



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής  
Εργαστήριο Οδοποιίας

Διδακτορική διατριβή

**Διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της βιωσιμότητας των έργων οδικής υποδομής**

**Investigation of asphalt pavements surface friction in the framework of sustainable road infrastructures**

Doctoral thesis

**Αθήνα, 2021**

**Μαρία Σ. Πομόνη**  
**Maria S. Pomoni**



**National Technical University of Athens - NTUA**  
**School of Civil Engineering**  
**Department of Transportation Planning and Engineering**  
**Laboratory of Pavement Engineering**

**ΕΛ**

«Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2ος Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ)»



**Επιχειρησιακό Πρόγραμμα**  
**Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,**  
**Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση**

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



**ΕΝ**

«This research is co-financed by Greece and the European Union (European Social Fund- ESF) through the Operational Programme «Human Resources Development, Education and Lifelong Learning» in the context of the project “Strengthening Human Resources Research Potential via Doctorate Research – 2<sup>nd</sup> Cycle” (MIS-5000432), implemented by the State Scholarships Foundation (ΙΚΥ)»



**Operational Programme**  
**Human Resources Development,**  
**Education and Lifelong Learning**

Co-financed by Greece and the European Union



**Athens, 2021**

### **Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή – Third-Member Advisory Committee**

1. Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ
2. Γεώργιος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ
3. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ, Επιβλέπουσα Διατριβής

### **Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής – Members of Examination Committee**

1. Βασίλειος Ψαριανός, Καθηγητής ΕΜΠ
2. Ελένη Βλαχογιάννη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ
3. Ευστράτιος Μπαδογιάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
4. Στέργιος Μαυρομάτης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

### **Εξωτερικός Διεθνής Ερευνητικός Σύμβουλος – External International Research Advisor**

1. Dr. Malal Kane, Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel (France)

### **Ημερομηνία και τόπος εξέτασης**

28/07/2021, Αθήνα

28/07/2021, Athens

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις διδακτορικές μου σπουδές, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ και επιβλέπουσα της διατριβής για την ανάθεση του θέματος, τη συνεχή καθοδήγηση και αμέριστη υποστήριξή της στην ερευνητική προσπάθειά μου. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κύριο Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή ΕΜΠ και Διευθυντή του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, για την από πλευράς του υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια των διδακτορικών σπουδών μου. Σημαντική ήταν και η συμβολή του κύριου Γιώργου Γιαννή, Καθηγητή ΕΜΠ, τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εξωτερικό διεθνή ερευνητικό σύμβουλο της διατριβής, Dr. Malal Kane (Πανεπιστήμιο Gustave Eiffel, Γαλλία) για την συμβολή του στο πειραματικό σκέλος της έρευνας και για τις ευρύτερες συμβουλές του στο πλαίσιο της ερευνητικής συνεργασίας μας.

Ουσιαστική υπήρξε και η συμβολή του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ), το οποίο με τη χρηματική ενίσχυση που παρείχε σε πληθώρα ερευνών, μεταξύ άλλων και της παρούσης, ενίσχυσε έτι περαιτέρω το κίνητρο της ερευνητικής προσπάθειας, ώστε να μπορεί αυτή να περατωθεί με συντεταγμένη επιμέλεια και αφοσίωση.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη και τους φίλους από το Εργαστήριο Οδοποιίας κι ευρύτερα από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ για το ομαδικό πνεύμα της συνεργασίας μας και ιδιαίτερα, την οικογένειά μου για την πολύπλευρη στήριξή της.



## Περίληψη

Σύμφωνα με το διεθνές γίνεσθαι, πολλές έρευνες που αφορούν στην οδική ασφάλεια επικεντρώνονται κυρίως στα χαρακτηριστικά του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών και στη μελέτη συμπεριφοράς των οδηγών, χωρίς να αποτυπώνεται αναλυτικά η συμβολή των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος και συγκεκριμένα της επιφάνειάς του. Παρά ταύτα, η αλληλεπίδραση των οχημάτων με το οδόστρωμα, μέσω της επιφάνειας επαφής ελαστικών-οδοστρώματος, συμβάλλει καθοριστικά στην αποτελεσματική κύλιση και κυρίως πέδηση των οχημάτων. Ως εκ τούτου, η ανάγκη διατήρησης της οδικής ασφάλειας σε βάθος χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος προϋποθέτει τη συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα, στοιχείο που συνάδει επίσης με την ενίσχυση της βιωσιμότητας των οδικών υποδομών. Ταυτόχρονα, οι μηχανικοί οδοστρωμάτων και οι φορείς διαχείρισης των οδικών υποδομών έρχονται συνεχώς αντιμέτωποι με νέες προκλήσεις σε επίπεδο επιλογής εναλλακτικών υλικών, τόσο για κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, αλλά κυρίως για ανακατασκευή του υφιστάμενου οδικού δικτύου με σκοπό τη μείωση της εκμετάλλευσης φυσικών πόρων. Υπό το πρίσμα αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής διεξάγεται έρευνα που επικεντρώνεται στη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των ασφαλικών οδοστρωμάτων αποσκοπώντας στη δημιουργία ενός πλαισίου για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς, αφενός των υλικών που προορίζονται για την κατασκευή αντιολισθηρών στρώσεων και αφετέρου, των επιμέρους χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα μακροπρόθεσμα στο πεδίο, με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων και της οδικής ασφάλειας. Η διερεύνηση που πραγματοποιείται συντίθεται από δύο βασικούς πυλώνες και συγκεκριμένα, την εργαστηριακή διερεύνηση επί συμβατικών ασφαλτομιγμάτων (Hot Mix Asphalt, HMA) και μη συμβατικών, βιώσιμων ασφαλτομιγμάτων (με προσθήκη ανακτώμενου – επαναχρησιμοποιούμενου ασφαλτομίγματος ή με προσθήκη τριμμάτων από ανακυκλωμένο ελαστικό) και τη διερεύνηση σε συνθήκες πεδίου λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία πολυετών μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής. Συνολικά, πιστεύεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και δημιουργούν ισχυρές προϋποθέσεις αξιοποίησής τους σε θέματα που αφορούν (α) σε μίγματα αντιολισθηρών στρώσεων στο πλαίσιο κατασκευής και ανακατασκευής οδοστρωμάτων, αξιοποιώντας ενδεχομένως εναλλακτικά υλικά και αποσκοπώντας στη μείωση της χρήσης φυσικών πόρων και (β) σε συνθήκες βελτιστοποίησης της παρακολούθησης της συμπεριφοράς οδοστρωμάτων και της διαχείρισής τους αποσκοπώντας στην ενίσχυση της βιωσιμότητάς τους και της παρεχόμενης οδικής ασφάλειας.

## Εκτεταμένη περίληψη

Διεθνώς, αρκετές έρευνες που αφορούν στην οδική ασφάλεια επικεντρώνονται κυρίως στα χαρακτηριστικά του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών και στη μελέτη συμπεριφοράς των οδηγών. Ωστόσο, στις έρευνες αυτές δεν αποτυπώνεται πάντα και αναλυτικά η συμβολή των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος και συγκεκριμένα της επιφάνειας του οδοστρώματος στο παρεχόμενο επίπεδο οδικής ασφάλειας, παρόλο που η σταθερότητα ενός κινούμενου οχήματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής στρώσης. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των ελαστικών ενός οχήματος και του οδοστρώματος διαμορφώνει την αντιολισθητική ικανότητα που παρέχεται από την επιφάνεια ενός οδοστρώματος. Για την ικανότητα αυτή έχει αποδειχθεί διαχρονικά ότι η έλλειψή της συμβάλλει στην πρόκληση ατυχημάτων-συμβάντων. Συνεπώς, πρόκειται για ένα ζήτημα με αυξημένο κοινωνικό πρόσημο και η ενδελεχής διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων πιστεύεται ότι μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση της εξυπηρετικότητας ενός οδοστρώματος με άμεσο αντίκτυπο στη βελτίωση της παρεχόμενης οδικής ασφάλειας.

Η αντιολισθητική ικανότητα εκφράζεται μέσω του συντελεστή τριβής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος. Πέρα από τα χαρακτηριστικά των ασφαλομιγμάτων της αντιολισθητικής στρώσης και την ποιότητα των ελαστικών ενός οχήματος, η αντιολισθητική ικανότητα επηρεάζεται άμεσα και από τις καιρικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το οδόστρωμα. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό ζήτημα, δεδομένου ότι αυτή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, τόσο από έτος σε έτος (ετήσια μεταβολή), όσο και κατά τη διάρκεια ενός έτους (εποχιακή μεταβολή/διακύμανση).

Κατά συνέπεια, η ενίσχυση της αντιολισθητικής ικανότητας που συμβάλει στη διατήρηση της οδικής ασφάλειας ενός οδοστρώματος, προϋποθέτει τη συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς της επιφανειακής στρώσης σε βάθος χρόνου, στοιχείο που συνάδει επίσης με την ενίσχυση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων. Δηλαδή, μέσω της συνεχούς παρακολούθησης μπορεί να καταστεί εφικτή η βελτιστοποίηση των ενεργειών συντήρησης σε έγκαιρο χρόνο με χαμηλό κόστος, ενισχύοντας έτσι τον βιώσιμο χαρακτήρα μίας οδικής υποδομής. Πέρα από την παρακολούθηση και την ενίσχυση της αντιολισθητικής ικανότητας σε εν λειτουργία οδοστρώματα, η βιωσιμότητα ενός οδοστρώματος μακράς διάρκειας αφορά και σε περιβαλλοντικά ζητήματα επιλογής κατάλληλων υλικών, φιλικών προς το περιβάλλον, με παράλληλο στόχο την περιορισμένη ανάγκη χρήσης παρθένων υλικών. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρουσιάζεται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον αναφορικά με την ένταξη ανακυκλωμένων - εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή και ανακατασκευή οδοστρωμάτων. Ωστόσο, η πλειοψηφία των συναφών ερευνών εστιάζει κυρίως σε θέματα δομικής συμπεριφοράς οδοστρωμάτων. Αντίθετα, περιορισμένης έως και ελλιπούς κλίμακας είναι οι έρευνες συναφείς με την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων στα οποία γίνεται ενσωμάτωση των ανακυκλωμένων υλικών στις επιφανειακές αντιολισθητικές στρώσεις.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των ασφαλικών οδοστρωμάτων, αποσκοπώντας στη δημιουργία ενός πλαισίου για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς συμβατικών και εναλλακτικών υλικών που προορίζονται για την κατασκευή αντιολισθητικών στρώσεων, καθώς και των παραγόντων που επηρεάζουν την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος στο πεδίο σε βάθος χρόνου με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων.

Όσον αφορά στη μεθοδολογική διαδικασία, πραγματοποιείται αρχικά εργαστηριακή διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας (κλίμακα εργαστηρίου) και αξιοποιούνται δοκιμαστικές πλάκες

ασφαλτομίγματος που παρασκευάστηκαν με συμβατικό ασφαλτικό σκυρόδεμα (Hot Mix Asphalt, HMA) ή/και τα ανακυκλωμένα – εναλλακτικά υλικά: ανακτώμενο - επαναχρησιμοποιούμενο ασφαλτόμιγμα ή τρίμματα από ανακυκλωμένο ελαστικό. Η εργαστηριακή διερεύνηση επικεντρώνεται στην προσομοίωση (α) της εποχιακής διακύμανσης και (β) της κυκλοφοριακής φόρτισης. Η δεύτερη αφορά σε επιβολή ελεγχόμενης στίλβωσης (λείανσης) μέσω κύκλων φόρτισης αξιοποιώντας τη συσκευή Wehner-Schulze (W/S) και πραγματοποιήθηκε στο Γαλλικό Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας για τις Μεταφορές, την Ανάπτυξη και τα Δίκτυα – IFSTTAR του Πανεπιστημίου Gustave Eiffel. Αναφορικά με την αξιολόγηση της συμπεριφοράς έναντι ολίσθησης σε συνθήκες πεδίου (κλίμακα 1:1), αξιοποιούνται στοιχεία πολυετών μετρήσεων από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ και γίνεται εκτενής διερεύνηση της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας, λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που επικρατούν σε πραγματικό οδικό περιβάλλον, όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά οδού, όγκος και σύνθεση κυκλοφορίας, κατάσταση επιφάνειας (ξηρή ή υγρή) για την περίπτωση υλικών που απαντώνται σε ελληνικούς αυτοκινητοδρόμους. Τέλος, πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση των στοιχείων αντιολισθητικής ικανότητας με βάση τους δύο άξονες διερεύνησης (εργαστηριακής και συνθηκών πεδίου) και επιχειρείται σύζευξη των σχετικών αποτελεσμάτων μέσω δοκιμαστικών συντελεστών προσαρμογής (shift factors).

Αναφορικά με τα κυριότερα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας, προέκυψε καλή συμπεριφορά των συμβατικών και μη συμβατικών ασφαλτομιγμάτων (με εναλλακτικά υλικά) στο εργαστήριο ως προς την επίδραση των εποχιακών μεταβολών και την επιβολή κυκλοφοριακών διελεύσεων. Όσον αφορά στις συνθήκες πεδίου, ποσοτικοποιήθηκε κατόπιν σχετικής ανάλυσης η επίδραση των εποχιακών διακυμάνσεων, ενώ εντοπίστηκαν δύο διακριτές ζώνες συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας σε σχέση με τη μακροϋφή και τη μικροϋφή σε βάθος χρόνου λειτουργίας των υπό διερεύνηση οδών. Τέλος, ενθαρρυντικά αποτελέσματα προέκυψαν αναφορικά με τη σύζευξη της εργαστηριακής συμπεριφοράς με αυτή που απαντάται στο πεδίο.

Επιστέγασμα της παρούσας έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου αξιολόγησης της συμπεριφοράς έναντι ολίσθησης των συμβατικών και μη συμβατικών ασφαλτομιγμάτων στο εργαστήριο, προτού αυτά χρησιμοποιηθούν στο πεδίο και η αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας και των συνιστωσών της (μικροϋφή και μακροϋφή) σε βάθος χρόνου λειτουργίας πραγματικών οδοστρωμάτων. Υπό την έννοια αυτή, η αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε μπορεί να λειτουργήσει ως προπομπός της συμπεριφοράς των υπόψη υλικών στο πεδίο και να καθορίσει έναν ενδεδειγμένο τύπο οδού, όπου η ενσωμάτωση των εναλλακτικών υλικών θα αποτελεί ενδεχομένως μία ασφαλή και βιώσιμη επιλογή, αποσκοπώντας στη μείωση της χρήσης φυσικών πόρων. Αναφορικά με τα ευρήματα που αφορούν στη μακροπρόθεσμη αξιολόγηση στοιχείων πεδίου, πιστεύεται ότι θα μπορούσαν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα σε θέματα λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων με γνώμονα τη διατήρηση ή βελτίωση του παρεχόμενου επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας αποσκοπώντας στην ενίσχυση της βιωσιμότητάς τους.

Συνολικά, εκτιμάται ότι η συμβολή της παρούσας έρευνας μπορεί να ικανοποιήσει ταυτόχρονα τις ανάγκες της κοινωνίας σε θέματα οδικής ασφάλειας, να εξυπηρετήσει προκλήσεις αιεφορίας (επαναχρησιμοποίηση – ανακύκλωση υλικών) και να λειτουργήσει συνδυαστικά με οικονομικά κριτήρια στο πλαίσιο αναλύσεων κόστους του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων (Life Cycle Cost Analysis: LCCA).

## Extended abstract

On a worldwide scale, many research efforts dealing with road safety issues are basically centered around features of road geometry and driving behavior aspects. However, those research efforts do not always capture in detail the contribution of pavement characteristics and in particular the pavement surface condition with respect to the level of the provided road safety, albeit the stability of a moving vehicle is directly related to the characteristics of the surface layer. The result of the tire-pavement interaction is determinant for the antiskidding properties of a road surface or else the provided skid resistance. Hence, it has been proven over the years that low skid resistance contributes to causing road accidents/incidents. Therefore, skid resistance is an issue with increased social impact and it is believed that its thorough investigation contributes to enhancing the overall road serviceability with a direct impact on the provided road safety too.

Skid resistance is expressed by the coefficient of friction developed on the tire-pavement contact surface when a vehicle starts braking. In addition to the characteristics of the asphalt mixture of the antiskidding layer and the quality of the vehicle tires, skid resistance is directly affected by the weather conditions that pavement is exposed to. As such, skid resistance investigation is a multiparametric issue, as it changes over time, both on a yearly basis, i.e., from year to year (annual changes) and within a year (seasonal changes / variations).

The need to maintain safe pavements requires continuous monitoring and performance evaluation of their surface condition, something that is in line with sustainability prerequisites of roadway infrastructure. Apart from the social component of road safety, sustainability aspects of Long-Life Pavements (LLPs) also include environmental issues regarding the selection of suitable, environmentally friendly materials, with the parallel goal of limiting the need for virgin materials. In the last decades, there have been intense research interests regarding the integration of recycled or non-conventional materials within pavement construction and reconstruction. However, the majority of the related researches focuses mainly on the structural performance of pavements. On the contrary, research efforts related to the provided skid resistance of the surface layer, in which recycled materials are integrated, are limited.

In the light of the above, the present doctoral thesis focuses on the investigation of skid resistance of asphalt pavements including a variety of asphalt mixtures. The aim is to develop a framework for performance evaluation of both conventional and recycled or non-conventional materials to be potentially used in the construction of antiskidding surfaces, as well as the evaluation of factors affecting the in-situ skid resistance performance on a long-term basis.

Regarding the methodological process that is followed, a laboratory investigation of skid resistance (laboratory scale) is carried out first considering slabs with asphalt mixtures prepared with conventional Hot Mix Asphalt Concrete (HMA) and / or the recycled materials: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) or recycled rubber in form of Reacted Activated Rubber (RAR). The laboratory investigation focuses on simulating (a) the seasonal variations effect and (b) the traffic polishing effect. The latter refers to controlled polishing cycles applied on the testing slabs using the Wehner-Schulze machine (W/S), that took place at the French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks (IFSTTAR) of the Gustave Eiffel University. The second pillar of the investigation refers to the in-situ evaluation of skid resistance performance (field conditions, scale 1:1). Long-Term Pavement Performance (LTPP) friction data stored in the database of the NTUA Laboratory of Pavement Engineering (LPE) is utilized for the research

purposes. Several factors prevailing in a real road environment, such as geometric characteristics of the road, traffic volume and composition, pavement surface condition (dry or wet) are considered for the case of the materials used on Greek highways. Finally, further investigation is performed considering both the laboratory performance and the field performance of the conventional materials through a coupling process of the relevant results with pilot shift factors.

Regarding the main results of the research, both conventional and non-conventional asphalt mixtures (with recycled materials) presented a very good performance based on the laboratory testing in terms of the effect of seasonal changes and the simulated traffic polishing. Regarding the field conditions, the effect of seasonal variations was quantified after a relative analysis, while two distinct zones were identified considering the combined long-term evolution of skid resistance and macrotexture in relation to the microtexture performance. Finally, encouraging results were obtained regarding the coupling process of the laboratory performance for the conventional materials with that observed in the field.

The outcome of the present research is a methodological framework for the evaluation of the skid resistance performance of both conventional and non-conventional asphalt mixtures (containing recycled materials) in the laboratory before their potential use in the field and the joint evaluation of skid resistance and its components (microtexture and macrotexture) on a long-term basis regarding field conditions. In this sense, it is deemed that the undertaken evaluation may act as a precursor regarding the materials' performance in the field and the determination of a suitable type of road, where the integration of non-conventional materials will be a potentially sustainable option aiming to reduce the use of natural resources. Regarding the findings concerning the field long-term performance, it is believed that they could be particularly useful for a pavement management system during the decision-making processes, with a view to maintaining or improving the provided level of skid resistance, while enhancing simultaneously pavement longevity and sustainability.

Overall, it is considered that the contribution of the present research may simultaneously meet societal needs in terms of road safety, serve sustainability challenges in pavement engineering (reuse/recycling of materials) and might also provide useful input in the context of a Life Cycle Cost Analysis (LCCA).

## Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή .....	1
1.1	Γενική θεώρηση του προβλήματος και αντικείμενο της έρευνας.....	1
1.2	Αντικείμενο έρευνας .....	3
1.3	Μεθοδολογία έρευνας.....	4
1.4	Δομή Διατριβής .....	5
2	Χαρακτηριστικά ασφαλικών οδοστρωμάτων .....	6
2.1	Εύκαμπτο οδόστρωμα .....	6
2.2	Αδρανή υλικά ασφαλτομίγματος.....	8
2.3	Εναλλακτικά υλικά οδοστρωμάτων .....	12
2.4	Αντιολισθηρή στρώση από ασφαλτόμιγμα .....	16
3	Αντιολισθητική ικανότητα ασφαλικών οδοστρωμάτων.....	21
3.1	Γενικά .....	21
3.2	Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας.....	24
3.3	Περιγραφή δυνάμεων τριβής .....	26
3.3.1	Διαμήκεις δυνάμεις τριβής .....	26
3.3.2	Πλευρικές δυνάμεις τριβής.....	29
3.3.3	Συνδυασμός πέδησης και καμπύλης .....	30
3.4	Παράγοντες επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα .....	32
3.4.1	Συνοπτική αναφορά .....	32
3.4.2	Επιφανειακή υφή .....	33
3.4.3	Λειτουργικές παράμετροι οχήματος και ιδιότητες ελαστικών .....	42
3.4.4	Καιρικές συνθήκες.....	46
3.4.4.1	Γενικά .....	46
3.4.4.2	Ύψος νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος .....	46
3.4.4.3	Αποστραγγιστική ικανότητα .....	50
3.4.4.4	Κατάλοιπα επιφάνειας (χιόνι, πάγος, λάδια κλπ.).....	51
3.4.4.5	Θερμοκρασία .....	53
3.4.4.6	Εποχιακές και βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις .....	53
3.4.5	Κυκλοφορία.....	56
4	Μέθοδοι μέτρησης αντιολισθητικής ικανότητας.....	68

4.1	Γενικό πλαίσιο .....	68
4.2	Συστήματα για μετρήσεις στο πεδίο.....	68
4.2.1	Κατηγορίες .....	68
4.2.2	Σύστημα GripTester.....	76
4.3	Συστήματα για μετρήσεις στο εργαστήριο .....	80
4.3.1	Κατηγορίες .....	80
4.3.2	Η συσκευή Wehner-Schulze (W/S).....	81
4.3.3	Η συσκευή British Pendulum Tester (BPT) .....	84
5	Πειραματική διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας στο εργαστήριο (Κλίμακα εργαστηρίου).....	87
5.1	Παρασκευή δοκιμαστικών πλακών.....	87
5.2	Επίδραση της διεύθυνσης συμπύκνωσης στον συντελεστή τριβής .....	97
5.3	Μακροϋφή επιφάνειας πλακών .....	100
5.4	Προσομοίωση επίδρασης εποχιακής διακύμανσης .....	102
5.4.1	Καθορισμός παραμέτρων .....	102
5.4.2	Πλάκες τύπου Rx (με ή χωρίς ανακυκλωμένο ελαστικό).....	103
5.4.2.1	Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών .....	103
5.4.2.2	Διερεύνηση επίδρασης καιρικών μεταβολών .....	104
5.4.3	Πλάκες τύπου Hx (ασφαλτόμιγμα από μονάδα παραγωγής & RAP) .....	108
5.4.3.1	Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών .....	108
5.4.3.2	Διερεύνηση επίδρασης καιρικών μεταβολών .....	110
5.5	Προσομοίωση κυκλοφοριακής φόρτισης .....	114
5.5.1	Μεθοδολογική προσέγγιση .....	114
5.5.2	Πλάκες HMA με περιεκτικότητα RAR – Rx (R0, R10, R20) .....	115
5.5.3	Πλάκες HMA με περιεκτικότητα RAP – Hx (H100, H90-10, H70-30).....	119
5.5.4	Συγκριτική αξιολόγηση ασφαλτομιγμάτων αναφοράς (χωρίς προσθήκη RAR/RAP) .....	121
5.5.5	Ανάπτυξη καμπυλών στίλβωσης.....	123
6	Αναλυτική διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας με στοιχεία πεδίου (Κλίμακα 1:1) .....	126
6.1	Ανάλυση μακροϋφής .....	126
6.2	Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής: Επίδραση κυκλοφοριακής φόρτισης.....	132
6.2.1	Μακροπρόθεσμη επίδραση της κυκλοφορίας .....	132
6.2.2	Βραχυπρόθεσμη επίδραση της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα στο πλαίσιο προγραμματισμού συντήρησης .....	141

6.3	Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας: Επίδραση εποχιακής διακύμανσης.....	145
6.3.1	Ποσοτικοποίηση εποχιακής διακύμανσης.....	145
6.3.2	Επαλήθευση ποσοστιαίας μεταβολής .....	154
6.4	Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής: Συνδυαστική επίδραση κυκλοφορίας και εποχιακής διακύμανσης.....	156
7	Σύζευξη αποτελεσμάτων .....	164
8	Σύνοψη .....	184
8.1	Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα έρευνας .....	184
8.1.1	Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας .....	184
8.1.2	Διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες εργαστηρίου (κλίμακα εργαστηρίου) 185	
8.1.3	Διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου (κλίμακα 1:1) .....	189
8.1.4	Σύζευξη ευρημάτων εργαστηριακής και επιτόπου διερεύνησης .....	191
8.2	Καινοτομία και συμβολή διατριβής.....	192
8.3	Περαιτέρω έρευνα – Προεκτάσεις.....	194
9	Βιβλιογραφίες .....	196



## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος Τύπου 1 .....	17
Πίνακας 2.2: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος Τύπου 2 .....	17
Πίνακας 2.3: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΕΤΕΠ.....	20
Πίνακας 4.1: Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής οδοστρώματος (Hall et al. 2009) .....	69
Πίνακας 5.1: Ποσοστά HMA και RAP για την κατασκευή των πλακών της κατηγορίας Δ .....	94
Πίνακας 5.2: Μακροϋφή παρασκευασμένων πλακών.....	101
Πίνακας 5.3: Θερμοκρασίες δοκιμής (°C) για τις πλάκες τύπου Rx .....	103
Πίνακας 5.4: Θερμοκρασίες δοκιμής (°C) για τις πλάκες κατηγορίας B, Δ και E (RAP).....	108
Πίνακας 5.5: T-test μεταξύ R10 και R20 .....	117
Πίνακας 5.6: Σχέσεις περιγραφής καμπύλων στίλβωσης .....	123
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα t-test μεταξύ των υποτμημάτων .....	128
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα t-test μεταξύ των δηγμάτων MTD .....	130
Πίνακας 6.3: Σχέσεις σύνδεσης δεικτών MPD-MTD.....	131
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά τμημάτων του αυτοκινητοδρόμου υποδιερεύνηση ανά κατηγορία .....	132
Πίνακας 6.5: Δείκτες GN και MPD υπό τη επίδραση της κυκλοφορίας .....	137
Πίνακας 6.6: R <sup>2</sup> μεταξύ των δεικτών GN και MPD στις 2 ζώνες .....	139
Πίνακας 6.7: Προσαρμογή κριτηρίου RMPSE για όλα τα τμήματα.....	142
Πίνακας 6.8: Προσαρμογή κατανομών για τα δείγματα ποσοστιαίων μεταβολών ΔGNij % για κάθε τμήμα και έτος.....	149
Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S1.....	152
Πίνακας 6.10: Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S2.....	153
Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S3.....	153
Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S4.....	153
Πίνακας 6.13: Αντιπροσωπευτικές τιμές ποσοστιαίων μεταβολών ΔGNij % για κάθε τμήμα και έτος ...	154
Πίνακας 6.14: Περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες ενιαίας σχετικής ποσοστιαίας μεταβολής ΔGNijref %.	154
Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικές τιμές GN & CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και δείγμα R0.....	178
Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικές τιμές GN & CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και δείγμα R0 .....	179
Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικές τιμές CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και δείγμα H100 .....	182
Πίνακας 7.4: Χαρακτηριστικές τιμές CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και δείγμα H100.....	183

## Περιεχόμενα Εικόνων

<b>Εικόνα 2.1:</b> Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος .....	6
<b>Εικόνα 2.2:</b> Ογκομετρική κατανομή υλικών συμπτυκνωμένου ασφαλτομίγματος.....	7
<b>Εικόνα 2.3:</b> Συσκευή για τη δοκιμή Los Angeles Abrasion Test (LA) .....	9
<b>Εικόνα 2.4:</b> Συσκευή για την δοκιμή απότριψης - Micro-deval.....	9
<b>Εικόνα 2.5:</b> Συσκευή για την εκτίμηση της αντίσταση σε στίλβωση των αδρανών - Polished Stone Test .	10
<b>Εικόνα 2.6:</b> Συσκευή για την δοκιμή απότριψης - AAV .....	11
<b>Εικόνα 2.7:</b> Διαθεσιμότητα υλικού RAP σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες το 2012 (EAPA, 2013) .....	13
<b>Εικόνα 2.8:</b> Χρήση RAP στις ΗΠΑ μέσω διάφορων μεθόδων (Williams et al. 2018).....	13
<b>Εικόνα 2.9:</b> Επεξεργασία παλαιών ελαστικών για τη μετατροπή τους σε τρίμματα ελαστικού.....	14
<b>Εικόνα 2.10:</b> Ποσοστό ελαστικών προς απόρριψη που αξιοποιείται στην παραγωγή ασφαλτομίγματος (Lo Presti, 2013) .....	15
<b>Εικόνα 2.11:</b> Επιμέρους υπό-στρώσεις της ασφαλικής στρώσης.....	16
<b>Εικόνα 2.12:</b> Ασφαλικό σκυρόδεμα 12,5mm Τύπου 1 (πυκνής σύνθεσης).....	17
<b>Εικόνα 2.13:</b> Ασφαλικό σκυρόδεμα 12,5mm Τύπου 2 (ανοικτής σύνθεσης) .....	18
<b>Εικόνα 2.14:</b> Ασφαλικό σκυρόδεμα για λεπτή επιφανειακή στρώση .....	19
<b>Εικόνα 3.1:</b> Γραφική απεικόνιση των δυνάμεων τριβής για κίνηση α) κατά τη διαμήκη διεύθυνση υπό συνθήκες πέδησης (BFC), β) υπό γωνία (SFC).....	21
<b>Εικόνα 3.2:</b> Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004) .....	22
<b>Εικόνα 3.3:</b> Ποσοστιαία κατανομή ύπαρξης προτύπων αξιολόγησης και διαχείρισης της αντιολισθητικής ικανότητας ανά κατηγορία οδού των χωρών της Ε.Ε. (Haider and Conter 2010) .....	23
<b>Εικόνα 3.4:</b> Προειδοποιητική σήμανση για μειωμένα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας .....	24
<b>Εικόνα 3.5:</b> Βασικός μηχανισμός τριβής (Glennon 1996).....	25
<b>Εικόνα 3.6:</b> Δύναμη αντίστασης κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης με σταθερή ταχύτητα σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen and Wambold 1999) .....	27
<b>Εικόνα 3.7:</b> Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen and Wambold 1999).....	28
<b>Εικόνα 3.8:</b> Διάγραμμα συντελεστή τριβής-διολίσθησης ελαστικού (Austroads 2005).....	28
<b>Εικόνα 3.9:</b> Δυνάμεις οχήματος που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα (Hall et al. 2009).....	30
<b>Εικόνα 3.10:</b> Δυνάμεις πέδησης ( $F_x$ ) & πλευρικές δυνάμεις ( $F_y$ ) συναρτήσει της διολίσθησης (Gillespie 1992) .....	31
<b>Εικόνα 3.11:</b> Πλευρική δύναμη έναντι διαμήκους δύναμης για σταθερές γωνίες ολίσθησης (Gillespie 1992) .....	31
<b>Εικόνα 3.12:</b> Κατηγορίες επιφανειακής υφής (Hall et al. 2009).....	33
<b>Εικόνα 3.13:</b> Ταξινόμηση επιφανειακής υφής κατά PIARC (Flintsch et al. 2012) .....	34
<b>Εικόνα 3.14:</b> Μακροϋφή και μικροϋφή επιφάνειας οδοστρώματος (Flintsch et al. 2003) .....	35
<b>Εικόνα 3.15:</b> Επιφάνειες οδοστρώματος με κακή και καλή μακροϋφή και μικροϋφή.....	35
<b>Εικόνα 3.16:</b> Μικροϋφή αδρανών ασφαλτομίγματος.....	36
<b>Εικόνα 3.17:</b> Συσκευή British Pendulum για τον προσδιορισμό της αντιολισθητικής ικανότητας.....	36
<b>Εικόνα 3.18:</b> Παραδείγματα αδρανών πριν (α) και μετά (β) τη λείανσή τους – Μικροσκοπική απεικόνιση (Roe and Lagarde-Forest 2005, Guan et al. 2018).....	37
<b>Εικόνα 3.19:</b> Μακροϋφή στρώσης κυκλοφορίας .....	38

<b>Εικόνα 3.20:</b> Θετική και αρνητική υφή.....	38
<b>Εικόνα 3.21:</b> Μέθοδος μέτρησης μακροϋφής «κηλίδα της άμμου».....	39
<b>Εικόνα 3.22:</b> Μέθοδος μέτρησης μακροϋφής με το σύστημα Laser Profiler.....	40
<b>Εικόνα 3.23:</b> Υπολογισμός δείκτη MPD (ASTM E1845-15 2015) .....	40
<b>Εικόνα 3.24:</b> Σχέση μακροϋφής και μικροϋφής με την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος για διαφορετικές ταχύτητες ολίσθησης (Flintsch et al. 2003) .....	41
<b>Εικόνα 3.25:</b> Πέλματα ελαστικών με διαφορετική υφή .....	43
<b>Εικόνα 3.26:</b> Σχέση πίεσης ελαστικών και συντελεστή τριβής (Rizenbergs 1968).....	44
<b>Εικόνα 3.27:</b> Διαφοροποίηση μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών ελαστικών .....	45
<b>Εικόνα 3.28:</b> Μήκος πέδησης για την περίπτωση χειμερινών ελαστικών αναφορικά με το πάχος πέλματος (ταχύτητα κίνησης 50km/h σε χιονισμένη επιφάνεια οδοστρώματος -Test conditions: 205/55 R16 91H, ContiWinterContactTM TS 830, VW Golf V) (Continental Reifen Deutschland GmbH, 2013) .....	45
<b>Εικόνα 3.29:</b> «Φιλμ» νερού κατά την επαφή ελαστικού - οδοστρώματος .....	47
<b>Εικόνα 3.30:</b> Επίδραση του νερού στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Henry 2000) .....	47
<b>Εικόνα 3.31:</b> Το φαινόμενο της υδρολίσησης .....	48
<b>Εικόνα 3.32:</b> Κρίσιμες ζώνες για την εμφάνιση της υδρολίσησης .....	49
<b>Εικόνα 3.33:</b> Μεταβολή του συντελεστή τριβής κατά τη διάρκεια μίας σύντομης βροχόπτωσης (Bennis and de Witt, 2003).....	51
<b>Εικόνα 3.34:</b> Σύγκριση κατάλοιπων και ποσοστού μείωσης αντιολισθητικής ικανότητας (Lubis et al. 2018) .....	52
<b>Εικόνα 3.35:</b> Εποχιακή διακύμανση για την περίπτωση του Ην. Βασιλείου (Choi 2011) .....	54
<b>Εικόνα 3.36:</b> Μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας που πραγματοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο για περίοδο 11 ετών (Hosking 1976).....	54
<b>Εικόνα 3.37:</b> Βραχυπρόθεσμες εποχιακές μεταβολές (Do et al. 2014b).....	55
<b>Εικόνα 3.38:</b> Εξέλιξη συντελεστή τριβής συναρτήσει των διελεύσεων για διαφορετικές επιφάνειες οδοστρωμάτων (Rizenbergs 1968).....	56
<b>Εικόνα 3.39:</b> Εξέλιξη συντελεστή τριβής με την πάροδο των ετών / διελεύσεων (Rizenbergs 1968) .....	57
<b>Εικόνα 3.40:</b> Ειδική σήμανση στην Ολλανδία για προειδοποίηση σχετικά με τη μειωμένη αντιολισθητική ικανότητα σε νέο οδόστρωμα.....	58
<b>Εικόνα 3.41:</b> Σύγκριση δοκιμών ασφαλτομίγματος και δίσκου αδρανών (Do et al. 2007, Guan et al. 2018) .....	58
<b>Εικόνα 3.42:</b> Αριστερά- η συσκευή Wehner-Schulze, δεξιά – οι δίσκοι ασφαλτομίγματος και αδρανών .	59
<b>Εικόνα 3.43:</b> Σχηματική απεικόνιση μεταβολής μικροϋφής με τη πάροδο των κύκλων στίλβωσης (Guan et al. 2018).....	59
<b>Εικόνα 3.44:</b> Σύγκριση των δύο μεθόδων, σχέση διελεύσεων και συντελεστή τριβής με τη συσκευή Wehner-Schulze (Wörner 2012).....	60
<b>Εικόνα 3.45:</b> Συσχέτιση συντελεστή τριβής και μέσου ετήσιου ημερήσιου αριθμού διελεύσεων (Goulias and Awoke 2017).....	63
<b>Εικόνα 3.46:</b> Σχέση μεταξύ αριθμού διελεύσεων και συντελεστή τριβής (Hofko et al. 2019) .....	65
<b>Εικόνα 3.47:</b> Συσκευή Auckland polishing machine (Auckland, New Zealand) .....	66
<b>Εικόνα 3.48:</b> Συσκευή Aachen polishing machine (Aachen, Germany) .....	66
<b>Εικόνα 3.49:</b> Συσκευή Harbin polishing machine (Harbin, China) .....	66
<b>Εικόνα 3.50:</b> Συσκευή NCAT Three Wheel Polishing Device (Auburn, Alabama - USA) .....	67

<b>Εικόνα 4.1:</b> Τρόποι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και δημοφιλέστερες συσκευές (Wilson 2006)	69
<b>Εικόνα 4.2:</b> Μοντέλο του δείκτη IFI (Hall et al. 2009)	76
<b>Εικόνα 4.3:</b> Το σύστημα GripTester (μοντέλο MK2)	77
<b>Εικόνα 4.4:</b> Λεπτομέρειες συσκευής GripTester (MK2)	78
<b>Εικόνα 4.5:</b> Παροχή νερού κάτω από το πρότυπο ελαστικό	79
<b>Εικόνα 4.6:</b> Επιτόπου μέτρηση με το σύστημα GripTester (MK2) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ	79
<b>Εικόνα 4.7:</b> Βρετανικό εκκρεμές – BPT (British Pendulum Tester)	80
<b>Εικόνα 4.8:</b> Dynamic Friction Tester (DFT) (ASTM E1911 – 19 2019)	81
<b>Εικόνα 4.9:</b> Η συσκευή Wehner-Schulze (W/S) του IFSTTAR Centre de Nantes	82
<b>Εικόνα 4.10:</b> Μορφή δοκιμίου και επιφάνεια λείανσης (Do et al. 2009)	82
<b>Εικόνα 4.11:</b> Σκόνη που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της δομικής της W/S	83
<b>Εικόνα 4.12:</b> Καμπύλη πέδησης για δοκιμή πρόσφυσης με τη συσκευή W/S	84
<b>Εικόνα 4.13:</b> Βρετανικό εκκρεμές – BPT	85
<b>Εικόνα 4.14:</b> Βοηθητικά εξαρτήματα BPT	85
<b>Εικόνα 5.1:</b> Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών κατηγορίας R0	87
<b>Εικόνα 5.2:</b> Δοκιμή Rise σε χαλαρό ασφαλτόμιγμα τύπου HMA	88
<b>Εικόνα 5.3:</b> Συμπύκνωση με κύλινδρο (roller compactor)	88
<b>Εικόνα 5.4:</b> Παρασκευασμένη πλάκα εντός του καλουπιού (μετά την συμπύκνωση)	89
<b>Εικόνα 5.5:</b> Διαδικασία εκχύλισης ασφάλτου	90
<b>Εικόνα 5.6:</b> Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών HMA υλικού μετά την εκχύλιση	91
<b>Εικόνα 5.7:</b> Τρίμματα καουτσούκ από ανακυκλωμένο ελαστικό	91
<b>Εικόνα 5.8:</b> Προέλευση και χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε έργα οδοποιίας (Pomoni et al. 2020a)	92
<b>Εικόνα 5.9:</b> Κατασκευή ασφαλτομίγματος με τη προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού	92
<b>Εικόνα 5.10:</b> Πλάκες με περιεκτικότητα ανακυκλωμένου ελαστικού	93
<b>Εικόνα 5.11:</b> Πλάκες μετά από 6 μήνες έκθεση σε καιρικές συνθήκες	93
<b>Εικόνα 5.12:</b> RAP και HMA που χρησιμοποιήθηκαν για τις πλάκες κατηγορίας Δ	94
<b>Εικόνα 5.13:</b> Κοκκομετρική καμπύλη υλικού RAP	95
<b>Εικόνα 5.14:</b> Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 70% HMA – 30% RAP	95
<b>Εικόνα 5.15:</b> Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 90% HMA – 10% RAP	96
<b>Εικόνα 5.16:</b> Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 88% HMA – 12% RAP	96
<b>Εικόνα 5.17:</b> Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 85% HMA – 15% RAP	97
<b>Εικόνα 5.18:</b> Σημεία μέτρησης συντελεστή τριβής αναφορικά με τη φορά συμπύκνωσης	98
<b>Εικόνα 5.19:</b> Αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια πλακών με περιεκτικότητα 40% ανακυκλωμένο ελαστικό	99
<b>Εικόνα 5.20:</b> BPN αναφορικά με το ποσοστό περιεκτικότητας ελαστικού ανά άξονα μετρήσεων (AA' και BB')	99
<b>Εικόνα 5.21:</b> BPN αναφορικά με το ποσοστό περιεκτικότητας ελαστικού ανά τα σημεία μετρήσεων (περιμετρικά ή κεντρικά)	100
<b>Εικόνα 5.22:</b> Κηλίδα της άμμου σε πλάκες με διαφορετικά χαρακτηριστικά	101
<b>Εικόνα 5.23:</b> Μέτρηση θερμοκρασίας στην επιφάνεια των πλακών	103
<b>Εικόνα 5.24:</b> Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών στις πλάκες με περιεκτικότητα ελαστικού (0%, 10%, 20%)	104
<b>Εικόνα 5.25:</b> Οι καιρικές συνθήκες που προσομοιώθηκαν	105

<b>Εικόνα 5.26:</b> Πρωτόκολλο προσομοίωσης καιρικών συνθηκών .....	106
<b>Εικόνα 5.27:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα R0 (0% ελαστικό).....	107
<b>Εικόνα 5.28:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα R20 (20% ελαστικό).....	107
<b>Εικόνα 5.29:</b> Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών στις πλάκες με περιεκτικότητα RAP .....	108
<b>Εικόνα 5.30:</b> Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών αναφορικά με τα ποσοστά κενών αέρα.....	109
<b>Εικόνα 5.31:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H100b (100% HMA).....	110
<b>Εικόνα 5.32:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H70-30a (70% HMA & 30% RAP).....	111
<b>Εικόνα 5.33:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H85-15 (85% HMA & 15% RAP λεπτόκοκκα αδρανή) .....	111
<b>Εικόνα 5.34:</b> Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H88-12 (88% HMA & 12% RAP λεπτόκοκκα αδρανή) .....	112
<b>Εικόνα 5.35:</b> Αλληλεπίδραση μίγματος αργίλου-νερού με την σταδιακή προσθήκη νερού .....	113
<b>Εικόνα 5.36:</b> Απομάκρυνση μίγματος και «παγίδευση» εντός των κενών (trapped contamination) .....	113
<b>Εικόνα 5.37:</b> Μεθοδολογία εργαστηριακής διερεύνησης για την επίδραση της κυκλοφορίας.....	115
<b>Εικόνα 5.38:</b> Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και δεν έχουν υποστεί γήρανση .....	116
<b>Εικόνα 5.39:</b> Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και δεν έχουν υποστεί γήρανση.....	116
<b>Εικόνα 5.40:</b> Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή.....	117
<b>Εικόνα 5.41:</b> Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και έχουν υποστεί γήρανση .....	118
<b>Εικόνα 5.42:</b> Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και έχουν υποστεί γήρανση.....	118
<b>Εικόνα 5.43:</b> Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή (R0_aged και R20_aged) .....	119
<b>Εικόνα 5.44:</b> Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAP .....	120
<b>Εικόνα 5.45:</b> Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAP .....	120
<b>Εικόνα 5.46:</b> Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή (H70-30) .....	121
<b>Εικόνα 5.47:</b> Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα αναφοράς HMA (R0, R0_aged, H100).....	122
<b>Εικόνα 5.48:</b> Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα αναφοράς HMA (R0, R0_aged, H100). .....	122
<b>Εικόνα 5.49:</b> Μέτρηση CoF vs. Υπολογισμός CoF (δείγμα R10) .....	124
<b>Εικόνα 6.1:</b> Καταμήκος μετρήσεις μακροϋφής σε νέο οδόστρωμα.....	127
<b>Εικόνα 6.2:</b> Επιμερισμός ομογενών τμημάτων με τη μέθοδο CUSUM .....	127
<b>Εικόνα 6.3:</b> Αντιστοίχιση τιμών MPD-MTD.....	129
<b>Εικόνα 6.4:</b> MTD και MPD (χαρακτηριστικές τιμές) για τις έντεκα (11) θέσεις .....	129
<b>Εικόνα 6.5:</b> Μετρημένα MTD και εκτιμώμενα MTD μέσω του συντελεστή $r_0$ στο επιπρόσθετο τμήμα αυτοκινητόδρομο .....	130
<b>Εικόνα 6.6:</b> Μετρημένα MTD και εκτιμώμενα MTD-ETD (μέσω των εξισώσεων του Πίνακα 6.3) .....	131
<b>Εικόνα 6.7:</b> Αναμενόμενα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας κατά τις περιόδους μετρήσεων (CS/228, 2020).....	133
<b>Εικόνα 6.8:</b> Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε .....	135
<b>Εικόνα 6.9:</b> Ενδεικτικά διαγράμματα MSSC_GN – MPD συναρτήσεως της αθροιστικής κυκλοφορίας .....	136
<b>Εικόνα 6.10:</b> Μακροϋφή πριν και μετά τη λείανση (στίλβωση) των επιφανειακών αδρανών .....	138
<b>Εικόνα 6.11:</b> Διάκριση εξέλιξης GN και MPD στις ζώνες 1 & 2.....	139

<b>Εικόνα 6.12:</b> Ρυθμός μείωσης της αντιολισθητικής ικανότητας στη ζώνη 2 .....	140
<b>Εικόνα 6.13:</b> Γραφική προσαρμογή κριτηρίου RMPSE.....	142
<b>Εικόνα 6.14:</b> Λειτουργία μεθόδου σφαιριδιοβολής ή shotblasting.....	144
<b>Εικόνα 6.15:</b> Επίδραση σφαιριδιοβολής στην αντιολισθητική ικανότητα σε διάφορα διαστήματα .....	144
<b>Εικόνα 6.16:</b> Επίδραση σφαιριδιοβολής στην μακροϋφή ( $\Delta$ MTD%) αμέσως μετά την εφαρμογή.....	145
<b>Εικόνα 6.17:</b> Μετρήσεις GN για το τμήμα S1 ( $GN_w$ and $GN_D$ ) .....	146
<b>Εικόνα 6.18:</b> Μετρήσεις GN για το τμήμα S2 ( $GN_w$ and $GN_D$ ) .....	147
<b>Εικόνα 6.19:</b> Μετρήσεις GN για το τμήμα S3 ( $GN_w$ and $GN_D$ ) .....	147
<b>Εικόνα 6.20:</b> Μετρήσεις GN για το τμήμα S4 ( $GN_w$ and $GN_D$ ) .....	147
<b>Εικόνα 6.21:</b> Προσαρμογή κατανομών - S1, $\Delta GN_{1j}$ ( $j= 2, 3$ ).....	150
<b>Εικόνα 6.22:</b> Προσαρμογή κατανομών – S2, $\Delta GN_{2j}$ ( $j= 2, 3, 4, 5$ ) .....	150
<b>Εικόνα 6.23:</b> Προσαρμογή κατανομών - S3, $\Delta GN_{3j}$ ( $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ).....	151
<b>Εικόνα 6.24:</b> Προσαρμογή κατανομών - S4, $\Delta GN_{4j}$ ( $j= 1, 2, 4, 5, 6$ ).....	152
<b>Εικόνα 6.25:</b> Σύγκριση τιμών GND (μετρημένες vs. υπολογισμένες).....	155
<b>Εικόνα 6.26:</b> RMSPE (μετρημένες vs. υπολογισμένες).....	155
<b>Εικόνα 6.27:</b> Στοιχεία που αξιοποιήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.	157
<b>Εικόνα 6.28:</b> Επίδραση εποχιακής διακύμανσης για 11 συναπτά έτη (Τμήμα Α).....	157
<b>Εικόνα 6.29:</b> Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 11 συναπτά έτη (Τμήμα Α).....	158
<b>Εικόνα 6.30:</b> Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 11 συναπτά έτη (Τμήμα Β).....	158
<b>Εικόνα 6.31:</b> Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 7 συναπτά έτη (Τμήμα C).....	159
<b>Εικόνα 6.32:</b> Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 7 συναπτά έτη (Τμήμα D) .....	159
<b>Εικόνα 6.33:</b> Συγκριτική απεικόνιση επίδρασης κυκλοφοριακού φόρτου και εποχιακής διακύμανσης (Τμήμα Α).....	160
<b>Εικόνα 6.34:</b> BPN vs MTD πριν το οδόστρωμα κυκλοφορηθεί (Τμήμα D) .....	162
<b>Εικόνα 6.35:</b> MSSC_GN vs MPD αφότου το οδόστρωμα δόθηκε στην κυκλοφορία (Τμήμα D) .....	162
<b>Εικόνα 7.1:</b> Σχηματική απεικόνιση σκοπού διερεύνησης .....	165
<b>Εικόνα 7.2:</b> Τμήματα αστικού αυτοκινητοδρόμου (Α) .....	166
<b>Εικόνα 7.3:</b> Τμήματα υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου (Υ) .....	167
<b>Εικόνα 7.4:</b> Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.1a,b – Πίνακας 5.6 για το δείγμα R0 .....	168
<b>Εικόνα 7.5:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A1 & εργαστηρίου -δείγμα R0...	169
<b>Εικόνα 7.6:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα R0...	169
<b>Εικόνα 7.7:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα R0...	170
<b>Εικόνα 7.8:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y1 & εργαστηρίου -δείγμα R0 ...	170
<b>Εικόνα 7.9:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα R0 ...	171
<b>Εικόνα 7.10:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα R0 .	171
<b>Εικόνα 7.11:</b> Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.4 – Πίνακας 5.6 για το δείγμα R0_aged .....	172
<b>Εικόνα 7.12:</b> Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.7 – Πίνακας 5.6 για το δείγμα H100.....	172
<b>Εικόνα 7.13:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A1 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	173
<b>Εικόνα 7.14:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	173
<b>Εικόνα 7.15:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	174

<b>Εικόνα 7.16:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y1 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	174
<b>Εικόνα 7.17:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	175
<b>Εικόνα 7.18:</b> Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	175
<b>Εικόνα 7.19:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα R0.....	176
<b>Εικόνα 7.20:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα R0.....	176
<b>Εικόνα 7.21:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα R0.....	177
<b>Εικόνα 7.22:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα R0.....	177
<b>Εικόνα 7.23:</b> Διαχωρισμός ζωνών με τη μέθοδο CUSUM για το τμήμα A1.....	178
<b>Εικόνα 7.24:</b> Ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα R0 .....	178
<b>Εικόνα 7.25:</b> Διαχωρισμός ζωνών με τη μέθοδο CUSUM για το τμήμα Y1 .....	179
<b>Εικόνα 7.26:</b> Ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου - δείγμα R0.....	179
<b>Εικόνα 7.27:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα H100 ..	180
<b>Εικόνα 7.28:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα H100 ..	180
<b>Εικόνα 7.29:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα H100...	181
<b>Εικόνα 7.30:</b> Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα H100...	181
<b>Εικόνα 7.31:</b> Ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα H100.....	182
<b>Εικόνα 7.32:</b> Ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα H100 .....	182

Διδακτορική διατριβή: «Διερεύνηση της αντισεισμικής ικανότητας των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της βιωσιμότητας των έργων οδικής υποδομής»



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος και αντικείμενο της έρευνας

Οι οδικές υποδομές εξυπηρετούν διεθνώς τη γρήγορη, ασφαλή και οικονομική μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών. Την ίδια στιγμή, οι απώλειες ανθρώπινων ζωών λόγω οδικών ατυχημάτων κατατάσσονται σε παγκόσμια κλίμακα την εν λόγω αιτία θανάτου στην 8<sup>η</sup> θέση με περίπου 1,35 εκατομμύρια θανάτους ετησίως, όντας παράλληλα στην 1<sup>η</sup> θέση για την περίπτωση των ηλικιών 5-19 ετών (World Health Organization 2018). Προς τούτο, 109 χώρες παγκοσμίως έχουν δηλώσει ως εθνικό στόχο την μείωση πρόκλησης θανάτων εξαιτίας των οδικών ατυχημάτων (World Health Organization 2018). Κατά συνέπεια, τόσο η διατήρηση όσο και η ενίσχυση της οδικής ασφάλειας των οδικών υποδομών αναδεικνύονται διαχρονικά ως ένα μείζον και επιτακτικό κοινωνικό ζήτημα.

Διεθνώς, οι περισσότερες έρευνες που αφορούν στην οδική ασφάλεια επικεντρώνονται κυρίως στα χαρακτηριστικά του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών και στη μελέτη συμπεριφοράς των οδηγών, π.χ. νοητική ικανότητα, αντίληψη κ.α. (Federal Highway Administration 1998, Garber and Ehrhart 2000, Vayalamkuzhi and Amirthalingam 2016, Papadimitriou et al. 2018, Petraki et al. 2020). Ωστόσο, στις έρευνες αυτές δεν αποτυπώνεται αναλυτικά η συμβολή των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος και συγκεκριμένα της επιφάνειας του οδοστρώματος, στο παρεχόμενο επίπεδο οδικής ασφάλειας. Το οδόστρωμα έρχεται σε άμεση επαφή με τα ελαστικά των οχημάτων, επηρεάζοντας σημαντικά την κύλιση τους, ιδίως κατά την πέδηση, όπου πραγματοποιούνται αλληλεπιδράσεις τόσο σε μικρό-κλίμακα (δηλαδή διεπιφάνεια ελαστικού-οδοστρώματος), όσο και σε νάνο-κλίμακα (με έμφαση στα επιμέρους χαρακτηριστικά των υλικών της επιφανειακής στρώσης του οδοστρώματος). Το αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων αυτών διαμορφώνει την αντιολισθητική ικανότητα που εξασφαλίζει ένα οδόστρωμα. Η ικανότητα αυτή συνιστά έναν βασικό παράγοντα διατήρησης της σταθερότητας ενός κινούμενου οχήματος, ενώ έχει αποδειχθεί διαχρονικά ότι η έλλειψή της συμβάλλει στην πρόκληση ατυχημάτων-συμβάντων (Cairney 1997, Wilson 2006, Ragland et al. 2010, Fwa 2017). Συνεπώς, η ενδελεχής διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων πιστεύεται ότι μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση της εξυπηρετικότητας ενός οδοστρώματος με άμεσο αντίκτυπο τη βελτίωση της παρεχόμενης οδικής ασφάλειας.

Παράλληλα, για τη διατήρηση της οδικής ασφάλειας ενός οδοστρώματος ανακύπτει η ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης και αξιολόγησης της συμπεριφοράς του, στοιχείο που συνάδει με το βιώσιμο χαρακτήρα των οδικών υποδομών. Μια οδική κατασκευή χαρακτηρίζεται βιώσιμη όταν η λειτουργία της υποστηρίζει το τρίπτυχο οικονομία-περιβάλλον-κοινωνία. Προς αυτήν την κατεύθυνση, τις τελευταίες δεκαετίες η έννοια της βιωσιμότητας στη διαχείριση των οδικών υποδομών έχει δημιουργήσει νέες προκλήσεις για τους μηχανικούς τόσο σε επίπεδο κατασκευής νέων οδικών υποδομών, αλλά κυρίως σε επίπεδο ανακατασκευής και συντήρησης του υφιστάμενου οδικού δικτύου. Η διατήρηση και προστασία οδοστρωμάτων μακράς διάρκειας στις οδικές υποδομές, ορολογία που είναι διεθνώς γνωστή ως Long-Life Pavements (LLPs), αναφέρεται σε δομικά υγιή και επαρκή οδοστρώματα, στα οποία η μέριμνα συντήρησης και αποκατάστασης επικεντρώνεται στις επιφανειακές στρώσεις των οδοστρωμάτων, δηλαδή των στρώσεων από ασφαλτομίγματα, τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με τα διερχόμενα οχήματα (Newcomb 2002, Ferne and Nunn 2006, Yu and Nunn 2006).

Σημαντικό στοιχείο της συμπεριφοράς μιας επιφανειακής στρώσης ενός ασφαλτικού οδοστρώματος είναι η παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα. Ειδικότερα σε αυτοκινητοδρόμους βαριάς κυκλοφορίας, τα υλικά της επιφανειακής στρώσης επιλέγονται βάσει αυστηρών προδιαγραφών προκειμένου να διαμορφωθεί ένας αντιολισθηρός ασφαλτοτάπητας. Πέρα από την κοινωνική της συνιστώσα (δηλαδή της οδικής ασφάλειας), η βιωσιμότητα ενός οδοστρώματος μακράς διάρκειας αφορά και σε περιβαλλοντικά ζητήματα επιλογής κατάλληλων υλικών, φιλικών προς το περιβάλλον, με παράλληλο στόχο την περιορισμένη ανάγκη χρήσης παρθένων υλικών (Losa et al. 2008, Ozer et al. 2017). Τις τελευταίες

δεκαετίες, παρουσιάζεται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον αναφορικά με την ένταξη βιώσιμων υλικών στην κατασκευή και ανακατασκευή οδοστρωμάτων. Ενδεικτικά αναφέρεται η εκτενής χρήση ανακτώμενου και επαναχρησιμοποιούμενου ασφαλτομίγματος, ορολογία διεθνώς γνωστή ως Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), καθώς και βιομηχανικών παραπροϊόντων όπως, μεταξύ άλλων, τρίμματα από ανακυκλωμένο ελαστικό, σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου και πλαστικά απόβλητα. Η πλειοψηφία των συναφών ερευνών αλλά και εφαρμογών στην πράξη που αφορούν στη χρήση των προαναφερθέντων υλικών, εστιάζει κυρίως σε θέματα δομικής ενίσχυσης των ασφαλτικών στρώσεων και της συμπεριφοράς του οδοστρώματος (Lo Presti 2013, Yu et al. 2014, Manke et al. 2019, Sootodeh-Nia et al. 2019, Huang et al. 2021), ενώ περιορισμένης έως και ελλιπούς κλίμακας είναι οι έρευνες συναφείς με την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων, στα οποία γίνεται ενσωμάτωση των ανακυκλωμένων - βιώσιμων υλικών στις επιφανειακές αντιολισθηρές στρώσεις.

Η αντιολισθητική ικανότητα (skid resistance) της επιφάνειας ενός οδοστρώματος εκφράζει το μέγεθος της τριβής που αναπτύσσεται κατά την πέδηση του οχήματος. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής τριβής (Coefficient of Friction – CoF) που αποτελεί μια ποσοτική έκφραση της ικανότητας πέδησης του οχήματος, αντικατοπτρίζει την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Wilson 2006, Hall et al. 2009, Flintsch et al. 2012). Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας, τόσο μικρότερο είναι το μήκος πέδησης που απαιτείται για να ακινητοποιηθεί ένα όχημα. Ήδη από τον ορισμό της, προκύπτουν σαφείς ενδείξεις ότι η αντιολισθητική ικανότητα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες συγκριτικά με τα υπόλοιπα λειτουργικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός οδοστρώματος (π.χ. ομαλότητα) (Hall et al. 2009, Kogbara et al. 2016, Yu et al. 2020, Plati et al. 2020a). Πέρα από τα χαρακτηριστικά και την ποιότητα των ελαστικών ενός οχήματος, η αντιολισθητική ικανότητα επηρεάζεται: (i) από τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων της αντιολισθητικής στρώσης, (ii) τον όγκο και τη σύνθεση της κυκλοφορίας που δέχεται το οδόστρωμα και (iii) τις καιρικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το οδόστρωμα. Ειδικότερα για τις τελευταίες, η παρουσία νερού ή πάγου στην επιφάνεια κύλισης, καθώς και η καθαρότητα της επιφάνειας αυτής (δηλαδή η παρουσία ή μη σκόνης, λαδιών ή άλλων κατάλοιπων) δύναται να διαφοροποιήσουν την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Wilson 2006, Hall et al. 2009, Yu et al. 2020, Pomoni et al. 2020a).

Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό ζήτημα, που μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Μετρήσεις της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν επιτόπου με πληθώρα στατικών ή κινούμενων συστημάτων (Hall et al. 2009, Flintsch et al. 2012, Mataei et al. 2016, Plati and Pomoni 2019), ενώ επικουρικά η αντιολισθητική ικανότητα μπορεί να εκτιμηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών επί δειγμάτων από υλικά αντιολισθητικής στρώσης (Do et al. 2007, Wang et al. 2017). Όσον αφορά στις μεταβολές της, η αντιολισθητική ικανότητα μεταβάλλεται τόσο από έτος σε έτος (ετήσια μεταβολή), λόγω της διέλευσης των οχημάτων που οδηγούν στη σταδιακή λείανση των επιφανειακών αδρανών του ασφαλτομίγματος, ενώ παράλληλα παρατηρείται μεταβολή της και κατά τη διάρκεια ενός έτους (εποχιακή μεταβολή/διακύμανση), λόγω των ποικίλων καιρικών συνθηκών και αλλαγών, στις οποίες εκτίθεται ένα οδόστρωμα (Cenek et al. 1999, Wilson 2006, Srirangam et al. 2015, Plati et al. 2020a). Οι εν λόγω μεταβολές αποτελούν βασικά ζητήματα που απασχολούν τους μηχανικούς οδοστρωμάτων και τους φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών που επιθυμούν να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή τα παρεχόμενα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων, με στόχο την ορθολογική διαχείρισή τους και τον έγκαιρο προγραμματισμό ενεργειών συντήρησης για τη διατήρηση αποδεκτών επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας.

Ωστόσο, μείζον ζήτημα που καθορίζει τον ρυθμό μεταβολής και εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος αποτελεί η αλληλεπίδρασή της με τις δύο συνιστώσες της, ήτοι της μικροϋφής και της μακροϋφής. Η μικροϋφή εκφράζει την αδρότητα των επιφανειακών αδρανών του ασφαλτομίγματος της αντιολισθητικής στρώσης, ενώ η μακροϋφή εκφράζει συνολικά την αδρότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω της προεξοχής των επιφανειακών αδρανών από μια θεωρητικά

επίπεδη επιφάνεια (Aktas et al. 2011, Pratico and Vaina 2015, Plati et al. 2017a, Pratico and Astolfi 2017). Η μεταβολή των συγκεκριμένων παραμέτρων εξαιτίας της στίλβωσης (λείανσης) των αδρανών και των εποχιακών διακυμάνσεων αποτελεί βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση του παρεχόμενου επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας. Εκτενείς έρευνες έχουν επικεντρωθεί διαχρονικά στη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας λαμβάνοντας υπόψη τη μικροϋφή ή/και τη μακροϋφή (Ergun et al. 2005, Ueckermann et al. 2015, Chou et al. 2017, Li et al. 2018, Alhasan et al. 2018, Zuniga-Garcia and Prozzi 2019). Συγκεκριμένα, περισσότερο δημοφιλής είναι η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος, αξιοποιώντας κυρίως μετρήσεις μακροϋφής. Η πρακτική αυτή υιοθετείται συχνά λαμβάνοντας υπόψη, αφενός την πληθώρα συστημάτων μέτρησης του συντελεστή τριβής και τη συνεπαγόμενη διασπορά των τιμών που προκύπτουν και αφετέρου, την ευκολία συλλογής στοιχείων μακροϋφής με υψηλής ταχύτητας προφίλομετρα στο πεδίο (συστήματα τεχνολογίας Laser). Παρά ταύτα, η αξιοπιστία και η ακρίβεια των εν λόγω μοντέλων έχει αποτελέσει διαχρονικά αντικείμενο προς κρίση και ενδεχομένως αμφισβήτηση εντός της συναφούς επιστημονικής κοινότητας (Liu et al. 2004, Alhasan et al. 2018, Plati and Pomoni 2019, Pomoni et al. 2020b).

Συγκεκριμένα τις προηγούμενες παρατηρήσεις, καθίσταται σαφές ότι η αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας εν λειτουργία οδοστρωμάτων, καθώς και η πρόβλεψη της εξέλιξής της σε βάθος χρόνου αποτελούν μια επίπονη διαδικασία. Επιπλέον, η έλλειψη συστηματικών πολυετών μετρήσεων πεδίου αποτελεί τροχοπέδη για την συντεταγμένη αξιολόγηση της επιτόπου συμπεριφοράς. Παράλληλα, η ανάγκη συντήρησης της αντιολισθητικής στρώσης για τη διατήρηση των οδοστρωμάτων μακράς διάρκειας, γίνεται ολοένα και εντονότερη. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της επιτόπου συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου μπορεί να προσφέρει ουσιαστική και αξιοποιήσιμη πληροφορία αναφορικά με τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων με γνώμονα τη διατήρηση ή βελτίωση του παρεχόμενου επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας αποσκοπώντας στην ενίσχυση της βιωσιμότητάς τους αλλά και της παρεχόμενης οδικής ασφάλειας. Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψη την περιβαλλοντική συνιστώσα της βιωσιμότητας αναφορικά με τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών ανακύπτει ο προβληματισμός σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης συναφών υλικών στο ασφαλτόμιγμα της αντιολισθητικής στρώσης (όπως μεταξύ άλλων, αυτών που προαναφέρθηκαν), δεδομένης της περιορισμένης σχετικής έρευνας που παρατηρείται διεθνώς, κυρίως ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα, αλλά και της αδήριτης ανάγκης για μείωση της χρήσης φυσικών πόρων. Ο έλεγχος της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων αντιολισθητικής στρώσης που περιέχουν τα εν λόγω υλικά υπό συνθήκες ελεγχόμενης εργαστηριακής προσομοίωσης, μπορεί να ενισχύσει έστω προκαταρκτικά, τις προσπάθειες αξιολόγησης των υλικών αυτών για ενδεχόμενη χρήση τους στην κατασκευή ή την ανακατασκευή αντιολισθητικών στρώσεων οδοστρωμάτων. Πιστεύεται ότι μια τέτοια αξιολόγηση μπορεί δυνητικά να αποτελέσει το εφαλτήριο για μια συντονισμένη προσπάθεια αξιοποίησης βιώσιμων υλικών στην πράξη με διττό στόχο, αφενός την ενίσχυση της βιωσιμότητας ενός οδοστρώματος και αφετέρου, την εξασφάλιση επαρκούς αντιολισθητικής ικανότητας.

## 1.2 Αντικείμενο έρευνας

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στη συστηματική διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας των ασφαλικών οδοστρωμάτων, αποσκοπώντας στη δημιουργία ενός πλαισίου για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς αφενός των υλικών που προορίζονται για την κατασκευή αντιολισθητικών στρώσεων και αφετέρου, του οδοστρώματος συνολικά. Στο πλαίσιο της σχετικής διερεύνησης, τίθενται οι εξής επιμέρους στόχοι:

- ✓ Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς ασφαλομιγμάτων αποτελούμενων από συμβατικά υλικά και από βιώσιμα – ανακυκλωμένα υλικά σε κλίμακα εργαστηρίου υπό συνθήκες προσομοίωσης για

ελεγχόμενη κυκλοφοριακή φόρτιση και καιρικές μεταβολές. Για την πληρέστερη αξιολόγηση των ως άνω ασφαλομιγμάτων διερευνάται και η συμπεριφορά συμβατικών ασφαλομιγμάτων θεωρώντας τα ως υλικών αναφοράς.

- ✓ Η συνδυαστική αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλικών οδοστρωμάτων και των επιμέρους συνιστωσών της (μικροϋφή και μακροϋφή), σε κυκλοφοριακές και καιρικές συνθήκες πεδίου (κλίμακα 1:1) λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ετήσια μεταβολή όσο και την εποχιακή διακύμανση.
- ✓ Η διερεύνηση της δυνατότητας σύζευξης της επιτόπου συμπεριφοράς ασφαλικών οδοστρωμάτων ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα, με την αντίστοιχη συμπεριφορά που αποτυπώνεται σε κλίμακα εργαστηρίου για τα συμβατικά ασφαλομίγματα και η περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών ως εργαλείο εκτίμησης της συμπεριφοράς των υλικών σε συνθήκες πεδίου.

### 1.3 Μεθοδολογία έρευνας

Για την υλοποίηση των επιμέρους ερευνητικών στόχων της διδακτορικής διατριβής ακολουθήθηκαν μεθοδολογικά τα κάτωθι βήματα:

- ✓ Πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με στόχο τη διαμόρφωση του state-of-the-art αναφορικά με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική όσον αφορά στην αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας και τη συναφή θεματολογία για υλικά, μίγματα και συστήματα μέτρησης.
- ✓ Για την εργαστηριακή διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας (κλίμακα εργαστηρίου), παρασκευάστηκαν δοκιμαστικές πλάκες από συμβατικά και μη συμβατικά ασφαλομίγματα. Στην περίπτωση των συμβατικών ασφαλομιγμάτων χρησιμοποιήθηκε ασφαλικό σκυρόδεμα (Hot Mix Asphalt, HMA) κατάλληλης διαβάθμισης, βάσει των συναφών προδιαγραφών για ασφαλομίγματα αντιολισθητής στρώσης (ELOT, ΤΠ 1501-05-03-12-01 2017). Για τα μη συμβατικά ασφαλομίγματα πραγματοποιήθηκε ανάμειξη (i) συμβατικού ασφαλικού σκυροδέματος με ανακτώμενο – επαναχρησιμοποιούμενο ασφαλτόμιγμα, και (ii) συμβατικού ασφαλικού σκυροδέματος με τρίμματα από ανακυκλωμένο ελαστικό. Επί των παρασκευασθέντων δοκιμαστικών πλακών έγινε προσομοίωση (α) της εποχιακής διακύμανσης σε συνθήκες εργαστηρίου, καθώς και (β) της κυκλοφοριακής φόρτισης μέσω ελεγχόμενης στίλβωσης με την συσκευή Wehner-Schulze (W/S).
- ✓ Για τη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου (κλίμακα 1:1), αντλήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ που αφορούν σε συστηματικές και πολυετείς μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής σε ελληνικούς αυτοκινητοδρόμους, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τα προηγμένης τεχνολογίας συστήματα που διαθέτει η Μονάδα Κινητών Συστημάτων Μέτρησης & Παρακολούθησης του Εργαστηρίου. Στο στάδιο αυτό, διερευνήθηκαν εκτενώς σε συνθήκες πεδίου οι παράγοντες επίδρασης που προσομοιάστηκαν στο εργαστήριο, ήτοι η εποχιακή διακύμανση και η αθροιστική κυκλοφορία. Τονίζεται ότι για την περίπτωση των τμημάτων αυτοκινητοδρόμων που διερευνήθηκαν, τα υλικά αναφοράς στην αντιολισθητή στρώση ήταν μόνο συμβατικά ασφαλομίγματα, τα οποία απαντώνται κυρίως στο πεδίο μέχρι σήμερα κατά τη συνήθη πρακτική και εμπειρία σε συναφή θέματα υλικών και οδοστρωμάτων.
- ✓ Πραγματοποιήθηκε περαιτέρω αξιοποίηση των στοιχείων αντιολισθητικής ικανότητας που προέρχονται από τα δύο προηγούμενα σκέλη της έρευνας (εργαστηριακό και συνθήκες πεδίου) και επιχειρήθηκε η σύζευξη των αποτελεσμάτων.

## 1.4 Δομή Διατριβής

Η παρούσα εισαγωγική ενότητα (**1<sup>η</sup> Ενότητα**) και επιπλέον οκτώ ενότητες συνθέτουν τη δομή της Διαδακτορικής Διατριβής, η οποία έχει ως ακολούθως:

Στη **2<sup>η</sup> Ενότητα** δίνεται έμφαση στα χαρακτηριστικά των ασφαλικών οδοστρωμάτων και στις ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων της ανώτερης στρώσης ενός οδοστρώματος. Επίσης, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τη χρήση μη συμβατικών ασφαλτομιγμάτων (από βιώσιμα υλικά) στην κατασκευή και ανακατασκευή οδοστρωμάτων με έμφαση στις ασφαλικές στρώσεις.

Στην **3<sup>η</sup> Ενότητα** δίνεται έμφαση εξολοκλήρου στο φαινόμενο της αντιολισθητικής ικανότητας. Συγκεκριμένα, γίνεται ανάλυση του μηχανισμού πέδησης ενός οχήματος, περιγράφονται οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η αντιολισθητική ικανότητα και τονίζεται η σχέση που τη συνδέει με τις δύο συνιστώσες της (μικροϋφή και μακροϋφή).

Στην **4<sup>η</sup> Ενότητα** γίνεται επισκόπηση των συστημάτων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας τόσο σε συνθήκες εργαστηρίου όσο και σε συνθήκες πεδίου. Μεταξύ άλλων, περιγράφονται τα προτερήματα και οι ενδεχόμενοι περιορισμοί των συστημάτων, ενώ σχολιάζονται και σχετικά ζητήματα εναρμόνισής τους.

Στην **5<sup>η</sup> Ενότητα** παρουσιάζεται η εργαστηριακή διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας (κλίμακα εργαστηρίου). Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και συγκεκριμένα: η παρασκευή δοκιμαστικών πλακών από συμβατικά και μη συμβατικά (βιώσιμα) ασφαλτομίγματα διαφόρων συνθέσεων, προσομοίωση των καιρικών συνθηκών (για τη διερεύνηση της εποχιακής διακύμανσης) που αφορούσε σε μεταβολές της θερμοκρασίας, της ποσότητας νερού και της παρουσίας λοιπών κατάλοιπων (π.χ. σκόνης) στην επιφάνεια των πλακών, καθώς και η προσομοίωση της κυκλοφοριακής φόρτισης υπό συνθήκες ελεγχόμενων διελεύσεων μέσω κατάλληλου εξοπλισμού. Ακολουθεί η σχετική ανάλυση των πειραματικών στοιχείων και τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση της επίδρασης των παραγόντων που προσομοιάστηκαν στο εργαστήριο.

Στην **6<sup>η</sup> Ενότητα** παρουσιάζεται η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας αξιοποιώντας στοιχεία πεδίου (κλίμακα 1:1). Συγκεκριμένα, σε αυτό το ερευνητικό σκέλος αξιοποιούνται πολυετείς μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας και υφής για διάστημα μεγαλύτερο των 10 ετών. Τα στοιχεία αυτά αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ και αφορούν σε αυτοκινητοδρόμους που δέχονται διαφορετικούς κυκλοφοριακούς φόρτους. Μέσω της ανάλυσης που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη ενότητα διερευνάται, μεταξύ άλλων, η σχέση μεταξύ μικρο και μακροϋφής με την αντιολισθητική ικανότητα, ενώ αξιολογούνται εκτενώς οι παράγοντες της εποχιακής διακύμανσης και της κυκλοφορίας στην παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων.

Στην **7<sup>η</sup> Ενότητα** επιχειρείται η σύζευξη των αποτελεσμάτων που προήλθαν από τις αναλύσεις της εργαστηριακής διερεύνησης και της διερεύνησης των στοιχείων πεδίου. Η εν λόγω ενότητα, μεταξύ άλλων, σκιαγραφεί τις προϋποθέσεις μιας τέτοιας σύζευξης στοιχείων, υπογραμμίζοντας παράλληλα τη δυναμική και τις προεκτάσεις που αναδεικνύονται από μια τέτοια μεθοδολογία.

Στην **8<sup>η</sup> Ενότητα** καταγράφονται τα συμπεράσματα της Διατριβής ανά ενότητα διερεύνησης, αποτυπώνεται η καινοτομία και η συμβολή της Διατριβής στο διεθνές επιστημονικό γίγνεσθαι και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στην **9<sup>η</sup> Ενότητα** περιλαμβάνεται το σύνολο των βιβλιογραφικών αναφορών που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Διατριβής.

## 2 Χαρακτηριστικά ασφαλτικών οδοστρωμάτων

### 2.1 Εύκαμπτο οδόστρωμα

Η ανώτερη στρώση ενός ασφαλτικού οδοστρώματος ή εναλλακτικά εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από μίγμα αδρανών συγκεκριμένης κοκκομετρικής διαβάθμισης και ασφάλτου ως συνδετικό υλικό. Το μίγμα που συνθέτουν τα δύο αυτά υλικά σε συνδυασμό με τον εγκλωβισμένο αέρα υπό μορφή κενών, ονομάζεται ασφαλτικό σκυρόδεμα ή ασφαλτόμιγμα και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών, καθώς και οι αναλογίες τους στο μίγμα έχουν καθοριστική επίδραση στα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Για το λόγο αυτό, κατά τη συνήθη πρακτική κατασκευής οδών ταχείας κυκλοφορίας, η ανώτερη ασφαλτική στρώση επιμερίζεται και οι επιμέρους στρώσεις διαφοροποιούνται όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος προσδίδοντας τελικά διαφορετικά στοιχεία στην κατασκευή (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Πιο αναλυτικά, τα στοιχεία που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα είναι τα αδρανή υλικά, δηλαδή ασύνδετα υλικά με ελαστική (κατά βάση) συμπεριφορά, το συνδετικό υλικό, δηλαδή την άσφαλτο που ως προϊόν αργού πετρελαίου είναι ένα ιξώδες ημίρρευστο υλικό, καθώς και τα κενά αέρος. Κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα επιμέρους χαρακτηριστικά των υλικών του (Molenaar 2010).

Συγκεκριμένα στα αδρανή υλικά θα πρέπει να ελέγχονται:

- ο τύπος των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν,
- η κοκκομετρική διαβάθμιση που απαιτείται,
- το κατ' όγκον ποσοστό τους στο ασφαλτόμιγμα,
- τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει η τελική στρώση.

Στην άσφαλτο θα πρέπει να προσδιορίζονται:

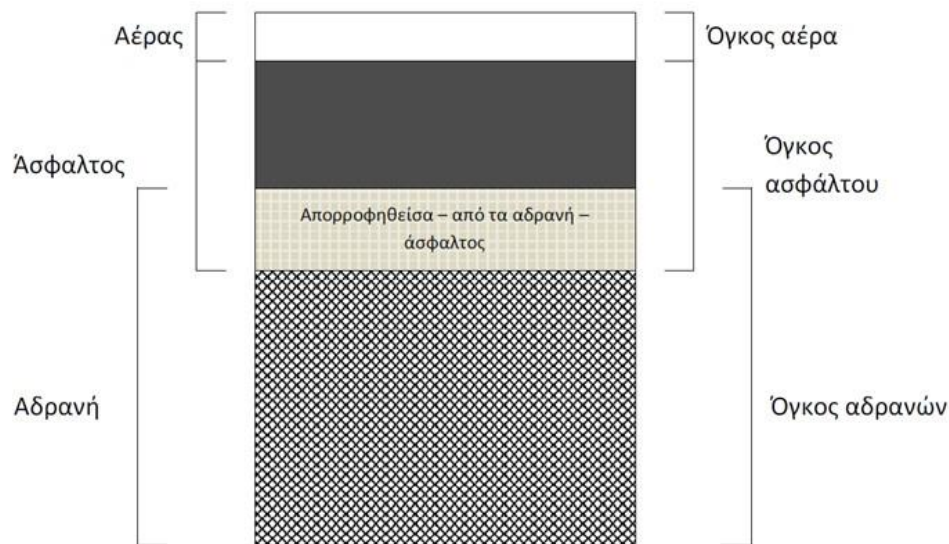
- τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της,

- το κατ' όγκον ποσοστό της στο ασφαλτόμιγμα.

Σχετικά με το ποσοστό των κενών αέρος χρειάζεται να ελέγχεται εάν:

- το προσδοκώμενο ποσοστό ικανοποιεί τις εκάστοτε προδιαγραφές.

Μετά την ανάμιξη και τη συμπύκνωση των επιμέρους συστατικών τόσο στο εργαστήριο, όσο και επιτόπου στο έργο, το ασφαλτόμιγμα αποκτά το συνολικό όγκο του (100%). Συνεπώς, ο τελικός όγκος ενός ασφαλτομίγματος αποτελείται από τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, η άσφαλτος και τα κενά αέρος. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται μία ποιοτική ογκομετρική απεικόνιση μίας τυπικής σύνθεσης ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.2: Ογκομετρική κατανομή υλικών συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος

Επιπλέον, σημειώνεται ότι από κατασκευαστικής άποψης, το ασφαλτόμιγμα που πρόκειται να διαστρωθεί θα πρέπει να είναι εργάσιμο (εργασιμότητα) και να έχει υψηλή ικανότητα συμπύκνωσης.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις είναι επόμενο να σχετίζονται με τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών κατά το στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Συνεπώς, ο τύπος των αδρανών που χρησιμοποιούνται, ιδίως για την ανώτερη στρώση που έρχεται σε άμεση επαφή με την κυκλοφορία (αντιολισθηρή), θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις μικροϋφής και μακροϋφής, καθώς και η αποφυγή της ταχείας στίλβωσης (λείανσης) τους. Επιπλέον, τα αδρανή που επιλέγονται θα πρέπει να προσδίδουν στο ασφαλτόμιγμα υψηλή αντοχή έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων, για παράδειγμα εκείνα με γωνιώδες σχήμα εμφανίζουν καλύτερη διατμητική συμπεριφορά σε σχέση με τα στρογγυλεμένα, πληρώντας πάντοτε τις απαιτήσεις της κοκκομετρικής διαβάθμισης που ορίζουν οι προδιαγραφές. Η αντοχή όμως του ασφαλτομίγματος έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων οφείλεται σε πολύ μεγάλο βαθμό και στα χαρακτηριστικά του συνδετικού υλικού – άσφαλτος, καθώς και στην ποσότητά της στο μίγμα. Συνεπώς, η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι άμεσα συνυφασμένη με την ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου, με την ελαστική κατά βάση συμπεριφορά των αδρανών,

καθώς και με τη συμπύκνωση του μίγματος για την επίτευξη του κατάλληλου ποσοστού κενών σε αυτό (Molenaar 2010).

## 2.2 Αδρανή υλικά ασφαλτομίγματος

Τα φυσικά αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προέρχονται κυρίως από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων, από φυσικές αποθέσεις ποταμών ή ορυχείων με ή χωρίς θραύση. Επίσης, τα αδρανή υλικά μπορεί να προέρχονται από τεχνητά υλικά (παραπροϊόντα) ή κονιορτοποιημένα υλικά παλαιών οδοστρωμάτων (υλικά ανακύκλωσης). Η καταλληλότητα των αδρανών υλικών, φυσικών ή τεχνητών, ελέγχεται πριν τη χρήση τους στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Οι έλεγχοι αφορούν στις γεωλογικές, γεωμετρικές, φυσικές και κατά περίπτωση χημικές ιδιότητές τους. Κατά κύριο λόγο, πρόκειται για ελέγχους σκληρότητας και ανθεκτικότητας που είναι καταστρεπτικοί, αλλά απόλυτα απαραίτητοι για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς τους υπό την επίδραση της κυκλοφορίας αλλά και της φθοράς που υφίστανται κατά την παραγωγή, τη διάστρωση και τη συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος (Nikolaidis 2002).

Οι σχετικές δοκιμές ελέγχου θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε όλα ή επιμέρους κλάσματα αδρανών υλικών. Τα αδρανή διακρίνονται σε χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα και παιπάλη σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων και εκφράζονται ως κλάσμα σε σχέση με το μικρότερο ( $d$ ) και μεγαλύτερο άνοιγμα ( $D$ ) οπής κόσκινου ως εξής:

- Χονδρόκοκκα, μεγέθους  $d/D$ , με  $D > 4\text{mm}$  και  $d \geq 1\text{mm}$
- Λεπτόκοκκα, μεγέθους  $d/D$ ,  $D \leq 4\text{mm}$
- Παιπάλη, διερχόμενη κυρίως από το κόσκινο ανοίγματος  $0.063\text{mm}$ . Η παιπάλη προστίθεται (σε περίπτωση έλλειψης), για να συμπληρώσει την κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των αδρανών.

Βασική προϋπόθεση για τη χρήση αδρανών στο ασφαλτόμιγμα είναι η ανάλυση της κοκκομετρικής διαβάθμισής τους, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού και να υπάρξει η κατάλληλη αναλογία τους στο μίγμα. Οι πλέον βασικές δοκιμές ελέγχου που εκτελούνται για τον καθορισμό της σκληρότητας και της ανθεκτικότητας των αδρανών είναι:

- Αντίσταση σε τριβή και κρούση – Los Angeles (LA)
- Αντίσταση σε τριβή και κρούση – Microdeval
- Αντίσταση σε στίλβωση - Polished Stone Value (PSV)
- Αντίσταση σε απότριψη- Aggregate Abrasion Value (AAV)
- Φθορά σε θλίψη
- Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (έλεγχος υγείας).

### ❖ Αντίσταση σε τριβή και κρούση Los Angeles (LA)

Τα αδρανή θα πρέπει να ελέγχονται έναντι θραύσης, δηλαδή να ελέγχεται η αντοχή τους σε θρυμματισμό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η συσκευή Los Angeles (LA) και η ομώνυμη δοκιμή. Κατά τη δοκιμή, δείγμα αδρανών υλικών βάρους 5kg εισάγεται σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό δοχείο μαζί με 6-12 χυτοσιδηρές σφαίρες βάρους 0.44kg η καθεμία (Εικόνα 2.3). Η εν λόγω δοκιμή αφορά στον έλεγχο των αδρανών που χρησιμοποιούνται σε όλες τις στρώσεις των οδοστρωμάτων, δίνοντας μία ένδειξη και για τη γεωλογική προέλευσή τους.





Εικόνα 2.3: Συσκευή για τη δοκιμή Los Angeles Abrasion Test (LA)

Μετά από 500 στροφές το δείγμα εξάγεται από τον κύλινδρο και ζυγίζεται το βάρος του συγκρατούμενου στο κόσκινο ανοίγματος 1.6mm. Έπειτα προσδιορίζεται ο δείκτης LA:

$$LA=A-BA\times 100(\%) \quad (2.1)$$

όπου A: η αρχική μάζα του δείγματος και B: η μάζα του δείγματος που συγκρατείται στο κόσκινο ανοίγματος 1.6mm. Όσο μικρότερο είναι αυτό το ποσοστό, τόσο σκληρότερα και ανθεκτικότερα είναι τα αδρανή. Κατά τις ελληνικές προδιαγραφές η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για αδρανή που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε στρώσεις βάσεων και υποβάσεων θεωρείται το 40%. Όταν τα αδρανή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για στρώσεις κυκλοφορίας οι μέγιστες τιμές εξαρτώνται από το είδος της οδού και τον φόρτο κυκλοφορίας. Η δοκιμή καθορισμού αντίστασης σε τριβή και κρούση κατά Los Angeles μπορεί να εκτελεστεί με το πρότυπο ASTM C131/C131M – 20.

#### ❖ Αντίσταση σε τριβή και κρούση – Microdeval

Η δοκιμή Microdeval αναπτύχθηκε στην Γαλλία από τον μηχανικό Deval και είναι παρόμοια με την Los Angeles. Οι βασικές διαφορές μεταξύ τους εντοπίζονται α) ο κάδος περιστρέφεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και β) εκτός από τα μεταλλικά σφαιρίδια μικρότερης διαμέτρου από αυτά που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή LA, προστίθεται συνήθως και νερό (Εικόνα 2.4).



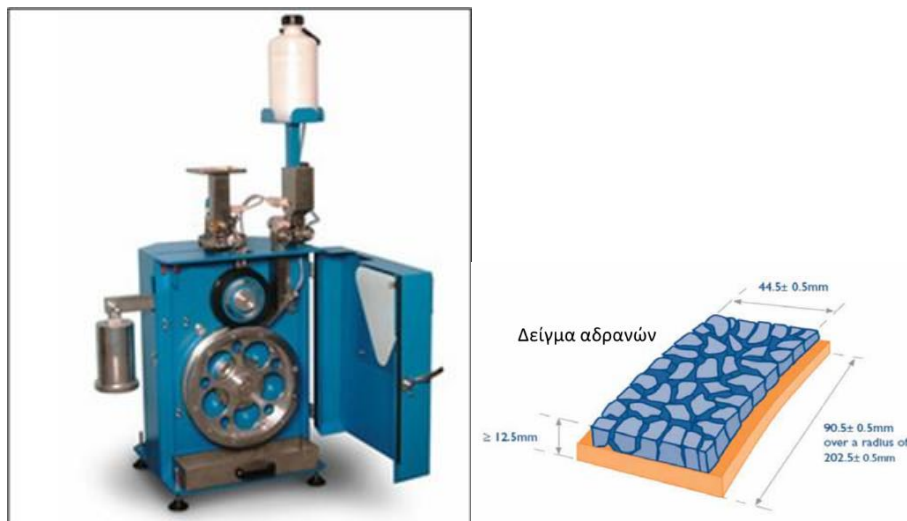
Εικόνα 2.4: Συσκευή για την δοκιμή απότριψης - Micro-deval

Τελικώς τα αδρανή σε αυτή τη δοκιμή υποβάλλονται σε μεγαλύτερη καταπόνηση από αυτή που επέρχεται κατά τη δοκιμή Los Angeles. Μετά το πέρας 5 ωρών τα αδρανή ξηραίνονται και κοσκινίζονται σε κόσκινο 1,6mm. Η διαφορά βάρους μεταξύ της αρχικής ποσότητας και αυτής που συγκρατείται από το συγκεκριμένο κόσκινο εκφραζόμενη ως ποσοστό της αρχικής ποσότητας, δίνει το ποσοστό απώλειας κατά Micro-Deval (MDE). Η τιμή αυτή εκφράζει την αντοχή των αδρανών υλικών σε τριβή και κρούση κατά Deval.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα την κατηγορία οδού και τη στρώση οδοστρώματος που πρόκειται να αξιοποιηθούν τα αδρανή. Η δοκιμή Microdeval μπορεί να εκτελεστεί ακολουθώντας το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1097-1:2011.

#### ❖ Αντίσταση σε στίλβωση - Polished stone value (PSV)

Εξίσου σημαντικός είναι και ο έλεγχος της αντίστασης σε στίλβωση ή αλλιώς λείανσης των αδρανών. Η αντίσταση σε στίλβωση αναφέρεται στην ικανότητα της επιφάνειας των αδρανών να μην στιλβώνονται - λειαινούνται εύκολα από τη δράση των ελαστικών των κινούμενων οχημάτων και προσδιορίζεται με τη δοκιμή PSV (polished stone value). Η δοκιμή πραγματοποιείται σε χονδρόκοκκα αδρανή υλικά τα οποία τοποθετούνται σε ειδική κυρτή μήτρα (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Συσκευή για την εκτίμηση της αντίστασης σε στίλβωση των αδρανών - Polished Stone Test

Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 1097-8:2020 ή σύμφωνα με την Αμερικάνικη ASTM D3319-00. Οι ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο προδιαγραφών είναι: το ονομαστικό μέγεθος αδρανών υλικών, το λειαντικό μέσο που χρησιμοποιείται, ο αριθμός και ο τύπος των τροχών, η υποβολή των αδρανών σε λείανση και ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη PSV. Τα αδρανή που θεωρούνται σκληρά και κατάλληλα για την χρήση τους σε επιφανειακές στρώσεις ή ασφαλτικές επαλείψεις έχουν δείκτη PSV μεγαλύτερο ή ίσο από τις τιμές που ορίζουν οι προδιαγραφές. Οι τιμές αυτές των προδιαγραφών συσχετίζονται με τον κυκλοφοριακό φόρτο και με την επικινδυνότητα της οδού.

#### ❖ Αντίσταση σε απότριψη – Aggregate abrasive value (AAV)

Λόγω της κυκλοφορίας ελαττώνεται το μέγεθος του αδρανούς, καταστρέφεται το γωνιώδες και η στρώση κυκλοφορίας χάνει την τραχύτητά της. Η απώλεια λόγω τριβής εξαρτάται από την σκληρότητα του πετρώματος. Η αντίσταση των πετρωμάτων σε απότριψη υπό την επίδραση των ελαστικών των οχημάτων

προσδιορίζεται με τη δοκιμή απότριψη που μπορεί να εκτελεστεί με βάση το πρότυπο (BS EN 1097-2:2020, 2020). Η συσκευή απότριψης – AAV φαίνεται στην Εικόνα 2.6.



*Εικόνα 2.6: Συσκευή για την δοκιμή απότριψης - AAV*

Η συσκευή φέρει ένα περιστρεφόμενο δίσκο στον οποίο τοποθετούνται τα δοκίμια ελέγχου. Επί των δοκιμών τοποθετείται μία κεφαλή απότριψης, το βάρος καθώς και λειαντική άμμος. Ο δείκτης απότριψης εκφράζει την απώλεια βάρους των δοκιμών πριν και μετά τη δοκιμή. Συνδυαστικά με τον δείκτη PSV, η δοκιμή AAV μπορεί να χαρακτηρίσει αρκετά ικανοποιητικά την σκληρότητα των αδρανών για χρήση σε επιφανειακές στρώσεις. Επίσης, οι οριακές τιμές του δείκτη συνδέονται με το αναμενόμενο κυκλοφοριακό φόρτο της οδού για την κατασκευή της οποίας πρόκειται να αξιοποιηθούν τα αδρανή.

#### ❖ **Δοκιμή αντίστασης σε θλίψη**

Η δοκιμή αντίστασης των αδρανών σε θλίψη καθορίζει την ικανότητα των αδρανών να αντιστέκονται στο θρυμματισμό που επέρχεται από την επίδραση του εφαρμοζόμενου φορτίου κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης ή της φόρτισης από την κυκλοφορία. Η δοκιμή εκτελείται για αδρανή που διέρχονται από το κόσκινο 14mm και συγκρατούνται από το κόσκινο 10mm, τα οποία τοποθετούνται σε ειδικές μεταλλικές μήτρες και εφαρμόζεται φορτίο μέγιστης τιμής 400N, με σταθερή ταχύτητα. Η επιβολή φορτίου γίνεται μέσω μία κοινής πρέσας και μετά το πέρας 10 λεπτών η συσκευή αποφορτίζεται και τα αδρανή κοσκινίζονται. Η ποσότητα που διέρχεται από τη διάμετρο κόσκινου - 2,36mm επί τοις εκατό του συνολικού βάρους των αδρανών, ονομάζεται τιμή αντίστασης των αδρανών σε θλίψη (ACV). Ως μέγιστη τιμή ACV για αδρανή οδοστρωσίας θεωρείται το 25% (BS 812:3, 1990).

#### ❖ **Δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (έλεγχος υγείας)**

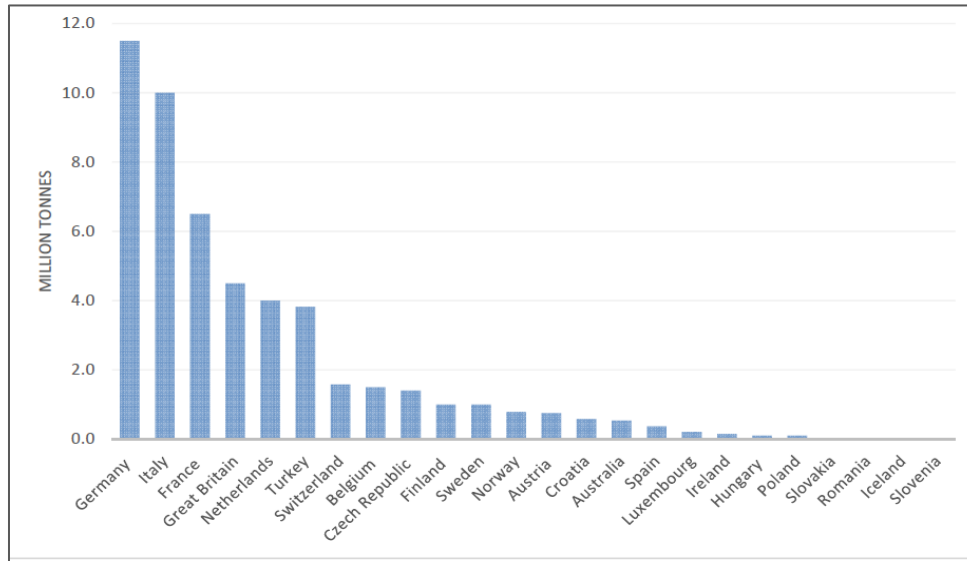
Η δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση ή αλλιώς έλεγχος υγείας του πετρώματος των αδρανών καθορίζει την ανθεκτικότητά τους σε αποσάθρωση λόγω των εναλλασσόμενων καιρικών συνθηκών και κυρίως της ψύξης και της θέρμανσης. Με την εναλλαγή των εποχιακών θερμοκρασιών προκαλείται μεταβολή του όγκου των αδρανών υλικών και στην περίπτωση κατά την οποία τα αδρανή δεν είναι ανθεκτικά (υγιά) επέρχεται ο θρυμματισμός τους έχοντας καταστρεπτικά αποτελέσματα για το οδόστρωμα. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής, τα αδρανή εμβαπτίζονται για 16-18 ώρες σε διάλυμα

θεικού νατρίου ή μαγνησίου και κατόπιν ξηραίνονται, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται πέντε φορές. Στην συνέχεια τα αδρανή ξεπλένονται ώστε να απομακρυνθεί το θειικό μαγνήσιο ή νάτριο. Έπειτα, τα αδρανή κοσκινίζονται στα ίδια κόσκινα που είχαν χρησιμοποιηθεί πριν τη δοκιμή. Καταγράφονται οι απώλειες βάρους σε κάθε κόσκινο και αυτή η απώλεια βάρους επί τοις εκατό εκφράζει την φθορά που επήλθε. Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί με βάση το πρότυπο EN 1367-2:2009.

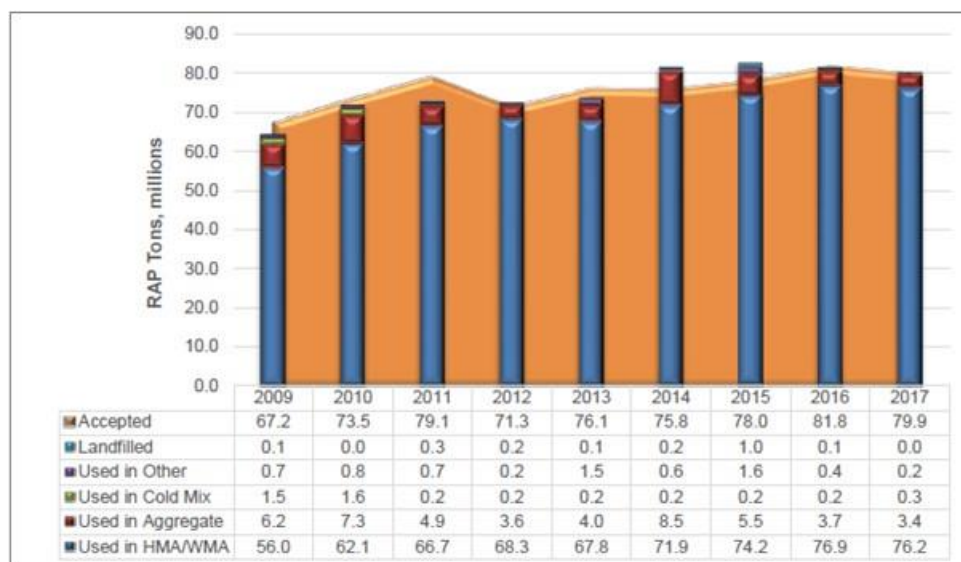
### 2.3 Εναλλακτικά υλικά οδοστρωμάτων

Τα τελευταία χρόνια έχει ενισχυθεί η ανάγκη για μείωση της χρήσης φυσικών πόρων και εξοικονόμηση ενέργειας που δαπανάται σε όλες τις επιμέρους δραστηριότητες των έργων κατασκευής, ανακατασκευής ή συντήρησης οδοστρωμάτων (Ozer et al. 2017). Για την αντιμετώπιση των παραπάνω έχει προταχθεί η έρευνα με στόχο να βρεθούν λύσεις που δεν προσβάλλουν, επιδεινώνουν ή αλλοιώνουν το περιβάλλον. Μια σημαντική παράμετρος που έχει βοηθήσει αρκετά στην επίλυση του συγκεκριμένου θέματος είναι η επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση υλικών παλαιών οδοστρωμάτων, όπως το ασφαλτόμιγμα, σκυρόδεμα ή αδρανή υλικά παρερχόμενα από υποκείμενες των ασφαλτικών στρώσεις. Ακόμα πιο επιτακτική γίνεται η εν λόγω ανάγκη σε χώρες με περιορισμένα αποθέματα φυσικών πόρων ή μειωμένο διατιθέμενο κόστος κατασκευής ή συντήρησης ενός οδικού έργου. Συνεπώς, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η έννοια της βιωσιμότητας και στα έργα οδοποιίας. Στο πλαίσιο της βιωσιμότητας διερευνώνται υλικά που μπορούν να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων αντικαθιστώντας τα συμβατικά αδρανή λατομικής προέλευσης διαφόρων διαβαθμίσεων που συντελούν σε σημαντική περιβαλλοντική υποβάθμιση. Μια χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης εναλλακτικών προϊόντων αντί των συμβατικών αδρανών είναι και τα βιομηχανικά αδρανή (σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου, γυαλί κλπ.). Όσον αφορά στα συνδετικά υλικά, αντί της συμβατικής (βιομηχανικής) ασφάλτου που παράγεται με διύλιση του αργού πετρελαίου μπορούν να αξιοποιηθούν διάφορες άλλες τεχνολογίες, όπως είναι η αφρώδης ασφάλτος ή η «πράσινη» τεχνολογία παραγωγής ελαστομερούς ασφάλτου μέσω προσθήκης επεξεργασμένου τρίμματος ελαστικών (crumb rubber) σε συμβατική ασφάλτο (Jamshidi and White, 2020).

Πιο συγκεκριμένα, η επαναχρησιμοποίηση υλικών οδοστρώματος για τη χρήση τους ως αδρανή, κυρίως ασφαλτομίγματος παλαιού τύπητα κυκλοφορίας, αποτελεί μια αρκετά διαδομένη πρακτική σε διάφορες χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως αντίθετα με τις χώρες της Ευρώπης παρά τη διαθεσιμότητα ανακτώμενου και επαναχρησιμοποιημένου ασφαλτομίγματος οδοστρώματος – Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) (Εικόνα 2.7), στην Αμερική οι εφαρμογές για την αξιοποίηση του εν λόγω υλικού είναι αρκετά δημοφιλείς εδώ και αρκετές δεκαετίες (McDaniel et al. 2012, ΕΑΡΑ 2013).



Εικόνα 2.7: Διαθεσιμότητα υλικού RAP σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες το 2012 (EAPA, 2013)

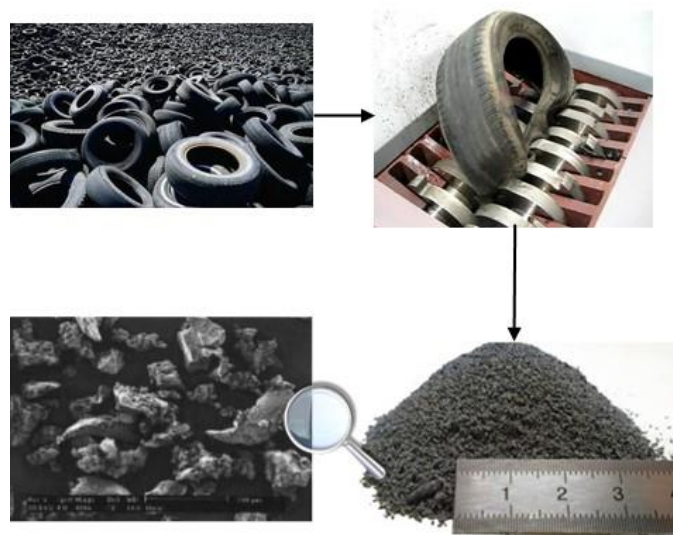


Εικόνα 2.8: Χρήση RAP στις ΗΠΑ μέσω διάφορων μεθόδων (Williams et al. 2018)

Το RAP μπορεί να αξιοποιηθεί σε όλες τις στρώσεις οδοστρωμάτων, από τις ασφαλτικές έως τις υποκείμενες, ως αδρανές αντικαθιστώντας τα φυσικά αδρανή. Ωστόσο, η ακριβής αναλογία του ιδιαίτερα στο ασφαλτόμιγμα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η κυκλοφορία της οδού. Αν και η χρήση του αποτελεί μία βιώσιμη πρακτική, το υλικό αυτό δεν παύει να έχει χάσει μέρος των μηχανικών ιδιοτήτων του. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε ποσοστό 20% κατά βάρους μίγματος θερμής ασφάλτου (Hot Mix Asphalt – HMA) έως και 5% του HMA (EAPA, 2013). Παρόλο που έχουν υπάρξει αρκετές εφαρμογές παγκοσμίως, συνεχίζουν να υπάρχουν αρκετές ανησυχίες σχετικά με τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου που περιέχεται στο RAP (Yu et al. 2014, Barco-Carrion et al. 2017, Sotoodeh-Nia et al. 2019). Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος η ασφαλτος σκληραίνει λόγω διάφορων

μηχανισμών όπως η γήρανση, η οξείδωση κλπ. και μετατρέπεται σε πιο άκαμπτο υλικό (Barco-Carrion et al. 2017, Borghi et al. 2017, Manke et al. 2019). Επιπροσθέτως, διάφορα ζητήματα που αφορούν στην αντοχή του εν λόγω υλικού λόγω υψηλής δυσκαμψίας και χαμηλής ολκιμότητας έχουν οδηγήσει διάφορους ερευνητές σε περαιτέρω διερεύνηση του υλικού και του βέλτιστου ποσοστού ενσωμάτωσης του στο νέο ασφαλτόμιγμα HMA (Sangiorgi et al. 2017). Ωστόσο, οι έρευνες σχετικά με την αξιοποίηση του RAP σε νέο ασφαλτόμιγμα HMA για αντιολισθηρή στρώση είναι αρκετά περιορισμένες (Eskandarsefat et al. 2018, Wang et al. 2019).

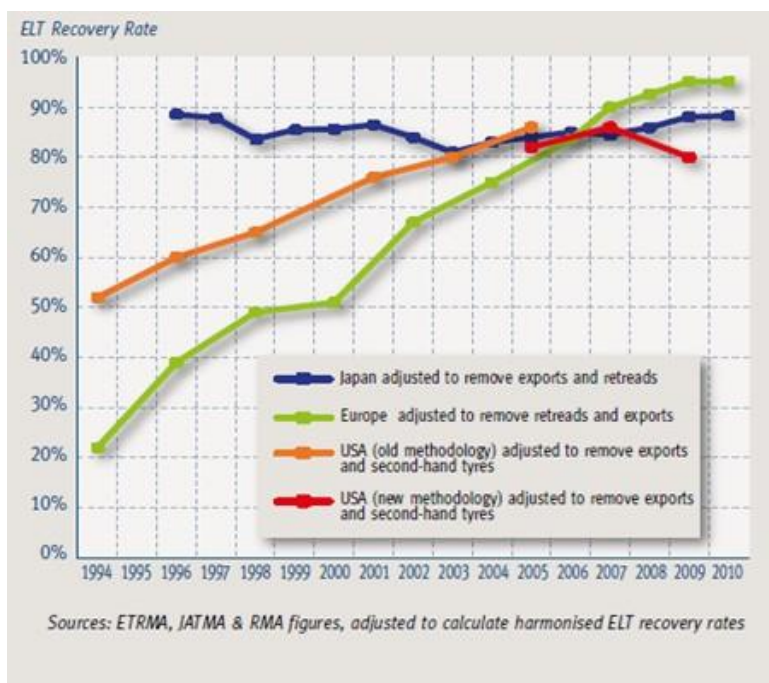
Αναφορικά με τη μείωση της πετρελαϊκής ασφάλτου ως συνδετικό υλικό στο ασφαλτόμιγμα, μία βιώσιμη λύση αποτελεί η προσθήκη επεξεργασμένου τρίμματος ελαστικών (crumb rubber) σε συμβατική άσφαλτο (Lo Presti 2013, Hadiwardoyo and Adillah 2019). Το συγκεκριμένο υλικό προέρχεται από φθαρμένα ελαστικά οχημάτων τα οποία έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία αποκτούν μορφή τρίμματος, έχοντας ελαστομερείς ιδιότητες (Εικόνα 2.9).



*Εικόνα 2.9: Επεξεργασία παλαιών ελαστικών για τη μετατροπή τους σε τρίμματα ελαστικού*

Αρκετές χώρες παγκοσμίως έχουν υιοθετήσει την συγκεκριμένη πρακτική σε μια προσπάθεια περιορισμού των ποσοτήτων ελαστικών που καταλήγουν σε χωματερές προκαλώντας έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Εικόνα 2.10) (Souza 2005, Dasek et al. 2012, Nordgren and Tykesson 2012, Pinto and Souza 2012).





Εικόνα 2.10: Ποσοστό ελαστικών προς απόρριψη που αξιοποιείται στην παραγωγή ασφαλτομίγματος (Lo Presti, 2013)

Κατά την παραγωγή ασφαλτομίγματος, κατάλληλη ποσότητα ελαστικού προστίθεται στο μίγμα αντικαθιστώντας το αντίστοιχο ποσοστό ασφάλτου. Επίσης, θεωρείται ότι με την χρήση του εν λόγω υλικού μπορεί να παραχθεί ασφαλτόμιγμα με χαμηλότερες απαιτήσεις θερμικής ενέργειας. Μεταξύ άλλων, η χρήση του ελαστικού ως πρόσθετο στο ασφαλτόμιγμα θεωρείται μία βιώσιμη λύση με αρκετά πλεονεκτήματα τόσο περιβαλλοντικά, όσο και οικονομικά (Lo Presti 2013, Moreno et al. 2013, Leandri et al. 2018). Έως τώρα οι περισσότερες έρευνες έχουν επικεντρωθεί στη διερεύνηση των δομικών και χημικών ιδιοτήτων των μιγμάτων που περιέχουν ανακυκλωμένο ελαστικό όμως, πρόσφατα αξιολογήθηκαν οι ιδιότητες του υλικού για την περίπτωση αντιθορυβικών οδοστρωμάτων (Moreno et al. 2013, Feiteira Dias et al. 2014, Huang et al. 2021). Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση του RAP έχει πραγματοποιηθεί περιορισμένος αριθμός ερευνών αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα των ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν ανακυκλωμένο ελαστικό, με τα αποτελέσματά τους να εμφανίζουν προκαταρκτικά διφορούμενα αποτελέσματα αναφορικά με την ενσωμάτωσή τους σε μίγματα αντιολισθητικής στρώσης καθώς, άλλοτε επισημαίνεται θετική κι άλλοτε αρνητική συνεισφορά στο παρεχόμενο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας (Eskandarsefat et al. 2018, Hadiwardoyo and Adillah 2019, Putra et al. 2019).

Η τελική σύνθεση του ασφαλτομίγματος, καθώς και η επιλογή των υλικών, φυσικών, τεχνητών ή επαναχρησιμοποιούμενων μπορούν να καθορίσουν ουσιαστικά τόσο τη δομική όσο και τη λειτουργική συμπεριφορά του οδοστρώματος προσδίδοντάς εν γένει βασικές διαφοροποιήσεις. Έτσι, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός μίγματος είναι: η επιλογή του κατάλληλου αδρανούς υλικού και η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος σε συνδυασμό με το ποσοστό κενών, καθώς και η επιλογή του συνδετικού υλικού.

## 2.4 Αντιολισθηρή στρώση από ασφαλτόμιγμα

Στην Ελλάδα, για την κατασκευή των ασφαλτικών στρώσεων χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά το ασφαλτικό σκυρόδεμα – ασφαλτόμιγμα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ασφαλτικά οδοστρώματα ή εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται εν γένει από τρεις κύριες βασικές στρώσεις υλικών, ενώ η σύνθεση του ασφαλτομίγματος της ανώτερης στρώσης μπορεί να επιμερίζεται σε υποστρώσεις ασφαλτομίγματος (Εικόνα 2.11). Η ανώτερη εξ αυτών στρώση είναι γνωστή με τον όρο αντιολισθηρή στρώση, καθώς είναι εκείνη που έρχεται σε άμεση επαφή με τα ελαστικά των οχημάτων.



Εικόνα 2.11: Επιμέρους υπό-στρώσεις της ασφαλτικής στρώσης

Για την αντιολισθηρή στρώση, κατάλληλα θεωρούνται τα πετρώματα που συνδυάζουν υψηλό δείκτη στίλβωσης με χαμηλή φθορά σε απότριψη και σε τριβή και κρούση. Επιπλέον, πρωταρχικό ρόλο για τη συγκεκριμένη στρώση έχουν η δομή και η φύση του πετρώματος καθορίζοντας τον παράγοντα της μικροϋφής. Ενώ, το μέγεθος, το σχήμα των αδρανών, η κοκκομετρία του μίγματος και οι συνθήκες κατασκευής έχουν καθοριστικό ρόλο για την μακροϋφή. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά αναλύονται σε επόμενο εδάφιο και αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικές παραμέτρους για την επαρκή πέδηση των οχημάτων.

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα συνεχούς ή ασυνεχούς διαβάθμισης χρησιμοποιείται για την κατασκευή των αντιολισθηρών στρώσεων και διακρίνεται σε Τύπο 1 και 2. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του συνολικού μίγματος των αδρανών υλικών (χονδρόκοκκο, λεπτόκοκκο και παιπάλη), ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτικού σκυροδέματος και το ονομαστικό μέγεθος του μέγιστου κόκκου, πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια τα οποία είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ, ΤΠ 1501-05-03-12-01 (2017). Για παράδειγμα, οι δύο βασικοί τύποι ασφαλτομίγματος είναι ο Τύπος 1 – Κλειστού τύπου ασφαλτόμιγμα, πρόκειται για πυκνή σύνθεση ασφαλτομίγματος και ο Τύπος 2 – Ανοικτού τύπου όπου η σύνθεση του ασφαλτομίγματος σε αυτή την περίπτωση είναι πιο αραιή από τον Τύπο 1, προσδίδοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά στις επιφάνειες οδοστρωμάτων (δομικά και λειτουργικά). Πιο αναλυτικά :

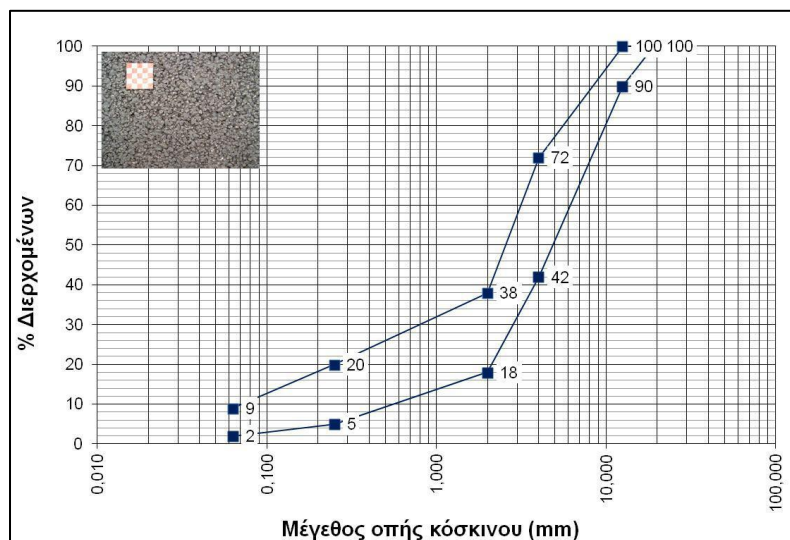


❖ Τύπος 1: Ασφαλτικό σκυρόδεμα πυκνής σύνθεσης (Πίνακας 2.1- Εικόνα 2.12).

Αφορά σε ασφαλτόμιγμα συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης, με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 12,5 mm, ή 9,5 mm. Με τον τύπο αυτό επιτυγχάνεται πέραν της αντιολισθηρότητας, η ενίσχυση και η στεγανότητα του οδοστρώματος.

**Πίνακας 2.1:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος Τύπου 1

Μέγεθος κόσκιου τετραγωνικής οπής [mm]	ΤΥΠΟΣ 1 (πυκνής σύνθεσης)	
	Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου [mm]	
	12,5	9,5
Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2	Ποσοστό διερχομένων από τα αντίστοιχα κόσκινα	
12,50 mm	90 - 100	100
9,00 mm	-	90 - 100
4,00 mm	42 - 72	50 - 80
2,00 mm	18 - 38	30 - 65
1,12 mm	-	-
0,25 mm	5 - 20	6 - 21
0,063 mm	2 - 9	2 - 9



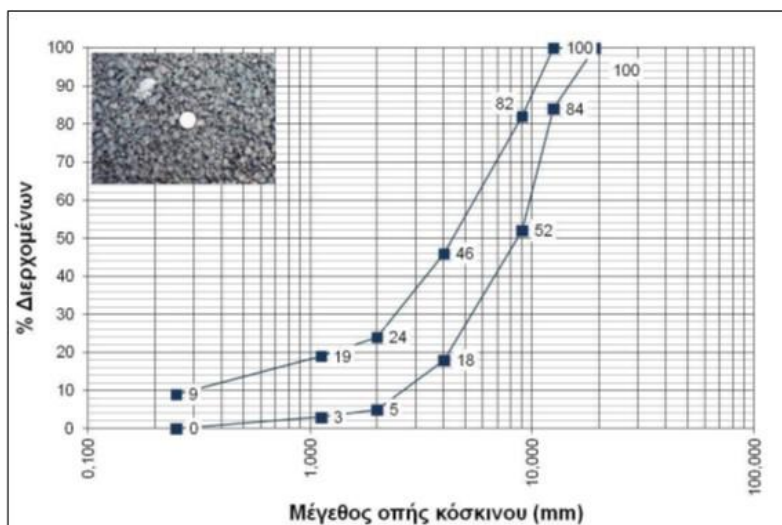
**Εικόνα 2.12:** Ασφαλτικό σκυρόδεμα 12,5mm Τύπου 1 (πυκνής σύνθεσης)

❖ Τύπος 2: Ασφαλτικό σκυρόδεμα ανοικτής σύνθεσης (Πίνακας 2.2-εικόνα 2.13).

Αφορά σε ασφαλτόμιγμα ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 12,5 mm, ή 10,0 mm. Με τον τύπο αυτό, εξασφαλίζεται καλύτερη μακροϋφή, με αποτέλεσμα την καλύτερη διατήρηση της αντίστασης σε ολίσθηση και σε υψηλές ταχύτητες. Λόγω αυξημένου ποσοστού κενών, η διάρκεια ζωής του ασφαλτοτάπητα είναι σχετικά μικρότερη, σε σύγκριση με τον Τύπο 1.

**Πίνακας 2.2:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος Τύπου 2

Μέγεθος κόσκιου τετραγωνικής οπής mm	ΤΥΠΟΣ 2 (ανοικτής σύνθεσης)	
	Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου [mm]	
	12,5	10,0
Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2	Ποσοστό διερχόμενων από τα αντίστοιχα κόσκινα	
12,50 mm	84 - 100	100
9,00 mm	52 - 82	75 - 100
4,00 mm	18 - 46	35 - 65
2,00 mm	5 - 24	10 - 35
1,12 mm	3 - 19	3 - 24
0,25 mm	0 - 9	0 - 10
0,063 mm	-	-



Εικόνα 2.13: Ασφαλτικό σκυρόδεμα 12,5mm Τύπου 2 (ανοικτής σύνθεσης)

Σημειώνεται ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των αδρανών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και κατά συνέπεια η επιλογή της σύνθεσης εξαρτάται, αφενός από το είδος της οδού για την οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και αφετέρου, από τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του έργου (κυκλοφορία, καιρικές συνθήκες).

Επίσης, η αντιολισθηρή στρώση μπορεί να παρουσιάζει κάποιες διαφοροποιήσεις από τα χαρακτηριστικά των Τύπων 1 και 2, προσδίδοντας διαφορετικές ιδιότητες στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Πιο αναλυτικά η στρώση κυκλοφορίας μπορεί να αποτελείται από:

❖ Αντιολισθηρή στρώση από πορώδες ασφαλτόμιγμα

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται μίγματα πορώδους σύνθεσης, τα οποία σε σύγκριση με τα συμβατικά έχουν υψηλότερο ποσοστό κενών (>15%) και παχύτερο συνδετικό υμένα. Τα κενά και η μακροϋφή που δημιουργείται από το χονδρόκοκκο αδρανές υλικό προσδίδουν αντιολισθητικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια. Εάν η διαβάθμιση του αδρανούς υλικού και το ποσοστό της ασφάλτου επιλεχθούν σωστά, τότε το μίγμα εκτός από καλή μακροϋφή θα παρουσιάζει και εξαιρετική μικροϋφή. Ο

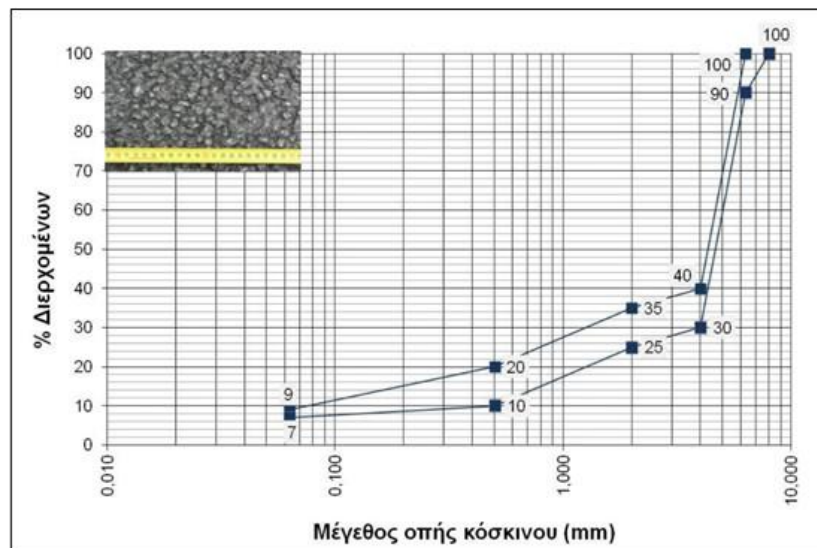
συγκεκριμένος τύπος ασφαλτομίγματος παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Αποστραγγιστική ικανότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος, καλή αντιολισθητική ικανότητα και μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της υδρολίσθησης λόγω του βρόχινου νερού. Η υδατοπερατότητα του ασφαλτοτάπητα ελέγχεται επιτόπου με κατάλληλη δοκιμή.
- Καλύτερη μακροϋφή με συνέπεια αυξημένη αντίσταση σε ολίσθηση σε υψηλές ταχύτητες.
- Επιφάνεια οδοστρώματος άνετης και σχετικά αθόρυβης κυκλοφορίας.

Στα μειονεκτήματα του πορώδους ασφαλτοτάπητα περιλαμβάνονται η μειωμένη δομική αντοχή (λόγω αυξημένου ποσοστού κενών), η ταχύτερη οξείδωση της ασφάλτου και η μειωμένη αποτελεσματικότητα στην περίπτωση πλήρωσης των κενών με άμμο και σκόνη.

#### ❖ Αντιολισθηρή λεπτή επιφανειακή στρώση

Η λεπτή αντιολισθηρή στρώση (ή λεπτοτάπητας) είναι μια στρώση πάχους μεταξύ 20 και 30mm από θερμό ασφαλτόμιγμα με πολύ καλά επιφανειακά χαρακτηριστικά. Το ασφαλτόμιγμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αυτής της λεπτής αντιολισθηρής στρώσης είναι ασφαλτόμιγμα ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης (Εικόνα 2.14), το οποίο παράγεται και διαστρώνεται «εν θερμώ» με συνήθη μηχανήματα παραγωγής και διάστρωσης θερμών ασφαλτικών μιγμάτων.



Εικόνα 2.14: Ασφαλτικό σκυρόδεμα για λεπτή επιφανειακή στρώση

Αποτελείται από χονδρόκοκκα αδρανή με μέγιστο ονομαστικό μέγεθος έως 10 mm (ή 11,2 mm), λεπτόκοκκα αδρανή κλάσματος 0/2 ή 0/4 mm και συνδετικό υλικό. Το συνδετικό υλικό μπορεί να είναι κοινή, φυσική ή τροποποιημένη άσφαλτος. Το βασικό πλεονέκτημα του σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλο ασφαλτόμιγμα στρώσης κυκλοφορίας είναι το χαμηλότερο κόστος του, ως αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης μικρότερης ποσότητας αδρανών υψηλού σχετικά κόστους, με αντιολισθητικά χαρακτηριστικά.

❖ Ασφαλτικές στρώσεις κλειστού τύπου

Οι ασφαλτικές στρώσεις κλειστού τύπου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή στρώσεων επιφανειακών, συνδετικών, ισοπεδωτικών και ασφαλτικών βάσεων οδών και περιλαμβάνουν ασφαλτικό σκυρόδεμα συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης (Πίνακας 2.3). Για κάθε ασφαλτική στρώση και τύπο ασφαλτομίγματος προοριζόμενο ως υλικό ενσωμάτωσης στην κατασκευή, θα πρέπει να εξασφαλίζονται διαφορετικές οριακές απαιτήσεις ως προς την κοκκομετρία (ΠΕΤΕΠ:05-03-11-04, 2016).

**Πίνακας 2.3:** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΕΤΕΠ

Όνομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2 (mm)	Τύπος ασφαλτομίγματος				
	ΑΣ 40	ΑΣ 31,5	ΑΣ 20	ΑΣ 12,5	ΑΣ 10
63	100				
40	90-100	100			
31,5	-	90-100	100		
20	58-81	-	90-100	100	
12,5	-	56-80	-	90-100	100
10	-	-	58-81	-	90-100
4	20-50	26-56	30-60	39-70	49-80
2	14-39	18-43	21-46	25-55	29-63
0,25	3-15	4-16	4-18	4-19	6-21
0,063	0-5	1-6	1-7	1-9	1-9
Προτεινόμενα μεγέθη χονδρόκοκκων αδρανών					
X-10/40 & X-4/31,5	X-4/31,5	X-4/20	X-2/12,5	X-2/10	
Συνιστώμενα πάχη μεμονωμένης στρώσης (mm)					
70-100	50-80	40-60	25-40	<30	
Προτεινόμενη χρήση					
				Ισοπεδωτική στρώση	
			Επιφανειακή στρώση		
		Συνδετική στρώση			
Ασφαλτική βάση					

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι απαιτήσεις σύμφωνα με την ΠΕΤΕΠ (2016). Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως η χρήση υλικών οποιασδήποτε προέλευσης θα πρέπει να συνάδει με τις απαιτήσεις των εκάστοτε προδιαγραφών. Η επιλογή ωστόσο του κατάλληλου τύπου ασφαλτοτάπητα για την αντιολισθηρή στρώση αποτελεί μια πολυπαραμερική διαδικασία στην περίπτωση που δεν υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για το έργο. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να χρησιμοποιείται το εκάστοτε είδος αντιολισθηρής στρώσης λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τις δομικές, όσο και τις λειτουργικές απαιτήσεις που χρειάζεται να καλύπτει η οδός με γνώμονα την οδική ασφάλεια.

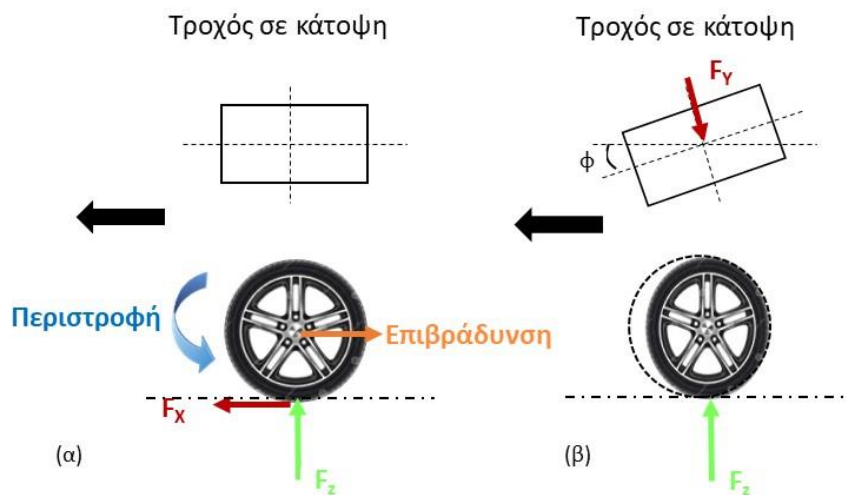
### 3 Αντιολισθητική ικανότητα ασφαλτικών οδοστρώματων

#### 3.1 Γενικά

Σύμφωνα με τον οδηγό AASHTO, η δύναμη που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση μεταξύ του ελαστικού του οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος ονομάζεται δύναμη τριβής (AASHTO 2018, Hall et al. 2009). Προκειμένου να είναι ασφαλής η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση ενός οχήματος, απαιτείται η ανάπτυξη τριβής μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος, η οποία αναλαμβάνει τη συγκράτηση του οχήματος επί της οδού σε οποιοδήποτε σημείο της κίνησής του. Δηλαδή, η απαίτηση σε τριβή πρέπει να είναι τέτοια, ώστε ο τροχός να μην ολισθαίνει σε κανένα σημείο της τροχιάς του, είτε αυτή αφορά σε κίνηση με προωθητική ροπή, είτε αφορά στη διαδικασία της πέδησης.

Για τη γενική περίπτωση κίνησης ενός οχήματος σε ευθυγραμμία, η διεύθυνση της αναπτυσσόμενης τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος συμπίπτει με τον διαμήκη (εφαπτομενικό) άξονα του ελαστικού. Σε αυτήν την περίπτωση, η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος εκφράζεται με τον εφαπτομενικό συντελεστή τριβής (Braking Force Coefficient – BFC) που προκύπτει ως ο λόγος της δύναμης τριβής ( $F_x$ ) προς την κάθετη δύναμη αντίδρασης που ασκείται στο ελαστικό ( $F_z$ ) (Εικόνα 3.1α και εξίσωση 3.1):

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (3.1)$$

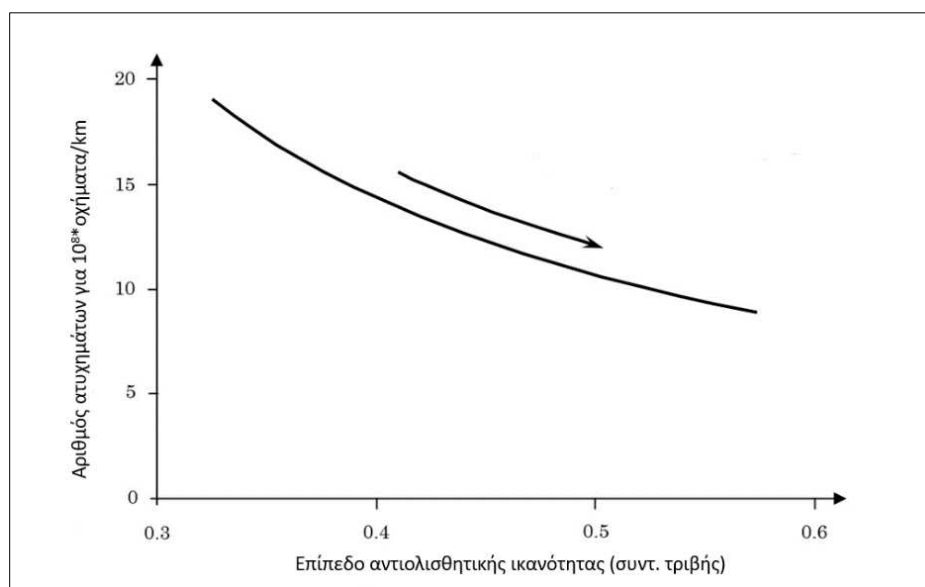


**Εικόνα 3.1:** Γραφική απεικόνιση των δυνάμεων τριβής για κίνηση α) κατά τη διαμήκη διεύθυνση υπό συνθήκες πέδησης (BFC), β) υπό γωνία (SFC)

Στην περίπτωση κίνησης σε καμπύλη, λόγω της συμβολής της ταχύτητας και της αναπτυσσόμενης πλευρικής (φυγόκεντρης) επιτάχυνσης, εμφανίζεται και επιπλέον εγκάρσια τριβή, η οποία έχει διεύθυνση κάθετη στον διαμήκη άξονα του ελαστικού και φορά προς το εσωτερικό της καμπύλης (Εικόνα 3.1β). Στην περίπτωση αυτή, η διεύθυνση της ταχύτητας του ελαστικού αποκλίνει κατά γωνία "φ" από τον διαμήκη άξονά του (γωνία πλαγιοδρόμησης του ελαστικού). Έτσι, κατ' αντιστοιχία με την κίνηση σε ευθυγραμμία, ορίζεται ο εγκάρσιος (πλευρικός) συντελεστής τριβής (Sideway Friction Coefficient – SFC) ως ο λόγος της αναπτυσσόμενης πλευρικής οριζόντιας δύναμης τριβής ( $F_y$ ) προς την κάθετη δύναμη αντίδρασης που

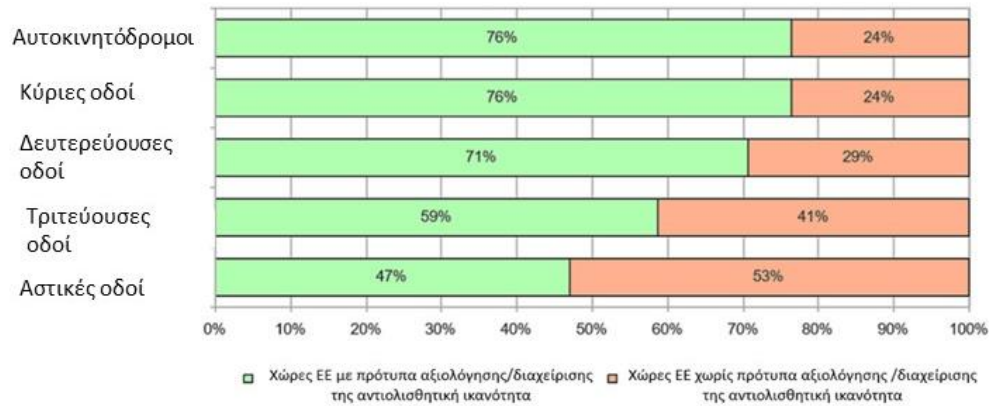
ασκείται στο ελαστικό ( $F_z$ ). Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής τριβής αποτελεί μία τιμή (ποσοτική έκφραση) που χαρακτηρίζει το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος.

Η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων έχει συνδεθεί με την πρόκληση οδικών ατυχημάτων, όπως επίσης και με τη σοβαρότητα των τραυματισμών και το είδος των οδικών συγκρούσεων (Hall et al. 2009, Douglas 2013, Fwa 2017). Διεθνώς, θεωρείται ότι η επαρκής αντιολισθητική ικανότητα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για ένα ασφαλές σύστημα μετακινήσεων και αποτελεί έναν παράγοντα ουσιαστικής και ζωτικής σημασίας (Choi 2011). Μέσα από πολυάριθμες έρευνες που διεξάγονται διεθνώς, έχει αναδειχθεί ότι σε οδούς με χαμηλό επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας, ο αριθμός ατυχημάτων είναι ιδιαίτερα υψηλός (Εικόνα 3.2). Ως εκ τούτου, οι φορείς διαχείρισης των οδών που είναι υπεύθυνοι για την κατάσταση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, θα πρέπει να είναι σαφώς εξοικειωμένοι με την έννοια της διατήρησης της οδικής ασφάλειας σε υψηλό επίπεδο και κατ' επέκταση, να κατανοούν τους παράγοντες που συμβάλουν σε αυτό.



**Εικόνα 3.2:** Σχέση αντιολισθητικής ικανότητας και αριθμού ατυχημάτων (Viner et al. 2004)

Συνεπώς, για τη διαχείριση της οδικής ασφάλειας, έχουν αναπτυχθεί σε πολλές χώρες πλαίσια με στρατηγικές και οδηγίες τόσο για την καταγραφή επιτόπου δεδομένων αντιολισθητικής ικανότητας, όσο και για την αξιολόγησή της (ZTV Asphalt-StB 2007, Choi 2011, NZTA T10 2013, Vos et al. 2015, CS/228 2020). Βασικός στόχος των παραπάνω πλαισίων είναι η σωστή αξιολόγηση και η έγκαιρη πρόληψη, με στόχο τη διατήρηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε υψηλά επίπεδα και κατ' επέκταση τη μείωση των οδικών ατυχημάτων που οφείλονται κυρίως σε μη επαρκή αντιολισθητική ικανότητα. Η Εικόνα 3.3 παρουσιάζει τα ποσοστά των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ανά κατηγορία οδού, που διαθέτουν πλαίσια αξιολόγησης της αντιολισθητικής ικανότητας.



**Εικόνα 3.3:** Ποσοστιαία κατανομή ύπαρξης προτύπων αξιολόγησης και διαχείρισης της αντιολισθητικής ικανότητας ανά κατηγορία οδού των χωρών της Ε.Ε. (Haider and Conter 2010)

Ωστόσο, τα προαναφερθέντα πλαίσια καταγραφής και αξιολόγησης της αντιολισθητικής ικανότητας έχουν αναπτυχθεί λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία μετρήσεων που προέρχονται από διάφορα συστήματα μέτρησης. Τα συστήματα αυτά έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς με στόχο την καταγραφή του συντελεστή τριβής των οδοστρωμάτων σε επιφάνειες οδών (Austroads 2005, 2009). Αναφορικά με τις συνθήκες μετρήσεων, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση επιφανειών οδοστρωμάτων με χαμηλά επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας, η ύπαρξη νερού οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή τριβής που καταγράφεται (Kuttesch 2004). Κατά συνέπεια, έχει διαπιστωθεί ότι οι προσκρούσεις οχημάτων είναι πιο πιθανό να συμβούν σε υγρό οδόστρωμα με χαμηλά επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της αντιολισθητικής ικανότητας και των υγρών συνθηκών στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων και έτσι τα περισσότερα συστήματα μετρούν τον συντελεστή τριβής σε υγρή επιφάνεια (Douglas 2013, Hall et al. 2009).

Η αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος που μπορεί να παρέχει μια οδός αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη στη φάση του γεωμετρικού σχεδιασμού της (Hall et al. 2009, Flintch et al. 2012). Συγκεκριμένα, αποτελεί ένα στοιχείο κλειδί που αξιοποιείται για τον προσδιορισμό της ελάχιστης απόστασης για στάση σε μία οδό, της ελάχιστης ακτίνας στην οριζοντιογραφία και των ελάχιστων παραμέτρων κοίλων και κυρτών καμπυλών στη μηκοτομή (Hall et al. 2009). Στην υφιστάμενη πρακτική σχεδιασμού οδών (RAA 2008, AASHTO 2018) οι τιμές αυτές προκύπτουν με βάση εμπειρικά δεδομένα (πχ. στοιχεία ατυχημάτων, άνεση οδηγού, κλπ.). Για παράδειγμα στον προσδιορισμό του μήκους ορατότητας για στάση λαμβάνεται μια μέση επιβράδυνση από την οποία προκύπτει ο συντελεστής τριβής.

Επίσης, η επαρκής αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος παρέχει τη δυνατότητα στους οδηγούς να ελέγχουν τους ελιγμούς του οχήματος με ασφαλή τρόπο, τόσο σε ευθύγραμμη όσο και σε μη ευθύγραμμη κίνηση. Ωστόσο, η ύπαρξη νερού σε υγρή μορφή ή πάγου ή η ύπαρξη ρύπων στη διεπαφή ελαστικού οδοστρώματος σε συνδυασμό με ένα οδόστρωμα χαμηλού επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας, μπορεί να οδηγήσει σε έλλειμα ευστάθειας του οχήματος και κατ' επέκταση σε σύγκρουση ή εκτροπή από την οδό (Flintsch et al. 2012). Για το λόγο αυτό, συνηθίζεται η χρήση σχετικής προειδοποιητικής σήμανσης προκειμένου οι οδηγοί να προσαρμόζουν την οδηγική συμπεριφορά τους (Εικόνα 3.4)





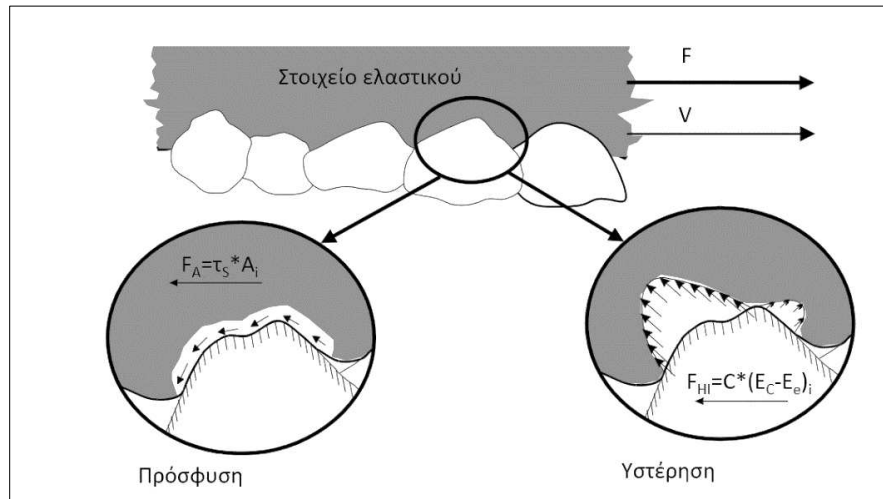
*Εικόνα 3.4: Προειδοποιητική σήμανση για μειωμένα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας*

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, προκύπτει ο σημαντικός ρόλος διατήρησης της αντιολισθητικής ικανότητας σε ικανοποιητικά επίπεδα και για το λόγο αυτό στην επόμενη υποενότητα αναλύεται ο μηχανισμός ανάπτυξής της, καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

### 3.2 Συνιστώσες αντιολισθητικής ικανότητας

Αναλύοντας περισσότερο τον μηχανισμό της τριβής, διαπιστώνεται ότι η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος είναι αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο κύριων παραμέτρων, της πρόσφυσης και της υστέρησης (Εικόνα 3.5) (Austroads 2005, Mohammad and Kassem 2017, Kane et al. 2019, Plati et al. 2020b, Pomoni et al. 2020a). Η πρόσφυση προκύπτει από τη μικρής κλίμακας επαφή του ελαστικού του οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος (Transportation Safety Board 2010, Villani et al. 2011). Πρόκειται για μια συνάρτηση της διατμητικής αντοχής και της περιοχής επαφής των δύο επιμέρους επιφανειών (Prowell et al. 2003). Η υστέρηση των δυνάμεων τριβής προκύπτει από την απώλεια ενέργειας λόγω της παραμόρφωσης του ελαστικού του οχήματος. Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να αναφερθεί ως περιτύλιξη του ελαστικού γύρω από την υφή του αδρανούς. Όταν ένα ελαστικό συμπιέζεται κατά την επαφή του με την επιφάνεια του οδοστρώματος, η κατανομή των τάσεων οδηγεί στην αποθήκευση της ενέργειας παραμόρφωσης εντός του ελαστικού (Kogbara et al. 2016 Srirangam et al. 2017). Καθώς το ελαστικό χαλαρώνει, ένα μέρος αυτής της αποθηκευμένης ενέργειας ανακτάται (ανακτώμενη ενέργεια), ενώ το άλλο μέρος απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας (υστέρηση) (μη ανακτώμενη ενέργεια) (Transportation Safety Board of Canada, 2010, Yu et al. 2017). Αυτή η απώλεια ενέργειας ωστόσο λειτουργεί θετικά για την πέδηση και την ακινητοποίηση του οχήματος (Hall et al. 2009, Yu et al. 2017).





Εικόνα 3.5: Βασικός μηχανισμός τριβής (Glennon 1996)

Αν και υπάρχουν και άλλες παράμετροι που συντελούν στην ανάπτυξη της δύναμης τριβής του οδοστρώματος, όπως π.χ. η διάτμηση του ελαστικού, θεωρούνται ασήμαντες σε σύγκριση με τις δυνάμεις πρόσφυσης και υστέρησης (Mataei et al. 2016). Έτσι, η δύναμη τριβής μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των δυνάμεων τριβής πρόσφυσης και υστέρησης (εξίσωση 3.2) (Hall et al. 2009, Kane et al. 2019).

$$F = F_A + F_H \quad (3.2)$$

όπου,

F= Δύναμη τριβής

F<sub>A</sub>= Δύναμη πρόσφυσης

F<sub>H</sub>= Δύναμη υστέρησης

Η δύναμη πρόσφυσης καθορίζεται κυρίως από την μικροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος, επειδή αναπτύσσεται στη μικροκλίμακα της διεπαφής ελαστικού και οδοστρώματος (Flintsch et al. 2003, Wilson 2006, Do et al. 2013a). Αντίθετα, η δύναμη υστέρησης επηρεάζεται κυρίως από τη μακροϋφή της επιφάνειας, αφού αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και της υφής μεγαλύτερης κλίμακας, η οποία καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος όπως το ποσοστό κενών (Flintsch et al. 2003, Wilson 2006, Yu et al. 2017). Ως αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, η πρόσφυση έχει καθοριστικό ρόλο κατά την ανάπτυξη της τριβής σε ομαλές και στεγνές επιφάνειες οδοστρωμάτων. Ενώ, η υστέρηση έχει καθοριστικό ρόλο κατά την ανάπτυξη της τριβής σε υγρές και τραχείς επιφάνειες οδοστρωμάτων (Hall et al. 2009, Kane et al. 2019).

Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος αλλά και από τις ιδιότητες του ελαστικού. Επίσης, επειδή το υλικό των ελαστικών είναι ιξωδοελαστικό, η θερμοκρασία και η ταχύτητα ολίσθησης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την εξέλιξη των δύο παραμέτρων και ως εκ τούτου την αναπτυσσόμενη τριβή ελαστικού-οδοστρώματος (Hall et al. 2009, Kogbara et al. 2018a).

### 3.3 Περιγραφή δυνάμεων τριβής

#### 3.3.1 Διαμήκεις δυνάμεις τριβής

Οι διαμήκεις δυνάμεις τριβής εμφανίζονται κατά την κίνηση ενός οχήματος με ευθύγραμμη κατεύθυνση, μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος όταν ο τροχός του οχήματος βρίσκεται σε λειτουργία ελεύθερης κύλισης, σταθερής πέδησης ή κίνησης με προωθητική ροπή. Κατά τη λειτουργία ελεύθερης κύλισης (χωρίς πέδηση), η σχετική ταχύτητα μεταξύ της περιμέτρου του ελαστικού και του οδοστρώματος, που αναφέρεται ως ταχύτητα ολίσθησης, είναι μηδενική μέχρι την ακινητοποίηση του τροχού. Κατά τη λειτουργία σταθερής πέδησης, η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται από μηδενική (κατάσταση ελεύθερης κίνησης) στην ενδεχόμενη μέγιστη ταχύτητα του οχήματος. Η ακόλουθη μαθηματική σχέση (Εξίσωση 3.3) εξηγεί τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της ταχύτητας ολίσθησης (Meyer 1982, Hall et al. 2009):

$$S = V - V_p = V - (0.68 * \omega * r) \quad (3.3)$$

όπου,

S= Ταχύτητα ολίσθησης, mi/h

V= Ταχύτητα οχήματος, mi/h

V<sub>p</sub>= Μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο, mi/h

ω= Γωνιακή ταχύτητα ελαστικού, rad/sec

r= Μέση ακτίνα ελαστικού, ft

Σε συνθήκες ελεύθερης κύλισης του ελαστικού, η μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο (V<sub>p</sub>) είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος. Το ελαστικό εκτελεί μεταφορική και περιστροφική κίνηση και η ταχύτητα ολίσθησης είναι μηδενική. Για την περίπτωση ακινητοποιημένου τροχού ή τροχού σε κατάσταση πλήρους πέδησης, ο τροχός δεν περιστρέφεται και ως εκ τούτου, εκτελεί μόνο μεταφορική κίνηση. Η μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο είναι μηδενική, οπότε η ταχύτητα ολίσθησης είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος (V). Κατά συνέπεια, στην κατάσταση ακινητοποιημένου τροχού αναφέρεται ότι συμβαίνει 100% διολίσθηση του τροχού (slip ratio) – πλήρης ολίσθηση, ενώ σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης η διολίσθηση είναι μηδενική. Για όλες τις υπόλοιπες ενδιάμεσες περιπτώσεις, ορίζεται ένα ποσοστό διολίσθησης του τροχού ως ακολούθως (Εξίσωση 3.4) (Hall et al. 2009, Meyer 1982):

$$SR=(V-V_p)/V*100=S/V*100 \quad (3.4)$$

όπου:

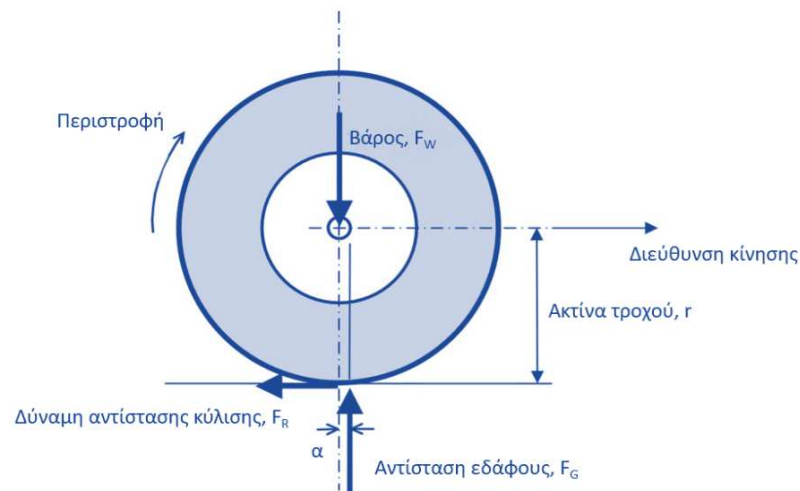
SR= Διολίσθηση

V= Ταχύτητα οχήματος, mi/h

V<sub>p</sub>= Μέση ταχύτητα του ελαστικού στην περίμετρο, mi/h

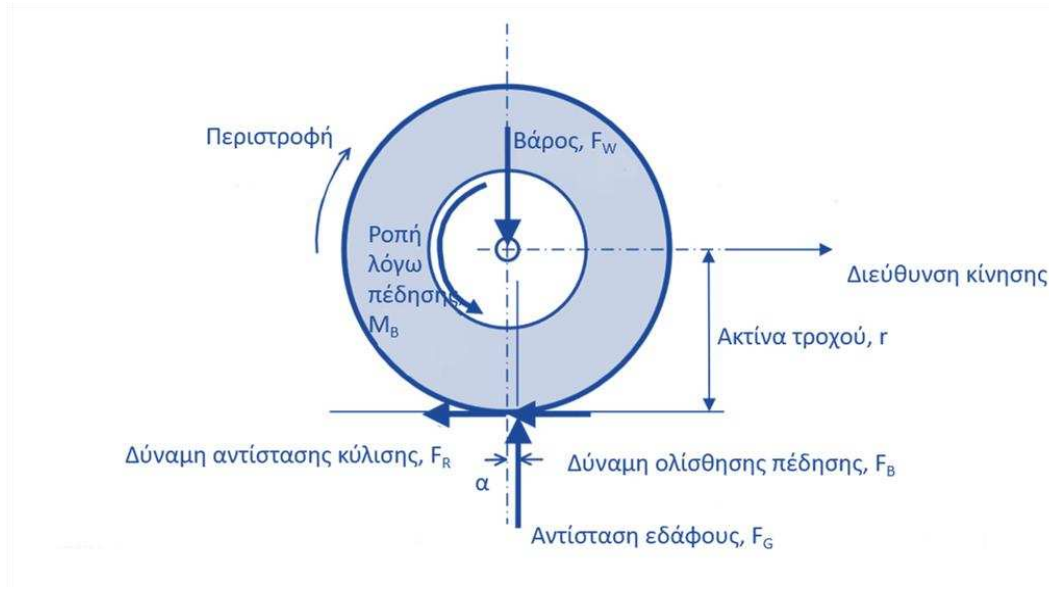
S= Ταχύτητα ολίσθησης, mi/h

Στην Εικόνα 3.6 απεικονίζεται η δύναμη εδάφους που δρα στην κατάσταση ελεύθερης κύλισης ενός ελαστικού. Σε αυτή την κατάσταση, η δύναμη του εδάφους δεν 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 θα πρέπει να ξεπεραστεί ώστε το ελαστικό να περιστραφεί. Η δύναμη που απαιτείται για την «εξουδετέρωση» αυτής της ροπής ονομάζεται δύναμη αντίστασης κύλισης ( $F_R$ ). Η τιμή  $-a$  είναι συναρτημένη της ταχύτητας και αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα. Τελικώς, η δύναμη αντίστασης στην κύλιση αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας (Hall et al. 2009).



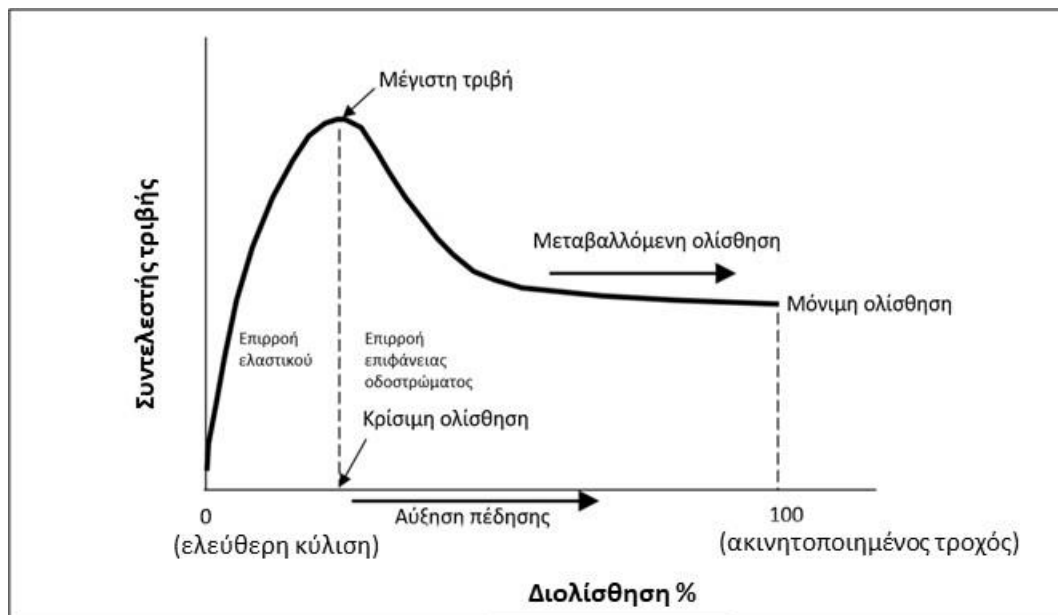
**Εικόνα 3.6:** Δύναμη αντίστασης κύλισης σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης με σταθερή ταχύτητα σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen and Wambold 1999)

Στην κατάσταση σταθερής πέδησης (Εικόνα 3.7), 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 αυτή είναι ανάλογη του επιπέδου πέδησης και του ποσοστού διολίσθησης που προκύπτει. Η συνολική δύναμη τριβής είναι το άθροισμα της δύναμης ( $F_R$ ) και της ολίσθησης πέδησης ( $F_B$ ) (Hall et al. 2009).



Εικόνα 3.7: Δυνάμεις και ροπές σε κατάσταση πέδησης σε στεγνή επιφάνεια οδοστρώματος (Andresen and Wambold 1999)

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος επηρεάζεται άμεσα από τη διολίσθηση (SR), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα συντελεστή τριβής-διολίσθησης ελαστικού (Austroads 2005)

Πιο συγκεκριμένα, όταν ο οδηγός ενός οχήματος αρχίζει να κάνει έναν ελιγμό που συνεπάγεται αλλαγή ταχύτητας, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος επιτρέπουν στο όχημα να επιταχύνει, να επιβραδύνει ή να ακολουθήσει μια καμπύλη. Ωστόσο, κατά την πέδηση και καθώς η δύναμη πέδησης αυξάνεται, η δύναμη αντίστασης σε ολίσθηση, δηλαδή ο συντελεστής τριβής, αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή του. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε ποσοστά διολίσθησης μεταξύ 18% και 30%. Η διολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του

συντελεστή τριβής ονομάζεται κρίσιμη ολίσθηση. Στην συγκεκριμένη κατάσταση, το ελαστικό συνεχίζει την επιβράδυνση σε σχέση με την ταχύτητα του οχήματος και τη διολίσθησή του στην επιφάνεια του δρόμου, ακόμα κι αν ο τροχός εξακολουθεί να περιστρέφεται. Αν η δύναμη πέδησης συνεχίσει να υφίσταται, το ελαστικό μπορεί να ολισθήσει ακόμα περισσότερο. Έπειτα, ο συντελεστής τριβής μειώνεται έως μια τιμή γνωστή ως συντελεστής πλήρους ολίσθησης, η οποία συμβαίνει σε ποσοστό διολίσθησης 100%. Επιπροσθέτως, όταν ολοκληρωθεί το κλείδωμα του τροχού (blocking system), ο τροχός σταματάει να περιστρέφεται και το ελαστικό ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η διαφορά μεταξύ των συντελεστών τριβής που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ολίσθηση και στην πλήρη ολίσθηση μπορεί να είναι της τάξης του 50%, ενώ είναι πολύ μεγαλύτερο στις υγρές επιφάνειες οδοστρωμάτων απ' ό,τι σε ξηρές (Raslavičius et al. 2016). Στην περίπτωση ξηρών επιφανειών οδοστρώματος, υπάρχει συνήθως μικρή διαφορά μεταξύ των συντελεστών της μέγιστης τριβής και της πλήρους ολίσθησης (Hall et al. 2009).

Το διάγραμμα της εικόνας 3.8 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 διολίσθησης που βρίσκονται αριστερά από την κρίσιμη ολίσθηση και ελαχιστοποιεί την πλευρική ολίσθηση. Τα οχήματα με σύστημα ABS έχουν σχεδιαστεί για να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν τα φρένα επανειλημμένα, έτσι ώστε η διολίσθηση να συγκρατείται κοντά στην κρίσιμη ολίσθηση. Η πέδηση απενεργοποιείται πριν επιτευχθεί η κρίσιμη ολίσθηση, ενώ ενεργοποιείται σε καθορισμένο χρόνο ή ποσοστό διολίσθησης κάτω από την κρίσιμη ολίσθηση. Ο χρόνος που συμβαίνει η παραπάνω διαδικασία καθορίζεται από τον κατασκευαστή του εκάστοτε συστήματος (Hall et al. 2009).

### 3.3.2 Πλευρικές δυνάμεις τριβής

Μια επιπλέον συνιστώσα δυνάμεων που συμβάλλει στην αντιολισθητική ικανότητα είναι η αναπτυσσόμενη πλευρική δύναμη τριβής. Η πλευρική δύναμη τριβής εμφανίζεται όταν ένα όχημα αλλάζει κατεύθυνση, κινείται σε καμπύλες με εγκάρσια κλίση ή στην περίπτωση ύπαρξης ανέμων εναλλασσόμενης φοράς. Σε αυτή την περίπτωση, η σχέση μεταξύ των δυνάμεων που δρουν στο ελαστικό του οχήματος και στην επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς το όχημα κινείται περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (εξίσωση 3.5) (Hall et al. 2009):

$$F_s = \frac{v^2}{15R} - e \quad (3.5)$$

όπου:

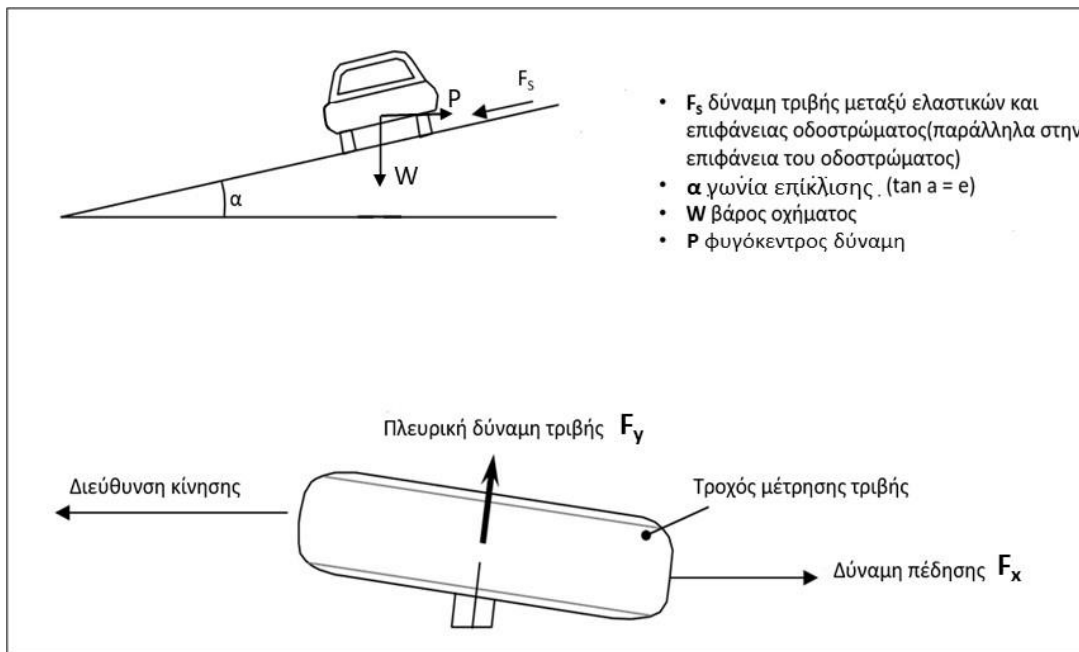
$F_s$ = Πλευρική δύναμη τριβής

$V$ = Ταχύτητα οχήματος, mi/h

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

$e$ = Επίκλιση οδοστρώματος, ft/ft

Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς του οχήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9.

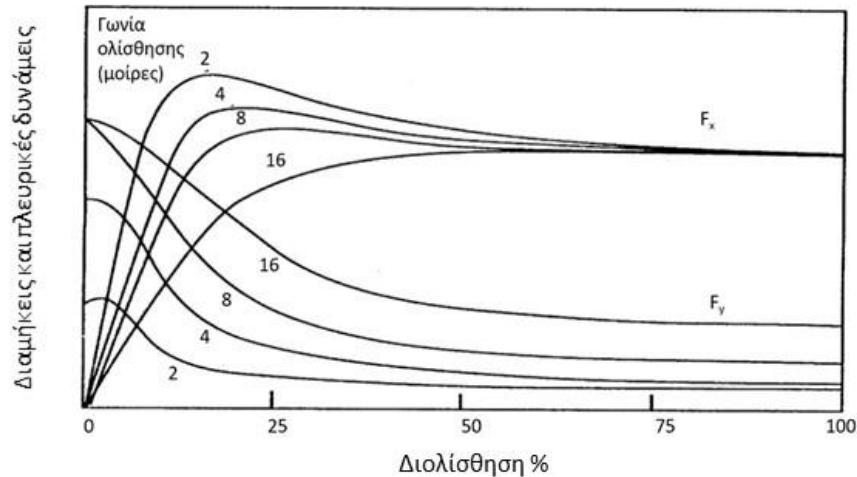


Εικόνα 3.9: Δυνάμεις οχήματος που κινείται σε καμπύλη σταθερής ακτίνας με σταθερή ταχύτητα (Hall et al. 2009)

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

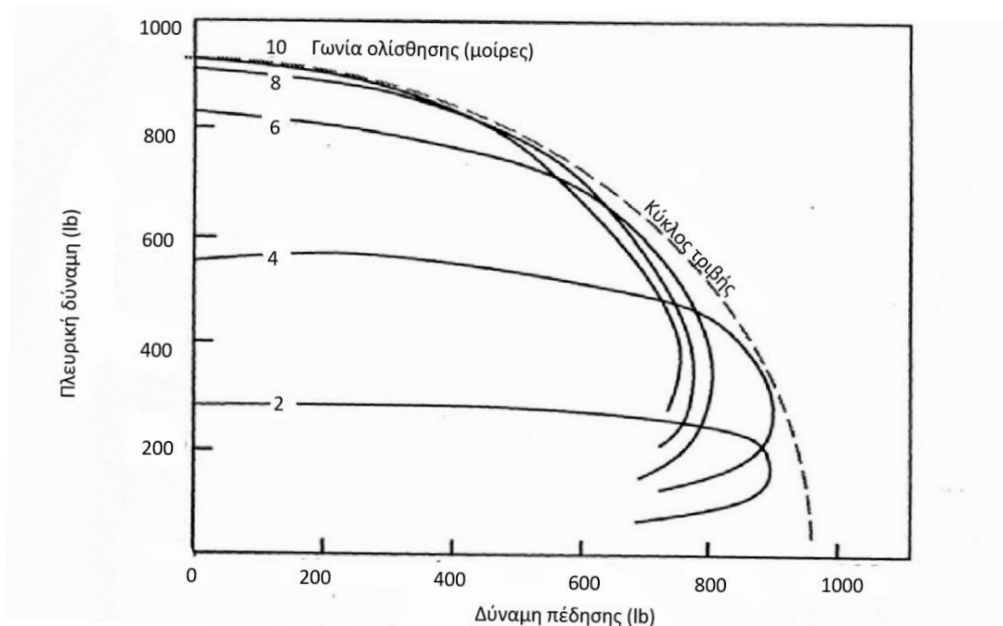
### 3.3.3 Συνδυασμός πέδησης και καμπύλης

Ο συνδυασμός της πέδησης ενός οχήματος κατά την κίνηση του σε ένα καμπύλο οδικό τμήμα συνήθως εντείνει τον κίνδυνο το όχημα να μην ακινητοποιηθεί γρήγορα ή ακόμα και να χαθεί εξολοκλήρου ο έλεγχός του, λόγω μειωμένων πλευρικών δυνάμεων. Στην περίπτωση που τα ελαστικά είναι στα όρια της πρόσφυσης, η αλληλεπίδραση των διαμήκων και των πλευρικών δυνάμεων είναι τέτοια ώστε όταν αυξάνεται η μία δύναμη, η άλλη θα πρέπει να μειώνεται αναλογικά (Hall et al. 2009). Επομένως, με την εφαρμογή της διαμήκου πέδησης μειώνεται σημαντικά η πλευρική δύναμη τριβής. Αντιστρόφως, με την ανάπτυξη υψηλής πλευρικής δύναμης τριβής μειώνεται η διαμήκης πέδηση. Το διάγραμμα της Εικόνας 3.10 απεικονίζει την παραπάνω σχέση των δύο ειδών δυνάμεων (Gillespie 1992).



**Εικόνα 3.10:** Δυνάμεις πέδησης ( $F_x$ ) & πλευρικές δυνάμεις ( $F_y$ ) συναρτήσει της διολίσθησης (Gillespie 1992)

Το άθροισμα των δύο δυνάμεων ( $F_x$ ,  $F_y$ ) είναι γνωστό ως κύκλος τριβής ή έλλειψη τριβής. Όταν το άθροισμα παραμένει σταθερό ονομάζεται κύκλος και όταν είναι σχεδόν σταθερό έλλειψη (Εικόνα 3.11).



**Εικόνα 3.11:** Πλευρική δύναμη έναντι διαμήκου δύναμης για σταθερές γωνίες ολίσθησης (Gillespie 1992)

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 3.11, το αθροιστικό διάνυσμα των δύο δυνάμεων θα πρέπει να μην υπερβαίνει τα όρια της διολίσθησης 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 κατά την επαφή του με το οδόστρωμα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, προκύπτει ότι η ανάπτυξη του συντελεστή τριβής και κατ' επέκταση η εν δυνάμει παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας ενός οδοστρώματος,

αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό στοιχείο. Αφενός, η ανάπτυξη των δυνάμεων που αναφέρθηκαν επηρεάζεται άμεσα από το είδος κίνησης του οχήματος, αφετέρου παράγοντες που αφορούν στο περιβάλλον κίνησής του (είδος οδού, γεωμετρία οδού, τύπος επιφάνειας, καιρικές συνθήκες κλπ.) δρουν καταλυτικά στην τελικώς προκύπτουσα αντιολισθητική ικανότητα και συνεπώς στην παρεχόμενη οδική ασφάλεια.

### 3.4 Παράγοντες επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα

#### 3.4.1 Συνοπτική αναφορά

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη δύναμη τριβής και κατ' επέκταση την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες, που είναι οι εξής:

- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, τα οποία αναφέρονται στην επιφανειακή υφή και στις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος.
- Οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος, οι οποίες αναφέρονται στην ταχύτητα ολίσθησης, δηλαδή στην ταχύτητα του οχήματος και τη δύναμη πέδησης που μπορεί να αναπτύξει κατά την κίνηση.
- Οι ιδιότητες των ελαστικών, στις οποίες εμπεριέχονται η υφή της επιφάνειας του πέλματος και η κατάσταση του, η σύνθεση και η σκληρότητά του, η πίεση που ασκεί ο αέρας στο εσωτερικό τους, το φορτίο που φέρουν και η θερμοκρασία τους.
- Καιρικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένης της εποχιακής διακύμανσης. Όσον αφορά στις καιρικές συνθήκες, αναφέρονται στο αποτέλεσμα αυτών στην κατάσταση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Για παράδειγμα, η ύπαρξη χιονιού, πάγου, νερού, σκόνης κλπ, έπειτα από την εκδήλωση ενός καιρικού φαινομένου, ακόμα και η ύπαρξη κατάλοιπων όπως υπολείμματα ελαστικών, λάδια, κλπ., τα οποία παραμένουν στην επιφάνεια κατά τις περιόδους με μικρή συχνότητα βροχοπτώσεων. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσεται και η επίδραση της θερμοκρασίας.
- Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, τα οποία αναφέρονται τόσο στον όγκο όσο και στη σύνθεσή της, δηλαδή το είδος των οχημάτων (ΙΧ ή/και βαρέα οχήματα) που διέρχονται από μια οδό σε συγκεκριμένο χρόνο.

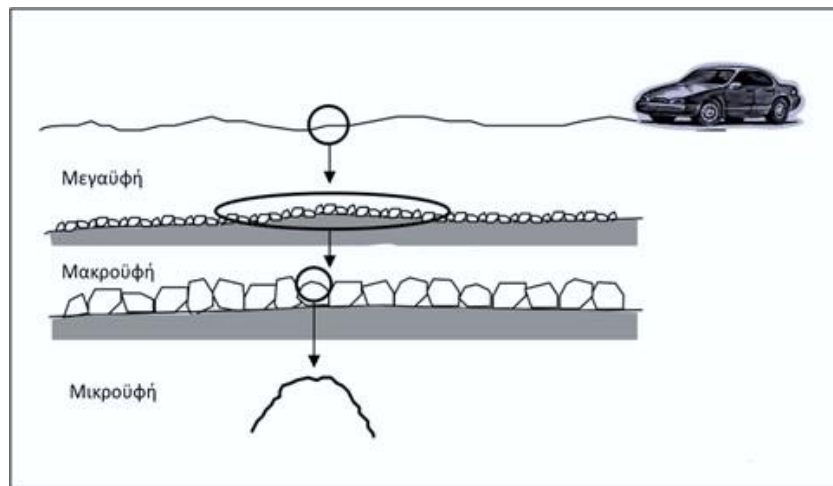
Οι προαναφερόμενοι παράγοντες συμβάλλουν τόσο στην εξέλιξη όσο και στην αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτόν, η αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να θεωρηθεί ως μια πολυπαραμετρική διαδικασία που εμπεριέχει τον προσδιορισμό



διάφορων παραγόντων που την επηρεάζουν δυνητικά. Ιδανικά, στην περίπτωση όπου καθοριστούν πλήρως όλοι οι παράγοντες, θα μπορούσε να καθοριστεί και η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος (Hall et al. 2009).

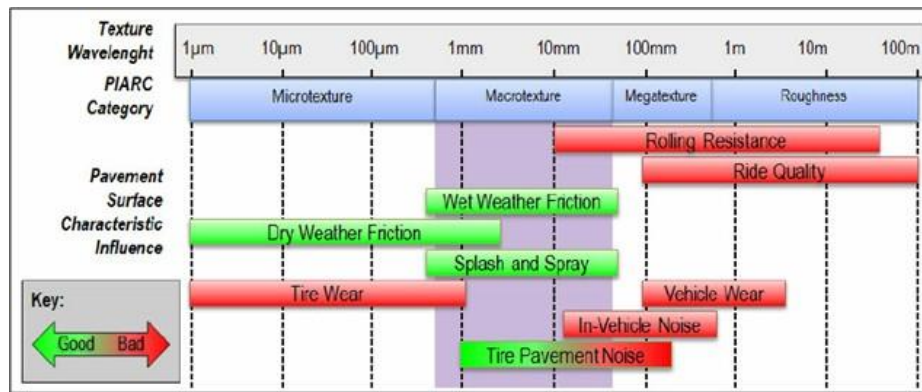
### 3.4.2 Επιφανειακή υφή

Η επιφανειακή υφή ενός οδοστρώματος διακρίνεται κυρίως στη μεγαϋφή, στη μακροϋφή και στη μικροϋφή όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 3.12. Ο διαχωρισμός αυτός προέρχεται έχοντας ως γνώμονα το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) της απόκλισης της επιφάνειας του οδοστρώματος από μια θεωρητικώς επίπεδη επιφάνεια. Συγκεκριμένα, η μεγαϋφή εντοπίζεται σε μήκος κύματος 50 – 500 mm, η μακροϋφή σε μήκος κύματος 0.5 – 50 mm και η μικροϋφή σε μήκος κύματος 1 $\mu$ m – 0.5 mm (Hall et al. 2009, Mogrovejo et al. 2016, Plati et al. 2017a, Plati et al. 2019, White et al. 2019).



Εικόνα 3.12: Κατηγορίες επιφανειακής υφής (Hall et al. 2009)

Συνολικά, η επιφανειακή υφή είναι συνδεδεμένη με τη συμπεριφορά του οχήματος κατά την επαφή των ελαστικών του με την επιφάνεια του οδοστρώματος (Rasmussen 2013). Έτσι, οι συνιστώσες αυτής της διεπαφής έχουν συσχετιστεί και με την αντίσταση κύλισης μίας οδού που είναι γνωστή διεθνώς με τον όρο «rolling resistance», καθώς επίσης με τη φθορά των ελαστικών (tyre wear), την παραγωγή θορύβου (noise), την υδρολίσθηση (hydroplaning) και τις εκπομπές ρύπων (China and James 2012a, Sohaney and Rasmussen 2013). Η ακόλουθη σχηματική απεικόνιση παρουσιάζει την επίδραση της επιφανειακής υφής σε βασικές παραμέτρους, τη δημιουργία ποσοστών θορύβου, καθώς και τη φθορά του οχήματος και των ελαστικών από τη διεπαφή ελαστικού-οδοστρώματος (Flintsch et al. 2012).



Εικόνα 3.13: Ταξινόμηση επιφανειακής υφής κατά PIARC (Flintsch et al. 2012)

Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.13 περιγράφεται η σχέση μεταξύ της επιφανειακής υφής του οδοστρώματος με το ελαστικό αλλά και ο βαθμός στον οποίο συμμετέχουν οι κατηγορίες της επιφανειακής υφής σε αυτό, διακρίνοντας το ρόλο της σε θετικό ή αρνητικό. Παρατηρείται ότι η συνεισφορά της μακροϋφής είναι κυρίως θετική (Flintsch et al. 2012, Do et al. 2013a, Pratico and Vaiana 2015, Rajaei et al. 2017):

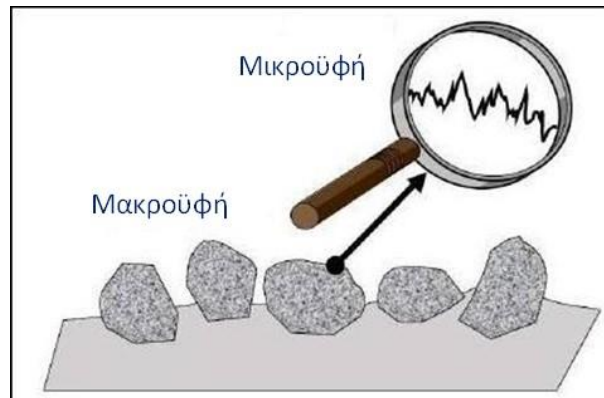
- Όσον αφορά στην περίπτωση που αναπτύσσεται τριβή σε ένα υγρό οδόστρωμα (*wet weather friction*), το «φιλμ» νερού που δημιουργείται στη διεπιφάνεια οδοστρώματος – ελαστικών μειώνει την άμεση επαφή τους εμποδίζοντας έτσι την πρόσφυση του οχήματος. Συνεπώς, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για επαρκή μακροϋφή, η οποία να εξασφαλίζει την απομάκρυνση του νερού κάτω από το ελαστικό, ελαχιστοποιώντας έτσι το φαινόμενο της υδρολίσθησης.
- Όσον αφορά στο φαινόμενο «παφλασμός και εκτόξευση νερού» γνωστό διεθνώς ως “*splash and spray*”, αυτό εμφανίζεται όταν το στάσιμο νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος “*ανασηκώνεται*” από τους τροχούς του οχήματος και διασκορπίζεται στον αέρα, με αποτέλεσμα να προκαλείται μείωση της ορατότητας στους οδηγούς των παράπλευρων ή πίσω οχημάτων. Για την αντιμετώπιση του είναι αναγκαία η παρουσία επαρκούς μακροϋφής, για να εξασφαλίζεται η απομάκρυνση του νερού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Τέλος, σχετικά με την παραγωγή θορύβου που προκαλείται μόνο λόγω της διεπαφής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (*tyre-pavement noise*), έχει παρατηρηθεί ότι ο θόρυβος αυξάνεται σε μεγάλα μήκη κύματος της μακροϋφής για την περίπτωση συμβατικών τύπων επιφανειακών ασφαλτικών στρώσεων.

Η επίδραση της μικροϋφής χαρακτηρίζεται είτε θετική, είτε αρνητική κατά περίπτωση αναφορικά με τα παρακάτω:

- Ως αρνητική θεωρείται η επίδραση της μικροϋφής στην σταδιακή φθορά των ελαστικών κατά την κίνησή τους (*tyre wear*).
- Ως θετική θεωρείται η συνεισφορά της μικροϋφής στην περίπτωση της κίνησης του οχήματος σε υγρή οδό, καθώς συμβάλει ενεργά στην ανάπτυξη της τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος μέσω κατάλληλων μηχανισμών που παρουσιάζονται σε επόμενο εδάφιο.

Όσον αφορά στην μεγαϋφή, η επίδραση της έχει καταγραφεί κυρίως ως αρνητική για την αντίσταση κύλισης, την παρεχόμενη ποιότητα κύλισης, τη σταδιακή φθορά των οχημάτων, την παραγωγή θορύβου τόσο από το ίδιο το όχημα κατά την κίνησή του (μηχανικά) σε μία οδό με αυτά τα χαρακτηριστικά όσο κι από τη διεπαφή ελαστικού-οδοστρώματος (Pavement Preservation Compendium 2003, Pavement Preservation Compendium II 2006). Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η μεγαϋφή δεν είναι επιθυμητή στο πλαίσιο της καλής λειτουργικής κατάστασης μιας οδού (Aktas et al. 2011, Sohaney and Rasmussen 2013).

Ωστόσο, οι κατηγορίες της επιφανειακής υφής που επηρεάζουν άμεσα την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος και αποτελούν τις συνιστώσες της, είναι η μικροϋφή και η μακροϋφή (Εικόνα 3.14) (Henry 2000, Flintsch et al. 2003).



Εικόνα 3.14: Μακροϋφή και μικροϋφή επιφάνειας οδοστρώματος (Flintsch et al. 2003)

Στην Εικόνα 3.15 παρουσιάζεται μια επιφάνεια οδοστρώματος με κακή μακροϋφή και μικροϋφή συγκριτικά με την περίπτωση οδοστρώματος με καλή μακρο και μικροϋφή.



Εικόνα 3.15: Επιφάνειες οδοστρώματος με κακή και καλή μακροϋφή και μικροϋφή

Είναι προφανές ότι στην περίπτωση κακής μακροϋφής και μικροϋφής η επιφάνεια του ελαστικού δεν έρχεται σε πλήρη επαφή με τα αδρανή του οδοστρώματος ώστε να αναπτυχθούν οι συνιστώσες της πρόσφυσης και της υστέρησης και συνεπώς, η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι μειωμένη ή/και ανεπαρκής (Vaiana et al. 2012, Li et al. 2019, Wesolowski and Blacha 2019). Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικά η μικροϋφή και μακροϋφή, η επίδρασή τους στην παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας ενός οδοστρώματος και μερικές μέθοδοι μέτρησής τους.

#### ❖ Μικροϋφή

Η μικροϋφή ορίζεται ως το εύρος των αποκλίσεων από τη θεωρητικώς επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος από 1μm έως 0,5mm (Ergun et al. 2005, Li et al. 2018). Η υφή σε αυτήν την κλίμακα παρέχεται είτε από την κρυσταλλική δομή των αδρανών στο ανώτερο στρώμα της αντιολισθητής στρώσης είτε από λεπτά σωματίδια, όπως η άμμος στο ασφαλτόμιγμα της στρώσης κυκλοφορίας (Εικόνα 3.16) (Do et al. 2013a). Η μικροϋφή επηρεάζει την αντιολισθητική ικανότητα σε υγρή και ξηρή κατάσταση σε όλο το φάσμα ταχυτήτων κίνησης, αλλά κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες (AASHTO 2008, Serigos et al. 2014, Rajaei et al. 2017), καθώς σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται δυνάμεις έλξης από την αλληλεπίδραση του πέλματος των ελαστικών με την επιφάνεια των αδρανών. Οι δυνάμεις έλξης ωστόσο, μπορεί να αυξήσουν σημαντικά τον ρυθμό φθοράς των ελαστικών (tyre wear) όταν η μικροϋφή είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα. Στην περίπτωση όμως κοινών τύπων οδοστρωμάτων, η μικροϋφή δεν μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη φθορά στα ελαστικά (Guan et al. 2018).



Εικόνα 3.16: Μικροϋφή αδρανών ασφαλτομίγματος

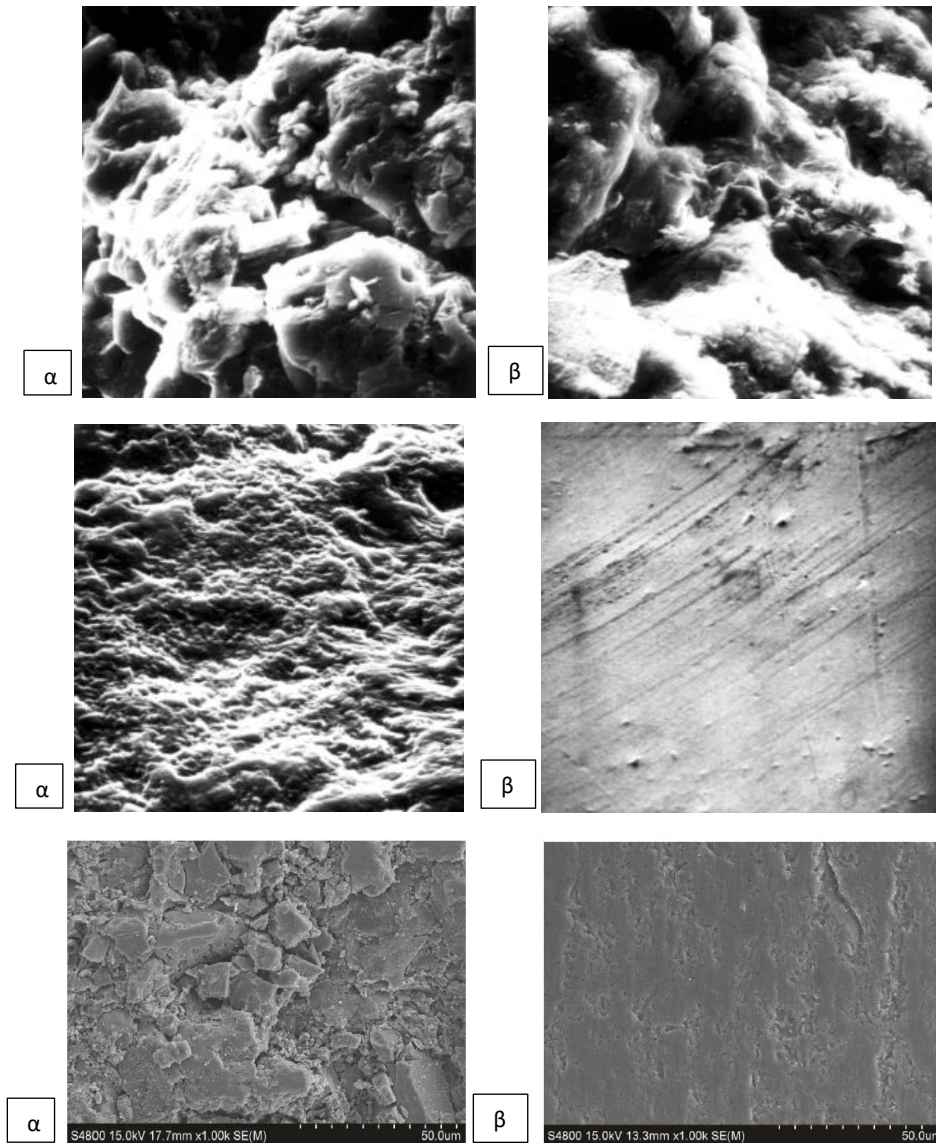
Η μικροϋφή μπορεί να εκτιμηθεί αξιοποιώντας τη συσκευή British Pendulum (Εικόνα 3.17) τόσο για μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον όσο και στο πεδίο (Pratico and Astolfi 2017). Γενικά, το British Pendulum χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντιολισθητικής ικανότητας σημειακά, καθώς πρόκειται για στατική μέθοδο μέτρησης, και έχει αποδειχθεί πως οι μετρήσεις επηρεάζονται κυρίως από τη μικροϋφή της επιφάνειας. Περισσότερες λεπτομέρειες για την συγκεκριμένη συσκευή δίνονται στο κεφάλαιο 4.



Εικόνα 3.17: Συσκευή British Pendulum για τον προσδιορισμό της αντιολισθητικής ικανότητας



Η μικροϋφή επηρεάζεται άμεσα από την κυκλοφορία. Οι διελεύσεις των οχημάτων οδηγούν σε απώλεια της τραχύτητας των αδρανών προκαλώντας λείανση της επιφάνειάς τους ακόμα και θραύση (Εικόνα 3.18). Για το λόγο αυτό, τα αδρανή με χαμηλή αντοχή σε λείανση/στίλβωση, βαθμό σκληρότητας και μικρή τιμή μικροϋφής θεωρούνται μη επιθυμητά για χρήση στο ασφαλτόμιγμα της στρώσης κυκλοφορίας (Guan et al. 2018, Kane and Edmondson 2018, Kane and Edmondson 2020).



**Εικόνα 3.18:** Παραδείγματα αδρανών πριν (α) και μετά (β) τη λείανσή τους – Μικροσκοπική απεικόνιση (Roe and Lagarde-Forest 2005, Guan et al. 2018)

Η αντίσταση σε στίλβωση των αδρανών μπορεί να ελεγχθεί στο εργαστήριο μέσω της δοκιμής Polished Stone Test (Polished Stone Value – PSV) (EN 1097-8:2020 2020). Ωστόσο, επιστήμονες από τη Νέα Ζηλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, έχουν διαπιστώσει ότι η εν λόγω μέθοδος δεν μπορεί να αποτυπώσει την πραγματική συμπεριφορά των αδρανών σε συνθήκες κυκλοφορίας στο πεδίο (Roe and Lagarde-Forest 2005, Wilson 2013). Κυρίως δηλαδή, αναφέρεται ότι η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την

αξιολόγηση της ποιότητας των αδρανών και κατ' επέκταση της συνεισφοράς τους στην μικροϋφή και την αντιολισθητική ικανότητα για συνθήκες πραγματικών διελεύσεων.

### ❖ Μακροϋφή

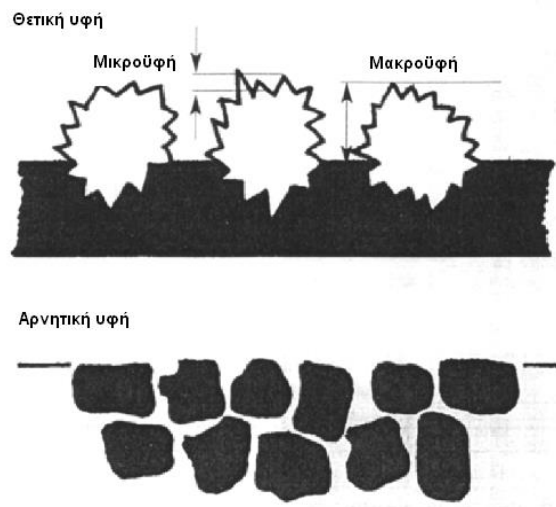
Η μακροϋφή ορίζεται ως η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μια επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος που κυμαίνονται από 0.5mm έως 50mm κατά μήκος της επιφάνειας (Choi 2011, Flintch et al. 2003). Επηρεάζεται κυρίως από το μέγεθος και το σχήμα των χονδρόκοκκων αδρανών της αντιολισθητής στρώσης κυκλοφορίας ή από την συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος κατά την κατασκευή μίας οδού (Sullivan 2005, Meegoda and Gao 2015, Iuele 2016). Ουσιαστικά, η μακροϋφή αναφέρεται στην τραχύτητα που προσδίδεται από τις αποκλίσεις μεταξύ των αδρανών (Εικόνα 3.19).



Εικόνα 3.19: Μακροϋφή στρώσης κυκλοφορίας

Η μακροϋφή καθορίζει το βαθμό κατά τον οποίο μειώνεται η αντίσταση σε ολίσθηση αυξανόμενης της ταχύτητας κίνησης του οχήματος και μπορεί να έχει τις παρακάτω μορφές (Εικόνα 3.19) China and James 2012, Khasawneh 2016, Khasawneh et al. 2016):

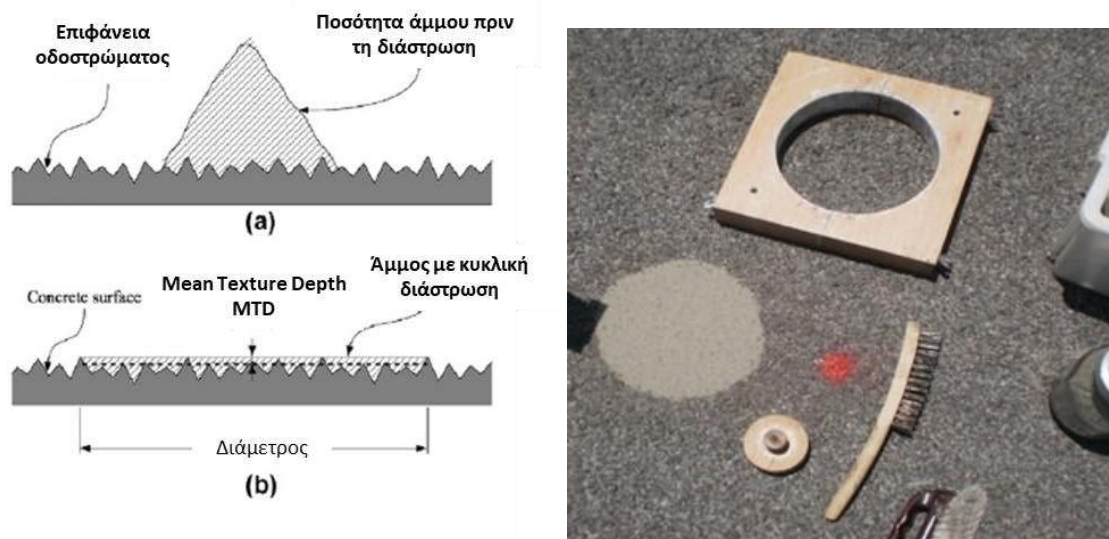
- Θετική υφή, η οποία διαμορφώνεται από τους κόκκους των αδρανών που προεξέχουν από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Αρνητική υφή, η οποία διαμορφώνεται όταν η υφή ενός υλικού κατά ένα μεγάλο ποσοστό εμπεριέχει κενά μεταξύ των κόκκων, των οποίων οι άνω επιφάνειες διαμορφώνουν την επίπεδη επιφάνεια κύλισης του οδοστρώματος.



Εικόνα 3.20: Θετική και αρνητική υφή

Η βασική μέθοδος μέτρησης της μακροϋφής είναι η «κηλίδα της άμμου» που είναι γνωστή διεθνώς με τον όρο – sand patch. Πρόκειται για μια στατική μέθοδο που παρέχει σημειακή πληροφόρηση για το επίπεδο μακροϋφής μίας επιφάνειας οδοστρώματος. Ο χαρακτηριστικός δείκτης μέτρησης με αυτή τη μέθοδο είναι το μέσο βάθος υφής (MTD - Mean Texture Depth) (Losa et al. 2008, Medeiros 2016, Plati et al. 2017a, Plati et al. 2019).

Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται στο πρότυπο ASTM E965 (2009) και αποτελεί τη μέθοδο αναφοράς σε πολλές χώρες διεθνώς, με βάση την οποία έχουν διαμορφωθεί προδιαγραφές τόσο για τον έλεγχο ποιότητας ενός οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του, όσο και στο πλαίσιο επιτελεστικότητας που αφορά στη λειτουργία του (Sengoz et al. 2012, Fisco and Sezen 2013, Yaacob et al. 2014, Pratico and Vaiana 2015).



Εικόνα 3.21: Μέθοδος μέτρησης μακροϋφής «κηλίδα της άμμου»

Η δοκιμή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας γνωστή ποσότητα άμμου συγκεκριμένης διαβάθμισης η οποία περιχύνεται στην επιφάνεια και στην συνέχεια διαστρώνεται σε κυκλική μορφή (Εικόνα 3.20). Στην συνέχεια γίνεται μέτρηση της διαμέτρου του κύκλου που έχει διαμορφωθεί. Στην πραγματικότητα, ο διαμορφωμένος κυκλικός δίσκος δεν έχει σταθερή διάμετρο, οπότε η διάμετρος μετράται αρκετές φορές και λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος των μετρημένων διαμέτρων. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του δείκτη MTD γίνεται μέσω της εξίσωσης, όπου μέσο βάθος υφής υπολογίζεται ως το πηλίκο του όγκου του υλικού διάστρωσης προς το εμβαδόν της επιφάνειας διάστρωσης (Flintsch et al. 2003, Kim et al. 2013, Fisco and Sezen 2013, ASTM E965 2015).

$$MTD=4*V/\pi*D^2 \quad (3.6)$$

όπου:

V ο όγκος του υλικού διάστρωσης σε mm<sup>3</sup> και

D ο μέσος όρος της διαμέτρου της περιοχής που καλύφθηκε από το υλικό σε mm.

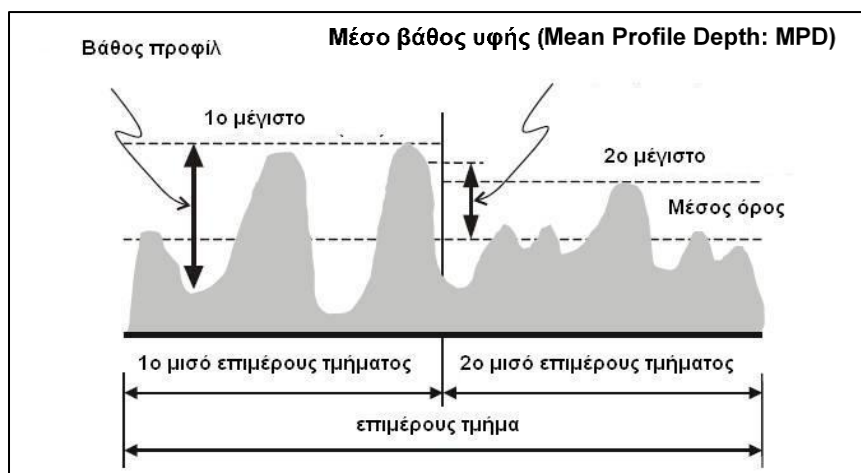
Ωστόσο, ιδιαίτερα διαδεδομένα είναι τα συστήματα ταχείας και συνεχούς προφίλομέτρησης μέσω συστήματος λέιζερ – Laser Profiler system (Εικόνα 3.21). Ο χαρακτηριστικός δείκτης μέτρησης με τον οποίο

προσδιορίζεται η μακροϋφή με την εν λόγω μέθοδο είναι το μέσο βάθος προφίλ - Mean Profile Depth (MPD) (Losa et al. 2007, ASTM E1845-09 2015, Meegoda and Gao 2015, Pratico and Vaiana 2015, Plati et al. 2017a). Το σύστημα Laser Profiler συλλέγει εν κινήσει στοιχεία μακροϋφής, τα οποία αποθηκεύονται μέσω κατάλληλου λογισμικού προς επεξεργασία σε επόμενο στάδιο. Για παράδειγμα για την περίπτωση του συστήματος Laser Profiler της εταιρίας Dynatest, η μονάδα συλλογής στοιχείων βρίσκεται στο εσωτερικό μίας δοκού, η οποία έχει μήκος 3.2 m και φέρει εσωτερικά επτά ενσωματωμένους ηλεκτρονικούς αισθητήρες (lasers) και δύο επιταχυνσιόμετρα. Η δοκός προσαρμόζεται κατάλληλα στο εμπρόσθιο μέρος διαμορφωμένου οχήματος τύπου βαν, ώστε οι αισθητήρες να βρίσκονται σε μια επίπεδη επιφάνεια προστατευμένοι κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων (Dynatest 2007).



Εικόνα 3.22: Μέθοδος μέτρησης μακροϋφής με το σύστημα Laser Profiler

Η αρχή μέτρησής τους βασίζεται στο πρότυπο ASTM E1845 (2015). Συγκεκριμένα, ο δείκτης MPD προκύπτει ως εξής: το υπό διερεύνηση προφίλ χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα μήκους 100 mm. Στη συνέχεια το κάθε επιμέρους τμήμα χωρίζεται στη μέση και υπολογίζεται το ύψος του μεγαλύτερου μέγιστου σε κάθε μισό του επιμέρους τμήματος. Τα μέγιστα υπολογίζονται σε σχέση με ένα προκαθορισμένο μηδενικό μέσο προφίλ (η περιοχή πάνω από το ύψος αναφοράς είναι ίση με την περιοχή κάτω από αυτό) (China and James 2012b, Plati et al. 2017a).

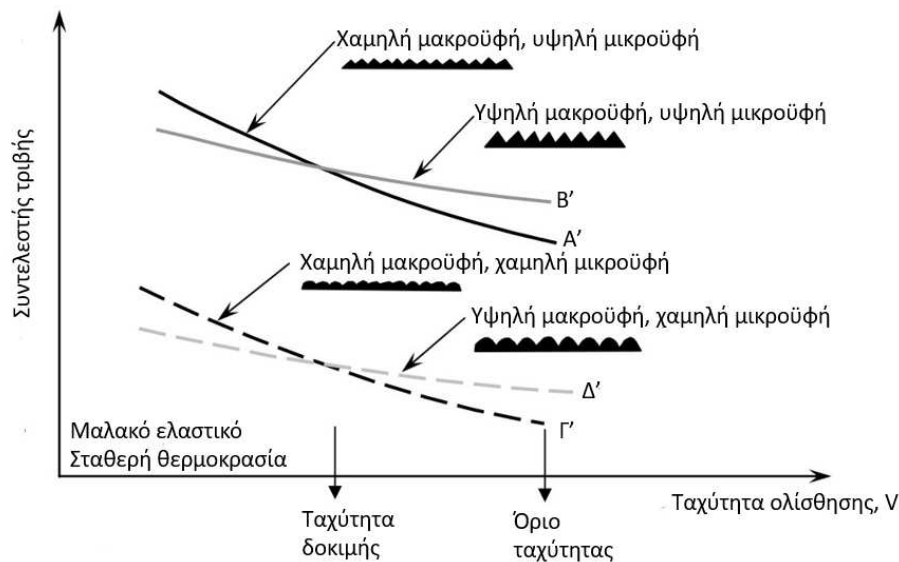


Εικόνα 3.23: Υπολογισμός δείκτη MPD (ASTM E1845-15 2015)



Όπως προκύπτει από τη γραφική απεικόνιση της Εικόνας 3.23, ο δείκτης MPD υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των μέσων όρων των μεγίστων του κάθε επιμέρους τμήματος (ASTM E1845-15 2015). Ουσιαστικά, το σύστημα μετρά τη μέση υψομετρική διαφορά του βάθους υψής, παρέχοντας συνεχείς μετρήσεις-καταγραφές μακροϋψής για όλο το μήκος μίας οδού.

Συνολικά, όσον αφορά στην επίδραση της μικροϋψής και της μακροϋψής στην αντιολισθητική ικανότητα, το διάγραμμα της Εικόνας 3.24 απεικονίζει τις σχετικές επιδράσεις συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος.



**Εικόνα 3.24:** Σχέση μακροϋψής και μικροϋψής με την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος για διαφορετικές ταχύτητες ολίσθησης (Flintsch et al. 2003)

Από την Εικόνα 3.24 διαφαίνεται ότι η μικροϋψή επηρεάζει την τιμή του συντελεστή τριβής, ενώ η μακροϋψή επηρεάζει την κλίση της καμπύλης, δηλαδή την ταχύτητα ολίσθησης. Σε χαμηλές ταχύτητες, η συνεισφορά της μικροϋψής είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο για υγρές, όσο και για ξηρές συνθήκες. Σε υψηλότερες ταχύτητες, η υψηλή τιμή μακροϋψής οδηγεί σε μεγαλύτερο συντελεστή τριβής (καμπύλη B' & Δ') καθώς βοηθά στην αποστράγγιση του νερού από την επιφάνεια του οδοστρώματος (Hall et al. 2009).

Επίσης, σημειώνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μικρο και μακροϋψή του οδοστρώματος σχετίζονται άμεσα με τα παρακάτω (Wambold et al. 1995, Hall et al. 2009, Rasmussen 2013, Kane et al. 2014, Wang et al. 2017, Kouchaki et al. 2018, Wesolowski and Blacha 2019):

- Τις μέγιστες διαστάσεις των αδρανών. Τα μεγέθη των μεγαλύτερων αδρανών του ασφαλτομίγματος, παρέχουν το βασικό μήκος κύματος για τη μακροϋψή.
- Τον τύπο των χονδρόκοκκων αδρανών. Η επιλογή κατάλληλου τύπου χονδρόκοκκων αδρανών αποτελεί βασικό παράγοντα για το ασφαλτόμιγμα καθώς έτσι μπορεί να ελεγχθεί η ποιότητα των αδρανών, η αδρότητα, το σχήμα και η αντοχή τους.
- Τον τύπο των λεπτόκοκκων αδρανών. Το γωνιώδες και η ανθεκτικότητα των λεπτόκοκκων αδρανών αποτελούν βασικά στοιχεία για την επιλογή των λεπτόκοκκων αδρανών του ασφαλτομίγματος.

- Το ιξώδες και η περιεκτικότητα της ασφάλτου στο μίγμα. Η μαλακή ασφαλτος με χαμηλό ιξώδες τείνει να αναδυθεί (*asphalt bleeding*) πιο εύκολα από μία πιο σκληρή ποιότητα ασφάλτου. Αν και η υπερβολική ποσότητα ασφάλτου ανεξάρτητα από τη σκληρότητά της μπορεί να οδηγήσει στην ανάδυσή της στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις προκαλείται μείωση ή ολική απώλεια της μικροϋφής και της μακροϋφής. Όμως, επειδή η ασφαλτος ως συνδετικό υλικό συγκρατεί τα αδρανή, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρεί τις ιδιότητες της τόσο τους χειμερινούς όσο και τους καλοκαιρινούς μήνες όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος.
- Την κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος. Ιδιαίτερα, για την περίπτωση των πορώδων οδοστρωμάτων, επηρεάζει τη σταθερότητα και το ποσοστό κενών αέρα στο οδόστρωμα.
- Το βαθμό συμπίκνωσης του ασφαλτομίγματος, δηλαδή το ποσοστό των κενών αέρα στο ασφαλτόμιγμα. Τα αυξημένα ποσοστά κενών αέρα παρέχουν αυξημένη αποστραγγιστική ικανότητα και μεγαλύτερη τριβή μεταξύ του πέλματος του ελαστικού και της επιφάνειας των αδρανών.
- Το πάχος της ασφαλικής στρώσης. Σε μια ασφαλική στρώση με μεγάλο πάχος χρειάζεται περισσότερος χρόνος για την αποστράγγιση του νερού.
- Η ομαλότητα της επιφανειακή στρώσης. Η έλλειψη ομαλότητας μία επιφάνειας οδοστρώματος συνήθως συνεπάγεται και με χαμηλά επίπεδα επιφανειακής υφής ή/και την αποκόλληση των επιφανειακών αδρανών.
- Το είδος της μακροϋφής. Συγκεκριμένα, η θετική μακροϋφή επηρεάζεται από τον αριθμό των κορυφών πάνω από τη νοητή επιφάνεια αναφοράς, δηλαδή από τις προεξοχές των αδρανών. Η αρνητική μακροϋφή επηρεάζεται από την επιφάνεια των αδρανών που βρίσκονται κάτω από αυτή τη νοητή γραμμή, δηλαδή τις εσοχές των αδρανών.

### 3.4.3 Λειτουργικές παράμετροι οχήματος και ιδιότητες ελαστικών

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος και την δύναμη πέδησης που μπορεί να αναπτύξει το κινούμενο όχημα. Οι συγκεκριμένες παράμετροι κατατάσσονται στις λειτουργικές παραμέτρους. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο κατά τη περιγραφή των δυνάμεων πέδησης, το κλείδωμα – ακινητοποίηση του τροχού διαφέρει από όχημα σε όχημα και καθορίζεται από τον κατασκευαστή (Hall et al. 2009).

Εκτός όμως από τις λειτουργικές παραμέτρους των οχημάτων που συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του οχήματος (τύπος, κατασκευαστής κ), πολύ σημαντικά στοιχεία αποτελούν και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών καθώς είναι και εκείνα που παρέχουν τα βασικά χαρακτηριστικά στις συνθήκες πέδησης (Kane and Scharnigg 2009, Kogbara et al. 2016). Όσον αφορά στις ιδιότητες των ελαστικών, η υφή του πέλματος (το σχήμα, το ύψος και το βάθος των αυλακώσεων) και η κατάστασή τους (επίπεδο φθοράς, παλαιότητα) είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την απομάκρυνση του νερού από την επιφάνεια του οδοστρώματος μέσω των αυλακώσεων του πέλματος (Εικόνα 3.25). Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει ένα σύστημα κατάταξης των ελαστικών (*tyre labelling*) με στόχο την βελτίωση της οδικής ασφάλειας και της καθαρής κινητικότητας (European Commission, 2019).



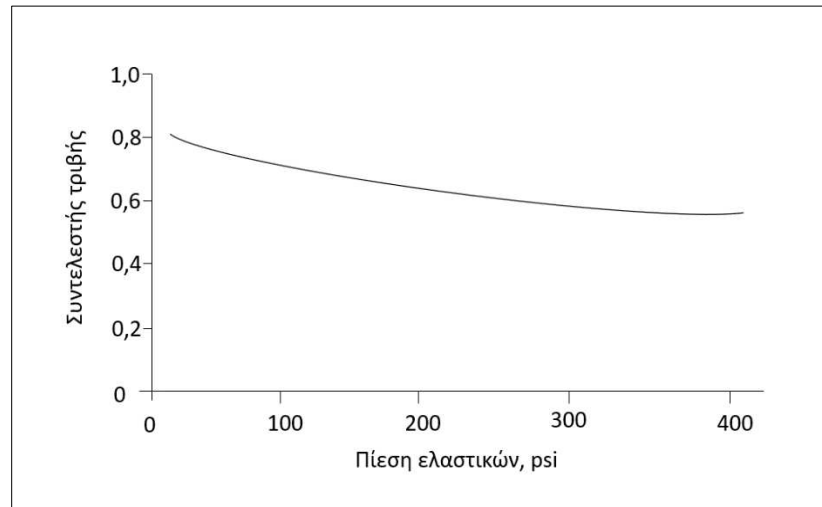
*Εικόνα 3.25: Πέλματα ελαστικών με διαφορετική υφή*

Συγκεκριμένα, το νερό που παγιδεύεται μεταξύ του οδοστρώματος και του ελαστικού μπορεί να απομακρυνθεί μέσω των αυλακώσεων και έτσι να ευνοηθεί η επαφή των δύο στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη της πρόσφυσης και της υστέρησης, ώστε σε περίπτωση πέδησης να υπάρχει επαρκής αντιολισθητική ικανότητα (Mohammad and Kassem 2017).

Ιδίως, το βάθος των αυλακώσεων του ελαστικού είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες και διαπερνούν στάσιμα νερά. Σε ορισμένες έρευνες αναφέρεται ότι η μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας υπό υγρές συνθήκες μπορεί να κυμαίνεται από 45% έως 70% για τα πλήρως φθαρμένα ελαστικά, σε σύγκριση με τα νέα (Hill and Henry 1981).

Επιπλέον, η πίεση των ελαστικών, δηλαδή ο αέρας στο εσωτερικό τους, αποτελεί έναν βασικό παράγοντα καθώς μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα σε υψηλές ταχύτητες. Συγκεκριμένα, τα ελαστικά που δεν είναι επαρκώς φουσκωμένα επιτρέπουν στο κέντρο του πέλματος να συμπυκνωθεί και να γίνει αρκετά κοίλο με αποτέλεσμα τη συστολή των αυλακώσεων αποστράγγισης και ως εκ τούτου, τη μείωση της πίεσης επαφής. Η εν λόγω κατάσταση έχει σαν αποτέλεσμα το ελαστικό να παγιδεύει το νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος και να εμποδίζεται η ροή μέσα από τις αυλακώσεις του (Hall et al. 2009). Αντίθετα, τα υπερβολικά φουσκωμένα ελαστικά προκαλούν μια μικρή απώλεια στην αντιολισθητική ικανότητα, αν και μειώνουν το φαινόμενο παγίδευσης νερού στην επιφάνεια, οδηγούν στην ανάπτυξη υψηλότερης πίεσης, πιέζοντας ουσιαστικά εντονότερα το νερό ώστε να διαφύγει εκατέρωθεν του ελαστικού. Όμως, η αυξημένη πίεση των ελαστικών οδηγεί σε μικρότερη περιοχή επαφής μεταξύ του πέλματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος, κατά συνέπεια οι δυνάμεις υστέρησης και πρόσφυσης δεν μπορούν να αναπτυχθούν σωστά (Hall et al. 2009).

Η επίδραση της πίεσης των ελαστικών στην αντιολισθητική ικανότητα φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.26. Παρατηρείται ότι καθώς η πίεση των ελαστικών αυξάνεται, ο συντελεστής τριβής δεν παρουσιάζει σημαντική μείωση (Rizenbergs 1968).

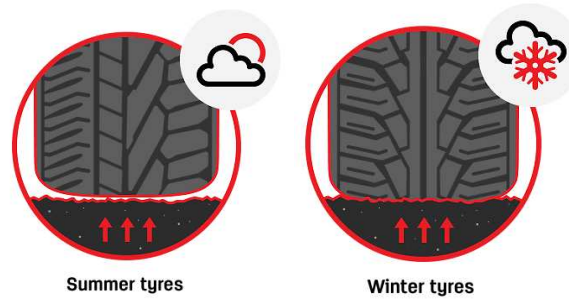


**Εικόνα 3.26:** Σχέση πίεσης ελαστικών και συντελεστή τριβής (Rizenbergs 1968)

Επίσης, η θερμοκρασία των ελαστικών αποτελεί βασικό παράγοντα που επιδρά στις ιδιότητες τους κατά την επαφή τους με το οδόστρωμα. Μέσα από σχετικές έρευνες έχει προκύψει ότι ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος για την περίπτωση υψηλότερων θερμοκρασιών. Μερικοί παράγοντες που επιδρούν σε αυτή τη συμπεριφορά αναφέρονται ακολούθως:

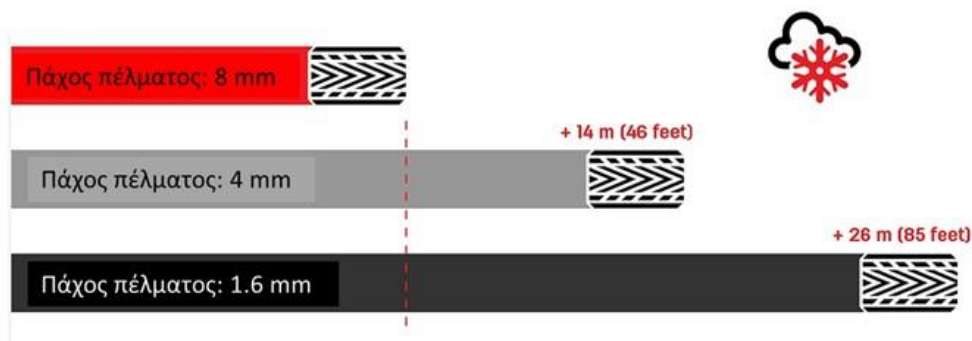
- *Μεταβολή στις ιδιότητες του ελαστικού: Η αναμενόμενη θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την πέδηση είναι μεταξύ 93°C και 200°C στις περιπτώσεις ξηρών συνθηκών (Choi 2011). Σε αυτήν την περίπτωση οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ελαστικών (μέτρο ελαστικότητας και γωνία υστέρησης) επηρεάζονται άμεσα από τις θερμοκρασιακές μεταβολές στο εύρος των προαναφερθέντων θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, σε θερμό θερμοκρασιακό περιβάλλον, το ελαστικό γίνεται πιο μαλακό και μειώνεται η συνεισφορά υστέρησης με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται πιο εύκολα.*
- *Θερμοδυναμικές ιδιότητες επιφάνειας οδοστρώματος. Κατά την πέδηση, η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε άλλες μορφές όπως είναι η θερμότητα και ο θόρυβος. Οι McDonald et al. (2006) αναφέρουν ότι η θερμότητα που αναπτύσσεται στη διεπαφή ελαστικού οδοστρώματος διασκορπίζεται ευκολότερα στην περίπτωση ψυχρής επιφάνειας οδοστρώματος από μία θερμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται ο συντελεστής τριβής και κατ' επέκταση η παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα (δεδομένου σταθερών των άλλων παραγόντων που επιδρούν).*

Χαρακτηριστικό επίσης της σημασίας των ιδιοτήτων των ελαστικών στην αντιολισθητική ικανότητα, αποτελεί η ύπαρξη νομοθετικών πλαισίων σε διάφορες χώρες παγκοσμίως για την διαφοροποίηση του τύπου των ελαστικών για τους χειμερινούς από τους καλοκαιρινούς μήνες (Εικόνα 3.27).



Εικόνα 3.27: Διαφοροποίηση μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών ελαστικών

Συγκεκριμένα, τα χειμερινά ελαστικά έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε φυσικό καουτσούκ. Έτσι, διατηρούνται εύπλαστα σε συνθήκες ψύχους και δεν σκληραίνουν τόσο όσο τα ελαστικά που χρησιμοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες. Επίσης, στο πέλμα τους υπάρχουν χιλιάδες μικροσκοπικές αυλακώσεις που επιτρέπουν τη διαφυγή νερού και μειώνουν τις πιθανότητες υδρολίσθησης. Τέλος, χάρη στο στενό πέλμα που διαθέτουν, ευνοείται η κίνηση σε χιονισμένους ή παγωμένους δρόμους καθώς το χιόνι λειτουργεί σαν μοχλός πίεσης βοηθώντας έτσι την περιστροφή των τροχών. Ωστόσο, τα χειμερινά ελαστικά παρουσιάζουν ευαισθησία αναφορικά με το πάχος τους το οποίο συνδέεται με το απαιτούμενο μήκος πέδησης (Εικόνα 3.28). Συγκεκριμένα, το ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος πέλματος (texture depth) για επαρκή πέδηση είναι 4 mm.



Εικόνα 3.28: Μήκος πέδησης για την περίπτωση χειμερινών ελαστικών αναφορικά με το πάχος πέλματος (ταχύτητα κίνησης 50km/h σε χιονισμένη επιφάνεια οδοστρώματος -Test conditions: 205/55 R16 91H, ContiWinterContact™ TS 830, VW Golf V) (Continental Reifen Deutschland GmbH, 2013)

Αντίθετα, τα καλοκαιρινά ελαστικά παρέχουν καλύτερες-απόλυτες επιδόσεις τους θερμότερους μήνες. Έχουν μια σχετικά σκληρή ένωση που μαλακώνει σε πιο υψηλές θερμοκρασίες για να είναι σε θέση να προσαρμοστούν τόσο σε οδούς με ξηρές συνθήκες όσο και με υγρές. Επίσης, τα καλοκαιρινά ελαστικά έχουν λιγότερες αυλακώσεις στο πέλμα τους από τα χειμερινά, αλλά έχουν ειδικό σχεδιασμό ώστε να ελαχιστοποιείται η υδρολίσθηση. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ιδιότητά τους να παρέχουν μεγαλύτερη πρόσφυση σε υψηλές θερμοκρασίες, τόσο διαμήκως όσο και πλευρικά, εξασφαλίζοντας μεγάλη πρόσφυση στους υγρούς και ξηρούς δρόμους.

Αν και τα καλοκαιρινά ελαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες καιρικές συνθήκες, δεν είναι κατάλληλα για ψυχρότερα κλίματα, καθώς έχουν σκληρότερο πέλμα με λιγότερο καουτσούκ από τα χειμερινά ελαστικά το οποίο σκληραίνει κάτω από +7 βαθμούς °C και μπορεί να γίνει εύθραυστο. Συνεπώς, έχουν σχεδιαστεί για να προσαρμόζονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς να μαλακώσουν. Αυτό σημαίνει ότι τα καλοκαιρινά ελαστικά έχουν χαμηλότερη τριβή και κατ' επέκταση είναι πιο αποδοτικά από πλευράς κατανάλωσης καυσίμων. Τέλος, τα καλοκαιρινά ελαστικά τείνουν να έχουν πιο πλατύ πέλμα σε σχέση με τα χειμερινά. Αυτό εξασφαλίζει άριστο χειρισμό και έχει τεράστιο αντίκτυπο στην απόσταση φρεναρίσματος.

### 3.4.4 Καιρικές συνθήκες

#### 3.4.4.1 Γενικά

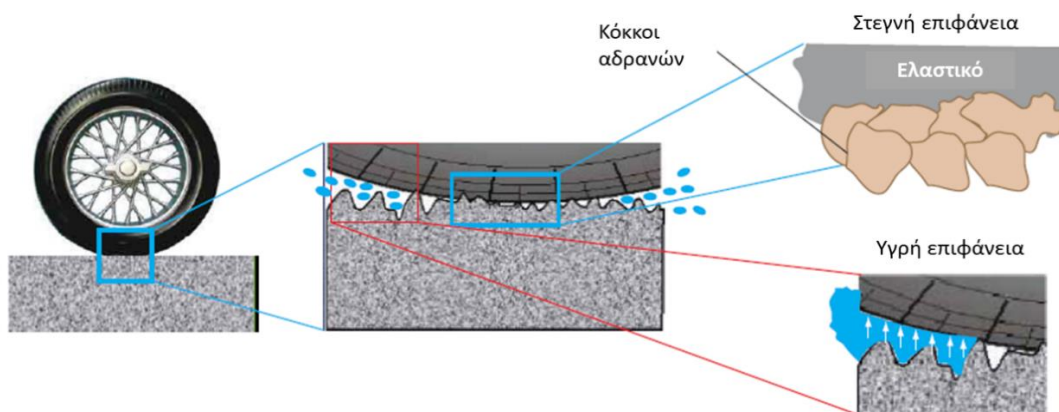
Εκτός από τους προαναφερόμενους παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα, ιδιαίτερα σημαντική είναι και η επίδραση των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή που βρίσκεται ένα οδικό έργο (Mitchell 2014, Hichri et al. 2017). Για το αυτό το λόγο, η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων έναντι άλλων χαρακτηριστικών τους αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευμετάβλητο και ευαίσθητο στο περιβάλλον της οδού χαρακτηριστικό. Στο συγκεκριμένο εδάφιο περιγράφονται οι συνθήκες, που συνδέονται με αντίστοιχα καιρικά φαινόμενα, τα οποία μεμονωμένα ή συνδυαστικά επηρεάζουν τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας. Η συνδυαστική επίδρασή τους περιγράφεται συνήθως με τον όρο εποχιακή διακύμανση της αντιολισθητικής ικανότητας και αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα που απασχολεί διεθνώς τους φορείς διαχείρισης οδοστρωμάτων. Οι βασικοί παράγοντες που θα αναλυθούν είναι οι εξής:

- Το ύψος νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος
- και η αποστραγγιστική ικανότητά της,
- τα κατάλοιπα στην επιφάνεια,
- η θερμοκρασία και
- οι εποχιακές και βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις.

#### 3.4.4.2 Ύψος νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος

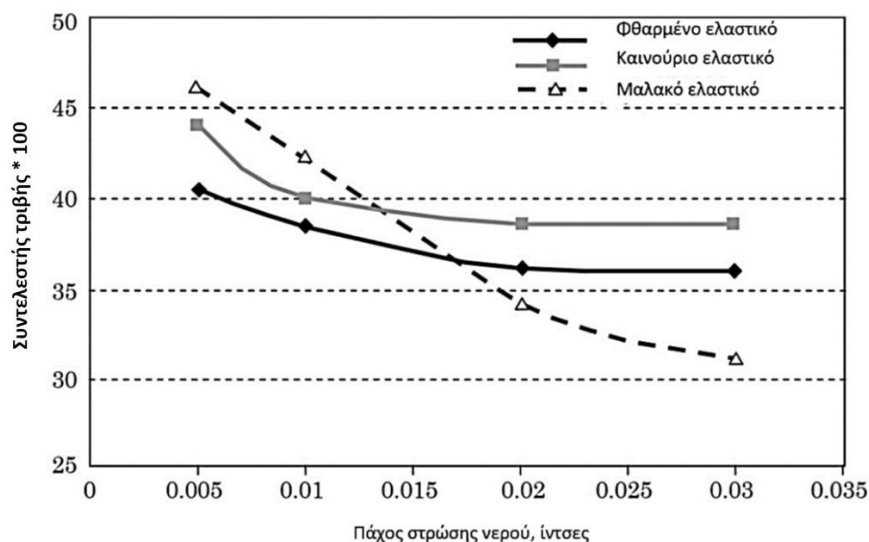
Το νερό μπορεί να λειτουργήσει σαν λιπαντικό όταν παρεμβάλλεται στην επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος. Έτσι, μειώνεται σημαντικά η παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας μίας οδού. Ωστόσο, το ύψος νερού αποτελεί βασική παράμετρο αναφορικά με τη λειτουργία του ως λιπαντικό. Συγκεκριμένα, το ύψος του «φιλμ» νερού που δημιουργείται στην επιφάνεια του

οδοστρώματος και καλύπτει ουσιαστικά τα προεξέχοντα αδρανή, επηρεάζει άμεσα τις συνιστώσες της αντιολισθητικής ικανότητας – μικρο και μακροϋφή (Εικόνα 3.29) (Wilson 2006, Do et al. 2013a, Bijsterveld and del Val Miguel 2016)



Εικόνα 3.29: «Φιλμ» νερού κατά την επαφή ελαστικού - οδοστρώματος

Η επίδραση του πάχους της στρώσης νερού (φιλμ) στην αντιολισθητική ικανότητα θεωρείται αμελητέα για την περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων κίνησης (<30 km/h), αλλά είναι αρκετά σημαντική σε υψηλότερες ταχύτητες (> 60 km/h). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.30, ο συντελεστής τριβής που αναπτύσσεται σε μια υγρή επιφάνεια οδοστρώματος, μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται το πάχος της στρώσης νερού που παρεμβάλλεται μεταξύ του ελαστικού του οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Μάλιστα, στην περίπτωση που τα ελαστικά του οχήματος είναι φθαρμένα, η επίδραση του πάχους της στρώσης νερού είναι μεγαλύτερη (Hall et al. 2009).



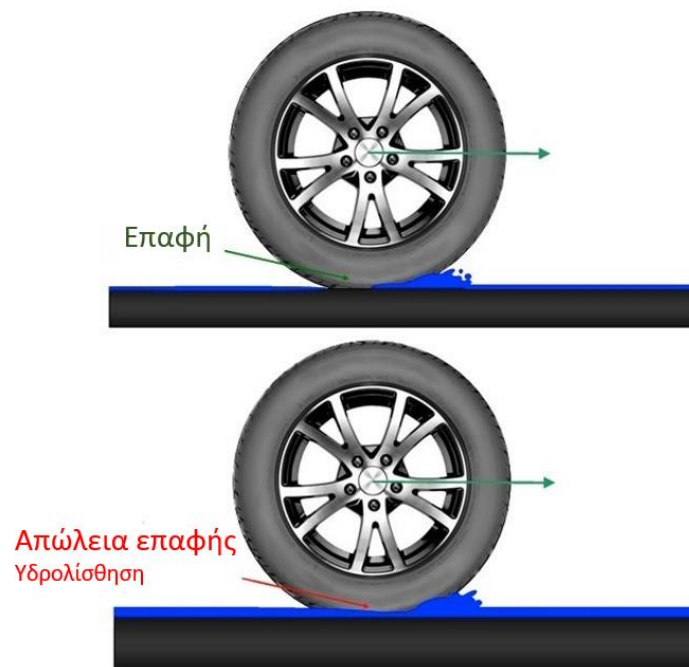
Εικόνα 3.30: Επίδραση του νερού στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Henry 2000)

Επίσης, έχει αναφερθεί ότι μια πολύ μικρή ποσότητα νερού μπορεί να μειώσει σημαντικά την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των δοκιμών της βασικής



έρευνας των Harwood et al. (1987) έδειξαν ότι έδειξαν ότι μόλις ένα φιλμ νερού πάχους 0.05mm στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι δυνατόν να μειώσει την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα κατά 20% έως 30% έναντι της αντιολισθητικής ικανότητας υπό ξηρές συνθήκες. Σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και μια μικρότερη ποσότητα νερού όπως 0,025mm μπορεί να μειώσει σημαντικά την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα, κάτι που είναι εξαιρετικά πιθανό να συμβεί κατά τη διάρκεια μιας σύντομης βροχόπτωσης (Hall et al. 2009).

Η ύπαρξη νερού μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας οδοστρώματος, οδηγεί και στην εμφάνιση του φαινομένου της υδρολίσθησης που είναι γνωστή διεθνώς με τον όρο hydroplaning ή aquaplaning και αποτελεί μία πολύ βασική αιτία πρόκλησης οδικών ατυχημάτων (Do et al. 2014b, Fwa 2017, Kane 2021). Η υδρολίσθηση μπορεί να αναπτυχθεί στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλης στρώσης νερού και κατά την κίνηση των οχημάτων με υψηλές ταχύτητες. Ουσιαστικά, η υδρολίσθηση συμβαίνει όταν το ελαστικό του οχήματος ανυψώνεται και χάνεται η επαφή του με την επιφάνεια του οδοστρώματος, λόγω της πίεσης του νερού που συσσωρεύεται μεταξύ της επιφάνειας και του πέλματος των ελαστικών (Cerezo et al. 2013). Ειδικά, πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο που επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους όπως: το πάχος της στρώσης νερού, την ταχύτητα του οχήματος, τις μικρο και μακροϋφή του οδοστρώματος, το βάθος αυλακώσεων της επιφάνειας ελαστικού, την πίεση του ελαστικού και την επιφάνεια επαφής των ελαστικών (Hall et al. 2009, Zhu et al. 2017). Στην Εικόνα 3.31 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της υδρολίσθησης.



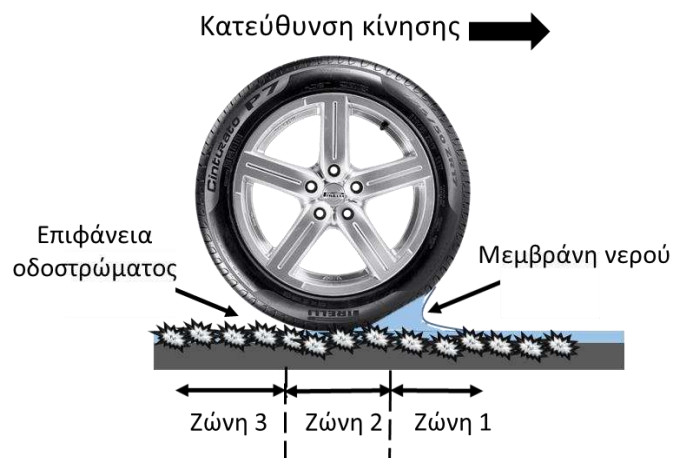
Εικόνα 3.31: Το φαινόμενο της υδρολίσθησης

Πιο αναλυτικά, όταν ένα στρώμα νερού 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. Το φαινόμενο της υδρολίσθησης είναι πιθανότερο να συμβεί στην περίπτωση που ένα όχημα κινείται επί υγρής επιφάνειας με ταχύτητα για την οποία ο χρόνος που διατίθεται ώστε τα ελαστικά να απομακρύνουν το



νερό από τη διεπαφή μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος, δεν επαρκεί. Συνεπώς, χάνεται η επαφή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος και κατ' επέκταση η δυνατότητα πρόσφυσης στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Davis 2006). Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται και η ποσότητα νερού που συσσωρεύεται στο κέντρο του ελαστικού, ώσπου η επαφή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος γίνεται αμελητέα και εμφανίζεται πλήρης υδρολίσηση. Οι συνθήκες όπου το ελαστικό αρχίζει να χάνει επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος αναφέρονται ως μερική υδρολίσηση και μπορεί να συμβεί και σε χαμηλές ταχύτητες (Wilson 2006). Στις περιπτώσεις χαμηλής ταχύτητας κίνησης (<70km/h), η υδρολίσηση είναι πιθανότερο να συμβεί όταν το οδόστρωμα έχει χαμηλή αποστραγγιστική ικανότητα, παρουσιάζει φθορές όπως λακούβες ή κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων με ισχυρές βροχοπτώσεις (Cerezo et al. 2013, Hichri et al. 2017). Επίσης, η εκτενής εμφάνιση τροχοαυλακώσεων σε ένα οδόστρωμα επιτρέπει την συσσώρευση νερού στις αυλακώσεις. Συνεπώς, εντείνεται ο κίνδυνος υδρολίσησης των τροχών των κινούμενων οχημάτων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση εισχώρησης του ελαστικού σε αυλακώσεις που περιέχουν νερό, το ελαστικό δεν μπορεί να έρθει σε άμεση επαφή με το οδόστρωμα εξαιτίας της ύπαρξης του «φιλμ» νερού.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μείωση του φαινομένου της υδρολίσησης έχει η μικροϋφή και η μακροϋφή του οδοστρώματος. Σε οδοστρώματα που εμφανίζουν καλή μακροϋφή και τα χαρακτηριστικά του πέλματος των ελαστικών είναι σε πολύ καλό επίπεδο, η επίδραση της υδρολίσησης είναι μειωμένη και συμβαίνει κυρίως στην περίπτωση που κάποια φθορά του οδοστρώματος επιτρέψει σημαντική συσσώρευση νερού. Όταν η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι υγρή, οι ιδιότητες της επιφανειακής τάσης του νερού δημιουργούν μία μεμβράνη νερού στο οδόστρωμα μειώνοντας την επαφή μεταξύ του ελαστικού και των αδρανών. Αυτή η μεμβράνη νερού σχηματίζεται πιο εύκολα σε ομαλή επιφάνεια με χαμηλό επίπεδο μικροϋφής και μακροϋφής. Σε ένα οδόστρωμα με καλή μακροϋφή η οποία παρέχει συνήθως και καλή αποστραγγιστική ικανότητα δεν δημιουργείται εύκολα η μεμβράνη νερού και επιπλέον, η καλή μικροϋφή βοηθάει στο «σπάσιμο» αυτής της μεμβράνης από τις γωνιώδεις αιχμές των αδρανών (Do et al. 2013a, Hichri et al. 2017). Στην Εικόνα 3.32 παρουσιάζεται η θεώρηση των τριών βασικών ζωνών της επαφής ελαστικού με την υγρή επιφάνεια οδοστρώματος.



Εικόνα 3.32: Κρίσιμες ζώνες για την εμφάνιση της υδρολίσησης

Συγκεκριμένα, στη ζώνη 1 (πρώτη επαφή) ξεκινάει η δημιουργία της μεμβράνης νερού. Στη ζώνη 2 (μεταβατική επαφή), το νερό διασκορπίζεται καθώς η μεμβράνη σπάει από τις αιχμές των αδρανών που έρχονται σε επαφή με το πέλμα του ελαστικού. Συνεπώς, η συμβολή της μικροϋφής στη ζώνη 2 είναι

ιδιαίτερα σημαντική ώστε τα αδρανή να έρθουν σε επαφή με το ελαστικό και μέσω της δύναμης έλξης που δημιουργείται να αποφευχθεί ο σχηματισμός της μεμβράνης νερού που θα οδηγήσει σε απώλεια επαφής και υδρολίσηση. Στη ζώνη 3 (ελκτική επαφή), το νερό έχει απομακρυνθεί από την πίεση του ελαστικού λόγω των δυνάμεων έλξης, τόσο πλευρικά όσο και εντός των κενών της επιφάνειας του οδοστρώματος. Για την επάρκεια των χαρακτηριστικών της ζώνης 3, εκτός από τη συμπεριφορά των ελαστικών, καθοριστική είναι και η μακροϋφή που παρέχει την κατάλληλη αποστραγγιστική ικανότητα ώστε να διαφύγει το νερό και να μην συσσωρευτεί στην επιφάνεια. Επίσης, έχει καταγραφεί ότι μία αύξηση της ταχύτητας από 50 km/h σε 100 km/h μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της τάξης του 30%-70% στην έλξη που αναπτύσσεται στη ζώνη 3 (Kokkalis and Panagouli 1998).

Η υδρολίσηση επίσης μπορεί να διαχωριστεί στις δύο παρακάτω μορφές:

- *Την ιξώδη υδρολίσηση: Συμβαίνει κυρίως στις μικρές ταχύτητες όπου η μακροϋφή είναι χαμηλή. Ακόμα και με την ύπαρξη ελάχιστης ποσότητας νερού το οποίο εγκλωβίζεται κάτω από το πέλμα των ελαστικών μπορεί να προκληθεί αυτό το είδος υδρολίσησης, ιδιαίτερα, κατά την πέδηση του οχήματος όταν τα ελαστικά είναι φθαρμένα.*
- *Τη δυναμική υδρολίσηση: Συμβαίνει κυρίως στην περίπτωση που το όχημα έχει υπερβεί την κρίσιμη ταχύτητα και το φιλμ νερού μπορεί να εισέλθει ατάκτως κάτω από το πέλμα εμποδίζοντας την επαφή ελαστικού-οδοστρώματος. Σε κατάσταση πλήρους δυναμικής υδρολίσησης δεν υπάρχει καμία επαφή μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος και ο τροχός κλειδώνεται. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει ο οδηγός του οχήματος να μειώσει σημαντικά την ταχύτητα κίνησης ώστε να γίνει μικρότερη από την κρίσιμη και να ενεργοποιηθούν εκ νέου οι δυνάμεις έλξης για να πραγματοποιηθεί η μετάβαση στη ζώνη 3. Ακόμα όμως και στην περίπτωση της δυναμικής υδρολίσησης, οι δυνάμεις επιβράδυνσης που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι αρκετά σημαντικές καθώς το νερό εισέρχεται ατάκτως κάτω από τα ελαστικά.*

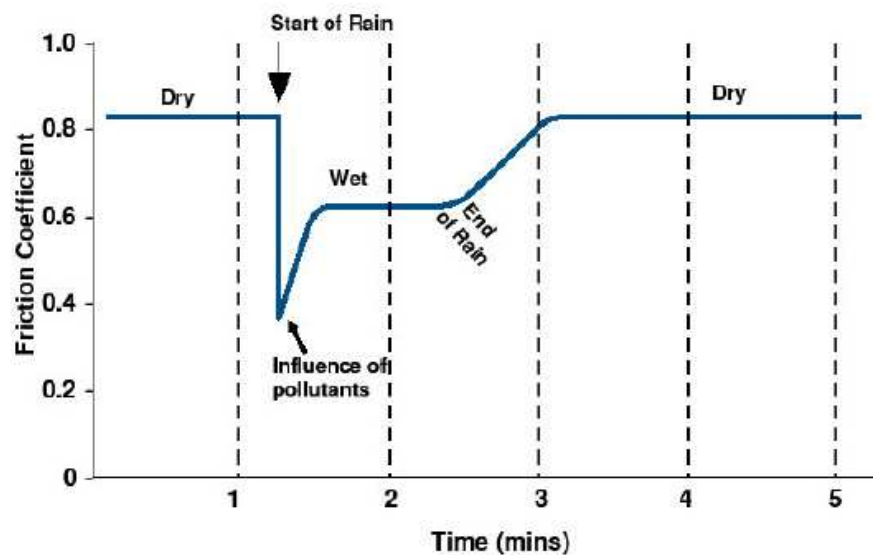
#### 3.4.4.3 Αποστραγγιστική ικανότητα

Εκτός όμως από τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος πολύ σημαντικός είναι και ο γεωμετρικός σχεδιασμός μίας οδού ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αποστραγγιστική ικανότητα. Για παράδειγμα, 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 τη μείωση της εμφάνισης της υδρολίσησης (Pavement Preservation Compendium II 2006).

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η κατάσταση του οδοστρώματος αποτελεί βασική παράμετρο για την απομάκρυνση των υδάτων από τη επιφάνειά του. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη τροχοαυλακώσεων ή τοπικών φθορών οδηγούν στη συσσώρευση υδάτων με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η άμεση επαφή ελαστικού-οδοστρώματος. Η εν λόγω περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε υδρολίσηση στα οχήματα που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες, καθώς το επιφανειακό νερό εισέρχεται ατάκτως κάτω από το πέλμα εμποδίζοντας την επαφή ελαστικού-οδοστρώματος και μειώνοντας την παρεχόμενη τριβή. Ακόμα, η συσσώρευση νερού κάτω από έναν τροχό ενός οχήματος μπορεί να οδηγήσει σε διαφορεική αντίσταση σε ολίσθηση μεταξύ των δύο αντιδιαμετρικών τροχών και να αυξήσει τις απαιτήσεις για εγκάρσια τριβή. Σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης της αντίστασης σε ολίσθηση μεταξύ των αντιδιαμετρικών τροχών, αυξάνονται οι πιθανότητες για απώλεια ελέγχου του οχήματος λόγω περιστροφής του (Wilson, 2006).

#### 3.4.4.4 Κατάλοιπα επιφάνειας (χιόνι, πάγος, λάδια κλπ.)

Τα κατάλοιπα στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος μπορεί να είναι πάσης φύσης και επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τις συνιστώσες της πρόσφυσης και της υστέρησης. Βασικά είδη κατάλοιπων που μπορούν να υπάρξουν σε μία επιφάνεια οδοστρώματος είναι: το χιόνι, ο πάγος, λάδια αυτοκινήτων, σκόνη και υπολείμματα ελαστικών (Yan et al. 2019). Το διάγραμμα της Εικόνας 3.33 απεικονίζει την επίδραση της ύπαρξης διάφορων κατάλοιπων στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται η πτώση του συντελεστή τριβής αμέσως μετά την έναρξη μίας σύντομης βροχόπτωσης και η σταδιακή αύξησή του καθώς αρχίζει η απορροή των υδάτων από την επιφάνεια. Σημαντική επίσης είναι η επίδραση των κατάλοιπων στην επιφάνεια όπως σκόνη τα οποία σε συνδυασμό με την ποσότητα νερού μιας σύντομης βροχόπτωσης σχηματίζουν μία μάζα που καλύπτει τα αδρανή και επηρεάζει την επαφή ελαστικού-οδοστρώματος.



Εικόνα 3.33: Μεταβολή του συντελεστή τριβής κατά τη διάρκεια μίας σύντομης βροχόπτωσης (Bennis and de Witt, 2003)

Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί ότι μετά το πέρας της σύντομης βροχόπτωσης και όταν η επιφάνεια γίνει και πάλι ξηρή, ο συντελεστής τριβής επανέρχεται στο ίδιο επίπεδο όπως πριν την βροχόπτωση. Κάτι που δεν συμβαίνει στην περίπτωση μιας έντονης βροχόπτωσης ή εκτεταμένης περιόδου βροχοπτώσεων. Παρακάτω αναφέρεται ειδικά η επίδραση κάποιων ειδών καταλοίπων στη μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω της ύπαρξής τους στη επιφάνεια των οδοστρώματων.

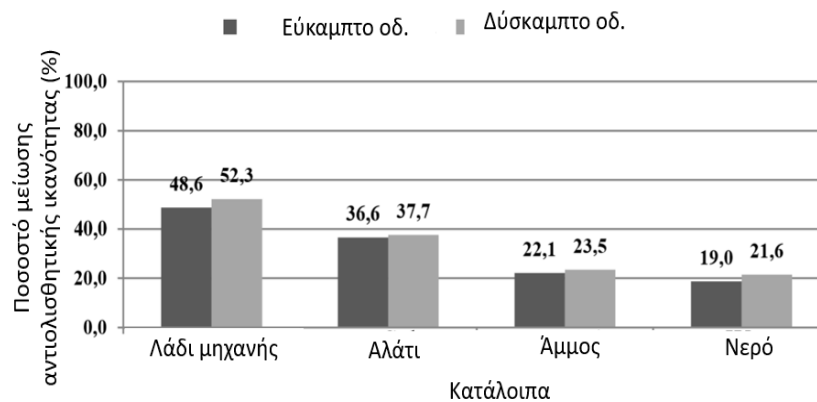
Το χιόνι και ο πάγος στην επιφάνεια του οδοστρώματος παρουσιάζουν την πιο επικίνδυνη κατάσταση για την πέδηση των οχημάτων ή την πραγματοποίηση ελιγμών. Η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος στην περίπτωση ύπαρξης χιονιού ή πάγου είναι τέτοια ώστε σχεδόν οποιαδήποτε απότομη πέδηση ή ξαφνική αλλαγή κατεύθυνσης έχει ως αποτέλεσμα την ολίσθηση του ακινητοποιημένου τροχού και την απώλεια σταθερότητας της κατεύθυνσης του οχήματος (Al Qadi et al. 2002). Συγκεκριμένα έχει υπάρξει ο εξής διαχωρισμός στις κατηγορίες ψυχρών συνθηκών που μπορούν να επηρεάσουν την αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος (Wilson 2013, Yan et al. 2019):

- Παγετός (λευκός παγετός),
- πάγος (παχύς παγωμένος πάγος, λεπτός πάγος και θρυμματισμένος πάγος) και

— χιόνι (συμπαγές ή λεπτό στρώμα χιονιού).

Η ακριβής επίδραση των παραπάνω συνθηκών στις συνιστώσες της αντιολισθητικής ικανότητας δεν έχει καταγραφεί πλήρως και δεν μπορεί να γενικευθεί για όλους τους τύπους οδοστρωμάτων. Ωστόσο, αποτελεί ιδιαίτερα χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στις χώρες με έντονες ψυχρές συνθήκες κατά τους χειμερινούς μήνες, γίνεται η χρήση αντιολισθητικών αλυσίδων για την κίνηση των οχημάτων στις οδούς. Αν και η ύπαρξη λευκού παγετού έχει καταγραφεί ως εξαιρετικά επικίνδυνη διότι δεν γίνεται πάντα αντιληπτή από τους οδηγούς. Επίσης μπορεί να προκληθεί πολύ εύκολα αν η θερμοκρασία, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας, είναι μικρότερη από 0 °C, με αποτέλεσμα την αύξηση της επικινδυνότητας για κίνηση σε μία οδό τις πρωινές ώρες (Yan et al. 2019).

Κατάλοιπα άλλης φύσεως που απαντώνται συνήθως στις οδούς είναι κυρίως σκόνη, λάδια οχημάτων, υπολείμματα λιωμένου ελαστικού, ακόμα και συγκέντρωση άλατος. Τα κατάλοιπα αυτού του τύπου που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως επιβλαβείς ουσίες που δρουν όπως το λιπαντικό μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου σε έναν κινητήρα, μειώνοντας τη δύναμη τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών. Όσο πιο παχύρρευστη είναι η συγκέντρωση αυτών των ουσιών στην επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Επίσης, κάθε είδος κατάλοιπου επηρεάζει διαφορετικά την αντιολισθητική ικανότητα για διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων (Εικόνα 3.34)



**Εικόνα 3.34:** Σύγκριση κατάλοιπων και ποσοστού μείωσης αντιολισθητικής ικανότητας (Lubis et al. 2018)

Από την Εικόνα 3.34 διαφαίνεται ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα επηρεάζονται περισσότερο από την ύπαρξη κατάλοιπων στην επιφάνεια (Lubis et al. 2018). Αυτό πιθανώς οφείλεται στον εγκλωβισμό ρύπων ή νερού στις αυλακώσεις της επιφάνειας των πλακών σκυροδέματος, το οποίο οδηγεί σε απώλεια της υψής. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκέντρωση ρύπων και σκόνης επιταχύνει το ρυθμό φθοράς της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος. Αφενός τα λάδια και τα ελαστικά επιταχύνουν τη γήρανση των υλικών, αφετέρου η συνδυαστική δράση από την επίδραση της κυκλοφορίας και της παρουσίας της σκόνης οδηγεί σε γρηγορότερη λείανση των αδρανών (Lubis et al. 2018).

#### 3.4.4.5 Θερμοκρασία

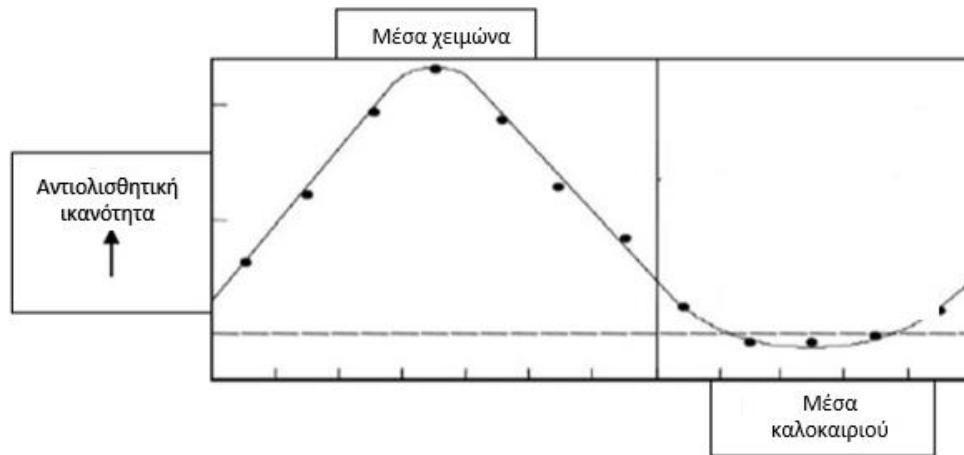
Γενικά η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν επηρεάζει τις ιδιότητες των αδρανών εκτός από την περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων συνδέεται κυρίως με τις ιδιότητες της ασφάλτου και των ελαστικών (Bianchini et al. 2011, Wang et al. 2014). Τα δύο αυτά υλικά, όντας ιζωδοελαστικά επηρεάζονται άμεσα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, κυρίως δε η συνιστώσα της υστέρησης. Δεδομένου ότι όλες οι διατάξεις για τη μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας διαθέτουν ελαστικό ώστε να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η πραγματική επαφή του πέλματος των ελαστικών με την επιφάνεια των οδοστρωμάτων, παρουσιάζουν ευαισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές (Wang et al. 2014, Kogbara et al. 2016, Kogbara et al. 2018a). Ωστόσο, η ευαισθησία της κάθε μεθόδου μέτρησης διαφέρει και οι μετρήσεις που παρέχει δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες με μετρήσεις από άλλες μεθόδους μέτρησης.

Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας ο συντελεστής τριβής μίας επιφάνειας οδοστρώματος μειώνεται (Bianchini et al. 2011, Anupam et al. 2013, Yu et al. 2020). Η μείωση όμως αυτή δεν έχει σταθερή τιμή και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, κυρίως όμως από τα χαρακτηριστικά του ασφαλομίγματος. Για παράδειγμα έχει αναφερθεί ότι σε επιφάνειες με αρχικά υψηλό συντελεστή τριβής, η μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας είναι μεγαλύτερη (Oliver et al. 1988, Anupam et al. 2013, Xie et al. 2018). Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι αν και η θερμοκρασία επηρεάζει τις ιδιότητες της ασφάλτου του ασφαλομίγματος και των ελαστικών, η θερμοκρασία του νερού στη διεπαφή τους δεν είναι ικανή να επηρεάσει τις εν λόγω ιδιότητες και την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα (Hosking 1992, Hill and Henry 1981).

#### 3.4.4.6 Εποχιακές και βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις

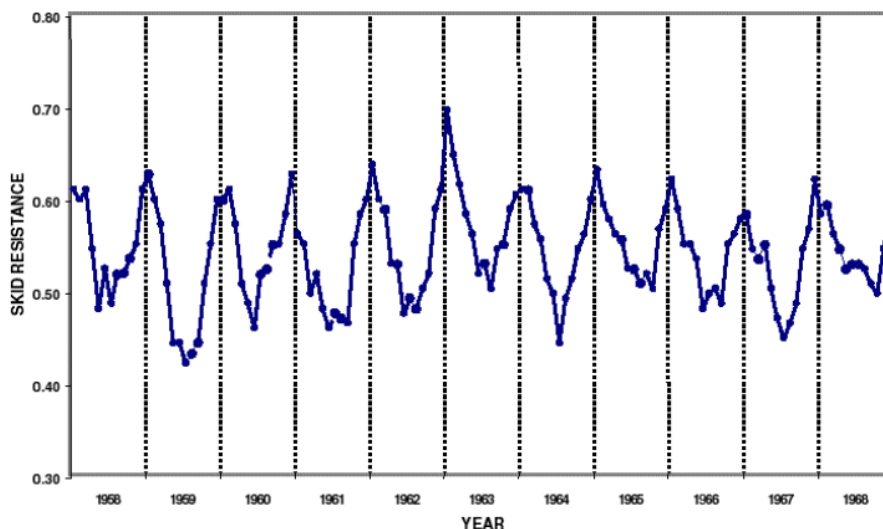
Ο βασικότερος λόγος ύπαρξης των θερμοκρασιακών μεταβολών αποδίδεται εν γένει στις καιρικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, η μετάβαση από τους χειμερινούς στους καλοκαιρινούς μήνες και αντίστροφα επηρεάζει σημαντικά το επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας μίας οδού. Οι εν λόγω μεταβολές είναι γνωστές με τον όρο εποχιακές διακυμάνσεις. Στον όρο εποχιακή διακύμανση εμπεριέχονται συνδυαστικά οι επιδράσεις των παραγόντων όπως η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις και τα κατάλοιπα.

Έχει παρατηρηθεί, ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στις χώρες όπου επικρατεί ζέστη και οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες, η αντιολισθητική ικανότητα είναι χαμηλότερη από τις άλλες εποχές του χρόνου. Αυτή η πτώση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να οφείλεται είτε στη συσσώρευση σκόνης στην επιφάνεια του οδοστρώματος που μειώνει τη μακροϋφή ή στην ύπαρξη υπολειμμάτων από οχήματα όπως λάδι και γράσο (Design Manual for roads and bridges 2015). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα ωστόσο όπου οι βροχοπτώσεις είναι εντονότερες και πιο συχνές, το οδόστρωμα ξεπλένεται, η μακροϋφή βελτιώνεται και κατά συνέπεια το οδόστρωμα έχει μεγαλύτερη αντιολισθητική ικανότητα (Jayawickrama and Thomas 1998) (Εικόνα 3.35). Επίσης, οι Faung και Hughes (2007) παρατήρησαν ότι η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας ακολουθεί ένα κυκλικό πρότυπο, με τις υψηλότερες τιμές την περίοδο με τις περισσότερες βροχοπτώσεις και τις χαμηλές τιμές την περίοδο με τις λιγότερες βροχοπτώσεις.



Εικόνα 3.35: Εποχιακή διακύμανση για την περίπτωση του Ην. Βασιλείου (Choi 2011)

Άλλοι ερευνητές ωστόσο χαρακτηρίζουν τη μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας λόγω της εποχιακής διακύμανσης κατά τη διάρκεια ενός έτους ως ημιτονοειδή (Hosking 1976, Rogers and Garget 1991, Hosking 1992, Jayawickrama and Thomas 1998, Wilson 2006, Do et al. 2014b). Στο διάγραμμα της εικόνας 3.36 διαφάνεται η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης στην αντιολισθητική ικανότητα για περίοδο έντεκα ετών.

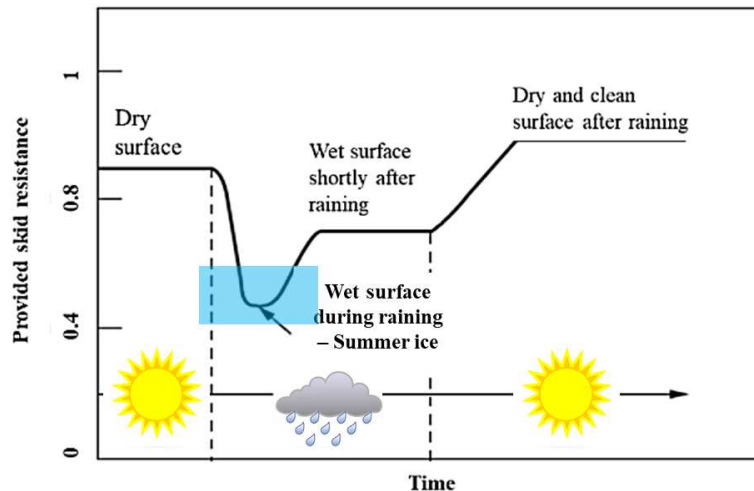


Εικόνα 3.36: Μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας που πραγματοποιήθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο για περίοδο 11 ετών (Hosking 1976)

Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 3.36, πράγματι η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή. Φυσικά, η περίοδος που η αντιολισθητική ικανότητα είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη εξαρτάται άμεσα από την κλιματική ζώνη της χώρας που βρίσκεται η οδός.

Πέρα όμως από τις εποχιακές διακυμάνσεις οι οποίες κατά κάποιο τρόπο θεωρούνται αναμενόμενες κατά τη διάρκεια ενός έτους, υπάρχουν και οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της αντιολισθητικής

ικανότητας που είναι εξίσου σημαντικές αλλά λιγότερο προβλέψιμες. Με τον όρο βραχυπρόθεσμες μεταβολές εννοούνται οι μεταβολές της αντιολισθητικής ικανότητας εντός μικρών χρονικών διαστημάτων, όπως μία ημέρα ή μία εβδομάδα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μεταβολές που μπορεί να προκληθούν είτε λόγω μίας απρόβλεπτης βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου είτε λόγω ύπαρξης σκόνης ή λασποβροχής κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου. Αυτές οι καταστάσεις έχουν σαν αποτέλεσμα να επηρεάζονται άμεσα τα επίπεδα της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας, προκαλώντας συνήθως προβλήματα στους χρήστες μιας οδού (Εικόνα 3.37).



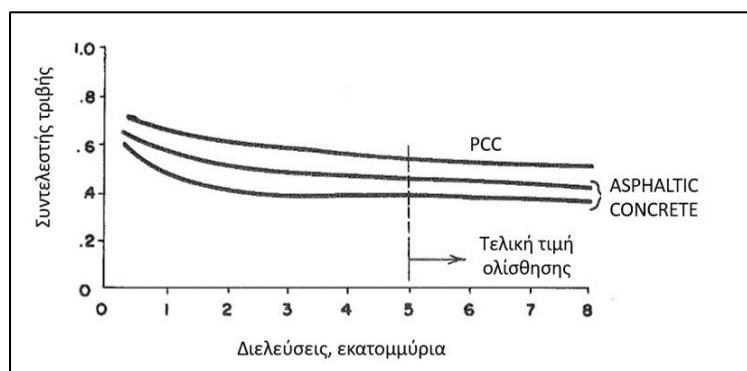
Εικόνα 3.37: Βραχυπρόθεσμες εποχιακές μεταβολές (Do et al. 2014b)

Συγκεκριμένα, αν κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου υπάρξει μία σύντομη και χαμηλής έντασης βροχόπτωση, τότε το νερό σε συνδυασμό με τα σωματίδια σκόνης και των μικρών αποκολλημένων αδρανών δημιουργούν μία μάζα που χαρακτηρίζεται διεθνώς ως καλοκαιρινός παγετός (Wilson 2006). Φυσικά, δεν πρόκειται για πραγματικό παγετό αλλά για μία κατάσταση κατά την οποία τα οχήματα μπορεί να ολισθήσουν πολύ εύκολα καθώς αυτή η μάζα παρεμβάλλεται μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος παρεμποδίζοντας την επαφή τους (Do et al. 2014b). Ωστόσο, αν η βροχόπτωση έχει μεγάλη ένταση και διάρκεια τότε το αποτέλεσμα λειτουργεί θετικά προς την αύξηση της αντιολισθητικής ικανότητας, αφού το νερό σε αυτή την περίπτωση απομακρύνει την σκόνη και δεν δημιουργείται η μάζα που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επιπροσθέτως, η λασποβροχή όπως προαναφέρθηκε είναι ιδιαίτερα συνήθης στις χώρες του νότιου ημισφαιρίου και μπορεί να συμβεί τόσο τους χειμερινούς, όσο και τους καλοκαιρινούς μήνες, επηρεάζοντας αρνητικά τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας.

Τέλος, σημειώνεται πως η συσσώρευση λαδιών από οχήματα σε τμήμα μίας οδού μπορεί να συμβεί ανά πάσα στιγμή ειδικά στην περίπτωση ατυχήματος. Οι φορείς διαχείρισης της οδού θα πρέπει ωστόσο να καθαρίσουν άμεσα το οδόστρωμα, διότι το επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας μειώνεται δραματικά. Εάν δεν υπάρξει κάποια παρέμβαση, η ποσότητα λαδιών θα απομακρυνθεί μόνο έπειτα από εκτεταμένη περίοδο ισχυρών βροχοπτώσεων.

### 3.4.5 Κυκλοφορία

Η κυκλοφορία που διέρχεται από μία οδό αποτελεί βασικό παράγοντα που επηρεάζει την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, η κυκλοφορία υπό τη μορφή διελεύσεων οχημάτων έχει αποδειχθεί πως συμβάλλει καταλυτικά στην υποβάθμιση του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας λόγω της λείανσης που προκαλείται στα επιφανειακά αδρανή από την επαφή με τα ελαστικά των διερχόμενων οχημάτων (Ahamed and Tighe 2009, Susanna et al. 2017). Ωστόσο, αξιοποιώντας αποτελέσματα επιτόπου μετρήσεων, αλλά και εργαστηριακών ελέγχων, έχει διαπιστωθεί ότι η αντιολισθητική ικανότητα φθίνει έως μια σταθερή τιμή πέρα από την οποία η αθροιστική αύξηση των διελεύσεων δεν επηρεάζει αισθητά το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας (Kowalski et al. 2017). Η συγκεκριμένη τιμή ονομάζεται και τελική τιμή αντιολισθητικής ικανότητας (end life value) και παρουσιάζεται ενδεικτικά στο παράδειγμα της Εικόνας 3.38, όπου φαίνεται η μείωση και η σταθεροποίηση του συντελεστή τριβής καθώς αυξάνονται οι συνολικές διελεύσεις για διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων (Rizenbergs 1968).

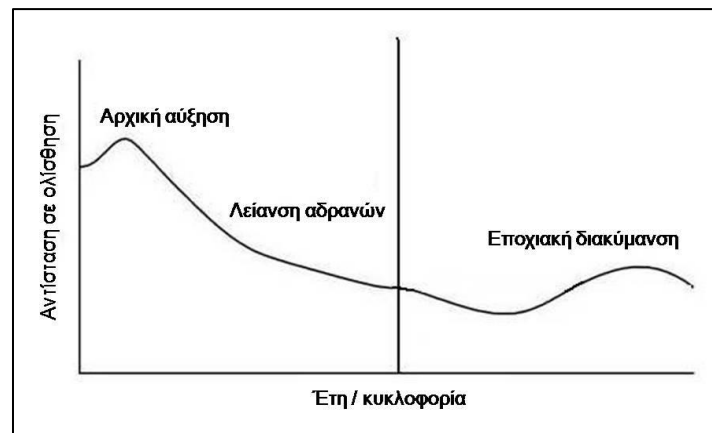


Εικόνα 3.38: Εξέλιξη συντελεστή τριβής συναρτήσει των διελεύσεων για διαφορετικές επιφάνειες οδοστρωμάτων (Rizenbergs 1968)

Όπως παρατηρείται από την Εικόνα 3.38, η τελική τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας διαφοροποιείται ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας του οδοστρώματος. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι πιθανόν η τελική τιμή να επέρχεται νωρίτερα από τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, των οποίων η επιφανειακή στρώση αποτελείται από σκυρόδεμα. Ωστόσο, η εξέλιξη της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας είναι ορθότερο να αξιολογείται κατά τη λειτουργία ενός οδοστρώματος ανεξάρτητα από τον τύπο του (Siriphun et al. 2019). Κατά τους Diringer and Barros (1990), η σταθεροποίηση της τιμής της αντιολισθητικής ικανότητας τυπικά, με εξαίρεση τις εποχιακές διακυμάνσεις, αντιστοιχεί σε διελεύσεις μεταξύ δύο και πέντε εκατομμυρίων. Αργότερα, Skerritt (1993) υποστήριξε ότι η ετήσια ελάχιστη αντιολισθητική ικανότητα παραμένει περίπου στάσιμη χωρίς σημαντική πτώση (τιμή σταθεροποίησης της αντιολισθητικής ικανότητας) μετά από περίπου δύο έως τρία χρόνια έκθεσης στην κυκλοφορία. Βέβαια, όπως επισημάνθηκε σε άλλη σχετική έρευνα, η φύση των υλικών του ασφαλτομίγματος της επιφανειακής στρώσης έχει ιδιαίτερη σημασία για το ρυθμό υποβάθμισης της αντιολισθητικής ικανότητας μία οδού (Mayora and Piña 2009). Συγκεκριμένα, έχει διαπιστωθεί πως τα ασβεστολιθικά αδρανή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα και μη ανθεκτικά στο πέρασμα χιλιάδων διελεύσεων οχημάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επέρχεται πιο γρήγορα η τιμή σταθεροποίησης ή αλλιώς τελική τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας (Rizenbergs 1968, Dahir and Meyer 1974).



Ωστόσο, ένα βασικό χαρακτηριστικό στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας είναι αρχική αύξηση της, για την περίπτωση ενός νέου οδοστρώματος κατά τη διέλευση πεπερασμένου αριθμού οχημάτων. Δηλαδή, η αντιολισθητική ικανότητα αρχικά αυξάνεται αμέσως μετά την κυκλοφορία του οδοστρώματος, μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια με την πάροδο του χρόνου και της κυκλοφορίας μειώνεται έως μια τελική τιμή. Η χρονική περίοδος από την αρχική έως τη μέγιστη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας και από αυτήν έως τη τελική τιμή της, εξαρτάται τόσο από τον τύπο, όσο και από τον όγκο της κυκλοφορίας (Skerritt 1993, Quinn 1975, Kane and Edmondson 2018, Kane et al. 2019, Kane and Edmondson 2020). Ο τύπος της κυκλοφορίας αφορά στα είδη των οχημάτων που διέρχονται - επιβατικά ή εμπορικά οχήματα, ενώ ο όγκος αναφέρεται στην τελική σύνθεση της κυκλοφορίας και στον συνολικό αριθμό διελεύσεων. Προφανώς, ο μεγάλος όγκος κυκλοφορίας μειώνει την αντιολισθητική ικανότητα για όλους τους τύπους αδρανών, καθώς επιφέρει λείανση των επιφανειακών αδρανών (O'Brien and Haddock 2009, Kane et al. 2010, Kane and Cerezo 2015, Kane and Edmondson 2018). Στην Εικόνα 3.39 φαίνεται η αρχική αύξηση της αντιολισθητικής ικανότητας έως την μεγιστοποίησή της, καθώς και η μετέπειτα υποβάθμιση λόγω της λείανσης των αδρανών από την συνεχώς αυξανόμενη αθροιστική κυκλοφορία.



**Εικόνα 3.39:** Εξέλιξη συντελεστή τριβής με την πάροδο των ετών / διελεύσεων (Rizenbergs 1968)

Στην πραγματικότητα η αύξηση που παρατηρείται στο επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας αμέσως μετά τη λειτουργία του οδοστρώματος οφείλεται στην απομάκρυνση της ασφάλτου από την επιφάνεια των αδρανών που έρχονται σε επαφή με τα ελαστικά (Li et al. 2018, Kane and Edmondson 2018, Kane et al. 2019). Με αυτόν τον τρόπο αποκαλύπτεται η αδρή επιφάνεια των αδρανών του ασφαλτομίγματος και ενεργοποιείται ο ρόλος της μικροϋφής (Li et al. 2018). Πρακτικά, πριν την ενεργοποίηση της μικροϋφής, η αντιολισθητική ικανότητα παρέχεται κυρίως από την μακροϋφή (Li et al. 2018, Li et al. 2019). Με το πέρας της μέγιστης τιμής, τα αδρανή λειαινούνται όλο και περισσότερο με αποτέλεσμα να μειώνεται τόσο η μικροϋφή όσο και η μακροϋφή και κατ' επέκταση η αντιολισθητική ικανότητα (Kane et al. 2014). Όταν η αντιολισθητική ικανότητα φτάσει στην τελική τιμή, οι όποιες μεταβολές οφείλονται κυρίως στην επίδραση της εποχιακής διακύμανσης που βελτιώνει ή δυσχεραίνει παροδικά ή/και περιοδικά το επίπεδό της (Donbavand and Cook 2005, Wilson 2006).

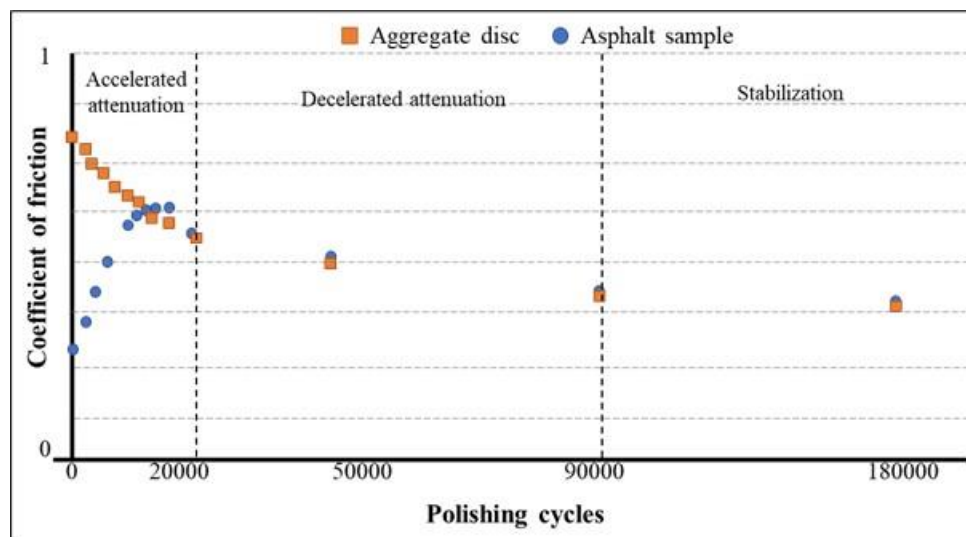
Αξίζει να σημειωθεί ότι το διάστημα μεταξύ της αρχικής και της μέγιστης τιμής της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να αποτελεί μία επικίνδυνη κατάσταση για την οδική ασφάλεια γεγονός που οφείλεται στην έλλειψη μικροϋφής όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Για το λόγο αυτό σε κάποιες χώρες

χρησιμοποιείται ειδική σήμανση που ενημερώνει τους οδηγούς, ώστε να οδηγούν με προσοχή σε τμήματα οδών που είναι νέα ή προσφάτως αποκαταστημένα με νέο ασφαλτικό υλικό (Εικόνα 3.40).

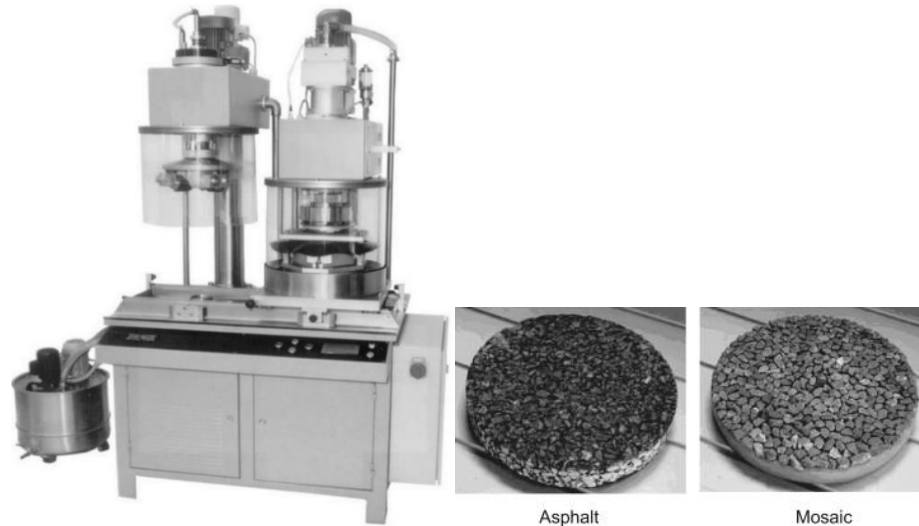


**Εικόνα 3.40:** Ειδική σήμανση στην Ολλανδία για προειδοποίηση σχετικά με τη μειωμένη αντιολισθητική ικανότητα σε νέο οδόστρωμα

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.41 παρουσιάζεται την εξέλιξη του συντελεστή τριβής έπειτα από χιλιάδες διελεύσεις οχημάτων (σε περιβάλλον εργαστηριακής προσομοίωσης). Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι καμπύλες λείανσης ή στίλβωσης ενός δείγματος από ασφαλτόμιγμα (asphalt sample) και ενός από αδρανή (aggregate disc). Για τη διεξαγωγή του πειράματος κατασκευάστηκαν δείγματα (δίσκοι) με ψηφίδες αδρανών αλλά και δείγματα ασφαλτομίγματος ενώ, για την προσομοίωση των διελεύσεων αξιοποιήθηκε η συσκευή Wehner-Schulze, η οποία προκαλεί τεχνητή λείανση ή αλλιώς στίλβωση των αδρανών των δοκιμών (Εικόνα 3.42).

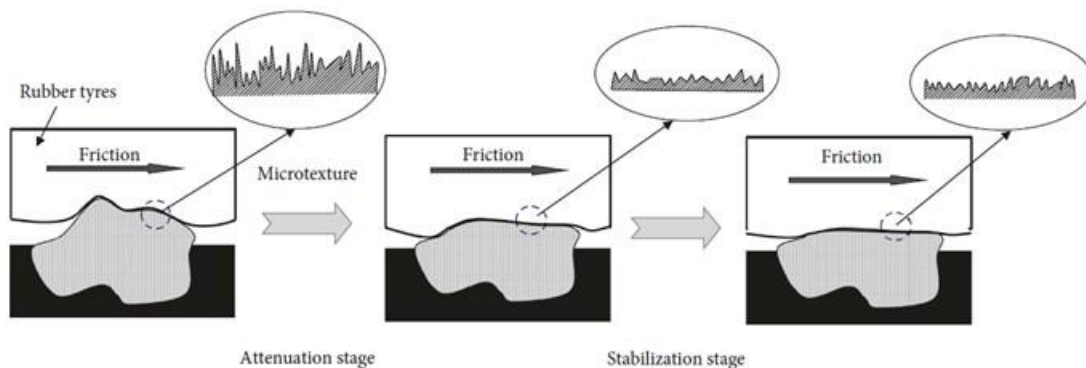


**Εικόνα 3.41:** Σύγκριση δοκιμών ασφαλτομίγματος και δίσκου αδρανών (Do et al. 2007, Guan et al. 2018)



**Εικόνα 3.42:** Αριστερά- η συσκευή Wehner-Schulze, δεξιά – οι δίσκοι ασφαλτομίγματος και αδρανών

Από την Εικόνα 3.41, παρατηρείται αρχικά μία μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπύλων η οποία οφείλεται στην παρουσία της ασφάλτου που καλύπτει τα επιφανειακά αδρανή στο δείγμα από ασφαλτόμιγμα (κάλυψη μικροϋφής) γνωστή διεθνώς και ως masking effect (Do et al. 2007, Kane and Edmondson 2020). Η επίδρασή αυτή δικαιολογεί τα χαμηλότερα επίπεδα συντελεστή τριβής που παρατηρούνται στα πρώτα στάδια της στίλβωσης. Ένα ακόμη ενδιαφέρον σημείο που παρατηρείται είναι η σύνδεση των δύο καμπυλών (δείγμα αδρανών και δείγμα ασφαλτομίγματος) όταν έχει αφαιρεθεί η άσφαλτος από την επιφάνεια των αδρανών του δείγματος από ασφαλτόμιγμα και έχει αποκαλυφθεί η μικροϋφή τους. Τέλος, ένα άλλο σημείο είναι ο διαχωρισμός της εξέλιξης της καμπύλης στίλβωσης του δείγματος αδρανών σε τρεις ζώνες που αφορούν στη μεταβολή του συντελεστή τριβής: α) ταχεία μείωση (accelerated attenuation), β) ήπια μείωση (decelerated attenuation), γ) σταθεροποίηση (stabilization). Ο εν λόγω διαχωρισμός εξαρτάται κυρίως από τη μικροϋφή των αδρανών του δείγματος (Εικόνα 3.43).



**Εικόνα 3.43:** Σχηματική απεικόνιση μεταβολής μικροϋφής με τη πάροδο των κύκλων στίλβωσης (Guan et al. 2018)

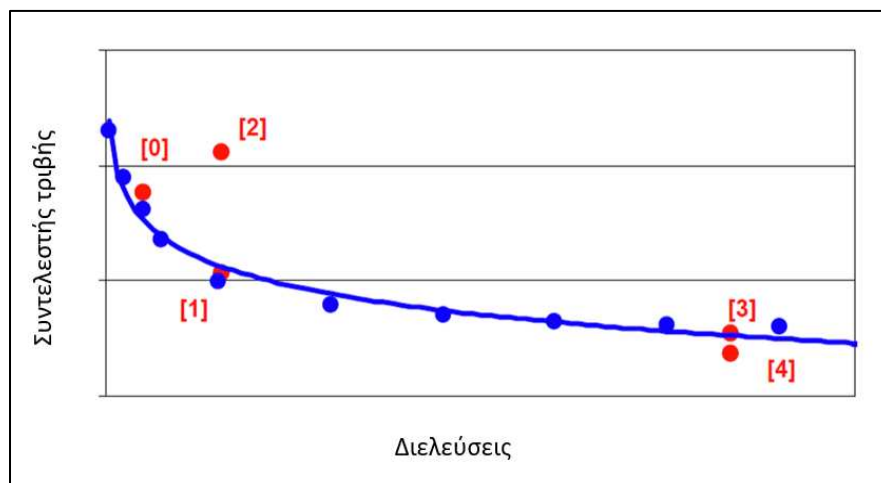
Συγκεκριμένα, μόλις αφαιρεθεί η άσφαλτος από την επιφάνεια των αδρανών του ασφαλτομίγματος, τα αδρανή είναι εκτεθειμένα στην κυκλοφορία. Για το λόγο αυτόν, μπορεί να ειπωθεί ότι η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος, μετά την αφαίρεση του συνδετικού υλικού – άσφαλτος, επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των αδρανών (Do et al. 2007, Kane et al. 2019). Συγκεκριμένα στο εργαστηριακό πείραμα που διεξήχθη από τους Do et al. (2007), πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές

δοκιμές οι οποίες ανέδειξαν ότι η λείανση των αδρανών εξαιτίας της κυκλοφορία μπορεί να προσομοιαστεί από τη συσκευή Wehner-Schulze, καθώς θεωρήθηκε ρεαλιστική όσον αφορά στην επίδραση της κυκλοφορίας (Kane et al. 2013a, Hofko et al 2019).

Ωστόσο, με τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου στο πείραμα των Do et al. (2007) τα αποτελέσματα δεν μπορούν να αποτυπώσουν την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας και στο πεδίο, καθώς στη δεύτερη περίπτωση οι διελεύσεις είναι πολύ περισσότερες. Γι' αυτόν τον λόγο ο Wörner (2012) πραγματοποίησε παρόμοιας φύσης εργαστηριακό πείραμα δοκιμάζοντας ωστόσο τη μέθοδο για περισσότερα στάδια διελεύσεων. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.44 φαίνεται η εξέλιξη του συντελεστή τριβής για κάθε επίπεδο διελεύσεων που επιβλήθηκαν τα πειραματικά δοκίμια μέσω της προτυποποιημένης συσκευής Wehner-Schulze. Οι μετρήσεις έγιναν μετά από 4.500, 7.500, 15.000, 22.500, 30.000, 45.000, 135.000, 180.000, 225.000 και 270.000 επίπεδα διελεύσεων. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα αποτελέσματα για περιορισμένο αριθμό μετρήσεων του συντελεστή τριβής, ενώ με μπλε οι τιμές για όλα τα προαναφερθέντα στάδια διελεύσεων.

Συγκεκριμένα, οι δοκιμές χωρίστηκαν κατά βάση στα 5 επιμέρους στάδια αναφοράς (κόκκινο χρώμα):

- ❖ Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας στην αρχή χωρίς λείανση (στάδιο 0).
- ❖ Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από 90.000 διελεύσεις (στάδιο 1).
- ❖ Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από αμμοβολή της επιφάνειας του δείγματος (στάδιο 2).
- ❖ Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μετά από νέο κύκλο 90.000 διελεύσεων (στάδιο 3).
- ❖ Μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μέχρι την τιμή της σταθερής- τελικής αντιολισθητικής ικανότητας (στάδιο 4).



Εικόνα 3.44: Σύγκριση των δύο μεθόδων, σχέση διελεύσεων και συντελεστή τριβής με τη συσκευή Wehner-Schulze (Wörner 2012)

Κατά αυτό τον τρόπο θεωρήθηκε ότι η εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να αποτελέσει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για την καταγραφή της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας σε εργαστηριακό περιβάλλον, ώστε να προσομοιαστεί όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητικά η επιτόπου συμπεριφορά αναφορικά με την επίδραση της πραγματικής κυκλοφορίας.

Εκτός όμως από τον όγκο της κυκλοφορίας και η σύνθεσή της έχει επίδραση στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας. Ως σύνθεση της κυκλοφορίας εννοείται η διαφοροποίηση των ειδών των οχημάτων που διέρχονται από μια οδό. Δηλαδή επί του συνολικού όγκου της κυκλοφορίας είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διακρίνονται οι διελεύσεις των συμβατικών Ι.Χ. από τα βαρέα οχήματα. Όπως αναμένεται, τα βαρέα οχήματα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, καθώς λειαινούν την επιφάνεια πολύ περισσότερο από τα άλλα είδη οχημάτων (Hall et al. 2009, El Halim 2010, Ragland et al. 2010, Mulry et al. 2012). Έχει αποδειχθεί ότι στις ασφαλικές επιφάνειες υπάρχει μια πολύ σημαντική συσχέτιση μεταξύ του κυκλοφοριακού φόρτου των βαρέων οχημάτων και της αντιολισθητικής ικανότητας. Σημειώνεται ωστόσο, ότι η αντιολισθητική ικανότητα δεν είναι απαραίτητα πιο υποβαθμισμένη στη λωρίδα με τις περισσότερες διελεύσεις (Dunford et al. 2014). Ωστόσο ο συντελεστής τριβής θα πρέπει να μετράται στη λωρίδα με τη μεγαλύτερη κυκλοφορία, λαμβάνοντας υπ' όψη και τον αριθμό των βαρέων οχημάτων που διέρχονται από αυτή.

Κατά καιρούς έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες από ερευνητές για να ποσοτικοποιηθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η επίδραση της κυκλοφορίας στην υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας. Για παράδειγμα οι Oh et al. (2010) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής για ταχύτητα 40 mi/h (εξίσωση 3.7), με σκοπό να βρουν μία συσχέτιση μεταξύ των διάφορων παραγόντων που επηρεάζουν την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα με περισσότερες από 50.000 παρατηρήσεις κατά μήκος πέντε αυτοκινητόδρομων στην Καλιφόρνια μεταξύ των ετών 1988 έως το 2008. Κάθε παρατήρηση διαθέτει πληροφορίες θέσης, χρόνου, κυκλοφορίας και μετρήσεις της αντιολισθητικής ικανότητας (Oh et al. 2010).

$$SN_{40} = \beta_1 \ln(TRAFFIC) + \beta_2(LANE) + \beta_3(TEMP) + \beta_4(PRCP) + \beta_5(DP) + \beta_6 \ln(AGE) + \alpha_0 + u \quad (3.7)$$

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

$\beta_i$ = Συντελεστές παλινδρόμησης

$\alpha_0$ = Σταθερά

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

$\alpha_i$ = Τυχαίο χρονικό διάστημα μεταξύ των τμημάτων

$\varepsilon$ = Τυχαία αναφορά για τα μη παρατηρούμενα χαρακτηριστικά του τμήματος

Τα αποτελέσματα της έρευνας 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 (2011) ανέπτυξαν ένα μοντέλο υπολογισμού της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0,74$ . Η εξίσωση 3.8 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.

$$SN(50) = 1,41 + 143,19(IFI - 0,045)e^{(-20/Sp)} \quad (3.8)$$

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,  $TMF = \frac{AADT*years\ in\ service*365}{1000}$

AADT= Ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός διελεύσεων στην εξωτερική λωρίδα

A, B, C= Μειωτικοί συντελεστές (A=-0,452, B=-58,95, C=5.834\*10<sup>-6</sup>)

Παρατηρήθηκε ότι τα τμήματα στα οποία το ασφαλτόμιγμα περιείχε ασβεστολιθικά αδρανή είχαν τη χαμηλότερη αντιολισθητική ικανότητα τόσο σε συνθήκες υψηλής όσο και χαμηλής κυκλοφορίας. Τα τμήματα με ψαμμίτη ως αδρανές είχαν την υψηλότερη τιμή αντιολισθητικής ικανότητας και επιπλέον αυτή η υψηλή τιμή διατηρούνταν ακόμα και για υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση ασβεστόλιθου με σκληρότερο τύπο αδρανούς, όπως γρανίτης ή χαλίκι, είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντιολισθητική ικανότητα από τη χρήση μόνο ασβεστολιθικών αδρανών (Rezaei and Masad 2013).

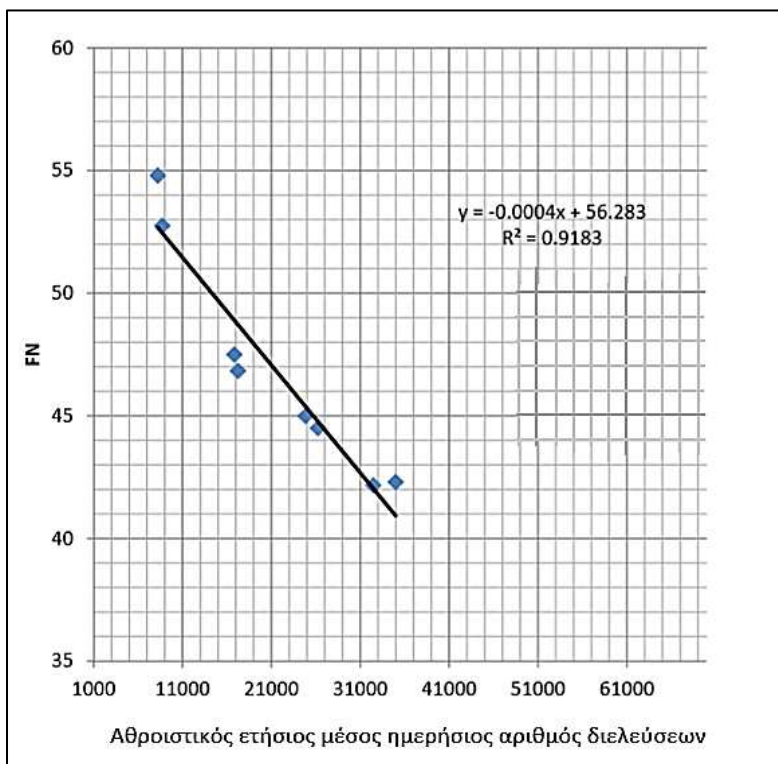
Οι Goulias και Awoke (2017) προσπάθησαν να βρουν ένα μοντέλο που να αποτυπώνει την επιρροή της κυκλοφορίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας δεδομένα από πέντε διαδοχικά έτη. Το μοντέλο που ανέπτυξαν για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας περιγράφεται από την εξίσωση 3.9, έχει συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0.9183$  και η γραφική σχέση απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.45.

$$FN = -0,0004 * AADT + 56,283 \quad (3.9)$$

όπου,

FN= Μετρούμενη αντιολισθητική ικανότητα

AADT= Ετήσιος μέσος ημερήσιος αριθμός διελεύσεων



Εικόνα 3.45: Συσχέτιση συντελεστή τριβής και μέσου ετήσιου ημερήσιου αριθμού διελεύσεων (Goulias and Awoke 2017)

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα της Εικόνας 3.45, η επίδραση της κυκλοφορίας είναι προφανώς αρνητική στην τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας.

Οι Omar et al. (2017) ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόβλεψης (εξίσωση 3.10) στο οποίο συμπεριέλαβαν τον παράγοντα της κυκλοφορίας, ωστόσο όχι με την μορφή ημερήσιων διελεύσεων αλλά με τη μορφή ισοδύναμου φορτίου άξονα. Δηλαδή μέσα από αυτή την τροποποίηση δόθηκε βαρύτητα όχι μόνο στον όγκο της κυκλοφορίας αλλά και στη σύνθεσή της (ύπαρξη Ι.Χ. και βαρέων οχημάτων).

$$SN = 48.89 - 6.02 \log(L) - 8.45MPD + 0.42FF + 1.95VMA \quad (3.10)$$

όπου,

SN= Μετρούμενη αντιολισθητική 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  $R^2=0,63$ . Τα φορτία κυκλοφορίας και η μακροϋφή είχαν αρνητική επίδραση στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας, ενώ το ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών και των κενών είχαν θετική επίδραση (Omar et al. 2017).

Οι Hofko et al. (2019) ανέπτυξαν μια εργαστηριακή μεθοδολογία με χρήση της συσκευής Wehner-Schulze για την πρόβλεψη της εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας. Το μοντέλο αναπτύχθηκε για την περίπτωση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων για οδικά τμήματα σε ευθεία, δηλαδή χωρίς καμπυλότητα ή κλίση μεγαλύτερη από 1%. Επίσης, απευθύνεται σε κλιματικές συνθήκες με θερμά, υγρά

καλοκαίρια και ψυχρούς, ξηρούς χειμώνες. 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 (εξιιώσεις 3.11, 3.12) (Hofko et al. 2019).

$$CTV_{w,HGV} = \frac{CTV * AADT(HGV)}{10^8 * 10^4} \quad (3.11)$$

$$PP_{C1-C3} = 5336.6CTV_{w,HGV} - 5099.5 \quad (3.12)$$

όπου,

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

$CTV$ = Αθροιστική κυκλοφορία

$AADT(HGV)$ = 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 που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία της τεχνητής λείανσης των δοκιμών (εξιιώσεις 3.13, 3.14, 3.15, 3.16) (Hofko et al. 2019) και είναι τα εξής:

$$\text{Για καθαρό νερό με } R^2=0.8445, \mu = -0.014 \ln(A\Delta) + 0.6136 \quad (3.13)$$

$$\text{Για 0,6\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9919, \mu = -0.039 \ln(A\Delta) + 0.7357 \quad (3.14)$$

$$\text{Για 2\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9875, \mu = -0.038 \ln(A\Delta) + 0.6679 \quad (3.15)$$

$$\text{Για 6\% σκόνη χαλαζία στο νερό με } R^2=0.9773, \mu = -0.037 \ln(A\Delta) + 0.6733 \quad (3.16)$$

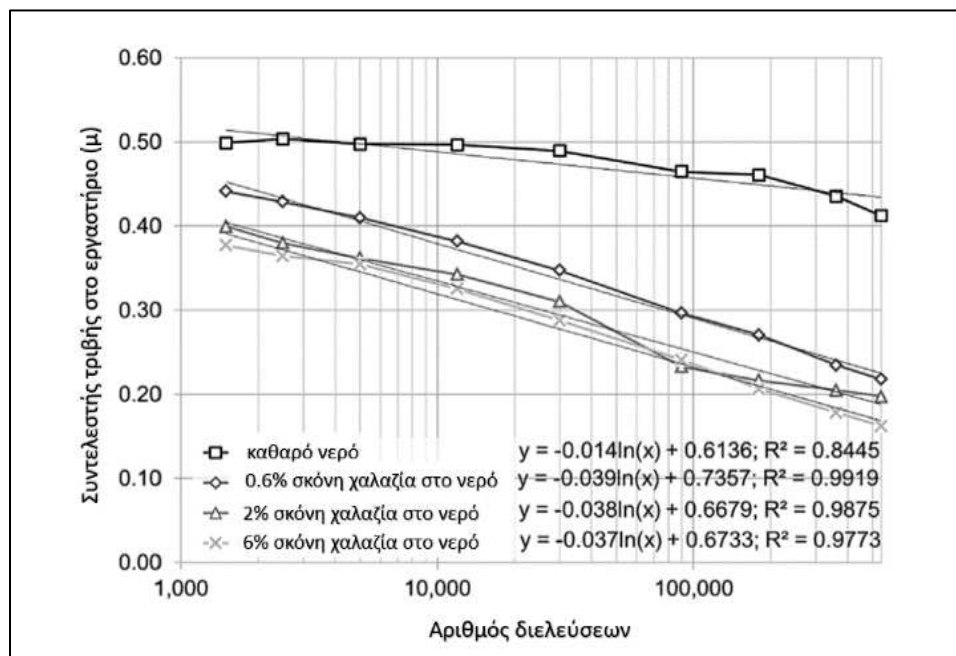
όπου,

$\mu$ = συντελεστής τριβής

$A\Delta$ = αριθμός διελεύσεων οχημάτων

Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.46 φαίνεται ότι η εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνάρτηση με τον αριθμό διελεύσεων είναι φθίνουσα.





Εικόνα 3.46: Σχέση μεταξύ αριθμού διελεύσεων και συντελεστή τριβής (Hofko et al. 2019)

Συγκεκριμένα, διαφάνεται ότι η αύξηση του ποσοστού της σκόνης χαλαζία στο νερό μειώνει ακόμα περισσότερο την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας καθώς οι διελεύσεις αυξάνονται (Hofko et al. 2019).

Οι Kane και Edmondson (2020) πραγματοποίησαν εργαστηριακά πειράματα σε δείγματα δίσκων αδρανών αξιοποιώντας την συσκευή Wehner-Schulze για την περίπτωση διαφόρων ειδών αδρανών (ασβεστολιθικά, βασάλτη, γρανίτη κ.α.). Επιβάλλοντας πεπερασμένο αριθμό κύκλων στίλβωσης προσπάθησαν να συνδέσουν τη συμπεριφορά των αδρανών έναντι στίλβωσης (προσομοίωση διελεύσεων) με τον δείκτη σκληρότητας τους (Averaged Aggregate Hardness Parameter). Τα αποτελέσματα της σχετικής έρευνας ήταν ενθαρρυντικά ως προς τη σύνδεση του δείκτη σκληρότητας με τον συντελεστή τριβής που μετρήθηκε έπειτα από έναν συγκεκριμένο αριθμό κύκλων στίλβωσης (Kane and Edmondson 2020).

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε διάφορες χώρες έχουν αναπτυχθεί συσκευές που να προσομοιάζουν τις διελεύσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον. Συνήθως, ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους γίνεται σε Πανεπιστήμια. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των συσκευών δεν είναι πάντα εφικτή όπως και η σύνδεση τους με την επίδραση της πραγματικής κυκλοφορίας (Do et al. 2007, Xie et al. 2019, Wang et al. 2020). Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις συσκευές που είναι πιο δημοφιλής πλην της Wehner-Schulze (W/S) η οποία είναι και η μοναδική προτυποποιημένη (CEN - EN 12697-49, 2017).



**Εικόνα 3.47:** Συσκευή Auckland polishing machine (Auckland, New Zealand)



**Εικόνα 3.48:** Συσκευή Aachen polishing machine (Aachen, Germany)



**Εικόνα 3.49:** Συσκευή Harbin polishing machine (Harbin, China)



*Εικόνα 3.50: Συσσκευή NCAT Three Wheel Polishing Device (Auburn, Alabama - USA)*

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω εικόνες που εμφανίζουν τις εν λόγω συσκευές, η κάθε μία από αυτές παρουσιάζει διαφοροποιήσεις όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της όπως, στον τύπο των ελαστικών που χρησιμοποιούνται, τη μορφή του δοκιμίου που πρόκειται να ελεγχθεί και την κίνηση της διάταξης κατά τη διαδικασία λείανσης των δοκιμίων κλπ. Σε μια έρευνα που έγινε το 2015 για την συσχέτιση των αποτελεσμάτων της συσκευής Auckland και της Wehner-Schulze, διαπιστώθηκε πως για το συγκεκριμένο πείραμα υπήρχε καλή συσχέτιση μεταξύ τους (Nataadmadja et al. 2015). Ενώ, σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της συσκευής Aachen και της Wehner-Schulze (W/S) διαμορφώθηκε το συμπέρασμα ότι η δοκιμή με τη συσκευή W/S οδηγεί σε υπερεκτίμηση των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας αν κατά τη δοκιμή λείανσης χρησιμοποιηθεί σκόνη (για την επίτευξη της λείανσης) μεγαλύτερου μεγέθους ονομαστικού κόκκου αδρανών και άλλης σύνθεσης από εκείνη που ορίζει το πρότυπο λειτουργίας της. Αντιθέτως, η συσκευή Aachen δεν φάνηκε να έχει ευαισθησία στην εν λόγω παράμετρο (Wang et al. 2013).

Γενικά, θεωρείται πως οι συγκεκριμένες διατάξεις συσκευών μπορούν να παρέχουν μια εκτίμηση της συμπεριφοράς των υλικών ως προς την αντιολισθητική ικανότητα τους. Σαφώς, οι έρευνες συνεχίζονται προς τον εντοπισμό πιθανής συσχέτισης των αποτελεσμάτων από τις εν λόγω συσκευές με την πραγματική συμπεριφορά των υλικών στο πεδίο για συνθήκες πραγματικής φόρτισης από την κυκλοφορία.

Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη τα παραπάνω, καθώς και την πληθώρα των εργασιών σχετικά με την επίδραση της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα, γίνεται αντιληπτή η σημασία διερεύνησης του εν λόγω παράγοντα. Επίσης, συνδυαστικά με την επίδραση των υπόλοιπων παραγόντων που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα στο πεδίο γίνεται κατανοητή η πολυπαραμετρική διερεύνηση που απαιτείται. Καθότι, η ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν το συγκεκριμένο επιφανειακό χαρακτηριστικό μπορεί να λειτουργήσει προς όφελος της οδικής ασφάλειας συνδυαστικά με τη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων.

## 4 Μέθοδοι μέτρησης αντιολισθητικής ικανότητας

### 4.1 Γενικό πλαίσιο

Υπάρχουν ποικίλα είδη συστημάτων και μεθόδων που είναι διαθέσιμα για τη μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας. Όμως, σχεδόν όλα τα συστήματα και οι μέθοδοι βασίζονται ουσιαστικά στην ίδια αρχή μέτρησης. Δηλαδή, τη μέτρηση της αντίστασης ενός ελαστικού που αφήνεται να ολισθήσει σε μια υγρή επιφάνεια οδοστρώματος, υπό την επιβολή συγκεκριμένου κάθετου φορτίου (Austroads 2005). Η προκύπτουσα τριβή μεταξύ του ελαστικού – οδοστρώματος καταγράφεται, ενώ το κάθετο επιβαλλόμενο φορτίο θεωρείται σταθερό ή εάν τροποποιείται επίσης καταγράφεται.

Η μετρούμενη δύναμη τριβής εξαρτάται από το φορτίο που επιβάλλεται και συνεπώς, υπολογίζεται ο συντελεστής τριβής ( $f$  ή  $\mu$ ) όπως αναλύεται και στην Ενότητα 2.1. Το εύρος των διαθέσιμων τεχνικών μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας είναι συνήθως ταξινομημένο σε δύο βασικές υποκατηγορίες:

- Τα συστήματα για μετρήσεις στο πεδίο και
- τα συστήματα για εργαστηριακές μετρήσεις.

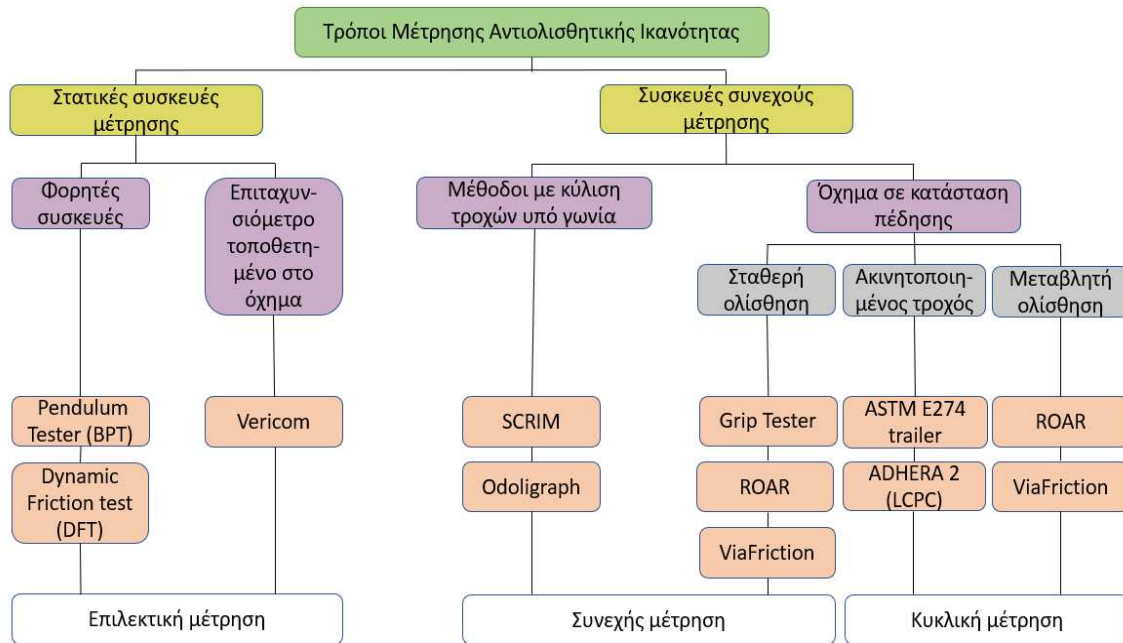
Ωστόσο κάποια συστήματα υπό τις κατάλληλες συνθήκες μπορούν να αξιοποιηθούν και στις δύο περιπτώσεις.

### 4.2 Συστήματα για μετρήσεις στο πεδίο

#### 4.2.1 Κατηγορίες

Γενικά, τα συστήματα για επιτόπου μετρήσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, εκείνες που δύναται να μετρούν συνεχώς σε μεγάλη έκταση οδοστρώματος και ονομάζονται συσκευές συνεχούς μέτρησης τριβής και εκείνες που μετρούν την αντιολισθητική ικανότητα τοπικά σε συγκεκριμένες θέσεις και ονομάζονται στατικές συσκευές. Οι συσκευές συνεχούς μέτρησης μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν είτε ως μέθοδοι με κύλιση τροχών υπό γωνία (SFC) είτε ως μέθοδοι πέδησης τροχού στη κατεύθυνση κίνησης (BFC) (Wilson et al. 2013, Mataei et al. 2016).

Η μέθοδος πέδησης τροχού στη κατεύθυνση κίνησής του μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε μεθόδους ακινητοποίησης τροχών, μεταβλητής ολίσθησης και σταθερής ολίσθησης. Οι πιο συνηθισμένες στατικές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικά στο πεδίο σε σημεία κατά μήκος μία οδού είτε στο εργαστήριο σε επιφάνειες δοκιμίων. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται η ταξινόμηση των διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και επιπλέον, δίνονται κάποια παραδείγματα των πιο κοινών χρησιμοποιούμενων συσκευών μέτρησης (Wilson et al. 2013).









Εικόνα 4.1: Τρόποι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας και δημοφιλέστερες συσκευές (Wilson 2006)

Λόγω των διαφοροποιήσεων μεταξύ των συστημάτων μέτρησης δεν είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων δηλαδή των μετρήσεων που εξαγονται. Καθώς, η μετρηθείσα αντιολισθητική ικανότητα εξαρτάται από μεταβλητές παραμέτρους όπως ο λόγος ολίσθησης, η ταχύτητα με την οποία κινείται η συσκευή κατά τη διαδικασία μετρήσεων, το κατακόρυφο φορτίο, το είδος του ελαστικού του τροχού που ολισθαίνει, η πίεση του ελαστικού και η ποσότητα του νερού που υπάρχει στην επιφάνεια κατά την ολίσθηση. Επίσης, ορισμένες από τις συσκευές υπολογίζουν την μέγιστη τριβή ενώ σε μερικές άλλες το ποσοστό ολίσθησης μεταβάλλεται με στόχο να λειτουργούν γύρω από το επίπεδο της μέγιστης τριβής που εξηγήθηκε στη προηγούμενη Ενότητα.

Στον πίνακα 4.1 αναγράφονται περισσότερα στοιχεία για τις μεθόδους μέτρησης, τα πρότυπα που ακολουθούν και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων.


Πίνακας 4.1: 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 64 km/h. Εκτοξεύεται νερό πάχους 0,5 mm μπροστά από το δοκιμαστικό τροχό, ο τροχός δοκιμής χαμηλώνει όσο χρειάζεται και ένα σύστημα πέδησης τον ασφαλίζει – κλειδώνει. Στην συνέχεια μετράται η δύναμη πέδησης από τον μέσο όρο των 3 πρώτων δευτερολέπτων μετά το κλείδωμα του δοκιμαστικού τροχού. Οι μετρήσεις μπορούν να επαναληφθούν όταν ο τροχός φθάσει και πάλι σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Γαλλικό ADHERA</li> </ol>  <ol style="list-style-type: none"> <li>ASTM E274 trailer</li> </ol>

Τύπος Μεθόδου	Πρότυπο	Περιγραφή	Συσκευές
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 (πάχος στρώσης νερού: 0,5 mm) εφαρμόζεται μπροστά από τον δοκιμαστικό τροχό. Ρυμουλκείται από όχημα που κινείται με περίπου 60 km/h. Η περιστροφή του δοκιμαστικού τροχού επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσής του με έναν μηχανισμό αλυσίδας ή με ιμάντα ή με υδραυλικό σύστημα. Τα δεδομένα τυπικά συλλέγονται ανά 25 έως 125 mm και υπολογίζονται κατά μέσο όρο σε διαστήματα του 1 m.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Grip Tester </li> <li>ROAR </li> <li>Airport Surface Friction Tester (ASFT)</li> <li>Saab Friction Tester (STF)</li> <li>Finland BV-11</li> <li>ViaFriction </li> </ol>
Μεταβλητή ολίσθηση Συνεχής μέτρηση	ASTM E1859	Οι συσκευές μεταβλητής ολίσθησης μετρούν τη δύναμη τριβής ως συνάρτηση της ολίσθησης (0 έως 100%) μεταξύ του τροχού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Στην επιφάνεια του οδοστρώματος εκτοξεύεται νερό (πάχος στρώσης νερού: 0,5 mm) 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 ~2,5 mm ή και λιγότερο. Τα δεδομένα καταγράφονται και αργότερα επεξεργάζονται και εξομαλύνονται.	<ol style="list-style-type: none"> <li>Γαλλικό IMAG </li> <li>ROAR</li> <li>Νορβηγικό Noremeter RUNAR </li> </ol>



Τύπος Μεθόδου	Πρότυπο	Περιγραφή	Συσκευές
Κύλιση τροχών υπό γωνία Συνεχής μέτρηση	ASTM E670	Οι συσκευές αυτές μετρούν τη δύναμη τριβής ή την πλευρική δύναμη τριβής που είναι κάθετη προς την κατεύθυνση κίνησης ενός ή δύο ελαστικών υπό γωνία. Η παροχή του νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος είναι περίπου 1,2 l/λεπτό. Ένας ή δύο περιστρεφόμενοι τροχοί υπό γωνία ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια συνήθως στα 64km/h. Καταγράφονται: η πλευρική δύναμη τριβής, το φορτίο ελαστικών, η απόσταση και η ταχύτητα του οχήματος. Τα δεδομένα τυπικά συλλέγονται ανά 25 έως 125 mm και υπολογίζεται ο μέσος όρος σε διαστήματα των ~1 m.	<p>1. SCRIM</p>   <p>2. Βρετανικό Mu-Meter</p> 
Φορητή συσκευή Στατική μέτρηση	ASTM E303 ASTM E1911	Για τη λειτουργία τους χρησιμοποιείται η θεωρία του εκκρεμούς για τη μέτρηση της τριβής στο εργαστήριο ή επιτόπου στο οδόστρωμα. Στο βρετανικό εκκρεμές (BPT-British Pendulum Tester), το ελαστικό του πέλματος έρχεται σε επαφή υπό χαμηλή ταχύτητα με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η ανύψωση στην οποία μετακινείται ο βραχίονας μετά την επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος 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 3.6 l/λεπτό. Η ταχύτητα περιστροφής, η περιστροφική ροπή και το κατακόρυφο φορτίο μετρώνται και καταγράφονται ηλεκτρονικά.	<p>1. Pendulum Tester (BPT)</p>  <p>2. Dynamic Friction Tester (DFT)</p> 
Επιταχυνσιόμετρο Στατική μέτρηση	ASTM E2101	Μετρούν την επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Η συσκευή τοποθετείται σε ένα όχημα που προκαλεί απότομη πέδηση όταν κινείται με ταχύτητα από 20 – έως 30 km/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.	<p>1. Vericom</p> 

Τύπος Μεθόδου	Πρότυπο	Περιγραφή	Συσκευές
Οπτική μέθοδος – λέιζερ Συνεχής μέτρηση	ASTM E 1845 ISO 13473-1 ISO 13473-2 ISO 13473-3	Αυτός ο τύπος συστημάτων καταγραφεί το προφίλ της επιφάνειας – κυρίως την μακροϋφή. Συνήθως συνοδεύονται από συστήματα γεωγραφικού προσδιορισμού θέσης – GPS. Η ανάλυση του προφίλ παρέχει μία εκτίμηση για τον παρεχόμενο συντελεστή τριβής.	1. FHWA ROSAN system 

Σε μία από τις πρώτες ολοκληρωμένες μελέτες στο θέμα της αντιολισθητικής ικανότητας αναφέρεται ότι κάθε μέθοδος μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας έχει πλεονεκτήματα. Ανάλογα με την κατάσταση που χρειάζεται κάποιος να καταγράψει, θα επιλέξει την αντίστοιχη συσκευή (Henry 2000).

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,  $\mu$ . Η αντιολισθητική ικανότητα αναφέρεται ως δύναμη τριβής (FN-Friction Number) ή αριθμός αντιολισθητικής ικανότητας (SN-Slip Number). Η καταγραφή της αντιολισθητικής ικανότητας γίνεται συνήθως περιοδικά σε οδούς υπό λειτουργία. Βασικό μειονέκτημα των περισσότερων συστημάτων συνεχούς καταγραφής, αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως σε ευθύγραμμα τμήματα χωρίς μεγάλες καμπύλες, ή κυκλικούς κόμβους. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα συστήματα που παρουσιάστηκαν είναι αρκετά εξελιγμένα, φιλικά 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,  $\mu$ . 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 ή μετά την κατασκευή τους. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι λαμβάνουν μετρήσεις πάντα με καθορισμένη ταχύτητα ολίσθησης. Δηλαδή, οι ταχύτητες ολίσθησης δεν συμπίπτουν πάντοτε με την κρίσιμη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες νερού σε συνεχή λειτουργία και απαιτείται διόρθωση των δεδομένων συλλογής. Ωστόσο, καταγράφονται δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας σε υψηλή ανάλυση.

Η μέθοδος μεταβλητής ολίσθησης αφορά στην πέδηση με ABS. Οι δείκτες που προκύπτουν είναι:

— Η τιμή τριβής λόγω διαμηκών δυνάμεων



- *Η τιμή του συντελεστή τριβής στην κορυφή της καμπύλης του συντελεστή τριβής συναρτήσει του ποσοστού διολίσθησης*
- *Η τιμή κρίσιμης ολίσθησης*
- *Ο λόγος τριβής/ ποσοστού διολίσθησης*
- *Η τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας*
- *Ο συντελεστής σχήματος ή αλλιώς η κλίση της καμπύλης του συντελεστή τριβής συναρτήσει του ποσοστού διολίσθησης*

Τα συστήματα παρέχουν τιμές FN. Η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μπορεί να γίνει τόσο σε ευθύγραμμα τμήματα όσο και σε καμπύλες σε δίκτυα υπό λειτουργία είτε μετά την κατασκευή τους. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί ότι πρόκειται για έναν μεγάλο και πολύπλοκο εξοπλισμό με ιδιαίτερα υψηλό κόστος συντήρησης και πολύπλοκες ανάγκες επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται 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 τόσο σε ευθύγραμμα τμήματα όσο και σε καμπύλες. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως στην Ευρώπη, ενώ στις Η.Π.Α χρησιμοποιείται κυρίως για αεροδρόμια. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ευαισθησία στις οδικές ανωμαλίες (λακκούβες, ρωγμές, κλπ). Ωστόσο, επιτυγχάνεται μία 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 έχει συνδεθεί περισσότερο με την μικροϋφή ενώ χρησιμοποιείται για επιφάνειες οδοστρωμάτων στο πεδίο ή στο εργαστήριο. Η φορητή συσκευή DFT υπολογίζει συντελεστές τριβής και ένα γράφημα του συντελεστή τριβής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Επίσης καθορίζει την 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 τέτοιου τύπου είναι τα παρακάτω:

- *Η μεταβλητότητα του BPN είναι μεγάλη και μπορεί να επηρεαστεί από τις διαδικασίες χειριστή και τον άνεμο.*
- *Απαιτείται έλεγχος της κυκλοφορίας 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 των οδών ενός δικτύου.*

- Για να καταγραφεί μία πλήρης μέτρηση σε ένα δεδομένο τμήμα του οδοστρώματος, πρέπει να πραγματοποιηθούν αρκετές μετρήσεις στο μήκος του τμήματος, και τελικώς η μέση τιμή να χαρακτηρίσει την συγκεκριμένη θέση μέτρησης.

Ωστόσο, η συσκευή 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 τα αποτελέσματα της συσκευής BPT.

Ο υπολογισμός του συντελεστή τριβής επιφάνειας ενός οδοστρώματος με τη χρήση επιταχυνσιόμετρου γίνεται μετρώντας τη δύναμη επιβράδυνσης. Η επιβράδυνση μπορεί να μετρηθεί απευθείας για πλήρη ακινητοποίηση του οχήματος ή να καθοριστεί ως διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής επιβράδυνσης διαιρούμενη με το χρόνο πέδησης. Χρησιμοποιείται σε ευθύγραμμα τμήματα κυρίως για την ενίσχυση ερευνών αναφορικά με τις οδικές συγκρούσεις. Το βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτείται ξαφνικός ελιγμός πέδησης αλλά οι χειρισμοί αυτοί δεν είναι λειτουργικά επιθυμητοί. Επίσης, 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.

Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν αναπτυχθεί και μέθοδοι ανάλυσης εικόνας και μακροϋφής με στόχο να παρέχουν μία εκτίμηση του παρεχόμενου συντελεστή τριβής (Masad et al. 2007, Masad et al. 2010, Araujo et al. 2015, Yan et al. 2019). Βέβαια, οι εν λόγω μέθοδοι δεν είναι ευρέως γνωστές και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε έρευνες.

Κατά καιρούς έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες δοκιμές με στόχο την εναρμόνιση των συστημάτων μέτρησης του συντελεστή τριβής ώστε τα αποτελέσματά τους να καθίστανται συγκρίσιμα. Το πιο γνωστό εξ αυτών πραγματοποιήθηκε από την PIARC το 1992 όπου έγινε μια εκτενής έρευνα για την εναρμόνιση των τότε διαθέσιμων συστημάτων μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας ώστε να καταστούν συγκρίσιμα, στην οποία συμμετείχαν εκπρόσωποι από 16 χώρες. Συγκεκριμένα, 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 (Wambold et al. 1995).

Το πείραμα της PIARC απέδειξε ότι η μακροϋφή επηρεάζει την ταχύτητα ολίσθησης. Επίσης μια απότομη αρνητική κλίση της καμπύλης ταχύτητας ολίσθησης-συντελεστή τριβής θεωρείται επικίνδυνη καθώς ο οδηγός θα αντιμετωπίσει μια απροσδόκητη απώλεια ελέγχου όταν το πεντάλ φρένου ωθηθεί στο μέγιστο αλλά η ισχύς πέδησης δεν είναι η μέγιστη. Επομένως, η επιθυμητή αρνητική κλίση είναι 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 1 έως 500km/h. Ο δείκτης IFI υπολογίζεται στην χαρακτηριστική τιμή των 60 km/h (Hall et al. 2009).

Ο δείκτης IFI αποτελείται από δύο συνιστώσες, το  $F(60)$  και την ταχύτητα  $S_p$  και συμβολίζεται  $IFI(F(60), S_p)$ . Ο 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 4.1, 4.2, 4.3 (ASTM E1960):

$$S_p = a + b \times TX \quad (4.1)$$

όπου,

SP= Ταχύτητα δοκιμής

α, 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

$$FR(60)=FR(S)\times e^{((S-60)/S_p)} \quad (4.2)$$

όπου,

S<sub>p</sub>= 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

$$F(60)=A+B\times FR(60)+C\times TX \quad (4.3)$$

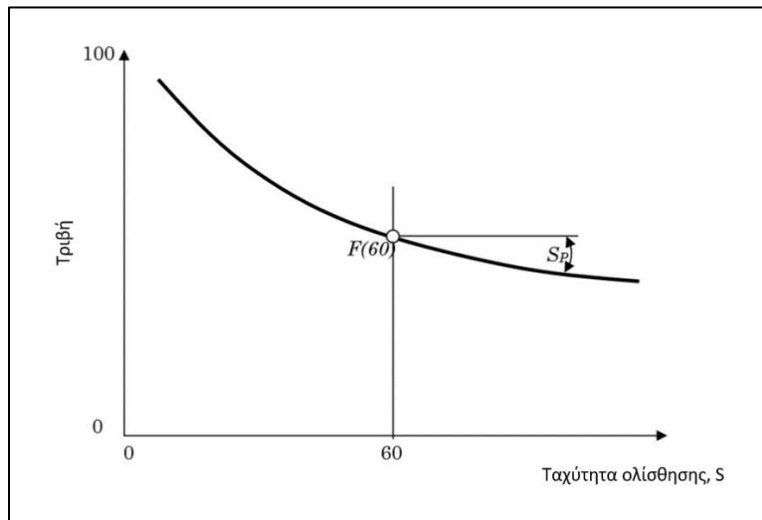
όπου,

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. Το διάγραμμα της Εικόνας 4.2 περιγράφει τον IFI μέσα από τη σχέση μεταξύ τριβής και ταχύτητας ολίσθησης (Hall et al. 2009).



Εικόνα 4.2: Μοντέλο του δείκτη IFI (Hall et al. 2009)

Η μέτρηση της ταχύτητας μπορεί να γίνει με φορητές συσκευές μέτρησης μακροϋφής. Το μοντέλο του δείκτη IFI αφορά για κατάσταση πέδησης σε έκτακτη ανάγκη χωρίς τη χρήση του συστήματος ABS. Ωστόσο, αξίζει αν σημειωθεί ότι αν και ο εν λόγω δείκτης έχει αξιοποιηθεί σε διάφορες έρευνες, δεν μπορεί να θεωρηθεί άκριτα αποδεκτός καθώς, τα αποτελέσματα του δεν είναι αντιπροσωπευτικά για όλα τα ήδη των οδών και των καταστάσεων σε αυτές.

#### 4.2.2 Σύστημα GripTester

Το σύστημα GripTester αποτελεί έναν από τους δημοφιλέστερους τρόπους μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας από το 1987 και εντάσσεται στις συσκευές συνεχούς μέτρησης με τη μέθοδο της σταθερής ολίσθησης στη διεύθυνση κίνησης του τροχού. Αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Cranfield και με την βοήθεια του TRL (Transport Research Laboratory) του Ηνωμένου Βασιλείου, τον διεθνή οργανισμό μεταφορών PIARC (Permanent International Association of Road Congresses), την U.S. 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. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε από την εταιρεία Findlay Irvine Limited στη Σκωτία για τη μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας στα οδοστρώματα των αεροδρομίων, αλλά έκτοτε χρησιμοποιείται εκτενώς διεθνώς και αποτελεί προϊόν της εν λόγω εταιρείας (Findlay Irvine, 2005).

Το σύστημα GripTester 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 συντήρησής του είναι χαμηλά και η ποιότητα των μετρήσεων που εξάγονται είναι εξαιρετικά υψηλή. Επομένως, το σύστημα GripTester είναι αρκετά δημοφιλές και λειτουργεί ευνοϊκά προς όσους το χρησιμοποιούν ώστε να μειώσουν το κόστος συντήρησης και να βελτιώσουν την ασφάλεια των οδικών δικτύων και των οδοστρωμάτων αεροδρομίων μέσω των παρακάτω (Walsh 2005, Wilson et al. 2013, Kogbara et al. 2018b, Martin 2019):

- Προσδιορίζοντας περιοχές με χαμηλό συντελεστή τριβής
- Καθορίζοντας τις προτεραιότητες για συντήρηση
- 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 αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας.

Αναφορικά με τη λειτουργία του συστήματος, το GripTester (Εικόνα 4.2) διαθέτει έναν τροχό δοκιμής που φρενάρει με σταθερό σύστημα ολίσθησης και δύο τροχούς κίνησης και ζυγίζει περίπου 85kg. Λειτουργεί με ένα μόνο δοκιμαστικό τροχό μέτρησης που περιβάλλεται από ένα λείο ελαστικό διαμέτρου 254 mm το οποίο καθορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E1844-08 (2015). 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 δεδομένα που λαμβάνονται από τη συσκευή είναι ο λόγος μεταξύ του κλάσματος της δύναμης έλξης ( $F_d$ ) και της δύναμης φορτίου ( $Q$ ). Πρόκειται για έναν αδιάστατο συντελεστής και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Ο λόγος ορίζεται στην εξίσωση 4.4:

$$GN = \frac{F_d}{Q} \quad (4.4)$$

όπου,

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

$F_d$ = Δύναμη έλξης (οριζόντια)

Q= Δύναμη βάρους (κατακόρυφη)

Η σταθερή ολίσθηση του πρότυπου ελαστικού του δοκιμαστικού τροχού 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 τροχό.



Εικόνα 4.3: Το σύστημα GripTester (μοντέλο MK2)





*Εικόνα 4.5: Παροχή νερού κάτω από το πρότυπο ελαστικό*

Η συσκευή GripTester είναι φορητή και πρακτική για μεταφορά καθώς μπορεί να ρυμουλκηθεί από οποιοδήποτε όχημα ρυμούλκησης (Εικόνα 4.6). Η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον χειριστή επί τόπου σε μερικά λεπτά και ο υπολογιστής στον οποίο συλλέγονται τα δεδομένα 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 4.6: Επιτόπου μέτρηση με το σύστημα GripTester (MK2) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ*

Το ΤRL του Ηνωμένου Βασιλείου έχει δημιουργήσει μία συσχέτιση του συστήματος GripTester 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. Παρά ταύτα, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε με τίτλο «Συσχέτιση υφής με χρήση φωτογραμμετρίας κοντινής εμβέλειας (CRP-Close Range Photogrammetry) και του συστήματος GripTester για τον υπολογισμό της αντιολισθητικής ικανότητας ενός οδοστρώματος» (Kogbara et al. 2018b) 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 2mm, η συσχέτιση ήταν αρκετά καλή (Kogbara et al. 2018b). Παρόλα τα θετικά χαρακτηριστικά της συσκευής υπάρχουν και κάποια 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 (Wilson et. al. 2013).
- Χρειάζεται αρκετή ποσότητα νερού κατά τη φάση συνεχούς λειτουργίας για την συλλογή δεδομένων πεδίου.
- Απαιτείται ευελιξία από τον χειριστή για την εναρμόνιση των αποτελεσμάτων που εξάγονται. Όταν για παράδειγμα, η συσκευή εξάγει τιμές που είναι πολύ μικρές ή πολύ μεγάλες, πέρα από το εύρος τιμών που αναμένεται (0-1 GN), ο αρμόδιος για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων θα 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 δεξί ίχνος τροχού μιας οδικής λωρίδας. Αυτό σημαίνει ότι η μετρούμενη τιμή του συντελεστή τριβής είναι λίγο μεγαλύτερη από την πραγματική (Design Manual for roads and bridges 2015).

### 4.3 Συστήματα για μετρήσεις στο εργαστήριο

#### 4.3.1 Κατηγορίες

Οι δημοφιλείς μέθοδοι μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας σε εργαστηριακό περιβάλλον είναι αρκετά πιο περιορισμένες σε σχέση με το πεδίο. Η πιο γνωστή μέθοδος που είναι εν γένει εργαστηριακής φύσης είναι η μέτρηση της αντιολισθητικής ικανότητας μέσω της συσκευής W/S, η οποία εκτός από τη διαδικασία λείανσης-στίλβωσης των αδρανών μπορεί να παρέχει και μετρήσεις του συντελεστή τριβής – πρόσφυσης στα δοκίμια που ελέγχονται. Ακόμα, η συσκευή Βρετανικό εκκρεμές (BPT) (Εικόνα 4.7) και η συσκευή Dynamic Friction Tester (ASTM E1911 – 19 2019) (Εικόνα 4.8) μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο σε εργαστηριακό περιβάλλον, όσο και στο πεδίο.



Εικόνα 4.7: Βρετανικό εκκρεμές – BPT (British Pendulum Tester)





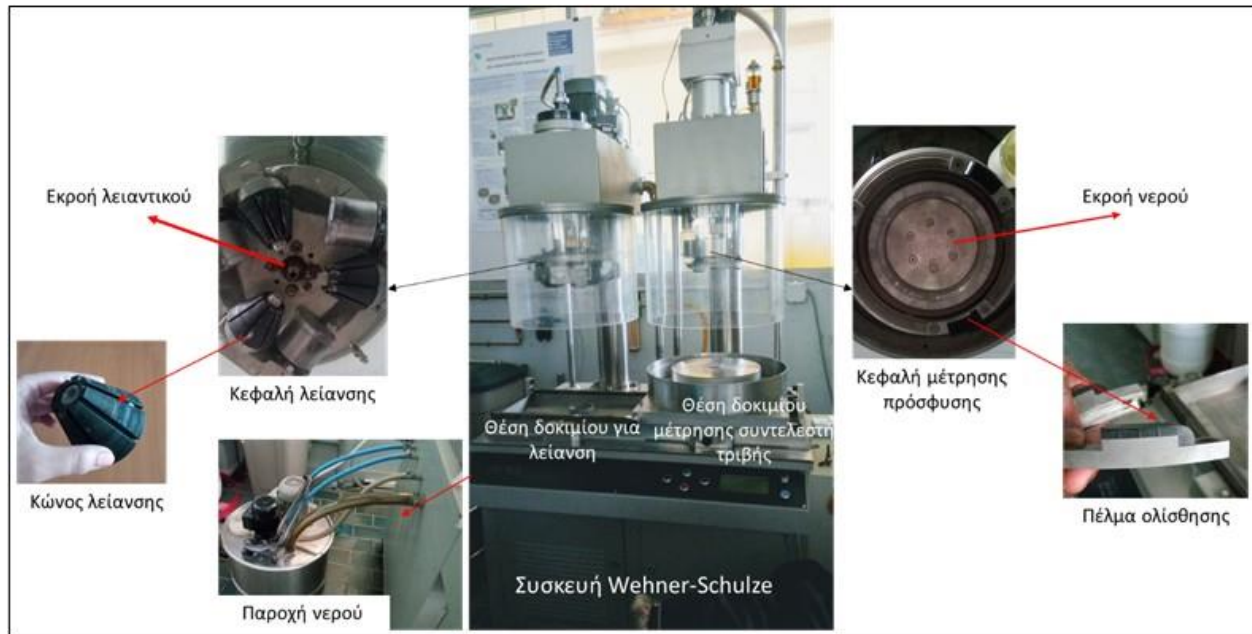
Εικόνα 4.8: Dynamic Friction Tester (DFT) (ASTM E1911 – 19 2019)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, έχουν αναπτυχθεί και διάφορες μέθοδοι ανάλυσης εικόνας και κυρίως μακροϋφής με στόχο να παρέχουν μία εκτίμηση του παρεχόμενου συντελεστή τριβής, όμως δεν είναι ευρέως γνωστές και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε έρευνες (Rezaei et al. 2011, Kassem et al. 2013, Bessa et al. 2014, Araujo et al. 2015). Γενικά, τα πιο διαδομένα συστήματα για εργαστηριακή χρήση είναι η συσκευή W/S και το BPT και γι' αυτό το λόγω τόσο η λειτουργία, όσο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

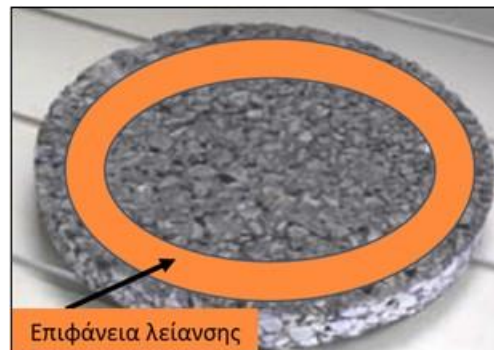
#### 4.3.2 Η συσκευή Wehner-Schulze (W/S)

Η συσκευή Wehner-Schulze (W/S) αναπτύχθηκε περί το 1960 από τους καθηγητές Wehner και Schulze στο Πανεπιστήμιο Technical University of Berlin (TUB) της Γερμανίας, ως μία εναλλακτική μέθοδος στίλβωσης των αδρανών αντί της δοκιμής PSV. Κατά τη δεκαετία του 1990 και έπειτα αναπτύχθηκε περισσότερο και έγινε γνωστή ως συσκευή W/S. Ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα της εν λόγω συσκευής είναι ότι συνδυάζει τη δυνατότητα λείανσης των δειγμάτων και της μέτρησης του συντελεστή τριβής-πρόσφυσης (τριβής) στις επιφάνειές τους. Επίσης, είναι εφικτή η δοκιμή τόσο εργαστηριακά παρασκευασμένων δοκιμίων όσο και δοκιμίων από το πεδίο. Βασική προϋπόθεση είναι τα δοκίμια που πρόκειται να ελεγχθούν να έχουν διάμετρο 225 mm και ύψος-πάχος 15-45 mm. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η χρήση της συσκευής ακολουθείται από το σχετικό πρότυπο CEN - EN 12697-49 (2017).

Η διαδικασία της λείανσης των δοκιμίων επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφής της κεφαλής λείανσης στην περίμετρο των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, η κεφαλή λείανσης διαθέτει τρεις περιστρεφόμενους κώνους που αποτελούνται από καουτσούκ και έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια των δοκιμίων, την φορτίζουν και ταυτόχρονα περιστρέφονται. Η διάμετρος που περιστρέφονται είναι περίπου 160 mm και το πάχος της επιφάνειας που λειανείται είναι 60 mm. Η Εικόνα 4.9 απεικονίζει τα βασικά μέρη της W/S και η Εικόνα 4.10 απεικονίζει την επιφάνεια λείανσης (Do et al. 2007, Do et al. 2009).



Εικόνα 4.9: Η συσκευή Wehner-Schulze (W/S) του IFSTTAR Centre de Nantes



Εικόνα 4.10: Μορφή δοκιμίου και επιφάνεια λείανσης (Do et al. 2009)

Τα κύρια στοιχεία του συστήματος λείανσης αποτελούνται από:

- Μια διάταξη προσάρτησης δοκιμίων που παρέχει μία ισόπεδη με παράλληλη ευθυγράμμιση – επιφάνεια δοκιμής.
- Μια μηχανοκίνητη περιστρεφόμενη κεφαλή εφοδιασμένη με τρεις κώνους που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια που πρόκειται να δοκιμαστεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λείανσης.
- Μία δεξαμενή ανάμιξης του λειαντικού μίγματος εφοδιασμένη με σύστημα ανάδευσης.
- Μια αντλία που παρέχει τη ροή λειαντικού μίγματος στην επιφάνεια του δείγματος.

Η διαδικασία της λείανσης διεξάγεται με επιταχυνόμενο τρόπο και καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής γίνεται συνεχής ρίψη λειαντικού μίγματος νερού και σκόνης στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το λειαντικό μίγμα θα πρέπει να είναι βάσει των σχετικών προδιαγραφών (Εικόνα 4.11).



**Εικόνα 4.11:** Σκόνη που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της δομικής της W/S

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας λείανσης της W/S, διαμορφώνονται ως εξής:

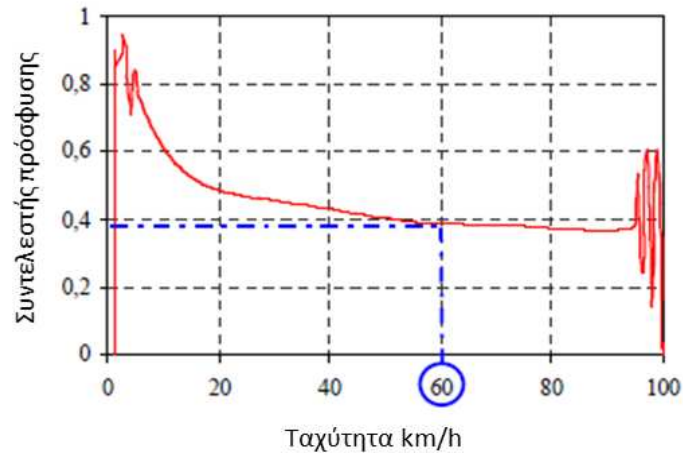
- Δύναμη που επιβάλλεται από την κεφαλή: 400 N (μάζα 40 kg) που αντιστοιχεί σε τάση περίπου 0,4 N/mm<sup>2</sup>.
- Ποσοστό ολίσθησης μεταξύ κώνων και επιφάνειας: μεταξύ 0,5 % - 1 %.
- Ταχύτητα κίνησης: περίπου 17 km/h.
- Συχνότητα περιστροφής: 500 περιστροφές το λεπτό (90000 περιστροφές την ώρα).
- Ρυθμός ροής λειαντικού μίγματος νερού-σκόνης: 5,0 l/min ± 10%. Το λειαντικό αποτελείται από ένα μείγμα νερού και παιπάλης χαλαζία με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 0,063 mm, τύπου Millisil W6 (Quarzwirke Frechen), με αναλογία 60 gr παιπάλης χαλαζία ανά λίτρο νερού.
- Θερμοκρασία δωματίου: <25 °C, θερμοκρασία νερού: περίπου 10 °C.

Η επιφάνεια στερέωσης του δείγματος είναι δακτυλιοειδής πλάτους περίπου 5 mm στην οποία το δείγμα τοποθετείται οριζόντια. Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά και το λειαντικό μίγμα θα πρέπει να ανανεώνεται πλήρως, το αργότερο μετά από δώδεκα δοκιμές λόγω της ρύπανσης από τα υλικά που έχουν αποκολληθεί από την επιφάνεια του δοκιμίου ή από τους κώνους. Η συσκευή μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να σταματήσει όποτε θελήσει ο χειριστής. Κάθε φορά που λήγει η δοκιμή το δοκίμιο υποβάλλεται σε 500 περιστροφές μόνο με τους κώνους ώστε να απομακρύνουν όλα τα κατάλοιπα και στην συνέχεια να μεταφερθεί στο θάλαμο μέτρησης του συντελεστή τριβής.

Ο θάλαμος μέτρησης του συντελεστή τριβής (πρόσφυσης) βρίσκεται ακριβώς δίπλα από τον θάλαμο που διεξάγεται η δοκιμή λείανσης και η μεταφορά των δοκιμίων γίνεται κυρίως χειρωνακτικά αν και τα τελευταία έτη στα πιο πρόσφατα μοντέλα της W/S, η διαδικασία γίνεται και αυτόματα. Το σύστημα μέτρησης της πρόσφυσης προσαρμόζεται σύμφωνα με το σύστημα της δοκιμής λείανσης για μετρήσεις κυκλικών επίπεδων δοκιμίων με διάμετρο 225 mm. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέθοδο μέτρησης του κλειστού ρυμουλκούμενου τροχού. Για την προσομοίωση της πρόσφυσης στην επιφάνεια των δοκιμίων χρησιμοποιούνται τρία ειδικά πέλματα από καουτσούκ επιφάνειας περίπου 4 cm<sup>2</sup> το καθένα, τα οποία τοποθετούνται σε ειδικές θέσεις ανά 120° επί κυκλικής μεταλλικής βάσης.

Στην αρχή της διαδικασίας μέτρησης, οι τρεις επιφάνειες από καουτσούκ πρώτα επιταχύνονται μέχρι μια κυκλική ταχύτητα περίπου 100 km/h. Όταν η ταχύτητα φτάσει τα 90km/h, περιχύνεται καθαρό νερό στην επιφάνεια του δείγματος και στη συνέχεια η περιστροφή επιβραδύνεται λόγω της επαφής των πελμάτων στην επιφάνεια του δοκιμίου υπό συνεχή διαβροχή. Η πίεση που ασκούν τα πέλματα στην επιφάνεια των δοκιμίων είναι περίπου 0.2 N/mm<sup>2</sup>. Οι περιστροφές σταματούν λόγω της επιβράδυνσης

από την επαφή των πελμάτων με την επιφάνεια του δοκιμίου. Οι τιμές της δύναμης τριβής-πέδησης καταγράφονται για ολόκληρο το εύρος περιστροφών έως ότου σταματήσουν. Γενικά, η τιμή πρόσφυσης επιλέγεται για την ταχύτητα των 60 km/h. Στην Εικόνα 4.12 φαίνεται όλο το φάσμα καταγραφής του κύκλου πέδησης για μία δοκιμή πρόσφυσης.



Εικόνα 4.12: Καμπύλη πέδησης για δοκιμή πρόσφυσης με τη συσκευή W/S

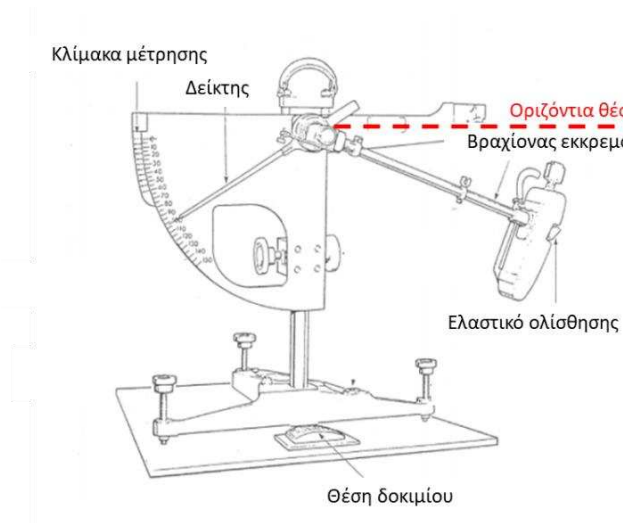
Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος μέτρησης πρόσφυσης έχουν ως εξής (Do et al. 2013b, Tang 2007):

- Μέση πίεση επαφής: περίπου 2.0 bar (ή 200 kPa).
- Επιφάνεια επαφής: 82 cm<sup>2</sup>.
- Μήκος του ίχνους μέτρησης: 565mm ανά περιστροφή του δακτυλίου μέτρησης.
- Ροή νερού: 20 l/min;
- Θερμοκρασία: 12 °C ± 4 °C.

#### 4.3.3 Η συσκευή British Pendulum Tester (BPT)

Το Βρετανικό Εκκρεμές είναι μία συσκευή μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960 στο Ηνωμένο Βασίλειο. Πρόκειται για μια φορητή συσκευή που μπορεί να παρέχει μετρήσεις τόσο στο πεδίο όσο και σε δοκίμια εργαστηρίου. Ξεχωρίζει λόγω της απλότητας στη χρήση της και το χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης (συγκριτικά με άλλες συσκευές) επίσης, είναι ελαφριά και ιδανική για συγκεκριμένες μετρήσεις. Ωστόσο, μπορεί να παρέχει μόνο σημειακές ενδείξεις κάτι που αποκλείει τη χρήση της για μεγάλα μήκη οδών ή οδικών αξόνων.

Τα βασικά μέρη της συσκευής είναι ο βραχίονας εκκρεμούς που φέρει ένα προτυποποιημένο ελαστικό ολίσθησης στο κατώτερο τμήμα του, το οποίο έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος όταν ο βραχίονας απελευθερωθεί από οριζόντια θέση (Εικόνα 4.13) (ASTM E303 – 93, 2018).



Εικόνα 4.13: Βρετανικό εκκρεμές – BPT

Συγκεκριμένα το BPT τοποθετείται και οριζοντιώνεται αναφορικά με την επιφάνεια που πρόκειται να ελεγχθεί. Στην συνέχεια ο βραχίονας ελέγχεται ώστε να έχει κατάλληλο ύψος σε σχέση με την επιφάνεια, δηλαδή η ολίσθηση να γίνει εντός συγκεκριμένου μήκους που ορίζεται από ειδικό χάρακα και έπειτα, η επιφάνεια διαβρέχεται με κατάλληλο ψεκαστικό βοήθημα (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14: Βοηθητικά εξαρτήματα BPT

Για τη διεξαγωγή της μέτρησης απελευθερώνεται ο βραχίονας – εκκρεμές ο οποίος είναι κλειδωμένος σε οριζόντια θέση. Το εκκρεμές φτάνει την ταχύτητα των 10 km/h λόγω της βαρύτητας την στιγμή που το ελαστικό έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Το ύψος του βραχίονα (ή η γωνία) καθορίζει το ποσό της κινητικής ενέργειας που μετατρέπεται σε άλλη μορφής ενέργειας κατά την διάρκεια της επαφής. Αυτή η κινητική ενέργεια του βραχίονα απομειώνεται λόγω της τριβής του ελαστικού με την επιφάνεια οδοστρώματος και ένα μέρος της, κινεί τον δείκτη (ορολογικά) σε μία θέση επάνω στην αναγραφόμενη κλίμακα, δίνοντας την ένδειξη British Pendulum Number (BPN).

Η θέση του δείκτη ή αλλιώς η ένδειξη BPN εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Δηλαδή, μία αδρή επιφάνεια προκαλεί μεγαλύτερη τριβή στο ελαστικό άρα η αρχική κινητική ενέργεια του εκκρεμούς μεταφέρεται αρκετά απομειωμένη στον δείκτη ο οποίος μετακινείται ελάχιστα και συνεπώς η ένδειξη είναι υψηλή. Αντίθετα, σε ένα οδόστρωμα λιγότερο αδρό ο δείκτης μετακινείται αρκετά παρέχοντας χαμηλότερη τιμή BPN. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης ξεκινώντας από κάθετη θέση και έχοντας ορολογική φορά συναντά πρώτα τις υψηλότερες τιμές BPN (αδρή επιφάνεια) και έπειτα της χαμηλότερες (λιγότερο αδρή επιφάνεια).

Σε περίπτωση διεξαγωγής μετρήσεων με το BPT στο πεδίο απαιτείται έλεγχος της κυκλοφορίας για την προστασία της συσκευής αλλά και του χειριστή. Η δοκιμή σε μία θέση διαρκεί περίπου 20-30 λεπτά συμπεριλαμβανομένου του χρόνου ρύθμισης του οργάνου. Για την ολοκλήρωση μίας μέτρησης σε ένα σημείο απαιτούνται τουλάχιστον 4 με 5 δοκιμές, ο χειριστής καταγράφει τις ενδείξεις BPN και λαμβάνει τον μέσο όρο τους. Εάν ωστόσο υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, ο χειριστής θα πρέπει να ελέγξει το όργανο για πιθανή λανθασμένη ρύθμιση ή άλλον παράγοντα. Πιθανές αποκλίσεις μπορεί να υπάρχουν σε περίπτωση που διαφοροποιούνται οι χειριστές του οργάνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι απαιτείται τακτικός έλεγχος της φθοράς του ελαστικού το οποίο θα πρέπει να αντικαθίσταται τακτικά για την ορθότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Ακόμα, η καταγραφή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των δοκιμών είναι ένα σημαντικό στοιχείο για τον χαρακτηρισμό της αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας που εξετάζεται. Τέλος, λόγω του μικρού φορτίου που φέρει το ελαστικό κατά την επαφή του με την επιφάνεια του οδοστρώματος, οι μετρήσεις εμφανίζουν ευαισθησία στον παράγοντα της μικροϋφής του οδοστρώματος, δίνοντας έτσι μία ένδειξη για το επίπεδο μικροϋφής της επιφάνειας που συντελεί στην παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα.



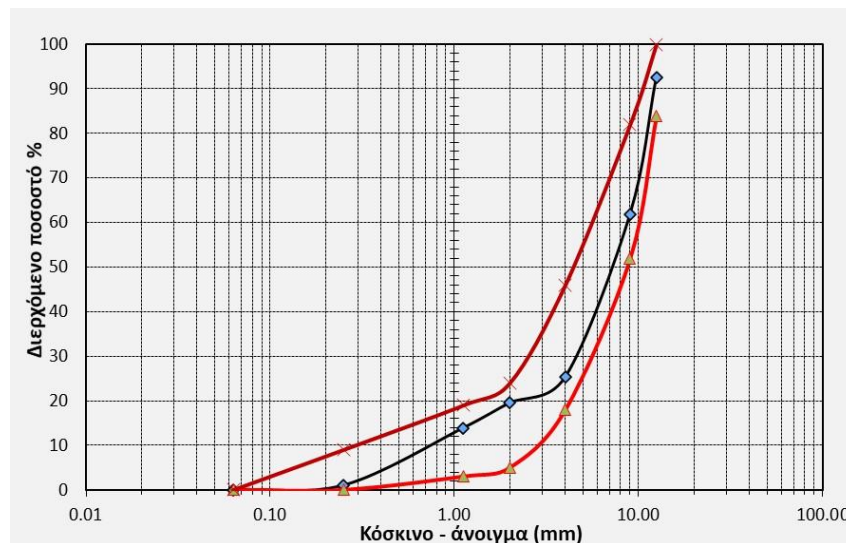
## 5 Πειραματική διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας στο εργαστήριο (Κλίμακα εργαστηρίου)

### 5.1 Παρασκευή δοκιμαστικών πλακών

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας παρασκευάστηκαν δοκιμαστικές πλάκες ασφαλτομίγματος διαφόρων τύπων στην Εργαστηριακή Μονάδα Δοκιμών & Χαρακτηρισμού Υλικών & Μιγμάτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Οι εν λόγω πλάκες αφορούν σε μίγματα αντιολισθητής στρώσης και οι όποιες διαφοροποιήσεις τους εντοπίζονται τόσο στη σύνθεση όσο και στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υλικών, η διαδικασία παρασκευής των πλακών και τα τελικά χαρακτηριστικά των δοκιμαστικών πλακών.

**A. Πλάκες από συμβατικό θερμό ασφαλτόμιγμα τύπου Hot-mix asphalt concrete (HMA) ανοιχτής σύνθεσης, που παρασκευάστηκε εξολοκλήρου σε εργαστηριακό περιβάλλον (κωδικός πλακών: R0).**

Το ασφαλτόμιγμα της κατηγορίας R0 σχεδιάστηκε με βάση τις προδιαγραφές για ασφαλτόμιγμα ανοιχτής σύνθεσης (Τύπος 2, Πίνακας 2.2) με μέγιστο μέγεθος κόκκων αδρανών 12,5 mm (ΕΛΟΤ, ΤΠ 1501-05-03-12-01, 2017), έτσι σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη της Εικόνας 5.1.



Εικόνα 5.1: Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών κατηγορίας R0

Για την παρασκευή του ασφαλτομίγματος έγινε προσθήκη ασφάλτου σε ποσοστό 5,4% κατά βάρος των αδρανών. Επίσης, η μέγιστη πυκνότητα του μίγματος ήταν  $2620 \text{ kg/m}^3$ , η οποία μετρήθηκε με τη μέθοδο Rise όπως περιγράφεται ακολούθως (Εικόνα 5.2). Η εν λόγω διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον μετέπειτα προσδιορισμό των κενών των πλακών που κατασκευάστηκαν.



**Εικόνα 5.2:** Δοκιμή Rise σε χαλαρό ασφαλτόμιγμα τύπου HMA

Αρχικά μία ποσότητα δείγματος ασφαλτομίγματος προετοιμάζεται και γίνεται διαχωρισμός των κόκκων χειρωνακτικά. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στο πυκνόμετρο και προστίθεται νερό θερμοκρασίας 25 °C μέχρι την πλήρη κάλυψη του υλικού. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται σε συσκευή δόνησης και ταυτόχρονα εφαρμόζεται υποπίεση για να αφαιρεθεί ο αέρας που είναι τυχόν εγκλωβισμένος μεταξύ των κόκκων του μίγματος.

Η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση 5.1 :

$$P_m = (m_2 - m_1) / V_p - ((m_3 - m_2) / \rho_w) \quad (5.1)$$

Όπου:

$m_1$ : η μάζα του πυκνόμετρου (kg)

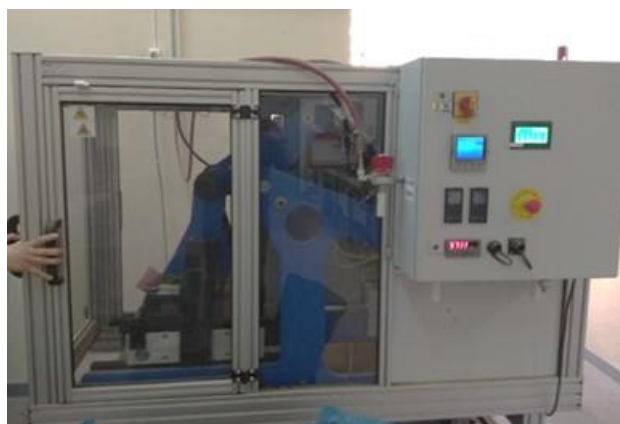
$m_2$ : η μάζα πυκνόμετρου και δείγματος ασφ/τος (kg)

$m_3$ : η συνολική μάζα πυκνόμετρου, δείγματος ασφ/τος και νερού (kg) στους 25°C

$V_p$ : ο όγκος του πυκνόμετρου ( $m^3$ ) και

$\rho_w$ : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου ( $kg/m^3$ )

Εν συνεχεία το δείγμα τοποθετείται εντός καλουπιών με στόχο την συμπίκνωσή του με τη συσκευή roller compactor (συμπύκνωση με κύλινδρο) (Εικόνα 5.3).



**Εικόνα 5.3:** Συμπύκνωση με κύλινδρο (roller compactor)



Για την παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν καλούπια διαστάσεων 305 mm x 305 mm και ύψους 40 mm. Το υλικό και τα καλούπια θερμάνθηκαν περίπου στους 170 °C και η συμπίκνωση των υλικών πραγματοποιήθηκε σε εύρος θερμοκρασίας 160-170 °C. Οι παρτίδες του παρασκευασμένου χαλαρού ασφαλτομίγματος τοποθετήθηκαν εντός των χαλύβδινων καλουπιών. Η ποσότητα του ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των καλουπιών βασίστηκε στη μέγιστη πυκνότητα του ασφαλτομίγματος και στο θεωρητικό (επιθυμητό) επίπεδο κενών αέρα. Η διαδικασία συμπίκνωσης με κύλινδρο που ακολουθήθηκε είναι σύμφωνη με το σχετικό πρότυπο (CEN - EN 12697-33, 2019). Η συγκεκριμένη μέθοδος συμπίκνωσης χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την προσομοίωση της συμπίκνωσης που πραγματοποιείται σε συνθήκες πεδίου. Η συσκευή αποτελείται από έναν μεγάλο κυρτό χαλύβδινο κύλινδρο που περιστρέφεται και ασκεί μια κινούμενη δύναμη παρόμοια με τις μηχανές που χρησιμοποιούνται σε συνθήκες πεδίου. Ένα στατικό φορτίο συμπίεσης εφαρμόζεται μέσω υδραυλικού συστήματος στο υλικό, έως ότου επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα κενών αέρα. Η διαδικασία συμπίκνωσης με κύλινδρο είναι μια στατική διαδικασία πλήρως αυτοματοποιημένη και με τη βοήθεια ενός κέντρου ελέγχου ο χειριστής επιλέγει τον αριθμό των περασμάτων του κυλίνδρου και το μέγεθος του φορτίου συμπίκνωσης.



*Εικόνα 5.4: Παρασκευασμένη πλάκα εντός του καλουπιού (μετά την συμπίκνωση)*

Η επιτευχθείσα περιεκτικότητα σε κενό αέρα των πλακών μετά την ολοκλήρωση της συμπίκνωσης ήταν περίπου 11% και μετρήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διαστάσεων όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM D3203 (ASTM D3203 / D3203M-17 2017).

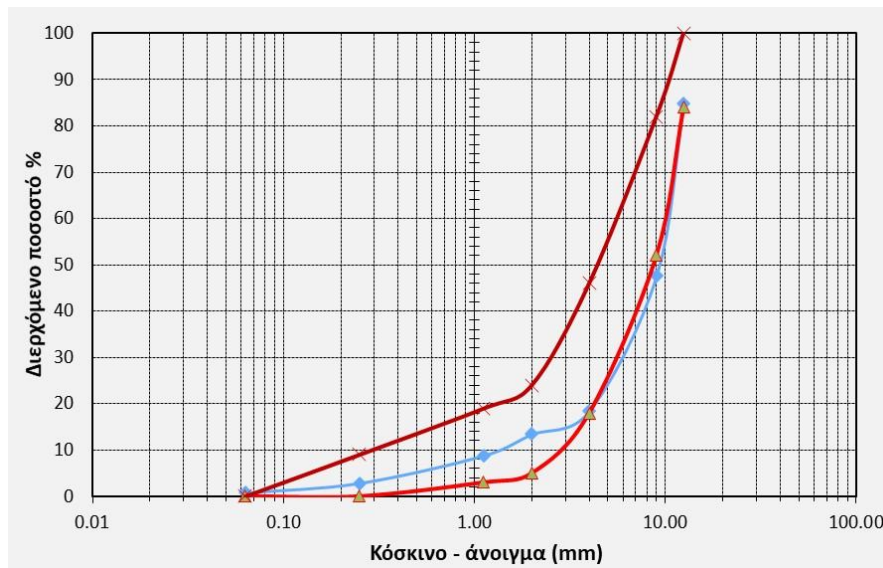
**Β. Πλάκες από συμβατικό θερμό ασφαλτόμιγμα τύπου Hot-mix asphalt concrete (HMA), ανοιχτής σύνθεσης, που παρασκευάστηκε εξολοκλήρου σε εξωτερική μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος με στόχο τη διάστρωση οδού ταχείας κυκλοφορίας (κωδικός πλακών: H100).**

Το χαλαρό ασφαλτόμιγμα της κατηγορίας H100 συλλέχθηκε πριν χρησιμοποιηθεί για τη διάστρωση της ανώτερης στρώσης κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομο στο πλαίσιο εργασιών αποκατάστασης. Οι πλάκες της κατηγορίας H100 προέρχονται από ασφαλτόμιγμα τύπου HMA, ανοιχτής σύνθεσης, με βάση το O-5 σχετικό πρότυπο της ASTM (ASTM D3515-01 2001). Εκτός των φυσικών αδρανών υλικών το εν λόγω ασφαλτόμιγμα περιέχει σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου στο σχεδιασμό του και σε αυτό προστέθηκε τροποποιημένη άσφαλτος τύπου 25-55/70 βαθμού διείδυσης. Ωστόσο, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει έλεγχος του ποσοστού άσφαλτου στο ασφαλτόμιγμα και προς τούτο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της εκχύλισης που περιγράφεται ακολούθως σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο της ASTM (ASTM D2172 – 95 2001).



*Εικόνα 5.5: Διαδικασία εκχύλισης ασφάλτου*

Το δείγμα του ασφαλτομίγματος θερμάνθηκε κατάλληλα, επιμερίστηκε σε 4 μέρη και τα δύο αντιδιαμετρικά χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω, τα οποία αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν στο ειδικό δοχείο της εκχύλισης. Επίσης, όλα τα μέρη του δοχείου ζυγίστηκαν και η μάζα τους καταγράφηκε σε ειδικό έντυπο. Στο δοχείο με το ασφαλτόμικμα εισήχθη ειδικός διαλύτης μέχρι την κάλυψη των αδρανών. Στην συνέχεια τοποθετήθηκε ένα ειδικό φίλτρο και η συσκευή τέθηκε σε κίνηση με συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα μέχρι να σταματήσει η ροή του διαλύτη με την άσφαλτο από τον σωλήνα εκροής. Έπειτα, προστέθηκε αντίστοιχη ποσότητα διαλύτη και η διαδικασία επαναλήφθηκε έως ότου η εξερχόμενη ποσότητα διαλύτη να ήταν όσο το δυνατόν πιο διαυγής σε περιεκτικότητα ασφάλτου. Έπειτα το καθαρό, πλέον από άσφαλτο, μίγμα αδρανών ξηράθηκε και ζυγίστηκε εκ νέου η μάζα του. Έτσι έμμεσα προέκυψε η ποσόστωση της ασφάλτου στο αρχικό ασφαλτόμικμα, ίση με 4,9% κατά βάρος του συνολικού ασφαλτομίγματος. Επιπροσθέτως, το μίγμα αδρανών ελέγχθηκε ως προς την κοκκομετρική του σύνθεση αναφορικά με τα όρια του ΕΛΟΤ, όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2.2. Ακολουθεί η κοκκομετρική καμπύλη που προέκυψε (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6: Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών ΗΜΑ υλικού μετά την εκχύλιση

Στην συνέχεια το ασφαλτόμιγμα συμπυκνώθηκε ομοίως με τις δοκιμαστικές πλάκες της κατηγορίας Η100 μέσω της μεθόδου του κυλίνδρου σύμφωνα με τη διαδικασία συμπύκνωσης που περιεγράφηκε προηγουμένως. Το ποσοστό κενών αέρα που επιτευχθήκαν μέσω της συμπύκνωσης μετρήθηκαν με τη μέθοδο διαστάσεων (ASTM D3203 / D3203M-17 2017) ήταν:

- Πλάκες 100% ΗΜΑ: Η100α 17.51%, Η100β 17.56%, Η100c 17% (κατασκευή τριών δειγμάτων)

**Γ. Πλάκες από εναλλακτικό θερμό ασφαλτόμιγμα τύπου Hot-mix asphalt concrete (ΗΜΑ) με προσθήκη τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού τύπου Reacted Activated Rubber – RAR, που παρασκευάστηκε εξολοκλήρου σε εργαστηριακό περιβάλλον (κωδικός πλακών: R10 (10% RAR), R20 (20% RAR), R40 (40% RAR)).**

Τα ασφαλτομίγματα αυτής της κατηγορίας παρασκευάστηκε παράλληλα με την κατηγορία R0 που θεωρήθηκε ως το ασφαλτόμιγμα αναφοράς (0% RAR). Στα ασφαλτομίγματα αυτού του τύπου, προστέθηκαν τρίμματα από καουτσούκ ως πρόσθετα, προερχόμενα από ανακυκλωμένα ελαστικά (crumb rubber) σε τρία ποσοστά, 10%, 20% και 40% κατά βάρος της ποσότητας της ασφάλτου με στόχο τον περιορισμό της αρχικής ζητούμενης περιεκτικότητας του ασφαλτομίγματος σε άσφαλτο (Εικόνα 5.7).



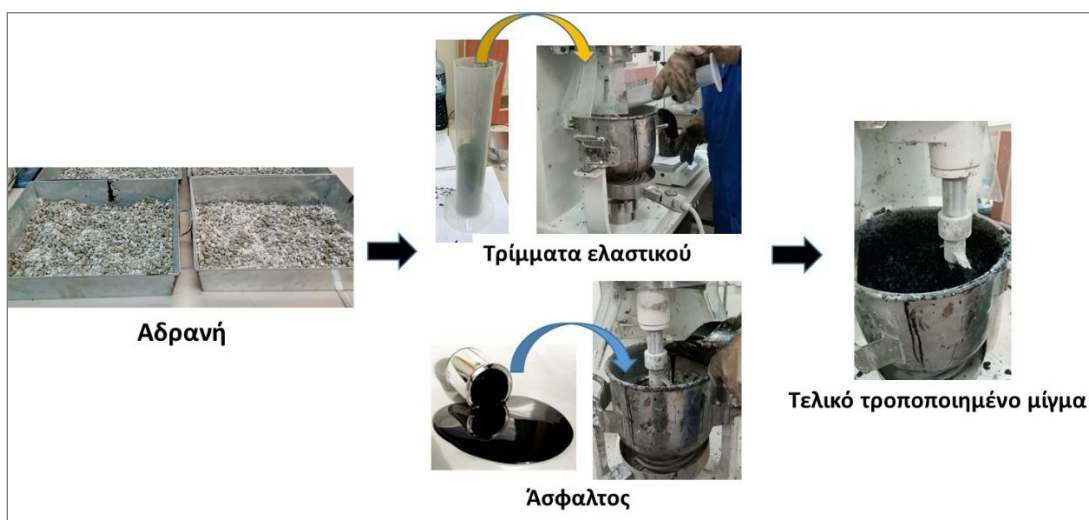
Εικόνα 5.7: Τρίμματα καουτσούκ από ανακυκλωμένο ελαστικό

Το εν λόγω υλικό, τύπου Reacted Activated Rubber – RAR όπως είναι η διεθνής ονομασία του, που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βιώσιμο τροποποιητικό και στη φυσική του κατάσταση είναι ένα μαύρο λεπτό ιξώδες υλικό με πυκνότητα όγκου  $0,6 \text{ gr} / \text{cm}^3$  και σημείο ανάφλεξης μεγαλύτερο από  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Τα μεμονωμένα σωματίδια RAR έχουν μέγεθος μικρότερο από 600 microns και η πλειοψηφία τους είχε μέγεθος μεταξύ 250-600 microns. Η Εικόνα 5.8 παρουσιάζει την πορεία χρήσης του υλικού σε έργα οδοποιίας, από την προέλευσή του έως την τελική του χρήση ως πρόσθετο.



Εικόνα 5.8: Προέλευση και χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε έργα οδοποιίας (Pomoni et al. 2020a)

Αναφορικά με την κατασκευή πλακών αυτής της κατηγορίας, το ανακυκλωμένο ελαστικό προστέθηκε σε ποσότητα αδρανών κατάλληλα προ-θερμασμένη (περί τους  $180^\circ\text{C}$ ), εντός ειδικού κάδου ανάμειξης (mixer). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάμειξη των δύο υλικών για περίπου 10-20s με στόχο να εξασφαλιστεί μια ομοιόμορφη κατανομή του ελαστικού στο μείγμα. Το επόμενο βήμα ήταν η προσθήκη της ασφάλτου 25/55-70 επίσης κατάλληλα προ-θερμασμένης ώστε να εξασφαλίζεται η ρευστότητά της. Στη συνέχεια, το μίγμα αναμίχθηκε περαιτέρω για επιπλέον χρόνο για να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του (Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9: Κατασκευή ασφαλτομίγματος με τη προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού

Το μίγμα στη συνέχεια μεταφέρθηκε αμέσως στον ειδικό φούρνο και διατηρήθηκε σε θερμοκρασία  $180^\circ\text{C}$  για μία ώρα στη διάρκεια της οποίας, το ασφαλτόμειγμα αναδεύτηκε πολλές φορές για να



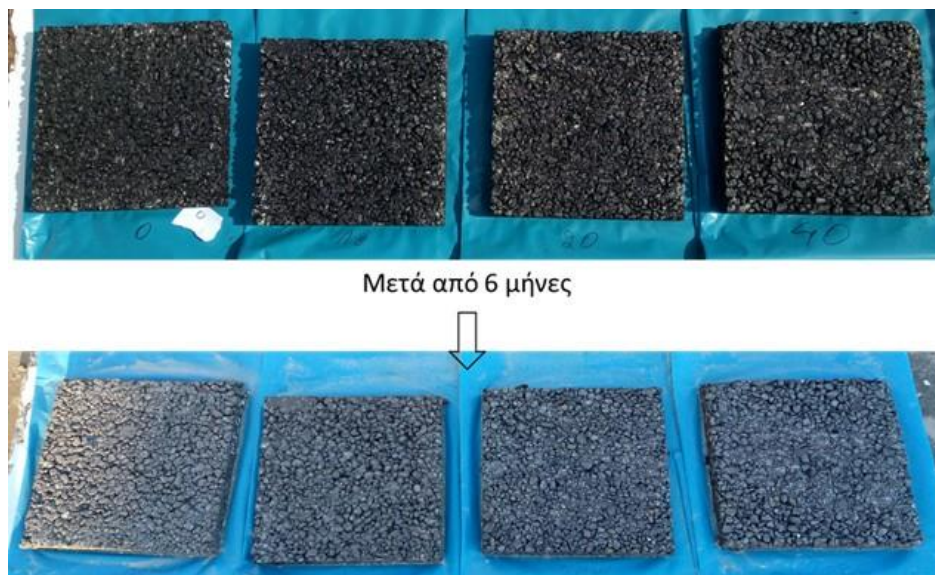
εξασφαλιστεί περαιτέρω ότι το πρόσμικτο υλικό ενσωματώθηκε πλήρως και ομοιογενώς στο συνολικό μίγμα. Για τα συγκεκριμένα μίγματα ωστόσο δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί το ποσοστό κενών εξαιτίας της δυσκολίας διαχωρισμού του χαλαρού μίγματος λόγω της ύπαρξης του ελαστικού που προκάλεσε προσκόλληση των αδρανών μεταξύ τους.

Η παρασκευή των πλακών ολοκληρώθηκε με την συμπύκνωση του υλικού μέσω της συσκευής roller compactor ομοίως με τις προηγούμενες κατηγορίες πλακών. Η Εικόνα 5.10 απεικονίζει τις δοκιμαστικές πλάκες μετά τη συμπύκνωση.



*Εικόνα 5.10: Πλάκες με περιεκτικότητα ανακυκλωμένου ελαστικού*

Από τα σετ πλακών που παρασκευάστηκαν, το ένα τοποθετήθηκε εντός του χώρου του εργαστηρίου υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Ενώ το δεύτερο σετ τοποθετήθηκε σε εξωτερικό χώρο για 6 μήνες (από φθινόπωρο έως άνοιξη) και εκτέθηκε σε πραγματικές καιρικές συνθήκες (ήλιος, βροχή, σκόνη, χιόνι, πάγος) (Εικόνα 5.11), ακολουθώντας μια παρόμοια προσέγγιση που ακολουθήθηκε σε σχετική έρευνα (Kane et al. 2013b).

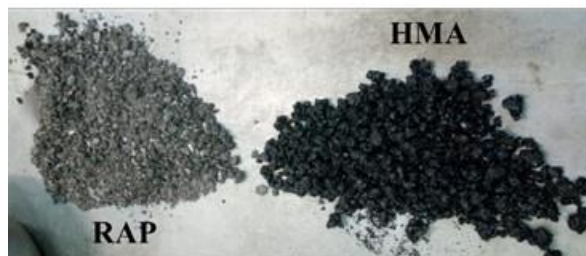


*Εικόνα 5.11: Πλάκες μετά από 6 μήνες έκθεση σε καιρικές συνθήκες*

Το δεύτερο σετ πλακών στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εξετάστηκε υπό την επίδραση της γήρανσης του υλικού έπειτα από την έκθεση των 6 μηνών, συγκριτικά με το πρώτο και έτσι ο κωδικός των εν λόγω πλακών αντιστοιχήθηκε σε Rx\_aged: R0\_aged, R10\_aged, R20\_aged, R40\_aged.

**Δ. Πλάκες από εναλλακτικό θερμό ασφαλτόμιγμα τύπου Hot-mix asphalt concrete (HMA) (από επιτόπου συλλογή) με προσθήκη RAP, ημι-ανοιχτής σύνθεσης, που παρασκευάστηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον (κωδικός πλακών: H70-30, H90-10, H88-12, H85-15).**

Για την παρασκευή των πλακών αξιοποιήθηκε ποσότητα ασφαλτομίγματος HMA και RAP.



*Εικόνα 5.12: RAP και HMA που χρησιμοποιήθηκαν για τις πλάκες κατηγορίας Δ*

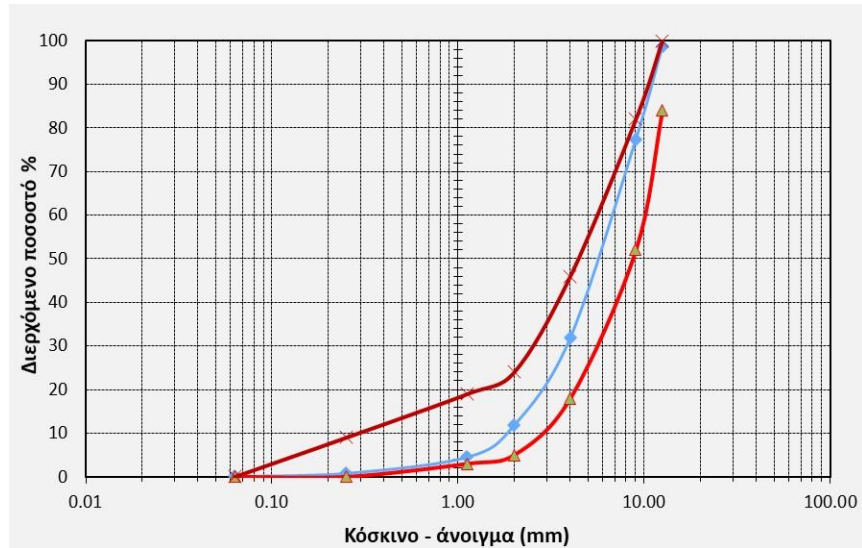
Συγκεκριμένα, στόχος ήταν να παρασκευαστούν πλάκες ασφαλτομίγματος με την αναλογία υλικών HMA ή και ποσοστού RAP που φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

*Πίνακας 5.1: Ποσοστά HMA και RAP για την κατασκευή των πλακών της κατηγορίας Δ*

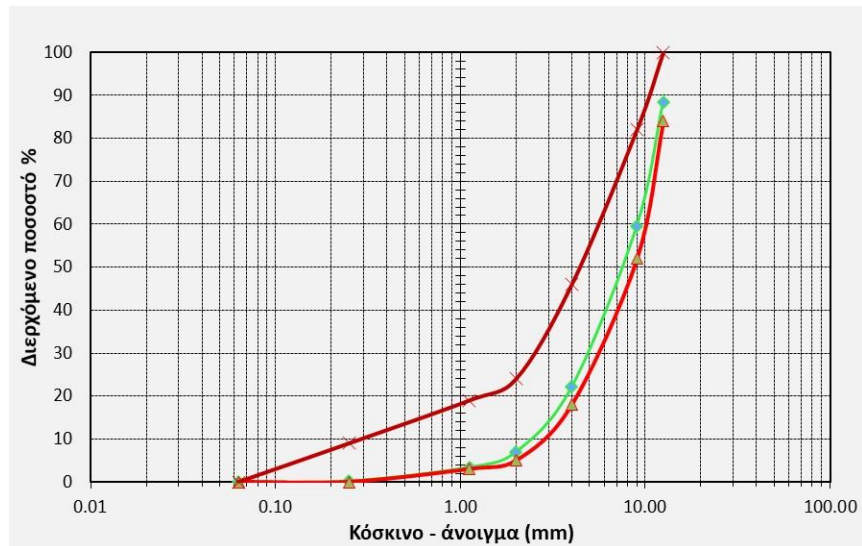
Όνομασία	HMA (%)	RAP (%)
H70-30	70	30
H90-10	90	10
H88-12	88	12
H85-15	85	15

Το χαλαρό HMA υλικό όπως αναφέρθηκε και στην κατηγορία H100 συλλέχθηκε πριν χρησιμοποιηθεί για τη διάστρωση της ανώτερης στρώσης κυκλοφορίας. Αντίστοιχα, το RAP υλικό προήλθε από την αφαίρεση παλιού ασφαλτομίγματος της στρώσης κυκλοφορίας πριν την ενσωμάτωση του συγκεκριμένου HMA. Έτσι το υλικό μεταφέρθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας και διαβαθμίστηκε κατάλληλα ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί σαν πρόσθετο στη σύνθεση νέου ασφαλτομίγματος. Εν γένει, η προσθήκη του RAP υλικού αξιοποιήθηκε κυρίως για τη μείωση της χρήσης φυσικών αδρανών στο νέο ασφαλτόμιγμα. Ωστόσο, πέραν τούτου η μικρή εναπομένουσα ποσότητα ασφαλτικού υλικού μπορεί να μειώσει, αν και ελάχιστα, την προσθήκη της ασφάλτου ως συνδετικό υλικό στο ασφαλτόμιγμα.

Ακολουθώς παρουσιάζονται η κοκκομετρική διαβάθμιση του RAP υλικού σε σχέση με τα όρια ΕΛΟΤ για ασφαλτόμιγμα ανοιχτής σύνθεσης (Τύπο 2) με μέγιστο κόκκο αδρανών 12.5mm. Επίσης, δίνονται οι κοκκομετρικές καμπύλες που αξιοποιήθηκαν για την τελική σύνθεση του ασφαλτομίγματος στις επιθυμητές αναλογίες (70-30, 90-10, 88-12, 85-15).

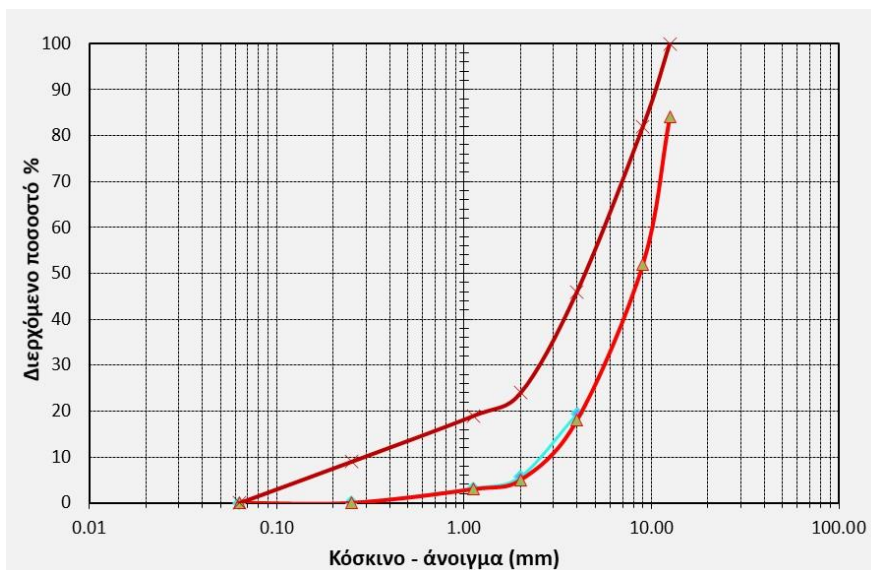


Εικόνα 5.13: Κοκκομετρική καμπύλη υλικού RAP

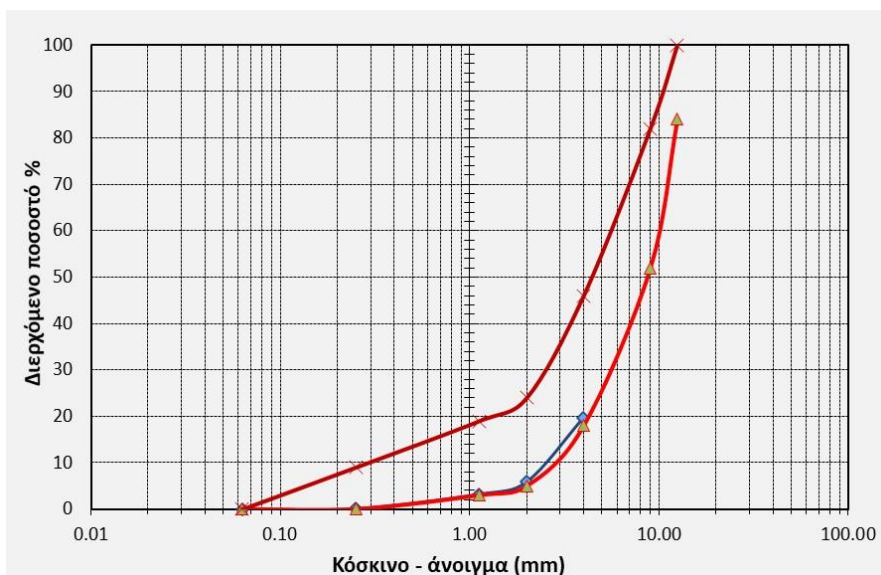


Εικόνα 5.14: Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 70% HMA – 30% RAP

Σημειώνεται δε, ότι στις περιπτώσεις αναλογίας HMA και RAP 90-10, 88-12, 85-15 αντίστοιχα, αξιοποιήθηκαν μόνο τα λεπτόκοκκα αδρανή από το RAP μίγμα αδρανών και συγκεκριμένα, όσα διέρχονταν από το κόσκινο διαμέτρου 4 mm ( $D < 4$  mm). Ως εκ τούτου, οι αντίστοιχες συνθέσεις παρουσιάζουν τη σύνθεση για αδρανή μικρότερα των 4mm, ενώ τα μεγαλύτερα αδρανή των μιγμάτων προέρχονταν εξ' ολοκλήρου από το υλικό HMA.

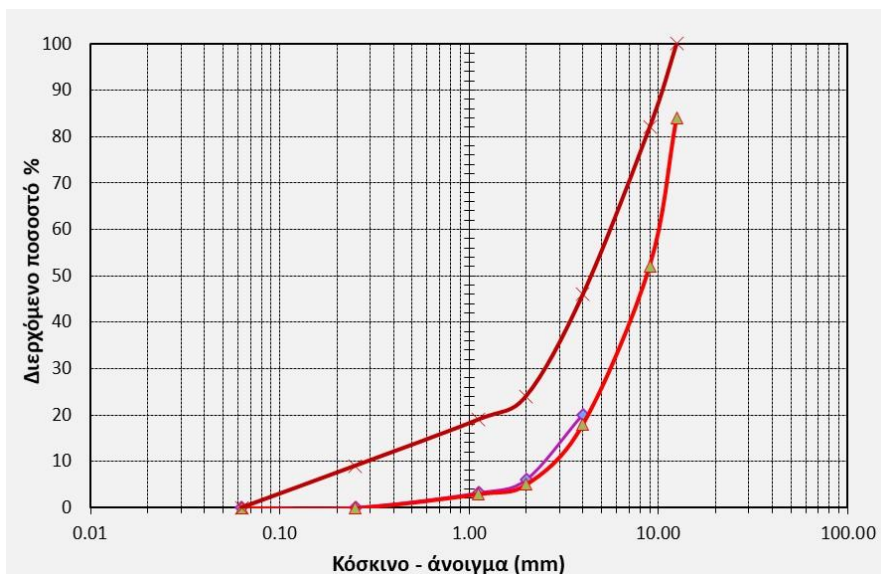


Εικόνα 5.15: Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 90% HMA – 10% RAP



Εικόνα 5.16: Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 88% HMA – 12% RAP





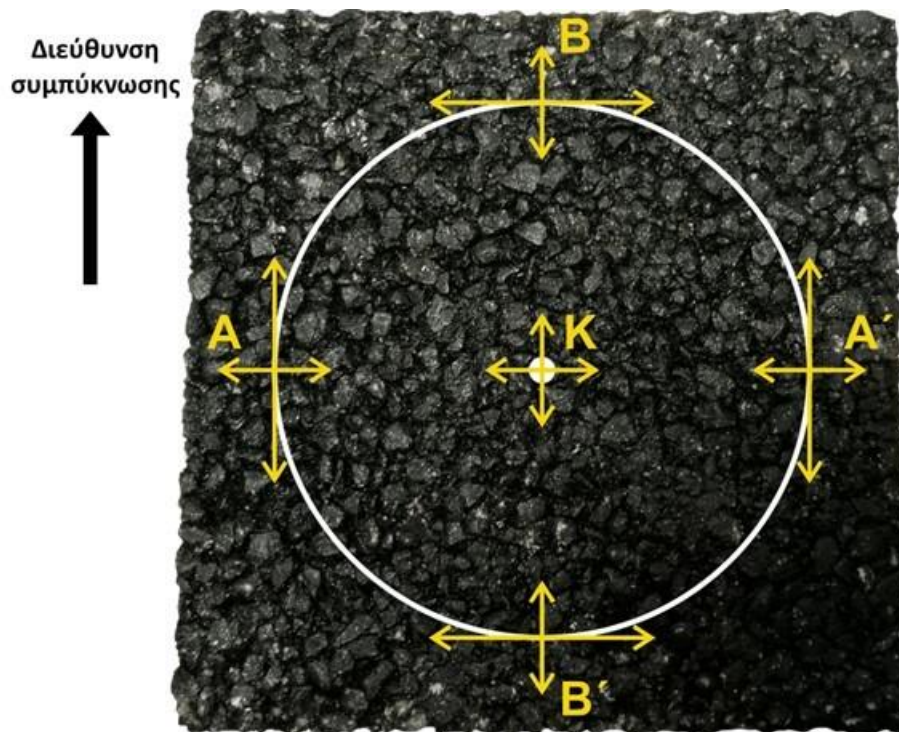
Εικόνα 5.17: Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης σε αναλογία 85% HMA – 15% RAP

Για την τελική σύνθεση του HMA και RAP, το μίγμα θερμάνθηκε σε φούρνο και προστέθηκε μικρή ποσότητα ασφάλτου (1% – 2% περίπου). Τόσο το αρχικό HMA όσο και το RAP αναμίχθηκαν επαρκώς για να παραχθεί ένα ομοιογενές μίγμα. Ομοίως με τις προηγούμενες κατηγορίες ασφαλτομιγμάτων το υλικό συμπυκνώθηκε με τη χρήση του roller compactor και υπολογίστηκαν τα κενά αέρα με τη μέθοδο των διαστάσεων τα οποία προέκυψαν ως εξής:

- Πλάκες 70% HMA – 30% RAP: H70-30a 9.9%, H70-30b 9.6%, H70-30c 7.65% (παρασκευή τριών δειγμάτων)
- Πλάκα 90% HMA – 10% RAP: 7.34%
- Πλάκα 88% HMA – 12% RAP: 7.7%
- Πλάκα 85% HMA – 15% RAP: 7.9%

## 5.2 Επίδραση της διεύθυνσης συμπύκνωσης στον συντελεστή τριβής

Στην παρούσα υποενοότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του συντελεστή τριβής με τη χρήση του συστήματος BPT σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των δοκιμαστικών πλακών με στόχο τη διερεύνηση της πιθανής επίδρασης της φοράς συμπύκνωσης μέσω του roller compactor στην παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα. Τα σημεία που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.18.

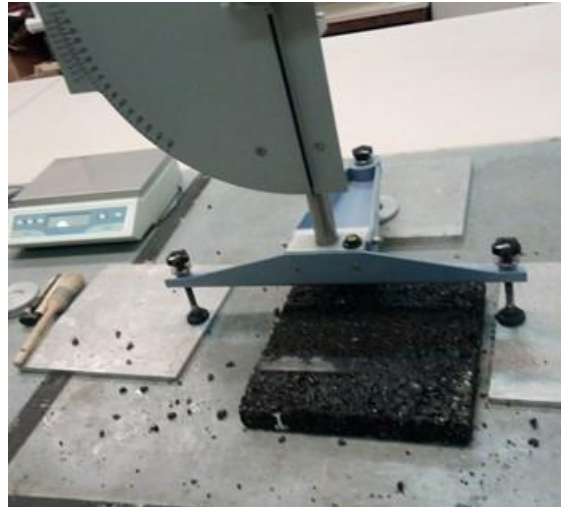


*Εικόνα 5.18: Σημεία μέτρησης συντελεστή τριβής αναφορικά με τη φορά συμπίκνωσης*

Σύμφωνα με την Εικόνα 5.18 η φορά της συμπίκνωσης ήταν παράλληλη με την ευθεία που διέρχεται από τα σημεία  $BB'$ . Οπότε, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα BPT στα σημεία  $A-A'$ ,  $B-B'$  και  $K$  τόσο στην παράλληλη προς τη συμπίκνωση διεύθυνση (άξονας  $BB'$ ) όσο και στην κάθετη (άξονας  $AA'$ ). Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στις εργαστηριακά παρασκευασμένες πλάκες ασφαλτομίγματος και συγκεκριμένα για τις πλάκες από εξ' ολοκλήρου HMA υλικό το οποίο παράχθηκε στο εργαστήριο (R0) καθώς και για τις πλάκες HMA με περιεκτικότητα ανακυκλωμένου ελαστικού ως πρόσμικτο (R10, R20, R40).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν τα στοιχεία έχουν ομαδοποιηθεί ανά άξονα μετρήσεων δηλαδή οι μετρήσεις για τα σημεία  $A$  και  $A'$  έχουν ομαδοποιηθεί ως  $AA'$ . Επίσης, συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμαστικών πλακών που εξετάστηκαν:

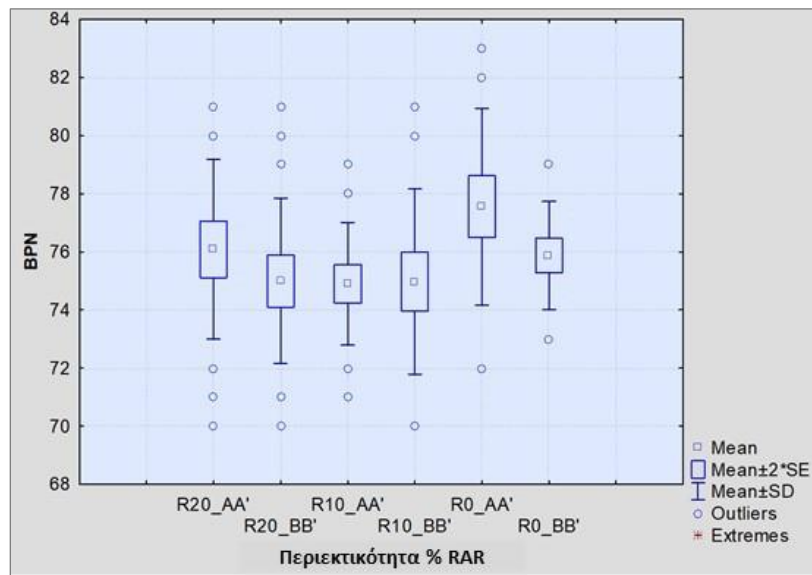
- **R0:** Πλάκες ασφαλτομίγματος εξ' ολοκλήρου από HMA υλικό χωρίς προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού (περιεκτικότητα RAR 0%).
- **R10:** Πλάκες ασφαλτομίγματος από HMA υλικό με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού RAR (περιεκτικότητα RAR 10%).
- **R20:** Πλάκες ασφαλτομίγματος από HMA υλικό με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού RAR (περιεκτικότητα RAR 20%).
- **R40:** Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για περιεκτικότητα 40% ανακυκλωμένου ελαστικού RAR, λόγω αποκόλλησης των επιφανειακών αδρανών κατά τη διεξαγωγή ενδεικτικών μετρήσεων (Εικόνα 5.19).



**Εικόνα 5.19:** Αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια πλακών με περιεκτικότητα 40% ανακυκλωμένο ελαστικό

Επίσης, σημειώνεται ότι η θερμοκρασία κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στην επιφάνεια των πλακών και στον περιβάλλοντα χώρο ήταν 16-18 °C.

Η Εικόνα 5.20 απεικονίζει τα θηκογράμματα (box-plots) τα οποία αφορούν στις μετρήσεις όλων των σημείων έχοντας σαν βάση διαχωρισμού το ποσοστό ανακυκλωμένου ελαστικού και τον άξονα AA' ή BB'.

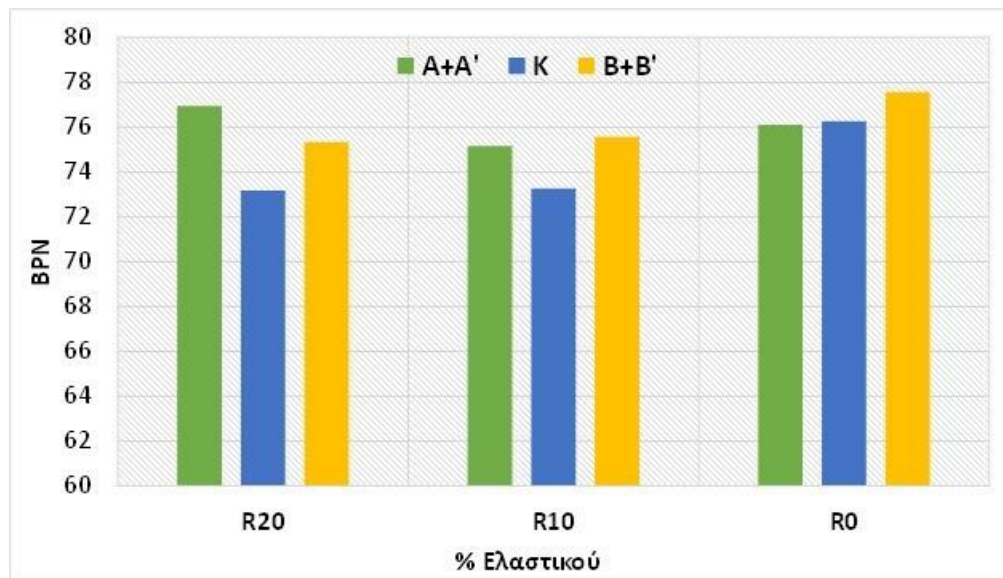


**Εικόνα 5.20:** BPN αναφορικά με το ποσοστό περιεκτικότητας ελαστικού ανά άξονα μετρήσεων (AA' και BB')

Με βάση το θηκογράμμα της Εικόνας 5.20, δεν προκύπτει σαφώς ότι η διεύθυνση συμπίκνωσης (// BB') μπορεί να επηρεάσει τον περιεχόμενο συντελεστή τριβής σε διεύθυνση κάθετη (AA') ή παράλληλη με αυτή (BB'). Ωστόσο, για τις περιπτώσεις περιεκτικότητας σε ελαστικό 20% και 0% ο κάθετος άξονας AA' εμφανίζει υψηλότερες τιμές BPN σε όλα τα σημεία.

Επιπροσθέτως, η Εικόνα 5.21 απεικονίζει τα ραβδογράμματα που αφορούν στις ίδιες μετρήσεις BPN, έχοντας πλέον ως βάση διαχωρισμού τα σημεία ομαδοποιώντας τους άξονες. Δηλαδή, για κάθε ποσοστό

περιεκτικότητας ελαστικού παρουσιάζονται οι μετρήσεις για κάθε ομάδα σημείων (A και A', K, B και B') ενοποιώντας τους άξονες AA' και BB'. Στόχος του συγκεκριμένου διαχωρισμού ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της θέσης των σημείων (περιμετρικά ή κεντρικά) στον συντελεστή τριβής.



Εικόνα 5.21: BPN αναφορικά με το ποσοστό περιεκτικότητας ελαστικού ανά τα σημεία μετρήσεων (περιμετρικά ή κεντρικά)

Από την Εικόνα 5.21, διαφαίνεται ότι τα σημεία περιμετρικά των πλακών εμφανίζουν υψηλότερες τιμές BPN απ' ό τι στο κέντρο κυρίως στις πλάκες με περιεκτικότητα ελαστικού. Η εν λόγω παρατήρηση πιθανώς συνδέεται με τη μορφή της μεθόδου συμπύκνωσης όπου το υλικό στο κέντρο του καλουπιού συμπυκνώνεται πιο αποτελεσματικά. Επίσης, υπήρξε συσσώρευση μεγάλης ποσότητας ελαστικού στο κέντρο των πλακών.

### 5.3 Μακροϋφή επιφάνειας πλακών

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας οι μετρήσεις μακροϋφής σε εργαστηριακό περιβάλλον πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της κηλίδας της άμμου (Sand Patch) η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην **Ενότητα 3.4.2**.

Συνεπώς, για την κάθε πλάκα πραγματοποιήθηκε η μέθοδος προσδιορισμού της μακροϋφής αξιοποιώντας τον σχετικό εξοπλισμό και γνωστή ποσότητα άμμο ίση με 46 ml, η οποία διαστρώθηκε σε κυκλικό σχήμα στην επιφάνειά τους.





Εικόνα 5.22: Κηλίδα της άμμου σε πλάκες με διαφορετικά χαρακτηριστικά

Ο Πίνακας 5.2 εμφανίζει τα επίπεδα μακροϋφής για την εκάστοτε πλάκα ανά κατηγορία, όπως προέκυψε μέσω της Εξίσωσης 3.6.

Πίνακας 5.2: Μακροϋφή παρασκευασμένων πλακών

Ονομασία	Χαρακτηριστικά πλάκας	MTD (mm)
<b>R0</b>	Πλάκα με ανακυκλωμένο ελαστικό, περιεκτικότητας RAR 0 %	1.73
<b>R10</b>	Πλάκα με ανακυκλωμένο ελαστικό, περιεκτικότητας RAR 10 %	1.58
<b>R20</b>	Πλάκα με ανακυκλωμένο ελαστικό, περιεκτικότητας RAR 20 %	1.47
<b>H100a</b>	1 <sup>η</sup> Πλάκα με 100% HMA, ασφαλτόμιγμα από μονάδα παραγωγής	1.54
<b>H100b</b>	2 <sup>η</sup> Πλάκα με 100% HMA, ασφαλτόμιγμα από μονάδα παραγωγής	1.54
<b>H100c</b>	3 <sup>η</sup> Πλάκα με 100% HMA, ασφαλτόμιγμα από μονάδα παραγωγής	1.42
<b>H70-30a, b</b>	1 <sup>η</sup> και 2 <sup>η</sup> Πλάκα με HMA & RAP (70%-30%)	1.08
<b>H70-30c</b>	3 <sup>η</sup> Πλάκα με HMA & RAP (70%-30%)	1.05
<b>H90-10</b>	Πλάκα με HMA & RAP λεπτόκοκκα αδρανή (90%-10%)	1.37
<b>H88-12</b>	Πλάκα με HMA & RAP λεπτόκοκκα αδρανή (88%-12%)	1.17
<b>H85-15</b>	Πλάκα με HMA & RAP λεπτόκοκκα αδρανή (85%-15%)	1.38

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του δείκτη MTD όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.2, παρατηρείται ότι ο δείκτης MTD είναι αυξημένος για τις πλάκες που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο με ή χωρίς ανακυκλώσιμο ελαστικό ως πρόσμικτο, καθώς και για εκείνες που περιέχουν HMA από μονάδα παραγωγής. Η εν λόγω παρατήρηση συνδέεται με τα ποσοστά κενών για τις σχετικές πλάκες όπως

μετρήθηκαν με τη μέθοδο διαστάσεων. Στην περίπτωση των πλακών που περιέχουν RAP σε αναλογία 70-30 (H70-30) παρατηρείται μείωση του MTD αντίθετα, οι πλάκες με περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο RAP υλικό εμφανίζουν υψηλότερο MTD και συνεπώς, καλύτερη μακροϋφή παρόλο που το ποσοστό κενών είναι μικρότερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διερεύνηση των επιπέδων μακροϋφής είναι ιδιαίτερα σημαντική και για την περίπτωση νέων οδοστρωμάτων, με εξέχουσα την ανάγκη καταγραφής της κατάστασης «μηδέν» στο πλαίσιο παραλαβής ενός νέου οδοστρώματος. Επομένως, η μέτρηση της μακροϋφής στο εργαστήριο δύναται να παράσχει χρήσιμη προγενέστερη πληροφόρηση τόσο για συμβατικά όσο και μη συμβατικά ασφαλτομίγματα.

## 5.4 Προσομοίωση επίδρασης εποχιακής διακύμανσης

### 5.4.1 Καθορισμός παραμέτρων

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για μείωση της χρήσης φυσικών πόρων τόσο στην κατασκευή όσο και στην συντήρηση των έργων υποδομής, η χρήση των βιώσιμων υλικών αποτελεί μία σημαντική πρόκληση. Ως εκ τούτου, συνεπάγεται ότι οι μηχανικοί οδοστρωμάτων θα πρέπει να γνωρίζουν βασικές παραμέτρους αναφορικά με τη συμπεριφορά των υλικών πριν τη χρήση τους στο πεδίο.

Ωστόσο, αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα των επιφανειών των οδοστρωμάτων, δεδομένης της πολυπαραμετρικής φύσης του εν λόγω επιφανειακού χαρακτηριστικού, προκύπτουν διάφορες άγνωστες πτυχές προς διερεύνηση. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη διερεύνησης της συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν εναλλακτικά-βιώσιμα υλικά ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητά τους. Μία τέτοιου τύπου διερεύνηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε πειραματικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας που είναι γνωστές με τον διεθνή όρο Accelerated Pavement Testing (APT). Εντούτοις, τόσο το κόστος όσο και ο αυξημένος αριθμός των εργατωρών που απαιτούνται για την πραγματοποίηση τέτοιων δοκιμών, αποτελούν τροχοπέδη στην υλοποίησή τους. Συνεπώς, συνίσταται η εργαστηριακή διερεύνηση ως προπομπός αυτών των δοκιμών ώστε να εντοπιστούν κάποια βασικά και ίσως κρίσιμα σημεία αναφορικά με τις ιδιότητες των υλικών και να υπάρξει ουσιαστική συνεισφορά στο πεδίο διερεύνησής τους. Συγκεκριμένα οι καιρικές συνθήκες, που όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3 επηρεάζουν άμεσα και δραστικά τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας, αποτελούν βασική παράμετρο διερεύνησης προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά αυτών των υλικών υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

Συνεπώς, στόχο της παρούσας υποενοτήτας αποτελεί η αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας στις επιφάνειες των κατασκευασμένων πλακών που περιέχουν βιώσιμα υλικά υπό προσομοιωμένες καιρικές διακυμάνσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον. Για τον σκοπό της συγκεκριμένης διερεύνησης, πραγματοποιήθηκε πείραμα εργαστηριακής κλίμακας και έγινε προσομοίωση μεταβολών θερμοκρασίας, βροχοπτώσεων και παρουσίας σκόνης στην επιφάνεια των πλακών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας αναφορικά με τις μεταβολές θερμοκρασίας και εν συνεχεία, διερευνήθηκαν οι διακυμάνσεις στα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας λόγω των βροχοπτώσεων (παρουσία νερού) και της ύπαρξης σκόνης.

Ακολουθούν σχετικές λεπτομέρειες αναφορικά με το πρωτόκολλο προσομοίωσης των καιρικών συνθηκών που αξιοποιήθηκε. Επίσης, η εν λόγω διερεύνηση παρουσιάζεται αρχικά για τα ασφαλτομίγματα με περιεκτικότητα ανακυκλωμένου ελαστικού (πλάκες τύπου R<sub>x</sub>) και στην συνέχεια για τα ασφαλτομίγματα από μονάδα παραγωγής και περιεκτικότητας RAP (πλάκες τύπου H<sub>x</sub>).

Για την σύντομη αναφορά των δοκιμαστικών πλακών τύπου  $R_x$  και  $H_x$ , ακολουθείται η κωδικοποίηση που παρουσιάστηκε στον **Πίνακα 5.2**:

- **R0**: Πλάκες χωρίς (0%) περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο ελαστικό
- **R10**: Πλάκες με 10% περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο ελαστικό
- **R20**: Πλάκες με 20% περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο ελαστικό
  
- **H100 b, c**: Πλάκες 100% HMA (από μονάδα παραγωγής, υλικό προς διάστρωση)
- **H70-30 a, c**: Πλάκες 70% HMA – 30% RAP
- **H85-15**: Πλάκα 85% HMA – 15% RAP (λεπτόκοκκα αδρανή)
- **H88-12**: Πλάκα 88% HMA – 12% RAP (λεπτόκοκκα αδρανή)

#### 5.4.2 Πλάκες τύπου $R_x$ (με ή χωρίς ανακυκλωμένο ελαστικό)

##### 5.4.2.1 Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των μεταβολών θερμοκρασίας, κάθε πλάκα  $R_x$  δοκιμάστηκε σε ένα καθορισμένο φάσμα θερμοκρασιών (Πίνακας 5.3), έτσι ώστε να προσομοιωθεί η θερμοκρασία, τόσο του περιβάλλοντος χώρου, όσο και της επιφάνειας των πλακών. Ωστόσο, υπήρξε αδυναμία προσομοίωσης στο εργαστήριο θερμοκρασιών εκτός του φάσματος που σημειώνεται, λόγω δυσκολίας προσέγγισης και εκτέλεσης των δοκιμών σε ακραίες για τον ελλαδικό χώρο θερμοκρασίες (π.χ. 0 °C ή 40 °C). Για την προσομοίωση, οι πλάκες τοποθετήθηκαν κατάλληλα σε ένα θάλαμο για περισσότερο από 6 ώρες ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στις επιφάνειές τους. Επίσης, ο εργαστηριακός χώρος που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές κλιματιζόταν επαρκώς σε κάθε θερμοκρασία δοκιμής (Εικόνα 5.23).

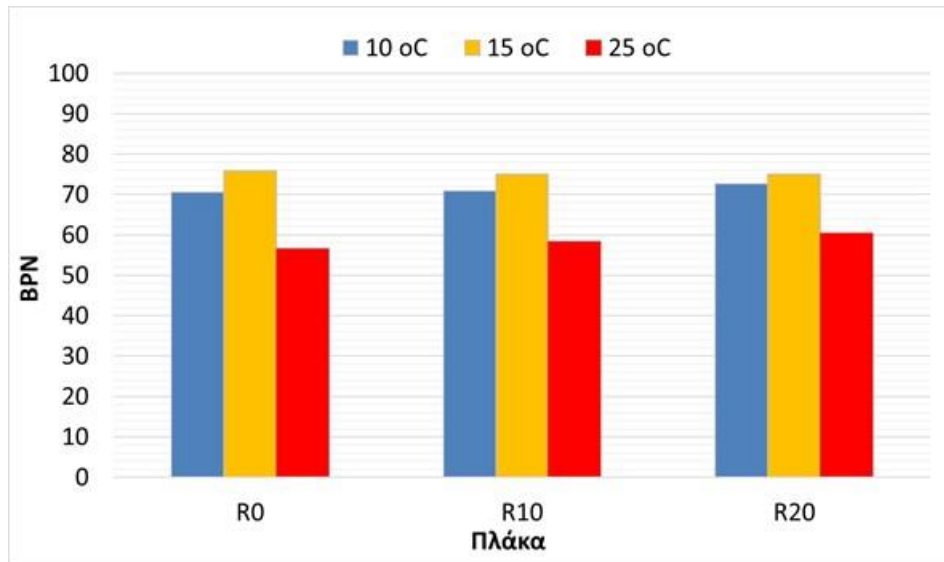
**Πίνακας 5.3:** Θερμοκρασίες δοκιμής (°C) για τις πλάκες τύπου  $R_x$

Πλάκα	1 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)	2 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)	3 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)
R0	10	15	25
R10	10	15	25
R20	10	15	25



**Εικόνα 5.23:** Μέτρηση θερμοκρασίας στην επιφάνεια των πλακών

Οι μετρήσεις του συντελεστή τριβής (αντιολισθητική ικανότητα) πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα BPT και οι σχετικές τιμές προέκυψαν σε μονάδες BPN. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε 4 φορές για κάθε θερμοκρασία αναφοράς και η μέση τιμή BPN (από τις τέσσερις μετρήσεις) θεωρήθηκε ως η χαρακτηριστική τιμή του συντελεστή τριβής για την εκάστοτε θερμοκρασία. Στην Εικόνα 5.24 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις τιμές του δείκτη BPN, για κάθε πλάκα στην αντίστοιχη θερμοκρασία μετρήσεων.



Εικόνα 5.24: Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών στις πλάκες με περιεκτικότητα ελαστικού (0%, 10%, 20%)

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της Εικόνας 5.24 φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 10 °C σε 15 °C προκαλεί αύξηση των επιπέδων BPN. Ωστόσο, αυτό το εύρημα δεν είναι σύμφωνο με σχετικές έρευνες και ίσως αποδίδεται στα υλικά ή σε περιστασιακούς παράγοντες που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 15 °C σε 25 °C οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριβής σε όρους BPN, κάτι που αποτελεί λογική παρατήρηση δεδομένου ότι τόσο η άσφαλτος όσο και το ελαστικό πέγμα του BPT γίνονται πιο μαλακά λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης τους, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία (Tyfour 2009, Do et al. 2014a, Sanders et al. 2015, Guo et al. 2017). Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από 10 °C σε 15 °C και από 15 °C σε 25 °C προκαλεί στατιστικά σημαντικές αλλαγές στο BPN (ανάλυση t-test για ζεύγη δειγμάτων) και στις τρεις περιπτώσεις πλακών. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται ότι η προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού δεν οδηγεί σε σαφή συμπεράσματα αναφορικά με την αύξηση ή τη μείωση του συντελεστή τριβής στις θερμοκρασίες που ελέγχθηκαν, δεδομένων των σχεδόν ίσων BPN των R0-10-20 σε όλες τις θερμοκρασίες.

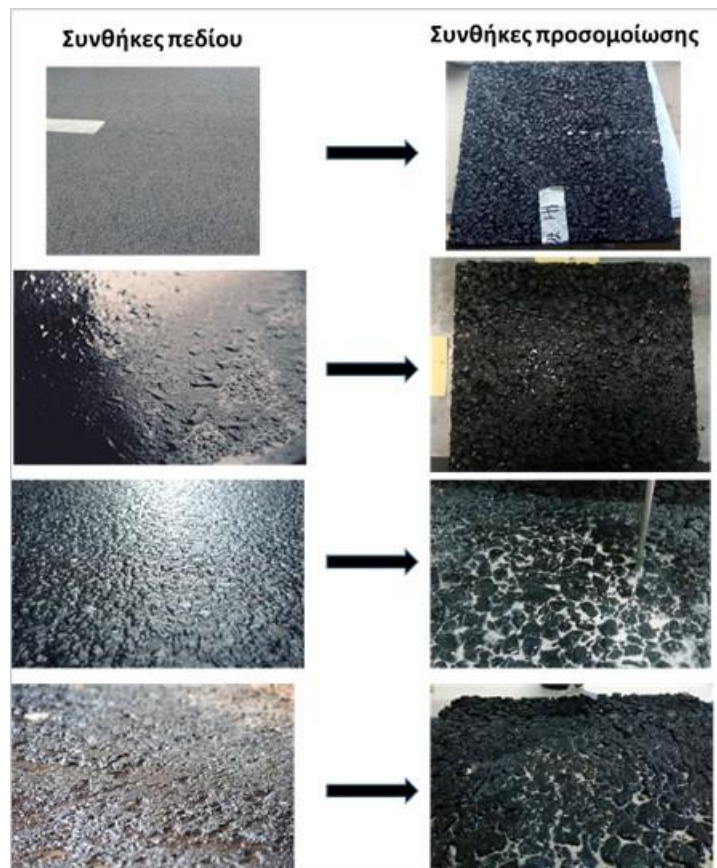
#### 5.4.2.2 Διερεύνηση επίδρασης καιρικών μεταβολών

Όπως περιεγράφηκε αναλυτικά στην Ενότητα 3, γενικά τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας εμφανίζουν διαφορές κατά τις συνθήκες ύπαρξης βροχοπτώσεων ή ξηρασίας κυρίως λόγω των εποχιακών αλλαγών. Οι εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας χαρακτηρίζονται κυρίως από ύπαρξη σωματιδίων σκόνης στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων που εμποδίζουν τη διεπαφή ελαστικού οδοστρώματος. Κατά τις περιόδους βροχοπτώσεων αντίθετα, λόγω των συχνών κατακρημνίσεων, η επιφάνεια των οδοστρωμάτων



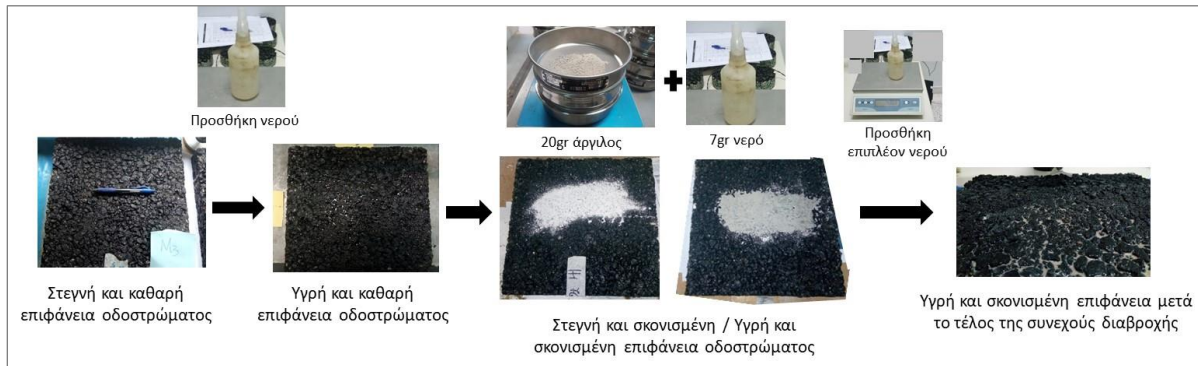
είναι πιο καθαρή και έτσι παρέχεται καλύτερο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η βροχόπτωση αποδεικνύεται ότι είναι κυρίως (αλλά όχι πάντα) θετική ως προς την αντιολισθητική ικανότητα μετά το τέλος της βροχόπτωσης, η κατάσταση είναι μάλλον διαφορετική κατά τη διάρκεια που εξελίσσεται μία βροχόπτωση. Συνεπώς, η βασική ιδέα που διαμορφώθηκε ήταν να προσομοιωθούν οι συνθήκες που περιγράφονται στην ακόλουθη λίστα και να μετρηθούν τα αντίστοιχα παρεχόμενα επίπεδα του συντελεστή τριβής για σχεδόν σταθερή θερμοκρασία περίπου 18-20°C:

- Στεγνή και καθαρή επιφάνεια οδοστρώματος
- Βροχοπτώσεις σε καθαρή επιφάνεια οδοστρώματος
- Βροχοπτώσεις σε υγρές και σκονισμένες επιφάνειες οδοστρώματος
- Υγρές επιφάνειες οδοστρώματος μετά από βροχόπτωση



*Εικόνα 5.25: Οι καιρικές συνθήκες που προσομοιώθηκαν*

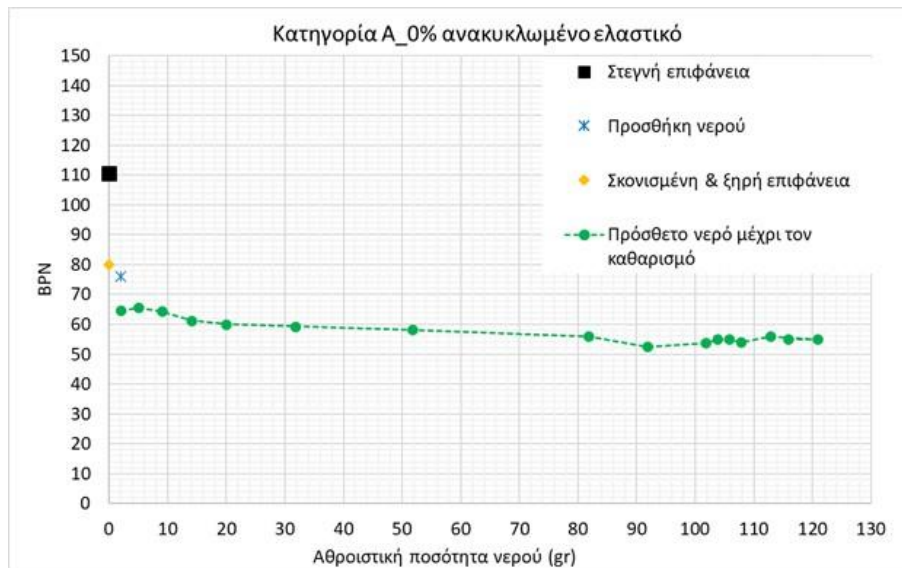
Για την εν λόγω διερεύνηση, οι ξηρές συνθήκες (περίοδος ξηρασίας) και υγρές συνθήκες (περίοδος βροχοπτώσεων) προσομοιώθηκαν στο εργαστηριακό περιβάλλον σύμφωνα με ένα πρωτόκολλο διαβροχής που έχει ακολουθηθεί παρομοίως και σε προηγούμενες ερευνητικές μελέτες (Hichri et al. 2017). Η σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας προσομοίωσης φαίνεται στην Εικόνα 5.26.



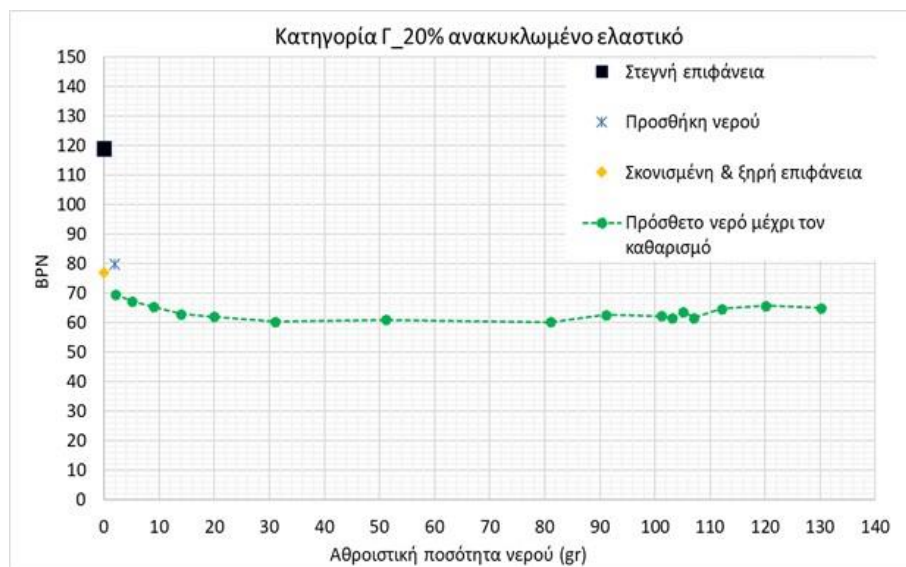
Εικόνα 5.26: Πρωτόκολλο προσομοίωσης καιρικών συνθηκών

Για τη στεγνή και καθαρή επιφάνεια, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς να προστεθεί νερό στην επιφάνεια της πλάκας. Με σκοπό την προσομοίωση των συνθηκών σκόνης στην επιφάνεια των πλακών (σκονισμένες επιφάνειες) παρασκευάστηκε ένα μίγμα λεπτών αδρανών (άργιλος) ποσότητας 20 gr και νερού 7 gr το οποίο απλώθηκε στις επιφάνειες προσομοιώνοντας την ύπαρξη σωματιδίων σκόνης στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων κατά τις περιόδους ξηρασίας. Το συγκεκριμένο μίγμα είτε αφέθηκε για μερικές ημέρες για να ξηραθεί πλήρως ώστε η επιφάνεια να θεωρηθεί στεγνή και σκονισμένη είτε μετρήθηκε άμεσα ο δείκτης BPN και η επιφάνεια θεωρήθηκε υγρή και σκονισμένη. Στη συνέχεια, οι βροχοπτώσεις προσομοιώθηκαν με συνεχή διαβροχή νερού ποσότητας που μπορεί να αντιπροσωπεύει μια βροχόπτωση μέτριας έντασης και αμέσως μετά, μετρήθηκε ο δείκτης BPN. Η προσθήκη νερού ολοκληρώθηκε όταν ο δείκτης BPN εμφάνιζε σταθεροποίηση και τα επιφανειακά αδρανή ήταν σχεδόν ή εντελώς καθαρά. Όλη η διαδικασία επαναλήφθηκε δύο φορές ανά πλάκα και η μέγιστη αποδεκτή διακύμανση μεταξύ των δύο φάσεων δοκιμής θεωρήθηκε ίση με τιμή 4 BPN. Εάν η διακύμανση ήταν μεγαλύτερη από 4 BPN, η διαδικασία επαναλήφθηκε για την τρίτη φάση δοκιμής.

Οι Εικόνες 5.27 και 5.28 που ακολουθούν παρουσιάζουν τις τιμές BPN για κάθε στάδιο των προσομοιωμένων μεταβολών καιρού με βάση τη διαδικασία που περιεγράφηκε προηγουμένως. Για την κάθε πλάκα, παρέχεται ξεχωριστό σχήμα και ακολουθούν τα σχετικά σχόλια. Ο όρος «Σκονισμένη και ξηρή επιφάνεια» αφορά στην περίπτωση που το μίγμα αργίλου και νερού ξηράθηκε πλήρως και στη συνέχεια μετρήθηκε ο δείκτης BPN. Η προσομοίωση της βροχόπτωσης στην σκονισμένη και ξηρή επιφάνεια, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, ορίζεται ως: «Πρόσθετο νερό μέχρι τον καθαρισμό».



Εικόνα 5.27: Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα R0 (0% ελαστικό)



Εικόνα 5.28: Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα R20 (20% ελαστικό)

Ο συντελεστής τριβής σε όρους BPN είναι υψηλότερος, όπως αναμενόταν για την περίπτωση της στεγνής επιφάνειας που αποτελεί το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης. Με την προσθήκη νερού ο δείκτης BPN μειώνεται εμφανώς ενώ, με την προσθήκη του μίγματος σκόνης και νερού μειώνεται εκ νέου. Ο δείκτης BPN μειώνεται αρκετά με την προσθήκη του εν λόγω μίγματος το οποίο στη μεν ξηρή του κατάσταση επηρεάζει (παρεμποδίζει) την διεπαφή των αδρανών με την επιφάνεια του πέλματος του BPT, στη δε υγρή του κατάσταση, υπό συνεχή διαβροχή, λειτουργεί σαν λιπαντικό μειώνοντας ακόμα περισσότερο τον συντελεστή τριβής. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί ότι προσομοιάζει την περίπτωση ξαφνικής βροχόπτωσης έπειτα από μια περίοδο εκτενούς ξηρασίας όπου στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων υπάρχει σκόνη. Όπως διαφαίνεται, η βροχόπτωση επί ξηρής και σκονισμένης επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε απότομη μείωση τους συντελεστή τριβής και να

αποτελέσει μία εξαιρετικά επικίνδυνη κατάσταση για τα κινούμενα οχήματα (Τυφούρ 2009, Do et al. 2014a, Do et al. 2014b). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η σταδιακή διαβροχή στην επιφάνεια δεν κατάφερε να απομακρύνει εξ' ολοκλήρου το μίγμα από την επιφάνεια και το επίπεδο BPN δεν έφτασε στο επίπεδο BPN του φαινομένου καθαρού νερού.

### 5.4.3 Πλάκες τύπου Hx (ασφαλτόμιγμα από μονάδα παραγωγής & RAP)

Η διαδικασία της προσομοίωσης τόσο των μεταβολών θερμοκρασίας όσο και των καιρικών συνθηκών ήταν όμοια με εκείνη που παρουσιάστηκε προηγουμένως για τα ασφαλτόμιγματα με περιεκτικότητα τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού (τύπου R<sub>x</sub>). Υπήρξαν ωστόσο μικρές διαφοροποιήσεις που σημειώνονται στα αντίστοιχα πεδία.

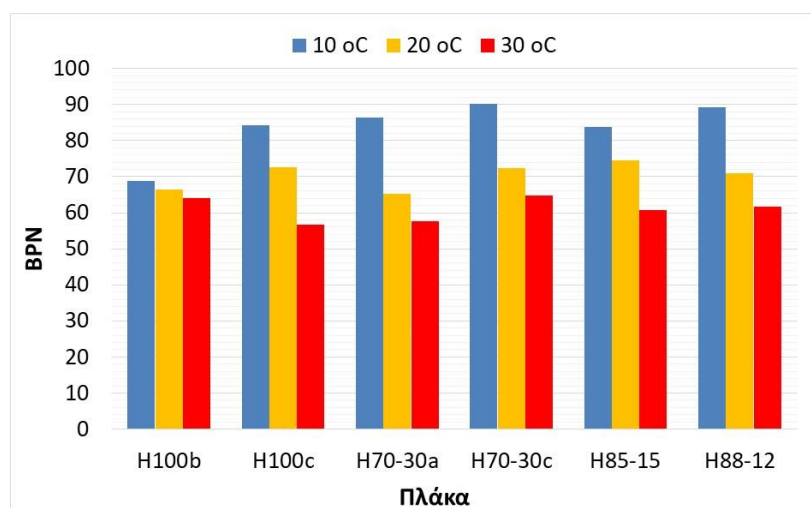
#### 5.4.3.1 Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των μεταβολών θερμοκρασίας, κάθε πλάκα H<sub>x</sub> δοκιμάστηκε σε ένα καθορισμένο φάσμα θερμοκρασιών (Πίνακας 5.4) προκειμένου να προσομοιωθεί η θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος χώρου όσο και της επιφάνειας των πλακών.

**Πίνακας 5.4:** Θερμοκρασίες δοκιμής (°C) για τις πλάκες κατηγορίας B, Δ και E (RAP)

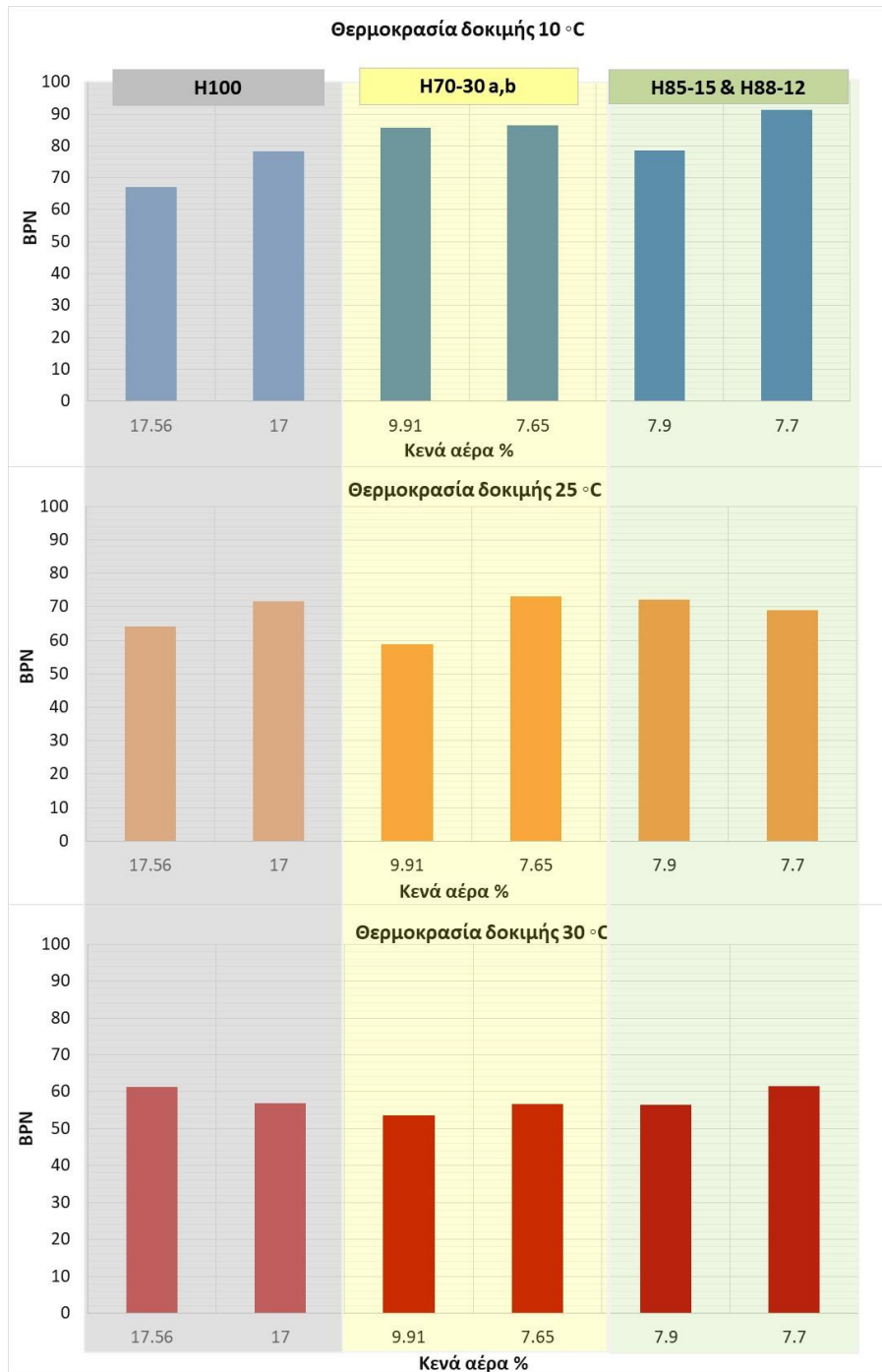
Πλάκα	1 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)	2 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)	3 <sup>η</sup> θερμοκρασία (°C)
H100 b, c	10	25	30
H70-30 a, c	10	25	30
H85-15	10	25	30
H88-18	10	25	30

Στην Εικόνα 5.29 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις τιμές του δείκτη BPN, για κάθε πλάκα στην αντίστοιχη θερμοκρασία μετρήσεων.



**Εικόνα 5.29:** Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών στις πλάκες με περιεκτικότητα RAP

Στις συγκεκριμένες κατηγορίες δοκιμαστικών πλακών είναι εμφανής η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στη μείωση του συντελεστή τριβής σε όρους BPN. Σε κάθε περίπτωση η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί στατιστικά σημαντικές μεταβολές στον συντελεστή τριβής. Επίσης, η προσθήκη RAP φαίνεται να επηρεάζει τα επίπεδα BPN στη χαμηλότερη θερμοκρασία διερεύνησης (10 °C). Στο σχήμα της Εικόνας 5.30 παρουσιάζεται η σχετική διερεύνηση δίνοντας ωστόσο, έμφαση στα ποσοστά κενών της εκάστοτε πλάκας.



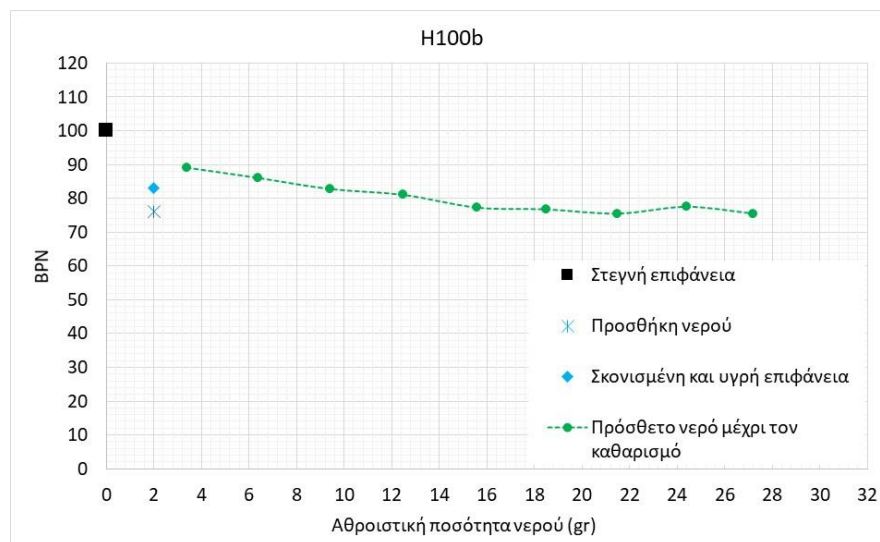
Εικόνα 5.30: Επίδραση θερμοκρασιακών αλλαγών αναφορικά με τα ποσοστά κενών αέρα



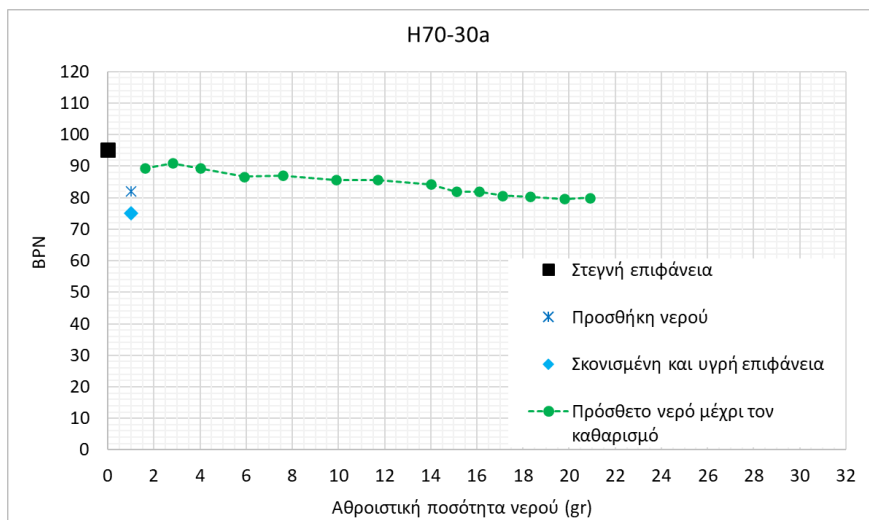
Λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά αποτελέσματα παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση των διαφορών μεταξύ των πλακών. Το γεγονός αυτό, μπορεί να αποδοθεί στη μεγαλύτερη ευαισθησία των μετρήσεων στις χαμηλότερες θερμοκρασίες και οφείλεται στην ισοδοελαστική φύση τόσο του πέλματος του συστήματος BPT, όσο και του ασφαλτομίγματος. Πιο συγκεκριμένα, στις χαμηλότερες θερμοκρασίες το ελαστικό του πέλματος είναι πιο σκληρό και απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια ώστε να αναπτυχθούν η πρόσφυση και η υστέρηση. Ως εκ τούτου οι όποιες διαφορές στην επιφάνεια των πλακών διαφοροποιούν την απαιτούμενη ενέργεια και οδηγούν σε μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις των τιμών BPN (κενά αέρα). Αντίθετα, στις υψηλότερες θερμοκρασίες η ενέργεια που απαιτείται είναι μικρότερη και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας ή τα ποσοστά κενών δεν αποτελούν κρίσιμη παράμετρο. Συνεπώς, το στοιχείο αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερος χρήσιμο για το σχεδιασμό μιγμάτων σε περιοχές με ήπιο ή και ψυχρό κλίμα.

#### 5.4.3.2 Διερεύνηση επίδρασης καιρικών μεταβολών

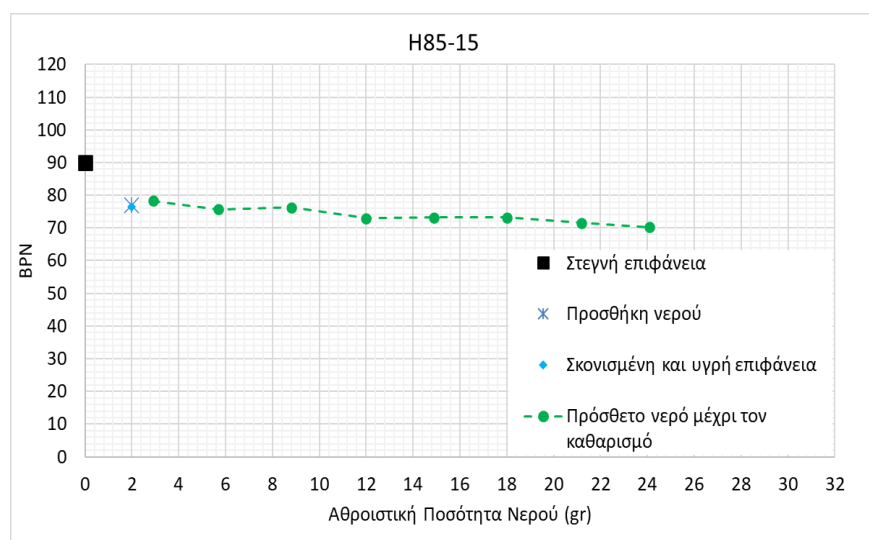
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση των καιρικών μεταβολών ήταν παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε για τις πλάκες με περιεκτικότητα τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού ( $R_x$ ). Όμως, στο συγκεκριμένο στάδιο της διερεύνησης, η συνολική ποσότητα του προστιθέμενου νερού ήταν πολύ μικρότερη από ό,τι στην περίπτωση των πλακών  $R_x$  (<35 gr, συνολικά), προσομοιώνοντας έτσι μία βροχόπτωση μικρότερης διάρκειας. Επιπλέον, το μίγμα νερού και αργίλου που προστέθηκε δεν ξηράνθηκε επομένως, οι σχετικές μετρήσεις αντιστοιχούν στον όρο «Σκονισμένη και υγρή επιφάνεια» και η συνεχής διαβροχή ομοίως με τις πλάκες  $R_x$  «Πρόσθετο νερό μέχρι τον καθαρισμό». Οι Εικόνες 5.30 και 5.31 που ακολουθούν παρουσιάζουν τις τιμές BPN για κάθε στάδιο των προσομοιωμένων μεταβολών καιρού.



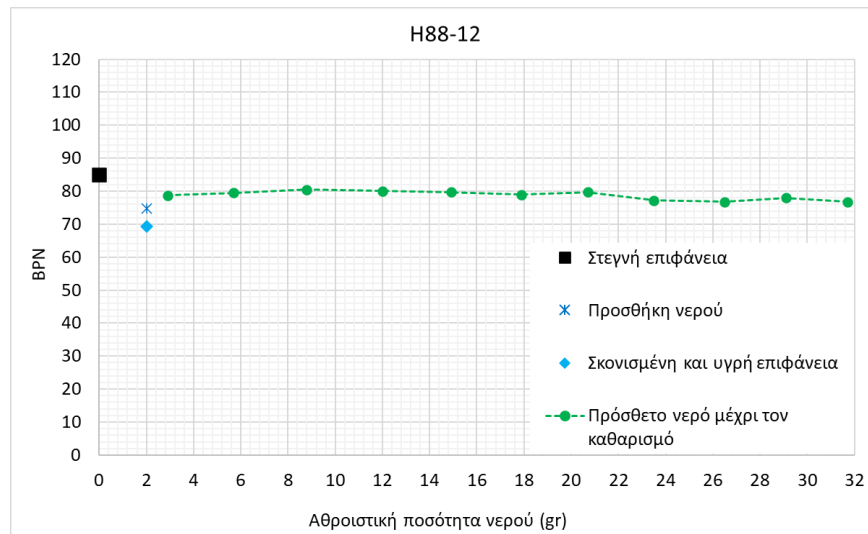
Εικόνα 5.31: Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H100b (100% HMA)



**Εικόνα 5.32:** Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H70-30a (70% HMA & 30% RAP)



**Εικόνα 5.33:** Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H85-15 (85% HMA & 15% RAP λεπτόκοκκα αδρανή)

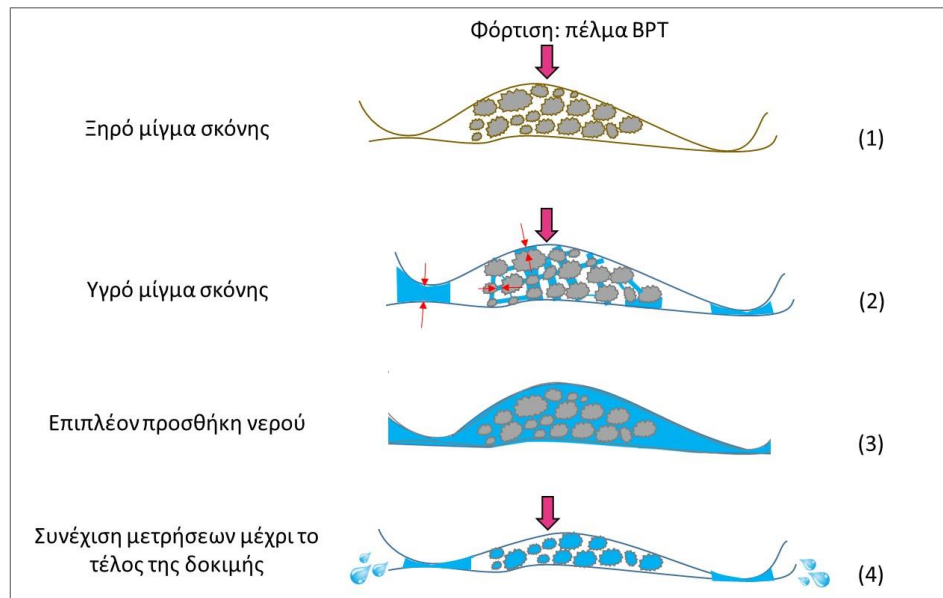


Εικόνα 5.34: Προσομοίωση καιρικών μεταβολών στην πλάκα H88-12 (88% HMA & 12% RAP λεπτόκοκκα αδρανή)

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο συντελεστής τριβής βρίσκεται στα υψηλότερα επίπεδα για την στεγνή και καθαρή επιφάνεια, αλλά η προσθήκη νερού προκαλεί μείωση. Ωστόσο, η επίδραση του μίγματος νερού και αργίλου (Σκονισμένη και υγρή επιφάνεια) οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των πλακών. Συγκεκριμένα, για τις πλάκες H70-30, H85-15 και H88-12 οδηγεί σε ίσα ή χαμηλότερα επίπεδα BPN σε σύγκριση με εκείνα που επιτεύχθηκαν κατά την προσθήκη του καθαρού νερού. Αντίθετα, για την πλάκα H100, η προσθήκη του μίγματος οδηγεί σε αύξηση του BPN σε σύγκριση με την επίδραση του καθαρού νερού. Η εν λόγω παρατήρηση ίσως οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό κενών αέρα στην περίπτωση H100. Αυτό σημαίνει ότι για τα ασφαλτομίγματα με μεγαλύτερο ποσοστό κενών αέρα (δηλ. H100), το μίγμα σκόνης και νερού που δημιουργείται στο πεδίο στην περίπτωση ξαφνικής βροχόπτωσης μπορεί να εισέλθει γρηγορότερα μεταξύ των κενών και να μην επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριβής όπως στις περιπτώσεις ασφαλτομιγμάτων με χαμηλό ποσοστό κενών. Κατ' επέκταση, οι ανοικτού τύπου συνθέσεις ασφαλτομίγματος εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά στην περίπτωση βροχόπτωσης σε σκονισμένη επιφάνεια από τις ημι-ανοικτού τύπου. Η εν λόγω παρατήρηση είναι επιπλέον σύμφωνη με τη διεθνή βιβλιογραφία στο συγκεκριμένο θέμα (Brown et al. 2004, Chen et al. 2019).

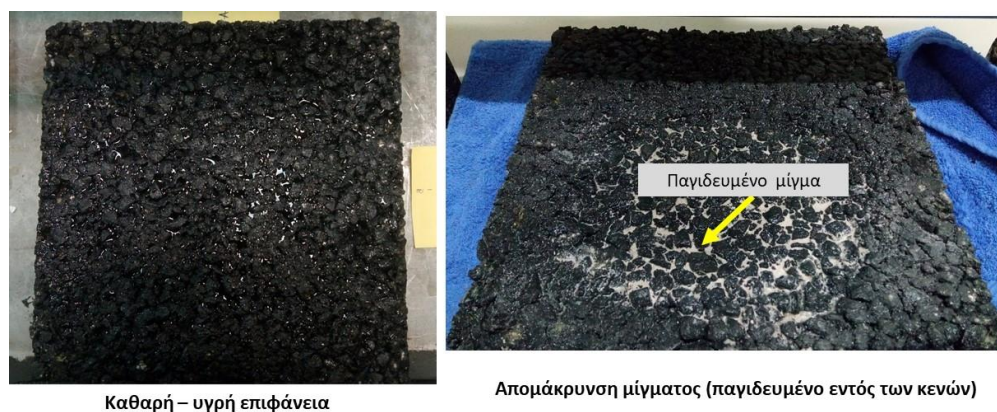
Όσον αφορά στην προσομοίωση βροχόπτωσης, ένα αρκετά ενδιαφέρον μέρος αποτελεί η επεξήγηση του υψηλού BPN στην αρχή της προσθήκης νερού στις σκονισμένες πλάκες (Πρόσθετο νερό μέχρι τον καθαρισμό) για όλες τις πλάκες. Καθώς η αθροιστική ποσότητα νερού στην επιφάνεια αυξάνεται, το BPN μειώνεται μέχρι περίπου το επίπεδο της καθαρής υγρής επιφάνειας και περισσότερο. Αυτή η τάση μπορεί να εξηγηθεί μέσω του σχήματος της Εικόνας 5.35, όπου παρουσιάζονται σχηματικά όλα τα στάδια από την ξηρή κατάσταση έως στο τέλος της δοκιμής. Το φορτίο που προκαλεί το πέγμα του BPT κατά την επαφή του με την επιφάνεια, αξιοποιείται ώστε να περιγράψει η σχετική αλληλεπίδραση του μίγματος (αργίλου νερού) με τη σταδιακή προσθήκη επιπλέον καθαρού νερού (Guo et al. 2017).





**Εικόνα 5.35:** Αλληλεπίδραση μίγματος αργίλου-νερού με την σταδιακή προσθήκη νερού

Ειδικότερα, η δοκιμή ξεκινά από το στάδιο (2) όταν μικρές ποσότητες νερού που πέφτουν στην επιφάνεια, αρχίζουν να σχηματίζουν μεγάλη τριχοειδή πίεση. Με την προσθήκη επιπλέον μικρής ποσότητας νερού, η τριχοειδής πίεση αυξάνεται προκαλώντας ισχυρή έλξη μεταξύ των γωνιών των λεπτών σωματιδίων των κόκκων, έτσι ο συντελεστής τριβής αυξάνεται υπό το σταθερό φορτίο του BPT, σε σύγκριση με το BPN κατά την προθήκη καθαρού νερού σε καθαρή επιφάνεια. Η συνεχόμενη προσθήκη νερού στο στάδιο (3) οδηγεί σε σταδιακή διακοπή του τριχοειδούς φαινομένου, ενώ το υγρό μίγμα σκόνης παραμερίζεται από την συνεχή κίνηση του BPT και την επαφή του με την επιφάνεια. Αυτό οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριβής μέχρι το τελικό στάδιο (4) όπου το BPN γίνεται σχεδόν ίσο με την κατάσταση «Προσθήκη νερού». Στο στάδιο (4), η επιφάνεια των αδρανών είναι καθαρή παρόμοια με την κατάσταση «Προσθήκη νερού» ενώ η ποσότητα του μίγματος σκόνης-νερού έχει παγιδευτεί εντός των κενών των αδρανών (trapped contamination) και δεν επηρεάζει τα επίπεδα τριβής που μετρούνται με το BPT (Εικόνα 5.36).



**Εικόνα 5.36:** Απομάκρυνση μίγματος και «παγίδευση» εντός των κενών (trapped contamination)

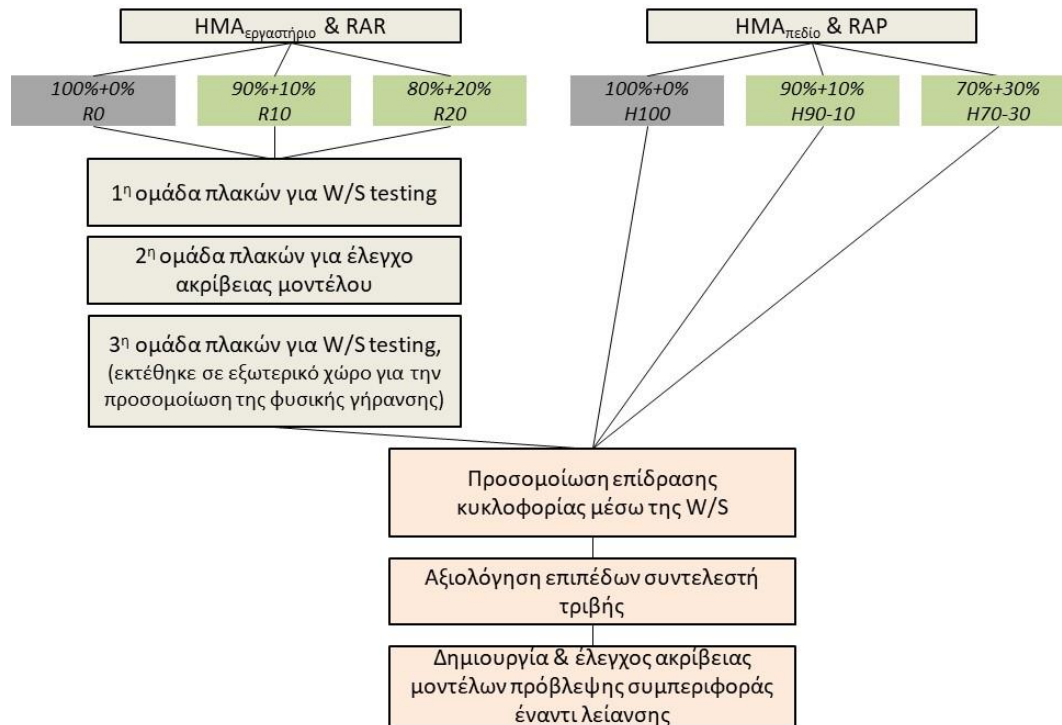
Επίσης, το «παγιδευμένο» μίγμα εμποδίζει τη διαφυγή του επιπρόσθετου νερού και ως εκ τούτου τα επίπεδα BPN δεν μεταβάλλονται δραματικά κατά την προσθήκη επιπρόσθετης ποσότητας νερού. Ωστόσο για την περίπτωση H100 η προσθήκη επιπλέον νερού οδηγεί σε μείωση του επιπέδου BPN, διότι το ποσοστό κενών είναι αρκετά μεγαλύτερο (ανοιχτού τύπου σύνθεση) και έτσι το νερό διαφεύγει γρηγορότερα και δεν επηρεάζεται τόσο από το «παγιδευμένο» μίγμα.

Σε κάθε περίπτωση, η παρεμπόδιση της απορροής του νερού εξαιτίας του «παγιδευμένου» μίγματος μπορεί να είναι καθοριστική για την παρεχόμενη μακροϋφή της επιφάνειας, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ως περιορισμός της συσκευής BPT.

## 5.5 Προσομοίωση κυκλοφοριακής φόρτισης

### 5.5.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Στην παρούσα υποενότητα πραγματοποιείται προσομοίωση διελεύσεων οχημάτων μέσω κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού στις παρασκευασμένες δοκιμαστικές πλάκες ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κυκλοφορίας στα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη συμπεριφορά έναντι στίλβωσης (λείανσης) των πλακών με περιεκτικότητα ελαστικού RAR ή ανακτώμενου-επαναχρησιμοποιημένου ασφαλτομίγματος RAP. Επίσης, ως πλάκες αναφοράς αξιοποιήθηκαν τα δοκίμια από εξολοκλήρου συμβατικό HMA υλικό (R0 και H100a). Για το εν λόγω σκέλος της πειραματικής διαδικασίας αξιοποιήθηκε η συσκευή Wehner/Schulze (W/S) machine (Kane et al. 2008, Kane et al. 2013a, Hofko et al. 2019) και πραγματοποιήθηκε στο Γαλλικό Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας για τις Μεταφορές, την Ανάπτυξη και τα Δίκτυα – IFSTTAR του Πανεπιστημίου Gustave Eiffel. Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα των πειραμάτων αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη σχέσεων περιγραφής αναφορικά με την συμπεριφορά του εκάστοτε ασφαλτομίγματος έναντι της επίδρασης της κυκλοφορίας. Η Εικόνα 5.37 που ακολουθεί παρουσιάζει σχηματικά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε σε αυτό το σκέλος της διερεύνησης.



**Εικόνα 5.37:** Μεθοδολογία εργαστηριακής διερεύνησης για την επίδραση της κυκλοφορίας

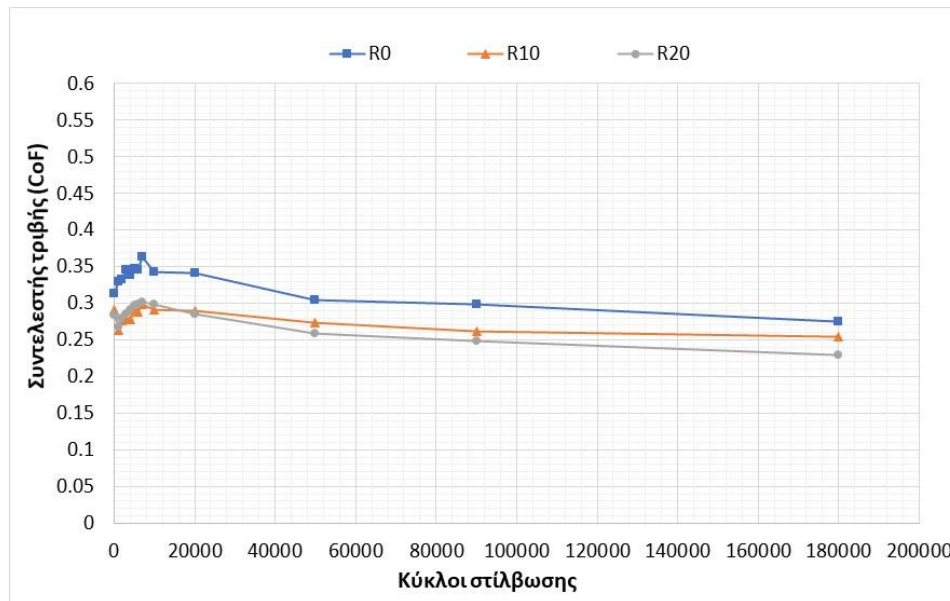
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.37 για την περίπτωση των πλακών με περιεκτικότητα RAR, αξιοποιήθηκαν τρεις (3) ομάδες πλακών. Η τρίτη κατηγορία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5.11** και αναφέρεται στην κατηγορία  $R_x$ \_aged. Για τη διάκριση των πλακών ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε RAR, ακολουθείται αντιστοίχως η ονομασία:

- $R0$ \_aged (0% RAR),
- $R10$ \_aged (10% RAR) και
- $R20$ \_aged (20% RAR).

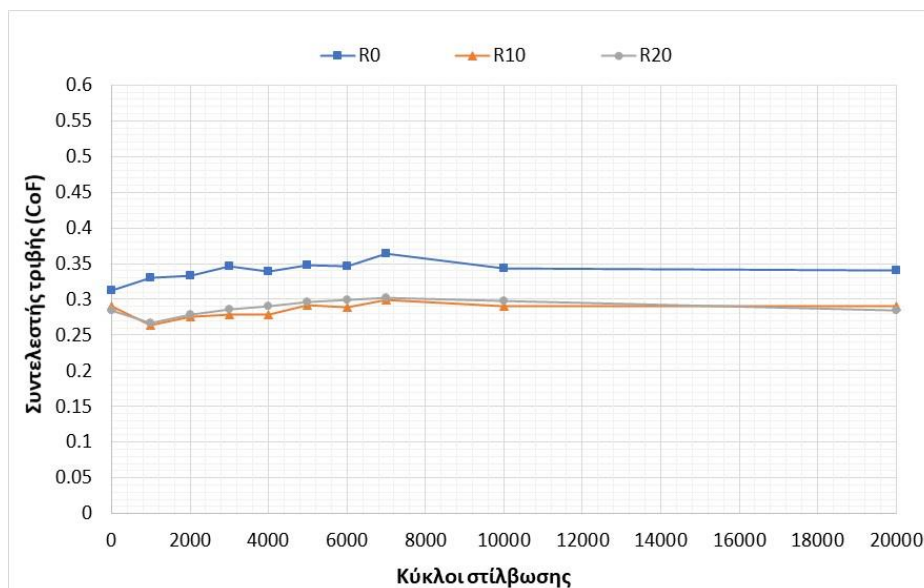
Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα με τις καμπύλες στίλβωσης/λείανσης – polishing curves ανά τύπο ασφαλτομίγματος και γίνεται επεξήγηση των σχετικών αποτελεσμάτων.

### 5.5.2 Πλάκες HMA με περιεκτικότητα RAR – $R_x$ ( $R0$ , $R10$ , $R20$ )

Στην Εικόνα 5.38 παρουσιάζονται τα επίπεδα του συντελεστή τριβής (Coefficient of Friction – CoF) έναντι των συνολικών κύκλων στίλβωσης (polishing cycles) για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR ( $R_x$ : 0%, 10%, 20%) και δεν έχουν υποστεί γήρανση. Στην Εικόνα 5.39 παρουσιάζονται επίσης τα επίπεδα του συντελεστή τριβής εστιάζοντας στους πρώτους κύκλους στίλβωσης ( $\leq 20000$ ).



Εικόνα 5.38: Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και δεν έχουν υποστεί γήρανση



Εικόνα 5.39: Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και δεν έχουν υποστεί γήρανση

Από τις παραπάνω εικόνες διαφαίνεται ότι το φαινόμενο κάλυψης των επιφανειακών με ασφαλτο (masking effect) είναι αξιοσημείωτο για όλα τα δείγματα έως και τους 7000 κύκλους, αφού οι καμπύλες στίλβωσης (polishing curves) παρουσιάζουν ανοδική τάση μέχρι αυτό το σημείο. Έπειτα, τα επίπεδα του συντελεστή τριβής ακολουθούν μια φθίνουσα τάση λόγω της απομάκρυνσης του masking effect.

Επίσης, φαίνεται ότι η πλάκα R0 έχει τον υψηλότερο συντελεστή τριβής σε όλα τα επίπεδα στίλβωσης. Εκτός αυτού, η αύξηση της περιεκτικότητας του ασφαλτομίγματος σε RAR μειώνει τον συντελεστή τριβής έπειτα από αρκετούς κύκλους καθώς, το R10 εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή τριβής από το R20 μετά από 20000 κύκλους στίλβωσης. Αντιθέτως, με βάση του πρώτους κύκλους στίλβωσης ( $\leq$

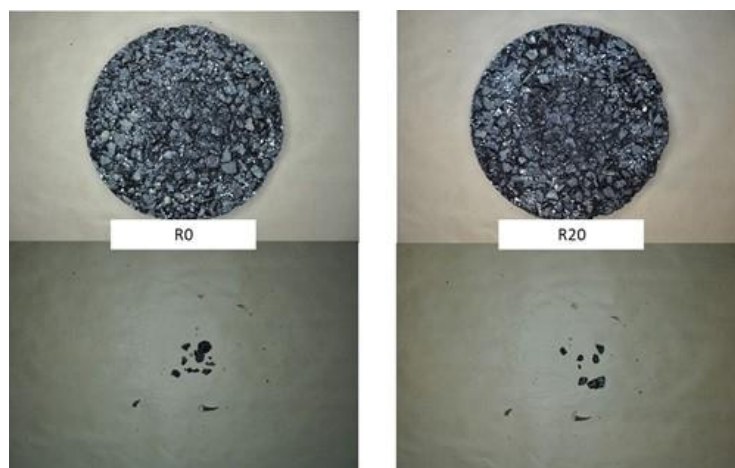
20000), τα R10 και R20 παρουσιάζουν μια αρκετά παρόμοια συμπεριφορά (Εικόνα 5.39). Για την περαιτέρω αξιολόγηση της διαφοράς μεταξύ των καμπύλων που αφορούν τις πλάκες R10 και R20 πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση t-test (95%) και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Η θεώρηση της μηδενικής υπόθεσης αφορά στην ύπαρξη ασήμαντης στατιστικά διαφοράς μεταξύ τους. Το κριτήριο για την αποδοχή της υπόθεσης είναι  $|tstat| < t_{critical}$ .

**Πίνακας 5.5:** T-test μεταξύ R10 και R20

	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Mean	0.28	0.28
Variance	0.00018	0.00049
Observations	13	13
Pearson Correlation	0.905	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	12	
t Stat	0.39	
P(T<=t) one-tail	0.35	
t Critical one-tail	1.78	
P(T<=t) two-tail	0.70	
t Critical two-tail	2.18	

Όπως παρατηρήθηκε, η μηδενική υπόθεση θεωρείται αποδεκτή, ως εκ τούτου, οι διαφορές μεταξύ R10 και R20 δεν ήταν στατιστικά σημαντικές. Ομοίως, οι διαφορές των δύο πλακών που περιέχουν RAR συγκρίθηκαν με την πλάκα αναφοράς R0. Ωστόσο, οι διαφορές, στην περίπτωση αυτή, βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές και συνεπώς, μπορεί να διατυπωθεί ότι η ύπαρξη RAR στο ασφαλτόμιγμα μειώνει τον συντελεστή τριβής έναντι στίλβωσης. Αυτό το εύρημα είναι σύμφωνο με άλλη σχετική διερεύνηση (Putra et al. 2019).

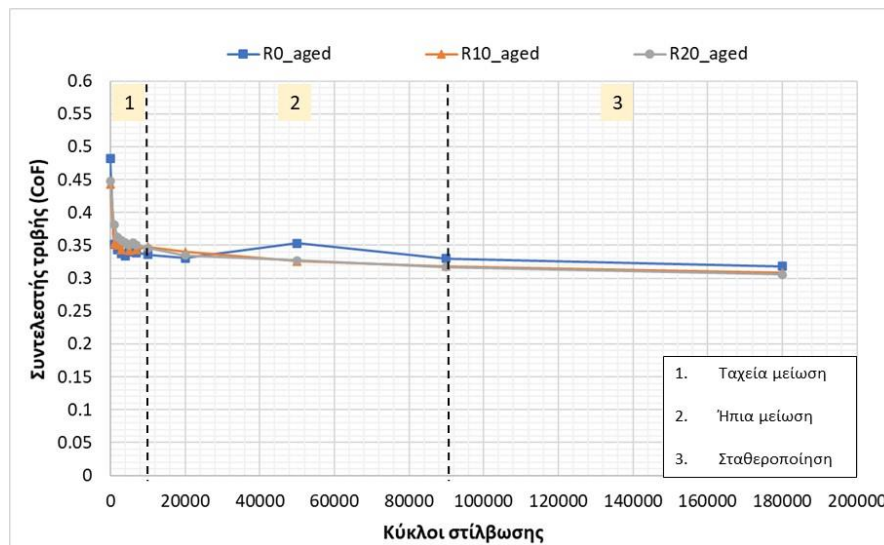
Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να επισημανθεί είναι η αποκόλληση αδρανών κατά τη διάρκεια των κύκλων στίλβωσης για τα R0 και R20. Η Εικόνα 5.40 απεικονίζει τα R0 και R20 μετά το πέρας της διαδικασίας στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή από το κάθε δείγμα. Η αποκόλληση των αδρανών ενδεχομένως αποδεικνύει την ευθραυστότητα των συγκεκριμένων τύπων ασφαλτομίγματος. Αντιθέτως, δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση για το δείγμα R10.



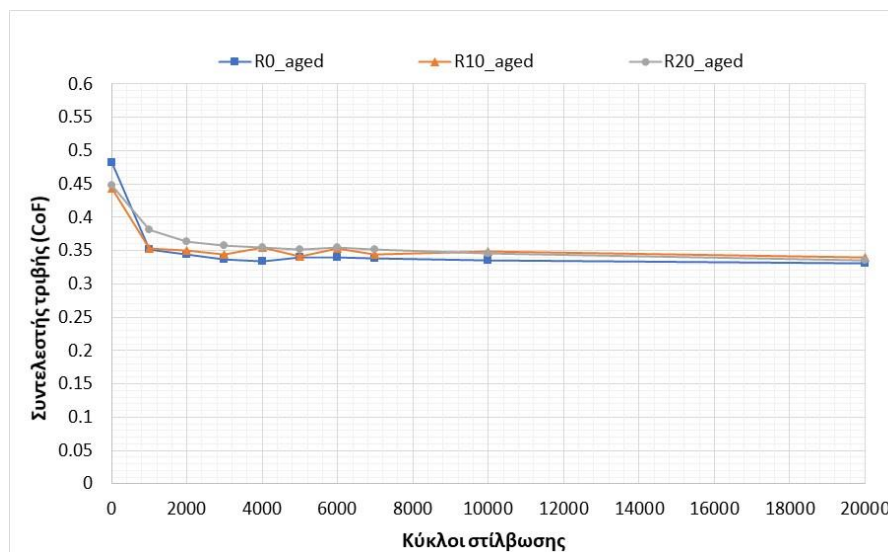
**Εικόνα 5.40:** Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή



Ομοίως, ακολουθεί η παράθεση των σχετικών αποτελεσμάτων για τις δοκιμαστικές πλάκες ασφαλτομίγματος που υπέστησαν γήρανση υλικού. Οι καμπύλες στίλβωσης τους απεικονίζονται στις Εικόνες 5.41 και 5.42 λαμβάνοντας υπόψη τις πλήρεις καμπύλες στίλβωσης και τις καμπύλες στίλβωσης στους πρώτους κύκλους αντίστοιχα.



Εικόνα 5.41: Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και έχουν υποστεί γήρανση



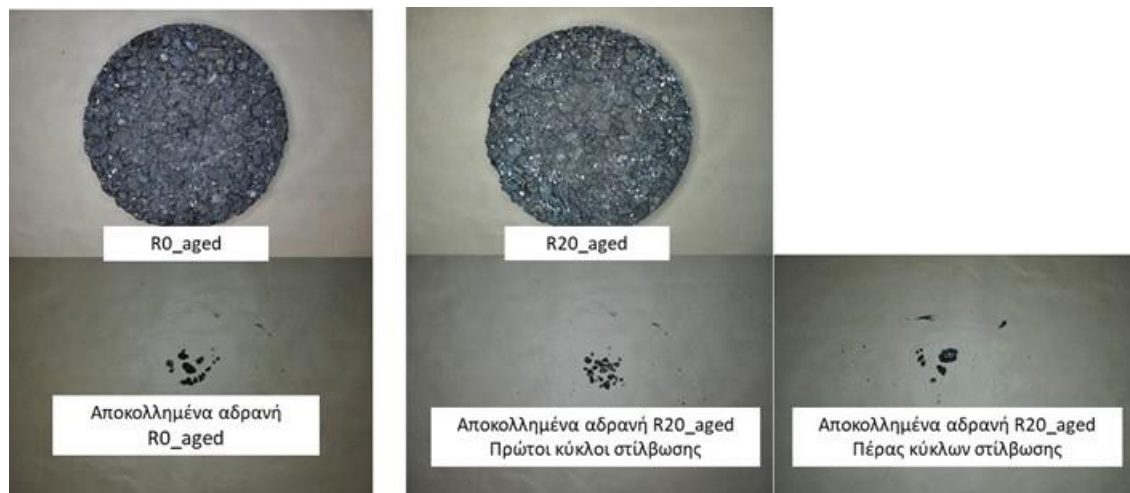
Εικόνα 5.42: Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAR και έχουν υποστεί γήρανση

Όπως παρατηρείται συγκριτικά με τις καμπύλες στίλβωσης για τις πλάκες που δεν έχουν υποστεί γήρανση, στην περίπτωση των πλακών με γήρανση η μορφή των καμπύλων διαφοροποιείται. Συγκεκριμένα, στην δεύτερη περίπτωση δεν παρατηρείται το φαινόμενο της κάλυψης των επιφανειακών αδρανών με άσφαλτο - masking effect, ως εκ τούτου η μορφή των καμπυλών προσεγγίζει περισσότερο τη μορφή της πρότυπης καμπύλης στίλβωσης δειγμάτων αδρανών (Εικόνα 3.41).

Σημειώνεται δε, ότι η μορφή των καμπυλών στίλβωσης εμφανίζει τρεις ζώνες: την ζώνη ταχείας μείωσης για το εύρος των 0-6000 κύκλων στίλβωσης, ήπιας μείωσης για το εύρος των 6000-90000 και τη ζώνη σταθεροποίησης για το εύρος των 90000-180000 κύκλων στίλβωσης. Συνολικά, φαίνεται ότι τόσο το δείγμα R0\_aged όσο και τα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα RAR (R10\_aged και R20\_aged) έγιναν σκληρότερα λόγω του φαινομένου γήρανσης και παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι στίλβωσης συγκριτικά με τα αντίστοιχα χωρίς γήρανση του υλικού.

Αναφορικά με τους πρώτους κύκλους στίλβωσης της Εικόνας 5.42, διαφαίνεται ότι τα ασφαλτομίγματα με περιεκτικότητα σε RAR εμφανίζουν ισοδύναμη ή ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά ως προς τον δείκτη τριβής σε σχέση με το R0\_aged. Επίσης, παρατηρείται ότι η υψηλότερη περιεκτικότητα σε RAR οδηγεί σε καλύτερη συμπεριφορά έναντι στίλβωσης. Ωστόσο, εφαρμόζοντας στατιστική ανάλυση t-test όπως στον Πίνακα 5.5 για τα τρία ζεύγη των πλακών αποδείχθηκε πως οι εν λόγω διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές. Συνεπώς δεν αποδεικνύεται ότι η αύξηση σε RAR βελτιώνει την συμπεριφορά έναντι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα με γήρανση.

Όσον αφορά στην αποκόλληση αδρανών κατά τη στίλβωση, η Εικόνα 5.43 δείχνει τα αποκολλημένα μέρη αδρανών και τις πλάκες μετά το πέρας δοκιμή στίλβωσης. Στις πλάκες R0\_aged και R20\_aged παρατηρήθηκε και πάλι αποκόλληση αδρανών, όπως και στα αντίστοιχες πλάκες χωρίς γήρανση υλικού.



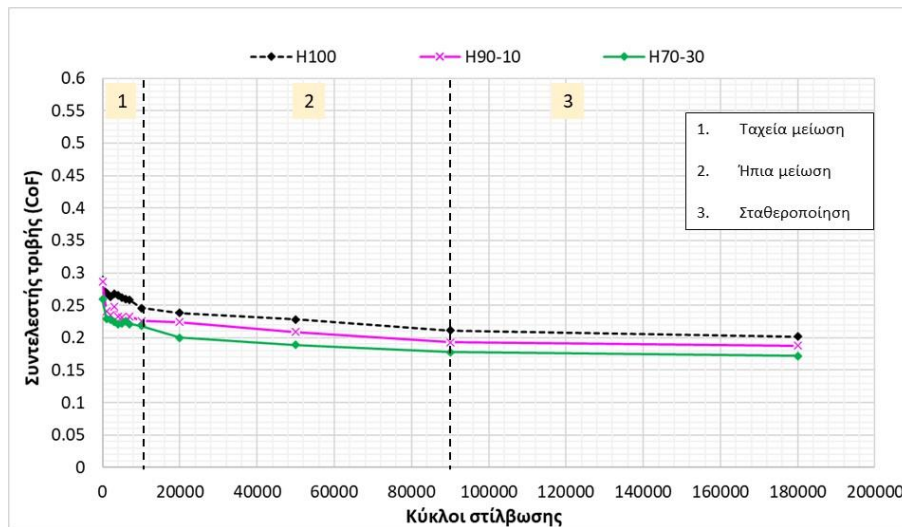
**Εικόνα 5.43:** Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή (R0\_aged και R20\_aged)

Αντίθετα για το R10\_aged, δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση αδρανών γεγονός που πιθανώς συνδέεται με την «καλή» αλληλεπίδραση μεταξύ του RAR ως τροποποιημένου συνδετικού και των αδρανών του ασφαλτομίγματος.

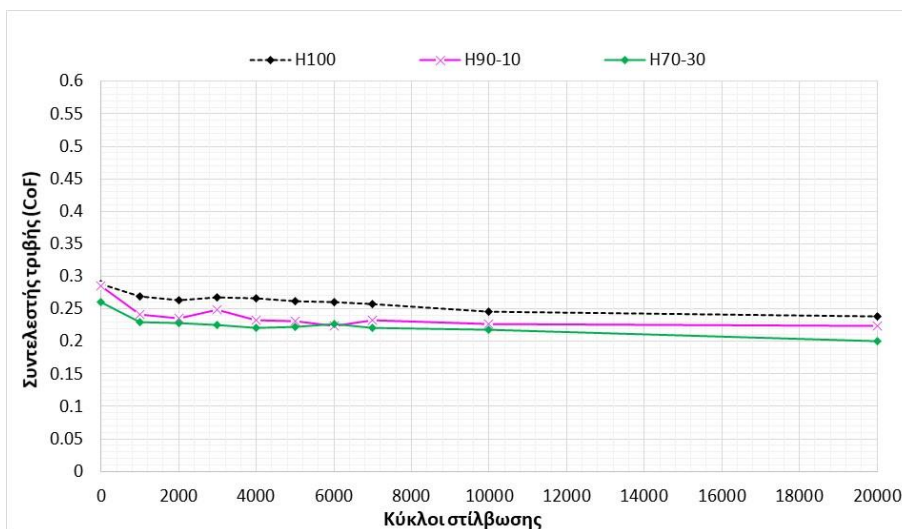
### 5.5.3 Πλάκες HMA με περιεκτικότητα RAP – Hx (H100, H90-10, H70-30)

Οι Εικόνες 5.44 και 5.45 που ακολουθούν παρουσιάζουν τις καμπύλες στίλβωσης για την περίπτωση των πλακών που περιέχουν HMA υλικό (από επιτόπου διάστρωση) και ποσοστά RAP υλικού (0%, 10%, 30%).





Εικόνα 5.44: Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAP

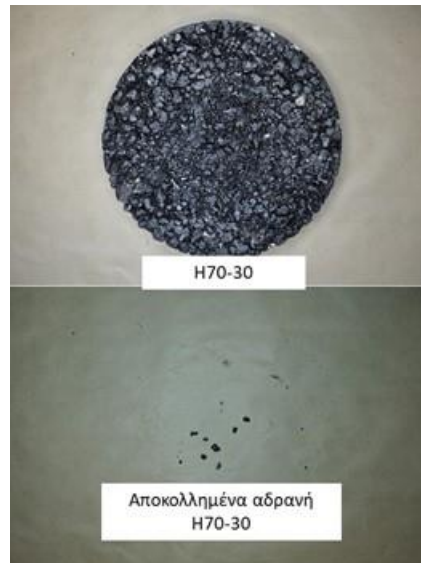


Εικόνα 5.45: Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν RAP

Πρωτίστως, διαφάνεται ότι η προσθήκη RAP οδηγεί σε μείωση του συντελεστή τριβής για όλους τους κύκλους στίλβωσης. Επίσης, και στις τρεις περιπτώσεις μιγμάτων δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της κάλυψης των επιφανειακών αδρανών από άσφαλο (masking effect). Συνεπώς, και σε αυτή την περίπτωση οι καμπύλες στίλβωσης προσεγγίζουν περισσότερο τη μορφή της πρότυπης καμπύλης στίλβωσης δειγμάτων αδρανών (Εικόνα 3.41). Ομοίως με τα ασφαλτομίγματα τύπου Rx\_aged, η μορφή των καμπυλών στίλβωσης εμφανίζει τρεις ζώνες: την ζώνη ταχείας μείωσης για το εύρος των 0-10000 κύκλων στίλβωσης, ήπιας μείωσης για το εύρος των 10000-90000 και την ζώνη σταθεροποίησης για το εύρος των 90000-180000 κύκλων στίλβωσης (Εικόνα 5.44).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διακυμάνσεις που εμφανίζει η καμπύλη στίλβωσης για το ασφαλτόμικγμα τύπου H90-10, πιθανώς οφείλονται στην παρουσία λεπτόκοκκων αδρανών στο μίγμα, τα οποία φαίνεται να έχουν καθοριστικό ρόλο κατά τους πρώτους κύκλους στίλβωσης μέχρι την πλήρη στίλβωσή τους. Στην συνέχεια, οι καμπύλες στην περιοχή των ζωνών ήπιας μείωσης και σταθεροποίησης είναι σχεδόν

παράλληλες με την καμπύλη του ασφαλτομίγματος H100 (χωρίς περιεκτικότητα RAP). Επίσης, αναφορικά με τις διαφορές των επιπέδων του συντελεστή τριβής για τα τρία δείγματα, οι διαφορές μεταξύ αυτών ήταν στατιστικά σημαντικές γεγονός που οδηγεί στη διαπίστωση ότι η περιεκτικότητα σε υλικό RAP επηρεάζει την συμπεριφορά κατά την στίλβωση.

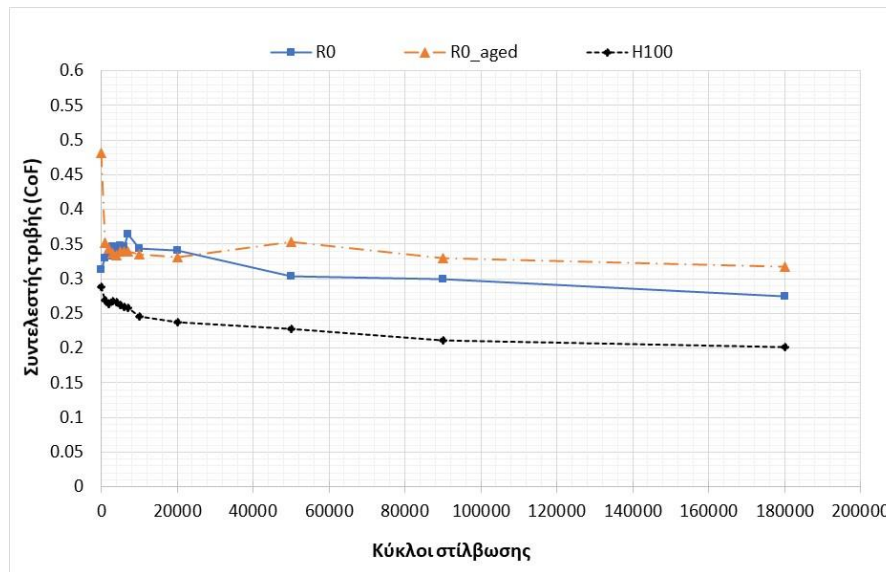


*Εικόνα 5.46: Δοκίμια μετά το τέλος της στίλβωσης και τα αποκολλημένα αδρανή (H70-30)*

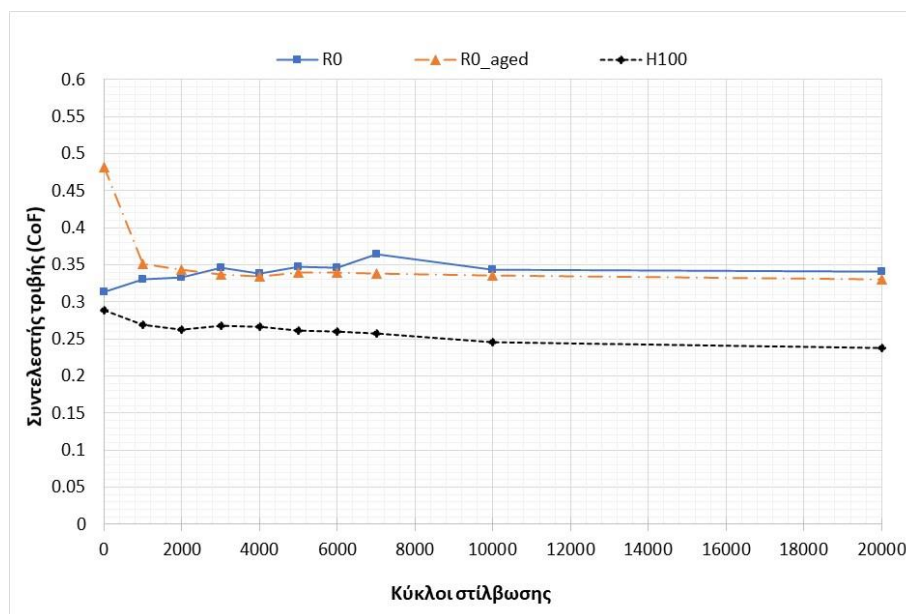
Γενικώς, για τη συγκεκριμένη κατηγορία ασφαλτομιγμάτων δεν παρατηρήθηκε έντονα το φαινόμενο της αποκόλλησης των αδρανών, εκτός από την περίπτωση του H70-30 όπου υπήρξε η αποκόλληση μικρών τμημάτων αδρανών.

#### 5.5.4 Συγκριτική αξιολόγηση ασφαλτομιγμάτων αναφοράς (χωρίς προσθήκη RAR/RAP)

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η συμπεριφορά στίλβωσης μεταξύ όλων των κατασκευασμένων ασφαλτομιγμάτων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορετικών χρησιμοποιούμενων υλικών και του μεταβλητού περιεχομένου σε RAR ή RAP. Για τον περιορισμό της επίδρασης της χρήσης διαφορετικών υλικών, έγινε διακριτή ανάλυση μεταξύ των ασφαλτομιγμάτων αναφοράς (HMA). Έτσι, οι Εικόνες 5.47 και 5.48 που ακολουθούν παρουσιάζουν την συμπεριφορά του συντελεστή τριβής έναντι στίλβωσης μόνο για τα ασφαλτομίγματα R0, R0\_aged (εργαστηριακά σχεδιασμένα) και H100 (συλλέχθηκε από το πεδίο).



**Εικόνα 5.47:** Κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα αναφοράς HMA (R0, R0\_aged, H100)



**Εικόνα 5.48:** Πρώτοι κύκλοι στίλβωσης για τα ασφαλτομίγματα αναφοράς HMA (R0, R0\_aged, H100)

Σύμφωνα με τις καμπύλες στίλβωσης που φαίνονται στην Εικόνα 5.47, είναι εμφανές ότι το ασφαλτόμιγμα τύπου H100 παρουσιάζει χαμηλότερο επίπεδο συντελεστή τριβής από το R0. Ενώ, περίπου στους 3000 κύκλους παρατηρείται μία μικρή αύξηση στο επίπεδο του συντελεστή τριβής και στους δύο τύπους. Από την Εικόνα 5.47 φαίνεται ότι οι καμπύλες στίλβωσης των R0 και R0\_aged συμπίπτουν στους 2000 κύκλους, εμφανίζοντας έτσι παρόμοια τάση με εκείνες που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.41** (δοκίμιο ασφαλτομίγατος έναντι δίσκου αδρανών). Πιθανώς, στους 2000 κύκλους στίλβωσης έχει αφαιρεθεί η άσφαλτος από τα επιφανειακά αδρανή του ασφαλτομίγατος R0 και η συμπεριφορά του έναντι στίλβωσης χαρακτηρίζεται κυρίως από την συμπεριφορά των αδρανών. Επίσης, η συμπεριφορά του

ασφαλομίγματος R0\_aged οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περίοδος των έξι (6) μηνών γήρανσης του υλικού, σκληραίνει την ασφαλτο βελτιώνοντας τις ιδιότητες του ασφαλομίγματος έναντι στίλβωσης κατά τους πρώτους κύκλους.

Συνολικά, οι προηγούμενες παρατηρήσεις αποδεικνύουν ότι ακόμα και τα ασφαλομίγματα αναφοράς δεν εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά καθώς διαφέρουν τόσο ο τρόπος παρασκευής τους (εργαστηριακά ή επιτόπου συλλογή), όσο και οι συνθήκες αποθήκευσής (ελεγχόμενες ή έκθεση σε εξωτερικό χώρο) τους. Οι εν λόγω παράμετροι οδηγούν εν τέλει σε διαφορετικά επίπεδα του συντελεστή τριβής έναντι στίλβωσης ή (μακροσκοπικά) κυκλοφοριακών διελεύσεων.

### 5.5.5 Ανάπτυξη καμπυλών στίλβωσης

Στην συνέχεια, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη σχέσεων για την περιγραφή των καμπύλων στίλβωσης με στόχο τη δυνατότητα της περαιτέρω αξιοποίησής τους για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων ίδιου τύπου ως προς την αντιολισθητική ικανότητά τους. Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των ασφαλομιγμάτων που διερευνήθηκαν, είναι προφανές ότι δεν μπορεί να δημιουργηθεί μία μοναδική σχέση. Ως εκ τούτου, οι καμπύλες στίλβωσης για κάθε τύπο ασφαλομίγματος διερευνήθηκαν ξεχωριστά. Για την περιγραφή των καμπύλων στίλβωσης αξιοποιήθηκε μέθοδος μη γραμμικής παλινδρόμησης και η σχέση για κάθε καμπύλη φαίνεται στον Πίνακα 5.6. Για κάθε σχέση που αναπτύχθηκε, ο συντελεστής τριβής περιγράφεται εν συντομία ως CoF (εξαρτημένη μεταβλητή) και οι κύκλοι στίλβωσης ως N (αριθμός κύκλων στίλβωσης - ανεξάρτητη μεταβλητή). Επίσης, στον Πίνακα 5.6 φαίνεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης - R<sup>2</sup> για τον έλεγχο της προσαρμογής της εκάστοτε σχέσης.

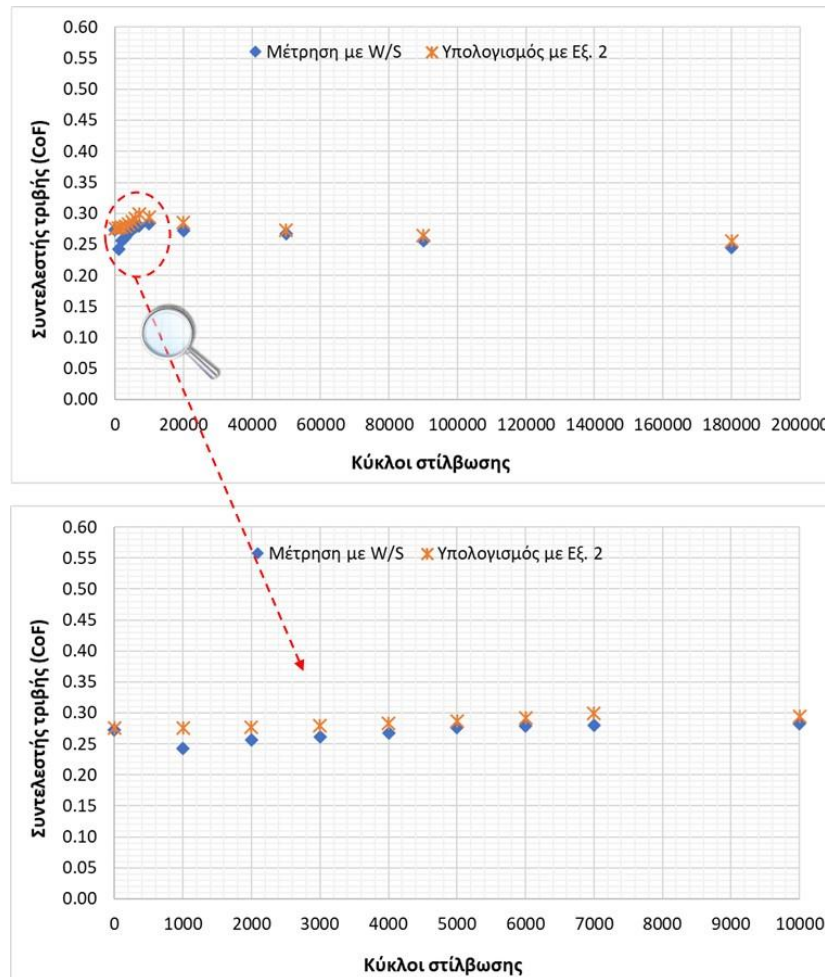
**Πίνακας 5.6:** Σχέσεις περιγραφής καμπύλων στίλβωσης

Πλάκα	No.	Εξίσωση	R <sup>2</sup>
R0	1a (ανοδική τάση)	CoF = 0.32 + 0.56*10 <sup>-5</sup> N	0.84
	1b (καθοδική τάση)	CoF = 0.59 – 0.025*ln(N)	0.97
R10	2a (ανοδική τάση)	CoF = 0.27+ 4.46*10 <sup>-10</sup> *N <sup>2</sup>	0.50
	2b (καθοδική τάση)	CoF = 0.42 – 0.014*ln(N)	0.97
R20	3a (ανοδική τάση)	CoF = 0.27+ 5.67*10 <sup>-10</sup> *N <sup>2</sup>	0.75
	3b (καθοδική τάση)	CoF = 0.50 – 0.023*ln(N)	0.99
H0_aged	4	CoF = 0.49 – 0.115N <sup>0.03</sup>	0.87
H10_aged	5	CoF = 0.44 – 0.047N <sup>0.08</sup>	0.97
H20_aged	6	CoF = 0.45 – 0.034N <sup>0.12</sup>	0.73
H100	7	CoF = 0.29 – 0.002N <sup>0.31</sup>	0.98
H90-10	8	CoF = 0.26 – 0.005N <sup>0.24</sup>	0.97
H70-30	9	CoF = 0.29 – 0.013N <sup>0.17</sup>	0.96

Αναφορικά με τη μορφή των σχέσεων, υπάρχουν δύο βασικές παρατηρήσεις. Πρώτον, η μορφή τους σχετίζεται με την ύπαρξη ή μη της κάλυψης των επιφανειακών αδρανών με ασφαλτο, για το λόγο αυτό, για τα ασφαλομίγματα R0, R10 και R20 αναπτύχθηκαν δύο εξισώσεις για τον ανοδικό και τον καθοδικό κλάδο των καμπύλων. Δεύτερον, οι Εξ. 4 - 6 δείχνουν ότι ο ρυθμός της αρχικής μείωσης του CoF είναι πιο έντονος από εκείνον των Εξ. 7 - 9. Η εν λόγω παρατήρηση είναι λογική λαμβάνοντας υπόψη την κλίση των

καμπυλών στίλβωσης των πλακών με γήρανση κατά τους πρώτους κύκλους στίλβωσης (Εικόνα 5.41 και Εικόνα 5.42).

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας, ένα σετ πλακών με RAR αξιοποιήθηκε για τον έλεγχο ακρίβειας των Εξ. 1-3. Δηλαδή, πραγματοποιήθηκαν και σε αυτά τα δείγματα δοκιμές με τη συσκευή W/S και τα αποτελέσματα των κύκλων στίλβωσης αξιοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των Εξ. 1-3 αναφορικά με τα ασφαλτομίγματα R0, R10 και R20. Ως εκ τούτου, ο μετρημένος CoF των αντίγραφων πλακών αξιολογήθηκε συγκριτικά με τον CoF που υπολογίστηκε για κάθε κύκλο στίλβωσης μέσω των Εξ. 1-3. Ενδεικτικά, ένα παράδειγμα μιας μετρημένης και υπολογισμένης καμπύλης στίλβωσης απεικονίζεται στην Εικόνα 5.49 για το δείγμα R10 (Εξ. 2).



Εικόνα 5.49: Μέτρηση CoF vs. Υπολογισμός CoF (δείγμα R10)

Από την Εικόνα 5.49, παρατηρείται ότι οι υπολογισμένες τιμές CoF στην ανοδική καμπύλη ( $\leq 7000$ ) παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τις μετρηθείσες τιμές, πιθανώς λόγω της απομάκρυνσης του ασφαλτικού υλικού από τα επιφανειακά αδρανή (βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη). Αντίθετα, οι υπολογισμένες τιμές CoF για μεγαλύτερες τιμές κύκλων στίλβωσης (μακροπρόθεσμη πρόβλεψη) φαίνεται ότι σχεδόν συμπίπτουν με τις μετρηθείσες τιμές. Για τον έλεγχο ακρίβειας των Εξ. 1-3 αξιοποιήθηκε ο δείκτης Root Mean Square Percentage Error (RMSPE%) και υπολογίστηκε ως εξής:

$$RMSPE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{CoF_{calc} - CoF_{meas}}{CoF_{meas}}\right)^2}{n}} * 100 \quad (5.1)$$

όπου:

$n$ : ο αριθμός των παρατηρήσεων

$CoF_{calc}$ : υπολογισμένες τιμές CoF για τα δείγματα R0, R10 και R20 (μέσω την Εξ. 1-3)

$CoF_{meas}$ : μετρηθείσες τιμές CoF (μέσω της W/S) για τα δείγματα R0, R10 και R20 (σετ δειγμάτων για επαλήθευση)

Ο δείκτης RMSPE για τα δείγματα R0, R10 και R20 υπολογίστηκε 11,6%, 6,2% και 7,3% αντίστοιχα. Οι εν λόγω τιμές θεωρούνται χαμηλές για τη συγκεκριμένη κατηγορία δεδομένων και συνεπώς, κρίνονται αποδεκτές σχετικά με την ακρίβεια των σχέσεων που αναπτύχθηκαν. Παρόμοια τάξη σφαλμάτων RMSPE έχουν βρεθεί και σε άλλες σχετικές έρευνες (Veerasingam et al. 2011, Plati et al. 2020a).

Συνολικά, πιστεύεται ότι η ανάπτυξη τέτοιου τύπου σχέσεων περιγραφής, ανάλογα με τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος, θα μπορούσε να αποδειχθεί χρήσιμη για σκοπούς ελέγχου ποιότητας σε περίπτωση ενδεχόμενων έργων κατασκευής ή ανακατασκευής οδοστρώματος. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις που διατυπώνονται στην **Ενότητα 5.5.4** για την περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων αναφοράς, η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων στο πεδίο είναι πιθανό να αποκλίνει από αυτήν που προβλέπεται μέσω των σχέσεων ή των εργαστηριακών δοκιμών. Μολαταύτα, η ενδεχόμενη ύπαρξη βαθμονομημένων και επαληθευμένων σχέσεων περιγραφής της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων έναντι στίλβωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προπομπός για την προκαταρκτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς παρόμοιων υλικών πριν την ενδεχόμενη χρήση τους στο πεδίο.

## 6 Αναλυτική διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας με στοιχεία πεδίου (Κλίμακα 1:1)

### 6.1 Ανάλυση μακροϋφής

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση στοιχείων μακροϋφής από μετρήσεις πεδίου, ως βασική παράμετρο επίδρασης της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας. Δεδομένου ότι στο πλαίσιο παραλαβής νέων οδοστρωμάτων, είναι απαραίτητη μόνο η εκτίμηση των επιπέδων μακροϋφής του ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας, η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου ξεκινάει μέσω αξιολόγησης των δυνατοτήτων καταγραφής της μακροϋφής στην κατάσταση «μηδέν» δηλαδή, την κατάσταση ενός νέου οδοστρώματος πριν δοθεί στην κυκλοφορία. Προς τούτο, συλλέχθηκαν επί τόπου στοιχεία μακροϋφής, επεξεργάστηκαν και αξιολογήθηκαν. Στο συγκεκριμένο εδάφιο, παρουσιάζονται οι μέθοδοι μετρήσεις, τα σχετικά αποτελέσματα, καθώς και η ανάλυση τους, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω και αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα.

Αρχικά κατά μήκος νέων τμημάτων αυτοκινητοδρόμου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μακροϋφής με τη μέθοδο Sand Patch και με το σύστημα Laser profiler. Βασικός στόχος ήταν η προσπάθεια σύνδεσης των δεικτών MTD - Mean Texture Depth (μέθοδος Sand Patch) και MPD - Mean Profile Depth (μέθοδος Laser profiler) που παρουσιάστηκαν στην **Ενότητα 3**, δεδομένου ότι το MTD αξιοποιήθηκε εκτενώς σε συνθήκες εργαστηρίου παρέχοντας σημειακές μετρήσεις ενώ, το MPD χρησιμοποιείται στο πεδίο παρέχοντας συνεχείς μετρήσεις. Επιπροσθέτως, στην πράξη οι προδιαγραφές για παραλαβή νέων οδοστρωμάτων στις περισσότερες χώρες χρησιμοποιούν τον δείκτη MTD, γεγονός που αποτελεί βασική δυσχέρεια ελέγχου νέων οδοστρωμάτων τόσο σε επίπεδο έργου, αλλά κυρίως σε επίπεδο δικτύου. Έως τώρα έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες (Losa et al. 2007, Freitas et al. 2008, Kim et al. 2013, Pratico and Vaiana 2015) αναφορικά με τη σύνδεση των δύο δεικτών με επικρατέστερη την σχέση που αναγράφεται στο πρότυπο E1845 της ASTM (2015), η οποία δίνεται ακολούθως:

$$ETD = 0.2 + 0.8 * MPD \quad (6.1)$$

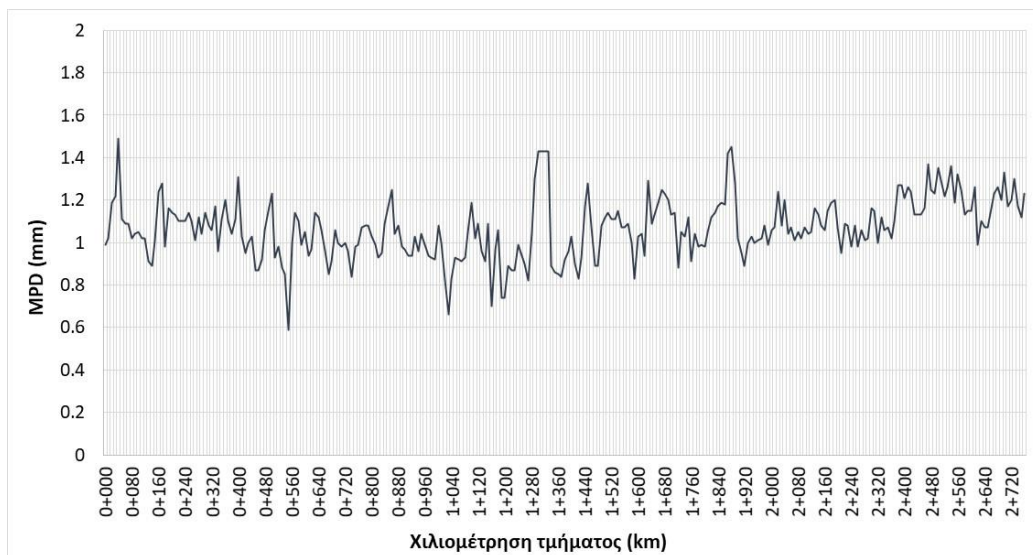
Όπου:

ETD (mm): εκτιμώμενο βάθος υφής λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις του δείκτη MPD (mm)

Οπότε μέσω της εν λόγω σχέσης προκύπτει η αναγωγή των μετρήσεων πεδίου σε μετρήσεις του δείκτη ETD ώστε να είναι συγκρίσιμες με αντίστοιχες σε όρους MTD. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις διαφαίνεται η αδυναμία της εν λόγω σχέσης να εκτιμήσει το πραγματικό μέσο βάθος υφής. Για το λόγο αυτό στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μία νέα μεθοδολογία σύνδεσης των δύο δεικτών για την περίπτωση νέων οδοστρωμάτων συγκεκριμένου τύπου που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας. Συγκεκριμένα, στα οδοστρώματα που μελετήθηκαν, το ασφαλτόμιγμα της αντιολισθητικής στρώσης περιέχει σκωρία σαν επιπλέον αδρανές και έχει σχεδιαστεί βάσει του πρότυπου O-5 της ASTM με περίπου 11,5% κενά αέρα και 4,6% περιεκτικότητα σε άσφαλτο. Η παραγωγή του ασφαλτομίγματος έγινε εν θερμώ (HMA) με άσφαλτο 80/100 με τροποποιητικό SBS 4%.

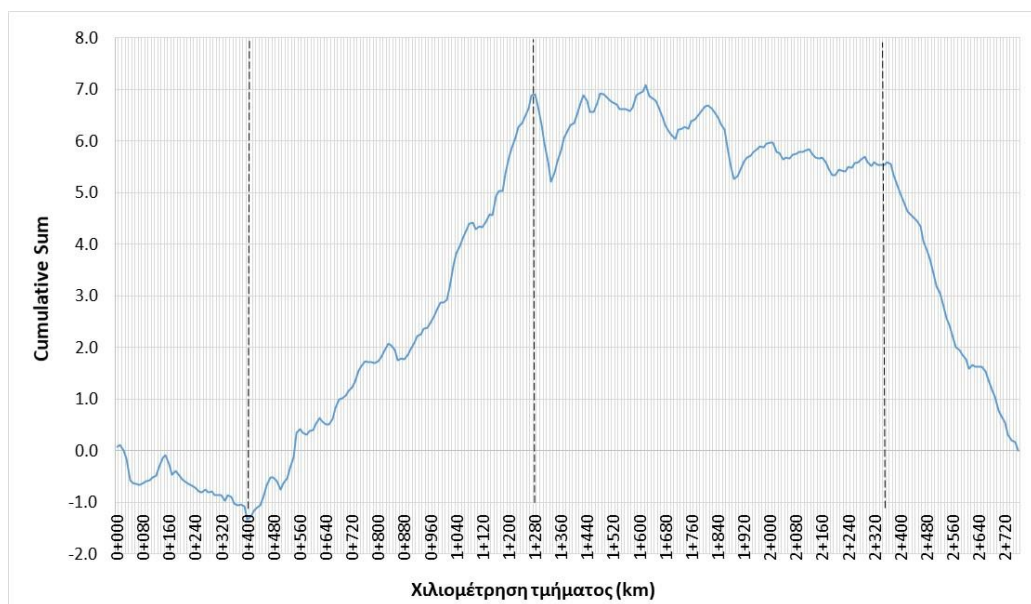
Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζονται οι κατά μήκος μετρήσεις μακροϋφής σε όρους MPD στο νέο οδόστρωμα που μελετήθηκε για την ανάπτυξη της εν λόγω μεθοδολογίας.





Εικόνα 6.1: Καταμήκος μετρήσεις μακροϋφής σε νέο οδόστρωμα

Στη συνέχεια, το εν λόγω τμήμα επιμερίστηκε σε ομογενή υπο-τμήματα, αξιοποιώντας τη μέθοδο Cumulative Sum Analysis (CUSUM) (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2: Επιμερισμός ομογενών τμημάτων με τη μέθοδο CUSUM

Σύμφωνα με τη μέθοδο CUSUM, οι αλλαγές στην κλίση της τεθλασμένης γραμμής υποδεικνύουν διαφοροποιήσεις στις τιμές των δεδομένων που εξετάζονται. Έτσι, τα τέσσερα υποτμήματα (S1, S2, S3, S4) που προέκυψαν θεωρήθηκαν ομογενή έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η περαιτέρω ανάλυσή τους. Για το τρίτο υποτμήμα, αν και θεωρείται ομογενές, απεικονίζονται μικρές αλλαγές στην κλίση του CUSUM, αλλά αγνοούνται για λόγους απλότητας. Στη συνέχεια, η υπόθεση επιμερισμού των τεσσάρων υποτμημάτων με βάση την ενδεικτική αλλαγή κλίσης επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας την ανάλυση t-test. Για τη διενέργεια του συγκεκριμένου t-test, διαμορφώθηκε η μηδενική υπόθεση της αμελητέας διαφοράς των τιμών MPD

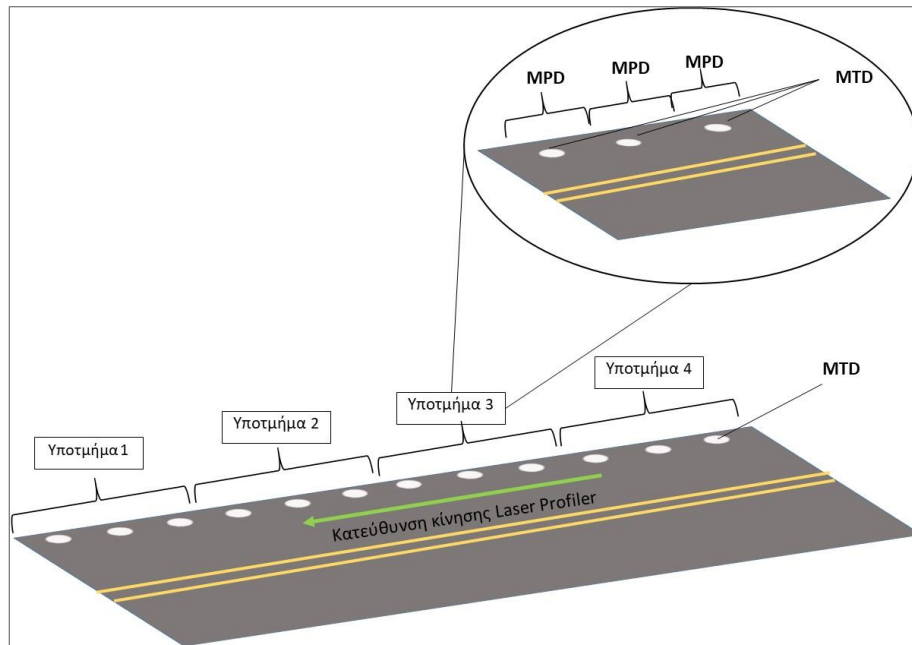
στα τέσσερα υποτμήματα, γεγονός που αν επαληθευθεί υποδηλώνει λανθασμένη την επιλογή επιμερισμού. Για τη συγκεκριμένη έρευνα, υιοθετήθηκε η δοκιμή t-test με την προϋπόθεση ίσων διακυμάνσεων λόγω του χαμηλού συντελεστή διακύμανσης των δειγμάτων. Στον παρακάτω Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής t-test μεταξύ των υποτμημάτων (S1-S2, S2-S3, S3-S4).

**Πίνακας 6.1:** Αποτελέσματα t-test μεταξύ των υποτμημάτων

<b>Statistics S1-S2</b>	<b>Μεταβλητή 1</b>	<b>Μεταβλητή 2</b>
Mean	1.097 mm	0.972 mm
Variance	0.0118 mm	0.0136 mm
Observations	42	86
Pooled Variance	0.013	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	126	
t Stat	5.830	
P(T<=t) one-tail	2.18E-08	
t Critical one-tail	1.657	
P(T<=t) two-tail	4.36E-08	
t Critical two-tail	1.97	
<b>Statistics S2-S3</b>	<b>Μεταβλητή 1</b>	<b>Μεταβλητή 2</b>
Mean	0.972 mm	1.079 mm
Variance	0.0136 mm	0.0177 mm
Observations	86	110
Pooled Variance	0.015	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	194	
t Stat	-5.889	
P(T<=t) one-tail	8.42E-09	
t Critical one-tail	1.6527	
P(T<=t) two-tail	1.68E-08	
t Critical two-tail	1.97	
<b>Statistics S3-S4</b>	<b>Μεταβλητή 1</b>	<b>Μεταβλητή 2</b>
Mean	1.079 mm	1.209 mm
Variance	0.0177 mm	0.0073 mm
Observations	110	39
Pooled Variance	0.0150	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	147	
t Stat	-5.689	
P(T<=t) one-tail	3.33E-08	
t Critical one-tail	1.655	
P(T<=t) two-tail	6.64E-08	
t Critical two-tail	1.97	

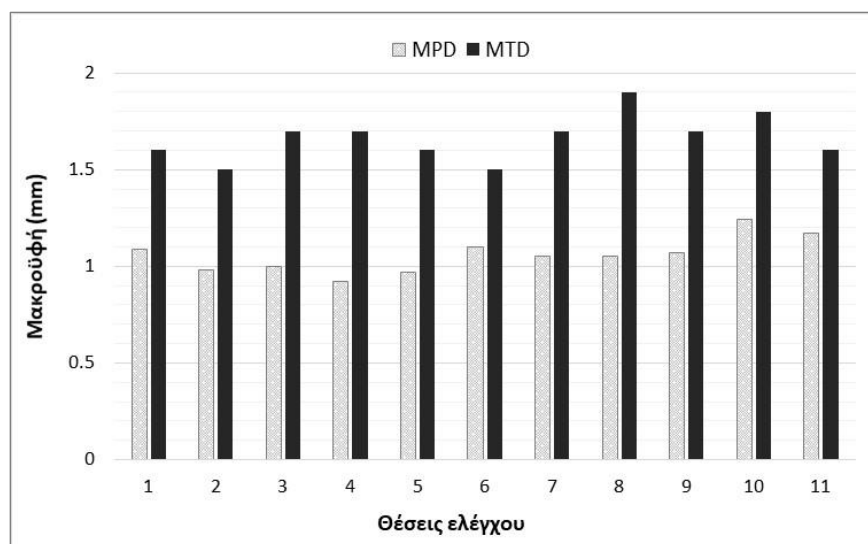
Το κριτήριο για αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης είναι  $|t\text{-Stat}| < t\text{-Critical}$ . Στο παρόν, αυτό το κριτήριο δεν επαληθεύεται, ως εκ τούτου η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, πράγμα που σημαίνει ότι ο προτεινόμενος επιμερισμός - τμηματοποίηση μπορεί να θεωρηθεί έγκυρος.

Όσον αφορά στις μετρήσεις μακροϋφής με τη μέθοδο Sand Patch, πραγματοποιήθηκαν εντός των ομογενών τμημάτων. Για την συγκριτική αξιολόγηση των MPD-MTD, σε κάθε τιμή του δείκτη MTD αντιστοιχήθηκε ένα σύνολο μετρήσεων MPD γύρω από την εκάστοτε θέση δοκιμής. Στο σχήμα της Εικόνας 6.3 παρουσιάζεται η εν λόγω προσέγγιση.



Εικόνα 6.3: Αντιστοίχιση τιμών MPD-MTD

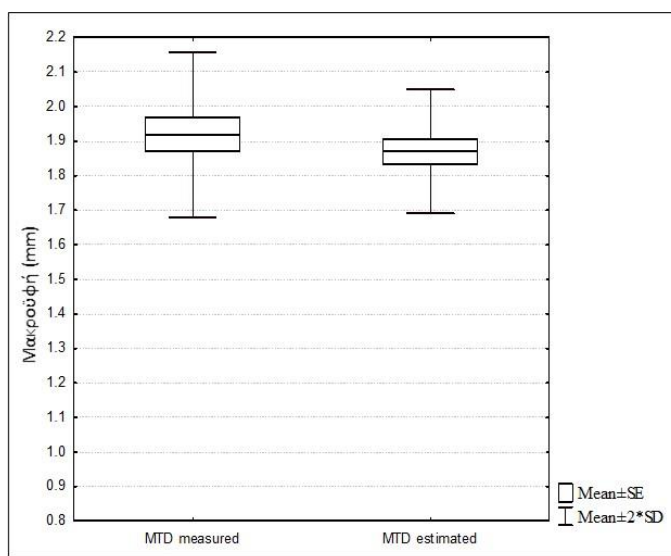
Για να προσδιοριστεί μια χαρακτηριστική τιμή κάθε συνόλου των μετρήσεων MPD εφαρμόστηκε η κατανομή Gauss που δίνει περισσότερο βάρος στα άκρα από την κανονική κατανομή (Mogrovejo et al. 2016). Έτσι, κατέστη δυνατή η δημιουργία ενός νέου δείγματος με χαρακτηριστικές τιμές MPD που αντιστοιχούν στα μετρημένα δεδομένα MTD (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: MTD και MPD (χαρακτηριστικές τιμές) για τις έντεκα (11) θέσεις

Από την Εικόνα 6.4 φαίνεται ότι οι τιμές MTD είναι μεγαλύτερες από τις τιμές MPD για όλες τις θέσεις. Η διακύμανση στις μετρήσεις MTD είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές MPD, ωστόσο, και οι δύο δείκτες έχουν χαμηλό συντελεστή διακύμανσης ( $CV_{MTD} (\%) = 8,7\%$ ,  $CV_{MPD} (\%) = 7,0\%$ ).

Λαμβάνοντας υπόψη τα ζεύγη τιμών που προέκυψαν αναπτύχθηκε ένας συντελεστής αναγωγής των μετρήσεων MPD σε τιμές MTD για την περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων των τμημάτων που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση. Ο εν λόγω συντελεστής ορίστηκε ως  $r_o = MTD/MPD$  και σταθμίστηκε ίσος 1,55. Ενώ, για την περαιτέρω αξιοποίηση του πραγματοποιήθηκε και μία διαδικασία επαλήθευσης σε ένα άλλο τμήμα αυτοκινητοδρόμου με ίδια χαρακτηριστικά. Η Εικόνα 6.5 παρουσιάζει τα θηκογράμματα των μετρημένων τιμών MTD (measured) συγκριτικά με τα αντίστοιχα που υπολογίσθηκαν MTD (estimated) αξιοποιώντας τον συντελεστή αναγωγής για το επιπρόσθετο τμήμα αυτοκινητοδρόμου.



Εικόνα 6.5: Μετρημένα MTD και εκτιμώμενα MTD μέσω του συντελεστή  $r_o$  στο επιπρόσθετο τμήμα αυτοκινητόδρομο

Τα δύο δείγματα τιμών MTD αναλύθηκαν περαιτέρω με αξιοποιώντας τη δοκιμή t-test με την προϋπόθεση μη ίσων διακυμάνσεων των δειγμάτων και τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα t-test μεταξύ των δειγμάτων MTD

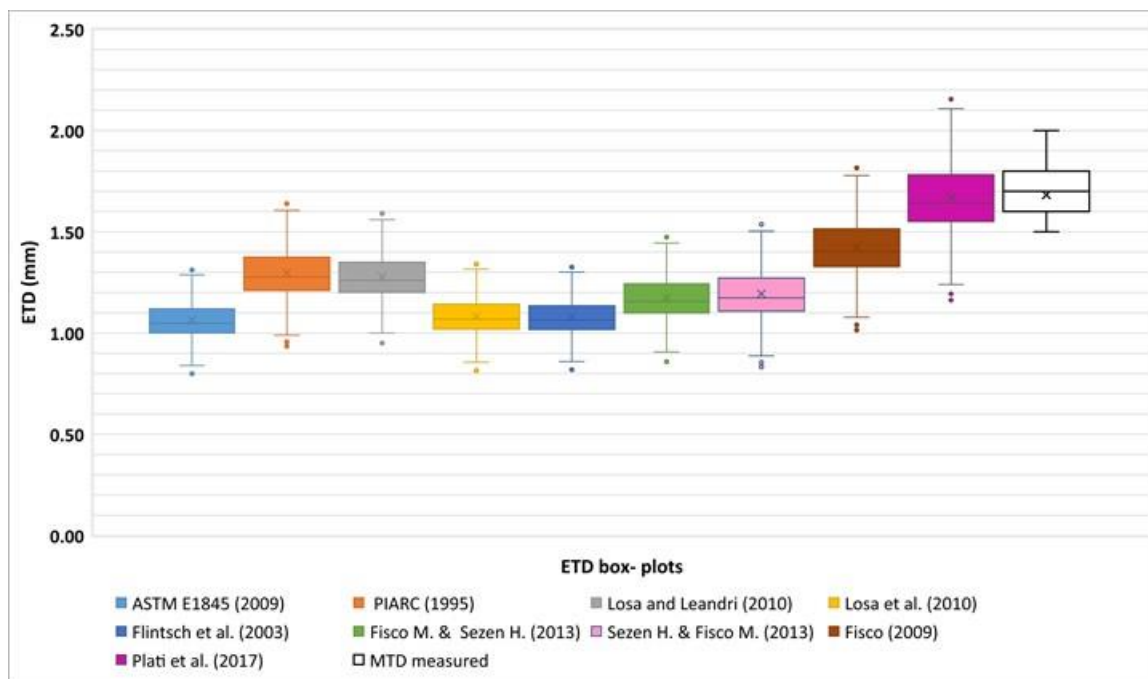
Statistics	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Mean	1.92 mm	1.87 mm
Variance	0.0142 mm	0.0080 mm
Observations	6	6
Hypothesized Mean Difference	0.1	
df	9	
t Stat	-0.853	
P(T<=t) one-tail	0.207	
t Critical one-tail	1.83	
P(T<=t) two-tail	0.415	
t Critical two-tail	2.26	

Η μηδενική υπόθεση για μη σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών γίνεται αποδεκτή βάσει του κριτηρίου ( $|t\text{-Stat}| < t\text{ Critical}$ ) και συνεπώς, ο εν λόγω συντελεστής αναγωγής μπορεί να θεωρηθεί έγκυρος.

Επιπροσθέτως, αξιοποιήθηκε ένα επιπλέον νέο τμήμα αυτοκινητοδρόμου με παρόμοια χαρακτηριστικά, το οποίο δεν είχε δοθεί στην κυκλοφορία με στόχο την συγκριτική αξιολόγηση του εν λόγω συντελεστή με άλλες σχέσεις της βιβλιογραφίας που στοχεύουν στη σύνδεση των δύο δεικτών. Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τις εξισώσεις που έχουν δημοσιευθεί συμπεριλαμβανομένου και του συντελεστή αναγωγής  $r_0$  αναφερόμενος ως Plati et al. 2017 (Plati et al. 2017a).

**Πίνακας 6.3:** Σχέσεις σύνδεσης δεικτών MPD-MTD

Εξίσωση	No.	Αναφορά ως
$ETD=0.20+0.80 \cdot MPD$	(1)	ASTM E1845 (2009)
$MTD=0.11+1.10 \cdot MPD$	(2)	Wambold et al. (1995) - PIARC
$ETD=0.20+MPD$	(3)	Losa & Leandri (2010)
$ETD=0.20+0.82 \cdot MPD$	(4)	Losa et al. (2010)
$ETD=0.227+0.79 \cdot MPD$	(5)	Flintsch et al. (2003)
$MTD=0.139+0.96 \cdot MPD$	(6)	Fisco & Sezen (2013)
$MTD=0.0076+1.10 \cdot MPD$	(7)	Sezen & Fisco (2013)
$MTD=0.0782+1.2496 \cdot MPD$	(8)	Fisco (2009)
$MTD=1.55 \cdot MPD$	(9)	Plati et al. (2017)



**Εικόνα 6.6:** Μετρημένα MTD και εκτιμώμενα MTD-ETD (μέσω των εξισώσεων του Πίνακα 6.3)

Το διάγραμμα της Εικόνας 6.6 εμφανίζει ότι η εξίσωση που αναπτύχθηκε από τους Plati et al. 2017a οδηγεί σε εκτιμήσεις του δείκτη MTD σχεδόν όμοιες κατά μέσο όρο με τις μετρημένες τιμές του

συγκεκριμένου δείκτη (MTD measured). Το γεγονός αυτό ενισχύει τη δυναμική του εν λόγω συντελεστή προσαρμογής  $r_o$  για ασφαλομίγματα του συγκεκριμένου τύπου.

## 6.2 Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής: Επίδραση κυκλοφοριακής φόρτισης

### 6.2.1 Μακροπρόθεσμη επίδραση της κυκλοφορίας

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 3.4.5), η κυκλοφορία αποτελεί βασικό παράγοντα επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα. Συνεπώς, η λειτουργία μίας οδού οδηγεί σε υποβάθμιση του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας και επιδρά σημαντικά στην εξέλιξη της μακροϋφής. Ωστόσο, η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κυκλοφορίας στα δύο αυτά επιφανειακά χαρακτηριστικά μιας οδού αποτελεί μια αρκετά σύνθετη διαδικασία δεδομένων, τόσο των υπόλοιπων παραγόντων που επιδρούν στο πεδίο (καιρικές συνθήκες, είδος κυκλοφορίας), όσο και από την ανάγκη για πληθώρα στοιχείων μετρήσεων.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη έρευνα αξιοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου από αυτοκινητοδρόμους στον ελλαδικό χώρο. Οι εν λόγω μετρήσεις αποτελούν στοιχεία της βάσης δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ από την οποία αξιοποιήθηκαν συγκεκριμένα στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας σε όρους GN και μακροϋφής σε όρους MPD (mm) από τη δεξιά λωρίδα κυκλοφορίας.

Ειδικότερα, τα δεδομένα που εξήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν για την τρέχουσα έρευνα αφορούσαν σε έναν εν λειτουργία αστικό αυτοκινητόδρομο, προερχόμενα από συστηματικές μετρήσεις περιοδικής παρακολούθησης του οδοστρώματος για έντεκα (11) συναπτά έτη. Τα δεδομένα κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις διακριτές κατηγορίες, με καθεμία από αυτές να περιλαμβάνει 4-6 οδικά τμήματα με μήκη που κυμαίνονται μεταξύ των 5-10 χιλιομέτρων. Επίσης, στο οδόστρωμα δεν εμφανίζονταν επιφανειακές φθορές και η δομική κατάσταση του ήταν πολύ καλή λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά στοιχεία της περιοδικής παρακολούθησης. Ο Πίνακας 6.4 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των τριών κατηγοριών τμημάτων του αυτοκινητοδρόμου που διερευνήθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά γεωμετρικού σχεδιασμού και τον αθροιστικό όγκο κυκλοφορίας.

**Πίνακας 6.4:** Χαρακτηριστικά τμημάτων του αυτοκινητοδρόμου υποδιερεύνηση ανά κατηγορία

Κατηγορία	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	Κυκλοφοριακός φόρτος	Πλήθος υπό-τμημάτων	Πλήθος λωρίδων
A	Ευθυγραμμία / κυρίως ευθυγραμμία με κλίση μικρότερη του 3%.	Υψηλός	6 (A <sub>1</sub> – A <sub>6</sub> )	3 - 4
B	Ευθυγραμμία / κυρίως ευθυγραμμία με κατά μήκος κλίση μικρότερη του 3%.	Μικρότερος της κατηγορίας A αλλά υψηλότερος αριθμός βαρέων οχημάτων	5 (B <sub>1</sub> – B <sub>5</sub> )	2 - 3
C	Καμπυλότητα (R < 500 m) ή/και με κατά μήκος κλίση μεταξύ 3-6%	Μέτριος	4 (C <sub>1</sub> – C <sub>4</sub> )	2 - 3

Η ανώτερη – αντιολισθηρή στρώση των τμημάτων του οδοστρώματος που μελετήθηκαν αποτελείται από ασφαλτόμιγμα που περιέχει σκωρία σαν επιπλέον αδρανές και έχει σχεδιαστεί βάσει του πρότυπου O-5 της ASTM με περίπου 11% κενά αέρα και 4,6% περιεκτικότητα σε άσφαλτο. Η παραγωγή του ασφαλτομίγματος έγινε εν θερμώ (HMA) με άσφαλτο 80/100 και με τροποποιητικό τύπου SBS 4%.

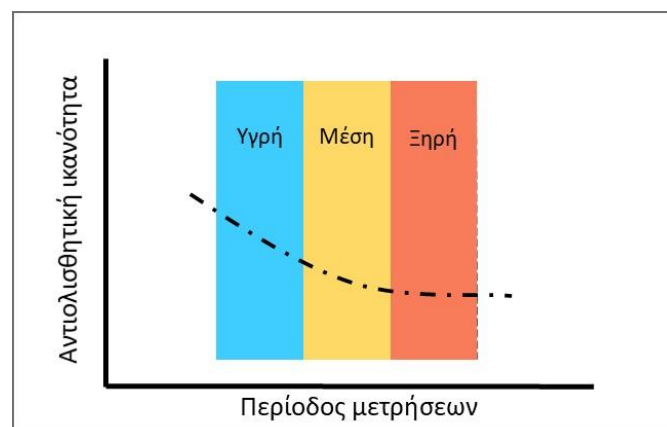
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας παρέχονται σε όρους GN, και μετρήθηκαν με το σύστημα GripTester, που περιγράφηκε στην **Ενότητα 4.2.2**. Τα δεδομένα μακροϋφής σε όρους MPD προήλθαν από μετρήσεις με το σύστημα προφίλομέτρησης Laser Profiler (**Ενότητα 3**). Τόσο τα δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας όσο και μακροϋφής που αξιοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των δύο επιφανειακών χαρακτηριστικών προήλθαν από τις κάτωθι περιόδους μετρήσεων. Οι συγκεκριμένες περιόδους μετρήσεων βασίστηκαν στο πρότυπο του Ηνωμένου Βασιλείου (CS/228, 2020) αναφορικά με την συχνότητα τους και προσαρμόστηκαν στα δεδομένα του κλίματος στον ελλαδικό χώρο. Δηλαδή, βασικό κριτήριο για τον διαχωρισμό των περιόδων αποτέλεσε η απαλοιφή της επίδρασης των εποχιακών διακυμάνσεων στα δύο υποδιερεύνηση επιφανειακά χαρακτηριστικά (Donbavand and Cook 2005).

**I.** Υγρή περίοδος - Περίπου μία εβδομάδα έως 1 μήνα μετά την κύρια περίοδο αυξημένων βροχοπτώσεων / υγρών μηνών (με βάση τη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη).

**II.** Μέση περίοδος - Περίπου δύο έως τρεις μήνες μετά την περίοδο I (αναφέρεται κυρίως στην αρχή των ξηρών μηνών).

**III.** Ξηρή περίοδος - Περίπου τέσσερις έως έξι μήνες μετά την περίοδο I (αναφέρεται κυρίως στο τέλος των ξηρών μηνών).

Η Εικόνα 6.7 παρουσιάζει μια γενική επισκόπηση των αναμενόμενων επιπέδων της αντιολισθητικής ικανότητας με βάση τις προαναφερθείσες περιόδους αναφοράς.



**Εικόνα 6.7:** Αναμενόμενα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας κατά τις περιόδους μετρήσεων (CS/228, 2020)

Για κάθε περίοδο μέτρησης του εκάστοτε έτους προέκυψε μία χαρακτηριστική τιμή από το δείγμα δεδομένων μέσω πιθανοτικής ανάλυσης. Οι χαρακτηριστικές τιμές από τις τρεις περιόδους για κάθε έτος



επεξεργάσθηκαν περαιτέρω ώστε να προκύψει ένα νέο δείγμα μετρήσεων κατά το πρότυπο του Ην. Βασιλείου (CS/228 2020) με βάση το οποίο το ετήσιο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας περιγράφεται από τον δείκτη Mean Summer Skid Coefficient (MSSC) που είναι ανεξάρτητος από την περίοδο μετρήσεων. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη διαδικασία παρακολούθησης οδοστρώματος για τη μέτρηση και την αξιολόγηση των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας κυρίως σε σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης παρακολούθησης (benchmark sites) (Fwa 2006, Mitchell 2014, Plati and Romoni 2019). Με αυτήν την προσέγγιση δεν χρειάζεται να υπολογισθούν διορθωτικοί συντελεστές για την προσαρμογή των μετρήσεων από διαφορετικές περιόδους, γεγονός που ελαχιστοποιεί τον χρόνο επεξεργασίας των μετρήσεων για την αξιολόγηση των δεδομένων. Η Εξίσωση 6.2 περιγράφει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη MSSC.

$$MSSC = (SC_{Υγρή} + SC_{Μέση} + SC_{Ξηρή})/3 \quad (6.2)$$

όπου:

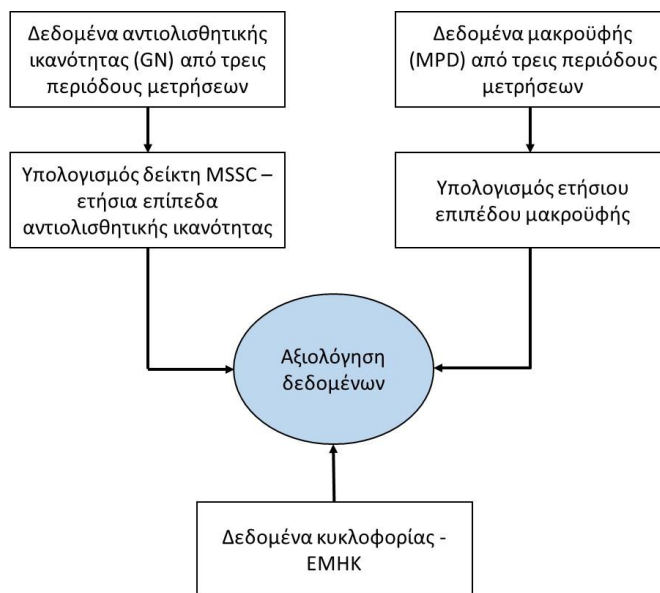
$SC_{Υγρή}$  = Ο συντελεστής αντιολισθητικής ικανότητας - Skid Coefficient (SC) - της υγρής περιόδου είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας που διεξήχθησαν κατά μήκος ενός καθορισμένου τμήματος οδοστρώματος εκείνη την περίοδο σε όρους GN.

$SC_{Μέση}$  = Ο συντελεστής αντιολισθητικής ικανότητας - Skid Coefficient (SC) - της μέσης περιόδου είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας που διεξήχθησαν κατά μήκος ενός καθορισμένου τμήματος οδοστρώματος εκείνη την περίοδο σε όρους GN.

$SC_{Ξηρή}$  = Ο συντελεστής αντιολισθητικής ικανότητας - Skid Coefficient (SC) - της ξηρής περιόδου είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας που διεξήχθησαν κατά μήκος ενός καθορισμένου τμήματος οδοστρώματος εκείνη την περίοδο σε όρους GN.

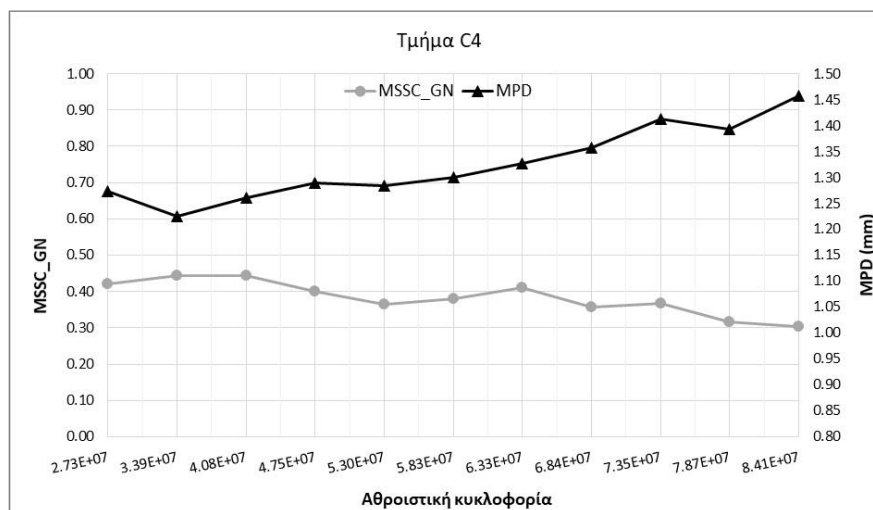
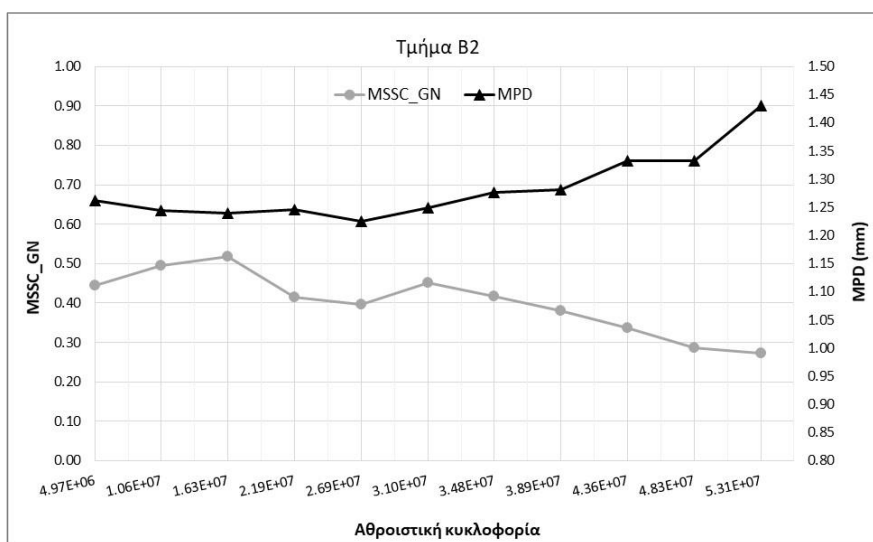
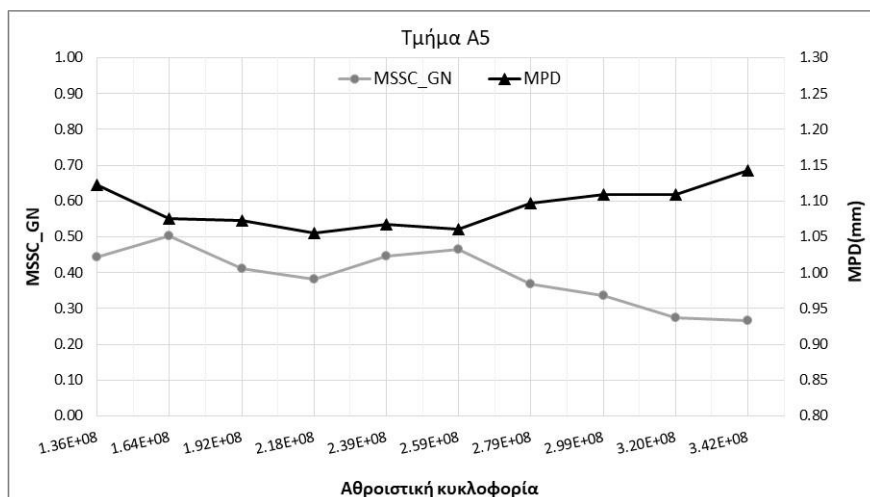
Ομοίως, τα δεδομένα μακροϋφής επεξεργάσθηκαν ώστε να προκύψει ένα νέο δείγμα μετρήσεων που να μην επηρεάζεται από τις συνθήκες της περιόδου μετρήσεων. Έτσι, προέκυψε ένα δείγμα αντιπροσωπευτικό του ετήσιου επιπέδου μακροϋφής –  $MPD_{Ετήσιο}$ .

Έχοντας ως στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης της αθροιστικής κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα και στη μακροϋφή, αξιοποιήθηκαν στοιχεία κυκλοφορίας για τα υπόψη έτη. Συγκεκριμένα, τα εν λόγω στοιχεία επεξεργάσθηκαν κατάλληλα ώστε να προκύψει η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία – ΕΜΗΚ η οποία είναι γνωστή με τη διεθνή ορολογία ως Annual Average Daily Traffic (AADT). Η Εικόνα 6.8 συνοψίζει τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν.



**Εικόνα 6.8:** Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα διαγράμμα GN (MSSC) – MPD συναρτήσει της αθροιστικής κυκλοφορίας για κάθε μία από τις υπόψη κατηγορίες του Πίνακα 6.4 (Εικόνα 6.9).



Εικόνα 6.9: Ενδεικτικά διαγράμματα MSSC\_GN – MPD συναρτήσει της αθροιστικής κυκλοφορίας

Από τα διαγράμματα της Εικόνας 6.9 διαφαίνεται ότι η τάση των δεικτών GN (MSSC) και MPD δεν είναι παρόμοια κατά την επίδραση της κυκλοφορίας. Ιδιαίτερα, έπειτα από μια συγκεκριμένη τιμή της αθροιστικής κυκλοφορίας οι τάσεις των δεικτών είναι αντίστροφες. Δηλαδή, από το συγκεκριμένο σημείο και έπειτα παρατηρείται αύξηση του δείκτη MPD και μείωση του δείκτη GN. Η εν λόγω αντίστροφη τάση μεταξύ της αντιολισθητικής ικανότητας και της μακροϋφής έχει εντοπιστεί και σε άλλες σχετικές έρευνες (Aavik et al. 2013, Miao et al. 2016, Maeger 2018).

Ωστόσο, πριν σημειωθεί η αντίστροφη τάση μεταξύ δεικτών, παρατηρείται μια αργή φθίνουσα τάση με μερικές διακυμάνσεις. Αυτές οι διακυμάνσεις οφείλονται πιθανώς στις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος που μεταβάλλονται υπό την επίδραση της κυκλοφοριακής ροής και τις συνθήκες της περιοχής (βροχή, σκόνη κ.λπ.), οδηγώντας σε μη προβλεπόμενες αποκλίσεις από έτος σε έτος. Μετά από αυτήν την περίοδο, όταν ξεκινά δηλαδή η αντίστροφη τάση, οι διακυμάνσεις από έτος σε έτος φαίνεται να εξαλείφονται. Όπως παρατηρήθηκε, μετά από έναν ορισμένο αθροιστικό όγκο κυκλοφορίας, η μακροϋφή που αντικατοπτρίζεται μέσω του δείκτη MPD τείνει να αυξάνεται και αντιστρόφως τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας τείνουν να μειώνονται με πιο γρήγορο ρυθμό. Λαμβάνοντας υπόψη την εν λόγω παρατήρηση, η επίδραση της κυκλοφορίας φαίνεται να είναι κρίσιμη για την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας για το υπόλοιπο της διάρκειας ζωής της συγκεκριμένης στρώσης του οδοστρώματος.

Στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί συνοψίζονται τα σχετικά αποτελέσματα για όλα τα υποδιερεύνηση τμήματα των τριών κατηγοριών, υποδεικνύοντας τη συνολική αθροιστική κυκλοφορία κατά το πιο πρόσφατο (11<sup>ο</sup> έτος) παρακολούθησης, το αρχικό επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας και στο 11<sup>ο</sup> έτος, το αρχικό επίπεδο μακροϋφής και στο 11<sup>ο</sup> έτος, καθώς και την αθροιστική κυκλοφορία που σημειώθηκε στο σημείο αντίστροφης τάσης των δεικτών GN και MPD.

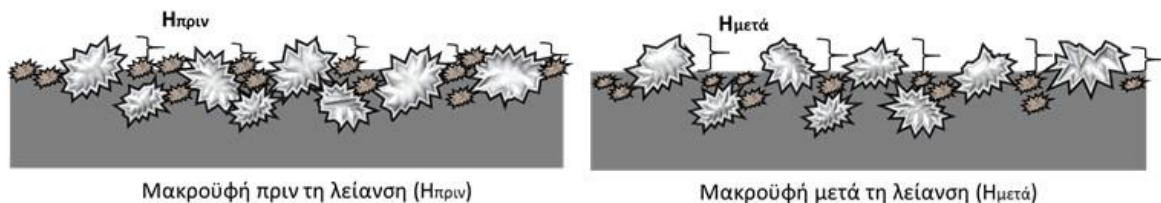
**Πίνακας 6.5:** Δείκτες GN και MPD υπό τη επίδραση της κυκλοφορίας

Τμήμα	Αθρ. Κυκλοφορία	Αρχικό GN	GN στο 11 <sup>ο</sup> έτος	Αρχικό MPD	MPD 11 <sup>ο</sup> έτος	Αθρ. Κυκλοφορία στο σημείο αντιστροφής
A1	22·10 <sup>7</sup>	0.56	0.37	1.02	1.04	17·10 <sup>7</sup>
A2	22·10 <sup>7</sup>	0.56	0.31	1.02	1.04	17·10 <sup>7</sup>
A3	22·10 <sup>7</sup>	0.48	0.30	1.08	1.15	16.8·10 <sup>7</sup>
A4	21.7·10 <sup>7</sup>	0.52	0.30	1.16	1.22	16.3·10 <sup>7</sup>
A5	34.2·10 <sup>7</sup>	0.39	0.27	1.10	1.14	25.9·10 <sup>7</sup>
A6	33.6·10 <sup>7</sup>	0.43	0.25	1.17	1.16	25.6·10 <sup>7</sup>
B1	9.16·10 <sup>7</sup>	0.47	0.30	1.26	1.31	7.63·10 <sup>7</sup>
B2	5.31·10 <sup>7</sup>	0.44	0.27	1.26	1.43	3.1·10 <sup>7</sup>
B3	9.47·10 <sup>7</sup>	0.42	0.26	1.42	1.66	7.98·10 <sup>7</sup>
B4	5.07·10 <sup>7</sup>	0.47	0.24	1.27	1.61	3.9·10 <sup>7</sup>
B5	3.58·10 <sup>7</sup>	0.44	0.37	1.19	1.26	2.76·10 <sup>7</sup>
C1	17·10 <sup>7</sup>	0.36	0.28	1.59	1.69	13.1·10 <sup>7</sup>
C2	18.5·10 <sup>7</sup>	0.45	0.31	1.55	1.73	14.3·10 <sup>7</sup>
C3	8·10 <sup>7</sup>	0.41	0.30	1.34	1.50	6.27·10 <sup>7</sup>
C4	8.41·10 <sup>7</sup>	0.42	0.30	1.27	1.46	6.33·10 <sup>7</sup>

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.5 παρατηρείται ότι σε τμήματα με παρόμοιους όγκους αθροιστικής κυκλοφορίας, η αντίστροφη τάση των δύο δεικτών ξεκινά σε σχεδόν ίσους όγκους κυκλοφορίας. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι ο χρόνος που ξεκινά η αντίστροφη τάση, κινείται προς τα

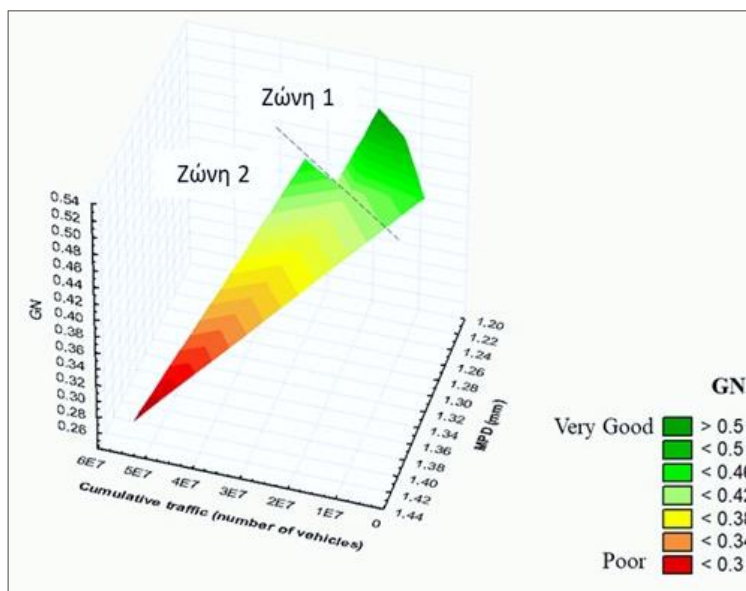
εμπρός (ξεκινά νωρίτερα) όταν ο κυκλοφοριακός όγκος είναι μεγαλύτερος και προς τα πίσω (ξεκινά αργότερα) όταν ο κυκλοφοριακός όγκος είναι χαμηλότερος. Αυτό πιθανώς οφείλεται στα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, στα τμήματα με υψηλότερο όγκο κυκλοφορίας κινούνται κυρίως επιβατικά αυτοκίνητα (κατηγορία Α), από την άλλη πλευρά στα τμήματα της κατηγορίας Β η ροή βαρέων οχημάτων είναι πιο έντονη, παρά το γεγονός ότι η ροή επιβατικών αυτοκινήτων είναι χαμηλότερη.

Η παραπάνω παρατήρηση είναι σύμφωνη με άλλες σχετικές έρευνες, στις οποίες εντοπίζεται ότι παρόλο που η μακροϋφή και η αντιολισθητική ικανότητα παρουσιάζουν ως επί το πλείστον παρόμοιες τάσεις σε εργαστηριακά πειράματα, σε συνθήκες πεδίου η εν λόγω παρατήρηση δεν ισχύει πάντα. Υπό την επίδραση της κυκλοφορίας, επηρεάζονται οι μικρότεροι κόκκοι αδρανών του ασφαλτομίγματος και ως εκ τούτου, τα χονδρόκοκκα αδρανή συνεισφέρουν κυρίως στην παρεχόμενη αντίσταση έναντι ολίσθησης (Ahammed and Tighe 2012, Kouchaki et al. 2018). Αυτή η κατάσταση αν και δημιουργεί μια φαινομενική αύξηση του επιπέδου μακροϋφής (ύψος αδρανών πάνω από την επιφάνεια – Η, ψευδό-αύξηση), οδηγεί σε μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας, καθώς η μικροϋφή δεν είναι πλέον αποτελεσματική λόγω της λείανσης των επιφανειακών αδρανών. Η παραπάνω παρατήρηση παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 6.10.



**Εικόνα 6.10:** Μακροϋφή πριν και μετά τη λείανση (στίλβωση) των επιφανειακών αδρανών

Ιδιαίτερα, το σημείο που η μακροϋφή και η αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος εμφανίζουν αντίστροφη τάση μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες. Στη ζώνη 1 (πριν από την αντίθετη τάση), κυρίως τα λεπτόκοκκα αδρανή του ασφαλτομίγματος παρέχουν την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας και οι όποιες διακυμάνσεις (που φαίνονται στην Εικόνα 6.9) στην μακροϋφή μπορεί να οφείλονται σε βραχυπρόθεσμες ή εποχιακές μεταβολές (Hall et al. 2009, Rajaei et al. 2015, Plati and Romoni 2019, Yu et al. 2020). Όσον αφορά στη ζώνη 2, τα χονδρόκοκκα αδρανή είναι κυρίως που παρέχουν αντιολισθητική ικανότητα για το υπόλοιπο της διάρκειας ζωής της επιφανειακής στρώσης. Η Εικόνα 6.11 απεικονίζει τις δύο προαναφερθείσες ζώνες για την περίπτωση του τμήματος Β4, όπου είναι ορατό ότι οι δύο ζώνες είναι ξεκάθαρα διακριτές.



Εικόνα 6.11: Διάκριση εξέλιξης GN και MPD στις ζώνες 1 & 2

Ο Πίνακας 6.6 παρουσιάζει συμπληρωματικά στοιχεία αναφορικά με την ύπαρξη των δύο διακριτών ζωνών 1 και 2. Συγκεκριμένα, συνοψίζει τα αποτελέσματα του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης -  $R^2$  μεταξύ δεδομένων GN και MPD πριν από την εμφάνιση της αντίστροφης τάσης (ζώνη 1) και μετά (ζώνη 2) για όλα τα τμήματα που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση.

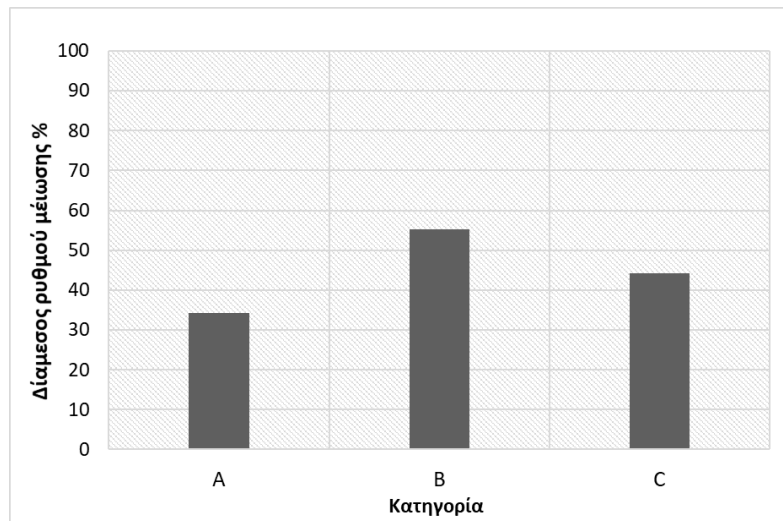
Πίνακας 6.6:  $R^2$  μεταξύ των δεικτών GN και MPD στις 2 ζώνες

Τμήμα	$R^2$ (GN vs. MPD)	$R^2$ (GN vs. MPD)
	Ζώνη 1	Ζώνη 2
A1	0.04	0.72
A2	0.32	0.72
A3	0.05	0.76
A4	0.03	0.85
A5	0.02	0.85
A6	0.00	0.73
B1	0.00	0.81
B2	0.03	0.80
B3	0.01	0.70
B4	0.28	0.69
B5	0.60	0.84
C1	0.47	0.82
C2	0.41	0.82
C3	0.41	0.77
C4	0.50	0.67

Τα αποτελέσματα του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης δείχνουν σαφώς ότι στη ζώνη 1, το MPD δεν μπορεί να συσχετιστεί με το GN. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα από τη ζώνη 2 δείχνουν ότι ο συσχετισμός μεταξύ GN-MPD είναι πολύ καλός, ως εκ τούτου οι δύο ζώνες μπορούν να θεωρηθούν διακριτές. Η διάκριση των δύο ζωνών δημιουργεί σαφώς αμφιβολίες για τις προσπάθειες που έχουν γίνει

με στόχο τη δημιουργία μοντέλων μακροπρόθεσμης πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας αξιοποιώντας δεδομένα μακροϋφής (Zuniga-Garcia and Prozzi 2019, Plati and Pomoni 2020). Επιπροσθέτως, δεδομένης της συνεχούς μείωσης της αντιολισθητικής ικανότητας μετά το σημείο αντίστροφης τάσης, αποκτά ιδιαίτερη σημασία η καταγραφή του όγκου της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο σημείο. Αυτό πιθανότατα θα μπορούσε να υποδηλώσει ότι το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας μετακινείται στη ζώνη 2 και πιθανώς, αναμένεται ένας σταθερός ρυθμός μείωσης για το υπόλοιπο της διάρκειας ζωής της αντιολισθητικής στρώσης του οδοστρώματος.

Σε συνέχεια της παραπάνω παρατήρησης, ένα επιπλέον ζήτημα που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο ρυθμός μείωσης της αντιολισθητικής ικανότητας στη ζώνη 2 και οι διαφορές μεταξύ των τριών κατηγοριών των τμημάτων που διερευνώνται. Η Εικόνα 6.12 παρουσιάζει τον ρυθμό μείωσης στη ζώνη 2 για τις τρεις κατηγορίες, λαμβάνοντας υπόψη τη διάμεσο κάθε δείγματος κατηγορίας.



Εικόνα 6.12: Ρυθμός μείωσης της αντιολισθητικής ικανότητας στη ζώνη 2

Σύμφωνα με την Εικόνα 6.12, ο χαμηλότερος ρυθμός μείωσης του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας εντός της ζώνης 2, παρατηρείται στην κατηγορία A και ο μεγαλύτερος στην κατηγορία B. Λαμβάνοντας υπόψη τα τμήματα από τις κατηγορίες A και B, η μόνη διαφορά έγκειται στον όγκο της αθροιστικής κυκλοφορίας και το ποσοστό των βαρέων οχημάτων (βλ. Πίνακα 6.4). Έτσι, μπορεί να ειπωθεί ότι η επίδραση της κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων είναι πιο κρίσιμη για την συμπεριφορά της αντιολισθητικής ικανότητας από το συνολικό όγκο κυκλοφορίας. Η εν λόγω παρατήρηση είναι σύμφωνη με άλλες σχετικές έρευνες (Ragland et al. 2010, Mulry et al. 2012, Plati and Pomoni 2019).

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των τμημάτων από τις κατηγορίες A και C, διαφαίνεται ότι αν και τα τμήματα της κατηγορίας A εξυπηρετούν μεγαλύτερο όγκο κυκλοφορίας από τη C, το γεγονός ότι είναι σε ευθυγαμμία αντί της καμπυλότητας, όπως συμβαίνει στην κατηγορία C, φαίνεται να είναι καθοριστικό. Κατά συνέπεια, το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας της κατηγορίας C μειώνεται με πιο έντονο ρυθμό πιθανώς λόγω των χαρακτηριστικών γεωμετρικού σχεδιασμού. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ορθολογικό, δεδομένου ότι ο γεωμετρικός σχεδιασμός των οδών σχετίζεται με τη δυναμική των οχημάτων κατά την κίνηση τους, γεγονός που έχει συνδεθεί με την συμπεριφορά της αντιολισθητικής ικανότητας στις συγκεκριμένες οδούς (Lamm et al. 1995, Wilson and Dunn 2009).

Συνολικά, πιστεύεται ότι η διάκριση δύο ζωνών εξέλιξης της αντιολισθητικής ικανότητας και η εκτίμηση ενός ρυθμού μείωσης μπορεί να προσεγγίσει την επίδραση της κυκλοφορίας στην



αντιολισθητική ικανότητα και να επισημάνει τη σημασία της διαφορετικής αξιολόγησης της επίδρασής της στις προαναφερθείσες ζώνες. Στην πράξη, η εν λόγω προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο στοιχείο για του φορείς διαχείρισης των οδοστρωμάτων, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της αντιολισθητικής ικανότητας για οδοστρώματα σε λειτουργία και να προγραμματιστούν έγκαιρα ενέργειες συντήρησης.

### 6.2.2 Βραχυπρόθεσμη επίδραση της κυκλοφορίας στην αντιολισθητική ικανότητα στο πλαίσιο προγραμματισμού συντήρησης

Τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων (Pavement Management Systems – PMS) περιλαμβάνουν καθιερωμένες διαδικασίες για τη συλλογή, ανάλυση και διατήρηση ποσοτικών δεδομένων αναφορικά με χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων. Ο προσδιορισμός των περιοχών με μειωμένα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας είναι ζωτικής σημασίας λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπό τους στις πολιτικές λήψης αποφάσεων για την οδό που στοχεύουν σε βέλτιστες επενδύσεις για τη διατήρηση της ποιότητας οδήγησης, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας του κόστους αποκατάστασης (Omar et al. 2017). Ως εκ τούτου, ο ορισμός της κατάλληλης χρονικής περιόδου για την εφαρμογή ενεργειών συντήρησης αποτελεί μείζον ζήτημα για τους φορείς διαχείρισης των οδών. Ειδικότερα, για τις περιπτώσεις αυτοκινητοδρόμων όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα εξυπηρετικότητας, η έγκυρη επέμβαση αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο.

Η χρονική προσέγγιση όμως της περιόδου εφαρμογής ενεργειών συντήρησης αποτελεί στην πράξη μια πολύπλοκη διαδικασία εξαιτίας των πολυάριθμων μεταβολών που συμβαίνουν σε μία οδό αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Έτσι, αν και έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες μέσα από έρευνες για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου δεν έχει καταστεί εφικτή η δημιουργία πρότυπων μοντέλων ή έστω μεθοδολογιών για την εκτίμηση της χρονικής περιόδου που θα χρειασθεί αναβάθμιση του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας. Στο πλαίσιο της παρούσας υποενοότητας θεωρήθηκε ορθότερη η δημιουργία ενός δοκιμαστικού μοντέλου βραχυπρόθεσμης εκτίμησης του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας, θεωρώντας ότι σε ένα μικρό χρονικό διάστημα μερικών ετών η επίδραση των παραγόντων που μακροπρόθεσμα επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω έγινε προσπάθεια αξιοποίησης στοιχείων αντιολισθητικής ικανότητας και κυκλοφορίας αυτοκινητοδρόμου τριών συναπτών ετών που εντάσσονται, σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα, στη ζώνη 2. Τα στοιχεία χωρίστηκαν σε δύο δείγματα υποσημάτων, το πρώτο δείγμα αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του δοκιμαστικού μοντέλου αποτελούμενο από το 60% του συνόλου και το δεύτερο δείγμα αποτελούμενο από το 40% του συνόλου αξιοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου (Shmueli et al. 2018). Η Εξίσωση 6.3 περιγράφει το δοκιμαστικό μοντέλο για την ανάπτυξη του οποίου αξιοποιήθηκε η σχεδόν γραμμική σχέση κυκλοφοριακού φόρτου και αντιολισθητικής ικανότητας ανά έτος που σημειώθηκε για τα τρία έτη της διερεύνησης.

$$GN_i = GN_{i-1} - (EMHK_{i-1} * 10^{-5}) / A \quad (6.3)$$

A=6, (EMHK > 30000)  
A=2, (EMHK ≈ 15000-30000, κυκλοφορία βαρέων οχημάτων)  
A=8, (EMHK ≈ 5000)

όπου:

GN<sub>i</sub> = προβλεπόμενη τιμή GN για το έτος (i)

GN<sub>i-1</sub> = τιμή GN του προηγούμενου έτους (i-1)

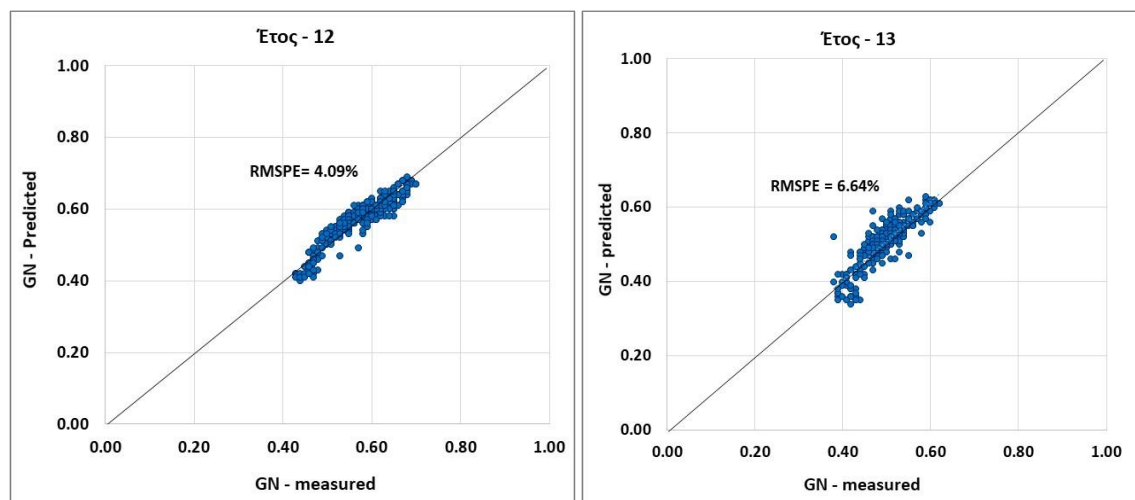
EMHK i-1 = EMHK του προηγούμενου έτους (i-1)

A = παράγοντας προσαρμοσμένος στην εκάστοτε κατηγορία EMHK

Για την επαλήθευση του δοκιμαστικού μοντέλου αξιοποιήθηκε το κριτήριο Root Mean Square Percent of Error (RMSPE) που περιγράφεται από την εξίσωση 6.4. Συγκεκριμένα, οι υπολογισμένες τιμές GN (GN estimated) για τα επόμενα έτη με βάση τις τιμές του πρώτου από τα τρία έτη, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες των επόμενων ετών (GN measured) .

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} * \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{GN_i^{estimated} - GN_i^{measured}}{GN_i^{measured}} \right)^2 \right]} * 100 \quad (6.4)$$

Η Εικόνα 6.13 απεικονίζει ενδεικτικά τη γραφική προσαρμογή του κριτηρίου RMSPE στις μετρημένες τιμές GN και στις αντίστοιχες της πρόβλεψης μέσω του μοντέλου. Όλα τα αποτελέσματα της διαδικασίας επαλήθευσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7, όπου φαίνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο δύο μεταβλητών οδηγεί σε εκτιμήσεις αποδεκτής ακρίβειας (RMSPE <15%).



Εικόνα 6.13: Γραφική προσαρμογή κριτηρίου RMPSE

Πίνακας 6.7: Προσαρμογή κριτηρίου RMPSE για όλα τα τμήματα

Τμήμα	EMHK	RMPSE % - Έτος 12	RMPSE % - Έτος 13
1	15000	8.54	9.67
2	20000	14.36	12.28
3	30000	9.02	9.04
4	20000	4.90	7.53
5	30000	4.80	6.10
6	>30000	8.33	9.80
7	>30000	6.07	12.58
8	30000	9.98	10.18
9	30000	12.97	14.74

10	15000	9.48	14.75
11	15000	13.69	14.64
12	15000	8.02	12.43
13	5000	4.09	6.64

Παρατηρείται ότι το RMSPE για το έτος 13 είναι συνήθως υψηλότερο από το έτος 12, ένα θέμα που θα συζητηθεί περαιτέρω παρακάτω. Συνολικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία του δοκιμαστικού μοντέλου θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα αποτελεσματικό και πρακτικό εργαλείο για τους φορείς λειτουργίας οδών, με στόχο την εκτίμηση της υποβάθμισης των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων για τα προσεχή έτη (βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη) και τον αποτελεσματικότερο προγραμματισμό ενεργειών συντήρησης.

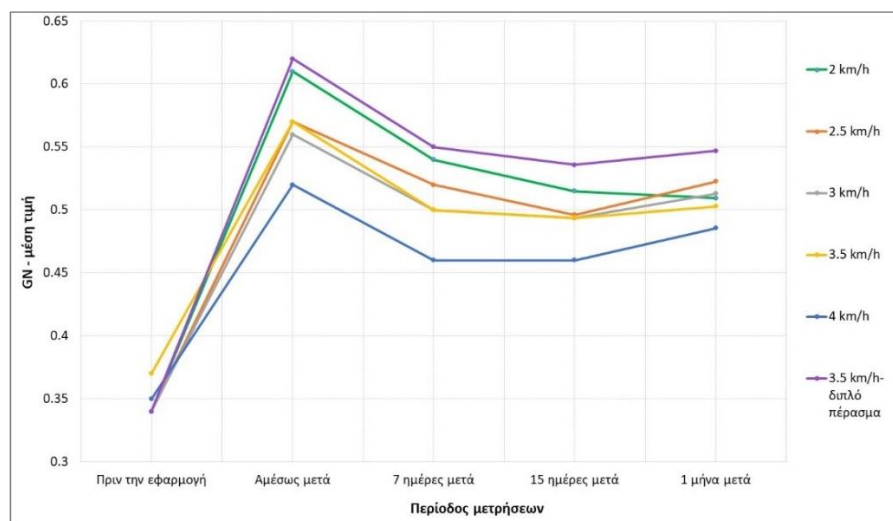
Ωστόσο, το δοκιμαστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, καθώς και η συνολική προσέγγιση, οριοθετούνται από αρκετούς περιορισμούς. Όπως αναφέρθηκε, η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε προϋποθέτει ότι για μία συγκεκριμένη οδό, το επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας ενός έτους επηρεάζεται κυρίως από τον όγκο της κυκλοφορίας εντός μίας βραχυπρόθεσμης περιόδου. Ωστόσο, σε μακροπρόθεσμη βάση οι μεταβλητές που σε αυτή τη προσέγγιση θεωρούνται σταθερές (δηλαδή το είδος της κυκλοφορίας, τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος, καιρικές συνθήκες) μεταβάλλονται. Επίσης, ο όγκος κυκλοφορίας που μεταβάλλεται σε μακροπρόθεσμη βάση επηρεάζει τον συντελεστή – A. Ως εκ τούτου, θα χρειαστεί η εκ νέου βαθμονόμηση του προτεινόμενου μοντέλου μετά από κάποια έτη (π.χ. τρία έτη) για την ενσωμάτωση των αλλαγών στον φόρτο και το είδος της κυκλοφορίας. Η εν λόγω παρατήρηση αιτιολογεί πιθανώς και την αύξηση του RMSPE κατά το δεύτερο έτος επαλήθευσης των τιμών πρόβλεψης. Ένας άλλος περιορισμός σχετικά με την προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση είναι η αδυναμία να εξεταστεί το αποτέλεσμα των ενδεχόμενων ενδιάμεσων δραστηριοτήτων συντήρησης για τη βελτίωση της επιφάνειας. Η εξέταση ενός τέτοιου ζητήματος θα αύξανε την πολυπλοκότητα της διαδικασίας ανάπτυξης του δοκιμαστικού μοντέλου. Συνεπώς, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε μπορεί να προσαρμοστεί μόνο εντός διαστημάτων που δεν έχουν πραγματοποιηθεί ενέργειες συντήρησης.

Τέτοιου τύπου ενέργειες μπορούν να βελτιώσουν το επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας χωρίς ωστόσο να μπορεί να αποσαφηνιστεί πλήρως ο χρόνος που διαρκεί η προκύπτουσα βελτίωση. Μεταξύ διάφορων τεχνικών που εφαρμόζονται για την αναβάθμιση της επιφανειακής υφής και κατ' επέκταση της αντιολισθητικής ικανότητας, ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η μέθοδος της σφαιριδιοβολής – ή shotblasting όπως είναι γνωστή διεθνώς (Vos et al. 2015, Plati et al. 2017b). Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας αξιοποιήθηκαν δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας από την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτοκινητόδρομο εντός αστικού δικτύου που βρίσκεται σε λειτουργία εντός της ζώνης διαχωρισμού 2 (όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως). Η τεχνική της μεθόδου απεικονίζεται την Εικόνα 6.14. Συγκεκριμένα, η συσκευή εκτοξεύει χαλύβδινα σφαιρίδια στην επιφάνεια του οδοστρώματος, αδροποιώντας την επιφάνεια των αδρανών βελτιώνοντας την μικροϋφή, και διασπώντας τα κατάλοιπα μεταξύ των αδρανών (ίχνη ελαστικού, ρύποι κλπ.) ενισχύοντας έτσι και την μακροϋφή.

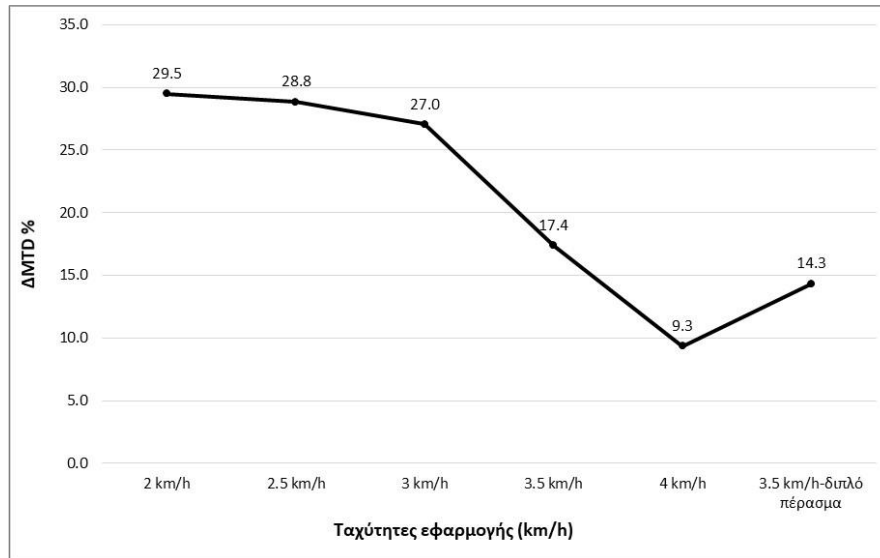


**Εικόνα 6.14:** Λειτουργία μεθόδου σφαιριδιοβολής ή shotblasting

Μεταξύ άλλων έγινε διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας κίνησης του οχήματος που φέρει τον εξοπλισμό της σφαιριδιοβολής, στο επίπεδο βελτίωσης της αντιολισθητικής ικανότητας σε δεδομένα GN, για μια σειρά χρονικών διαστημάτων από την στιγμή της εφαρμογής της μεθόδου. Επίσης, διερευνήθηκε η μεταβολή του επιπέδου μακροϋφής σε όρους MTD ( $\Delta$ MTD%) αμέσως μετά την εφαρμογή της μεθόδου, συγκριτικά με το επίπεδο μακροϋφής πριν την εφαρμογή, αξιοποιώντας τη μέθοδο Sand Patch. Οι Εικόνες 6.15 και 6.16 παρουσιάζουν τα σχετικά αποτελέσματα.



**Εικόνα 6.15:** Επίδραση σφαιριδιοβολής στην αντιολισθητική ικανότητα σε διάφορα διαστήματα



Εικόνα 6.16: Επίδραση σφαιριδιοβολής στην μακροϋφή (DMTD%) αμέσως μετά την εφαρμογή

Από τα σχετικά διαγράμματα διαφαίνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιώνει και τα δύο επιφανειακά χαρακτηριστικά, ενώ η μικρότερη ταχύτητα εφαρμογής οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά οφείλεται στον μεγαλύτερο αριθμό σφαιριδίων που εκτοξεύονται στην περιοχή εφαρμογής, όταν ο χρόνος κίνησης είναι μικρότερος (άρα η αδροποίηση διαρκεί περισσότερο χρόνο). Ωστόσο, παρά τη βελτίωση που σημειώθηκε στο εν λόγω μικρό χρονικό διάστημα, η συνέχιση της διερεύνησης οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η επιφανειακή κατάσταση μετά από κάποιο χρόνο επιστρέφει στα αρχικά επίπεδα επιφανειακής υφής και αντιολισθητικής ικανότητας. Το διάστημα όμως αυτό δεν δύναται να προσδιοριστεί πλήρως (από μερικούς μήνες έως 1-2 έτη), καθώς οφείλεται τόσο από την κατάσταση του οδοστρώματος πριν την εφαρμογή όσο και από τους επιμέρους παράγοντες που επηρεάζουν δυναμικά τα εν λόγω επιφανειακά χαρακτηριστικά (κυκλοφορία, καιρικές συνθήκες). Γενικά, παρατηρήθηκε ότι η εφαρμογή μίας τέτοιας μεθόδου συντήρησης εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα, όταν εφαρμόζεται έγκαιρα σε ένα οδόστρωμα πριν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά φθίνουν σημαντικά.

### 6.3 Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας: Επίδραση εποχιακής διακύμανσης

#### 6.3.1 Ποσοτικοποίηση εποχιακής διακύμανσης

Η εποχιακή διακύμανση η οποία συνεπάγεται τόσο με θερμοκρασιακές μεταβολές όσο και την απότομη εναλλαγή ή μη διάφορων καιρικών φαινομένων, αποτελεί βασική παράμετρο επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα και την επιφανειακή υφή κατά τη διάρκεια ενός έτους. Το γεγονός αυτό μπορεί να δημιουργήσει σαφώς βασικές δυσχέρειες στην ομαλή και ασφαλή λειτουργία ενός οδικού έργου. Επίσης, η διαφοροποίηση του κλίματος και των καιρικών συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή που μπορεί να εκτείνεται μία οδός, ως μέρος οδικού δικτύου, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές ανάγκες διαχείρισης αλλά και συντήρησης σε συγκεκριμένα τμήματα.

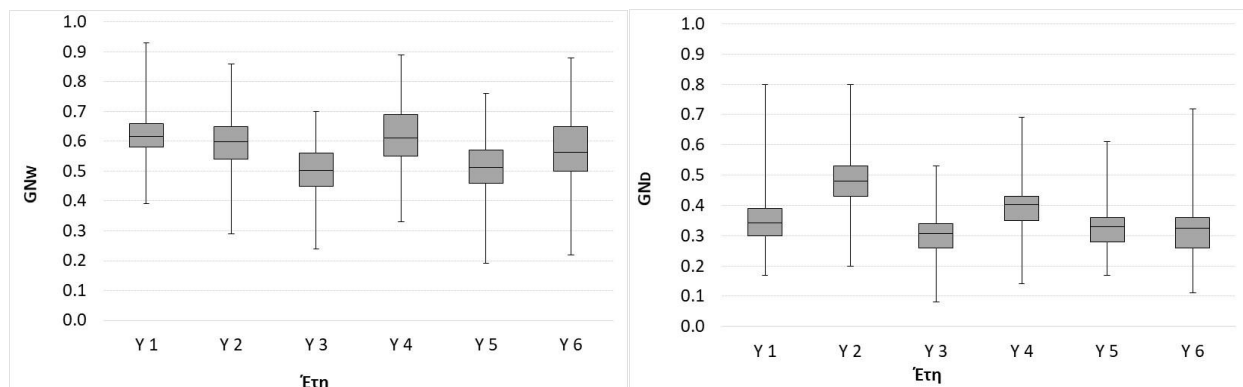
Στο πλαίσιο διερεύνησης της επίδρασης της εποχιακής διακύμανσης στην αντιολισθητική ικανότητα για την περίπτωση των ασφαλικών οδοστρωμάτων που μελετώνται, αξιοποιήθηκαν δεδομένα GN από έξι (6) συναπτά έτη από αυτοκινητόδρομο εντός αστικού δικτύου. Συγκεκριμένα, με στόχο την διερεύνηση και ποσοτικοποίηση της εποχιακής διακύμανσης αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία από τις περιόδους I και III όπως αναφέρθηκαν στην **Ενότητα 6.2.1** και συγκεκριμένα την:

**I.** Υγρή περίοδο - Περίπου μία εβδομάδα έως 1 μήνα μετά την κύρια περίοδο αυξημένων βροχοπτώσεων / υγρών μηνών (με βάση τη συγκεκριμένη κλιματική ζώνη).

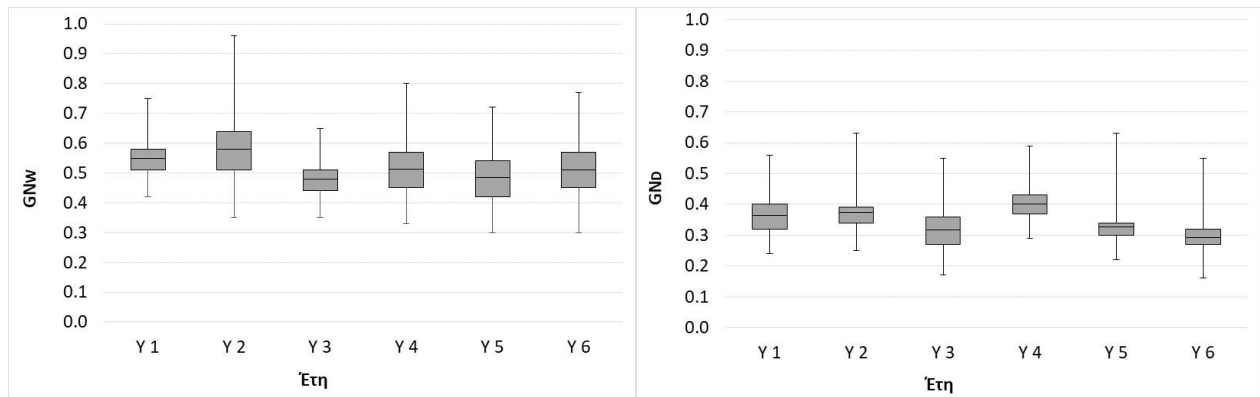
**III.** Ξηρή περίοδο - Περίπου τέσσερις έως έξι μήνες μετά την περίοδο I (αναφέρεται κυρίως στο τέλος των ξηρών μηνών).

Τα δεδομένα της αντιολισθητικής ικανότητας σε όρους GN προερχόμενα από την περίοδο I, σημειώνονται ως GN<sub>w</sub> (wet period) και από την περίοδο III ως GN<sub>d</sub> (dry period). Στο παρόν εδάφιο αξίζει να αναφερθούν κάποιες λεπτομέρειες αναφορικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ύπαρξη κατάλοιπων στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά τις υπόψη περιόδους. Κατά την περίοδο I η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 5 – 10 °C και αντιστοιχεί στους μήνες Μάρτιο ή Απρίλιο ενώ, κατά την περίοδο III μεταξύ 20 – 30 °C και αντιστοιχεί στους μήνες Σεπτέμβριο ή Οκτώβριο, δεδομένου ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά τις νυχτερινές ώρες. Επίσης, όπως αναφέρεται και βιβλιογραφικά, την περίοδο έπειτα από βροχοπτώσεις, όπως στην περίοδο I, η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι ως επί το πλείστον καθαρή, απαλλαγμένη από κατάλοιπα σκόνης και ελαστικών που εναποτίθενται στην επιφάνεια όπως συμβαίνει έπειτα από μία εκτεταμένη περίοδο ξηρασίας. Κατά την περίοδο III (ξηρή περίοδος) στην επιφάνεια του οδοστρώματος υπάρχουν κυρίως μικρά κομμάτια αδρανών τα οποία αποκολλώνται με την κίνηση των οχημάτων και εισέρχονται στην μακροϋφή επηρεάζοντας κατά αυτό τον τρόπο τη σωστή διεπαφή ελαστικού οδοστρώματος.

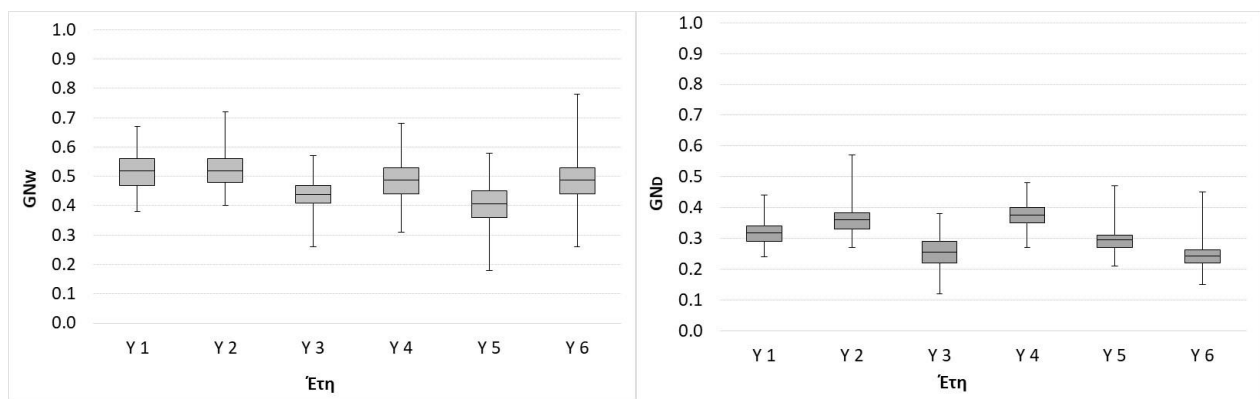
Για την ανάλυση των δεδομένων GN, ο οδικός άξονας επιμερίστηκε και σε τέσσερα βασικά τμήματα, κυρίως λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία κυκλοφορίας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως αναφέρθηκαν στον **Πίνακα 6.4**. Επίσης σημειώνεται ότι τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν αφορούν στα πρώτα έξι έτη περιοδικών μετρήσεων στον υπόψη οδικό άξονα. Συγκεκριμένα, με Si (1 ≤ i ≤ 4) σημειώνονται τα τμήματα και Yj (1 ≤ j ≤ 6) τα έτη. Ακολουθούν τα σχετικά θηκογράμματα (Εικόνες 6.17 – 6.20) με τα στοιχεία GN για κάθε έτος, ανά τμήμα. Σημειώνεται ότι η κεντρική γραμμή στα θηκογράμματα υποδεικνύει τη μέση τιμή του δείγματος, η άνω γραμμή το 75 % του δείγματος και η κάτω το 25%.



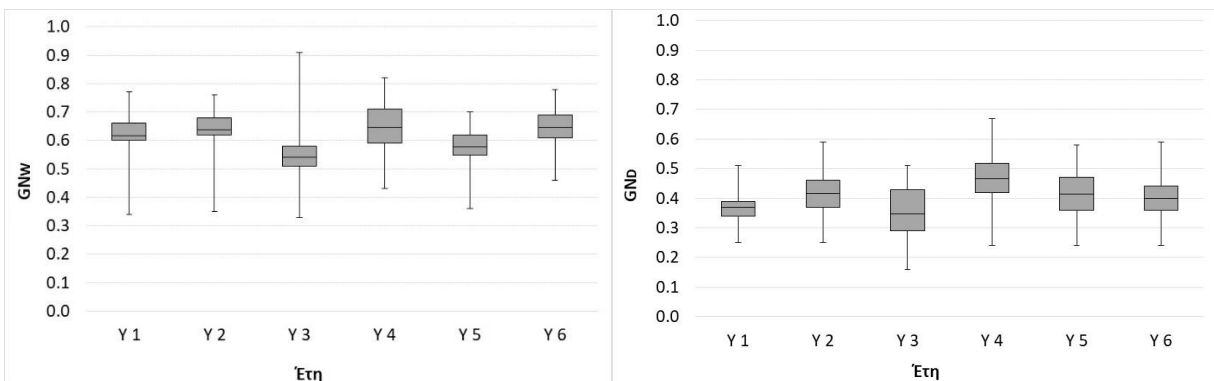
**Εικόνα 6.17:** Μετρήσεις GN για το τμήμα S1 (GN<sub>w</sub> and GN<sub>d</sub>)



Εικόνα 6.18: Μετρήσεις GN για το τμήμα S2 ( $GN_w$  and  $GN_d$ )



Εικόνα 6.19: Μετρήσεις GN για το τμήμα S3 ( $GN_w$  and  $GN_d$ )



Εικόνα 6.20: Μετρήσεις GN για το τμήμα S4 ( $GN_w$  and  $GN_d$ )

Όπως αναμενόταν, οι μέσες τιμές  $GN_w$  είναι σαφώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές  $GN_d$  για όλα τα τμήματα. Το  $GN_w$  κυμαίνεται γενικά από 0.41 έως 0.65. Σε όλα τα τμήματα, οι τιμές  $GN_w$  είναι γενικά ικανοποιητικές λόγω των χειμερινών βροχοπτώσεων. Ωστόσο, η συνδυαστική επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου σε συνδυασμό με την παρουσία κατάλοιπων και ρύπων στην επιφάνεια του οδοστρώματος, που δεν μπορούν να απομακρυνθούν εντελώς κατά τη διάρκεια της περιόδου I, οδηγούν σε χαμηλότερα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου III, που αντανακλάται από χαμηλές τιμές  $GN_d$ . Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι τα δεδομένα του S1 στο σύνολο τους,



παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση από τα υπόλοιπα τμήματα για κάθε έτος. Αυτό πιθανώς οφείλεται στον μεγάλο φόρτο κυκλοφορίας που διέρχεται από το τμήμα S1 και δημιουργεί μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας κατά μήκος του τμήματος.

Στη συνέχεια, σε μία προσπάθεια ποσοτικοποίησης της μεταβολής των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ των δεδομένων των περιόδων I και III έγινε περεταίρω ανάλυση των σχετικών μετρήσεων. Συνεπώς, για τον ποσοτικό προσδιορισμό της εποχικής διακύμανσης στις τιμές GN, καθορίζεται μια ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ των τιμών  $GN_W$  και  $GN_D - \Delta GN_{ij}$  (%) ως ακολούθως:

$$\Delta GN_{ij}\% = \frac{GN_{ij}^D - GN_{ij}^W}{GN_{ij}^W} \cdot 100 \quad (6.5)$$

όπου:  $1 \leq i \leq 4$  και  $1 \leq j \leq 6$

Οι ποσοστιαίες μεταβολές που υπολογίσθηκαν αποτέλεσαν νέα δείγματα δεδομένων στα οποία διερευνήθηκε η δυνατότητα προσαρμογής κατάλληλων κατανομών μέσω πιθανοτικής ανάλυσης. Η καταλληλότητα και προσαρμοστικότητα κάθε κατανομής ελέγχθηκε μέσω των ακόλουθων κριτηρίων ελέγχου: το Kolmogorov-Smirnov test και το Anderson-Darling test. Το κριτήριο Kolmogorov-Smirnov βασίζεται στη σύγκριση μιας εμπειρικής συνάρτησης κατανομής με την κατανομή της υποθετικής συνάρτησης. Μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε συνεχείς κατανομές με εκτιμώμενες παραμέτρους, λειτουργώντας συντηρητικά. Το Anderson-Darling είναι ένα γενικό κριτήριο σύγκρισης της καταλληλότητας μιας παρατηρούμενης συνάρτησης αθροιστικής κατανομής με μια αναμενόμενη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής. Το κριτήριο Anderson-Darling δίνει περισσότερο βάρος στα άκρα ενός δείγματος δεδομένων συγκριτικά με το κριτήριο ελέγχου Kolmogorov-Smirnov (D'Agostino and Stephens 1986).

Το κριτήριο ελέγχου Kolmogorov-Smirnov ορίζεται ως ακολούθως:

$$D_n = \sup |F_n(x) - E(x)| \quad (6.6)$$

όπου:  $F_n(x)$  είναι η πραγματική κατανομή και  $E(x)$  είναι η υποθετική κατανομή.

Το κριτήριο ελέγχου Anderson-Darling ορίζεται ως ακολούθως:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \{(2 \cdot i - 1) \cdot [\ln F(X_i) + \ln(1 - F(X_{n-i+1}))]\} \quad (6.7)$$

όπου:  $F(X_i)$  είναι η πραγματική κατανομή.

Με βάση τη φύση των δεδομένων της αντιολισθητικής ικανότητας τα οποία αποτελούνται από πανομοιότυπες κατανεμημένες τυχαίες τιμές που περιγράφουν ένα φυσικό συμβάν που συμβαίνει με μικρή πιθανότητα έντονης μεταβολής, τρεις συνεχείς κατανομές θεωρήθηκαν ως πιο κατάλληλες για αυτό το είδος δεδομένων. Αυτές οι κατανομές περιλαμβάνουν την κατανομή Burr που περιγράφεται μέσω τεσσάρων παραμέτρων - Burr (4P), την κατανομή Dagum που περιγράφεται επίσης μέσω τεσσάρων παραμέτρων - Dagum (4P) και τέλος, της γενικευμένης κατανομής Extreme Value - Gen. Extreme (Kotz and Nadarajah 2000). Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα διερεύνηση αποτελεί μια πρώτη ερευνητική προσέγγιση όπου αυτές οι κατανομές χρησιμοποιούνται για να προσαρμοστούν σε δεδομένα αντιολισθητικής ικανότητας οδοστρωμάτων.

Παρακάτω, παρουσιάζεται εν συντομία το μαθηματικό υπόβαθρο αυτών των κατανομών. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Burr (4P) ορίζεται ως:

$$f(x) = \frac{\alpha \cdot k \cdot \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \cdot \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]^{k+1}} \quad (6.8)$$

και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής ορίζεται ως:

$$F(x) = 1 - \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]^{-k} \quad (6.9)$$

όπου:  $k$  είναι συνεχής παράμετρος σχήματος ( $k > 0$ ),  $\alpha$  είναι συνεχής παράμετρος σχήματος ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  είναι συνεχής παράμετρος κλίμακας ( $\beta > 0$ ) και  $\gamma$  είναι συνεχής παράμετρος θέσης ( $\gamma \leq x < +\infty$ ).

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Dagum (4P) ορίζεται ως:

$$f(x) = \frac{\alpha \cdot k \cdot \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha \cdot k - 1}}{\beta \cdot \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]^{k+1}} \quad (6.10)$$

και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής ορίζεται ως:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right]^{-k} \quad (6.11)$$

όπου:  $k$  είναι συνεχής παράμετρος σχήματος ( $k > 0$ ),  $\alpha$  είναι συνεχής παράμετρος σχήματος ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  είναι συνεχής παράμετρος κλίμακας ( $\beta > 0$ ) και  $\gamma$  είναι συνεχής παράμετρος θέσης ( $\gamma \leq x < +\infty$ ).

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Gen. Extreme ορίζεται ως:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \cdot (1 + k \cdot z)^{\left(-1 - \frac{1}{k}\right)} \cdot \exp\left[-(1 + k \cdot z)^{\left(-\frac{1}{k}\right)}\right], & k \neq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \cdot \exp[-z - \exp(-z)], & k = 0 \end{cases} \quad (6.12)$$

και η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής ορίζεται ως:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-(1 + k \cdot z)^{\left(-\frac{1}{k}\right)}\right], & k \neq 0 \\ \exp[-\exp(-z)], & k = 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

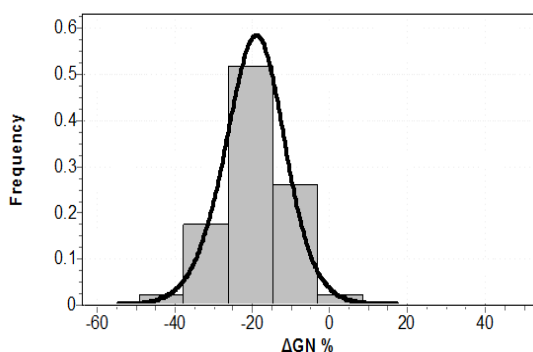
όπου:  $z \equiv (x-\mu)/\sigma$ ,  $k$  είναι συνεχείς παράμετροι σχήματος,  $\alpha$  είναι συνεχής παράμετρος σχήματος και  $\mu$  είναι συνεχής παράμετρος θέσης.

Οι εξεταζόμενες κατανομές για κάθε σύνολο δεδομένων που αντιστοιχούν σε καθένα από τα υποδιερεύνηση τμήματα (S1-S4) και του έτους ανάλυσης (Y1-Y6) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.8. Ο όρος «non available» αναφέρεται για τις περιπτώσεις όπου καμία από τις εξεταζόμενες κατανομές δεν ήταν εφικτό να προσαρμοστεί στα αντίστοιχα δεδομένα. Τα ιστογράμματα καθώς και οι καμπύλες των κατανομών που περιγράφουν τα δεδομένα παρουσιάζονται στις Εικόνες 6.21-6.24.

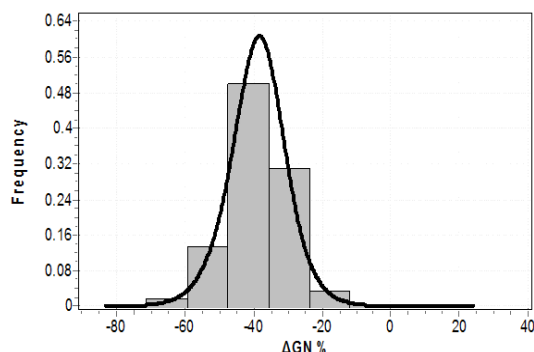
**Πίνακας 6.8:** Προσαρμογή κατανομών για τα δείγματα ποσοστιαίων μεταβολών ΔGNij % για κάθε τμήμα και έτος

i-τμήμα	j-έτος					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
S1	non available	Burr (4P)	Dagum (4P)	non available	non available	non available
S2	non available	Gen. Extreme	Dagum (4P)	Dagum (4P)	Burr (4P)	non available

<b>S3</b>	Burr (4P)	Gen. Extreme	Gen. Extreme	Gen. Extreme	Dagum (4P)	Gen. Extreme
<b>S4</b>	Burr (4P)	Gen. Extreme	non available	Dagum (4P)	Gen. Extreme	Gen. Extreme

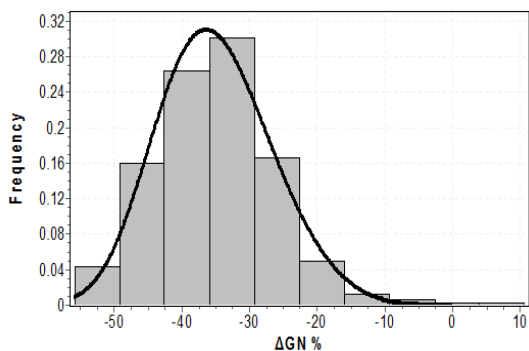


**a)** Y2, distribution: Burr (4P)

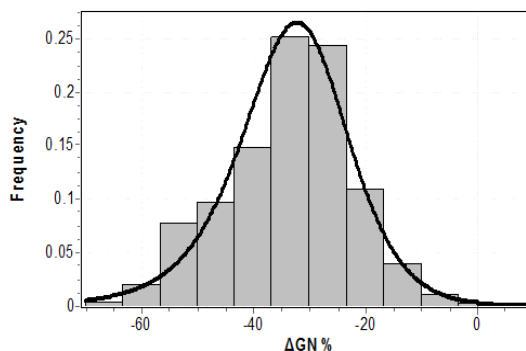


**b)** Y3, distribution: Dagum (4P)

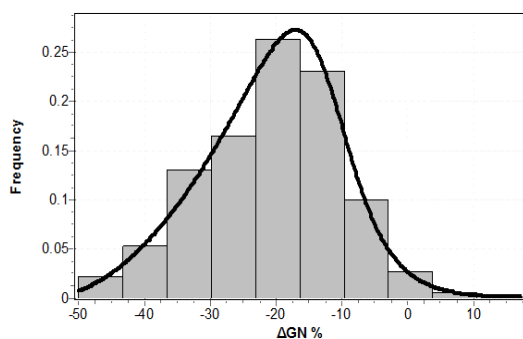
**Εικόνα 6.21:** Προσαρμογή κατανομών - S1, ΔGN1j (j= 2, 3)



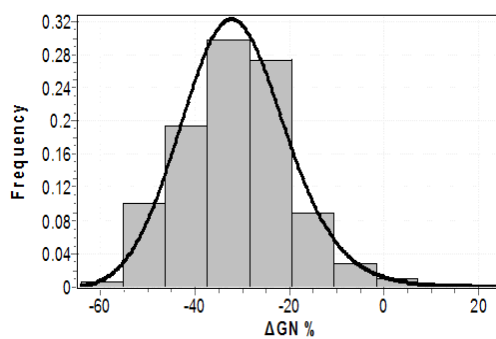
**a)** Y2, distribution: Gen. Extreme value



**b)** Y3, distribution: Dagum (4P)

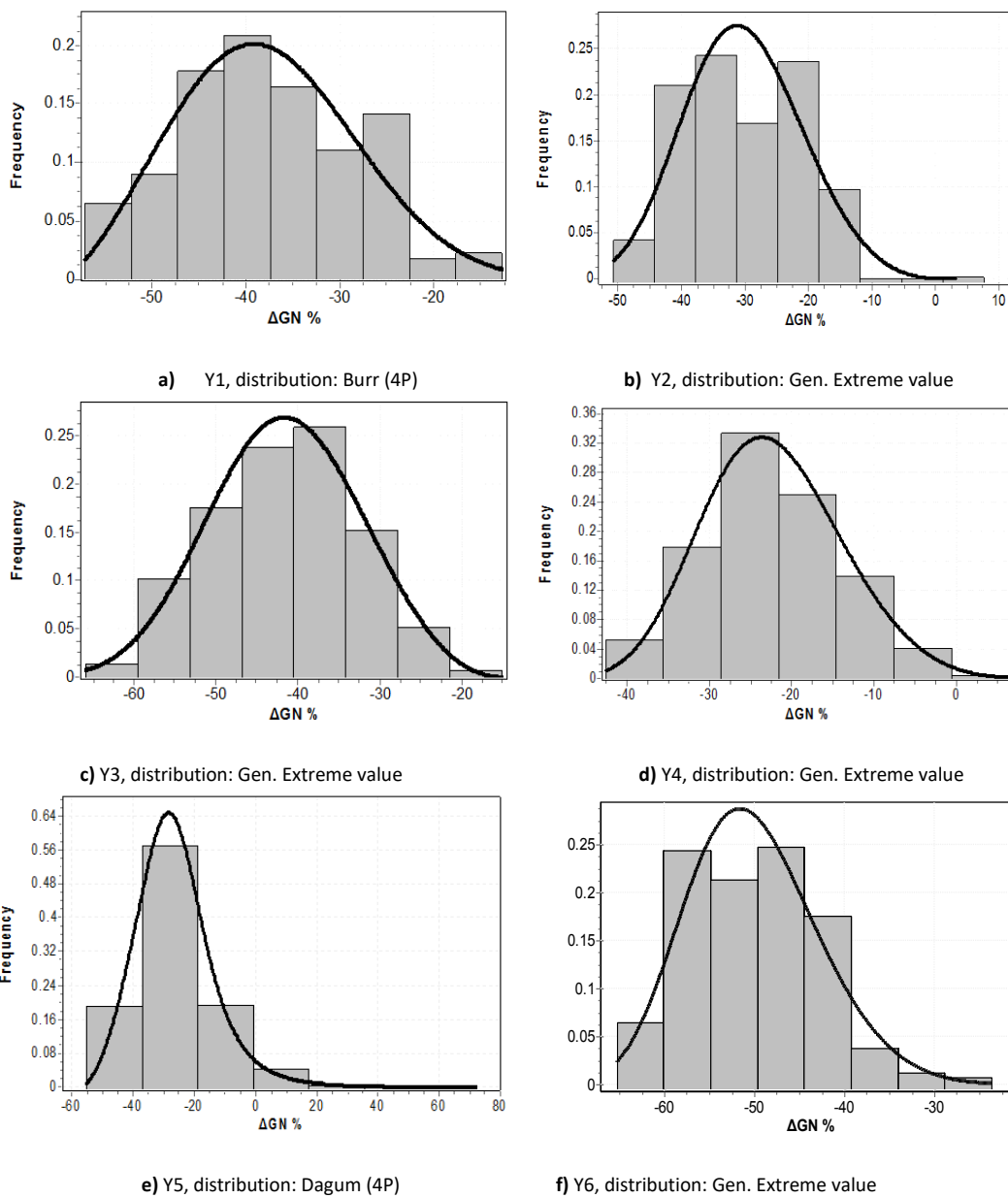


**c)** Y4, distribution: Dagum (4P)

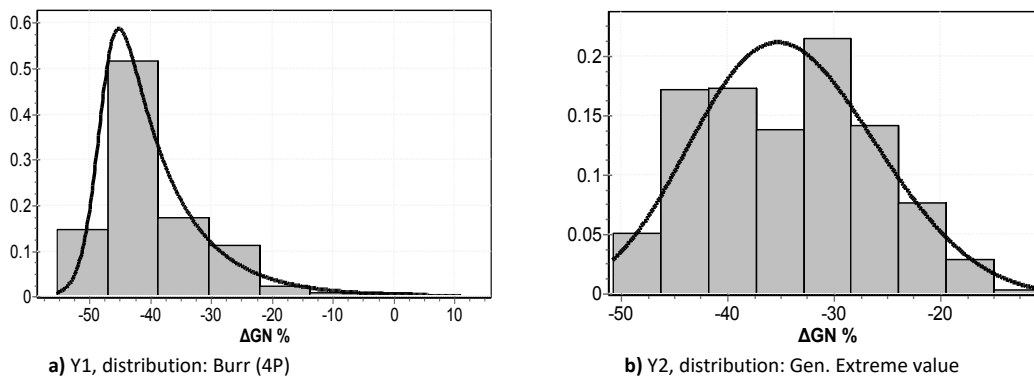


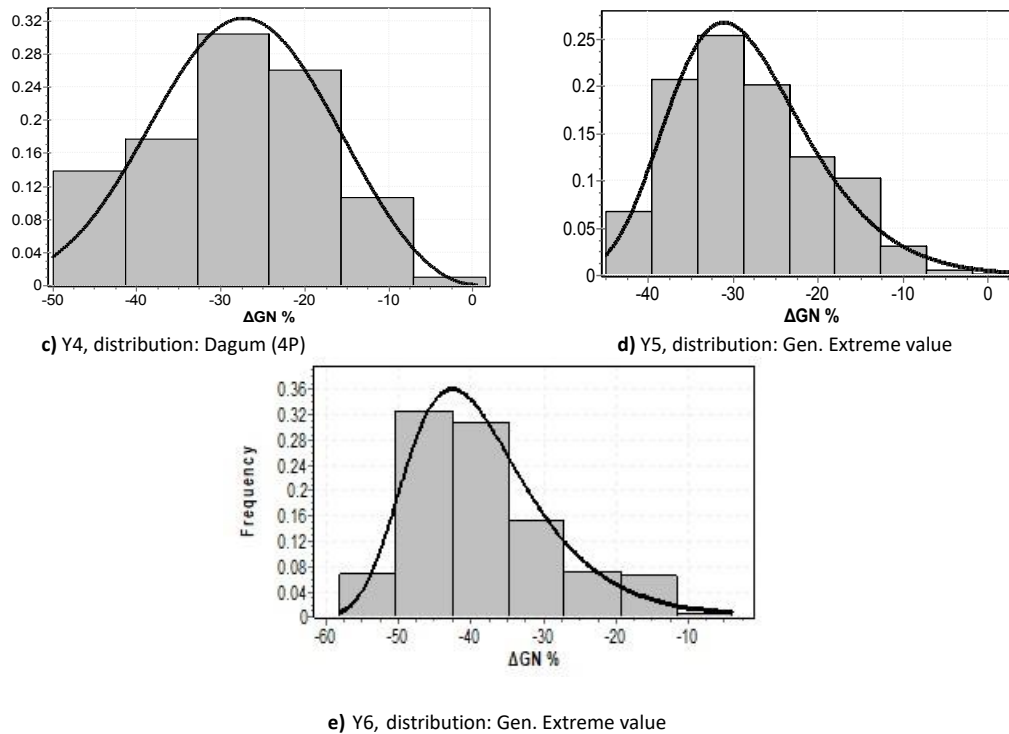
**d)** Y5, distribution: Burr (4P)

**Εικόνα 6.22:** Προσαρμογή κατανομών – S2, ΔGN2j (j= 2, 3, 4, 5)



**Εικόνα 6.23:** Προσαρμογή κατανομών -  $S3, \Delta GN_{3j}$  ( $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ )





**Εικόνα 6.24:** Προσαρμογή κατανομών - S4,  $\Delta GN_{4j}$  ( $j= 1, 2, 4, 5, 6$ ).

Οι Πίνακες 6.9-6.11 δείχνουν τα αποτελέσματα του κριτηρίου ελέγχου Kolmogorov-Smirnov και του Anderson-Darling σχετικά με την προσαρμογή των κατανομών στο εκάστοτε δείγμα δεδομένων. Η επιλογή της εκάστοτε κατανομής βασίστηκε στην καλή προσαρμογή με βάση το αντίστοιχο κριτήριο ελέγχου. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις δειγμάτων  $\Delta GN_{ij}$  δεν ήταν εφικτή η προσαρμογή καμίας κατανομής. Κατά κάποιο τρόπο, αυτό υποδηλώνει ότι αυτά τα δείγματα μπορεί να μην είναι κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση, και ως εκ τούτου ο αποκλεισμός τους μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή προσέγγιση. Το επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ ) υποδεικνύει το μέγιστο σταθερό επίπεδο που λαμβάνεται υπόψη για κοινούς στατιστικούς λόγους, μέχρι το οποίο η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ) μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή. Επίσης για αυτό το επίπεδο, η αναφερόμενη ως «κρίσιμη» τιμή λαμβάνεται από έναν τυπικό πίνακα και εάν είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στατιστική τιμή του κριτηρίου ελέγχου, τότε η υποτιθέμενη κατανομή μπορεί να γίνει αποδεκτή για την περιγραφή των αντίστοιχων δεδομένων.

**Πίνακας 6.9:** Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S1

Έτη	Κατανομή	Κριτήριο ελέγχου	Test statistic	Επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ )
Y1	non-available	-	-	-
Y2	Burr (4P)	Kolmogorov-Smirnov	0.015	0.01
Y3	Dagum (4P)	Anderson-Darling	1.381	0.1
Y4	non-available	-	-	-
Y5	non-available	-	-	-
Y6	-	-	-	-

**Πίνακας 6.10:** Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S2

Έτη	Κατανομή	Κριτήριο ελέγχου	Test statistic	Επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ )
Y1	non-available	-	-	-
Y2	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	0.023	0.2
Y3	Dagum (4P)	Anderson-Darling	2.332	0.05
Y4	Dagum (4P)	Anderson-Darling	0.658	0.2
Y5	Burr (4P)	Anderson-Darling	1.484	0.1
Y6	non-available	-	-	-

**Πίνακας 6.11:** Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S3

Έτη	Κατανομή	Κριτήριο ελέγχου	Test statistic	Επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ )
Y1	Burr (4P)	Kolmogorov-Smirnov	0.049	0.2
Y2	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	0.076	0.01
Y3	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	0.030	0.2
Y4	Gen. Extreme	Anderson-Darling	0.621	0.2
Y5	Dagum (4P)	Anderson-Darling	0.436	0.2
Y6	Gen. Extreme	Anderson-Darling	1.261	0.2

**Πίνακας 6.12:** Αποτελέσματα κριτηρίων ελέγχου τμήμα S4

Έτη	Κατανομή	Κριτήριο ελέγχου	Test statistic	Επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha$ )
Y1	Burr (4P)	Kolmogorov-Smirnov	1.541	0.1
Y2	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	2.809	0.02
Y3	non available	-	-	-
Y4	Dagum (4P)	Anderson-Darling	3.578	0.01
Y5	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	0.034	0.2
Y6	Gen. Extreme	Kolmogorov-Smirnov	0.044	0.05

Με βάση τα παραπάνω, ο Πίνακας 6.13 συνοψίζει το εκτιμώμενο - αντιπροσωπευτικό  $\Delta GN_{ij}\%$ , που προκύπτει από την προσαρμογή κατανομής σε κάθε τμήμα, για το κάθε έτος. Στην πραγματικότητα, αυτές οι τιμές  $\Delta GN_{ij}\%$  παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, με άλλα λόγια αυτές οι τιμές είναι πιο πιθανό να παρατηρηθούν (δειγματοληπτικά) σε καθένα από τα επιμέρους σύνολα δεδομένων και ως εκ τούτου, θεωρούνται χαρακτηριστικές. Προφανώς, για την περίπτωση της μη ύπαρξης διαθέσιμων κατανομών (non available), δεν ορίστηκε χαρακτηριστική τιμή για το αντίστοιχο δείγμα δεδομένων.

**Πίνακας 6.13:** Αντιπροσωπευτικές τιμές ποσοστιαίων μεταβολών ΔGNij % για κάθε τμήμα και έτος

i-τμήμα	j-έτη					
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
S1	Δεν ορίζεται	-19%	-38%	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται	Δεν ορίζεται
S2	Δεν ορίζεται	-38%	-30%	-17%	-32%	Δεν ορίζεται
S3	-39%	-34%	-45%	-26%	-28%	-50%
S4	-45%	-37%	Δεν ορίζεται	-23%	-32%	-42%

Με στόχο τον προσδιορισμό μιας ενιαίας σχετικής ποσοστιαίας μεταβολής αναφοράς (ΔGNref%) ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά του τμήματος ή του έτους ανάλυσης, όλες οι τιμές ΔGNij% από τον Πίνακα 6.13 θεωρούνται ότι αποτελούν ένα νέο δείγμα δεδομένων, στο οποίο πραγματοποιείται μία πρόσθετη στατιστική ανάλυση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες, που φαίνονται στον Πίνακα 6.14, καθώς το νέο δείγμα δεδομένων αποτελείται από λίγες τιμές.

**Πίνακας 6.14:** Περιγραφικοί στατιστικοί δείκτες ενιαίας σχετικής ποσοστιαίας μεταβολής ΔGNijref %

Στατιστικός δείκτης	Τιμή
Μέσος όρος	-33.8%
Τυπική απόκλιση	9.3
25%	-40%
Διάμεσος 50%	-34%
75%	-27%

Ωστόσο για την προσέγγιση μιας ασφαλούς ενιαίας σχετικής ποσοστιαίας μεταβολής και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιλέγεται η μεταβολή ΔGNref -35% μεταξύ των περιόδων I και III για το εν λόγω αυτοκινητόδρομο. Κατά συνέπεια, μπορεί να προταθεί μια εκτίμηση των τιμών GN<sub>D</sub> ως εξής, με βάση τις μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας της περιόδου I:

$$GN_D = 65\% \cdot G_w \quad (6.14)$$

Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι πληροφορίες που παρείχε το προηγούμενο δείγμα, αν και συντηρητικές, θα μπορούσαν ενδεχομένως να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για τους φορείς διαχείρισης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων στο πλαίσιο του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης ενδεχόμενων προληπτικών ενεργειών συντήρησης, κατά τη μετάβαση από την περίοδο I στην περίοδο III, με σκοπό τη βελτίωση της ασφάλειας των χρηστών του δρόμου.

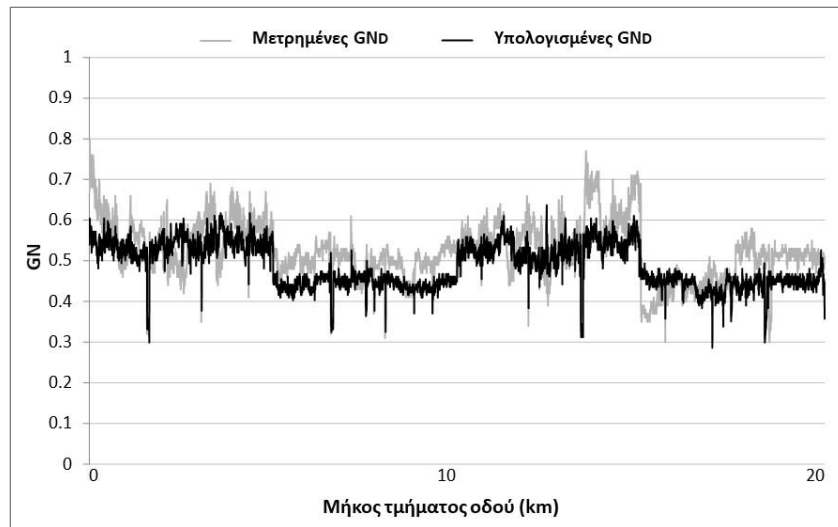
### 6.3.2 Επαλήθευση ποσοστιαίας μεταβολής

Για την επαλήθευση της ποσοστιαίας μεταβολής της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ των περιόδων I και III (-35%) αξιοποιήθηκαν επιπλέον στοιχεία GN, αυτοκινητοδρόμου υπεραστικού δικτύου με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας και καιρικών συνθηκών, αλλά ίδια χαρακτηριστικά ασφατομίγματος της αντιολισθητικής στρώσης. Συγκεκριμένα, στον υπόψη αυτοκινητόδρομο επαλήθευσης η κυκλοφορία των διερχόμενων οχημάτων ήταν πολύ μικρότερη (συνολική και βαρέων οχημάτων). Επίσης, η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κυμαινόταν μεταξύ 5-10°C



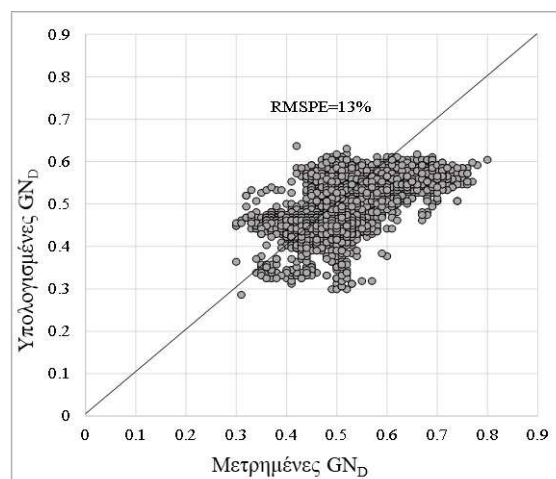
κατά την περίοδο I, ενώ κατά την περίοδο III κυμαινόταν μεταξύ 15-25°C, επιπλέον σημειώνεται σημαντική εμφάνιση βροχοπτώσεων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Ως εκ τούτου, με βάση τις μετρημένες τιμές  $GN_w$ , υπολογίζονται οι τιμές  $GN_D$  μέσω της εξίσωσης 6.14. Η Εικόνα 6.25 απεικονίζει τη σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω της εξίσωσης τιμών  $GN_D$ , κατά μήκος τμήματος της συγκεκριμένης υπεραστικής οδού.



Εικόνα 6.25: Σύγκριση τιμών GND (μετρημένες vs. υπολογισμένες)

Από το διάγραμμα της Εικόνας 6.25 παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι υπολογισμένες τιμές  $GN_D$  είναι σαφώς χαμηλότερες από τις μετρημένες, ωστόσο αυτό μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό ως υπολογισμός υπέρ της ασφάλειας δεδομένου ότι οι χαμηλότερες τιμές GN αποτελούν ένα πιο δυσμενές σενάριο αξιολόγησης της αντιολισθητικής ικανότητας. Στη συνέχεια, με σκοπό την αξιολόγηση του εκτιμώμενου  $\Delta GN_{ref}$  (-35%), το κριτήριο Root Mean Square Percent of Error (RMSPE) (Εξίσωση 6.4) προσαρμόζεται στα ζεύγη των μετρημένων και υπολογισμένων, μέσω της εξίσωσης, τιμών  $GN_D$ .



Εικόνα 6.26: RMSPE (μετρημένες vs. υπολογισμένες)

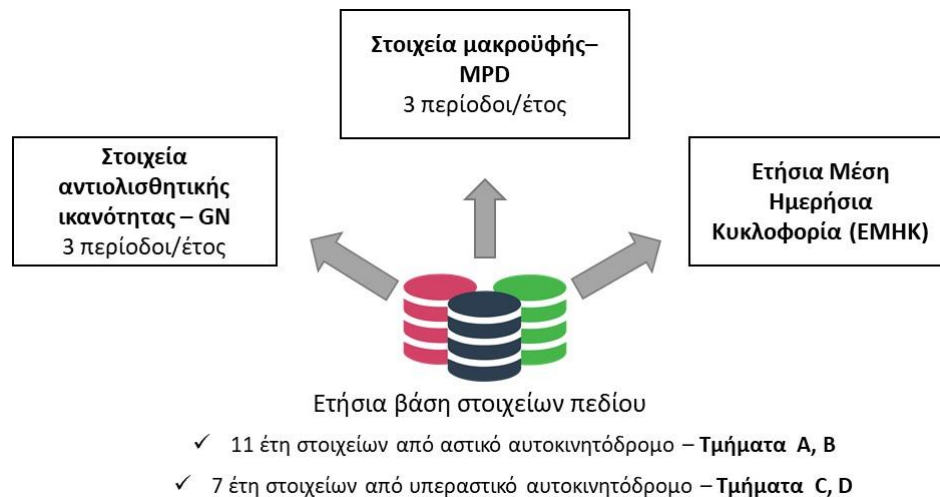
Στην Εικόνα 6.26 φαίνεται ότι το RMSPE που προκύπτει είναι 13%, το οποίο θεωρείται σχετικά χαμηλή τιμή που αντιπροσωπεύει μια καλή τάση (Veerasamy et al. 2011) για το συγκεκριμένο είδος δεδομένων και, ως εκ τούτου, τα εκτιμώμενα δεδομένα των τιμών GN<sub>0</sub> αποτελούν μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση των μετρημένων. Κατά συνέπεια, η ποσοστιαία μεταβολή αναφοράς -35% βρέθηκε να ικανοποιεί τον υπολογισμό της εποχιακής διακύμανσης της αντιολισθητικής ικανότητας και σε αυτό το υπεραστικό τμήμα αυτοκινητόδρομου.

Δεδομένης της επαλήθευσης της ποσοστιαίας μεταβολής σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου με διαφορετικά χαρακτηριστικά κυκλοφορίας και καιρικών συνθήκων, αλλά κοινών χαρακτηριστικών οδοστρώματος (υλικά κατασκευής ανώτερης στρώσης), προκύπτει ότι η εποχιακή μεταβολή πιθανώς συνδέεται με τα χαρακτηριστικά της αντιολισθητικής στρώσης. Ωστόσο, θα ήταν σαφώς θετική η επέκταση της σχετικής διερεύνησης σε επιπρόσθετα οδικά τμήματα, ώστε να επαληθευτεί η εν λόγω παρατήρηση και πιθανώς να γίνει βαθμονόμηση της συγκεκριμένης μεταβολής συναρτήσει άλλων παραμέτρων.

#### 6.4 Ανάλυση αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής: Συνδυαστική επίδραση κυκλοφορίας και εποχιακής διακύμανσης

Στα παραπάνω εδάφια παρουσιάστηκε η διερεύνηση αναφορικά με την επίδραση των παραγόντων της κυκλοφορίας και της εποχιακής διακύμανσης στο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Ωστόσο, όπως είναι προφανές κατά τη διάρκεια λειτουργίας μίας οδού και οι δύο παράγοντες είναι εξίσου σημαντικοί όπως άλλωστε παρουσιάστηκε και στο θεωρητικό σκέλος της παρούσας διατριβής. Ως εκ τούτου, στο παρόν εδάφιο γίνεται περαιτέρω αξιοποίηση των δεδομένων αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής, με στόχο να αξιολογηθεί συνδυαστικά η επίδραση των δύο αυτών παραγόντων, σε συνέχεια των προηγούμενων αποτελεσμάτων.

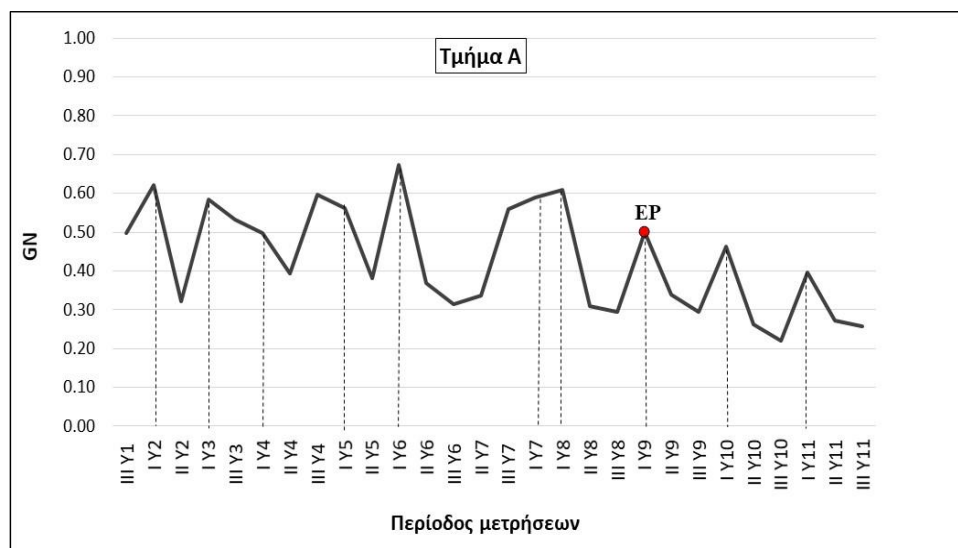
Προς τούτο αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής από τις περιόδους I, II, III όπως παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 6.2 και την Εικόνα 6.7 για την περίπτωση ενός αστικού αυτοκινητοδρόμου. Αντίστοιχα ζεύγη στοιχείων μετρήσεων αξιοποιήθηκαν για την περίπτωση ενός υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου με τα ίδια χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος αντιολισθητικής στρώσης. Επιπλέον, και για τις δύο περιπτώσεις αυτοκινητοδρόμων χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες σχετικά με την ΕΜΗΚ. Αξίζει να σημειωθεί ότι και για τις δύο περιπτώσεις οδών το πρώτο έτος συλλογής των στοιχείων πεδίου που αξιοποιήθηκαν δεν αντιστοιχεί στο πρώτο έτος λειτουργίας τους συνεπώς, δεν αντικατοπτρίζει την κατάσταση «μηδέν» των κατασκευών αλλά την κατάστασή τους μερικά έτη μετά την έναρξη λειτουργίας τους. Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν από τις βάσεις δεδομένων για τις δύο οδούς παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 6.27.



**Εικόνα 6.27:** Στοιχεία που αξιοποιήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ

Για τον προσδιορισμό της ετήσιας μεταβολής της αντιολισθητικής ικανότητας και της μακροϋφής εξαιτίας της κυκλοφορίας αξιοποιήθηκε η Εξίσωση 6.2 για τον υπολογισμό του δείκτη Mean Summer Skid Coefficient (MSSC). Ενώ, για τον προσδιορισμό των εποχιακών μεταβολών αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία και των τριών περιόδων μετρήσεων (Περίοδος I: Υγρή, Περίοδος II: Μέση, Περίοδος III: Ξηρή) για κάθε έτος (εφόσον εμπεριέχονταν στη βάση δεδομένων).

Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 6.28 απεικονίζεται το διάγραμμα GN για κάθε περίοδο μέτρησης για την περίπτωση των 11 ετών (Yi - έτος) στο τμήμα A. Η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης είναι εμφανής με τις περιόδους «I» να εμφανίζουν καλύτερα επίπεδα GN, όπως αναμενόταν.

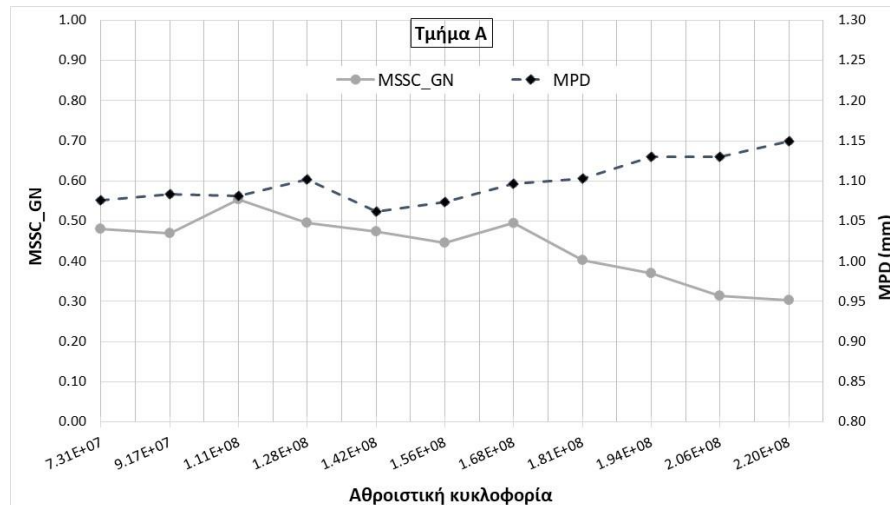


**Εικόνα 6.28:** Επίδραση εποχιακής διακύμανσης για 11 συναπτά έτη (Τμήμα A)

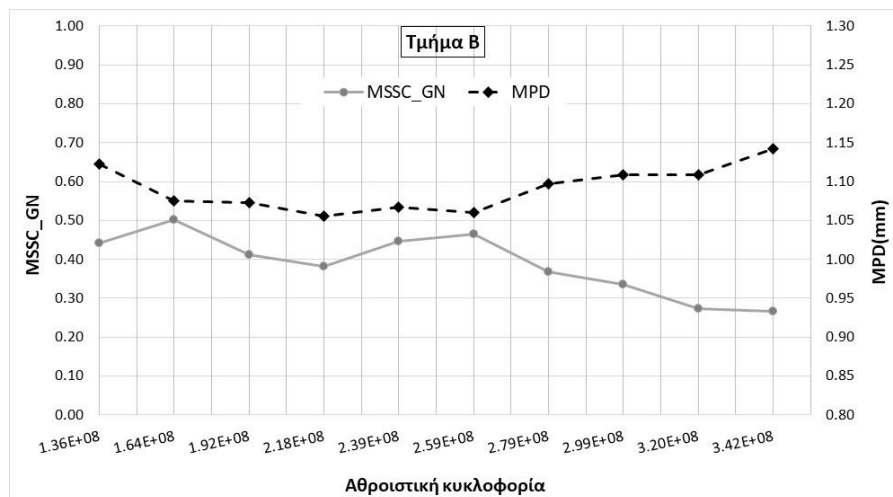
Επιπλέον, εστιάζοντας στα δεδομένα των υγρών περιόδων «I», φαίνεται ότι μετά από το σημείο «I Y9», η αντιολισθητική ικανότητα μειώνεται συνεχώς και η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης γίνεται λιγότερο έντονη. Αυτό το σημείο υποδηλώνει την έναρξη της φάσης ισορροπίας στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας, όπως περιγράφεται σε σχετικές έρευνες (Wilson 2006, Choi 2011, Friel et al.

2013) και στη συνέχεια αναφέρεται ως σημείο ισορροπίας – “Equilibrium Point (EP)”. Επιπροσθέτως, όπως παρουσιάστηκε στο εδάφιο 6.3, η μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας μεταξύ των περιόδων I και III, εκτιμήθηκε περί το 35%.

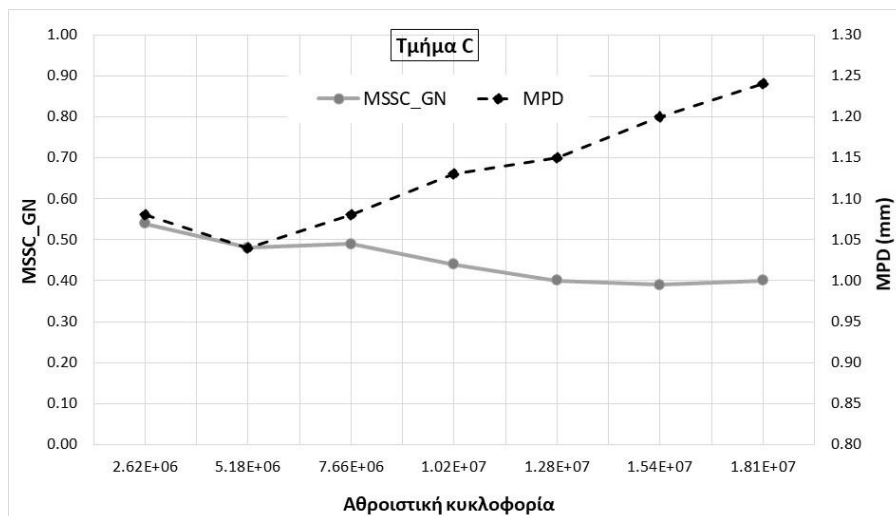
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής των επιπέδων GN (MSSC) και MPD (Εικόνα 6.29 – 6.31), με την πάροδο των ετών για τα τέσσερα υπό-διερεύνηση τμήματα. Σε όλες τις περιπτώσεις είναι εμφανής η ύπαρξη του σημείου αντίστροφης τάσης των δύο δεικτών όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο εδάφιο 6.2. Επίσης, κυρίως για τα στοιχεία του αστικού αυτοκινητόδρομου πριν την αντίστροφη τάση, δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών ( $R^2$  χαμηλό, Πίνακας 6.6). Τα τμήματα A και B αντιστοιχούν στον αστικό αυτοκινητόδρομο ενώ, τα C και D στον υπεραστικό.



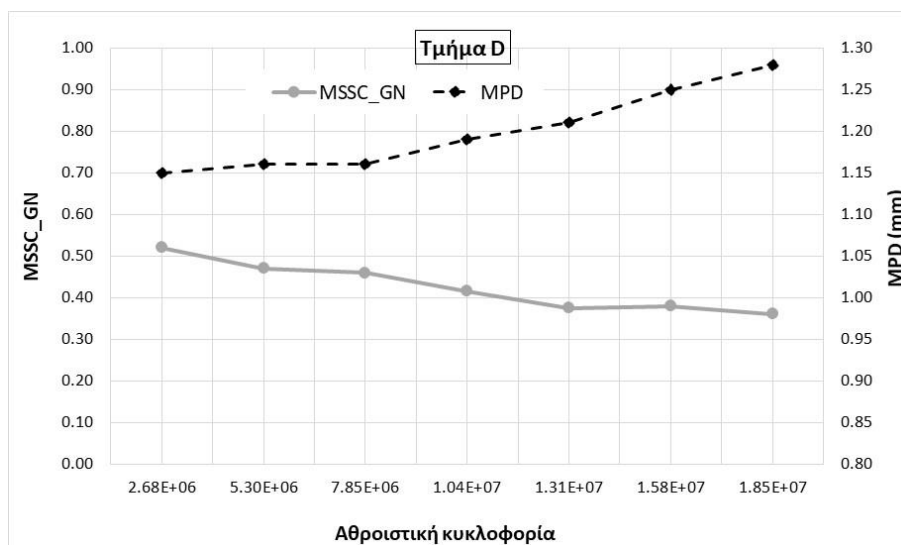
Εικόνα 6.29: Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 11 συναπτά έτη (Τμήμα A)



Εικόνα 6.30: Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 11 συναπτά έτη (Τμήμα B)

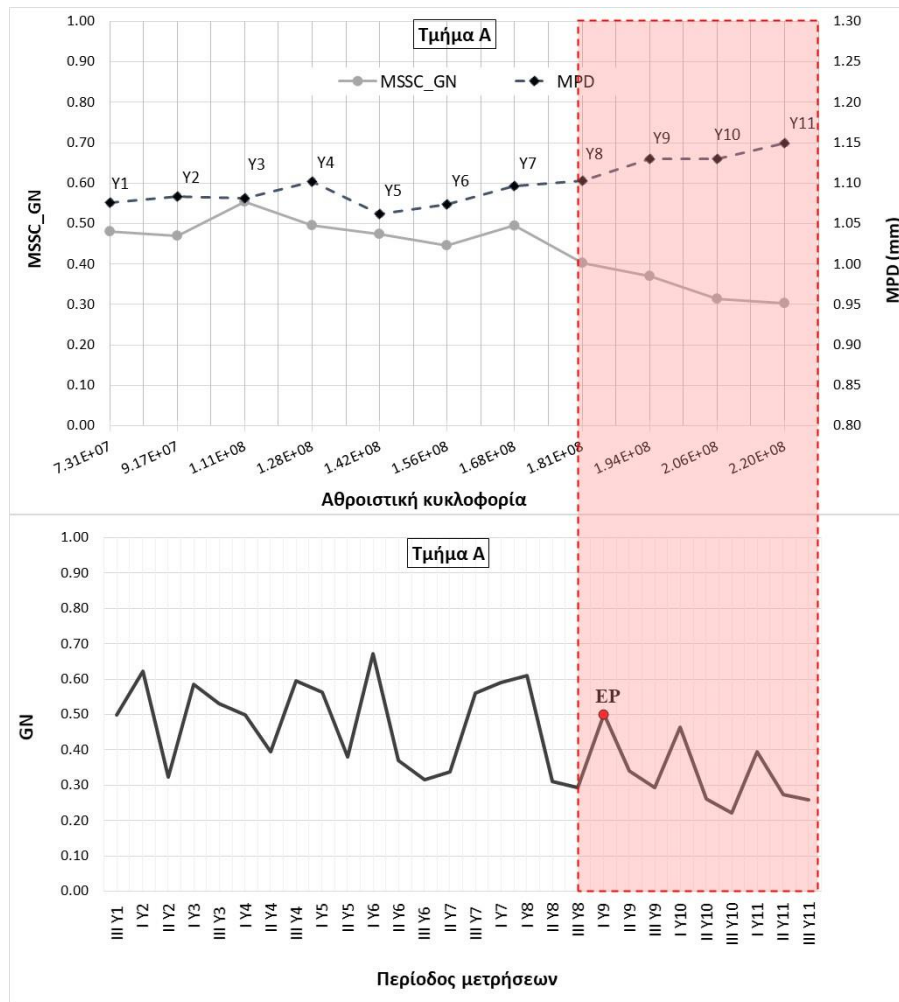


Εικόνα 6.31: Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 7 συναπτά έτη (Τμήμα C)



Εικόνα 6.32: Επίδραση κυκλοφοριακού φόρτου για 7 συναπτά έτη (Τμήμα D)

Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, διερευνάται ο συνδυασμός των ευρημάτων σχετικά με την εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας υπό την επίδραση των παραγόντων της κυκλοφορίας και της εποχιακής διακύμανσης. Η Εικόνα 6.33 δείχνει την εποχιακή διακύμανση σε σύγκριση με την πτώση του επίπεδου αντιολισθητικής ικανότητας από έτος σε έτος, για το τμήμα Α της αστικής οδού. Το κύριο ζήτημα είναι να προσδιοριστεί εάν υπάρχει κάποιο κοινό στοιχείο μεταξύ των φάσεων α) όταν ξεκινά η αντίστροφη τάση (δηλαδή μετά το Έτος 8: Υ8) και β) όταν το φαινόμενο εποχιακής διακύμανσης γίνεται λιγότερο έντονο (σημείο EP).



Εικόνα 6.33: Συγκριτική απεικόνιση επίδρασης κυκλοφοριακού φόρτου και εποχιακής διακύμανσης (Τμήμα Α)

Από τα διαγράμματα της Εικόνας 6.33, είναι προφανές ότι υπάρχει ένδειξη σχέσης μεταξύ των δύο φάσεων. Με άλλα λόγια, φαίνεται ότι όταν η επιφάνεια του οδοστρώματος γίνεται πιο λεία (κυρίως μετά την αντίστροφη τάση στο Y8), η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης είναι λιγότερο έντονη. Αυτή η παρατήρηση φαίνεται να είναι ορθολογική, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του οδοστρώματος στη φάση μετά την αντίστροφη τάση μεταξύ MSSC\_GN και MPD, η οποία εξηγήθηκε αναλυτικά προηγουμένως. Ιδιαίτερα, λαμβάνοντας υπόψη την απώλεια μερίδας λεπτών αδρανών και την ύπαρξη σιλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών, τόσο οι συνθήκες ύπαρξης κατάλοιπων στην επιφάνεια (που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της μέσης όσο και της ξηρής περιόδου) όσο και οι συνθήκες που η επιφάνεια είναι πιο καθαρή (που συμβαίνουν κατά τις υγρές κυρίως περιόδους) μπορεί να μην επηρεάζουν ουσιαστικά πια τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής υφής και κατ' επέκταση δεν μπορούν να θεωρούνται κρίσιμες για τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας όπως αυτά διαμορφώνονται σε κάθε μετέπειτα περίοδο I – III.

Συγκρίνοντας τα δεδομένα των τμημάτων των δύο αυτοκινητοδρόμων, παρατηρείται ότι τόσο οι τιμές GN, όσο και οι τιμές MPD βρίσκονται αρχικά σε παρόμοια επίπεδα μεταξύ των τμημάτων, δηλαδή περίπου 0,50 GN (MSSC\_GN) και MPD 0.55-0.70 mm αντίστοιχα. Ωστόσο, η πτώση του επιπέδου της αντιολισθητικής ικανότητας είναι αξιοσημείωτη αντίθετα, η μακροϋφή δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα και τελικώς αυξάνεται. Συγκεκριμένα, για τα τμήματα της δεύτερης οδού C και D, οι τιμές MPD είναι

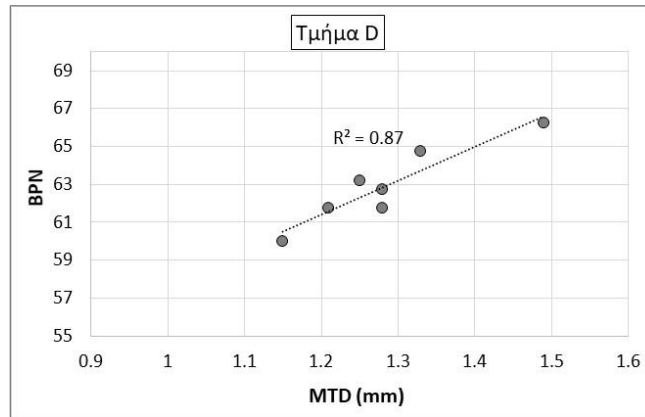
μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για την πρώτη οδό. Η εν λόγω παρατήρηση θα μπορούσε να αποδοθεί στις διαφορές στην τάξη μεγέθους της αθροιστικής κυκλοφορίας αλλά και στη συχνότητα των βροχοπτώσεων μεταξύ των δύο αυτοκινητόδρομων. Πιο συγκεκριμένα, οι έντονες βροχοπτώσεις στον υπεραστικό αυτοκινητόδρομο καθαρίζουν αποτελεσματικότερα το βάθος υψής με αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές μακροϋψής.

Εστιάζοντας στις λεπτομέρειες της τάσης που παρατηρείται και σημειώνοντας τα στοιχεία κυκλοφορίας στους δύο αυτοκινητοδρόμους γίνεται αντιληπτό ότι ο όγκος της κυκλοφορίας όταν συμβαίνει η αντίστροφη τάση στα τμήματα των δύο οδών είναι διαφορετικός, χωρίς σταθερό ρυθμό αύξησης καθ' όλη την περίοδο διερεύνησης. Συγκεκριμένα, η έναρξη της αντίστροφης τάσης συμβαίνει σε υψηλότερη αθροιστική κυκλοφορία στον αστικό αυτοκινητόδρομο από ό,τι στην περίπτωση του υπεραστικού. Ωστόσο, στην περιοχή του υπεραστικού αυτοκινητόδρομου, η πιθανότητα βροχοπτώσεων, όχι μόνο κατά τη διάρκεια των υγρών «I» αλλά και κατά τη διάρκεια των μεσαίων «II» και των ξηρών «III» περιόδων και η κυκλοφορία είναι μικρότερη από ό,τι στον αστικό αυτοκινητόδρομο (τόσο για τα εμπορικά οχήματα όσο και τα επιβατικά αυτοκίνητα). Ως εκ τούτου, η τάση που συζητήθηκε (παρατήρηση του σημείου αντίστροφης τάσης για τον υπεραστικό αυτοκινητόδρομο σε χαμηλή αθροιστική κυκλοφορία), δεν φαίνεται εκ πρώτης όψεως λογική.

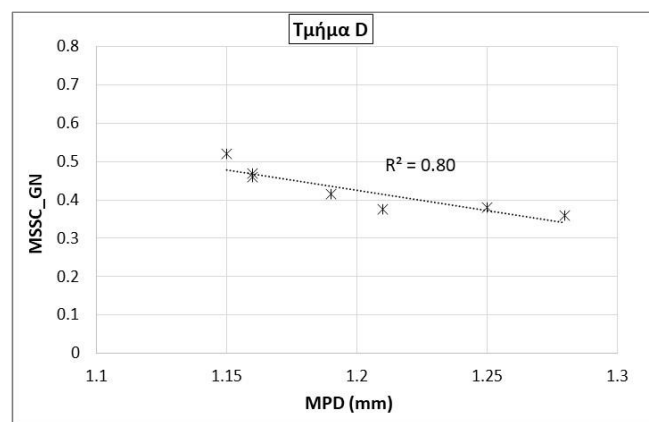
Η συγκεκριμένη παρατήρηση οδήγησε στην αξιοποίηση διαθέσιμων δεδομένων από την κατάσταση μηδέν του οδοστρώματος του υπεραστικού αυτοκινητόδρομου (εδάφιο 6.1), τα οποία όπως αναφέρθηκε νωρίτερα δεν περιλαμβάνονται στη βάση στοιχείων παρακολούθησης του οδοστρώματος (δεν αφορούν στη λειτουργία της οδού). Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν στοιχεία μακροϋψής με τη μέθοδο της κηλίδας της άμμου – Sand Patch σε όρους MTD (ASTM E965, 2015) και στοιχεία μικροϋψής με τη μέθοδο του Βρετανικού εκκρεμούς σε όρους BPN (ASTM E303, 2018) από το τμήμα D (Pratico and Astolfi 2017). Τα στοιχεία BPN αφορούσαν στη κατά μήκος διεύθυνση της οδού (// με την κίνηση των οχημάτων) και συνολικά τα στοιχεία BPN και MTD προέρχονταν από τα ίδια επτά σημεία στο εξωτερικό (δεξί) ίχνος τροχού. Έως τώρα στην παρούσα έρευνα για την εκτίμηση των επιπέδων μακροϋψής έχει αξιοποιηθεί ο δείκτης MPD αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά η σχέση μεταξύ μεταβλητών MTD και MPD είναι μη γραμμική για την περίπτωση επιφανειών από ανοιχτού τύπου ασφαλτόμιγμα, αντίστοιχο με το ασφαλτόμιγμα που διερευνάται (Pratico and Vaina 2015). Ωστόσο, για την κατάσταση «μηδέν» ενός οδοστρώματος, όπως παρουσιάστηκε στο εδάφιο 6.1 η σχέση μεταξύ των μεταβλητών MTD και MPD μπορεί να είναι γραμμική (Plati et al. 2017a). Με άλλα λόγια, στην κατάσταση «μηδέν» πριν δηλαδή το οδόστρωμα κυκλοφορηθεί, οι τιμές MTD μπορούν να υποδηλώσουν το εύρος των τιμών MPD και ως εκ τούτου, οι τιμές MTD να δώσουν μια εικόνα για την τάση των τιμών MPD.

Η Εικόνα 6.34 απεικονίζει ότι η σχέση μεταξύ των δεδομένων BPN και MTD από τα επτά σημεία που αξιοποιήθηκαν στην κατάσταση «μηδέν» είναι γραμμική. Ωστόσο, τα στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας (MSSC\_GN) στο συγκριμένο τμήμα και η μακροϋψή (MPD) αρχίζουν να παρουσιάζουν αντίστροφη τάση άμεσα απ' όταν το οδόστρωμα μπει στη φάση λειτουργίας του Εικόνα 6.35.





Εικόνα 6.34: BPN vs MTD πριν το οδόστρωμα κυκλοφορηθεί (Τμήμα D)



Εικόνα 6.35: MSSC\_GN vs MPD αφότου το οδόστρωμα δόθηκε στην κυκλοφορία (Τμήμα D)

Η αντίστροφη τάση μεταξύ των δεικτών MSSC\_GN και MPD υποδεικνύει ότι η αντιολισθητική ικανότητα που μειώνεται, πιθανώς επηρεάζεται περισσότερο από την μικροϋφή παρά από τη μακροϋφή, η οποία αυξάνεται. Η εν λόγω παρατήρηση ενδεχομένως συνδέεται με την γεωλογική προέλευση των αδρανών του ασφαλτομίγματος, τα οποία προέρχονται εν γένει από ασβεστολιθικά πετρώματα. Όπως άλλωστε έχει παρουσιαστεί μέσα από διάφορες σχετικές έρευνες, τα ασβεστολιθικά αδρανή είναι ιδιαίτερα ευπαθή όσον αφορά στη μικροϋφή τους, η οποία φθίνει αρκετά γρήγορα (Kane et al. 2012, Guan et al. 2018, Crisman et al. 2020).

Ωστόσο, το ερώτημα που ανακύπτει αφορά στην ευαισθησία της μικροϋφής στον εν λόγω αυτοκινητόδρομο σε σχέση με τον πρώτο (11 έτη παρακολούθησης), δεδομένης της ίδιας σύνθεσης του ασφαλτομίγματος και της προέλευσης των αδρανών υλικών. Η επεξήγηση θα μπορούσε να συνδεθεί με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του δεύτερου αυτοκινητοδρόμου δηλαδή, της αυξημένης πιθανότητας βροχοπτώσεων, όχι μόνο κατά τη διάρκεια των υγρών, αλλά και κατά τη διάρκεια της μέσης και της ξηρής περιόδου, καθώς και τον χαμηλό όγκο κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, η συχνότητα των βροχοπτώσεων απομακρύνει τα λεπτά αδρανή που αποκολλώνται κατά την κίνηση των οχημάτων, ωστόσο τα εν λόγω αδρανή λειτουργούν πολλές φορές θετικά ως προς την αδροποίηση των αδρανών της επιφανειακής στρώσης (Do et al. 2007, Dunford and Roe 2010). Συνεπώς, η απομάκρυνσή των λεπτών αδρανών συντελεί μεν στην αύξηση της μακροϋφής, καθώς καθαρίζονται τα κενά μεταξύ των

επιφανειακών αδρανών, οδηγεί όμως στη μείωση της μικροϋφής, εξαιτίας της μη αδροποίησής τους από την κυκλοφορία των οχημάτων.

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι η συμπεριφορά της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου δεν επηρεάζεται από τη μονομερή επίδρασή τους, αλλά ο συνδυασμός τους αποτελεί το κλειδί για τη διαμόρφωση των επιπέδων αντιολισθηρότητας που παρέχει εν τέλει μία οδός. Συνοψίζοντας, βασικό κομμάτι της διερεύνησης αποτέλεσε ο συνδυασμός της αντίστροφης τάσης της μακροϋφής από την αντιολισθητική ικανότητα με την εμφάνιση του σημείου “EP” της εποχιακής διακύμανσης. Επίσης, γίνεται σαφές ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διαφορετικότητα των συνθηκών που επικρατούν σε μία περιοχή, κατά την αξιολόγηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών οδοστρώματος σε μία οδό.

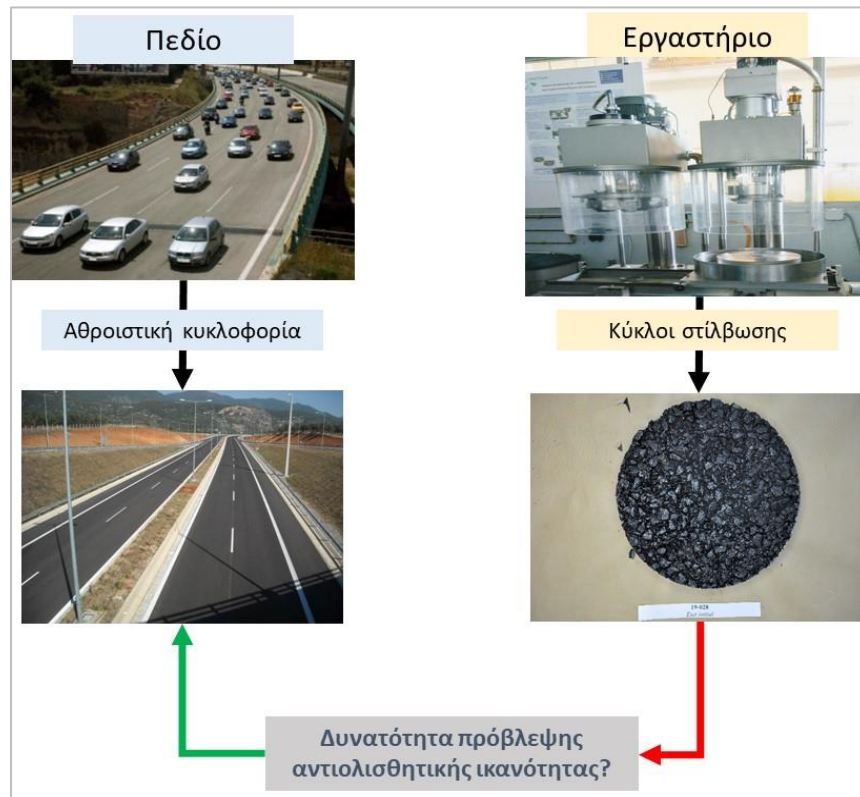
## 7 Σύζευξη αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η δυνατότητα σύζευξης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εργαστηριακή διερεύνηση δειγμάτων ασφαλτομιγμάτων με τα σχετικά αποτελέσματα από τις αναλύσεις των στοιχείων πεδίου. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση επικεντρώνεται στην επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου στο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας και συνεπώς, θα αξιολογηθεί η δυνατότητα εκτίμησης της επιτόπου συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων αξιοποιώντας σχετικές εργαστηριακές αναλύσεις. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη διερεύνηση δεν εστιάζει στην επίδραση των εποχιακών διακυμάνσεων στην αντιολισθητική ικανότητα, διότι σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται η πολυπλοκότητα και συνάμα η αβεβαιότητα των αναλύσεων.

Ξεκινώντας από τα στοιχεία της εργαστηριακής διερεύνησης, στην Ενότητα 5 πραγματοποιήθηκε διερεύνηση διάφορων τύπων ασφαλτομιγμάτων, μεταξύ αυτών το συμβατικό ασφαλτόμιγμα HMA σε δύο τύπους που θεωρήθηκαν ασφαλτομίγματα αναφοράς, χωρίς δηλαδή την προσθήκη RAR ή RAP υλικού. Ο πρώτος τύπος ασφαλτομίγματος (R0) προήλθε από το εργαστήριο (σχεδιασμός και παρασκευή) και ο δεύτερος τύπος (H100) από συλλογή υλικού κατά τη διαδικασία ασφαλτόστρωσης αντιολισθητής στρώσης αυτοκινητοδρόμου. Εντούτοις, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5, η συμπεριφορά των δύο τύπων ασφαλτομίγματος έναντι στίλβωσης παρουσίασε διαφοροποιήσεις. Ακόμα, διαφάνηκε ότι η επίδραση της γήρανσης (όπως αυτή ορίστηκε στο πλαίσιο της έρευνας) διαφοροποιεί επίσης την συμπεριφορά των υλικών έναντι στίλβωσης.

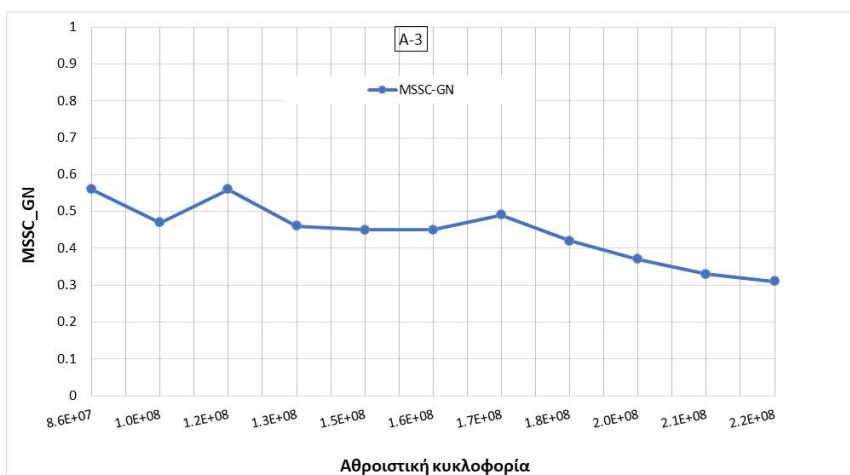
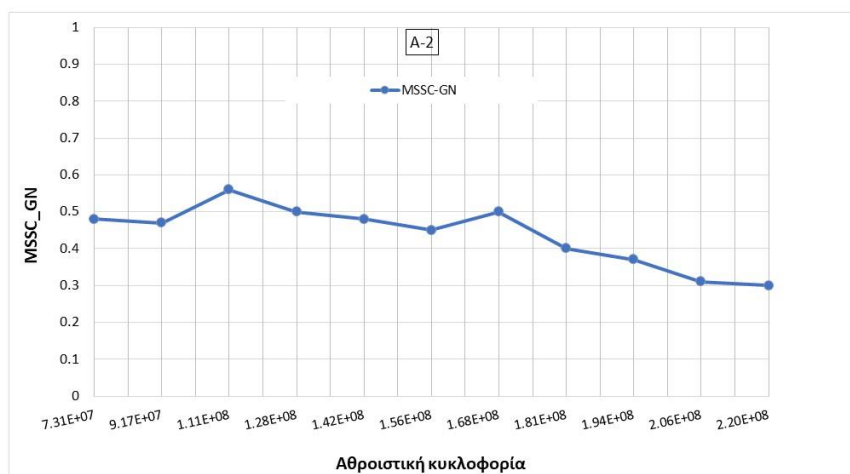
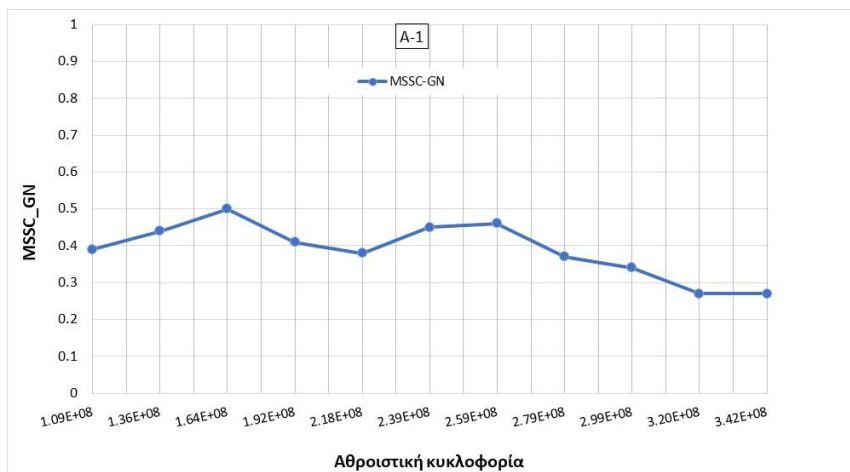
Όπως είναι γνωστό, η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών διαφοροποιούνται μεταξύ των ερευνών που αφορούν εργαστηριακά και στοιχεία από επιτόπου μετρήσεις, ακόμα και αν τα υλικά έχουν όμοιες ιδιότητες. Στην περίπτωση της αντιολισθητικής ικανότητας, η εν λόγω παρατήρηση γίνεται ακόμα πιο έντονη δεδομένων των πολυάριθμων παραγόντων που ενεργούν στο πεδίο και επηρεάζουν τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος συγκριτικά με τις συνθήκες εργαστηρίου. Η παρούσα έρευνα όμως, ασχολήθηκε και με τις δύο περιπτώσεις αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα που διαμορφώνεται και εξελίσσεται. Συνεπώς, οι βασικοί πυλώνες διερεύνησης αναφορικά με την παραπάνω παρατήρηση εντοπίζονται: α) στη διαφοροποίηση των τύπων των υλικών που αξιολογήθηκαν έναντι στίλβωσης αξιοποιώντας εργαστηριακό εξοπλισμό και β) στη διερεύνηση της επίδρασης του κυκλοφοριακού φόρτου (στίλβωσης) τόσο σε περιβάλλον εργαστηριακό, όσο και αξιοποιώντας στοιχεία πεδίου (Εικόνα 7.1). Η ανάλυση και τα σχετικά αποτελέσματα της παρούσας ενότητας, εστιάζουν στο δεύτερο κυρίως σκέλος, αξιοποιώντας προφανώς τη διερεύνηση του πρώτου σκέλους που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5. Προς τούτο, αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας από μετρήσεις πεδίου, που αναλύθηκαν στην Ενότητα 6. Πλην όμως υπάρχουν κάποιες βασικές υποθέσεις και περιορισμοί που χρειάζεται να σημειωθούν:

- Αναφορικά με τα στοιχεία πεδίου, η διερεύνηση αφορά στην περίοδο μετά την απομάκρυνση του ασφαλτικού υλικού από τα επιφανειακά αδρανή (masking effect removal).
- Δεν προϋπάρχει ένδειξη για ισοδυναμία ή συσχέτιση του συντελεστή τριβής σε όρους GN (στοιχεία πεδίου μέσω GripTester) και του CoF (στοιχεία εργαστηρίου μέσω W/S).
- Δεν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης.
- Αξιολογείται η ποιοτική τάση της αντιολισθητικής ικανότητας με την πάροδο των αθροιστικών διελεύσεων οχημάτων συγκριτικά με τους κύκλους στίλβωσης.

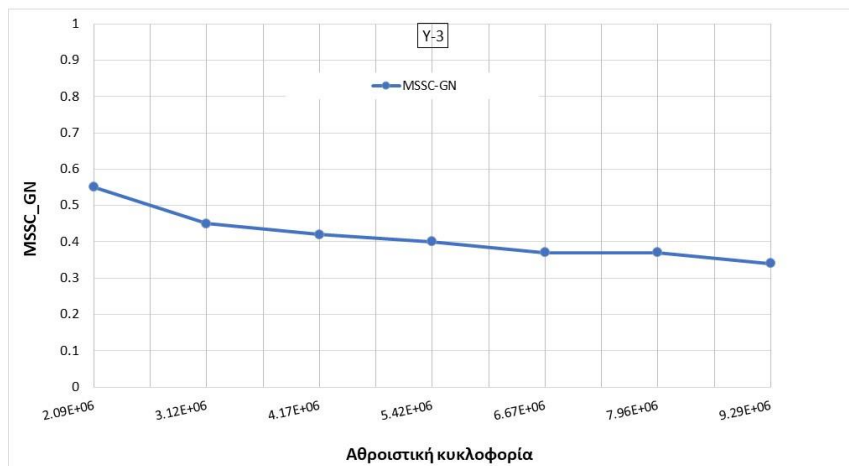
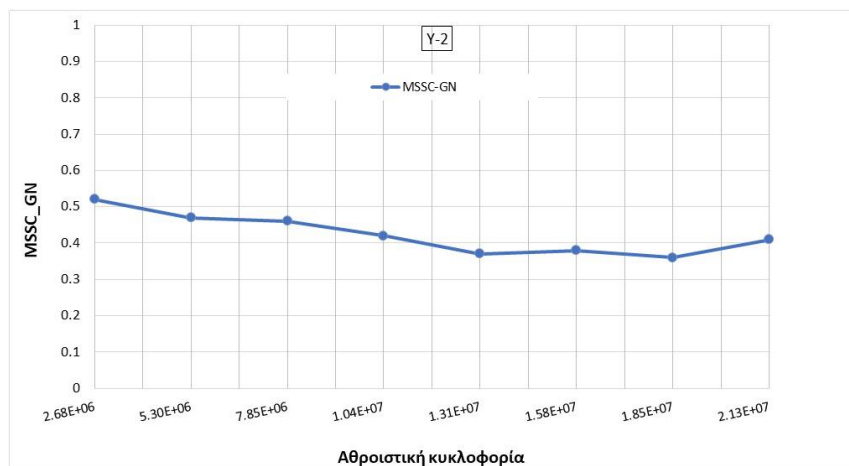
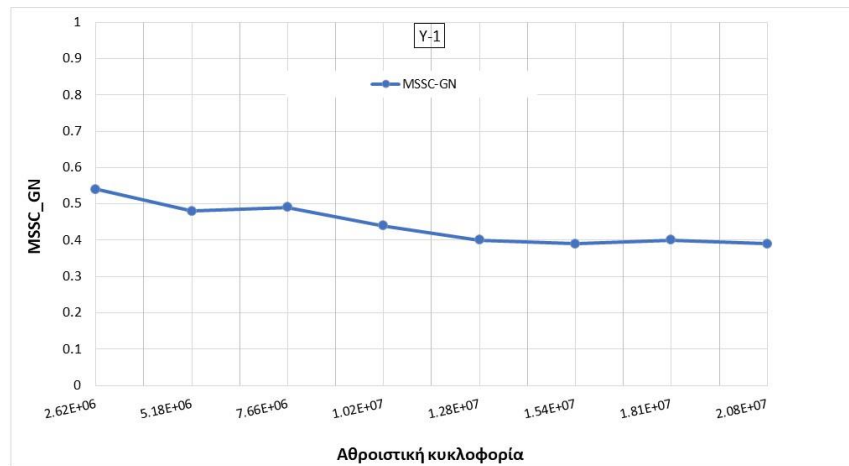


Εικόνα 7.1: Σχηματική απεικόνιση σκοπού διερεύνησης

Οι Εικόνες 7.2 – 7.3 παρουσιάζουν τα διαγράμματα αντιολισθητικής ικανότητας σε όρους GN (MSSC) υπό την επίδραση της αθροιστικής κυκλοφορίας για τα τμήματα που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας. Συγκεκριμένα, η Εικόνα 7.2 απεικονίζει τα σχετικά μεγέθη για την περίπτωση του αστικού αυτοκινητοδρόμου, ειδικότερα στα τμήματα της κατηγορίας A (Πίνακας 6.4), όπως αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα (τμήματα με την ένδειξη A) ενώ, η Εικόνα 7.3 τα αντίστοιχα μεγέθη για τον υπεραστικό αυτοκινητόδρομο (τμήματα με την ένδειξη Υ) με μικρότερη κυκλοφορία. Τα σχετικά διαγράμματα προέκυψαν από την πορεία ανάλυσης που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.



Εικόνα 7.2: Τμήματα αστικού αυτοκινητοδρόμου (Α)

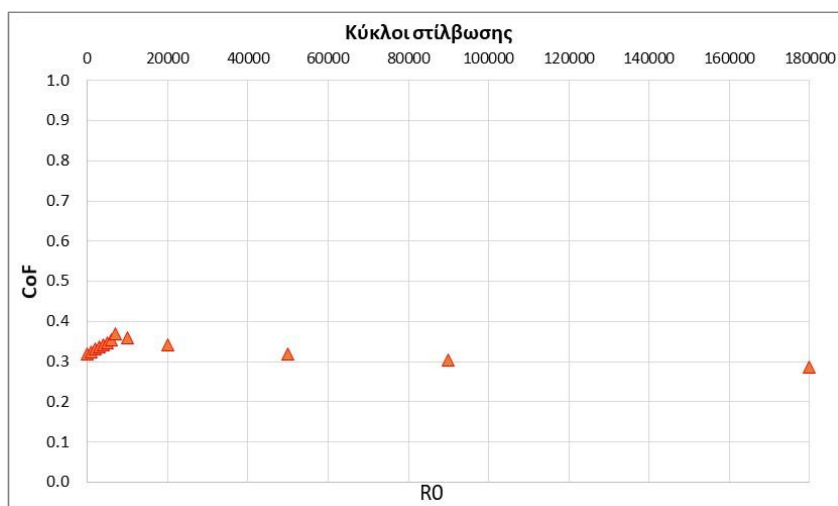


Εικόνα 7.3: Τμήματα υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου (Υ)

Η διαδικασία της σύζευξης των δύο συμπεριφορών (εργαστηρίου & πεδίου) παρουσιάζεται ακολούθως για τις περιπτώσεις ασφαλομιγμάτων τύπου HMA χωρίς προσθήκη RAR ή RAP και βασίζεται στις καμπύλες στίλβωσης που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 5, ακολουθώντας την παρακάτω μεθοδολογία:

- ✓ Αξιοποίηση σχέσεων περιγραφής καμπύλων στίλβωσης για τα δείγματα: R0 και H100.
- ✓ Σχεδιασμός καμπύλων στίλβωσης με βάση τις σχέσεις της **Ενότητας 5.5.5**.
- ✓ Επεξήγηση υπόθεσης για την εύρεση του σημείου έναρξης και λήξης της σύζευξης των σχετικών διαγραμμάτων.
- ✓ Δημιουργία συντελεστή προσαρμογής της εργαστηριακής καμπύλης στην επιτόπου και πιλοτική επαλήθευση.

### 1. Σύζευξη επιτόπου συμπεριφοράς (τμήματα A και Y) και δείγματος τύπου R0

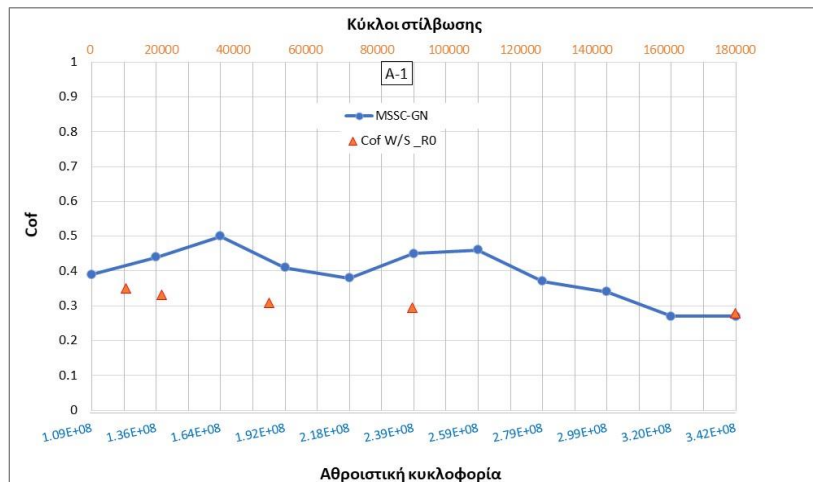


Εικόνα 7.4: Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.1α,β – Πίνακας 5.6 για το δείγμα R0

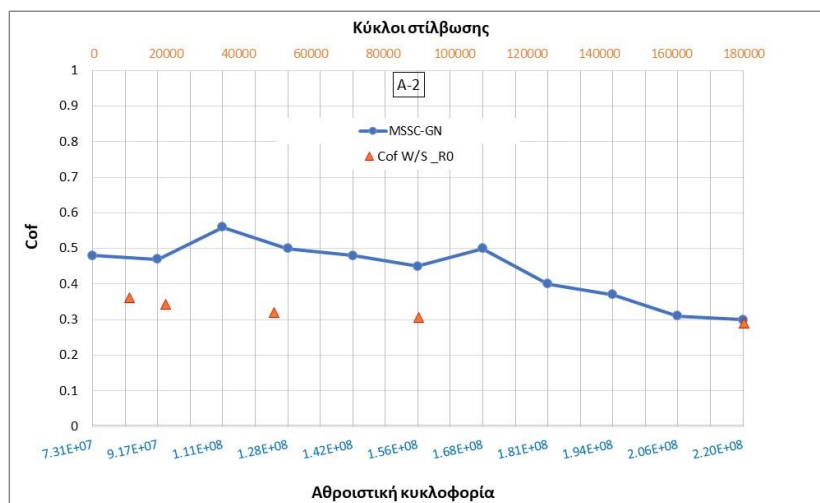
Όπως αναφέρθηκε στις υποθέσεις της παρούσας Ενότητας, για όλες τις περιπτώσεις τμημάτων θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η απομάκρυνση ασφάλτου από τα επιφανειακά αδρανή και ως εκ τούτου, μόνον ο καθοδικός κλάδος της καμπύλης στίλβωσης που προκύπτει μέσω της Εξ.1b (**Πίνακας 5.6**, κύκλοι στίλβωσης > 10000) μπορεί να αξιοποιηθεί ως σημείο έναρξης για την σύζευξη των δύο συμπεριφορών. Αυτή η υπόθεση βασίζεται στο γεγονός ότι η απομάκρυνση του ασφατικού υλικού πραγματοποιείται πολύ νωρίς αμέσως μετά τη λειτουργία του έργου για παράδειγμα από μερικές εβδομάδες έως 2 μήνες περίπου (αναλόγως της κυκλοφορίας) και για κανένα από τα υποδιερεύνηση τμήματα δεν υπήρξαν μετρήσεις πεδίου στο υπόψιν διάστημα.

Αναφορικά με το σημείο λήξης των καμπύλων στίλβωσης, για τα τμήματα A λόγω μεγάλου φόρτου κυκλοφορίας και χρόνου λειτουργίας του έργου μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η τελική τιμή για τους 180000 κύκλους στίλβωσης (end life value) συνδέεται με τα επίπεδα του δείκτη GN στα τελευταία έτη κυκλοφορίας. Αντίθετα, για την περίπτωση των τμημάτων Y, η κυκλοφορία είναι πολύ μικρότερη όπως και τα έτη λειτουργίας και κατ' επέκταση η -end life value- της καμπύλης στίλβωσης δεν συνδέεται με τα επίπεδα του δείκτη GN στα τελευταία διαθέσιμα έτη κυκλοφορίας. Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα για καθένα από τα τμήματα που διερευνήθηκαν με βάση τις παραπάνω παραδοχές.

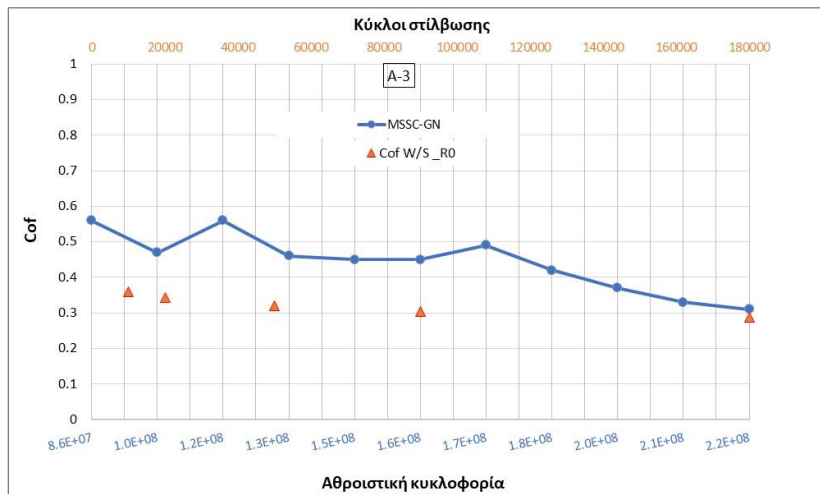




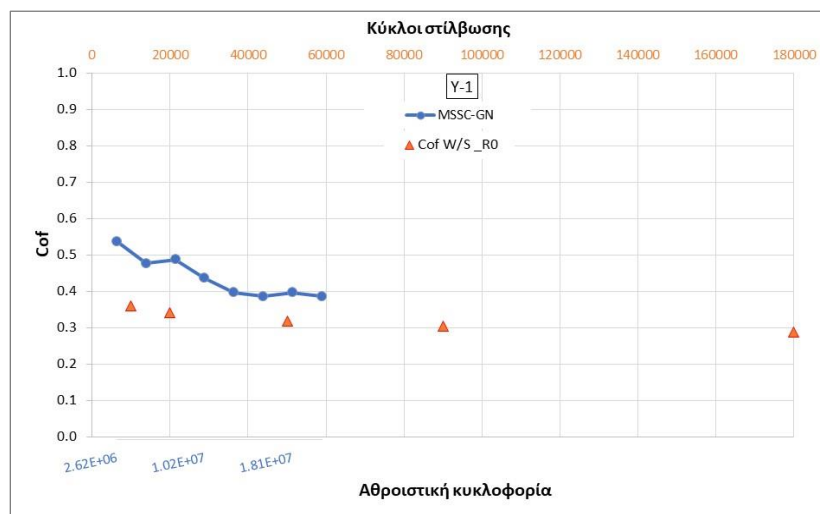
Εικόνα 7.5: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A1 & εργαστηρίου -δείγμα R0



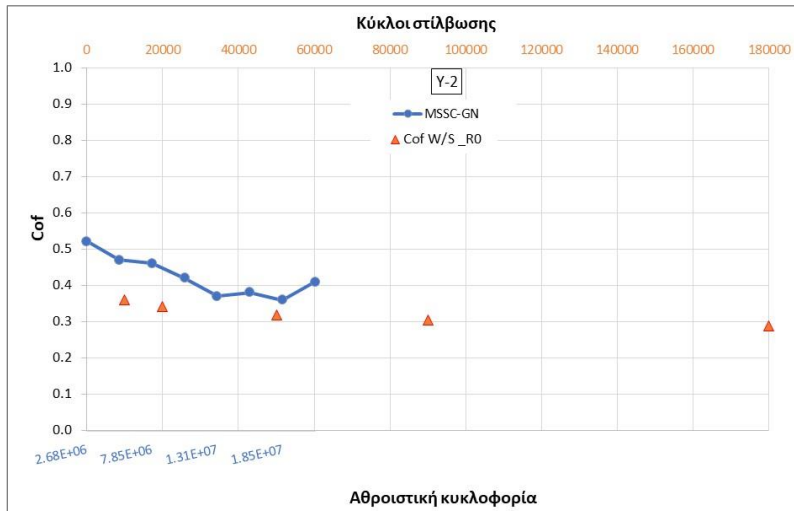
Εικόνα 7.6: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα R0



Εικόνα 7.7: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα R0



Εικόνα 7.8: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y1 & εργαστηρίου -δείγμα R0

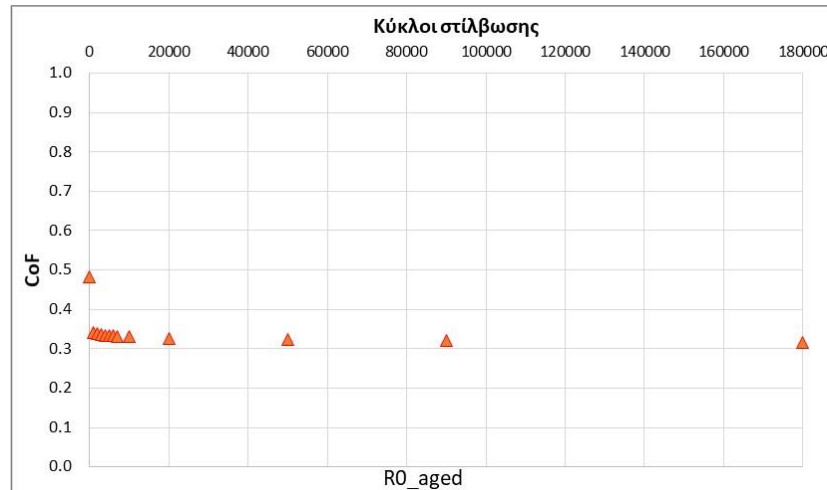


Εικόνα 7.9: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα R0



Εικόνα 7.10: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα R0

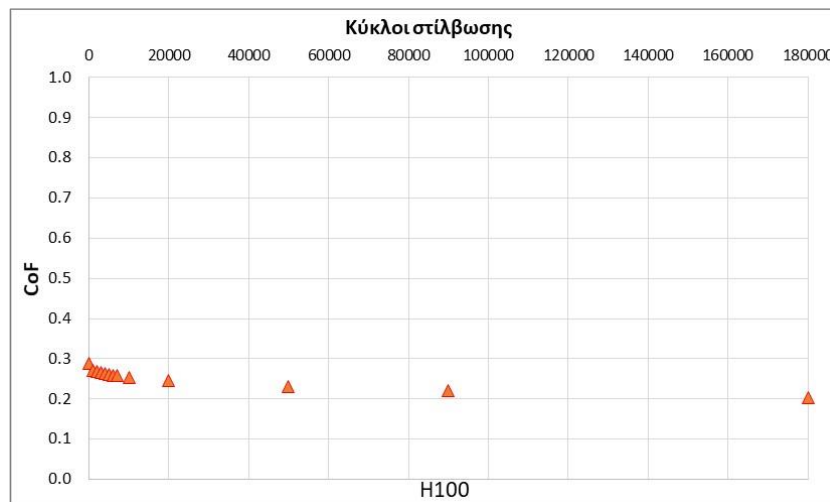
Αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση του δείγματος τύπου RO\_aged και για κύκλους στίλβωσης (polishing cycles) > 50000 ο δείκτης CoF παρουσίασε μία μικρή αύξηση της τάξεως του: 1% στους 50000 κύκλους, 5% στους 90000 και 10% στους 180000. Συνεπώς, εμφανίζεται μεγαλύτερη αντίσταση στη στίλβωση του υλικού στους τελευταίους κύκλους, αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο την αντιολισθητική ικανότητα. Στην Εικόνα 7.11 παρουσιάζεται η καμπύλη στίλβωσης για το δείγμα RO\_aged όπως προέκυψε αξιοποιώντας την Εξ. 4 του Πίνακα 5.6.



Εικόνα 7.11: Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.4 – Πίνακας 5.6 για το δείγμα RO\_aged

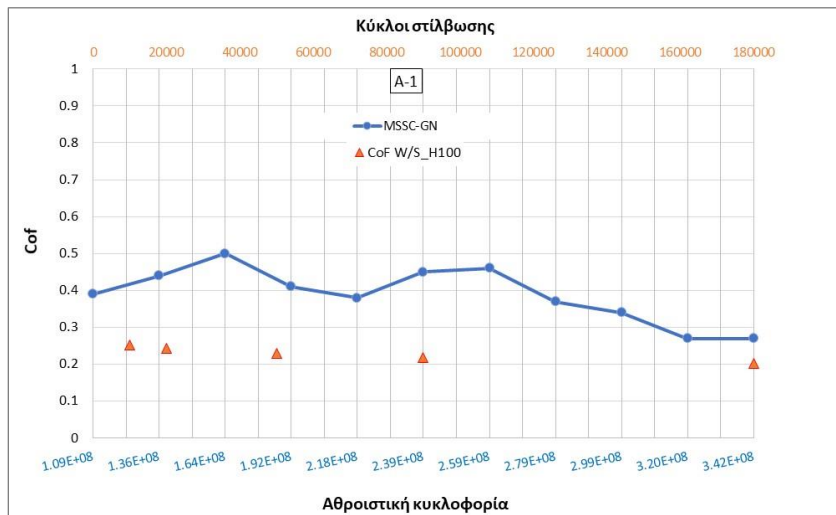
Όπως έχει επεξηγηθεί στην Ενότητα 5.5.2, στο εν λόγω δείγμα δεν υπήρξε το φαινόμενο της αποκάλυψης των αδρανών όπως συνέβη με το αντίστοιχο δείγμα που δεν υπέστη γήρανση (R0). Η αύξηση ωστόσο λόγω της γήρανσης μπορεί ενδεχομένως να συνδέεται και με την επιτόπου συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος.

## 2. Σύζευξη επιτόπου συμπεριφοράς (τμήματα Α και Υ) και δείγματος τύπου H100

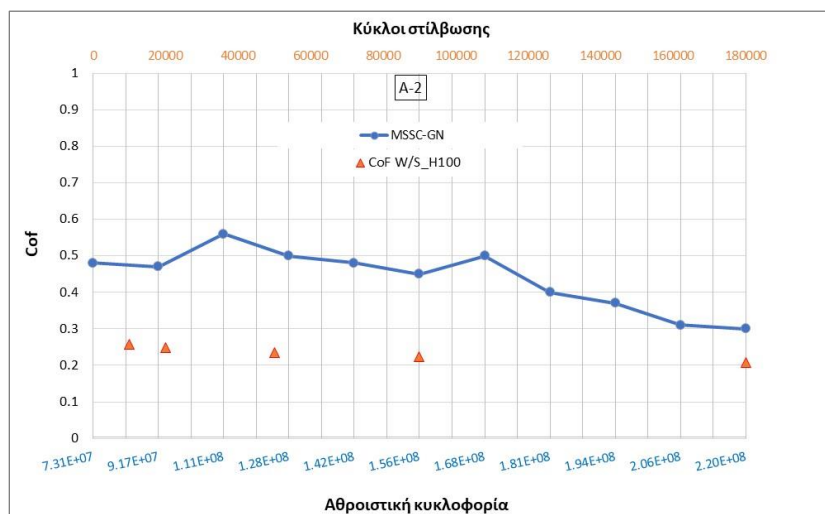


Εικόνα 7.12: Καμπύλη στίλβωσης μέσω της Εξ.7 – Πίνακας 5.6 για το δείγμα H100

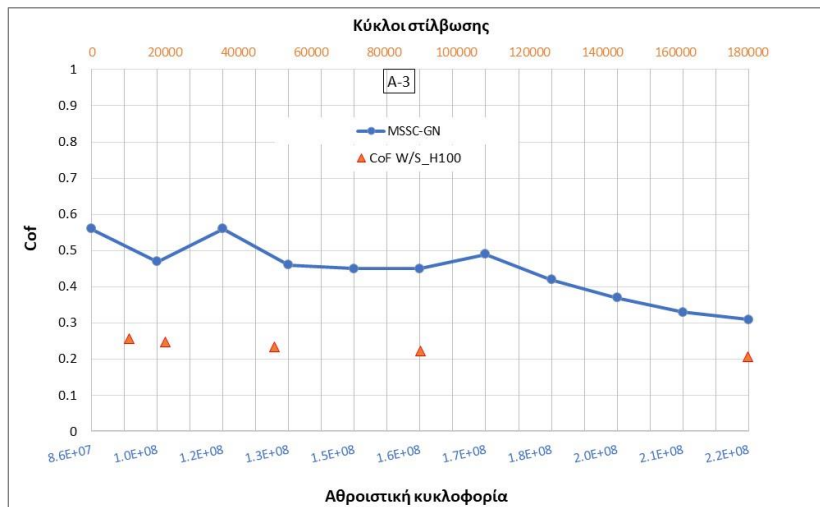
Στο δείγμα H100 δεν καταγράφηκε απομάκρυνση ασφαλτικού υλικού από τα επιφανειακά αδρανή ωστόσο, και σε αυτή τη περίπτωση αξιοποιήθηκε η καμπύλη στίλβωσης που προκύπτει μέσω της Εξ. 7 για κύκλοι στίλβωσης > 10000, δεδομένου ότι οι προηγούμενοι κύκλοι έχουν συνδεθεί όπως αναφέρθηκε νωρίτερα με την περίοδο έναρξης λειτουργίας μίας οδού. Αντίστοιχα με την περίπτωση του δείγματος R0 και στην περίπτωση του δείγματος H100 η -end life value- συνδέεται με το τελικό επίπεδο του δείκτη GN για τα τμήματα Α, όχι όμως για τα τμήματα Υ. Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα για καθένα από τα τμήματα που διερευνήθηκαν με βάση τις παραπάνω παραδοχές.



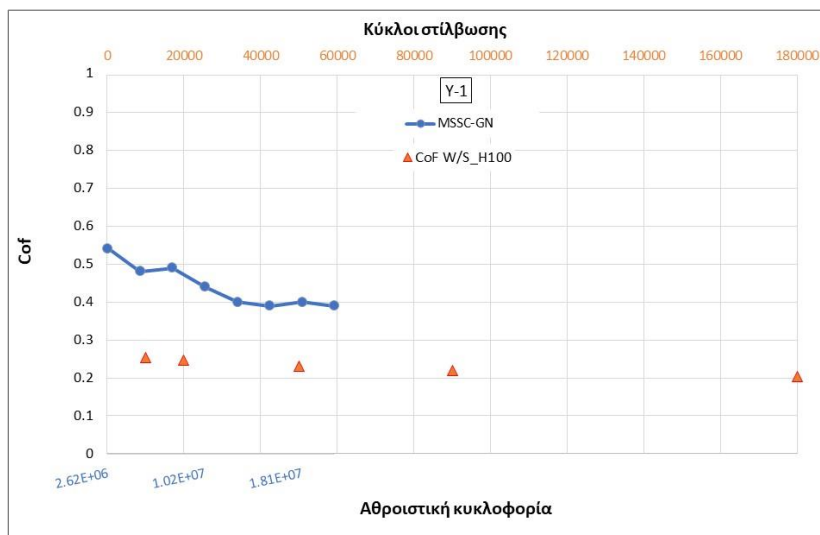
Εικόνα 7.13: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A1 & εργαστηρίου -δείγμα H100



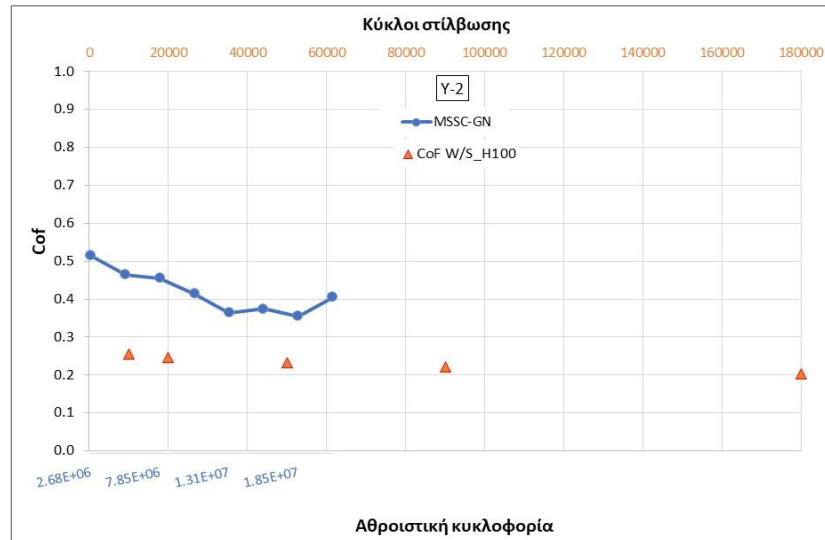
Εικόνα 7.14: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα H100



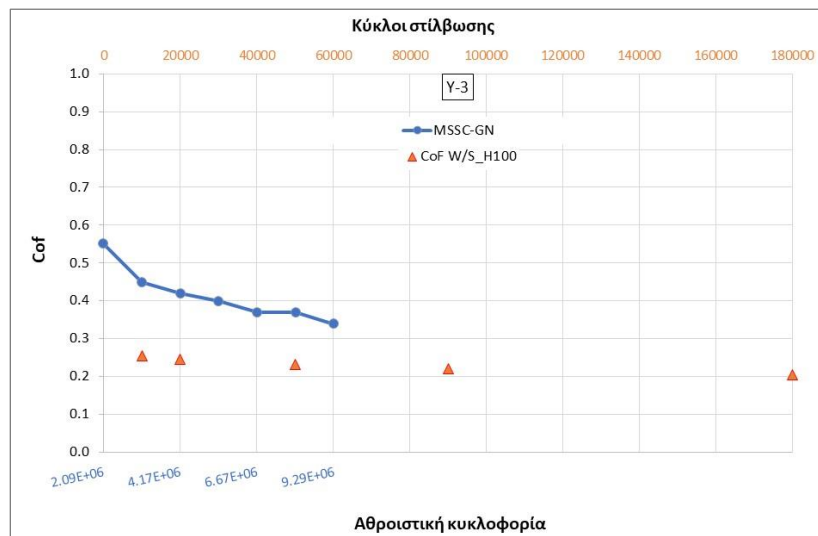
Εικόνα 7.15: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα H100



Εικόνα 7.16: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y1 & εργαστηρίου -δείγμα H100



Εικόνα 7.17: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα H100

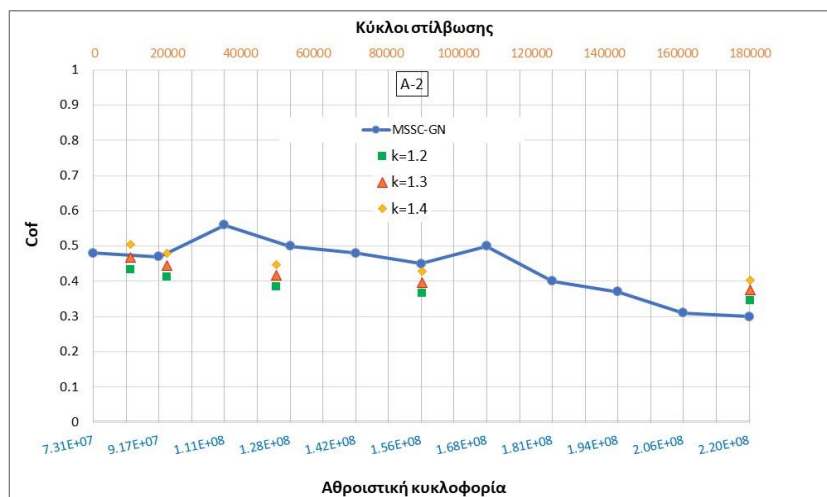


Εικόνα 7.18: Σύζευξη καμπύλων στίλβωσης, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα H100

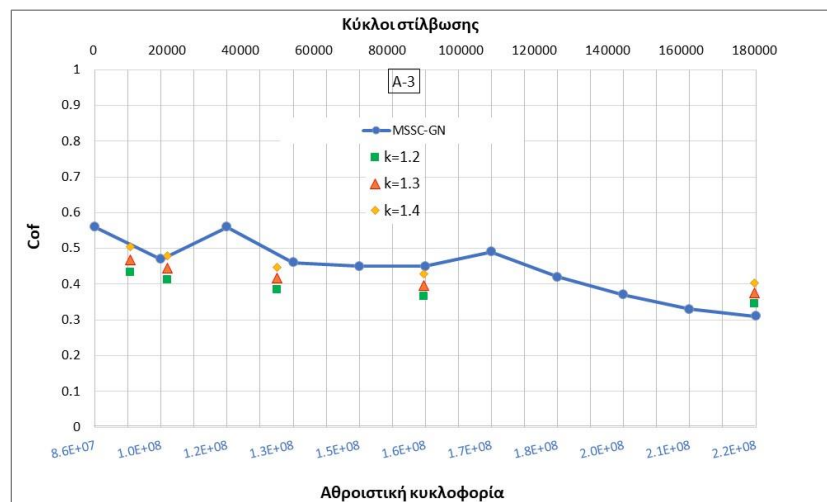
Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω διαγράμματα σύζευξης παρατηρήθηκε η δυνατότητα δημιουργίας ενός συντελεστή προσαρμογής των δύο καμπυλών καθώς εμφανίζουν ποιοτικά ομοιόμορφη τάση. Στην ουσία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η δυνατότητα δημιουργίας ενός συντελεστή προσαρμογής - μετατόπισης (συγκεκριμένα προσαύξησης) της εργαστηριακής καμπύλης στίλβωσης με την επιτόπου. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν δύο τμήματα από κάθε κατηγορία τμημάτων A και Y και οι πιθανοί συντελεστές σημειώθηκαν με το συμβολισμό “k” για την προσαρμογή των καμπύλων στίλβωσης R0 και H100. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί πως η δημιουργία του ο εν λόγω συντελεστή έχει στόχο να προσδώσει μία εκτίμηση της επιτόπου συμπεριφοράς (πιλοτικά) χωρίς αυτό να συνεπάγεται με δυνατότητα υπολογισμού, καθώς ισχύει ο αρχικός περιορισμός της διαφοροποίησης των συστημάτων μέτρησης (GripTester – W/S).



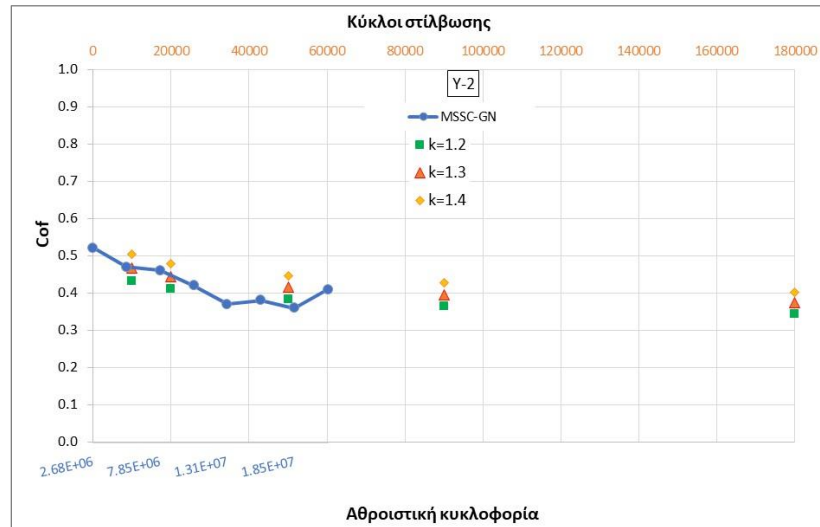
**1α. Προσαρμογή καμπύλης στίλβωσης R0 για  $k = 1.2, 1.3, 1.4$  στα τμήματα A2, A3, Y2 και Y3**



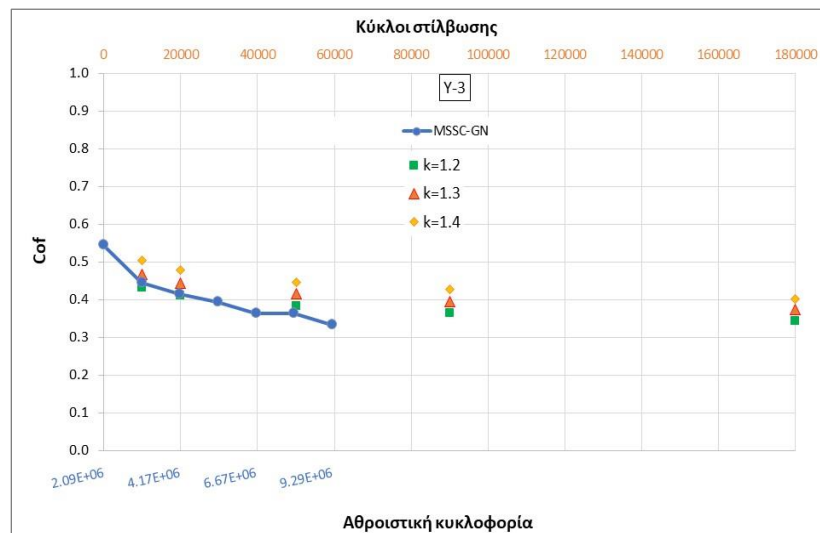
**Εικόνα 7.19:** Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα R0



**Εικόνα 7.20:** Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα R0



Εικόνα 7.21: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα R0



Εικόνα 7.22: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα R0

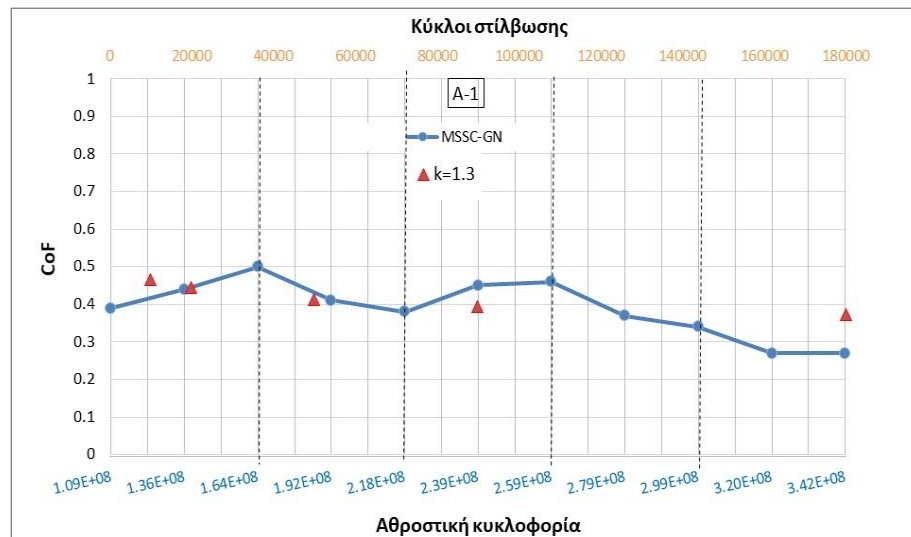
Από τα παραπάνω διαγράμματα εμφανίζεται ο συντελεστής  $k=1.3$ , ως πιο αντιπροσωπευτικός και για τις τέσσερις περιπτώσεις τμημάτων.

### 1β. Πιλοτική επαλήθευση καμπύλης στίλβωσης R0 – τμήματα A1 και Y1 για $k = 1.3$

Η επιλογή του συγκεκριμένου συντελεστή ωστόσο κρίνεται σημαντικό να επαληθευτεί έστω πιλοτικά αξιοποιώντας τα δεδομένα των τμημάτων A1 και Y1. Δεδομένου όμως του διαφορετικού πλήθους στοιχείων των δειγμάτων εργαστηρίου-επιτόπου, επιλέχθηκε η μέθοδος CUSUM για το διαχωρισμό της καμπύλης των επιτόπου στοιχείων σε ομογενείς ζώνες τιμών GN ώστε, η χαρακτηριστική τιμή εντός της κάθε ζώνης (μέση τιμή) να αντιστοιχηθεί με τις τιμές CoF της εργαστηριακής καμπύλης στίλβωσης. Η Εικόνα 7.23 παρουσιάζει τον διαχωρισμό των ζωνών για το τμήμα A1.



Εικόνα 7.23: Διαχωρισμός ζωνών με τη μέθοδο CUSUM για το τμήμα A1



Εικόνα 7.24: Ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα R0

Ο Πίνακας 7.1 περιέχει τα ζεύγη χαρακτηριστικών τιμών για κάθε μία από τις 5 ζώνες των καμπύλων στίλβωσης.

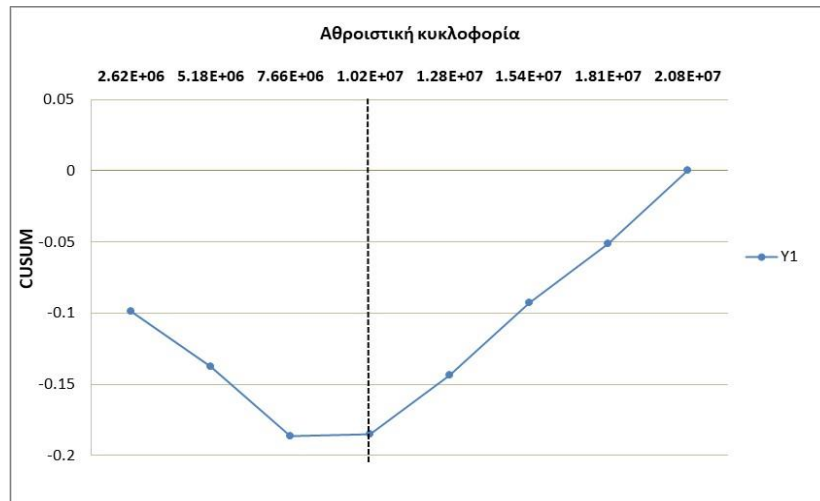
Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικές τιμές GN & CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και δείγμα R0

R0	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5
Επιτόπου (GN)	0,44	0,40	0,46	0,36	0,27
Εργαστήριο (CoF) για k = 1.3	0,46	0,42	0,40	-	0,37

Έτσι, κατά την προκαταρκτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής προσαρμογής  $k = 1.3$  δημιουργεί ένα δείγμα τιμών αρκετά κοντά στις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο, πλην της Ζώνης 5. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η σύνδεση της εργαστηριακής end life

value με την επιτόπου τελική τιμή για τα τμήματα Α αποτελεί υπόθεση της συγκεκριμένης ενότητας που ενδεχομένως να μην είναι ορθή.

Ομοίως, η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για το τμήμα Y1. Ακολουθούν τα σχετικά διαγράμματα και οι σχολιασμοί.



Εικόνα 7.25: Διαχωρισμός ζωνών με τη μέθοδο CUSUM για το τμήμα Y1



Εικόνα 7.26: Ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου - δείγμα R0

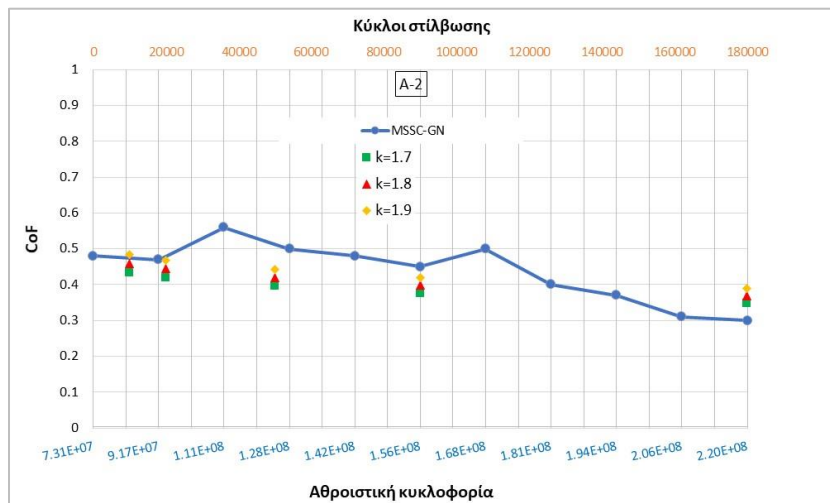
Ο Πίνακας 7.2 περιέχει τα ζεύγη χαρακτηριστικών τιμών (μέσων τιμών) για τις 2 ζώνες των καμπύλων στίλβωσης.

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικές τιμές GN & CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και δείγμα R0

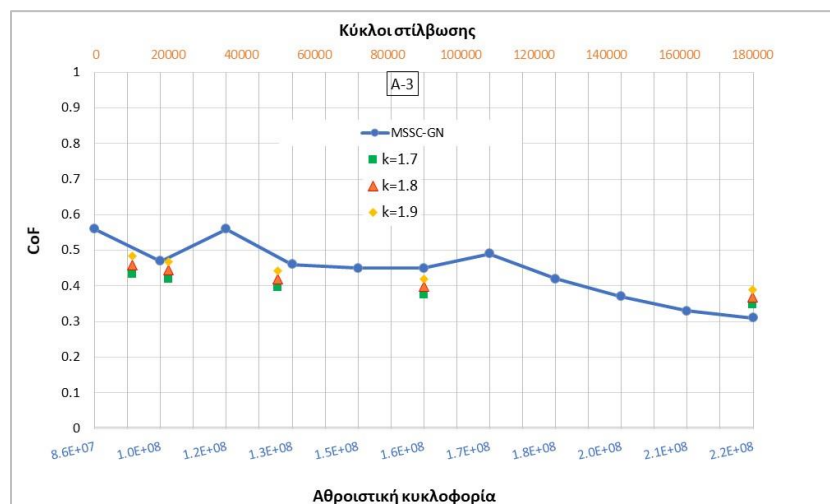
R0	Ζώνη 1	Ζώνη 2
Επιτόπου (GN)	0,50	0,43
Εργαστήριο (CoF) για k = 1.3	0,47	0,40

Συνεπώς και για το τμήμα Υ3, κατά την προκαταρκτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής προσαρμογής  $k = 1.3$  δημιουργεί ένα δείγμα τιμών αρκετά κοντά στις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο.

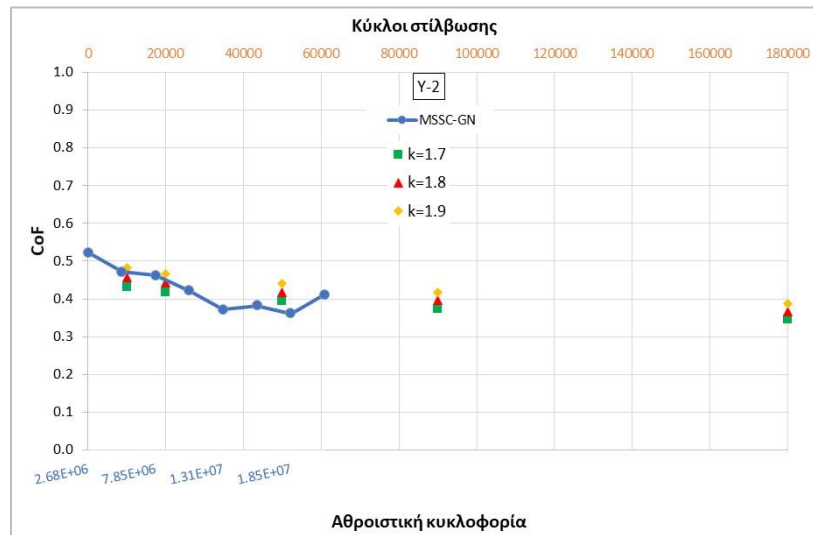
## 2α. Προσαρμογή καμπύλης στίλβωσης H100 για $k = 1.7, 1.8, 1.9$ στα τμήματα A2, A3, Υ2 και Υ3



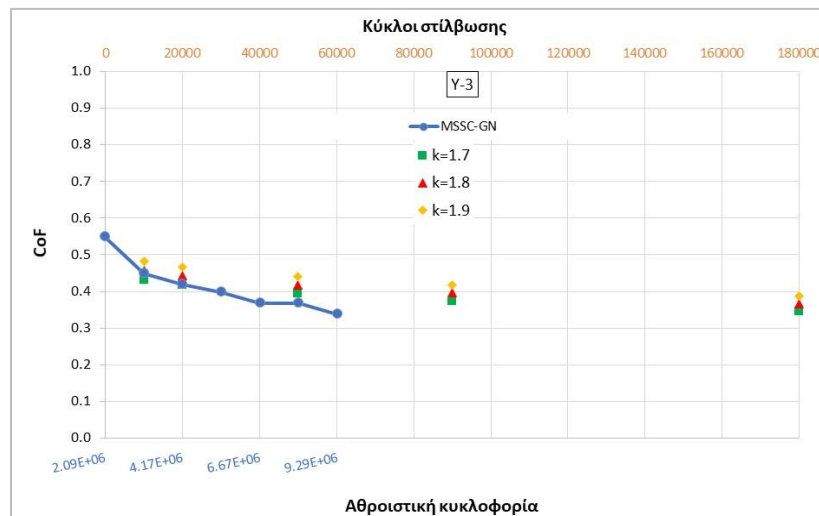
Εικόνα 7.27: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A2 & εργαστηρίου -δείγμα H100



Εικόνα 7.28: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα A3 & εργαστηρίου -δείγμα H100



Εικόνα 7.29: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y2 & εργαστηρίου -δείγμα H100

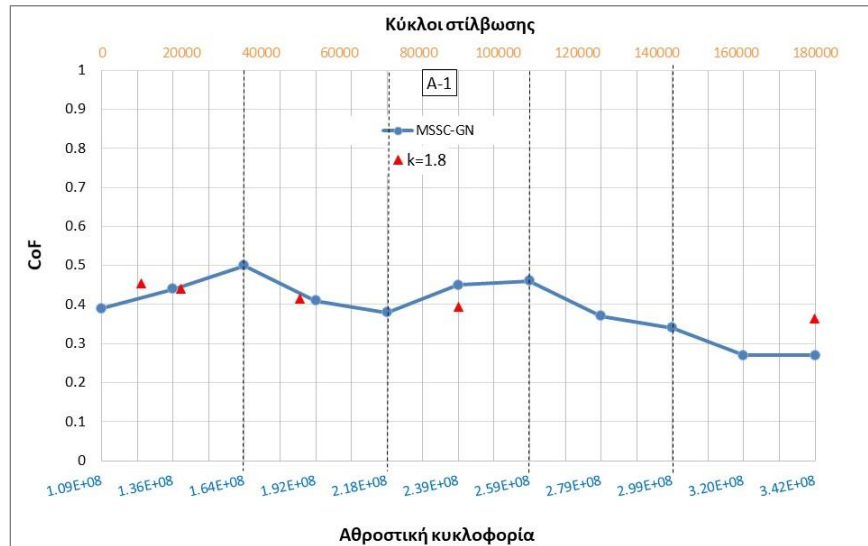


Εικόνα 7.30: Συντελεστές προσαρμογής, επιτόπου στοιχεία -τμήμα Y3 & εργαστηρίου -δείγμα H100

Από τα παραπάνω διαγράμματα εμφανίζεται ο συντελεστής  $k=1.8$ , ως πιο αντιπροσωπευτικός και για τις τέσσερις περιπτώσεις τμημάτων.

## 2β. Πιλοτική επαλήθευση καμπύλης στίλβωσης H100 – τμήματα A1 και Y1 για $k = 1.8$

Ομοίως, με την περίπτωση του δείγματος R0 η επιλογή του συντελεστή προσαρμογής  $k=1.8$  θα επαληθευτεί πιλοτικά αξιοποιώντας τα δεδομένα των τμημάτων A1 και Y1. Ο διαχωρισμός των ομογενών ζωνών για τα τμήματα A1 και Y1 εμφανίζεται στις Εικόνες 7.23 και 7.25 αντίστοιχα, με βάση τον διαχωρισμό CUSUM που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Ακολουθούν οι Εικόνες 7.31 και 7.32 που εμφανίζουν το διαχωρισμό ομογενών ζωνών επί της σύζευξης των καμπύλων στίλβωσης.



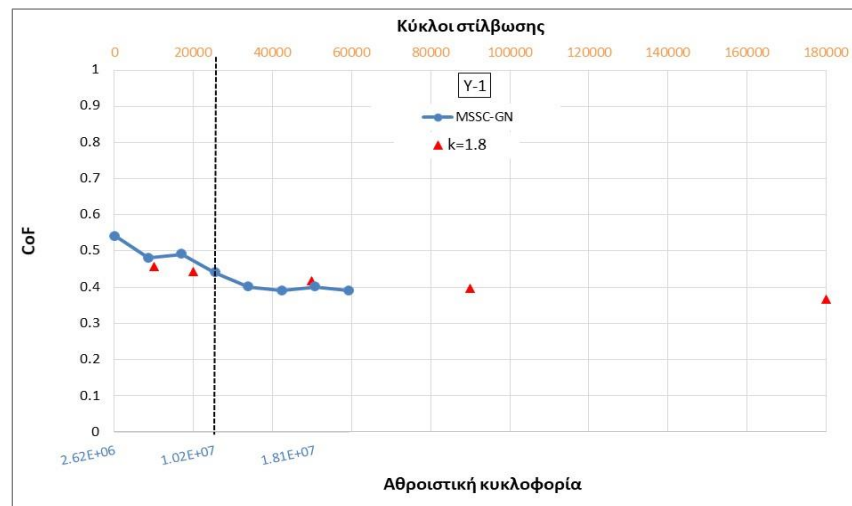
Εικόνα 7.31: Ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα H100

Ο Πίνακας 7.3 περιέχει τα ζεύγη χαρακτηριστικών τιμών για κάθε μία από τις 5 ζώνες των καμπύλων στίλβωσης για το τμήμα A1.

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικές τιμές CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα A1 και δείγμα H100

H100	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5
Επιτόπου (GN)	0,44	0,40	0,46	0,36	0,27
Εργαστήριο (CoF) για $k = 1.8$	0,45	0,42	0,40		0,37

Η προκαταρκτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε με συντελεστή προσαρμογής  $k = 1.8$  δημιουργεί ένα δείγμα τιμών αρκετά κοντά στις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο κυρίως για τις Ζώνες 1 και 2. Το τμήμα Y1 φαίνεται στην Εικόνα 7.32.



Εικόνα 7.32: Ομογενείς ζώνες για το τμήμα Y1 και σύζευξη με στοιχεία εργαστηρίου -δείγμα H100



Ο Πίνακας 7.4 περιέχει τα ζεύγη χαρακτηριστικών τιμών για κάθε μία από τις δύο ζώνες των καμπύλων στίλβωσης για το τμήμα Υ1, όπου διαφαίνεται ότι κυρίως στη Ζώνη 2 τα δύο δείγματα είναι αρκετά κοντά.

**Πίνακας 7.4:** Χαρακτηριστικές τιμές CoF στις ομογενείς ζώνες για το τμήμα Υ1 και δείγμα Η100

<b>H100</b>	<b>Ζώνη 1</b>	<b>Ζώνη 2</b>
<b>Επιτόπου (GN)</b>	0,50	0,40
<b>Εργαστήριο (CoF) για k = 1.8</b>	0,45	0,42

Συνολικά, παρατηρείται ότι οι προτεινόμενοι δοκιμαστικοί συντελεστές προσαρμογής για τις καμπύλες στίλβωσης των δύο τύπων ασφαλτομιγμάτων οδηγούν στη δημιουργία νέων θεωρητικών καμπύλων στίλβωσης που συγκλίνουν με τις πραγματικές από τα επιτόπου στοιχεία, έστω σε πιλοτικό επίπεδο διερεύνησης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις ομογενών ζωνών παρατηρήθηκε μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας, όπως περιγράφονται από τις δύο καμπύλες. Εστιάζοντας στη μορφή των καμπυλών μπορεί να ειπωθεί ότι πιθανώς η προκαταρκτική θεώρηση για την αντιστοίχιση των τιμών έναρξης ή/και των -end life values- (CoF μέσω W/S) στις επιτόπου τιμές (GN) ενδεχομένως να χρειάζεται περαιτέρω προσαρμογή, ώστε οι αποκλίσεις μεταξύ των ζωνών να περιοριστούν. Συνεπώς, η παρασκευή και η εξέταση περισσότερων δειγμάτων μέσω της διαδικασίας στίλβωσης με την συσκευή W/S και η μέτρηση του συντελεστή CoF ανά μικρότερα διαστήματα κύκλων στίλβωσης μετά τους 20000 κύκλους, θα μπορούσε ενδεχομένως να βοηθήσει στη δημιουργία ακριβέστερης προσέγγισης για την αντιστοίχιση του συντελεστή CoF με τον δείκτη GN που αφορά στο επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας στο πεδίο (συναρτήσει της αθροιστικής κυκλοφορίας).

## 8 Σύνοψη

### 8.1 Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα έρευνας

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας ανά ερευνητική ενότητα παρουσιάζονται ακολούθως.

#### 8.1.1 Ανασκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, προέκυψαν οι εξής βασικές επισημάνσεις – παρατηρήσεις:

- Υποστηρίζεται πλέον σε παγκόσμιο επίπεδο η ολοένα και αυξανόμενη χρήση εναλλακτικών και βιώσιμων υλικών στα οδοστρώματα, τόσο στις ενδιάμεσες στρώσεις (βάση-υπόβαση), όσο και στις ανώτερες στρώσεις (ασφαλτικές στρώσεις). Αναφορικά με τις ασφαλτικές στρώσεις, προέκυψε ότι η πλειονότητα των συναφών ερευνών και εφαρμογών για χρήση μη συμβατικών υλικών (βιώσιμων) στα ασφαλτομίγματα, επικεντρώνεται κυρίως σε θέματα μηχανικής και χημικής συμπεριφοράς (πχ ζητήματα αλληλεπίδρασης των επιμέρους υλικών των μιγμάτων, φαινόμενο γήρανσης, κ.α.), καθώς και σε θέματα δομικής συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, όπως μεταξύ άλλων αναφέρονται η αντίσταση σε ρηγμάτωση, τροχοαυλάκωση κ.α.
- Αντίθετα, η έρευνα όσον αφορά στα επιφανειακά χαρακτηριστικά ασφαλτικών στρώσεων από βιώσιμα υλικά φαίνεται να είναι περιορισμένη, ενώ τα έως τώρα ευρήματα σχετικά με την αντιολισθητική ικανότητα προέκυψαν διφορούμενα, καθώς άλλοτε επισημαίνεται θετική κι άλλοτε αρνητική συνεισφορά στο παρεχόμενο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση και ανεξάρτητα από το είδος των χρησιμοποιούμενων υλικών, έγινε σαφής η σπουδαιότητα διερεύνησης της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων, λόγω της άμεσης σύνδεσής της με τα οδικά ατυχήματα/συμβάντα και της ευρύτερης συμβολής στα θέματα οδικής ασφάλειας μιας οδού. Κατά συνέπεια, αναδείχθηκε ως μείζονος σημασίας ο σωστός σχεδιασμός της ανώτερης στρώσης (αντιολισθητής) στα ασφαλτικά οδοστρώματα, ιδίως για τις περιπτώσεις ενσωμάτωσης καινούργιων υλικών, των οποίων η συμπεριφορά αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα των ασφαλτομιγμάτων είναι σε γενικές γραμμές άγνωστη.
- Όσον αφορά στην αξιολόγηση των επιπέδων της αντιολισθητικής ικανότητας μιας οδού, επισημάνθηκε το σύνολο των παραγόντων που επιδρούν σε αυτήν (κυκλοφορία, χαρακτηριστικά μιγμάτων, καιρικές συνθήκες) και τονίστηκε ως εξαιρετικά δύσκολη τόσο η ποσοτικοποίηση της μεταβολής της εξαιτίας των επιμέρους παραγόντων, όσο και η πρόβλεψη των επιπέδων της. Διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των υλικών και μιγμάτων, καθώς και στις συνθήκες που απαντώνται επιτόπου στα οδικά έργα, δυσχεραίνουν ανά την υφήλιο μια συντεταγμένη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας.
- Επιπλέον, υπογραμμίστηκε η αλληλεπίδραση της αντιολισθητικής ικανότητας με τις συνιστώσες της, τη μικροϋφή και τη μακροϋφή. Η αλληλεπίδραση αυτή εμφανίστηκε να είναι έκδηλη καθ' όλη της διάρκεια ζωής ενός υφιστάμενου οδοστρώματος, στοιχείο το οποίο έχει τροφοδοτήσει πληθώρα διεθνών πειραματικών ερευνών και αριθμητικών προσομοιώσεων της συμπεριφοράς του οδοστρώματος αναφορικά με τη σύνδεση αυτών των χαρακτηριστικών. Επιπροσθέτως, επισημάνθηκε

ως συχνό φαινόμενο, η απόπειρα ανάπτυξης μεθόδων και μεθοδολογιών εκτίμησης της αντιολισθητικής ικανότητας οδοστρωμάτων μέσω στοιχείων μακροϋφής, λόγω της ευκολίας, της πρακτικότητας, αλλά και της αξιοπιστίας στη συλλογή των στοιχείων αυτών. Παρά ταύτα, προέκυψε ότι συχνά η πρακτική αυτή τυγχάνει κριτικής και αμφισβήτησης, στοιχείο το οποίο τροφοδότησε συναφή διερεύνηση στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

- Ως προς τις δυνατότητες μέτρησης της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου, αναδείχθηκε η πληθώρα των διαθέσιμων μεθόδων και συναφών συστημάτων. Εντοπίστηκαν δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων, ήτοι συστήματα στατικών και συνεχών μετρήσεων. Τα συστήματα διαφοροποιούνται επίσης και ως προς την τεχνική μέτρησης του συντελεστή τριβής, γεγονός που δυσχεραίνει την ύπαρξη ενός ενιαίου συστήματος μετρήσεων για την αξιολόγηση της αντιολισθητικής ικανότητας, παρά τις όποιες προσπάθειες εναρμόνισης. Υπό το πρίσμα αυτό, το ζήτημα εναρμόνισης μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας που προκύπτει όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα ή όταν γίνεται προσπάθεια μετάβασης από ένα σύστημα μετρήσεων σε κάποιο άλλο παραμένει «ανοικτό». Τέλος, σημειώθηκε η εκτενής εμπειρία, μέσω της βιβλιογραφίας, αναφορικά με τη συναφή πρακτική και χρήση του συστήματος συνεχών μετρήσεων GripTetser, σύστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των προς διερεύνηση στοιχείων που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.
- Αναφορικά με την εργαστηριακή εκτίμηση των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας, προέκυψε περιορισμένος αριθμός συστημάτων που έχουν αξιοποιηθεί εκτενώς σε έρευνες. Ιδιαίτερα δημοφιλές αναδείχθηκε το σύστημα του Βρετανικού εκκρεμούς – British Pendulum Tester (BPT), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πεδίο. Παρά ταύτα, το υπόψη σύστημα έχει συνδεθεί περισσότερο με την εκτίμηση των επιπέδων μικροϋφής των ασφαλτομιγμάτων. Ως εξειδικευμένο σύστημα αξιολόγησης της συμπεριφοράς δοκιμών ασφαλτομιγμάτων και αδρανών έναντι ολίσθησης αναδείχθηκε η πρωτοποριακή συσκευή Wehner-Schulze (W/S), η οποία προσομοιώνει σε κλίμακα εργαστηρίου την κυκλοφοριακή φόρτιση μέσω της επιβολής πεπερασμένων κύκλων στίλβωσης κι επιπλέον μετρά τον συντελεστή τριβής στα επιμέρους στάδια των κύκλων φόρτισης. Παρά την ύπαρξη επιπρόσθετων συσκευών επιβολής στίλβωσης, η χρήση της W/S είναι προτυποποιημένη εξασφαλίζοντας επαναληψιμότητα και ευχέρεια σύγκρισης των παραγόμενων αποτελεσμάτων, όπως αποδεικνύεται από τις συναφείς έρευνες παγκοσμίως.

### *8.1.2 Διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες εργαστηρίου (κλίμακα εργαστηρίου)*

Προκειμένου να διερευνηθεί εργαστηριακά η αντιολισθητική ικανότητα (κλίμακα εργαστηρίου), παρασκευάστηκαν δοκιμαστικές πλάκες από συμβατικά και μη συμβατικά ασφαλτομίγματα. Στην περίπτωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων χρησιμοποιήθηκε ασφαλτικό σκυρόδεμα (Hot Mix Asphalt, HMA), ενώ για τα μη συμβατικά (βιώσιμα) ασφαλτομίγματα πραγματοποιήθηκε ανάμειξη υλικού HMA με επαναχρησιμοποιούμενο-ανακτώμενο ασφαλτόμιγμα (RAP) ή τρίμματα από ανακυκλωμένο ελαστικό (RAR). Η ανάμειξη των υλικών έγινε σε διάφορα ποσοστά, προκειμένου να προκύψουν συνθέσεις τόσο ανοικτού όσο και ημιανοικτού τύπου. Επίσης, σημειώνεται ότι εκτός της σύνθεσης παρθένου HMA υλικού στο εργαστήριο, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον HMA υλικό που συλλέχθηκε κατά τη διαδικασία επιτόπου διάστρωσης στο πεδίο. Από την επιμέρους εργαστηριακή διερεύνηση της μακροϋφής, της εποχιακής διακύμανσης της αντιολισθητικής ικανότητας και της επίδρασης της κυκλοφορίας διαμορφώθηκαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις.

- Αναφορικά με τη συμπύκνωση των μιγμάτων που περιείχαν RAR, διαπιστώθηκε ότι ο δείκτης BPN (σύστημα του Βρετανικού εκκρεμούς) ήταν υψηλότερος στα σημεία περιμετρικά της δοκιμαστικής πλάκας αντί του κέντρου. Το στοιχείο αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στη διαδικασία συμπύκνωσης των ασφαλτομιγμάτων μέσω κυλίνδρου, που οδήγησε σε συσσώρευση του υλικού RAR, κυρίως στο κέντρο της πλάκας και κατ' επέκταση, σε διαφοροποίηση των επιπέδων BPN.
- Η μακροϋφή (που μετρήθηκε με τη μέθοδο της κηλίδας άμμου – δείκτης MTD) βρέθηκε κατά βάση υψηλότερη στα δείγματα ανοιχτού τύπου από τα ημιανοικτού τύπου, αποτέλεσμα το οποίο αναμενόταν λόγω της καθοριστικής συμβολής του ποσοστού των κενών αέρος στο επίπεδο μακροϋφής. Ωστόσο, η προσθήκη λεπτόκοκκου RAP υλικού στα δείγματα ημιανοικτού τύπου εμφανίστηκε να επιδρά θετικά στο επίπεδο μακροϋφής, παρά το χαμηλό ποσοστό κενών των συγκεκριμένων δειγμάτων. Σημειώνεται ότι η διερεύνηση των επιπέδων μακροϋφής είναι ιδιαίτερα σημαντική και για την περίπτωση νέων οδοστρωμάτων, με εξέχουσα την ανάγκη καταγραφής της κατάστασης «μηδέν» στο πλαίσιο παραλαβής ενός νέου οδοστρώματος. Επομένως, η μέτρηση της μακροϋφής στο εργαστήριο δύναται να παράσχει χρήσιμη προγενέστερη πληροφόρηση, τόσο για συμβατικά όσο και για μη συμβατικά - βιώσιμα ασφαλτομίγματα.
- Σχετικά με την προσομοίωση των καιρικών μεταβολών σε συνθήκες εργαστηρίου, σχεδιάστηκε και ακολουθήθηκε ένα πρωτόκολλο προσομοίωσης σύμφωνα με συναφείς έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας και ο συντελεστής τριβής μετρήθηκε με το σύστημα του Βρετανικού εκκρεμούς (BPT). Η προσομοίωση των καιρικών συνθηκών αφορούσε (α) σε μεταβολές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των πλακών, και (β) σε μεταβολές των συνθηκών της επιφάνειας των πλακών υπό σταθερή θερμοκρασία, και συγκεκριμένα: (β1) καθαρή και στεγνή επιφάνεια, (β2) βροχοπτώσεις σε καθαρή επιφάνεια, (β3) βροχοπτώσεις σε υγρή και σκονισμένη επιφάνεια και (β4) υγρή επιφάνεια έπειτα από βροχόπτωση.
  - ο Ως προς την περίπτωση (α), παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί εν γένει σε πτώση των επιπέδων αντιολισθητικής ικανότητας. Τα βιώσιμα ασφαλτομίγματα εμφάνισαν ισοδύναμη ή και οριακά καλύτερη συμπεριφορά (ιδίως στις χαμηλότερες θερμοκρασίες) έναντι ολίσθησης σε σύγκριση με τα συμβατικά ασφαλτομίγματα, λαμβάνοντας υπόψη όλο το φάσμα θερμοκρασιών που προσομοιάστηκε (10-30°C). Οι παρατηρούμενες διαφορές στους δείκτες BPN των διαφορετικών υλικών στις χαμηλές θερμοκρασίες, ενδεχομένως να οφείλονται στην ιξωδοελαστική φύση τόσο του πέλματος του συστήματος BPT όσο και των ασφαλτομιγμάτων, τα οποία συμπεριφέρονται περισσότερο ελαστικά στις θερμοκρασίες αυτές. Κατά συνέπεια, η διαφοροποίηση των συστατικών του μίγματος εμφανίζεται να έχει εντονότερη επίδραση στο παρεχόμενο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας στις χαμηλές θερμοκρασίες, στοιχείο που μπορεί να είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο για το σχεδιασμό μιγμάτων σε περιοχές με ήπιο ή και ψυχρό κλίμα. Τονίζεται ότι η αδυναμία προσομοίωσης στο εργαστήριο θερμοκρασιών εκτός του φάσματος που προαναφέρθηκε (δηλαδή <10°C και >30°C), αποτελεί έναν περιορισμό στην περαιτέρω διερεύνηση των θερμοκρασιακών μεταβολών σε κλίμακα εργαστηρίου.
  - ο Ως προς την περίπτωση (β), η ύπαρξη στεγνής και καθαρής επιφάνειας (περίπτωση β1) αποδείχθηκε προφανώς ευμενέστερη ανεξάρτητα από τον τύπο σύνθεσης. Η συμπεριφορά έναντι προσθήκης νερού (περιπτώσεις β2 και β3) παρουσίασε σημαντική ευαισθησία στην ογκομετρική σύσταση των μιγμάτων, χωρίς ωστόσο τα συστατικά των μιγμάτων να προκαλούν σημαντική διαφοροποίηση. Κατά συνέπεια, το ποσοστό των κενών εμφανίστηκε

- ως καθοριστικότερη παράμετρος συγκριτικά με τα συστατικά των μιγμάτων για τη διαφοροποίηση της αντιολισθητικής ικανότητας έναντι μεταβολής των συνθηκών στην επιφάνεια των δοκιμαστικών πλακών.
- Επισημαίνεται ότι παρά τους αναπόφευκτους περιορισμούς που συναντώνται σε μία εργαστηριακή προσομοίωση καιρικών συνθηκών (π.χ. θερμοκρασίες και ποσότητα νερού από βροχοπτώσεις), τα ευρήματα του συγκεκριμένου σκέλους της διερεύνησης ήταν ενθαρρυντικά δεδομένου ότι η προσθήκη των βιώσιμων υλικών δεν οδήγησε σε ουσιώδη διαφοροποίηση. Συνολικά, εκτιμάται ότι η παρατήρηση της συμπεριφοράς των υλικών στο εργαστήριο, μπορεί να δράσει επικουρικά και ως προπομπός σε θέματα επιλογής συμβατικών και ευρύτερα εναλλακτικών υλικών για χρήση τους στο πεδίο. Η περαιτέρω παρακολούθηση της συμπεριφοράς των υλικών στο πεδίο μέσω πιλοτικών τμημάτων θα ήταν επίσης χρήσιμη για την ενίσχυση των εργαστηριακών ευρημάτων.
  - Η προσομοίωση κυκλοφοριακών διελεύσεων σε συνθήκες εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε βάσει του πρωτοκόλλου στίλβωσης με τη συσκευή W/S σε συνεργασία με το Γαλλικό Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας για τις Μεταφορές, την Ανάπτυξη και τα Δίκτυα – IFSTTAR του Πανεπιστημίου Gustave Eiffel. Με βάση την προτυποποιημένη διαδικασία, εφαρμόστηκαν πεπερασμένοι κύκλοι στίλβωσης και μετρήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές τριβής για μίγματα αποτελούμενα από: (α) εργαστηριακής σύνθεσης HMA και RAR σε ποσοστά 0, 10 και 20%, και (β) επιτόπου σύνθεσης HMA και RAP σε ποσοστά 0, 12, 15 και 30%. Λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη γήρανση που υφίστανται τα μίγματα που περιέχουν RAR, για τα υλικά της κατηγορίας (α) παρασκευάστηκαν τρία επιπλέον δείγματα (ένα ανά σύνθεση), τα οποία τοποθετήθηκαν σε εξωτερικό χώρο για να διαπιστωθούν τυχόν διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά έναντι στίλβωσης εξαιτίας της επίδρασης της φυσικής γήρανσης που υπέστησαν τα επιπλέον δείγματα λόγω της έκθεσης τους σε συνθήκες περιβάλλοντος. Διαμορφώθηκαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις - συμπεράσματα:
    - Η προσθήκη RAR υλικού στο ασφαλτόμιγμα εργαστηριακής σύνθεσης HMA οδήγησε σε μείωση του συντελεστή τριβής και κατ' επέκταση στο επίπεδο της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας συγκριτικά με το συμβατικό HMA. Επίσης, η μορφή των καμπυλών στίλβωσης εμφανίστηκε παρόμοια με την πρότυπη καμπύλη στίλβωσης δοκιμίων ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα, ο ανοδικός κλάδος που εμφανίστηκε σε όλα τα RAR-μίγματα, οφείλεται στην παρουσία της ασφάλτου που επικαλύπτει αρχικά τα επιφανειακά αδρανή, με αποτέλεσμα ο συντελεστής τριβής να είναι αρχικά μειωμένος. Η σταδιακή απομάκρυνση της ασφάλτου από τα επιφανειακά αδρανή οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή τριβής (ανοδικός κλάδος) ενώ, καθώς συνεχίζουν να αυξάνονται οι κύκλοι στίλβωσης, η αντιολισθητική ικανότητα αρχίζει να μειώνεται προοδευτικά (καθοδικός κλάδος). Επισημαίνεται ότι στην πράξη (συμπεριφορά πεδίου), η παρουσία ανοδικού κλάδου συναντάται σε νέα οδοστρώματα, αμέσως μετά την έναρξη λειτουργίας τους και μπορεί να διαρκέσει (ενδεικτικά) από μερικές εβδομάδες έως 1-2 μήνες (ανάλογα με τον όγκο και τη σύνθεση της κυκλοφορίας που διέρχεται από το οδόστρωμα). Το χρονικό διάστημα μέχρι την πλήρη απομάκρυνση της ασφάλτου από τα επιφανειακά αδρανή είναι ιδιαίτερο κρίσιμο λόγω του χαμηλού επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας. Τέλος, η επίδραση της φυσικής γήρανσης όπως αυτή προσομοιώθηκε στα εργαστηριακά RAR-μίγματα εμφανίστηκε θετική, καθώς ο συντελεστής τριβής προέκυψε αυξημένος. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή η καμπύλη

στίλβωσης είχε εξαρχής καθοδική πορεία, καθώς δεν υπήρξε το φαινόμενο απομάκρυνσης της ασφάλτου που επικαλύπτει αρχικά τα επιφανειακά αδρανή (masking effect). Το στοιχείο αυτό μπορεί εν δυνάμει να καθορίσει έναν ενδεδειγμένο χρόνο παράδοσης στην κυκλοφορία ενός νέου ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας, προκειμένου να ευνοηθεί η αντίσταση σε στίλβωση του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση των καιρικών συνθηκών.

- Η προσθήκη RAP υλικού στο ασφαλτόμιγμα HMA που συλλέχθηκε επιτόπου (HMA<sub>πεδίο</sub>) οδήγησε επίσης σε μείωση του συντελεστή τριβής συγκριτικά με το HMA. Η μορφή των καμπυλών στίλβωσης των μιγμάτων της κατηγορίας (β) προσέγγισε περισσότερο την πρότυπη καμπύλη στίλβωσης αδρανών, πιθανώς λόγω του χαμηλού ποσοστού από παρθένο συνδετικό υλικό στα RAP-μίγματα. Κατά συνέπεια, και σε αυτήν την περίπτωση δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της απομάκρυνσης ασφάλτου.
- Η συμπεριφορά έναντι στίλβωσης των συμβατικών μιγμάτων, δηλαδή του HMA εργαστηριακής σύνθεσης (HMA<sub>εργαστήριο</sub>) και του HMA<sub>πεδίο</sub> εμφάνισε διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής τριβής του μίγματος HMA<sub>πεδίο</sub> προέκυψε χαμηλότερος. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει τις δυσκολίες στη σύγκριση υλικών που προέρχονται από άλλον τρόπο παρασκευής και επεξεργασίας. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι και ο χρόνος που μεσολαβεί από τη συλλογή του υλικού στο πεδίο μέχρι τη διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών (δηλαδή ο χρόνος αποθήκευσης του υλικού) δύναται να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της συμπεριφοράς έναντι στίλβωσης. Επίσης, η ύπαρξη σκωρίας στη σύνθεση του μίγματος HMA<sub>πεδίο</sub>, ενδεχομένως επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριβής.
- Η ανάπτυξη σχέσεων περιγραφής της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων που διερευνήθηκαν έναντι στίλβωσης, προέκυψε καταρχήν εφικτή. Συγκεκριμένα, οι σχέσεις συσχέτισης που αναπτύχθηκαν είχαν καλή προσαρμογή στα διαθέσιμα στοιχεία αλλά και ικανοποιητική ακρίβεια εκτίμησης του συντελεστή τριβής σε επιπρόσθετα διαθέσιμα δείγματα. Βέβαια, παραμένει η ανάγκη ενός ακόμα μεγαλύτερου πλήθους στοιχείων για την ακριβέστερη προσαρμογή και πρόβλεψη του συντελεστή τριβής. Παρά ταύτα, τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, με τα έως τώρα στοιχεία, αποτελούν εφελκυστικό για την περαιτέρω διερεύνηση της ανάπτυξης τέτοιου τύπου σχέσεων, αλλά και ενδεχόμενης αναθεώρησης της μορφής των συγκεκριμένων σχέσεων που αναπτύχθηκαν, με στόχο τη χρήση τους ως εργαλεία ποιοτικού ελέγχου ομοειδών υλικών πριν τη χρήση τους στο πεδίο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει η εκτίμηση του μακροπρόθεσμου συντελεστή τριβής, ο οποίος φαίνεται να προσεγγίζει μία σταθερή - τελική τιμή (end life value) με βάση τη μορφή όλων των καμπυλών στίλβωσης.

Σε αντίθεση με τα ευρήματα από τη διερεύνηση των καιρικών μεταβολών, η προσομοίωση της κυκλοφοριακής φόρτισης στις δοκιμαστικές πλάκες που παρασκευάστηκαν, οδήγησε σε μείωση του συντελεστή τριβής για την περίπτωση ασφαλτομιγμάτων με προσθήκη βιώσιμων υλικών. Επισημαίνεται ωστόσο, ότι η συγκεκριμένη παρατήρηση δεν αποτελεί μονοσήμαντο κριτήριο απόρριψης της χρήσης αυτών των υλικών στην πράξη. Αντιθέτως, εκτιμάται ότι τροφοδοτείται η ενίσχυση της διερεύνησης και της αξιολόγησης χρήσης βιώσιμων υλικών λαμβάνοντας συνδυαστικά υπόψη περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Ενδεικτικά αναφέρεται η ανάγκη διερεύνησης για ενδεχόμενη ενσωμάτωση βιώσιμων υλικών στην κατασκευή ή ανακατασκευή εθνικών οδών ή δευτερευουσών οδών, που εξυπηρετούν χαμηλότερους φόρτους κυκλοφορίας. Στην περίπτωση της Ελλάδας, αυτές οι οδοί αποτελούν σημαντικό ποσοστό του εθνικού οδικού δικτύου.

### 8.1.3 Διερεύνηση αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου (κλίμακα 1:1)

Δεδομένου ότι στο πλαίσιο παραλαβής νέων οδοστρωμάτων, είναι απαραίτητη μόνο η εκτίμηση των επιπέδων μακροϋφής του ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας, η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου ξεκίνησε με την αξιολόγηση των δυνατοτήτων **καταγραφής της μακροϋφής στην κατάσταση-σημείο «μηδέν»**. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημειακή μέθοδο αναφοράς για τη μέτρηση της μακροϋφής (μέθοδος κηλίδας άμμου) και τη δημοφιλή μέθοδο συνεχούς προφίλομέτρησης οδοστρωμάτων μέσω συστήματος Laser, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία συσχέτισης των δεικτών MTD και MPD που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους αντίστοιχα. Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ένας λόγος προσαρμογής του δείκτη MTD μέσω του δείκτη MPD. Παράλληλα, παρουσιάστηκε η ανάγκη ανάπτυξης σχέσεων (μοντέλων) βάσει των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος που κάθε φορά θα πρέπει να βαθμονομείται, αντί της γενικευμένης χρήσης του μοντέλου της ASTM E1845, το οποίο σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει απασχολήσει συχνά πολλούς ερευνητές διεθνώς λόγω της μειωμένης ακρίβειας προσαρμογής του σε στοιχεία μακροϋφής διαφορετικών οδοστρωμάτων.

Πέρα από τη σημασία καταγραφής της κατάστασης «μηδέν», η διερεύνηση επικεντρώθηκε στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος. **Για τη διερεύνηση της επίδρασης της κυκλοφορίας στην ετήσια μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας**, τα στοιχεία πολυετών μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας (δείκτης GN) και μακροϋφής (δείκτης MPD) που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, οργανώθηκαν σε επιμέρους τμήματα, ανάλογα με το μέγεθος και το είδος της κυκλοφορίας που αυτά εξυπηρετούν, αλλά και με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού (ευθυγραμμία, καμπυλότητα, κατά μήκος κλίση). Επίσης, προκειμένου να διερευνηθεί η μεταβολή της αντιολισθητικής ικανότητας από έτος σε έτος, η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης (λόγω πολλαπλών μετρήσεων στην περίοδο ενός έτους) εξομαλύνθηκε βάσει σχετικής μεθόδου που παρουσιάζεται στο Βρετανικό πρότυπο (CS/228 2020). Διαμορφώθηκαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις - συμπεράσματα:

- Η επίδραση της αθροιστικής κυκλοφορίας που διέρχεται από ένα οδόστρωμα με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας του στα επίπεδα της αντιολισθητικής ικανότητας και της μακροϋφής δεν έχει σταθερή τάση. Αντίθετα, εντοπίστηκαν δύο διακριτές ζώνες εξέλιξης της συμπεριφοράς των δύο μεγεθών. Στην πρώτη ζώνη, η αντιολισθητική ικανότητα παρουσίαζε μειωμένη έως ελλιπή συσχέτιση με τη μακροϋφή, ενώ στη δεύτερη ζώνη η μεταξύ τους συσχέτιση εμφανίστηκε αισθητά βελτιωμένη. Συγκεκριμένα στη ζώνη 2, τα δύο μεγέθη παρουσίαζαν αντίστροφη τάση εξέλιξης, δηλαδή παρατηρήθηκε αύξηση της μακροϋφής και παράλληλα μείωση της αντιολισθητικής ικανότητας. Το στοιχείο αυτό οφείλεται στην επαναλαμβανόμενη στίλβωση λόγω της διέλευσης του κυκλοφοριακού φόρτου, η οποία οδήγησε σε σταδιακή απομάκρυνση των λεπτόκοκκων αδρανών από την επιφάνεια του ασφαλτομίγματος και λείανση των εναπομένων, μειώνοντας τη μικροϋφή τους. Ως εκ τούτου, η επικράτηση κυρίως χονδροκόκκων αδρανών οδήγησε στη φαινομενική αύξηση του δείκτη MPD λόγω αύξησης των κενών μεταξύ των αδρανών, η οποία όμως δεν συνεπάγεται πραγματική βελτίωση (ψευδό-αύξηση) των επιπέδων μακροϋφής, στοιχείο που εξηγεί την πτώση στο επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας. Η διαφοροποίηση της σχέσης μεταξύ των δεικτών GN και MPD με βάση τις ζώνες 1 και 2, αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό εύρημα, το οποίο δύναται να ενισχύσει τις αμφιβολίες αναφορικά με την αξιοπιστία των μοντέλων πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας μέσω στοιχείων μακροϋφής. Ωστόσο, παρά την



κριτική που διατυπώνεται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία αναφορικά με την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων, η θεώρηση των δύο ζωνών συμπεριφοράς απουσιάζει από τις συναφείς ερευνητικές προσπάθειες.

- ο Το ποσοστό βαρέων οχημάτων στη σύνθεση της κυκλοφορίας εμφανίστηκε να είναι περισσότερο κρίσιμο ως προς την υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας, συγκριτικά με το συνολικό αριθμό των διερχόμενων οχημάτων. Επιπλέον, για τα τμήματα που βρίσκονται σε καμπύλες με ακτίνα καμπυλότητας μικρότερη των 500m ή/και κατά μήκος κλίση μεγαλύτερη από 5% εντοπίστηκε μεγαλύτερη υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας παρά τον μικρότερο όγκο κυκλοφορίας που εξυπηρετούν τα τμήματα αυτά, συγκριτικά με εκείνα που βρίσκονται σε ευθυγραμμία και έχουν μικρότερη κατά μήκος κλίση.
- ο Από την περαιτέρω αξιοποίηση των στοιχείων αντιολισθητικής ικανότητας και κυκλοφορίας, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της αντιολισθητικής ικανότητας (στη ζώνη 2). Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, ωστόσο παρουσιάστηκαν οι αδυναμίες και οι περιορισμοί στην ανάπτυξη συναφών μοντέλων, καθώς παράμετροι που δεν υπεισέρχονται στην ανάπτυξη του μοντέλου (π.χ. μακροϋφή ή εξωγενείς περιβαλλοντικοί παράγοντες) νοούνται σταθεροί και συνεπώς, δεν αποτυπώνεται η συμβολή τους στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας. Για το λόγο αυτό, τα περισσότερα συναφή μοντέλα έχουν μόνο βραχυπρόθεσμη ισχύ και χρήζουν συνεχούς επικαιροποίησης και ανατροφοδότησης λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία συμπεριφοράς πεδίου. Ωστόσο, ένα τέτοιο εργαλείο μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έγκαιρο εντοπισμό τμημάτων, στα οποία αναμένεται υποβάθμιση του επιπέδου της αντιολισθητικής ικανότητας με στόχο τον έγκαιρο προγραμματισμό ενεργειών συντήρησης. Ειδικό παράδειγμα εφαρμογής του ως άνω εργαλείου, αποτελεί η επιλογή υποτμημάτων διερεύνησης, στα οποία εφαρμόστηκε πιλοτικά η μέθοδος της σφαιριδιοβολής για την αποκατάσταση του επιπέδου της αντιολισθητικής ικανότητας (στη ζώνη 2). Αν και τα αποτελέσματα της εφαρμογής ήταν αρχικά θετικά, η μετέπειτα παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος υποδεικνύει ότι είναι σημαντικό να επιλεχθεί ο σωστός χρόνος για την αρχική εφαρμογή μίας τέτοιας διαδικασίας και να καθοριστεί η περιοδικότητα στην εφαρμογή της, δηλαδή τα διαστήματα επανάληψής της.

Η επόμενη φάση αξιολόγησης των στοιχείων πεδίου αφορούσε στη διερεύνηση του παράγοντα **της εποχιακής διακύμανσης της αντιολισθητικής ικανότητας**. Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν σε αυτό στο στάδιο, αφορούσαν σε ζεύγη μετρήσεων από το ίδιο έτος παρακολούθησης, δηλαδή σε μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας έπειτα από περίοδο βροχοπτώσεων (χειμώνας) και έπειτα από περίοδο ξηρασίας (καλοκαίρι). Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση αστικού αυτοκινητοδρόμου βαριάς κυκλοφορίας και η εποχιακή διακύμανση ποσοτικοποιήθηκε περί το 35% λαμβάνοντας υπόψη πιθανοτική ανάλυση για τις κατανομές των τιμών της αντιολισθητικής ικανότητας στις δύο περιόδους. Το ποσοστό αυτό ουσιαστικά αντιστοιχεί σε πτώση της αντιολισθητικής ικανότητας όταν γίνεται μετάβαση από την υγρή περίοδο στην ξηρή. Το συγκεκριμένο ποσοστό επαληθεύτηκε έπειτα από εφαρμογή του σε τμήμα υπεραστικού αυτοκινητοδρόμου, το οποίο εξυπηρετούσε μεν μικρότερο όγκο κυκλοφορίας, ωστόσο το μίγμα της αντιολισθητικής στρώσης ήταν ίδιας σύνθεσης με αυτό στον αστικό αυτοκινητόδρομο. Κατά συνέπεια, διαμορφώνεται το συμπέρασμα ότι η εποχιακή διακύμανση της αντιολισθητικής ικανότητας ενδεχομένως να σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της αντιολισθητικής στρώσης του οδοστρώματος, ακόμη και για την περίπτωση που οι κυκλοφοριακές και καιρικές συνθήκες διαφοροποιούνται.

Περαιτέρω, αξιολογήθηκαν **συνδυαστικά τόσο η επίδραση της κυκλοφορίας όσο και της εποχιακής διακύμανσης** στην εξέλιξη της αντιολισθητικής ικανότητας και των δύο συνιστωσών της υψής (μακροϋφή και μικροϋφή). Τα βασικότερα ευρήματα διαμορφώνονται ως εξής:

- Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι η εποχιακή διακύμανση παρουσίαζε σταδιακή μείωση στο εύρος του χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος. Η έναρξη της αντίστροφης τάσης μεταξύ της αντιολισθητικής ικανότητας και της μακροϋφής που αναφέρθηκε προηγουμένως (δηλαδή η μετάβαση από τη ζώνη 1 στη ζώνη 2), διαπιστώθηκε ότι συνδέεται με την έναρξη υποβάθμισης της επίδρασης της εποχιακής διακύμανσης. Δηλαδή, παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της εποχιακής διακύμανσης στο επίπεδο της αντιολισθητικής ικανότητας στη ζώνη 2 δεν ήταν καταλυτική. Παρόλο που βιβλιογραφικά το σημείο αυτό έχει εντοπιστεί και έχει ονομαστεί ως σημείο ισορροπίας, είναι η πρώτη φορά που αξιοποιώντας πλούσια στοιχεία πεδίου, κατέστη εφικτό να συνδεθεί η υποβάθμιση της εποχιακής διακύμανσης (φάση ισορροπίας) με την αλλαγή συμπεριφοράς στην σχέση της αντιολισθητικής ικανότητας με τη μακροϋφή.
- Για τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου αντιστροφής της τάσης μεταξύ της αντιολισθητικής ικανότητας και της μακροϋφής, διαπιστώθηκε ότι πέρα από την επίδραση της κυκλοφορίας, εξίσου καθοριστική είναι και η συμβολή των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή ενός έργου. Οι καιρικές συνθήκες μπορούν να διαφοροποιούνται σημαντικά κατά μήκος ενός οδικού άξονα επηρεάζοντας άμεσα τη μακροϋφή και τη μικροϋφή. Το αποτέλεσμα είναι η κατάσταση της επιφάνειας κύλισης να διαφοροποιείται και κατ' επέκταση οι συνθήκες στίλβωσης να μεταβάλλονται. Η συγκεκριμένη παρατήρηση συνδέθηκε με τη σημασία αξιολόγησης του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία πεδίου προκειμένου να αποτυπώνεται η συμβολή των εκάστοτε καιρικών συνθηκών.

#### 8.1.4 Σύζευξη ευρημάτων εργαστηριακής και επιτόπου διερεύνησης

Στο στάδιο αυτό, έγινε μία προσπάθεια σύζευξης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες εργαστηρίου και πεδίου. Ως υλικά αναφοράς, επιλέχθηκαν μόνο τα συμβατικά ασφαλτομίγματα (από ΗΜΑ), δεδομένου ότι αυτός ο τύπος ασφαλτομίγματος συναντάται στις συνθήκες πεδίου. Επίσης, η διερεύνηση επικεντρώθηκε στη δυνατότητα εκτίμησης της αντιολισθητικής ικανότητας στο πεδίο ως αποτέλεσμα της επίδρασης του κυκλοφοριακού φόρτου, αγνοώντας ωστόσο την εποχιακή διακύμανση που θα αύξανε την πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα των σχετικών εκτιμήσεων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν έχουν ως ακολούθως:

- Η ανάπτυξη σχέσεων περιγραφής των καμπυλών στίλβωσης στο αμιγώς εργαστηριακό σκέλος της διερεύνησης μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτίμηση των αντίστοιχων καμπυλών στίλβωσης που προκύπτουν στο πεδίο. Πράγματι, οι δύο καμπύλες παρουσίασαν ποιοτικά ομοιόμορφη τάση μεταβολής (υπό προϋποθέσεις), γεγονός που ανέδειξε ότι η συμπεριφορά στις δύο συνθήκες μπορεί εν δυνάμει να συνδεθεί.
- Για να υλοποιηθεί η σύζευξη, υιοθετήθηκαν πιλοτικά δοκιμαστικοί συντελεστές προσαρμογής (συγκεκριμένα προσαύξησης) με στόχο την προσαρμογή της εργαστηριακής καμπύλης στίλβωσης στην επιτόπου καμπύλη στίλβωσης και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Ωστόσο, βασικό περιορισμό στη διερεύνηση που ακολουθήθηκε, αποτέλεσε η προϋπόθεση

αντιστοίχισης του πραγματικού κυκλοφοριακού φόρτου (συνθήκες πεδίου) και των κύκλων στύλβωσης που επιβάλλονται μέσω της συσκευής W/S (συνθήκες εργαστηρίου). Στο πλαίσιο της έρευνας, έγιναν αναγκαίες παραδοχές λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία και τον κυκλοφοριακό φόρτο των υπό διερεύνηση τμημάτων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των τμημάτων του αστικού αυτοκινητοδρόμου (που βρίσκεται αρκετά έτη σε λειτουργία και εξυπηρετεί μεγάλο κυκλοφορικό φόρτο), θεωρήθηκε ότι η τελική τιμή (end life value) του συντελεστή τριβής που προέκυψε εργαστηριακά, αντιστοιχεί στην τελευταία διαθέσιμη μετρημένη τιμή της αντιολισθητικής ικανότητας στο πεδίο. Κατά συνέπεια, τυχόν αναμενόμενες αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης συμπεριφοράς στο πεδίο οφείλονται, μεταξύ άλλων, στην αδυναμία ακριβούς προσδιορισμού των σημείων έναρξης και κυρίως λήξης των καμπύλων στύλβωσης.

Συνολικά, από τη διερεύνηση αυτή προέκυψε μια υψηλή δυναμική σύνδεσης των δύο συμπεριφορών, ενώ διαφαίνεται ιδιαίτερη προοπτική επέκτασης και ενίσχυσης της σχετικής έρευνας.

## 8.2 Καινοτομία και συμβολή διατριβής

Στο πλαίσιο ολοκλήρωσης της έρευνας που διεξήχθη, εκτιμάται ότι τα **στοιχεία που συνιστούν καινοτομία** είναι τα ακόλουθα:

- Η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης μη συμβατικών, βιώσιμων υλικών (επαναχρησιμοποιούμενο-ανακτώμενο ασφαλτόμιγμα και τριμμάτων από ανακυκλωμένο ελαστικό) σε ασφαλτομίγματα αντιολισθητής στρώσης ασφαλτικών οδοστρωμάτων, που πιστεύεται ότι έχει κυρίαρχη συμβολή σε εθνικό επίπεδο. Παρά ταύτα, ακόμη και διεθνώς, οι έρευνες που αφορούν στη χρήση βιώσιμων υλικών στο ασφαλτόμιγμα της επιφανειακής στρώσης είναι περιορισμένες και επικεντρώνονται κυρίως σε θέματα μηχανικής και χημικής συμπεριφοράς των υλικών καθώς και σε θέματα δομικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων. Κατά συνέπεια, η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα της επιφανειακής στρώσης ενός οδοστρώματος με ασφαλτομίγματα που περιέχουν ανακυκλωμένα υλικά συνιστά μια καινοτόμο ερευνητική προσπάθεια που ενισχύει τις περιορισμένες σχετικές διεθνείς έρευνες.
- Επίσης, η διερεύνηση της χρήσης βιώσιμων υλικών στην αντιολισθητή στρώση δύναται να παράσχει χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με την ενσωμάτωσή τους, τόσο στην κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, όσο και στην ανακατασκευή-συντήρηση υφισταμένων, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των οδικών έργων υποδομής, δεδομένου ότι εξυπηρετείται το τρίπτυχο μιας βιώσιμης κατασκευής, ήτοι οικονομία-περιβάλλον-κοινωνία. Πιστεύεται ότι η εν λόγω έρευνα αποτελεί εφιαλτήριο για την ανάδειξη της προοπτικής χρήσης τους, με στόχο τον περιορισμό των παρθένων υλικών.
- Ένα επιπλέον στοιχείο καινοτομίας της παρούσας διατριβής πιστεύεται ότι αποτελεί η αξιολόγηση της επιτόπου συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας σε βάθος χρόνου, αξιοποιώντας πληθώρα διαθέσιμων στοιχείων από πολυετείς μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας και μακροϋφής από ελληνικούς αυτοκινητοδρόμους. Τα στοιχεία αυτά επέτρεψαν την ουσιαστική εμβάθυνση στη διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας σε συνθήκες πεδίου, στην αξιολόγηση των μεταβολών της ετησίως αλλά και σε βάθος χρόνου λειτουργίας μίας οδού, καθώς και στην τεκμηριωμένη αξιολόγηση αλλά και ερμηνεία της αλληλεπίδρασή της με τη μακροϋφή των ασφαλτικών οδοστρωμάτων.

- Τέλος, η ύπαρξη πληθώρας στοιχείων πεδίου επέτρεψε την προκαταρκτική διερεύνηση σύζευξης της συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων αναφορικά με την αντιολισθητική ικανότητα που προσδιορίζεται σε συνθήκες εργαστηρίου, με αυτήν που τελικά παρατηρείται στο πεδίο σε βάθος χρόνου λειτουργίας των οδοστρωμάτων. Η διαθεσιμότητα στοιχείων πεδίου δεν θεωρείται πάντα δεδομένη σε συναφείς διεθνείς έρευνες, πράγμα που συνιστά βασική τους αδυναμία. Αντίθετα, στην παρούσα διατριβή δόθηκε η δυνατότητα διερεύνησης της σύζευξης της συμπεριφοράς στο εργαστήριο και στο πεδίο, με παράλληλη αξιολόγηση των σχετικών περιορισμών αυτής της προσπάθειας, αλλά και την υπογράμμιση των προεκτάσεων που αναδεικνύονται για τους μηχανικούς οδοστρωμάτων και τους φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών από μια τέτοια μεθοδολογία.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, η **συμβολή της παρούσας διατριβής** διαμορφώνεται ως ακολούθως:

- Γίνεται εφικτή η δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου αξιολόγησης της συμπεριφοράς έναντι ολίσθησης των συμβατικών ασφαλομιγμάτων και των ασφαλομιγμάτων που περιέχουν ανακυκλωμένα υλικά στο εργαστήριο. Υπό την έννοια αυτή, η εργαστηριακή προσομοίωση μπορεί να λειτουργήσει ως προπομπός της αναμενόμενης συμπεριφοράς των υπόψη υλικών στο πεδίο. Το στοιχείο αυτό έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα, ιδιαίτερα όσον αφορά στο επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας του οδοστρώματος, καθώς για τα μίγματα που εξετάστηκαν προέκυψε ότι η καμπύλη στίλβωσης συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή του συντελεστή τριβής όταν οι κυκλοφοριακές διελεύσεις μεγιστοποιούνται. Άλλωστε, αυτό που ενδιαφέρει τους φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών και τους μηχανικούς οδοστρωμάτων είναι η συμπεριφορά της αντιολισθητικής ικανότητας μακροπρόθεσμα, όταν δηλαδή το επίπεδό της θα έχει υποστεί μια σημαντική υποβάθμιση.
- Αναφορικά με την επιτόπου συμπεριφορά, ο διαχωρισμός της συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας σε δύο ζώνες εξέλιξης πιστεύεται ότι μπορεί να αποτελέσει στοιχείο με πρακτικό αντίκτυπο προς τους φορείς διαχείρισης των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, η γνώση ύπαρξης του σημείου μετάβασης από τη ζώνη 1 (περιοχή μη ύπαρξης συσχέτισης μεταξύ MPD-GN) στη ζώνη 2 (περιοχή αύξησης MPD με ταυτόχρονη μείωση GN και ύπαρξη καλής συσχέτισης μεταξύ τους), μπορεί να δώσει την πληροφορία στους αρμόδιους φορείς σχετικά με την αναμενόμενη υποβάθμιση του επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας για το υπόλοιπο της λειτουργίας του έργου. Συνεπώς, μια τέτοια πληροφορία δύναται να ενεργοποιήσει τον έγκαιρο σχεδιασμό και την υλοποίηση εργασιών συντήρησης για την αναβάθμιση του επιπέδου της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος και κατ' επέκταση την ενίσχυση της βιωσιμότητας της επιφανειακής στρώσης και της ασφάλειας των χρηστών μίας οδού (κοινωνική συνιστώσα) με χαμηλό κόστος (οικονομική συνιστώσα), τροφοδοτώντας παράλληλα σχετικές αναλύσεις κόστους στο πλαίσιο αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων (Life Cycle Cost Analysis: LCCA).
- Υπογραμμίζεται η ανάγκη συστηματικής διενέργειας μετρήσεων αντιολισθητικής ικανότητας σε νέα και υφιστάμενα οδοστρώματα με εξιδεικευμένα συστήματα πεδίου. Η απουσία συσχέτισης μεταξύ της μακροϋφής και της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, ιδίως στα πρώτα έτη λειτουργίας του, δύναται να κινητοποιήσει τους φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών προκειμένου να εντάξουν διακριτές μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας στο πλαίσιο της περιοδικής παρακολούθησης των οδοστρωμάτων. Μάλιστα, η εκκίνηση των μετρήσεων αυτών αμέσως μετά την κατασκευή ή την ανακατασκευή ενός οδοστρώματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να διατηρείται ένα μητρώο παρακολούθησης του οδοστρώματος, το

οποίο θα είναι χρήσιμο στη μετέπειτα διαχείριση της συντήρησής του και στην ενίσχυση της ευρύτερης βιωσιμότητάς του.

- Αναπτύσσεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διερεύνηση της εποχιακής διακύμανσης που εκτιμάται ότι έχει έντονο πρακτικό ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να βελτιστοποιήσει τον προγραμματισμό διενέργειας μετρήσεων της αντιολισθητικής ικανότητας στο πλαίσιο της περιοδικής παρακολούθησης οδοστρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η μέτρηση έπεται από την περίοδο έντονων βροχοπτώσεων και η αξιοποίηση του ποσοστού μείωσης που θα εκτιμηθεί μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, μπορούν να οριοθετήσουν συγκεκριμένα τμήματα στα οποία προβλέπεται περαιτέρω υποβάθμιση της αντιολισθητικής ικανότητας τις ξηρές περιόδους του έτους, ώστε να προγραμματιστεί ενδεχομένως επανάληψη των μετρήσεων μόνο σε αυτά τα τμήματα, ή ακόμα και να δρομολογηθούν ενέργειες συντήρησης. Το στοιχείο αυτό μπορεί να εξασφαλίσει σημαντική εξοικονόμηση πόρων στο πλαίσιο διαχείρισης της λειτουργίας των οδικών υποδομών και να ενισχύσει τις ενέργειες προς όφελος της οδικής ασφάλειας.
- Τέλος, η προκαταρκτική διερεύνηση της σύζευξης της συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας που σημειώθηκε στο εργαστήριο με αυτή που καταγράφηκε στο πεδίο, πιστεύεται ότι μπορεί να λειτουργήσει ως προπομπός για την ευρύτερη αξιολόγηση υλικών και μιγμάτων πριν την χρήση τους για την κατασκευή ή ανακατασκευή επιφανειακών ασφαλτικών στρώσεων.

### 8.3 Περαιτέρω έρευνα – Προεκτάσεις

Περαιτέρω εξέλιξη της έως τώρα έρευνας θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα εξής:

- Η δημιουργία μίας βάσης δεδομένων με στοιχεία εργαστηριακής συμπεριφοράς έναντι στίλβωσης από πληθώρα ασφαλτομιγμάτων, στοιχείο που θα επιτρέψει:
  - Την ανάπτυξη ενός οδηγού που θα βοηθήσει στην κατάταξη της συμπεριφοράς ομοειδών μιγμάτων και στην εν δυνάμει ανάπτυξη ενός ενιαίου πρωτοκόλλου-προδιαγραφών για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των μιγμάτων (π.χ. αναμενόμενος συντελεστής τριβής, θέματα αποκόλλησης αδρανών) αξιοποιώντας τη συσκευή W/S.
  - Τη διεύρυνση μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των υλικών στο εργαστήριο μέσω κατάλληλα βαθμονομημένων σχέσεων. Φυσικά, η συμπεριφορά στο πεδίο (κλίμακα 1:1) εμφανίστηκε να διαφοροποιείται από τη συμπεριφορά σε κλίμακα εργαστηρίου. Πλην όμως και σε αυτήν την περίπτωση, ένα καλώς βαθμονομημένο μοντέλο συνδυαστικά με την ύπαρξη κατάλληλων συντελεστών προσαρμογής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς ομοειδών μιγμάτων.
- Η κατασκευή ενός πιλοτικού οδοστρώματος μικρού μήκους στο πεδίο, στο οποίο θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα βιώσιμα ασφαλτομίγματα που εξετάστηκαν. Η συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας σε βάθος του χρόνου λειτουργίας – αξιοποίησής του, θα επιτρέψει αφενός την αξιολόγηση της πραγματικής αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος που εκτίθενται σε καιρικές και κυκλοφοριακές συνθήκες πεδίου, αφετέρου την ακριβέστερη βαθμονόμηση ενός συντελεστή προσαρμογής (shift factor), προκειμένου η συμπεριφορά που προβλέπεται μέσω μοντέλων σε επίπεδο εργαστηρίου να αντανakλά τη συμπεριφορά στο πεδίο.
- Η διερεύνηση της χρήσης επιπρόσθετων βιώσιμων υλικών (π.χ. υπολείμματα πλαστικού ή γυαλιού) στα ασφαλτομίγματα αντιολισθητικής στρώσης και της συμπεριφοράς τους (καταρχάς) στο εργαστήριο μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή.

- Η συνδυαστική θεώρηση θεμάτων δομικής συμπεριφοράς των υπό διερεύνηση βιώσιμων ασφαλτομιγμάτων, αλλά και επιπρόσθετων λειτουργικών χαρακτηριστικών (πχ τροχοαυλάκωση), με στόχο την ορθολογικότερη αξιολόγηση των υπόψη υλικών. Ενδεικτικά μόνο αναφέρεται ότι η γήρανση-οξείδωση του παλαιού συνδετικού υλικού και η παρουσία αυξημένου ποσοστού RAP, ενέχουν τον κίνδυνο εμφάνισης ψαθυρής συμπεριφοράς των υλικών της αντιολισθητής στρώσης, καθιστώντας την ευάλωτη στην εμφάνιση πρόωρων ρωγμών στην επιφάνεια του οδοστρώματος (top-down cracking). Το κίνητρο μιας τέτοιας διερεύνησης είναι μια ολιστική αξιολόγηση αναφορικά με τη βέλτιστη σύνθεση των μιγμάτων ή τον ενδεδειγμένο τύπο οδοστρώματος με βάση την αναμενόμενη κυκλοφορία.
- Η διενέργεια αξιολόγησης του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων που αποτελούνται από βιώσιμα υλικά στις ασφαλτικές στρώσεις με συναφείς περιβαλλοντικές μελέτες και αναλύσεις κόστους-ωφέλειας (Life Cycle Cost Analysis: LCCA). Ενδεικτικοί τομείς έρευνας αφορούν μεταξύ άλλων, στις εκπομπές ρύπων κατά την παραγωγή, μεταφορά, διάσπρωση ή τις διαδικασίες απομάκρυνσης/απόρριψης ήδη χρησιμοποιημένων υλικών (ανθρακικό αποτύπωμα) αλλά και το κόστος των συναφών εργασιών κατασκευής ή ανακατασκευής με βάση τη συχνότητα επανάληψης των ενεργειών συντήρησης.
- Στο πλαίσιο ενίσχυσης της οδικής ασφάλειας, η ανάπτυξη ενός μητρώου με στοιχεία παρακολούθησης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων διάφορων τύπων οδών εντός του εθνικού δικτύου θα μπορούσε ενδεχομένως να βελτιστοποιήσει και να μεθοδεύσει τη συστηματική υλοποίηση ενεργειών συντήρησης και αποκατάστασης των επιφανειακών στρώσεων, με στόχο την βελτίωση της παρεχόμενης αντιολισθητικής ικανότητας. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη ενός τέτοιου μητρώου θα μπορούσε ενδεχομένως να δημιουργήσει ισχυρές προϋποθέσεις για τον καθορισμό ενός κατώτατου ορίου αντιολισθητικής ικανότητας για τον εκάστοτε τύπο οδών ή τμημάτων αυτών (benchmark sites), συνδυαστικά με αρχεία καταγραφής οδικών ατυχημάτων. Προς αυτήν την κατεύθυνση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε θέματα συμπεριφοράς οδοστρωμάτων εμπλουτίζοντας υπάρχουσες βάσεις δεδομένων από στοιχεία αντιολισθητικής ικανότητας και αξιοποιώντας τα ερευνητικά ευρήματα της παρούσας διερεύνησης.

## 9 Βιβλιογραφίες

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

AASHTO, 2018. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Sixth Edition, Washington, DC, USA.

Aavik, A., Kaal, T., Jentson, M., 2013. Use of pavement surface texture characteristics measurement results in Estonia. In the Proceedings of the XXVIII International Baltic Road Conference, 26-28 August, Vilnius, Lithuania.

Ahammed, M.A., Tighe, S.L., 2009. Early-life, long-term, and seasonal variations in skid resistance in flexible and rigid pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2094(1), 112-120.

Ahammed, M.A., Tighe, S.L., 2012. Asphalt pavements surface texture and skid resistance — exploring the reality. Canadian Journal of Civil Engineering, 39(1), 1–9.

Aktas, B., Gransberg, D.D., Riemer, C., Pittenger, D., 2011. Comparative Analysis of Macrotecture Measurement Tests for Pavement Preservation Treatments. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2209(1), 34–40.

Alhasan, A., Bou-Saab, G., Smadi, O., Hernandez N., Cochran, E., 2018. Pavement Friction Modeling Using Texture Measurements and Pendulum Skid Tester. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2672(40), 440–451.

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

Anupam, K., Srirangam, S.K., Scarpas, A., Kasbergen, C., 2013. Influence of temperature on tire -pavement friction: Analyses. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2369(1), 114–124.

Araujo, V.M.C., Bessa, I. S., Castelo Branco, V.T.F., 2015. Measuring skid resistance of hot mix asphalt using the aggregate image measurement system (AIMS). Construction and Building Materials, 98, 476–481.

ASTM C131/C131M – 20, 2020. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D3319 – 00, 2000. Standard Practice for the Accelerated Polishing of Aggregates Using the British Wheel. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D2172 – 95, 2001. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D3203 / D3203M – 17, 2017. Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D3515 – 01, 2001. Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E1844 – 08, 2015. Standard Specification for A Size 10 × 4–5 Smooth-Tread Friction Test Tire. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E1845 – 15, 2015. Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E1911 – 19, 2019, Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E1960 – 07, 2015. Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E303 – 93, 2018. Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E965-15, 2015. Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Austrroads, 2005. Guide to the management of road surface skid resistance. Austrroads Incorporated, Sydney, Australia.

Austrroads, 2009. Guide to Pavement Technology Part 4E: Recycled Materials, Austrroads Publication, No. AGPT04E-09, Sydney, Australia.

Barco-Carrion, A.J., Perez Martinez, M., Themeli, A., Lo Presti, D., Marsac, P., Pouget, S., Hammoum, F., Chailleux, E., Airey, G.D., 2017. Evaluation of bio-materials' rejuvenating effect on binders for high-reclaimed asphalt content mixtures. *Materiales de construccion*, 67(327), ff10.3989/mc.2017.04516ff. ffhal-01609000f

Bennis, TA., de Witt, LB., 2003. PIARC state-of-the-art on friction and IFI. 1<sup>st</sup> Annual Australian Runway and Roads Friction Testing Workshop, Sydney, 5–7 August 2003.

Bessa, I.S., Branco, V., Soares, J.B., 2014. Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using the aggregate image measurement system. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 385-405.

Bianchini, A., Heitzman, M., Maghsoodloo, S., 2011. Evaluation of Temperature Influence on Friction Measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 137(9), 640-647.

Bijsterveld, W., del Val Miguel, A., 2016. Towards quantification of seasonal variations in skid resistance measurements. *Road Materials and Pavement Design*, 17(2), 477–486.

Borghi, A., Barco-Carrión, A.J., Lo Presti, D., Giustozzi, F., 2017. Effects of Laboratory Aging on Properties of Biorejuvenated Asphalt Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 29(10), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001995.

Brown, E.R., Hainin, M., Cooley, A., Hurley, G., 2004. Relationship of Air Voids, Lift Thickness, and Permeability in Hot Mix Asphalt Pavements. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine Washington, DC, The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13777>



BS 812:3, 1990. Testing Aggregates, Sampling and Testing of mineral aggregates, Part3: Method for determination of mechanical properties. British Standard Institution, London.

Cairney, P.T., 1997. Skid Resistance and Crashes: A Review of the Literature. ARRB Transport Research, Ltd., Vermont South, Melbourne, Victoria Australia, p.32.

CEN - EN 12697-33, 2019. Bituminous mixtures - Test method - Part 33: Specimen prepared by roller compactor.

CEN - EN 12697-49, 2017. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 49: determination of friction after polishing.

Cenek, P.D., Alabaster, D.J., Davies, R.B., 1999. Seasonal and weather normalisation of skid resistance measurements. Research report No 63, Transit New Zealand, Wellington, NZ.

Cerezo, V., Gothie, M. Menissier, M., Gibrat, T., 2013. Hydroplaning speed and infrastructure characteristics. In the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, SAGE Publications, 224(9), 891-898.

Chen, L.M., Chen, J.W., Chen, T.H., Lecher, T., Davidson, P.C., 2019. Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. Water 2019, 11(3), 444, doi:10.3390/w11030444.

China, S., James, D.E., 2012a. Influence of Pavement Macrotecture on PM10 Emissions from Paved Roads: A Controlled Study. Atmospheric Environment Journal, 63, 313–326.

China, S., James, D.E., 2012b. Comparison of Laser-Based and Sand Patch Measurements of Pavement Surface Macrotecture. Journal of Transportation Engineering, 138(2).

Choi, Y., 2011. Review of Skid Resistance and Measurement Methods. Austroads Project No. AT1488, Austroads Publication, AP–T177/11, Austroads Ltd.

Chou, C.P, Lee, C.C., Chen, A.C., Wuc, C.Y., 2017. Using a constructive pavement texture index for skid resistance screening. International Journal of Pavement Research and Technology, 10, 360–368.

Continental Reifen Deutschland GmbH, 2013. <https://www.continental-tires.com/car/tires/contiwintercontact-ts-830>

Crisman, B., Ossich, G., Bevilacqua, P., Roberti, R., 2020. Degradation Prediction Model for Friction of Road Pavements with Natural Aggregates and Steel Slags. Applied Sciences, 10(1), 32.

CS/228, 2020. Skidding resistance. Design Manual for Roads and Bridges, Pavement Inspection & Assessment, formerly HD 28/15, Revision 1.

D'Agostino, R.B., Stephens, M.A., 1986. Goodness-of-fit Techniques, New York: Marcel Dekker.

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

Dasek, O., Kudrna, J., Kachtík, J., Spies, K., 2012. Asphalt rubber in Czech Republic. Asphalt Rubber conference 2012, Munich.

Davis, J.R., 2006. Hydroplaning issues, [www.msgroup.org/forums/mtt/topic.asp?TOPIC\\_ID=200](http://www.msgroup.org/forums/mtt/topic.asp?TOPIC_ID=200)

Design Manual for Roads and Bridges, 2015. HD 28/15, Vol. 7, Section 3, Part 1: Skidding resistance.

Diringer, K.T., Barros, R.T., 1990. Predicting the skid resistance of bituminous pavements through accelerated laboratory testing of aggregates. *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, ed. W. Meyer and J. Reichert, West Conshohocken, PA, ASTM International, 61-76, <https://doi.org/10.1520/STP23353S>

Do, M.T., Cerezo, V., Zahouani, H., 2014a. Laboratory test to evaluate the effect of contaminants on road skid resistance. In the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228(11), 1276–1284, <https://doi.org/10.1177/1350650114530109>

Do, M.T., Cerezo, V., Beautru, Y., Kane, M. 2014b. Influence of Thin Water Film on Skid Resistance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(1), 36-44.

Do, M.T., Cerezo, V., Beautru, Y., Kane, M., 2013a. Modeling of the connection road surface microtexture / water depth / friction. *Wear*, 303, 1426-1435.

Do, M.T., Kane, M., Cerezo, V., 2013b. Laboratory test methods for polishing asphalt surfaces and predicting their skid resistance. In the Proceedings of the 92<sup>nd</sup> Transportation Research Board Annual Meeting (TRB), 16p, Washington DC.

Do, M.T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., 2007. Pavement polishing – development of a dedicated laboratory test and its correlation with road results. *Wear*, 263(1-6), 36–42.

Do, M.T., Tang, Z., Kane, M., de Larrard, F., 2009. Evolution of road-surface skid-resistance and texture due to polishing. *Wear*, 266(5-6), 574–577.

Donbavand, J., Cook, D., 2005. Procedures for correcting seasonal variations. In the Proceedings of the Surface Friction Conference, Christchurch, New-Zealand.

Douglas, I.A., 2013. Skid correction program user’s manual. Report, University of Utah, No. UT-13.03.

Dunford, A., Roe, P.G., 2010. BOS slag as a surface coarse aggregate. Published Project Report -PPR647, Transport Research Laboratory.

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

EAPA - European Asphalt Pavement Association, 2013. Asphalt in Figures 2012. [Online]. Available from: <http://www.eapa.org/promo.php?c=174>

El Halim, A.O., 2010. Improvement to highway safety through network level friction testing and cost-effective pavement maintenance. Dissertation, UWSpace <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/5172>

ELOT, ΤΠ 1501-05-03-12-01, 2017. Hellenic Technical Specification. Skid resistant asphalt concrete wearing course.

EN 1097-1:2011, 2011. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)

EN 1097-2:2020, 2020. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Methods for the determination of resistance to fragmentation.

EN 1097-8:2020, 2020. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the polished stone value.

EN 1367-2:2009, 2009. Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Magnesium sulfate test.

Ergun, M., Iyınam, S., Iyınam, A.F., 2005. Prediction of road surface friction coefficient using only macro- and microtexture measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 131(4), 311 – 319.

Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Dondi, G., Lamperti, R., 2018. Recycling asphalt pavement and tire rubber: A full laboratory and field scale study. *Construction and Building Materials*, 176, 283–294, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.03>

European Commission, 2018. Regulation of the European Parliament and of the Council, on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters and repealing. Regulation (EC) No 1222/2009 2018 COM (2018) 296 final.

Faung, H., Hughes, W., 2007. Friction Monitoring of SuperPave Mixes in Virginia. Virginia Highway & Transportation Research Council, 8-9.

Federal Highway Administration (FHWA), 1998. Report on Synthesis of Safety Research Related to Speed and Speed Management. FHWA-RD-98-154. U.S, Department of Transportation, Washington DC.

Feiteira Dias, J.L., Picado-Santos, L.G., Capitão, S.D., 2014. Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network. *Construction and Building Materials*, 73, 247–254, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.110>

Findlay Irvine, 2002. Road Base Grip Tester Survey Software for Roads (User manual). Findlay Irvine Ltd.

Fisco, N., Sezen, H., 2013. Comparison of surface macro-texture measurement methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 153-160.

Flintsch, G.W., de Leon Izeppi, E., McGhee, K.K., Al-Qadi, I.L., 2003. Pavement Surface Macrotecture Measurement and Application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1860(1), 168–177, <https://doi.org/10.3141/1860-19>

Flintsch, G.W., McGhee, K.K., de Leon, E.I., Najafi, S., 2012. The little book of tire pavement friction. Version 1.0, Submitted for Review and Comment, Pavement Surface Properties Consortium.

Freitas, E., Pereira, P., Antunes, M.L., Domingos, P., 2008. Analysis of Test Methods for Texture Depth Evaluation Applied in Portugal. *Seminario Avaliacao das Caracteristicas de Superficie dos Pavimentos*.

Friel, S., Kane, M., Woodward, D., 2013. Use of Wehner Schulze to predict skid resistance of Irish surfacing materials. *Airfield and Highway Pavement*, p.12.

Fwa, T.F., 2006. *The Handbook of Highway Engineering*. 1<sup>st</sup> Edition, published by CRC Press, Taylor & Francis Group, Section 21: Pavement Skid Resistance Management.

Fwa, T.F., 2017. Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(3), 217-227, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.08.001>

Garber, N.J., Ehrhart, A.A, 2000. Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways. In the Proceedings of the 79<sup>th</sup> Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, Washington DC.

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

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

Goulias, D., Awoke, S.G., 2017. Pavement Friction Analysis & Prediction of Deterioration Rate at Early Ages. In the Proceedings of the 96<sup>th</sup> Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, p.16, Washington DC.

Guan, B., Wu, J., Xie, C., Fang, J., Zheng, H., Chen, H., 2018. Influence of Macrotexture and Microtexture on the Skid Resistance of Aggregates. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 1437069, p.9.

Guo, F., Tian, Y., Liu, Y., Wang, Y., 2017. Unexpected friction behaviours due to capillary and adhesion effects. Scientific Reports, 7(1), 148, doi:10.1038/s41598-017-00238-0.

Hadiwardoyo, S.P., Adillah, R., 2019. Laboratory Investigation on Skid Resistance Characterizations of Recycled Hot-Mix Modified Asphalt Nano Crumb Rubber. International Journal of Engineering Research and Technology, 12(12), 2692-2697, DOI: 10.13189/cea.2020.080430.

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

Hall, J.W., Smith, K.L., Titus-Glover, L., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rado, Z., 2009. Guide for Pavement Friction, Project 01-43, NHCPR.

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

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

Hichri, Y., Cerezo, V., Do, M.T., 2017. Effect of dry deposited particles on the tire/road friction. Wear, 376-377(B), 1437-1449.

Hill, B.J., Henry, J.J., 1981. Short-Term, weather-related skid resistance variations. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 836, 76-81.

Hofko, B., Kugler, H., Chankov G., Spielhofer, R., 2019. A laboratory procedure for predicting skid and polishing resistance of road surface. International Journal of Pavement Engineering, 20(4), 439–447.

Hosking, R., 1992. Road aggregates and skidding. Transport Research Laboratory State of the Art Review 4.

Hosking, R., 1976. Aggregates for skid-resistant roads. Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory, p.22.

Huang, J., Leandri, P., Cuciniello, G., Losa, M., 2021. Mix design and laboratory characterisation of rubberised mixture used as damping layer in pavements. International Journal of Pavement Engineering, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1869975>

luele, T., 2016. Road surface micro- and macrotexure evolution in relation to asphalt mix composition. *Advanced Materials and Structural Engineering*, 433-436.

Jamshidi, A., White, G., 2020. Evaluation of Performance and Challenges of Use of Waste Materials in Pavement Construction: A Critical Review. *Applied Sciences*, 10(1):226  
<https://doi.org/10.3390/app10010226>

Jayawickrama, P.W., Thomas, B., 1998. Correction of field skid measurements for seasonal variations in Texas. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1639, 147-154.

Kane, M., Edmondson, V., 2020. Long-term skid resistance of asphalt surfacings and aggregates' mineralogical composition: Generalisation to pavements made of different aggregate types. *Wear*, 454–455, 203339, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203339>

Kane, M., 2021. Road safety: First step of an algorithm to identify the potential water ponding on routes. *Measurement*, 174(2021), 108980, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.108980>

Kane, M., Artamendi, I., Scarpas, T., 2013a. Long-term skid resistance of asphalt surfacings: Correlation between Wehner–Schulze friction values and the mineralogical composition of the aggregates. *Wear*, 303(1–2), 235-243, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.022>

Kane, M., Cerezo, V., 2015. A contribution to tire/road friction modelling: from a simplified dynamic frictional contact model to a 'dynamic friction tester' model. *Wear*, 342, 163–171, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.08.007>

Kane, M., Zhao, D., de Larrard, F., Do, M.T., 2012. 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*, 13(2), 312 – 326.

Kane, M., Do, M.T., Cerezo, V., Rado, Z., Khelifi, C., 2019. Contribution to pavement friction modelling: an introduction of the wetting effect. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 965-976, <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1369776>

Kane, M., Edmondson, V., 2018. Modelling the bitumen scour effect: Enhancement of dynamic friction model to predict the skid resistance of rubber upon asphalt pavement surfaces subjected to wear by traffic polishing. *Wear*, 400–401, 100–110, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.013>

Kane, M., Do, M.T., Piau, J.M., 2010. On the study of polishing of road surface under traffic load. *Journal of Transportation Engineering*, 136(1), 45–51.

Kane, M., Piau, J.M., Do, M.T., 2008. Modeling of the road surface polishing based on contact-mechanics approach. *Road Materials and Pavement Design*, 9, 305–318.

Kane, M., Scharnigg, K., 2009. Report on different parameters influencing skid resistance, rolling resistance and noise emissions. Deliverable D10: EU project TYROSAFE.

Kane, M., Rado, Z., Timmons, A., 2014. Exploring the texture–friction relationship: from texture empirical decomposition to pavement friction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(10), 919 – 928.

Kane, M., Zhao, D., Chailleux, E., Delarrard, F., Do, M.T., 2013b. Development of an accelerated pavement test reproducing the effect of natural ageing on skid resistance. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 126-140, <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.749804>

Kassem, E., Awed, A., Masad, E., Little, D., 2013. Development of Predictive Model for Skid Loss of Asphalt Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2372, 83–96.

Khasawneh, M., 2016. Macrotexture characterisation of laboratory-compacted hot-mix asphalt specimens using a new asphalt polishing machine. *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), 400-416.

Khasawneh, M., Smadi, M., Zelelew, H., 2016. Investigation of the factors influencing wavelet-based macrotexture values for HMA pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 779–791.

Kim, H.B., Lee, S.W., Hyun, T.J., Lee, K.H., 2013. Measurement of Texture Depth of Pavement Using Potable Laser Profiler. In the Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 9, 2013.

Kogbara, R.B., Masad, E.A., Kassem, E., Scarpas A.T., 2018a. Skid Resistance Characteristics of Asphalt Pavements in Hot Climates. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(2), 04018015.

Kogbara, R.B., Masad, E.A., Kassem, E., Scarpas A.T., Anupam, K., 2016. A state of art review of parameters influencing measurements and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 114, 602–617, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>

Kogbara, R.B., Masad, E.A., Woodward, D., Millar, P., 2018b. Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. *Construction and Building Materials*, 166, 227–240.

Kokkalis, A., Panagouli, O., 1998. Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations. II: Surface Wear. *Chaos Solitons & Fractals*, 9(11), 1891-1899, doi: 10.1016/S0960-0779(98)00185-4.

Kotz, S., Nadarajah, S., 2000. *Extreme Value Distributions: Theory and Applications*. London: Imperial College Press.

Kouchaki, S., Roshani, H., Hernandez, J.B., Prozzi, J., 2018. Field Investigation of Relationship between Pavement Surface Texture and Friction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(40), 395–407.

Kowalski, K., Mcdaniel, R., Shah, A., Olek, J., 2017. Long-Term Monitoring of Noise and Frictional Properties of Three Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2127, 12–19.

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

Lamm, R., Psarianos, B., Choueiri, E.M., Soilemezoglou, G., 1995. A Practical Safety Approach to Highway Geometric Design International Case Studies: Germany, Greece, Lebanon, And the United States. *International Symposium on Highway Geometric Design Practice*, Boston, Massachusetts.

Leandri, P., Losa, M., Rocchio, P., 2018. New Low Noise Pavement Surfaces by the use of Crumb Rubber. In the Proceedings of the Euronoise conference, 2679-2686.



Li, Q.J., Yang, K., Wang, C., Zhan, Y., Wang, C., 2017. Novel macro-and microtexture indicators for pavement friction by using high-resolution three-dimensional surface data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2641(1), 164-176.

Li, Q.J., Zhan, Y., Yang, G., Wang, K.C.P., 2018. Pavement skid resistance as a function of pavement surface and aggregate texture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(10), 1159-1169.

Li, Q.J., Zhan, Y., Yang, G., Pittenger, D.M., Wang, K.C.P., 2019. 3D Characterization of Aggregates for Pavement Skid Resistance. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 145(2), 04019002.

Liu, Y., Fwa, T.F., Choo, Y.S., 2004. Effect of surface macrotexture on skid resistance measurements by the British pendulum test. *Journal of Testing and Evaluation*, 32(4), 304–309.

Lo Presti, D., 2013. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881.

Losa, M., Leandri, P., Bacci, R., 2008. Monitoring and Evaluating Performance Requirements of Flexible Road Pavements. *First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices*, 511–516.

Losa, M., Leandri, P., Bacci, R., 2007. Measurements of Pavement Macrotexture with Stationary and Mobile Profilometers. *Fifth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Park City.

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

Maeger, K.F., 2018. Enhancement of Network Level Macrotexture Measurement Practices through Deterioration Modeling and Comparison of Measurement Devices for Integration into Pavement Management Systems. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Blacksburg, VA.

Manke, N.D., Williams, R.C., Sotoodeh-Nia, Z., Cochran, E.W., Porot, L., Chailleux, E., Pouget, S., Olard, F., Del Barco Carrion, A.J., Planche, J.P., Lo Presti D., 2019. Performance of a sustainable asphalt mix incorporating high RAP content and novel bio-derived binder. *Road Materials and Pavement Design*, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1643769>

Martin, L.A, 2019. An analysis of early-life skid resistance of SMAs on the Scottish trunk road network. *Transportation Research Laboratory (TRL)*. Published project report PPR893, Scottish Road Research Board.

Masad, E., Luce, A., Mahmoud, E., Chowdhury, A., 2007. Relationship of Aggregate Texture to Asphalt Pavement Skid Resistance Using Image Analysis of Aggregate Shape. Final Report for Highway IDEA Project 114, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board, Washington, D.C.

Masad, E., Rezaei, A., Chowdhury, A., 2010. Field Evaluation of Asphalt Mixture Skid Resistance and Its Relationship to Aggregate Characteristics. Technical Report: September 2009–August 2010. Report 0-5627-3. Project Title: Aggregate Resistance to Polishing and Its Relationship to Skid Resistance, Texas Transportation Institute.

Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi M., Nejad. F.M, 2016. Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6, 537-565.

Mayora, J.M.P., Piña, R.J., 2009. An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions. *Accident Analysis & Prevention*, 41(4), 881–886.

McDaniel, R.S., Kowalski, K.J., Shah, A., 2012. Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement for Surface Mixtures. Publication FHWA/IN/JTRP-2012/03, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, doi: 10.5703/1288284314665.

McDonald, M.P., Crowley, L.G., Turochy, R.E., 2006. Investigation of seasonal variation in pavement friction using the datapave 3.0 database. In *Improving Pavements with Long-Term Pavement Performance: Products for Today and Tomorrow*, Paper 3, Publication No. HRT-06-109, Federal Highway Administration.

Medeiros, S., Underwood, S., Castorena, C., Rupnow, T., Rawls, M., 2016. 3D Measurement of Pavement Macrotecture Using Digital Stereoscopic Vision. In the Proceedings of the 95<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

Meegoda, J.N., Gao, S., 2015. Evaluation of pavement skid resistance using high speed texture measurement. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, 2(6), 382-390.

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

Miao, Y., Li, J., Zheng, X., Wang, L., 2016. Field investigation of skid resistance degradation of asphalt pavement during early service. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 313–320.

Mitchell, J., 2014. How to allow for seasonal effects when using skid resistance data. 4<sup>th</sup> Safer Roads International Conference, May 2014, Cheltenham, U.K.

Mogrovejo, D.E., Flintsch, G.W., Katicha, S., de Leon Izeppi, E., McGhee, K., 2016. Enhancing Pavement Surface Macrotecture Characterization by Using the Effective Area for Water Evacuation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2591, 80–93.

Mohammad, A., Kassem E., 2017. Evaluation of Adhesion and Hysteresis Friction of Rubber–Pavement System, *Applied Sciences*, 7(10), 1029, <https://doi.org/10.3390/app7101029>

Molenaar, A., 2010. Road Paving Materials, Part III – Asphaltic Materials, Delft University of Technology.

Moreno, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M., Rubio, M.C., 2013. The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. *Materials and Design* 47, 274–280, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.022>

Mulry, B., Brennan, M.J., Sheahan, J.N., 2012. A model for adjusting scrim skid resistance data to reflect seasonal variation. In the Proceedings of the 5<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitumen Congress, June 2012, Istanbul, p.14.

Nataadmadja, A., Wilson, D., Costello, S., Do, M.T., 2015. Correlating laboratory test methodologies to measure skid resistance of pavement surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2506 (1), 107-115.



Newcomb, D., 2002. Perpetual Pavements – a Synthesis. In Asphalt Pavement Alliance, Lanham, MD, USA, p.24.

Nikolaidis, A., 2002. Pavements – Materials – Quality control. 2<sup>nd</sup> Edition. ISBN: 960-91843-0-1.

Nordgren, T., Tykesson, A., 2012. Dense graded asphalt rubber in cold climate conditions. Presented at Asphalt Rubber 2012, Munich.

NZTA T10, 2013. Specification for state highway skid resistance management. New Zealand Transport Agency, NZTA T10 Specification: 2013.

O'Brien, J.P., Haddock, J.E., 2009. 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.

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

Oliver, J.W.H., 2003. Skid Resistance Presentation. Auckland, New Zealand: REAAA Roadshow.

Oliver, J.W.H., Tredrea, P.F., Pratt, D.N., 1988. Seasonal variation of skid resistance in Australia (Special Report No 37). Australian Road Research Board, Melbourne, Australia.

Omar, L.G., Halim, A. E., Ismail, K., 2017. Investigating the Predictability of Pavement Friction on Rural Roads in Ontario Canada. In the Proceedings of the 96<sup>th</sup> Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C, p.13.

Ozer, H., Yang, R., Al-Qadi, I.L., 2017. Quantifying sustainable strategies for the construction of highway pavements in Illinois. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51, 1-13.

Papadimitriou, E., Tselentis, D., Yannis, G., 2018. Analysis of Driving Behaviour Characteristics Based on Smartphone Data. In the Proceedings of 7<sup>th</sup> Transport Research Arena - TRA, April 2018, Vienna, Austria.

Pavement Preservation Compendium II, 2006. Federal Highway Administration - FHWA, U.S. Department of Transportation.

Pavement Preservation Compendium, 2003. Federal Highway Administration - FHWA, U.S. Department of Transportation.

Petraki, V., Ziakopoulos, A., Yannis, G., 2020. Combined impact of road and traffic characteristic on driver behavior using smartphone sensor data. Accident Analysis & Prevention, 144, 105657, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105657>

Pinto, A., Sousa, J., 2012. The first Brazilian experience with in situ field blend rubber asphalt. Presented at Asphalt Rubber 2012, Munich.

Plati, C., Pomoni, M., 2019. Impact of Traffic Volume on Pavement Macrotecture and Skid Resistance Long-Term Performance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2673(2), 314–322.

Plati, C., Georgouli, K., Loizos, A., 2014. Utilizing the seasonal variations of skid resistance to plan pavement preventive maintenance. In the Proceedings of the Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management, M. Losa, T. Papagiannakis (Eds), Pisa, 509-518.

Plati, C., Loizos, A., Stergiou, T., Pomoni, M., Papadimitriou, F., Drimeris, K., 2017b. Assessment of shotblasting moving speed for pavement preservation—a pilot-case study. In the Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017), CRC press, 1<sup>st</sup> edition, p.5, June 2017, Athens, Greece.

Plati, C., Pomoni, M., Georgouli, K., 2020a. Quantification of skid resistance seasonal variation in asphalt pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(2), 237 – 248.

Plati, C., Pomoni, M., Stergiou, T., 2017a. Development of Mean Profile Depth to Mean Texture Depth Shift Factor for Asphalt Pavements. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2641(1), 156–163.

Plati, C., Pomoni, M., Loizos, A., Yannis, G., 2020b. Stochastic prediction of short-term friction loss of asphalt pavements: a traffic dependent approach. In the Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9, Raab C. (eds), Lecture Notes in Civil Engineering, 76, 923-932, May 2020, Zurich, Switzerland, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2\\_86](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2_86)

Plati, C., Pomoni, M., Stergiou, T., 2019. From Mean Texture Depth to Mean Profile Depth: Exploring possibilities. In the Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements (7ICONFBMP), Nikolaidis & Manthos (eds), Taylor & Francis, 639-644, June 2019, Thessaloniki, Greece, DOI: 10.1201/9781351063265-86

Pomoni, M., Plati C., Loizos, A., 2020a. How Can Sustainable Materials in Road Construction Contribute to Vehicles' Braking? *Vehicles*, 2(1), 55-77.

Pomoni, M., Plati, C., Loizos, A., Yannis, G., 2020b. Investigation of pavement skid resistance and macrotexture on a long-term basis. *International Journal of Pavement Engineering*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1788029>

Pratico, F.G., Astolfi, A., 2017. A new and simplified approach to assess the pavement surface micro- and macrotexture. *Construction and Building Materials*, 148, 476-483.

Pratico, F.G., Vaiana, R., 2015. A study on the relationship between mean texture depth and mean profile depth of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 101(1), 72-79.

Prowell, B.D., Xie, H., Cooley, A.L., Powell, R.B., Hanson, D., 2003. Relationships between pavement friction and material properties at NCAT test track. In the Proceedings of the 82<sup>nd</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

Putra, A.D., Hadiwardoyo, S.P., Sumabrata, R.J., 2019. Skid resistance performance against temperature change of hot-mix recycled asphalt pavement with added crumb rubber. In the Proceedings of the AIP Conference, 2114(1), 04112-1 – 04112-8, <https://doi.org/10.1063/1.5112441>

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

RAA, 2008. Ed. German Road and Transportation Research Association. Committee, Geometric Design Standards, Guidelines for the Design of Freeways, (RAA), Germany.

Ragland, D.R., Oh, S.M., Chan, C.Y., 2010. Evaluation of traffic and environment effects on skid resistance and safety performance of rubberized open-grade asphalt concrete. Research Report: UCB-ITS-PRR-2010-14. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkley.

Rajaei, S., Chatti, K., Dargazany, R., 2017. A review: Pavement Surface Micro-texture and its contribution to Surface Friction. In the Proceedings of the 96<sup>th</sup> Transportation Research Board, Washington, D.C.

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

Rasmussen, R.O., 2013. Pavement Texture Fundamentals. CE News, 25(7), 48–50.

Rezaei, A. Masad, E., Chowdhury A., 2011. Development of a Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation. Technical Paper, Journal of Transportation Engineering, 137(12).

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

Roe, P.G., Lagarde-Forest, R. 2005. The early life skid resistance of asphalt surfaces. Published project report PPR060, copyright TRL Limited, p.46.

Rogers, M.P., Gargett, T., 1991. A Skidding resistance standard for the National Road Network. Highways and Transportation, 38(4), 10-13.

Sanders, P.D., McRobbie, S., Gopaldas, J., Viner, H.E, 2015. Development of a reference surface for the assessment of pavement skid resistance measurement devices. Published Project Report Ppr771, Transport Research Laboratory (TRL).

Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G., 2017. A laboratory and field evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement. Construction and Building Materials, 138, 232–239, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004>

Sengoz, B., Topal, A., Tanyel, S., 2012. Comparison of Pavement Surface Texture Determination by Sand Patch Test and 3D Laser Scanning. Periodica Polytechnica, 56(1), 73–78.

Serigos, P.A., de Fortier Smit, A., Prozzi, J.A., 2014. Incorporating surface microtexture in the prediction of skid resistance of flexible pavements. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 2457(1), 105-113.

Shmueli, G., Bruce, P.C., Yahav, I., Patel, N.R., Lichtendahl, Jr. K.C., 2018. Data Mining for Business Analytics Concepts, Techniques, and Applications in R. John Wiley & Sons, Inc.

Siriphun, S., Horpibulsuk, S., Chotisakul, S., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., 2019. Effect of cumulative traffic and statistical predictive modelling of field skid resistance. Road Materials and Pavement Design, 20(2), 426-439.

Skerritt, W.H., 1993. Aggregate Type and Traffic Volume as Controlling Factors in Bituminous Pavement Friction. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1418, 22-29.

Sohaney, R.C., Rasmussen, R.O., 2013. Pavement Texture Evaluation and Relationships to Rolling Resistance at MnROAD. Final Report MN/RC 2013–16. Minnesota Department of Transportation, Saint Paul.

Sotoodeh-Nia, Z., Manke, N., Williams, R.C., Cochran, E.W., Porot, L., Chailleux, E., Lo Presti, D., Carrión, A., Blanc, J., 2019. Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes – a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1661276>

Souza, R., 2005. Experiences with use of reclaimed rubber in asphalt within Europe. Presented at Rubber in Roads, Birmingham.

Srirangam, K., Anupam, K., Kasbergenb, C., Scarpas, A., 2017. Analysis of asphalt mix surface-tread rubber interaction by using finite element method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(4), 395-402.

Srirangam, K., Anupam, K., Scarpas, A., Kasbergenb, C., 2015. Development of a thermomechanical tyre-pavement interaction model. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(8), 721-729.

Sullivan, B.W., 2005. Development of a fundamental skid resistance asphalt mix design procedure. In the Proceedings of the International Surface Friction Conference: roads and runways: improving safety through assessment and design, May 2005, Christchurch, New Zealand, p.15.

Tang, Z.Z., 2007. Polissage et adhérence des chaussées routières. *Engineering Sciences [physics], École nationale des ponts et chaussées (France)*.

Transportation Safety Board of Canada, 2010. Runway Overrun (Aviation Investigation Report A10H0004). Trans States Airlines LLC, Embraer EMB-145LR N847HK, Ottawa/Macdonald-Cartier, International Airport, Ontario.

Tyfour, W.R., 2009. Tire Skid Resistance on Contaminated Wet Pavements. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 3(2), 119 – 124.

Ueckermann, A., Wang, D., Oeser, M., Steinauer, B., 2015. Calculation of skid resistance from texture measurements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(1), 3–16.

Vaiana, R., Capiluppi, G.F., Gallelli, V., Iuele, T., Minani, V., 2012. Pavement Surface Performances Evolution: An Experimental Application. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53(3), 1149-1160.

Vayalamkuzhi, P., Amirthalingam, V., 2016. Influence of geometric design characteristics on safety under heterogeneous traffic flow. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 3(6), 559-570, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.05.006>

Veerasamy, R., Rajak, H., Jain, A., Sivadasan, S., Varghese, C.P., Agrawal, R.K., 2011. Validation of QSAR Models - Strategies and Importance. *International Journal of Drug Design and Discovery*, 2(3), 511-519.

Villani, M.M., Artamendi, I., Kane M., Scarpas, A., 2011. Contribution of hysteresis component of tire rubber friction on stone surfaces. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2227, 153–162.

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

Vos, E., Bennis, T., Bouman, F., Kuijper, P., Voskuilen, J., Groenendijk, J., 2015. Skid resistance on national roads. Ministry of Infrastructure and the Environment-Rijkswaterstaat, Major Projects and Maintenance (RWS, GPO), the Netherlands.

Walsh, C., 2005. The UK Pavement Management System (UKPMS) user manual. Volume 3: Machine data collection for UKPMS, Chapter 11: GripTester.

Wambold, J., Antle, C., Henry, J., Rado, Z., Descornet, G., Sandberg U., Gothié, M., Huschek, S., 1995. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement. Final report, No. 01.04.T, Technical Committee on Surface Characteristics, World Road Association (PIARC), Paris.

Wang, D., Schacht, A., Schmidt, S., Oeser, M., Steinauer, B., 2014. Influence of the Testing Temperatures on Skid Resistance Measurements on Roads. In the Proceedings of the International Conference on Sustainable Civil Infrastructure (Geo-Hubei 2014), Hubei, China, 19-26, <https://trid.trb.org/view/1316575>

Wang, A., Shena, S., BoSong, X., 2019. Micro-surfacing mixtures with reclaimed asphalt pavement: Mix design and performance evaluation. Construction and Building Materials, 201, 303-313, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.164>

Wang, D., Chen, X., Yin, C., Oeser, M., Steinauer, B., 2013. Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface. Wear, 308(1-2), 71-78, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.09.013>

Wang, D., Liu, P., Wang, H., Ueckermann, A., Oeser, M., 2017. Modeling and testing of road surface aggregate wearing behaviour. Construction and Building Materials 131, 129-137, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.075>

Wang, D., Zhang, Z., Kollmann, J., Oeser, M., 2020. Development of aggregate micro-texture during polishing and correlation with skid resistance. International Journal of Pavement Engineering, 21(5), 629-641.

Wesolowski, M., Blacha, K., 2019. Evaluation of airfield pavement micro and macrotexture in the light of skid resistance (friction coefficient) measurements. MATEC Web of Conferences, 262, 05017.

White, G., Ward, C., Jamieson, S., 2019. Field evaluation of a handheld laser meter for pavement surface macro texture measurement. International Journal of Pavement Engineering, <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1654103>

Williams, B.A., Copeland, A., Ross, T.C., 2018. Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2018. National Asphalt Pavement Association, Final Report, January-December 2018, Report No. Information Series 138(9e) (9th edition).

Wilson, D., Dunn, R., 2009. Normalising skid resistance measurements to analyse road geometric elements by timeslices. Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, 18(2), 3-14.

Wilson, D., Jacobsen, B., Chan, W., 2013. The effect of road roughness (and test speed) on GripTester measurements. Research report 523NZ, Transport Agency.

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

Wilson, D.J., 2013. The effect of rainfall and contaminants on road pavement skid resistance. Research report – 515, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Auckland, New Zealand.

World Health Organization, 2018. World health statistics 2018.

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

Xie, X., Wang, C., Wang, D., Fan, Q., Oeser, M., 2019. Evaluation of Polishing Behavior of Fine Aggregates Using an Accelerated Polishing Machine with Real Tires. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 145(2), 04019015.

Xie, X., Lu, G., Liu, P., Zhou, Y., Wang, D., Oeser, M., 2018. Influence of temperature on polishing behaviour of asphalt road surfaces. Wear, 402–403, 49-56.

Yaacob, H., Hassan, N.A., Hainin, M.R., Rosli, M.F., 2014. Comparison of Sand Patch Test and Multi Laser Profiler in Pavement Surface Measurement. Journal Teknologi (Sciences & Engineering), 70(4), 103-106.

Yan, B., Mao, H., Zhong, S., Zhang, P., Zhang, X., 2019. Experimental Study on Wet Skid Resistance of Asphalt Pavements in Icy Conditions. Materials, 12(8), 1201, doi:10.3390/ma12081201.

Yu, B., Nunn, M., 2006. The European Approach to Long Lasting Asphalt Pavements: A state-of-the-art review by ELLPAG. Presented at ORITE International Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio (USA), p55.

Yu, M., Wu, G., Kong, L., Tang Y, 2017. Tire-Pavement Friction Characteristics with Elastic Properties of Asphalt Pavements. Applied Sciences, 7, 1123, doi:10.3390/app7111123

Yu, M., You, Z., Wue, G., Kong, L., Liu, C., Gao, J., 2020. Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review. Construction and Building Materials, 260, 119878, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119878>

Yu, X., Zaumanis, M., Dos Santos, S., Poulidakos, L., 2014. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. Fuel, 135, 162–171.

Zhu, S., Liu, X., Cao, Q., Huang, X., 2017. Numerical Study of Tire Hydroplaning Based on Power Spectrum of Asphalt Pavement and Kinetic Friction Coefficient. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 1-11, doi:10.1155/2017/5843061

ZTV Asphalt-StB 07, 2007. Additional technical terms of contract and guidelines for the construction of road surfacing from asphalt. German Roads and Transportation Research Association, the “Asphalt constructions” working group, [German designation: ZTV Asphalt-StB 07].

Zuniga-Garcia, N., Prozzi, J.A, 2019. High-Definition Field Texture Measurements for Predicting Pavement Friction. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 2673(1), 246-260.

---

ΠΕΤΕΠ 05-03-11-04, 2016. Μέρος 4: Στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης (κλειστού τύπου). ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ, Αρχική Έκδοση - Μάιος 2006, 1<sup>η</sup> Αναθεώρηση – Ιανουάριος 2016.