηση ή τη στρέφουσα κίνηση του οχήματος. Το επίπεδο τριβής μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος είναι τέτοιο που σχεδόν κάθε απότομο φρενάρισμα ή απότομη αλλαγή κατεύθυνσης έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση των μπλοκαρισμένων τροχών και την απώλεια σταθερότητας κατά την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος (Hall, et al., 2009). Επομένως, η συμπεριφορά της τριβής που δημιουργείται στη διεπιφάνεια ελαστικού-οδοστρώματος είναι σημαντική κατά τη διάρκεια του χειμώνα, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια των χρηστών της οδού και ο έλεγχος του οχήματος από τους οδηγούς.

Δύο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τριβής του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια χιονοπτώσεων είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος και το εύρος ταχύτητας (Rasol, et al., 2021). Πειραματικές μελέτες της τριβής σε επιφάνειες πάγου έδειξαν ότι οι χαμηλότερες τιμές τριβής παρατηρούνται κοντά στο σημείο τήξης. Συγκεκριμένα, όταν λιώνει ο πάγος ή το χιόνι δημιουργείται ένας λεπτός υμένας νερού στα σημεία επαφής μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης, εξαιτίας του οποίου μειώνεται η αντίσταση σε ολίσθηση (Bowden & Hughes, 1939); (Colbeck, 1988).

#### 2.3.5.5 Άνεμος

Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί επίσης να είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την επίστρωση της επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω υγρών καιρικών συνθηκών ή φαινομένων αποπαγοποίησης κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών συνθηκών το χειμώνα. Ένας ελαφρύς άνεμος βοηθάει τη διαδικασία εξάτμισης της υπάρχουσας υγρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος αυξάνοντας έτσι την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Επιπλέον, σε ορισμένες ζώνες, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση λόγω της μεταφοράς σκόνης, ή κάποιας τυχαίας κατανομής σκόνης και άλλων οργανικών υλικών στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Abaza, et al., 2017).

#### 2.3.6 **Λειτουργικές παράμετροι οχήματος**

Οι παράγοντες λειτουργίας του οχήματος έχουν σημαντική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση στα συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερα σημαντικά είναι η ταχύτητα ολίσθησης ως συνάρτηση της ταχύτητας κίνησης, ο λόγος ολίσθησης και το σύστημα φρεναρίσματος. Είναι γνωστό ότι η αντίσταση σε ολίσθηση μειώνεται όταν η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων αυξάνεται σε υγρό οδόστρωμα. Γενικά, η σχετική συμβολή της επιφάνειας του οδοστρώματος (μακρο- και μικρο-υφή) μεταβάλλεται λόγω των συνεχών μεταβολών της ταχύτητας του οχήματος. Με την αύξηση της ταχύτητας ο χρόνος διαφυγής του νερού που παγιδεύεται μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος μειώνεται, για αυτό είναι απαραίτητη η επαρκής αντίσταση σε ολίσθηση προκειμένου να εξασφαλίζονται ασφαλείς ελιγμοί (Rasol, et al., 2021).

Η ταχύτητα ολίσθησης είναι η σχετική ταχύτητα με βάση την περιφέρεια των ελαστικών του οχήματος και την επιφάνεια του οδοστρώματος σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης ή σε κατάσταση σταθερής πέδησης (Rasol, et al., 2021). Ο συντελεστής τριβής μεταξύ ενός ελαστικού και του οδοστρώματος μεταβάλλεται με τη μεταβαλλόμενη ολίσθηση. Η κατάσταση «ακινητοποιημένου» τροχού αντιστοιχεί σε λόγο ολίσθησης 100% ( $\mu=1$ ), ενώ η κατάσταση ελεύθερης κύλισης αντιστοιχεί σε λόγο ολίσθησης 0% ( $\mu=0$ ). Επίσης, η τριβή μειώνεται σε μια τιμή γνωστή ως συντελεστής τριβής ολίσθησης, η οποία εμφανίζεται στο 100% της ολίσθησης (Hall, et al., 2009).

Το σύστημα πέδησης του οχήματος είναι ένας αποτελεσματικός περιοριστικός παράγοντας όταν η αντίσταση σε ολίσθηση μειώνεται σε δυσμενή τιμή. Ειδικότερα,



στα νέα οχήματα χρησιμοποιούνται συστήματα πέδησης υψηλής τεχνολογίας, τα οποία είναι γνωστά ως συστήματα αντιμπλοκαρίσματος των φρένων (ABS). Ο ρόλος των συστημάτων αυτών είναι να διατηρούν το λόγο ολίσθησης στο 15%, γεγονός που αυξάνει την εφαιπτομένη δύναμη τριβής του οδοστρώματος ώστε να μπορέσει το όχημα να σταματήσει με ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο (Rasol, et al., 2021).

## 2.4 Μέθοδοι μέτρησης της αντίστασης σε ολίσθηση

### 2.4.1 Γενικά

Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες δοκιμής και συσκευές για τη μέτρηση της αντίστασης σε ολίσθηση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Κάθε μια από αυτές έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και μετράει ελαφρώς διαφορετικές παραμέτρους από τις υπόλοιπες, με συνέπεια τα αποτελέσματά τους να μην μπορούν να συγκριθούν άμεσα. Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι μετρήσεις της αντίστασης σε ολίσθηση είναι (Mataei, et al., 2016):

- Συσκευές για μετρήσεις πεδίου
- Συσκευές για εργαστηριακές μετρήσεις

Οι συσκευές μέτρησης μπορούν, επίσης, να χωριστούν ως ακολούθως (Wilson, 2006):

- Συσκευές συνεχούς μέτρησης τριβής - Ικανές να μετρούν συνεχώς σε ένα μεγάλο τμήμα οδοστρώματος (Continuous Friction Measuring Equipment - CFME), οι οποίες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
  - Μέθοδος γωνιακού δοκιμαστικού τροχού (Angled test wheel method)  
Στην κατηγορία αυτή ανήκει το σύστημα μέτρησης της αντίστασης σε ολίσθηση της πλευρικής δύναμης.
  - Μέθοδος μπλοκαρισμένου τροχού (Braked wheel)  
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα μέτρησης του ακινητοποιημένου τροχού, της σταθερής ολίσθησης και της κυμαινόμενης ολίσθησης.
- Στατικές ή χαμηλής ταχύτητας συσκευές - Μετρούν την αντίσταση σε ολίσθηση σε συγκεκριμένα σημεία

Οι πιο συνηθισμένες στατικές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο. Για το λόγο αυτό για την πραγματοποίηση μετρήσεων ολίσθησης με στατικές συσκευές απαιτείται ρύθμιση της κυκλοφορίας. Αντίθετα,

τα συστήματα συνεχούς μέτρησης πραγματοποιούνται με υψηλές ταχύτητες με αποτέλεσμα να μην απαιτείται διακοπή ή κάποια ρύθμιση της κυκλοφορίας.

## **2.4.2 Συσκευές συνεχούς μέτρησης στο πεδίο**

### **2.4.2.1 Μέθοδος γωνιακού δοκιμαστικού τροχού**

#### **➤ Μέθοδος πλευρικής δύναμης**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα, που μετρούν τον πλευρικό συντελεστή τριβής με ειδικό τροχό μέτρησης λείου ελαστικού, ο οποίος κινείται συνεχώς, υπό γωνία κατά τη διεύθυνση κίνησης του συστήματος και με σταθερή ταχύτητα. Με τον πλευρικό συντελεστή τριβής προσομοιώνεται η δύναμη αντίστασης των τροχών των οχημάτων κατά την κίνηση σε καμπύλα τμήματα του αυτοκινητόδρομου ή όταν τα οχήματα εκτελούν ελιγμούς (Λοΐζος & Πλατή, 2021).

### **2.4.2.2 Μέθοδος μπλοκαρισμένου τροχού**

#### **➤ Μέθοδος ακινητοποιημένου τροχού**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα που μετρούν το συντελεστή τριβής ή πέδησης με ειδικό τροχό (λείο ή με ραβδώσεις), που κινείται κατά τη διεύθυνση κίνησης του συστήματος και παρεμποδίζεται πλήρως, ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Σημειώνεται ότι στα συστήματα του ακινητοποιημένου τροχού η ταχύτητα ολίσθησης, η οποία είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ της επιφάνειας του ελαστικού και της επιφάνειας κύλισης του οδοστρώματος, είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος. Η μέθοδος του ακινητοποιημένου τροχού αναπαριστά την απότομη πέδηση χωρίς το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών (Λοΐζος & Πλατή, 2021).

#### **➤ Μέθοδος σταθερής ολίσθησης**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα που λειτουργούν με μια σταθερή ολίσθηση, συνήθως μεταξύ 10% και 20%. Ο τροχός μέτρησης κινείται με μία γωνιακή ταχύτητα χαμηλότερη από αυτή της ελεύθερης περιστροφής. Αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται με υδραυλική επιβράδυνση του τροχού μέτρησης, που έχει σαν αποτέλεσμα ο τροχός να ολισθαίνει και να κινείται με ένα ποσοστό (10%-20%) της ταχύτητας του οχήματος που το ρυμουλκεί. Η μέθοδος αυτή σχετίζεται με το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών. (Λοΐζος & Πλατή, 2021).

#### **➤ Μέθοδος κυμαινόμενης ολίσθησης**

Τα συστήματα κυμαινόμενης ολίσθησης μεταβάλλουν το ποσοστό ολίσθησης του τροχού μέτρησης κατά την διάρκεια της καταγραφής. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως

με υδραυλικά συστήματα. Η μέθοδος αυτή, επίσης, σχετίζεται με το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος των τροχών (Λοΐζος & Πλατή, 2021).

### 2.4.3 Στατικές συσκευές μέτρησης

Οι πιο συνηθισμένες συσκευές στατικών δοκιμών είναι το Βρετανικό εκκρεμές (British Pendulum Tester - BPT), η διάταξη Dynamic Friction Tester (DFT) και η συσκευή Wehner/Schulze.

#### 2.4.3.1 Βρετανικό εκκρεμές

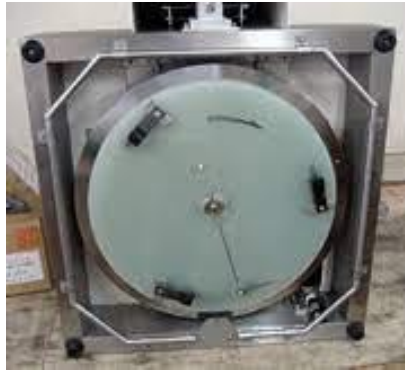
Το βρετανικό εκκρεμές (BPT) (Εικόνα 2.11) είναι ένα απλό και φθινό όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τριβής των επιφανειών των οδοστρωμάτων. Η συσκευή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τριβής του οδοστρώματος στο εργαστήριο ή σε χαμηλές ταχύτητες στο πεδίο. Το BPT είναι εύκολο στο χειρισμό αλλά το αποτέλεσμα του είναι μόνο ένα μέτρο της τριβής σε χαμηλή ταχύτητα. Η μέτρηση αυτή επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη μικρο-υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος, ωστόσο η μακρο-υφή μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μετρήσεις (Mataei, et al., 2016).



Εικόνα 2.11: Βρετανικό εκκρεμές

#### 2.4.3.2 Δοκιμή Δυναμικής Τριβής DFT

Το DFT (Dynamic Friction Tester) (Εικόνα 2.12) είναι μια συσκευή δοκιμής που μετρά τη δύναμη τριβής μεταξύ της επιφάνειας και των τριών ελαστικών επιθεμάτων (pads) που είναι προσαρτημένα σε έναν περιστρεφόμενο δίσκο. Ο δίσκος περιστρέφεται οριζόντια με γραμμική ταχύτητα περίπου 20 έως 80 km/h υπό σταθερό φορτίο. Τα ελαστικά επιθέματα μπορούν να ακουμπήσουν την επιφάνεια του οδοστρώματος με διαφορετικές ταχύτητες, ώστε το DFT να μπορεί να μετρήσει την αντίσταση σε ολίσθηση σε διάφορες ταχύτητες.

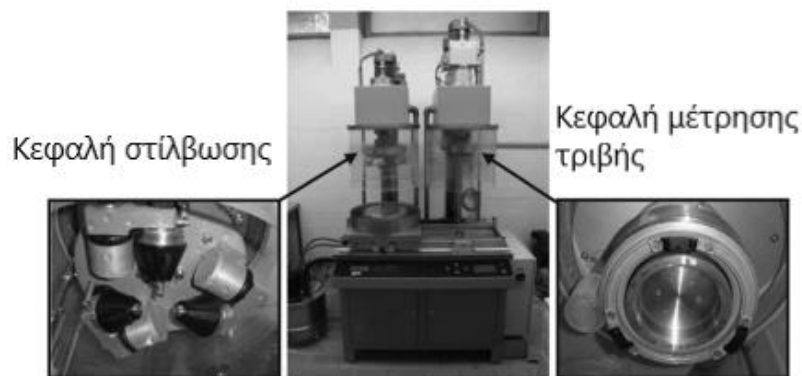


**Εικόνα 2.12: Συσκευή DFT**

Τόσο οι διαδικασίες της συσκευής Βρετανικού εκκρεμούς όσο και οι διαδικασίες της συσκευής DFT βασίζονται στον προσδιορισμό της απώλειας κινητικής ενέργειας ενός ολισθαίνοντος εκκρεμούς ή ενός περιστρεφόμενου δίσκου, όταν έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος (Mataei, et al., 2016).

#### 2.4.3.3 Συσκευή Wehner-Schulze (W/S)

Η εργαστηριακή συσκευή Wehner/Schulze (Εικόνα 2.13) συνδυάζει τη στίλβωση και τη μέτρηση της αντίστασης ολίσθησης σε μία δοκιμή (Hofko, et al., 2019). Η διαδικασία Wehner Schulze (W/S) είναι μια εναλλακτική μέθοδος στίλβωσης των αδρανών αντί της δοκιμής PSV (Polished Stone Value), η οποία έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει την επιταχυνόμενη φθορά των υλικών οδοστρώσας και να ελέγχει την τριβή που παρέχει το δοκίμιο πριν και μετά τη φθορά αυτή. Ωστόσο, μια σημαντική διαφορά μεταξύ της δοκιμής PSV και της διαδικασίας W/S είναι ότι η τελευταία χρησιμοποιεί μεγάλα, επίπεδα δοκίμια, συγκεκριμένα οποιαδήποτε επίπεδη, κυκλική επιφάνεια με διάμετρο 225mm μπορεί να ελεγχθεί, έτσι υπάρχει δυνατότητα ελέγχου δοκιμίων τόσο από το πεδίο όσο και εργαστηριακά παρασκευασμένων (Dunford, 2008).






Εικόνα 2.13: Συσκευή Wehner-Schulze


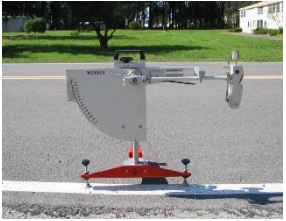
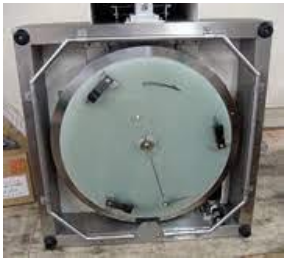
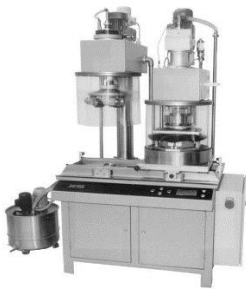
Η στίλβωση πραγματοποιείται από μια περιστρεφόμενη κεφαλή με τρεις κωνικούς κυλίνδρους καλυμμένους με καουτσούκ που περιστρέφονται με 500 στροφές ανά λεπτό πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται 90000 περάσματα ανά ώρα. Για τη μέτρηση της αντίστασης σε ολίσθηση, αρχικά, η περιστρεφόμενη κεφαλή επιταχύνεται μέχρι μια κυκλική ταχύτητα 100 km/h. Στη συνέχεια, ψεκάζεται νερό στην επιφάνεια του δοκιμίου προτού η περιστρεφόμενη κεφαλή ακουμπήσει την επιφάνεια. Καθώς η κεφαλή δοκιμής επιβραδύνεται, καταγράφεται η τιμή τριβής  $\mu$ . Γενικά, η τιμή τριβής επιλέγεται για την ταχύτητα των 60 km/h και αναφέρεται ως  $\mu_{PWS}$  (Polishing value Wehner/Schulze) (Hofko, et al., 2019).

#### 2.4.4 Συγκεντρωτικός πίνακας συσκευών μέτρησης ολισθηρότητας

Ο Πίνακας 2.3 περιλαμβάνει τις διάφορες μεθόδους μέτρησης της ολισθηρότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στην καθεμιά. Επίσης, εμφανίζει τους δείκτες της αντίστασης σε ολίσθηση που αντιστοιχούν σε κάθε μέθοδο, καθώς και τα πρότυπα που ακολουθούν.

Πίνακας 2.3: Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής οδοστρώματος (Hall, et al., 2009); (Mataei, et al., 2016)

Κατηγορία μεθόδου	Τύπος μεθόδου	Πρότυπο	Δείκτης μέτρησης	Συσκευές
Μέτρηση πεδίου Συνεχής μέτρηση Μέθοδος φρεναρισμένου τροχού	Ακινητοποιημένος τροχός	ASTM E274	Ο συντελεστής τριβής (μ) υπολογίζεται με τη μέτρηση της δύναμης αντίστασης και του φορτίου του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα. Η τριβή αναφέρεται ως αριθμός τριβής (FN) ή αριθμός ολίσθησης (SN)	ASTM E274 skid trailer 
	Σταθερής ολίσθησης	Διάφορα	Ο συντελεστής τριβής (μ) υπολογίζεται με τη μέτρηση της δύναμης αντίστασης και του φορτίου του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα. Η τριβή αναφέρεται ως αριθμός τριβής (FN)	1. Roadway and runway friction testers (RFTs) 2. Airport Surface friction Tester (ASFT) 3. Grip Tester  4. Finland BV-11 5. Road Analyzer and Recorder (ROAR) 6. ASTM E 1551 7. Saab Friction Tester (SFT)
	Κυμαινόμενης ολίσθησης	ASTM E1859	Αυτή η δοκιμή παρέχει τους παρακάτω δείκτες: -Αριθμός τριβής διαμήκους ολίσθησης -Αριθμός τριβής ολίσθησης αιχμής -Κρίσιμος λόγος ολίσθησης -Αριθμός τριβής κύλισης προς ολίσθηση -Εκτιμώμενος αριθμός τριβής -Συντελεστής σχήματος (Rado Shape factor)	1. Γαλλικό IMAG 2. Νορβηγικό Norsemeter RUNAR  3. ROAR and SALTAR systems

<p>Μέτρηση πεδίου Συνεχής μέτρηση Μέθοδος γωνιακού δοκιμαστικού τροχού</p>	<p>Πλευρικής δύναμης</p>	<p>ASTM E670</p>	<p>Ο αριθμός Mu, (MuN) ή ο συντελεστής πλευρικής δύναμης (SFC) υπολογίζεται με τη μέτρηση του μέσου όρου της πλευρικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο περιστροφής</p>	<p>1. Βρετανικό Mu-Meter 2. Βρετανικό Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM)</p> 
<p>Μέτρηση πεδίου ή στο εργαστήριο Στατική μέτρηση</p>		<p>ASTM E303</p>	<p>Το Βρετανικό εκκρεμές παρέχει το British Pendulum Number (BPN) με βάση το ύψος περιστροφής του εκκρεμούς μετά από μια ολισθαίνουσα επαφή χαμηλής ταχύτητας με την επιφάνεια του οδοστρώματος.</p>	<p>1. Βρετανικό εκκρεμές (British Pendulum Tester – BPN)</p> 
		<p>ASTM E1911</p>	<p>Η δοκιμή δυναμικής τριβής (DFT) παρέχει αυτούς τους δείκτες: -Αριθμούς ή συντελεστές τριβής DFT -Τριβή αιχμής -Σχετική μέγιστη ταχύτητα ολίσθησης -Διεθνής δείκτης τριβής (International Friction Index-IFI), που χαρακτηρίζεται από το F(60) και το SP Η συσκευή αυτή παρουσιάζει επίσης τη γραφική παράσταση του συντελεστή τριβής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής</p>	<p>2. Dynamic Friction Tester (DFT)</p> 
<p>Μέτρηση στο εργαστήριο</p>		<p>CEN - EN 12697-49</p>	<p>Η συσκευή Wehner-Schulze πραγματοποιεί δοκιμή στίλβωσης και μέτρηση της αντίστασης σε ολίσθηση. Από τις μετρήσεις παρέχει το συντελεστή τριβής <math>\mu_{pws}</math>.</p>	<p>Wehner-Schulze</p> 

## **3. Ανάλυση ολισθηρότητας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

### **3.1 Συγκριτικά στοιχεία ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

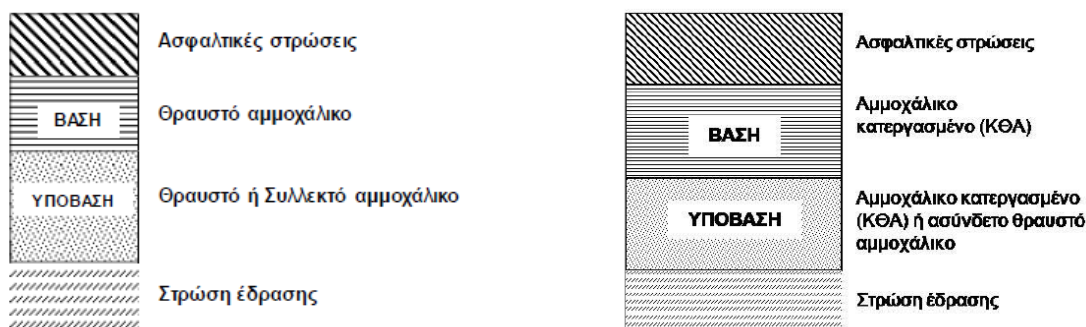
#### **3.1.1 Δομικά χαρακτηριστικά ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

Τα οδοστρώματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα ασφατικά και τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Οι δύο κατηγορίες οδοστρωμάτων παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά καθώς έχουν διαφορετική δομή και διαφορετικά υλικά κατασκευής. Για το λόγο αυτό κάθε κατηγορία οδοστρώματος χρησιμοποιείται σε έργα με διαφορετικές απαιτήσεις.

Τα ασφατικά οδοστρώματα διακρίνονται σε εύκαμπτα και ημι-εύκαμπτα/ημι-άκαμπτα οδοστρώματα και αποτελούνται από τις εξής στρώσεις (Εικόνα 3.1) (Λοΐζος & Πλατή, 2021):

- Την ασφατική επίστρωση, που κατασκευάζεται από στρώσεις ασφατομίγματος, οι οποίες εν γένει διακρίνονται στην ανώτερη στρώση που ονομάζεται επιφανειακή στρώση, στην (ενδιάμεση) συνδετική στρώση και στην (υποκείμενη) στρώση ασφατικής βάσης
- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης στα εύκαμπτα και από αμμοχάλικο κατεργασμένο συνήθως με υδραυλικές κονίες στα ημι-εύκαμπτα
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό ή φυσικό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης ή από κατεργασμένο αμμοχάλικο στα ημι-εύκαμπτα οδοστρώματα
- Τη στρώση έδρασης





**Εικόνα 3.1: Εύκαμπτο οδόστρωμα (αριστερά) και ημι-εύκαμπτο οδόστρωμα (δεξιά) (Λοϊζος & Πλατή, 2021)**

Στην Ελλάδα τα ασφαλτικά οδοστρώματα επικρατούν στα περισσότερα έργα οδοποιίας.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από τις εξής στρώσεις (Εικόνα 3.2) (Λοϊζος & Πλατή, 2021):

- Τη στρώση σκυροδέματος (είναι ουσιαστικά μία πλάκα σκυροδέματος), η οποία αντιπροσωπεύει την επίστρωση και τη στρώση βάσης
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή συνθιθέστερα κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο
- Τη στρώση έδρασης



**Εικόνα 3.2: Δύσκαμπτο οδόστρωμα (Λοϊζος & Πλατή, 2021)**

Στην Ελλάδα τα δύσκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε δάπεδα διοδίων και χώρων στάθμευσης.

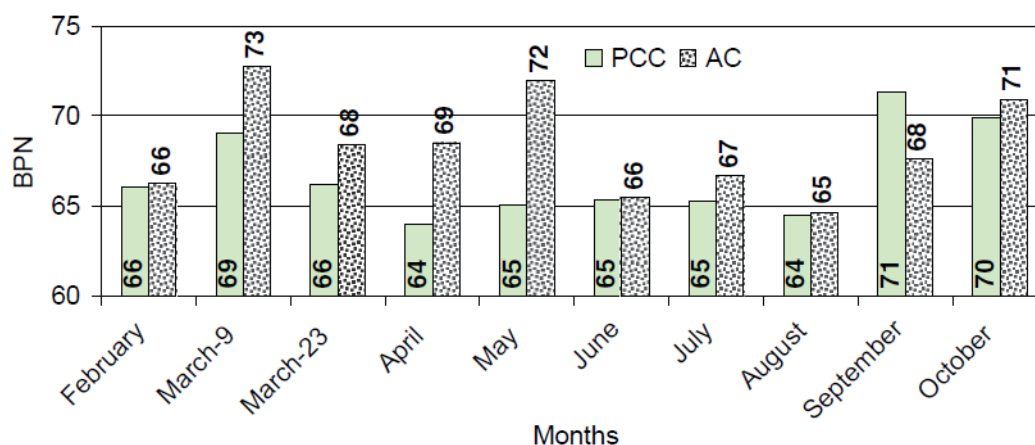
### 3.1.2 Σύγκριση αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, η αντίσταση σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, τις κυκλοφοριακές συνθήκες, τις λειτουργικές παραμέτρους του οχήματος, τις ιδιότητες του ελαστικού και τα

χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Ωστόσο, η ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων επηρεάζεται και από τον τύπο της επιφανειακής υφής. Μερικοί ενδεικτικοί τύποι δημιουργίας επιφανειακής υφής δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το σύρσιμο με Astroturf (Astroturf dragged), το σύρσιμο με λινάτσα (burlap dragged), και τα εκτεθειμένα αδρανή (exposed aggregate).

Με βάση έρευνα που διεξάχθηκε από τους (Ahammed & Tighe, 2009), παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για τις πρώιμες, μακροπρόθεσμες και εποχιακές μεταβολές της αντίστασης σε ολίσθηση των ασφαλτικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της έρευνας η εποχιακή διακύμανση της επιφανειακής τριβής του οδοστρώματος μετρήθηκε μηνιαία για εννέα συνεχόμενους μήνες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3, σε έξι δύσκαμπτα οδοστρώματα τύπου Portland Cement Concrete (PCC) και πέντε ασφαλτικά οδοστρώματα (Asphalt Concrete - AC). Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ήταν το Βρετανικό εκκρεμές (British Pendulum Tester) και το Skid Trailer κατά (ASTM E274, 2011).

Διαπιστώθηκε ότι βραχυπρόθεσμα η εποχιακή διακύμανση της αντίστασης σε ολίσθηση των επιφανειών, τόσο των ασφαλτικών οδοστρωμάτων όσο και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι σχεδόν ίδια. Η διαφορά μεταξύ της χαμηλότερης και της υψηλότερης τριβής υγρής επιφάνειας βρέθηκε να είναι 8 BPN (British Pendulum Number), τόσο για τις επιφάνειες ασφαλτικών οδοστρωμάτων, όσο και για τις επιφάνειες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3 (Ahammed & Tighe, 2009).



Εικόνα 3.3: Μηνιαία μεταβολή της επιφανειακής τριβής των οδοστρωμάτων (Ahammed & Tighe, 2009)

Η τριβή της επιφάνειας του οδοστρώματος αυξάνεται συνήθως σε νεαρή ηλικία, έως ότου τα υπολείμματα κατασκευής και τα χαλαρά υλικά στην επιφάνεια απομακρυνθούν από την κίνηση των οχημάτων και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως η βροχή. Στην έρευνα διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη αντίσταση σε ολίσθηση επιτεύχθηκε σε περίπου 30 μήνες, κατά μέσο όρο, για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα και σε 18 μήνες για τα ασφαλικά οδοστρώματα. Ένα ακόμα συμπέρασμα ήταν ότι η επιφανειακή τριβή των ασφαλικών οδοστρωμάτων (AC) μειώνεται με υψηλότερο ρυθμό από εκείνη των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (PCC) και η απώλεια εμφανίζεται, κυρίως, για περίπου 8 έτη μετά την αύξηση της τριβής στην αρχή της ζωής.

Τέλος, η έρευνα κατέληξε στη διαπίστωση ότι μακροπρόθεσμα η επιφανειακή τριβή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι λιγότερο ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συνθήκες συγκριτικά με αυτή των ασφαλικών οδοστρωμάτων (Ahammed & Tighe, 2009). Επομένως, από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, παρόλο που η μέγιστη αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων απαιτεί περισσότερο χρόνο να αναπτυχθεί, διαρκεί για περισσότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με την τριβή των ασφαλικών οδοστρωμάτων.

Μια άλλη έρευνα που διεξήχθη σχετικά με την επίδραση των ρύπων στην αντίσταση σε ολίσθηση των επιφανειών των ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων πραγματοποιήθηκε από τους (Lubis, et al., 2018). Οι ρύποι που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή είναι νερό, άμμος, αλάτι και λυπαντικό λάδι. Κατά την έρευνα μετρήθηκε η τιμή της ολισθηρότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος πριν και μετά την έκθεση σε ρύπους. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πέντε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της τιμής της αντίστασης σε ολίσθηση των εξεταζόμενων επιφανειών οδοστρώματος πριν από την έκθεση σε ρύπους και πέντε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μετά την έκθεση των επιφανειών. Με βάση τον πίνακα 3.1, η ελάχιστη τιμή αντίστασης σε ολίσθηση για τον τύπο ασφαλικού οδοστρώματος κατηγορίας C είναι 45 και για τον τύπο δύσκαμπτου οδοστρώματος κατηγορίας B είναι 55.

**Πίνακας 3.1: Προτεινόμενες ελάχιστες τιμές αντίστασης σε ολίσθηση (BPN) (Road Research Laboratory, 1969)**

Category	Type Location	Skid resistance value
A	Difficult locations such as: 1. Roundabout 2. Finger turns <150 m on the highway. 3. Tilt, 1:20 or more steep, with length > 100 m 4. Signal intersection of the intersection on the highway.	65
B	Main/fast, continuous roads and 1st class roads and heavy traffic roads in urban areas (> 2000 vehicles per day)	55
C	Other locations	45

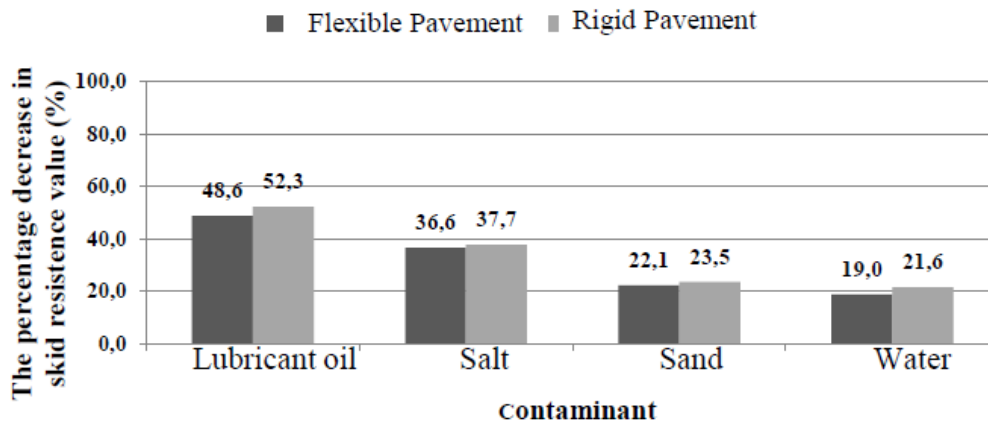
Οι τιμές της αντίστασης σε ολίσθηση πριν και μετά την έκθεση στους ρύπους διαμορφώθηκαν όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι τιμές πριν την έκθεση στους ρύπους είναι επαρκείς, ενώ μετά την έκθεση είναι ανεπαρκείς (Lubis, et al., 2018).

**Πίνακας 3.2: Ο μέσος όρος της τιμής αντίστασης σε ολίσθηση (BPN) πριν και μετά την έκθεση σε ρύπους**

Τύπος ρύπου	Μέσος όρος τιμής αντίστασης σε ολίσθηση (BPN)			
	Εύκαμπτο οδόστρωμα		Δύσκαμπτο οδόστρωμα	
	Πριν	Μετά	Πριν	Μετά
Νερό	51,76	41,92	59,92	46,96
Άμμος	52,60	40,96	67,76	51,84
Αλάτι	56,84	36,04	59,24	36,92
Λιπαντικό λάδι	54,60	28,04	60,00	28,64
Μέσος όρος	53,95		61,73	

Η κατάταξη των ρύπων από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση ήταν νερό, άμμος, αλάτι, λιπαντικό λάδι.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.4 η μειωτική επίδραση των ρύπων στην αντίσταση σε ολίσθηση των επιφανειών, τόσο των ασφαλτικών οδοστρωμάτων όσο και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι παρόμοια. Ωστόσο, είναι φανερό ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα επηρεάζονται περισσότερο από όλους τους τύπους ρύπων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα.



Εικόνα 3.4: Μέσο ποσοστό μείωσης της τιμής της αντίστασης σε ολίσθηση λόγω ρύπων (Lubis, et al., 2018)

Τέλος, μια άλλη παράμετρος σχετικά με τη σύγκριση της αντίστασης σε ολίσθηση μεταξύ των ασφαλικών και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι ο τύπος της κάθε κατηγορίας οδοστρωμάτων βάσει των οποίων γίνεται η σύγκριση κάθε φορά. Συγκεκριμένα, σε έρευνα που διεξήχθη από τους (Fang, et al., 2020) σχετικά με την ολισθηρότητα σε σήραγγες διαπιστώθηκε ότι, αναλόγως τον τύπο του ασφαλικού ή του δύσκαμπτου οδοστρώματος, διαφοροποιείται η υπεροχή μίας από τις δύο κατηγορίες οδοστρωμάτων ως προς την αντιολισθητική ικανότητα. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση σε ολίσθηση της ασφαλικής επιφάνειας ήταν σημαντικά υψηλότερη από αυτή του συνηθισμένου οδοστρώματος από τσιμεντοσκυρόδεμα. Ωστόσο, όταν χρησιμοποιήθηκαν δύσκαμπτα οδοστρώματα από τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα (PCC) και σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Exposed Aggregate Cement Concrete Pavement- EACCP) η αντιολισθητική ικανότητά τους βελτιώθηκε αισθητά (Fang, et al., 2020).

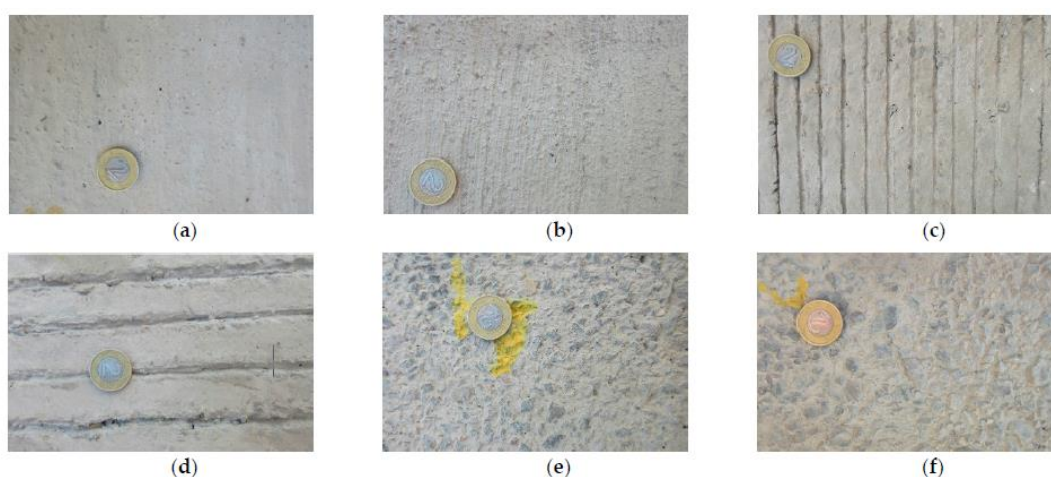
## 3.2 Αντίσταση σε ολίσθηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

### 3.2.1 Επιρροή μεθόδου δημιουργίας επιφανειακής υφής

Η αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη μέθοδο που έχει χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία της επιφανειακής υφής. Συγκεκριμένα, οι μέθοδοι δημιουργίας υφής στην επιφάνεια των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων καθορίζουν τη μακρο-υφή της επιφάνειας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η οποία αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την ύπαρξη

επαρκούς τριβής στην επιφάνεια (Jalalkamali, et al., 2021). Κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, τα φορτία της κυκλοφορίας λειαινούν τη μικρο-υφή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Επομένως, πρέπει να δημιουργηθεί επαρκής μακρο-υφή στην επιφάνεια του οδοστρώματος, ώστε να παρέχεται ικανοποιητική τριβή σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Διάφοροι παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, ο τύπος και η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, οι καιρικές συνθήκες, ο θόρυβος που προκαλείται από την επιφάνεια του οδοστρώματος και η απαιτούμενη τριβή, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της μεθόδου διαμόρφωσης της μακρο-υφής (Hall, et al., 2009). Για τον λόγο αυτό πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για τη διερεύνηση της ολισθηρότητας των επιφανειών, στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί οι παραπάνω μέθοδοι, καθώς και τη συγκριτική ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της καθεμίας.

Μία συγκριτική έρευνα για την αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με διαφορετικές τεχνικές δημιουργίας επιφανειακής υφής διεξήχθη από τους (Gierasimiuk, et al., 2021). Προσομοιάζοντας φαινόμενα που συμβαίνουν στις πραγματικές οδικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε πέντε διαφορετικές μεθόδους υφής δύσκαμπτων οδοστρωμάτων: «σύρσιμο λινάτσας» (Burlap Drag - BuD), «σύρσιμο βούρτσας (Brush Drag - BrD)», εγκάρσιο φρεζάρισμα (Transverse Tined - TT), κατά μήκος φρεζάρισμα (Longitudinal Tined - LT) και σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Exposed Aggregate Concrete - EAC) (Εικόνα 3.5).



**Εικόνα 3.5: Επιφανειακές υφές πλακών (a) BuD, (b) BrD, (c) TT, (d) LT, (e) EAC8, (f) EAC11 (Gierasimiuk, et al., 2021)**

Στην περίπτωση του EAC χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αδρανών, οι οποίοι διέφεραν ως προς το μέγιστο μέγεθος κόκκων, δηλαδή ο πρώτος τύπος ήταν 0/8 mm (EAC8)



και ο δεύτερος 0/11 mm (EAC11). Τα υπόλοιπα δείγματα δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με υφή διαμορφωμένη από τις μεθόδους BuD, BrD, TT και LT κατασκευάστηκαν με αδρανή 0/16 mm. Οι μεταβολές στην αντίσταση σε ολίσθηση καταγράφηκαν από μετρήσεις με Βρετανικό εκκρεμές και κυκλικό μετρητή υφής (Circular Texture Meter - CTM) πριν και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης της απότριψης (abrasion) (1<sup>η</sup> φάση της δοκιμής) και της στίλβωσης (2<sup>η</sup> φάση της δοκιμής) των δοκιμών με χρήση πλάκας στίλβωσης.

Με βάση τη βιβλιογραφία έχει διαπιστωθεί ότι τα οδοστρώματα στα οποία εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι «σύρσιμο λινάτσας» και «σύρσιμο βούρτσας» χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή στη φθορά, η οποία προκαλείται από τους τροχούς των οχημάτων. Το εγκάρσιο και κατά μήκος φρεζάρισμα των οδοστρωμάτων παρέχουν βαθύτερες ανωμαλίες και μεγαλύτερη αντοχή από εκείνες που επιτυγχάνονται με δημιουργία υφής από βούρτσα ή ύφασμα. Οι πιο πλεονεκτικές τεχνικές δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, τόσο σε περιπτώσεις ανακατασκευής όσο και νέων κατασκευών, θεωρούνται το σκυροδέμα με εκτεθειμένα αδρανή (EAC), οι μέθοδοι λείανσης (grinding) και αυλάκωσης (grooving) καθώς και η επιφάνεια σκυροδέματος νέας γενιάς (NGCS) (Gierasimiuk, et al., 2021).

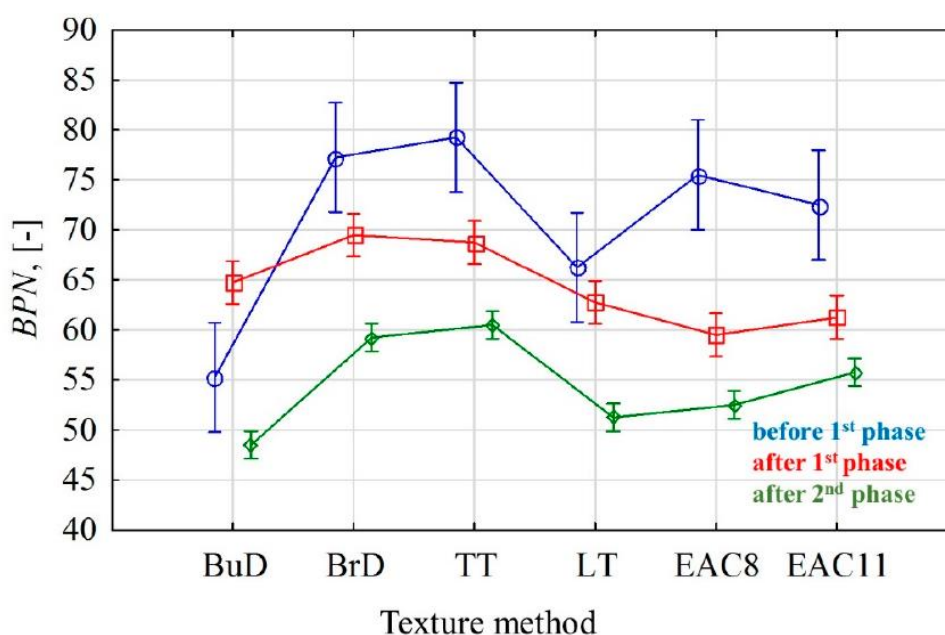
Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας, οι πλάκες σκυροδέματος υποβλήθηκαν σε απότριψη και στίλβωση σε εργαστηριακές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια προσομοίωση των φαινομένων που συμβαίνουν σε πραγματικές συνθήκες στις επιφάνειες των οδοστρωμάτων υπό την επίδραση ρύπων, νερού και κυκλοφοριακού φόρτου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο στίλβωνας πλακών (slab polisher), ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Στίλβωνας πλακών (Gierasimiuk, et al., 2021)

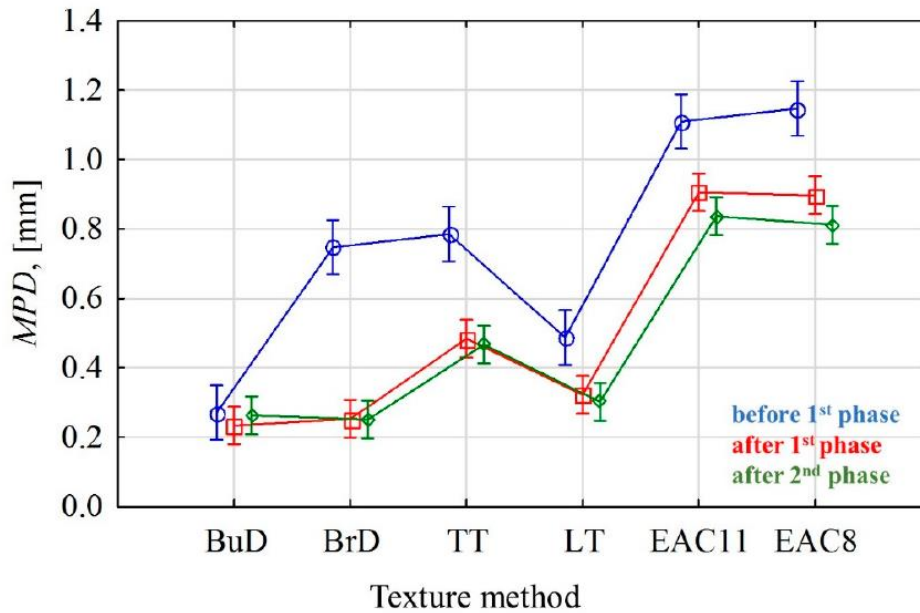
Η αντίσταση σε ολίσθηση των δοκιμών προσδιορίστηκε βάσει των μετρήσεων του αριθμού του Βρετανικού εκκρεμούς BPN (British Pendulum Number) σύμφωνα με το πρότυπο (ASTM E303-93, 2018). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα ίχνη που άφησαν οι τροχοί στίλβωσης στις επιφάνειες των δοκιμών πριν και μετά τις επιμέρους φάσεις. Αντίστοιχα, η αξιολόγηση της μακρο-υφής των πλακών σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με τη μέτρηση του δείκτη MPD (Mean Profile Depth) με τον κυκλικό μετρητή υφής (circular texture meter) σύμφωνα με το πρότυπο (ASTM E2157-15, 2019) (Gierasimiuk, et al., 2021).

Η εφαρμογή μιας εργαστηριακής συσκευής, η οποία προσομοιώνει τα φαινόμενα που συμβαίνουν στην οδό (απότριψη, στίλβωση), επέτρεψε στους ερευνητές να προσδιορίσουν τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των παραμέτρων BPN (Εικόνα 3.7) και MPD (Εικόνα 3.8) για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με διαφορετικές τεχνικές δημιουργίας υφής. Όσον αφορά τους δείκτες BPN και MPD τα δυσμενέστερα αποτελέσματα προέκυψαν για τις επιφάνειες από «σύρσιμο λινάτσας» (BuD) και κατά μήκος φρεζάρισμα (LT). Τα οδοστρώματα με τις προαναφερθέντες τεχνικές επιφανειακής υφής χαρακτηρίστηκαν από τις χαμηλότερες τιμές BPN και μια ανεπαρκώς ανεπτυγμένη μακρο-υφή. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές επιφανειακής υφής «σύρσιμο βούρτσας» (BrD) και εγκάρσιο φρεζάρισμα (TT) παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές BPN στην αρχική φάση και μετά το τέλος της διαδικασίας στίλβωσης. Ωστόσο, για τις τεχνικές αυτές ελήφθησαν πολύ χαμηλές τιμές μακρο-υφής.



Εικόνα 3.7: Μέσες τιμές BPN με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Gierasimiuk, et al., 2021)





Εικόνα 3.8: Μέσες τιμές MPD με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (Gierasimiuk, et al., 2021)

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι οι πιο ανθεκτικές επιφάνειες σε συνθήκες προσομοίωσης των φαινομένων απότριψης και στίλβωσης είναι οι επιφάνειες από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (EAC). Η ανάλυση μεταβολών των τιμών BPN και MPD των επιφανειών, που έχουν υποστεί υφή με διάφορες τεχνικές, σε συγκεκριμένα στάδια των δοκιμών απέδειξε ότι οι τεχνικές EAC8 και EAC11 είναι πολύ καλές τεχνολογίες για την κατασκευή της στρώσης κυκλοφορίας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που προορίζονται για δρόμους υψηλής ταχύτητας (άνω των 90 km/h). Χαρακτηρίζονται από τις υψηλότερες τιμές MPD σε σύγκριση με άλλες δοκιμασμένες επιφάνειες, ελαφρώς χαμηλότερες τιμές BPN συγκριτικά με τις επιφάνειες από BrD και TT, αλλά υψηλότερες τιμές BPN σε σύγκριση με επιφάνειες από BuD και LT. Λόγω των εκτεθειμένων χονδρόκοκκων αδρανών, η αντοχή του μείγματος των υπόψη αδρανών σε στίλβωση σχετίζεται με την αντίσταση στίλβωσης του πετρώματος, για αυτό παρατηρήθηκαν πολύ μικρές αλλαγές του συντελεστή τριβής κατά τη δοκιμή στίλβωσης.

Επίσης, λόγω των χαμηλών τιμών MPD που παρατηρήθηκαν μετά την ολοκλήρωση της μελέτης, οι στρώσεις κυκλοφορίας από «σύρσιμο λινάτσας» (BrD), «σύρσιμο βούρτσας» (BuD), κατά μήκος φρεζάρισμα (LT) και εγκάρσιο φρεζάρισμα (TT) συνιστώνται μόνο για επαρχιακούς δρόμους χαμηλής ταχύτητας. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι εμφανίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των δεικτών BPN και MPD ανάλογα με τη μέθοδο δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Για

αυτό η μέθοδος δημιουργίας επιφανειακής υφής έχει σημαντική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (Gierasimiuk, et al., 2021).

Μια άλλη έρευνα για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της αντίστασης σε ολίσθηση, του μέσου βάθους υφής (Mean Texture Depth-MTD) και της αντίστασης σε απότριψη για διαφορετικές μακρο-υφές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων διεξήχθη από τους (Jalalkamali, et al., 2021). Στη συγκεκριμένη έρευνα συγκρίνονται οι παρακάτω τύποι συμβατικών επιφανειακών υφών σε δύσκαμπτα οδοστρώματα:

- Χωρίς υφή (No texture – NT)
- Υφή που δημιουργείται με «σύρσιμο τεχνητού χλοοτάπητα» (Turf dragging – TD)
- Υφή που δημιουργείται με αυλάκωση (Grooving – G)
- Υφή που δημιουργείται με «σύρσιμο πλαστικής βούρτσας» παράλληλα με τη διαδρομή της κυκλοφορίας (Parallel Brushing – ParB)
- Υφή που δημιουργείται με «σύρσιμο πλαστικής βούρτσας» κάθετα στη διαδρομή της κυκλοφορίας (Perpendicular Brushing – PerB)
- Υφή που δημιουργείται με «σύρσιμο λινάτσας» παράλληλα με τη διαδρομή της κυκλοφορίας (Burlap dragging – BD)

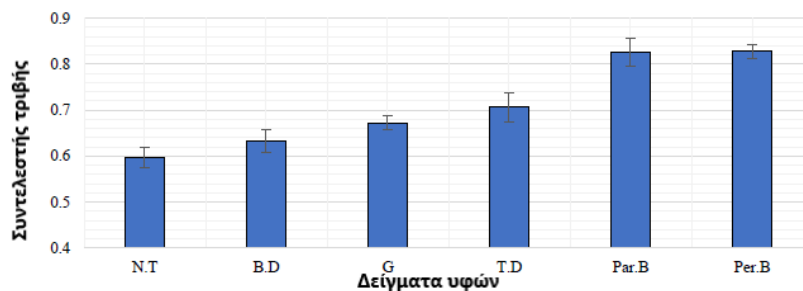
Αφού τα δοκίμια σκυροδέματος σκληρύνθηκαν για 28 ημέρες, προιόνιστηκαν σε κομμάτια για να ληφθούν 127 δείγματα. Στη συνέχεια, τα δοκίμια σκυροδέματος υποβλήθηκαν στις δοκιμές του Βρετανικού εκκρεμούς (British Pendulum), της κηλίδας της άμμου (Sand Patch) και σε απότριψη (Wide Wheel Abrasion) (Jalalkamali, et al., 2021).

Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε μια ειδική συσκευή απότριψης (Wide Wheel Abrasion Test) σύμφωνα με το πρότυπο (BS EN 1338, 2003), για να λειάνει τα δοκίμια σκυροδέματος διαφορετικών υφών. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του συντελεστή τριβής των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων το σύστημα δοκιμής τριβής, που φαίνεται στην Εικόνα 3.9 και κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Tarbiat Modares.



**Εικόνα 3.9:** Η συσκευή δοκιμής τριβής (αριστερά) και η χρησιμοποιούμενη συσκευή απότριψης (δεξιά) (Jalalkamali, et al., 2021)

Μετά την εκτέλεση των δοκιμών Βρετανικού εκκρεμούς, κηλίδας της άμμου, αντίστασης στην απότριψη και συντελεστή τριβής σε δοκίμια σκυροδέματος, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των BPN, MTD, αντίστασης στην απότριψη και συντελεστή τριβής (Εικόνα 3.10) για κάθε δοκίμιο οδοστρώματος διαφορετικής υφής. Όπως ήταν αναμενόμενο, στο οδόστρωμα στο οποίο δεν έχει δημιουργηθεί μακρο-υφή, παρουσιάζονται οι χαμηλότερες τιμές BPN, MTD και συντελεστή τριβής (Jalalkamali, et al., 2021).



**Εικόνα 3.10:** Σύγκριση των τιμών των συντελεστών τριβής για τις διάφορες υφές οδοστρώματος

Μελετώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι ερευνητές κατέληξαν σε συμπεράσματα για τη σχέση μεταξύ των δεικτών BPN και MTD, την αντίσταση σε απότριψη και τον συντελεστή τριβής που παρουσιάζονται σε κάθε μέθοδο δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Αρχικά, κατέληξαν ότι η μακρο-υφή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έχει σημαντική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση της υγρής επιφάνειας. Για αυτό πρέπει να επιτευχθεί η επιθυμητή

αντίσταση σε ολίσθηση χρησιμοποιώντας την κατάλληλη μέθοδο δημιουργίας μακρο-υφής.

Για τα οδοστρώματα χωρίς υφή διαπιστώθηκε ότι μια μικρή αύξηση στην τιμή του MTD οδηγεί σε σημαντική αύξηση του δείκτη BPN. Παρά την καλή αντίσταση σε απότριψη, τα εν λόγω οδοστρώματα δεν συνιστώνται για χρήση σε οδούς λόγω της χαμηλής αντίστασης σε ολίσθηση. Την υψηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση παρουσίασαν τα οδοστρώματα με υφή που δημιουργήθηκε με «βούρτσισμα» σε νωπό σκυρόδεμα παράλληλα και κάθετα προς την κατεύθυνση κυκλοφορίας. Οι ρηχές αυλακώσεις που εμφανίζονται στο σκυρόδεμα, με αυτές τις μεθόδους, οδηγούν σε μεγαλύτερη εμπλοκή του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος, με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης σε ολίσθηση.

Όσον αφορά το «σύρσιμο τεχνητού χλοοτάπητα» στο σκυρόδεμα δημιούργησε μια μακρο-υφή παρόμοια με την υφή του παράλληλου βουρτσίσματος, με τη διαφορά ότι το δείγμα στο οποίο έγινε «σύρσιμο με χλοοτάπητα» είχε μικρότερο μέσο βάθος υφής, χαμηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση και συνεπώς χαμηλότερο συντελεστή τριβής. Επομένως, η μακρο-υφή που δημιουργήθηκε με «σύρσιμο χλοοτάπητα» και βούρτσισμα κάθετα προς την κατεύθυνση κυκλοφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δρόμους μεσαίου όγκου κυκλοφορίας λόγω των υψηλών τιμών BPN και της κατάλληλης αντίστασης σε απότριψη.

Μια άλλη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η επιρροή των αυλακώσεων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Το συμπέρασμα ήταν ότι το βάθος αυλάκωσης στο σκληρυμένο σκυρόδεμα δεν είχε σημαντική επίδραση στην αντίσταση σε ολίσθηση του σκυροδέματος, αλλά οι βαθύτερες και ευρύτερες αυλακώσεις μπορούν να παρέχουν καλύτερη αποστράγγιση και να αποτρέψουν την εμφάνιση υδρολίσθησης κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης. Τέλος, το «σύρσιμο με λινάτσα» δεν αποτελεί καλή μέθοδο δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα λόγω της έλλειψης ομοιομορφίας στη διαμορφωμένη υφή. Αυτό συμβαίνει διότι κατά το «σύρσιμο με λινάτσα» στο νωπό σκυρόδεμα μετατοπίζονται ορισμένοι κόκκοι. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος έδειξε καλύτερη αντοχή σε απότριψη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατάλληλη μέθοδος, υπό την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται ορισμένες τροποποιήσεις στη διαδικασία επίτευξης μιας πιο ομοιόμορφης επιφάνειας (Jalalkamali, et al., 2021).

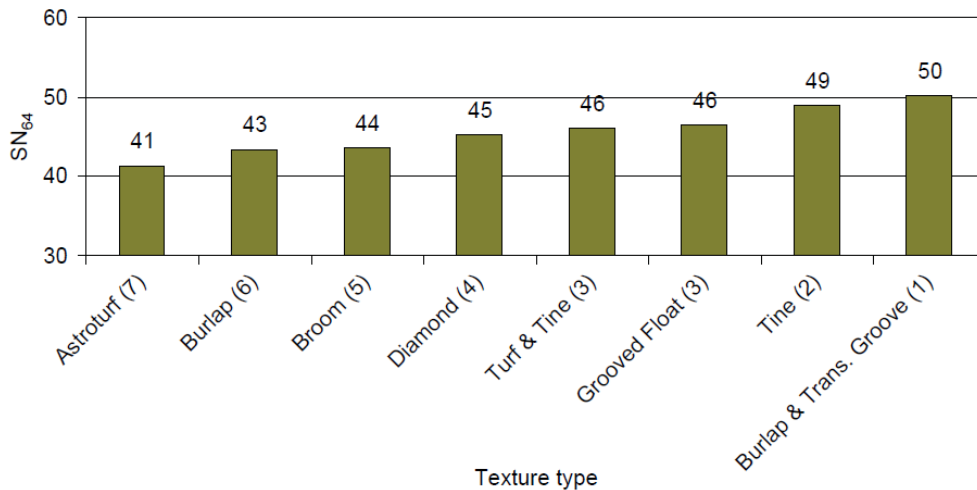
Η έρευνα που διεξήχθη από τους (Ahammed & Tighe, 2009), σχετικά με τις πρώιμες, μακροπρόθεσμες και εποχιακές μεταβολές της αντίστασης σε ολίσθηση των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, δίνει πληροφορίες για την επιρροή της

μεθόδου δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα (PCC). Οι επιφανειακές υφές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που εξετάστηκαν στην έρευνα είναι λεία επιφάνεια (smooth surface), επιφάνεια διαμορφωμένη από σύρσιμο λινάτσας (burlap), σκούπας (broom) και Astroturf, επιφάνεια από «diamond ground», φρεζάρισμα, «grooved float» και επιφάνεια διαμορφωμένη από το συνδυασμό εγκάρσιων αυλακώσεων και «σύρσιμου λινάτσας».

Για τη μακροπρόθεσμη απόδοση της τριβής ελήφθησαν δεδομένα πεδίου από τη βάση δεδομένων LTPP (Long-Term Pavement Performance) Release 21, ενσωματώνοντας όλες τις γεωγραφικές και κλιματικές περιοχές του Καναδά και των ΗΠΑ. Ο εξοπλισμός που επιλέχθηκε, για χρήση των μετρήσεων της αντίστασης σε ολίσθηση, είναι ο ακινητοποιημένος τροχός κατά (ASTM E274, 2011) Στην ανάλυση αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από 238 τμήματα οδοστρωμάτων PCC σε 38 πολιτείες και επαρχίες των ΗΠΑ και του Καναδά.

Στην έρευνα υπολογίστηκε ο μέσος όρος SN (Skid Number) πολλαπλών μετρήσεων σε κάθε τμήμα και χρησιμοποιήθηκε ως η διαθέσιμη επιφανειακή τριβή κάθε τμήματος σε κάθε επίπεδο ηλικίας. Υπολογίστηκε, επίσης, ο χρόνος (ηλικία) μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων τριβής και η αθροιστική ηλικία για κάθε τμήμα. Επιπλέον, για τις επιφάνειες PCC υπολογίστηκε η 28 ημερών μέση αντοχή σε θλίψη για κάθε τμήμα, με κατάλληλη διόρθωση για δοκιμή σε διαφορετικές ηλικίες (Ahammed & Tighe, 2009).

Τα επεξεργασμένα δεδομένα LTPP χωρίστηκαν σε δύο ομάδες: η πρώτη ομάδα αποτελούταν από αυξήσεις στην επιφανειακή τριβή κατά την πρώιμη ηλικία και η δεύτερη ομάδα αποτελούταν από μειώσεις της επιφανειακής τριβής μετά την αύξηση στην πρώιμη ηλικία. Αυτό επέτρεψε την ποσοτικοποίηση τόσο της πρώιμης ηλικίας όσο και των μακροπρόθεσμων μεταβολών της αντίστασης σε ολίσθηση. Για τον προσδιορισμό της συμβολής των διαφόρων μεθόδων δημιουργίας υφής στην αντίσταση σε ολίσθηση, επιλέχθηκε ο αριθμός ολίσθησης SN (Skid Number) σε μια ενιαία ταχύτητα 64 km/h -  $SN_{64}$ . Η διακύμανση του μέσου όρου  $SN_{64}$  και οι κατατάξεις των διαφόρων διαμορφώσεων επιφανειακής υφής παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.11. Διαπιστώθηκε, λοιπόν, ότι οι επιφάνειες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που διαμορφώθηκαν από το συνδυασμό εγκάρσιων αυλακώσεων και «σύρσιμου λινάτσας» παρουσίασαν την υψηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση ενώ οι επιφάνειες που διαμορφώθηκαν από «σύρσιμο με Astroturf» παρουσίασαν τη χαμηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση (Ahammed & Tighe, 2009).



Εικόνα 3.11: Μέση τιμή SN και κατάταξη των διαφορετικών μεθόδων δημιουργίας υφής για PCC οδοστρώματα (Ahammed & Tighe, 2009)

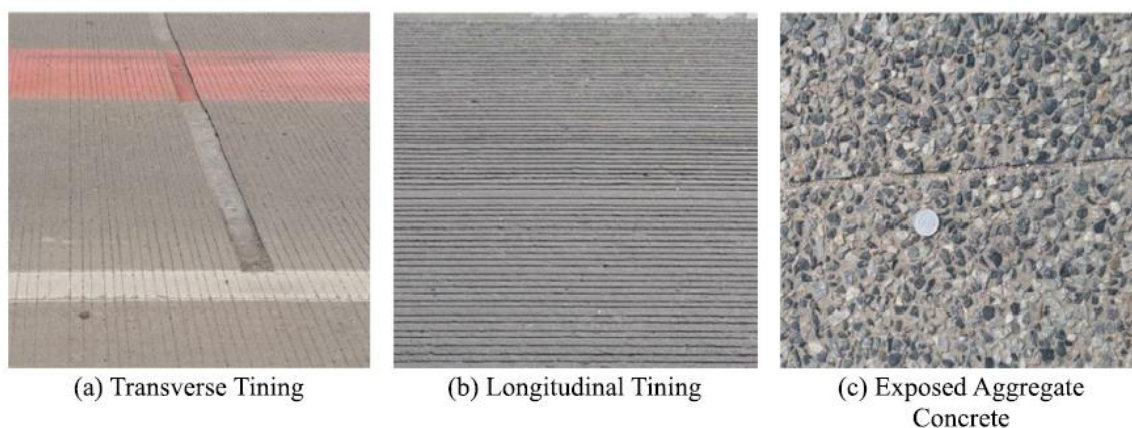
Επίσης, η ανάλυση της μακροπρόθεσμης τριβής των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η επιφανειακή τριβή μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Ahammed & Tighe, 2009).

### 3.2.2 Μακροπρόθεσμη αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρώματος από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή

Έρευνα που διεξάχθηκε από τους (Rith, et al., 2020) επικεντρώνεται ειδικά στα χαρακτηριστικά της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ολίσθηση των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Exposed Aggregate Concrete Pavement - EACP). Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν η αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ολίσθηση του EACP συγκριτικά με φρεζαρισμένες επιφάνειες (tining textures), η αξιολόγηση της επίδρασης της στίλβωσης των χονδρόκοκκων αδρανών και η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης που θα αποτελέσει εργαλείο για τον προσδιορισμό της κατάλληλης χρονικής στιγμής για την αποκατάσταση της επιφάνειας.

Το εγκάρσιο φρεζάρισμα βελτιώνει αποτελεσματικά την αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων καθώς συμβάλει στη γρήγορη απορροή των ομβρίων από τη λωρίδα κυκλοφορίας. Αυτή η τεχνική επιτυγχάνεται με εγκάρσιο «σύρσιμο συρμάτινης χτένας» στην επιφάνεια του νωπού σκυροδέματος. Αντίστοιχα, το κατά μήκος φρεζάρισμα σχηματίζεται με το «τράβηγμα της συρμάτινης χτένας» κατά μήκος της κατεύθυνσης κυκλοφορίας. Για τη διαμόρφωση υφής σκυροδέματος με εκτεθειμένα αδρανή απαιτείται η αφαίρεση του επιφανειακού κονιάματος ώστε να

αποκαλυφθούν τα αδρανή (Rith, et al., 2020). Οι επιφανειακές υφές κάθε μεθόδου δημιουργίας υφής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα φαίνεται στην Εικόνα 3.12.



**Εικόνα 3.12: Επιφάνεια δύσκαμπτου οδοστρώματος από (a) εγκάρσιο φρεζάρισμα, (b) κατά μήκος φρεζάρισμα και (c) σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Rith, et al., 2020)**

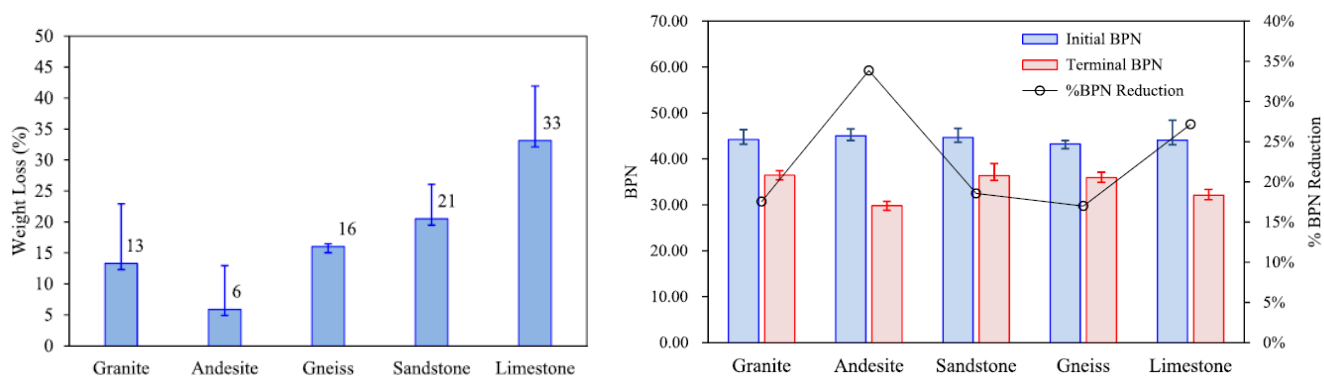
Για τη σύγκριση της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ολίσθηση του σκυροδέματος με εκτεθειμένα αδρανή με τις επιφανειακές υφές από εγκάρσιο και κατά μήκος φρεζάρισμα δημιουργήθηκαν 3 δοκίμια για κάθε υφή. Η αντίσταση σε ολίσθηση των διαφόρων επιφανειακών υφών αξιολογήθηκε μέσω προσομοίωσης σε εργαστηριακή δοκιμή. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στο θάλαμο επιταχυνόμενου τροχού (accelerated wheel tracking chamber), το οποίο προσομοιώνει την επίδραση της φθοράς στην επιφανειακή υφή υπό την επαναλαμβανόμενη κυκλοφοριακή φόρτιση.

Τα συμπεράσματα από τη δοκιμή ήταν ότι ο ρυθμός μείωσης της αντίστασης σε ολίσθηση του εγκάρσιου και κατά μήκος φρεζαρίσματος ήταν ταχύτερος από τον αντίστοιχο του σκυροδέματος με εκτεθειμένα αδρανή υπό τον κυκλοφοριακό φόρτο. Ως εκ τούτου, η διαμόρφωση υφής από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή όχι μόνο παρείχε επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση σε πρώιμη ηλικία αλλά διατήρησε τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα της επιφάνειας για παροχή επαρκούς τριβής στην επαφή ελαστικού-οδοστρώματος. Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί να παρατείνει το χρόνο αποκατάστασης της επιφάνειας και να μειώσει το κόστος του κύκλου ζωής (Rith, et al., 2020).

Η επίδραση της στίλβωσης του πετρώματος στην αντίσταση σε ολίσθηση διερευνήθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους χονδρόκοκκων αδρανών στο σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή. Συγκεκριμένα, για την αξιολόγηση επιλέχθηκαν γρανίτης, ανδεσίτης, ψαμμίτης, γνεύσιος και ασβεστόλιθος. Στα αδρανή



πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές τριβής Los Angeles και επιταχυνόμενης στίλβωσης (accelerated polishing). Η δοκιμή τριβής L.A. πραγματοποιήθηκε στα επιλεγμένα αδρανή για να επιβεβαιώσει την ποιότητά τους για την κατασκευή οδοστρώματος από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή. Αντίστοιχα, στην παρούσα, η επίδραση της στίλβωσης στην αντίσταση σε ολίσθηση αξιολογήθηκε με το ποσοστό μείωσης του BPN (%BPNreduction). Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής φαίνονται στην Εικόνα 3.13:



**Εικόνα 3.13: Ποσοστό απώλειας κάθε αδρανούς λόγω τριβής (αριστερά) και μείωση BPN των διαφόρων πετρωμάτων μετά από τη δοκιμή στίλβωσης (δεξιά) (Rith, et al., 2020)**

Η έρευνα κατέληξε ότι η επιλογή πετρώματος για τα εκτεθειμένα αδρανή σκυροδέματος ήταν σημαντική, δεδομένου ότι διάφορα πετρώματα παρέχουν διαφορετική αντίσταση στη στίλβωση, το οποίο μπορεί να έχει αντίκτυπο στη μακροπρόθεσμη αντίσταση σε ολίσθηση. Περαιτέρω, η έρευνα έδειξε ότι το σκληρό πέτρωμα με υψηλή αντίσταση σε τριβή είχε χαμηλή αντίσταση στίλβωσης υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Επομένως, η μελέτη συμπεραίνει ότι η δοκιμή τριβής L.A., για τη σκληρότητα των αδρανών, δεν μπορεί να καθορίσει την αντίσταση σε στίλβωση για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ολίσθηση του EACP. Ως εκ τούτου, η δοκιμή επιταχυνόμενης στίλβωσης θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην διαδικασία σχεδιασμού του μείγματος του οδοστρώματος από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (Rith, et al., 2020).

Τέλος, μέσω της συγκεκριμένης έρευνας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ολίσθηση των παλαιών (γερασμένων) EACP, το οποίο μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η προβλεπόμενη αντίσταση σε ολίσθηση συμφωνεί ικανοποιητικά με τη μετρούμενη τιμή, ωστόσο, για τη μελλοντική βελτίωση του μοντέλου απαιτούνται περιβαλλοντικά δεδομένα καθώς



και πρόσθετα δεδομένα πεδίου. Το μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση 3.3 (Rith, et al., 2020):

$$\log SN_{40,age} = \log SN_{40,i} - 0,07235e^{-1,081n} \times \log CTV, R^2 = 0,81 \quad (3.1)$$

Όπου  $SN_{40,age}$  είναι ο τελικός αριθμός ολίσθησης πριν την αποκατάσταση, το  $SN_{40,i}$  είναι ο αρχικός αριθμός ολίσθησης, CTV – Cumulative Traffic Volume είναι ο αθροιστικός κυκλοφοριακός όγκος και N είναι ο αριθμός των λωρίδων του οδοστρώματος.

### 3.2.3 Αντίσταση σε ολίσθηση οδοστρώματος από ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας με ασβεστολιθικά αδρανή

Η έρευνα που διεξήχθη από τους (Yoshitake, et al., 2016) μελετά την αντίσταση σε απότριψη και ολίσθηση των οδοστρωμάτων από ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας με ασβεστολιθικά αδρανή. Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα καθημερινό υποπροϊόν των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα. Το κονιοποιημένο υλικό μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες του τσιμεντοσκυροδέματος όταν χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό τσιμεντοειδές υλικό. Το ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα κατασκευάστηκε με την αντικατάσταση του 40% της μάζας του τσιμέντου με σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας. Τα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή από ασβεστολιθικά πετρώματα αναμιχθηκαν στο σκυρόδεμα με νερό ή τσιμεντοειδές υλικό σε αναλογία 0,33 για επαρκή πρώιμη αντοχή.

Στην έρευνα για τα σκυροδέματα με ιπτάμενη τέφρα πραγματοποιήθηκε δοκιμή raveling στις 91 ημέρες ή αργότερα, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αντίσταση σε απότριψη των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Στη συσκευή δοκιμής raveling (Εικόνα 3.14) που χρησιμοποιήθηκε είναι προσαρτημένες χαλύβδινες αλυσίδες οι οποίες προσομοιάζουν τις αλυσίδες χιονιού για ελαστικό.



Εικόνα 3.14: Συσκευή δοκιμής raveling (Yoshitake, et al., 2016)

Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης παρασκευάστηκαν πυριτικά αδρανή και χρησιμοποιήθηκαν σε συμβατική αναλογία μείγματος για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Τα συμπεράσματα από τη δοκιμή αυτή ήταν ότι η φθορά λόγω απότριψης του σκυροδέματος που παρασκευάζεται με ασβεστολιθικά αδρανή αυξήθηκε σταδιακά με την αύξηση του όγκου της ιπτάμενης τέφρας, ενώ η φθορά του σκυροδέματος με πυριτικά αδρανή ήταν σχετικά μικρή. Η αντίσταση σε απότριψη θα μπορούσε να βελτιωθεί με την αύξηση της ακαμψίας στη μήτρα του κονιάματος, ακόμη και σε σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή που ενσωματώνει ιπτάμενη τέφρα (Yoshitake, et al., 2016).

Για την ποσοτικοποίηση της αντίστασης σε ολίσθηση του σκυροδέματος που υποβάλλεται σε φθορά απότριψης, προσδιορίστηκε ο δείκτης BPN (British Pendulum Number) με τη χρήση του Βρετανικού εκκρεμούς. Η δοκιμή BPT (British Pendulum Tester) που ορίζεται από το (ASTM E303-93, 2018) είναι μια κοινή δοκιμή για την εξέταση της αντίστασης σε ολίσθηση του οδοστρώματος. Οι τιμές BPN σε ξηρές και υγρές συνθήκες εξετάστηκαν για κάθε δοκιμή, ωστόσο τα αποτελέσματα του δείκτη BPN για υγρές επιφάνειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διατήρηση επαρκούς αντίστασης σε ολίσθηση. Διαπιστώθηκε, λοιπόν, ότι η αντίσταση σε ολίσθηση του ανακυκλώσιμου σκυροδέματος ιπτάμενης τέφρας με ασβεστολιθικά αδρανή ήταν σχεδόν ίση με την αντίσταση του σκυροδέματος ελέγχου με πυριτικά αδρανή (Yoshitake, et al., 2016).

#### **3.2.4 Αντίσταση σε ολίσθηση διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος**

Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το υψηλό επίπεδο θορύβου, που προκαλείται λόγω της κυκλοφορίας, συγκριτικά με τα ασφαλικά οδοστρώματα. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε περιορισμό της χρήσης τους σε αστικές περιοχές. Το διαπερατό σκυρόδεμα (Εικόνα 3.15), ως εναλλακτικό υλικό οδοστρωσίας, αποκτά όλο και περισσότερες εφαρμογές λόγω της εξαιρετικής διαπερατότητας, της αντίστασης σε ολίσθηση και του μειωμένου θορύβου (Chen, et al., 2013). Ουσιαστικά, το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα με μεγάλο ποσοστό (15% έως 35%) κενών. Όπως το συμβατικό σκυρόδεμα, κατασκευάζεται από ένα μείγμα τσιμέντου, χονδρόκοκκων αδρανών και νερού, ωστόσο, περιέχει λίγη ή καθόλου άμμο, με αποτέλεσμα να έχει μια πορώδη δομή ανοικτών κυψελών από την οποία περνάει εύκολα το νερό.



**Εικόνα 3.15: Διαπερατό δύσκαμπτο οδόστρωμα**

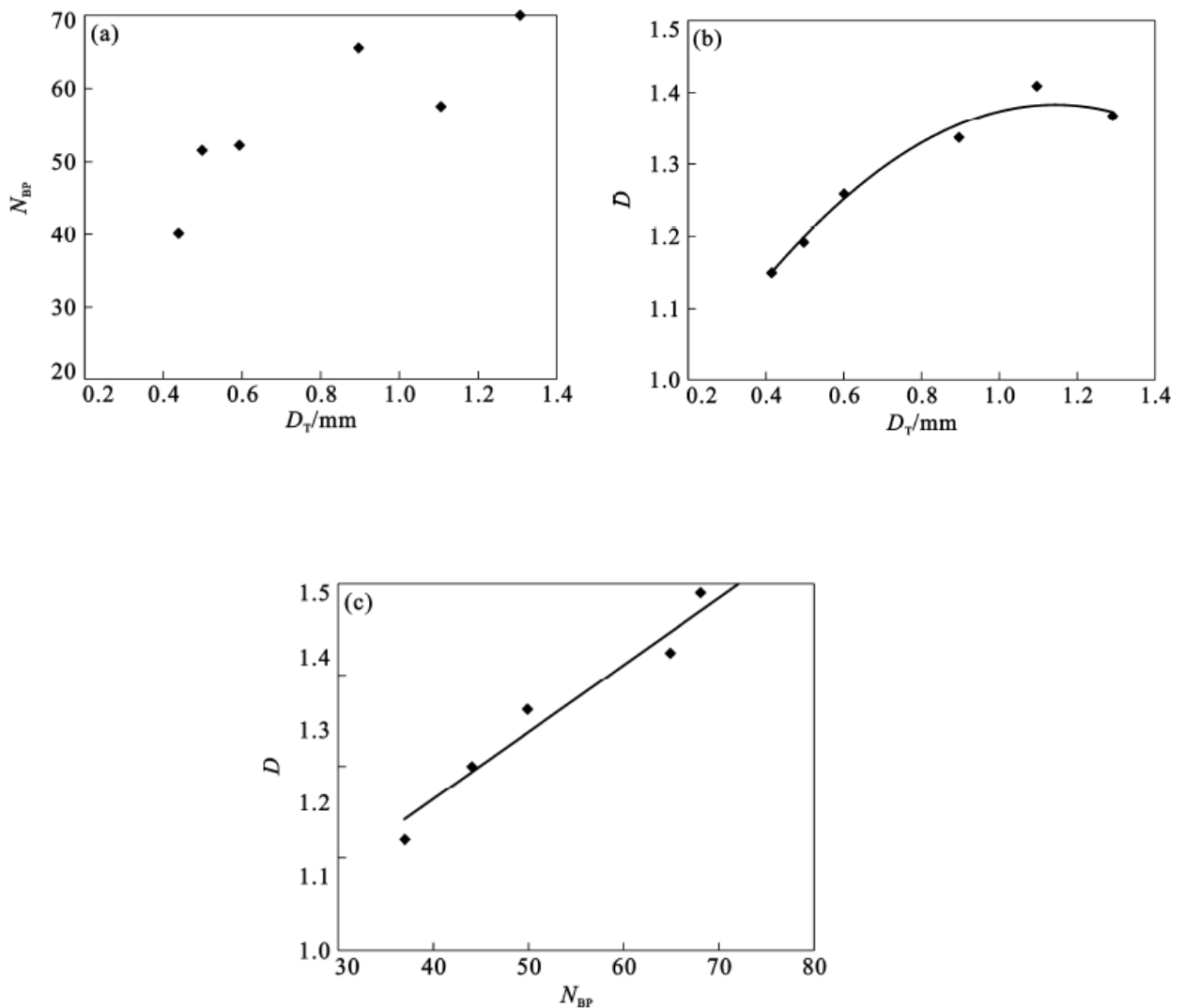
Η αντίσταση σε ολίσθηση των διαπερατών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σχετίζεται αναμφίβολα με τον τρόπο με τον οποίο έχει διαμορφωθεί η επιφανειακή υφή. Έχει αναγνωριστεί ότι η γεωμετρία fractal παρέχει στους ερευνητές ένα ισχυρό περιγραφικό εργαλείο για τα οδοστρώματα. Γενικά, η γεωμετρία fractal έχει χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό του σχήματος των αδρανών και για τον προσδιορισμό της επιφάνειας τους (Chen, et al., 2013).

Ένα fractal είναι ένα αντικείμενο ή μια ποσότητα που εμφανίζει ομοιομορφία σε όλες τις κλίμακες. Λόγω της σχεδόν συνεχούς ομοιομορφίας από τις μικρο- στις μακρο-κλίμακες, οι επιφανειακές υφές του διαπερατού σκυροδέματος μπορούν να θεωρηθούν ως fractal, το οποίο αποδίδεται στον τυχαίο σχηματισμό των δομών των πόρων και των εκτεθειμένων χονδρόκοκκων αδρανών. Επομένως, οι τυχαίες επιφανειακές υφές του διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος μπορούν να περιγραφούν από τη γεωμετρία fractal (Chen, et al., 2013).

Σε έρευνα που διεξήχθη από τους (Chen, et al., 2013), σχετικά με την αξιολόγηση των επιφανειακών υφών και της αντίστασης σε ολίσθηση των διαπερατών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, παρουσιάζεται η συσχέτιση της διάστασης fractal με την ολίσθησή της. Υψηλότερη διάσταση fractal σημαίνει πιο τραχιά και σκληρή επιφανειακή υφή οδοστρώματος, διαφορετικά η επιφάνεια του οδοστρώματος θεωρείται λεία.

Προκειμένου να διερευνηθεί η σκοπιμότητα και η σημασία της διάστασης fractal ως δείκτη μέτρησης της ολίσθησής στο διαπερατό δύσκαμπτο οδόστρωμα, διαφορετικές πρώτες ύλες και αναλογίες μείγματος επιλέχθηκαν για την παραγωγή δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος με διαφορετικές επιφανειακές υφές. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των δεικτών  $D$ ,  $D_T$  και BPN, το οποίο

στην Εικόνα 3.16 εκφράζεται ως  $N_{BP}$ . Ένα από τα συμπεράσματα είναι ότι το βάθος μακρο-υφής ( $D_T$ ) δείχνει απλώς τη συνολική ομαλότητα. Επίσης, επισημαίνεται ότι το βάθος μακρο-υφής ( $D_T$ ) μπορεί να διαφέρει ακόμη και στον ίδιο αριθμό BPN, γεγονός που εξηγεί ότι ο BPN αντανακλά τη μικρο-υφή περισσότερο από ό,τι τη μακρο-υφή. Η διάσταση fractal ( $D$ ) φαίνεται να αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος μακρο-υφής ( $D_T$ ) μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή. Από το σημείο αυτό και μετά το  $D$  σταθεροποιείται ή μειώνεται ελαφρώς. Επιπλέον, η διάσταση fractal ( $D$ ) αυξάνεται με την αύξηση του BPN, γεγονός που σημαίνει ότι το  $D$  αντανακλά τη μικρο-υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος από διαπερατό σκυρόδεμα. Επομένως, όλοι οι δείκτες,  $D$ ,  $D_T$  και BPN, περιγράφουν την επιφανειακή υφή του οδοστρώματος από διαπερατό σκυρόδεμα (Chen, et al., 2013).



Εικόνα 3.16: Σχέσεις μεταξύ των  $N_{BP}$ ,  $D$  και  $D_T$  στο διαπερατό δύσκαμπτο σκυρόδεμα (Chen, et al., 2013)

Σύμφωνα με τα παραπάνω για τη γεωμετρία fractal, η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η διάσταση fractal (D) είναι ένας δείκτης της πολυπλοκότητας του διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος. Ο δείκτης αυτός αποδείχθηκε ότι υποδεικνύει τη μακρο-υφή, τη μικρο-υφή και τις κατανομές τους στην επιφάνεια και ότι ξεπερνά τις αδυναμίες του βάθους μακρο-υφής και του αριθμού BPN (Chen, et al., 2013).

Για την αξιολόγηση των επιφανειακών υφών και την αντίσταση σε ολίσθηση του διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος συγκρίθηκαν δοκίμια οδοστρώματος από διαπερατό σκυρόδεμα, αυλακωτό σκυρόδεμα (grooved concrete) και σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή. Με βάση τη δοκιμή επιταχυνόμενης απότριψης (accelerated abrasion test) δόθηκε έμφαση στη διαδικασία απότριψης και την εξασθένηση των επιφανειακών υφών στα διάφορα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Οι δείκτες BPN και  $D_T$  για τις πλάκες αυλακωτού σκυροδέματος και σκυροδέματος με εκτεθειμένα αδρανή μετρήθηκαν μετά από κάθε 200 κύκλους απότριψης. Οι δείκτες BPN και  $D_T$  για τις πλάκες διαπερατού σκυροδέματος μετρήθηκαν μετά από κάθε 600 κύκλους απότριψης (Chen, et al., 2013).

Παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρξε αξιοσημείωτη και σταθερή κάθοδος ούτε του BPN ούτε και του  $D_T$  με τους συσσωρευμένους κύκλους απότριψης. Επιπλέον, επειδή το διαπερατό σκυρόδεμα, αντίθετα από το αυλακωτό σκυρόδεμα και το σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή, έχει πανομοιότυπα υλικά σύστασης και ομοιογενή δομή κατά μήκος του βάθους του, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απότριψης δεν παρουσίασε αδύναμη στρώση. Επομένως, με βάση τη δοκιμή επιταχυνόμενης απότριψης διαπιστώθηκε ότι το διαπερατό δύσκαμπτο οδοστρώμα είναι το πιο ανθεκτικό όσον αφορά την αντοχή σε απότριψη και τη θεωρητική διάρκεια ζωής της αντιολισθητικής επιφάνειας (Chen, et al., 2013).

### **3.2.5 Αντιολισθητική ικανότητα και επίπεδο θορύβου δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

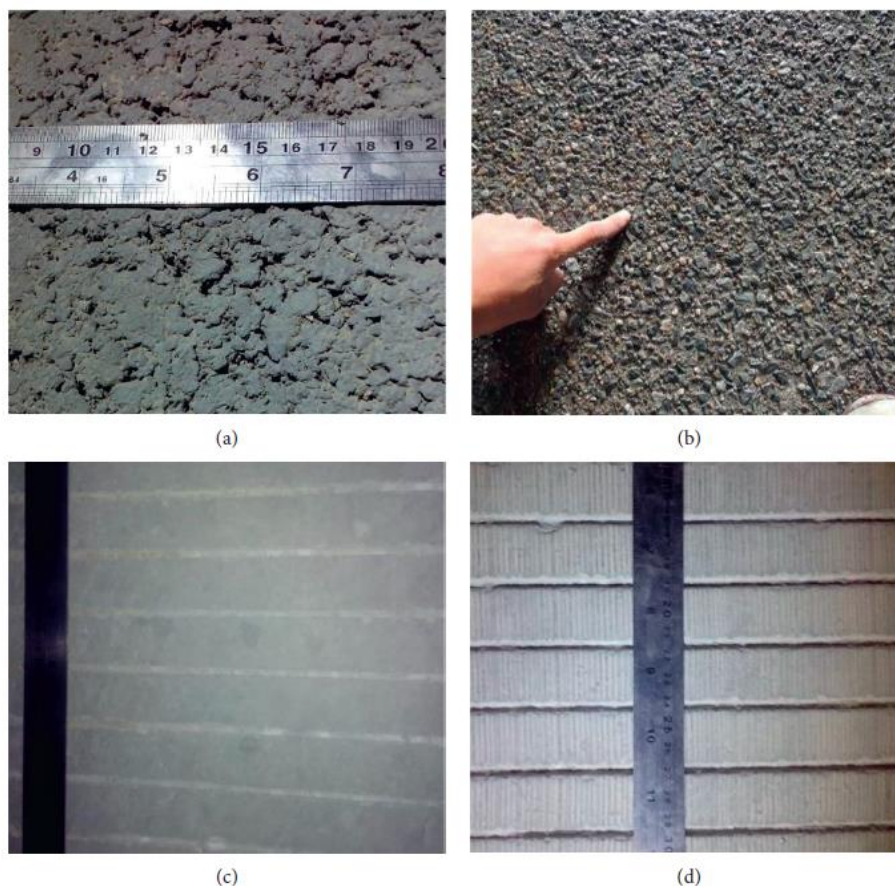
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το βασικό μειονέκτημα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι ο θόρυβος που προκαλείται κατά την κυκλοφορία. Το επίπεδο του θορύβου είναι ακόμα πιο σημαντική παράμετρος του οδοστρώματος εντός των σηράγγων. Αυτό γιατί ο θόρυβος του οδοστρώματος εκπέμπεται και επικαλύπτεται στη σήραγγα, με αποτέλεσμα να διαρκεί περισσότερο και να είναι πιο δύσκολο να εκτονωθεί. Οι (Fang, et al., 2020) πραγματοποίησαν ανάλυση της αντίστασης σε ολίσθηση και των χαρακτηριστικών θορύβου για διάφορα είδη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε σήραγγες.

Σύμφωνα με τη (Moretti, 2014) ενθαρρύνεται τα τελευταία χρόνια η αντικατάσταση των ασφαλικών οδοστρωμάτων από δύσκαμπτα οδοστρώματα λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι η εύκολη συντήρηση, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η ανθεκτικότητα (Moretti, 2014). Το οδόστρωμα από σκυρόδεμα είναι εντελώς μη εύφλεκτο και μη τοξικό σε περίπτωση ατυχήματος πυρκαγιάς σε σήραγγες (Puente, et al., 2016). Επιπλέον, σε σύγκριση με το ασφαλικό οδόστρωμα, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ανοιχτόχρωμης επιφάνειας του, η οποία απαιτεί λιγότερο φωτισμό (Cantisani, et al., 2018). Ωστόσο, λόγω του μοναδικού κλιματικού περιβάλλοντος μέσα στις σήραγγες και των χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος από τσιμεντοσκυρόδεμα, το δύσκαμπτο οδόστρωμα των σηράγγων παρουσιάζει πολλές αδυναμίες, από τις οποίες οι πιο σοβαρές είναι η αντίσταση σε ολίσθηση και ο θόρυβος.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα προκύπτει από την ευαισθησία του δύσκαμπτου οδοστρώματος στη ρύπανση και την ευαισθησία της επιφανειακής υφής στη φθορά. Οι ρύποι, όπως η ρύπανση από τα λάδια των οχημάτων και τα υπολείμματα ελαστικών που διαχέονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, μπορούν να μειώσουν την αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια χαμηλών θερμοκρασιών το χειμώνα το δύσκαμπτο οδόστρωμα είναι πιο πιθανό να παγώσει, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση σε ολίσθηση. Όσον αφορά την παράμετρο του θορύβου, λόγω του κλειστού περιβάλλοντος της σήραγγας είναι δύσκολο να διαχυθεί ο θόρυβος κατά την οδήγηση, γεγονός που επηρεάζει την άνεση οδήγησης. Ο θόρυβος που παράγεται κατά την επαφή ελαστικού-οδοστρώματος είναι μία από τις κύριες πηγές θορύβου του οχήματος (Fang, et al., 2020).

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους (Fang, et al., 2020) προτάθηκαν πρότυπα αντίστασης σε ολίσθηση και ταξινόμησης του θορύβου για δύσκαμπτα οδοστρώματα σηράγγων. Τα πρότυπα ελέγχου για την αντίσταση σε ολίσθηση και την ασφάλεια του θορύβου εξασφαλίζουν ότι τα οχήματα λειτουργούν «με ασφάλεια» και «αθόρυβα» στις σήραγγες. Για την ανάλυση της ολισθηρότητας και του επιπέδου θορύβου σε δύσκαμπτα οδοστρώματα συλλέχθηκαν δεδομένα από συνηθισμένα αυλακωτά δύσκαμπτα σκυροδέματα και νέους τύπους δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, όπως οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή και οδόστρωμα από τροποποιημένο με πολυμερή τσιμεντοσκυρόδεμα (Εικόνα 3.17). Για να εξασφαλιστεί η ποικιλομορφία των δεδομένων αντιολισθητικής ταξινόμησης δειγμάτων, η παρούσα έρευνα επέλεξε, επίσης, ασφαλικά οδοστρώματα,

συγκεκριμένα, πυκνό ασφαλτικό σκυρόδεμα (Asphalt Concrete - AC) και άσφαλτο με πέτρινη μήτρα (Stone Matrix Asphalt - SMA). Τα ασφαλτικά οδοστρώματα χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα σύγκρισης για την ολοκληρωμένη δοκιμή της τιμής της ολισθηρότητας και του επιπέδου θορύβου διαφορετικών τύπων υφής οδοστρωμάτων.



**Εικόνα 3.17: Τύποι υφής οδοστρωμάτων. (α) Οδόστρωμα με τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα, (β) οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή, (γ) αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα (χωρίς σύρσιμο), (δ) αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα (με σύρσιμο τεχνητού χλοοτάπητα) (Fang, et al., 2020)**

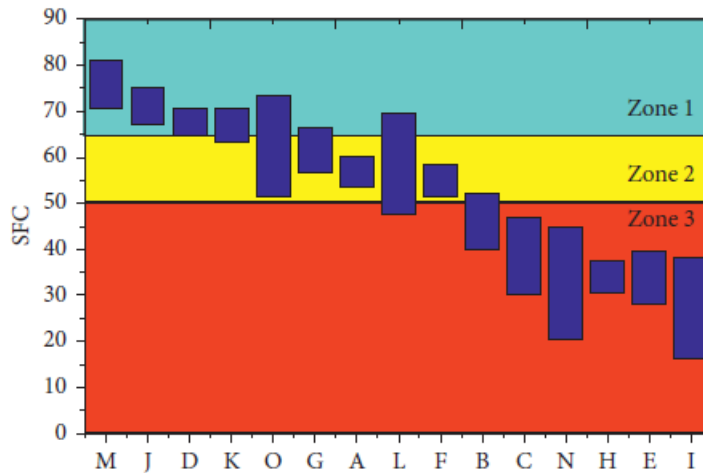
Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε σύστημα ανίχνευσης του συντελεστή τριβής του οδοστρώματος, κυρίως για τον προσδιορισμό του συντελεστή εγκάρσιας τριβής (Surface Friction Coefficient - SFC) του οδοστρώματος από σκυρόδεμα, ώστε να εκτιμηθεί η αντίσταση του σε ολίσθηση. Το σύστημα μέτρησης περιλάμβανε τα ακόλουθα όργανα και εξοπλισμό: test trailer, εξοπλισμό ψεκασμού, ηλεκτρικό κουτί ελέγχου και υποστηρικτικό λογισμικό υπολογιστή, ενώ η ταχύτητα δοκιμής ήταν 60 km/h. Υπό αυτές τις συνθήκες υπολογίστηκε με ακρίβεια το SFC του οδοστρώματος και συνεπώς εκτιμήθηκε η αντίσταση του σε ολίσθηση.

Ο θόρυβος του οδοστρώματος αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο έντασης ήχου επί του οχήματος OBSI (on-board sound intensity). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα τυποποιημένο ελαστικό δοκιμής κατά (ASTM E1136, 2019) για την αξιολόγηση του οδικού θορύβου. Πραγματοποιήθηκε μια στατιστική ανάλυση συστάδων για την εξαγωγή των πρωταρχικών χαρακτηριστικών των δεδομένων του δείγματος και τον καθορισμό δεικτών ομαδοποίησης μεταξύ διαφορετικών δεδομένων. Στόχος της ανάλυσης ήταν ο καθορισμός των προτύπων ταξινόμησης για τα επίπεδα ολίσθησης και θορύβου διαφορετικών οδοστρωμάτων σε σήραγγα. Η μέθοδος ανάλυσης συστάδων είναι μια μέθοδος πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης στην οποία τα ερευνητικά αντικείμενα ταξινομούνται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων δειγμάτων και τη «συγγένεια» των δεδομένων του δείγματος (Fang, et al., 2020).

Τα συμπεράσματα της ανάλυσης σχετικά με την αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε σήραγγες έδειξαν ότι η αντιολισθητική ικανότητα του φρεσκοστρωμένου δύσκαμπτου οδοστρώματος ήταν σχετικά ισχυρή και επηρεαζόταν σημαντικά από τη μικρο-υφή του τσιμεντοσκυροδέματος. Επίσης, στο οδόστρωμα που πραγματοποιήθηκε «σύρσιμο» η τιμή ολίσθησης ήταν σημαντικά υψηλότερη από εκείνη του λείου οδοστρώματος, συγκεκριμένα η τιμή παρουσίασε αύξηση έως 50%. Το παραδοσιακό αυλακωτό δύσκαμπτο σκυρόδεμα παρουσίασε χαμηλή αντίσταση σε ολίσθηση, ενώ οι νέοι τύποι τσιμεντοσκυροδέματος παρουσίασαν υψηλότερη αντίσταση.

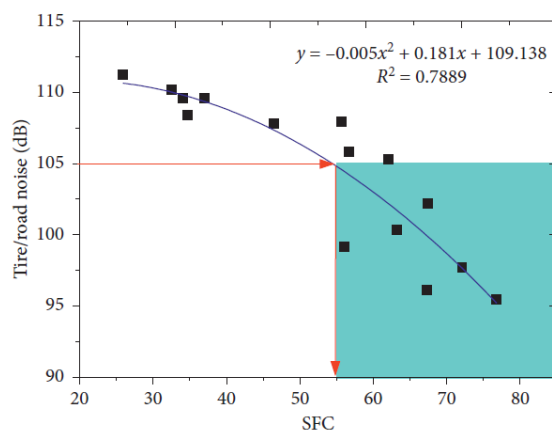
Η μέθοδος ανάλυσης συστάδων υιοθετήθηκε για να διαιρέσει την αντίσταση σε ολίσθηση και τον οδικό θόρυβο σε τρεις περιοχές. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την αντίσταση σε ολίσθηση τα οδικά τμήματα που αντιστοιχούν στις ζώνες 1 και 2 είναι ασφαλή για οδήγηση, ενώ αυτά που αντιστοιχούν στη ζώνη 3 είναι ανεπαρκή και αποτελούν ενδεχόμενο κίνδυνο για την ασφάλεια. Το πρόσφατα διαστρωμένο αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα (D), το οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή (J), το οδόστρωμα από τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα (K) και το ασφαλτικό σκυρόδεμα (M) κατατάσσονται στη ζώνη 1, με την καλύτερη αντίσταση σε ολίσθηση (Εικόνα 3.18).





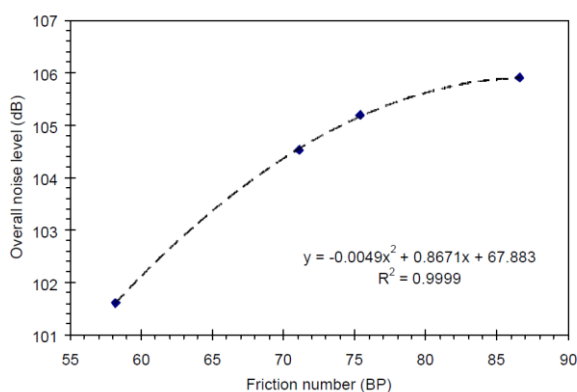
Εικόνα 3.18: Αποτελέσματα από την αντιολισθητική ζώνη του δύσκαμπτου σκυροδέματος (Fang, et al., 2020)

Αντίστοιχα, τα δείγματα δοκιμής θορύβου χωρίζονται σε 3 ζώνες με βάση το επίπεδο θορύβου τους. Στην ζώνη 1, με τη χαμηλότερη τιμή θορύβου, ανήκουν όλα τα ασφατικά οδοστρώματα, το οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή και το οδόστρωμα από τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα. Ενώ το παραδοσιακό αυλακωτό δύσκαμπτο σκυρόδεμα ανήκει στη ζώνη 2. Συνεπώς, το παραδοσιακό αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα παράγει έντονο θόρυβο, ενώ το οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή και το οδόστρωμα από τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα μείωσαν σημαντικά το θόρυβο μεταξύ του οδοστρώματος και των ελαστικών. Στη έρευνα μελετήθηκε, επίσης, η συσχέτιση μεταξύ του θορύβου του οδοστρώματος και της αντιολισθητικής ικανότητας. Διαπιστώθηκε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους και ειδικότερα υψηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος αντιστοιχεί σε χαμηλότερο επίπεδο θορύβου (Εικόνα 3.19). Αυτό συμβαίνει γιατί το οδόστρωμα με επαρκή αντίσταση σε ολίσθηση έχει μια επαρκώς διαμορφωμένη επιφανειακή υφή, η οποία δίνει τη δυνατότητα διαφυγής του πεπιεσμένου αέρα κατά την κυκλοφορία των οχημάτων, μειώνοντας τον θόρυβο που παράγεται κατά την επαφή ελαστικού – οδοστρώματος (Fang, et al., 2020).



**Εικόνα 3.19: Συσχέτιση αντίστασης σε ολίσθηση (SFC) και επιπέδου θορύβου (Fang, et al., 2020)**

Ωστόσο, μια άλλη έρευνα που διεξήχθη από τους (Olek, et al., 2004) συσχετίζει την τριβή της επιφάνειας του οδοστρώματος με το συνολικό επίπεδο θορύβου. Παρουσιάζεται μια σχέση που προκύπτει από διαφορετικές επιφανειακές υφές, η οποία συσχετίζει το συνολικό επίπεδο θορύβου που προκύπτει από δοκιμές σε συσκευή TPTA (Tire/Pavement Test Apparatus) με το συντελεστή τριβής που προκύπτουν από τη δοκιμή με το Βρετανικό εκκρεμές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20.



**Εικόνα 3.20: Συσχέτιση συνολικού επιπέδου θορύβου και αριθμού τριβής (Olek, et al., 2004)**

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα συνολικά επίπεδα θορύβου που λαμβάνονται για αυτά τα οδοστρώματα είναι μέσοι όροι συχνότητας, αυτό σημαίνει ότι λαμβάνονται υπόψη θόρυβοι όπως η άντληση αέρα και ο θόρυβος που παράγεται από το ελαστικό. Από τη σχέση φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται ο συντελεστής τριβής, το συνολικό επίπεδο θορύβου αυξάνεται επίσης. Στην αρχή ο ρυθμός αύξησης του

συνολικού επιπέδου θορύβου είναι μεγαλύτερος, ενώ στη συνέχεια φαίνεται να επιβραδύνεται και σχεδόν να σταθεροποιείται.

### 3.2.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων ερευνών

Με βάση τις παραπάνω έρευνες σχετικά με την αντιολισθητική ικανότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έχουν εξαχθεί συμπεράσματα τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις συμπίπτουν και σε άλλες όχι. Ειδικότερα, η έρευνα που διεξήχθη από τους (Gierasimiuk, et al., 2021) καταλήγει σε συμπεράσματα αναλύοντας τις τιμές των δεικτών BPN (British Pendulum Number) και MPD (Mean Profile Depth). Διαπιστώθηκε ότι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τη δημιουργία υφής όσον αφορά στην ανθεκτικότητα σε απότριψη και στίλβωση είναι το σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με δημιουργία υφής από «σύρσιμο βούρτσας» και εγκάρσιο φρεζάρισμα, ενώ τα δυσμενέστερα αποτελέσματα παρουσιάζουν οι μέθοδοι δημιουργίας υφής «σύρσιμο λινάτσας» και κατά μήκος φρεζάρισμα.

Στο συμπέρασμα ότι η δημιουργία επιφανειακής υφής από «σύρσιμο λινάτσας» σχετίζεται με τη χειρότερη αντίσταση σε ολίσθηση στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους που μελετώνται στην έρευνα, κατέληξαν και οι (Jalalkamali, et al., 2021). Στη συγκεκριμένη έρευνα, καλύτερη αντιολισθητική ικανότητα παρουσίασαν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με υφή που δημιουργήθηκε από «σύρσιμο πλαστικής βούρτσας» κάθετα και παράλληλα στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Επίσης, για οδούς μεσαίου όγκου κυκλοφορίας θεωρούνται κατάλληλες οι μέθοδοι δημιουργίας υφής «σύρσιμο με χλοοτάπητα» και «κάθετο βούρτσισμα».

Αντίθετα, η έρευνα που διεξήχθη από τους (Ahammed & Tighe, 2009) κατέληξε ότι καλύτερη ολισθηρότητα παρουσιάζουν οι επιφάνειες με υφή που δημιουργήθηκε από το συνδυασμό εγκάρσιων αυλακώσεων και «σύρσιμου λινάτσας». Στη συγκεκριμένη έρευνα, τη χειρότερη αντίσταση σε ολίσθηση είχαν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με δημιουργία υφής από «σύρσιμο με AstroTurf».

Μια ακόμα έρευνα που έδειξε την υπεροχή ως προς την αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή διεξήχθη από τους (Rith, et al., 2020). Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι το οδόστρωμα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή παρουσιάζει καλή αντίσταση σε ολίσθηση τόσο στην πρώιμη ηλικία όσο και μακροπρόθεσμα. Αντίθετα, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με δημιουργία υφής από εγκάρσιο και κατά μήκος φρεζάρισμα έχουν ταχύτερο ρυθμό μείωσης της αντίστασης σε ολίσθηση. Επίσης, η έρευνα κατέληξε ότι στα

οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή σημαντική επίδραση στην ολισθηρότητα διαδραματίζει το πέτρωμα από το οποίο προέρχονται τα αδρανή. Για αυτό σημαντικά είναι τα αποτελέσματα, τόσο της δοκιμής Los Angeles (L.A.) όσο και της δοκιμής επιταχυνόμενης στίλβωσης των αδρανών, για τη μακροπρόθεσμη αξιολόγηση της αντίστασης σε ολίσθηση.

Η έρευνα των (Yoshitake, et al., 2016) σχετικά με το οδόστρωμα από ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα ιπτάμενης τέφρας με ασβεστολιθικά αδρανή παρουσίασε ότι η φθορά λόγω απότριψης αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της ιπτάμενης τέφρας. Επιπλέον, κατέληξε ότι η αντίσταση σε ολίσθηση του οδοστρώματος από ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα είναι σχεδόν ίση με την αντίσταση σε ολίσθηση του σκυροδέματος ελέγχου με πυριτικά αδρανή, που χρησιμοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης στην έρευνα.

Οι (Chen, et al., 2013) ασχολήθηκαν με την ολισθηρότητα του οδοστρώματος από διαπερατό σκυρόδεμα. Στην έρευνα τους διαπίστωσαν ότι η γεωμετρία fractal αποτελεί περιγραφικό εργαλείο της επιφανειακής υφής του διαπερατού δύσκαμπτου οδοστρώματος. Αποδείχθηκε ότι ο παράγοντας fractal είναι ένας δείκτης που υποδεικνύει τη μακρο-υφή, τη μικρο-υφή και τις κατανομές τους στην επιφάνεια. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το διαπερατό δύσκαμπτο οδόστρωμα είναι το πιο ανθεκτικό όσον αφορά στην αντοχή σε απότριψη και τη θεωρητική διάρκεια ζωής της αντιολισθητικής επιφάνειας, συγκριτικά με τα οδοστρώματα από αυλακωτό σκυρόδεμα και σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή.

Η έρευνα που διεξήχθη από τους (Fang, et al., 2020) αφορά στην αντίσταση σε ολίσθηση και το επίπεδο θορύβου των επιφανειών των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε σήραγγες. Από την ανάλυση της αντίστασης σε ολίσθηση των υπό εξέταση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων φάνηκε ότι το παραδοσιακό αυλακωτό σκυρόδεμα έχει χαμηλή αντίσταση σε ολίσθηση, ενώ τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή και τα οδοστρώματα από τροποποιημένο με πολυμερή τσιμεντοσκυρόδεμα παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση σε ολίσθηση, όπως και τα ασφαλικά οδοστρώματα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το αυλακωτό δύσκαμπτο οδόστρωμα παράγει έντονο θόρυβο κατά την επαφή ελαστικού-οδοστρώματος. Από την άλλη μεριά, τα ασφαλικά οδοστρώματα, τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή και τα οδοστρώματα από τροποποιημένο με πολυμερή τσιμεντοσκυρόδεμα φαίνεται να παράγουν από τα χαμηλότερα επίπεδα θορύβου.

Τέλος, η έρευνα των (Fang, et al., 2020) κατέληξε ότι οι επιφάνειες με καλύτερη αντίσταση σε ολίσθηση παράγουν χαμηλότερο επίπεδο θορύβου. Στο συμπέρασμα

αυτό αντιτίθενται τα αποτελέσματα της έρευνας των (Olek, et al., 2004). Η συγκεκριμένη έρευνα έδειξε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής της επιφάνειας, τόσο αυξάνεται και το συνολικό επίπεδο θορύβου.

## 4. Ανάλυση δεδομένων ολισθηρότητας

### 4.1 Γενικά στοιχεία

Για την ανάλυση της ολισθηρότητας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε πραγματικές συνθήκες αξιοποιήθηκαν δεδομένα από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα, αντλήθηκαν στοιχεία από μετρήσεις πεδίου σε δάπεδα διοδίων αυτοκινητόδρομου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα συνεχούς μέτρησης Grip Tester (Εικόνα 4.1). Οι υπόψη μετρήσεις δίνονται με τον συντελεστή ολίσθησης Grip Number (GN) που αποτελεί μια ποσοτική έκφραση της ολισθηρότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο καλύτερη είναι η αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας.



Εικόνα 4.1: Σύστημα Grip Tester

Το σύστημα Grip Tester μετρά τον συντελεστή τριβής σε υγρές συνθήκες οδοστρώματος, έχοντας εγκατεστημένο σύστημα παροχής νερού το οποίο παρέχει ένα φιλμ νερού, ύψους 0,5 mm κάτω από το ελαστικό δοκιμής (Εικόνα 4.2). Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Οδοστρωμάτων εξήχθησαν τιμές ολισθηρότητας GN ανά 5 m. Από τα δεδομένα αυτά στην ανάλυση που ακολουθεί λαμβάνονται υπόψη όσα είχαν ταχύτητα μέτρησης 45-52 km/h και ροή νερού 9-11 lt/min.



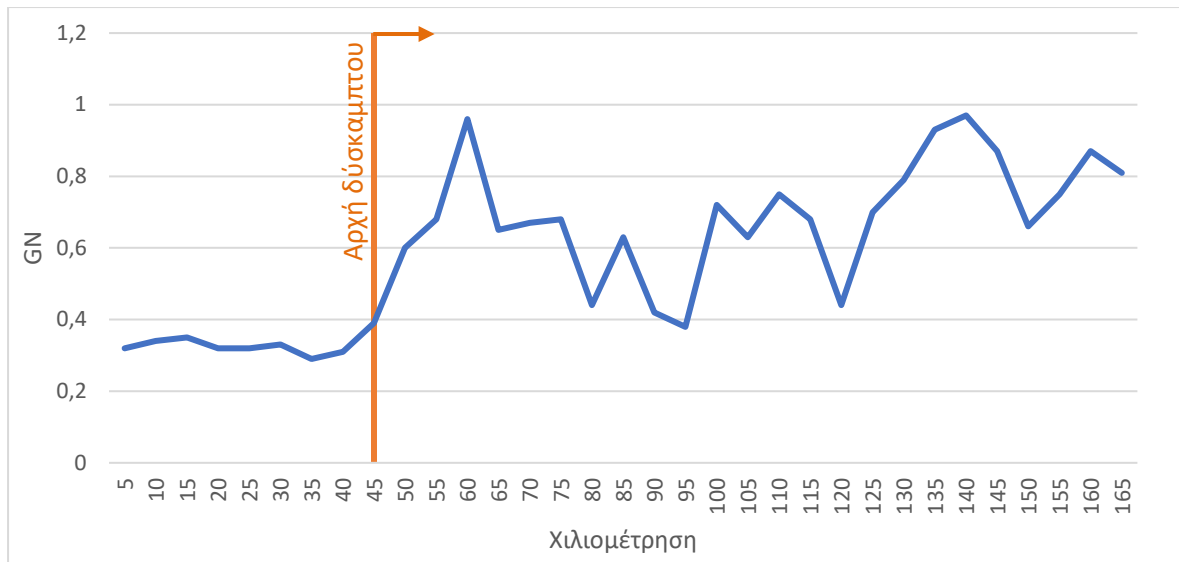
Εικόνα 4.2: Παροχή νερού κάτω από το πρότυπο ελαστικό

Σκοπός της ανάλυσης των δεδομένων πεδίου είναι, πρώτον, η σύγκριση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικού και δύσκαμπτου οδοστρώματος κατά μήκος του ίδιου οδικού τμήματος. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Οδοστρωμάτων, περιλαμβάνουν τιμές ολισθηρότητας GN, εκτός από το δύσκαμπτο οδόστρωμα διοδίων και από το ασφαλτικό οδόστρωμα πριν το δάπεδο διοδίων. Δεύτερον, σκοπός είναι η αξιολόγηση της βελτίωσης της αντιολισθητικής ικανότητας δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση συντήρησής του. Ειδικότερα, στη βάση δεδομένων υπάρχουν μετρήσεις από τμήμα δύσκαμπτου οδοστρώματος διοδίων, στο οποίο μετρήθηκε ο συντελεστής ολίσθησης GN πριν και μετά από επέμβαση συντήρησης που πραγματοποίησε ο φορέας διαχείρισης.

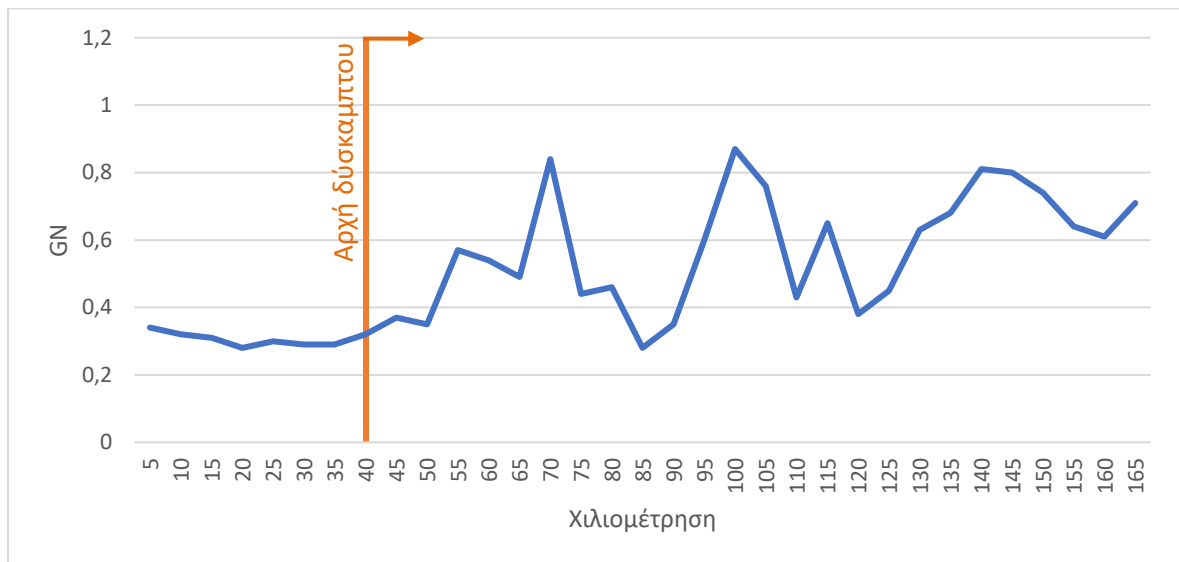
#### **4.2 Συγκριτική ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

Για τη συγκριτική ανάλυση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αξιοποιούνται δεδομένα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ στο τμήμα διοδίων αυτοκινητόδρομου Δ-1. Το δάπεδο διοδίων του τμήματος Δ-1 είναι κατασκευασμένο από δύσκαμπτο οδόστρωμα, ενώ πριν και μετά από τα διόδια το οδόστρωμα είναι ασφαλτικό. Οι μετρήσεις ολισθηρότητας αφορούν σε επτά λωρίδες διοδίων (λωρίδες 1-7).

Οι Εικόνες 4.3-4.9 παρουσιάζουν κατά μήκος τη μεταβολή των τιμών GN στο ασφαλτικό οδόστρωμα σε συνέχεια με το δύσκαμπτο οδόστρωμα του δαπέδου διοδίων.

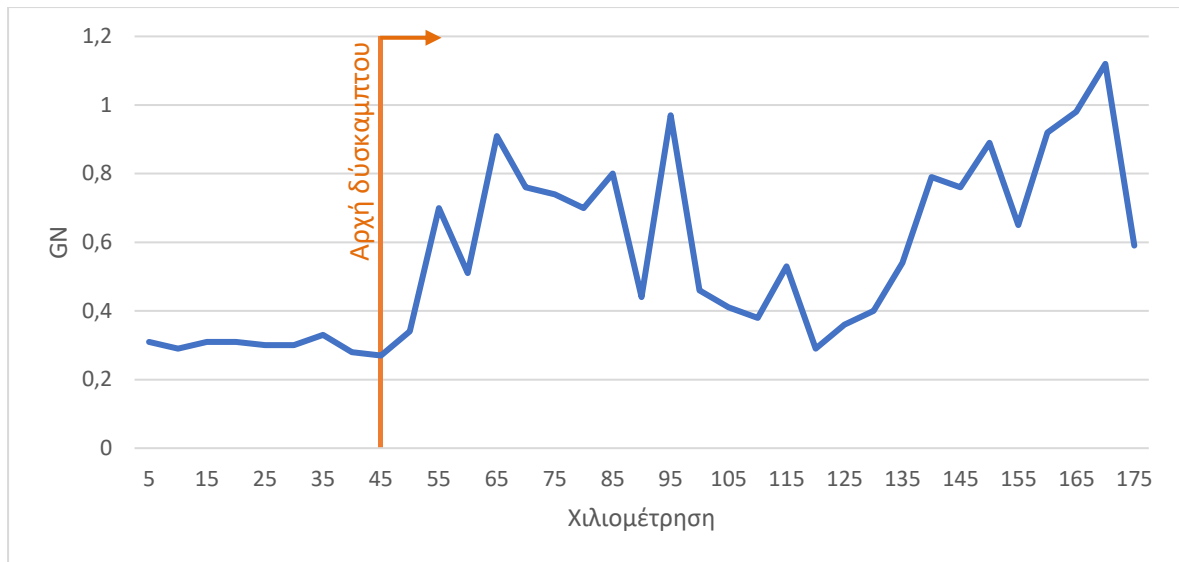


Εικόνα 4.3: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 1

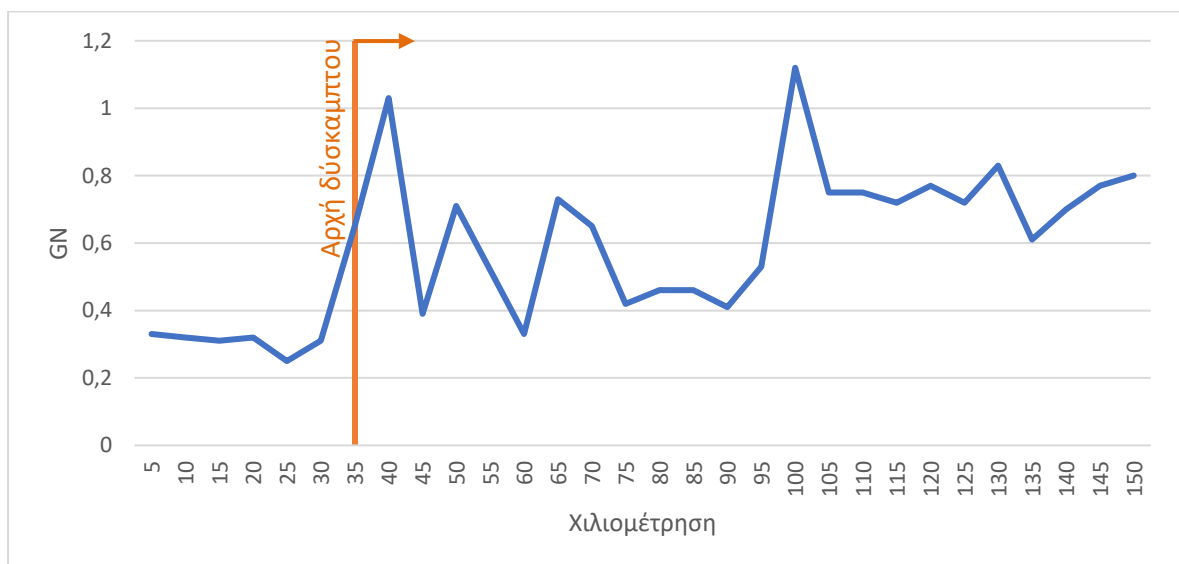


Εικόνα 4.4: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 2

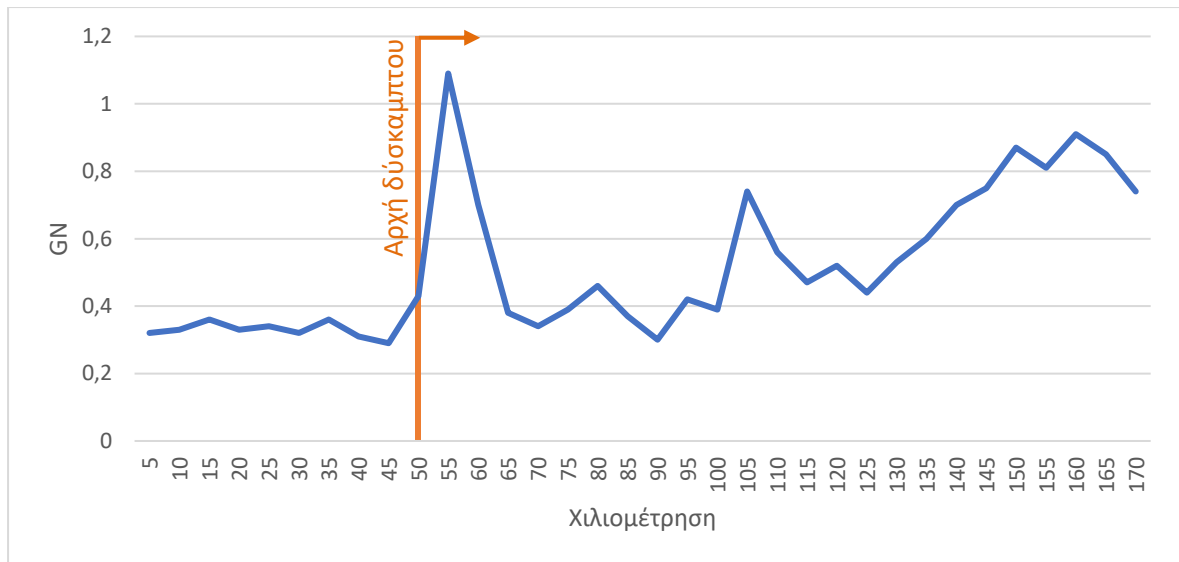




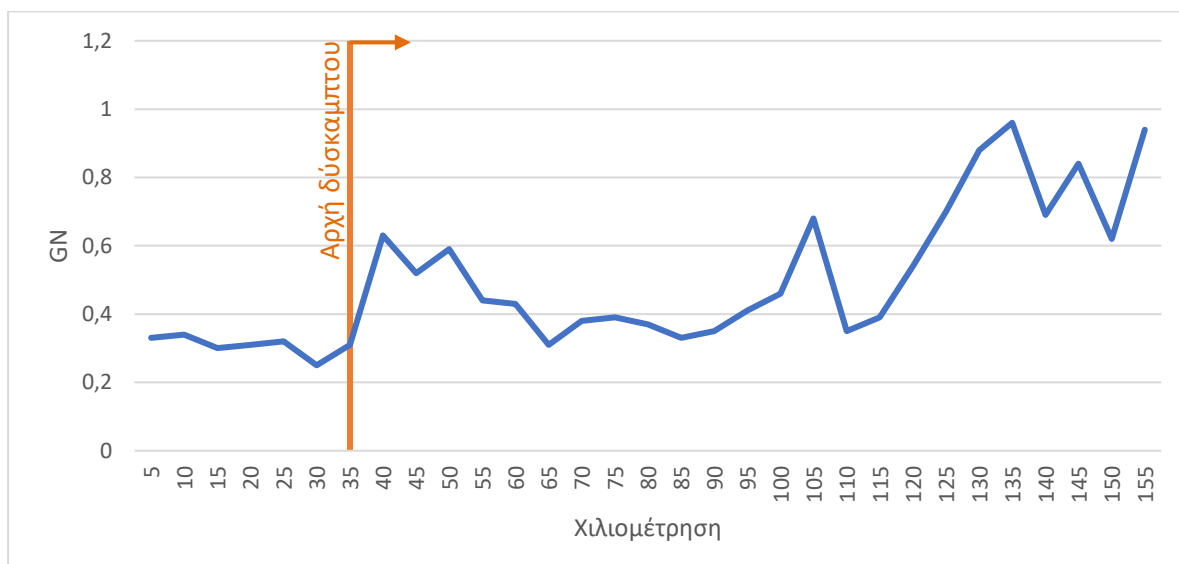
**Εικόνα 4.5: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 3**



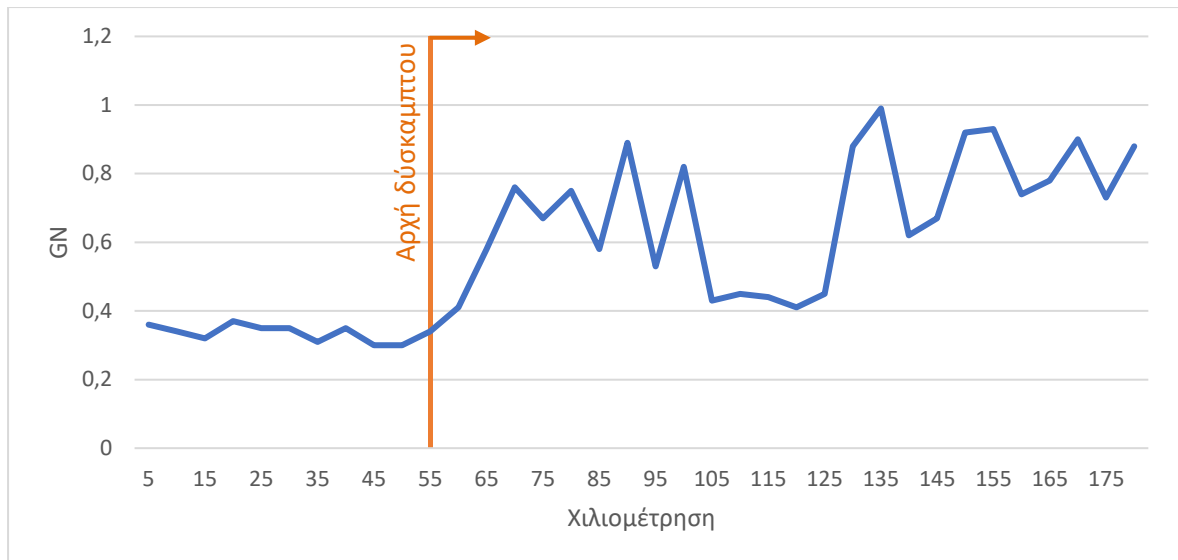
**Εικόνα 4.6: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 4**



**Εικόνα 4.7: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 5**



**Εικόνα 4.8: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 6**

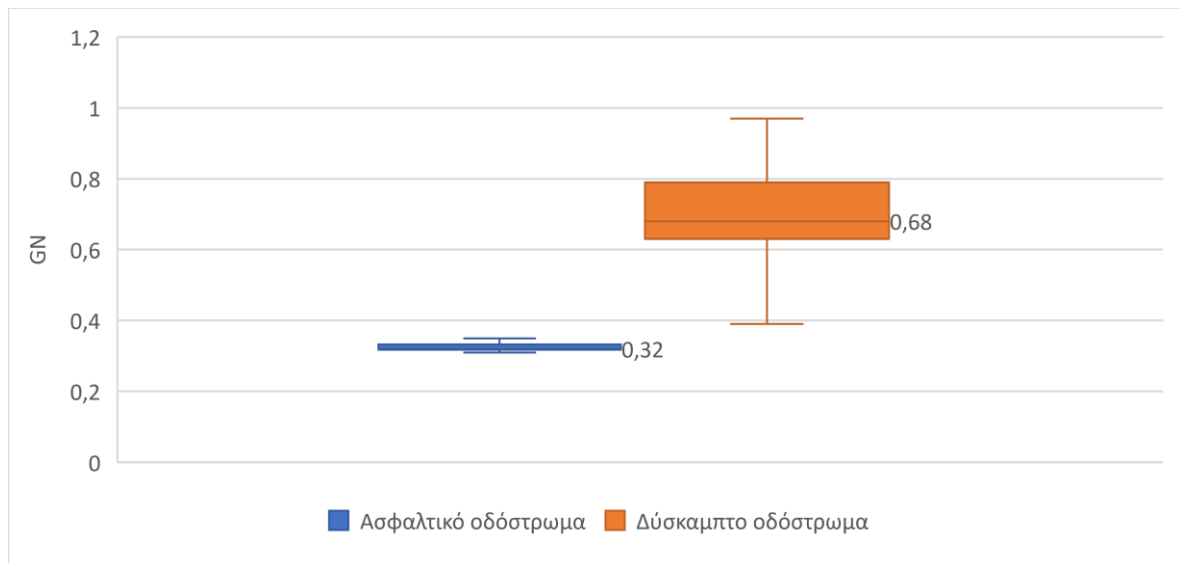


**Εικόνα 4.9: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 7**

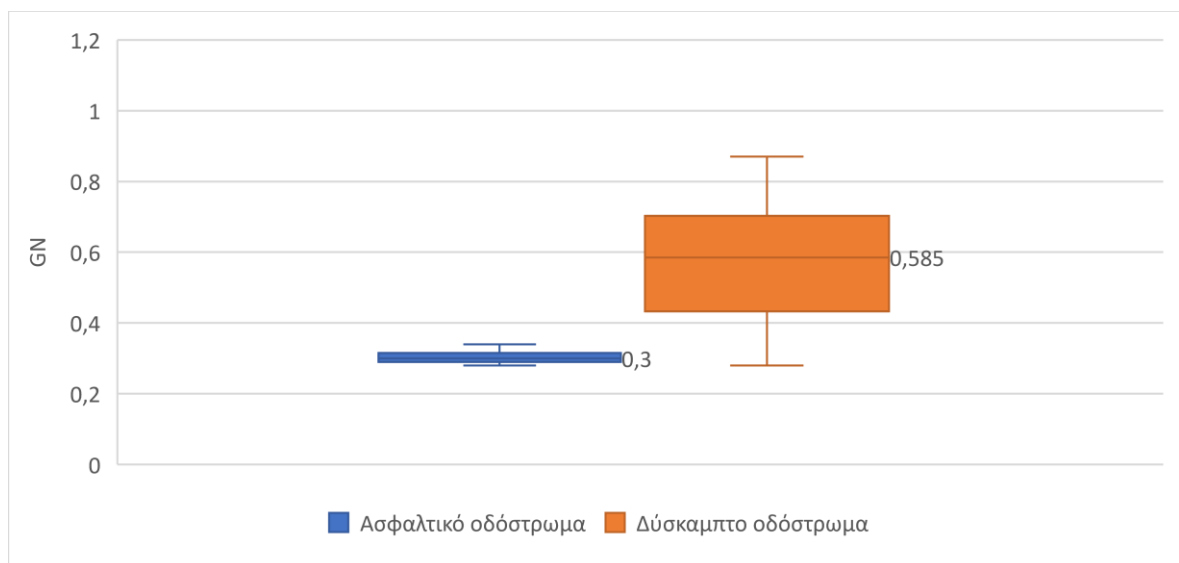
Από τα γραφήματα των Εικόνων 4.3-4.9 παρατηρείται ότι το δύσκαμπτο οδόστρωμα του δαπέδου διοδίων παρουσιάζει καλύτερη ολισθηρότητα από το ασφαλτικό οδόστρωμα σε κάθε λωρίδα του τμήματος Δ-1, καθώς οι τιμές GN είναι μεγαλύτερες. Όμως, από τα γραφήματα είναι επίσης φανερό ότι οι τιμές του συντελεστή ολίσθησης GN του δύσκαμπτου οδοστρώματος παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση σε όλες τις λωρίδες, σε αντίθεση με αυτές του ασφαλτικού οδοστρώματος οι οποίες φαίνεται να έχουν μικρή διακύμανση.

Μια άλλη παρατήρηση που προκύπτει από τα γραφήματα είναι ότι σε μερικές λωρίδες παρατηρούνται τιμές GN μεγαλύτερες από 1. Ο συντελεστής ολίσθησης GN παίρνει τιμές από 0 έως 1, επομένως οι τιμές οι οποίες είναι μεγαλύτερες αποτελούν σφάλμα κατά τη μέτρηση λόγω κάποιας αναπήδησης του συστήματος μέτρησης. Για παράδειγμα, στα γραφήματα των Εικόνων 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται τιμές του συντελεστή ολίσθησης μεγαλύτερες από 1 στις χιλιομετρικές θέσεις αμέσως μετά την αρχή του δύσκαμπτου οδοστρώματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της αναπήδησης του Grip Tester στον αρμό σύνδεσης του ασφαλτικού και του δύσκαμπτου οδοστρώματος. Επίσης, σε άλλες χιλιομετρικές θέσεις όπου παρατηρούνται τιμές πάνω από 1 είναι πιθανόν να βρίσκεται αρμός της πλάκας σκυροδέματος. Επομένως, οι τιμές αυτές δεν είναι ρεαλιστικές αλλά προκύπτουν λόγω σφάλματος κατά τη μέτρηση στο πεδίο.

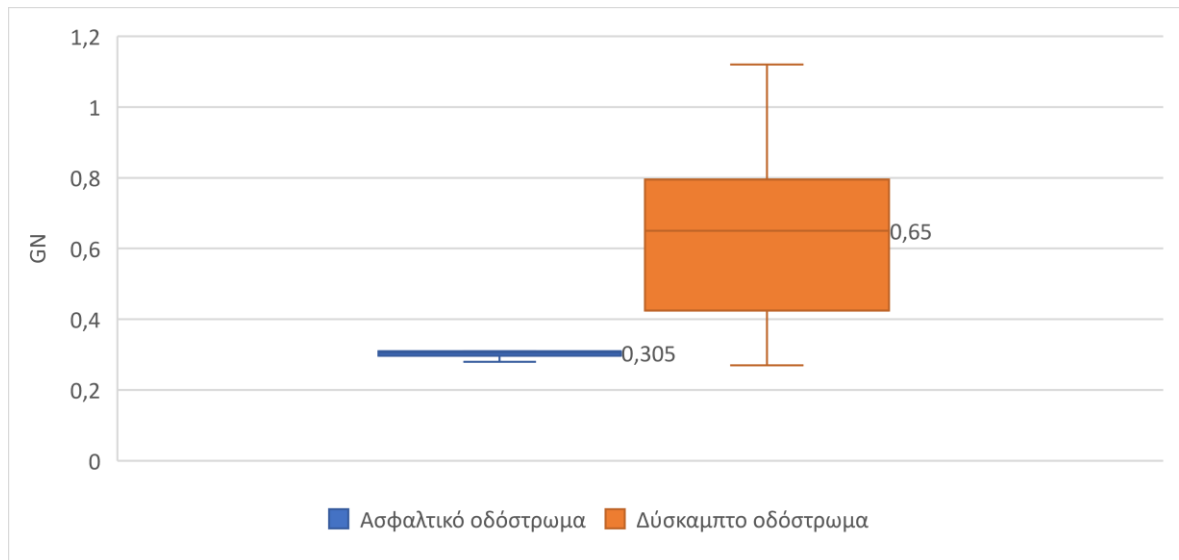
Αναλύοντας περαιτέρω τα στοιχεία των μετρήσεων πεδίου δημιουργούνται τα θηκογράμματα των Εικόνων 4.10-4.16.



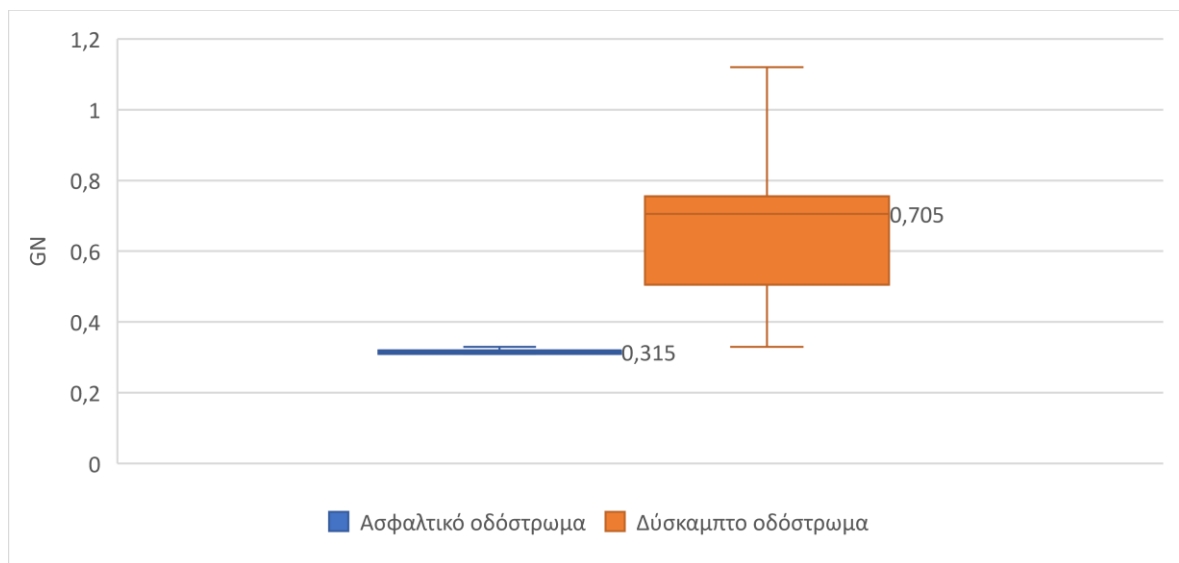
Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 1



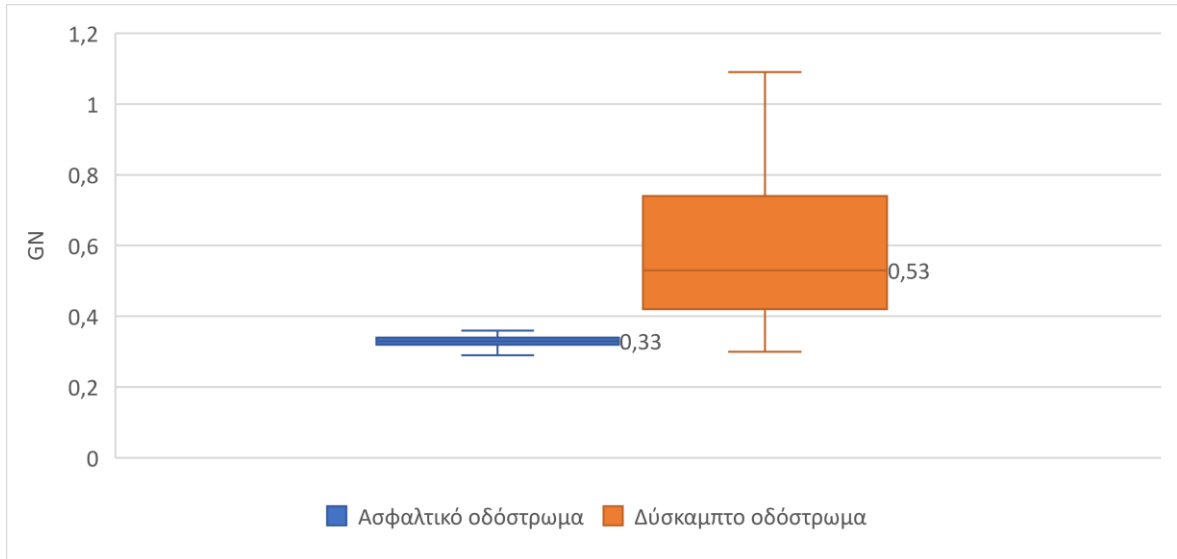
Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 2



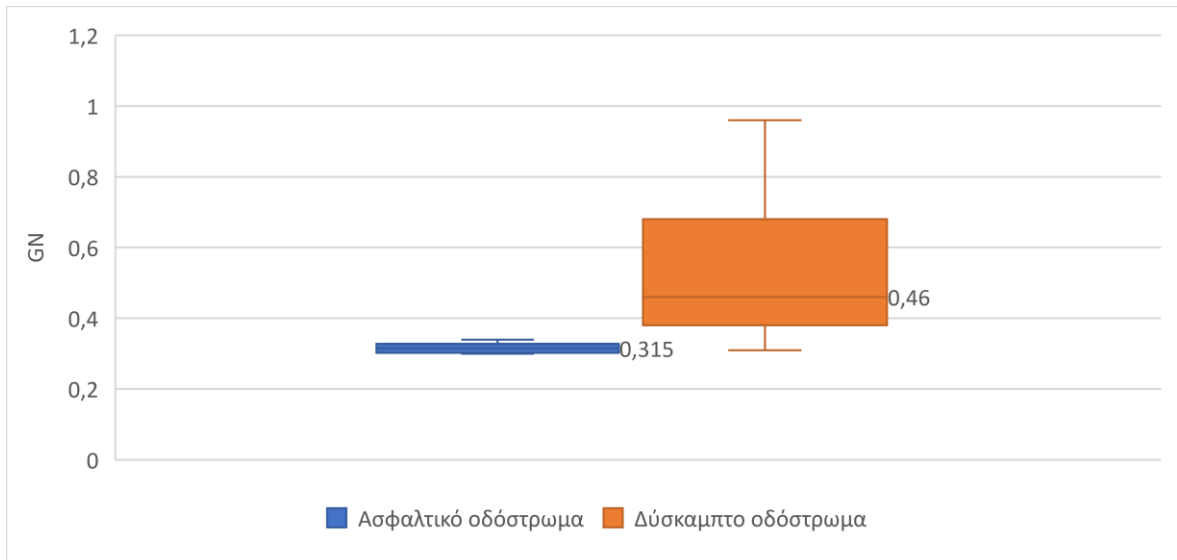
**Εικόνα 4.12: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 3**



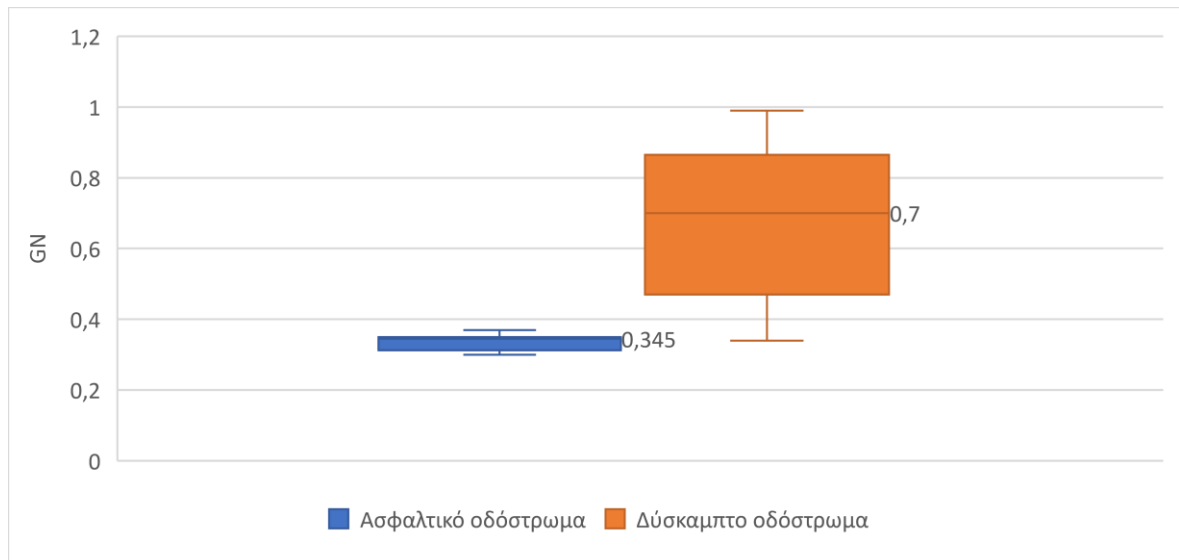
**Εικόνα 4.13: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 4**



Εικόνα 4.14: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 5



Εικόνα 4.15: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 6



**Εικόνα 4.16: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 7**

Τα θηκογράμματα χρησιμοποιούνται για την καλύτερη απεικόνιση του εύρους των τιμών GN για το ασφαλτικό και το δύσκαμπτο οδόστρωμα. Η παρατήρηση αναφορικά με τη διακύμανση των τιμών είναι ακόμα πιο εμφανής από τα θηκογράμματα, (Εικόνες 4.10- 4.16) στα οποία παρουσιάζεται η διασπορά των τιμών του συντελεστή ολίσθησης GN για το ασφαλτικό και το δύσκαμπτο οδόστρωμα κάθε λωρίδας. Από τα θηκογράμματα του ασφαλτικού οδοστρώματος κάθε λωρίδας είναι φανερό ότι η διασπορά είναι μικρή, καθώς οι τιμές του GN έχουν μικρές αποστάσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα το ύψος του ορθογωνίου να είναι μικρό. Αντίθετα, στα θηκογράμματα του δύσκαμπτου οδοστρώματος κάθε λωρίδας το ύψος του ορθογωνίου είναι αρκετά μεγαλύτερο, συνεπώς η διασπορά των τιμών είναι μεγάλη.

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικός πίνακας τμήματος Δ-1

Λωρίδα	Ασφαλτικό οδόστρωμα		Δύσκαμπτο οδόστρωμα	
	Μέσος όρος (m)	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)	Μέσος όρος (m)	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)
1	0,32	6%	0,68	25%
2	0,30	7%	0,57	31%
3	0,30	5%	0,64	37%
4	0,31	9%	0,66	30%
5	0,33	7%	0,59	36%
6	0,31	10%	0,54	38%
7	0,34	8%	0,68	29%

Η καλύτερη αντιολισθητική ικανότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έναντι των ασφαλτικών επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μέσων όρων του συντελεστή ολίσθησης GN του ασφαλτικού και του δύσκαμπτου οδοστρώματος κάθε λωρίδας. Ειδικότερα, από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 4.1 φαίνεται ότι ο μέσος όρος του συντελεστή ολίσθησης για το ασφαλτικό οδόστρωμα κυμαίνεται μεταξύ 0,30 και 0,34, ενώ για το δύσκαμπτο οδόστρωμα μεταξύ 0,54 και 0,68.

Ένας ακόμα συντελεστής που περιλαμβάνεται στον Πίνακα 4.1 είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας CV, ο οποίος εκφράζει την ομοιογένεια των τιμών ενός δείγματος, στην συγκεκριμένη περίπτωση των τιμών του συντελεστή ολίσθησης GN. Αν η τιμή του συντελεστή είναι μικρότερη από 10% τότε το δείγμα τιμών GN, του ασφαλτικού ή του δύσκαμπτου οδοστρώματος, χαρακτηρίζεται ομοιογενές, αντιθέτως το δείγμα χαρακτηρίζεται ανομοιογενές. Σε όλες τις λωρίδες παρατηρείται ότι το CV του ασφαλτικού οδοστρώματος είναι μικρότερο από 10%, συγκεκριμένα κυμαίνεται από 5% μέχρι 10%, οπότε θεωρείται ότι το δείγμα των τιμών του GN είναι ομοιογενές. Εξάιρεση αποτελεί ο συντελεστής μεταβλητότητας του ασφαλτικού οδοστρώματος της λωρίδας 6, ο οποίος είναι σχεδόν ίσος με 10%, οπότε οριακά μπορεί το δείγμα να θεωρηθεί ομοιογενές. Όσον αφορά στο CV των τιμών GN στο δύσκαμπτο οδόστρωμα, με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1, κυμαίνεται από 25% μέχρι 38%, επομένως σε όλες τις λωρίδες είναι αρκετά μεγαλύτερος από 10%, το οποίο συνεπάγεται ότι το δείγμα των τιμών GN είναι ανομοιογενές.



Η ανομοιογένεια που παρατηρείται στο δύσκαμπτο οδόστρωμα οφείλεται σε ορισμένα σφάλματα ή μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη μέτρηση του συντελεστή ολίσθησης GN. Ειδικότερα, υποστηρίζεται ότι η ανομοιογένεια συσχετίζεται με την αναπήδηση του συστήματος μέτρησης Grip Tester, η οποία έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα μέτρησης να χάνει στιγμιαία επαφή με την επιφάνεια οπότε να μεταβάλλεται το κατακόρυφο φορτίο κατά τη μέτρηση.

### **4.3 Αξιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση**

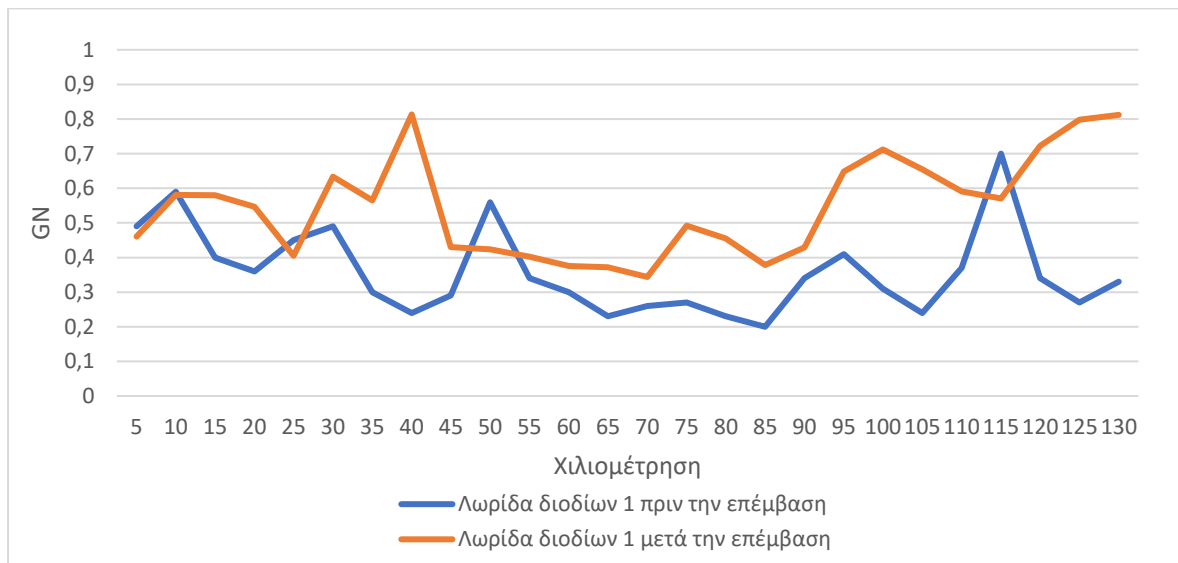
Για την αξιολόγηση της βελτίωσης της επιφάνειας δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση χρησιμοποιούνται δεδομένα από τις μετρήσεις του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ στο τμήμα διοδίων αυτοκινητόδρομου Δ-2. Το τμήμα Δ-2 αφορά επίσης σε δάπεδο διοδίων κατασκευασμένο από δύσκαμπτο οδόστρωμα.

Οι διατιθέμενες μετρήσεις του συντελεστή ολίσθησης GN αφορούν σε δύο λωρίδες διοδίων του τμήματος Δ-2 πριν και μετά την επέμβαση. Ο φορέας διαχείρισης του αυτοκινητόδρομου πραγματοποίησε επέμβαση βελτίωσης της ολισθηρότητας του δύσκαμπτου οδοστρώματος, καθώς είχαν διαπιστωθεί αστοχίες και είχε κριθεί απαραίτητη η συντήρησή του. Συγκεκριμένα, για τη βελτίωση του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της σφαιριδιοβολής (shotblasting) κατά μήκος των λωρίδων. Η τεχνική αυτή αποτελεί μέθοδο διόρθωσης της επιφανειακής υφής των οδοστρωμάτων και συνεπώς βελτίωσης της αντιολισθητικής ικανότητάς τους. Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα, τοποθετημένο επί τριαξονικού φορτηγού αυτοκινήτου. Το μηχάνημα εκτοξεύει με μεγάλη ταχύτητα μικρές χαλύβδινες σφαίρες στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα να δημιουργεί αδρή επιφάνεια και να βελτιώνεται η μικρο-υφή (Εικόνα 4.17). Επιπλέον, οι σφαίρες χτυπώντας την επιφάνεια του οδοστρώματος απομακρύνουν τα κατάλοιπα μεταξύ των αδρανών βελτιώνοντας και τη μακρο-υφή του.

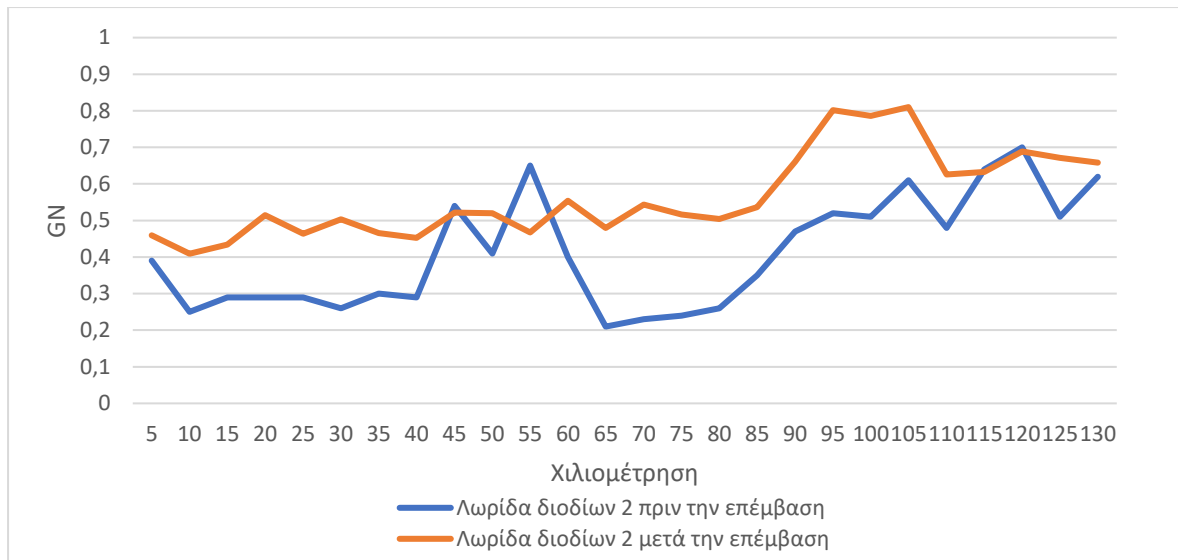


Εικόνα 4.17: Λειτουργία μεθόδου σφαιριδιοβολής

Στις Εικόνες 4.18 και 4.19 παρουσιάζεται η κατά μήκος μεταβολή των τιμών GN στο δύσκαμπτο οδόστρωμα του δαπέδου διοδίων τόσο πριν όσο και μετά την επέμβαση.

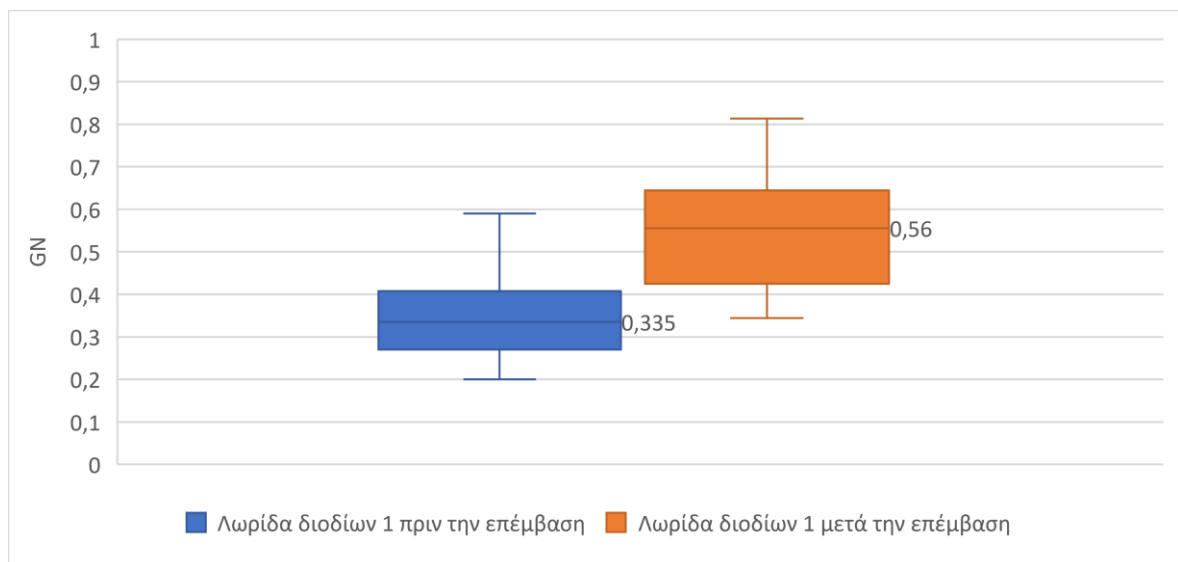


Εικόνα 4.18: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 1

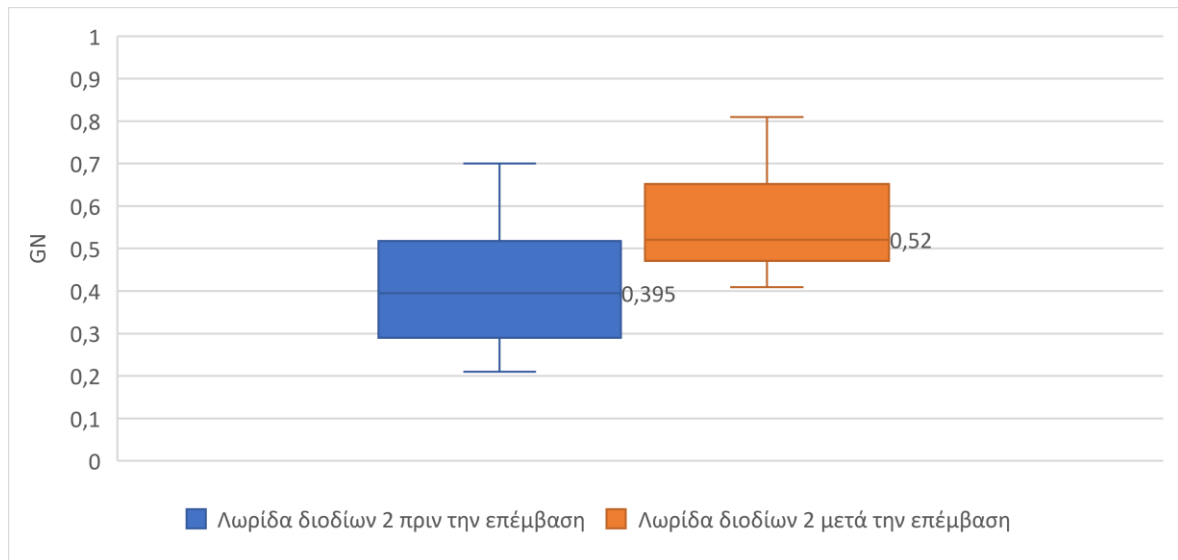


Εικόνα 4.19: Γράφημα συντελεστή ολίσθησης GN σε κάθε χιλιομετρική θέση της λωρίδας 2

Από τα γραφήματα των Εικόνων 4.18 και 4.19 παρατηρείται ότι το δύσκαμπτο οδόστρωμα στις λωρίδες 1 και 2 παρουσιάζει σημαντική διακύμανση των τιμών του συντελεστή ολίσθησης GN. Για την καλύτερη απεικόνιση της διασποράς των τιμών του συντελεστή ολίσθησης δημιουργούνται τα θηκογράμματα των Εικόνων 4.20 και 4.21, τα οποία περιλαμβάνουν και τη διάμεσο των τιμών.



Εικόνα 4.20: Θηκογράμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 1



**Εικόνα 4.21: Θηκόγραμμα ολισθηρότητας (GN) συμπεριλαμβανομένης της διαμέσου λωρίδας 2**

Η διακύμανση των τιμών GN είναι εμφανής και στα θηκογράμματα των Εικόνων 4.20 και 4.21, όπου φαίνεται ότι οι τιμές GN έχουν σημαντική απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα το ύψος του ορθογωνίου να είναι σχετικά μεγάλο. Επομένως, διαπιστώνεται ότι η διασπορά των τιμών GN είναι μεγάλη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα γραφήματα των Εικόνων 4.18 και 4.19 καθώς και τα θηκογράμματα των Εικόνων 4.20 και 4.21 είναι φανερό ότι η ολισθηρότητα των λωρίδων βελτιώθηκε σημαντικά μετά την επέμβαση. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τις διαμέσους του συντελεστή ολίσθησης της λωρίδας 1 πριν και μετά την επέμβαση, 0,34 και 0,56 αντίστοιχα, παρατηρείται βελτίωση της τάξης του 65%. Αντίστοιχα, οι διάμεσοι των τιμών GN της λωρίδας 2 πριν και μετά την επέμβαση είναι 0,40 και 0,52, επομένως η βελτίωση είναι της τάξης του 30%. Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική τιμή του δείγματος η διάμεσος των τιμών GN, καθώς λόγω της μεγάλης διακύμανσης των τιμών του δύσκαμπτου οδοστρώματος θεωρείται ότι παρέχει καλύτερη αναπαράσταση της «μεσαίας» τιμής από το μέσο όρο.

Στα γραφήματα παρατηρείται ότι σε λίγες χιλιομετρικές θέσεις ο συντελεστής ολίσθησης GN μετά την επέμβαση είναι μικρότερος συγκριτικά με το συντελεστή πριν την επέμβαση. Ωστόσο, η διαπίστωση αυτή δεν επηρεάζει τα συνολικά συμπεράσματα της ανάλυσης των δεδομένων ούτε την εμφανή βελτίωση της αντιολισθητικής ικανότητας στις λωρίδες 1 και 2 μετά την επέμβαση που πραγματοποιήθηκε.

**Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας τμήματος Δ-2**

Λωρίδα	Πριν την επέμβαση		Μετά την επέμβαση	
	Διάμεσος	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)	Διάμεσος	Συντελεστής μεταβλητότητας (CV)
1	0,34	35%	0,56	27%
2	0,40	37%	0,52	21%

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2 φαίνεται ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας CV των λωρίδων 1 και 2 πριν και μετά την επέμβαση είναι μεγαλύτερος από 10%, οπότε το δείγμα των τιμών GN είναι ανομοιογενές. Ωστόσο, η ανομοιογένεια του δείγματος είναι ακόμα ένα πρόβλημα που φαίνεται να βελτιώνεται μετά την επέμβαση. Όπως παρατηρείται από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 4.2, στη λωρίδα 1 ο συντελεστής μεταβλητότητας CV πριν και μετά την επέμβαση είναι 35% και 27% αντίστοιχα. Ομοίως, στη λωρίδα 2 το CV πριν και μετά την επέμβαση είναι 37% και 21% αντίστοιχα. Επομένως, φαίνεται ότι υπάρχει βελτίωση στην ομοιογένεια του δείγματος τιμών GN και κατ' επέκταση στην ομοιογένεια της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Στα θηκογράμματα της Εικόνας 4.21 παρατηρείται βελτίωση της διακύμανσης των τιμών του συντελεστή GN της λωρίδας 2. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα θηκογράμματα της λωρίδας 2 πριν και μετά την επέμβαση φαίνεται ότι η διασπορά των τιμών μετά την επέμβαση είναι μικρότερη. Αντιθέτως, στα θηκογράμματα της λωρίδας 1, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.20, φαίνεται ότι το θηκόγραμμα των τιμών GN πριν την επέμβαση παρουσιάζει μικρότερη διασπορά από αυτό μετά την επέμβαση. Επομένως, παρατηρείται ότι παρόλο που βελτιώθηκε η μεταβλητότητα των τιμών του συντελεστή ολίσθησης GN μετά την επέμβαση, η διασπορά των τιμών του δείγματος αυξήθηκε. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι τιμές του δείγματος δεν παρουσιάζουν πολλές μεταβολές, ωστόσο παρατηρείται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ακραίων τιμών του δείγματος μετά την επέμβαση.

## 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις συνιστώσες της ολισθηρότητας και τους μηχανισμούς ανάπτυξής της. Διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση σε ολίσθηση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, όπως είναι η επιφανειακή υφή, ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, οι ιδιότητες του ελαστικού και η ταχύτητα κίνησης του οχήματος. Όσον αφορά στις μεθόδους μέτρησης της ολισθηρότητας διαπιστώνεται ότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές δοκιμές, τόσο εργαστηριακές όσο και στο πεδίο, με ποικίλες συσκευές μέτρησης. Σε κάθε συσκευή αντιστοιχούν διαφορετικοί δείκτες ολισθηρότητας, ενώ οι τιμές διαφορετικών δεικτών ολισθηρότητας δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν έρευνες στις οποίες συγκρίνεται η ολισθηρότητα δύσκαμπτων και ασφαλικών οδοστρωμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών συμπεραίνεται ότι βραχυπρόθεσμα η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης στην αντίσταση σε ολίσθηση είναι σχεδόν ίδια στα ασφαλικά και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Αντίθετα, διαπιστώθηκε ότι μακροπρόθεσμα η αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι λιγότερο ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης, η μέγιστη αντίσταση σε ολίσθηση επιτυγχάνεται γρηγορότερα στα ασφαλικά συγκριτικά με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Από την άλλη μεριά, στα ασφαλικά οδοστρώματα ο ρυθμός μείωσης της αντίστασης σε ολίσθηση είναι υψηλότερος. Επομένως, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μακροπρόθεσμα είναι πιο ανθεκτικά και απαιτούν συντήρηση λιγότερο συχνά σε σχέση με τα ασφαλικά οδοστρώματα.

Με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης δεν μπορεί να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα σχετικά με την υπεροχή της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ των ασφαλικών και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Ειδικότερα, σε σχετική έρευνα διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση σε ολίσθηση της ασφαλικής επιφάνειας είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του συνηθισμένου οδοστρώματος από τσιμεντοσκυρόδεμα. Ωστόσο, η αντιολισθητική ικανότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων βελτιώνεται σημαντικά όταν χρησιμοποιείται τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή.

Πέραν τούτων, η ενδελεχής διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε θέματα σύγκρισης μεταξύ δύσκαμπτων και ασφαλικών οδοστρωμάτων σχετικά με τη

μειωτική επίδραση των ρύπων στην αντίσταση σε ολίσθηση των επιφανειών τους. Προέκυψε ότι η κατάταξη των ρύπων από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση είναι νερό, άμμος, αλάτι και λιπαντικό λάδι. Βέβαια, οι υπόψη ρύποι φαίνεται ότι έχουν παρόμοια επίδραση, τόσο στα ασφαλικά όσο και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, με ελαφρώς μεγαλύτερη μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας να παρατηρείται στα δύσκαμπτα.

Επίσης, αρκετές έρευνες επικεντρώνονται στην επίδραση της μεθόδου δημιουργίας επιφανειακής υφής στην ολισθηρότητα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, διάφορες έρευνες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι την καλύτερη αντιολισθητική ικανότητα παρουσιάζουν τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή. Αυτός ο τύπος δύσκαμπτων οδοστρωμάτων διαπιστώθηκε ότι έχει πολύ καλή αντίσταση σε ολίσθηση τόσο στην πρώιμη ηλικία, όσο και μακροπρόθεσμα. Επιπρόσθετη έρευνα κατέδειξε ότι ένας τύπος δύσκαμπτου οδοστρώματος που παρουσιάζει καλύτερη αντιολισθητική ικανότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή είναι το διαπερατό δύσκαμπτο οδοστρώμα.

Επιπλέον, ανεδείχθη ότι εξίσου καλή αντιολισθητική ικανότητα με τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα με εκτεθειμένα αδρανή παρέχουν τα οδοστρώματα με υφή που δημιουργήθηκε από «σύρσιμο βούρτσας» παράλληλα και κάθετα στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας και τα οδοστρώματα από τροποποιημένο με πολυμερή σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, ικανοποιητική αντίσταση σε ολίσθηση για χρήση, κυρίως, σε οδούς μικρότερου όγκου κυκλοφορίας παρουσιάζουν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με υφή που δημιουργήθηκε από «σύρσιμο βούρτσας» κάθετα στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας, εγκάρσιο φρεζάρισμα, «σύρσιμο με χλοοτάπητα» και τα οδοστρώματα με αυλακωτό σκυρόδεμα. Αντίθετα, τη χειρότερα αντίσταση σε ολίσθηση έχουν οι επιφάνειες με δημιουργία υφής από «σύρσιμο λινάτσας», «σύρσιμο με Astroturf» και κατά μήκος φρεζάρισμα. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η ολισθηρότητα των επιφανειών που δημιουργούνται από «σύρσιμο λινάτσας» μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη δημιουργία εγκάρσιων αυλακώσεων.

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το υψηλότερο επίπεδο θορύβου συγκριτικά με τα ασφαλικά οδοστρώματα. Οι έρευνες δεν συγκλίνουν στα συμπεράσματα τους όσον αφορά στη σχέση μεταξύ ολισθηρότητας και επιπέδου θορύβου. Σχετική έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η αντίσταση σε ολίσθηση της επιφάνειας μειώνεται το επίπεδο θορύβου, καθώς η διαμορφωμένη επιφανειακή υφή παρέχει τη δυνατότητα

διαφυγής του θορύβου. Αντίθετα, άλλη έρευνα συμπεραίνει ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής τριβής τόσο αυξάνεται και το συνολικό επίπεδο θορύβου κατά την επαφή οδοστρώματος – ελαστικού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των ερευνών σχετικά με την αντιολισθητική ικανότητα δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι περιορισμένος. Παρά ταύτα τα ευρήματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας κρίνονται σημαντικά.

Η εμπειρία που αποκομίστηκε μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιοποιήθηκε για την επεξεργασία και την ανάλυση στοιχείων ολισθηρότητας από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία μετρήσεων πεδίου για τη συγκριτική ανάλυση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα δεδομένα αφορούσαν σε μετρήσεις του συντελεστή ολίσθησης GN (Grip Tester), τόσο από δύσκαμπτο δάπεδο διοδίων αυτοκινητόδρομου, όσο και από το ασφαλικό οδόστρωμα με το οποίο συνδέεται. Από τη συγκριτική ανάλυση παρατηρήθηκε ότι το δύσκαμπτο οδόστρωμα παρουσιάζει καλύτερη αντιολισθητική ικανότητα από το ασφαλικό στις υπό εξέταση λωρίδες. Ωστόσο, οι τιμές GN του δύσκαμπτου οδοστρώματος παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση και το δείγμα θεωρείται ανομοιογενές. Αντιθέτως, το δείγμα τιμών GN του ασφαλικού οδοστρώματος είναι ομοιογενές με μικρή διακύμανση τιμών. Η διαφορά στην αντιολισθητική ικανότητα μεταξύ ασφαλικού και δύσκαμπτου οδοστρώματος επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδηγών, καθώς πρέπει να προσαρμόσουν ανάλογα την ταχύτητα του οχήματός τους για την εξασφάλιση ασφαλούς μετάβασης μεταξύ των οδοστρωμάτων.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της βελτίωσης δύσκαμπτου οδοστρώματος μετά από επέμβαση συντήρησης. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν δεδομένα ολισθηρότητας από δύσκαμπτο δάπεδο διοδίων αυτοκινητόδρομου πριν και μετά από επέμβαση με τη μέθοδο της σφαιριδιοβολής. Από την ανάλυση συμπεραίνεται ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση της αντίστασης σε ολίσθηση του οδοστρώματος μετά την επέμβαση. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι και σε αυτό το δύσκαμπτο δάπεδο διοδίων υπάρχει σημαντική διακύμανση των τιμών του συντελεστή ολίσθησης GN, τόσο πριν όσο και μετά την επέμβαση. Ωστόσο, μετά την επέμβαση βελτιώθηκε σημαντικά η ανομοιογένεια του δείγματος των τιμών GN.

Η ανομοιογένεια που παρατηρείται στις τιμές του συντελεστή ολίσθησης GN των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων συσχετίζεται με την αναπήδηση του συστήματος μέτρησης Grip Tester, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα να χάνει στιγμιαία



επαφή με την επιφάνεια και έτσι να μεταβάλλεται το κατακόρυφο φορτίο κατά τη μέτρηση. Επομένως, η μεταβλητότητα αυτή δεν είναι ρεαλιστική αλλά οφείλεται σε σφάλματα κατά τη μέτρηση της ολισθηρότητας. Συνεπώς, ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι συσκευές συνεχούς μέτρησης, όπως είναι το Grip Tester, ενδεχομένως δεν ενδείκνυνται για τη μέτρηση της ολισθηρότητας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα της ολισθηρότητας της επιφάνειας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων θα μπορούσε να αποτελέσει η επεξεργασία περισσότερων μετρήσεων πεδίου. Συγκεκριμένα, προτείνεται η επεξεργασία δεδομένων από στατικές συσκευές μέτρησης, με στόχο να διαπιστωθεί ποια μέθοδος μέτρησης παρέχει τα πιο έγκυρα αποτελέσματα για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Επιπλέον, θα μπορούσε να ερευνηθεί, ως προς τη συμπεριφορά των οδηγών, η επιρροή της μεταβολής της ολισθηρότητας κατά τη μετάβαση από ασφαλτικό σε δύσκαμπτο οδόστρωμα. Τέλος, η βραχυπρόθεσμη αλλά και η μακροπρόθεσμη αντίσταση σε ολίσθηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, σε σύγκριση και με τα ασφαλτικά οδοστρώματα, είναι θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση.

## 6. Βιβλιογραφία

Abaza, O. A., Chowdhury, T. D. & Arafat, M., 2017. Comparative Analysis of Skid Resistance for Different Roadway Surface Treatments. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(4), pp. 890-899.

Ahammed, M. A. & Tighe, S., 2009. Early-Life, Long-Term, and Seasonal Variations in Skid Resistance in Flexible and Rigid Pavements. *Journal of Transportation Research Board*, 2094(1), p. 112–120.

Asi, I. M., 2007. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and Environment*, 42(1), pp. 325-329.

ASTM E1136, 2019. *Standard Specification for P195/75R14 Radial Standard Reference Test Tire*, Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.

ASTM E2157-15, 2019. *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Properties Using the Circular Track Meter*, West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.

ASTM E274, 2011. *Standard Test Method for Measuring Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire*, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

ASTM E303-93, 2018. *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*, West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.

Bawono, A. A., Lechner, B. & Yang, E.-H., 2019. Skid resistance and surface water drainage performance of engineered cementitious composites for pavement applications. *Cement and Concrete Composites*, 104(103387).

Bowden, F. P. & Hughes, T. P., 1939. The mechanism of sliding on ice and snow. *The Royal Society Publishing*, 172(949), pp. 280-298.

BS EN 1338, 2003. *Concrete paving blocks. Requirements and test methods*, London: British Standards.

Cantisani, G., Mascio, P. D. & Moretti, L., 2018. Comparative life cycle assessment of lighting systems and road pavements in an Italian twin-tube road tunnel. *Sustainability*, 10(11), pp. 1-18.

Chen, Y., Wang, K.-j. & Zhou, W.-f., 2013. Evaluation of surface textures and skid resistance of pervious concrete pavement. *Journal of Central South University*, 20(1), pp. 520-527.

Chu, L., Guo, W. & Fwa, T. F., 2022. Theoretical and practical engineering significance of British pendulum test. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), pp. 1-8.

Chu, L. J. & Fwa, T. F., 2019. A functional approach for determining skid resistance threshold state of porous pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(4), pp. 481-489.

- Colbeck, S., 1988. The kinetic friction of snow. *Journal of Glaciology*, 34(116), pp. 78-86.
- Dunford, A., 2008. *The Wehner Schulze machine and its potential use to improve aggregate specification*. s.l., 2nd International Safer Roads Conference.
- Fang, J., Tu, J. & Wu, K., 2020. Analysis of Skid Resistance and Noise Characteristics for Varieties of Concrete Pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), pp. 1-8.
- Fwa, T., 2021. Determination and prediction of pavement skid resistance—connecting research and practice. *Journal of Road Engineering*, 1(1), pp. 43-62.
- Gierasimiuk, P., Wasilewska, M. & Gardziejczyk, W., 2021. A Comparative Study on Skid Resistance of Concrete Pavements Differing in Texturing Technique. *Materials*, 14(1), p. 178.
- Hall, J. και συν., 2009. *Guide for Pavement Friction*, s.l.: Final Report for NCHRP Project 1.
- Harwood, D. W., Blackburn, R. R., Kulakowski, B. & Kibler, D. F., 1987. *Wet Weather Exposure Measures*, Washington, D.C.: Federal Highway Administration (FHWA).
- Hill, B. & Henry, J., 1982. *Surface Materials and Properties Related to Seasonal Variations in Skid Resistance*, West Conshohocken, PA United States: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Hofko, B., Kugler, H., Chankov, G. & Spielhofer, R., 2019. A laboratory procedure for predicting skid and polishing resistance of road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(4), pp. 439-447.
- Jalalkamali, R., Dibaei, M. M., Jalal Kamali, M. H. & Hassani, A., 2021. An Investigation of the Relationship among Skid Resistance, Mean Texture Depth and Abrasion Resistance for Different Macrotextures of Concrete Pavements. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 54(2), pp. 301-317.
- Khasawneh, M., 2017. Laboratory Study on the Frictional Properties of HMA Specimens Using a Newly Developed Asphalt Polisher. *International Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp. 1007-1017.
- Khasawneh, M. A. & Liang, R. Y., 2012. Temperature effect on frictional properties of HMA at different polishing stages. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(1), pp. 39-53.
- Kogbara, R. B. και συν., 2016. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 114(1), pp. 602-617.
- Kummer, H. & Meyer, W., 1963. *Penn State Road Surface friction tester as adapted to routine measurement of pavement skid resistance*. *Road Surface Properties*. s.l., 42nd Annual Meeting, pp. 1-31.

- Li, Q. J., Zhan, Y., Yang, G. & Wang, K. ., 2018. Pavement skid resistance as a function of pavement surface and aggregate texture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, September, 21(10), pp. 1159-1169.
- Lubis, A. S., Muis, Z. A. & Gultom, E. M., 2018. The effect of contaminant on skid resistance of pavement surface. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126(1), pp. 1-6.
- Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M. & Nejad, F. M., 2016. Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(4), pp. 537-565.
- Mc Lean, J., 1995. *The Relationship between Pavement Condition and Road Safety*, Newcastle: Load- Pavement Interaction Workshop 1995.
- Moretti, L., 2014. Technical and economic sustainability of concrete pavements. *Modern Applied Science*, 8(3), pp. 1-9.
- Olek, J., Weiss, W. J. & Garcia-Villarreal, R., 2004. *Relating surface texture of rigid pavement with noise and skid resistance*. SQDH 2004-1 επιμ. Indiana, United States: Purdue University.
- Oliver, J. W. H., 1989. *Seasonal Variation of Skid Resistance in Australia*, s.l.: Australian Road Research Board.
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J. & Rojí, E., 2020. A skid resistance prediction model for an entire road network. *Construction and Building Materials*, 262(120041).
- Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), 1987. *Report of the Committee on Surface Characteristics*, Brussels, Belgium: In Proceedings of the XVII World Road Congress.
- Puente, E., Lázaro, D. & Alvear, D., 2016. Study of tunnel pavements behaviour in fire by using coupled cone calorimeter - FTIR analysis. *Fire Safety Journal*, 81(1), pp. 1-7.
- Rasol, M. και συν., 2021. Progress and Monitoring Opportunities of Skid Resistance in Road Transport: A Critical Review and Road Sensors. *Remote Sensing*, 13(18), pp. 1-26.
- Rith, M., Kim, Y. K. & Lee, S. W., 2020. Characterization of long-term skid resistance in exposed aggregate concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 256(119423), pp. 1-8.
- Road Research Laboratory, M. o. T., 1969. *Instructions for using the portable skid-resistance tester*. 2 επιμ. London: Her Majesty' s Stationery Office.
- Shafii, M. A., 2009. *Skid resistance and the effect of temperature*. Malaysia: Doctoral thesis, Universiti Teknologi Malaysia.
- Teekman, E., 2012. *The determination of the relationship between friction and traffic accidents*. Hasselt: University of Hasselt.

Wallman, C. & Åström, H., 2001. *Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety: A literature review (VTI meddelande 911A)*, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Wambold, J. C., Antle, C. E., Henry, J. J. & Rado, Z., 1995. *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*, Paris: PIARC World Road Association.

Widyatmoko, D., Cossale, G. & Elliott, R., 2013. *The importance of Road Surface Texture in Active Safety Design and Assessment*. Rome, International Conference Road Safety and Simulation (RSS2013).

Wilson, D. J., 2006. *An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance*. New Zealand: Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland.

Wilson, D. J., 2013. *The Effect of Rainfall and Contaminants on Road Pavement Skid*, New Zealand: Transport Agency research report 515.

Yoshitake, I. και συν., 2016. Abrasion and skid resistance of recyclable fly ash concrete pavement made with limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 112(1), pp. 440-446.

Yu, J. και συν., 2021. Optimizing the Texturing Parameters of Concrete Pavement by Balancing Skid-Resistance Performance and Driving Stability. *Materials*, 14(20), pp. 1-21.

Yun, D., Hu, L. & Tang, C., 2020. Tire–Road Contact Area on Asphalt Concrete Pavement and its Relationship with the Skid Resistance. *Materials*, 13(3), pp. 1-16.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων*. Αθήνα: ΕΜΠ.