



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών & Συγκοινωνιακής Υποδομής
Εργαστήριο Οδοποιίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΟΧΙΑΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ
ΟΛΙΣΘΗΡΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΣΦΑΛΤΟΤΑΠΗΤΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΣΚΛΑΒΟΥΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κλείνει ένα κομμάτι της ζωής μου και θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με στήριξαν καθ'όλη την διάρκεια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Λοΐζο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και για τις συμβουλές που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκειά της.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Πομόνη για την πολύτιμη βοήθειά της, για την υποστήριξη αλλά και για τον χρόνο που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια διεκπεραίωσης και συγγραφής της εργασίας. Ακόμα, ευχαριστώ τα άτομα του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ και ειδικά τον Brad Cliatt για την βοήθεια τους στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, οικονομική και ψυχολογική.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιφάνεια των οδοστρωμάτων θα πρέπει να παρέχει ικανοποιητική αντιολισθητική ικανότητα για όλες τις συνθήκες που επικρατούν έτσι ώστε να παρέχεται ικανοποιητικό επίπεδο οδικής ασφάλειας. Ωστόσο η παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα σε μία οδό επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η κυκλοφορία που διέρχεται και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Εξαιτίας της πληθώρας των παραγόντων επιρροής η διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας αποτελεί πολυπαραμετρική διαδικασία. Θεωρείται όμως σημαντικό να διενεργείται ποσοτικοποίηση των παραγόντων επίδρασης έστω μεμονωμένα για να αξιολογηθεί η επίδραση του εκάστοτε παράγοντα. Ακόμη, η ανάγκη για μείωση της χρήσης των φυσικών πόρων στην κατασκευή οδοστρωμάτων (συμβατικών υλικών) απαιτεί από τους μηχανικούς να στραφούν σε άλλα υλικά μη συμβατικά υλικά και να μελετήσουν την συμπεριφορά τους σε σχέση με τα συμβατικά. Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ορίζονται και ποσοτικοποιούνται παράγοντες που σχετίζονται με τις εποχιακές μεταβολές της αντιολισθητικής ικανότητας σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον αξιοποιώντας τόσο συμβατικά όσο και εναλλακτικά υλικά. Δηλαδή, σε εργαστηριακές συνθήκες διερευνάται η επίδραση της θερμοκρασίας, και η ύπαρξη νερού και κατάλοιπων σκόνης που θεωρούνται βασικοί παράγοντες των εποχιακών διακυμάνσεων. Οι επιφάνειες οδοστρωμάτων που εξετάστηκαν εργαστηριακά αποτελούνταν από εναλλακτικά - ανακυκλώσιμα υλικά (Reclaimed Asphalt Pavement – RAP) πέρα των συμβατικών (Hot Mix Asphalt Concrete - HMA). Οπότε, στο πλαίσιο της διερεύνησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αντιολισθητικής ικανότητας υπό την επίδραση των παραγόντων που προσομοιάστηκαν. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν κατάλληλα ώστε να αναδειχθεί τόσο η επίδραση των παραγόντων που εξετάστηκαν όσο και η χρήση ανακυκλώσιμων υλικών αναφορικά με την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα ανέδειξαν την σημαντική επίδραση τόσο της θερμοκρασίας όσο και των κατάλοιπων σκόνης-νερού στα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας. Αναφορικά με τη χρήση ανακυκλώσιμου ασφαλτομίγματος, διαπιστώθηκε ότι δεν επηρέαζε αρνητικά τα επίπεδα αντιολισθητικής ικανότητας και συνεπώς, θεωρήθηκε θετική η ενσωμάτωσή του στο ασφαλτόμιγμα.

Abstract

Pavements should provide adequate skid resistance at all conditions so as to ensure a satisfactory level of road safety. However, pavement skid resistance is affected by various factors such as traffic that passes over the surface and the seasonal changes. Due to the multitude of affecting factors, the investigation of skid resistance is a multi-parametric process. However, it is considered important to quantify such factors, even individually, in order to evaluate their effect on skid resistance performance. Furthermore, the need to reduce the use of natural resources in road construction (conventional materials) requires engineers to think of non-conventional, sustainable materials and study their behavior in comparison to the conventional ones. Thus, in the present thesis, factors related to the seasonal changes are simulated and investigated in a controlled laboratory environment, for both conventional and sustainable pavement materials. Hence, under the framework of the conducted investigation, the effect of temperature and the existence of water and dust on pavement surface are analysed as being some key factors in seasonal fluctuations. The pavement surfaces that were fabricated and tested in the laboratory premises were made of the sustainable material Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) the conventional Hot Mix Asphalt (HMA) concrete. Skid resistance measurements were performed on the fabricated pavement specimens to quantify the effect of the simulated conditions. The measurements were properly analysed to figure out the effect of the simulated factors on skid resistance levels and the potential influence in using the sustainable RAP material in the asphalt mixture. Study findings showed that temperature and water-dust existence on pavement surfaces influence the provided skid resistance levels. Regarding though the use of sustainable materials, there was no evidence for negative effect in the skid resistance at all simulated conditions, an issue that can enhance the potentials in integrating this sort of materials in asphalt mixture.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
1.1	Γενικά	7
1.2	Στόχος και Μεθοδολογία	7
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	8
2	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΤΑΠΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	9
2.1	Χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος.....	9
2.2	Διαφορετικά υλικά ασφαλτομιγμάτων.....	11
2.2.1	Χρήση ΗΜΑ.....	11
2.2.2	Χρήση RAP.....	11
2.3	Αντιολισθητική ικανότητα.....	15
3	ΣΗΜΑΣΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ	16
3.1	Κατάσταση οδοστρωμάτων και οδική ασφάλεια.....	17
3.1.1	Έρευνες πεδίου	19
3.1.2	Έρευνες με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων	19
4	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	21
5	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ.....	27
5.1	Επιφανειακή υφή	27
5.2	Λειτουργικές παράμετροι οχήματος.....	29
5.3	Ιδιότητες των ελαστικών	29
5.4	Περιβαλλοντικοί παράγοντες	30
5.4.1	Θερμοκρασία	30
5.4.2	Νερό	31
5.4.3	Χιόνι – πάγος.....	34
5.4.4	Κατάλοιπα οδοστρώματος	35
5.5	Εποχιακές Μεταβολές.....	36
6	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	39
6.1	Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής.....	39
6.2	Επιφανειακή υφή	45
6.3	Όργανο μέτρησης του συντελεστή τριβής.....	48
6.4	Μετρήσεις μακροϋφής	49
7	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	51

7.1	Κατασκευή μιγμάτων και πλακών	51
7.2	Μεθοδολογία για την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας	61
7.3	Μεθοδολογία για την διερεύνηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων ...	61
8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	64
8.1	Επίδραση θερμοκρασίας.....	64
8.2	Επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων	69
8.3	Μετρήσεις μακροϋφής	75
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	78
9.1	Συμπεράσματα	78
9.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	80
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Γενικά

Η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την οδική ασφάλεια που μπορεί να παρέχεται από μία οδό. Η πρόκληση ατυχημάτων σε μία οδό ωστόσο, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες εκ των οποίων οι φορείς διαχείρισης της οδικής ασφάλειας μπορούν να ελέγξουν κυρίως μόνο αυτούς που σχετίζονται με την οδική υποδομή. Έτσι, αναφορικά με την επιφάνεια των οδοστρωμάτων θα πρέπει να παρέχεται ικανοποιητική αντιολισθητική ικανότητα για όλες τις συνθήκες που επικρατούν, η οποία όμως επηρεάζεται από τον τύπο και την σύνθεση του ασφαλτομίγματος, τις συνθήκες διάστρωσής του, την κυκλοφορία, τις περιβαλλοντικές και καιρικές συνθήκες, τις χρήσεις γης κλπ. Για τον λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητο για τη μελέτη-διερεύνηση της αντιολισθητικής ικανότητας να ποσοτικοποιηθούν όλοι οι παράγοντες επίδρασης. Η μελέτη αυτή ιδανικά θα έπρεπε να γίνει τόσο μεμονωμένα για τον εκάστοτε παράγοντα επίδρασης έτσι ώστε να γίνει αντιληπτός ο μηχανισμός δράσης του, όσο και συγκεντρωτικά καθώς ο συνδυασμός όλων επηρεάζει διαφορετικά την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα σε μία οδό. Η ποσοτικοποίηση αυτή συμπεριλαμβάνει τις εποχιακές μεταβολές οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε όλη την έκταση του πλανήτη και επηρεάζουν αντίστοιχα τις συνθήκες που επικρατούν στα οδικά έργα και κατ' επέκταση στα οδοστρώματα. Αναπόσπαστα κομμάτια των εποχιακών μεταβολών είναι τόσο η θερμοκρασία όσο οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Βέβαια η ποσοτικοποίηση αυτή πρέπει να είναι εκσυγχρονισμένη και εναρμονισμένη με την τεχνολογία αλλά και τις ανάγκες της εποχής.

Στις ημέρες μας πέρα από τη χρήση συμβατικών υλικών για την κατασκευή των οδοστρωμάτων έχει ενισχυθεί η μελέτη και η χρήση εναλλακτικών ή και ανακυκλώσιμων υλικών. Τα υλικά αυτά μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά ή μέρος αυτών στο ασφαλτόμιγμα χωρίς να επηρεάσουν άμεσα τη συμπεριφορά τους κατά τη λειτουργία των οδών. Οι περισσότερες έρευνες ωστόσο, έως τώρα, όπως είναι λογικό εστιάζουν κυρίως στα δομικά χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν μη συμβατικά υλικά. Όμως και η λειτουργική συμπεριφορά τους αποτελεί ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον στοιχείο, κυρίως η αντιολισθητική ικανότητα τους, όταν αξιοποιούνται για την ανώτερη ασφατική στρώση, δεδομένης της σύνδεσής της με την οδική ασφάλεια. Ένα από αυτά τα υλικά και ίσως το πιο δημοφιλές έως τώρα, είναι το επαναχρησιμοποιούμενο ασφαλτόμιγμα ή όπως είναι γνωστό διεθνώς - RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) η σύσταση του οποίου δύναται για χρήση σε νέο ασφαλτόμιγμα, υπό συγκεκριμένες πάντα συνθήκες. Το υλικό αυτό προσφέρεται για την επίτευξη των προσπαθειών που γίνονται για την προστασία του των φυσικών πόρων. Συγκριτικά με το HMA (Hot Mixture Asphalt) οι δυνατότητες του οποίου είναι αναγνωρισμένες, το RAP αποτελεί ένα υλικό το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει μερικώς το HMA κάτω από ειδικό σχεδιασμό και αφού γίνει περαιτέρω έρευνα για να συγκεκριμενοποιηθούν οι λειτουργικές ιδιότητές - δυνατότητές του.

Όλα τα παραπάνω συνάδουν στην ανάγκη για την κατανόηση της συμπεριφοράς της αντιολισθητικής ικανότητας υπό διάφορες καιρικές συνθήκες, λαμβάνοντας όμως υπόψη και την ανάγκη για την αξιοποίηση μη συμβατικών υλικών όπως το RAP. Βασικό γνώμονα αυτών των ενεργειών αποτελεί η βελτιστοποίηση της οδικής ασφάλειας για την οποία έχουν γίνει και συνεχίζονται να διεξάγονται έρευνες.

1.2 Στόχος και Μεθοδολογία

Δεδομένων των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εργαστηριακή ποσοτικοποίηση των εποχιακών μεταβολών και η επίδρασή τους στην αντιολισθητική ικανότητα, καθώς και

η συγκριτική αξιολόγηση των συμβατικών ΗΜΑ ασφαλτομιγμάτων με εκείνα που περιέχουν RAP. Συγκεκριμένα, η εν λόγω εργασία στοχεύει στη μεμονωμένη ποσοτικοποίηση, σε εργαστηριακό περιβάλλον, κάποιων βασικών παραγόντων επίδρασης στην αντιολισθητική ικανότητα όπως είναι η θερμοκρασία και η ύπαρξη κατάλοιπων σκόνης και νερού στην επιφάνεια. Πέρα όμως από τη χρήση συμβατικών υλικών δίνεται έμφαση στην αξιοποίηση RAP και διερευνάται συγκριτικά η συμπεριφορά των υλικών. Συνεπώς, ο στόχος της εργασίας είναι διττός διότι αφενός μελετάται η επίδραση των εποχικών μεταβολών στην αντιολισθητική ικανότητα σε συνθήκες εργαστηρίου παρέχοντας σαφή εικόνα για φαινόμενα που συμβαίνουν στο πεδίο. Αφετέρου, η ένταξη RAP ενισχύει την έρευνα στη χρήση εναλλακτικών υλικών απαντώντας αναφορικά με την αποτελεσματικότητα τους ως υλικά της ανώτερης ασφαλικής στρώσης.

Για να επιτευχθεί ο στόχος, στο πλαίσιο της εργασίας γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς πρακτικής και εμπειρίας, έτσι ώστε να γίνουν κατανοητοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την τριβή του οδοστρώματος και οι μέθοδοι με τους οποίους μετράται. Ακόμα, περιγράφεται ο μηχανισμός της αντιολισθητικής ικανότητάς και οι παράγοντες επίδρασής. Δίνεται μια σύντομη περιγραφή στα χαρακτηριστικά του RAP. Έπειτα, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο όπου κατασκευάστηκαν πλάκες ασφαλτομίγματος στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ. Τέλος, μέσω μέτρησης της τριβής θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα για την επίδραση των εποχιακών μεταβολών και του ανακυκλώσιμου υλικού (RAP) στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Πέραν του παρόντος κεφαλαίου η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κύρια κεφάλαια που περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει εισαγωγικές έννοιες αναφορικά με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος και ορίζονται τις ιδιότητες διαφορετικών ασφαλτομιγμάτων (ΗΜΑ και RAP). Επιπλέον, γίνεται εκτενής περιγραφή της αντιολισθητικής ικανότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η σημασία διερεύνησης της αντιολισθητικής ικανότητας και πως αυτή επηρεάζει την οδική ασφάλεια με τη μείωση του συντελεστή τριβής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο μηχανισμός της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος, δηλαδή οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της διεσπάρης ελαστικού-οδοστρώματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο τρόπος που, οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος, οι ιδιότητες των ελαστικών, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και οι εποχιακές μεταβολές επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Το έκτο κεφάλαιο αφορά τα συστήματα μέτρησης τόσο της επιφανειακής υφής όσο και της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος. Ακόμα σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι και οι συσκευές μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν στην πειραματική διαδικασία.

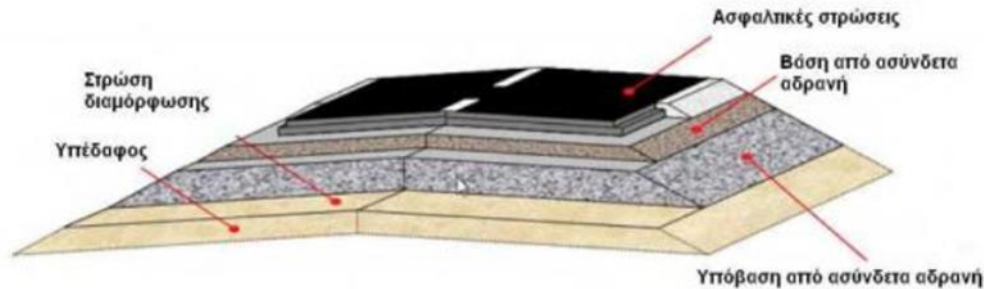
Το έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Αναλυτικά καταγράφεται η διαδικασία κατασκευής των ασφαλτομιγμάτων και των πλακών, η μεθοδολογία για την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και η μεθοδολογία διερεύνησης της επίδρασης της ύπαρξης κατάλοιπων και νερού στην αντιολισθητική ικανότητα. Δηλαδή, γίνεται προσπάθεια ποσοτικοποίησης των εποχιακών μεταβολών.

Στο όγδοο κεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Με διαγράμματα και πίνακες τεκμηριώνεται η επίδραση των ανακυκλώσιμων υλικών και τον θερμοκρασιακών μεταβολών στην αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρώματων.

Στο ένατο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΤΑΠΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικού πάχους και υλικών έτσι ώστε να κατανέμονται οι τάσεις που προκαλούνται από τα κυκλοφοριακά φορτία ομοιόμορφα στο έδαφος. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι βασικές στρώσεις των εύκαμπτων οδοστρωμάτων που είναι η υπόβαση, η βάση και οι ασφαλτικές στρώσεις.



Εικόνα 1. Στρώσεις εύκαμπτου οδοστρώματος (European Asphalt Pavement Association, 2018)

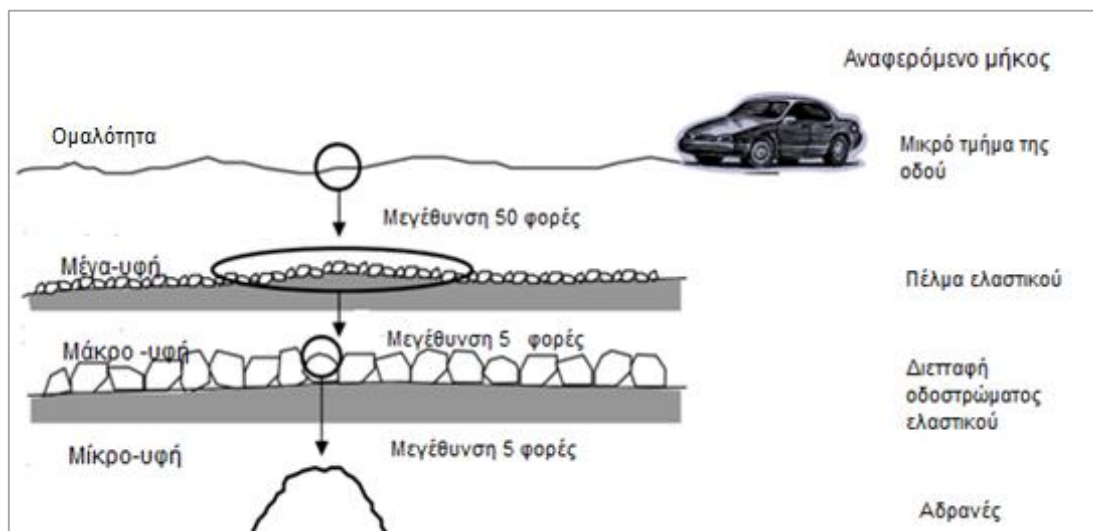
Η υπόβαση η οποία εδράζεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο υπέδαφος αποτελείται συνήθως από θραυστά η συλλεκτά αδρανή. Η βάση αποτελείται από θραυστά αδρανή καλύτερης ποιότητας και κατάλληλης διαβάθμισης (Yoder & Witczak, 1975). Αυτές οι δύο στρώσεις είναι καθοριστικές για τη δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος. Οι ασφαλτικές στρώσεις έχουν πολύ μικρότερο πάχος από την βάση και την υπόβαση με μεγαλύτερο όμως μέτρο ελαστικότητας. Έτσι η ασφαλτική βάση συμβάλει στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Η επιφανειακή ασφαλτική στρώση θα πρέπει να παρέχει μία αδρή επιφάνεια η οποία έρχεται σε επαφή με την κυκλοφορία με καλή αντιστοιχιστική ικανότητα και επιφανειακή υφή, ώστε να συμβάλει στην ασφάλεια των χρηστών. Επίσης, η επιφανειακή στρώση είναι άμεσα συννεφιασμένη με την έντασή του θορύβου που προκαλείται από την διεπαφή του οδοστρώματος και των ελαστικών των κινουμένων οχημάτων (Yoder & Witczak, 1975).

2.1 Χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος

Η επιφάνεια των οδοστρώματος εμφανίζει αποκλίσεις από μία λεία και επίπεδη επιφάνεια χάρη στα υλικά κατασκευής της. Οι εν λόγω αποκλίσεις χαρακτηρίζουν την επιφανειακή υφή του οδοστρώματος και είναι πολύ σημαντικές για την ασφαλή κυκλοφορία των οχημάτων. Η επιφανειακή υφή διακρίνεται σε τρεις διαφορετικές κλίμακες (Permanent International Association of Road Congresses PIARC, 1987) που εξαρτώνται τόσο από τη διαφορά μήκος κύματος (λ) αλλά και από τη διάφορα του ύψους των ανωμαλιών (A). Οι τρεις κλίμακες είναι οι εξής :

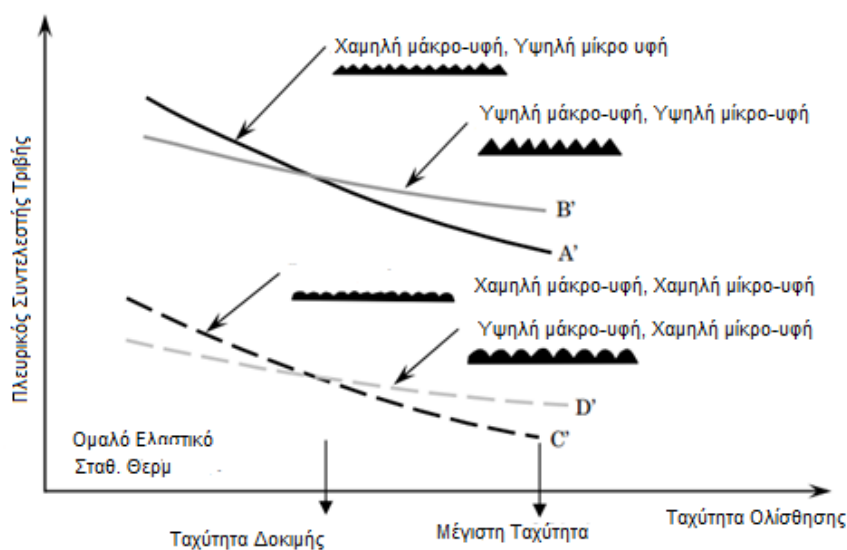
1. Μικροϋφή ($\lambda < 0,5 \text{ mm}$, $1 < A < 500 \mu\text{m}$). Φαίνεται σε μικροσκοπικό επίπεδο και είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις επιφανειακές ιδιότητες των αδρανών που εμπεριέχονται στο ασφαλτόμιγμα ή στο μίγμα του σκυροδέματος.
2. Μακροϋφή ($0,5 < \lambda < 50 \text{ mm}$, $0,1 < A < 20 \text{ mm}$). Η ποιότητα τραχύτητας της επιφάνειας, ορίζεται από τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος (σχήμα, μέγεθος και διαβάθμιση των αδρανών)
3. Μέγα-υφή ($50 < \lambda < 500 \text{ mm}$, $0,1 < A < 50 \text{ mm}$). Υφή με αποκλίσεις της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διεπαφή ελαστικού-οδοστρώματος.

Αποκλίσεις μεγαλύτερες από το ανώτατο όριο (500 mm μέγα-υφής) ορίζονται ως ομαλότητα. Στο σχήμα 1 φαίνονται οι τρεις περιοχές υφής, καθώς και η ομαλότητα, που αντιπροσωπεύουν αποκλίσεις μεγαλύτερες από το ανώτατο όριο (Permanent International Association of Road Congresses PIARC, 1987).



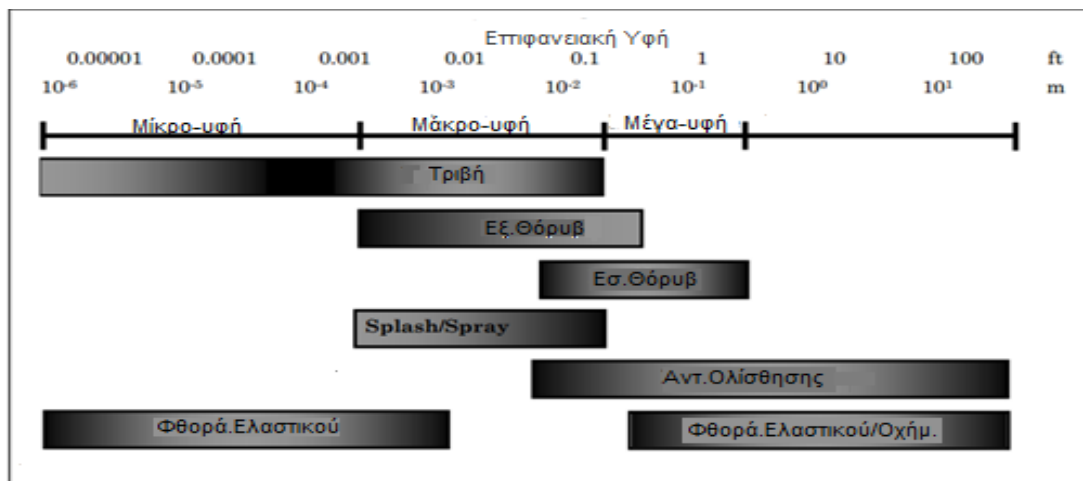
Σχήμα 1 Κλίμακες επιφανειακής υφής και ομαλότητα οδοστρώματος (Sandburg, 1998)

Σο διάγραμμα 1 απεικονίζονται οι επιδράσεις της μικροϋφής, της μακροϋφής και της ταχύτητας στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Όπως γίνεται κατανοητό, η μικροϋφή επηρεάζει το μέγεθος της τριβής των ελαστικών, ενώ η μακροϋφή επηρεάζει την τριβή σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Σε χαμηλές ταχύτητες, η μικροϋφή κυριαρχεί στην εμφάνιση της τριβής και για στεγνό, αλλά και για υγρό οδόστρωμα. Σε υψηλότερες ταχύτητες, η παρουσία της μακροϋφής διευκολύνει την αποστράγγιση του νερού έτσι ώστε να διευκολύνεται η επαφή της μικροϋφής με τα ελαστικά όταν το ύψος νερού είναι χαμηλότερα από τις επιφανειακές προεξοχές των ανώτερων αδρανών (Flintsch et al., 2002).



Διάγραμμα 1. Η επίδραση της μικροϋφής και μακροϋφής στην διεπαφή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος σε διαφορετικές ταχύτητες (Flintsch et al., 2002)

Είναι γνωστό ότι η επιφανειακή υφή του οδοστρώματος επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (PIARC, 1987) με τη μορφή διάφορων παραμέτρων. Στο σχήμα 2 (Henry 2000, Sandburg και Ejsmont 2002) φαίνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ οχήματος και οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένου της τριβής, του θορύβου και του φαινομένου 'Splash' και 'Spray', την αντίσταση στην κύλιση και την φθορά των ελαστικών. Όπως φαίνεται, η τριβή πρωτίστως επηρεάζεται από την μικροϋφή και την μακροϋφή όπου παρουσιάζονται οι τριβές πρόσφυσης και υστέρησης αντίστοιχα.



Σχήμα 2. Οι αποκλίσεις της υφής του οδοστρώματος και πως επηρεάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (Henry, 2000 και Sandburg και Ejsmont, 2002)

2.2 Διαφορετικά υλικά ασφαλτομιγμάτων

Οι ασφαλτικές στρώσεις έχουν καθοριστικό ρόλο στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Οι ιδιότητες του ασφαλτομίγματος καθορίζουν την επιφανειακή υφή και συνεπακόλουθα την αντιολισθητική ικανότητα. Τα ασφαλτομίγματα αποτελούνται από το συνδετικό υλικό (άσφαλτος), τα αδρανή τα οποία μπορεί να είναι θραυστά ή επα-ναεπεξεργασμένα και ποσοστό αέρα (κενά αέρα). Έτσι προκύπτουν διάφορα είδη ασφαλτομιγμάτων, τα οποία παράγονται είτε χρησιμοποιώντας συμβατικά υλικά είτε εναλλακτικά. Παρακάτω παρουσιάζεται το Hot Mixture Asphalt (HMA) που αποτελεί βασικό είδος ασφαλτομίγματος και αποτελείται από συμβατικά υλικά αλλά και εναλλακτικά αξιοποιώντας επαναχρησιμοποιούμενη ποσότητα παλαιού ασφαλτομίγματος και είναι γνωστό με την ορολογία Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

2.2.1 Χρήση HMA

Το ασφαλτόμιγμα τύπου HMA αποτελείται κυρίως από θραυστά αδρανή και πετρελαϊκή άσφαλτο. Σημαντικά βέβαια είναι τα ποσοστά κενών, δηλαδή ο όγκος που καταλαμβάνει ο αέρας στο συνολικό όγκο του μίγματος. Η άσφαλτος είναι το συνδετικό υλικό που δίνει στο μίγμα συνοχή και ομοιομορφία. Είναι ιξωδοελαστικό υλικό και η συμπεριφορά της επηρεάζεται από την θερμοκρασία και τον χρόνο φόρτισης. Επειδή δίνει στο μίγμα ιξωδοελαστική συμπεριφορά είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί ο τύπος και η ποιότητα της. Η ποσότητα της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα κυμαίνεται μεταξύ 3,8%- 5,3% ανάλογα την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Τα θραυστά αδρανή από την άλλη αποτελούν το δομικό υλικό του ασφαλτομίγματος και του δίνουν αντοχή και ανθεκτικότητα. Λόγω της σημαντικότητας αυτής πρέπει να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους μέσω δοκιμών. Οι κυριότερες είναι, η δοκιμή με τη συσκευή Los Angeles, η δοκιμή του ισοδύναμου άμμου, η δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (Λοΐζος 2011).

2.2.2 Χρήση RAP

Το ασφαλτόμιγμα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί σε νέα οδοστρώματα με ικανοποιητικό τρόπο και σε μεγάλα ποσοστά. Το ποσοστό αυτό όμως δεν είναι αρκετά μεγάλο στις ασφαλτικές στρώσεις. Παρά τα πλεονεκτήματα που παρέχει, σε αρκετές χώρες παραμένει περιορισμένη η χρήση της λόγω νομοθετικών αλλά και τεχνικών περιορισμών (Lo Presti et.al 2016).



Εικόνα 2. Επαναχρησιμοποιημένο ασφαλτόμιγμα - Reclaimed Asphalt Pavement



Εικόνα 3. Μονάδα παραγωγής RAP

Η έλλειψη πρώτων υλών για την κατασκευή αλλά και τη συντήρηση οδών, σε συνδυασμό με τις μεγάλες δυνατότητες που παρουσιάζει το επαναχρησιμοποιούμενο ασφαλτόμιγμα (Reclaimed Asphalt-RA), ενθαρρύνουν την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων με υψηλό ποσοστό RA (Stimilli et al., 2016). Γι' αυτό το σκοπό γίνονται μεγάλες προσπάθειες για την κατανόηση του τρόπου ανακύκλωσης απευθείας από την επιφάνεια του οδοστρώματος χωρίς να υποβαθμιστεί η ανακυκλωμένη άσφαλτος (ReRoad.fehrl.org, 2013). Ωστόσο το ποσοστό της RA παραμένει σε χαμηλά ποσοστά στα νέα ασφαλτόμιγμα εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων και επιδόσεων που έχει ένα νέα οδόστρωμα (West et al., 2016). Παρά τα πλεονεκτήματα της RA σε πολλές χώρες η χρήση της είναι περιορισμένη λόγω νομοθετικών και τεχνικών ζητημάτων. Τέτοια είναι: η μεταβλητότητα που έχουν οι ιδιότητες της RA, η άγνωστη προέλευση της, οι αβεβαιότητες της απόδοσης του ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος και η έλλειψη θεμελιώδους κατανόησης ορισμένων μηχανισμών που εμπλέκονται κατά την ανάμιξη της RA με τα συστατικά του νέου ασφαλτομίγματος.

Γενικά ένα υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας RA σε νέα ασφαλτομίγματα θεωρείται 20%-30% κατά βάρος ανάλογα με τις χώρες και την ποιότητα της (Austroads, 2015). Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες σχετικά με το αν είναι εφικτή ή όχι η αύξηση του ποσοστού αυτού (Sabouri et al., 2015a, 2015b, Doyle and Howard, 2010, Maurin et al., 2008). Ξεκινώντας με χαμηλές αυξήσεις ο Maurin et al. (2008) ανέφερε τα αποτελέσματα των δοκιμών για ασφαλτομίγματα που περιείχαν RA σε ποσοστό 21%-30%, παραγόμενα σε εργαστηριακές συνθήκες. Έδειξε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ασφαλτομιγμάτων που περιείχαν μεγαλύτερο ποσοστό RA και των ασφαλτομιγμάτων ελέγχου για την κόπωση και την ευαισθησία στην υγρασία. Ακόμα η αύξηση της RA έδειξε αύξηση στη θερμοκρασία εξομάλυνσης (grading) κατά έναν με δύο βαθμούς κάτι το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος και στις χαμηλές θερμοκρασίες εξομάλυνσης. Τα ίδια δείγματα μελετήθηκαν αργότερα από τον Apeagyei et al.

(2013) για να ελέγξει αν η υψηλή περιεκτικότητα σε RA επηρεάζει την δυσκαμψία του μίγματος, διαπιστώνοντας ότι το υψηλό ποσοστό (30%) RA δεν είχε σημαντική επίδραση.

Αρκετές μελέτες έδειξαν ότι το κλειδί για την αύξηση του ποσού της RA είναι ένας σχεδιασμός ισορροπημένου μίγματος (Canon Falla et al., 2015, Bueche et al., 2016). Από την άποψη αυτή, ο Zhou et al. (2011) ανέπτυξε έναν ισορροπημένο σχεδιασμό για μίγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RA για επιφανειακές ασφατικές στρώσεις, βασιζόμενος στην αλλαγή του συνδετικού υλικού για την βελτιστοποίηση της μέγιστης πυκνότητας. Για την επιβεβαίωση του σχεδιασμού (Zhou et al. 2011), κατασκευάστηκαν δύο τμήματα με χρήση μιγμάτων σε ποσοστό 35% RA, σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή σε διαφορετικές τοποθεσίες. Το γενικό συμπέρασμα από τη μελέτη ήταν ότι τα μίγματα με υψηλό ποσοστό σε RA έχουν την ίδια ή και καλύτερη επίδοση σε σχέση με τα μίγματα που περιέχουν νέα υλικά, αλλά πρέπει να είναι καλά σχεδιασμένα, ακολουθώντας κατάλληλες μεθόδους σχεδιασμού ανάμειξης.

Προχωρώντας περισσότερο στην αύξηση του περιεχομένου RA, οι Doyle και Howard (2010) μελέτησαν μίγματα με ποσοστά RA 25% και 50% λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση προσθέτων για την παραγωγή θερμών τεχνολογιών. Εξετάστηκε η ανθεκτικότητα, οι ρωγμές, και η φθορά από την υγρασία των μιγμάτων και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση υψηλού RA σε ασφατικές στρώσεις θα ήταν εφικτή χωρίς να επηρεάζεται δυσμενώς η επίδοση των μιγμάτων. Ακόμα Ο Celauro et al. (2010) διενήργησε άλλη έρευνα για μίγματα (επιφανειακών στρώσεων) με 50% περιεκτικότητα σε RA καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι με τον κατάλληλο σχεδιασμό και για απαίτηση υψηλών επιδόσεων, τόσο μεγάλα ποσοστά RA θα μπορούσαν να επιτευχθούν.

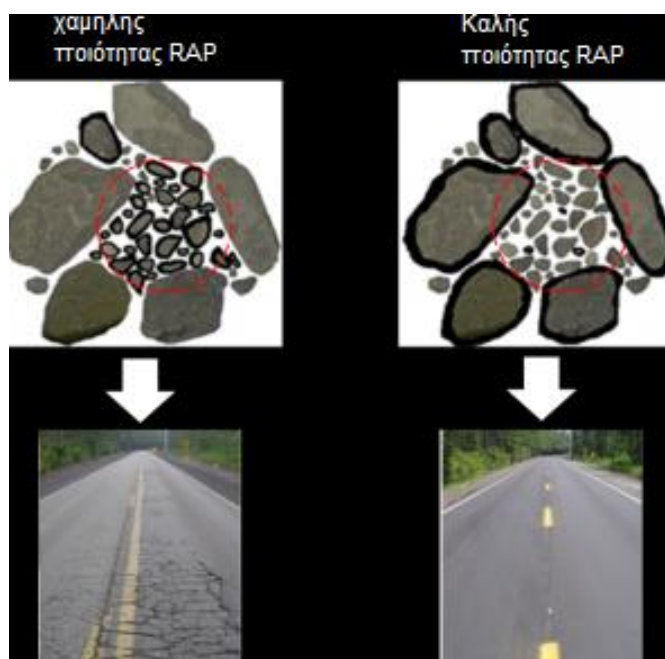
Η έκθεση NCHRP 752 (West et al., 2013) έδειξε ότι σε μίγματα με περιεκτικότητα σε RA 55%, η δυσκαμψία θα μπορούσε να αυξηθεί έως και 25% σε σύγκριση με τα μίγματα που περιέχουν νέα υλικά, οδηγώντας έτσι σε προβλήματα ρωγμών. Από το άλλο χέρι η αντίσταση στις τροχοαυλάκωσεις και στη φθορά από το νερό, είναι πιθανό να είναι καλύτερη ή παρόμοια με εκείνη των συμβατικών μιγμάτων ως προς το ποσοστό της RA (McDaniel et al., 2002, Silva et al., 2012, Tran et al., 2012, Mogawer et al., 2012).

Τα αποτελέσματα της έκθεσης Austroads (2015), καθώς και των Saburi et al. (2015 a, 2015 b) ενισχύουν τις δημοσιευμένες γενικές τάσεις ότι η αύξηση του περιεχομένου σε RA οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, σε μείωση της ζωής του οδοστρώματος εξαιτίας της κόπωσης και στην αύξηση των μόνιμων παραμορφώσεων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι για μίγματα με ποσοστό 30% υψηλής γήρανσης RA οι αποδόσεις δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα αλλά διαφέρουν σημαντικά από μίγματα με 60% RA και από αυτά που περιέχουν μόνο νέα υλικά (0% RA) (Austroads, 2015). Αντ 'αυτού, όταν τα μίγματα παρασκευάστηκαν με ποσοστό 40% χαμηλής γήρανσης RA, τα αποτελέσματα των δοκιμών που σχετίζονται με την απόδοση παρείχαν αποδείξεις για μικρό αντίκτυπο της RA. Αυτό δικαιολογείται από τις μικρές διαφορές μεταξύ της δυσκαμψίας της RA και των νέων υλικών.

Συνοπτικά, όλες αυτές οι μελέτες συμφωνούν ότι η επίτευξη καλής απόδοσης μιγμάτων υψηλού περιεχομένου RA εξαρτάται έντονα από τις ιδιότητες της RA και το σχεδιασμό του μίγματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο σχεδιασμό του μίγματος που περιέχει RA που έχει υποστεί γήρανση (είναι περισσότερο δύσκαμπτη). Δεν παραλείπεται όμως το γεγονός ότι η RA που έχει υποστεί γήρανση έχει καλή επίδοσή για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίες (αντίσταση στην τροχοαυλάκωση) σε αντίθεση με την μειωμένη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (κίνδυνος ρωγμών). Επιπλέον, αυτές οι μελέτες εξέτασαν σαν όριο το ποσοστό 50%-60% RA ειδικά για της επιφανειακές ασφατικές στρώσεις. Αυτό σχετίζεται εν μέρει με την τελική απόδοση του ασφαλτομίγματος που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες της RA και τον χειρισμό της (Bressi et al., 2016), και από την τελική κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος που συνήθως διορθώνεται με πρόσθετα νέα αδρανή. Παρ 'όλα αυτά άσχετα από την τελική απόδοση του ασφαλτομίγματος, μέχρι στιγμής οι κύριοι λόγοι που δεν έχει ενσωματωθεί στο μίγμα 100% RA είναι τεχνικοί και οφείλονται στον εξοπλισμό των εγκαταστάσεων παραγωγής RA (π.χ. καπνοί που παράγονται από υπερθέρμανση της RA). Έτσι δεν μπορούν να ενσωματώσουν περισσότερο από 50%-60%

RA σε νέα ασφαλτομίγματα (Zaumanis και Mallick, 2015). Οι τρέχουσες φιλοδοξίες είναι να επιτευχθούν μεγαλύτερα ποσοστά RA με στόχο το 100% (Rowe et al., 2015, Zaumanis et al., 2014). Για να μεγιστοποιηθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης RA πρέπει, πρώτον να εκσυγχρονιστούν οι μονάδες παραγωγής RA κάτι το οποίο σταδιακά γίνεται (Rowe et al., 2015, Zaumanis et al., 2014) και δεύτερον ο σχεδιασμός του μίγματος πρέπει να υιοθετήσει την RA σαν κύριο συστατικό, εξασφαλίζοντας την επιθυμητή επίδοση (Canon Falla et al., 2015; Lo Presti et al., 2014)

Συμπερασματικά λοιπόν, όταν το HMA φτάσει στο τέλος της διάρκειας της ζωής του, τα υλικά που το αποτελούν (δηλαδή η ασφάλτος και τα αδρανή) εξακολουθούν να είναι σημαντικά, αφού μπορούν ξανά να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευαστούν νέα ασφαλτομίγματα μειώνοντας έτσι την ανάγκη για την χρήση νέων υλικών. Όμως κατά την διάρκεια ζωής του HMA τα υλικά έχουν υποστεί διάφορες φυσικές και μηχανικές αλλαγές κάτι που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαδικασία σχεδιασμού για να εξασφαλιστεί ότι το νέο μίγμα με τα επαναχρησιμοποιημένα υλικά εξασφαλίζει τις ίδιες ιδιότητες όπως ένα ασφαλτόμγμα HMA από εξολοκλήρου νέα υλικά (Al-Qadi et.al 2007). Ωστόσο, η γήρανση της ασφάλτου που γίνεται κατά την διάρκεια της παραγωγής αλλά κατά την χρήση της σαν συνδετικό υλικό, είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητές της σαν επαναχρησιμοποιούμενο υλικό (Kemp and Predoehl 1981). Ακόμα οι ιδιότητές της εξαρτώνται από τις φθορές που είχε υποστεί το οδόστρωμα (Smiljanic et al. 1993). Δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το επίπεδο φθορών στο οδόστρωμα κατά την πρώτη χρήση του τόσο μεγαλύτερες είναι οι αλλαγές στις ιδιότητες του συνδετικού υλικού. Άρα όσο η γήρανση και η συντήρηση επιδρούν στις ιδιότητες της ασφάλτου, τόσο διαφέρει η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ανακυκλωμένης από τη νέα (McMillan and Palsat 1985).

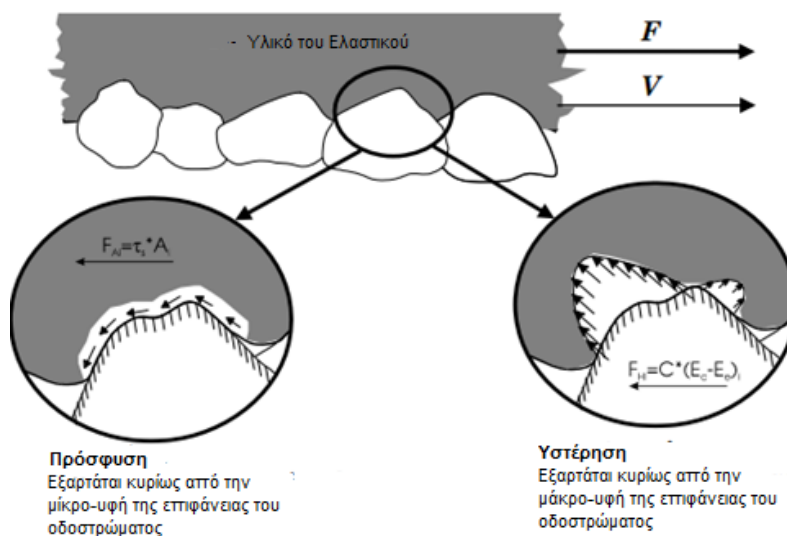


Εικόνα 4. Διαφορετικές ποιότητες RAP

Αυτό υποδηλώνει τη σημασία ελέγχου της διαδικασίας ανάμειξης μεταξύ ανακυκλωμένων και νέων συνδετικών υλικών. Εάν το παλιό συνδετικό υλικό είναι υπερβολικά άκαμπτο το μίγμα παλιών και νέων συνδετικών υλικών μπορεί να μην λειτουργήσει όπως αναμένεται. Σε μικρά ποσοστά RAP (έως 20%) η ανακυκλωμένη ασφάλτος δεν επηρεάζει σημαντικά της ιδιότητες του ασφαλτομίγματος (Kennedy et al. 1998). Εάν όμως το ποσοστό αυξηθεί επηρεάζονται οι ιδιότητες του συνδετικού στο προκύπτον ασφαλτόμγμα. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τα αδρανή, όπου λόγω καταπόνησης αλλάζουν οι ιδιότητές τους (σχήμα, σκληρότητα, πορώδες) και πρέπει να ελεγχθούν πριν εισαχθούν στο νέο μίγμα. Αυτό που είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλιστεί είναι η κατάλληλη, για το μίγμα, κοκκομετρική διαβάθμιση.

2.3 Αντιολισθητική ικανότητα

Η τριβή του οδοστρώματος είναι το αποτέλεσμα μιας πολύπλοκης αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο κύριων δυνάμεων τριβής (δυνάμεων πρόσφυσης και δυνάμεων υστέρησης) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Οι δυνάμεις πρόσφυσης είναι αποτέλεσμα της μικρό-κλίμακας του υλικού του ελαστικού που ενώνεται με την επιφάνεια του οδοστρώματος όταν έρχονται σε επαφή. Είναι μια συνάρτηση της διατρητικής αντοχής και της επιφάνειας επαφής. Η συνιστώσα υστέρησης των δυνάμεων τριβής προκύπτει από την απώλεια ενέργειας λόγω της μαζικής παραμόρφωσης του ελαστικού του οχήματος. Η παραμόρφωση αναφέρεται συνήθως ως 'περιτύλιξη του ελαστικού γύρω από την υφή'. Όταν ένα ελαστικό συμπιέζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, η κατανομή των τάσεων προκαλεί την αποθήκευση της ενέργειας παραμόρφωσης εντός του ελαστικού. Καθώς το ελαστικό χαλαρώνει, μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας ανακτάται, ενώ το άλλο μέρος χάνεται με τη μορφή θερμότητας (υστέρηση), η οποία είναι μη αναστρέψιμη. Αυτή η απώλεια αφήνει μια καθαρή δύναμη τριβής για να βοηθήσει να σταματήσει η κίνηση. (J.W. Hall et.al 2009)



Σχήμα 3. Αντιολισθητική ικανότητα και επιφανειακή υφή του οδοστρώματος (Hall et.al 2009)

Παρόλο που υπάρχουν και άλλες συνιστώσες της τριβής, όπως διάτμηση του υλικού του ελαστικού, η συνεισφορά της είναι ασήμαντη συγκριτικά με τις δυνάμεις πρόσφυσης και υστέρησης. Έτσι, η τριβή μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των δυνάμεων τριβής συνάφειας και υστέρησης. (Hall et.al 2009).

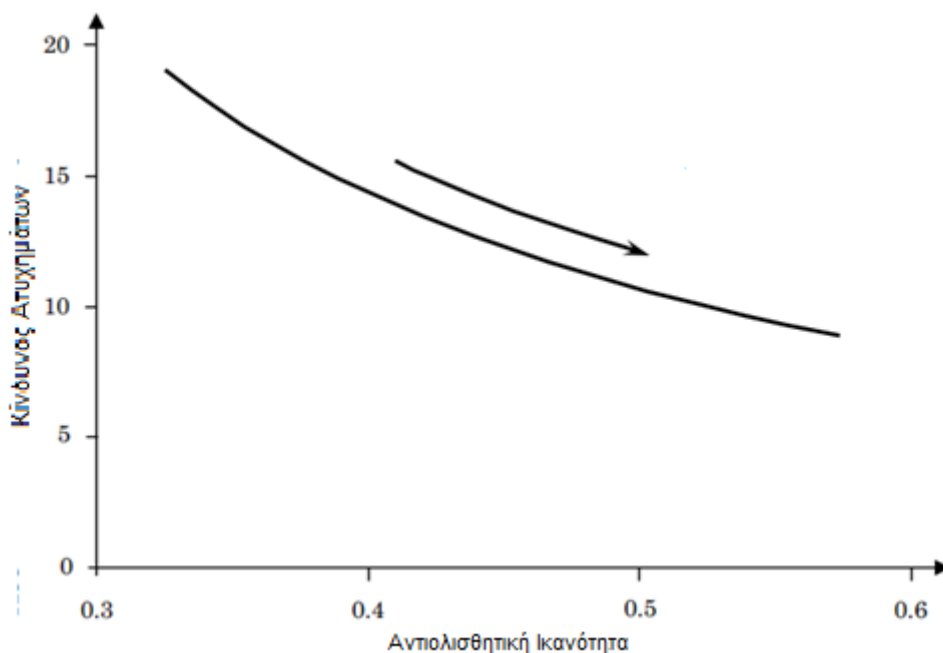
Αυτές οι δύο συνιστώσες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, την επαφή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος και τις ιδιότητες του ελαστικού. Επειδή το ελαστικό είναι ιξωδοελαστικό υλικό η θερμοκρασία και η ταχύτητα ολίσθησης επηρεάζουν και τις δύο συνιστώσες. Ακόμα η δύναμη πρόσφυσης που αναπτύσσεται στη διεπαφή του ελαστικού-οδοστρώματος, είναι πιο ευαίσθητη στη σκληρότητα, τραχύτητα (μικροϋφή) των αδρανών που περιέχονται στο ασφαλτόμιγμα. Αντίθετα, η δύναμη υστέρησης που αναπτύσσεται μέσα στο ελαστικό, εκφράζεται πρώτον από την μακροϋφή η οποία καθορίζεται από το σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος και δεύτερον από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής του ελαστικού. Ως αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου η πρόσφυση διέπει τη συνολική τριβή σε ξηρά οδοστρώματα ομαλής υφής, ενώ η δύναμη υστέρησης είναι η κυρίαρχη συνιστώσα στην περίπτωση βρεγμένων οδοστρωμάτων (Hall et.al 2009).

3 ΣΗΜΑΣΙΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Μια πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια διερεύνηση της επιφανειακής τριβής στα οδοστρώματα, έγινε από την AASHTO το 1976 με το εγχειρίδιο : 'Guidelines for Skid-Resistant Pavement Design'. Όμως εξαιτίας των πολλών αλλαγών που έχουν πραγματοποιηθεί από το 1976 στην κυκλοφορία, στις απαιτήσεις των χρηστών των αυτοκινητοδρόμων, στα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, στο σχεδιασμού του, στις μεθόδους και στον εξοπλισμό μέτρησης της τριβής, χρειάζεται αναβάθμιση του οδηγού για τη διερεύνηση της τριβής στα οδοστρώματα. Αυτό θα βοηθήσει τους μηχανικούς να κατανοήσουν την πολυπλοκότητα της αντιολισθητικής ικανότητας των οδοστρωμάτων αλλά και την σημαντικότητα της στην ασφάλεια των αυτοκινητοδρόμων. Ακόμα, θα ενισχύσει την ανάγκη για να θεσπίσουν πρακτικές διαχείρισης και σχεδιασμού οδοστρωμάτων που βελτιστοποιούν την ασφάλεια σε σχέση με την αντιολισθητική ικανότητα, αναγνωρίζοντας πάντα τις επιπτώσεις στην οικονομία αλλά και στα ζητήματα αλληλεπιδράσεων οδοστρωμάτων (Hall et.al 2009).

Η ασφάλεια των αυτοκινητοδρόμων πρέπει να χαρακτηρίζεται εν γενεί από ένα περιβάλλον που διέπεται από κανόνες σχεδιασμένους έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα ατυχήματα που έχουν συνέπειες, όπως θάνατοι, τραυματισμοί και οικονομικές απώλειες. Τις τελευταίες δεκαετίες, η κοινωνική ζήτηση για κινητικότητα και η οικονομική ανάπτυξη έχει αυξηθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα ποσοστά των μετακινήσεων των οχημάτων και τα πρωτοφανή επίπεδα κινδύνου για τους χρήστες των οδικών αρτηριών (Hall et.al 2009) Μεταξύ 1990 και 2003, κατά μέσο όρο συνέβησαν 6,4 εκατομμύρια ατυχήματα (όλοι οι τύποι οχημάτων) που σημειώθηκαν ετησίως στις εθνικές οδούς, με αποτέλεσμα 3 εκατομμύρια τραυματισμούς και 42.000 θανάτους. Αυτός ο ρυθμός θανάτου ισοδυναμεί με 115 θανάτους ανά ημέρα ή 1 θάνατο κάθε 12 λεπτά (Noyce et al., 2005; National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], 2004). Το οικονομικό κόστος δε των ατυχημάτων ανέρχεται σε 230,6 δις. δολάρια και κάθε χρόνο αυτό το πόσο ανεβαίνει (Noyce et al., 2005, NHTSA, 2004).

Τα ατυχήματα έχουν άμεση σχέση με την επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος που χαρακτηρίζεται από την αντιολισθητική ικανότητά και την υφή του. Γι' αυτό χρειάζεται βαθιά γνώση και κατανόηση μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών έτσι ώστε οι μηχανικοί να δίνουν σωστές λύσεις σε επικίνδυνες καταστάσεις. Βέβαια είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η σχέση μεταξύ ατυχημάτων και συντελεστή τριβής. Σίγουρα όμως τα ατυχήματα αυξάνονται όταν μειώνεται η τριβή και ειδικά σε υγρά οδοστρώματα. Έτσι υπάρχουν αυξημένες τιμές ατυχημάτων σε υγρό οδόστρωμα για τις αντίστοιχες τιμές της τριβής σε στεγνά οδοστρώματα και φυσικά είναι λιγότερα για χαμηλά και μέτρια επίπεδα κυκλοφορίας (Hall et.al 2009). Αντίστοιχα αποτελέσματα υπάρχουν για ατυχήματα σε υγρό προς στεγνό οδόστρωμα. Τα εμπειρικά στοιχεία από αυτές τις έρευνες δείχνουν ότι είναι πιθανότερο να σημειωθούν ατυχήματα σε υγρά οδοστρώματα (με χαμηλότερα επίπεδα τριβής) (Hall et al. 2009). Επίσης, όταν η τριβή του οδοστρώματος μειώνεται κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, ο κίνδυνος ατυχημάτων αυξάνεται σημαντικά. Η ακριβής φύση της σχέσης μεταξύ της τριβής του οδοστρώματος και των ατυχημάτων υπό υγρές συνθήκες είναι συγκεκριμένη, όπως αυτή ορίζεται όχι μόνο από την τριβή του οδοστρώματος αλλά και από διάφορους άλλους παράγοντες. Συνεπώς πρέπει να αναπτυχθούν σχέσεις τριβής του οδοστρώματος και ατυχημάτων όπως αυτά εξαρτώνται από συγκεκριμένους παράγοντες ενός δικτύου οδοστρωμάτων. Σύμφωνα με το Εθνικό Συμβούλιο Ασφάλειας των Μεταφορών (NTSB) και το FHWA, περίπου το 13,5% των θανατηφόρων ατυχημάτων και το 25% όλων των ατυχημάτων συμβαίνουν όταν τα οδοστρώματα είναι υγρά (Kuemmel et al., 2000). Η συσχέτιση μεταξύ της τριβής του οδοστρώματος και των ατυχημάτων δεν είναι μονοσήμαντη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (Noyce et al., 2005). Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας σχέσης που αναπτύχθηκε για μεμονωμένα οδοστρώματα στην Βρετανία, δείχνει ότι ο κίνδυνος ατυχημάτων πέφτει περίπου κατά το ήμισυ, καθώς η τριβή του οδοστρώματος διπλασιάζεται, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.



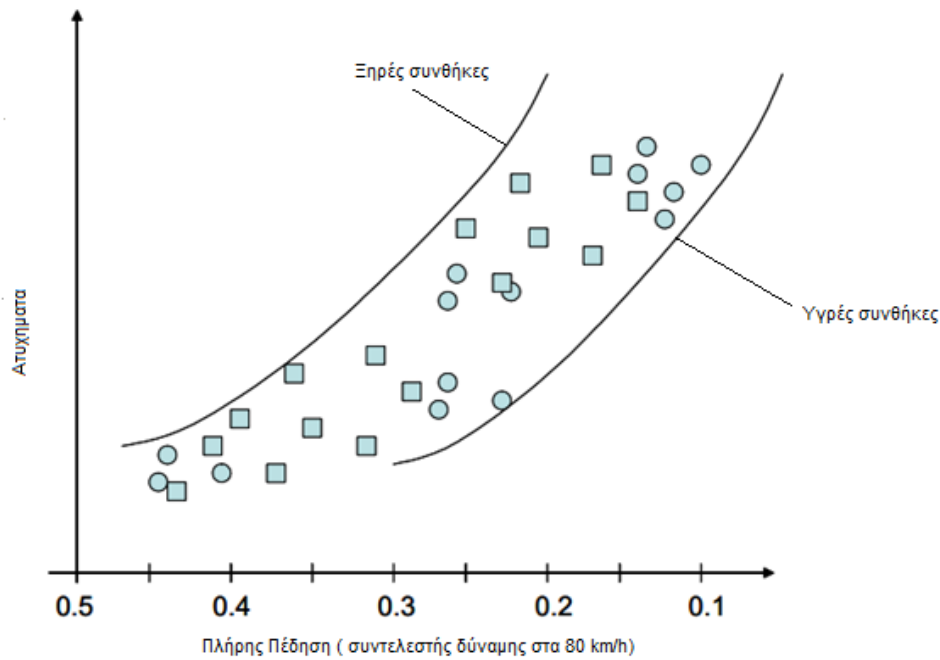
Διάγραμμα 2. Σχέση μεταξύ αντιολισθητικής ικανότητας οδοστρώματος και κίνδυνος ατυχημάτων (Viner et al., 2004)

3.1 Κατάσταση οδοστρωμάτων και οδική ασφάλεια

Σε όλο τον κόσμο, περισσότερα από ένα εκατομμύριο άνθρωποι σκοτώνονται κάθε χρόνο από τροχαία ατυχήματα. Αν και μεγάλο ποσοστό αυτών των ατυχημάτων οφείλεται σε λάθη οδηγών, η κατάσταση των οδοστρωμάτων των αυτοκινητοδρόμων έχουν σημαντική επίδραση στο ποσοστό των ατυχημάτων (Saplıoğlu et al., 2012). Τα τροχαία ατυχήματα είναι πολύπλοκα γεγονότα που είναι αποτέλεσμα ενός ή περισσότερων παραγόντων. Αυτοί οι παράγοντες εμπίπτουν σε τρεις κύριες κατηγορίες: παράγοντες που σχετίζονται με τον οδηγό, με το όχημα και με την σχετική κατάσταση του αυτοκινητόδρομου (Noyce et al., 2005). Από αυτές τις τρεις κατηγορίες, οι φορείς διαχείρισης αυτοκινητοδρόμων μπορούν να ελέγξουν μόνο τους παράγοντες που σχετίζονται με την κατάσταση του αυτοκινητοδρόμου. Αυτό μπορεί να γίνει με την ανάπτυξη και διαχείριση αποτελεσματικών πρακτικών και πολιτικών σχεδιασμού, κατασκευής, συντήρησης και διαχείρισης (Majed Msallam et.al 2017). Παρακάτω φαίνεται αυτή η προσπάθεια από διάφορους ερευνητές (Hall et. Al. 2009).

1. Οι Miller και Johnson 1973 και Cairney 1997: Τα ατυχήματα καταγράφηκαν για δύο χρόνια μετά και δύο χρόνια πριν από την αποκατάσταση του οδοστρώματος και για 500 περιστατικά. Δεδομένα από τη μελέτη αυτή έδειξαν ότι η επαναφορά των οδοστρωμάτων (αυξημένη τριβή στο οδόστρωμα) οδήγησε σε μείωση κατά 28% των ατυχημάτων που συνέβησαν σε ξηρές συνθήκες και μείωση κατά 63% των ατυχημάτων που συνέβησαν σε υγρές συνθήκες. Τα συνολικά ατυχήματα για την περιοχή μελέτης μειώθηκαν κατά 45%.
2. Οι Kamel και Gartshore, 1982: Επέλεξαν επικίνδυνα τμήματα, αυτά δηλαδή με χαμηλή τριβή και αποκαταστάθηκαν για να αυξηθεί η επιφανειακή τριβή. Στις διασταυρώσεις τα ατυχήματα μειώθηκαν συνολικά 46%, 21% για ξηρές συνθήκες και 71% για υγρές. Για τους αυτοκινητοδρόμους τα συνολικά ατυχήματα μειώθηκαν κατά 29%, 16% σε ξηρές συνθήκες και 54% σε υγρές συνθήκες.
3. Ο Bray, 2002. Σε αυτή τη μελέτη εντοπίστηκαν 40 τμήματα οδοστρώματος που παρουσιάζουν ασυνήθιστα υψηλό αριθμό ατυχημάτων σε υγρές συνθήκες. Μετά από την επικάλυψη με ζεστό ασφαλτόμιγμα, οι αναλύσεις έδειξαν σημαντική μείωση ατυχημάτων.

4. Ο McLean, 1995. Έγινε αξιολόγηση μετά από έργα αποκατάστασης οδοστρώματων στην Αγγλία και βρέθηκε ότι στις αγροτικές οδικές αρτηρίες ο αριθμός των ατυχημάτων αυξήθηκε ακόμα και με την βελτίωση του οδοστρώματος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι οδηγοί τείνουν να χρησιμοποιούν οδούς με λιγότερες επιφανειακές ανωμαλίες και να ταξιδεύουν με υψηλότερες ταχύτητες. Αυτό το εύρημα υποδηλώνει ότι τα κέρδη από τη βελτίωση της τριβής μπορούν να αντισταθμιστούν συγκριτικά με τη μείωση του κινδύνου πρόκλησης ατυχήματος.
5. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), 1984. Η Διεθνής Ομάδα Επιστημονικών Εμπειρογνομώνων του OECD για τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών επιφάνειας ανέπτυξε μια γραμμική σχέση τριβής για συγκεκριμένες οδούς στις ΗΠΑ (δηλ. Η μείωση της τριβής συσχετίστηκε με μια γραμμική αύξηση των ατυχημάτων). Αυτή η συνάρτηση συμπεριφοράς διαφέρει από άλλες σχέσεις που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη, και παρουσίαζαν μια μη γραμμική σχέση μεταξύ της τριβής του οδοστρώματος και των ατυχημάτων
6. Ο Larson, 1999. Η γαλλική έρευνα που ανακοινώθηκε το 1996, βρήκε πενταπλάσια αύξηση στις τιμές ατυχημάτων υπό υγρές συνθήκες, στην περιφερειακή οδό του Μπορντό, Η μελέτη αυτή διαπίστωσε επίσης ότι ο κίνδυνος ατυχημάτων υπό υγρές συνθήκες αυξάνεται σημαντικά για επιφάνειες με εκτιμώμενο βάθος υφής μικρότερο από 0,40 mm.
7. Οι Xiao et al., 2000 του Ινστιτούτου Μεταφορών της Pennsylvania (PTI) ανέπτυξαν δύο μοντέλα για να προβλέψουν τα ατυχήματα υπό υγρές συνθήκες. Η ολίσθηση, η ταχύτητα, η μέση ημερήσια κυκλοφορία (ADT), ο χρόνος που το οδόστρωμα είναι υγρό και η δυσκολία οδήγησης ήταν οι μεταβλητές που είχαν επιλεγεί ως έχουσες τη μεγαλύτερη επίδραση στον κίνδυνο ατυχημάτων. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αύξησης της ασφάλειας που αναμένεται από βελτίωση σε κάθε μία από τις μεταβλητές του μοντέλου. Αποδείχθηκε ότι η κατάσταση ασφαλείας, η οποία μετράται με την ποσοστιαία μείωση των ατυχημάτων σε υγρές συνθήκες, θα μπορούσε να βελτιωθεί σχεδόν κατά 60% εάν ο αριθμός ολίσθησης αυξηθεί από 33.4 σε 48.
8. Schulze et al., 1976. Η επίδραση του υγρού κλίματος στην ασφάλεια αποδείχθηκε και από μια μελέτη που διεξήχθη στη Γερμανία, όπου η αναλογία των ατυχημάτων υπό υγρές συνθήκες, συγκρίθηκε με την επιφάνεια τριβής του οδοστρώματος, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3. Ο αριθμός τριβής για τη μελέτη αυτή μετρήθηκε σε ταχύτητα (80 km/h). Παρόλο που υπήρχε μεγάλη διασπορά στα δεδομένα, ο αριθμός αυτός δείχνει σαφώς ότι υπάρχει σημαντική αύξηση στα ατυχήματα που συμβαίνουν σε υγρό οδόστρωμα καθώς μειώνεται η τριβή του οδοστρώματος.



Διάγραμμα 3. Σχέση μεταξύ ατυχημάτων σε υγρές και ξηρές συνθήκες (Schulze et al., 1976)

Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι ο αριθμός των ατυχημάτων αυξάνεται όταν το οδόστρωμα είναι υγρό ειδικά όταν ο ρυθμός της διαβροχής είναι μικρός (Kuttesch, 2004).

Συνεπώς, η σχέση τριβής οδοστρώματος και ατυχημάτων πρέπει να αναπτυχθεί για τις θέσεις που τυπικά υπάρχουν σε ένα δεδομένο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων. Επιπλέον, πολλοί οδηγοί δεν δίνουν μεγάλη σημασία στην κατάσταση των ελαστικών τους και οι οδηγικές τους συνήθειες δεν αλλάζουν πολύ κατά τη διάρκεια της βροχής.

3.1.1 Έρευνες πεδίου

Για τη μελέτη του συντελεστή τριβής έχουν διεξαχθεί πολλές μετρήσεις στο πεδίο. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι στο πεδίο, η εποχιακή διακύμανση επηρεάζει τον συντελεστή ανάλογα με τους μήνες βροχόπτωσης και ξηρασίας, δηλαδή τους χειμερινούς και τους καλοκαιρινούς (Jayawickrama και Thomas 1998). Ακόμα, χρήσιμα δεδομένα προκύπτουν και από τους μήνες που η βροχόπτωση κυμαίνεται σε μεσαία επίπεδα. Έτσι σε δοκιμές που έγιναν επιτόπου, για τους μήνες που η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη και το οδόστρωμα πιο καθαρό (χωρίς λάδια και σκόνες) ο συντελεστής τριβής είναι υψηλότερος σε σχέση με τους μήνες με λιγότερη βροχόπτωση (Colony 1992). Επιπλέον ο συντελεστής τριβής σε ξηρές συνθήκες είναι εμφανώς μεγαλύτερος σε σχέση με την υγρή επιφάνεια οδοστρώματος.

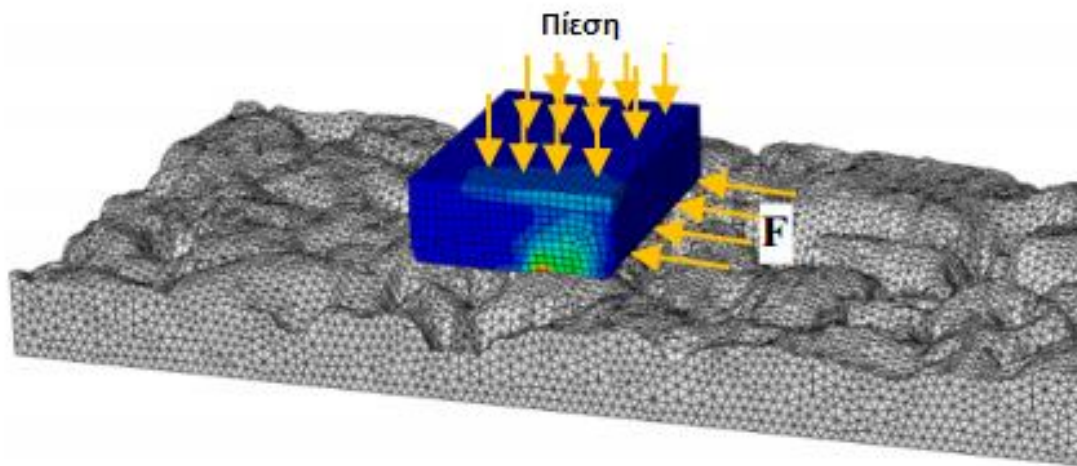
Ακόμα από επί τόπου μετρήσεις και σε διαφορετικά τμήματα των αυτοκινητοδρόμων έχει βγει το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής τριβής είναι μειωμένος στα τμήματα που έχουν περισσότερη κυκλοφορία. Η μεταβολή του συντελεστή τριβής ποικίλει ανάλογα με την σύνθεση του ασφαλτομίγματος, δηλαδή τον τύπο της ασφάλτου, τα ποσοστά κενών, την κοκκομετρική διαβάθμιση, την ποιότητα και την προέλευση των αδρανών. Έτσι ένα σχετικά σκληρό αδρανές (π.χ θραυστός ασβεστόλιθος ή δολομίτης) παρέχει καλύτερη τριβή σε σχέση με ένα λιγότερο σκληρό (π.χ ψαμμίτης) (Masad et.al 2010).

3.1.2 Έρευνες με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της διεπαφής της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού μέσω πεπερασμένων στοιχείων (Khaleghian S., Emami A.,

Taheri S 2015), για να μπορεί να γίνει πρόβλεψη του επιπέδου της αντιστοιχιστικής ικανότητας του οδοστρώματος. Όμως οι παράμετροι της τριβής που απαιτούνται για τις παραμέτρους εισόδου καθορίζονται από αντικειμενικές παραδοχές. Η βασική ανάλυση συνιστωσών γίνεται για να ποσοτικοποιηθεί η σχέση μεταξύ διάφορων χαρακτηριστικών υφής και των παραμέτρων τριβής της διεπαφής ελαστικού - οδοστρώματος.

Για να απεικονιστεί με ακρίβεια ο μηχανισμός διεπαφής ελαστικού οδοστρώματος έχουν δημιουργηθεί πολλά μοντέλα επιφανειών οδοστρώματος με βάση τις ακτίνες X (X-ray tomography)(Srirangam S.K, et al. 2013), την απλοποιημένη επιφάνεια πορώδους οδοστρώματος και άλλων μοντέλων. Χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία ανακατασκευάζεται το οδόστρωμα σε σύγχρονους Η/Υ με βάση υψηλής ανάλυσης δεδομένων - 3D.

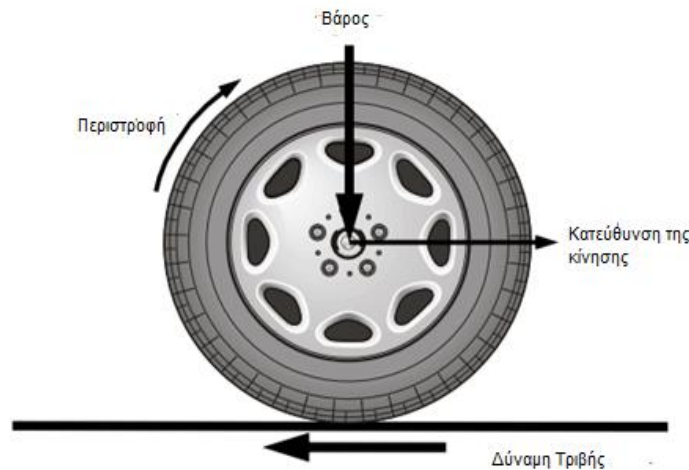


Εικόνα 5. Μοντέλο της διεπαφής ελαστικού-οδοστρώματος με χρήση FEM (Peng et.al 2019)

Δεδομένου ότι η διαδικασία FEM (Finite Element Method) είναι χρονοβόρα και υπολογιστικά εκτεταμένη, είναι επιθυμητό να αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης τριβής χρησιμοποιώντας σετ δεδομένων και παραμέτρους δεδομένων 3D υφής. Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει υψηλός βαθμός συσχέτισης στους δείκτες μακρο-και μικροϋφής (Peng et al. 2019).

4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος προέρχεται από την τριβή που αναπτύσσεται κατά τη διεπαφή ελαστικού και οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, η τριβή του οδοστρώματος είναι η δύναμη που αντιστέκεται στη σχετική κίνηση μεταξύ του ελαστικού ενός οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Αυτή η δύναμη αντίστασης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4, δημιουργείται καθώς τα ελαστικά είτε ολισθαίνουν είτε όχι στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Hall et.al 2009).



Σχήμα 4. Η τριβή και οι δυνάμεις κατά την κίνηση του ελαστικού ενός οχήματος (Hall et.al 2009)

Η δύναμη αντίστασης, που χαρακτηρίζεται με τη χρήση του αδιάστατου συντελεστή τριβής μ είναι ο λόγος εφαπτομενικής δύναμης F (τριβή) προς την αντίδραση του βάρους N και υπολογίζεται από την Εξίσωση 1 (J.W. Hall et.al 2009)

$$\text{Εξίσωση 1} \quad \mu = \frac{F}{N}$$

Η τριβή του οδοστρώματος έχει σημαντικό ρόλο στη σταθεροποίηση των οχημάτων στο οδόστρωμα, καθώς δίνει στους οδηγούς την δυνατότητα να ελίσσονται και να ελέγχουν τα οχήματα με ασφαλή τρόπο τόσο κατά τη διαμήκη όσο και κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Είναι μία σημαντική παράμετρος για τον γεωμετρικό σχεδιασμό των αυτοκινητοδρόμων, αφού χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της επάρκειας της ελάχιστης οπτικής απόστασης μεταξύ οχημάτων και της ελάχιστης οριζόντιας ακτίνας, της ελάχιστης ακτίνας των κυρτών ή κοίλων καμπυλών. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η τριβή που υπάρχει στη διεπιφάνεια οδοστρώματος-ελαστικού, τόσο περισσότερο ο οδηγός έχει τον έλεγχο του οχήματος.

Οι διαμήκεις δυνάμεις τριβής εμφανίζονται μεταξύ ενός ελαστικού που κυλά (κατά τη διαμήκη κατεύθυνση) και της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά την ελεύθερη κύλιση ή την σταθερή πέδηση. Κατά την ελεύθερη κύλιση (χωρίς πέδηση), η σχετική ταχύτητα μεταξύ της περιφέρειας του ελαστικού και του οδοστρώματος (που αναφέρεται ως ταχύτητα ολίσθησης) είναι μηδέν. Στη συνεχή πέδηση, η ταχύτητα ολίσθησης αυξάνεται από το μηδέν σε ένα μέγιστο δυναμικό της ταχύτητας του οχήματος (J.W. Hall et.al 2009, Meyer 1982).

$$\text{Εξίσωση 2} \quad S = V - Vp = V - (0.68 * \omega * r)$$

Όπου : S = Ταχύτητας ολίσθησης mi/hr

V = Ταχύτητα οχήματος mi/hr

V_p = Μέση περιφερειακή ταχύτητα του ελαστικού mi/hr

ω = Γωνιακή ταχύτητα του ελαστικού. Rad/sec

r = Μέση ακτίνα του ελαστικού. Ft

Κατά την ελεύθερη κύλιση του ελαστικού το V_p είναι ίσο με την ταχύτητα του οχήματος, έτσι το S είναι μηδέν. Για τροχό με πλήρης πέδηση το V_p είναι μηδέν οπότε η ταχύτητα ολίσθησης είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος (V). Η κατάσταση πλήρους πέδησης είναι το 100% της ολίσθησης και η κατάσταση ελεύθερης κύλισης το 0% της ολίσθησης (Hall et.al 2009, Meyer 1982)

Εξίσωση 3
$$SR = \frac{V - V_p}{V} * 100 = \frac{S}{V} * 100$$

Όπου : SR = Ολίσθηση %

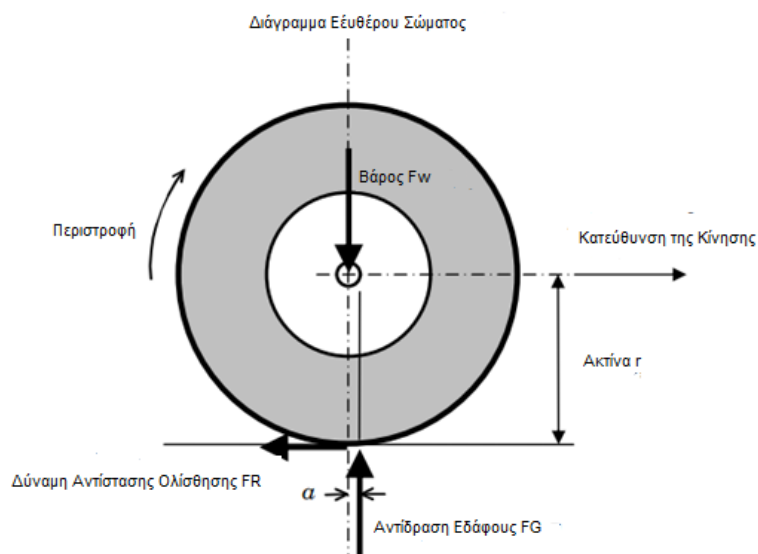
V = Ταχύτητα οχήματος mi/hr

V_p = Μέση περιφερειακή ταχύτητα του ελαστικού mi/hr

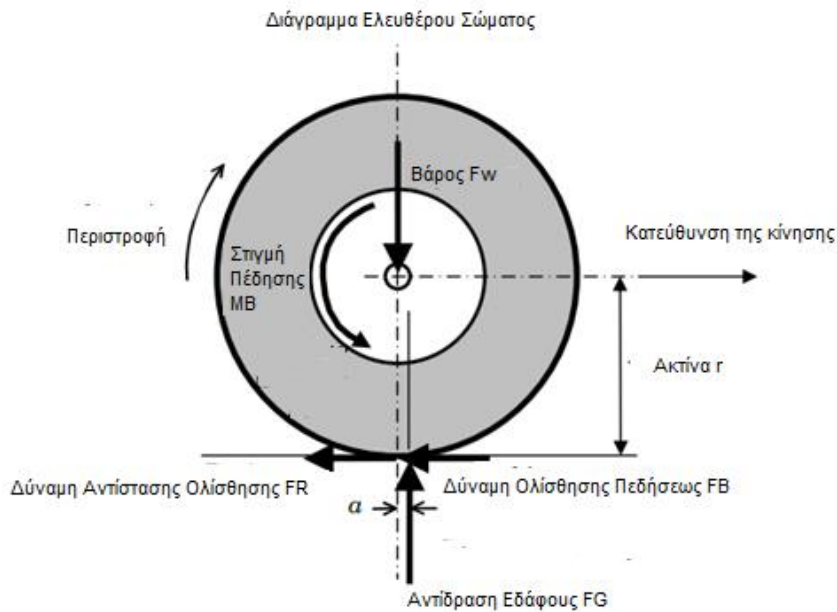
S = Ταχύτητα ολίσθησης. mi/hr

Παρόμοια με την προηγούμενη εξήγηση, κατά την ελεύθερη κύλιση του ελαστικού, το V_p ισούται με την ταχύτητα του οχήματος και το S είναι μηδέν συνεπώς ο λόγος ολίσθησης SR είναι 0%. Για ένα τροχό σε κατάσταση πέδησης το V_p είναι μηδέν, το S ισούται με την ταχύτητα του οχήματος V και έτσι ο λόγος ολίσθησης SR είναι 100%.

Στο Σχήμα 5 αναπαριστάται η δύναμη εδάφους που επενεργεί στο ελαστικό. Η δύναμη του εδάφους βρίσκεται στο κέντρο της πίεσης της περιοχής επαφής του ελαστικού κατά απόσταση a από το κέντρο. Για να γίνει περιστροφή, θα πρέπει αυτή η απόσταση a να μειωθεί και στο τέλος να μηδενιστεί (δημιουργείται μία ροπή). Η δύναμη που απαιτείται για την αντιμετώπιση αυτής της ροπής ονομάζεται δύναμη αντίστασης κύλισης FR . Η τιμή a είναι συνάρτηση της ταχύτητας. Έτσι, το FR αυξάνεται με την ταχύτητα (Hall et.al 2009). Στο Σχήμα 6 φαίνεται η λειτουργία σταθερής πέδησης. Απαιτείται μια πρόσθετη δύναμη που ονομάζεται δύναμη ολίσθησης πεδήσεως FB για την αντιμετώπιση της πρόσθετης ροπής MB που δημιουργείται από την πέδηση. Η δύναμη είναι ανάλογη του επιπέδου πέδησης και του προκύπτοντος λόγου ολίσθησης. Η συνολική δύναμη τριβής είναι το άθροισμα της δύναμης αντίστασης ελεύθερης κύλισης FR και της δύναμης ολίσθησης πέδησης FB . (Hall et.al 2009).

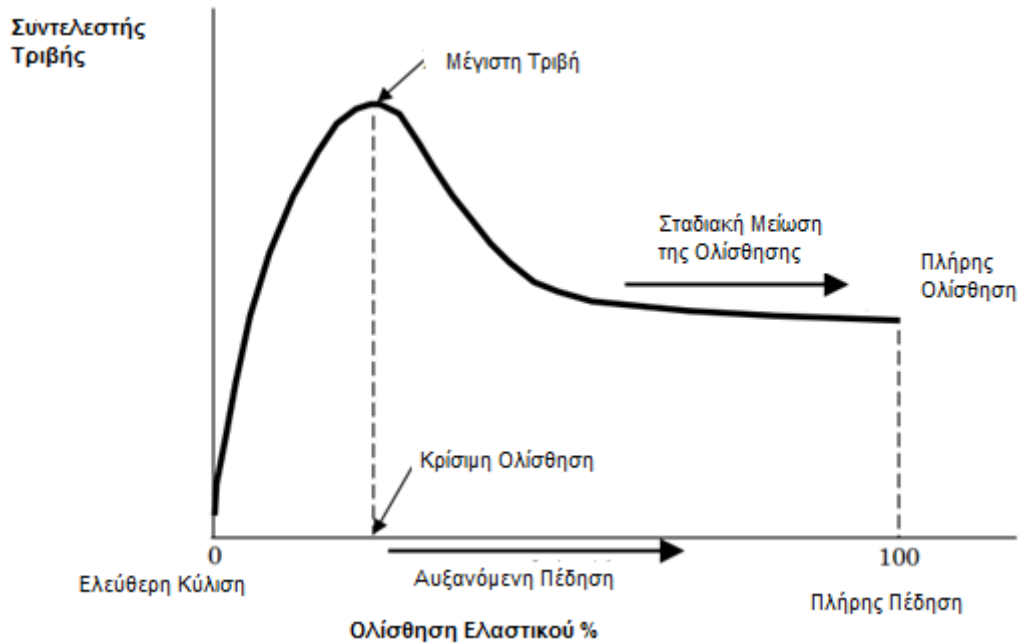


Σχήμα 5. Δύναμη αντίστασης ολίσθησης στην ελεύθερη κύλιση με σταθερή ταχύτητα (Andresen και Wambold, 1999)



Σχήμα 6. Δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την σταθερή πέδηση (Andresen και Wambold, 1999)

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ ενός ελαστικού και του οδοστρώματος, αλλάζει με μεταβαλλόμενη πέδηση, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4. Ο συντελεστής τριβής αυξάνεται ταχέως με την αύξηση της πέδησης σε μια μέγιστη τιμή που συνήθως εμφανίζεται μεταξύ 10 και 20% της πέδησης (κρίσιμη ολίσθηση) (Henry 2000). Η τριβή στη συνέχεια μειώνεται σε μια τιμή γνωστή ως ο συντελεστής ολισθηρής τριβής, η οποία συμβαίνει σε πέδηση 100%. Η διαφορά μεταξύ των ακραίων τιμών, μπορεί να ισοδυναμούν στο 50% των τιμών της ολίσθησης και είναι μεγαλύτερη στα οδοστρώματα υπό υγρές συνθήκες. Η σχέση που φαίνεται στο διάγραμμα αποτελεί τη βάση για το σύστημα πέδησης A.B.S (Anti-locking Break System) το οποίο εκμεταλλεύεται τη μέγιστη τιμή της εμπρόσθιας τριβής και ελαχιστοποιεί τις πλευρικές τριβές λόγω της ολίσθησης. Τα οχήματα με ABS έχουν σχεδιαστεί για να ενεργοποιούν και να απενεργοποιούν τα φρένα επαναλαμβανόμενα, έτσι ώστε η ολίσθηση να συγκρατείται κοντά στην μέγιστη τιμή της. Η πέδηση απενεργοποιείται πριν επιτευχθεί η μέγιστη τιμή και ενεργοποιείται σε καθορισμένο χρόνο ή ποσοστό ολίσθησης κάτω από την μέγιστη τιμή. Ο πραγματικός χρόνος είναι σχέδιο του κατασκευαστή (Hall et.al 2009).



Διάγραμμα 4. Συσχέτιση της τριβής του οδοστρώματος, ποσοστού πέδησης και της ολίσθησης του ελαστικού (Hall et.al 2009)

Μια άλλη σημαντική πτυχή της τριβής σχετίζεται με την **πλευρική δύναμη τριβής** που συμβαίνει όταν ένα όχημα αλλάζει την κατεύθυνση του ή αντισταθμίζει τα φαινόμενα εγκάρσιας κλίσης και τα φαινόμενα πλευρικού ανέμου. Η σχέση μεταξύ των δυνάμεων που επενεργούν στο ελαστικό του οχήματος και στην επιφάνεια του οδοστρώματος καθώς το όχημα κινείται σε μία καμπύλη, αλλάζει λωρίδες ή αντισταθμίζει τις πλευρικές δυνάμεις έχει ως εξής (J.W. Hall et.al 2009):

Εξίσωση 4
$$Fs = \frac{V^2}{15R} - e$$

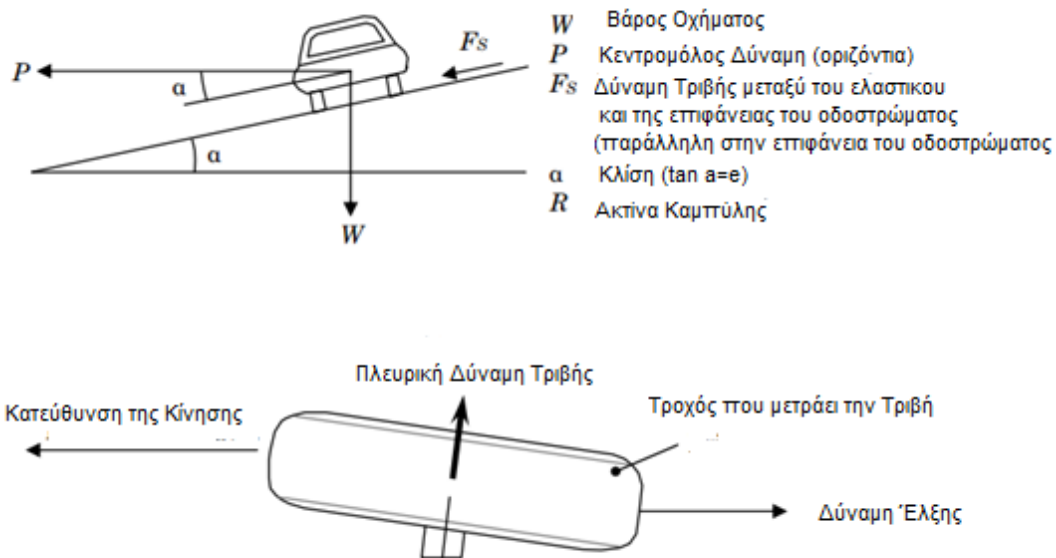
Όπου : FS = Πλευρική τριβή.

V = Ταχύτητα οχήματος, mi/hr.

R = Ακτίνα της διαδρομής του κέντρου βάρους του οχήματος (επίσης, η ακτίνα καμπυλότητας σε καμπύλη), ft.

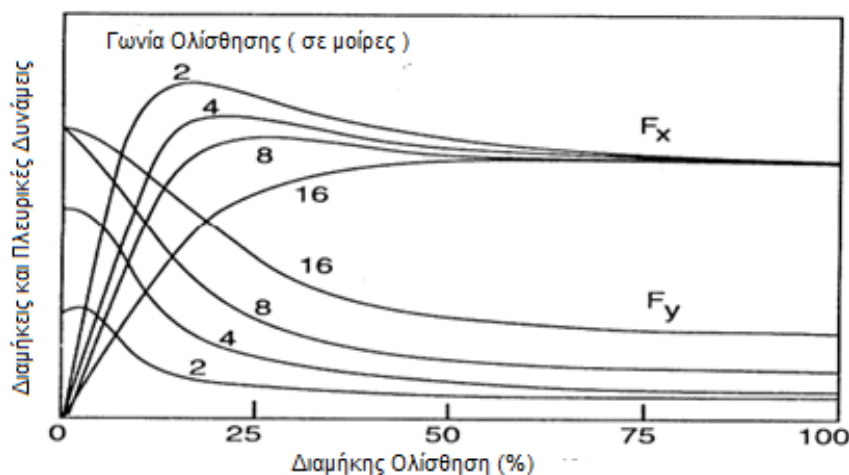
e = ανύψωση, ft/ft.

Αυτή η εξίσωση βασίζεται στις δυνάμεις που ασκούνται στο οδόστρωμα από το ελαστικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Δείχνεται πώς ο συντελεστής πλευρικής τριβής της πλευρικής δύναμης δρα ως αντίβαρο στην κεντρομόλο δύναμη που αναπτύσσεται καθώς το όχημα εκτελεί πλευρική κίνηση.

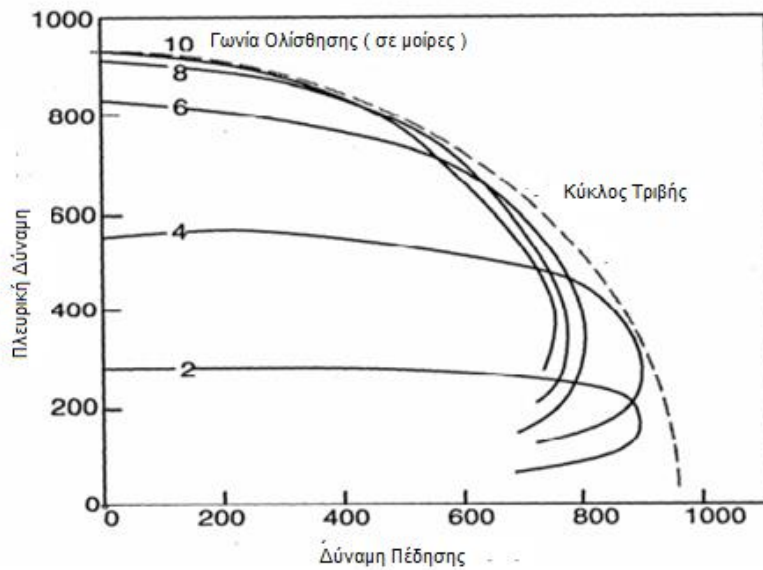


Σχήμα 7. Δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε καμπύλη με σταθερή ταχύτητα και οι δυνάμεις στο τροχό (Hall et.al 2009)

Με το **συνδυασμό πέδησης και στροφής**, ο οδηγός κινδυνεύει να μην σταματήσει τόσο γρήγορα όσο πρέπει ή να χάσει τον έλεγχο λόγω των μειωμένων πλευρικών δυνάμεων. Κατά τη λειτουργία των ελαστικών κοντά στα όρια της πρόσφυσης, η αλληλεπίδραση των διαμήκων και των πλευρικών δυνάμεων είναι τέτοια ώστε, καθώς αυξάνεται η μία δύναμη, η άλλη πρέπει να μειώνεται κατά μία αναλογική ποσότητα (J.W. Hall et.al 2009). Η εφαρμογή της επιμήκους πέδησης μειώνει σημαντικά την πλευρική δύναμη. Ομοίως, η εφαρμογή της υψηλής πλευρικής δύναμης μειώνει τη διαμήκη πέδηση. Στο Διάγραμμα 5 (Gillespie 1992) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά. Συνήθως ο αναφερόμενος ως κύκλος τριβής ή έλλειψη τριβής, είναι το αθροιστικό διάνυσμα των δύο συνδυασμένων δυνάμεων που παραμένει σταθερό (κύκλος) ή σχεδόν σταθερό (έλλειψη) Διάγραμμα 5 (Gillespie 1992).



Διάγραμμα 5. Πέδηση (F_x) και πλευρικές δυνάμεις (F_y) ως συνάρτηση της διαμήκους ολίσθησης (Gillespie, 1992)



Διάγραμμα 6. Πλευρική δύναμη έναντι διαμήκους δύναμης σε σταθερές γωνίες ολίσθησης κύκλος Τριβής (Gillespie, 1992)

Κατά τη λειτουργία εντός των ορίων της πρόσφυσης του ελαστικού, η ποσότητα πέδησης και η τριβή μπορούν να διαφέρουν, αρκεί το αθροιστικό τους μέγεθος να μην υπερβαίνει τα όρια της πρόσφυσης του ελαστικού όπως ορίζεται από τον κύκλο τριβής ή την έλλειψη της τριβής (Διάγραμμα 6). Οι μοίρες της έλλειψης εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ελαστικού και του οδοστρώματος.

5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Όπως γίνεται αντιληπτό η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι μία πολύπλοκη ιδιότητα η οποία επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες οι οποίοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε κατηγορίες (Hall et.al 2009):

- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος (επιφανειακή υφή)
- Τις λειτουργικές παραμέτρους του οχήματος,
- Τις ιδιότητες των ελαστικών,
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες
- Εποχιακές μεταβολές

Οι διάφοροι παράγοντες που συνθέτουν κάθε κατηγορία απαριθμούνται στο Πίνακα 1 (Wallman και Astrom, 2001)

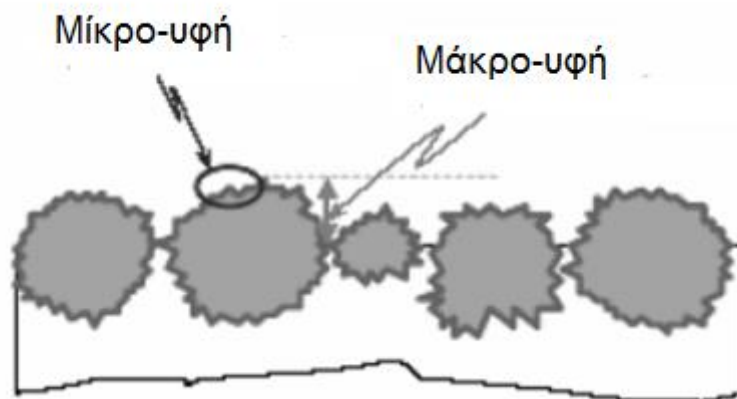
Πίνακας 1. Παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος (Wallman και Astrom, 2001)

Χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος	Παράμετροι λειτουργίας οχήματος	Ιδιότητες ελαστικού	Περιβάλλον
Μικρό-υφή	Ταχύτητα ολίσθησης: 1) Ταχύτητα οχήματος 2) Πέδηση	Ίχνος ελαστικού	1) Αέρας 2) Θερμοκρασία 3) Υγρό περιβάλλον 4) Χίονι και πάγος
Μάκρο-υφή	Ελιγμοί: 1) Στροφές 2) Προσπεράσματα	Σχεδίαση πέλματος και κατάσταση πέλματος Σύνθεση ελαστικού και σκληρότητα	Σκόνη, λάσπη, κλπ
Ανωμαλίες		Πίεση	
Ιδιότητες υλικού		φουσκώματος	
Θερμοκρασία		Φορτίο Θερμοκρασία	

Επειδή κάθε παράγοντας σε αυτόν τον πίνακα παίζει ρόλο στον καθορισμό της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος πρέπει να εξεταστεί ως διαδικασία αντί για την εγγενή ιδιότητά του.

5.1 Επιφανειακή υφή

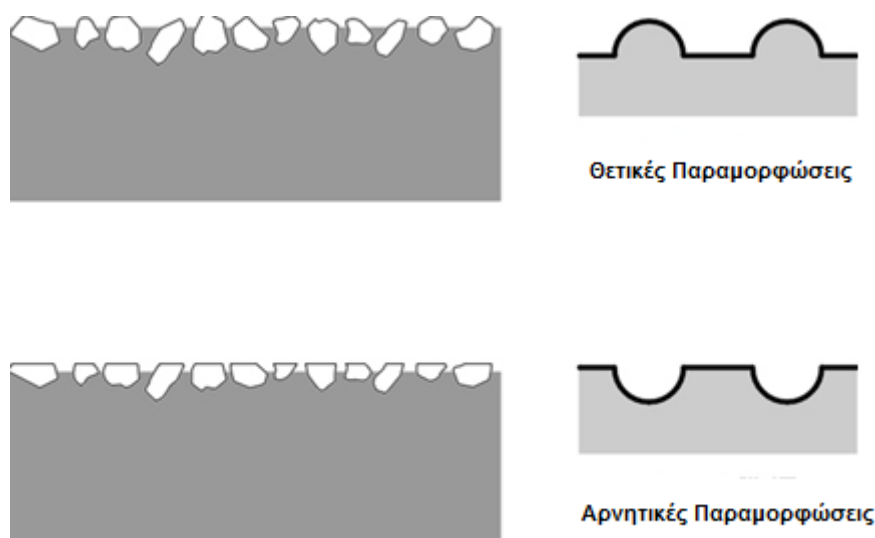
Στα χαρακτηριστικά της επιφάνειας συγκαταλέγονται τα δύο είδη υφής που επηρεάζουν κυρίως την αντιολισθητική ικανότητα, η μικροϋφή και η μακροϋφή. Όπως δείχνει το Σχήμα 8 (Flintsch et al., 2003) η μικροϋφή είναι ο βαθμός σκληρότητας που έχουν τα αδρανή στην επιφάνεια τους, ενώ η μακροϋφή δημιουργείται από τις αποκλίσεις μεταξύ των αδρανών. Η μικροϋφή είναι συνήθως υπεύθυνη για την τριβή του οδοστρώματος στις χαμηλές ταχύτητες, ενώ η μακροϋφή είναι κυρίως υπεύθυνη για την πιθανότητα του διαχωρισμού του ελαστικού από το οδόστρωμα όταν υπάρχει νερό και για τις δυνάμεις υστέρησης όταν τα οχήματα κινούνται με μεγάλη ταχύτητα. (Henry, 2000)



Σχήμα 8. Η μικροϋφή και η μακροϋφή (Flintsch et al., 2003)

Εξαιτίας της σημαντικότητας της επιφανειακής υφής (μικροϋφή, μακροϋφή, μέγα-υφή, τραχύτητα) στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος, θα αναλυθούν περαιτέρω οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος σχετίζονται με το αδρανές υλικό, το συνδετικό υλικό, τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος και στη συμπύκνωση κατά τη διάστρωση της, πιο συγκεκριμένα (J.W. Hall et.al 2009):

1. **Οι μέγιστες διαστάσεις των αδρανών.** Το μέγεθος των χονδρόκοκκων αδρανών στα οδοστρώματα παρέχει σε μεγάλο βαθμό την μακρο-υφή.
2. **Ο τύπος των χονδρόκοκκων αδρανών.** Η επιλογή των χονδρόκοκκων αδρανών (γωνιώδες και το σχήμα τους) είναι σημαντική για την αντοχή κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα θεμελιώδες για τα οδοστρώματα.
3. **Λεπτόκοκκα αδρανή.** Η επιλογή του λεπτόκοκκου υλικού και αν αυτό είναι θραυστό, επηρεάζει την αντοχή του.
4. **Συνδετικό υλικό (άσφαλτος).** Τα συνδετικά με χαμηλό ιξώδες τείνουν να προκαλούν ανάδυση ασφάλτου. Επίσης οι μεγάλες ποσότητες ασφάλτου, όλων των τύπων μπορούν να προκαλέσουν ανάδυση. Το αποτέλεσμα της ανάδυσης ασφάλτου είναι η μείωση ή ολική απώλεια της μικροϋφής και της μακροϋφής του οδοστρώματος. Επειδή το συνδετικό υλικό κρατά τα αδρανή στη θέση τους, μια άσφαλτος με αντίσταση στις καιρικές συνθήκες είναι πολύ καλή επιλογή.
5. **Κοκκομετρική διαβάθμιση.** Η διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος, επηρεάζει τη σταθερότητα και τα κενά αέρα του ασφαλτομίγματος.
6. **Τα κενά αέρα που υπάρχουν στο ασφαλτόμιγμα.** Η αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα, παρέχει αυξημένη αποστραγγιστική ικανότητα για την βελτίωση της αντιολισθητικής ικανότητα και στη μείωση του θορύβου.
7. **Η διεύθυνση της επιφανειακής υφής.** Η επιφανειακή υφή μπορεί να έχει εγκάρσιο, διαμήκη και διαγώνιο προσανατολισμό ως προς την κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Ο προσανατολισμός επηρεάζει τις δονήσεις των ελαστικών και ως εκ τούτου, τον θόρυβο.
8. **Ισοτροπική ή Ανισότροπη.** Αν η επιφανειακή υφή έχει την ίδια κατεύθυνση αναφορικά με την φορά κυκλοφορίας (ισοτροπική) ελαχιστοποιούνται οι αποκλίσεις και έτσι μειώνεται ο θόρυβος.
9. **Η παραμόρφωση της επιφανειακής υφής.** Οι θετικές παραμορφώσεις είναι αποτέλεσμα των προεξοχών των αδρανών στην μακροϋφή ενώ οι αρνητικές είναι αποτέλεσμα των εσοχών.(Εικόνα 6)



Εικόνα 6. Οι προεξοχές και οι εσοχές στην επιφανειακή υφή λόγω των αδρανών

Στο Πίνακα 2 (Sandberg 2002, Henry 2000, Rado 1994, PIARC 1995, AASHTO 1976) παρέχεται μια περίληψη του τρόπου με τον οποίο οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την μικροϋφή και την μακροϋφή.

Πίνακας 2. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μικροϋφή και την μακροϋφή

Τύπος Οδοστρώματος	Παράγοντας	Μίκρο-υφή	Μάκρο-υφή
Εύκαμπτο	Μέγιστες Διαστάσεις Αδρανούς		X
	Τύπος Χονδρόκοκκων Αδρανών	X	X
	Τύπος Λεπτόκοκκων Αδρανών		X
	Διαβάθμιση Αδρανών		X
	Ποσοστό Κενών		X
	Τύπος Ασφάλτου		X

Με την βελτιστοποίηση των παραγόντων του Πίνακα 2 αποκτώνται τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επιφάνειας του οδοστρώματος για μια συγκεκριμένη κατάσταση σχεδιασμού.

5.2 Λειτουργικές παράμετροι οχήματος

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ ενός ελαστικού και του οδοστρώματος ποικίλει ανάλογα με την ταχύτητα ολίσθησης. Αυξάνει γρήγορα με την αύξηση της ταχύτητας της ολίσθησης σε μια μέγιστη τιμή που συνήθως εμφανίζεται μεταξύ 10% και 20% της ολίσθησης. Η τριβή στη συνέχεια μειώνεται σε μια τιμή γνωστή τιμή που αναφέρεται ως ο συντελεστής συρόμενης τριβής, η οποία συμβαίνει σε ολίσθηση 100% (Hall et.al 2009)

5.3 Ιδιότητες των ελαστικών

• ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΕΛΜΑΤΟΣ

Ο σχεδιασμός του πέλματος (ο τύπος, το σχέδιο και το βάθος) και η κατάσταση του, έχουν σημαντική επίδραση στην αποστράγγιση του νερού που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Henry, 1983). Το νερό που παγιδεύεται μεταξύ του οδοστρώματος και του ελαστικού μπορεί να φύγει μέσα από τα κανάλια διαφυγής που δημιουργούνται από την επιφάνεια του οδοστρώματος και από το πέλμα του

ελαστικού. Όσο μεγαλύτερο το πάχος του νερού που υπάρχει στο οδόστρωμα τόσο βαθύτερες πρέπει να είναι οι ραβδώσεις στο ελαστικό. Ακόμα για τα πλήρως φθαρμένα ελαστικά (Εικόνα 7) η τριβή μειώνεται κατά 45% έως 70%.



Εικόνα 7. Διαφορετικές καταστάσεις ελαστικών

- ΠΙΕΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ

Τα ελαστικά που δεν είναι πλήρως φουσκωμένα προκαλούν μείωση της τριβής σε υψηλές ταχύτητες. Δηλαδή το κέντρο του πέλματος συρρικνώνεται και γίνεται πολύ κοίλο, με αποτέλεσμα τη συστολή των καναλιών αποστράγγισης στο πέλμα του ελαστικού και τη μείωση της πίεσης επαφής, οπότε παγιδεύεται το νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος και δεν διαφεύγει μέσα από κανάλια αποστράγγισης του πέλματος. Από την άλλη τα ελαστικά που είναι υπερβολικά φουσκωμένα προκαλούν μία μικρή απώλεια της τριβής, μειώνοντας το φαινόμενο παγίδευσής αφού πιέζουν με μεγαλύτερη πίεση το νερό από το ελαστικό του οχήματος και η διαφυγή του νερού γίνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα (Henry 1983, Kulakowski et al., 1990).

5.4 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

5.4.1 Θερμοκρασία

Η τριβή στα οδοστρώματα είναι αποτέλεσμα κυρίως δύο διάχυτων πηγών ενέργειας, της πρόσφυσης και της υστέρησης (Kummer 1966). Η ενέργεια πρόσφυσης είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων έλξης μεταξύ του ελαστικού τροχού και των ασφαλτικών επιφανειακών στρώσεων. Η ενέργεια υστέρησης είναι το αποτέλεσμα των απωλειών απόσβεσης και της ενέργειας που διασκορπίζεται από την φορτισμένη επιφάνεια του ελαστικού και της μακροϋφής του οδοστρώματος. Μια θεωρία που παρουσιάστηκε από τους Sakai και Araki (1998) αναφέρει ότι, κάτω από έντονη ολίσθηση του ελαστικού στο οδόστρωμα, παράγεται τεράστια θερμότητα στην περιοχή επαφής ελαστικού-οδοστρώματος, η οποία σχηματίζει ένα λεπτό φιλμ θερμότητας όπου στιγμιαία «λιώνει» το ελαστικό και την ασφάλτο. Αυτό το φιλμ, ουσιαστικά καταστρέφει όποια ανάπτυξη δυνάμεων πρόσφυσης, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός της πρόσφυσης να μην διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των δυνάμεων τριβής. Έτσι οι δυνάμεις υστέρησης είναι κυρίως αυτές που δημιουργούν την τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (Tabor et. al 1958, Grosch 2005). Τα ελαστικά με μεγάλους συντελεστές απόσβεσης έχουν υψηλό συντελεστή τριβής εξαιτίας της αύξησης της τριβής που οφείλεται στις δυνάμεις υστέρησης (Heiβsing et al. 2011). Η ανάπτυξη μεγάλων ή μικρών δυνάμεων υστέρησης οφείλεται στην δυσκαμψία του ελαστικού, η οποία μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του ελαστικού (Subhi and Farhad 2005).

Επίσης, σημαντική επίδραση έχει η θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην μεταβολή των τιμών της τριβής (Tung et.al 1977, Runkle and Mahone 1980, Burchett and Rizenbergs 1980, Jayawickrama and Thomas 1998). Οι Hill και Henry (1982) ανέπτυξαν ένα μοντέλο για την αντιμετώπιση της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης εποχικής θερμοκρασίας που επηρεάζουν τις μετρήσεις της θερμοκρασίας και κατέληξαν σε παρόμοιο συμπέρασμα.

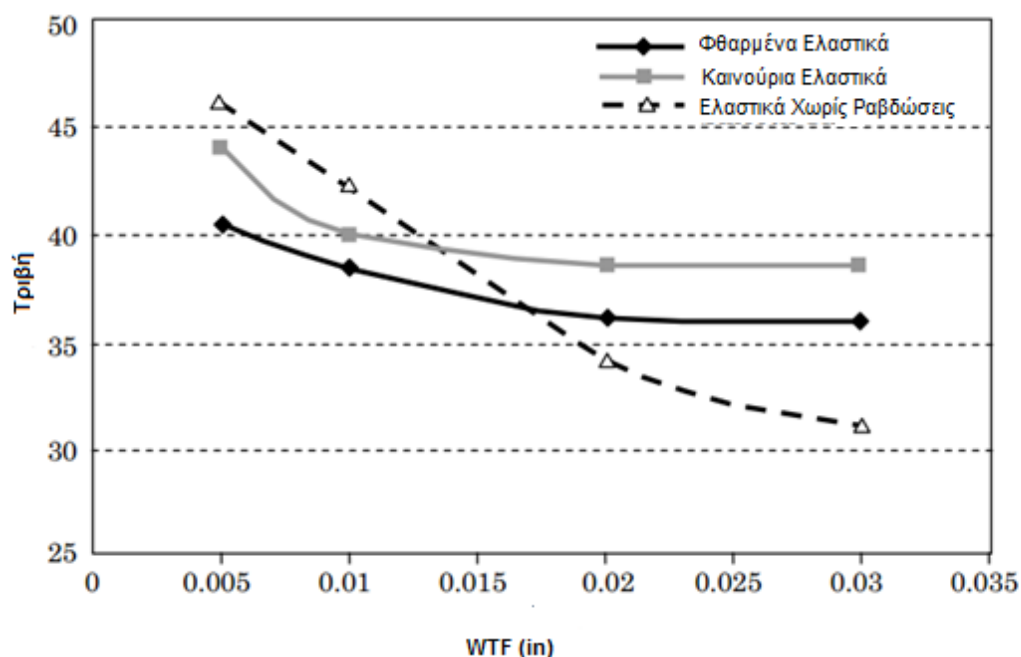
Σύμφωνα με τα παραπάνω, τόσο η θερμοκρασία περιβάλλοντος όσο και η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες της τριβής (Hall, Glover 2009). Έτσι η θερμοκρασία του οδοστρώματος και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος καθορίζουν την θερμοκρασία του ελαστικού που με την σειρά του θα επηρεάσει τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες του υλικού του (καουτσούκ) (Oliver, 1989). Οπότε θα πρέπει να εξεταστεί η παραγωγή θερμότητας κατά την τριβή του ελαστικού με τη μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος και να αξιολογηθούν αντίστοιχα οι ιδιότητες της τριβής (Grosch, and Schallamach 1970, Grosch, 1963). Οι Elkin et al (1980) διαπίστωσαν ότι ο συντελεστής τριβής είναι χαμηλότερος το καλοκαίρι και υψηλότερος την άνοιξη ανεξάρτητα από τον τύπο του ασφαλτομίγματος. Έχουν γίνει έρευνες όσον αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος και στις ιδιότητες της επιφανειακής τριβής (Flintsch, et al. 2005, Luo, 2003) και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες ασκούν σημαντική επίδραση στις εποχιακές μεταβολές της επιφανειακής τριβής του οδοστρώματος.

Για διαφορετικού είδους ολίσθησης των ελαστικών, παράγεται και διαφορετική ποσότητα θερμότητας που επηρεάζει ανάλογα τις ιδιότητες της τριβής (Grosch, K. A. 2005). Διαφορετικές συσκευές μέτρησης της τριβής χρησιμοποιούνται από διάφορες οδικές υπηρεσίες ανά τον κόσμο κάτω από διαφορετικές συνθήκες ολίσθησης. Για παράδειγμα, ο ευρέως χρησιμοποιούμενος πλήρης πέδησης τροχός (locked-wheel) μετρά την τριβή σε αναλογία ολίσθησης 100% (πλήρης ολίσθηση), ενώ οι συσκευές σταθερής ολίσθησης λειτουργούν τυπικά σε αναλογία ολίσθησης 15% έως 20% και συσκευές μεταβλητής ολίσθησης σε ποσοστό 15% έως 85%. Ο Grosch αναφέρει ότι με αύξηση του λόγου ολίσθησης, η θερμοκρασία του ελαστικού αυξάνεται και προκαλεί μείωση της μέγιστης διαμήκους τριβής

Συνοπτικά, τα ελαστικά αυτοκινήτων είναι ιξωδοελαστικά υλικά και οι ιδιότητές τους μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από μεταβολές στη θερμοκρασία και άλλες θερμικές ιδιότητες, όπως η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα. Η τριβή του ελαστικού με το οδόστρωμα μειώνεται γενικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του ελαστικού, αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποσοτικά (Anupam et.al).

5.4.2 Νερό

Το νερό, με τη μορφή βροχής ή υγροποίησης, μπορεί να λειτουργήσει ως λιπαντικό, μειώνοντας σημαντικά την τριβή μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Η επίδραση του πάχους του νερού (water film thickness - WFT) στην τριβή είναι ελάχιστη σε χαμηλές ταχύτητες και αρκετά έντονη σε υψηλότερες ταχύτητες. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7 (Henry, 2000) ο συντελεστής τριβής ενός οχήματος που ολισθαίνει πάνω σε μία επιφάνεια υγρού οδοστρώματος μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται το WFT. Ο ρυθμός με τον οποίο ο συντελεστής τριβής μειώνεται γενικά γίνεται μικρότερος καθώς αυξάνεται το WFT. Επιπλέον, η επίδραση του WFT επηρεάζεται από το σχεδιασμό και την κατάσταση των ελαστικών, με τα φθαρμένα ελαστικά να είναι πιο ευαίσθητα στο WFT.



Διάγραμμα 7. Η επίδραση του πάχους του νερού στην τριβή του οδοστρώματος (Henry, 2000)

Στην πραγματικότητα, όταν η επιφάνεια του δρόμου είναι υγρή, παρατηρείται σημαντική μείωση του συντελεστή τριβής λόγω της παρουσίας ενός φιλμ νερού που λειτουργεί ως λιπαντικό μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι Kulakowski και Harwood (1990), ανέφεραν ότι ακόμη και ένα πάχος νερού τόσο λεπτό όσο 0,025 mm, μπορεί να μειώσει την τριβή ακόμα και 75% σε σχέση με την τριβή που υπάρχει σε στεγνό οδόστρωμα. Ο Do (2013) βρήκε από την άλλη πλευρά ότι ανάλογα με την επιφανειακή μικροϋφή (παρέχεται από τα αδρανή του ασφαλτομίγματος) ο συντελεστής τριβής σε υγρές συνθήκες μπορεί να διατηρηθεί σε τιμή κοντά με αυτόν σε ξηρές συνθήκες μέχρι ενός κρίσιμου πάχους φιλμ νερού.

Βασισμένοι στις δοκιμές τριβής που πραγματοποιήθηκαν με όχημα εξοπλισμένο με ρυμουλκούμενο ο Veith, A. G (1983) έδειξε ότι ο συντελεστής τριβής είναι ανεξάρτητος από το βάθος του νερού (φιλμ) σε χαμηλές ταχύτητες (μέχρι 50 km/h) αλλά επηρεάζεται έντονα από το βάθος του νερού στις υψηλές ταχύτητες (96 km/h και άνω). Το σχετικά μεγάλο πάχος νερού σχηματίζεται στο οδόστρωμα όταν η αποστράγγιση είναι ανεπαρκής κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων ή όταν λόγω φθοράς του οδοστρώματος δημιουργούνται λακούβες. Για την ανάπτυξη επαρκούς τριβής το νερό μεγάλου πάχους πρέπει να απομακρυνθεί από το οδόστρωμα. Έτσι η διαφυγή του νερού μπορεί να συμβεί όταν υπάρχουν σχετικά μεγάλα στρώματα νερού και τα οχήματα κινούνται με υψηλότερες ταχύτητες. Το φαινόμενο αυτό γίνεται όταν το ελαστικό του οχήματος διαχωρίζεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος από την πίεση του νερού που συσσωρεύεται στη διεπαφή του ελαστικού, προκαλώντας πτώση της τάσης σε σχεδόν μηδενικό επίπεδο (Horne and Buhlmann, 1983). Πρόκειται για ένα πολύπλοκο φαινόμενο που επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως το πάχος του νερού, την ταχύτητα του οχήματος, τη μακροϋφή του οδοστρώματος, το βάθος των ραβδώσεων του πέλματος του ελαστικού, την πίεση του ελαστικού και την περιοχή επαφής του ελαστικού. Η απώλεια της άμεσης επαφής του ελαστικού του οχήματος με το οδόστρωμα μπορεί όμως να πραγματοποιηθεί και σε χαμηλές ταχύτητες 64-72 km/h σε λακούβες από 25 mm βάθος και 9 m μήκους (Hayes et al., 1983).

Από την άλλη μια πολύ μικρή ποσότητα νερού μπορεί να μειώσει σημαντικά την τριβή του οδοστρώματος. Δηλαδή, μόλις 0,05 mm νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να μειώσει τον συντελεστή τριβής κατά 20% έως 30% σε σχέση με τον συντελεστή τριβής σε στεγνό οδόστρωμα. Σε μερικές περιπτώσεις, 0,025 mm νερού μπορεί να μειώσει σημαντικά την τριβή. Τα λεπτά αυτά φιλμ νερού αναπτύσσονται μετά από

βροχοπτώσεις ή κατά τη διάρκεια 'ψιλόβροχων' όπου η επιφανειακή υφή του οδοστρώματος δίνει στον χρήστη την ψευδαίσθηση της ασφάλειας. Όμως διάφορα πειράματα έχουν δείξει (Delanne, Y et.al 2006) ότι η μείωση του συντελεστή τριβής στα υγρά οδοστρώματα είναι σημαντική και συνεπακολούθως και η ασφάλεια. Αυτή η απότομη πτώση του συντελεστή τριβής εξηγεί γιατί οι καταγραφές ατυχημάτων είναι ειδικά υψηλές μετά από βροχοπτώσεις.

Συμπερασματικά η μακροϋφή του οδοστρώματος και το βάθος των ραβδώσεων του πέλματος του ελαστικού επηρεάζουν τη διαφυγή του νερού με δύο τρόπους. Πρώτον, έχουν άμεση επίδραση στην κρίσιμη ταχύτητα διαφυγής, επειδή παρέχουν μια διαδρομή για το νερό να ξεφύγει από τη διεπαφή του ελαστικού-οδοστρώματος. Δεύτερον, έχουν έμμεση επίδραση στην κρίσιμη ταχύτητα διαφυγής, δεδομένου ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μακροϋφή, τόσο πιο βαθιά πρέπει να είναι το νερό για να προκληθεί η διαφυγή του. Ωστόσο, η επιφάνεια του οδοστρώματος πρέπει επίσης να έχει την κατάλληλη μικροϋφή για να αναπτύξει επαρκή τριβή.

5.4.2.1 Ατυχήματα σε υγρές συνθήκες και Splash/Spray

Τα "Splash" και "spray" περιγράφουν σταγονίδια νερού και ομίχλης που προκαλούνται από το όχημα και επηρεάζουν δυσμενώς την ορατότητα του οδηγού σε υγρές οδούς. Το 'Splash' αποτελείται από πολύ μεγάλα σταγονίδια υγρού που πέφτουν βαλλιστικά στο έδαφος, ενώ το 'Spray' αποτελείται από πολύ μικρά σταγονίδια υγρού που παραμένουν στον αέρα για μεγάλο χρονικό διάστημα με τη μορφή νέφους πριν πέσουν στο έδαφος (NHTSA, 1998) (Εικόνα 8).



Εικόνα 8. Φαινόμενο splash and spray

Το 'Splash' δεν επηρεάζει σημαντικά την ορατότητα του οδηγού, καθώς τα σταγονίδια συνήθως παραμένουν κοντά στο έδαφος και έξω από τη γραμμή της ορατότητας του οδηγού. Ωστόσο, επειδή το 'Spray' μπορεί να παραμείνει επί μακρόν στον αέρα, μπορεί να εκπλήξει, να μπερδέψει και να αποπροσανατολίσει τους οδηγούς οδηγώντας ενδεχομένως στους κινδύνους που αναφέρονται στον Πίνακα 3 (NHTSA, 1998). Παρόλου που είναι δεκτό ότι το 'Splash' και το 'Spray' αυξάνουν τον κίνδυνο των ατυχημάτων υπάρχουν λίγες πληροφορίες σχετικά με το πόσα ατυχήματα έχουν συμβεί εξαιτίας και μόνο λόγω του 'Splash' και του 'Spray'.

Όχημα	Περιγραφή
Προπορευόμενο όχημα	Το 'Spray' καλύπτει το όχημα που ακολουθεί
Προηγούμενο όχημα	Το 'Spray' από το όχημα που προπορεύεται μειώνει την ορατότητα : 1) του προπορευόμενου οχήματος, 2) των πινάκιδων σήμανσης,3) της διαγράμμισης ,4)της λοιπής κυκλοφορίας στις διασταυρώσεις
Προηγούμενο όχημα	Ψεκάζονται τα οχήματα κατά την προσπέραση και κατά την αλλαγή λωρίδας
Οχήματα που κινούνται σε οδό με μία λωρίδα ανά κατεύθυνση	Το 'Spray' μειώνει την ορατότητα στην λωρίδα προσπέρασης αλλά και 1) του προπορευόμενου οχήματος, 2) των πινάκιδων σήμανσης,3) της διαγράμμισης ,4)της λοιπής κυκλοφορίας στις διασταυρώσεις στην λωρίδα κίνησης
Οχήματα που κινούνται σε οδό με δυο διαχωρισμένες λωρίδες ανά κατεύθυνση	Η μετατόπιση του 'Spray' από τα οχήματα που κυκλοφορούν στις αντίθετες λωρίδες κατεύθυνσης μειώνει την ορατότητα :1) του προπορευόμενου οχήματος, 2) των πινάκιδων σήμανσης,3) της διαγράμμισης ,4)της λοιπής κυκλοφορίας στις διασταυρώσεις
Πεζοί, οδηγοί δικύκλων	Πολλά προβλήματα ορατότητας, αφού γνωρίζουν ότι δεν τους βλέπουν κατευθύνονται διαφορετικά και η κίνησή του δεν μπορεί να προβλεφθεί και ψεκάζονται από τα οχήματα που τους

Πίνακας 3. Πιθανοί κίνδυνοι που μπορούν να δημιουργηθούν από το Splash και το Spray(NHTSA, 1998).

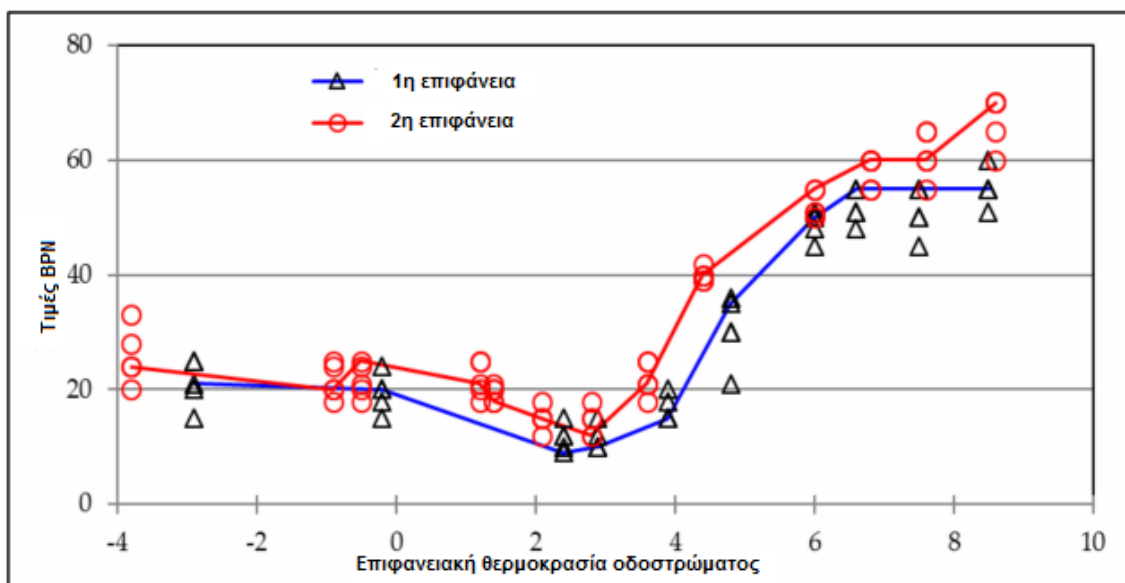
Έτσι σύμφωνα με όλα τα παραπάνω η διερεύνηση για την αντιολισθητική ικανότητα (και τους παράγοντες που την επηρεάζουν) ενός συστήματος αυτοκινητοδρόμων είναι πάρα πολύ σημαντική, αφού έχει καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια του συστήματος.

5.4.3 Χιόνι – πάγος

Το χιόνι και ο πάγος στην επιφάνεια του οδοστρώματος παρουσιάζουν την πιο επικίνδυνη κατάσταση για την πέδηση ή τη στροφή των οχημάτων. Το επίπεδο τριβής μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος είναι τέτοιο ώστε σχεδόν οποιαδήποτε απότομη πέδηση ή ξαφνική αλλαγή κατεύθυνσης οδηγεί σε ολίσθηση και απώλεια σταθερότητας κατεύθυνσης του οχήματος(Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Οδόστρωμα μετά από χιονόπτωση και παγετού



Διάγραμμα 8. Μείωση της τριβής σε διαφορετικές επιφάνειες οδοστρώματος (Yan. et.al 2019)

Τέλος για να γίνει αντιληπτή η πτώση της τριβής, το Διάγραμμα 8 δείχνει την αντιολισθητική ικανότητα διαφορετικών επιφανειών όταν η θερμοκρασία είναι κοντά σ αυτή που λιώνει ο πάγος. Όποια και αν είναι η επιφάνεια ο συντελεστής τριβής πέφτει δραματικά σε αυτές τις θερμοκρασίες.

5.4.4 Κατάλοιπα οδοστρώματος

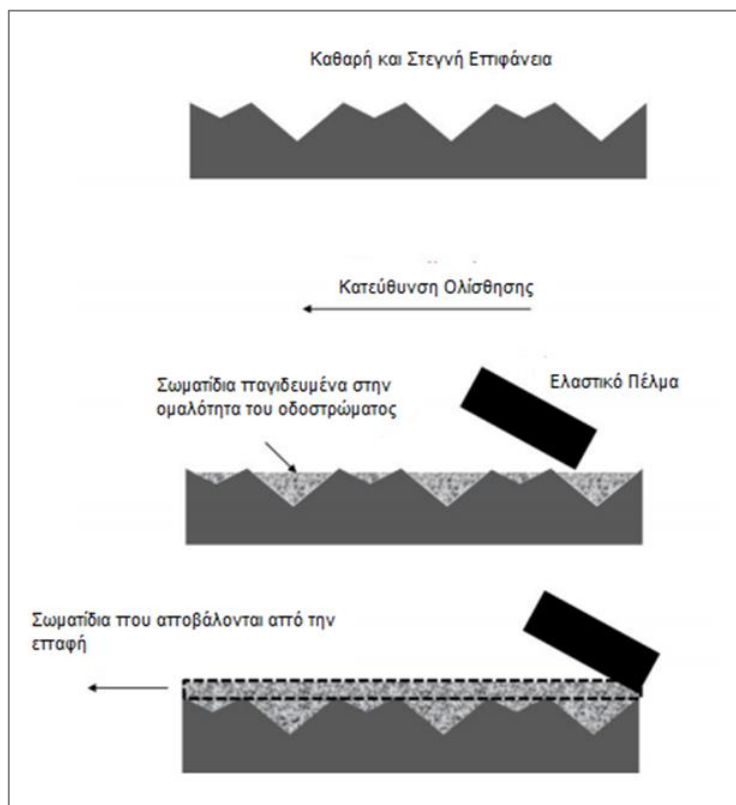
Τα οδικά ατυχήματα αυξάνονται κατά την πρώτη βροχή μετά από μακρά περίοδο ξηρασίας (Eisenberg 2004). Ο Eisenberg ανάλυσε τη σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και των οδικών ατυχημάτων για πάνω από 25 χρόνια στις Η.Π.Α και κατέληξε στο γεγονός ότι ο κίνδυνος των ατυχημάτων αυξάνεται με τον αριθμό των ξηρών ημερών από την τελευταία βροχόπτωση. Αυτή η αύξηση του κινδύνου οφείλεται στην συσσώρευση λεπτών σωματιδίων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η προέλευση αυτών των σωματιδίων είναι ποικίλη (π.χ σκόνη, υπολείμματα από ελαστικά). Οι Sartor, Boyd, Agardy 1974, Egodawatta 2007 ανέπτυξαν μοντέλα για την πρόβλεψη της συσσώρευσης των σωματιδίων ως συνάρτηση του αριθμού των ξηρών ημερών και άλλων καιρικών και κυκλοφοριακών συνθηκών. Οι ίδιοι συγγραφείς εξέτασαν επίσης την κατανομή μεγέθους σωματιδίων ανάλογα με τη χρήση της γης (βιομηχανική, εμπορική, οικιστική).

Ο Shakely et al (2004) αναφέρει ότι ο συντελεστής τριβής, μετρημένος σε πλήρη ολίσθηση, μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης σκόνης. Ο Wilson (2006) έδειξε πως η τριβή ποικίλλει σε υγρή-ξηρή-υγρή περίοδο. Ο συντελεστής τριβής θεωρείται σταθερός κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, στις πρώτες σταγόνες βροχής, ο συντελεστής τριβής μειώνεται σημαντικά καθώς η βροχή συνεχίζει να πέφτει η επιφάνεια ξεπλένεται και ο συντελεστής τριβής αυξάνεται μέχρις ότου φθάσει σε σταθερή τιμή. Όταν η βροχή σταματά και η επιφάνεια στεγνώνει αυξάνεται σε επίπεδο παρόμοιο με αυτό πριν από τη βροχή. Ο Do (2014) ανέπτυξε σε εργαστήριο ένα πειραματικό πρωτόκολλο το οποίο αναπαράγει ποιοτικά την απώλεια αντοχής σε ολίσθηση με το χρόνο κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης μετά από μία μακρά ξηρή περίοδο. Αυτοί οι συγγραφείς διερεύνησαν την επίδραση της συγκέντρωσης των σωματιδίων και διαπίστωσαν ότι όσο μεγάλη ήταν η συγκέντρωση τόσο χαμηλότερος ήταν ο συντελεστής τριβής και τόσο πιο αργά καθάριζε το οδόστρωμα.

Συμπερασματικά ο κίνδυνος που δημιουργείται από την συσσώρευση των σωματιδίων είναι αρκετά αντιληπτός. Ωστόσο, ο τρόπος που αυτά τα σωματίδια επενεργούν στην τριβή της διεπαφής ελαστικού-οδοστρώματος εξακολουθεί να είναι υπό διερεύνηση αμφισβητήσιμος. Στο πεδίο, η τριβή σε ξηρές

περιόδους θεωρείται ικανοποιητική και συνήθως το νερό είναι το κύριο στοιχείο που επηρεάζει την ασφαλή κίνηση των οχημάτων.

Η παρουσία σωματιδίων στο οδόστρωμα θεωρείται επιπρόσθετο στοιχείο που μειώνει περισσότερο την τριβή σε υγρές συνθήκες. Ο Persson (2005) ανέφερε ότι το μίγμα των σωματιδίων και νερού είναι πολύ ιξώδες με αποτέλεσμα να λιπαίνεται περισσότερο η διεπαφή ελαστικού-οδοστρώματος (Εικόνα 10).



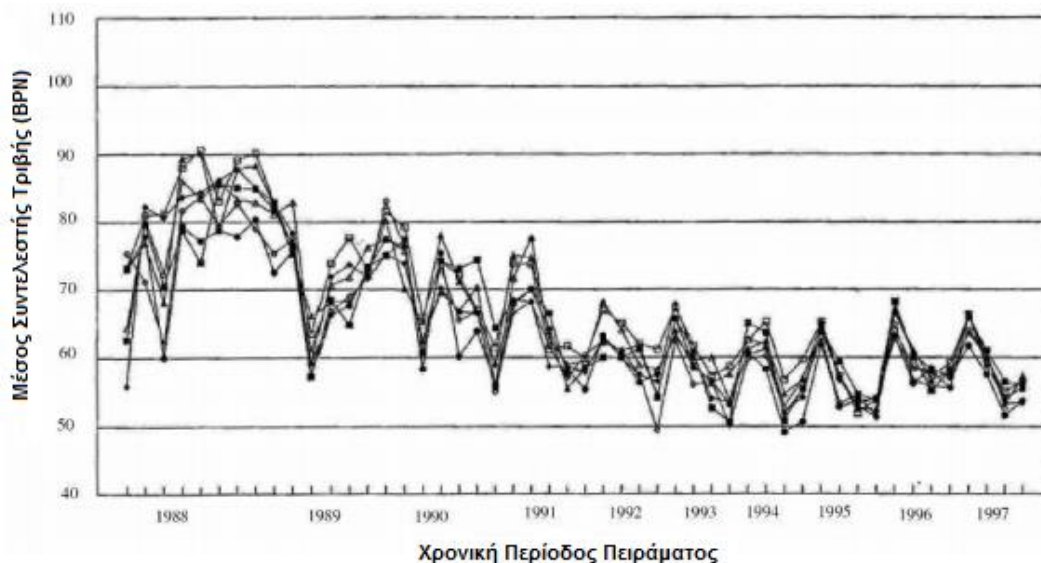
Εικόνα 10. Μηχανισμός λειτουργίας ρυπογόνου οδοστρώματος (Hichri et.al 2017)

Ωστόσο, άλλοι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι και τα σωματίδια χωρίς παρουσία νερού μπορούν να προκαλέσουν δράσεις λίπανσης. Οι Li et al (2014) μελέτησε την τριβή στεγνού, αλλά ρυπασμένου οδοστρώματος και διαπίστωσε ότι οι ρύποι (σωματίδια) μπορούν να μειώσουν τον συντελεστή τριβής ακόμα και σε ξηρές συνθήκες. Σύμφωνα με αυτούς τους συγγραφείς ο συντελεστής τριβής σε ξηρές συνθήκες μειώνεται με μεγαλύτερο βαθμό όταν το μέγεθος των συσσωρευμένων σωματιδίων μεγαλώνει. Δηλαδή, υπάρχει ένα κρίσιμο μέγεθος σωματιδίων (περίπου 50-60 μm) πάνω από το οποίο τα σωματίδια κυλούν μεταξύ τους όταν το ελαστικό ολισθαίνει πάνω τους και κάτω από το οποίο τείνουν να κολλάνε μεταξύ τους λόγω της συνοχής και προάγουν τον μηχανισμό ολίσθησης (Mills et al 2009). Έχει αποδειχθεί ότι τα σωματίδια μπορούν να σχηματίσουν φιλμ λιπαντικού που παρουσιάζει συμπεριφορά παρόμοια με εκείνη των υγρών φιλμ (Heshmat 1993).

5.5 Εποχιακές Μεταβολές

Η αντιολισθητική ικανότητα ενός οδοστρώματος, έχει αποδειχθεί ότι ποικίλλει καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτή η διακύμανση είναι συνήθως υψηλότερη το χειμώνα και χαμηλότερη το καλοκαίρι για τα περισσότερα κλίματα του βόρειου ημισφαιρίου (Wilson 2006). Ο Hosking (1976), παρατήρησε μετά από μακροχρόνια έρευνα (Ηνωμένο Βασίλειο) μια σαφή τάση ετήσιας κυκλικής διακύμανσης. Μετά από τη μελέτη αυτή παρατηρήθηκε εποχιακή διακύμανση της ίδιας τάσης (υψηλή σε χειμώνα, χαμηλή το καλοκαίρι) σε αρκετές χώρες, όπως στη Γαλλία (Brillet & Gothie 1983), στις Ηνωμένες Πολιτείες

(Jayawickrama & Thomas 1998, Rice 1977), στον Καναδά (Ahmed & Tighe 2009) και στη Νέα Ζηλανδία (Cenek et al., 1999). Για τη μελέτη της Νέας Ζηλανδίας (Cenek et al., 1999) (Διάγραμμα 9), πραγματοποιήθηκε μια συγκρίσιμη μακροχρόνια έρευνα που έγινε σε νέα κατασκευασμένα οδοστρώματα.



Διάγραμμα 9. Εποχιακές μεταβολές στην Νέα Ζηλανδία (Cenek et al. 1999)

Σημειώνεται ότι η μέτρηση έγινε από το έτος κατασκευής και συνεπώς στις ακόλουθες τρεις φάσεις, όπως προτείνεται από τους Prowell et al. (2003), παρατηρήθηκαν:

- 1) Αρχική φάση : Η αρχική αντίσταση στην ολίσθηση είναι χαμηλή, πιθανώς λόγω της επικάλυψης των αδρανών με ασφάλτο. Η ασφαλτος σταδιακά είτε κατακάθεται είτε απομακρύνεται λόγω της κυκλοφορίας με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής στην ολίσθηση.
- 2) Φάση λείανσης. Η επιφάνεια των αδρανών (μικροϋφή) λόγω της κυκλοφορίας τρίβεται με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής στην ολίσθηση.
- 3) Φάση ισορροπίας : Η φάση λείανσης έχει φτάσει σε κατάσταση σχεδόν ισορροπίας. Στη φάση αυτή, η αντίσταση στην ολίσθηση ποικίλει κάθε χρόνο σύμφωνα με την έρευνα του Ηνωμένου Βασιλείου.

Στην Αυστραλία, οι Oliver et al. (1988) διενήργησαν μια έρευνα για την τριβή στις αντιολισθητικές επιφάνειες σε όλη τη διάρκεια μιας διετούς περιόδου (1979-1981)(Διάγραμμα 10). Τα στοιχεία από τις μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν. Ο Oliver (1988) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι σε όλες τις πολιτείες της Αυστραλίας, εκτός από το Κουίνσλαντ, υπήρξε σημαντική εποχιακή διακύμανση της αντοχής στην ολίσθηση. Η βροχόπτωση θεωρήθηκε ως η μεταβλητή που ήταν κυρίως υπεύθυνη για την εποχιακή διακύμανση. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το Μπρίσμπεϊν λόγω του μοναδικού κλίματος που έχει, δηλαδή δέχεται τις βροχοπτώσεις κυρίως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και οι δρόμοι είναι υγροί για μικρότερη περίοδο.

Τα ακόλουθα παρατηρήθηκαν και έγιναν από τον Cenek (1999) στη μελέτη:

- 1) Το εύρος της εποχιακής διακύμανσης εξαρτάται από τον τύπο του αδρανούς.
- 2) Αδρανή ευαίσθητα στο φαινόμενο της λείανσης έδωσαν πιο έντονα αποτελέσματα για την εποχιακή διακύμανση.
- 3) Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι η ανάκτηση αντοχής στην ολίσθηση ήταν μικρότερη για τα παλαιότερα αδρανή.

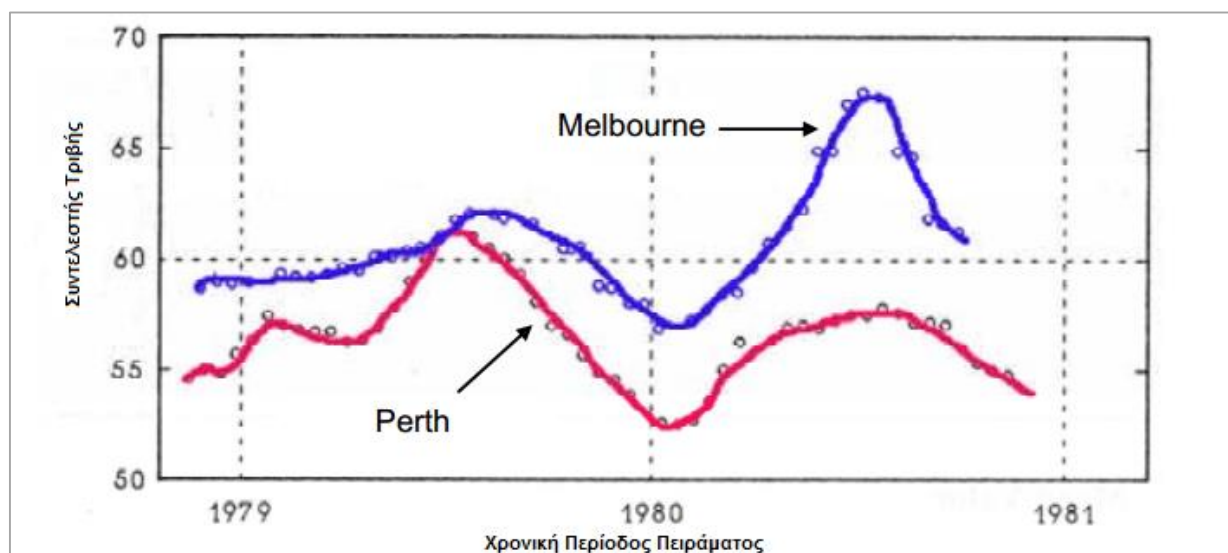
Το Austroads (2011) απαριθμεί έναν αριθμό μηχανισμών που είναι οι κύριοι υπεύθυνοι για την εποχιακή διακύμανση:

1) Τριβή: Το φαινόμενο της τριβής μεταξύ της μικροϋφής των αδρανών και της κυκλοφορίας μειώνει την τραχύτητα των αδρανών. Μεγάλα χρονικά διαστήματα ζέστης έχουν ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση σκόνης και άλλων υπολειμμάτων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η βροχή ξεπλένει τα λεπτότερα υπολείμματα και αφήνει τα χονδρότερα κάτω από τη δράση της κυκλοφορίας όπου 'σκληραίνει' το αδρανές και έτσι αποκαθίσταται η μικροϋφή του (Rice 1977).

2) Λείανση: Η λείανση θεωρήθηκε ότι είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την τριβή σε επιφάνειες μεγαλύτερες του ενός ή δύο ετών. Μετά από αυτή την περίοδο, η αντίσταση στην ολίσθηση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή θεωρείται ότι είναι το αποτέλεσμα μιας ισορροπίας, όπου αφενός η λείανση τείνει να μειώνει την αντοχή στην ολίσθηση και αφετέρου άλλοι παράγοντες όπως ο καιρός και η τριβή τείνουν να την αυξάνουν. Όπου επιτυγχάνεται αυτή η ισορροπία η αντίσταση στην ολίσθηση εξαρτάται από την αντοχή των αδρανών στη λείανση, από την ένταση της κυκλοφορίας και από το ιστορικό των βροχοπτώσεων (Salt 1976).

3) Αποσάθρωση: Οι εργαστηριακές μελέτες υποδεικνύουν ότι ο κύριος παράγοντας της αποσάθρωσης μπορεί να αποδοθεί σε όξινα όμβρια ύδατα (Buhlman 1984).

4) Επιφανειακή μόλυνση (σκόνη): Ένας πρόσθετος παράγοντας της εποχικής διακύμανσης που διαπιστώθηκε από διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στη Βόρεια Αμερική (Jayawickrama & Thomas 1998, Ahammed & Tighe 2009, MacDonald et al., 2009) είναι η ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας (ζέστη το καλοκαίρι, κρύο το χειμώνα). Πρέπει να σημειωθεί ότι η διόρθωση θερμοκρασίας δεν εξετάζεται στις ΗΠΑ λόγω της χρήσης συνθετικού πλαστικού. Δεδομένου ότι τα δεδομένα που μετρήθηκαν με τη χρήση συσκευών με βάση συνθετικό πλαστικό παραμένουν ακόμα ευαίσθητα στη θερμοκρασία, η ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας έχει κατανοηθεί ως η κύρια αιτία της εποχιακής διακύμανσης. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί με τον καθορισμό συντελεστών διορθώσεως της θερμοκρασίας ανά συσκευή (όπως στην περίπτωση της BPT που χρησιμοποιείται στην Αυστραλία).



Διάγραμμα 10. Εποχιακές μεταβολές στο Περθ και στην Μελβούρνη (Oliver et al. 1988)

6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Η μέτρηση της τριβής και της επιφανειακής υφής του οδοστρώματος έχει πρωταρχική σημασία τα τελευταία 50 χρόνια. Πολλοί διαφορετικοί τύποι εξοπλισμού έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αυτών των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Για τις μετρήσεις μόνο της τριβής υπάρχουν αρκετές εμπορικές συσκευές που μπορούν να λειτουργούν είτε με σταθερή είτε με μεταβαλλόμενη ολίσθηση σε ταχύτητες έως και 161 km/h με μεταβλητή, την κατάσταση των ελαστικών (όπως φορτίο, μέγεθος, σχεδιασμός, κατασκευή πέλματος και πίεση ελαστικών). Όσον αφορά την επιφανειακή υφή είτε πρόκειται για μικροϋφή είτε για μακροϋφή μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών συσκευών επαφής με ολίσθηση, των ογκομετρικών τεχνικών και τεχνικών αποστράγγισης νερού (J.W. Hall et.al 2009). Η American Society for Testing and Material (ASTM) και η American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) έχουν αναπτύξει ένα σύνολο χαρακτηριστικών επιφανειακών προτύπων πρακτικής μέτρησης για την εξασφάλιση συγκρίσιμων στοιχείων σχετικά με την υφή και την τριβή. Δεδομένου ότι τα πρότυπα διασφαλίζουν τη δυνατότητα σύγκρισης των μετρήσεων για πρακτικούς σκοπούς, οι μέθοδοι και οι συσκευές ομαδοποιούνται σε ζεύγη σύμφωνα με μετρήσεις που εκτελούνται σε αυτοκινητόδρομους χωρίς κλείσιμο λωρίδας (σχετικά υψηλές ταχύτητες) και σε αυτές που απαιτούν κλείσιμο λωρίδας – στατικές συσκευές μέτρησης (δηλ. συσκευές χαμηλής ταχύτητας και στάσης). Γενικά, οι συσκευές μέτρησης που απαιτούν κλείσιμο λωρίδας είναι απλούστερες και σχετικά ακριβείς, ενώ οι συσκευές που δεν απαιτούν κλείσιμο λωρίδας αυτοκινητόδρομου είναι πιο σύνθετες, ακριβότερες και απαιτούν περισσότερη κατάρτιση τόσο για τη συντήρηση όσο και για τη λειτουργία τους. Με την πρόσφατη εξέλιξη της τεχνολογίας στην απόκτηση δεδομένων, την τεχνολογία αισθητήρων και την ισχύ επεξεργασίας δεδομένων των υπολογιστών, η αληθινή υπεροχή της ποιότητας των δεδομένων για τις συσκευές σταθερής και χαμηλής ταχύτητας μειώνεται. Η ανάλυση και η ακρίβεια όμως των δεδομένων που αποκτώνται από συσκευές χαμηλής ταχύτητας εξακολουθεί να αντικαθιστά εκείνη των συσκευών υψηλής ταχύτητας, αλλά σε μικρότερα περιθώρια καθώς η απλότητα και το κόστος τις καθιστά ελκυστικότερες (Hall et.al 2009).

6.1 Συσκευές μέτρησης συντελεστή τριβής

Οι δύο συσκευές που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών τριβής του οδοστρώματος στο εργαστήριο ή σε χαμηλές ταχύτητες στο πεδίο είναι το British Pendulum Tester (BPT) (AASHTO T 278 ή ASTM E 303) και το Dynamic Friction Tester (DFT) (ASTM E 1911)(Πίνακες 4, 5).

Πίνακας 4. Επισκόπηση των μεθόδων δοκιμής τριβής οδοστρώματος που απαιτούν έλεγχο κυκλοφορίας

Μέθοδος Δοκιμής	Πρότυπες Προδιαγραφές	Περιγραφή	Εξοπλισμός
Μέτρηση Απόστασης Πλήρους Πέδησης	ASTM E 445	Η επιφάνεια του πεζοδρομίου ψεκάζεται με νερό μέχρι κορεσμού. Ένα όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα (40 mi / ώρα [64 km / hr] που καθορίζεται) πάνω στην επιφάνεια. Οι τροχοί βρίσκονται σε πλήρη πέδηση και μετρείται η απόσταση που το όχημα φτάνει σε πλήρη στάση. Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται διαφορετικές ταχύτητες και πλήρως ενεργοποιημένο anti-blocking system (ABS)	Επιβατικό αυτοκίνητο ή ελαφρύ φορτηγό (τουλάχιστον 3,200 lb [κατά προτίμηση εξοπλισμένο με σύστημα ανάρτησης βαρέως τύπου]). Το σύστημα πέδησης θα πρέπει να είναι ικανό σε πολύ καλή κατάσταση. Τα ελαστικά θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα με ραβδώσεις κατά ASTM E 501 
Μέτρηση της Τιμής Επιβράδυνσης.	ASTM E 2101	Οι δοκιμές πραγματοποιούνται συνήθως το χειμώνα και σε οδόστρωμα που έχει υποστεί μόλυνση (βρωμίες, λάσπη, σκόνη). Το όχημα ταξιδεύει με κανονική ταχύτητα (20 έως 30 mi / hr [32 έως 48 km / hr]), εφαρμόζονται τα φρένα για την ασφάλιση των τροχών, μέχρι να μετρηθούν τα ποσοστά επιβράδυνσης. Η ταχύτητα επιβράδυνσης καταγράφεται για τον υπολογισμό της τριβής	Μηχανικός ή ηλεκτρονικός εξοπλισμό, που φαίνεται δεξιά, είναι εγκατεστημένος σε οποιοδήποτε όχημα για τη μέτρηση και καταγραφή του ρυθμού επιβράδυνσης. 
Κινητοί Μετρητές	ASTM E 303 ASTM E 1911	Οι φορητές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των ιδιοτήτων τριβής των επιφανειακών ιδιοτήτων του οδοστρώματος. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν τη θεωρία του εκκρεμούς για τη μέτρηση της τριβής στο εργαστήριο ή στο πεδίο 1) British Pendulum Tester (BPT). Το εκκρεμές του BPT (ελαστικό πέλμα) έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος σε χαμηλής ταχύτητα. Η ανύψωση στην οποία ο το εκκρεμές φτάνει μετά την επαφή παρέχει έναν δείκτη τριβής. Τα δεδομένα από πέντε μετρήσεις συνήθως συλλέγονται και καταγράφονται. 2) Ο δυναμικός μετρητής τριβής (Dynamic Friction Tester) μετρά τη ροπή που απαιτείται για την περιστροφή τριών μικρών ελατηριακών ελαστικών επιθεμάτων για κυκλική διαδρομή πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος με ταχύτητες από 3 έως 55 mi / hr (5 έως 89 km / h). Η ταχύτητα περιστροφής, η περιστροφική ροπή και το προς τα κάτω φορτίο μετρώνται και καταγράφονται ηλεκτρονικά	1) Το BPT λειτουργεί χειροκίνητα και καταγράφονται τα δεδομένα όπως φαίνεται πάνω δεξιά. 2) Το DFT, που εμφανίζεται στο κάτω δεξί μέρος, είναι ένα αρθρωτό σύστημα που ελέγχεται ηλεκτρονικά. Τα αποτελέσματα τυπικά καταγράφονται σε 12, 24, 36 και 48 mi / hr (20, 40, 60 και 80 km / hr) και η σχέση ταχύτητας και τριβής μπορεί να καταγραφεί. Τοποθετείται σε ένα αυτοκίνητο και συνοδεύεται από δεξαμενή νερού και φορητό υπολογιστή.  

Πίνακας 5. Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους δοκιμών τριβής οδοστρώματος που απαιτούν έλεγχο της κυκλοφορίας.

Μέθοδος Δοκιμής	Δείκτης Μέτρησης	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μέτρηση Απόστασης Πλήρους Πέδησης	Η απόσταση πλήρους πέδησης ή ο συντελεστής τριβής μ προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση : $\mu = \frac{v^2}{2 \times g \times d}$ Όπου : μ= Συντελεστής Τριβής V= ταχύτητα οχήματος όταν εφαρμόζονται τα φρένα g=Επιτάχυνση βαρύτητας d= Απόσταση που σταματά το όχημα	1) Δοκιμή πεδίου(ευθύγραμμαμήματα) 2) Έρευνα ατυχημάτων	Απλούστερη μέθοδος για τον προσδιορισμό της τριβής στη επιφάνεια του οδοστρώματος	Οι αποκτιθέσες τιμές δοκιμής δεν είναι επαναλαμβανόμενες.Απαιτείται ο έλεγχος της κυκλοφορίας
Μέτρηση της Τιμής Επιβράδυνσης	Η μετρούμενη δύναμη επιβράδυνσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής της επιφάνειας του οδοστρώματος, μ. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση: $\mu = \frac{\text{Μετρηθείσα Επιβράδυνση}}{g}$ Όπου : μ= Συντελεστής τριβής g= Επιτάχυνση βαρύτητας Η μετρούμενη επιβράδυνση μπορεί να μετρηθεί άμεσα για την πλήρη διακοπή ή να προσδιοριστεί για μερική διακοπή ως η διαφορά μεταξύ της αρχικής και τελικής επιβράδυνσης διαιρώντας με το χρόνο πέδησης	1) Δοκιμή πεδίου(ευθύγραμμαμήματα) 2) Έρευνα ατυχημάτων	Το σύστημα είναι εύκολο στη χρήση, μικρό, φορητό, ελαφρύ, και εύκολο στην εγκατάσταση και αφαίρεση.	Απαιτείται ξαφνικός ελιγμός πέδησης και τέτοιοι ελιγμοί δεν είναι λειτουργικά επιθυμητοί (Al-Qadi, 2002). Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιολόγηση ενός δικτύου αυτοκινητόδρομων. Γενικά απαιτεί κλείσιμο της λωρίδας κυκλοφορίας.
Κινητοί Μετρητές	Το BPT παρέχει τον αριθμό του Βρετανικού εκκρεμούς (BPN) με βάση το ύψος ταλάντωσης ενός βαθμονομημένου BPT. Ο δυναμικός μετρητής τριβής (DFT) παρέχει τον αριθμό DFT ή τον συντελεστή τριβής και ένα γράφημα του συντελεστή τριβής για διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.Αυτή η συσκευή καταγράφει επίσης την μέγιστη τριβή, την αντίστοιχη ταχύτητα ολίσθησης και τον Διεθνή Δείκτη Τριβής (IFI) που ορίζονται από το F (60) και το SP	Το BPT παρέχει δείκτες τριβής και μικρο-υψής για κάθε οδόστρωμα, είτε στο πεδίο είτε από εργαστηριακή ανάλυση δειγμάτων πυρήνων ή παρασκευασμένων πλακών. Χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση του αποτελέσματος της φθοράς από την τριβή στην επιφανειακή υφή. Το DFT μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πεδίο και για εργαστηριακές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, διασφάλισης ποιότητας (QC / QA). Η συλλογή δεδομένων τριβής γίνεται και για το έργο αλλά και για ερευνητικά προγράμματα	Το BPT χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την μέτρηση της τριβής και της επιφανειακής υψής. Είναι κατάλληλο και για το εργαστήριο αλλά και για την αξιολόγηση στο πεδίο. Το BPT μπορεί να χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και της διαμήκης και της πλευρικής τριβή του οδοστρώματος. Το DFT παρέχει καλή επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα και δεν επηρεάζεται από τους χειριστές ή τον άνεμο. Παρέχει επίσης συντελεστές τριβής που είναι αντιπροσωπευτικοί της υψηλής ταχύτητας. Μπορεί να παράγει το IFI στατιστικά, και συσχετίζεται καλά με το BPN.	Η μεταβλητότητα του BPN είναι μεγάλη και μπορεί να επηρεαστεί από τον χειριστή και από τον άνεμο. Ο έλεγχος της κυκλοφορίας απαιτείται και για τις δύο φορητές διαδικασίες. Δεν προσομοιώνουν πάντα τα χαρακτηριστικά των ελαστικών και του οδοστρώματος. Και οι δύο συσκευές συλλέγουν μόνο μετρήσεις σημείων και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμων. Για να ποσοτικοποιηθεί ένα δεδομένο τμήμα του οδοστρώματος, πρέπει να πραγματοποιηθούν αρκετές μετρήσεις κατά μήκος του τμήματος

Αυτές οι συσκευές μετρούν τις ιδιότητες τριβής, προσδιορίζοντας την απώλεια της κινητικής ενέργειας είτε όταν το ελαστικό πέλμα του BPM είτε όταν ο περιστρεφόμενος δίσκος του DFT έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η απώλεια της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε δύναμη τριβής και συνεπώς σε τριβή οδοστρώματος. Αυτές οι δύο μέθοδοι είναι εξαιρετικά εύκολες στη χρήση. Το DFT έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι είναι σε θέση να μετρά την εξάρτηση της ταχύτητας από την τριβή του οδοστρώματος μετρώντας την τριβή σε διάφορες ταχύτητες (Saito et al., 1996).

Για τις μετρήσεις τριβής σε υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιείται ένα ή δύο ελαστικά δοκιμής με έναν από τους τέσσερις τρόπους: 1) Τροχός σε πλήρη πέδηση, 2) Πλευρικές δυνάμεις 3) Σταθερή ολίσθηση 4) Μεταβλητή ολίσθηση (Πίνακες 6, 7).

Πίνακας 6. Μέθοδοι μέτρησης τριβής σε υψηλές ταχύτητες (δεν χρειάζεται κλείσιμο λωρίδων) (Hall et.al 2009)

Μέθοδος Δοκιμής	Πρότυπες Προδιαγραφές	Περιγραφή	Εξοπλισμός	
Πλήρης Πέδηση	ASTM E 274	Αυτή η συσκευή είναι εγκατεστημένη σε ένα τρέιλερ που ρυμουλκείται από το όχημα μέτρησης το οποίο κινείται με τυπική ταχύτητα 64 km / h. Εφαρμόζεται νερό πάχους 0,02 ιντσών (0,5 mm) μπροστά από το ελαστικό δοκιμής το οποίο ακουμπάει το οδόστρωμα και με την εφαρμογή συστήματος φρένων ο τροχός βρίσκεται σε πλήρη πέδηση. Στη συνέχεια η δύναμη αντίστασης μετράται (μέσος όρος) για 1 έως 3 δευτερόλεπτα αφότου ο τροχός βρίσκεται σε πλήρη πέδηση. Οι μετρήσεις μπορούν να επαναληφθούν αφού ο τροχός έρθει πάλι σε κατάσταση ελεύθερης κύλισης και επαναλαμβάνεται η διαδικασία.	Η δοκιμή απαιτεί όχημα το οποίο ρυμουλκεί και τράιλερ με σύστημα πλήρους πέδησης που είναι εξοπλισμένο είτε με λείο (ASTM E501) είτε με ελαστικό με ραβδώσεις (ASTM E 524). Το λείο ελαστικό είναι πιο ευαίσθητο στη μακρο-υφή του οδοστρώματος ενώ το ελαστικό με ραβδώσεις πιο ευαίσθητο στις αλλαγές της μικρο-υφής του οδοστρώματος.	
Πλευρικές Δυνάμεις	ASTM E 670	Οι συσκευές μέτρησης τριβής πλευρικής δύναμης μετράνε την πλευρική τριβή του οδοστρώματος ή την γωνιακή δύναμη που είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ίχνους των παραμορφωμένων ελαστικών. Τοποθετείται νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος (1,2l/min) και ένα ή δύο παραμορφωμένα ελαστικά που περιστρέφονται ελεύθερα κυλούνται πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Καταγράφονται η πλευρική δύναμη, το φορτίο των ελαστικών, η απόσταση και η ταχύτητα του οχήματος. Τα δεδομένα συλλέγονται κάθε 1 έως 5 ίντσες (25 έως 125 mm) και κατά μέσο όρο σε διάστημα πάνω από 3 ft (1m)	1) Ο βρετανικός Mu-Meter, που φαίνεται δεξιά, μετρά την πλευρική δύναμη που αναπτύχθηκε από δύο κεκλιμένα ελαστικά (7,5 μοίρες) τα οποία είναι είτε λεία είτε ραβδωτά. 2) Το SCRIM (British Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine) που φαίνεται δεξιά έχει κλίση τροχού 20 μοιρών	 
Σταθερή Ολίσθηση	Διάφορες	Οι συσκευές σταθερής ολίσθησης μετρούν τη περιστροφική αντίσταση των λείων ελαστικών σε μια σταθερή ταχύτητα ολίσθησης (12% έως 20%). Νερό (0,02 ιντσών [0,5 mm] πάχος) εφαρμόζεται μπροστά από ένα ανασυρόμενο ελαστικό, τοποθετημένο σε ρυμουλκούμενο ή όχημα που έχει ταχύτητα συνήθως 40 mi / hr [64 km / hr]. Η περιστροφή του ελαστικού δοκιμής μετατρέπεται σε ποσοστό της ταχύτητας του οχήματος με μηχανισμό αλυσίδας ή μάντα ή με υδραυλικό σύστημα πέδησης. Τα φορτία και οι δυνάμεις τριβής μετρώνται με μετρητές τάσης και ροπής. Τα δεδομένα συλλέγονται κάθε 1 έως 5 ίντσες (25 έως 125 mm) και κατά μέσο όρο 3-ft (1-m)	1) Μετρητές τριβής για οδούς και αυτοκινητόδρομους (RFTs) 2) Μετρητές τριβής για διαδρόμους αεροδρομίου που φαίνεται δεξιά (ASFT) 3) Δοκιμαστής τριβής Saab (SFT) που φαίνεται στα δεξιά 4) U.K. Griptester που φαίνεται στα δεξιά 5) Finland BV -11 6) Road Analyzer and Recorder (ROAR). 7) ASTM E 1551	 
Μεταβαλλόμενη Τριβή	ASTM E 1859	Οι συσκευές μεταβλητής ολίσθησης μετρούν την τριβή ως συνάρτηση της ολίσθησης (0% έως 100 %) μεταξύ του τροχού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Νερό (0,02 ιντσες [0,5 mm] πάχος) εφαρμόζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος και ο τροχός επιτρέπεται να περιστρέφεται ελεύθερα. Σταδιακά η ταχύτητα του δοκιμαστικού τροχού μειώνεται και μετρώνται η ταχύτητα του οχήματος, η απόσταση που διανήθηκε, η ταχύτητα περιστροφής του τροχού, το φορτίο του τροχού και η δύναμη τριβής σε 0,1 ίντσες (2,5 mm) διαστήματα ή λιγότερο. Τα ακατέργαστα δεδομένα καταγράφονται για να φιλτραριστούν και να εξομαλυνθούν αργότερα.	1) Γαλλικό IMAG 2) Νορβηγικό RUNAR που φαίνεται στα δεξιά 3) Συστήματα ROAR και SALTAR	

Πίνακας 7. Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους δοκιμής τριβής οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες (Hall et al 2009)

Μεθοδος Δοκιμής	Δείκτης Μέτρησης	Εφαρμογές	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πλήρης Πέδηση	Η μετρημένη δύναμη αντίστασης και το φορτίο του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, μ . Η τριβή αναφέρεται ως αριθμός τριβής (FN) ή αριθμός ολίσθησης (SN)	1) Δοκιμή πεδίου (ευθύγραμμα τμήματα) 2) Σε δίκτυο αυτοκινητόδρομων για την διατήρηση της τριβής	Καλά αναπτυγμένο και πολύ ευρέως χρησιμοποιούμενο στις Η.Π.Α. Περισσότερα από 40 κράτη χρησιμοποιούν συσκευές με πλήρη πέδηση. Τα συστήματα είναι φιλικά προς το χρήστη, σχετικά απλά και όχι χρονοβόρα	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ευθύγραμμα τμήματα (χωρίς καμπύλες, τμήματα T ή κυκλικούς κόμβους). Μπορεί να χάνονται οι ολισθηρές επιφάνειες επειδή οι μετρήσεις είναι διακοπτόμενες.
Πλευρικές Δυνάμεις	Η πλευρική δύναμη κάθετα προς το το επίπεδο περιστροφής μετράται και υπολογίζεται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό του αριθμού μ_u , μ_{uN} ή τον συντελεστή πλευρικής δύναμης, SFC.	Δοκιμή πεδίου σε ευθύγραμμα τμήματα, καμπύλες και σε απότομες κλίσεις.	Σχετικά καλά ελεγχόμενη ολίσθηση παρόμοια με τη συσκευή σταθερής ολίσθησης. Οι μετρήσεις είναι συνεχείς σε όλο το τμήμα δοκιμής του οδοστρώματος. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως στην Ευρώπη.	Πολύ ευαίσθητο στις ανωμαλίες (λακκούβες, ρωγμές, κλπ.) Που μπορούν να καταστρέψουν γρήγορα τα ελαστικά. Ο μ_u -Meter χρησιμοποιείται κυρίως για τα αεροδρόμια στις ΗΠΑ.
Σταθερή Ολίσθηση	Η μετρημένη δύναμη αντίστασης και το φορτίο του τροχού που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, μ . Η τριβή αναφέρεται ως FN	1) Δοκιμή πεδίου (ευθύγραμμα τμήματα) 2) Σε δίκτυο αυτοκινητόδρομων για την διατήρηση της τριβής 3) Τριβή σε επίπεδο έργου (παρακολούθηση)	Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι συνεχή και υψηλής ανάλυσης	Οι συσκευές σταθερής ολίσθησης λαμβάνουν μετρήσεις με καθορισμένη ταχύτητα ολίσθησης. Η ταχύτητα αυτή δεν συμπίπτει πάντοτε με την τιμή της κρίσιμης ολίσθησης, ειδικά στις επιφάνειες που καλύπτονται από πάγο και χιόνι. Χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού σε συνεχή λειτουργία.
Μεταβαλλόμενη Ολίσθηση	Όταν χρησιμοποιείται για μετρήσεις μεταβλητής ολίσθησης, το σύστημα παρέχει ένα διάγραμμα της σχέσης μεταξύ του αριθμού τριβής και ταχύτητα ολίσθησης. Οι δείκτες που προκύπτουν είναι: 1) Αριθμός τριβής διαμήκους ολίσθησης 2) Αριθμός τριβής κορυφών του προφίλ 3) Εύρος κρίσιμης ολίσθησης 4) Εύρος ολίσθησης 5) Εκτιμώμενος αριθμός τριβής Όταν χρησιμοποιείται για πλήρης πέδηση το σύστημα παρέχει τιμές FN.	1) Δοκιμή πεδίου (ευθύγραμμα τμήματα) 2) Σε δίκτυο αυτοκινητόδρομων για την διατήρηση της τριβής 3) Τριβή σε επίπεδο έργου (παρακολούθηση)	1) Τα αποτελέσματα παρέχουν συνεχώς οποιαδήποτε επιθυμητή σταθερή ή μεταβλητή τριβή ολίσθησης	Μεγάλος, πολύπλοκος εξοπλισμός με υψηλά έξοδα συντήρησης και πολύπλοκες ανάγκες επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων. Χρησιμοποιεί μεγάλες ποσότητες νερού σε συνεχή λειτουργία.

Η πιο κοινή μέθοδος για τη μέτρηση τριβής οδοστρώματος στις ΗΠΑ είναι η μέθοδος πλήρους πέδησης (ASTM E 274) (Henry 2000). Αυτή η μέθοδος ελέγχει τις ιδιότητες τριβής της επιφάνειας του οδοστρώματος υπό συνθήκες πέδησης έκτακτης ανάγκης για όχημα χωρίς ABS (Anti-Blocking-System). Σε αντίθεση με τις μεθόδους πλευρικής δύναμης και σταθερής ολίσθησης, που η προσέγγιση πλήρους πέδησης δοκιμάζεται με ταχύτητα ολίσθησης ίση με την ταχύτητα του οχήματος, πράγμα που σημαίνει ότι ο τροχός είναι κλειδωμένος και δεν μπορεί να περιστραφεί (Henry, 2000). Τα αποτελέσματα της δοκιμής πλήρους πέδησης αναφέρονται ως αριθμός τριβής (FN ή αριθμός ολίσθησης [SN]), ο οποίος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{Εξίσωση 5} \quad FN(V) = 100\mu = 100 * \left(\frac{F}{W} \right)$$

Όπου : V = Ταχύτητα του δοκιμαστικού ελαστικού, mi / hr.

μ = Συντελεστής τριβής

F = Ισχυρή οριζόντια δύναμη εφαρμοζόμενη στο ελαστικό, lb

W = Κάθετο φορτίο που εφαρμόζεται στο ελαστικό, lb.

Η ταχύτητα δοκιμής τριβής σε πλήρη πέδηση είναι συνήθως μεταξύ 64 και 96 km / h. Η δοκιμή μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα λείο (ASTM E 524) ελαστικό ή ένα τραχύ ελαστικό (ASTM E 501), δηλαδή με ραβδώσεις. Το τραχύ ελαστικό, δεν είναι ευαίσθητο στο πάχος του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, άρα δεν είναι ευαίσθητο στην μακρό-υφή του οδοστρώματος. Το ομαλό ελαστικό, από την άλλη πλευρά, είναι ευαίσθητο στην μακροϋφή.

Η μέθοδος της πλευρικής δύναμης (ASTM E 670) μετρά την ικανότητα των οχημάτων να διατηρούν τον έλεγχο σε καμπύλες που συνεπάγεται με τη διατήρηση μιας σταθερής γωνίας, της γωνίας κλίσης, μεταξύ του ελαστικού και της κατεύθυνσης της κίνησης. Ο συντελεστής πλευρικής δύναμης (SFC) υπολογίζεται ως εξής :

Εξίσωση 6

$$SFC(V, a) = 100 * \left(\frac{F_s}{W} \right)$$

Όπου : V = Ταχύτητα του δοκιμαστικού ελαστικού, mi / hr

α = Γωνία κλίσης

F_s = Δύναμη κάθετη προς το επίπεδο περιστροφής, lb

W = Κάθετο φορτίο που εφαρμόζεται στο ελαστικό, lb.

Δεδομένου ότι η γωνία κλίσης είναι συνήθως μικρή, μεταξύ 7,5° και 20°, η ταχύτητα ολίσθησης είναι αρκετά χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι η δοκιμή πλευρικής δύναμης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην μικροϋφή του οδοστρώματος αλλά γενικά δεν είναι ευαίσθητη στις αλλαγές στην μακροϋφή του οδοστρώματος.

Οι δύο συνηθέστερες συσκευές μέτρησης πλευρικής δύναμης είναι ο μηχανισμός μέτρησης Mu-Meter και ο Side-Force Coefficient Road Inventory Machine (SCRIM). Το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρεται από συσκευές μέτρησης πλευρικής δύναμης είναι η δυνατότητα μέτρησης συνεχούς τριβής σε όλο το τμήμα δοκιμής. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι περιοχές χαμηλής τριβής δεν παραλείπονται (J.W. Hall et.al 2009).

Οι συσκευές σταθερής ολίσθησης μετρούν την τριβή που υφίστανται τα οχήματα με ABS (anti-blocking system). Οι συσκευές σταθερής ολίσθησης διατηρούν μια σταθερή ολίσθηση, συνήθως μεταξύ 10% και 20%, καθώς το κάθετο φορτίο εφαρμόζεται στο δοκιμαστικό ελαστικό. Η δύναμη τριβής στην κατεύθυνση μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος μετριέται και το ποσοστό ολίσθησης υπολογίζεται ως ακολουθεί :

Εξίσωση 7

$$Percent Slip = \left(\frac{V - r * \omega}{V} \right) * 100$$

Όπου : Percent Slip = Αναλογία, ταχύτητας ολίσθησης προς ταχύτητα δοκιμής, εκατοστιαία.

V = Ταχύτητα δοκιμής

r = Η ακτίνα του ελαστικού που εφαρμόζεται.

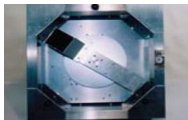
ω = Γωνιακή ταχύτητα του δοκιμαστικού ελαστικού.

Αυτές οι συσκευές είναι επίσης πιο ευαίσθητες στην μικροϋφή, καθώς η ταχύτητα ολίσθησης είναι χαμηλή. Οι συσκευές μεταβλητής ολίσθησης (ASTM E 1859) μετρούν τη δύναμη τριβής, καθώς το ελαστικό μεταφέρεται μέσω προκαθορισμένης σειράς αναλογιών ολίσθησης.

6.2 Επιφανειακή υφή

Ο εξοπλισμός μέτρησης της επιφανειακής υφής που απαιτεί κλείσιμο λωρίδας στους αυτοκινητόδρομους περιλαμβάνει τη μέθοδο κηλίδας άμμου (Sand Patch Method -SPM- ASTM E 965), τον μετρητή εκροής (Outflow-Meter-OFM -ASTM E 2380) και τον μετρητή κυκλικής υφής (Circular-Texture-Meter- CTM -ASTM E 2157) (Πίνακας 8, 9).

Πίνακας 8. Επισκόπηση των μεθόδων δοκιμής υφής επιφανειών οδοστρώματος που απαιτούν έλεγχο κυκλοφορίας (Hall et al. 2009)

Μέθοδος Δοκιμής	Πρότυπες Προδιαγραφές	Περιγραφή	Εξοπλισμός
Μέθοδος Sand Patch (SPM)	ASTM E 965, ISO 10844	Αυτή η μέθοδος μέτρησης παρέχει το μέσο βάθος της μακρο-υφής του οδοστρώματος. Ο χειριστής απλώνει έναν γνωστό όγκο γυάλινων σφαιριδίων (ή άμμο) σε έναν κύκλο πάνω σε μία επιφάνεια και καθορίζει τη διάμετρο. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος του βάθους υφής (MTD)	
Μετρητής Εκροής	ASTM E 2380	Αυτή η ογκομετρική μέθοδος μέτρησης μετρά την ταχύτητα αποστράγγισης του νερού μέσω της υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος και των κενών αέρα. Υποδεικνύει το χρόνο διαφυγής του νερού κάτω από ένα κινούμενο ελαστικό. Έχουν επίσης αναπτυχθεί συσχετισμοί με άλλες μεθόδους υπολογισμού της επιφανειακής υφής. Αυτή η συσκευή λείζερ χωρίς να έρθει σε επαφή με το οδόστρωμα μετρά την υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος σε κυκλικό προφίλ διαμέτρου 11,25 ιντσών (286 mm) σε διαστήματα 0,034 ιντσών (0,868 mm), που ταιριάζουν με τη διαδρομή μέτρησης του DFT. Περιστρέφεται στα 20 ft / min (6 m / min) και παρέχει ίχνη προφίλ και μέση τιμή MPD για την επιφάνεια του οδοστρώματος.	Ο εξοπλισμός είναι ένας κύλινδρος με δαχτυλίδι από πλαστικό στο κάτω μέρος και ανοιχτό στο πάνω μέρος. Οι αισθητήρες μετράνε την ώρα που απαιτείται για να περάσει ένας γνωστός όγκος νερού κάτω από το πλαστικό ή πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Ο εξοπλισμός περιλαμβάνει παροχή νερού, φορητό υπολογιστή και τον μετρητή της επιφανειακής υφής. 
Κυκλικός Μετρητής Επιφανειακής Υφής	ASTM E 2157		 

Πίνακας 9. Πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους δοκιμών υφής επιφανειών οδοστρώματος που απαιτούν έλεγχο της κυκλοφορίας (Hall et.al 2009)

Μέθοδος Δοκιμής	Δείκτης Μέτρησης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μέθοδος Sand Patch (SPM)	Μέσο βάθος υφής (MTD) της μάκτο-υφής υπολογίζεται από την σχέση $MTD = \frac{4V}{\pi \times D^2}$ Όπου : MTD= Μέσο βάθος υφής V=Όγκος δείγματος D= Μέση διάμετρος υλικού,	1) Απλή και φθηνή μέθοδος και εξοπλισμός 2) Όταν συνδυάζεται με άλλα δεδομένα μπορεί να παρέχει πολλές πληροφορίες για την τριβή 3) Χρησιμοποιείται ευρέως	1) Η μέθοδος είναι αργή και απαιτεί κλείσιμο λωρίδας 2) Αντιπροσωπεύει μόνο μια μικρή περιοχή 3) Μόνο η μακρο-υφή είναι αξιολόγηση. 4) Ευαίσθητο στη μεταβλητότητα του χειριστή
Μετρητής Εκροής (OFM)	Ο χρόνος εκροής (OFT) είναι ο χρόνος σε χιλιοστά του δευτερολέπτου για εκροή καθορισμένου όγκου νερού. Μικρότεροι χρόνοι εκροής δείχνουν σκληρότερη επιφανειακή υφή.	1) Απλές μέθοδοι και σχετικά φθηνός εξοπλισμός 2) Παρέχει ένδειξη διαφυγής νερού σε υγρό καιρό.	1) Η μέθοδος είναι αργή και απαιτεί κλείσιμο λωρίδας 2) Αντιπροσωπεύει μόνο μια μικρή περιοχή της επιφάνειας του οδοστρώματος 3) Τα εξαγόμενα δεδομένα δεν έχουν καλή συσχέτιση με το MPD ή το MTD
Κυκλικός Μετρητής Επιφανειακής Υφής (CTM)	Οι δείκτες που παρέχονται από το CTM περιλαμβάνουν το μέσο βάθος του προφίλ (MPD) και το μέσο τετράγωνο της ρίζας (RMS) για την μάκρο-υφή	1) Μετράει την ίδια διάμετρο σαν DFT επιτρέποντας την σύγκριση μεταξύ επιφανειακής υφής και τριβής. 2) Επαναλαμβανόμενη μέθοδος και δεν εξαρτάται από τους χειριστές 3) Συνδέεται καλά με την MTD 4) Μετρά θετικά και αρνητικά την υφή. 5) Η συσκευή είναι μικρή (29 lb [13 kg]) άρα φορητή. 6) Ο χρόνος εγκατάστασης είναι μικρός (λιγότερο από 1 λεπτό)	1) Η μέθοδος είναι αργή (περίπου 45 δευτερόλεπτα για να ολοκληρωθεί) και απαιτεί κλείσιμο λωρίδας 2) Αντιπροσωπεύει επιφάνεια μικρής περιοχής.

Το SPM (στατική μέτρηση) είναι μια ογκομετρική διαδικασία η οποία αξιολογεί την μακροϋφή μέσω της εξάπλωσης ενός γνωστού όγκου γυάλινων σφαιριδίων (ή άμμου) σε έναν κύκλο πάνω σε μια καθαρισμένη επιφάνεια, όπου μετριέται η διάμετρος του προκύπτοντος κύκλου. Ο όγκος διαιρείται από τη περιοχή του κύκλου και αναφέρεται ως το μέσο βάθος υφής (MTD).

Το OFM (στατική μέτρηση) είναι μια ογκομετρική μέθοδος δοκιμής που μετρά το ρυθμό αποστράγγισης του νερού μέσω της υφής της επιφάνειας και των εσωτερικών κενών. Δείχνει το χρόνο διαφυγής του νερού κάτω από ένα κινούμενο ελαστικό. Ο εξοπλισμός αποτελείται από έναν κύλινδρο με δακτύλιο από πλαστικό στο κάτω μέρος και ένα ανοικτό στο άνω μέρος. Οι αισθητήρες μετράνε τον απαιτούμενο χρόνο για να διαφύγει ένας γνωστός όγκος νερού κάτω από το πλαστικό ή πάνω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η παράμετρος μέτρησης δηλαδή ο χρόνος εκροής (OFT) ορίζει την μακροϋφή. Υψηλά OFTs δείχνουν ομαλή μακροϋφή και χαμηλά OFTs σκληρή μακροϋφή (J.W. Hall et.al 2009).

Το CTM (συνεχής μέτρηση) είναι μια συσκευή λείζερ χωρίς επαφή που μετρά το προφίλ επιφάνειας κατά μήκος μιας κυκλικής διαδρομής διαμέτρου 286 mm της επιφάνειας του οδοστρώματος σε διαστήματα 0,868 mm. Η συσκευή μέτρησης υφής περιστρέφεται στα 6 m/min και παράγει ίχνη προφίλ της επιφανειακής υφής του οδοστρώματος, τα οποία μεταδίδονται και αποθηκεύονται σε φορητό υπολογιστή. Δύο διαφορετικοί δείκτες μακροϋφής μπορούν να υπολογιστούν από αυτά τα προφίλ, το μέσο βάθος προφίλ (MPD) και η ρίζα μέσου τετραγώνου (RMS). Το MPD, το οποίο είναι μια δισδιάστατη εκτίμηση του τρισδιάστατου MTD, αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των υψηλότερων κορυφών (σημείων) του προφίλ που εμφανίζονται σε οκτώ μεμονωμένα τμήματα που περιλαμβάνουν τον κύκλο μέτρησης (Flintsch et al., 2003). Το RMS είναι μια στατιστική τιμή, η οποία προσφέρει ένα μέτρο για το πόσο τα πραγματικά δεδομένα

(μετρούμενο προφίλ) αποκλίνουν από ένα καλύτερα προσαρμοσμένο (μοντέλο προφίλ) των δεδομένων (McGhee και Flintsch, 2003).

Οι μέθοδοι υψηλής ταχύτητας για τον χαρακτηρισμό της υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος τυπικά βασίζονται σε τεχνικές επιφανειακού προφίλ χωρίς επαφή. Ένα παράδειγμα ενός προφίλ μη επαφής για χρήση στο χαρακτηρισμό της υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι ο αναλυτής οδικής επιφάνειας (ROSANV). Ο ROSANV (συνεχής μέτρηση) είναι ένα φορητό αυτοματοποιημένο σύστημα για τη μέτρηση της υφής του οδοστρώματος στις ταχύτητες αυτοκινητόδρομου κατά μήκος μιας γραμμικής διαδρομής. Ο ROSANV (Πίνακας 10,11) ενσωματώνει έναν αισθητήρα λέιζερ τοποθετημένο στον μπροστινό προφυλακτήρα του οχήματος και η συσκευή μπορεί να λειτουργεί σε ταχύτητες έως 113 km/h. Το σύστημα υπολογίζει τόσο το MPD όσο και το εκτιμώμενο μέσο βάθος υφής (EMTD), το οποίο είναι μια εκτίμηση του MTD που προέρχεται από το MPD χρησιμοποιώντας μια εξίσωση μετασχηματισμού (J.W. Hall et.al 2009).

Πίνακας 10. Επισκόπηση των μεθόδων δοκιμής υφής οδοστρώματος χωρίς επαφή (Hall et al. 2009)

Μέθοδος Δοκιμής	Πρότυπες Προδιαγραφές	Περιγραφή	Εξοπλισμός
Οπτική-Ηλεκτρική Μέθοδος (Λάιζερ)	ASTM E 1845 ISO 13473-1 ISO 13473-2 ISO 13473-3	Λάιζερ πολύ υψηλής ταχύτητας χωρίς άμεση επαφή με το οδόστρωμα. Χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων των επιφανειών οδοστρώματος σε διαστήματα των 0,01 ιντσών (0,25mm) ή λιγότερο. Αυτός ο τύπος συστήματος, συνεπώς, είναι ικανός να μετρά τα προφίλ και τους δείκτες μακρο-υφής της επιφάνειας οδοστρώματος (0,5 έως 50 mm). Παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS) προστίθενται συχνά σε αυτό το σύστημα για να βοηθήσουν στον εντοπισμό του σημείου δοκιμής. Η επεξεργασία των δεδομένων υπολογίζει τα προφίλ υφής και άλλους δείκτες υφής.	Ο εξοπλισμός μέτρησης υφής υψηλής ταχύτητας λέιζερ (όπως το σύστημα FHWA ROSANV που φαίνεται δεξιά). Χρησιμοποιεί αισθητήρα λέιζερ τριγωνισμού για συνδυασμό συσκευή μέτρησης οριζόντιας απόστασης και πολύ υψηλής ταχύτητας (64 kHz ή υψηλότερη). Η κατακόρυφη ανάλυση είναι συνήθως 0,002 in (0,5 mm) ή καλύτερη. Ο εξοπλισμός λέιζερ είναι τοποθετημένος σε ένα όχημα υψηλής ταχύτητας και τα δεδομένα συλλέγονται και αποθηκεύονται σε ένα φορητό υπολογιστή.



Πίνακας 11. Πρόσθετες πληροφορίες των μεθόδων δοκιμής υφής οδοστρώματος χωρίς επαφή (Hall et al. 2009)

Μέθοδος Δοκιμής	Δείκτης Μέτρησης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οπτική-Ηλεκτρική Μέθοδος (Λάιζερ)	Χρησιμοποιώντας τα μετρημένα προφίλ υφής, το σύστημα AMM υπολογίζει το μέσο όρο (MPD) ως τη διαφορά μεταξύ της κορυφής και του μέσου όρου του βάθους για διαδοχικά τμήματα 2 ιντσών (50 mm), κατά μέσο όρο σε 4 in (100 mm). Το εκτιμώμενο MTD (EMTD) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια σχέση που αναπτύχθηκε μεταξύ MPD και MTD στο Διεθνή Πείραμα PIARC. Τα επίπεδα μακρο-υφής RMS μπορούν επίσης να υπολογιστούν. Η ισχύς των αποκλίσεων της υφής μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με υπολογισμό φασματικής πυκνότητας ισχύος.	1) Συλλέγει συνεχή δεδομένα σε υψηλές ταχύτητες 2) Συνδέεται καλά με το MTD 3) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σταθερή ταχύτητα που τις καταγραφές θα τις συνοδεύουν συνεχόμενα δεδομένα τριβής.	1) Ο εξοπλισμός είναι πολύ ακριβός 2) Απαιτούνται ειδικευμένοι χειριστές για την συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων

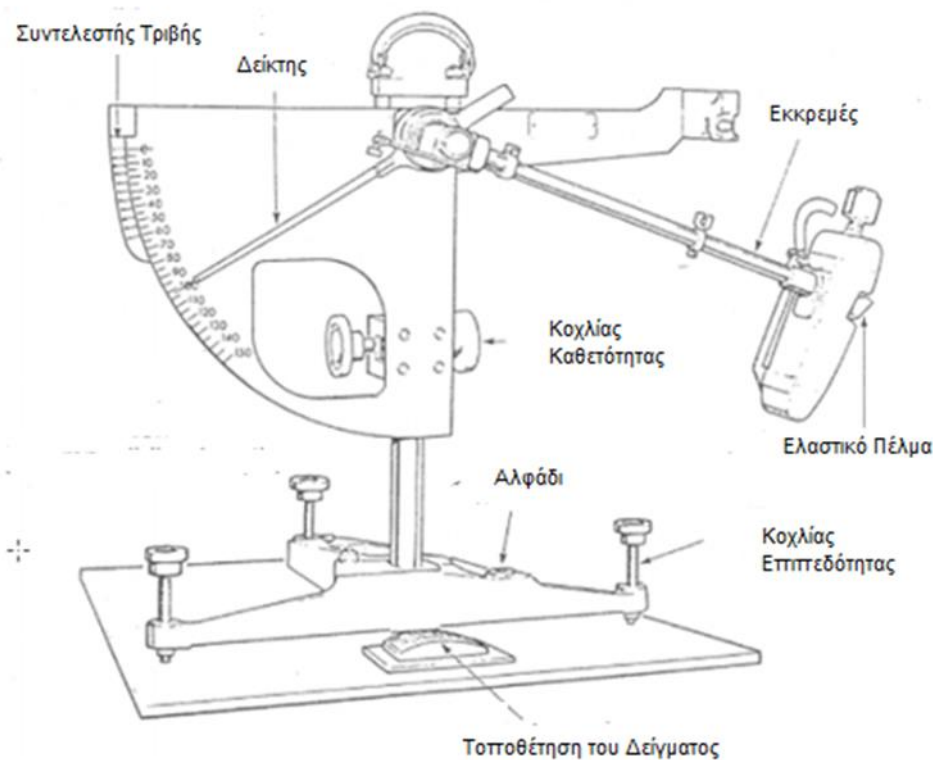
Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα μέτρησης παρέχει μια μεγάλη ποσότητα πολύτιμων και λιγότερο ακριβών δεδομένων επιφανειακής υφής, μειώνοντας σημαντικά τα προβλήματα ασφάλειας και ελέγχου της κυκλοφορίας. Μερικές από τις εφαρμογές του ROSANV περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Μετρήσεις υφής για συστήματα διαχείρισης οδοστρώματος (PMS).
2. Ειδικές μετρήσεις υφής για την έρευνα της ασφάλειας.

3. Μετρήσεις ελέγχου ποιότητας (QC) για νέο οδόστρωμα, για πιστοποίηση οδοστρώματος, προδιαγραφές σύμβασης για την επιφανειακή υφή του οδοστρώματος και για τα όρια διαχωρισμού αδρανών
4. Συνδυασμός με εξοπλισμό μέτρησης της τριβής (ρυμουλκούμενου) για ταυτόχρονη μέτρηση της τριβής και της επιφανειακής υφής.
5. Πληροφορίες για την επιφάνεια και την επιφανειακή υφή του οδοστρώματος στο πλαίσιο της έρευνας του θορύβου.

6.3 Όργανο μέτρησης του συντελεστή τριβής

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής έγινε χρήση του Βρετανικού Εκκρεμούς. Το Βρετανικό Εκκρεμές είναι μία συσκευή μέτρησης της αντοχής του οδοστρώματος σε ολίσθηση που αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1960 στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται ευρέως στην Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία. Είναι γνωστό και ως Φορητό Εκκρεμές (PPT) αλλά και ως Φορητός Ελεγκτής της Αντοχής σε Ολίσθηση (PSRT). Για απλότητα θα αναφέρεται ως Βρετανικό Εκκρεμές (BTP). Είναι μία στατική συσκευή που ρυθμίζεται σε συγκεκριμένη θέση στην οδό. Αποτελείται από ένα βραχίονα εκκρεμούς που φέρει ελαστικό ολισθητήρα και απελευθερώνεται από την οριζόντια θέση (Εικόνα 11). Ο ολισθητήρας φτάνει την ταχύτητα των 10 km/h λόγω της βαρύτητας, την ώρα που το ελαστικό αγγίζει την επιφάνεια του οδοστρώματος. Το ύψος του βραχίονα (ή η γωνία) καθορίζεται με το ποσό της κινητικής ενέργειας που χρειάζεται να μετατραπεί σε άλλη μορφής ενέργειας κατά την διάρκεια της επαφής (π.χ. το ύψος του βραχίονα θα είναι σε μεγαλύτερο ύψος για ολισθηρά οδοστρώματα). Με την μέτρηση του ύψους μετά την επαφή μπορεί να προκύψει ο συντελεστής της τριβής το CoF (Austroads 2011) ή British Pendulum Number για το εν λόγω σύστημα που εν συντομία θα αναφέρεται στο εξής ως BPN.

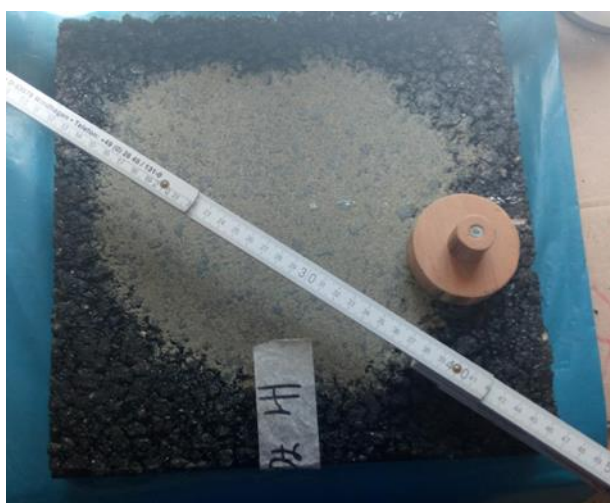


Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση του Βρετανικού Εκκρεμούς (Austroads 2011)

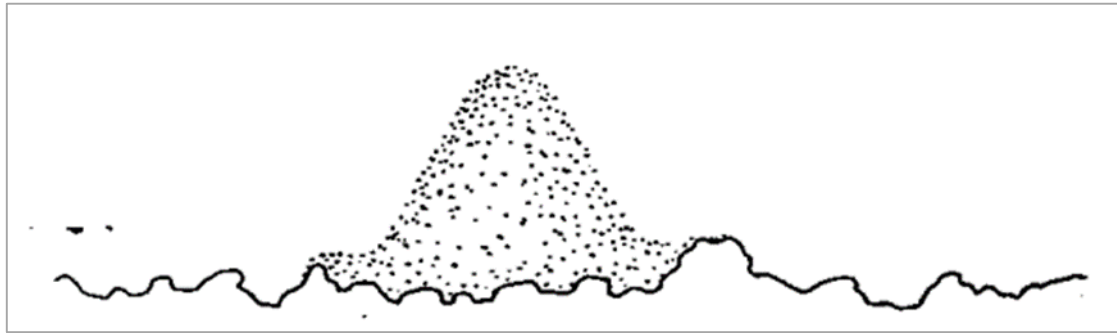
Το Βρετανικό Εκκρεμές έχει χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, είναι ελαφρύ και ιδανικό για συγκεκριμένες και περιστασιακές έρευνες, ενώ δεν είναι ιδανικό για μεγάλης κλίμακας δικτύου αυτοκινητοδρόμων. Απαιτεί τον έλεγχο της κυκλοφορίας για την προστασία και της συσκευής αλλά και του χρήστη. Η δοκιμή σε μία θέση διαρκεί περίπου 30 λεπτά συμπεριλαμβανομένου του χρόνου ρύθμισης του οργάνου. Η αντίσταση στην ολίσθηση μετράται κανονικά με σχετικά χαμηλή ταχύτητα ολίσθησης (10 km / h ή λιγότερο). Λόγω του ελαφρού κατακόρυφου φορτίου που επενεργεί στον ελαστικό ολισθητήρα και το μικρό έλασμα δοκιμής, μετριέται μόνο η τριβή που συντελείται από την μικρό-υφή (Austroads 2011).

6.4 Μετρήσεις μακροϋφής

Η μέτρηση της μακροϋφής της επιφάνειας του οδοστρώματος μπορεί να γίνει με την δοκιμή της κηλίδας άμμου. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα με ύψη μεγαλύτερη των 0,25 mm. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου δεν είναι ακριβή για υγρό ή μη καθαρό οδόστρωμα. Πρόκειται για μια ογκομετρική μέθοδο που βασίζεται στην εκτίμηση του όγκου των κενών της επιφάνειας του οδοστρώματος, όταν γνωστός όγκος διαβαθμισμένης άμμου διαστρώνεται και γεμίζει τα κενά έως τις κορυφές των κόκκων των αδρανών. Το βάθος υφής που προκύπτει από την ογκομετρική μέθοδο ονομάζεται «Mean Texture Depth» (MTD). Για την περίπτωση νέου οδοστρώματος, οι μετρήσεις εκτελούνται το αργότερο 7 ημέρες μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και οπωσδήποτε πριν από την παράδοση της οδού στην κυκλοφορία. Επισημαίνεται ωστόσο ότι η μέθοδος της κηλίδας της άμμου παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα: δεν παρέχει ικανότητα αποτύπωσης της συνολικής επιφάνειας του οδοστρώματος λόγω σημειακών μετρήσεων, είναι χρονοβόρα ως προς την εφαρμογή της και προϋποθέτει την ύπαρξη μέτρων οδικής ασφάλειας (σήμανση, αποκλεισμός της οδού) (HIGHWAYS DEPARTMENT 1989).



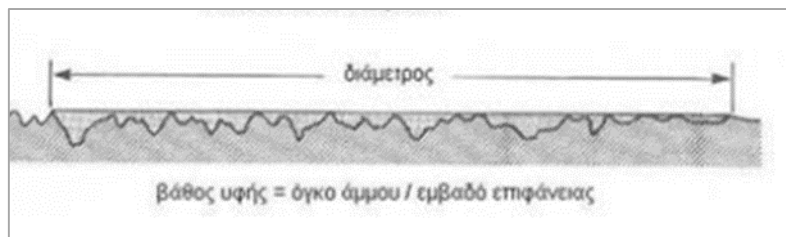
Εικόνα 12. Δοκιμή της κηλίδας άμμου στις κατασκευασμένες πλάκες (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)



Εικόνα 13. Μετρημένη ποσότητα άμμου τοποθετείται στο οδόστρωμα (Standard test procedure for measurement of texture by the sand method 1981)



Σχήμα 9. Τι αγνοείται στη δοκιμή της κηλίδας της άμμου (Standard test procedure for measurement of texture by the sand method 1981)



Εικόνα 14. Υπολογισμός MTD (Highways department 1989)

Για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή της άμμου πρέπει να καθαριστεί η δοκιμαστική επιφάνεια με μία μαλακή βούρτσα και τονίζεται ότι το τμήμα του οδοστρώματος που θα εξεταστεί να είναι στεγνό. Στη συνέχεια γεμίζεται ο μεταλλικός κύλινδρος με άμμο μέχρι την κορυφή και συμπυκνώνεται με μαλακά χτυπήματα στη βάση του, έτσι ώστε να προστεθεί η απαραίτητη ποσότητα άμμου. Μετά, απομακρύνεται ο μεταλλικός κύλινδρος και η άμμος απλώνεται με το ειδικό εργαλείο σε κυλινδρική κηλίδα μέχρι να καλυφθούν τα αδρανή και μετράτε η διάμετρος (Tex-436-A.1999-2008). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για περισσότερες φορές και προκύπτει ο μέσος όρος. Στο τέλος υπολογίζεται η μακροϋφή από την εξίσωση 9 :

Εξίσωση 8

$$MTD = \left(\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \right)$$

Όπου :

V : Ο όγκος της άμμου σε ml ίδιος σε κάθε δοκιμή.

D : Ο μέσος όρος των διαμέτρων της κηλίδας της άμμου

7 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο έγινε προσπάθεια προσομοίωσης των εποχιακών μεταβολών σε συνθήκες εργαστηρίου. Έτσι κατασκευάστηκαν πλάκες ασφαλτομίγματος και καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά των ασφαλικών πλακών, που διαφοροποιούνταν μεταξύ τους τόσο ως προς τη σύνθεση όσο και στα υλικά τους. Συγκεκριμένα για τη ποσοτικοποίηση της εποχιακής διακύμανσης εξετάστηκε η επιρροή της θερμοκρασίας και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Έτσι σε συνθήκες εργαστηρίου έγιναν δύο ποσοτικοποιήσεις, η επίδραση της θερμοκρασίας και των κατάλοιπων σκόνης στον συντελεστή τριβής των οδοστρωμάτων.

7.1 Κατασκευή μιγμάτων και πλακών

Για τη διεξαγωγή των πειραματικών εργασιών και τη διερεύνηση των εποχιακών μεταβολών κατασκευάστηκαν πλάκες ασφαλτομίγματος. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η παρασκευή πλακών σε διάφορα ποσοστά ασφαλτομίγματος HMA και RAP (Εικόνα 15). Συγκεκριμένα, στόχος ήταν να κατασκευαστούν πλάκες ασφαλτομίγματος με την αναλογία υλικών HMA ή και ποσοστού RAP που φαίνονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12. Ονομασία πλακών με τα αντίστοιχα ποσοστά HMA και RAP

HMA (%)	RAP (%)	HMA (%)	RAP (%)
100	0	100	0
70	30	70	30
88	12	88	12
85	15	85	15



Εικόνα 15. HMA και RAP (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Το εν λόγω υλικό ΗΜΑ προήλθε από μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος με στόχο τη διάστρωση σε οδό αυτοκινητοδρόμου ενώ το RAP από διαδικασία ανακατασκευής οδού. Συνεπώς, έπρεπε τα υλικά του ασφαλτομίγματος να ελεγχθούν ως προς την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Για την περίπτωση του ΗΜΑ πραγματοποιήθηκε αρχικά εκχύλιση με στόχο τον διαχωρισμό των αδρανών από την ασφάλτο.

Η εκχύλιση είναι μια διαδικασία που έχει σκοπό τον προσδιορισμό του ποσοστού της ασφάλτου που περιέχει το ασφαλτόμιγμα. Το δείγμα του ασφαλτομίγματος θερμαίνεται, τετραμερίζεται και λαμβάνονται τα δύο αντιδιαμετρικά του τμήματα ώστε να ληφθεί η κατάλληλη ποσότητα, η οποία τοποθετείται στο δοχείο της εκχύλισης. Στο δοχείο με το ασφαλτόμιγμα εισάγεται διαλύτης μέχρι την κάλυψη των αδρανών. Τοποθετείται το φίλτρο και τίθεται σε κίνηση η συσκευή με συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα μέχρι να σταματήσει η ροή του διαλύτη με την ασφάλτο από τον σωλήνα εκροής. Προστίθεται αντίστοιχη ποσότητα διαλύτη και επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου το εκχύλισμα να εξέρχεται όσο το δυνατόν πιο διαυγές και καθαρό σε περιεκτικότητα ασφάλτου. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο ειδικό έντυπο.



Εικόνα 16. Συσκευή εκχύλισης (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Αναφέρεται ότι το ποσοστό της ασφάλτου για το ΗΜΑ που προέκυψε από την δοκιμή της εκχύλισης ήταν 4,87%.

Αναφορικά με την αξιοποίηση RAP έπρεπε να ελεγχθεί αν και αυτό το υλικό ήταν εντός των προδιαγραφών. Έτσι έγινε τετραμερισμός μιας ποσότητας υλικού και κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη με τον εξής τρόπο: Μια ποσότητα μάζας που προήλθε από τον τετραμερισμό (αντιδιαμετρικά τμήματα) τοποθετήθηκε σε ηλεκτρονική κοσκινίστρα (Εικόνα 17), στην οποία τοποθετούνται τα κόσκινα με φθίνουσα σειρά μεγέθους οπής, από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο. Τα αδρανή υλικά αφού ζυγίσθηκαν, τοποθετήθηκαν στην κοσκινίστρα και κοσκινίζονται για 15 λεπτά. Στη συνέχεια ζυγίζεται η ποσότητα που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο και υπολογίζεται το ποσοστό που διέρχεται από το καθένα έτσι ώστε να κατασκευαστεί η κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών. Η κοκκομετρική καμπύλη που προκύπτει, συγκρίνεται με τα άνω και κάτω όρια του Ε.Λ.Ο.Τ. Η διαδικασία αυτή γίνεται τρεις φορές.



Εικόνα 17. Ηλεκτρονική συσκευή κοσκίνισματος

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών υλικών που αξιοποιήθηκαν για την μετέπειτα κατασκευή του ασφαλτομίγματος. Από την κοκκομετρική διαβάθμιση που πραγματοποιήθηκε κατασκευάστηκε η αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη η οποία ελέγχθηκε με βάση τις προδιαγραφές Ε.Λ.Ο.Τ (Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2)(Εικόνα 18).

Μέγεθος κόσκινου 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 18. Τα όρια που ορίζονται από τον Ε.Λ.Ο.Τ για τα αδρανή (Λοΐζος 2018)

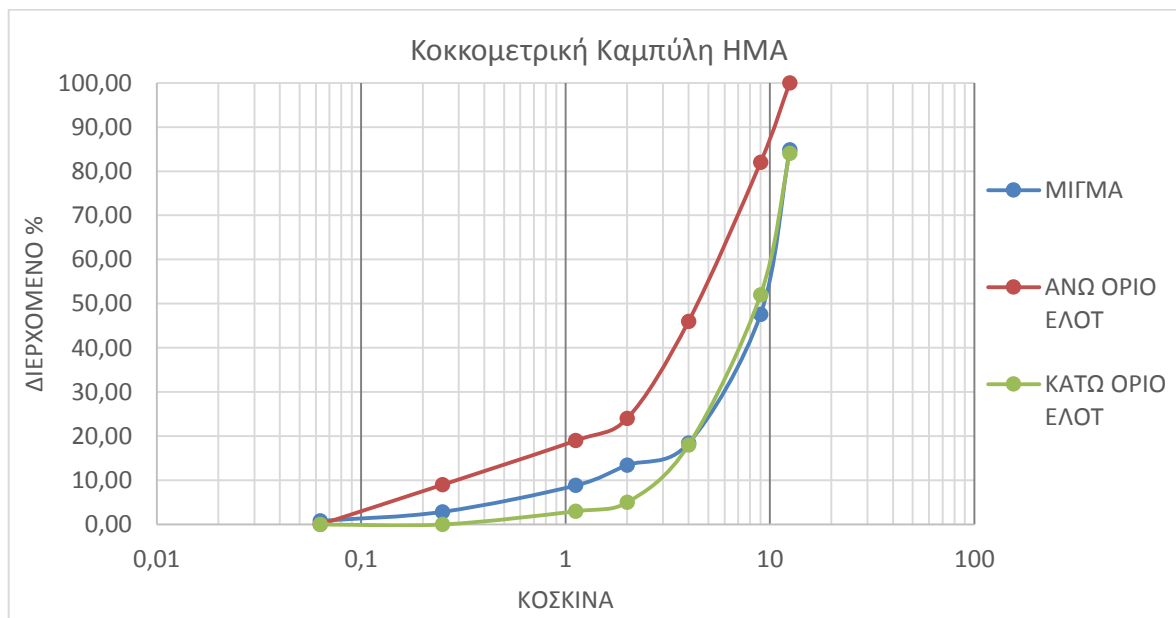


Εικόνα 19. Το RAP του εργαστηρίου το οποίο κοσκινίστηκε (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

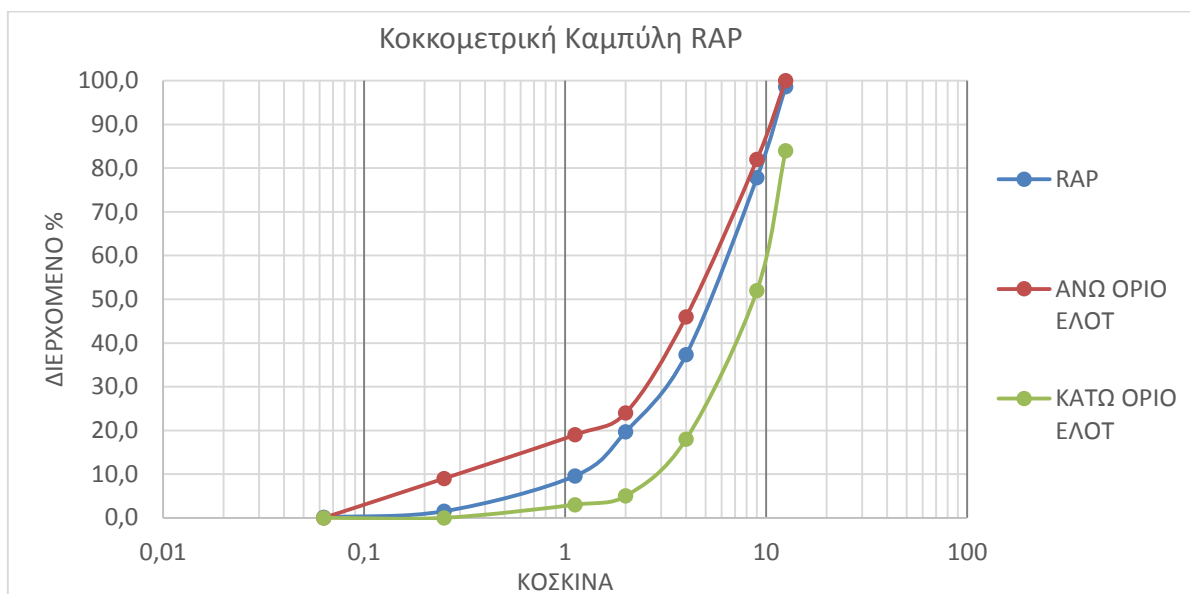


Εικόνα 20. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες που κατασκευάστηκαν από τα αδρανή των ΗΜΑ – RAP.



Διάγραμμα 11. Κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών προς χρήση για το ΗΜΑ



Διάγραμμα 12. Κοκκομετρική καμπύλη RAP μίγμα αδρανών

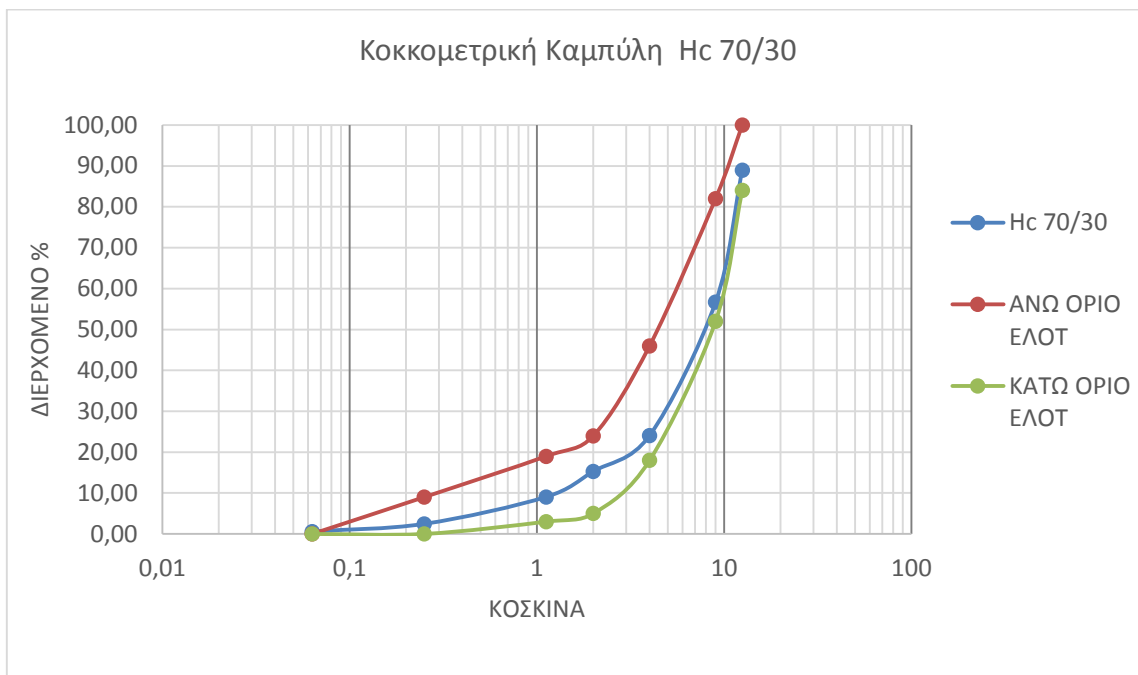
Για την κατασκευή των πλακών αναφορικά με τα ποσοστά που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 12, πραγματοποιήθηκε σύνθεση των δύο υλικών με στόχο το τελικό μίγμα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ΕΛΟΤ. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ονομασία της κάθε πλάκας και η επιθυμητή αναλογία. Ο πρώτος αριθμός δηλώνει το ποσοστό περιεκτικότητας στο 100% της συνολικής μάζας του ασφαλτομίγματος του ΗΜΑ και ο δεύτερος το ποσοστό του RAP. Στις τελευταίες συνθέσεις προστέθηκαν μόνο λεπτόκοκκα αδρανή (από το κόσκινο Νο. 4 και κάτω).

Πίνακας 13. Ονομασία πλακών και τα αντίστοιχα ποσοστά ΗΜΑ και RAP

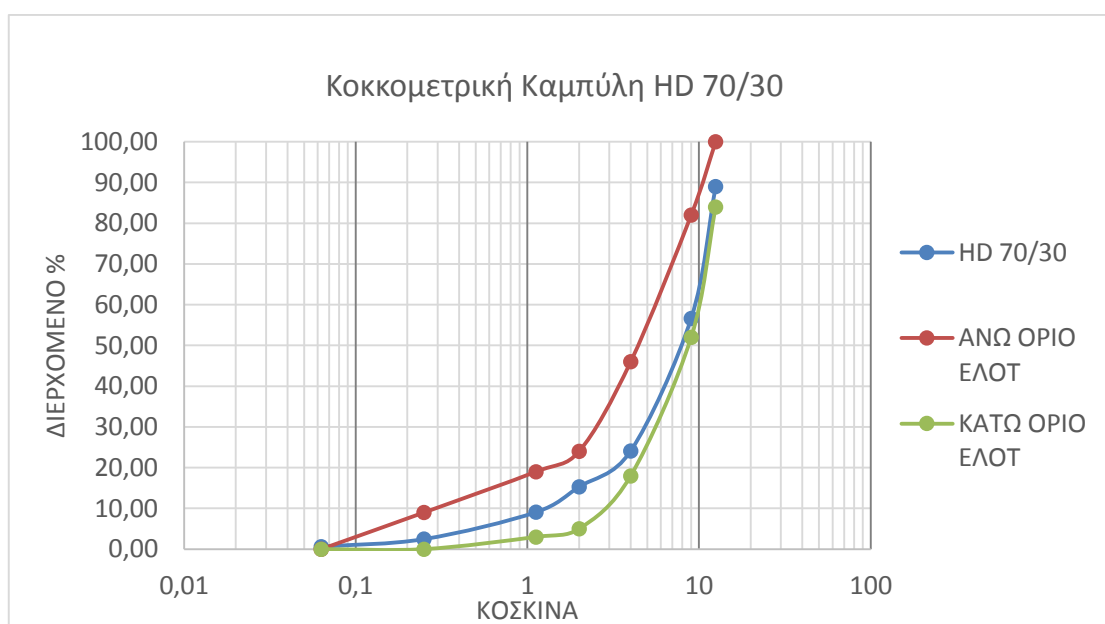
ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΛΑΚΩΝ	ΗΜΑ (%)	RAP (%)
HA 100%	100	0
HB 100%	100	0
HC 70/30	70	30
HD 70/30	70	30
HE 85/15	85	15 (μόνο λεπτόκοκκα αδρανή)
HF 88/12	88	12 (μόνο λεπτόκοκκα αδρανή)

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΛΑΚΩΝ	ΗΜΑ (%)	RAP (%)
HA 100%	100	0
HB 100%	100	0
HC 70/30	70	30
HD 70/30	70	30
HE 85/15	85	15
HF 88/12	88	12

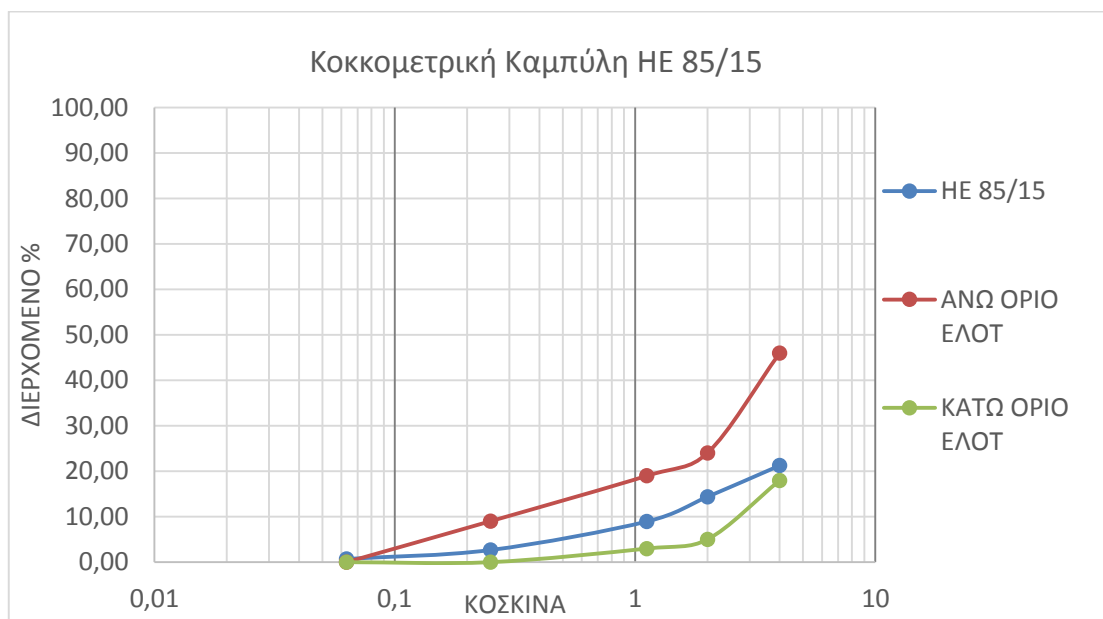
Αναφορικά με τα ποσοστά της κάθε πλάκας παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των συνθέσεων, έτσι ώστε να αποδειχθεί ότι βρίσκονται εντός ορίων Ε.Λ.Ο.Τ.



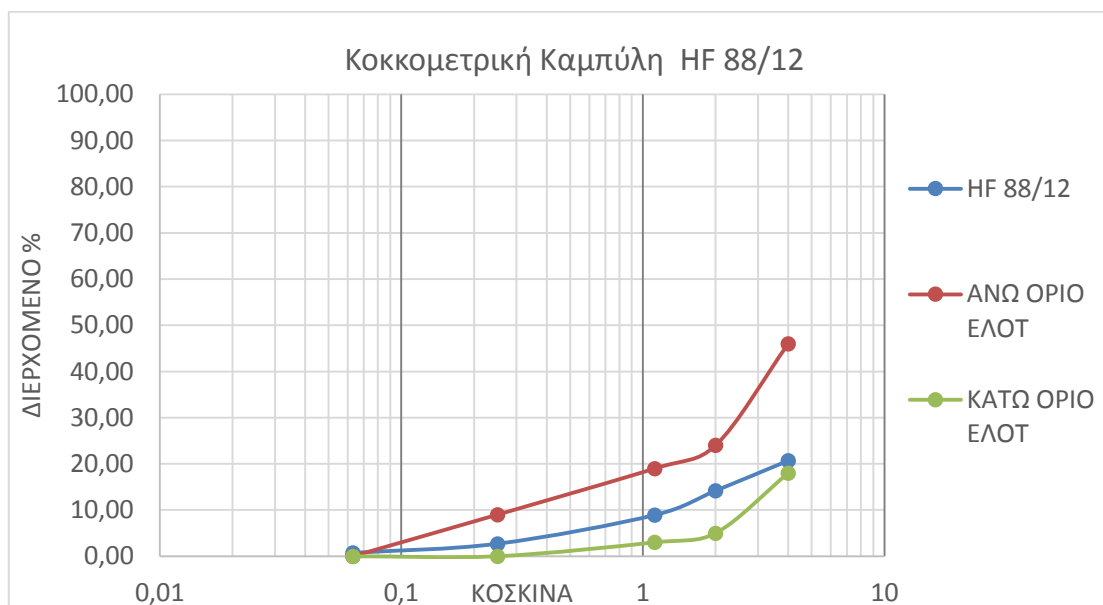
Διάγραμμα 13. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης 70/30



Διάγραμμα 14. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης 70/30



Διάγραμμα 15. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης 85/15



Διάγραμμα 16. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης 88/12

Για το μίγμα με ποσοστά RAP προστέθηκε μικρή ποσότητα ασφάλτου έτσι ώστε να ομογενοποιηθεί με τα αδρανή.

Άλλο ένα σημαντικό μέρος της πειραματικής διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός, των ποσοστών κενών των πλακών. Συνεπώς, πριν την κατασκευή των πλακών ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να υπολογιστούν τα θεωρητικά κενά. Τα θεωρητικά κενά θα αξιοποιηθούν εν συνεχεία για να ορισθεί η μάζα των μιγμάτων που θα τοποθετηθεί στον συμπιεστή με κύλινδρο (roller compactor). Και θα καθορίσει τα ποσοστά κενών που είναι επιθυμητό να έχουν οι πλάκες που θα κατασκευαστούν. Στο τέλος της κατασκευής των πλακών θα ορισθεί το τελικό ποσοστό που θα αποτελέσει την ταυτότητά τους. Αυτό γίνεται με την δοκιμή rise (EN 12697-5:2002+A1:2007) που περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά το δείγμα προετοιμάζεται και γίνεται διαχωρισμός των κόκκων με τα χέρια. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στο πυκνόμετρο και προστίθεται νερό θερμοκρασίας 25 °C μέχρι την πλήρη κάλυψη του υλικού.



Εικόνα 21. Το μίγμα τετραμερισμένο πριν μπει στο πυκνόμετρο (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Το δείγμα τοποθετείται σε συσκευή δόνησης και ταυτόχρονα εφαρμόζεται υποπίεση για να αφαιρεθεί ο αέρας που είναι τυχόν εγκλωβισμένος μεταξύ των κόκκων του μίγματος.



Εικόνα 22. Συσκευή rise (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα υπολογίζεται από την σχέση :

Εξίσωση 9

$$P_m = (m_2 - m_1) / V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{p_w} \right)$$

Όπου:

m1: η μάζα του πυκνόμετρου (kg)

m2: η μάζα πυκνόμετρου και δείγματος ασφ/τος (kg)

m3: η συνολική μάζα πυκνόμετρου, δείγματος ασφ/τος και νερού (kg) στους 25°C V_p: ο όγκος του πυκνόμετρου (m³) και

ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου (kg/m^3)

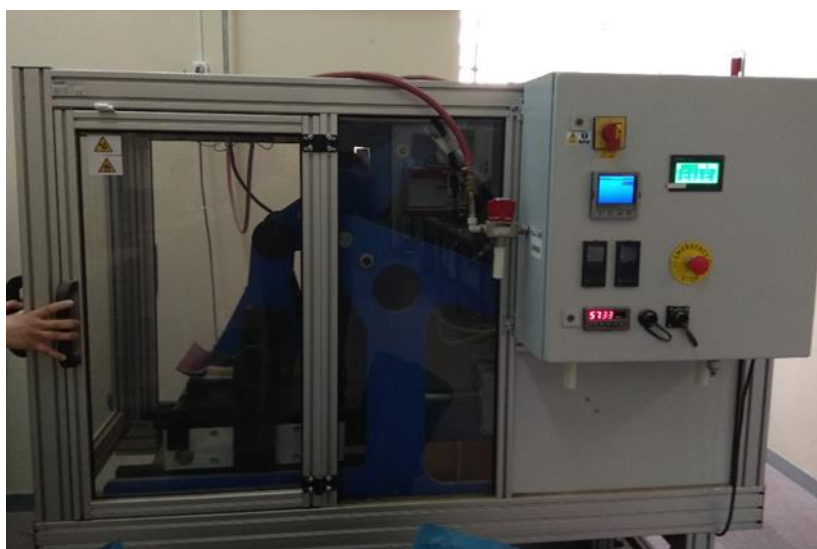
Η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα πολλαπλασιάζεται με τις διαστάσεις των μητρών που χρησιμοποιήθηκαν ($30\text{ cm} * 30\text{ cm} * 4\text{ cm}$) για να βρεθεί η μάζα που θα μπει στο roller compactor ρολερ.

Αφού μετρήθηκε η μάζα που μπήκε στις μήτρες και ακολούθησε η συμπίκνωση του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 23. Το ασφαλτόμιγμα στις μήτρες μετά την συμπίκνωση

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την συμπίκνωση είναι αυτή με τον κύλινδρο αφού χρησιμοποιείται για την προετοιμασία των δοκιμών ελέγχου συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων. Στη μέθοδο αυτή, η συμπίκνωση επιτυγχάνεται με μεταλλικό κύλινδρο, ο οποίος ασκεί πίεση στο προς συμπίκνωση ασφαλτόμιγμα μέσω υδραυλικού συστήματος. Η διαδικασία της συμπίκνωσης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και με τη βοήθεια ενός κέντρου ελέγχου ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των περασμάτων του κυλίνδρου και το μέγεθος του φορτίου συμπίκνωσης (Εικόνα 24).



Εικόνα 24. Η συμπίκνωση των πλακών (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα ποσοστά κενών που έχουν πραγματικά οι πλάκες που κατασκευάστηκαν έτσι ώστε να συγκριθούν με τον θεωρητικό υπολογισμό τους, για να ταυτοποιηθούν οι πλάκες. Για να γίνει αυτό, πολλαπλασιάζεται η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα με τις διαστάσεις τις κάθε πλάκας (Εικόνα 25).



Εικόνα 25. Μέτρηση των διαστάσεων των πλακών (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Το πλάτος και το μήκος δεν άλλαξαν, όμως άλλαξε το ύψος το οποίο μετρήθηκε τρεις φορές σε κάθε διάσταση και χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος (Μέθοδος Διαστάσεων- EN 12697-5:2002+A1:2007). Αναλυτικότερα, από την μέγιστη θεωρητική πυκνότητα και για συγκεκριμένο ποσοστό κενών, υπολογίστηκε η μάζα HMA και RAP που θα έπρεπε να μπει στις μήτρες για κάθε σύνθεση (π.χ. για μάζα 1000 gr HMA με ποσοστό κενών 7% και 1000 gr RAP με ποσοστό κενών 7% για την πλάκα 70/30 θα έμπαινε στις μήτρες 700 gr HMA και 300 gr RAP). Η μάζα που μπήκε στις μήτρες ωστόσο παρουσίαζε μικρές αποκλίσεις. Ο πίνακας 14 παρουσιάζει τα τελικά πραγματικά ποσοστά κενών των πλακών που κατασκευάστηκαν συγκριτικά με την αναλογία υλικού HMA -RAP.

Πίνακας 14. Τελικά στοιχεία πλακών

Πλάκα	Ποσοστά Κενών (%)	HMA (%)	RAP (%)
HA 100%	17,01	100	0
HB 100%	17,56	100	0
HC 70/30	9,91	70	30
HD 70/30	7,65	70	30
HE 85/15	7,90	85	15
HF 88/12	7,70	88	12

Παρατηρείται ότι, ενώ οι πλάκες HA και HB έχουν μόνο ασφαλτόμιγμα HMA (ίδια κοκκομετρική ανάλυση) προκύπτει να έχουν διαφορετικά ποσοστά κενών (17,01 και 17,56 αντίστοιχα). Αυτό συμβαίνει γιατί στη συμπίκνωση με τον κύλινδρο (roller compactor) επιλέχθηκαν διαφορετικές μάζες. Έτσι τα ποσοστά κενών μειώνονται είτε με διαφορετική κοκκομετρική σύνθεση είτε με διαφορετικές μάζες.

7.2 Μεθοδολογία για την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας

Για τις μετρήσεις του συντελεστή τριβής αξιοποιήθηκε το Βρετανικό εκκρεμές (British Pendulum) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ και έτσι βρέθηκε ο συντελεστής τριβής σε όρους BPN για όλες τις πλάκες κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες και για διαφορετικά σημεία των πλακών. Αναλυτικότερα οι θερμοκρασίες που έγιναν τα πειράματα ήταν οι 10 °C, οι 25 °C και οι 30 °C και τα σημεία των πλακών ήταν το Α και Κ που βρίσκονταν σε κάθετες διευθύνσεις στο κέντρο και στην άκρη των πλακών αντίστοιχα (Εικόνα 26). Έγιναν 4-5 μετρήσεις για κάθε σημείο σε κάθε πλάκα και με τον μέσο όρο έγιναν τα παρακάτω διαγράμματα. Οι θερμοκρασίες πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια κλιματιστικού και για τις πλάκες με ειδικό ειδικό θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας.



Εικόνα 26. Τα σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

7.3 Μεθοδολογία για την διερεύνηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων

Για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά των πλακών στις περιβαλλοντικές συνθήκες, θα πρέπει να συγκριθούν και τα σημεία αναφοράς της κάθε πλάκας στις δύο μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και μεταξύ τους οι πλάκες με σημείο σύγκρισης τα διαφορετικά ποσοστά κενών. Τα σημεία αναφοράς που φαίνονται στα διαγράμματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις και παρουσιάζονται κατά περίπτωση είναι τα εξής (Σχήμα 10):

- 1) 'ΣΤΕΓΝΟ': η πλάκα χωρίς την παρουσία νερού,
- 2) 'ΝΕΡΟ': η πλάκα με διαβροχή 2-3 ml νερού αλλά όχι παρουσία μίγματος
- 3) 'ΜΕ ΜΙΓΜΑ': η πλάκα με παρουσία μίγματος και νερού που αυτή είχε ήδη,

 'ΜΕ ΜΙΓΜΑ ΣΤΕΓΝΟ': Το μίγμα ήταν τελείως ξηρό και είχε τοποθετηθεί αρκετές ώρες πριν. Η διαδικασία μετρήσεων έγινε σε δύο φάσεις. Πριν τοποθετηθεί το μίγμα (έως στάδιο 2) και μετά από κάποιες ώρες αφού είχε αποξηραθεί (στάδια 3-5).

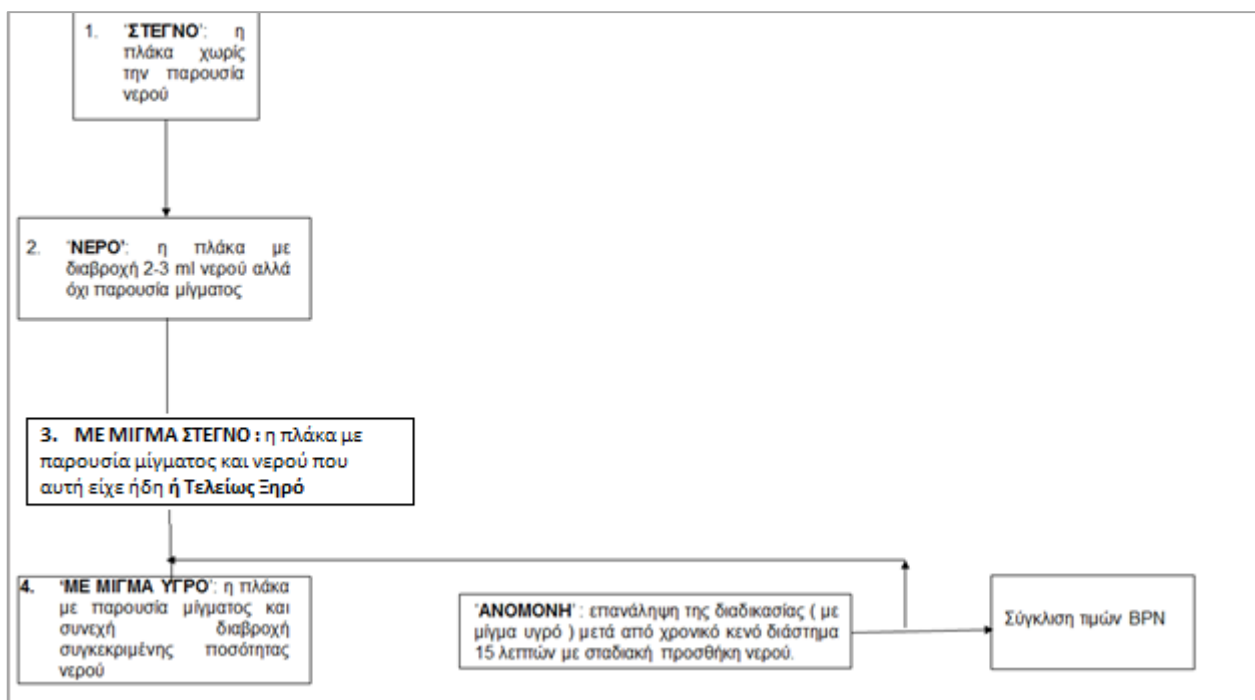
- 4) 'ΜΕ ΜΙΓΜΑ ΥΓΡΟ': η πλάκα με παρουσία μίγματος και συνεχή διαβροχή συγκεκριμένης ποσότητας νερού,
- 5) 'ΑΝΟΜΟΝΗ': επανάληψη της διαδικασίας (με μίγμα υγρό) μετά από χρονικό κενό διαστήματος 15 λεπτών με σταδιακή προσθήκη νερού.

Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι το μίγμα αποτελείται από παιπάλη (20gr) και από 7 gr νερού, το οποίο απλώθηκε στο κέντρο της πλάκας (Εικόνα 27,28). Για να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα της διαδικασίας,

κάθε πλάκα εξετάστηκε δύο φορές. Επίσης το σημείο που έγιναν οι μετρήσεις ήταν το Κ εξαιτίας του γεγονότος ότι το μίγμα σε αυτό το σημείο σταθεροποιούνταν πιο εύκολα με αποτέλεσμα πιο αξιόπιστες μετρήσεις.



Εικόνα 27. Διαδικασία πειράματος (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, 2019)



Σχήμα 10. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας με τα σημεία αναφοράς



Εικόνα 28. Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των καταλοίπων σε ξηρή μορφή (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)



Εικόνα 29. Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των καταλοίπων σε υγρή μορφή (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)



Εικόνα 30. Εργαστηριακή δοκιμή με το BPT (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ 2019)

Στις εικόνες 28 και 29 φαίνεται το μίγμα που χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των κατάλοιπων σκόνης σε στέρεα και υγρή μορφή. Ενώ στην εικόνα 30 φαίνεται μια δοκιμή που έγινε όταν εφαρμόστηκε το μίγμα στην κατασκευασμένη πλάκα.

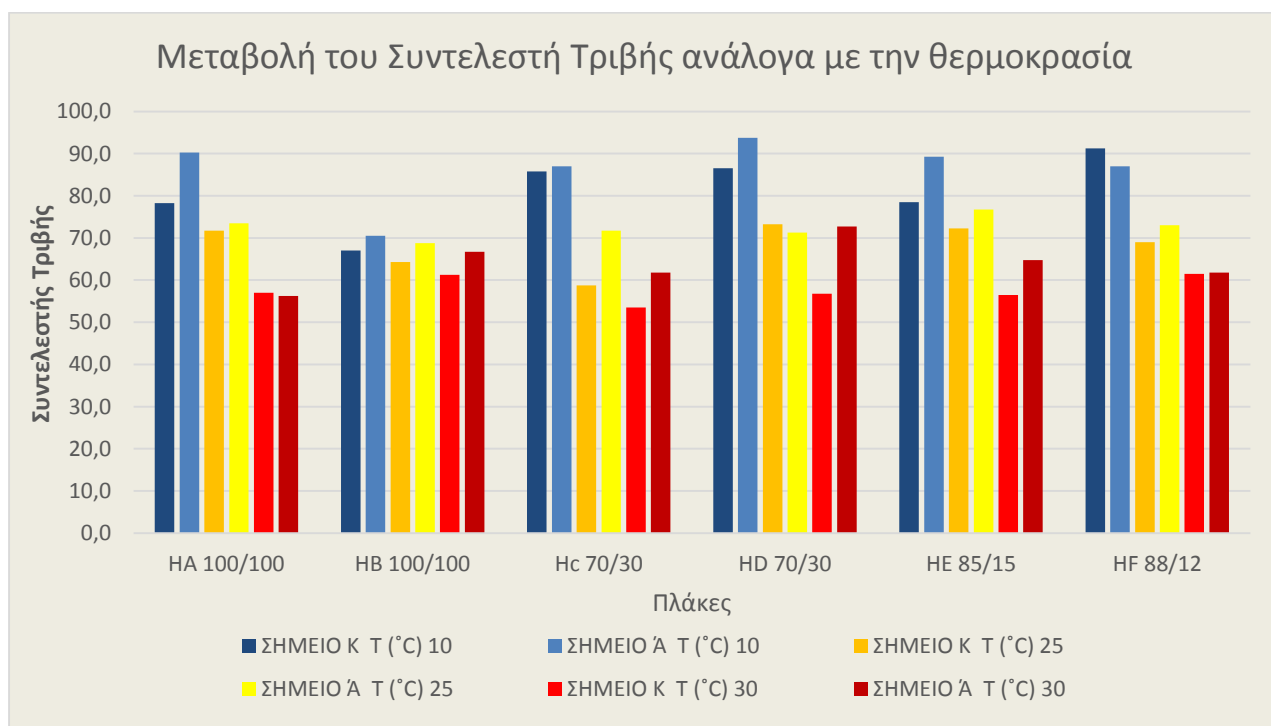
Στο επόμενο κεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα από τις πειραματικές διαδικασίες καθώς και χρήσιμα συμπεράσματα.

8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία του κεφαλαίου 7. Αρχικά παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές επιδράσεις στο συντελεστή τριβής και στη συνέχεια οι περιβαλλοντικές επιδράσεις σε αυτόν. Τέλος, δίδονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της μακροϋφής που πραγματοποιήθηκαν με την δοκιμή της κηλίδας της άμμου. Συνολικά, δίνεται έμφαση στη σημασία διαφοροποίησης των υλικών του ασφαλτομίγματος αναφορικά με τη συμπεριφορά του συντελεστή τριβής στις συνθήκες που εξετάζονται καθώς και της μακροϋφής.

8.1 Επίδραση θερμοκρασίας

Οι θερμοκρασίες που μελετήθηκαν ήταν οι 10 °C, οι 25 °C και οι 30 °C και τα σημεία των πλακών ήταν το Α και Κ που βρίσκονταν σε κάθετες διευθύνσεις στο κέντρο και στην άκρη των πλακών αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 17 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή τριβής (BPN) για τις θερμοκρασίες που εξετάστηκαν στα σημεία που ελέγχθηκαν.

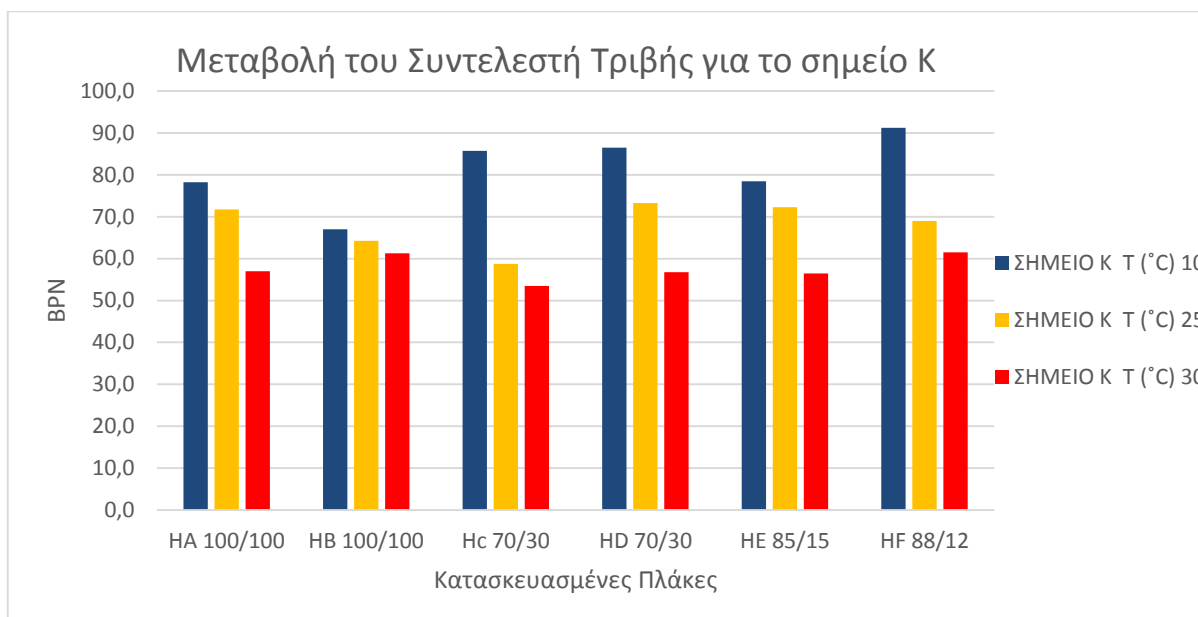


Διάγραμμα 17. Θερμοκρασιακά αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν με το Βρετανικό Εκκρεμές

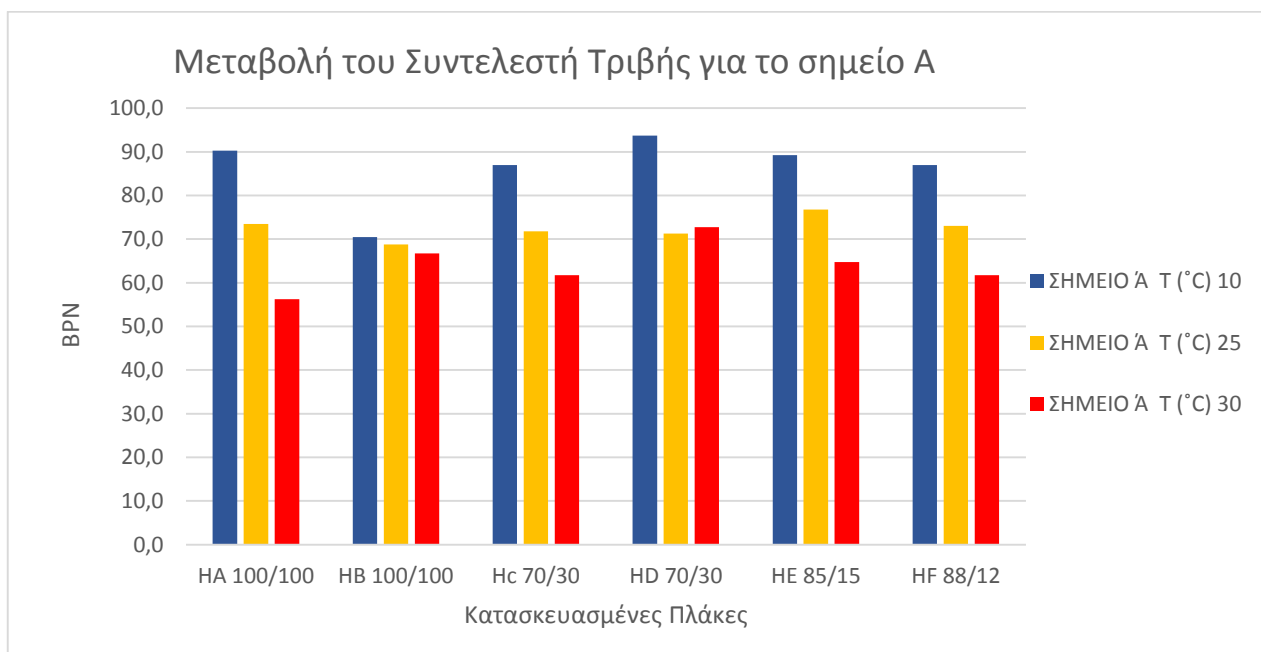
Παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριβής (BPN) είναι μεγαλύτερος σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις υψηλές στο γενικότερο πλαίσιο. Αυτό συμβαίνει γιατί η τριβή σε αυτή την φάση εξαρτάται μόνο από τις δυνάμεις υστέρησης (Βλέπε παρ. 5.4 – Περιβαλλοντικοί, Παράγοντες – Θερμοκρασία). Κατά την πλήρη πέδηση λοιπόν, στιγμιαία τήκεται το ελαστικό με το ασφαλτόμιγμα, άρα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τριβής. Οπότε η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος διαφαίνεται να είναι ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα του ασφαλτομίγματος σε RAP και του ποσοστού κενών, αφού η θερμοκρασιακές μεταβολές σχετίζονται με την ανάπτυξη δυνάμεων και ενέργειας και δεν συνδέονται άμεσα με τα υλικά.

Όσον αφορά τα σημεία μέτρησης, το σημείο Κ βρίσκεται στο κέντρο της πλάκας και το Α στην άκρη, σε κάθετη διεύθυνση από αυτή του Κ. Ο συντελεστής τριβής διαφαίνεται πιο αυξημένος στο Α συγκριτικά με το Κ και αυτό γίνεται λόγω της συμπύκνωσης μέσω του roller compactor. Στις άκρες, δηλαδή στο Α, προεξέχουν περισσότερο τα αδρανή άρα το ελαστικό πέλμα του pendulum συναντά μεγαλύτερη αντίσταση.

Στα Διαγράμματα 18, 19 που ακολουθούν απεικονίζονται οι μετρήσεις BPN για κάθε πλάκα αναφορικά με τα σημεία Κ και Α, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 18. Μεταβολή του συντελεστή τριβής για το σημείο Κ



Διάγραμμα 19. Μεταβολή του συντελεστή τριβής για το σημείο Α

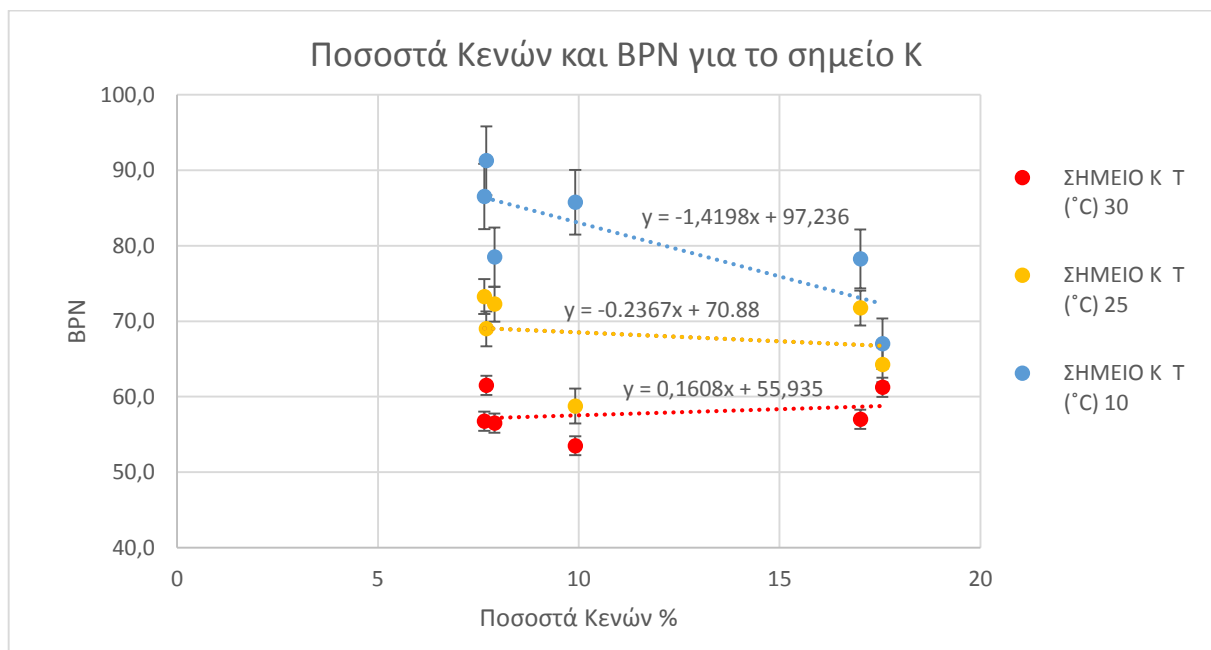
Συγκεκριμένα από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι για την Η_Α 100/100 ο συντελεστής τριβής για το σημείο Κ στους 10°C είναι μικρότερος κατά δέκα μονάδες από την αντίστοιχη θερμοκρασία για το Α, ενώ για τις άλλες θερμοκρασίες είναι περίπου ίδιος και για τα δύο σημεία.

Στην Η_Β 100/100 ο συντελεστής τριβής είναι μειωμένος και για τα δύο σημεία σε όλες τις θερμοκρασίες όχι όμως κατά πολύ. Στην Η_Γ 70/30 ο συντελεστής τριβής του σημείου Κ είναι ίδιος με το σημείο Α στους 10 °C, ενώ είναι κατά 10 μονάδες μικρότερος για τις θερμοκρασίες 25 °C και 30 °C.

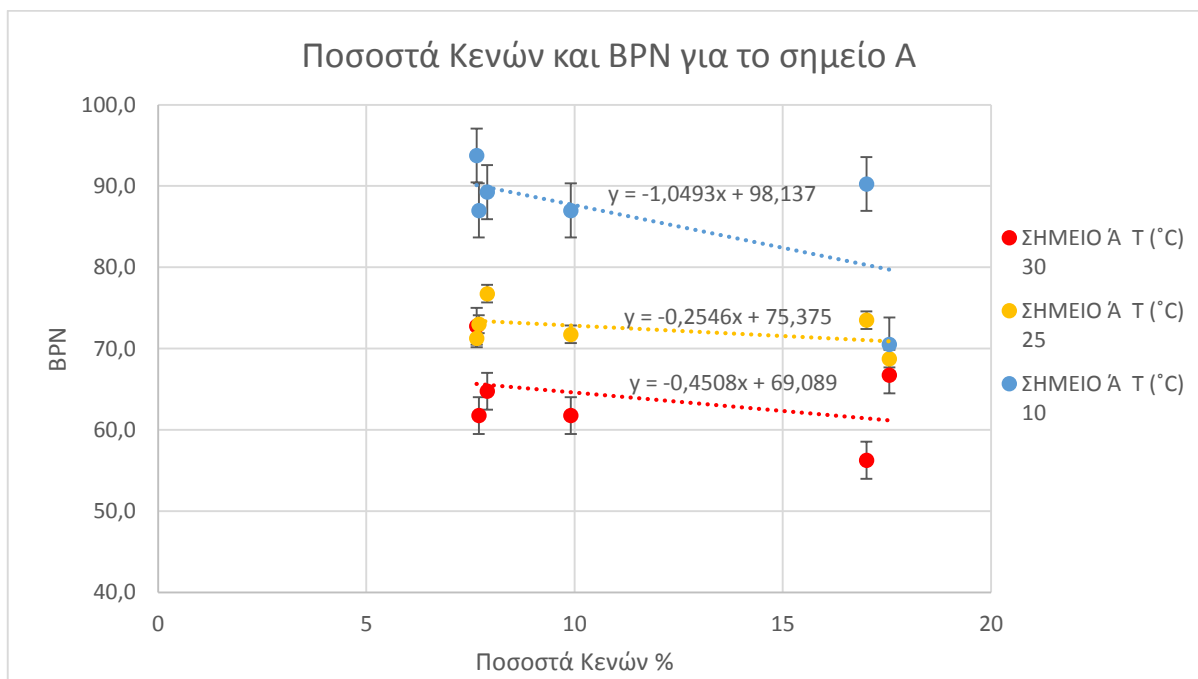
Στην Η_D 70/30 η μεγάλη μείωση του συντελεστή τριβής για το σημείο Κ γίνεται στους 30 °C ενώ για τους 25 °C είναι περίπου ίδιος και για τους 10 °C η μείωση είναι μικρή.

Για την Η_E 85/15 στο σημείο Κ ο BPN είναι μειωμένος όχι όμως σε ακραίες τιμές σε όλες τις θερμοκρασίες. Για την Η_F 88/12 ο συντελεστής τριβής στο Κ είναι μεγαλύτερος από το Α στους 10 °C, ίδιος περίπου στους 30°C και μειωμένος στους 25 °C.

Αφού μελετήθηκαν τα σημεία μέτρησης για διαφορετικές θερμοκρασίες για να κατανοηθεί πως επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των πλακών τον συντελεστή τριβής γίνεται αναφορά στο ποσοστό κενών που έχουν οι κατασκευασμένες πλάκες. Στα διαγράμματα 20, 21 απεικονίζεται το BPN σε σχέση με το ποσοστό κενών ανεξάρτητα από τα υλικά των πλακών.



Διάγραμμα 20. Μεταβολή του συντελεστή τριβής ανάλογα με τις θερμοκρασίες και τα ποσοστά κενών (σημείο Κ)

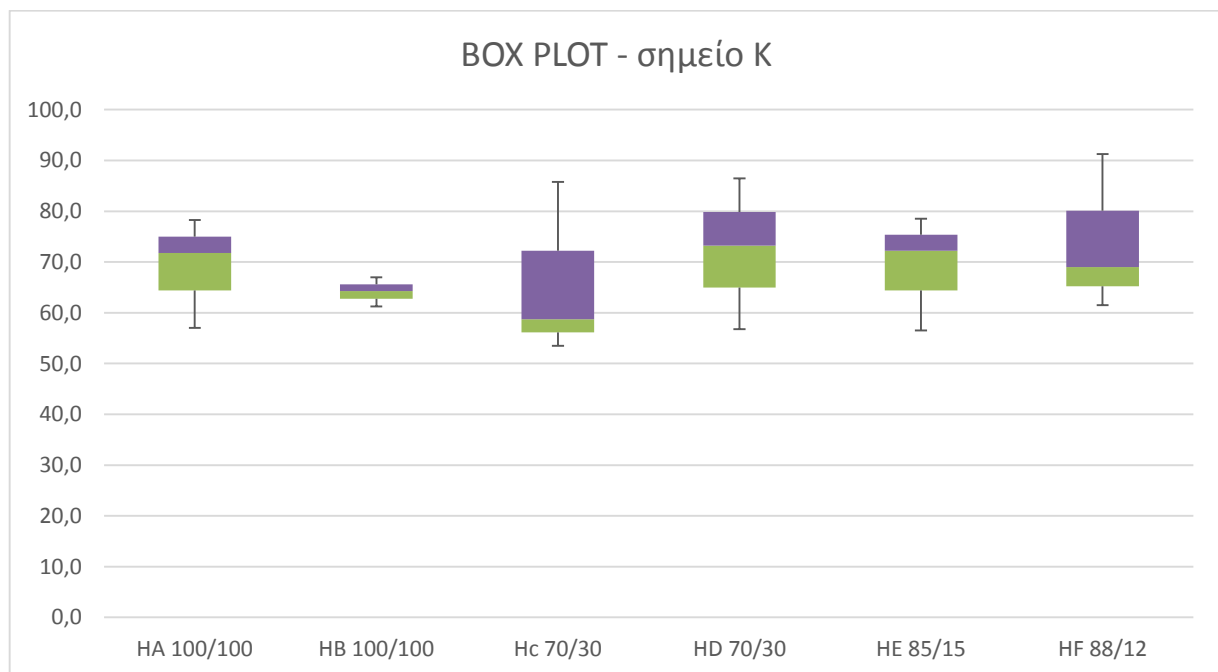


Διάγραμμα 21. Μεταβολή του συντελεστή τριβής ανάλογα με τις θερμοκρασίες και τα ποσοστά κενών (σημείο Α)

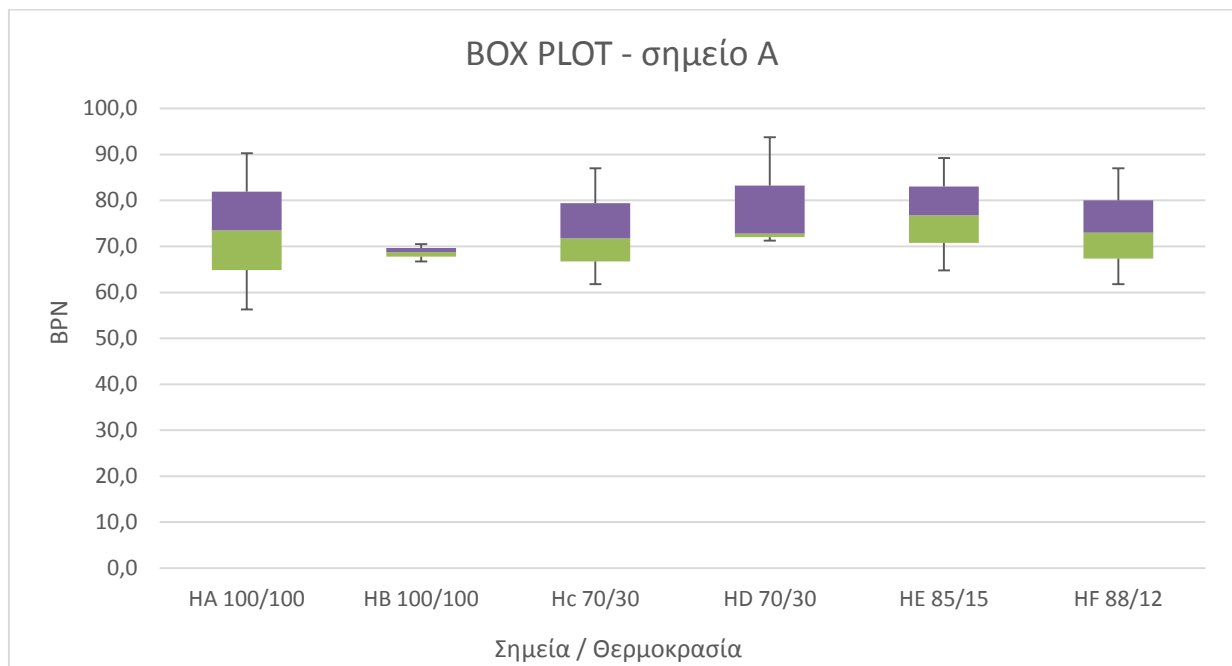
Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής τριβής παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες (25 °C και 30 °C) ανεξάρτητα από τα ποσοστά κενών (μικρή μεταβλητότητα συντελεστή τριβής - κλίση γραμμικής σχέσης). Ενώ, στις χαμηλές θερμοκρασίες και για τα δύο σημεία μέτρησης ο συντελεστής τριβής επηρεάζεται έντονα από τα ποσοστά κενών και μάλιστα όσο μειώνονται τα ποσοστά τόσο αυξάνεται το BPN (μεγάλη κλίση γραμμικής σχέσης). Επίσης το σφάλμα των τιμών είναι μεγαλύτερο στις χαμηλότερες τιμές υποδεικνύοντας της ευαισθησία των μετρήσεων σε αυτές τις συνθήκες.

Για την κατανόηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τα διαφορετικά σημεία (K, A) για κάθε πλάκα, θα γίνει κατασκευή θηκογράμματος (box plot). Πρόκειται για ένα ορθογώνιο με δύο κεραίες το οποίο κατασκευάζεται με την κάτω βάση του ορθογωνίου να βρίσκεται στο q1 και η πάνω στο q3. Η διάμεσος δ αναπαρίσταται με ένα οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα που βρίσκεται ανάμεσα στις βάσεις και η πάνω και κάτω κεραία έχουν τη μορφή T και ανεστραμμένο T αντίστοιχα και εκτείνονται μέχρι τις οριακές τιμές. Το θηκογράμματα προσφέρεται ιδιαιτέρως για την ανίχνευση ακραίων τιμών και την αναγνώριση της συμμετρίας ή του είδους της ασυμμετρίας της κατανομής. Αν το ευθύγραμμο τμήμα που αναπαριστά τη διάμεσο βρίσκεται στο μέσο του ορθογώνιου η κατανομή είναι συμμετρική αν βρίσκεται προς την κάτω πλευρά του ορθογώνιου η κατανομή παρουσιάζει θετική ασυμμετρία τέλος αν βρίσκεται πάνω προς τα πάνω πλευρά του ορθογώνιου η κατανομή παρουσιάζει αρνητική ασυμμετρία.

Για τα διάφορα σημεία K και A έγινε η απεικόνιση των μετρήσεων σε θηκογράμματα για να παρατηρηθεί η συμμετρία τους. Γενικότερα συμμετρικό είναι το σημείο A αφού για τις περισσότερες πλάκες το θηκογράμματα δείχνει ότι οι μετρήσεις είναι συμμετρικές κάτι το οποίο δεν συμβαίνει για το σημείο K (Διάγραμμα 22, 23).

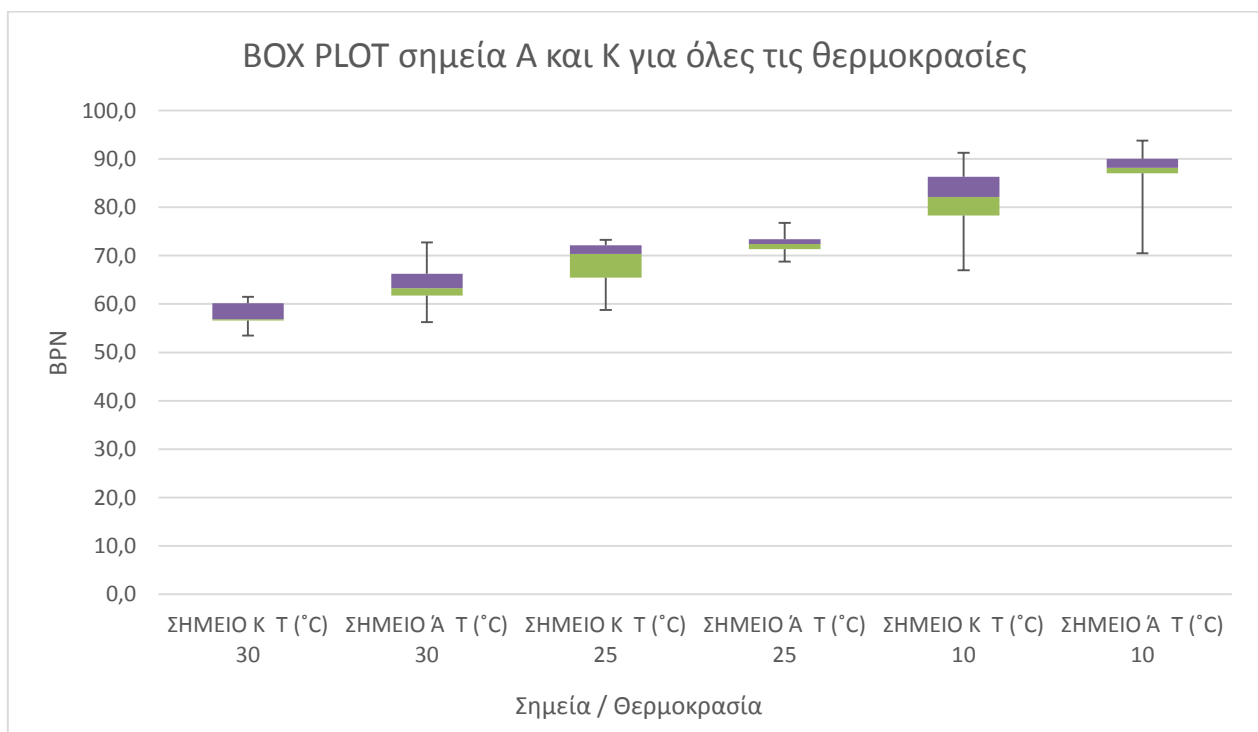


Διάγραμμα 22. Box plot του σημείου K



Διάγραμμα 23. Box plot του σημείου A

Για τις διάφορες πλάκες έγινε στατιστική ανάλυση (θηκόγραμμα) για να δούμε σε ποιες θερμοκρασίες και σε ποια σημεία παρουσιάζεται συμμετρία και δεν υπάρχουν ακραίες τιμές. Σύμφωνα με το διάγραμμα 24, συμμετρία παρουσιάζει το σημείο A στους 25 °C και το K στους 10 °C. Στις ακραίες τιμές των 10 °C και 30 °C υπάρχει ασυμμετρία και η διάμεσος είναι πιο κοντά στις μικρές τιμές (θετική ασυμμετρία) εκτός από το σημείο K στους 25 °C που παρουσιάζει αρνητική ασυμμετρία.



Διάγραμμα 24. Box plot για τα διάφορα σημεία και τις θερμοκρασίες

Για τις περιπτώσεις τις θετικής ασυμμετρίας (σημεία K, A στους 30 °C, και στο A στους 10 °C) η διάμεσος τείνει να ακουμπήσει την κάτω πλευρά του ορθογωνίου, κάτι το οποίο σημαίνει ότι έχουμε περισσότερες

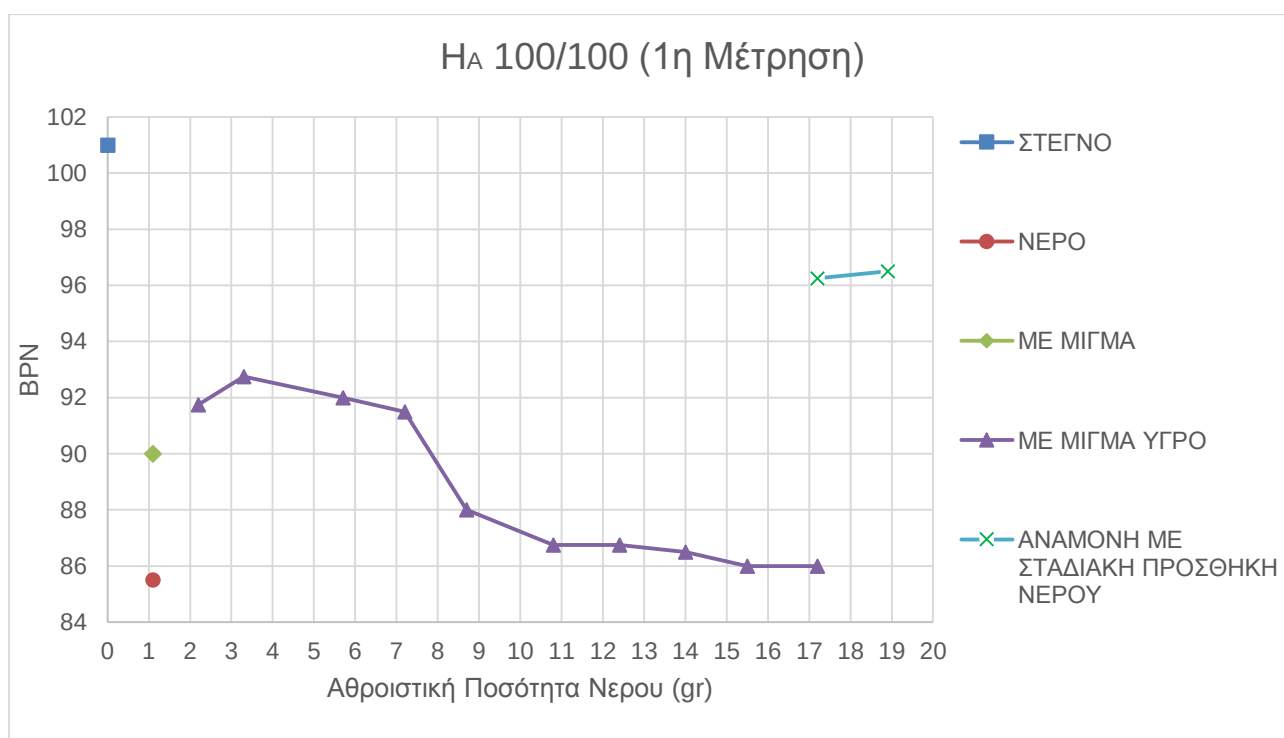
μετρήσεις κάτω από τη διάμεσο και μερικές μεγαλύτερες. Αυτό σημαίνει ότι οι περισσότερες μετρήσεις ήταν γύρω από μία τιμή (π.χ. 53) και λίγες ακραίες (π.χ. 61).

Το αντίστοιχο συμβαίνει και με την αρνητική συμμετρία (σημείο Κ στους 25 °C) όπου οι περισσότερες μετρήσεις ήταν γύρω από μία τιμή μεγαλύτερη της διαμέσου και λίγες μικρότερες.

Άρα οι μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας, αφού σε όλες τις περιπτώσεις τείνουν σε μία τιμή.

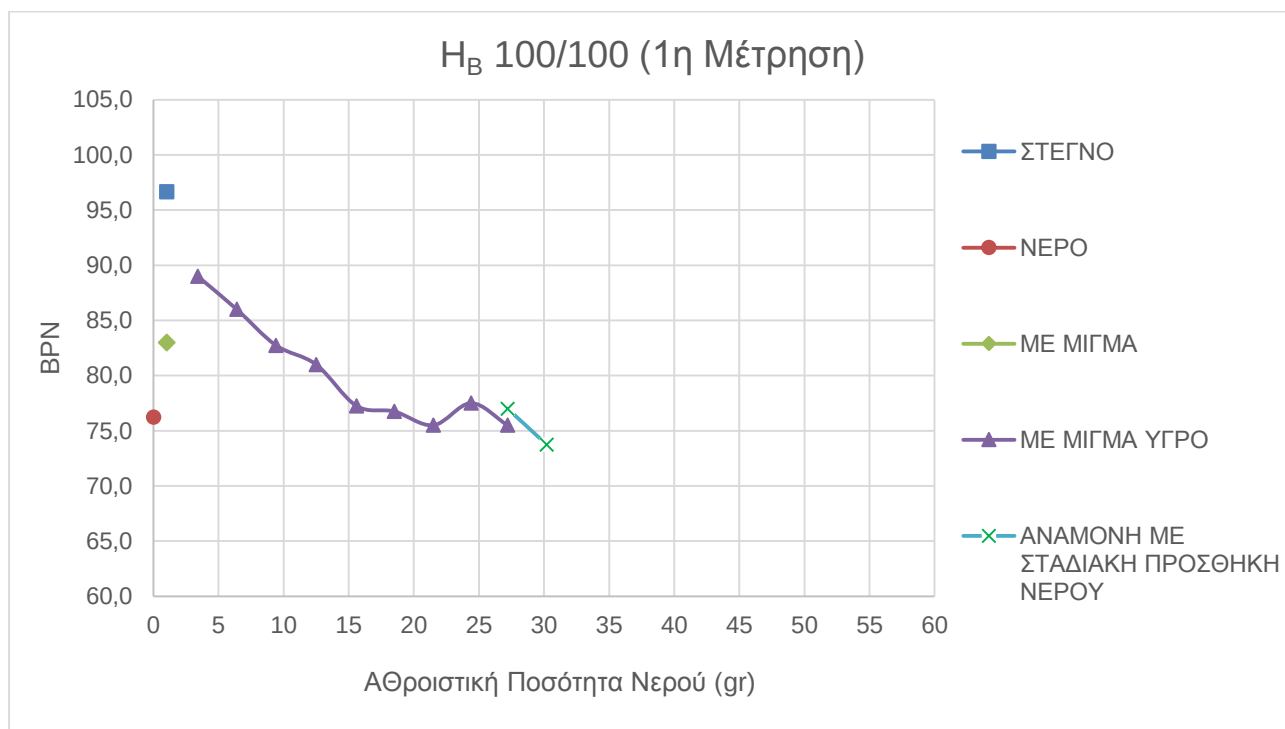
8.2 Επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων

Σε αυτό το εδάφιο παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία για τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, καθώς και χρήσιμα σχόλια που πηγάζουν από αυτά. Έτσι παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε σχετικά διαγράμματα, καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των σημείων αναφοράς.

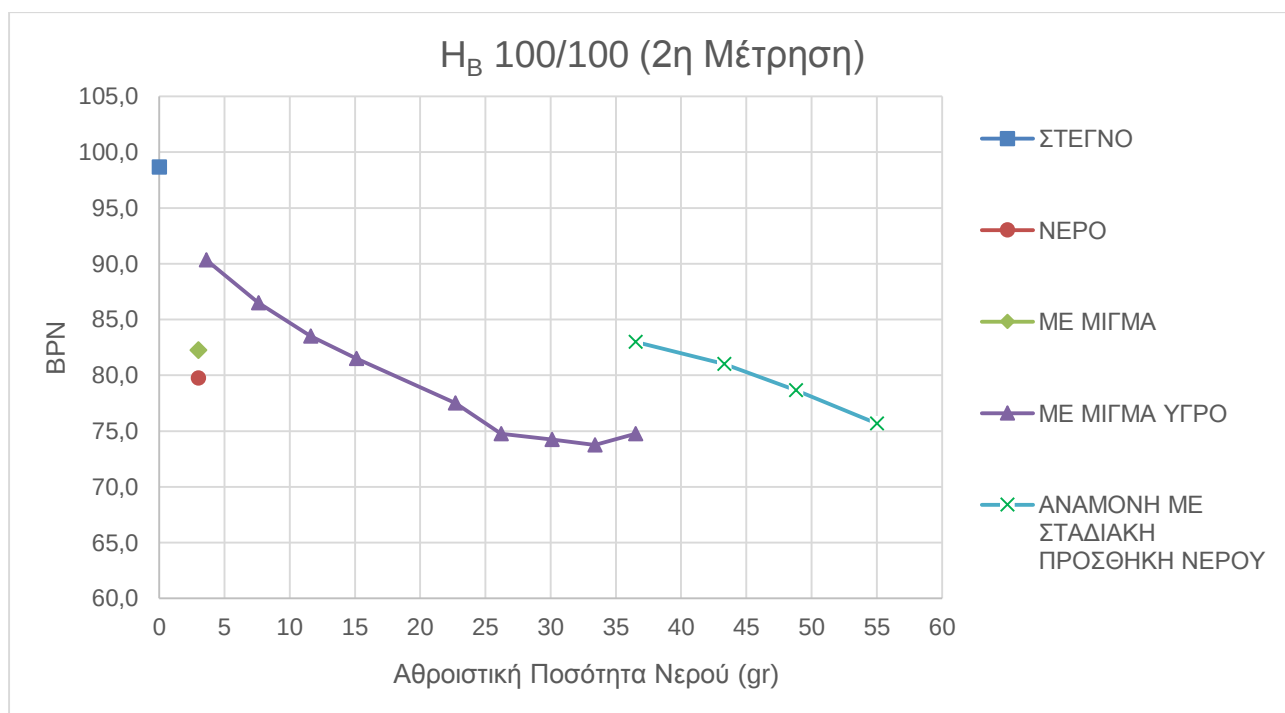


Διάγραμμα 25. 1^η Μέτρηση της πλάκας ΗΑ 100/100

Το πείραμα για την πλάκα ΗΑ 100/100 δείχνει το αναμενόμενο για το ΗΜΑ ασφαλτόμιγμα όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.4 – Περιβαλλοντικό Παράγοντες-Κατάλοιπα Οδοστρώματος. Δηλαδή, όταν η πλάκα είναι στεγνή έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή τριβής. Για μικρό φιλμ νερού ο συντελεστής τριβής μειώνεται δραματικά, αφού το νερό λειτουργεί σαν λιπαντικό. Όταν εφαρμόζονται οι ρύποι (σκόνη και νερό) αυξάνεται ο συντελεστής τριβής αφού λόγω του μεγέθους των κόκκων επανέρχεται σε μικρό ποσοστό η μικροϋφή των αδρανών. Στη συνέχεια αυξάνεται και πάλι η τριβή αφού με την εφαρμογή νερού ξεπλένεται ο ρύπος. Με την σταδιακή διαβροχή, το νερό δρα και πάλι σαν λιπαντικό και ο συντελεστής τριβής μειώνεται μέχρι την σταθεροποίησή του. Τέλος, στην αναμονή επανέρχεται ο συντελεστής τριβής αφού το νερό διαφεύγει από τα κενά, χωρίς όμως να πάρει την μέγιστη τιμή του διότι ακόμα υπάρχουν ρύποι που δρουν σαν λιπαντικό σε ξηρές πλέον συνθήκες.

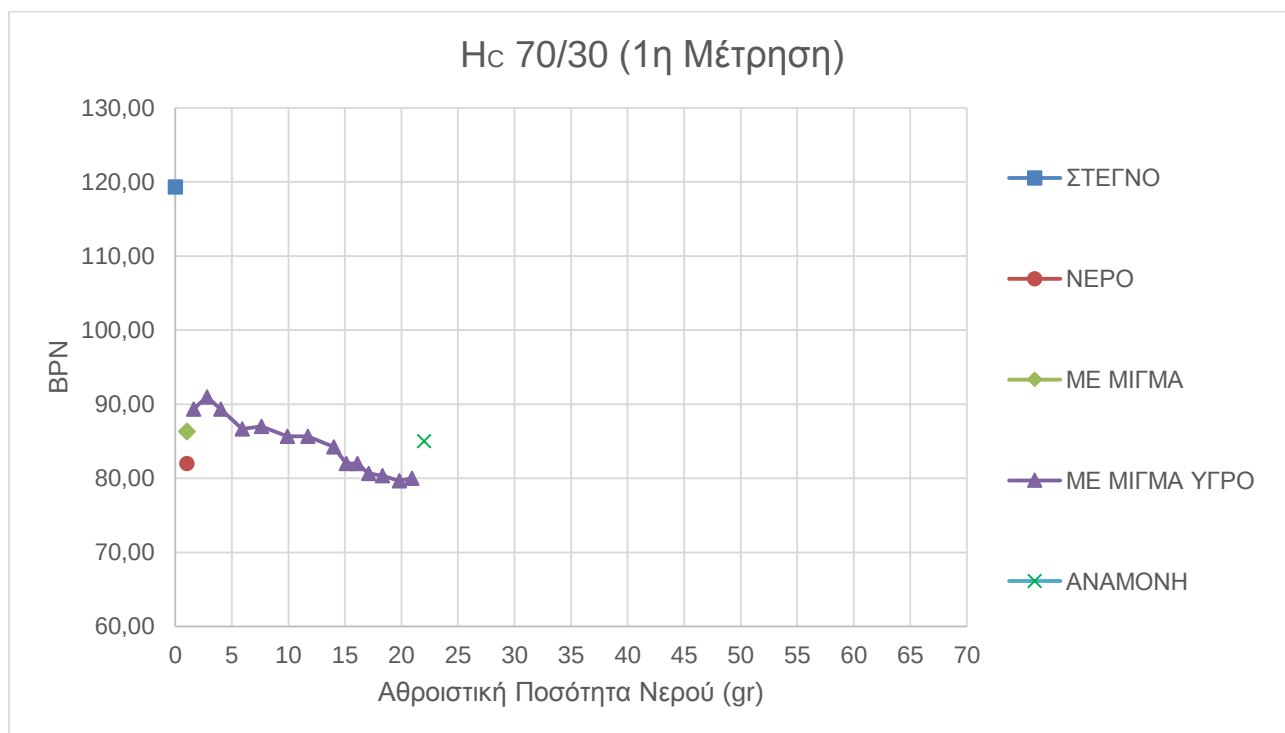


Διάγραμμα 26. 1^η Μέτρηση της πλάκας H_B 100/100

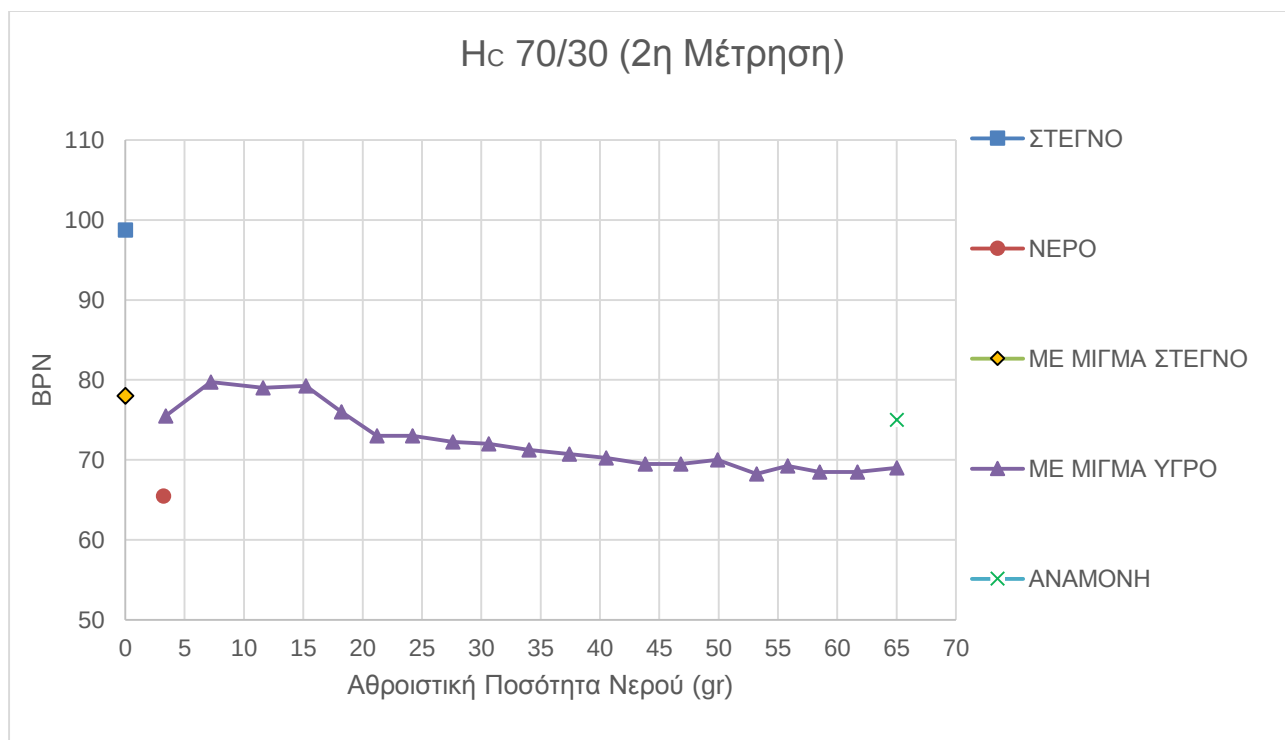


Διάγραμμα 27. 2^η Μέτρηση της πλάκας H_B 100/100

Η συμπεριφορά του συντελεστή τριβής για την πλάκα H_B 100/100 είναι παρόμοια με την H_A 100/100 μόνο που ο ρυθμός μείωσης του συντελεστή τριβής είναι μεγαλύτερος αφού και ο ρυθμός διαβροχής είναι μεγαλύτερος, άρα η πλάκα ξεπλένεται πιο γρήγορα.



Διάγραμμα 28. 1^η Μέτρηση της πλάκας Hc 70/30



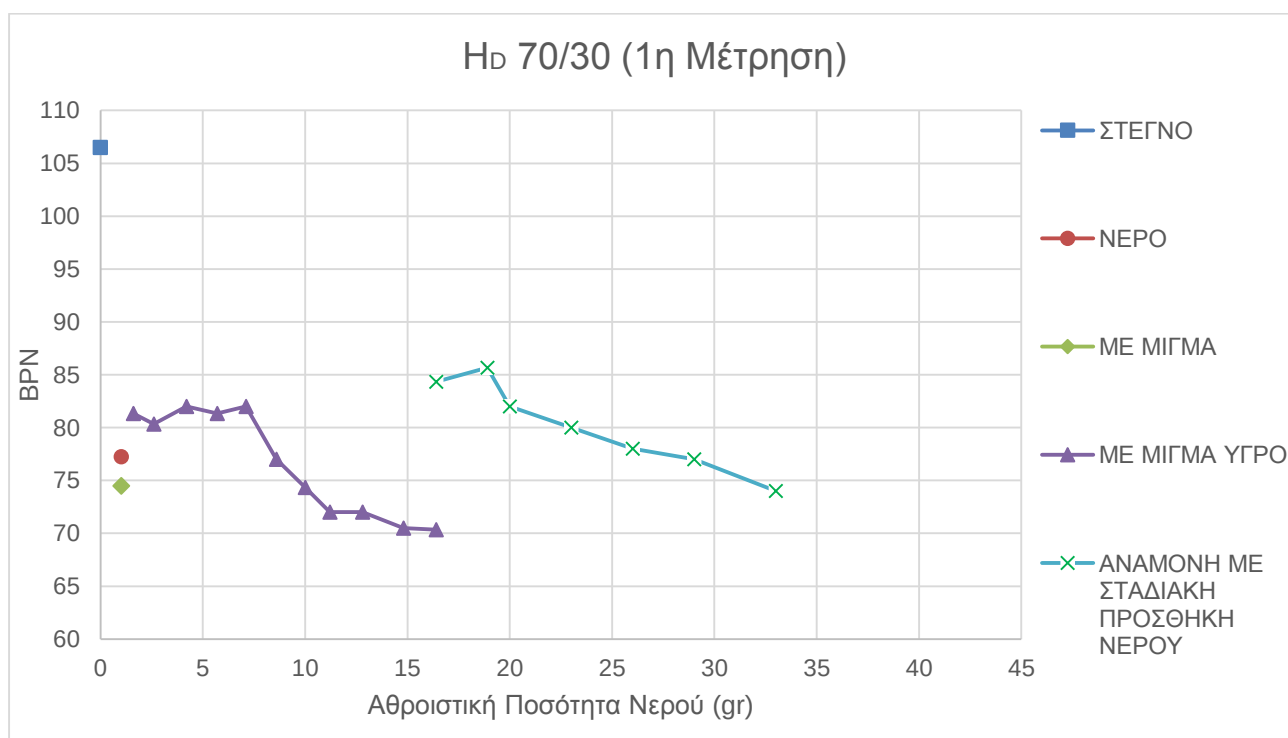
Διάγραμμα 29. 2^η Μέτρηση της πλάκας Hc 70/30

Στην 1^η μέτρηση δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της μείωσης του συντελεστή τριβής όταν εφαρμόζεται το νερό και της αντίστοιχης μείωσης όταν εφαρμόζεται το μίγμα. Αυτό συμβαίνει λόγω του μειωμένου ποσοστού κενών. Δηλαδή είτε το νερό είτε οι ρύποι δρουν περίπου με τον ίδιο τρόπο (σαν λιπαντικό) αφού επηρεάζουν το ίδιο έντονα την μικροϋφή των αδρανών, καθώς δεν εισέρχονται στα λίγα κενά του ασφαλτομίγματος. Στην 2^η μέτρηση, αρχικά όταν εφαρμόστηκε το μίγμα, ήταν τελείως ξηρό και είχε

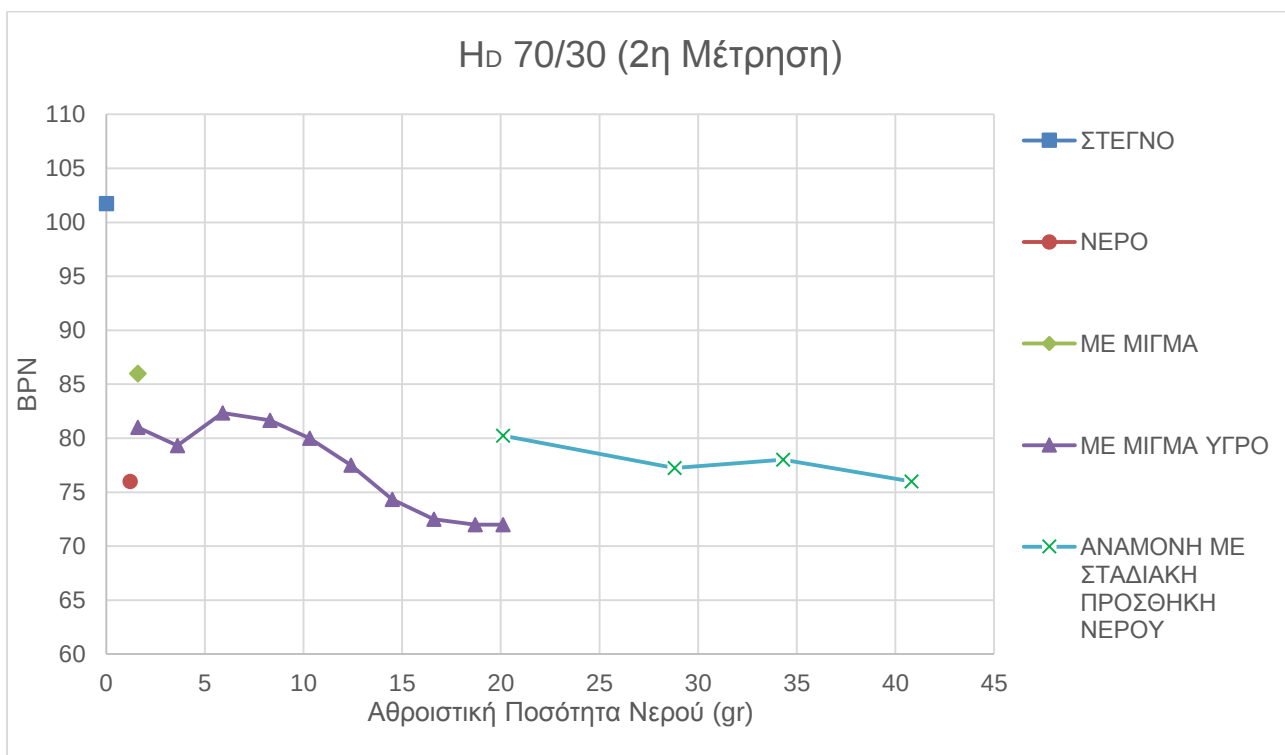
τοποθετηθεί αρκετές ώρες πριν γι' αυτό ο συντελεστής είναι αυξημένος σε σχέση με όταν εφαρμόζεται το μίγμα και ξεκινά η σταδιακή διαβροχή κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στις H_A και H_B. Εν προκειμένω δηλαδή, επιβεβαιώνεται πως το νερό και οι ρύποι συνεργάζονται για την περαιτέρω μείωση της τριβής και πως οι ρύποι ακόμα και σε ξηρές συνθήκες μειώνουν τον συντελεστή τριβής. Αυτό συμβαίνει λόγω των λίγων ποσοστών κενών που δεν επιτρέπουν στα σωματίδια και στο νερό να εισέλθουν στο ασφαλτόμιγμα, με αποτέλεσμα να παραμένουν στην επιφάνεια και να επηρεάζουν την μικροϋφή.

Για τον τρόπο που δρα το RAP θα γίνει σύγκριση των τιμών του συντελεστή τριβής για τα ίδια σημεία αναφοράς. Συγκρίνοντας τις τιμές του συντελεστή τριβής των πλακών H_A, H_B που δεν έχουν RAP σε στεγνές συνθήκες με τον αντίστοιχο συντελεστή τριβής της H_C που έχει RAP, προκύπτει ότι αφού κινείται γύρω από τα ίδια επίπεδα, δεν επηρεάζεται από το RAP σε στεγνές συνθήκες και σε χαμηλές ταχύτητες (το BPT μετρά σε ταχύτητες περίπου 10km/h). Από την στεγνή κατάσταση στην υγρή, παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της τριβής στην H_C από τις H_A, H_B, αλλά επειδή στην ξηρή κατάσταση είναι περίπου ίδια η τριβή, σε αυτή τη φάση μεγαλύτερο ρόλο στην μείωση της τριβής έχουν τα μειωμένα ποσοστά κενών. Στη μετάβαση από την υγρή φάση, σε αυτή που εφαρμόζεται το μίγμα υπάρχει ανάκαμψη του συντελεστή τριβής και πτώση στην συνεχή διαβροχή, όπως και στις πλάκες χωρίς RAP με τον ίδιο κιόλας περίπου ρυθμό.

Εκεί όπου φαίνεται η επίδραση του RAP στο συντελεστή τριβής είναι όπου η μικροϋφή και μόνο αυτή επηρεάζει το συντελεστή τριβής, δηλαδή όταν οι πλάκες είναι στεγνές και στη συνεχή διαβροχή μέχρι να σταθεροποιηθεί ο συντελεστής τριβής. Έτσι παρατηρούμε ότι στην H_C χρειάζονται περισσότερες διαβρέξεις (με την ίδια ποσότητα νερού) για να μειωθεί ο συντελεστής τριβής και να πάρει μία σταθερή τιμή. Άρα δεν μειώνεται στον ίδιο βαθμό όπως στις H_A και H_B.

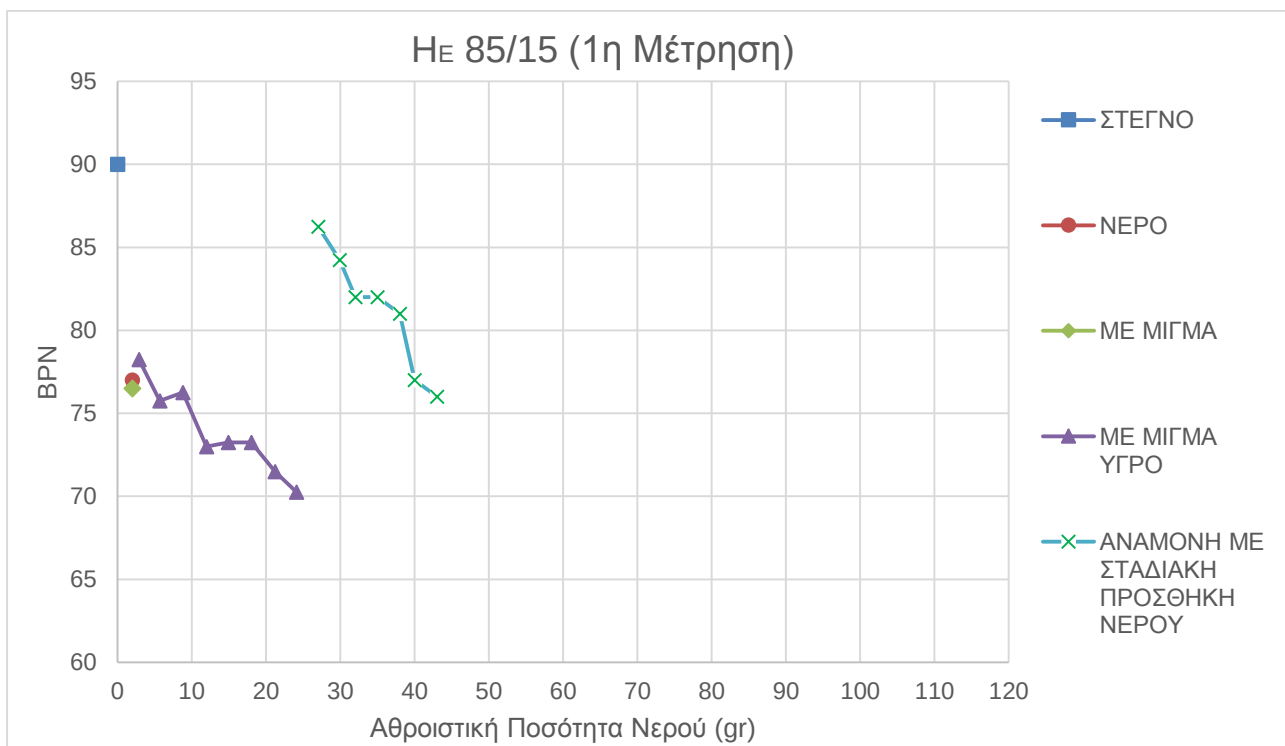


Διάγραμμα 30. 1^η Μέτρηση της πλάκας HD 70/30

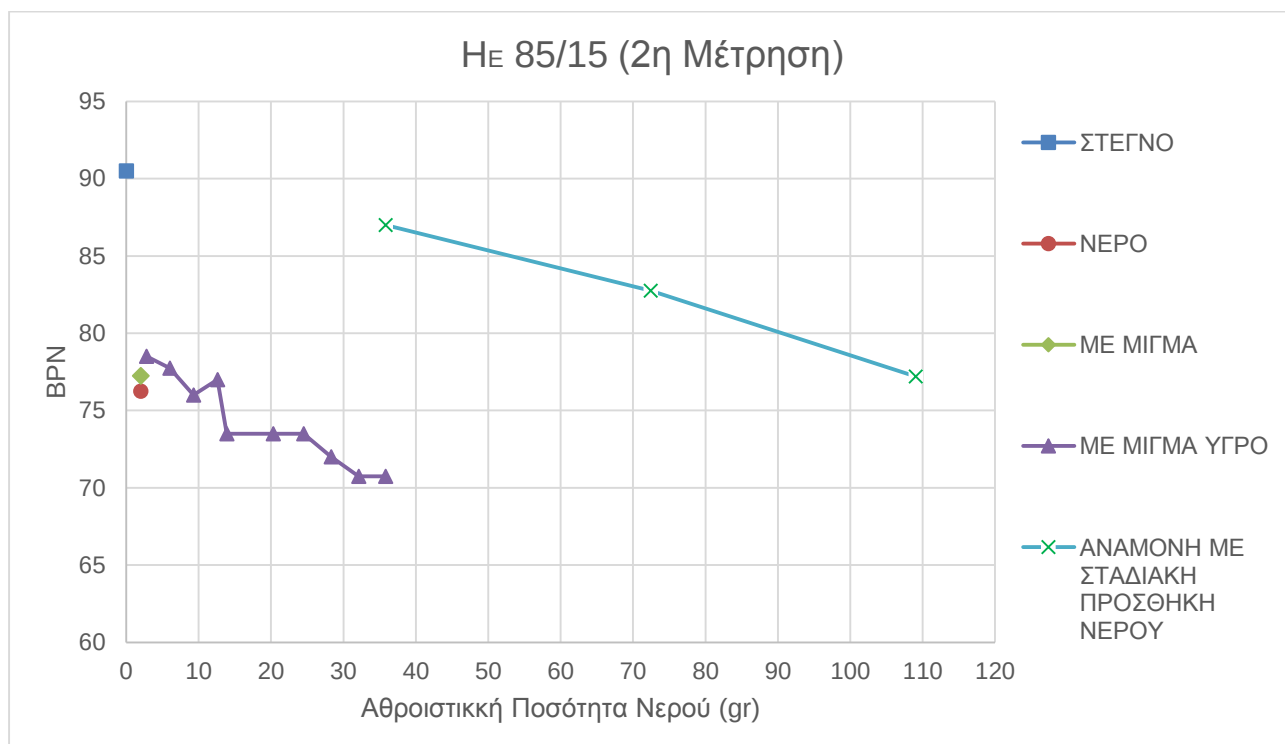


Διάγραμμα 31. 2^η Μέτρηση της πλάκας H_D 70/30

Η πλάκα H_D έχει την ίδια συμπεριφορά με την H_C με τη διαφορά ότι η μείωση του συντελεστή από την στεγνή κατάσταση στην υγρή και από την υγρή στην εφαρμογή του μίγματος είναι ακόμα πιο μικρή, κάτι το οποίο είναι λογικό, αφού τα ποσοστά κενών έχουν μειωθεί ακόμα πιο πολύ και τα σωματίδια όπως και το νερό δυσκολεύονται ακόμα περισσότερο να εισέλθουν στο ασφαλτόμιγμα.

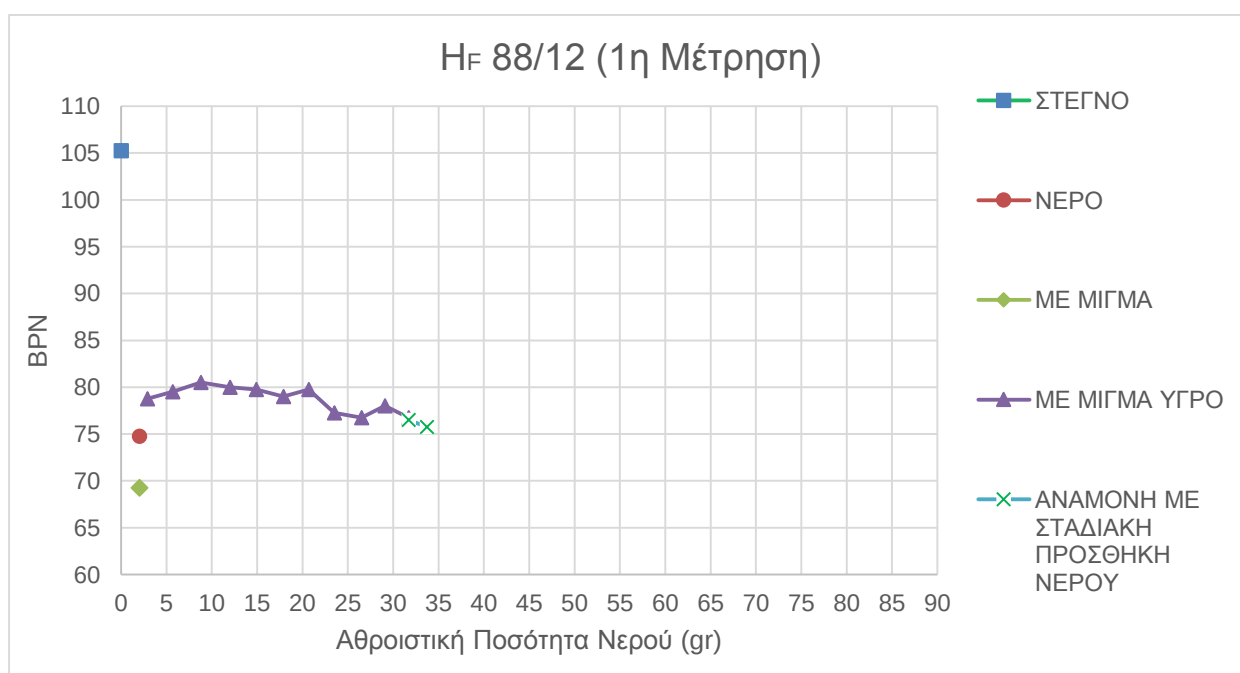


Διάγραμμα 32. 1^η Μέτρηση της πλάκας H_E 85/15

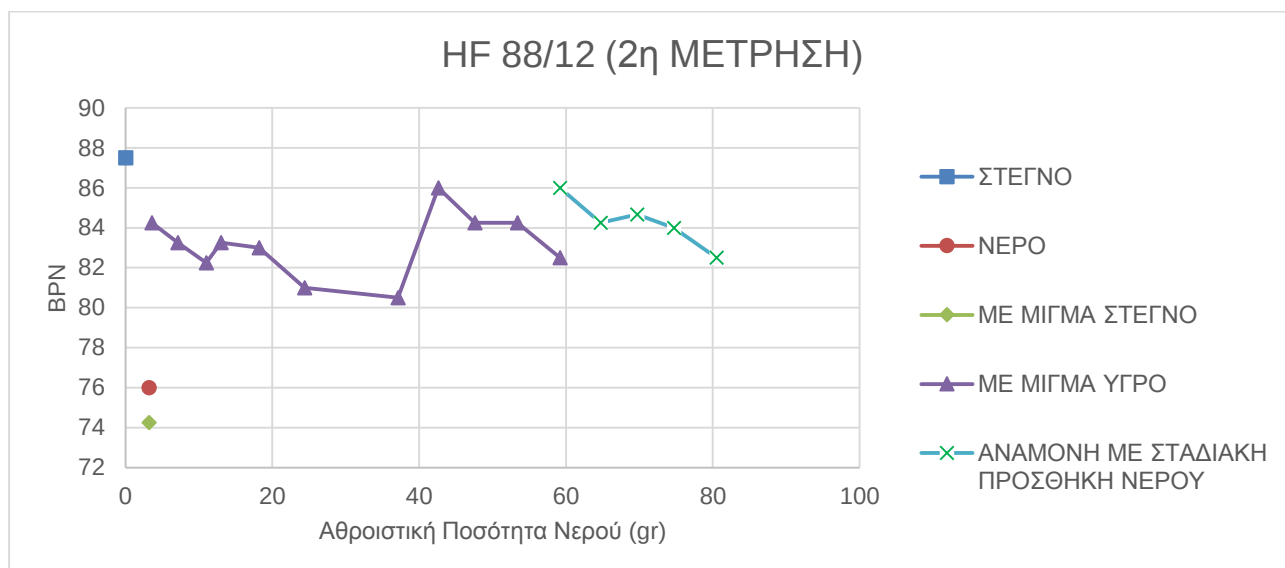


Διάγραμμα 33. 2^η Μέτρηση της πλάκας ΗΕ 85/15

Αρχικά ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος για στεγνή επιφάνεια για την ΗΕ. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των περισσότερων λεπτόκοκκων αδρανών, άρα και της μειωμένης επιφάνειας των αδρανών που επηρεάζει την μικροϋφή και στη συνέχεια τον συντελεστή τριβής. Ακόμα, η ανάκαμψη του συντελεστή τριβής είναι μεγαλύτερη από τις άλλες πλάκες στην αναμονή, αφού τα λεπτόκοκκα (που εδώ είναι περισσότερα) συνεργάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό με τους ρύπους (Βλέπε 5.4-Περιβαλλοντικοί Παράγοντες-Κατάλοιπα). Όμως η πτώση του συντελεστή τριβής είναι απότομος, αφού λόγω μικρής μακροϋφής τα σωματίδια με τη διαβροχή απομακρύνονται πιο εύκολα.



Διάγραμμα 34. 1^η Μέτρηση της πλάκας ΗΕ 88/12



Διάγραμμα 35. 2^η Μέτρηση της πλάκας HF 88/12

Η πλάκα Η_Γ έχει όμοια συμπεριφορά με την Η_Ε. Δηλαδή, ο συντελεστής τριβής είναι μικρότερος σε στεγνές συνθήκες και η ανάκαμψη της τριβής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες πλάκες λόγω των αυξημένων λεπτόκοκκων που περιέχει.

ΠΛΑΚΑ	1η ΜΕΤΡΗΣΗ					2η ΜΕΤΡΗΣΗ				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Η _Α 100/100	101	85,5	90	91,75-86,25	96,25-96,5	101	85,5	90	91,75-86,25	96,25-96,5
Η _Β 100/100	96,7	76,3	83	89-75,5	77-73,8	98,7	79,8	82,3	90,3-74,8	83-75,7
Η _Γ 70/30	119,3	82	86,3	89,3-80	-	98,8	65,5	77,5	84,3-69	75
Η _Δ 70/30	106,5	77,3	74,5	81,3-70,3	84,3-85,7	101,8	76	75,3	81-72	86,3-76
Η _Ε 85/15	90	77	76,5	78,3-70,25	86,3-84,3	90,5	76,3	77,3	78,5-70,8	87-77,2
Η _Γ 88/12	105,3	74,8	69,3	78,8-76,8	76,5-75,8	80,5	76	74,3	84,3-82,5	86-82,5

Πίνακας 15. Οι τιμές που παίρνουν τα σημεία αναφοράς

Οι οικογένειες πλακών σύμφωνα με την ισότητα των ποσοστών κενών είναι τρεις. Η πρώτη αποτελείται από τις πλάκες Η_Α 100/100 και Η_Β 100/100 με ποσοστά κενών 17,01% και 17,51% αντίστοιχα. Η δεύτερη αποτελείται από τις πλάκες Η_Δ 70/30, Η_Ε 85/15 και Η_Γ 88/12 με ποσοστό κάτω από 8% και η τρίτη έχει την πλάκα Η_Γ 70/30 με 9,91%. Η δεύτερη οικογένεια έχει τον μικρότερο συντελεστή όταν εφαρμόζεται το μίγμα για πρώτη φορά χωρίς να διαβρέχεται σταδιακά κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις άλλες δύο οικογένειες. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει τα λιγότερα κενά με αποτέλεσμα να μην εισέρχεται η παιπάλη σε αυτά και να καλύπτει την μικροϋφή των αδρανών.

Αναφορικά με την ένταση της κατάβρεξης υπάρχουν δύο ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις πλάκες Η_Γ 70/30, Η_Δ 70/30 και Η_Α 100/100 με μέσο όρο προσθήκης νερού ανά δοκιμή περίπου στα 1,5 - 2.0 gr και η δεύτερη τις Η_Β 100/100, Η_Γ 88/12 και Η_Ε 85/15 με μέσο όρο προσθήκης νερού τα 3.0 – 4.0 gr. Ισχύει ότι έχει ευπωθεί παραπάνω και δεν υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις. Παρατηρείται όμως ότι για την μικρή ένταση κατάβρεξης ο συντελεστής τριβής μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση μες τη μεγαλύτερη ένταση.

8.3 Μετρήσεις μακροϋφής

Η κηλίδα της άμμου είναι πολύ χρήσιμη για τον υπολογισμό της μακροϋφής των οδοστρωμάτων και γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε για τις κατασκευασμένες πλάκες διαφορετικής σύνθεσης. Σύμφωνα με την μέθοδο και τα

βήματα της διαδικασίας, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό κενών των πλακών τόσο η διάμετρος ήταν μεγαλύτερη.

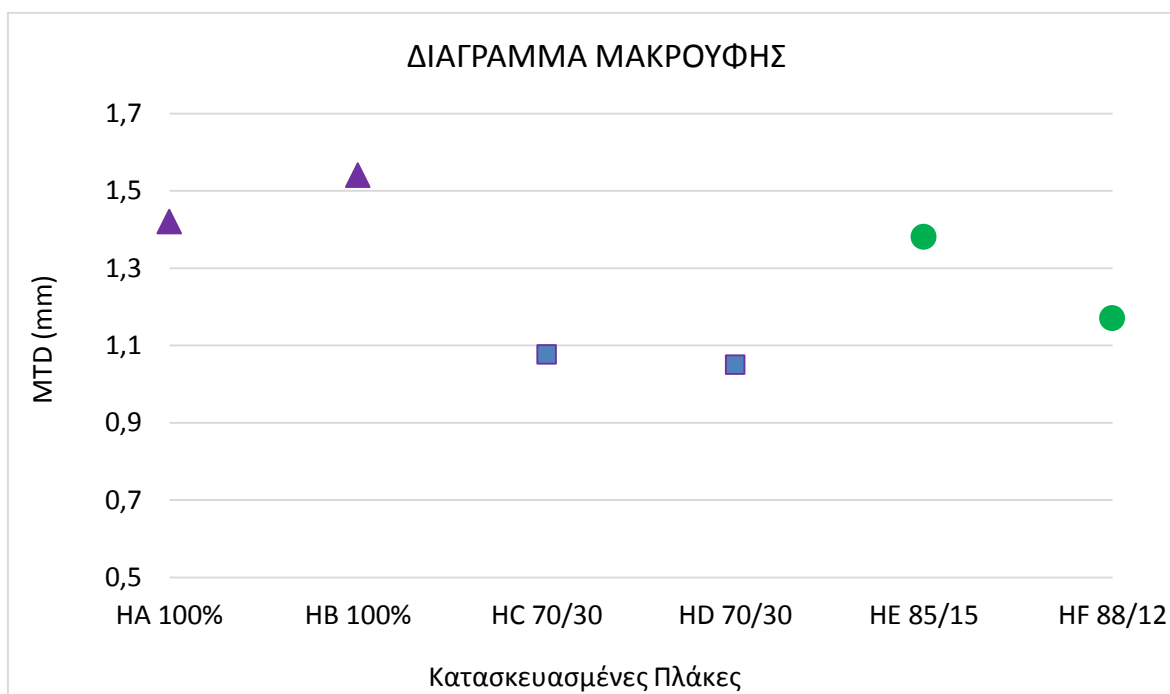
Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται η μεγαλύτερη διάμετρος της κηλίδας που σχηματίζεται στις κατασκευασμένες πλάκες.



Εικόνα 31. Η διαφορετική διάμετρος της κηλίδας για διαφορετικές πλάκες με διαφορετικά ποσοστά κενών

Όταν το ποσοστό κενών είναι μικρότερο συγκριτικά με την μικρότερη διάμετρο των πλακών που έχουν μεγαλύτερο ποσοστό κενών. Γι' αυτό τον λόγο θα γίνει προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ της επιφανειακής υφής και του ποσοστού κενών.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος για τον μέσο όρο μακροϋφής σύμφωνα με την μέθοδο της κηλίδας άμμου.



Διάγραμμα 36. Η μακροϋφή των κατασκευασμένων πλακών

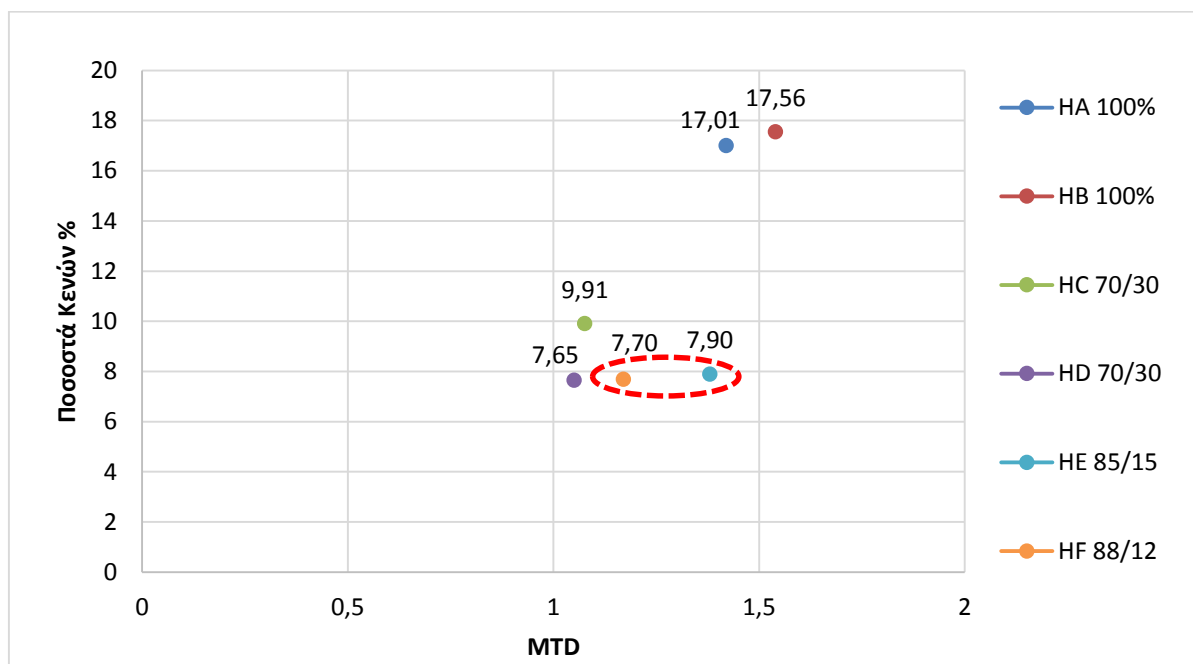
Όταν δεν υπάρχουν κενά μεταξύ των αδρανών στο ασφαλτόμιγμα, μικρό ποσοστό κενών, οι κόκκοι της άμμου δυσκολεύονται να εισχωρήσουν ανάμεσα στα αδρανή, με αποτέλεσμα η μακροϋφή να είναι μικρότερη. Το αντίθετο συμβαίνει στις πλάκες με μεγαλύτερο ποσοστό κενών, όπου οι κόκκοι εισχωρούν

στα κενά, τα αδρανή προεξέχουν με μεγαλύτερη επιφάνεια και η μακροϋφή είναι μεγαλύτερη. Ο παρακάτω πίνακας αποδεικνύει τον ισχυρισμό αυτό.

Πίνακας 16. Οι κατασκευασμένες πλάκες με τα αντίστοιχα ποσοστά κενών και μακροϋφή

ΠΛΑΚΕΣ	MTD (mm)	ΠΟΣΟΣΤΑ ΚΕΝΩΝ (%)
HA 100%	1,42	17,01
HB 100%	1,54	17,56
HC 70/30	1,08	9,91
HD 70/30	1,05	7,65
HE 85/15	1,38	7,90
HF 88/12	1,17	7,70

Ωστόσο σημειώνεται ότι στις τελευταίες πλάκες Η_ε 85/15 και Η_ε 88/12 παρατηρείται αύξηση της μακροϋφής σε αντίθεση με το ποσοστό κενών που μικραίνει συγκριτικά με τις υπόλοιπες πλάκες. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτές οι πλάκες αποτελούνται από πιο λεπτόκοκκα αδρανή (κατασκευαστικά) από ότι οι άλλες (Διάγραμμα 37).



Διάγραμμα 37. Η σχέση μακροϋφής και ποσοστών κενών

Έτσι μπορεί να έχει μειωθεί μεν το ποσοστό κενών, αλλά οι κόκκοι της άμμου αλληλοεπιδρούν και εισχωρούν ανάμεσα στα λεπτόκοκκα αδρανή με αποτέλεσμα την αύξηση της μακροϋφής.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

9.1 Συμπεράσματα

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της μεταβολής της αντιολισθητικής ικανότητας του οδοστρώματος επηρεαζόμενη από τις εποχιακές μεταβολές και από διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο ασφαλτόμιγμα των ασφαλοτάπητων κυκλοφορίας. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε ελεγχόμενο περιβάλλον εργαστηρίου. Άρα για την επίτευξη του στόχου της εργασίας ήταν απαραίτητη η εργαστηριακή ποσοτικοποίηση των παραγόντων αυτών που έγινε σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιελάμβανε την ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και η δεύτερη την επίδραση των κατάλοιπων σε μορφή σκόνης. Εκτός όμως από την εξέταση των εποχιακών παραγόντων μέρος της διπλωματικής εργασίας ήταν και η εξέταση μη συμβατικών υλικών όπως είναι το RAP και η επίδραση της χρήσης του στην παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος. Άρα υπάρχουν πρώτον τα συμπεράσματα που σχετίζονται άμεσα με τις εποχιακές διακυμάνσεις (επίδραση θερμοκρασίας και επίδραση κατάλοιπων σκόνης) και την αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων και δεύτερον τα συμπεράσματα που σχετίζονται έμμεσα με τις εποχιακές διακυμάνσεις και αφορούν στη σύνθεση των ασφαλομιγμάτων. Με άξονα λοιπόν την βιβλιογραφία που έχει αναπτυχθεί διεθνώς, γύρω από τη χρήση RAP και τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντιολισθητική ικανότητα (εστιάζοντας μόνο στις εποχιακές μεταβολές και όχι σε άλλους παράγοντες όπως η κυκλοφορία), διαμορφώθηκε το πειραματικό κομμάτι της εργασίας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ και προέκυψαν τα σχετικά αποτελέσματα κατόπιν ανάλυσης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν και έχουν **άμεση** συσχέτιση με τις εποχιακές διακυμάνσεις κάτω από **την επίδραση της θερμοκρασίας** είναι τα εξής:

Ο συντελεστής τριβής σε όρους BPN είναι μεγαλύτερος σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις υψηλές. Αφού η τριβή σε αυτή την φάση εξαρτάται μόνο από την φύση των δυνάμεων από τις οποίες προκύπτει. **Κατά την πλήρη πέδηση** λοιπόν, **στιγμιαία τήκεται το ελαστικό με το ασφαλτόμιγμα**, άρα όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τριβής

Όσον αφορά στο ποσοστό του RAP στους ασφαλοτάπητες, η επίδραση της θερμοκρασίας **στην αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι ανεξάρτητη από την περιεκτικότητα του**, αφού η θερμοκρασιακές μεταβολές **σχετίζονται με την ανάπτυξη δυνάμεων και ενέργειας και δεν συνδέονται άμεσα με τα υλικά**.

Αν γίνει όμως **αναφορά στο ποσοστό κενών** για διαφορετικές θερμοκρασίες τότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής τριβής **παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες**, ενώ, στις χαμηλές θερμοκρασίες ο συντελεστής τριβής **επηρεάζεται έντονα** από τα ποσοστά κενών.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που έχουν άμεση συσχέτιση με την εποχιακή διακύμανση και επηρεάζεται από τους **περιβαλλοντικούς παράγοντες**, δηλαδή το νερό και τα κατάλοιπα σκόνης. Έτσι σίγουρα **ο συντελεστής τριβής είναι μεγαλύτερος σε ξηρές συνθήκες, αλλά τα κατάλοιπα σκόνης που υπάρχουν για διάφορους λόγους στο οδόστρωμα σε ξηρές συνθήκες μειώνουν τον συντελεστή τριβής** καθώς μειώνουν την μικροϋφή του οδοστρώματος που είναι υπεύθυνη για την τριβή στις μικρές ταχύτητες. Σε αντίθεση με **τις υγρές συνθήκες** όπου τα **κατάλοιπα είτε αυξάνουν την τριβή, είτε τη μειώνουν**, ανάλογα με το μέγιστο μέγεθος των κόκκων και το ποσοστό λεπτόκοκκων στην σύνθεση του ασφαλομιγματος. Αυτό συμβαίνει γιατί μπορεί να **υπάρχει συνεργασία με τα λεπτόκοκκα και τους ρύπους και στο τέλος να αυξηθεί η τριβή**.

Εξαιτίας της διαφορετικής ποσότητας νερού με το οποίο έγινε η διαβροχή των πλακών γίνεται κατανοητό ότι, **ο ρυθμός μείωσης του συντελεστή τριβής εξαρτάται από το ρυθμό έντασης της βροχής καθώς και με τον ρυθμό διαφυγής των ρύπων** μέχρι και τη σταθεροποίηση του, που κατά μία έννοια συνδέεται με τον καθαρισμό της επιφάνειας από τη συνεχόμενη διαβροχή νερού. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά και κυρίως **τα**

ποσοστά κενών των πλακών επηρεάζουν περισσότερο την αντιολισθητική ικανότητα σε υγρές συνθήκες παρά το ποσοστό RAP των πλακών, αφού από το ποσοστό κενών εξαρτάται η διαφυγή του νερού.

Επιβεβαιώθηκε ότι για μεγάλο ποσοστό κενών για το HMA ότι το λεπτό φιλμ νερού (που λειτουργεί σαν λιπαντικό και καλύπτει την μικροϋφή των αδρανών) που δημιουργείται μετά από μια **βροχόπτωση μειώνει δραματικά την αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος** σε μικρές ταχύτητες, κάτι το οποίο παρουσιάστηκε στην βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα οποία **είναι έμμεσα** συνδεδεμένα με τις εποχιακές διακυμάνσεις αλλά ιδιαίτερα χρήσιμα και προέκυψαν από την διπλωματική εργασία είναι τα εξής :

Το RAP σε μικρά τουλάχιστον ποσοστά είτε δεν επηρεάζει είτε δρα θετικά στον συντελεστή τριβής. Ενώ για μικρά ποσοστά κενών είτε το νερό είτε οι ρύποι δρουν περίπου με τον ίδιο τρόπο (σαν λιπαντικό) αφού επηρεάζουν το ίδιο έντονα την μικροϋφή των αδρανών. Αν γίνει όμως αναφορά στην σύνθεση και συγκεκριμένα στα ποσοστά κενών, τότε **η σύνθεση των αδρανών και η αναλογία λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων** επηρεάζουν το ποσοστό κενών και κατ' επέκταση τον συντελεστή τριβής κατά την προσομοίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Επιπλέον, **μικρό ποσοστό κενών, η μακροϋφή είναι μικρότερη.** Το αντίθετο συμβαίνει στις πλάκες με **μεγαλύτερο ποσοστό κενών.** Ενώ για **λεπτόκοκκες συνθέσεις, παρατηρείται αύξηση της μακροϋφής.**

Ο **συντελεστή τριβής** εξαρτάται από την **συμπύκνωση** μέσω του roller compactor, καθώς παρατηρήθηκε διαφορά στις τιμές του BPN σε δυο διαφορετικά σημεία που εξετάστηκαν επί της ίδιας πλάκας (στην άκρη και στο κέντρο της πλάκας). Με τον μεγαλύτερο BPN στα σημεία που εξέχουν περισσότερο τα αδρανή (στην άκρη της πλάκας).

Συμπερασματικά, σε χαμηλές ταχύτητες και για συμβατικά υλικά, επιβεβαιώθηκαν οι αναφορές της βιβλιογραφίας όσον αφορά στις εποχιακές μεταβολές και την επίδρασή τους στον συντελεστή τριβής. Δηλαδή, ο συντελεστής δεν είναι σταθερός και διαμορφώνεται ανάλογα με τις θερμοκρασιακές και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν (ύπαρξη νερού, σκόνης). Συνδυαστικά με τα παραπάνω, για τη χρήση RAP προκύπτει ότι δεν επηρεάζει πάντα, σε χαμηλές ταχύτητες, την αντιολισθητική ικανότητα αφού σημαντικότερος παράγοντας είναι το ποσοστό κενών, παρά η αναλογία υλικών HMA-RAP στο ασφαλτόμιγμα. Έτσι με την κατάλληλη σύνθεση αξιοποιώντας κατάλληλο ποσοστό εναλλακτικών υλικών, εν προκειμένω RAP, γίνεται να κατασκευαστεί ασφαλτόμιγμα για τις επιφανειακές ασφατικές στρώσεις με ικανοποιητικές συμπεριφορά ως προς την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητα υπό την επίδραση των εποχιακών μεταβολών.

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για να πραγματοποιηθεί η διπλωματική εργασία έγινε αποκλειστική χρήση του Βρετανικού Εκκρεμούς, που συνεπάγεται ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν σε χαμηλές ταχύτητες και ο συντελεστής τριβής που μετρήθηκε επηρεαζόταν από την μικροϋφή. Για να προκύψει όμως ένα πιο συνολικό συμπέρασμα για το πως τα ανακυκλώσιμα υλικά και η εφαρμογή τους σε ασφαλτιομίγματα επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής, προτείνεται η επανάληψη του πειραματικού μέρους σε υψηλότερες ταχύτητες. Έτσι ο συντελεστής τριβής δεν θα εξαρτάται μόνο από την μικροϋφή αλλά και από την μακροϋφή και τα πειραματικά αποτελέσματα θα μπορούν να θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά για την πραγματική κυκλοφορία.

Η παρούσα διερεύνηση παρουσίασε ένα βασικό πλαίσιο μεμονωμένης ποσοτικοποίησης των εποχιακών διακυμάνσεων και της επίδρασης τους στην αντιολισθητική ικανότητα εντός εργαστηριακού περιβάλλοντος. Πιθανώς, η ποσοτικοποίηση και άλλων παραγόντων όπως για παράδειγμα της κυκλοφορίας, κατ' αρχήν εργαστηριακά, θα μπορούσε να δώσει ακόμα μία παράμετρο για την αξιολόγηση των υλικών αναφορικά με την παρεχόμενη αντιολισθητική ικανότητά τους. Ιδανικά, ο συνδυασμός όλων των παραγόντων θα μπορούσε να εμφανίσει κάποια χαρακτηριστικά για την συμπεριφορά των υλικών πριν την ενδεχόμενη χρήση τους στο πεδίο.

Τέλος προτείνεται, ότι πέρα από την κατασκευής πλακών μπορεί να γίνει προσομοίωση παραγόντων επίδρασης σε μεγαλύτερη κλίμακα, για παράδειγμα σε ένα πραγματικό πειραματικό οδόστρωμα - ικανοποιητικού μήκους κατασκευασμένο από ασφαλτόμιγμα που να περιέχει τα αντίστοιχα ποσοστά RAP. Με αυτό τον τρόπο θα αντληθούν περισσότερα στοιχεία, τόσο για την επίδραση των εποχιακών μεταβολών όσο και για τη συμπεριφορά του RAP ως υλικό αντιολισθητικής στρώσης.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahammed, MA & Tighe, SL 2009, 'Early-life, long-term, and seasonal variations in skid resistance in flexible and rigid pavements', *Transportation Research Record*, no. 2094, pp. 112-120.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Guidelines for Skid Resistant Pavement Design," Task Force for Pavement Design, AASHTO, Washington, D.C. (1976).
- Anderson, D. A., W. E. Meyer, and R. L. Rosenberger. Development of a Procedure for Correcting Skid-Resistance Measurements to a Standard End-of-Season Value. In *Transportation Research Record 1084*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1984, pp. 40–48.
- Anupam K., S. K. Srirangam, A. Scarpas, and C. Kasbergen. Influence of Temperature on Tire–Pavement Friction
- Apeagyei, A.K., Clark, T.M., Rorrer, T.M., 2013. Stiffness of high-RAP asphalt mixtures: Virginia's experience. *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (6), 747e754. [http:// dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000543](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000543)
- Austrroads Ltd. 2011. Review of Skid Resistance and Measurement Methods
- Austrroads, 2015. Maximising the Re-Use of Reclaimed Asphalt Pavement: Outcomes of Year Two: RAP Mix Design. AP-T286-15. Austrroads, Sydney, NSW
- Boxiang Yan, Huanhuan Mao, Sai Zhong, Pengfei Zhang and Xiaoshan Zhang. Experimental Study on Wet Skid Resistance of Asphalt Pavements in Icy Conditions.2019
- Bray, J. 2002. "The Role of Crash Surveillance and Program Evaluation: NYSDOT's Skid Accident Reduction Program (SKARP)," Presented at 28th International Forum on Traffic Records and Highway information Systems, Orlando, Florida.
- Bressi, S., Pittet, M., Dumont, A.G., Partl, M.N., 2016. A framework for characterizing RAP clustering in asphalt concrete mixtures. *Constr. Build. Mater.* 106, 564e574. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.132>
- Brillet, F & Gothie, M 1983, 'Variation saisonnieres de l'adherence des chaussees mesurees par l'appariel SCRIM', *Bulletin de Liaison Laboratoires Ponts et Chausees*, no.127, Sep-Oct, pp. 37-52.
- Bueche, N., Dumont, A.-G., Pittet, M., Bressi, S., 2016. Asphalt mixture with RAP: Mix design optimization. *RILEM Bookseries 11*, 607e618.
- Buhlman, F 1984, "Einfluss der wittering auf die griffigkeit von fahrbahnen", S.F.I.o. Technology, Dissertation ETH 7594.
- Burchett, J. L., and R. L. Rizenbergs. Seasonal Variations in the Skid Resistance of Pavements in Kentucky. In *Transportation Research Record 788*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1980, pp. 6–14.
- Cairney, P. 1997. "Skid Resistance and Crashes – A Review of the Literature," Research Report No. 311, ARRB Transport Research Ltd., Vermont South Victoria, Australia.

Canon Falla, G., Blasl, A., Millow, R., Lo Presti, D., 2015. Mix design considerations for asphalt wearing courses with high reclaimed asphalt content. In: International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, 6th, 2015, Thessaloniki, Greece.

Celauro, C., Bernardo, C., Gabriele, B., 2010. Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 337e347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.009>.

Cenek, PD, Alabaster, DJ & Davies, RB 1999, Seasonal and weather normalisation of skid resistance measurements, research report no 63, Transit New Zealand, Wellington, NZ.

Cenek, PD, Alabaster, DJ & Davies, RB 1999, Seasonal and weather normalisation of skid resistance measurements, research report no 63, Transit New Zealand, Wellington, NZ.

Davide Lo Presti, Ana Jimenez del Barco Carrion, Gordon Airey, Elie Hajj 'Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies' University of Nottingham 2016

Delanne, Y, Do, M. T., Gothié, M., and Delalande, G. 2006. Tyre/Road Friction Potential. ERLPC (Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées) French

Do M.T., Cerezo V., and Zahouani H., Laboratory test to evaluate the effect of contaminants on road skid resistance. *Engineering Tribology*, 268 (11), 1276 -1284, 2014.

Do M.T., Cerezo V., Beautru Y., and Kane M., Modeling of the connection road surface microtexture/water depth/friction. *Wear*, 302, 1426-1435, 2013

Doyle, J.D., Howard, I.L., 2010. Laboratory Investigation of High RAP Content Pavement Surface Layers. Final Report FHWA/MS-DOT-RD-10-212. USA.

Egodawatta P., Translation of small plot scale pollutant build-up and wash-off measurements to urban catchment scale. PhD thesis, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 2007.

Eisenberg D., The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 36, 637–647, 2004.

Elkin, B. L., K. J. Kercher, and S. Gullen. Seasonal Variation in Skid Resistance of Bituminous Surfaces in Indiana. In *Transportation Research Record 777*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1980, pp. 50–58

Flintsch G.W., E. De Leon, K.K. McGhee, and I.L. Al-Qadi. 2003. "Pavement Surface Macro-texture Measurement and Application," *Transportation Research Board (TRB)*, Washington, D.C.

Flintsch, G. W., Y. Luo, and I. L. Al-Qadi. Analysis of Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Flexible Pavement Surfaces. Presented at 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.

Flintsch, G.W., I.L. Al-Qadi, R. Davis, and K.K. McGhee, "Effect of HMA Properties on Pavement Surface Characteristics," *Proceedings of the Pavement Evaluation 2002 Conference*, Roanoke, Virginia

Gillespie, T.D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers (SAE), Warrendale, Pennsylvania (1992).

- Greenwood, J. A., and D. Tabor. The Friction of Hard Sliders on Lubricated Rubber: The Importance of Deformation Losses. *Proceedings of the Physical Society*, Vol. 71, No. 6, 1958, pp. 989–1001.
- Grosch, K. A. Rubber Friction and Traction. In *the Pneumatic Tire* (A. N. Gent and J. D. Walter, eds.), NHTSA, U.S. Department of Transportation, 2005, pp. 421–475
- Grosch, K. A. The Relation Between the Friction and Viscoelastic Properties of Rubber. *Rubber Society London A*, Vol. 274, No. 1356, 1963, pp. 21–39
- Grosch, K. A., and A. Schallamach. The Load Dependence of Laboratory Abrasion and Tire Wear. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 43, No. 4, July 1970, pp. 701–713.
- Hall J.W., K.L. Smith, L. Titus-Glover, J.C. Wambold, T.J. Yager, Z. Rado. *Guide for Pavement Friction* 2009
- Hall, J. W., L. T. Glover, K. L. Smith, L. D. Evans, J. C. Wambold, Y. J. Yager, and Z. Rado. NCHRP Web Document 108: *Guide for Pavement Friction*. Transportation Research Board of the National Academies, 2009. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w108.pdf
- Hayes, G.G., D.L. Ivey, and B.M. Gallaway, “Hydroplaning, Hydrodynamic Drag, and Vehicle Stability,” Special Technical Publication 793, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania (1983).
- Hayes, G.G., D.L. Ivey, and B.M. Gallaway, “Hydroplaning, Hydrodynamic Drag, and Vehicle Stability,” Special Technical Publication 793, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania (1983).
- Heißing, B., and M. Ersoy. *Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives*. Vieweg +Teubner, Wiesbaden, Germany, 2011
- Henry, J.J., “Evaluation of Pavement Friction Characteristics,” NCHRP Synthesis 291, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C. (2000)
- Heshmat H., Wear reduction systems for coal-fueled diesel engines – Experimental results and hydrodynamic model of powder lubrication. *Wear*, 162-164, 518-528, 1993
- HIGHWAYS DEPARTMENT. *GUIDANCE NOTES ON ROAD TESTING*. 1989
- Hill, B. J., and J. J. Henry. *Surface Materials and Properties Related to Seasonal Variations in Skid Resistance: Pavement Surface Characteristics and Materials*. Special Technical Publication 763, ASTM, Conshohocken, Pa., 1982.
- Horne, W.B. and F. Buhlmann. 1983. “A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macro-texture Characteristics of Wet Pavements,” ASTM International STP No. 793, W. E Meyers and J. D. Walter, Editors American Society for testing and materials, Philadelphia, Pennsylvania
- Hosking, JR 1976, Aggregate for skid-resistant roads, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- Imad L. Al-Qadi, Mostafa A. Elseifi, Samuel H. Carpenter. *Reclaimed Asphalt Pavement – A Literature Review* Illinois March 2007.
- Jayawickrama, P. W., and B. Thomas. Correction of Field Skid Measurements for Seasonal Variations in Texas. In *Transportation Research Record* 1639, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp. 147–154

Jayawickrama, PW & Thomas, B 1998, 'Correction of field skid measurements for seasonal variation in Texas', Transportation Research Record, no. 1639, pp. 147–54.

Kamel, N. and T. Gartshore. 1982. "Ontario's Wet Pavement Accident Reduction Program," ASTM Special Technical Publication 763, American Society of Testing and Materials, (ASTM), Philadelphia, Pennsylvania.

Kemp, G. R., and N. H. Predoehl, "A Comparison of Field and Laboratory Environments on Asphalt Durability," Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, 1981, pp. 492-537.

Kennedy, T. W., W. O. Tam, and M. Solaimanian, "Optimizing Use of Reclaimed Asphalt Pavement with the SuperPave System," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67, 1998, pp. 311-333.

Kuemmel, D.A., J.R. Jaeckel, and A. Satanovsky, Investigative Study of the Italgrip System: Noise Analysis, Report No. WI/SPR-02-00, Wisconsin Department of Transportation, Madison, Wisconsin (2000)

Kulakowski B.T. and Harwood D.W., Effect of water-film thickness on tire-pavement friction. Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031 (W.E. Meyer and J. Reichter, Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 50-60, 1990.

Kulakowski, B.T., J.C. Wambold, C.E. Antle, C. Lin, and J.M. Mason, "Development of a Methodology to Identify and Correct Slippery Pavements," FHWA-PA90-002+88-06, The Pennsylvania Transportation Institute, State College, Pennsylvania (1990).

Kummer, H. Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Engineering Research Bulletin B-94. Pennsylvania State University, State College, 1966

Kuttesch, J. S. 2004. "Quantifying the Relationship Between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data," M.S.Thesis, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia

Larson, R.M. 1999. "Consideration of Tire/Pavement Friction/Texture Effects on Pavement Structural Design and Materials Mix Design," Federal Highway Administration (FHWA), Office of Pavement Technology, Washington, D.C.

Li K.W., Meng F., Zhang W. , Friction between footwear and floor covered with solid particles under dry and wet conditions. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), 20 (1), 43 –53, 2014.

Lo Presti, D., Khan, R., Abdul Hassan, N., Airey, G., Collop, A., 2014. Laboratory mix design of asphalt mixture containing reclaimed material. Adv. Mater. Sci. Eng. 2014 <http://dx.doi.org/10.1155/2014/507082art.no.507082>.

Luo, Y. Effect of Pavement Temperature on Frictional Properties of Hot-Mix-Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road. Master's thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.

Maupin, G.W., Diefenderfer, S.D., Gillespie, J.S., 2008. Evaluation of Using Higher Percentages of Recycled Asphalt Pavement in Asphalt Mixes in Virginia. Virginia Transportation Research Council, USA, p. 29

McDaniel, R.S., Shah, A., Huber, G.A., Copeland, A., 2012. Effects of reclaimed asphalt pavement content and virgin binder grade on properties of plant produced mixtures. Road Mater. Pavement Des. 13 (Suppl. 1), 161e182. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.657066>

- McLean, J. 1995. "The Relationship Between Pavement Condition and Road Safety," Paper presented at the Load-Pavement Interaction Workshop, Newcastle.
- McMillan, C., and D. Palsat, "Alberta's Experience in Asphalt Recycling," Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 30, 1985, pp. 148-167
- Meyer, W.E. 1982. Synthesis of Frictional Requirements Research, Report No. FHWA/RD-81/159, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, D.C.
- Miller, M.M. and H.D. Johnson. 1973. "Effects of Resistance to Skidding on Accidents: Surface Dressing on an Elevated Section of the M4 Motorway," Report No. LR 542, Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, United Kingdom.
- Mills R., Dwyer-Joyce R.S., Loo-Morrey M. , The mechanisms of pedestrian slip on flooring contaminated with solid particles. *Tribology International*, 42, 403-412, 2009.
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J.S., Bonaquist, R., Austerman, A., Booshehrian, A., 2012. Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Mater. Pavement Des.* 13 (Suppl. 1), 183e208. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>
- Msallam Majed, Asi Ibrahim and Abudayyeh Dana. Safety Evaluation (Skid Resistance) of Jordan's National Highway Network. 2017
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Traffic Safety Facts 2003 – A Compilation of Motor Vehicle Crash Data from the Fatality Analysis Reporting System and the General Estimates System, NHTSA website (<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov>.) (2004)
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). 1998. "Report to Congress: Update on the Status of Splash and Spray Suppression Technology for Large Trucks," NHTSA, Washington, D.C.
- Noyce, D. A., H. U. Bahia, J. M. Yambó and G. Kim, "Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements," Draft Literature Review and State Surveys, Midwest Regional University Transportation Center (MRUTC), Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory, Madison, Wisconsin (2005).
- Noyce, D., Bahia, H., Yambó, J., and Kim, G. (2005). "Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements". Draft Literature Review and State Surveys, Midwest Regional University, Transportation Center Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory
- Oliver, J. W. H. Seasonal Variation of Skid Resistance in Australia. Special Report 37, Australia Road Research Board, Vermont South, Victoria, 1989
- Oliver, JWH, Tredrea, PF & Pratt, DN 1988, Seasonal variation of skid resistance in Australia, special report no. 37, Australian Road Research Board, Vermont South, Vic.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 1984. "Road Surface Characteristics – Their Interaction and their Optimisation," OECD Scientific Expert Group, Road Transport Research, Paris, France
- Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), "Report of the Committee on Surface Characteristics," Proceedings of the 18th World Road Congress, Brussels, Belgium (1987)

Permanent International Association of Road Congresses (PIARC). 1995. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, Report No. AIPCR-01.040.T, PIARC, Brussels, Belgium.

Persson B. N. J. , Tartaglino U. , Albohr O., and Tosatti E., Rubber friction on wet and dry road surfaces: the sealing effect. *Physical Review*, B71, DOI: 10.1103/PhysRevB.71.035428, 2005

Prowell, BD, Xie, H, Cooley, AL, Powell, RB & Hanson, D 2003, 'Relationships between pavement friction and material properties at NCAT test track', Transportation Research Board annual meeting, 82nd, 2003, Washington, DC, TRB, Washington, DC, USA.

Re-Road.fehrl.org, 2013. Re-Road End of Life Strategies for Reclaimed Asphalt. FP7 project. European Commission (last accessed 24.02.16.)

Rice, JM 1977, 'Seasonal variations in pavement skid resistance', *Public Roads*, vol. 40, no. 4, pp. 160-6.

Rowe, G.M., Barry, J., Crawford, K., 2015. Evaluation of a 100% Rap Recycling Project in Fort Wayne, Indiana. In: Canestrani, F., Partl, M.N. (Eds.), 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Springer, pp. 941e951

Runkle, S. N., and D. C. Mahone. Variation in Skid Resistance over Time. Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville, 1980, pp. 10–13.

Sabouri, M., Bennert, T., Daniel, J.S., Kim, Y.R., 2015a. A comprehensive evaluation of the fatigue behavior of plant-produced RAP mixtures. *Int. J. Road Mater. Pavement Des.* 16 (Suppl. 2), 29e54. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2015.1076997>.

Saito, K., T. Horiguchi, A. Kasahara, H. Abe, and J.J. Henry. 1996. "Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and its Speed Dependency on Pavement Surfaces," Transportation Research Record No. 1536, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Sakai, H., and K. Araki. Thermal Engineering Analysis of Rubber Vulcanization and Tread Temperatures During Severe Sliding of a Tire. Presented at 7th Annual Conference of the Tire Society, Akron, Ohio, 1998

Salt, GF 1976, 'Research on skid resistance at the Transport and Road Research Laboratory (1927-1977)', Transportation Research Record, no. 622, pp. 26-38.

Sandburg, U. and J.A. Ejsmont, Tyre/Road Noise Reference Book, ISBN 91-631-2610-9, Informex, Kisa, Sweden (2002)

Saplıoğlu, M., Erişkin, E., Yüzer, E., and Aktaş, B. (2012). "Investigation of skid resistance effects on traffic safety at urban intersections". 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey

Sartor J.D., Boyd G.B., Agardy F.J., Water pollution aspects of street surface contaminants. *Water Pollution Control Federation*, 46(3), 458-467, 1974.

Schulze, K.H., A. Gerbaldi, and J. Chavet. 1976. "Skidding Accidents, Friction Numbers, and the Legal Aspects Involved," In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 623, TRB, Washington, D.C.

Shakely R.B., Henry J.J., Heinsohn R.J., Effects of pavement contaminants on skid resistance. *Transportation Research Record*, 788, 23-28, 1980.

Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G., 2012. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resour. Conserv. Recycl.* 60, 38e48.<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>

Smiljanic, M., J. Stefanovic, H.-J. Neumann, I. Rahimaian, and J. Jovanovic, "Aging of Asphalt on Paved Roads — Characterization of Asphalt Extracted from the Wearing Courses of the Belgrade-Nis Highway," *Journal of Erdol and Kohl*, Vol. 46, No. 6, Hamburg, Germany, 1993

STANDARD TEST PROCEDURE FOR MEASUREMENT OF TEXTURE BY THE SAND CIRCLE METHOD. 1981

Stimilli, A., Virgili, A., Giuliani, F., Canestrari, F., 2016. In plant production of hot recycled mixtures with high reclaimed asphalt pavement content: a performance evaluation. *RILEM Bookseries* 11, 927e939

Subhi, M. B., and R. Farhad. Changes in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 131, 2005, pp. 470–476

Tex-436-A, Measuring Texture Depth by the Sand Patch Method.1991-2008.

Tran, N.H., Taylor, A., Willis, R., 2012. Effect of Rejuvenator on Performance Properties of HMA Mixtures with High RAP and RAS Contents. NCAT Report 12-05. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, Alabama.USA, p. 75

Tung, J. S. N., J. J. Henry, and S. H. Dahir. Statistical Analysis of Seasonal Variations in Pavement Skid Resistance.PTI 7704. Pennsylvania Transportation Institute, Pennsylvania State University, University Park, 1977.

Veith, A. G. 1983. "Tires-Roads-Rainfall-Vehicles: The Traction Connection." In *Frictional Interaction of Tire and Pavement*, ASTM STP 793, edited by Meyer, W. E., and Reichter, J. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.

Wallman, C.G. and H. Astrom, "Friction Measurement Methods and the Correlation Between Road Friction and Traffic Safety," Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI Meddelande 911A, Linkoping, Sweden (2001)

West, R., Willis, J.R., Marasteanu, M., 2013. NCHRP Report 752. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. NCAT at Auburn University, USA. eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/other-publications.html (accessed 24.02.16.).

West, R., Willis, J.R., Marasteanu, M., 2013. NCHRP Report 752. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. NCAT at Auburn University, USA. eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/other-publications.html (accessed 24.02.16.).

Wilson, DJ 2006, 'An analysis of the seasonal and short-term variation of road pavement skid resistance', PhD thesis, The University of Auckland, NZ.

Xiao, J., Kulakowski B.T., and El-Gindy M. 2000. "Prediction of Risk of Wet-Pavement Accidents: Fuzzy Logic Model," *Transportation Research Record* 1717, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Yi Peng , Joshua Qiang Li , You Zhan,Kelvin C. P. Wang and Guangwei Yang. Finite Element Method-Based Skid Resistance Simulation Using In-Situ 3D Pavement Surface Texture and Friction Data.2019

Yoder & Witczak, 1975. *Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων*. Δεύτερη Έκδοση: Μόσχος Γκιούρδας.

Yosra Hichri, Véronique Cerezo, Minh Tan Do. Effect of dry deposited particles on the tire/road friction. Wear, Elsevier, 2017, pp.1437-1449. <10.1016/j.wear.2017.01.037>. <hal-01627856>.2017

Zaumanis, M., Mallick, R.B., 2015. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. Int. J. Pavement Eng. 16 (February), 39e55. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., 2014. 100% Recycled hot mix asphalt: a review and analysis. Resour. Conserv. Recycl. 92, 230e245 <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

Zhou, F., Sheng, H., Das, G., Scullion, T., 2011. High Rap Mixes Design Methodology with Balanced Performance. University of North Texas Libraries, The Portal to Texas History. Report. <http://texashistory.unt.edu/ark:/67531/metaph326755/>(accessed 24.02.16.). <http://texashistory.unt.edu>. crediting UNT Libraries Government Documents Department, Denton, Texas.

Λοΐζος, Α, Πλατή Χ.2018. Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων. Αθήνα :εκδόσεις ΕΜΠ

Λοΐζος, Α. 2011. Οδοστρώματα. Σημειώσεις Μαθήματος. Αθήνα: εκδόσεις ΕΜΠ.

- ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-Reclaimed-asphalt-pavement-RAP-Chiu-2008_fig1_321749343

https://www.google.com/search?q=reclaimed+asphalt+pavement+plant&tbm=isch&ved=2ahUKEwjut_rxzd3nAhVdO1AKHcP8AwAQ2-cCegQIABAA&oq=reclaimed+asphalt+pavement+plant&gs_l=img.3..35i39.76911.78246..78389...0.0..0.212.937.0j2j3.....0....1..gws-wiz-img.....0i19j0i30i19.vU_5HCUhwLk&ei=9ShNXq7pKN32wALD-Q8&bih=632&biw=1366&client=firefox-b-d#imgrc=Xi1f8E695zapVM