



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών & Συγκοινωνιακής Υποδομής

Εργαστήριο Οδοποιίας

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ
ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ
ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΟΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΔΡΑΚΟΝΤΙΔΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών οδοστρωμάτων. Αρχικά, διερευνώνται οι συνιστώσες προσδιορισμού της αντιολισθητικής ικανότητας και οι παράγοντες που την επηρεάζουν, συμπεριλαμβανομένου των μεθόδων και συστημάτων μέτρησης της. Επιπλέον, αναλύεται η επίδραση της σύνθεσης και του όγκου της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας. Στη συνέχεια, μέσω πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση δεδομένων αντιολισθητικής ικανότητας και κυκλοφορίας, προερχόμενα από μετρήσεις από έξι συναπτά έτη σε οδοστρώματα αυτοκινητόδρομου και διερευνάται η προσαρμογή μοντέλων πρόβλεψης σε αυτά. Η αξιολόγηση και η συγκριτική ανάλυση των ανωτέρω αποτελεσμάτων οδηγούν σε συμπεράσματα, τα οποία εστιάζουν κυρίως στο πώς ο αριθμός των βαρέων οχημάτων υπεισέρχεται στην πρόβλεψη της εξέλιξης (υποβάθμισης) της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων υπό την επίδραση της κυκλοφορίας.

ABSTRACT

The present diploma thesis aims at highlighting the degree of influence of traffic on skid resistance. Firstly, it presents and analyzes the components of skid resistance and its dependence on various parameters, by including methods and devices that used to measure friction. Also, the effect of volume and composition of traffic on skid resistance is analyzed. Subsequently, through an experimental process, it presents the findings of a research that explored the relationship between pavement friction performance and traffic using data from a motorway that include pavement friction records and traffic data from six consecutive years and the adjustment of models on them is investigated. Evaluation and comparative analysis of the above results lead to conclusions, which focus mainly on how heavy traffic is involved in predicting the evolution (degradation) of pavements' skid resistance under the influence of traffic.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2	Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος.....	4
2.1	Γενικά	4
2.2	Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας	6
2.3	Περιγραφή δυνάμεων τριβής	9
2.3.1	Διαμήκεις δυνάμεις τριβής.....	9
2.3.2	Πλευρικές δυνάμεις τριβής	14
2.3.3	Συνδυασμός πέδησης και καμπύλης.....	15
2.4	Παράγοντες επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα	16
2.4.1	Συνοπτική αναφορά.....	16
2.4.2	Χαρακτηριστικά επιφάνειας οδοστρώματος	17
2.4.2.1	Υφή επιφάνειας	17
2.4.2.2	Ιδιότητες ασφαλτομίγματος.....	24
2.4.3	Λειτουργικές παράμετροι οχήματος	25
2.4.4	Ιδιότητες ελαστικών	25
2.4.5	Περιβαλλοντικοί παράγοντες	26
2.4.5.1	Θερμοκρασία.....	26
2.4.5.2	Νερό.....	28
2.4.5.3	Χιόνι και πάγος	31
2.4.5.4	Κατάλοιπα	31

2.4.6	Χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας.....	32
2.5	Τρόποι μέτρησης.....	33
2.6	Σύστημα Grip Tester.....	40
3	Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας.....	47
3.1	Στίλβωση αδρανών	47
3.2	Ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κυκλοφορίας	53
4	Πειραματική διαδικασία.....	59
4.1	Περιγραφή δεδομένων	59
4.2	Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα.....	60
4.2.1	Εποχιακή διακύμανση	60
4.2.2	Υπολογισμός και ανάλυση της κυκλοφορίας	63
5	Πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω κυκλοφορίας ...	69
5.1	Γενικά	69
5.2	Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης	70
5.2.1	Ενιαίο μοντέλο.....	70
5.2.2	Μοντέλο για τη δεξιά λωρίδα	72
5.2.3	Μοντέλο για την αριστερή λωρίδα	73
5.3	Επαλήθευση μοντέλων	75
6	Συμπεράσματα.....	78
7	Βιβλιογραφικές αναφορές.....	81

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1 Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004).	5
Εικόνα 2.2 Ποσοστά πρότυπων αξιολόγησης και διαχείρισης της αντιολισθητικής ικανότητας ανά κατηγορία οδού των χωρών της ΕΕ (Haider & Conter 2010).	6
Εικόνα 2.3 Ανάπτυξη των δυνάμεων που δρουν σε έναν περιστρεφόμενο τροχό (Kotek et al. 2014).	7
Εικόνα 2.4 Βασικός μηχανισμός τριβής (Glennon 1996).	8
Εικόνα 2.5 Δύναμη αντίστασης κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης με σταθερή ταχύτητα σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen & Wambold 1999).	11
Εικόνα 2.6 Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen & Wambold 1999).	12
Εικόνα 2.7 Διάγραμμα συντελεστή τριβής-ολίσθησης ελαστικού (Austroads 2005).	13
Εικόνα 2.8 Δυνάμεις οχήματος που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα (Hall et al. 2009).	14
Εικόνα 2.9 Δυνάμεις πέδησης (F_x) & πλευρικές δυνάμεις (F_y) συναρτήσει της πλευρικής δύναμης τριβής (Gillespie 1992).	15
Εικόνα 2.10 Πλευρική δύναμη έναντι διαμήκου δύναμης για σταθερές γωνίες ολίσθησης (Gillespie 1992).	16
Εικόνα 2.11 Κατηγορίες υφής επιφάνειας οδοστρώματος (Sandberg 1998).	18
Εικόνα 2.12 Μακροϋφής και μικροϋφής επιφάνειας οδοστρώματος (Flintsch et al. 2003).	18
Εικόνα 2.13 Μικροϋφή	19
Εικόνα 2.14 Μακροϋφή.	20
Εικόνα 2.15 Σχέση μακροϋφής και μικροϋφής με την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος για διαφορετικές ταχύτητες ολίσθησης (Flintsch et al. 2002).	21
Εικόνα 2.16 Μοντέλο του δείκτη IFI (Hall et al. 2009).	24
Εικόνα 2.17 Σχέση πίεσης ελαστικών και συντελεστή τριβής (Rizenbergs 1968).	26
Εικόνα 2.18 Εποχιακή διακύμανση στο UK (Austroads 2011).	27

Εικόνα 2.19 Επίδραση του νερού στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Henry 2000).	29
Εικόνα 2.20 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης.	30
Εικόνα 2.21 Σύγκριση κατάλοιπων και ποσοστού μείωσης αντιολισθητικής ικανότητας (Lubis et al. 2018).	32
Εικόνα 2.22 Τρόποι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και δημοφιλέστερες συσκευές (Wilson 2006).	34
Εικόνα 2.23 Το σύστημα Grip Tester.	41
Εικόνα 2.24 Λεπτομέρειες συσκευής Grip Tester.	42
Εικόνα 2.25 Επιτόπου μέτρηση με το σύστημα Grip Tester του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.	43
Εικόνα 3.1 Συσχέτιση συντελεστή τριβής με τις διελεύσεις (Rizenbergs 1968).	47
Εικόνα 3.2 Σύγκριση δοκιμών ασφαλομίγματος και δίσκου αδρανών (Do et al. 2007).	50
Εικόνα 3.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων, σχέση διελεύσεων και συντελεστή τριβής από τη συσκευή Wehner-Schulze (Wörner 2012).	51
Εικόνα 3.4 Επιρροή της σύνθεσης της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα (Cornwall County Council 2008).	52
Εικόνα 3.5 Συντελεστής τριβής συσκευής Wehner-Schulze και αριθμός διελεύσεων (Wörner 2012).	53
Εικόνα 3.6 Συσχέτιση συντελεστή τριβής και μέσου ετήσιου ημερήσιου αριθμού διελεύσεων (Goulías & Awoke 2017).	56
Εικόνα 3.7 Σχέση μεταξύ αριθμού διελεύσεων και συντελεστή τριβής (Hofko et al. 2017).	58
Εικόνα 4.1 Οδικό τμήμα υπό μελέτη.	59
Εικόνα 4.2 Ανακατασκευασμένο οδικό τμήμα.	59
Εικόνα 4.3 Εποχιακή διακύμανση αντιολισθητικής ικανότητας δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.	61
Εικόνα 4.4 Εποχιακή διακύμανση αντιολισθητικής ικανότητας αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.	61

Εικόνα 4.5 Εποχιακή διακύμανση αντιολισθητικής ικανότητας δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.	61
Εικόνα 4.6 Εποχιακή διακύμανση αντιολισθητικής ικανότητας αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.	62
Εικόνα 4.7 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.....	65
Εικόνα 4.8 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.	65
Εικόνα 4.9 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.....	66
Εικόνα 4.10 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.	67
Εικόνα 5.1 Ανάπτυξη ενιαίων μοντέλων πρόβλεψης κατεύθυνσης ΑΔ.....	71
Εικόνα 5.2 Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης δεξιάς λωρίδας, κατεύθυνσης ΑΔ.	73
Εικόνα 5.3 Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης αριστερής λωρίδας, κατεύθυνσης ΑΔ..	74
Εικόνα 5.4 Επαλήθευση μοντέλων πρόβλεψης δεξιάς λωρίδας, κατεύθυνσης ΔΑ. ..	75
Εικόνα 5.5 Επαλήθευση μοντέλων πρόβλεψης αριστερής λωρίδας, κατεύθυνσης ΔΑ.	76

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής οδοστρώματος (Hall et al. 2009).	35
Πίνακας 4.1 Τιμές αθροιστικής ετήσιας κυκλοφορίας και αντίστοιχοι συντελεστές τριβής.	64
Πίνακας 4.2 Τιμές αθροιστικής ετήσιας κυκλοφορίας και αντίστοιχοι συντελεστές τριβής.	66
Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών RMSPE.	76

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος αποτελεί βασική απαίτηση για την διαχείριση της οδικής ασφάλειας με βασικό στόχο τη μείωση/εξάλειψη των οδικών ατυχημάτων. Βέβαια, η διατήρηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος σε επίπεδο παρόμοιο με αυτό που είχε αμέσως μετά την κατασκευή του είναι αδύνατο. Αυτό συμβαίνει διότι με το πέρασμα του χρόνου, παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η συνεχής αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου και η γήρανση των υλικών φθείρουν το οδόστρωμα, με αποτέλεσμα, εκτός άλλων, τη μείωση του επιπέδου της αντιολισθητικής ικανότητας και κατά συνέπεια την αύξηση του αριθμού ατυχημάτων. Τα αυτοκινητιστικά ατυχήματα μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τον οδηγό, το όχημα, το περιβάλλον, κλπ. Όμως η καλή αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος αποτελεί βασική παράμετρο για την αποφυγή πρόκλησης ατυχήματος. Για το λόγο αυτόν, παγκοσμίως έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι μέτρησής της και έχουν διεξαχθεί έρευνες για τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Μέσα από αυτές τις έρευνες έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα και σχέσεις υπολογισμού δεικτών που να χαρακτηρίζουν την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος, συνυπολογίζοντας διάφορους παράγοντες.

Η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, τις παραμέτρους λειτουργίας του οχήματος, τις ιδιότητές των ελαστικών του οχήματος, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Πέρα από αυτό όμως, οι Φορείς που διαχειρίζονται τους δρόμους είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση και τη διατήρηση επαρκούς επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ωστόσο, συνήθως οι προδιαγραφές για τις μετρήσεις της αντιολισθητικής ικανότητας αντιμετωπίζουν το υπ' όψη θέμα μονοσήμαντα. Συγκεκριμένα, ορίζουν μια τιμή από μια συσκευή μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψη όλους του παράγοντες που την επηρεάζουν (Omar et al. 2017).

Στους προαναφερόμενους παράγοντες συμπεριλαμβάνεται η κυκλοφορία, η οποία χαρακτηρίζεται όχι μόνον από τον όγκο, αλλά και από τη σύνθεσή της. Αποτελεί μια πολύ βασική παράμετρο που έχει αποτελέσει αντικείμενο διεθνούς έρευνας, όσον αφορά στον συσχετισμό της με την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Δεδομένων των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ανάλυση της επίδρασης της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας ενός ασφαλτικού οδοστρώματος. Ως πρώτο βήμα, θα γίνει ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην αντιολισθητική ικανότητα και τις έννοιες που την περιγράφουν, αλλά και τους διάφορους παράγοντες που την επηρεάζουν, συμπεριλαμβανομένου των μεθόδων και συστημάτων μέτρησης της. Εν συνεχεία, θα γίνει διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία. Τέλος, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, και συγκεκριμένα στοιχεία κυκλοφορίας και αντιολισθητικής ικανότητας, ώστε να αναλυθεί και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας. Οι συγκριτικές αναλύσεις που θα προκύψουν θα αξιοποιηθούν στο πλαίσιο διερεύνησης της δυνατότητας ανάπτυξης ενός μοντέλου πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας, το οποίο να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας ενός αυτοκινητόδρομου.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κύρια κεφάλαια. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος που αποτελεί το πρώτο κεφάλαιο, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της αντιολισθητικής ικανότητας και για ποιον λόγο είναι χρήσιμος ο προσδιορισμός το επιπέδου της αντιολισθητικής

ικανότητας ενός οδοστρώματος. Περιγράφονται οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ επιφάνειας οδοστρώματος και τροχού οχήματος κατά την κίνησή του, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα ενός ασφαλικού οδοστρώματος. Επίσης, καταγράφονται οι συσκευές/συστήματα μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας που υπάρχουν διεθνώς, δίνοντας έμφαση στο σύστημα Grip Tester, το οποίο και περιγράφεται αναλυτικά καθώς τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από μετρήσεις με αυτό.

Στο τρίτο κεφάλαιο διερευνάται ο παράγοντας της κυκλοφορίας. Γίνεται ανασκόπηση παλαιών και πρόσφατων ερευνών που περιλαμβάνουν αποτελέσματα όσον αφορά στην επίδραση που έχει η κυκλοφορία στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην πειραματική ανάλυση στοιχείων κυκλοφορίας και αντιολισθητικής ικανότητας σε ένα υφιστάμενο ασφαλικό οδόστρωμα, με γνώμονα την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναπτύσσονται μοντέλα που περιγράφουν την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας υπό την επίδραση της κυκλοφορίας. Η αξιολόγηση των διαφόρων μοντέλων γίνεται μέσω συγκριτικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων τους, βάσει στατιστικών ελέγχων.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία, οδηγό για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

2 Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος

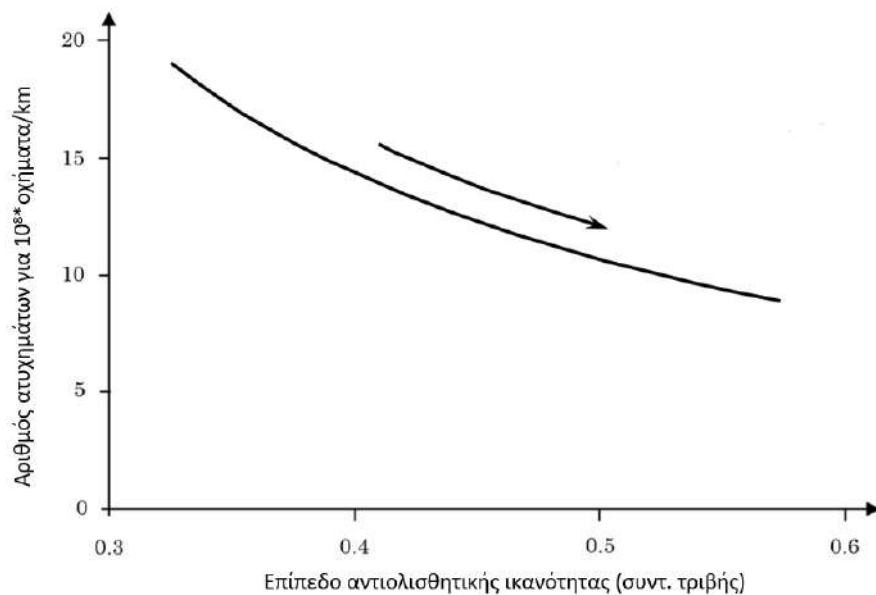
2.1 Γενικά

Η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος αποτελεί βασικό παράγοντα για την ασφάλεια των οχημάτων κατά την οδήγηση, καθώς δίνει στους οδηγούς τη δυνατότητα να ελέγχουν τους ελιγμούς του οχήματος με ασφαλή τρόπο, τόσο σε ευθύγραμμη όσο και σε μη ευθύγραμμη κίνηση. Η ύπαρξη νερού, δηλαδή αν η επιφάνεια είναι υγρή ή σε μορφή πάγου, ή η ύπαρξη ρύπων, σε συνδυασμό με ένα οδόστρωμα χαμηλού επίπεδου αντιολισθητικής ικανότητας, μπορεί να οδηγήσει τον οδηγό σε μειωμένο έλεγχο σταθερότητας του οχήματός του και κατ' επέκταση σε σύγκρουση με έναν άλλο χρήστη της οδού ή εκτροπή από την οδό. Παρ' όλα αυτά, η «ανεπαρκής» αντιολισθητική ικανότητα δεν αποτελεί την πρώτη αιτία ενός ατυχήματος, καθώς ως βασική αιτία θεωρείται ο ανθρώπινος παράγοντας. Σε γενικές γραμμές όμως, όσο μεγαλύτερη είναι η αντιολισθητική ικανότητα κατά τη διεπαφή μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού, τόσο μεγαλύτερος είναι ο έλεγχος που έχει ο οδηγός στο όχημα (Flintsch et al. 2012).

Συγκεκριμένα, όταν δημιουργείται μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης, οι οδηγοί φρενάρουν για να αποφύγουν τη σύγκρουση. Εάν δεν μπορεί να αποφευχθεί η σύγκρουση, τότε η πέδηση θα μειώσει την ταχύτητα πρόσκρουσης και συνεπώς τις πιθανότητες θανάτου ή σοβαρού τραυματισμού. Ωστόσο, η απότομη πέδηση μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη ολίσθησης, με απόλυτη απώλεια ελέγχου και μικρή μείωση της ταχύτητας πρόσκρουσης. Όμως, όταν μια οδική επιφάνεια έχει καλή αντιολισθητική ικανότητα κατά μήκος όλου του οδικού δικτύου, αυτό είναι λιγότερο πιθανό να συμβεί. Ακόμη και όταν εφαρμόζεται πέδηση με τέτοιο τρόπο ώστε ο οδηγός έχει τον έλεγχο του οχήματος, οι ρυθμοί επιβράδυνσης είναι χαμηλότεροι, όταν το οδόστρωμα έχει χαμηλότερο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας. Συνεπώς, η απαιτούμενη απόσταση πέδησης είναι μεγαλύτερη και σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα του οχήματος, οι δυνάμεις πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες.

Επομένως, η αντιολισθητική ικανότητα έχει επίδραση στην σοβαρότητα και τον αριθμό των συντριβών (Douglas 2013). Η επαρκής αντιολισθητική ικανότητα

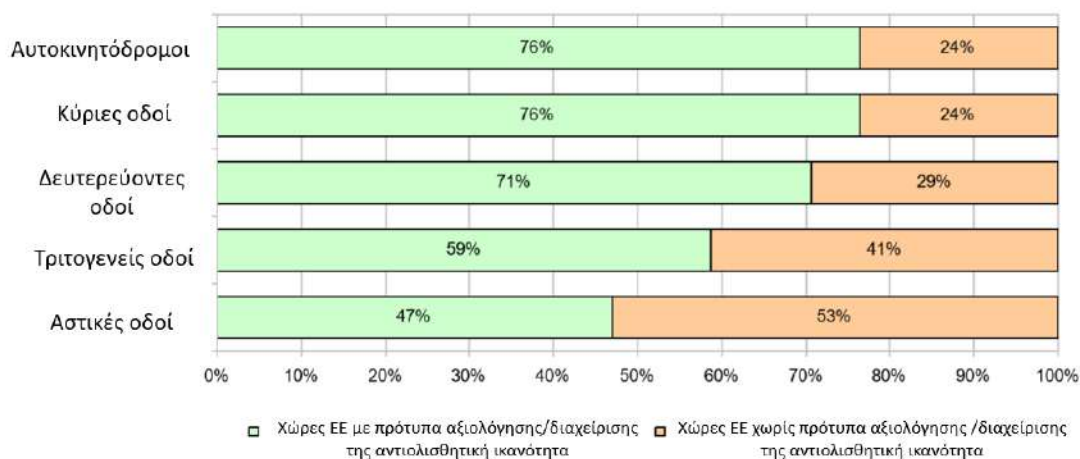
αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για ένα ασφαλές σύστημα μετακινήσεων. Έρευνες που διεξάγονται σε πολλές χώρες και έχουν υποδείξει ότι σε οδοστρώματα που έχουν χαμηλό επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας εμφανίζεται υψηλός αριθμός συγκρούσεων (βλ. εικόνα 2.1). Όσον αφορά στους διαχειριστές της οδού, που είναι υπεύθυνοι για την κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος, θα πρέπει να είναι εξοικειωμένοι με την έννοια του ασφαλούς συστήματος και να κατανοούν τον ζωτικό ρόλο που έχει η αντιολισθητική ικανότητα (Austroads 2011).



Εικόνα 2.1 Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004).

Η ανάγκη για μείωση του αριθμού των ατυχημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού συστημάτων και μεθόδων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας (Austroads 2009), αλλά και της υψής της επιφάνειας του οδοστρώματος. Επίσης, οι στρατηγικές για την ανάλυση και τη χρήση των δεδομένων που συλλέγονται από τα συστήματα μέτρησης για τη διαχείριση της αντιολισθητικής ικανότητας είναι πολύ διαδεδομένες. Η εικόνα 2.2 παρουσιάζει τα ποσοστά των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ανά κατηγορία οδού, που διαθέτουν πρότυπα αξιολόγησης και διαχείρισης της αντιολισθητικής ικανότητας.

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



Εικόνα 2.2 Ποσοστά πρότυπων αξιολόγησης και διαχείρισης της αντιολισθητικής ικανότητας ανά κατηγορία οδού των χωρών της ΕΕ (Haider & Conter 2010).

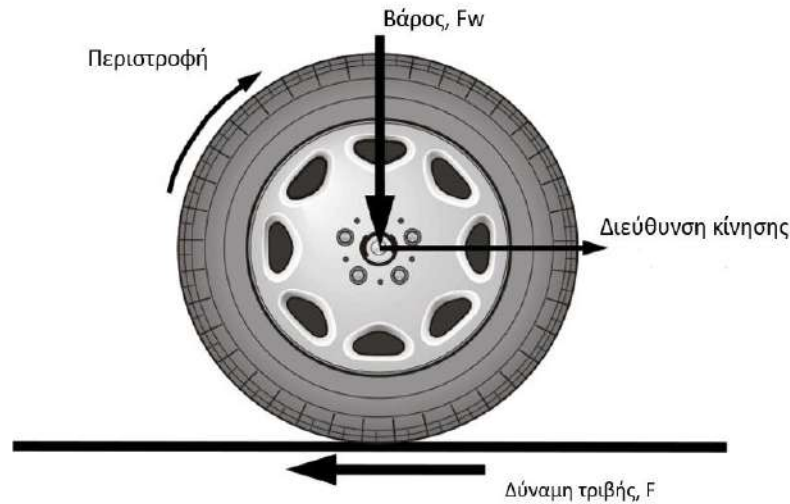
Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση υγρών συνθηκών στην επιφάνεια του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με χαμηλά επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας, ο κίνδυνος συντριβών αυξάνεται σημαντικά (Kuttesch 2004). Έχει παρατηρηθεί από διάφορες έρευνες, ότι οι προσκρούσεις οχημάτων είναι πιο πιθανό να συμβούν σε υγρό οδόστρωμα με χαμηλότερα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της αντιολισθητικής ικανότητας και των υγρών συνθηκών (Douglas 2013, Hall et al. 2009).

Δεδομένα σχετικά με την αντιολισθητική ικανότητα συλλέγονται τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν βασικές παραμέτρους για τον γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών. Συγκεκριμένα, βάσει της αντιολισθητικής ικανότητας προσδιορίζεται η επάρκεια της ελάχιστης απόστασης για στάση (Hall et al. 2009), η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα της καμπύλης και η μέγιστη υπερύψωση της καμπύλης.

2.2 Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας

Η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος καθορίζεται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Σύμφωνα με τον οδηγό για την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος της AASHTO, η δύναμη που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση μεταξύ του ελαστικού του

οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος ονομάζεται δύναμη τριβής (Hall et al. 2009). Αυτή η δύναμη αντίστασης, που απεικονίζεται στην εικόνα 2.3, δημιουργείται κατά την ολίσθηση του τροχού επί της επιφάνειας του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.3 Ανάπτυξη των δυνάμεων που δρουν σε έναν περιστρεφόμενο τροχό (Kotek et al. 2014).

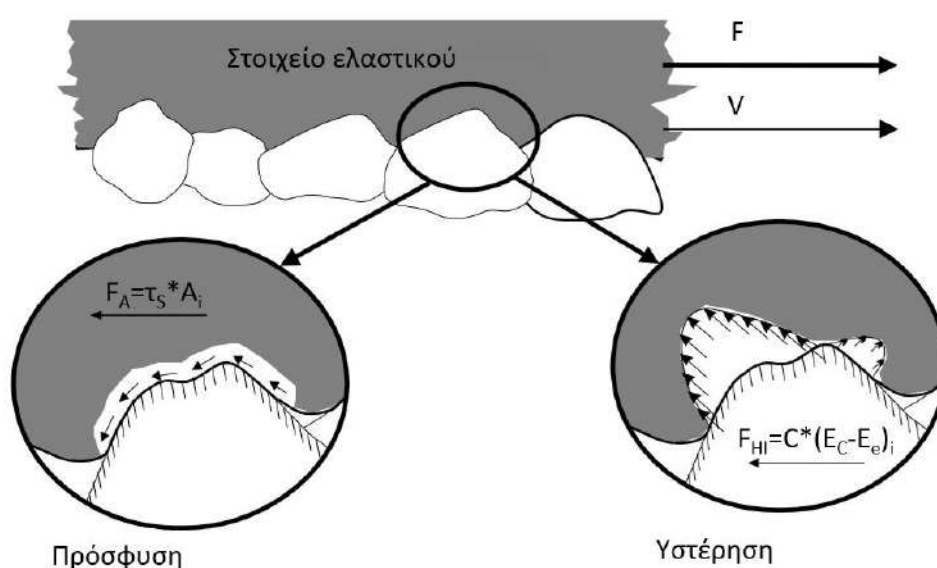
Η δύναμη αντίστασης, που χαρακτηρίζεται με τον αδιάστατο συντελεστή τριβής, μ , είναι ο λόγος της εφαπτομένης δύναμης τριβής (F) του ελαστικού του τροχού και της επιφάνειας κατά μήκος της κίνησης προς την κατακόρυφη δύναμη, δηλαδή το βάρος (F_W) και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 2.1 (Hall et al. 2009):

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

Ο συντελεστής τριβής αποτελεί ουσιαστικά την τιμή που χαρακτηρίζει το επίπεδο της αντιολισθητική ικανότητας ενός οδοστρώματος.

Αναλύοντας περισσότερο τον μηχανισμό της τριβής διαπιστώνεται ότι η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος είναι το αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο κύριων παραμέτρων, της πρόσφυσης και της υστέρησης (βλ. εικόνα 2.4). Η πρόσφυση προκύπτει από τη μικρή κλίμακας επαφή του ελαστικού του οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Είναι μια συνάρτηση της διατμητικής αντοχής και της περιοχής επαφής των δύο επιμέρους επιφανειών. Η υστέρηση των δυνάμεων τριβής προκύπτει από την απώλεια ενέργειας λόγω της

παραμόρφωσης του ελαστικού του οχήματος. Η παραμόρφωση αναφέρεται συνήθως ως περιτύλιξη του ελαστικού γύρω από την υφή του αδρανούς. Όταν ένα ελαστικό συμπιέζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, η κατανομή των τάσεων οδηγεί στην αποθήκευση της ενέργειας παραμόρφωσης εντός του ελαστικού. Καθώς το ελαστικό χαλαρώνει, ένα μέρος αυτής της αποθηκευμένης ενέργειας ανακτάται, ενώ το άλλο μέρος χάνεται με τη μορφή θερμότητας (υστέρηση), κάτι που είναι μη αναστρέψιμο. Αυτή η απώλεια βοηθάει στην πέδηση και ακινητοποίηση του οχήματος (Hall et al. 2009).



Εικόνα 2.4 Βασικός μηχανισμός τριβής (Glennon 1996).

Αν και υπάρχουν άλλες παράμετροι της δύναμης τριβής του οδοστρώματος, όπως π.χ. η διάτμηση του ελαστικού, αυτές είναι ασήμαντες σε σύγκριση με τη δύναμη πρόσφυσης και υστέρησης. Έτσι, η δύναμη τριβής μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των δυνάμεων τριβής πρόσφυσης και υστέρησης (εξίσωση 2.2) (Hall et al. 2009).

$$F = F_A + F_H \quad (2.2)$$

όπου,

F = Δύναμη τριβής

F_A = Δύναμη πρόσφυσης

F_H = Δύναμη υστέρησης

Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά επιφάνειας του οδοστρώματος. Δηλαδή, την επαφή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος και τις ιδιότητες του ελαστικού. Επίσης, επειδή το υλικό των ελαστικών είναι ιξωδοελαστικό, η θερμοκρασία και η ταχύτητα ολίσθησης επηρεάζουν σημαντικά τις δύο παραμέτρους (Hall et al. 2009).

Η δύναμη πρόσφυσης καθορίζεται κυρίως από την μικροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος, επειδή αναπτύσσεται στη μικροκλίμακα της διεπαφής ελαστικού και οδοστρώματος. Αντίθετα, η δύναμη υστέρησης καθορίζεται κυρίως από την μακροϋφή της επιφάνειας, αφού αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και της υφής μεγαλύτερης κλίμακας, η οποία χαρακτηρίζεται από τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος όπως το ποσοστό κενών. Ως αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, η πρόσφυση καθορίζει τη τριβή σε ομαλές και στεγνές επιφάνειες οδοστρωμάτων. Ενώ η υστέρηση είναι το κυρίαρχο στοιχείο σε υγρές και τραχείς επιφάνειες οδοστρωμάτων (Hall et al. 2009).

2.3 Περιγραφή δυνάμεων τριβής

2.3.1 Διαμήκεις δυνάμεις τριβής

Οι διαμήκεις δυνάμεις τριβής εμφανίζονται κατά την διάρκεια της κίνησης σε ευθύγραμμη κατεύθυνση, μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ο τροχός βρίσκεται σε λειτουργία είτε ελεύθερης κύλισης είτε σταθερής πέδησης. Κατά τη λειτουργία ελεύθερης κύλισης (χωρίς πέδηση), η σχετική ταχύτητα μεταξύ της περιμέτρου του ελαστικού και του οδοστρώματος - που αναφέρεται ως η ταχύτητα ολίσθησης - είναι μηδέν, αν και μπορεί να υπάρχουν μερικές αλληλεπιδράσεις που συμβάλλουν στην αντίσταση κύλισης. Στη λειτουργία σταθερής πέδησης, η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται από μηδέν στην ενδεχόμενη μέγιστη ταχύτητα του οχήματος. Η ακόλουθη μαθηματική σχέση (εξίσωση 2.3) εξηγεί την ταχύτητα ολίσθησης (Hall et al. 2009, Meyer 1982):

$$S = V - V_p = V - (0.68 * \omega * r) \quad (2.3)$$

όπου,

S= Ταχύτητα ολίσθησης, mi/h

V= Ταχύτητα οχήματος, mi/h

V_p= Μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο, mi/h

ω= Γωνιακή ταχύτητα ελαστικού, rad/sec

r= Μέση ακτίνα ελαστικού, ft

Και πάλι, κατά τη διάρκεια της κατάστασης ελεύθερης κύλισης του ελαστικού, η μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο (V_p) είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος. Έτσι, η ταχύτητα ολίσθησης είναι μηδέν.

Για έναν ακινητοποιημένο τροχό ή σε κατάσταση πλήρης πέδησης, η μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο είναι μηδέν, οπότε η ταχύτητα ολίσθησης είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος (V). Στη κατάσταση ακινητοποιημένου τροχού αναφέρεται ότι έχουμε 100% ολίσθηση, ενώ σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης 0% ολίσθηση. Οι ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις δίνουν τον τύπο υπολογισμού του ποσοστού ολίσθησης (Hall et al. 2009, Meyer 1982):

$$SR = \frac{V-V_P}{V} * 100 = \frac{S}{V} * 100 \quad (2.4)$$

όπου,

SR= Ποσοστό ταχύτητας ολίσθησης

V= Ταχύτητα οχήματος, mi/h

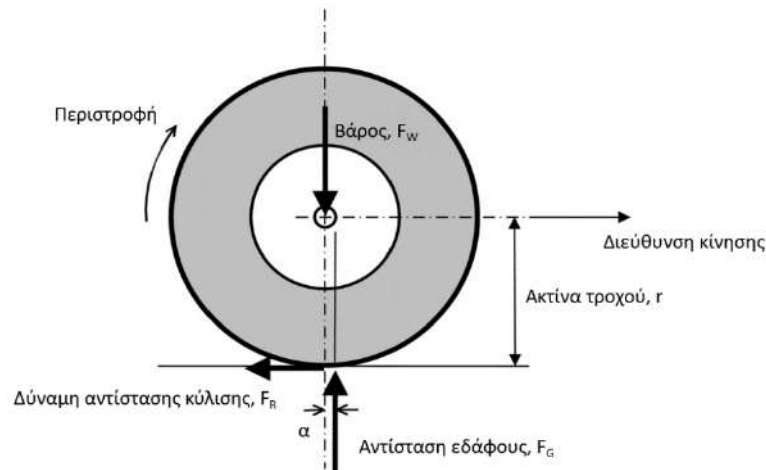
V_p= Μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο, mi/h

S= Ταχύτητα ολίσθησης, mi/h

Ομοίως, κατά την κατάσταση ελεύθερης κύλισης του ελαστικού, η μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο ισούται με την ταχύτητα του οχήματος άρα η ταχύτητα ολίσθησης είναι μηδέν και το ποσοστό ολίσθησης (SR) είναι 0%. Για έναν ακινητοποιημένο τροχό, η μέση περιφερειακή ταχύτητα του ελαστικού είναι μηδέν, άρα η ταχύτητα ολίσθησης ισούται με την ταχύτητα του οχήματος (V) και έτσι το ποσοστό ολίσθησης (SR) είναι 100%.

Στην εικόνα 2.5 απεικονίζεται η δύναμη εδάφους που δρα σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης ενός ελαστικού. Σε αυτή τη κατάσταση, η δύναμη του εδάφους βρίσκεται στο

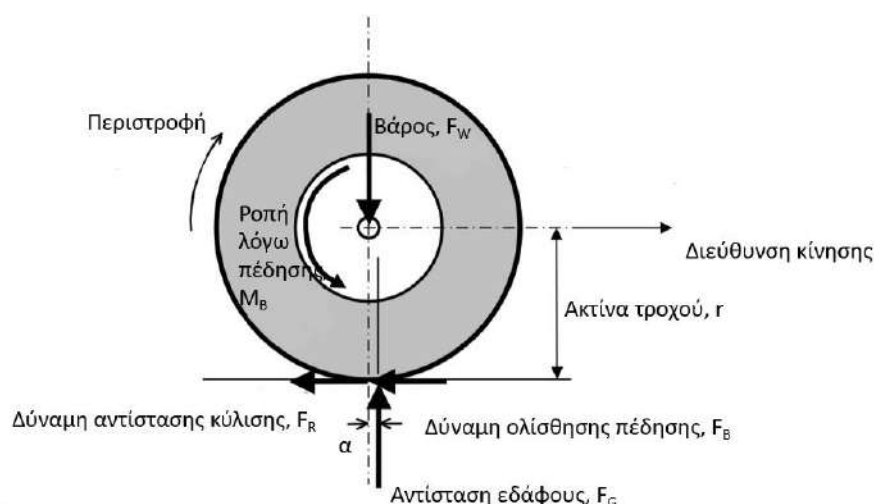
κέντρο της περιοχής πίεσης του ελαστικού και του εδάφους, αλλά σε απόσταση a από το κέντρο του ελαστικού. Αυτή η απόσταση προκαλεί μια ροπή που πρέπει να ξεπεραστεί για να περιστραφεί το ελαστικό. Η δύναμη που απαιτείται για την αντιμετώπιση αυτής της ροπής ονομάζεται δύναμη αντίστασης κύλισης (F_R). Η τιμή a είναι συνάρτηση της ταχύτητας και αυξάνεται με την ταχύτητα. Έτσι, η δύναμη αντίστασης στη κύλιση αυξάνεται με την ταχύτητα (Hall et al. 2009).



Εικόνα 2.5 Δύναμη αντίστασης κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης με σταθερή ταχύτητα σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen & Wambold 1999).

Στη λειτουργία σταθερής πέδησης (βλ. εικόνα 2.6), απαιτείται μια πρόσθετη δύναμη που ονομάζεται δύναμη ολίσθησης πέδησης (F_B) για την αντιμετώπιση της προστιθέμενης ροπής (M_B) που δημιουργείται από την πέδηση. Η δύναμη είναι ανάλογη του επιπέδου πέδησης και του προκύπτοντος ποσοστού ολίσθησης. Η συνολική δύναμη τριβής είναι το άθροισμα της δύναμης (F_R) και της ολίσθησης πέδησης (F_B) (Hall et al. 2009).

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



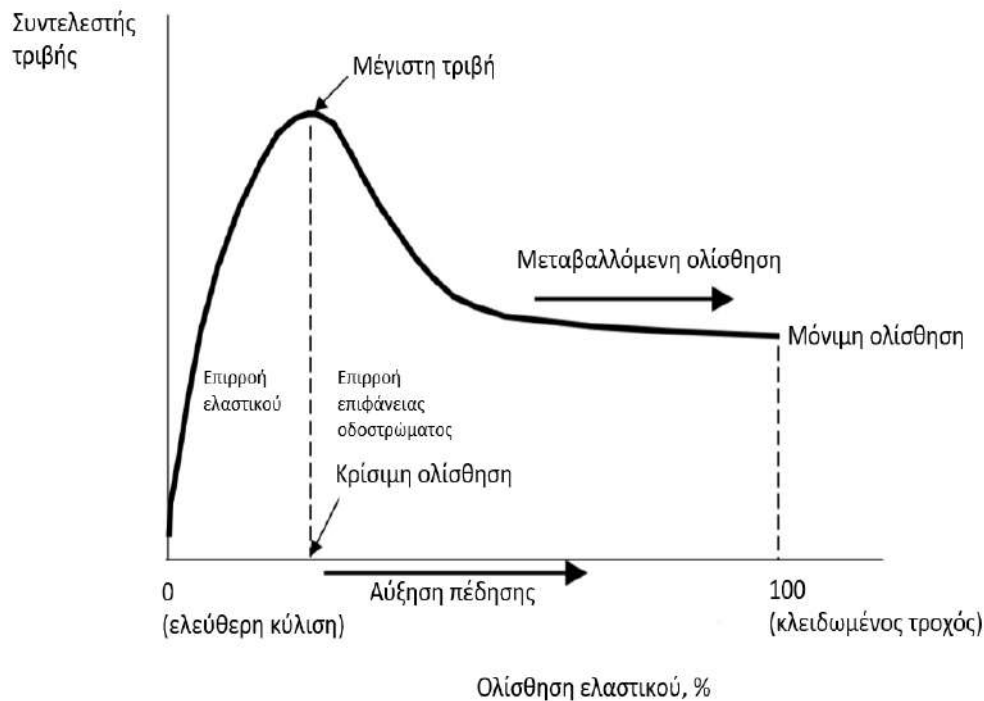
Εικόνα 2.6 Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen & Wambold 1999).

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ ενός ελαστικού και του οδοστρώματος αλλάζει ανάλογα την ολίσθηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7 (Henry 2000). Όταν ένας οδηγός αρχίζει να κάνει έναν ελιγμό που συνεπάγεται αλλαγή ταχύτητας ή κατεύθυνσης, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος, επιτρέπουν στο όχημα να επιταχύνει, να επιβραδύνει ή να ακολουθήσει μια καμπύλη.

Κατά τη διάρκεια της πέδησης, καθώς η δύναμη πέδησης αυξάνεται, η δύναμη αντίστασης σε ολίσθηση, δηλαδή ο συντελεστής τριβής αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή. Αυτό συμβαίνει κανονικά μεταξύ ποσοστού ολίσθησης 18% και 30% και η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του συντελεστή τριβής ονομάζεται κρίσιμη ολίσθηση. Σε αυτό το σημείο, το ελαστικό συνεχίζει να επιβραδύνεται σε σχέση με την ταχύτητα του οχήματος και να ολισθαίνει στην επιφάνεια του δρόμου, ακόμα κι αν ο τροχός εξακολουθεί να περιστρέφεται. Αν η δύναμη πέδησης συνεχίσει, το ελαστικό ολισθαίνει ακόμα περισσότερο. Ο συντελεστής τριβής μειώνεται σε μια τιμή γνωστή ως ο συντελεστής μόνιμης ολίσθησης, η οποία συμβαίνει σε ποσοστό ολίσθησης 100%. Όταν δε ολοκληρωθεί το κλείδωμα του τροχού, ο τροχός σταματάει να περιστρέφεται και το ελαστικό ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών τριβής που

αντιστοιχεί στη κρίσιμη ολίσθηση και στη μόνιμη ολίσθηση μπορεί να ισούται με ποσοστό ολίσθησης 50% και είναι πολύ μεγαλύτερη σε υγρά οδοστρώματα απ' ό τι σε ξηρά οδοστρώματα (Raslančičius et al., 2016) Σε ξηρή επιφάνεια του οδοστρώματος, υπάρχει συχνά μικρή διαφορά μεταξύ των συντελεστών της μέγιστης τριβής και της μόνιμης ολίσθησης (Hall et al. 2009).

Το διάγραμμα της εικόνας 2.7 αποτελεί τη βάση για το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχού γνωστού ως ABS (Anti-Blocking System), το οποίο εκμεταλλεύεται το τμήμα του διαγράμματος με τις τιμές της ολίσθησης που βρίσκονται αριστερά από την κρίσιμη ολίσθηση και ελαχιστοποιεί την πλευρική ολίσθηση.



Εικόνα 2.7 Διάγραμμα συντελεστή τριβής-ολίσθησης ελαστικού (Austroads 2005).

Τα οχήματα με σύστημα ABS έχουν σχεδιαστεί για να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν τα φρένα επανειλημμένα, έτσι ώστε η ολίσθηση να συγκρατείται κοντά στην κρίσιμη ολίσθηση. Η πέδηση απενεργοποιείται πριν επιτευχθεί η κρίσιμη ολίσθηση και ενεργοποιείται σε καθορισμένο χρόνο ή ποσοστό ολίσθησης κάτω από την κρίσιμη ολίσθηση. Ο χρόνος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του εκάστοτε συστήματος (Hall et al. 2009).

2.3.2 Πλευρικές δυνάμεις τριβής

Μια άλλη σημαντική πτυχή της αντιολισθητικής ικανότητας σχετίζεται με την πλευρική δύναμη τριβής. Η πλευρική δύναμη τριβής εμφανίζεται όταν ένα όχημα αλλάζει κατεύθυνση, κινείται σε καμπύλες με εγκάρσια κλίση ή λόγω ύπαρξης διασταυρούμενων ανέμων. Η σχέση μεταξύ των δυνάμεων που δρουν στο ελαστικό του οχήματος και στην επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς το όχημα κινείται περιγράφεται από την παρακάτω σχέση (εξίσωση 2.5) (Hall et al. 2009):

$$F_S = \frac{V^2}{15R} - e \quad (2.5)$$

όπου,

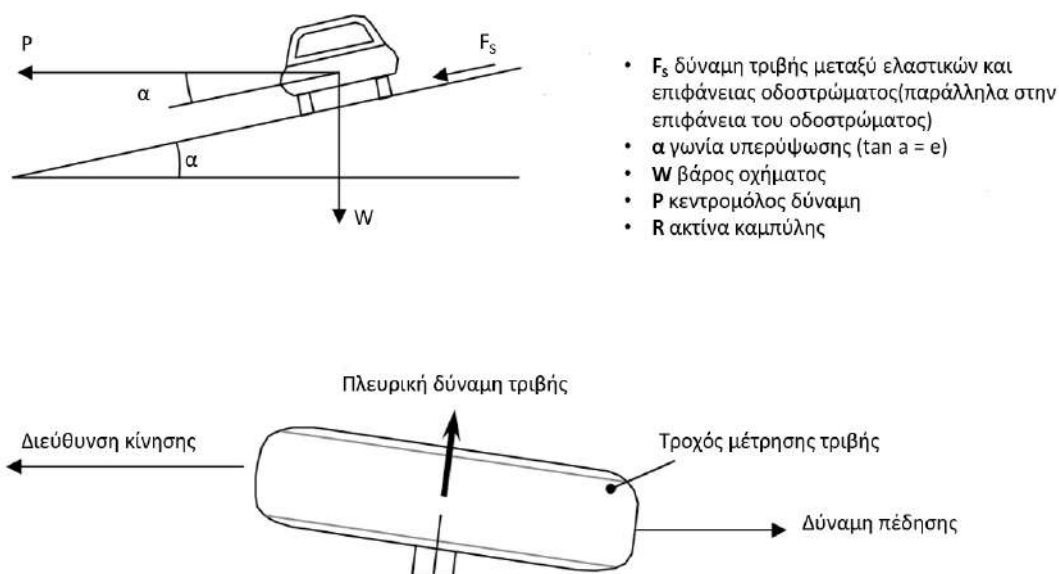
F_S = Πλευρική δύναμη τριβής

V = Ταχύτητα οχήματος, mi/h

R = Ακτίνα της καμπύλης από το κέντρο βάρους του οχήματος, δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας σε καμπύλη, ft

e = Υπερύψωση οδοστρώματος, ft/ft

Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς του οχήματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8.

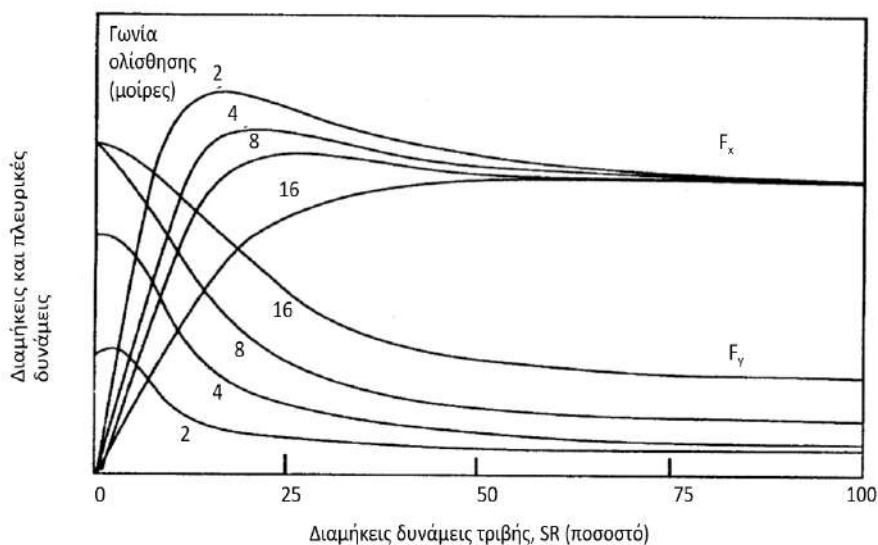


Εικόνα 2.8 Δυνάμεις οχήματος που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα (Hall et al. 2009).

Συγκεκριμένα, η πλευρική δύναμη τριβής δρα ως αντιστάθμισμα στην κεντρομόλο δύναμη που αναπτύσσεται καθώς το όχημα εκτελεί μη ευθύγραμμη κίνηση.

2.3.3 Συνδυασμός πέδησης και καμπύλης

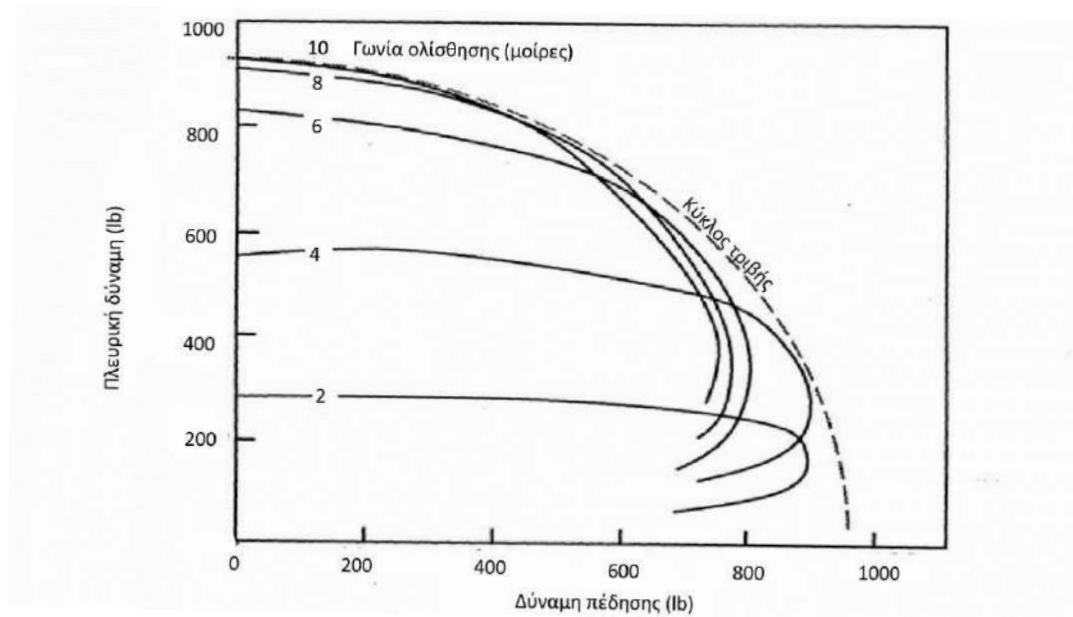
Κατά τη διάρκεια που ένας οδηγός επιχειρεί πέδηση σε καμπύλο οδικό τμήμα, ο οδηγός κινδυνεύει είτε να μην ακινητοποιήσει τόσο γρήγορα το όχημα του είτε να χάσει τον έλεγχο λόγω μειωμένων πλευρικών δυνάμεων. Κατά τη λειτουργία στα όρια της πρόσφυσης των ελαστικών, η αλληλεπίδραση των διαμήκων και πλευρικών δυνάμεων είναι τέτοια ώστε όταν αυξάνεται μία δύναμη, η άλλη θα πρέπει να μειώνεται αναλογικά (Hall et al. 2009). Επομένως, η εφαρμογή της διαμήκου πέδησης μειώνει σημαντικά την πλευρική δύναμη. Ομοίως, η εφαρμογή υψηλής πλευρικής δύναμης τριβής μειώνει τη διαμήκη πέδηση. Το διάγραμμα της εικόνας 2.9 απεικονίζει την παραπάνω σχέση των δυνάμεων (Gillespie, 1992).



Εικόνα 2.9 Δυνάμεις πέδησης (F_x) & πλευρικές δυνάμεις (F_y) συναρτήσει της πλευρικής δύναμης τριβής (Gillespie 1992).

Το άθροισμα των δύο συνδυασμένων δυνάμεων είναι γνωστό ως κύκλος τριβής ή έλλειψη τριβής (Radt & Milliken 1960). Όταν το άθροισμα παραμένει σταθερό ονομάζεται κύκλος και όταν είναι σχεδόν σταθερό έλλειψη (βλ. εικόνα 2.10).

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



Εικόνα 2.10 Πλευρική δύναμη έναντι διαμήκου δύναμης για σταθερές γωνίες ολίσθησης (Gillespie 1992).

Όπως φαίνεται από την εικόνα 2.10, το αθροιστικό διάνυσμα των δύο συνδυασμένων δυνάμεων θα πρέπει να μην υπερβαίνει τα όρια της αντοχής του ελαστικού όπως ορίζεται από τον κύκλο τριβής ή την έλλειψη τριβής. Επομένως, οι παράμετροι του κύκλου και της έλλειψης τριβής εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ελαστικού και του οδοστρώματος.

2.4 Παράγοντες επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα

2.4.1 Συνοπτική αναφορά

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις δυνάμεις τριβής του οδοστρώματος μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε κατηγορίες, που είναι οι εξής:

- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος.
- Οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος.
- Οι ιδιότητες των ελαστικών.
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες.
- Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας.

Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος περιλαμβάνουν την υφή (μικροϋφή και μακροϋφή), την ομαλότητα και τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος. Στις λειτουργικές παράμετροι του οχήματος εμπεριέχονται η ταχύτητα ολίσθησης, δηλαδή η ταχύτητα του οχήματος, η δύναμη πέδησης και οι ελιγμοί που μπορούν να προκληθούν κατά την κίνηση του οχήματος. Στις ιδιότητες των ελαστικών του οχήματος εμπεριέχονται η υφή της επιφάνειας του πέλματος και η κατάστασή του, η σύνθεση και η σκληρότητα του ελαστικού, η πίεση των ελαστικών, το φορτίο και η θερμοκρασία. Όσον αφορά στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, αναφέρονται στις καιρικές συνθήκες και στα κατάλοιπα που μπορεί να έχουν απομείνει στην επιφάνεια του οδοστρώματος, είτε από τους χρήστες του δρόμου (καύσιμα, λάδια, κλπ), είτε μετά από έντονα καιρικά φαινόμενα (χιόνι, πάγος, νερό, σκόνη). Τέλος, η σύνθεση και ο όγκος αποτελούν βασικές παραμέτρους της κυκλοφορίας που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα (Wallman & Astrom 2001).

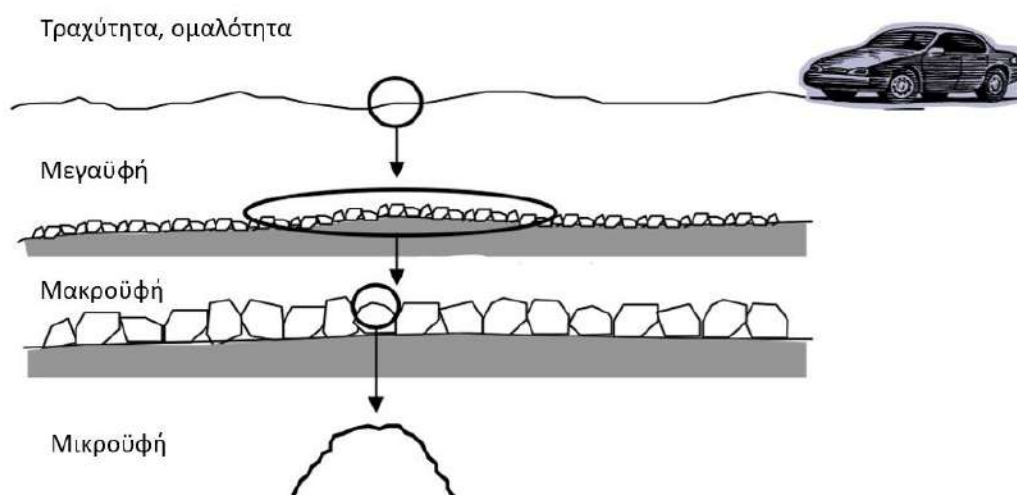
Οι προαναφερόμενοι παράγοντες συμβάλλουν στον καθορισμό της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος. Για το λόγο αυτόν, η αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια διαδικασία προσδιορισμού των διάφορων παραγόντων που την επηρεάζουν. Ιδανικά στην περίπτωση που καθοριστούν πλήρως όλοι οι παράγοντες, η αντιολισθητική ικανότητα μπορεί να καθοριστεί πλήρως (Hall et al. 2009). Παρακάτω αναλύονται οι βασικότεροι από τους παράγοντες που την επηρεάζουν.

2.4.2 Χαρακτηριστικά επιφάνειας οδοστρώματος

2.4.2.1 Υφή επιφάνειας

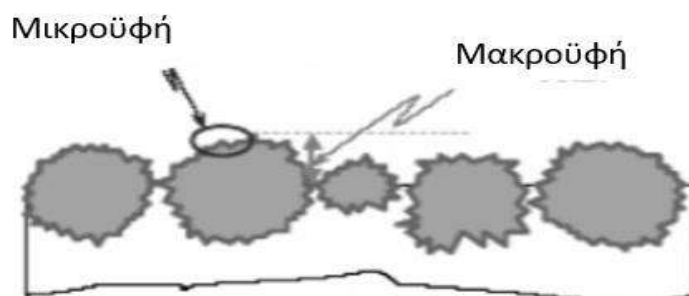
Η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μία θεωρητικώς επίπεδη επιφάνεια με χαρακτηριστικές διαστάσεις κατά μήκος της επιφάνειας. Η υφή ανάλογα με την κλίμακα στην οποία την εξετάζουμε χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες (βλ. εικόνα 2.11) (Sandburg 1995, Λοΐζος & Πλατή 2015).

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



Εικόνα 2.11 Κατηγορίες υφής επιφάνειας οδοστρώματος (Sandberg 1998).

Οι κατηγορίες που επηρεάζουν άμεσα την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος είναι η μικροϋφή και η μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος (βλ. εικόνα 2.12) (Hu et al. 2016, Henry 2000).



Εικόνα 2.12 Μακροϋφής και μικροϋφής επιφάνειας οδοστρώματος (Flintsch et al. 2003).

- **Μικροϋφή**

Η μικροϋφή ορίζεται ως το εύρος των αποκλίσεων από τη θεωρητικής επίπεδη επιφάνειας με μήκη κύματος από 1 μm έως 0,5 mm (Λοΐζος & Πλατή 2015). Η υφή σε αυτήν την κλίμακα παρέχεται είτε από την κρυσταλλική δομή των αδρανών στο ανώτερο στρώμα του υλικού επίστρωσης είτε από λεπτά σωματίδια, όπως η άμμος,

στο ασφαλτομίγμα της στρώσης κυκλοφορίας (βλ. εικόνα 2.13). Η μικροϋφή επηρεάζει την αντιολισθητική ικανότητα σε υγρή και ξηρή κατάσταση σε όλες τις ταχύτητες, αλλά κυρίως σε χαμηλές (AASHTO 2008), καθώς η αλληλεπίδραση των ελαστικών του οχήματος με τα αδρανή δημιουργούν δυνάμεις έλξης.



Εικόνα 2.13 Μικροϋφή

Τα αδρανή που περιέχονται στο ασφαλτόμιγμα χωρίς καμία σκληρότητα και με μικρή τιμή μικροϋφής θεωρούνται ανεπιθύμητα και μπορεί εύκολα να προκαλέσουν απώλεια του ελέγχου ενός οχήματος. Ωστόσο, οι πολύ υψηλές τιμές μικροϋφής μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τον ρυθμό φθοράς των ελαστικών.

Όταν η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι υγρή, οι ιδιότητες της επιφανειακής τάσης του νερού δημιουργούν μία μεμβράνη νερού στο οδόστρωμα. Έτσι, μειώνεται η επαφή μεταξύ του ελαστικού και των αδρανών, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της διαθέσιμης αντιολισθητικής ικανότητας. Αυτή η μεμβράνη νερού σχηματίζεται πιο εύκολα σε ομαλή επιφάνεια με χαμηλό επίπεδο μακροϋφής και μικροϋφής. Με λίγα λόγια η αντιολισθητική ικανότητα εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο οι ιδιότητες των αδρανών βοηθούν στην απομάκρυνση του νερού από την διεπαφή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος.

Η μικροϋφή επηρεάζεται άμεσα από την κυκλοφορία, η οποία συμβάλλει στην απώλεια της ανομοιομορφίας των αδρανών. Ειδικότερα, τα υψηλά ποσοστά βαρέων οχημάτων στην κυκλοφορία λειαίνουν τη συνολική επιφάνεια του οδοστρώματος

(Stevenson 1997). Η αντίσταση σε στίλβωση των αδρανών μπορεί να μετρηθεί στο εργαστήριο με τη βοήθεια του Polished Stone Test (Polished Stone Value-PSV) (Λοΐζος & Πλατή 2015), αν και τόσο στη Νέα Ζηλανδία όσο και στο Ηνωμένο Βασίλειο, η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ότι δεν αποτελεί έναν επαρκή δείκτη απόδοσης της αντιολισθητικής ικανότητας στο πεδίο. Άλλες συσκευές που έχουν αναπτυχθεί για εργαστηριακή χρήση, είναι η συσκευή στίλβωσης του πανεπιστημίου του Auckland και η συσκευή Wehner Schulze, των οποίων τα αποτελέσματα αποδεικνύονται ικανοποιητικά για την πρόβλεψη της ικανότητας των αδρανών να αντισταθούν σε στίλβωση (Wilson & Black, Dunford 2008).

Παρ' όλα αυτά, η ικανότητα αντίστασης σε στίλβωση με το πέρασμα διελεύσεων είναι πιο περίπλοκη, καθώς δεν εξαρτάται μόνο από την σκληρότητα του αδρανούς (αρχική μικροϋφή) αλλά και από τις γεωλογικές πηγές και την ανθεκτικότητα των ορυκτών αδρανών (Wilson & Black 2009).

- **Μακροϋφή**

Η μακροϋφή κυμαίνεται σε μήκη κύματος μεταξύ 0,5 έως 50 mm και μπορεί να επηρεαστεί από το μέγεθος, το σχήμα και την απόσταση των χονδρόκοκκων αδρανών στο υλικό επίστρωσης ή από την σωστή συμπίκνωση του ασφαλτομίγματος κατά την κατασκευή. Ουσιαστικά είναι ο βαθμός τραχύτητας που προσδίδεται από τις αποκλίσεις μεταξύ των αδρανών (βλ. εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14 Μακροϋφή.

Η μακροϋφή επηρεάζει την ικανότητα αποστράγγισης του νερού από την επιφάνεια και επιτρέπει στο πέλμα του ελαστικού να παραμορφωθεί. Κατά συνέπεια αναπτύσσεται η δύναμη υστέρησης (κεφάλαιο 2.2). Η δύναμη υστέρησης σε συνδυασμό με την ύπαρξη νερού, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της επαφής

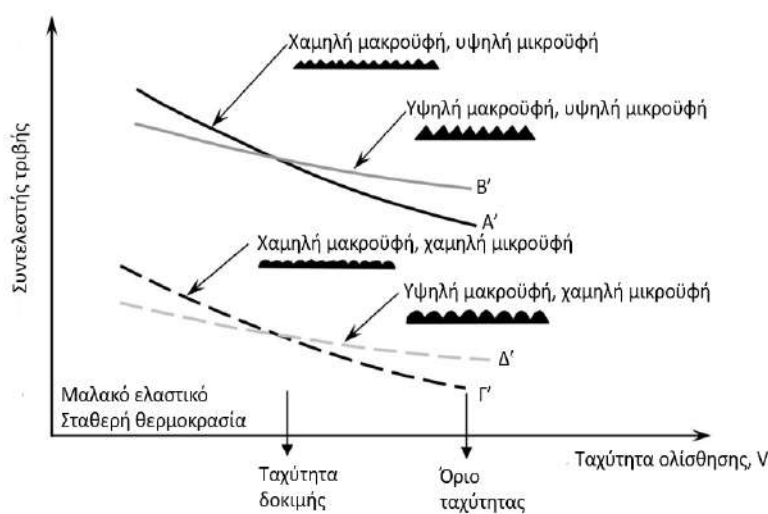
μεταξύ της επιφάνειας του ελαστικού και του οδοστρώματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υδρολίσθηση και επηρεάζει κυρίως οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες πάνω από 65 mi/h (105 km/h) (PIARC 1987).

Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η μακροϋφή, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση κύλισης των ελαστικών, άρα και η αντιολισθητική ικανότητα που αναπτύσσεται (Austroads 2011).

Η βασική μέθοδος μέτρησης της μακροϋφής είναι η 'κηλίδα της άμμου' (sand patch) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της μακροϋφής σε συγκεκριμένη θέση με χαρακτηριστικό μέγεθος το μέσο βάθος υφής (MTD- Mean Texture Depth). Ωστόσο, ιδιαίτερα διαδεδομένα είναι τα συστήματα laser με χαρακτηριστικό μέγεθος το Mean Profile Depth (MPD) που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μακροϋφής για ένα συνεχές τμήμα ενός οδοστρώματος.

Οι όροι «υφή επιφάνειας» και «βάθος υφής» χρησιμοποιούνται συχνά από τους μηχανικούς ως εναλλακτικοί τρόποι ονομασίας της μακροϋφής της επιφάνειας του οδοστρώματος (Austroads 2005).

Συνοψίζοντας όλα παραπάνω, από το διάγραμμα της εικόνας 2.15 βλέπουμε τις σχετικές επιδράσεις της μικροϋφής, της μακροϋφής και της ταχύτητας στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.15 Σχέση μακροϋφής και μικροϋφής με την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος για διαφορετικές ταχύτητες ολίσθησης (Flintsch et al. 2002).

Από την εικόνα 2.15 παρατηρείται ότι η μικροϋφή επηρεάζει το μέγεθος του συντελεστή τριβής, ενώ η μακροϋφή επηρεάζει την κλίση της καμπύλης, δηλαδή την ταχύτητα ολίσθησης. Σε χαμηλές ταχύτητες, η μικροϋφή κυριαρχεί τόσο σε υγρές όσο και σε ξηρές συνθήκες. Σε υψηλότερες ταχύτητες, η παρουσία υψηλής μακροϋφής προσφέρει μεγαλύτερο συντελεστή τριβής (καμπύλη Β' & Δ') καθώς διευκολύνει την αποστράγγιση του νερού (Hall et al. 2009).

Κατά την διεξαγωγή του διεθνούς πειράματος της PIARC (World Road Association) το 1992, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη εναρμόνισης των συστημάτων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας ώστε να είναι συγκρίσιμα, στην οποία συμμετείχαν εκπρόσωποι από 16 χώρες. Το πείραμα διεξήχθη σε 54 τοποθεσίες στις Η.Π.Α. και στην Ευρώπη και περιλάμβανε 51 διαφορετικά συστήματα μέτρησης. Ένα από τα κύρια αποτελέσματα του πειράματος PIARC ήταν η ανάπτυξη του Διεθνούς Δείκτη Τριβής (IFI-International Friction Index). Ο δείκτης IFI τυποποίησε την εξάρτηση της αντιολισθητικής ικανότητας και της ταχύτητας ολίσθησης του ελαστικού έτσι ώστε όλα τα αποτελέσματα από οποιαδήποτε συσκευή να μπορούν να συγκριθούν με αυτόν τον δείκτη (Wambald et al. 1995).

Το πείραμα της PIARC επιβεβαίωσε ότι η μακροϋφή επηρεάζει τη ταχύτητα ολίσθησης. Μια απότομη αρνητική κλίση της καμπύλης ταχύτητας ολίσθησης-συντελεστή τριβής θεωρείται επικίνδυνη. Ο οδηγός θα αντιμετωπίσει μια απροσδόκητη απώλεια ελέγχου όταν το πεντάλ φρένου ωθηθεί στο μέγιστο και η ισχύς πέδησης δεν είναι η μέγιστη. Επομένως, η επιθυμητή αρνητική κλίση είναι η μικρότερη ή ακόμη και μηδενική. Η κλίση των τιμών της αντιολισθητικής ικανότητας αποτελεί ένα εκθετικό μοντέλο όπου η ταχύτητα (S_p) κυμαίνεται σε εύρος τιμών από 0,6 έως 310 mi/h (~1 έως 500 km/h). Ο δείκτης IFI υπολογίζεται στην χαρακτηριστική τιμή των 37 mi/h (~60 km/h) (Hall et al. 2009).

Ο δείκτης IFI αποτελείται από δύο συνιστώσες, το $F(60)$ και τη ταχύτητα S_p και συμβολίζεται $IFI(F(60), S_p)$ (βλ. εικόνα 2.16). Ο δείκτης IFI βασίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο, που ονομάζεται μοντέλο τριβής PIARC, ως συνάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης και της μακροϋφής. Η ταχύτητα S_p και ο αριθμός τριβής $F(60)$ υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.7, 2.8, 2.9 (ASTM E 1960):

$$S_p = a + b \times TX \quad (2.7)$$

όπου,

S_p = Ταχύτητα δοκιμής

a, b = Σταθερές βαθμονόμησης που εξαρτώνται από τη μέθοδο μέτρησης της μακροϋφής

Για MPD (ASTM E 1845), $a= 14.2$ and $b= 89.7$

Για MTD (ASTM E 965), $a= -11.6$ and $b= 113.6$

TX = Τιμή της μακροϋφής (MPD- Mean Profile Depth ή MTD-Mean Texture Depth), mm

$$FR(60) = FR(S) \times e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (2.8)$$

όπου,

S_p = Ταχύτητα δοκιμής, km/h

S = Επιλεγμένη ταχύτητα ολίσθησης, km/h

$FR(S)$ = Τιμή δύναμης τριβής σε επιλεγμένη ταχύτητα ολίσθησης S

$FR(60)$ = Προσαρμοσμένη τιμή τριβής $FR(S)$ σε ταχύτητα ολίσθησης (S) και ταχύτητα δοκιμής 60 km/h

$$F(60) = A + B \times FR(60) + C \times TX \quad (2.9)$$

όπου,

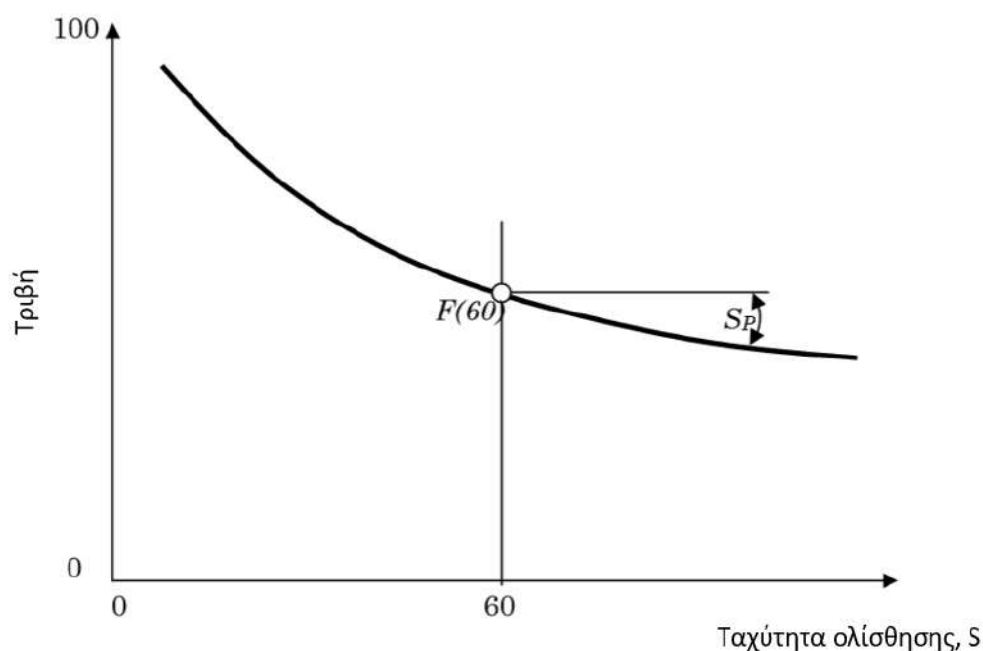
$F(60)$ = Δείκτης τριβής IFI

C = Σταθερές βαθμονόμησης που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του ελαστικού

A, B = Σταθερές βαθμονόμησης που εξαρτώνται από τη συσκευή μέτρησης

Προφανώς μπορούν να γίνουν αναγωγές και σε άλλες ταχύτητες δοκιμής, μεγαλύτερες ή μικρότερες των 60 km/h.

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



Εικόνα 2.16 Μοντέλο του δείκτη IFI (Hall et al. 2009).

Το διάγραμμα της εικόνας 2.16 περιγράφει το IFI μέσα από τη σχέση μεταξύ τριβής και ταχύτητας ολίσθησης (Hall et al. 2009).

2.4.2.2 Ιδιότητες ασφαλτομίγματος

Οι ιδιότητες του ασφαλτομίγματος του οδοστρώματος συμβάλλουν στον καθορισμό της υφής της επιφάνειας (Haddock & O'Brien 2013). Βασικό ρόλο στις ιδιότητες αυτές έχουν τα αδρανή, τα οποία μπορεί να προκύπτουν από τη διάσπαση της πετρωμάτων κατά τη διαδικασία θραύσης. Επομένως το ασφαλτόμιγμα ίσως περιέχει θρυμματισμένα υλικά. Τα θρυμματισμένα υλικά που προέρχονται από τη φύση είναι συνήθως εξαιρετικά λεία και ακατάλληλα για χρήση στην επίστρωση.

Καθώς οι ιδιότητες επηρεάζουν κυρίως τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα της υφής, αντιστέκονται στη συνολική στίλβωση και την φθορά των αδρανών υπό συσσωρευμένες κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές φορτίσεις. Επομένως, όσο καλύτερη είναι η ποιότητα των υλικών, τόσο καλύτερη είναι η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος.

2.4.3 Λειτουργικές παράμετροι οχήματος

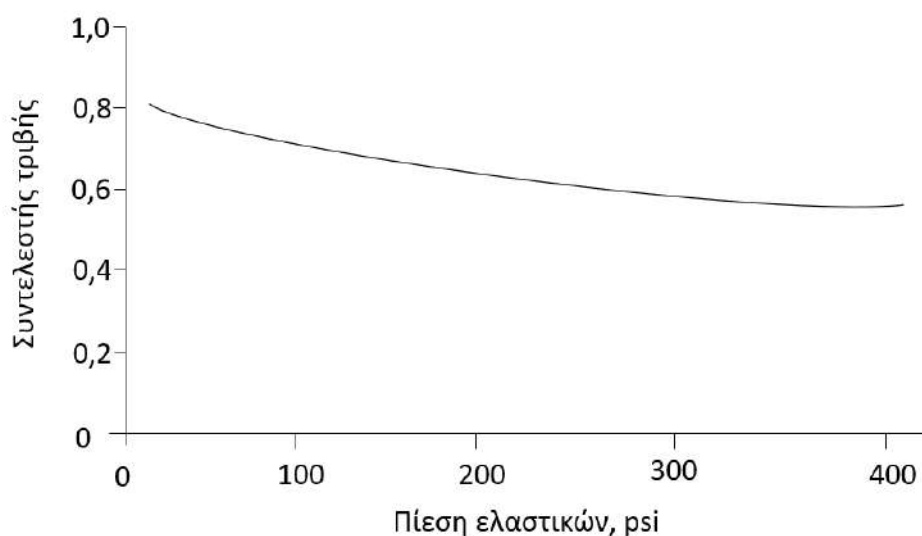
Ο συντελεστής τριβής μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος και την δύναμη πέδησης. Οι έννοιες και οι διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.3.

2.4.4 Ιδιότητες ελαστικών

Η υφή του ελαστικού (το ύψος και το βάθος των αυλακώσεων) και η κατάστασή του έχουν σημαντική επίδραση 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 αυλακώσεων που υπάρχουν στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το βάθος των αυλακώσεων του ελαστικού, ιδίως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες διαπερνώντας στάσιμα νερά. Ορισμένες μελέτες ανέφεραν μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας υπό υγρές συνθήκες από 45% έως 70% για τα πλήρως φθαρμένα ελαστικά, σε σύγκριση με τα νέα (Hill & Henry 1982).

Η πίεση των ελαστικών μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα σε υψηλές ταχύτητες (βλ. εικόνα 2.17). Τα ελαστικά που δεν είναι φουσκωμένα αρκετά επιτρέπουν στο κέντρο του πέλματος να συμπτυχθεί και να γίνει πολύ κοίλο, με αποτέλεσμα τη συστολή των αυλακώσεων αποστράγγισης στο πέλμα του ελαστικού και τη μείωση της πίεσης επαφής. Το αποτέλεσμα είναι, το ελαστικό να παγιδεύει νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος παρά να του επιτρέπει να ρέει μέσα από τις αυλακώσεις (Hall et al. 2009).

Αντίθετα, τα υπερβολικά φουσκωμένα ελαστικά, προκαλούν μόνο μια μικρή απώλεια της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος (Kulakowski et al. 1990) καθώς μειώνουν το φαινόμενο παγίδευσης νερού και παράγουν υψηλότερη πίεση πιέζοντας το νερό να απομακρυνθεί από το ελαστικό. Ωστόσο, αυξημένη πίεση ελαστικών οδηγεί σε μικρότερη περιοχή επαφής μεταξύ ελαστικών και επιφάνειας οδοστρώματος (Hall et al. 2009).



Εικόνα 2.17 Σχέση πίεσης ελαστικών και συντελεστή τριβής (Rizenbergs 1968).

Η επίδραση της πίεσης των ελαστικών στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 2.17. Παρατηρείται ότι ενώ η πίεση των ελαστικών αυξάνεται, ο συντελεστής τριβής δεν μειώνεται σημαντικά (Rizenbergs 1968).

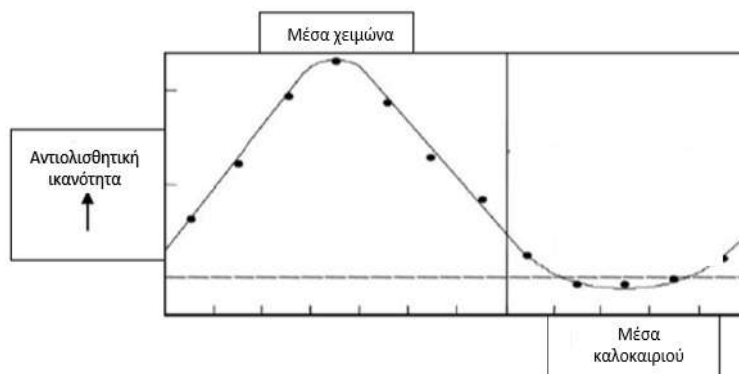
2.4.5 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

2.4.5.1 Θερμοκρασία

Αρκετοί ερευνητές έχουν διερευνήσει τον παράγοντα της θερμοκρασίας χωρίς να μπορέσουν να τον ποσοτικοποιήσουν. Οι Jayawickrama και Thomas (1998) διαπίστωσαν ότι η διακύμανση του συντελεστή τριβής μπορεί να μεταβληθεί από την μία ημέρα στην άλλη. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται σε κλιματικές μεταβολές.

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η αντιολισθητική ικανότητα είναι χαμηλότερη από τις άλλες εποχές του χρόνου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται είτε στη συσσώρευση στιλβωμένων σωματιδίων από το οδόστρωμα που μειώνουν την μακροϋφή ή μπορεί να είναι υπολείμματα από οχήματα όπως λάδι και γράσο (HD/Standards 2015). Κατά τη διάρκεια έντονων

βροχοπτώσεων το οδόστρωμα ξεπλένεται, η μακροϋφή είναι υψηλότερη και κατά συνέπεια το οδόστρωμα έχει μεγαλύτερη αντιολισθητική ικανότητα (Jayawickrama & Thomas 1998) (βλ. εικόνα 2.18). Ο Colony (1992) ανέφερε επίσης ότι η διακύμανση της αντιολισθητικής ικανότητας κατά την διάρκεια του έτους έχει τις υψηλότερες τιμές μετά την περίοδο με τις περισσότερες βροχοπτώσεις, δηλαδή τον χειμώνα και τις χαμηλότερες τιμές την περίοδο με τις λιγότερες βροχοπτώσεις στο τέλος του καλοκαιριού. Επίσης, οι Faung και Hughes (2007) ανίχνευσαν ότι η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας ακολουθεί αυτό το κυκλικό πρότυπο, με τις υψηλότερες τιμές την περίοδο με τις περισσότερες βροχοπτώσεις και τις χαμηλές τιμές την περίοδο με τις λιγότερες βροχοπτώσεις.



Εικόνα 2.18 Εποχιακή διακύμανση στο UK (Austroads 2011).

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες του ελαστικού (Jayawickrama & Thomas 1998). Τα ελαστικά των οχημάτων είναι ιξωδοελαστικά υλικά και οι ιδιότητές τους μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από μεταβολές στη θερμοκρασία.

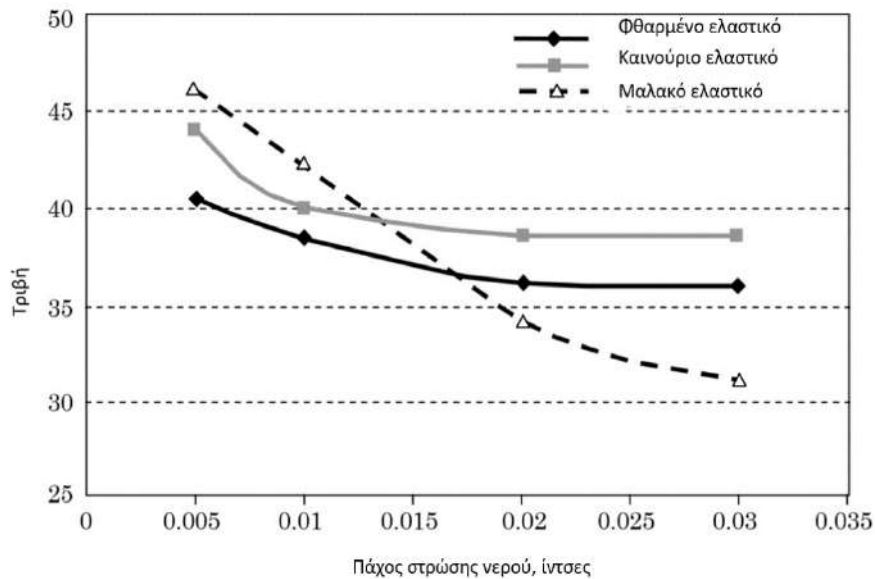
Η πρόσφυση ως συνιστώσα της αντιολισθητικής ικανότητας είναι η διατμητική δύναμη που δημιουργείται στη διεπαφή της περιοχής επαφής και η υστέρηση οφείλεται στις απώλειες απόσβεσης στο ελαστικό (Li et al 2004). Μεγαλύτερη θερμοκρασία καθιστά το ελαστικό πιο εύκαμπτο. Αυτό μειώνει την απώλεια ενέργειας του ελαστικού (υστέρηση) και μειώνει τον μετρημένο συντελεστή τριβής.

Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει καμία απόδειξη για αυτόν τον μηχανισμό στη διεθνή βιβλιογραφία. Ενώ μερικές μελέτες έδειξαν ότι η επίδραση της θερμοκρασίας είναι μικρής σημασίας, πολλοί άλλοι υποδεικνύουν ότι η θερμοκρασία είναι σημαντικός παράγοντας (Jayawickrama & Thomas 1998). Οι Bazlamit και Reza (2005) έδειξαν ότι ανεξάρτητα από την υφή της επιφάνειας, η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την υστέρηση της δύναμης τριβής. Δεδομένου ότι η υστέρηση αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο μέρος της συνολικής δύναμης τριβής, η αντιολισθητική ικανότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Bazlamit & Reza 2005).

2.4.5.2 Νερό

Το νερό, με τη μορφή βροχοπτώσεων, μπορεί να λειτουργήσει ως λιπαντικό, μειώνοντας σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Η επίδραση του πάχους της στρώσης νερού στην αντιολισθητική ικανότητα είναι ελάχιστη σε χαμηλές ταχύτητες (<32 km/h), αλλά είναι αρκετά έντονη σε υψηλότερες ταχύτητες (> 64 km/h).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 2.19, ο συντελεστής τριβής που αναπτύσσεται σε μια υγρή επιφάνεια οδοστρώματος, μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται το πάχος της στρώσης νερού μεταξύ του ελαστικού του οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Όσο αυξάνεται το πάχος της στρώσης νερού, τόσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής. Μάλιστα, σε περίπτωση που τα ελαστικά του οχήματος είναι φθαρμένα, η επίδραση του πάχους της στρώσης νερού είναι εντονότερη (Hall et al. 2009).

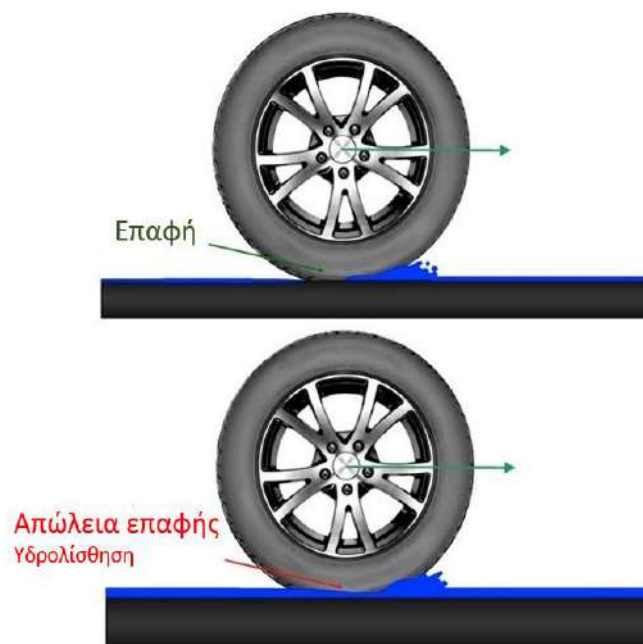


Εικόνα 2.19 Επίδραση του νερού στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Henry 2000).

Μια πολύ μικρή ποσότητα νερού μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών από μια μελέτη που χρηματοδοτήθηκε από την FHWA (Harwood et al. 1987) δείχνουν ότι μόλις 0,002 in (~0,05 mm) νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι δυνατόν να μειώσουν την αντιολισθητική ικανότητα κατά 20% έως 30% έναντι της αντιολισθητικής ικανότητας υπό ξηρές συνθήκες. Σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και μια μεμβράνη νερού 0,001 in (~0,025 mm) μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα. Μια τέτοια λεπτή στρώση είναι πιθανό να σχηματιστεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε ώρας κατά την οποία έχει πέσει τουλάχιστον 0,01 in (~0,25 mm) βροχής (Hall et al. 2009).

Σε περίπτωση εμφάνισης μεγάλης στρώσης νερού και με οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες, παρατηρείται το φαινόμενο της υδρολίσθησης. Η υδρολίσθηση συμβαίνει όταν το ελαστικό του οχήματος διαχωρίζεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος λόγω της πίεσης του νερού που συσσωρεύεται μεταξύ της επιφάνειας και των ελαστικών (Horne & Buhlmann 1983). Πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο που επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως το πάχος της στρώσης νερού, τη ταχύτητα του οχήματος, τη μακροϋφή του οδοστρώματος, το βάθος αυλακώσεων της επιφάνειας ελαστικού, την πίεση του ελαστικού και την επιφάνεια επαφής ελαστικών. Στην εικόνα 2.20 παρουσιάζεται το φαινόμενο.

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος



Εικόνα 2.20 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης.

Όταν ένα όχημα κινείται σε μια υγρή επιφάνεια με ταχύτητα που δεν δίνει στο ελαστικό τον απαιτούμενο χρόνο για να απομακρύνει το νερό από τη διεπαφή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος, εμφανίζεται το φαινόμενο της υδρολίσθησης. Συνεπώς, χάνεται η επαφή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος και επομένως η πρόσφυση στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Davis 2006). Ένα παχύ στρώμα νερού που συσσωρεύεται μπροστά από το ελαστικό και σταδιακά επεκτείνεται κάτω από αυτό, «ανασηκώνει» το ελαστικό από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια έλξης, παρόλο που ο τροχός μπορεί ακόμα να περιστραφεί. Όταν μια μεγάλη στρώση νερού σχηματίζεται σε μια επιφάνεια οδοστρώματος και η αποστράγγιση είναι ανεπαρκής κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων ή λόγω φθοράς του οδοστρώματος υπάρχουν λακκούβες, η υδρολίσθηση γίνεται πιο έντονη. Η απώλεια άμεσης επαφής του ελαστικού με το οδόστρωμα μπορεί να λάβει χώρα, βέβαια, και σε ταχύτητες χαμηλές όπως 40 έως 45 mi/h (~64 έως 72 km/h), σε λάκκους με βάθος περίπου 25 mm και μήκους 9 m (Hayes et al. 1983).

Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται και η ποσότητα νερού που συσσωρεύεται στο κέντρο του ελαστικού. Οι συνθήκες όπου το ελαστικό αρχίζει να χάνει επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος αναφέρονται ως μερική υδρολίσθηση και μπορεί

να συμβεί σε χαμηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση που το όχημα κινείται με υψηλότερες ταχύτητες, η επαφή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος είναι αμελητέα και εμφανίζεται πλήρης υδρολίσθηση. Σε αυτό το στάδιο η πέδηση και οι στροφές έχουν πολύ περιορισμένο έλεγχο (Wilson 2006).

Η μακροϋφή συμβάλλει στην μείωση του φαινομένου της υδρολίσθησης. Σε οδοστρώματα που εμφανίζουν καλή μακροϋφή και τα χαρακτηριστικά του πέλματος των ελαστικών είναι σε πολύ καλό επίπεδο, η επίδραση της υδρολίσθησης είναι μειωμένη και συμβαίνει κυρίως στην περίπτωση που κάποια αστοχία στο οδόστρωμα επιτρέψει σημαντική συσσώρευση νερού κατά μήκος του οδοστρώματος. Η AASHTO έχει αναπτύξει μια μέθοδο για τον γεωμετρικό σχεδιασμό της διατομής του οδοστρώματος που επιταχύνει την απορροή και την αποστράγγιση του νερού από την επιφάνεια του οδοστρώματος με σκοπό την μείωση της εμφάνισης της υδρολίσθησης (FHWA 2011).

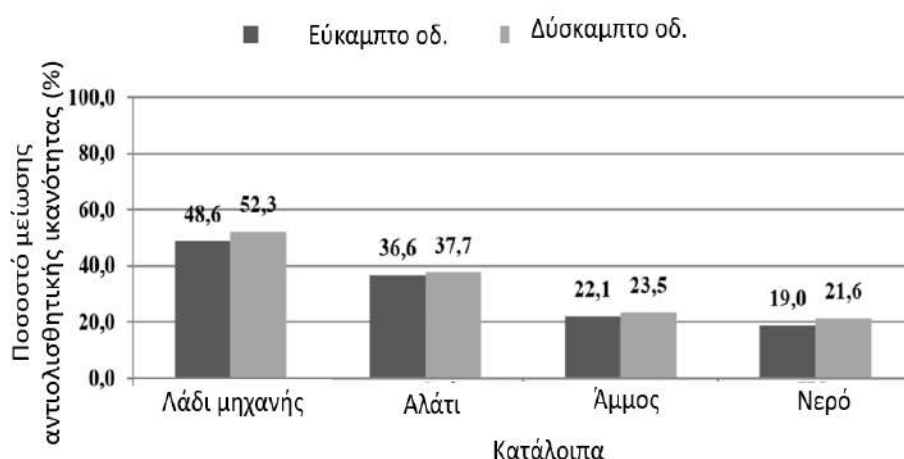
2.4.5.3 Χιόνι και πάγος

Το χιόνι και ο πάγος στην επιφάνεια του οδοστρώματος παρουσιάζουν την πιο επικίνδυνη κατάσταση για τη πέδηση ή τη στροφή των οχημάτων. Το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος είναι τέτοιο ώστε σχεδόν οποιαδήποτε απότομη πέδηση ή ξαφνική αλλαγή κατεύθυνσης έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση του ακινητοποιημένου τροχού και την απώλεια σταθερότητας κατεύθυνσης του οχήματος. Το NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) (Al Qadi et al. 2002) σημείωσε ότι η αντιολισθητική ικανότητα των οχημάτων μπορεί να υποβαθμιστεί δραστικά αν τα ελαστικά δεν έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος λόγω του πάγου και του χιονιού.

2.4.5.4 Κατάλοιπα

Οι επιβλαβείς ουσίες που συναντώνται συνήθως στις εθνικές οδούς είναι κυρίως σκόνη, λάδια οχημάτων, υπολείμματα λιωμένου ελαστικού. Η ύπαρξη οποιοδήποτε είδους εξωγενούς προς το οδόστρωμα ουσίας, στη διεπαφή του ελαστικού και της

επιφάνειας του οδοστρώματος, έχει δυσμενή επίδραση στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (βλ. εικόνα 2.21). Οι εξωγενείς αυτές ουσίες δρουν όπως το λιπαντικό μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου σε κινητήρα, μειώνοντας τη δύναμη τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών. Όσο πιο παχύρρευστος είναι ο ρύπος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Εξωγενείς ουσίες μπορούν να θεωρηθούν και το νερό, ο πάγος, το χιόνι.



Εικόνα 2.21 Σύγκριση κατάλοιπων και ποσοστού μείωσης αντιολισθητικής ικανότητας (Lubis et al. 2018).

Αμερικάνοι ερευνητές μέτρησαν την αντιολισθητική ικανότητα σε χώρο στάθμευσης και σε αγροτικό δρόμο με τη μέθοδο του βρετανικού εκκρεμούς πριν και μετά τον καθαρισμό της με σκούπα και νερό. Η αντιολισθητική ικανότητα στα σημεία επέμβασης βελτιώθηκε σημαντικά μετά το καθαρισμό της επιφάνειας και αυτό αποδόθηκε στην απομάκρυνση της σκόνης (Shakely, Henry & Heinsohn 1980). Τέλος, σε περίπτωση ύπαρξης σκληρών ρύπων και σκόνης, επιταχύνεται ο ρυθμός φθοράς της επιφάνεια του οδοστρώματος.

2.4.6 Χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας

Η κυκλοφορία, τόσο ως προς τη σύνθεσή της, δηλαδή την ύπαρξη ή μη βαρέων οχημάτων, όσο και ως προς τον όγκο, δηλαδή τον συνολικό αριθμό διελεύσεων των

οχημάτων, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος. Η διαδικασία με την οποία επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής θα αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

2.5 Τρόποι μέτρησης

Υπάρχουν ποικίλα είδη συστημάτων και μεθόδων που είναι διαθέσιμα για τη μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας και έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικές χώρες τα τελευταία χρόνια. Όμως, τα εμπορικά διαθέσιμα μέσα ουσιαστικά βασίζονται στην ίδια αρχή μέτρησης. Δηλαδή, τη μέτρηση της αντίστασης ενός ελαστικού που αφήνεται να ολισθήσει σε μια βρεγμένη επιφάνεια οδοστρώματος, υπό την επιβολή εφαρμοζόμενου φορτίου (Austroads 2005). Η προκύπτουσα οριζόντια τριβή, πρόσφυση ή δύναμη αντίστασης στην ολίσθηση του ελαστικού μετράται, ενώ το κάθετο επιβαλλόμενο φορτίο είτε μετράται είτε θεωρείται σταθερό.

Η μετρούμενη δύναμη τριβής εξαρτάται από το φορτίο που επιβάλλεται και συνεπώς υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής (SFC, f ή μ) όπως αναλύεται και στο κεφάλαιο 2.1.

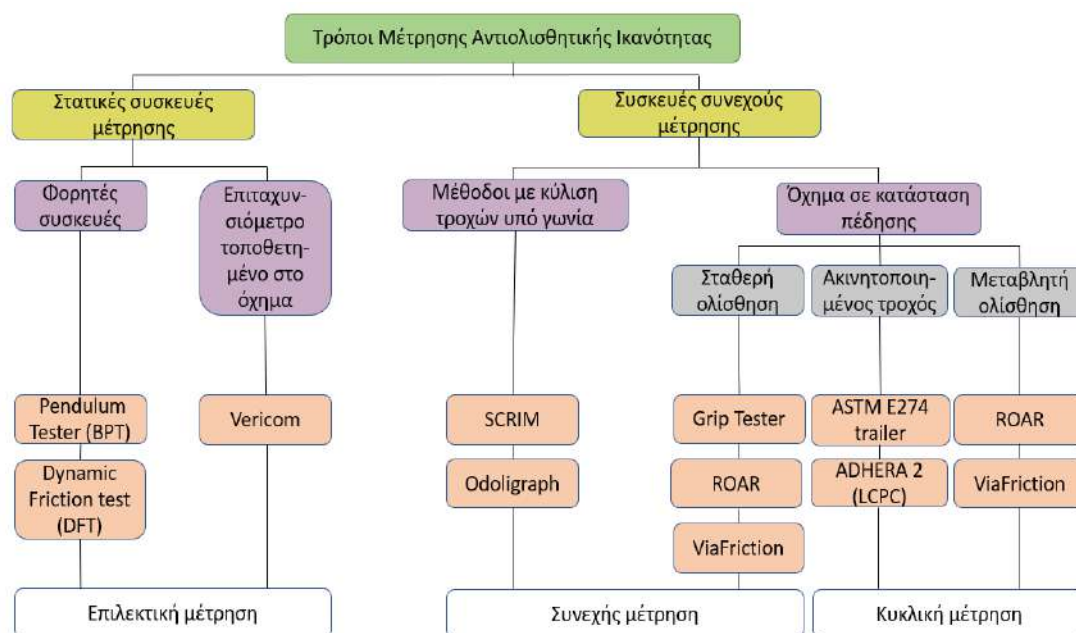
Το εύρος των διαθέσιμων τεχνικών μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας είναι συνήθως ταξινομημένο είτε σε:

- συστήματα για επιτόπου μετρήσεις, ή
- εργαστηριακά συστήματα.

Τα συστήματα για επιτόπου μετρήσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, εκείνες που δύναται να μετρούν συνεχώς σε μεγάλη έκταση επιφανειών οδοστρώματος και ονομάζονται συσκευές συνεχούς μέτρησης τριβής και εκείνες που μετρούν την αντιολισθητική ικανότητα τακτικά σε συγκεκριμένες θέσεις και ονομάζονται στατικές συσκευές. Οι συσκευές συνεχούς μέτρησης μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν είτε ως μέθοδοι με κύλιση τροχών υπό γωνία είτε ως μέθοδοι πέδησης τροχού (Wilson & Chan 2013).

Η μέθοδος πέδησης τροχού μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε μεθόδους κλειδώματος τροχών, μεταβλητής ολίσθησης και σταθερής ολίσθησης. Οι πιο συνηθισμένες στατικές συσκευές μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν τακτικά στο

πεδίο σε οδική επιφάνεια είτε στο εργαστήριο. Η εικόνα 2.22 απεικονίζει την ταξινόμηση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και παραδείγματα των κοινώς χρησιμοποιούμενων συσκευών μέτρησης (Wilson & Chan 2013).



Εικόνα 2.22 Τρόποι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και δημοφιλέστερες συσκευές (Wilson 2006).

Λόγω των σημαντικών διαφορών τους, η άμεση σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών αποτελεσμάτων της συσκευής δεν είναι δυνατή. Η μετρηθείσα αντιολισθητική ικανότητα εξαρτάται από μεταβλητές παραμέτρους όπως ο λόγος ολίσθησης, η ταχύτητα με την οποία κινείται η συσκευή, το κατακόρυφο φορτίο, η σύνθεση ελαστικού, το πέλμα, η πίεση του ελαστικού και η ποσότητα του επιφανειακού νερού που υπάρχει. Ορισμένες από τις συσκευές υπολογίζουν την μέγιστη τριβή και μερικές μεταβάλλουν το ποσοστό ολίσθησης σε μια προσπάθεια να λειτουργούν γύρω από το επίπεδο της μέγιστης τριβής όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. κεφάλαιο 2.2).

Στον πίνακα 2.1 αναγράφονται περισσότερα στοιχεία για τις μεθόδους μέτρησης, τα πρότυπα που ακολουθούν και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος.

Πίνακας 2.1 Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής οδοστρώματος (Hall et al. 2009).

Τύπος Μεθόδου	Πρότυπο	Περιγραφή	Συσκευές
Ακίνητοποιημένος τροχός Συνεχής μέτρηση	ASTM E274	Η συσκευή ρυμουλκείται από όχημα μέτρησης με τυπική ταχύτητα 40mi/h (~64km/h). Εκτοξεύεται νερό πάχους 0,02 ίντσες(0,5mm) μπροστά από το δοκιμαστικό ελαστικό, το ελαστικό δοκιμής χαμηλώνει όσο χρειάζεται και ένα σύστημα πέδησης ασφαλίζει το ελαστικό. Στη συνέχεια μετράται η δύναμη πέδησης από τον μέσο όρο των 3 πρώτων δευτερολέπτων μετά το κλειδώμα του δοκιμαστικού τροχού. Οι μετρήσεις μπορούν να επαναληφθούν όταν ο τροχός φθάσει και πάλι σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης.	1. ADHERA 2 2. ASTM E274 trailer
Σταθερή ολίσθηση Συνεχής μέτρηση	Διάφορα	Αυτές οι συσκευές μετρούν την αντίσταση περιστροφής των μαλακών ελαστικών που ολισθαίνουν με μια σταθερή ταχύτητα ολίσθησης (12-20%). Το νερό (πάχους 0,02 ιντσών) εφαρμόζεται μπροστά από το ελαστικό. Ρυμουλκείται από όχημα που κινείται με 40mi/h (~64km/h). Η περιστροφή του ελαστικού δοκιμής επιτυγχάνεται ή με έναν μηχανισμό αλυσίδας ή με ιμάντα ή με ένα υδραυλικό σύστημα. Τα δεδομένα τυπικά συλλέγονται κάθε 1 έως 5 ίντσες (~25 έως 125 mm) και υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε διαστήματα των 3 ft (~1 m).	1. Grip Tester  2. ROAR  3. ViaFriction
Μεταβλητή ολίσθηση Συνεχής μέτρηση	ASTM E1859	Οι συσκευές μεταβλητής ολίσθησης μετρούν την δύναμη τριβής ως συνάρτηση της ολίσθησης (0 έως 100%) μεταξύ του τροχού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Στην επιφάνεια του οδοστρώματος εκτοξεύεται νερό (πάχος 0,02 ιντσών) και ο τροχός περιστρέφεται ελεύθερα. Σταδιακά μειώνεται η ταχύτητα του δοκιμαστικού τροχού και του οχήματος, η απόσταση διαδρομής, η ταχύτητα περιστροφής του ελαστικού, το φορτίο του τροχού και η δύναμη τριβής. Τα στοιχεία συλλέγονται σε διαστήματα των 0,1 ίντσες (~2,5 mm) ή και λιγότερο. Τα δεδομένα καταγράφονται και αργότερα φιλτράρονται και εξομαλύνονται.	1. ROAR 2. ViaFriction
Κύλιση τροχών υπό γωνία	ASTM E670	Οι συσκευές αυτές μετρούν τη δύναμη τριβής ή τη πλευρική δύναμη τριβής που είναι κάθετη προς την κατεύθυνση κίνησης ενός ή δύο ελαστικών υπό γωνία. Η παροχή του	1. SCRIM

2. Αντιολισθητική ικανότητα οδοστρώματος

Συνεχής μέτρηση		νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι 4 γαλλ/λεπτό (~1,2 L/λεπτό). Ένας ή δύο περιστρεφόμενοι τροχοί υπό γωνία ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια συνήθως στα 40 mi/h (~64km/h). Καταγράφονται η πλευρική δύναμη τριβής, το φορτίο ελαστικών, η απόσταση και η ταχύτητα του οχήματος. Τα δεδομένα τυπικά συλλέγονται κάθε 1 έως 5 ίντσες (~25 έως 125 mm) και υπολογίζεται ο μέσος όρος σε διαστήματα των 3 ft (~1 m).	 2. Mu-Meter 
Φορητή συσκευή Στατική μέτρηση	ASTM E303 ASTM E1911	Χρησιμοποιούν την θεωρία εκκρεμούς για τη μέτρηση της τριβής στο εργαστήριο ή επιτόπου στο οδόστρωμα. Στο βρετανικό εκκρεμές (BPT-British Pendulum Tester), το ελαστικό πέλματος έρχεται σε επαφή υπό χαμηλή ταχύτητα με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η ανύψωση στην οποία ο βραχίονας μετακινείται μετά την επαφή παρέχει ένα δείκτη αντιολισθητικής ικανότητας. Τα δεδομένα από πέντε μετρήσεις συλλέγονται και καταγράφονται χειρωνακτικά. Ο δυναμικός μετρητής τριβής (DFT- Dynamic Friction Tester) μετράει τη ροπή που απαιτείται για την περιστροφή τριών μικρών ελαστικών σε κυκλική κίνηση πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος σε ταχύτητες από 5 έως 89 km/h. Η παροχή του νερού κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι 0.95 γαλλ/λεπτό (3.6 L/λεπτό). Η ταχύτητα περιστροφής, η περιστροφική ροπή και το κατακόρυφο φορτίο μετρώνται και καταγράφονται ηλεκτρονικά.	1. Pendulum Tester (BPT)  2. Dynamic Friction Tester (DFT) 
Επιταχυνσιόμετρο Στατική μέτρηση	ASTM E2101	Μετρούν την επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Η συσκευή τοποθετείται σε ένα όχημα που προκαλεί απότομη πέδηση όταν κινείται με 50km/h έτσι ώστε οι τροχοί να κλειδώσουν έως ότου μπορούν να μετρηθούν τα ποσοστά επιβράδυνσης. Το ποσοστό επιβράδυνσης καταγράφεται για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας. Λόγω των απαιτήσεων ασφάλειας, οι δοκιμές πραγματοποιούνται συχνά σε ξηρές συνθήκες δρόμου.	1. Vericom 

Ο Henry (2000) θεωρεί ότι κάθε μέθοδος μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας έχει πλεονεκτήματα. Ανάλογα με την κατάσταση που πρέπει κάποιος να μελετήσει, θα επιλέξει την αντίστοιχη συσκευή.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος ακινητοποιημένου τροχού προσομοιώνει την πέδηση έκτακτης ανάγκης χωρίς τη λειτουργία του ABS. Η μετρημένη δύναμη αντίστασης και το φορτίο του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, μ . Η αντιολισθητική ικανότητα αναφέρεται ως δύναμη τριβής (FN- Friction Number) ή αριθμός αντιολισθητικής ικανότητας (SN- Slip Number). Η παρακολούθηση της αντιολισθητικής ικανότητας γίνεται σε δίκτυα υπό λειτουργία. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ευθύγραμμα τμήματα (χωρίς καμπύλες, τμήματα T ή κυκλικούς κόμβους). Επιπλέον, πιθανώς να χαθούν κάποια σημεία με χαμηλή αντιολισθητική ικανότητα, επειδή οι μετρήσεις είναι διακοπτόμενες. Ωστόσο, είναι ένα καλά αναπτυγμένο και πολύ ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα, καθώς είναι φιλικό προς το χρήστη, σχετικά απλά και δεν απαιτούν πολύ χρόνο για τη διεξαγωγή μετρήσεων.

Στη μέθοδο σταθερής ολίσθησης η μετρημένη δύναμη αντίστασης και το φορτίο του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, μ . Η αντιολισθητική ικανότητα αναφέρεται ως δύναμη τριβής (FN) ή αριθμός αντιολισθητικής ικανότητας (SN). Η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να γίνει σε ευθύγραμμα τμήματα σε δίκτυα υπό λειτουργία είτε κατά την διάρκεια της κατασκευής. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι λαμβάνουν μετρήσεις με καθορισμένη ταχύτητα ολίσθησης. Δηλαδή, οι ταχύτητες ολίσθησης δεν συμπίπτουν πάντοτε με την κρίσιμη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας, ειδικά σε επιφάνειες που καλύπτονται από πάγο και χιόνι. Επιπλέον, χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού σε συνεχή λειτουργία και απαιτεί επιδέξια διόρθωση των δεδομένων. Ωστόσο, παρέχει δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας σε υψηλή ανάλυση.

Η μέθοδος μεταβλητής ολίσθησης αφορά στην πέδηση με ABS. Παρέχει ένα γράφημα της σχέσης μεταξύ του συντελεστή τριβής και της ταχύτητας ολίσθησης. Οι δείκτες που προκύπτουν είναι:

- Η τιμή τριβής λόγω διαμήκων δυνάμεων.
- Η τιμή τριβής κορυφής.
- Η τιμή κρίσιμης ολίσθησης.
- Ο λόγος τριβής/ ολίσθησης.
- Η τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας.
- Ο συντελεστής σχήματος .

Το σύστημα παρέχει τιμές FN. Η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να γίνει τόσο σε ευθύγραμμα τμήματα όσο και σε καμπύλες σε δίκτυα υπό λειτουργία είτε κατά την διάρκεια της κατασκευής. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί ότι είναι μεγάλος και πολύπλοκος εξοπλισμός με υψηλό κόστος συντήρησης και πολύπλοκες ανάγκες επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού σε συνεχή λειτουργία. Ωστόσο, παρέχει συνεχώς δεδομένα σταθερής ή μεταβλητής τριβής και τον συντελεστή σχήματος για λεπτομερή αξιολόγηση.

Η μέθοδος κύλισης τροχών υπό γωνία μετρά την ικανότητα το όχημα να διατηρεί τον έλεγχο σε καμπύλες. Κατά την μέτρηση, μετράται η πλευρική δύναμη κάθετη προς το επίπεδο περιστροφής κατά μέσο όρο, προσδιορίζοντας τον αριθμό της συσκευής Mu-Meter (MuN) ή τον συντελεστή πλευρικής δύναμης SFC. Η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να γίνει σε ευθύγραμμα τμήματα και σε καμπύλες. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως στην Ευρώπη, ενώ στις Η.Π.Α χρησιμοποιείται κυρίως για αεροδρόμια. Μειονέκτημα της συσκευής είναι η ευαισθησία στις οδικές ανωμαλίες (λακκούβες, ρωγμές, κλπ). Ωστόσο, επιτυγχάνεται καλά ελεγχόμενη κατάσταση ολίσθησης παρόμοια με τα αποτελέσματα της μεθόδου σταθερής ολίσθησης. Επιπλέον, οι μετρήσεις είναι συνεχείς σε όλο το μήκος του οδοστρώματος.

Η φορητή συσκευή BPT παρέχει τον αριθμό βρετανικού εκκρεμούς (BPN) με βάση το ύψος ταλάντωσης του εκκρεμούς. Παρέχει δείκτες αντιολισθητικής ικανότητας και μικροϋφής για κάθε οδόστρωμα, είτε στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της φθοράς της αντιολισθητικής ικανότητας και

της υφής (ASTM, 2018). Η φορητή συσκευή DFT υπολογίζει συντελεστές τριβής και ένα γράφημα του συντελεστή τριβής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Επίσης καθορίζει τη κρίσιμη ολίσθηση, τον αντίστοιχο συντελεστή τριβής και τον Διεθνή Δείκτη Τριβής (IFI). Το DFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτόπου ή στο εργαστήριο για έλεγχο ποιότητας. Τα μειονεκτήματα μιας φορητής συσκευής είναι τα παρακάτω:

- Η μεταβλητότητα του BPN είναι μεγάλη και μπορεί να επηρεαστεί από τις διαδικασίες χειριστή και τον άνεμο.
- Απαιτείται έλεγχος της κυκλοφορίας απαιτείται και για τα δύο συστήματα (BPT, DFT).
- Δεν προσομοιώνουν πάντοτε τα χαρακτηριστικά των ελαστικών.
- Και οι δύο συσκευές συλλέγουν μόνο μετρήσεις σημείου και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του δικτύου.
- Για να ποσοτικοποιηθεί ένα δεδομένο τμήμα του οδοστρώματος, πρέπει να πραγματοποιηθούν αρκετές μετρήσεις στο μήκος του τμήματος.

Ωστόσο, το BPT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση τόσο της διαμήκους όσο και της πλευρικής τριβής του οδοστρώματος. Το DFT παρέχει καλή επαναληψιμότητα και δεν επηρεάζεται από τους χειριστές ή τον άνεμο. Παρέχει επίσης συντελεστές τριβής που είναι αντιπροσωπευτικοί για τιμές υψηλής ταχύτητας και έχει καλή συσχέτιση με το BPN.

Στο επιταχυνσιόμετρο για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής επιφάνειας οδοστρώματος χρησιμοποιείται η μετρούμενη δύναμη επιβράδυνσης. Η επιβράδυνση μπορεί να μετρηθεί απευθείας για πλήρη ακινητοποίηση ή να καθοριστεί ως διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής επιβράδυνσης διαιρουμένη με το χρόνο πέδησης. Χρησιμοποιείται σε ευθύγραμμα τμήματα για έρευνες συντριβής. Το πρόβλημα είναι ότι απαιτεί ξαφνικό ελιγμό πέδησης και οι χειρισμοί αυτοί μπορεί να μην είναι λειτουργικά επιθυμητοί. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιολόγηση δικτύου και γενικά, απαιτείται αποκλεισμός της

λωρίδας κυκλοφορίας. Παρ' όλα αυτά, το σύστημα είναι εύκολο κατά τη χρήση και την εγκατάστασή του, μικρό, φορητό και ελαφρύ.

2.6 Σύστημα Grip Tester

Το σύστημα Grip Tester αποτελεί έναν από τους δημοφιλέστερους τρόπους μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας από το 1987. Εντάσσεται στις συσκευές μέτρησης με τη μέθοδο σταθερής ολίσθησης. Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Cranfield και με την βοήθεια του TRL (Transport Research Laboratory) του Ηνωμένου Βασιλείου, τον διεθνή οργανισμό μεταφορών (PIARC), της US FAA (Federal Aviation Administration) και την NASA (National Aeronautics and Space Administration) αναγνωρίστηκε από διεθνείς οργανισμούς όπως η ICAO (International Civil Aviation Organization) λόγω της εξαιρετικής συσχέτισης με άλλες συσκευές μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τη Findlay Irvine Limited στη Σκωτία για τη μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας στα οδοστρώματα των αεροδρομίων, αλλά έκτοτε χρησιμοποιείται εκτενώς διεθνώς (Findlay Irvine 2005).

Το σύστημα Grip Tester παρέχει έναν οικονομικό, ευέλικτο και αξιόπιστο τρόπο μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος τόσο σε ένα οδικό δίκτυο όσο και σε οδοστρώματα αεροδρομίου. Τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης είναι χαμηλά και η ποιότητα των τιμών που εξάγονται είναι εξαιρετικά υψηλή. Επομένως, το σύστημα Grip Tester βοηθά τους χρήστες να μειώσουν το κόστος συντήρησης και να βελτιώσουν την ασφάλεια των οδικών δικτύων και των οδοστρωμάτων αεροδρομίων μέσω των παρακάτω:

- Προσδιορίζοντας περιοχές με χαμηλό συντελεστή τριβής.
- Καθορίζοντας τις προτεραιότητες της συντήρησης.
- Προσδιορίζοντας τη συμπεριφορά του οδοστρώματος σε κακές καιρικές συνθήκες.
- Και καταγράφοντας τις περιοχές με υψηλά ποσοστά ατυχημάτων για να διαπιστωθεί αν υπάρχει συσχέτιση με τις συνθήκες της επιφάνειας.

Το σύστημα Grip Tester (βλ. εικόνα 2.23) διαθέτει έναν τροχό δοκιμής που φρενάρει με σταθερό σύστημα ολίσθησης και δύο τροχούς κίνησης και ζυγίζει περίπου 85kg. Λειτουργεί με ένα μόνο δοκιμαστικό ελαστικό μέτρησης, διαμέτρου 254mm που καθορίζεται από το πρότυπο της ASTM (2008). Η λειτουργία του βασίζεται στην επιβολή μίας οριζόντιας και κατακόρυφης δύναμης ώστε να υπολογιστεί το πηλίκο τους, δηλαδή ο συντελεστής τριβής γνωστός ως GN (Grip Number) . Επομένως, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη συσκευή είναι ο λόγος μεταξύ του κλάσματος της δύναμης έλξης (F_d) και της δύναμης φορτίου (Q). Είναι αδιάστατος συντελεστής και κυμαίνεται από 0 έως 1. Ο λόγος ορίζεται στην εξίσωση 2.6:

$$GN = \frac{F_d}{Q} \quad (2.6)$$

όπου,

GN= Συντελεστής τριβής- Grip Number (κυμαίνεται από 0 έως 1)

F_d = Δύναμη έλξης (οριζόντια)

Q = Δύναμη βάρους (κατακόρυφη)

Η σταθερή ολίσθηση του δοκιμαστικού ελαστικού επιτυγχάνεται μέσω μιας αλυσίδας κιβωτίου ταχυτήτων (Wilson 2006). Ο δοκιμαστικός τροχός του άξονα διαθέτει μετρητές τάσης για τη μέτρηση των ελκτικών διαμήκων και δυναμικών κάθετων δυνάμεων που δρουν στο δοκιμαστικό ελαστικό.

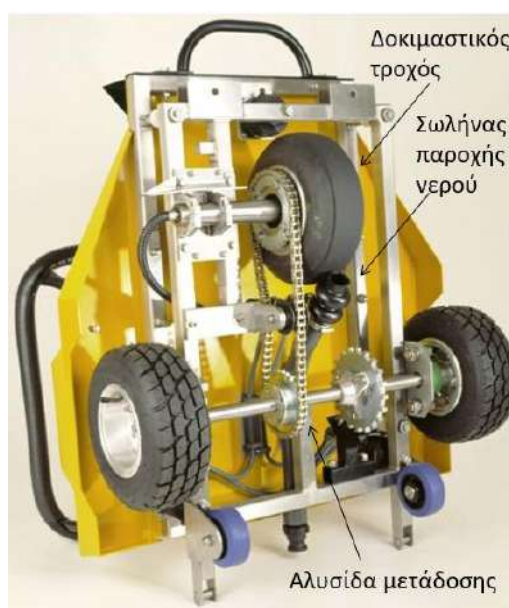


Εικόνα 2.23 Το σύστημα Grip Tester.

Ο δοκιμαστικός τροχός περιβάλλεται από λείο ελαστικό, κατασκευασμένο από καουτσούκ κατάλληλων προδιαγραφών. Σύμφωνα με τους κανονισμούς ταχύτητας, το σύστημα Grip Tester λειτουργεί σε ταχύτητες 65 έως 95 km/h στα αεροδρόμια, ενώ οι ταχύτητες που υιοθετούνται για τα οδοστρώματα οδών είναι συνήθως 5, 20 και 50 km/h, αν και ο τροχός μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση ώθησης από 5 km/h έως 130 km/h. Ο εξοπλισμός λειτουργεί με σταθερή ολίσθηση σε ποσοστό 14.5% και μετρώνται τόσο το φορτίο όσο και η οριζόντια δύναμη. Για παράδειγμα, ταχύτητα ολίσθησης περίπου 7 km/h επιτυγχάνεται με ταχύτητα έλξης 50 km/h και ποσοστό ολίσθησης 14.5%. Δηλαδή η ταχύτητα ολίσθησης του τροχού αντιστοιχεί περίπου στο 15% της ταχύτητας του οχήματος (Wilson 2006).

Οι βελτιώσεις στο σύστημα αξόνων του εξοπλισμού στα πρόσφατα μοντέλα Grip Tester (MK 2) βοήθησαν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που αντιμετώπιζαν τα προηγούμενα μοντέλα (MK 1). Έτσι, έγινε εφικτή η επίλυση προβλημάτων φθοράς της διαμέτρου του ελαστικού δοκιμής σε μετρήσεις της αντιολισθητικής ικανότητας σε καμπύλα τμήματα. Ωστόσο, ο τακτικός έλεγχος του ελαστικού δοκιμής και η καταγραφή της διαμέτρου του πριν και μετά από κάθε μέτρηση αποτελούν βασικά στοιχεία σωστής λειτουργίας του συστήματος.

Στην εικόνα 2.24 φαίνονται περισσότερες λεπτομέρειες της συσκευής.



Εικόνα 2.24 Λεπτομέρειες συσκευής Grip Tester.

Οι συσκευές μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας κατά την οδήγηση προσομοιώνουν συνήθως τον συντελεστή τριβής σε υγρές συνθήκες και συνεπώς απαιτούν ψεκασμό νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος μπροστά από το ελαστικό μέτρησης. Επομένως, η συσκευή έχει εγκατεστημένο σύστημα παροχής νερού που μπορεί να λειτουργήσει αυτόματα ή χειροκίνητα για να παρέχει μια στρώση νερού 0,25mm κάτω από το ελαστικό δοκιμής.

Η συσκευή Grip Tester είναι φορητή και πρακτική για μεταφορά καθώς ρυμουλκείται από οποιονδήποτε όχημα ρυμούλκησης (βλ. εικόνα 2.25). Η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον χειριστή επί τόπου σε περίπου δέκα λεπτά και ο υπολογιστής συλλογής δεδομένων μπορεί να είναι οποιοσδήποτε τυποποιημένος φορητός υπολογιστής. Το ιδιαίτερα εξελιγμένο λογισμικό που διαθέτει μετρά την αντιολισθητική ικανότητα ανά 5 ή 10 m και αποδίδει τα αποτελέσματα τόσο σε πίνακες όσο και σε γραφήματα και χάρτες, παρέχοντας στον χειριστή τη δυνατότητα να καταγράφει την χιλιομετρική θέση κατά την μέτρηση και να εξάγει άμεσα αποτελέσματα.



Εικόνα 2.25 Επιτόπου μέτρηση με το σύστημα Grip Tester του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.

Στο TRL του Ηνωμένου Βασιλείου έχει καθιερωθεί εξαιρετική συσχέτιση του συστήματος Grip Tester με τη συσκευή SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine) έπειτα από την επιτυχημένη συμμετοχή του συστήματος στο διεθνές πείραμα για τη σύγκριση και την εναρμόνιση των συστημάτων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας της PIARC το 1992.

Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τίτλο 'Συσχέτιση υφής με χρήση φωτογραμμετρίας κοντινής εμβέλειας (CRP-Close Range Photogrammetry) και του συστήματος Grip Tester για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος' (Kogbara et al. 2018) δεν προέκυψαν αξιόλογες συσχετίσεις των δύο μεθόδων. Όμως, παρατηρήθηκε ότι όταν η απόσταση του ελαστικού από την θεωρητικώς επίπεδη επιφάνεια που ορίζει την μακροϋφή ήταν 2 mm, η συσχέτιση ήταν αρκετά καλή (Kogbara et al. 2018).

Η συσκευή έχει τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

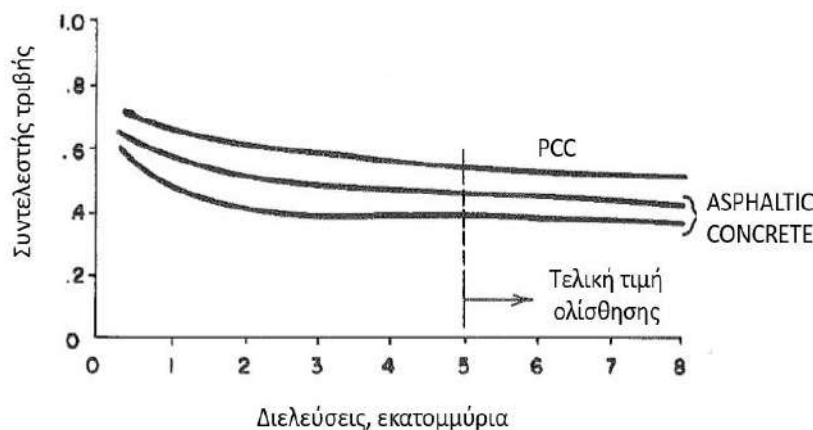
- Λαμβάνει μετρήσεις με καθορισμένη ταχύτητα ολίσθησης με αποτέλεσμα οι ταχύτητες ολίσθησης της μέτρησης να μη συμπίπτουν πάντοτε με την κρίσιμη τιμή της ολίσθησης, ειδικά σε επιφάνειες που καλύπτονται από πάγο και χιόνι (Wilson et. al. 2013).
- Χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού σε φάση συνεχής λειτουργίας κατά την συλλογή δεδομένων.
- Απαιτεί ευελιξία στη μείωση ή τροποποίηση των δεδομένων. Όταν για παράδειγμα, η συσκευή εξάγει τιμές που είναι πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες, πέρα από το εύρος τιμών που αναμένεται, ο μελετητής πρέπει να προβεί σε απαραίτητες τροποποιήσεις ή ακόμα και να παραλείψει την συγκεκριμένη τιμή (Wilson et. al. 2013).
- Έχει μόνο έναν τροχό δοκιμής και επομένως τα αποτελέσματα λαμβάνονται συνήθως δίπλα από το αριστερό ίχνος τροχού μιας οδικής λωρίδας. Γεγονός που σημαίνει ότι η μετρούμενη τιμή του συντελεστή τριβής είναι λίγο μεγαλύτερη από την πραγματική (HD/Standards 2015).

3 Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

3.1 Στίλβωση αδρανών

Η κυκλοφορία αποτελεί βασικό παράγοντα στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας σε ένα οδόστρωμα. Ως εκ τούτου, αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να υπολογίσουν τον βαθμό στον οποίο ο παράγοντας της κυκλοφορίας επηρεάζει την αντιολισθητική ικανότητα ή την τιμή των διελεύσεων στην οποία παρατηρείται η σταθεροποίηση της αντιολισθητικής ικανότητας. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη ετήσια αντιολισθητική ικανότητα που παραμένει περίπου ίδια, δηλαδή χωρίς σημαντική πτώση, με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων ανά τα έτη. Αυτό το έχουν επιτύχει είτε με εργαστηριακούς ελέγχους, προσομοιώνοντας με κατάλληλο εξοπλισμό την κυκλοφορία, είτε από χρόνια παρακολούθηση ενός οδοστρώματος, κάνοντας μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα και καταγράφοντας την αντιολισθητική ικανότητα με την αντίστοιχη σύνθεση και τον όγκο της κυκλοφορίας.

Το διάγραμμα της εικόνας 3.1 δείχνει μείωση του συντελεστή τριβής για δείγματα σε διάφορους τύπους οδοστρώματος καθώς ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται αυξάνεται (Rizenbergs 1968).



Εικόνα 3.1 Συσχέτιση συντελεστή τριβής με τις διελεύσεις (Rizenbergs 1968).

Όπως, παρατηρείται από το διάγραμμα της εικόνας 3.1 ότι ανάλογα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος η κατώτατη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας διαφοροποιείται. Σε εύκαμπτα οδοστρώματα μπορεί να απαιτούνται περίπου 5-7 εκατομμύρια διελεύσεις, ενώ οι επιφάνειες από σκυρόδεμα μπορεί να απαιτούν 15-20 εκατομμύρια διελεύσεις (Rizenbergs 1968). Η συμπεριφορά ενός οδοστρώματος, όσον αφορά στην αντιολισθητική ικανότητα, πρέπει να κρίνεται κατά τη λειτουργία του οδοστρώματος. Η πτώση της αντιολισθητικής ικανότητας είναι συνήθως μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων ετών μετά την κατασκευή. Στη συνέχεια, ο ρυθμός λείανσης μειώνεται και τελικά παρατηρείται μικρή πρόσθετη στίλβωση.

Η έρευνα των Ahammed και Tighe (2009), έδειξε ότι η αντιολισθητική ικανότητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, κυρίως λόγω στίλβωσης που σχετίζεται με την κυκλοφορία. Σύμφωνα και με τον Susanna et al. (2017) η αυξημένη κυκλοφοριακή φόρτιση οδηγεί σε μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας με την πάροδο του χρόνου. Δεδομένου ότι η αντιολισθητική ικανότητα αρχικά αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της, και στη συνέχεια με την πάροδο του χρόνου μειώνεται σε μια σταθερή τιμή, συμπεραίνουμε ότι η αντιολισθητική ικανότητα αρχικά παρέχεται από την μακροϋφή (Skerritt 1993). Η χρονική περίοδος από την αρχική και τη μέγιστη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας έως τη τελική τιμή εξαρτάται από τον τύπο και τον όγκο της κυκλοφορίας (Skerritt 1993, Quinn 1975). Προφανώς, ο μεγάλος όγκος κυκλοφορίας μειώνει την αντιολισθητική ικανότητα για όλους τους τύπους αδρανών (O'Brien & Haddock 2009).

Τυπικά, η σταθεροποίηση της τιμής της αντιολισθητικής ικανότητας, με εξαίρεση τις εποχιακές διακυμάνσεις, αντιστοιχεί σε διελεύσεις μεταξύ δύο και πέντε εκατομμυρίων (Diringer & Barros 1990). Εντούτοις, η βιβλιογραφία έχει δείξει ότι μετά από περίπου δύο έως τρία χρόνια κυκλοφοριακής έκθεσης, η ετήσια ελάχιστη αντιολισθητική ικανότητα παραμένει περίπου στάσιμη χωρίς σημαντική πτώση (τιμή σταθεροποίησης της αντιολισθητικής ικανότητας) (Skerritt 1993).

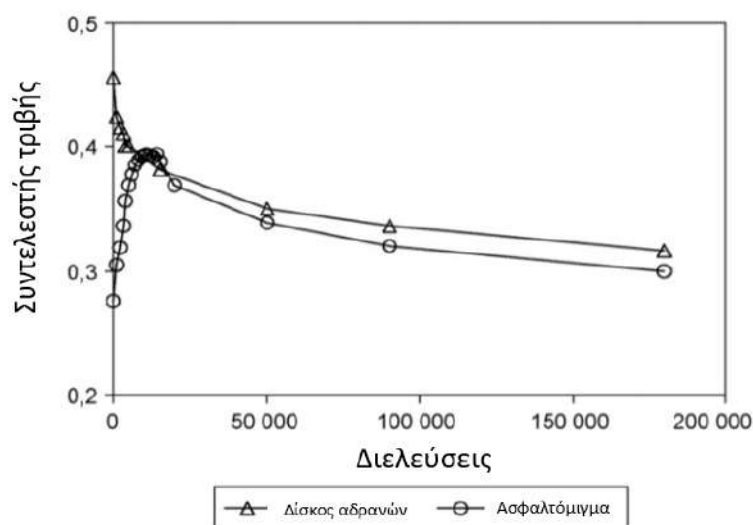
Οι Finney και Brown (1958) σε μελέτη που έκαναν σε οκτώ έργα, μεταξύ των οποίων μία επιφάνεια ασφαλτομίγματος με μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών,

τέσσερις επιφάνειες με αδρανή ασβεστολιθικής προέλευσης και τρεις επιφάνειες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (PCC), διαπίστωσαν ότι οι διαφορές των συντελεστών τριβής μεταξύ των δύο λωρίδων κίνησης ανήλθαν σε ποσοστό 36%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις λωρίδες κυκλοφορίας εμφανίστηκε φθορά περισσότερο στα χονδρόκοκκα αδρανή, όπως το χαλίκι και ο ασβεστόλιθος, ενώ το συνδετικό υλικό γύρω από τα αδρανή επηρεάστηκε ελάχιστα. Το ίδιο διαπιστώθηκε και σε άλλες μελέτες. Σύμφωνα με τον Rizenbergs (1968) τα ασβεστολιθικά αδρανή, είτε χονδρόκοκκα είτε λεπτόκοκκα, λειαινόνται περισσότερο με την πάροδο του χρόνου.

Σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Dahir και Meyer (1974), ένα οδόστρωμα με αδρανή με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα επήλθε την τιμή σταθεροποίησης της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από 12 εκατομμύρια διελεύσεις. Ωστόσο, ο μέσος όρος των τριών χρόνων με την χαμηλότερη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας διαπιστώθηκε πολύ μικρότερος σε σχέση με άλλους τύπους ασφαλτομίγματος (Dahir & Meyer 1974). Η μεγάλη πτώση της αντιολισθητικής ικανότητας δηλώνει την υψηλή ευαισθησία των αδρανών με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα στη στίλβωση.

Το διάγραμμα της εικόνας 3.2 παρουσιάζει την εξέλιξη του συντελεστή τριβής έπειτα από χιλιάδες διελεύσεις. Το πιο ενδιαφέρον σημείο είναι η σύνδεση των δύο καμπυλών – δίσκος αδρανών και δίσκος ασφαλτομίγματος - όταν έχει αφαιρεθεί το ασφατικό υλικό από την επιφάνεια των αδρανών του δίσκου με το ασφαλτόμιγμα (βλ. εικόνα 3.2).

3. Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας



Εικόνα 3.2 Σύγκριση δοκιμών ασφαλτομίγματος και δίσκου αδρανών (Do et al. 2007).

Μόλις απομακρυνθεί το συνδετικό υλικό από την επιφάνεια των αδρανών του ασφαλτομίγματος, τα αδρανή είναι κυρίως εκτεθειμένα στην κυκλοφορία. Για αυτό, μπορεί να ειπωθεί ότι η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας μετά την αφαίρεση του συνδετικού υλικού ελέγχεται από τα αδρανή (Do et al. 2007). Ομοίως ο Li et al. (2003) υποστήριξαν ότι η αρχική αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι αρκετά χαμηλή, πιθανώς λόγω της επίδρασης του ασφαλικού συνδετικού υλικού. Μέσα στα πρώτα 2-3 έτη, η αντιολισθητική ικανότητα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται. Σε γενικές γραμμές, η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων μειώνεται από την κυκλοφοριακή φόρτιση.

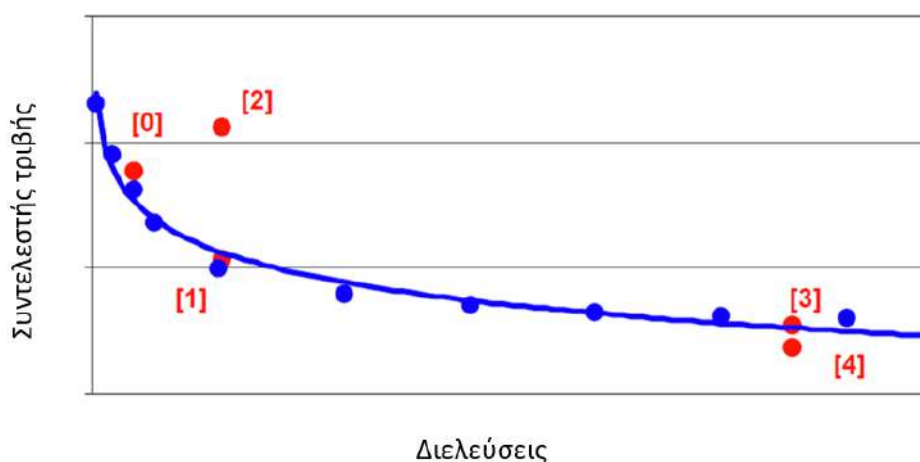
Διαφορετικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη Γαλλία από το 2004 ανέδειξαν ότι η στίλβωση που προσομοιώνεται από τη συσκευή Wehner-Schulze, είναι ρεαλιστική όσον αφορά στην επιρροή της κυκλοφορίας (Do et al. 2007).

Οι μετρήσεις με την προτυποποιημένη συσκευή Wehner-Schulze ακολουθούν συγκεκριμένη μέθοδο, η οποία χωρίζεται σε 5 στάδια (βλ. εικόνα 3.3) (Wörner 2012).

Αυτά είναι :

- Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας στην αρχή χωρίς στίλβωση [0].
- Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από 90.000 διελεύσεις [1].

- Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από αμμοβολή της επιφάνειας του δείγματος [2].
- Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από πάλι 90.000 διελεύσεις [3].
- Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μέχρι τη τιμή της σταθερής ολίσθησης [4].

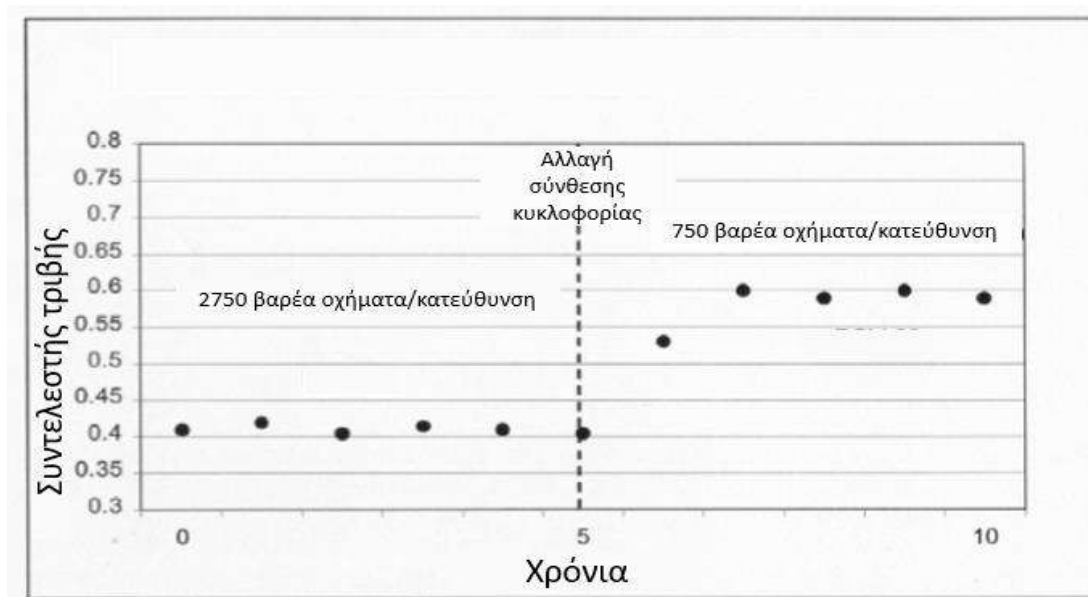


Εικόνα 3.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων, σχέση διελεύσεων και συντελεστή τριβής από τη συσκευή Wehner-Schulze (Wörner 2012).

Με αυτή την εργαστηριακή μέθοδο, παίρνουμε πειραματικά μόνο σημεία της καμπύλης της αντιολισθητικής ικανότητας χωρίς να μπορούμε να κρίνουμε την εξέλιξή της. Επομένως, απαιτείται μια δεύτερη μελέτη, όπου δοκιμάζεται μια μέθοδος που μπορεί να προσδιορίσει την εξέλιξη. Έτσι παρουσιάζεται και μια επιπλέον μέθοδος. Με αυτή τη μέθοδο η αντιολισθητική ικανότητα μετρείται μετά από αρκετές διελεύσεις. Συνήθως οι μετρήσεις γίνονται μετά από 4.500, 7.500, 15.000, 22.500, 30.000, 45.000, 135.000, 180.000, 225.000 και 270.000 διελεύσεις. Στο διάγραμμα της εικόνας 3.3 συγκρίνονται οι δύο μέθοδοι με διαφοροποίηση χρώματος και προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ του αριθμού διελεύσεων και της αντιολισθητικής ικανότητας (Wörner 2012).

3. Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

Εκτός από τον όγκο της κυκλοφορίας, και η σύνθεση της κυκλοφορίας, δηλαδή ο αριθμός των βαρέων οχημάτων έχει επίδραση στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας. Ένα προφίλ μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας κάθετα στην διεύθυνση κίνησης εμφανίζει χαμηλότερα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας στα ίχνη του τροχού. Κατά μήκος θα δείξει ότι τα επίπεδα είναι χαμηλότερα όπου υπάρχουν πρόσθετες τάσεις λόγω πέδησης και στα καμπύλα τμήματα της οδού. Όπως αναμένεται, τα βαρέα οχήματα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, καθώς λειαίνουν την επιφάνεια πολύ περισσότερο από τα άλλα είδη οχημάτων. Έχει αποδειχθεί ότι στις ασφαλικές επιφάνειες υπάρχει μια πολύ σημαντική συσχέτιση μεταξύ του κυκλοφοριακού φόρτου των βαρέων οχημάτων και της αντιολισθητικής ικανότητας. Η εικόνα 3.4 δείχνει τη μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας μίας οδού όταν δημιουργήθηκε μια παράκαμψη που μείωσε τον αριθμό των βαρέων οχημάτων ανά ημέρα (Cornwall County Council 2008).

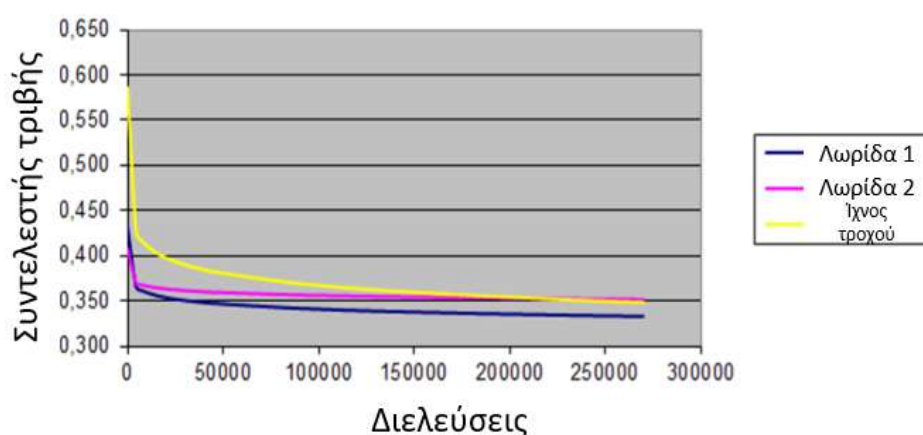


Εικόνα 3.4 Επιρροή της σύνθεσης της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα (Cornwall County Council 2008).

Το Transport Research Laboratory (TRL) ισχυρίζεται ότι η αντιολισθητική ικανότητα δεν είναι πάντα χαμηλότερη στη λωρίδα με τη μεγαλύτερη κυκλοφορία. Ωστόσο η αντιολισθητική ικανότητα θα πρέπει να μετράται στη λωρίδα με τη μεγαλύτερη

κυκλοφορία, λαμβάνοντας υπ' όψη τον αριθμό των βαρέων οχημάτων (Dunford et al. 2014).

Ο Wörner, σε μελέτη που χρησιμοποίησε τη συσκευή Wehner-Schulze έδειξε ότι δεν θα υπάρξουν ουσιαστικές αλλαγές στην αντιολισθητική ικανότητα των λωρίδων ένα και δύο μετά την αρχική μείωση και ότι η τελική αντιολισθητική ικανότητα επιτυγχάνεται και στις δύο λωρίδες μετά από 270.000 διελεύσεις (βλ. εικόνα 3.5). Επίσης, το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την τιμή που αντιστοιχεί στο ίχνος τροχού, όπου η τελική τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας είναι ίδια με αυτήν της λωρίδας 2 (Wörner 2012).



Εικόνα 3.5 Συντελεστής τριβής συσκευής Wehner-Schulze και αριθμός διελεύσεων (Wörner 2012).

Οι περισσότερες εργαστηριακές έρευνες παρουσιάζουν μία πολύ έντονη μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας κατά την πρώτη φόρτιση, από 10.000 έως 30.000 διελεύσεις. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατόν να καθοριστεί με ακρίβεια μόνο μια τελική τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας. Οι ενδιάμεσες τιμές, όπως για παράδειγμα ο χρόνος λήξης της περιόδου μείωσης της αντιολισθητικής ικανότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί (Wörner 2012).

3.2 Ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

Στην προσπάθεια να ποσοτικοποιήσουν την επίδραση της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας αναπτύχθηκαν διάφορες σχέσεις υπολογισμού του

3. Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

συντελεστή τριβής με βάση στοιχεία κυκλοφορίας, αλλά και άλλων παραγόντων. Ο Oh et al. (2010) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για τον συντελεστή τριβής για ταχύτητα 40 mi/h (εξίσωση 3.1) με σκοπό να βρουν την συσχέτιση μεταξύ των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, περιέχει περισσότερες από 50.000 παρατηρήσεις κατά μήκος πέντε αυτοκινητόδρομων στην Καλιφόρνια μεταξύ του 1988 και 2008. Κάθε παρατήρηση διαθέτει πληροφορίες θέσης, χρόνου, κυκλοφορίας και μετρήσεις της αντιολισθητικής ικανότητας (Oh et al. 2010).

$$SN40 = \beta_1 \ln(TRAFFIC) + \beta_2(LANE) + \beta_3(TEMP) + \beta_4(PRCP) + \beta_5(DP) + \beta_6 \ln(AGE) + \alpha_0 + u \quad (3.1)$$

όπου,

SN40= Μετρούμενη αντιολισθητική ικανότητα σε ταχύτητα 40mi/h

TRAFFIC= Κυκλοφορία στο συγκεκριμένο τμήμα, mi/h

LANE= Εικονική μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τη λωρίδα όπου μετρήθηκε το τμήμα

TEMP= Θερμοκρασία

PRCP= Ποσότητα καθίζησης

DP= Διάρκεια των ξηρών περιόδων

AGE= Ηλικία οδοστρώματος

β_i = Συντελεστές παλινδρόμησης

α_0 = Σταθερά

$u = \varepsilon + (\alpha_i - \alpha_0)$

α_i = Τυχαιο χρονικό διάστημα μεταξύ των τμημάτων

ε = Τυχαία αναφορά για τα μη παρατηρούμενα χαρακτηριστικά του τμήματος

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μέσος ετήσιος αριθμός των διελεύσεων (AADT) συσχετίζεται περισσότερο με την αντιολισθητική ικανότητα, καθώς η τιμή του συντελεστή επιρροής του όρου $\ln(AADT)$, που αποτελεί βασικό παράγοντα της συνάρτησης $\ln(TRAFFIC)$, είναι -0.059 με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.7$ (Oh et al. 2010).

Οι Rezaei και Masad (2013) ανέπτυξαν ένα μοντέλο υπολογισμού της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος με συντελεστή συσχέτισης $R^2=0,74$. Η εξίσωση 3.2 αποτυπώνει το μοντέλο που αναπτύχθηκε, και επηρεάζεται από την μακροϋφή, τον διεθνή δείκτη τριβής (IFI) και την κυκλοφορία χωρίς βέβαια να έχει ληφθεί υπ' όψη το ποσοστό των βαρέων οχημάτων και η κυκλοφοριακή συμφόρηση που μπορεί να έχει ένα οδικό τμήμα.

$$SN(50) = 1,41 + 143,19(IFI - 0,045)e^{(-20/Sp)} \quad (3.2)$$

όπου,

$SN(50)$ = Αντιολισθητική ικανότητα σε ταχύτητα 50mi/h

S_p = Συνάρτηση μακροϋφής, $S_p = 14,2 + 89,7 MPD$

MPD = Mean Profile Depth, μέσο βάθος μακροϋφής

IFI = Διεθνής δείκτης τριβής, $IFI(N) = a_{mix} + b_{mix} * e^{(-c_{mix} * N)}$

a_{mix} , b_{mix} , c_{mix} = Τελική, αρχική τιμή και ρυθμός μεταβολής του συντελεστή

N = Διελεύσεις στη συσκευή Micro-Deval, $N = TMF * 10^{\left(\frac{1}{A+B*c_{mix}+\left(\frac{C}{c_{mix}}\right)}\right)}$

TMF = Αθροιστικός δείκτης κυκλοφορία, $TMF = \frac{AADT * years \text{ in service} * 365}{1000}$

$AADT$ = Ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός διελεύσεων στην εξωτερική λωρίδα

A , B , C = Μειωτικοί συντελεστές ($A=-0,452$, $B=-58,95$, $C=5.834*10^{-6}$)

Παρατηρήθηκε ότι τα τμήματα με αδρανή ασβεστόλιθου είχαν τη χαμηλότερη αντιολισθητική ικανότητα σε συνθήκες και υψηλής και χαμηλής κυκλοφορίας. Τα τμήματα με αδρανή ψαμμίτη είχαν την υψηλότερη αντιολισθητική ικανότητα και ήταν σε θέση να διατηρήσουν αυτή την υψηλή τιμή ακόμα και σε υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας. Η ανάμειξη ασβεστόλιθου με σκληρότερο τύπο βράχου, όπως ο γρανίτης ή το χαλίκι, είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντιολισθητική ικανότητα από τη χρήση μόνο ασβεστόλιθου (Rezaei & Masad 2013).

Ο Goulias και Awoke (2017) προσπάθησαν να βρουν ένα μοντέλο που να αποτυπώνει την επιρροή της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας δεδομένα από πέντε διαδοχικά έτη. Το μοντέλο που ανέπτυξαν για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας δίνεται από την

3. Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

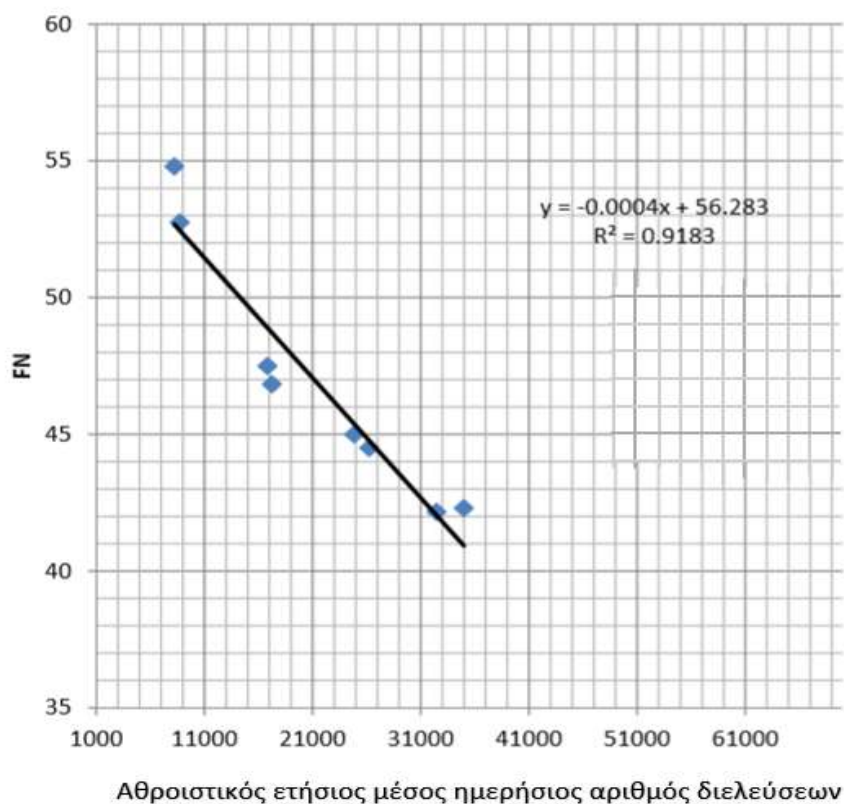
εξίσωση 3.3, έχει συντελεστή συσχέτισης $R^2=0.9183$ και περιγράφεται από το διάγραμμα της εικόνας 3.6.

$$FN = -0,0004 * AADT + 56,283 \quad (3.3)$$

όπου,

FN= Μετρούμενη αντιολισθητική ικανότητα

AADT= Ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός διελεύσεων



Εικόνα 3.6 Συσχέτιση συντελεστή τριβής και μέσου ετήσιου ημερήσιου αριθμού διελεύσεων (Goulias & Awoke 2017).

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα της εικόνας 3.6, η αρνητική επίδραση της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα είναι εμφανής.

Ο Omar et al. (2017) δημιούργησαν ένα μοντέλο πρόβλεψης (βλ. εξίσωση 3.4) όπου συμπεριέλαβαν τον παράγοντα της κυκλοφορίας, όχι με την μορφή ημερήσιων διελεύσεων, αλλά με τη μορφή ισοδύναμου φορτίου άξονα. Έδωσαν δηλαδή σημασία όχι μόνο στον όγκο της κυκλοφορίας αλλά και στο είδος της, δηλαδή την ύπαρξη βαρέων οχημάτων.

$$SN = 48.89 - 6.02 \log(L) - 8.45MPD + 0.42FF + 1.95VMA \quad (3.4)$$

όπου,

SN= Μετρούμενη αντιστοιχιστική ικανότητα

L= Ετήσιος αριθμός ισοδύναμου φορτίου ενός άξονα για κάθε λωρίδα

MPD= Mean Profile Depth, μέσο βάθος μακροϋφής (mm)

FF= Ποσοστό των αδρανών που διέρχονται κόσκινο 2,36 mm

VMA= Ποσοστό των κενών

Το μοντέλο έδειξε μια καλή συσχέτιση της τάξης του $R^2=0,633$. Τα φορτία κυκλοφορίας και η μακροϋφή είχαν αρνητική επίδραση στην εξέλιξη της αντιστοιχιστικής ικανότητας, ενώ το ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών και των κενών είχαν θετική επιρροή (Omar et al. 2017).

Ο Hofko et al. (2017) ανέπτυξαν μια εργαστηριακή διαδικασία με χρήση της συσκευής Wehner-Schulze για την πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιστοιχιστικής ικανότητας υπό κυκλοφορία στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου της περιόδου 2009-2014. Το μοντέλο βασίζεται σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα, σε οδικά τμήματα με γραμμικό άξονα, δηλαδή χωρίς καμπυλότητα και κλίση μεγαλύτερη από 1%. Επίσης, απευθύνεται σε κλιματικές συνθήκες, με θερμά, υγρά καλοκαίρια και ψυχρούς, ξηρούς χειμώνες με περισσότερο από πενήντα κύκλους κατάψυξης-απόψυξης.

Με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης συσχέτισαν ($R^2=0,92$) τον ετήσιο μέσο αριθμό διελεύσεων (AADT), συμπεριλαμβάνοντας τα βαρέα οχήματα, με τις διελεύσεις της συσκευής Wehner-Schulze (βλ. εξισώσεις 3.5, 3.6) (Hofko et al. 2017).

$$CTV_{w,HGV} = \frac{CTV * AADT(HGV)}{10^8 * 10^4} \quad (3.5)$$

$$PP_{C1-C3} = 5336.6CTV_{w,HGV} - 5099.5 \quad (3.6)$$

όπου,

$CTV_{w,HGV}$ = Αθροιστική κυκλοφορία προσαρμοσμένη με βάση τα βαρέα οχήματα

CTV= Αθροιστική κυκλοφορία

3. Διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας

AADT(HGV)= Ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός διελεύσεων συμπεριλαμβανομένου των βαρέων οχημάτων

PP_{C1-C3}= Polishing passes, διελεύσεις στη συσκευή Wehner-Schulze

Τα μοντέλα που τελικά αναπτύχθηκαν εξαρτώνται από το ποσοστό σκόνης χαλαζία στο νερό (εξισώσεις 3.7, 3.8, 3.9, 3.10) (Hofko et al. 2017) και είναι τα εξής:

$$\text{Για καθαρό νερό με } R^2=0.8445, \mu = -0.014\ln(A\Delta) + 0.6136 \quad (3.7)$$

$$\text{Για 0,6\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9919, \mu = -0.039\ln(A\Delta) + 0.7357 \quad (3.8)$$

$$\text{Για 2\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9875, \mu = -0.038\ln(A\Delta) + 0.6679 \quad (3.9)$$

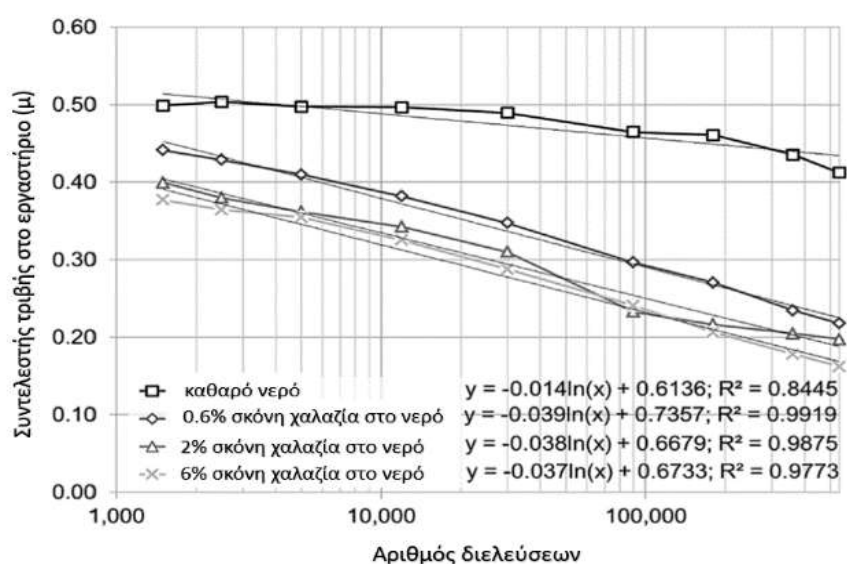
$$\text{Για 6\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9773, \mu = -0.037\ln(A\Delta) + 0.6733 \quad (3.10)$$

όπου,

μ = Συντελεστής τριβής

$A\Delta$ = Αριθμός διελεύσεων οχημάτων

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.7 φαίνεται ότι η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνάρτηση με τον αριθμό διελεύσεων είναι φθίνουσα.



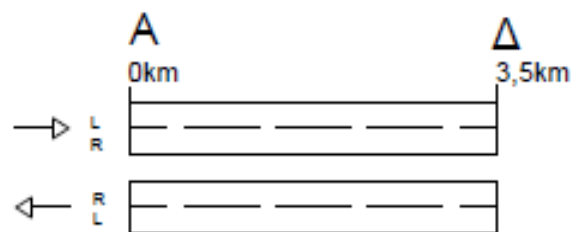
Εικόνα 3.7 Σχέση μεταξύ αριθμού διελεύσεων και συντελεστή τριβής (Hofko et al. 2017).

Συγκεκριμένα, διαφαίνεται ότι η ύπαρξη σκόνης χαλαζία στο νερό επηρεάζει ακόμα περισσότερο την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας καθώς οι διελεύσεις αυξάνονται (Hofko et al. 2017).

4 Πειραματική διαδικασία

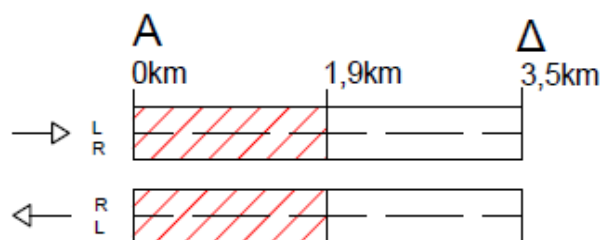
4.1 Περιγραφή δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η επιρροή της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, αξιοποιώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Συγκεκριμένα τα στοιχεία αυτά αφορούν μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας επί τμήματος αυτοκινητοδρόμου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1 το οδικό τμήμα που μελετάται είναι δύο κατευθύνσεων (ΑΔ και ΔΑ) με δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση μήκους 3.5 km.



Εικόνα 4.1 Οδικό τμήμα υπό μελέτη.

Στο συγκεκριμένο οδικό τμήμα έγιναν έργα αναβάθμισης του υφιστάμενου οδοστρώματος μήκους 1.9 km (βλ. εικόνα 4.2). Στο εν λόγω ανακατασκευασμένο τμήμα συλλέχθηκαν στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας για έξι συνεχόμενα έτη.



Εικόνα 4.2 Ανακατασκευασμένο οδικό τμήμα.

Συγκεκριμένα:

- Συλλέχθηκαν στοιχεία συντελεστή τριβής με το σύστημα Grip Tester ανά 10m.
- Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν περιοδικά σε τρεις χρονικές περιόδους ανά έτος, που αντιστοιχούσαν σε υγρή και ξηρή περίοδο.
- Παράλληλα αξιοποιήθηκαν στοιχεία κυκλοφορίας ΕΜΗΚ (Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία) καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά % βαρέων οχημάτων για τα τμήματα μελέτης.

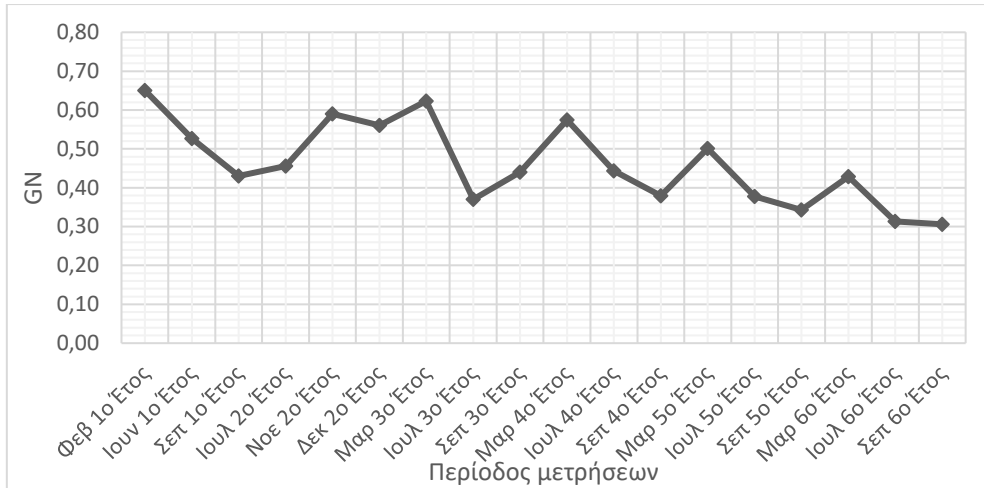
4.2 Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα

4.2.1 Εποχιακή διακύμανση

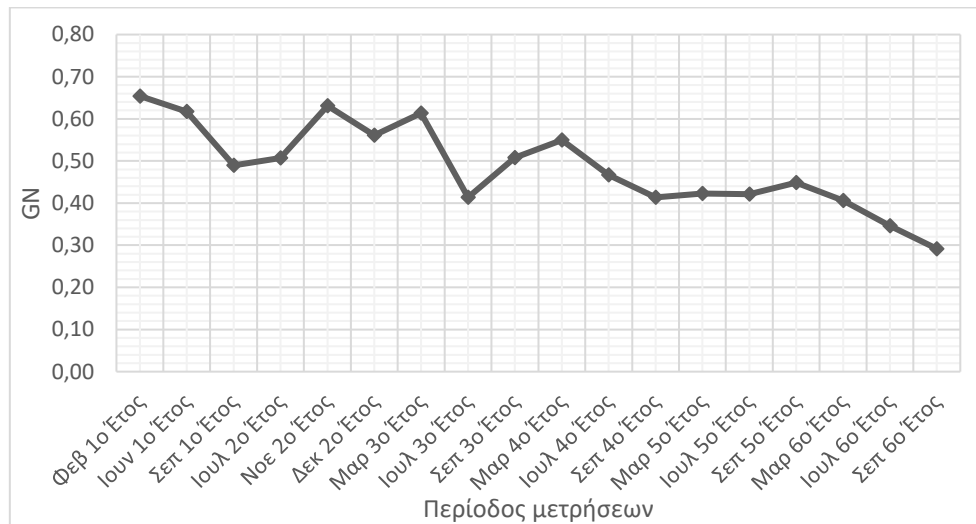
Αρχικά αναλύθηκαν οι μετρήσεις ανά περίοδο μετρήσεων (υγρή και ξηρή) για κάθε μία από τις λωρίδες κίνησης (βλ. εικόνες 4.3-4.6). Στα διαγράμματα των εικόνων εμφανίζονται οι μήνες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Όπου οι μήνες π.χ. Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος αφορούν στην υγρή περίοδο, ενώ οι μήνες π.χ. Ιούνιος, Ιούλιος, Σεπτέμβριος στη ξηρή περίοδο.

Ως χαρακτηριστική τιμή του συντελεστή τριβής για όλο το υπό διερεύνηση οδόστρωμα χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή του συνόλου των μετρήσεων του συντελεστή τριβής για κάθε έναν από τους μήνες που έγιναν μετρήσεις. Η διακύμανση ήταν σε αποδεκτά επίπεδα, ώστε να θεωρείται ότι το δείγμα ανά περίοδο μέτρησης είναι ομοιογενές και άρα η μέση τιμή των μετρήσεων ήταν αντιπροσωπευτική για το τμήμα.

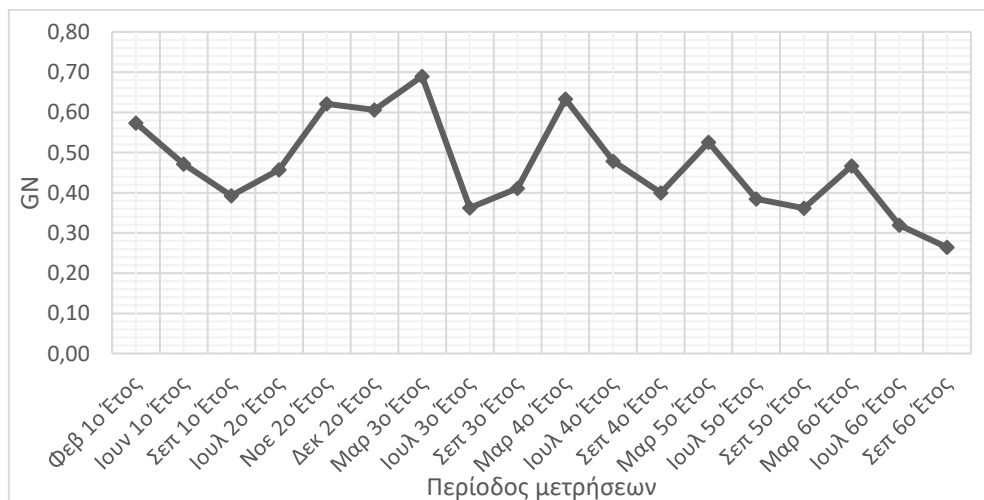
Όπως παρατηρείται από τα επιμέρους διαγράμματα των εικόνων 4.3-4.6, η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης είναι ιδιαίτερα εμφανής.



Εικόνα 4.3 Εποχιακή διακύμανση αντιφλεγμονώδους ικανότητας δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.

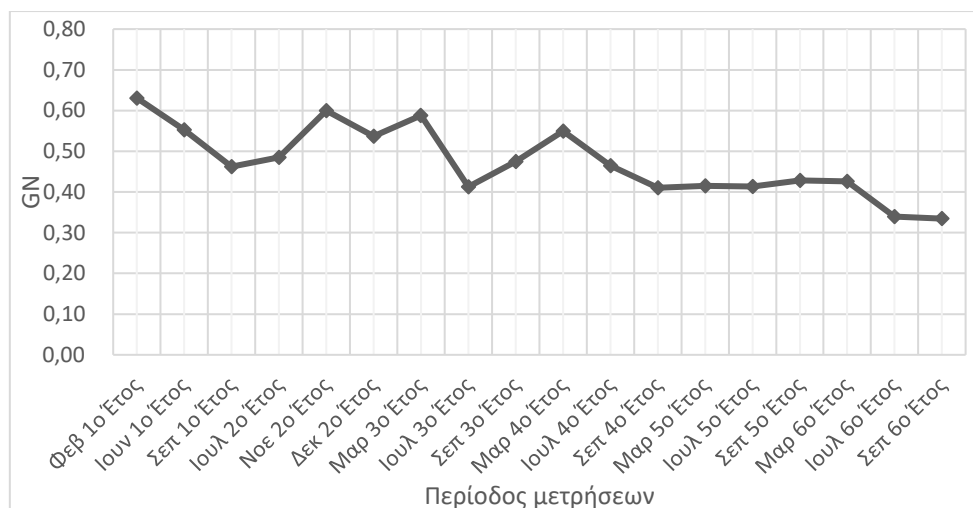


Εικόνα 4.4 Εποχιακή διακύμανση αντιφλεγμονώδους ικανότητας αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.



Εικόνα 4.5 Εποχιακή διακύμανση αντιφλεγμονώδους ικανότητας δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.

4. Πειραματική διαδικασία



Εικόνα 4.6 Εποχιακή διακύμανση αντιολισθητικής ικανότητας αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.

Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι τους μήνες όπου οι βροχοπτώσεις στην Ελλάδα είναι πιο έντονες και το οδόστρωμα πιο καθαρό από παράγοντες όπως σκόνη, κατάλοιπα ελαστικών, λάδια κλπ, η τιμή του συντελεστή τριβής είναι υψηλότερη απ' ότι τους μήνες με λιγότερες βροχοπτώσεις, γεγονός που έχει επισημανθεί σε αρκετές έρευνες (βλ. Κεφάλαιο 2.4.5). Επιπλέον, αν και ο συντελεστής τριβής παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση με ποσοστό υποβάθμισης 34% μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου κατά μέσο όρο, η υποβάθμιση του συντελεστή τριβής από την αρχική του τιμή είναι εμφανής σε όλα τα διαγράμματα ανεξαρτήτως κατεύθυνσης και λωρίδας. Ωστόσο, παρατηρείται ότι έπειτα από μια χαμηλή τιμή του συντελεστή τριβής, η αντιολισθητική ικανότητα δεν επηρεάζεται από την εποχιακή διακύμανση, το οποίο επιβεβαιώνει και η βιβλιογραφία. Γενικά, διαπιστώνεται ότι η αντιολισθητική ικανότητα με το πέρας των έξι ετών μειώθηκε περίπου κατά το ήμισυ σε όλες τις λωρίδες.

Δεδομένου ότι η εποχιακή διακύμανση επηρεάζει την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, καθώς εμφανίζει ανομοιομορφία λόγω της μεταβολής των περιόδων, η ανάλυση της επίδρασης του παράγοντα της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος δυσκολεύει.

Για το λόγο αυτόν, στο επόμενο εδάφιο γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης του παράγοντα της κυκλοφορίας με στόχο την ποσοτικοποίηση της σχέσης της με την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας.

4.2.2 Υπολογισμός και ανάλυση της κυκλοφορίας

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος, πραγματοποιήθηκε ετήσια αναγωγή τόσο στον συντελεστή τριβής, όσο και στον αριθμό των διελεύσεων.

Όσον αφορά στην κυκλοφορία, υπολογίστηκε η Ετήσια Αθροιστική Κυκλοφορία (ΕΑΚ) για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά, π.χ. για το 1^ο έτος που τέθηκε σε λειτουργία το συγκεκριμένο οδικό τμήμα, η ΕΑΚ δίνεται από τις σχέσεις 4.1 και 4.2:

$$ΕΑΚ = ΕΜΗΚ(1^ο \text{ έτος}) * 30(\text{ημέρες}) * 12(\text{μήνες}) \quad (4.1)$$

όπου,

ΕΑΚ= Ετήσια αθροιστική κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

ΕΜΗΚ= Ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

Καθώς όμως το τμήμα κυκλοφορήθηκε 4 μήνες πριν την πρώτη μέτρηση του 1^{ου} έτους, η κυκλοφορία αυτή δεν αγνοήθηκε αλλά προστέθηκε κατάλληλα, δηλαδή:

$$ΕΑΚ = ΕΜΗΚ(0 \text{ έτος}) * 30(\text{ημέρες}) * 4(\text{μήνες}) + ΕΜΗΚ(1^ο \text{ έτος}) * 30(\text{ημέρες}) * 12(\text{μήνες}) \quad (4.2)$$

όπου,

0 έτος= Το έτος πριν τις περιοδικές μετρήσεις

ΕΑΚ= Ετήσια αθροιστική κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

ΕΜΗΚ= Ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η αθροιστική κυκλοφορία μέχρι και το 6^ο έτος.

Όμως δεδομένου ότι η κυκλοφορία αφορά και στις δύο λωρίδες κυκλοφορίας, θεωρήθηκε σημαντικό να επιμεριστεί ανά λωρίδα.

Ο επιμερισμός της κυκλοφορίας βασίστηκε στις ακόλουθες παραδοχές:

- Στη δεξιά λωρίδα κινούνται όλα τα βαρέα οχήματα.
- Ο αριθμός των βαρέων οχημάτων αποτελεί το 1/3 της συνολικής κυκλοφορίας της δεξιάς λωρίδας, δηλαδή:

4. Πειραματική διαδικασία

$$B = (1/3) * EAK_{\text{δεξιά}} \quad (4.3)$$

όπου,

B=Βαρέα οχήματα

EAK_{δεξιά}=Ετήσια αθροιστική κυκλοφορία δεξιάς λωρίδας

Όσον αφορά στην τιμή του συντελεστή τριβής, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων κάθε έτους. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η εξισορρόπηση μεταξύ της ξηρής και υγρής αντιολισθητικής ικανότητας. Η πρακτική αυτή εφαρμόζεται και διεθνώς (HD/Standards 2015).

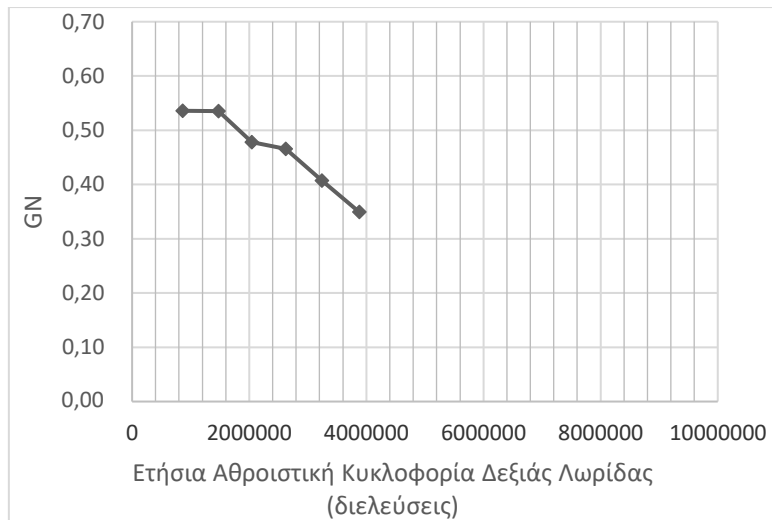
Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς προέκυψε ο πίνακας 4.1, όπου απεικονίζονται τα εξής στοιχεία:

- Ο συντελεστής τριβής (GN) δεξιάς και αριστερής λωρίδας.
- Η αντίστοιχη ετήσια αθροιστική κυκλοφορία (EAK) για κάθε έτος μετρήσεων για την κατεύθυνση ΑΔ.

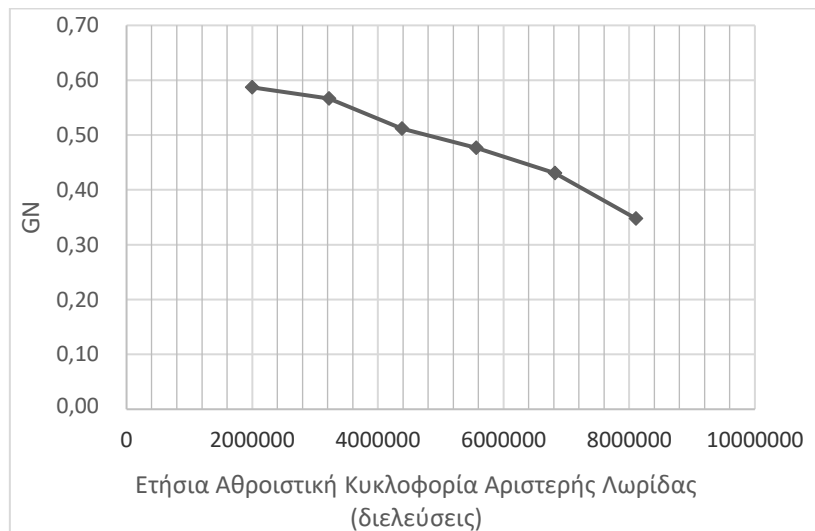
Πίνακας 4.1 Τιμές αθροιστικής ετήσιας κυκλοφορίας και αντίστοιχοι συντελεστές τριβής.

ΕΤΟΣ	GN Δεξιάς Λωρίδας	GN Αριστερής Λωρίδας	Κυκλοφορία (διελεύσεις οχημάτων) (EAK)	Βαρέα οχήματα (διελεύσεις οχημάτων) (B)	Κυκλοφορία δεξιάς λωρίδας (διελεύσεις οχημάτων) (EAK _{δεξιά})	Κυκλοφορία αριστερής λωρίδας (διελεύσεις οχημάτων) (EAK _{αριστερά})
1 ^ο έτος	0,54	0,59	2858880	287231,52	861694,56	1997185,44
2 ^ο έτος	0,54	0,57	4694880	491027,52	1473082,56	3221797,44
3 ^ο έτος	0,48	0,51	6422880	681107,52	2043322,56	4379557,44
4 ^ο έτος	0,47	0,48	8186880	875147,52	2625442,56	5561437,44
5 ^ο έτος	0,41	0,43	10058880	1081067,52	3243202,56	6815677,44
6 ^ο έτος	0,35	0,35	11982360	1292650,32	3877950,96	8104409,04

Στα διαγράμματα των εικόνων 4.7, 4.8 παρουσιάζεται η επίδραση της ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας (EAK) στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος για κάθε μία από τις λωρίδες μελέτης για την κατεύθυνση ΑΔ με βάση την παραπάνω διαμόρφωση.



Εικόνα 4.7 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.



Εικόνα 4.8 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΑΔ.

Από τα διαγράμματα των εικόνων 4.7, 4.8 φαίνεται ότι παρ' όλο που στη δεξιά λωρίδα ο αριθμός διελεύσεων οχημάτων είναι μικρότερος από την αριστερή, με αναλογία της τιμής των διελεύσεων των δύο λωρίδων ($EAK_{αριστερής}/EAK_{δεξιάς}=2$, η τελική τιμή του συντελεστή τριβής (GN) είναι ίδια με της αριστερής, στην κατεύθυνση ΑΔ.

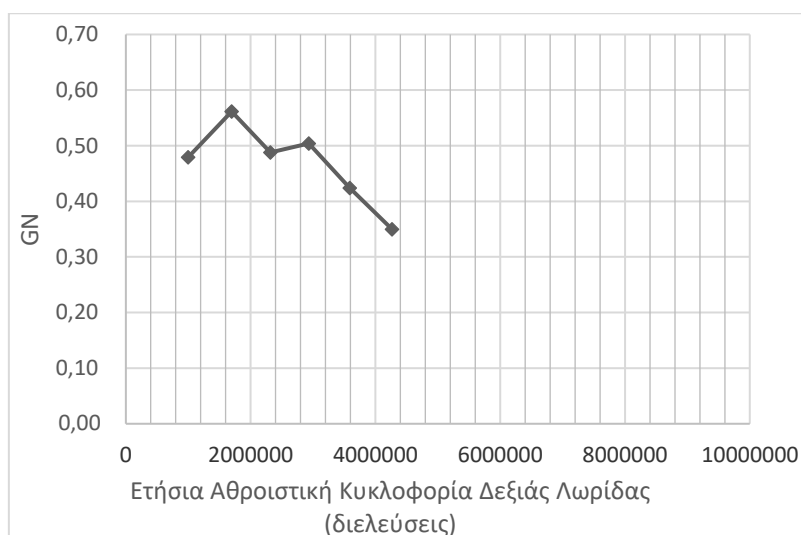
Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε και για την κατεύθυνση ΔΑ και προέκυψε ο Πίνακας 4.2.

4. Πειραματική διαδικασία

Πίνακας 4.2 Τιμές αθροιστικής ετήσιας κυκλοφορίας και αντίστοιχοι συντελεστές τριβής.

ΕΤΟΣ	GN Δεξιάς Λωρίδας	GN Αριστερής Λωρίδας	Κυκλοφορία (διελεύσεις οχημάτων) (ΕΑΚ)	Βαρέα οχήματα (διελεύσεις οχημάτων) (Β)	Κυκλοφορία δεξιάς λωρίδας (διελεύσεις οχημάτων) (ΕΑΚ _{δεξιάς})	Κυκλοφορία αριστερής λωρίδας (διελεύσεις οχημάτων) (ΕΑΚ _{αριστερής})
1 ^ο έτος	0,48	0,55	3172200	333090,6	999271,8	2172928,2
2 ^ο έτος	0,56	0,54	5224200	564966,6	1694899,8	3529300,2
3 ^ο έτος	0,49	0,49	7204200	772866,6	2318599,8	4885600,2
4 ^ο έτος	0,50	0,47	9148200	976986,6	2930959,8	6217240,2
5 ^ο έτος	0,42	0,42	11236200	1196227	3588679,8	7647520,2
6 ^ο έτος	0,35	0,37	13381800	1421515	4264543,8	9117256,2

Στα διαγράμματα των εικόνων 4.9, 4.10 παρουσιάζεται η επίδραση της ετήσιας αθροιστικής ετήσιας κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιστοιχιστικής ικανότητας του οδοστρώματος για κάθε μία από τις λωρίδες μελέτης για την κατεύθυνση ΔΑ με βάση την παραπάνω διαμόρφωση.

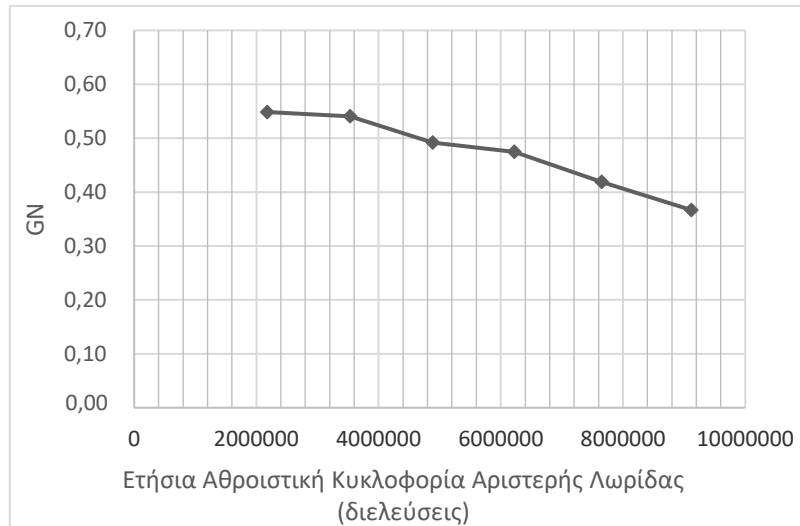


Εικόνα 4.9 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής δεξιάς λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.

Ωστόσο, παρατηρείται ότι στην συγκεκριμένη κατεύθυνση και λωρίδα (δεξιά) ενώ οι διελεύσεις αυξάνονται, η τιμή της αντιστοιχιστικής ικανότητας είναι υψηλότερη κατά το δεύτερο έτος μετρήσεων, γεγονός που χρήζει περαιτέρω αιτιολόγησης.

Συγκεκριμένα, για την επεξήγηση της συγκεκριμένης τάσης δόθηκε περισσότερη προσοχή στις επιμέρους μετρήσεις που φαίνονται στην εικόνα 4.5. Δηλαδή τους μήνες Ιούλιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο του δεύτερου έτους, οι τιμές της αντιστοιχιστικής ικανότητας φθάνουν σε υψηλότερα επίπεδα συγκριτικά με το

προηγούμενο έτος μετρήσεων. Πιθανώς, η συγκεκριμένη τάση μπορεί να αποδοθεί στο ενδεχόμενο αυξημένου ποσοστού κατακρημνίσεων κατά την διάρκεια του εν λόγω έτους σε σχέση με το προηγούμενο. Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια του οδοστρώματος ενδεχομένως να έχει καλύτερα χαρακτηριστικά υφής (λιγότερα κατάλοιπα ή σκόνη) και συνεπώς το επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας είναι υψηλότερο.



Εικόνα 4.10 Συσχέτιση ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας και συντελεστή τριβής αριστερής λωρίδας κατεύθυνσης ΔΑ.

Ομοίως, και στην κατεύθυνση ΔΑ ισχύει το ίδιο για τις διελεύσεις, αλλά η τιμή του συντελεστή τριβής (GN) της δεξιάς λωρίδας είναι μικρότερη.

Γενικά, ο ρυθμός υποβάθμισης της αντιολισθητικής ικανότητας για τη δεξιά λωρίδα είναι 30% και στην αριστερή 35% κατά μέσο όρο των δύο κατευθύνσεων, που μπορούν να θεωρηθούν σχεδόν ίσα. Παρ' όλο που στη δεξιά λωρίδα ο αριθμός διελεύσεων οχημάτων είναι μικρότερος, όπως έχει προαναφερθεί, η τελική τιμή του συντελεστή τριβής είναι ίδια με της αριστερής λωρίδας. Λαμβάνοντας υπ' όψη και τα διαγράμματα κάθε λωρίδας της κάθε κατεύθυνσης (βλ. εικόνες 4.7-4.10), η διαφοροποίηση της υποβάθμισης μεταξύ της δεξιάς και αριστερής λωρίδας μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη βαρέων οχημάτων.

Η παραπάνω διαμόρφωση της κυκλοφορίας ανά λωρίδα αφενός αναδεικνύει την υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας στις επιμέρους λωρίδες και αφετέρου,

4. Πειραματική διαδικασία

βοηθάει στην εξάλειψη της επίδρασης της εποχιακής διακύμανσης και στην καταγραφή της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας στο χρόνο.

5 Πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω κυκλοφορίας

5.1 Γενικά

Ως επόμενο βήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνάται η δυνατότητα ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων που να εκφράζουν την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας υπό την επίδραση της κυκλοφορίας, λαμβάνοντας υπ' όψη τη διαμόρφωση της κυκλοφορίας, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.2.2.

Για τον προσδιορισμό των μοντέλων πραγματοποιείται γραμμική, πολυωνυμική και εκθετική ανάλυση παλινδρόμησης. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της κατεύθυνσης ΑΔ ως εξής:

- α) Ενιαία και για τις δύο λωρίδες κυκλοφορίας.
- β) Μόνο για τη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας.
- γ) Μόνο για την αριστερή λωρίδα κυκλοφορίας.

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 θα καθορίσει τη ποιότητα του εκάστοτε μοντέλου. Το R^2 χρησιμοποιείται ως κριτήριο καλής προσαρμογής των δεδομένων στο μοντέλο παλινδρόμησης. Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης R^2 κυμαίνονται από 0 έως 1 και προφανώς όσο η τιμή πλησιάζει προς το 1 τόσο καλύτερη προσαρμογή έχει το μοντέλο. Συνήθως χαρακτηρίζεται ισχυρή η συσχέτιση όταν $R^2 > 0.9$. Βέβαια, μεταξύ δύο ή περισσότερων μοντέλων επιλέγεται ως καταλληλότερο εκείνο με τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης R^2 .

Η επαλήθευση των μοντέλων θα γίνει χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της άλλης κατεύθυνσης.

5.2 Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης

5.2.1 Ενιαίο μοντέλο

Με στόχο την δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης ανεξαρτήτως λωρίδας κίνησης, ενσωματώθηκαν τα στοιχεία από τη δεξιά και αριστερή λωρίδα. Αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα πρόβλεψης του συντελεστή τριβής σε όρους GN συναρτήσει της ετήσιας αθροιστικής κυκλοφορίας. Τα μοντέλα αυτά ήταν, α) ένα γραμμικό, β) ένα πολυωνυμικό 2^{ου} βαθμού και γ) ένα εκθετικό. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την κατεύθυνση ΑΔ για τον συνδυασμό των δύο λωρίδων και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης R² είναι οι μαθηματικές σχέσεις 5.1, 5.2, 5.3.

α) Γραμμικό μοντέλο:

$$GN = 0.56 - 2 * 10^{-8} * EAK \text{ με } R^2=0.39 \quad (5.1)$$

β) Πολυωνυμικό μοντέλο 2^{ου} βαθμού:

$$GN = -20 * 10^{-15} * EAK^2 - 20 * 10^{-9} * EAK + 0.56 \text{ με } R^2=0.39 \quad (5.2)$$

γ) Εκθετικό μοντέλο:

$$GN = 0.56e^{-50*10^{-7}*EAK} \text{ με } R^2=0.40 \quad (5.3)$$

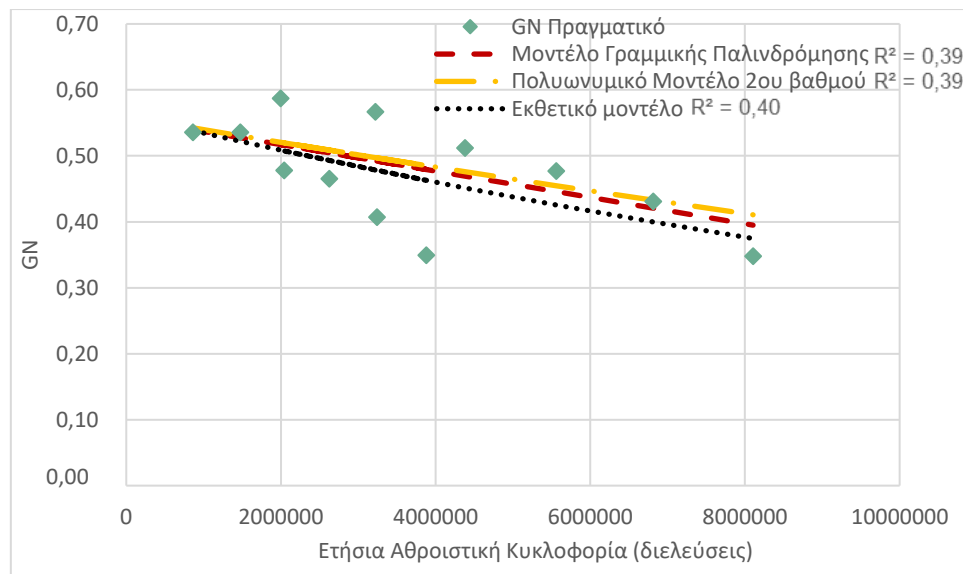
όπου,

GN= Συντελεστής τριβής

EAK= Ετήσια Αθροιστική Κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.1 συγκρίνονται τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τις πραγματικές τιμές του συντελεστή τριβής.

5. Πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω κυκλοφορίας



Εικόνα 5.1 Ανάπτυξη ενιαίων μοντέλων πρόβλεψης κατεύθυνσης ΑΔ.

Η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας στις επιμέρους λωρίδες αποτυπώνεται διαφορετικά, όπως φαίνεται από το διάγραμμα της εικόνας 5.1. Αυτό πιθανώς συμβαίνει λόγω της διαφορετικής φόρτισης που υπόκεινται οι δύο λωρίδες. Λόγω, λοιπόν, της διαφοροποίησης των τιμών των μετρήσεων μεταξύ της δεξιάς και αριστερής λωρίδας, παρουσιάζεται έντονη απόκλιση μεταξύ της τάσης του μοντέλου και των πραγματικών μετρήσεων.

Γενικά, τα μοντέλα πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν συνδυάζοντας τις δύο λωρίδες δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Η ανάπτυξη των μοντέλων δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 , που είναι σχεδόν ίδιος και για τα τρία μοντέλα, δεν είναι ικανοποιητικός για κανένα από αυτά. Η τιμή του είναι πολύ χαμηλή για να γίνει αποδεκτό κάποιο από τα μοντέλα. Πιθανώς, αυτό να οφείλεται στην σύνθεση της κυκλοφορίας, δηλαδή στην ύπαρξη βαρέων οχημάτων, που φορτίζουν διαφορετικά την αριστερή από τη δεξιά λωρίδα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης για κάθε λωρίδα ξεχωριστά πιθανώς να αντιπροσωπεύει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες ώστε να μπορεί να οριστεί πιο ξεκάθαρα η καταλληλότητα των μοντέλων.

5.2.2 Μοντέλο για τη δεξιά λωρίδα

Η ανάπτυξη των ενιαίων μοντέλων δεν επέφερε θετικά αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτόν, στη συνέχεια των παραπάνω αναπτύχθηκαν μοντέλα πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας για κάθε λωρίδα ξεχωριστά. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με παραπάνω.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την κατεύθυνση ΑΔ και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης R^2 για τη δεξιά λωρίδα είναι οι μαθηματικές σχέσεις 5.4, 5.5, 5.6.

α) Γραμμικό μοντέλο δεξιάς λωρίδας:

$$GN = 0.61 - 6.36 * 10^{-8} * EAK \text{ με } R^2=0.95 \quad (5.4)$$

β) Πολυωνυμικό μοντέλο 2^{ου} βαθμού δεξιάς λωρίδας:

$$GN = -1.32 * 10^{-14} * EAK^2 + 3 * 10^{-9} * EAK + 0.55 \text{ με } R^2=0.98 \quad (5.5)$$

γ) Εκθετικό μοντέλο δεξιάς λωρίδας:

$$GN = 0.639 e^{-10^{-7} * EAK} \text{ με } R^2=0.93 \quad (5.6)$$

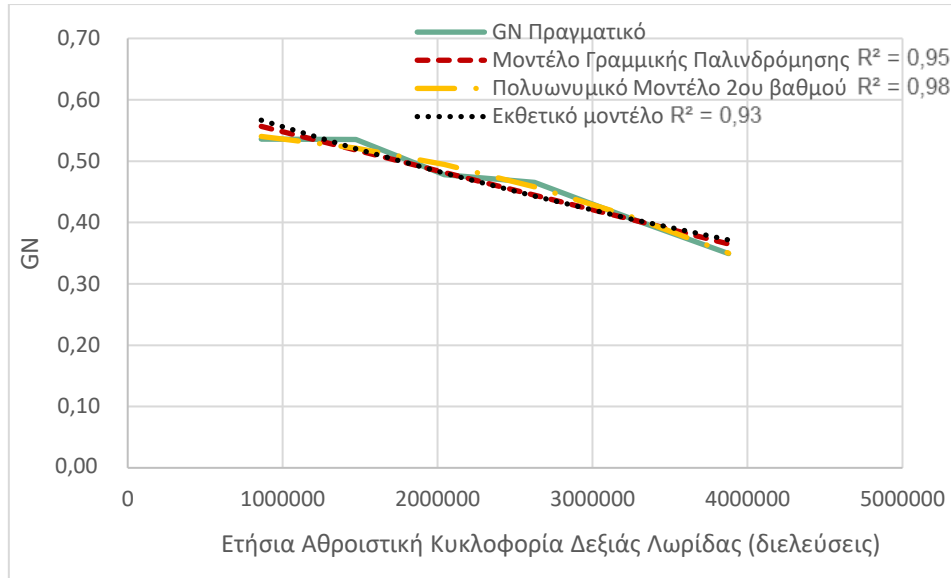
όπου,

GN= Συντελεστής τριβής

EAK= Ετήσια Αθροιστική Κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.2 συγκρίνονται τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τις πραγματικές τιμές του συντελεστή τριβής.

5. Πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω κυκλοφορίας



Εικόνα 5.2 Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης δεξιάς λωρίδας, κατεύθυνσης ΑΔ.

Φαίνεται ότι και τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν ακολουθούν την τάση των πραγματικών στοιχείων από τις μετρήσεις με συντελεστή συσχέτισης πολύ ισχυρό ($R^2 > 0.9$). Μάλιστα, το πολυωνυμικό μοντέλο 2^{ου} βαθμού παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης, $R^2=0.98$. Σύμφωνα, λοιπόν με το κριτήριο του συντελεστή συσχέτισης, και τα τρία μοντέλα θεωρούνται αποδεκτά.

5.2.3 Μοντέλο για την αριστερή λωρίδα

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στη δεξιά λωρίδα, επαναλήφθηκε για την αριστερή. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την κατεύθυνση ΑΔ για την αριστερή λωρίδα και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης R^2 είναι οι μαθηματικές σχέσεις 5.7, 5.8, 5.9.

α) Γραμμικό μοντέλο αριστερής λωρίδας:

$$GN = 0.68 - 3.86 \cdot 10^{-8} \cdot EAK \text{ με } R^2=0.97 \quad (5.7)$$

β) Πολυωνυμικό μοντέλο 2^{ου} βαθμού αριστερής λωρίδας:

$$GN = -2.68 \cdot 10^{-15} \cdot EAK^2 - 8 \cdot 10^{-9} \cdot EAK + 0.616 \text{ με } R^2=0.99 \quad (5.8)$$

γ) Εκθετικό μοντέλο δεξιάς λωρίδας:

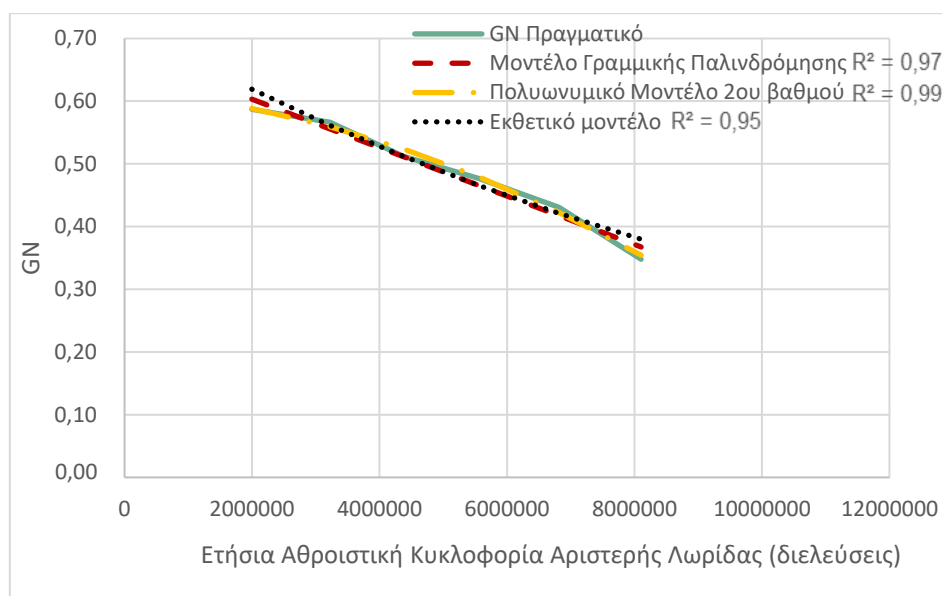
$$GN = 0.726e^{-80 \cdot 10^{-7} \cdot EAK} \text{ με } R^2=0.96 \quad (5.9)$$

όπου,

GN= Συντελεστής τριβής

EAK= Ετήσια Αθροιστική Κυκλοφορία, διελεύσεις οχημάτων

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.3 συγκρίνονται τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τις πραγματικές τιμές του συντελεστή τριβής.



Εικόνα 5.3 Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης αριστερής λωρίδας, κατεύθυνσης ΑΔ.

Σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης που προαναφέρθηκαν, φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση, ότι και τα τρία μοντέλα που αναπτύχθηκαν ακολουθούν την τάση των πραγματικών στοιχείων από τις μετρήσεις, με συντελεστές συσχέτισης R^2 ισχυρούς. Μάλιστα, το πολυωνυμικό μοντέλο 2^{ου} βαθμού παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης, $R^2=0.99$, και περιγράφει σχεδόν απόλυτα την καμπύλη των τιμών των μετρήσεων. Γενικά, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αριστερή λωρίδα είναι αποδεκτά.

Δεδομένων των ανωτέρω, η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης για κάθε λωρίδα ξεχωριστά φαίνεται να αντιπροσωπεύει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, απορρίπτεται σε κάθε περίπτωση το ενιαίο μοντέλο και πραγματοποιούνται αναλύσεις για τον έλεγχο επαλήθευσης των μοντέλων ανά λωρίδα.

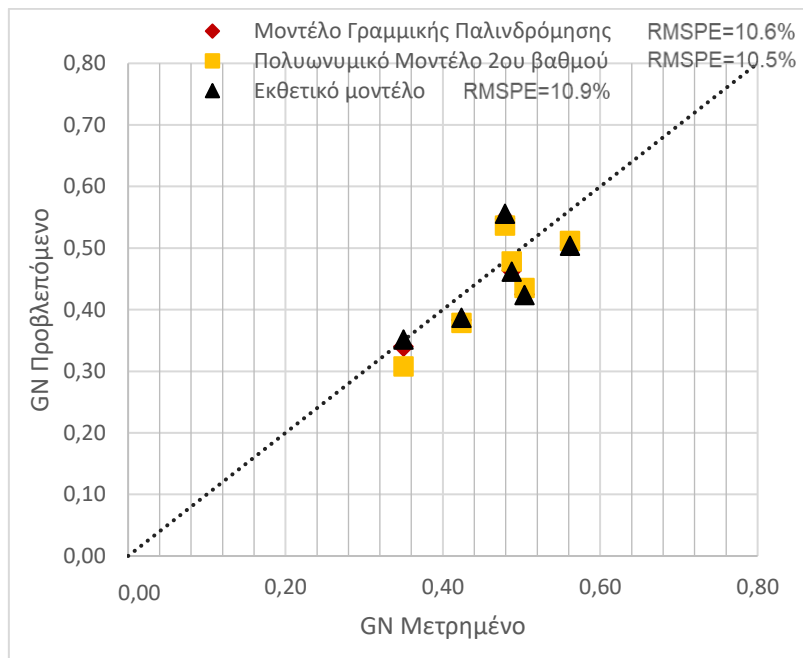
5.3 Επαλήθευση μοντέλων

Για την αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας ανά λωρίδα διερευνώνται οι αποκλίσεις των προβλεπόμενων τιμών αντιολισθητικής ικανότητας από τις μετρημένες, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της άλλης κατεύθυνσης (ΔΑ) μέσω του δείκτη RMSPE (Root Mean Square Percent of Error %) (εξίσωση 5.10).

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{GN_{\text{προβλεπόμενο}} - GN_{\text{μετρημένο}}}{GN_{\text{μετρημένο}}} \right)^2} * 100 \quad (5.10)$$

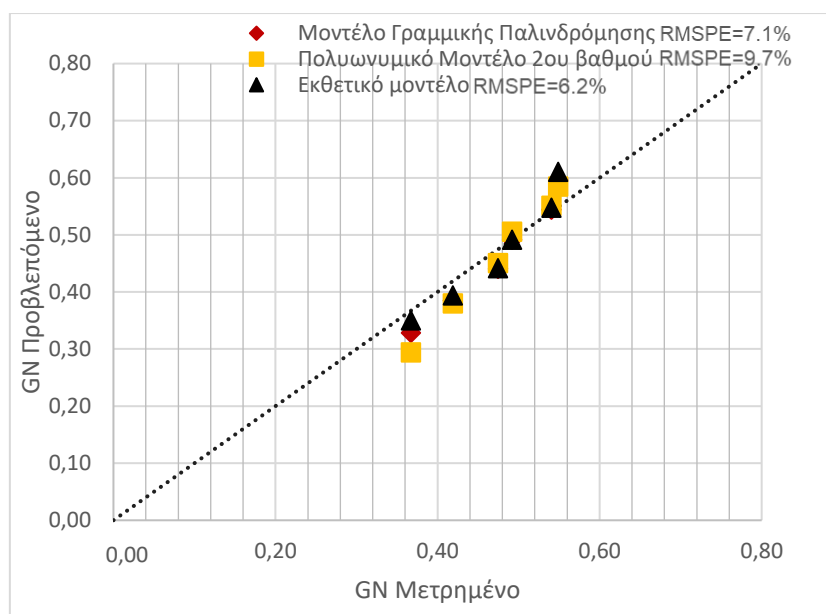
Ο δείκτης αυτός, αποτελεί έναν δείκτη ποιότητας προσαρμογής που παρέχει απευθείας πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των σφαλμάτων των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με τις τιμές των μετρήσεων. Οι τιμές του RMSPE έχουν εύρος από 0 έως 100%. Όσο η τιμή πλησιάζει προς το 0 τόσο καλύτερες είναι οι τιμές που προέρχονται από το μοντέλο.

Η επαλήθευση για το αν τα μοντέλα αυτά μπορούν να αντιπροσωπεύσουν τις συνθήκες της αντίθετης κατεύθυνσης εμφανίζονται στα διαγράμματα των εικόνων 5.4, 5.5.



Εικόνα 5.4 Επαλήθευση μοντέλων πρόβλεψης δεξιάς λωρίδας, κατεύθυνσης ΔΑ.

5. Πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω κυκλοφορίας



Εικόνα 5.5 Επαλήθευση μοντέλων πρόβλεψης αριστερής λωρίδας, κατεύθυνσης ΔΑ.

Στο διάγραμμα της εικόνας 5.4 παρατηρείται ότι και τα τρία μοντέλα της δεξιάς λωρίδας της κατεύθυνσης ΑΔ προβλέπουν με σχετικά καλή ακρίβεια τις μετρημένες τιμές αντιολισθητικής ικανότητας της κατεύθυνσης ΔΑ. Η ακρίβεια αυτή βελτιώνεται στα μοντέλα της αριστερής λωρίδας. Παρατηρείται από το διάγραμμα της εικόνας 5.5 ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αριστερή λωρίδα της κατεύθυνσης ΑΔ, προβλέπουν με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια τις μετρημένες τιμές αντιολισθητικής ικανότητας της κατεύθυνσης ΔΑ, σε σχέση με τη δεξιά λωρίδα.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για την αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης από τον έλεγχο του δείκτη RMSPE (Root Mean Square Percent of Error %) για τις δύο λωρίδες.

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών RMSPE.

RMSPE, %	Δεξιά λωρίδα	Αριστερή λωρίδα
Γραμμικό Μοντέλο	10.6%	7.1%
Πολυωνυμικό Μοντέλο	10.5%	9.7%
Εκθετικό Μοντέλο	10.9%	6.2%

Ο δείκτης RMSPE έχει περίπου την ίδια τιμή για τα τρία μοντέλα της δεξιάς λωρίδας, που είναι αρκετά χαμηλή ώστε να γίνει η υπόθεση ότι οι πραγματικές τιμές δεν διαφέρουν από τις τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα. Ωστόσο η τιμή RMSPE δεν μπορεί να οδηγήσει στην ξεκάθαρη επιλογή ενός μοντέλου πρόβλεψης, ως καλύτερο. Όσον αφορά στην αριστερή λωρίδα, η τιμή του δείκτη RMSPE είναι ικανοποιητική και για τα τρία μοντέλα, με χαμηλότερη τιμή να παρουσιάζει το εκθετικό μοντέλο (RMSPE=6.2%). Σύμφωνα με τα κριτήρια αποδοχής μοντέλων μπορεί να θεωρηθεί πως οι πραγματικές τιμές δεν διαφέρουν από τις τιμές που προκύπτουν από τα μοντέλα. Τελικά, το μοντέλο που πιθανώς μπορεί να αποτυπώσει καλύτερα τις συνθήκες της αριστερής λωρίδας είναι το εκθετικό μοντέλο, καθώς έχει την μικρότερη τιμή RMSPE και κατά την ανάπτυξη του μοντέλου πρόβλεψης η τιμή του R^2 είναι πολύ υψηλή.

6 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας υπό την επίδραση της κυκλοφορίας. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδείχθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Οι παράγοντες αυτοί είναι τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, τα χαρακτηριστικά των ελαστικών του οχήματος, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος και τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Απ' αυτούς του παράγοντες, η κυκλοφορία αποτελεί μια πολύ βασική παράμετρο, καθώς η διεθνής εμπειρία έχει στοιχειοθετήσει την επίδρασή της στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, η οποία βασίστηκε σε στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας που μετρήθηκαν σε ανακατασκευασμένο οδόστρωμα αυτοκινητόδρομου και στα αντίστοιχα στοιχεία κυκλοφορίας, προέκυψαν τα ακόλουθα.

Η εποχιακή διακύμανση είναι ιδιαίτερα εμφανής, με μέσο ποσοστό υποβάθμισης της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος 34% μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου. Βέβαια, παρατηρείται ότι το ποσοστό αυτό έχει καθοδική πορεία και έπειτα από μια χαμηλή τιμή του συντελεστή τριβής, θα μπορούσε να γίνει η υπόθεση ότι η εποχιακή διακύμανση εξαλείφεται και παύει να επηρεάζει την αντιολισθητική ικανότητα. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η αντιολισθητική ικανότητα με το πέρας των έξι ετών μειώθηκε περίπου κατά το ήμισυ σε όλες τις λωρίδες.

Κατά τη διερεύνηση του παράγοντα της κυκλοφορίας, παρατηρήθηκε ότι παρ' όλο που η δεξιά λωρίδα έχει το μισό αριθμό διελεύσεων οχημάτων, η τελική τιμή του συντελεστή τριβής είναι ίση ή και μικρότερη από την τιμή του συντελεστή τριβής της αριστερής λωρίδας. Η διαφοροποίηση της υποβάθμισης της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ δεξιάς και αριστερής λωρίδας μπορεί να αποδοθεί στον μεγάλο αριθμό βαρέων οχημάτων που κινούνται στη δεξιά λωρίδα. Ωστόσο, κατά το δεύτερο έτος παρακολούθησης των οδοστρωμάτων ενώ οι διελεύσεις αυξάνονται, η τιμή της

αντιολισθητικής ικανότητας είναι υψηλότερη συγκριτικά με το προηγούμενο έτος μετρήσεων. Πιθανώς, η συγκεκριμένη τάση μπορεί να αποδοθεί στο ενδεχόμενο αυξημένου ποσοστού κατακρημνίσεων κατά τη διάρκεια του εν λόγω έτους σε σχέση με το προηγούμενο. Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια του οδοστρώματος έχει καλύτερα χαρακτηριστικά υφής (λιγότερα κατάλοιπα ή σκόνη) και συνεπώς το επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας είναι υψηλότερο. Η εν λόγω διαπίστωση είναι σε σύμπνοια με τη διεθνή εμπειρία στο συγκεκριμένο πεδίο έρευνας.

Όσον αφορά στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας, συνδυάζοντας τις τιμές των δύο λωρίδων αναπτύχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα (γραμμικό, πολυωνυμικό, εκθετικό). Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης R^2 μεταξύ των τιμών αντιολισθητικής ικανότητας και των τιμών που προέκυψαν από τα παραπάνω μοντέλα δεν ήταν ικανοποιητικός. Συνεπώς τα μοντέλα αυτά δεν έγιναν αποδεκτά.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν αντίστοιχα μοντέλα πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας ξεχωριστά για τη δεξιά και αριστερή λωρίδα. Και στις δύο λωρίδες τα μοντέλα ήταν αποδεκτά καθώς οι συντελεστές συσχέτισης R^2 (μετρημένες τιμές-τιμές από μοντέλα) ήταν αρκετά υψηλοί. Από την επαλήθευση των παραπάνω μοντέλων, όπου χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης RMSPE, προέκυψε για την αριστερή λωρίδα ότι το εκθετικό μοντέλο περιγράφει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα, ενώ στη δεξιά λωρίδα και τα τρία μοντέλα (γραμμικό, πολυωνυμικό, εκθετικό) είχαν την ίδια καλή προσαρμογή.

Η τιμή του δείκτη RMSPE ήταν χαμηλότερη στην αριστερή λωρίδα σε σχέση με τη δεξιά λωρίδα, δηλαδή τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την αριστερή λωρίδα φάνηκε να προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές αντιολισθητικής ικανότητας στην υπ' όψη λωρίδα απ' ό,τι τα αντίστοιχα για τη δεξιά λωρίδα. Πιθανώς αυτό να οφείλεται στην επίδραση που μπορεί να έχει στο οδόστρωμα ο αριθμός βαρέων οχημάτων και οι συνθήκες κυκλοφορίας (ταχύτητα οχημάτων), καθώς κατά τη διαμόρφωση της κυκλοφορίας, υπήρχε έντονη διαφοροποίηση των τιμών των μετρήσεων μεταξύ της δεξιάς και αριστερής λωρίδας.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να αφορούν στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας στο εργαστήριο με τη βοήθεια κατάλληλου, εξειδικευμένου εξοπλισμού. Η καταλληλότητα αυτών των μοντέλων θα επαληθευόταν συγκρίνοντας τις τιμές της αντιολισθητικής ικανότητας που θα προέκυπταν από το εργαστηριακό μοντέλο με τα αποτελέσματα μετρήσεων πεδίου.

Μια επιπλέον πρόταση σχετίζεται με την εισαγωγή και άλλων παραμέτρων στην ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας. Για παράδειγμα, την προσθήκη του παράγοντα της θερμοκρασίας, της ύπαρξης (ή όχι) νερού μέσω κάποιας επιπρόσθετης παραμέτρου και τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος της αντιολισθηρής στρώσης, δηλαδή το είδος των αδρανών, το ποσοστό κενών κλπ., πάντα σε σχέση με την επίδραση της κυκλοφορίας

7 Βιβλιογραφικές αναφορές

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., Σημειώσεις για το μάθημα «Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων», Τεύχος Β' Εκδόσεις ΕΜΠ, 2015.

AASHTO, Guide for pavement friction, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.

ASTM, Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester, ASTM E303-93, DOI: 10.1520/E0303-93R18, 2018.

Ahammed M. A. and Tighe S. L., Early-Life, Long-Term, and Seasonal Variations in Skid Resistance in Flexible and Rigid Pavements, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 2094, pp. 112–120, DOI: 10.3141/2094-12, 2009.

Andresen A., Wambold J. C., Friction Fundamentals, Concepts and Methodology, 1999.

Austroroads Ltd., Guidance for the Development of Policy to Manage Skid Resistance, Research Report, AP-R374/11, 2011.

Austroroads, Guide to Pavement Technology Part 4E: Recycled Materials, Austroroads Publication, No. AGPT04E|09, 2009.

Austroroads, Guidelines for the management of road surface skid resistance, Report, AP-G83/05, 2005.

Awad H. A., Parry T., Dawson A., Evaluation of road: Pavement condition impact on intersection frequencies using random parameters models, TRB Annual Meeting, paper, p. 20, 2018.

Bazlamit S., Reza F., Change in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature, Journal of Transportation Engineering, vol. 131(6), pp. 470–476, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:6\(470\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:6(470)), 2005.

Colony D., Influence of traffic, surface age and environment on skid number, Ohio Department of Transportation Project, no. 14460(O), Final Report, 1992.

Cornwall County Council, Procedure for the Management of Skid Resistance of Road Surfaces on the County Road Network, p. 34, 2008.

Dahir S. H., Meyer W. E., Bituminous pavement polishing, ARP-S66, FHWA/PennDOT, University Park, 1974.

Davis J. R., Hydroplaning issues, www.msgroup.org/forums/mtt/topic.asp?TOPIC_ID=200, 2006.

Diringer K. T., Barros R. T., Predicting the skid resistance of bituminous pavements through accelerated laboratory testing of aggregates *In* Surface Characteristics for Roadways, International Research and Technologies, ASTM STP 1031, pp. 61–76, 1990.

Do M., Tang Z., Kane M., Larrard F., Pavement polishing—Development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results, *Wear*, vol. 263, pp. 36–42, doi: 10.1016/j.wear.2006.12.086, 2007.

Douglas I. A., Skid correction program user's manual, report, University of Utah, no. UT-13.03, 2013.

Dunford A., Sanders P. D., Brittain S., Sidaway N., Smith R., Highways Agency skid resistance survey policy, Report PPR729, Transport Research Laboratory, 2014.

Dunford A., The Wehner Schulze machine and its potential use to improve aggregate specification, 2nd International safer roads conference, Cheltenham, United Kingdom, pp. 8, 2008.

FHWA (Federal highway administration), Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Report, no. FHWA-HRT-11-021, 2011.

Findlay Irvine, Highways – griptesterMK2 skid resistance tester, www.findlayirvine.com/products/prod_det.php?sectorId=16&productId=106, 2005.

Finney E. A., Brown M. G., Relative Skid Resistance of Pavement Surfaces based on Michigan's experience, Report, First International Skid Prevention Conference, no. 295, 1958.

Flintsch G. W., McGhee K. K., Izeppi E. L., Najafi S., The Little Book of Tire Pavement Friction, review, Version 1.0, p. 23, 2012.

Flintsch G., Leon E., McGhee K., Al-Qadi I., Pavement surface macrotexture measurement and applications, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1860, pp. 168-177, 2003.

Gillespie T. D., Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE International, 1992.

Glennon J. C., Roadway Defects and Tort Liability, Lawyers and Judges Publishing company, 1996.

Goulias D., Awoke S. G., Pavement Friction Analysis & Prediction of Deterioration Rate at Early Ages, TRB Annual Meeting, p. 16, 2017.

Haddock J. E. and O'Brien J. P., Hot-mix asphalt pavement frictional resistance as a function of aggregate physical properties, Road Material and Pavement Design, vol. 4(S2), pp. 35–56, 2013.

Haider M., Conter M., Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects, Report, p. 24, 2010.

Hall J. W., Smith K. L., Titus-Glover L., Wambold J. C., Yager T. J., Rado Z., Guide for Pavement Friction, Report for National Cooperative Highway Research Program, Project 01-43, 2009.

Harwood D. W., Blackburn R. R., Kulakowski B. T., Kibler D. F., Wet Weather Measures, Report, No. FHWA/RD-87/105, FCP 31W2-112, 1987.

HD/Standards, The Stationery Office (TSO), Design Manual for Roads and Bridges, vol. 7, Section 3, 2015.

Henry J. J., Evaluation of Pavement Friction Characteristics, NCHRP Synthesis, National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., 2000.

Hill B. J. and Henry J. J., Surface Materials Related to Seasonal Variations in Skid Resistance, ASTM STP, no. 763, p. 5, 1982.

Hofko B., Kugler H., Chankov G., Spielhofer R., A laboratory procedure for predicting skid and polishing resistance of road surfaces, International Journal of Pavement Engineering, doi: 10.1080/10298436.2017.1309191, p. 10, 2017.

Horne W.B. and Buhlmann F., A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macrotexture Characteristics of Wet Pavements, Frictional Interaction of Tire and Pavement, ASTM Special Technical Publication, American Society of Testing and Materials (ASTM), No. STP 793, pp. 191-218, 1983.

Hu L., Yun D., Liu Z., Du S., Zhang Z., Bao Y., Effect of three-dimensional macrotexture characteristics on dynamic frictional coefficient of asphalt pavement surface, Construction and Building Material, vol. 126, pp. 720–729, 2016.

Jayawickrama P. W., Prasanna R., Senadheera S. P., Skid Resistance on Hot-Mix Asphalt Concrete Pavement, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1536, pp. 52-58, 1996.

Jayawickrama P. W., Thomas B., Correction of field skid measurements for seasonal variations in Texas, Transportation Research Record, no. 1639, pp. 147-154, 1998.

Kane M., Do M. T., Piau J. M., On the Study of Polishing of Road Surface under Traffic Load, Journal of Transportation Engineering, vol. 136(1), pp. 45-51, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:1(45), 2010.

Kane M., Zhao D., Larrand F., Do M.-T., Laboratory evaluation of aggregate polishing as a function of load and velocity. Application to the prediction of damages on skid resistance of road surfaces due to trucks and passenger cars, Road Materials and Pavement Design, vol. 13, pp. 312–326, <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.649424>, 2012.

Kogbara R. B., Masad E. A., Woodward D., Millar P., Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements, Construction and Building Materials, vol. 166, pp. 227–240, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102>, 2018.

Kotek P., Kovac M., Decky M., The skid resistance evalyation on the long-term monitored road sections, De Gruyter, vol. 10(2), pp. 66-72, doi: 10.2478/cee-2014-0013, 2014.

Kulakowski B. T., Henry J. J., Lin C., A Closed Loop Calibration Procedure for a British Pendulum Tester Surface Characteristics of Roadways, International Research and Technologies, ASTM Special Technical Publication, vol. 1031, pp. 103-112, 1990.

Kuttesch J. S., Quantifying the relationship between skid resistance and wet weather accidents for Virginia Data: Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.

Li S., Noureldin S., Zhu K., Upgrating the Indot Pavement Friction Testing Program, Report, Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2003/23, 2003.

Lubis A. S., Muis Z. A. and Gultom E. M., The effect of contaminant on skid resistance of pavement surface, IOP Conf. Series, Earth and Environmental Science, vol. 126, p. 7, doi: 10.1088/1755-1315/126/1/012040, 2018.

Masad E., Rezaei A., Chowdhury A., Freeman T., Field Evaluation of Asphalt Mixture Skid Resistance and its Relationship to Aggregate, Report, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, no. FHWA/TX-10/0-5627-2, <http://tti.tamu.edu/documents/0-5627-2.pdf>, 2010.

Meyer W. E., Synthesis of Frictional Requirements Research, Report No. FHWA/RD-81/159, 477 Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC, 1982.

O' Brien J. P., Haddock J. E., Frictional Resistance of Aggregates for hot-mix Asphalt Pavements, report, Part of an Investigation Conducted by the Joint Transportation Research Program Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2004/23, 2009.

Oh S., Madanat S., Ragland D. R., Chan C.-Y., Evaluation of Traffic and Environment Effects on Skid Resistance in California, Research Reports, Univercity Berkeley, p. 12, 2010.

Omar G. L., El Halim A., Ismail K., Investigating the Predictability of Pavement Friction on Rural Roads in Ontario Canada, TRB Annual Meeting, p. 13, 2017.

PIARC, Technical Committee on Surface Characteristics, Report XVIII World Road Congress, Brussels, 1987.

Quinn J. J., Skid Resistant Characteristics of Carbonate Rock Aggregates, New Jersey Department of Transportation, 1975.

Raslavičius L., Pakalnis A., Keršys A., Skvireckas R., Juodvalkis D., Investigation of asphalt texture roughness on friction evolution for wheeled vehicles, *Transport*, vol. 31(2), pp. 133–141, doi:10.3846/16484142.2016.1189960, 2016.

Rezaei A., Masad E., Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 14(1), pp. 24–35, doi: 10.1080/10298436.2011.643793, 2013.

Rizenbergs R. L., Discussion on Skid Resistance of Pavement Surfaces, Kentucky Department of Highways, report, 1968.

Sandberg U., Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy, and Safety: A State-of-the-Art Study Regarding Measures and Measuring Methods, VTI Report 53A-1997, Swedish National Road Administration, 1998.

Shakely B. R., Henry J. J., Heinsohn R. J., Effects of Pavement Contaminants on Skid Resistance, *Transportation Research Record*, vol. 788, pp. 23–28, 1980.

Skerritt W. H., Aggregate Type and Traffic Volume as Controlling Factors in Bituminous Pavement Friction, paper, *Transportation Research*, vol. 1418, pp. 22–29, 1993.

Stevenson H., Chipseal microtexture and polishing, *New Zealand Engineering*, vol. 52(1), 1997.

Susanna A., Crispino M., Giustozzi F., Toraldo E., Deterioration trends of asphalt pavement friction and roughness from medium-term surveys on major Italian roads, *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, pp. 421–433, 2017.

Viner H. E., Sinhal R., Parry A. R., Review of UK skid resistance policy-Symposium on pavement surface characteristics of roads and airports, 5th World Road Association (PIARC), p. 12, 2004.

Wallman C.-G., Åström H., Friction Measurement Methods and Correlation between Road Friction and Traffic Safety, A Literature Review, Swedish National Road and Transport Research Institute, p. 47, 2001.

Wambold J. C., Antle C. E., Henry J. J., Rado Z., International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement, Report, PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, 1995.

Wilson D. J. and Black P. M., The skid resistance performance of natural New Zealand aggregates using a dynamic friction tester, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, vol. 42(1), pp. 61–72, 2009.

Wilson D. J., An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, 2006.

Wilson D. J., Black P. M., Comparison of skid resistance performance between greywackes and melter slag aggregates in New Zealand, 2nd International safer roads conference, Cheltenham, United Kingdom, p. 15, 2008.

Wilson D. J., Jacobsen B., Chan W., The effect of road roughness (and test speed) on Grip Tester measurements, research report, NZ Transport Agency, vol. 523, p. 80, 2013.

Wörner T., Basis of Evaluation for Methods of Skid Resistance Prediction, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, p. 7, 2012.