



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

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



Εκπόνηση διπλωματικής εργασίας:  
**ΚΟΣΜΕΤΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ**

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2014



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν οι διάφορες κατηγορίες υφής των ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε λεπτομερής ανάλυση του ρόλου και του τρόπου επιρροής των κύριων κατηγοριών υφής, τόσο σε θέματα ασφάλειας όσο και σε θέματα εξυπηρετικότητας του χρήστη της οδού. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται η μέθοδος της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, ως τρόπος απεικόνισης και αξιολόγησης κυματισμών που σχετίζονται με την επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Κατόπιν, μέσω της αξιοποίησης στοιχείων υφής, προερχόμενα από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τις διαδικασίες αξιολόγησης της υφής, καθώς και του τρόπου μεταβολής της στο χρόνο. Γενικό συμπέρασμα είναι ότι κατασκευάζοντας ένα οδόστρωμα με καλή-αποδεκτή υφή, εξασφαλίζεται σε μεγάλο ποσοστό η απαίτηση για καλή ποιότητα της επιφάνειας κύλισης, ενώ βελτιστοποιούνται οι ενέργειες στα πλαίσια ενός συστήματος παρακολούθησης οδοστρωμάτων.

## **ABSTRACT**

In the present thesis, the various types of asphalt pavement texture were analysed and assessed. Based on the literature review, a detailed analysis of the role and way of influence of the main texture categories was made, both in terms of security and in terms of convenience of road user. In addition, the way of usage of power spectral density analysis was investigated as a way of illustrating and evaluating the waves, associated with the pavement surface. Then, by utilizing texture data derived from the data base of NTUA Pavement Engineering Laboratory, arose useful conclusions on evaluation procedures of texture, and how to change in time. General conclusion is that by constructing a pavement with good-acceptable texture, the demand for good quality of the rolling surface is largely ensured, while the actions within a pavement monitoring system are being optimized.

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	3
1.1 Γενική ανασκόπηση .....	3
1.2 Στόχος και μεθοδολογία .....	4
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας .....	4
<b>2. ΥΦΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ</b> .....	6
2.1 Γενικά .....	6
2.2 Κύριες κατηγορίες υφής .....	9
2.2.1 Μικροϋφή.....	9
2.2.2 Μακροϋφή.....	10
2.2.3 Μεγαϋφή.....	11
2.3 Υφή και πέδηση .....	12
2.4 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης .....	15
2.5 Υφή και θόρυβος.....	19
2.6 Υφή και κατανάλωση καυσίμων-αντίσταση κύλισης .....	23
2.7 Μετρήσεις υφής .....	26
2.7.1 Γενικά.....	26
2.7.2 Μέθοδος κηλίδας άμμου (Sand Patch Method) .....	26
2.7.3 Μέθοδος προφίλομέτρησης.....	27
2.7.4 Μέθοδος ASTM E2157 (Circular Texture Meter).....	29
2.8 Προδιαγραφές υφής.....	30
<b>3. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b> .....	32
3.1 Γενικά .....	32
3.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier.....	33
3.3 Δυναμική φασματική ανάλυση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων .....	34

<b>4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b> .....	41
4.1 Στοιχεία ανάλυσης.....	41
4.2 Περιγραφή δεδομένων υφής.....	41
4.3 Επεξεργασία δεδομένων συλλογής.....	43
4.3.1 Επεξεργασία δεδομένων μακροϋφής.....	43
4.3.2 Επεξεργασία δεδομένων μεγαϋφής.....	46
4.4 Ανάλυση στοιχείων υφής.....	48
4.4.1 Ανάλυση και σύγκριση στοιχείων μακροϋφής.....	49
4.4.2 Διερεύνηση της εξέλιξης της μακροϋφής.....	56
4.4.3 Ανάλυση και σύγκριση στοιχείων μεγαϋφής.....	57
4.4.4 Διερεύνηση της εξέλιξης της μεγαϋφής.....	59
4.4.5 Συσχετισμός στοιχείων μακροϋφής και μεγαϋφής.....	61
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	63
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	65

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενική ανασκόπηση

Ένα πολύ σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι ενός συστήματος παρακολούθησης οδοστρωμάτων (ΣΠΟ) είναι η αξιολόγηση της λειτουργικής του κατάστασης. Η κατάσταση ενός οδοστρώματος αφορά άμεσα τους χρήστες του, καθώς συνδέεται με την ασφάλεια της κυκλοφορίας, την ποιότητα κύλισης, το λειτουργικό κόστος του οχήματος, τη ταχύτητα των οχημάτων, τους χρόνους μετακίνησης και γενικά με το κόστος που επιβαρύνει τους χρήστες. Συνεπώς, η διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου εξυπηρετικότητας και ασφάλειας αποτελεί ένα μείζον θέμα (Λοΐζος, 2012).

Πρακτικά όμως, η διατήρηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος σε κατάσταση παρόμοια με αυτήν που είχε κατά το χρόνο της κατασκευής του είναι αδύνατη. Αυτό συμβαίνει διότι με το πέρασμα του χρόνου, παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η κυκλοφορία και η γήρανση των υλικών φθείρουν το οδόστρωμα, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τόσο τη φέρουσα ικανότητά του, όσο και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του που απολαμβάνουν οι χρήστες του. Για να διατηρηθεί επομένως η εξυπηρετικότητα και η ασφάλεια ενός οδοστρώματος σε υψηλά επίπεδα, πρέπει να διενεργούνται περιοδικές επιθεωρήσεις και μετρήσεις των χαρακτηριστικών του, με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργικής και δομικής κατάστασής του, έτσι ώστε να εφαρμόζονται εγκαίρως όπου και αν απαιτούνται κατάλληλες διορθωτικές εργασίες.

Η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό επιφανειακών ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, που επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης των οχημάτων και αφορούν άμεσα τους χρήστες της οδού, όπως είναι η αντιολισθητική ικανότητα, η υφή, η ομαλότητα και οι φθορές της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται είτε μέσω μετρήσεων και καταγραφών επιφανειακών χαρακτηριστικών με ειδικά συστήματα είτε με οπτική επισκόπηση των επιφανειακών φθορών.

Η υφή της οδοστρωματικής επιφάνειας αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζει την κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος και έχει άμεση σχέση με την οδική ασφάλεια, καθώς επιδρά σε θέματα

πέδησης και τριβής, με την άνεση στην οδήγηση (θόρυβος, επιπεδότητα) και την κατανάλωση καυσίμων. Συνεπώς ο έγκαιρος και επαρκής προσδιορισμός της μέσω διαφόρων μεθόδων μετρήσεων, καθώς και η εφαρμογή διαφόρων τρόπων αναλύσεων για τη διερεύνησή της και την διεξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων, καθίσταται αναγκαίος, προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη και ορθή πολιτική αξιολόγησης λειτουργικής κατάστασης ενός οδοστρώματος.

## **1.2 Στόχος και μεθοδολογία**

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ανάλυση της υφής της επιφάνειας των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της αξιολόγησης της λειτουργικής τους κατάστασης. Έμφαση δίνεται στη μακροϋφή και τη μεγαϋφή, καθώς αυτές επηρεάζουν τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με θέματα ασφαλείας και εξυπηρετικότητας του χρήστη, αλλά και επίδρασης στο περιβάλλον. Η διερεύνηση περιλαμβάνει την ανάλυση στοιχείων υφής συγκριτικά μεταξύ τους, αλλά και στο χρόνο.

Η ανωτέρω διαδικασία διερεύνησης, ανάλυσης και αξιολόγησης της υφής εντάσσεται στις ανάγκες διαχείρισης και συντήρησης των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της επιτελεστικότητάς τους.

## **1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας**

Μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που αποτελούν την παρούσα εργασία, με θέμα την ανάλυση και αξιολόγηση της υφής ασφαλικών οδοστρωμάτων αναφέρεται ακολούθως.

Το παρόν κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και θέτει τους στόχους της εργασίας περιγράφοντας παράλληλα τη διάρθρωσή της.

Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην υφή της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Αναλύει ποιες είναι οι κατηγορίες υφής και ποια φαινόμενα και παράμετροι που σχετίζονται με την ασφάλεια και την εξυπηρετικότητα του χρήστη επηρεάζουν, ποιοι είναι οι μέθοδοι μετρήσεων των κατηγοριών αυτών και ποιες είναι οι προδιαγραφές οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούνται.

Το κεφάλαιο 3, δείχνει πως η κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας των οδοστρωμάτων περιγράφεται μέσω της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης. Περιγράφει τι είναι η δυναμική φασματική ανάλυση και πως δημιουργείται, πάνω σε ποια μαθηματικά πρότυπα βασίζεται, ποιοι είναι οι λόγοι που χρησιμοποιούμε διαδικασίες φιλτραρίσματος και ποιες είναι αυτές και τέλος, ποια στοιχεία και δείκτες υφής μπορούμε να αντλήσουμε και να αξιοποιήσουμε από την εφαρμογή της.

Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται η αναλυτική διαδικασία που έγινε, κατά την οποία αξιοποιήθηκαν στοιχεία υφής τα οποία προήλθαν από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, παρουσιάζονται οι διαδικασίες επεξεργασίας των εν λόγω στοιχείων, είτε μέσω στατιστικών μεθόδων, είτε μέσω εφαρμογής της μεθόδου δυναμικής φασματικής ανάλυσης, καθώς και οι διαδικασίες ανάλυσης των επεξεργασμένων πλέον στοιχείων.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη και σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



## 2. ΥΦΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

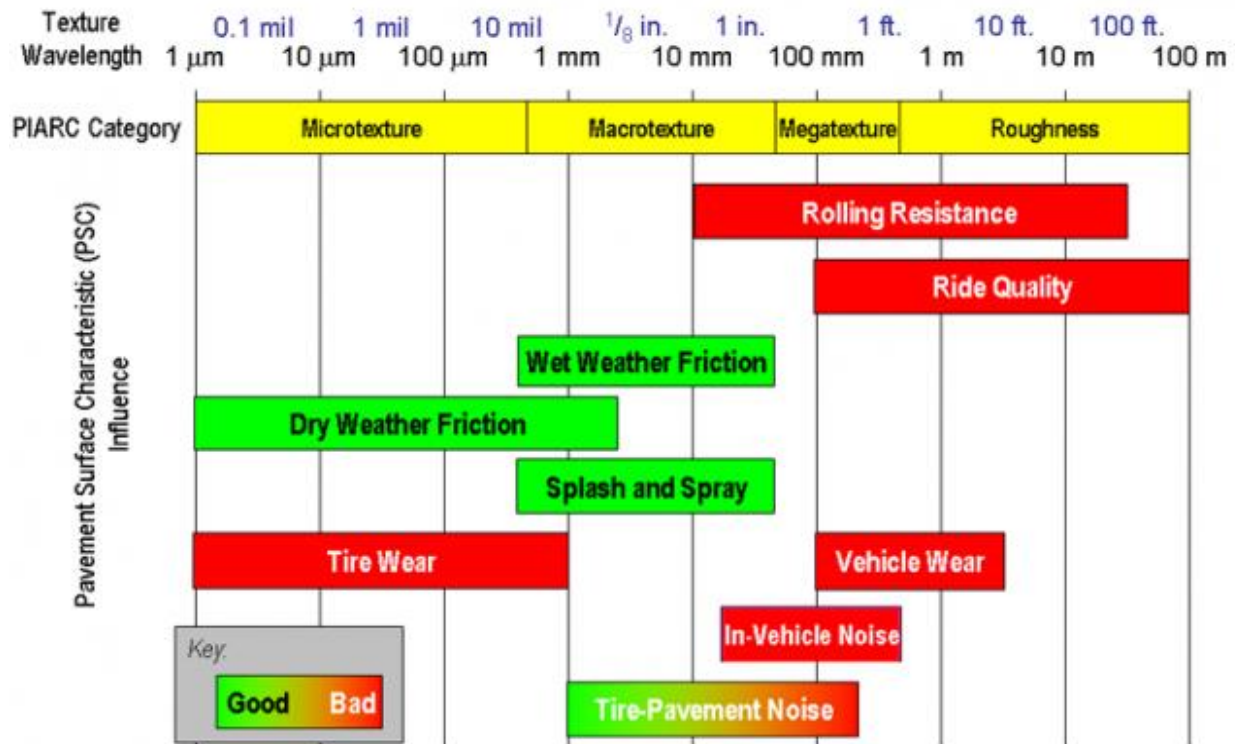
### 2.1 Γενικά

Η υφή ενός οδοστρώματος συνδέεται κυρίως με την ασφάλεια των χρηστών της οδού. Η υφή είναι χαρακτηριστικό της επιφάνειας του οδοστρώματος που σχετίζεται άμεσα με την αντιολισθητική ικανότητά του (Ευαγγελίδης, 2004). Συγκεκριμένα, η υφή επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά των ελαστικών των οχημάτων σε βρεγμένο οδόστρωμα και έμμεσα την αντίσταση σε ολίσθηση. Η υφή επίσης σχετίζεται με το θόρυβο που προέρχεται από την κυκλοφορία των οχημάτων πάνω στο οδόστρωμα και με την αντίσταση κύλισης.

Η υφή, σχετίζεται με τους κυματισμούς που εμφανίζονται στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων. Η παγκόσμια ένωση οδικών μεταφορών (World Road Association - PIARC) έχει καθορίσει τις κατηγορίες υφής, οι οποίες ταξινομούνται ανάλογα με το μήκος κυματισμών. Άλλωστε ένα οδόστρωμα αποτελείται από ένα συνδυασμό διαφόρων μηκών κυματισμών διαφορετικού μεγέθους. Με βάση λοιπόν αυτή την κατάταξη έχουμε τις εξής κατηγορίες υφής (Εικόνα 2.1):

- ✓ Μικροϋφή (microtexture) με μήκη κυματισμών μέχρι 0,5 mm.
- ✓ Μακροϋφή (macrotexture) με μήκη κυματισμών από 0,5 mm μέχρι 50 mm.
- ✓ Μεγαϋφή (megatexture) με μήκη κυματισμών από 50 mm μέχρι 500 mm.

Επίσης, σύμφωνα με την Εικόνα 2.1, οι κυματισμοί μήκους από 500 mm μέχρι 50 m ορίζουν την επιπεδότητα/ομαλότητα (roughness).

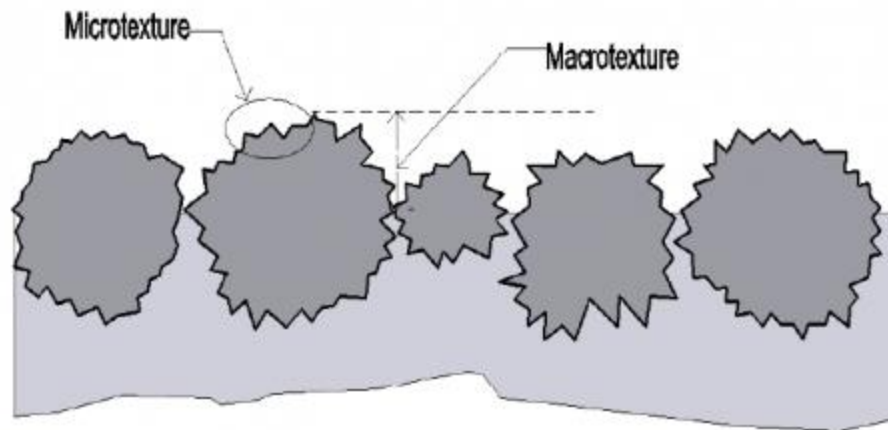


Source: PIARC

Εικόνα 2.1: Κατάταξη κατηγοριών υφής οδοστρώματος (PIARC, 2003)

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 2.1, διαφορετικά μεγέθη της υφής επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος με διαφορετικούς τρόπους. Μικρού μήκους κυματισμοί υφής επιδρούν κυρίως στην τριβή, ενώ μεγάλου μήκους κυματισμοί υφής επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης. Ο θόρυβος και η αντίσταση κύλισης ελέγχονται κυρίως από την μακροϋφή και τη μεγαϋφή (Rasmussen, 2013).

Ανάλογα με τη (συν)ύπαρξη ή μη της μικροϋφής και της μακροϋφής (Εικόνα 2.2), η επιφάνεια ενός οδοστρώματος χαρακτηρίζεται με τον τρόπο που ορίζει η Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.2: Γραφική αναπαράσταση της μικροϋφής και μακροϋφής (Hall, 2007)

Επιφάνεια		Υφή επιφάνειας	
		Μακρο	Μικρο
A		Τραχεία	Αδρή
B		Τραχεία	Λεία
C		Ομαλή	Αδρή
D		Ομαλή	Λεία

Εικόνα 2.3: Όροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της υφής της επιφάνειας των οδοστρωμάτων (Λοΐζος, 2012)

Σύμφωνα με την Εικόνα 2.3, προκύπτουν τα ακόλουθα (PIARC, 2003):

- Στην περίπτωση όπου η επιφάνεια ενός οδοστρώματος είναι τραχεία και αδρή έγκειται συνύπαρξη μικρο και μακροϋφής.
- Στην περίπτωση όπου η επιφάνεια είναι τραχεία και λεία έγκειται ύπαρξη μόνο μακροϋφής.
- Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι ομαλή και αδρή έγκειται ύπαρξη μόνο μικροϋφής.
- Τέλος, στην περίπτωση όπου η επιφάνεια είναι ομαλή και λεία απουσιάζουν τόσο η μικροϋφή όσο και η μακροϋφή.

## 2.2 Κύριες κατηγορίες υφής

Οι βασικότερες κατηγορίες υφής, η μικροϋφή, η μακροϋφή και η μεγαϋφή, αναπτύσσονται ακολούθως:

### 2.2.1 Μικροϋφή

Η μικροϋφή είναι η παράμετρος που προσδιορίζεται από την αδρότητα της επιφάνειας των αδρανών υλικών του ασφαλτοτάπητα, από την οποία εξαρτάται η επαφή ελαστικού-αδρανούς. Η μικροϋφή εξαρτάται από την προέλευση και την πετρογραφική σύσταση των αδρανών. Καθοριστικό ρόλο στον ποιοτικό προσδιορισμό της μικροϋφής παίζει η αντίσταση στη λείανση υπό τη δράση των φορτίων της κυκλοφορίας, η διατήρηση, δηλαδή, της μικροϋφής για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η μικροϋφή εκφράζει τη συμπεριφορά των αδρανών έναντι των ελαστικών των οχημάτων και εξαρτάται από τους δείκτες αντίστασης σε στίλβωση και απότριψη των αδρανών, όπως αναφέρονται παρακάτω (Sachpazis, 1988):

- ✓ Ο όρος στίλβωση χρησιμοποιείται συνήθως, για να περιγράψει τη γενική λείανση μιας επιφάνειας, συμπεριλαμβανομένης και της αποστρογγυλοποίησης η οποία παίρνει μέρος κατά τη διεργασία της απότριψης. Η διεργασία της στίλβωσης τείνει να καταστρέψει την μικροϋφή της επιφάνειας των αδρανών υλικών, ενώ δεν επηρεάζει καθόλου τη μακροϋφή

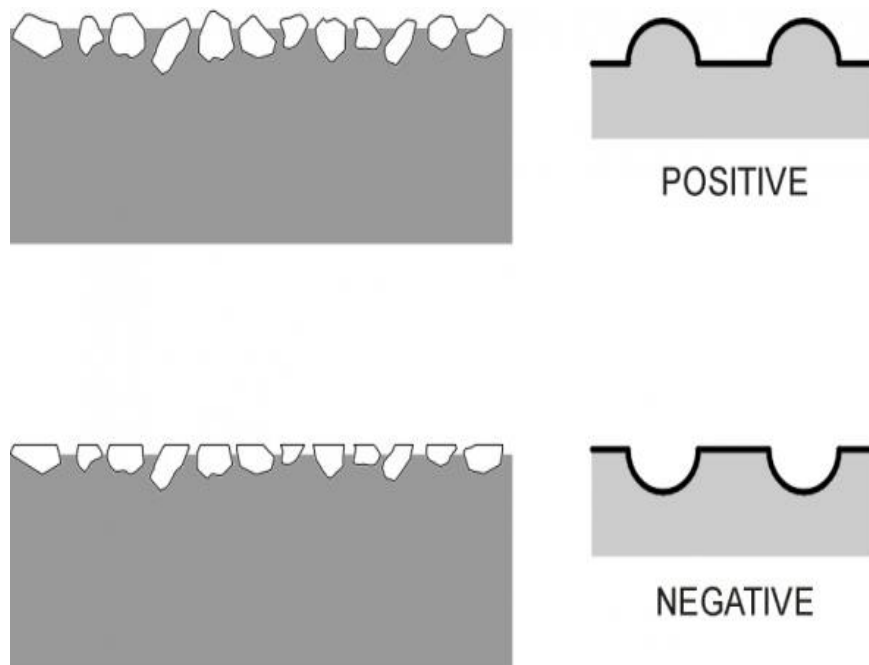
τους. Ο δείκτης που τη χαρακτηρίζει είναι ο δείκτης αντίστασης σε στίλβωση (PSV-Polished Stone Value).

- ✓ Η διεργασία της απότριψης προκαλείται λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως είναι η δράση των τροχών και επιφέρει απόσπαση και απομάκρυνση υλικού από το προεξέχον τμήμα των τεμαχίων του αδρανούς υλικού. Το πρόβλημα εδώ εντείνεται και από την παρουσία κάποιου λειαντικού μέσου (άμμος, ιλύς, σκόνη, κλπ.) το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος λόγω της απότριψης ή φέρεται σε αυτήν από έξω. Το αποτέλεσμα της απότριψης είναι να εξομαλύνονται και να ισοπεδώνονται οι επιφάνειες των αδρανών, μειώνοντας έτσι τις ανωμαλίες και τη μακροϋφή τους. Βέβαια, η απομάκρυνση των θραυσμάτων ανανεώνει τη μικροϋφή των αδρανών, αφού φέρει στην επιφάνεια νέους υγιείς κόκκους. Ο δείκτης που τη χαρακτηρίζει είναι ο δείκτης αντοχής σε απότριψη (AAV-Aggregates Abrasion Value).

### 2.2.2 Μακροϋφή

Η μακροϋφή από την οποία εξαρτάται η επαφή ελαστικού-οδοστρώματος είναι η παράμετρος που περιγράφει το ανάγλυφο της επιφάνειας κυκλοφορίας και συναρτάται με την σύσταση του τάπητα και ιδιαίτερα με την κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών καθώς και με τη μέθοδο κατασκευής του τάπητα. Η μακροϋφή έχει τις εξής δυο μορφές, όπως αποτυπώνονται και στην Εικόνα 2.5:

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



**Εικόνα 2.5: Θετική και αρνητική υφή (the-contact-patch.com)**

Η μακροϋφή χαρακτηρίζει την τραχύτητα της επιφάνειας κυκλοφορίας και υφίσταται και αυτή φθορά λόγω της δράσης των φορτίων. Η κατάλληλη μακροϋφή του οδοστρώματος συντελεί στην ταχεία απομάκρυνση των επιφανειακών υδάτων από το οδόστρωμα και επομένως περιορίζει τα φαινόμενα υδρολίσθησης των οχημάτων, με αποτέλεσμα την ασφάλεια των χρηστών της οδού (Ευαγγελίδης, 2004).

### 2.2.3 Μεγαϋφή

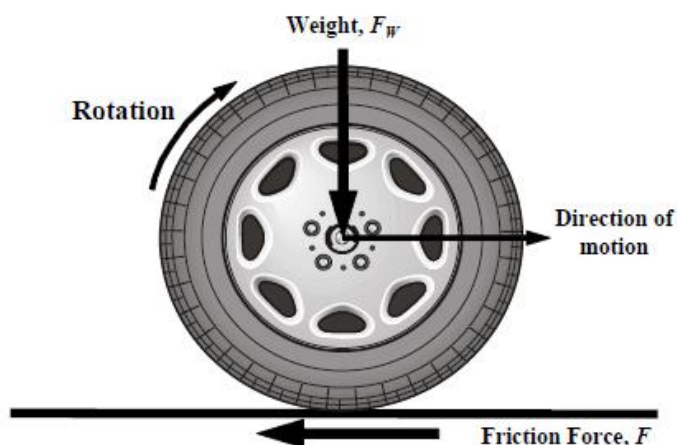
Η μεγαϋφή, είναι εκείνη η κατηγορία υφής με μήκη κύματος της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διεπιφάνεια επαφής ελαστικού/οδοστρώματος. Κυρίως ορίζεται για να παρέχει μια συνέχεια μεταξύ της μακροϋφής και της επιπεδότητας. Περιγράφει ανωμαλίες που μπορούν να προκύψουν από τροχοαυλάκωση, λακκούβες, μπαλώματα, απώλεια των πετρωμάτων της επιφάνειας και κυρίως αρμών και ρωγμές (McLean and Foley, 1998). Επίσης, είναι αποτέλεσμα κακών κατασκευαστικών πρακτικών που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία κατασκευής ενός οδοστρώματος. Η μεγαϋφή προκαλεί δονήσεις στα τοιχώματα των ελαστικών, οι οποίες έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία εσωτερικού θορύβου στο όχημα, αλλά και εξωτερικού θορύβου στη

διεπιφάνεια επαφής ελαστικού/οδοστρώματος. Επιπρόσθετα, επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της επιφάνειας κύλισης του οδοστρώματος και μπορεί να προκαλέσει πρόωρη φθορά των αναρτήσεων των οχημάτων. Συνεπώς, τα κύρια χαρακτηριστικά στα οποία επιδρά είναι ο θόρυβος και η αντίσταση κύλισης και γενικώς είναι ένα ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό του οδοστρώματος (Cerezo and Gothie, 2008).

### 2.3 Υφή και πέδηση

Η ανάλυση και κατανόηση του βασικού μηχανισμού που ενεργεί για τη παραγωγή δυνάμεων τριβής μεταξύ των ελαστικών ενός οχήματος και της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, είναι θεμελιώδης για την μελέτη, κατασκευή και συντήρηση αντιολισθηρών οδοστρωμάτων.

Η αντιολισθητική ικανότητα των οδοστρωμάτων (skid resistance) είναι η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται στο σημείο επαφής ελαστικού και οδοστρώματος. Η τριβή ορίζεται ως η αντίσταση στην κίνηση μεταξύ δυο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή. Ποσοτικά εκφράζεται με το συντελεστή τριβής ( $\mu$ ) που είναι ο λόγος δυο δυνάμεων, όπου η μία είναι παράλληλη στην επιφάνεια επαφής ελαστικού/οδοστρώματος, η οποία αντιτίθεται στην κίνηση και η άλλη κατακόρυφη στην επιφάνεια επαφής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Με άλλα λόγια, αντιολισθητική ικανότητα είναι η δύναμη που αντιστέκεται να ολισθήσει στην επιφάνεια του οδοστρώματος όταν πραγματοποιείται πέδηση.



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα δυνάμεων που δρουν σε ένα περιστρεφόμενο τροχό (Hall, 2007)

Η αντιολισθητική ικανότητα, είναι εδώ και καιρό αναγνωρισμένη ως ο πρωταρχικός παράγοντας ελέγχου της διεύθυνσης του οχήματος και της ταχύτητάς του, καθώς και της διασφάλισης μικρών αποστάσεων φρεναρίσματος. Έλλειψη αντιολισθητικής ικανότητας οδηγεί στην ολίσθηση, που είναι ένας από τους σπουδαιότερους παράγοντες δημιουργίας τροχαίων ατυχημάτων. Η κοινωνικοοικονομική σημασία της οδικής ασφάλειας είναι προφανής και για αυτό υποστηρίζονται μέτρα παγκοσμίως για τη μείωση των ατυχημάτων. Δεκάδες μελέτες για τη συσχέτιση μεταξύ του ρίσκου ατυχημάτων και της τριβής οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα: ο κίνδυνος ατυχημάτων μειώνεται με καλύτερη αντίσταση σε ολίσθηση (Panagouli and Kokkalis, 1998). Για αυτό είναι πολύ σημαντικό να προσδιοριστεί πως αυτή προκαλείται και πως επηρεάζεται από την υφή της οδοστρωματικής επιφάνειας και συγκεκριμένα από τη μικροϋφή και τη μακροϋφή.

Η τριβή των ελαστικών δρα και αναπτύσσεται σύμφωνα με την πολύπλοκη ελαστικοϊξώδη διαδικασία, κατά την οποία ο συντελεστής της τριβής δεν εξαρτάται μόνο από τις επιφάνειες επαφής, αλλά επίσης από το βάρος, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα ολίσθησης. Η ολική δύναμη της τριβής, που αναπτύσσεται όταν ένα ελαστικό ολισθαίνει πάνω σε μια επιφάνεια οδοστρώματος, θεωρείται γενικά ότι είναι το αποτέλεσμα τεσσάρων συνεισφερόντων παραγόντων:

1. Πρόσφυση.
2. Υστέρηση.
3. Σχήσιμο του ελαστικού.
4. Φθορά του ελαστικού ή/και της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Οι δυο τελευταίοι παράγοντες επηρεάζουν λιγότερο την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής συγκριτικά με τους δυο πρώτους και συνήθως παραλείπονται στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις.

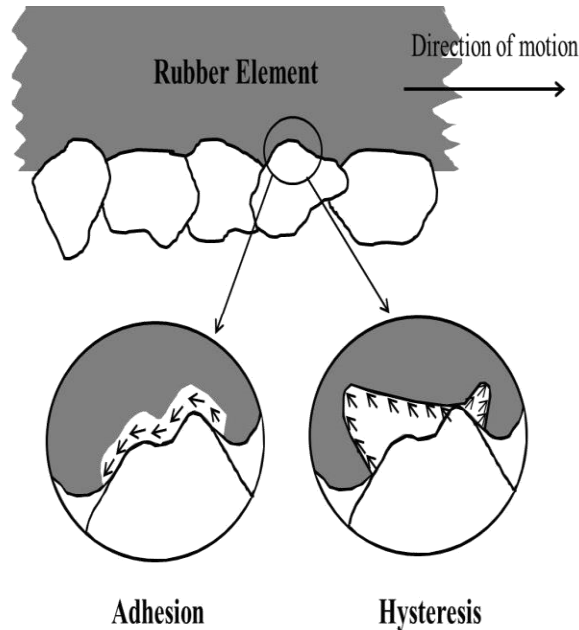
Οι δυο κύριοι παράγοντες της τριβής λοιπόν, η πρόσφυση και η υστέρηση, είναι διαφορετικές εκδηλώσεις της ίδιας ιδιότητας του ελαστικού, δηλαδή, του ελαστικοϊξώδους (UK Highways Agency, 2001 and Oliver, 2003):

- Η πρόσφυση (adhesion) είναι η αντίσταση ολίσθησης μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος της οποίας το μέγεθος καθορίζεται από τη φύση των υλικών που βρίσκονται σε επαφή. Η πρόσφυση γεννάται από την ανάπτυξη χημικών



δεσμών μεταξύ του ελαστικού του τροχού και των αδρανών της επιφάνειας του οδοστρώματος.

- Η υστέρηση (hysteresis) είναι η απώλεια ενέργειας η οποία προκαλείται από την παραμόρφωση του ελαστικού του τροχού εξαιτίας των προεξοχών της επιφάνειας του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.7: Οι δυο κύριοι παράγοντες της τριβής, πρόσφυση και υστέρηση (Hall, 2007)

Συνεπώς, η πρόσφυση οφείλεται στη μικροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος και αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια επαφής μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος (Sachpazis, 1988). Η πρόσφυση είναι το αποτέλεσμα των μοριακών δεσμών που αναπτύσσονται τοπικά σε περιοχές υψηλής πίεσης. Το σπάσιμο των δεσμών αυτών επιβραδύνει τον τροχό.

Αντίθετα, η υστέρηση οφείλεται στη μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος και αναπτύσσεται μέσα στη μάζα του ελαστικού κατά τη διαδικασία της απορρόφησης ενέργειας. Η συνιστώσα της υστέρησης προκαλείται από την παραμόρφωση του ελαστικού του τροχού γύρω από την υφή του οδοστρώματος. Το ελαστικό συμπιέζεται καθώς πλησιάζει μια προεξοχή της επιφάνειας του οδοστρώματος και στη συνέχεια, καθώς απομακρύνεται, αποσυμπιέζεται. Αυτό

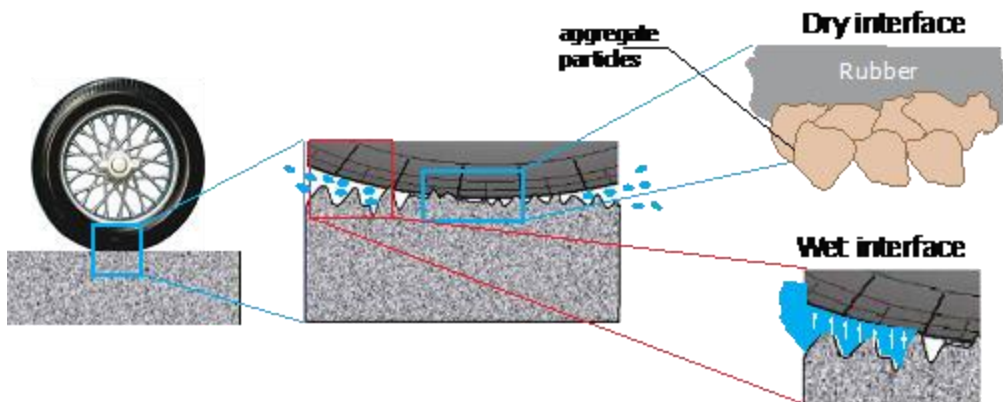
προκαλεί την άσκηση μιας δύναμης επιβράδυνσης στον τροχό με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας υπό μορφή θερμότητας και θορύβου.

Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες μια από τις δυο αυτές συνιστώσες (η πρόσφυση ή η υστέρηση) έχει πρωταρχικό ρόλο στην ανάπτυξη της τριβής. Σε συνθήκες ελεύθερης κύλισης σε στεγνό οδόστρωμα, η τριβή πρόσφυσης είναι η κυρίαρχη συνιστώσα. Καθώς η ελαστικότητα του ελαστικού του τροχού εξαρτάται από το ποσοστό πίεσης που ασκείται, όσο πιο γρήγορα περιστρέφεται ή ολισθαίνει στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος, τόσο μικρότερη είναι η δυνατότητα των προεξοχών των αδρανών να διεισδύσουν στο ελαστικό. Οι μικρότερες διεισδύσεις μεταφράζονται σε μικρότερη επιφάνεια επαφής για πρόσφυση και μικρότερη απώλεια υστερητικής ενέργειας, που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μειωμένη ικανότητα φρεναρίσματος.

Αντίθετα, όταν πρόκειται για βρεγμένο οδόστρωμα, η παρουσία του νερού αποτρέπει τη δημιουργία μοριακών δεσμών μεταξύ της διεπιφάνειας του αδρανούς και του ελαστικού του τροχού, πράγμα που έχει ως απόρροια την αισθητή μείωση της συνιστώσας της τριβής (σχεδόν μηδενίζεται), άρα και της ίδιας της τριβής. Συνεπώς, σε υγρό οδόστρωμα η συνιστώσα της υστέρησης είναι η σημαντικότερη συνιστώσα αντίστασης σε ολίσθηση, καθώς αντιστέκεται στις δυνάμεις αποσταθεροποίησης του οχήματος.

## **2.4 Το φαινόμενο της υδρολίσθησης**

Η ανάπτυξη δύναμης τριβής δίνει τη δυνατότητα στο όχημα όχι μόνο να πραγματοποιήσει πέδηση, αλλά και να επιταχύνει, καθώς και να προβεί σε ελιγμούς. Αναφέρεται συνήθως σε υγρά οδοστρώματα, καθώς η πλειοψηφία των επιφανειών των οδοστρωμάτων παρέχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας όταν αυτά βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση. Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά ενός οχήματος σε στεγνό οδόστρωμα με εκείνη σε βρεγμένο, παρατηρείται ότι στη δεύτερη περίπτωση το στρώμα νερού μεταξύ επιφάνειας οδοστρώματος και ελαστικού δρα σαν «λιπαντικό», όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

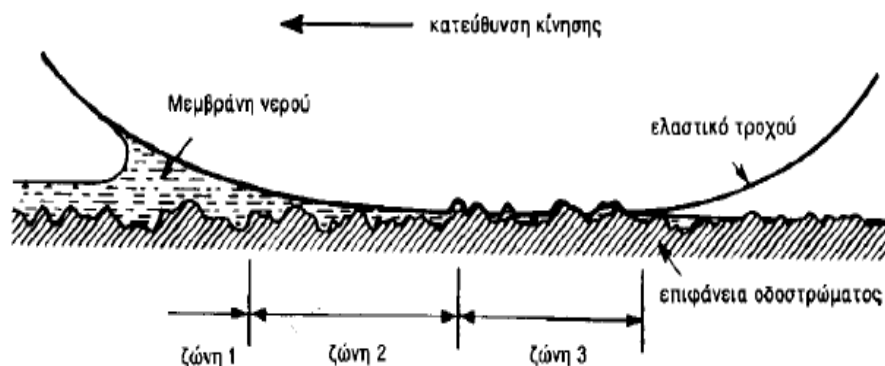


**Εικόνα 2.8:** Διεπαφή ελαστικού-επιφάνειας οδοστρώματος σε ξηρές και υγρές συνθήκες (capa-3d.org)

Για την εξασφάλιση επαρκούς αντίστασης σε ολίσθηση θα πρέπει το σύστημα «τροχός-επιφάνεια οδοστρώματος» να λειτουργεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ταχεία απομάκρυνση του νερού, προκειμένου το ελαστικό να έρχεται σε άμεση επαφή με τα αδρανή της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αντίσταση στην ολίσθηση αυξάνεται όσο αυξάνεται η επιφάνεια της ξηρής επαφής μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Σε αυτό συντελεί πρωτίτως η μικρο και μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η μακροϋφή προμηθεύει την επιφάνεια με διόδους ή "κανάλια" για τη διασκόρπιση και αποστράγγιση του νερού, όσο το δυνατόν ταχύτερα, ενώ η μικροϋφή διασπά τη λεπτή πλέον μεμβράνη νερού με τη συγκέντρωση υψηλών πιέσεων και έτσι επιτυγχάνεται άμεση επαφή με το πέλμα του ελαστικού.

Όσο πιο ανεπτυγμένη είναι η μικροϋφή, τόσο υψηλότερη είναι η αντιολισθητική ικανότητα στις χαμηλές ταχύτητες. Η σταδιακά αυξημένη μακροϋφή γίνεται σπουδαιότερη και απαιτείται όσο η ταχύτητα του οχήματος αυξάνει. Απλά η μικροϋφή καθορίζει το βαθμό της τριβής που θα αναπτύξει μια υγρή επιφάνεια, ενώ η μακροϋφή εάν θα διατηρήσει ή όχι την τριβή αυτή με την αύξηση της ταχύτητας (Sachpazis, 1988).

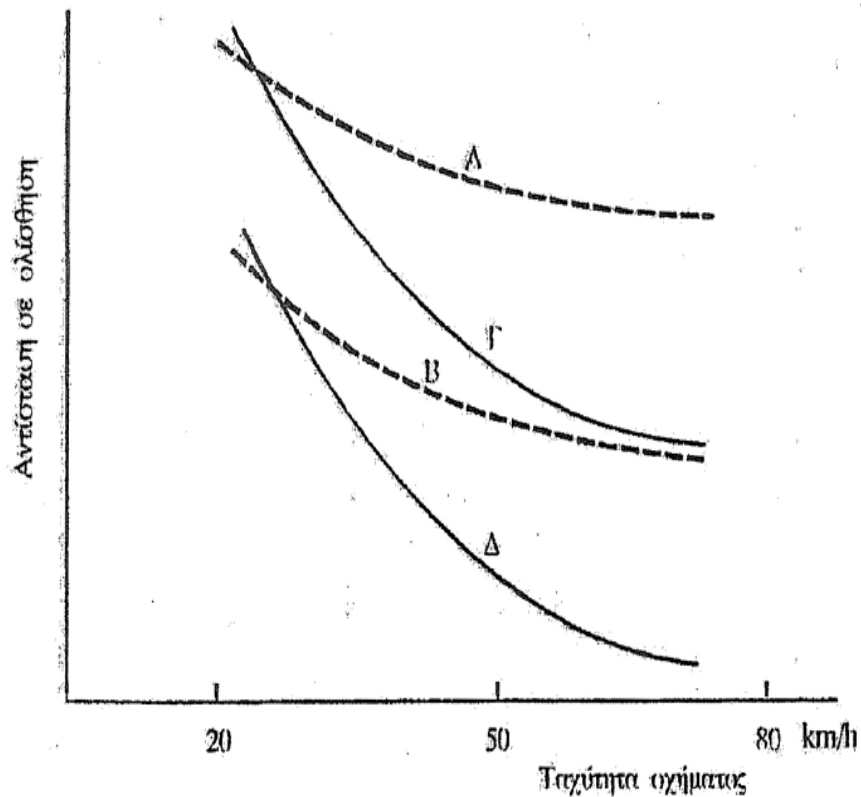


Εικόνα 2.9: Ζώνες της επιφάνειας επαφής τροχού – οδοστρώματος (Λοΐζος, 2012)

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.9, υπάρχει πάντοτε επαρκής ξηρή επιφάνεια επαφής μεταξύ ελαστικού και επιφάνειας οδοστρώματος (ζώνη 3) και πρόσφυση ελαστικού-οδοστρώματος. Η ζώνη 2 είναι μια μεταβατική ζώνη μεταξύ υγρής και ξηρής επαφής. Ο μηδενισμός της ζώνης 3 έχει ως συνέπεια τη δημιουργία υδάτινου υμένα στη διεπιφάνεια ελαστικού και οδοστρώματος με αποτέλεσμα να μηδενίζεται ο συντελεστής τριβής και κατ' επέκταση η αντίσταση της επιφάνειας σε ολίσθηση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υδρολίσθηση και η ανάπτυξη του είναι άκρως επικίνδυνη για την ασφάλεια του οχήματος (PIARC, 1995).

Το φαινόμενο της υδρολίσθησης αναπτύσσεται προοδευτικά, ξεκινώντας σαν μερική ολίσθηση σε μικρές ταχύτητες, και καταλήγει σαν πλήρη ολίσθηση σε κάποια συγκεκριμένη υψηλότερη ταχύτητα. Η ταχύτητα κατά την υδρολίσθηση εξαρτάται κυρίως από την υφή του οδοστρώματος, το πάχος της στρώσης του νερού, το σύστημα ραβδώσεων του ελαστικού και το φορτίο επί του ελαστικού (Sachpazis, 1988).

Συνεπώς γίνεται αντιληπτό, ότι η αντιολισθητική ικανότητα είναι κρίσιμη κυρίως σε συνθήκες υγρού οδοστρώματος. Η σημασία της ύπαρξης μικροϋφής και μακροϋφής στην αντιολισθητική ικανότητα σε υγρές επιφάνειες συναρτήσκει της ταχύτητας των οχημάτων φαίνεται στην Εικόνα 2.10:



**Εικόνα 2.10: Αντίσταση σε ολίσθηση υγρών επιφανειών (PIARC, 2003)**

Είναι σαφές ότι με την αύξηση της ταχύτητας η αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας μειώνεται και η μείωση αυτή είναι περισσότερο αισθητή στην περίπτωση απουσίας μακροϋφής (καμπύλες Γ και Δ). Από το παραπάνω σχήμα εξάγεται επίσης το συμπέρασμα ότι σε χαμηλές ταχύτητες έως 50km/h, η ύπαρξη μικροϋφής μόνο, είναι ικανή να δώσει ικανοποιητικό συντελεστή αντιολίσθησης (αρχή της καμπύλης Γ). Σε υψηλές ταχύτητες, η ύπαρξη και μακροϋφής είναι απολύτως αναγκαία για τη διατήρηση του συντελεστή αντιολίσθησης σε ικανοποιητικά επίπεδα (καμπύλη Α). Τέλος, η ύπαρξη μόνο μακροϋφής δεν προσδίδει καλό συντελεστή αντιολίσθησης ακόμη και σε υψηλές ταχύτητες (καμπύλη Β).

Ένας καλός τρόπος για να διατηρηθούν χαμηλά επίπεδα ολισθηρότητας είναι η χρησιμοποίηση αδρανών με υψηλή αντοχή στη λείανση (polish resistant aggregates). Αδρανή με καλή απόδοση τριβής, πρέπει να είναι με γωνίες, σκληρά ή (καλύτερα) με σκληρούς ορυκτούς κόκκους και πρέπει να είναι ομοιόμορφα και πυκνά απλωμένα πάνω στην επιφάνεια του

οδοστρώματος. Γενικά, τα αδρανή έχουν αυτές τις ιδιότητες εφόσον η επιφάνεια είναι καινούργια. Υπό την λειαντική επίδραση των ελαστικών τα προεξέχοντα αδρανή μπορεί να εξομαλυνθούν ή να αποσχιστούν και αυτό μειώνει την μικρο και μακροϋφή. Υπό την συμπυκνωτική επίρροια της κυκλοφορίας τα προεξέχοντα αδρανή μπορεί να «ενσωματωθούν» στην οδοστρωματική επιφάνεια. Υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών η συμπύκνωση που προκαλεί η κυκλοφορία μειώνει το βάθος μακροϋφής, αφήνοντας τα πέλματα των ελαστικών ως τον μόνο τρόπο διαφυγής του νερού. Αυτό μπορεί να αποβεί ανεπαρκές σε υψηλές ταχύτητες και έτσι αυξάνεται το ρίσκο να δημιουργηθεί φαινόμενο υδρολίσθησης και το ελαστικό να χάσει την επαφή του με την επιφάνεια του οδοστρώματος, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα ατυχημάτων (Panagouli and Kokkalis, 1998).

Από όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνεται η σημασία συνύπαρξης μικροϋφής και μακροϋφής σε μια επιφάνεια οδοστρώματος. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερης σημασίας είναι ένας δρόμος που κατασκευάζεται, δηλαδή όσο μεγαλύτεροι είναι οι κυκλοφοριακοί φόρτοι που σχεδιάζεται να εξυπηρετήσει, τόσο υψηλότερες απαιτήσεις αντολισθητικής ικανότητας δημιουργούνται.

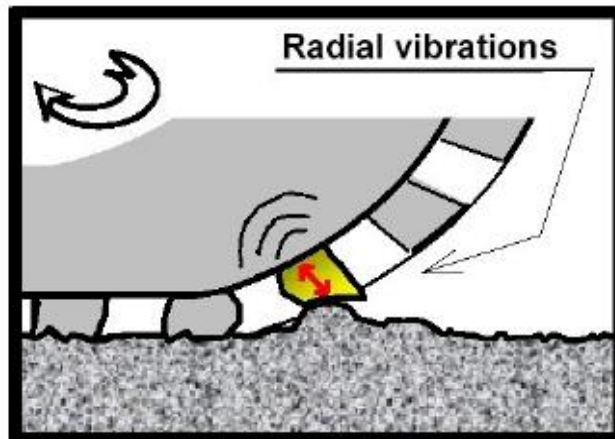
## 2.5 Υφή και θόρυβος

Η υφή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος-και κυρίως η μακροϋφή και η μεγαϋφή, επηρεάζει σημαντικά το θόρυβο που προκαλείται από την κίνηση των οχημάτων στο οδόστρωμα. Στη διεπιφάνεια ελαστικού/οδοστρώματος, δρουν διάφοροι μηχανισμοί, που παράγουν ενέργεια, η οποία εκπέμπεται σαν θόρυβος. Επίσης, υπάρχουν και χαρακτηριστικά αυτής της διεπιφάνειας που λειτουργούν ως αιτία αυτή η ενέργεια να μετατραπεί σε θόρυβο και να εκπέμπεται αποτελεσματικά. Οι δύο πιο χαρακτηριστικοί μηχανισμοί είναι οι επόμενοι:

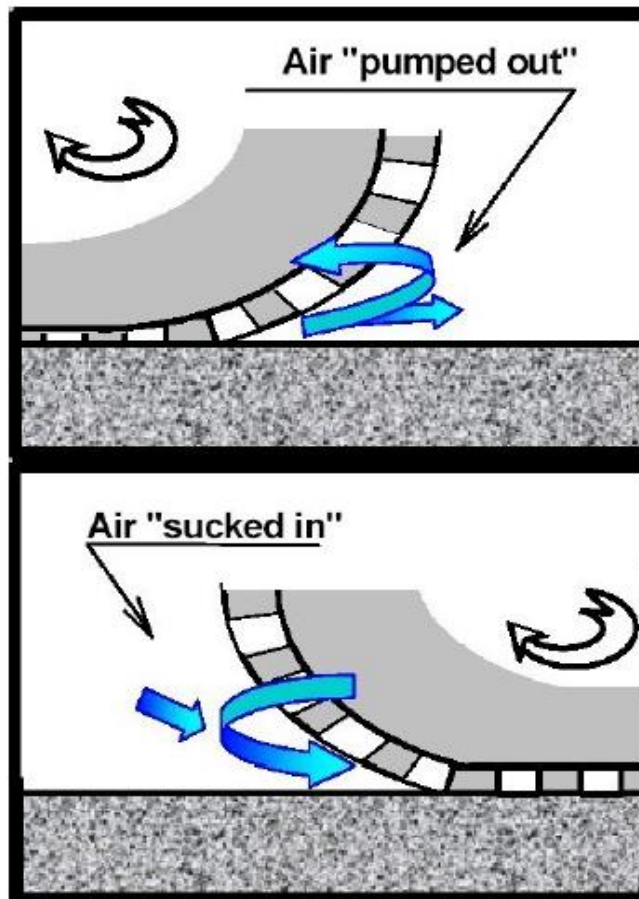
1. Επίπτωση πέλματος (Tread impact): Τα επιμέρους μέρη του πέλματος του ελαστικού γυρίζουν γύρω από το ελαστικό, καθώς αυτό περιστρέφεται. Κατά την έναρξη της διεπαφής ελαστικού/οδοστρώματος δημιουργείται κρούση καθώς το ελαστικό «χτυπά» το οδόστρωμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.11. Αυτή η κρούση του ελαστικού, που μπορεί να συγκριθεί με το χτύπημα ενός μικρού λαστιχένιου σφυριού στο οδόστρωμα, προκαλεί δονήσεις στο εσωτερικό του ελαστικού. Εάν και το πέλμα του ελαστικού και το

οδόστρωμα είναι ανθεκτικά, η ενέργεια που δημιουργείται από την εν λόγω κρούση μειώνεται. Η διακύμανση τόσο στην υφή του οδοστρώματος όσο και στο μοτίβο του ελαστικού μειώνει την επαναληψιμότητα αυτής της κρούσης και έτσι αλλάζει το χαρακτήρα του θορύβου με τελικό στόχο τη μείωση της ενόχλησης από τον παραγόμενο αυτό θόρυβο.

2. Άντληση αέρα (Air pumping): Στην επιφάνεια επαφής, οι δίοδοι και τα αυλάκια του ελαστικού συμπιέζονται και παραμορφώνονται. Ο αέρας που διαπερνά αυτές τις εισόδους θα συμπιεστεί και θα αντλείται μέσα και έξω από αυτά τα περάσματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.12. Αυτή η συμπίεση και άντληση του αέρα, λόγω αεροδυναμικής, παράγει ήχο (Bernhard and Wayson , 2014).



Εικόνα 2.11: Άντληση αέρα κατά την είσοδο και έξοδο της επιφάνειας επαφής (Bernhard, 2014)



Εικόνα 2.12: Δονήσεις που προκαλούνται από τη διεπαφή ελαστικού/οδοστρώματος (Bernhard, 2014)

Μάλιστα, αυξημένη μακροϋφή με μήκη κυματισμών από 2 μέχρι 10 mm έχει αποδειχτεί ότι μειώνει τον θόρυβο από την αλληλεπίδραση ελαστικών/οδοστρώματος, ενώ υφή με χαρακτηριστικά μήκη κύματος μεγαλύτερα των 20 mm (δηλαδή τα μεγάλα μήκη κύματος της μακροϋφής και η μεγαϋφή) τείνει να αυξάνει τον θόρυβο μεταξύ ελαστικού/οδοστρώματος. Επίσης καλύτερα αποτελέσματα αναμένονται να προκύψουν για αρνητική υφή, παρά για θετική υφή. Είναι δυνατόν να μειωθεί ο θόρυβος ελαστικών/οδοστρώματος παράλληλα με την αύξηση της αντιολισθητικής ικανότητας, παρέχοντας στην οδοστρωματική επιφάνεια υφή με επαρκή μικρο και μακροϋφή (Rasmussen, 2013).





Εικόνα 2.13: Καλή και κακή υφή για αποτροπή δημιουργίας θορύβου (Rasmussen, 2013)

Η πολυπλοκότητα όμως του εγχειρήματος να κατασκευαστούν πιο «ήσυχα» οδοστρώματα έγκειται στο ότι θα πρέπει να δημιουργηθεί μια υφή, η οποία θα μπορεί να διατηρεί επαρκή επίπεδα τριβής. Η δυσκολία στην κατασκευή πιο «ήσυχων» οδοστρωμάτων έγκειται κυρίως στον γεγονός ότι η σχέση μεταξύ μακροϋφής, μεγαϋφής και θορύβου δεν είναι επαρκώς καθορισμένη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη σχέση της υφής με άλλους παράγοντες, οι οποίοι την επηρεάζουν, όπως είναι το πορώδες του μείγματος της στρώσης κυκλοφορίας.

Επιπλέον, η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος επιδρά τόσο στην αντίσταση σε ολίσθηση, όσο και στο θόρυβο μεταξύ ελαστικού και επιφάνειας οδοστρώματος. Η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος και η ομαλότητα επιδρούν στην αντίσταση σε ολίσθηση, δημιουργώντας δονήσεις στο ελαστικό και στο οδόστρωμα, οι οποίες συνήθως παράγουν θόρυβο. Για αυτό το λόγο, κατασκευάζοντας έναν πιο ομαλό δρόμο, μειώνονται άμεσα αυτές οι δονήσεις και ο θόρυβος και έμμεσα η κατανάλωση καυσίμων. Αυτό όμως δεν είναι απόλυτο,

καθώς έχουν γίνει και δοκιμές στις οποίες τα επίπεδα θορύβου σε ομαλότερες επιφάνειες οδοστρώματος είναι υψηλότερα από αντίστοιχες πιο τραχιές επιφάνειες.

Τέλος έχει αποδειχτεί από δοκιμές ότι ο βαθμός της επίδρασης της μακροϋφής, της μεγαϋφής και του πορώδους του μείγματος στα επίπεδα θορύβου, είναι άμεσα συνδεδεμένος με το βάρος των διερχόμενων οχημάτων και την πίεση των ελαστικών. Για ελαφρύτερα επιβατικά οχήματα, το πορώδες της επιφάνειας του οδοστρώματος, που συνδέεται με το βαθμό της απόσβεσης του θορύβου, είναι ο κυριότερος παράγοντας. Για βαρύτερα οχήματα με μεγαλύτερη πίεση ελαστικών, η μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος επιδρά περισσότερο στα επίπεδα θορύβου (Sakhaeifar, Liao and Waller, 2013).

## 2.6 Υφή και κατανάλωση καυσίμων - αντίσταση κύλισης

Είναι γνωστό ότι η κατανάλωση καυσίμων αυξάνεται όσο υποβαθμίζεται η επιφάνεια κύλισης του οδοστρώματος. Σε αυτό, δηλαδή ουσιαστικά στην αύξηση της αντίστασης κύλισης (rolling resistance), σημαντικό ρόλο έχει η υφή του οδοστρώματος, και κυρίως η μεγαϋφή.

Η αντίσταση κύλισης είναι ένα φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει όταν για παράδειγμα, ένας τροχός κυλάει σε μια επιφάνεια. Η κύρια αιτία της απώλειας της ενεργητικής των ελαστικών, προέρχεται από το γεγονός ότι τα στοιχεία των ελαστικών υποβάλλονται διαδοχικά σε αυξήσεις και μειώσεις. Όσο αυξάνεται το τμήμα του ελαστικού που ακουμπά στην επιφάνεια, αυξάνεται και η ενέργεια που καταναλώνεται, η οποία ανακτάται μόνο μερικώς καθώς επιστρέφουν τα ελαστικά μέρη. Η απώλεια ενέργειας καταλήγει σαν θερμότητα. Η ενέργεια χάνεται εξαιτίας τριών μηχανισμών (Bendtsen, 2004):

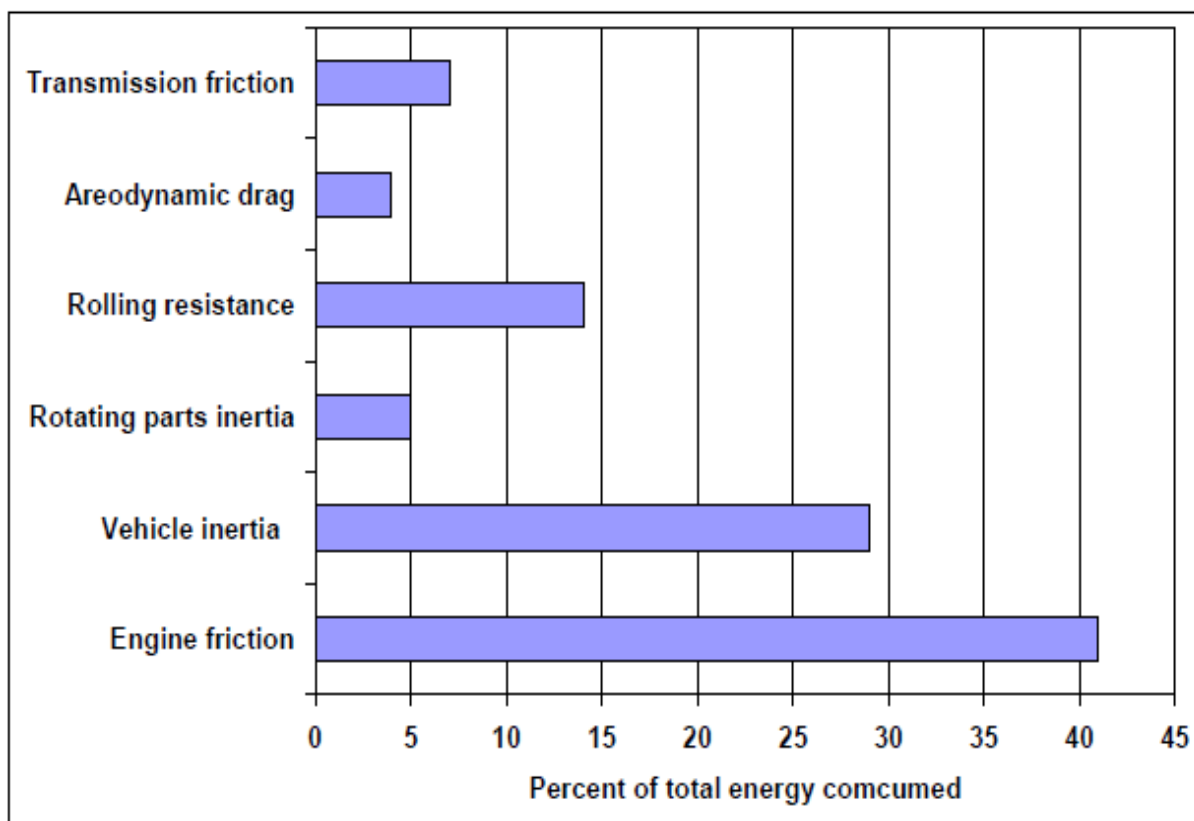
1. Απώλειες εξαιτίας μακροπαραμορφώσεων (macro deformations) στο ελαστικό (καμπτικές παραμορφώσεις στα πλευρικά τοιχώματα του ελαστικού).
2. Απώλειες εξαιτίας μικροπαραμορφώσεων (micro deformations) στην διεπιφάνεια επαφής ελαστικού/οδοστρώματος και
3. Απώλειες εξαιτίας της τριβής ολίσθησης στη διεπιφάνεια επαφής ελαστικού/οδοστρώματος.

Μάλιστα, πολλές μελέτες και έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στην Ευρώπη, επιβεβαιώνουν το σπουδαίο ρόλο της υφής και καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα (McLean and Foley, 1998):

- Η επίδραση της μακρο και μεγαυφής στην αντίσταση κύλισης και συνεπώς στην κατανάλωση καυσίμων, γίνεται μέσω απωλειών ενέργειας στα ελαστικά.
- Η μεγαυφή μπορεί επίσης να επιφέρει ακόμα μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες για χαμηλές προς μέτριες ταχύτητες κίνησης, καθώς προκαλεί δονήσεις στο σύστημα αναρτήσεων του οχήματος.
- Οι απώλειες ενέργειας επηρεάζονται κυρίως από μεγάλα μήκη κύματος μακρουφής και τη μεγαυφή (μήκη κύματος μεταξύ 20 mm και 300mm).
- Για οδοστρώματα σε λογική κατάσταση, η επίδραση της μακρο και μεγαυφής στην αντίσταση κύλισης των οχημάτων είναι της ίδιας τάξεως με την επίδραση της τραχύτητας.
- Καθώς διαφορετικού τύπου επιφάνειες οδοστρωμάτων έχουν διαφορετικά επίπεδα μακρο και μεγαυφής, θα καταλήγουν σε διαφορετικές αντιστάσεις κύλισης για το ίδιο επίπεδο τραχύτητας.
- Οι επιδράσεις της υφής μειώνεται με την αύξηση της ακτίνας των ελαστικών και την αύξηση της πίεσης τους. Για αυτό και η επίδραση της υφής στην αντίσταση κύλισης των μεγάλων φορτηγών είναι πολύ μικρότερη από ότι των αυτοκινήτων.

Από όλα τα παραπάνω, γίνεται λοιπόν αντιληπτή η άμεση συσχέτιση της υφής (μακρουφής και κυρίως μεγαυφής) με την αντίσταση κύλισης. Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί ότι η αντίσταση κύλισης αυξάνεται κατά 7,5 με 15% για κάθε αύξηση του βάθους υφής κατά 1 mm, το οποίο αντιστοιχεί σε 1,5 με 3% αύξηση στην ταχύτητα κατανάλωσης καυσίμων.

Στην Εικόνα 2.14, φαίνεται ένα παράδειγμα της κατανομής της χρήσης ενέργειας ενός οχήματος που προέκυψε από δέκα διαφορετικούς τρόπους οδήγησης (συμπεριλαμβανομένων επιτάχυνσης και φρεναρίσματος). Όπως φαίνεται, η αντίσταση κύλισης αντιστοιχεί περίπου στο 14% της ενέργειας που καταναλώνεται από ένα όχημα.



Εικόνα 2.14: Παράδειγμα κατανομής ενεργειακής κατανάλωσης ενός οχήματος (Bendtsen, 2004)

Ο καλύτερος τρόπος για τη μείωση της αντίστασης κύλισης χωρίς να διακυβεύεται η αντίσταση σε ολίσθηση βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του βάθους μεγαυφής και των μικρών μηκών κύματος (μικρότερα από 3 m) της ομαλότητας, παράγοντες που όπως προαναφέρθηκε συνδέονται άμεσα με την αύξηση της αντίστασης κύλισης. «Θεραπείες» εξομάλυνσης του οδοστρώματος είναι αποτελεσματικές για αυτόν το σκοπό. Η χρησιμοποίηση μικρότερων αδρανών για μαπαλώματα, συνεισφέρει τόσο στο χαμηλότερο κόστος σφραγήσεων, όσο και στη μείωση της αντίστασης κύλισης. Τα μικρότερα αδρανή συμβάλλουν τόσο στη μείωση του μέσου βάθους υφής, όσο και στην παροχή ενός επαρκούς βάθους για την αντίσταση σε ολίσθηση σε βρεγμένο οδόστρωμα και μειώνουν τις αποκλίσεις της υφής σε κλίμακα εύρους ζώνης, το οποίο

έχει τη σημαντικότερη επιρροή στην αντίσταση κύλισης (McLean and Foley, 1998). Τέλος τα μικρότερα αδρανή δρουν θετικά και στη μείωση θορύβου από τη διεπαφή ελαστικού/οδοστρώματος (Bendtsen, 2004).

## 2.7 Μετρήσεις υφής

### 2.7.1 Γενικά

Η υφή της στρώσης κυκλοφορίας ενός οδοστρώματος επηρεάζει την αντιολισθητική του ικανότητα και πρέπει να παρακολουθείται ως δευτερεύουσα ένδειξη της λειτουργικής κατάστασης του, μετά την ολισθηρότητα και την ομαλότητα. Οι μετρήσεις της υφής (ουσιαστικά της μακροϋφής), πρέπει να γίνονται παράλληλα με τις μετρήσεις της ολισθηρότητας.

Η μικροϋφή δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα επί τόπου, παρά μόνο στο εργαστήριο. Τα επίπεδα μικροϋφής συνήθως υπολογίζονται έμμεσα με τη χρήση χαμηλής ταχύτητας συσκευών μέτρησης τριβής, όπως είναι το British Portable Tester (BPT), το Dynamic Friction Tester (DF Tester) και το σύστημα ακινητοποιημένου τροχού (ASTM E274) (Flintsch, 2003).

Η μακροϋφή μετράται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

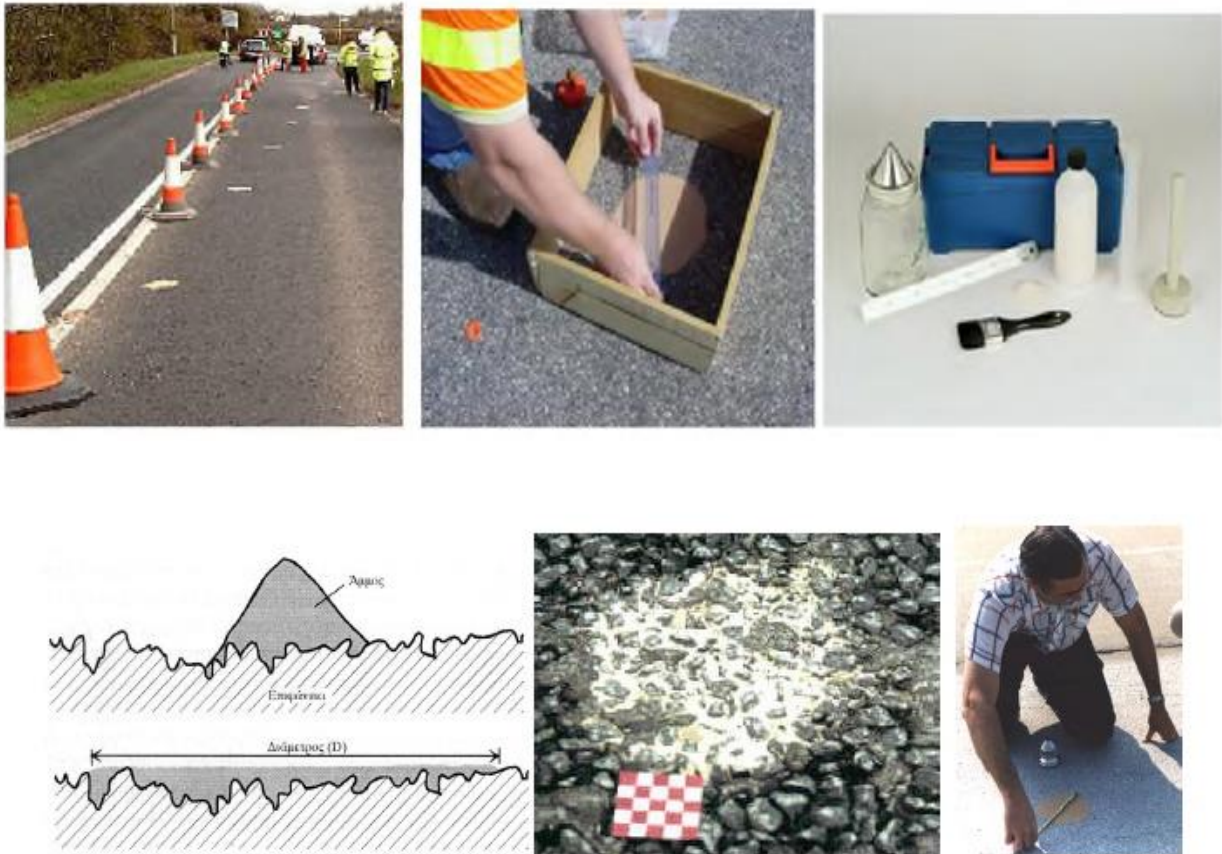
- ✓ Τη μέθοδο της κηλίδας της άμμου (Sand Patch Method)
- ✓ Με μεθόδους προφίλομέτρησης
- ✓ Με τη μέθοδο ASTM E2157 (Circular texture meter)

Η μεγαϋφή μπορεί να μετρηθεί άμεσα, με τη χρήση συσκευών προφίλομέτρησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της μακροϋφής. Μπορεί όμως να υπολογιστεί και έμμεσα μέσω της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, η οποία αναλύεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.7.2 Μέθοδος κηλίδας άμμου (Sand Patch Method)

Κατά τη μέθοδο της κηλίδας άμμου (ASTM E, 965-96, 1998), γνωστός όγκος διαβαθμισμένης άμμου (διερχόμενη από το κόσκινο No.60 (0.270 mm) και συγκρατούμενη στο No.80 (0.120 mm)), διαχέεται σταδιακά, με κυκλικές κινήσεις και διατηρώντας το κυκλικό

περιτύπωμα, έως ότου καλυφθούν όλα τα επιφανειακά κενά. Έτσι δημιουργείται μια κυκλική κηλίδα άμμου. Το βάθος της υφής υπολογίζεται από τον όγκο της άμμου δια του εμβαδού της επιφάνειας της κυλίδας της άμμου που προκύπτει μετά τη διάστρωσή της. Σημειώνεται ότι για τη μέτρηση αυτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μικρές γυάλινες σφαίρες αντί άμμου.



**Εικόνα 2.15: Μέθοδος της κηλίδας της άμμου (Λοΐζος, 2012 και Εγνατία Οδός, 2004)**

Συχνά προδιαγράφεται ότι οι μετρήσεις του βάθους υφής θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε όλες τις λωρίδες κυκλοφορίας ενός αυτοκινητόδρομου και ανά διαστήματα των 100 m το μέγιστο.

### 2.7.3 Μέθοδος προφίλομέτρησης

Η μέτρηση των προφίλ υφής απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό που μετρά τις υψομετρικές αποκλίσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος σε πολύ μικρή κλίμακα. Αντί να αναφέρονται οι υψομετρικές αποκλίσεις σε μέτρα, αναφέρονται σε κλάσματα του χιλιοστού. Με δεδομένη

λοιπόν την ανάγκη για ακρίβεια, τα τελευταία χρόνια το βάθος υφής μετράται με ειδικά όργανα που χρησιμοποιούν ακτίνες laser. Τα όργανα αυτά διακρίνονται σε δύο τύπους: αυτά που σύρονται με το χέρι (mini texture meter) και αυτά που σύρονται από όχημα και καταγράφουν το βάθος της μακροϋφής κατά την κίνηση του οχήματος και κινούνται στις συνήθεις ταχύτητες κυκλοφορίας. Το σύστημα καταγραφής laser μπορεί επίσης να προσαρμοσθεί και στα όργανα καταγραφής της επιφανειακής επιπεδότητας και να γίνονται ταυτόχρονα και οι δύο μετρήσεις. Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται με τη βοήθεια μικροεπεξεργαστή που είναι και αυτός τοποθετημένος πάνω στο όργανο.

Τα υψηλής ταχύτητας συστήματα προφίλομέτρησης (Laser Profilors) δίνουν τη δυνατότητα άμεσης μέτρησης βάθους υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά μήκος του οδοστρώματος. Τα περισσότερα συστήματα προφίλομέτρησης χρησιμοποιούν μόνο μία δέσμη laser, αλλά τα 3D συστήματα προφίλομέτρησης κερδίζουν έδαφος, διότι συγκεντρώνουν περισσότερη ποσότητα πληροφοριών σχετικά με την υφή (Rasmussen, 2013). Με τα συστήματα αυτά υπολογίζεται το βάθος της υφής τόσο στο δεξί ίχνος τροχού όσο και στο αριστερό, το οποίο εκφράζεται μέσω του δείκτη MPD (Mean Profile Depth).



**Εικόνα 2.16: 3D σύστημα προφίλομέτρησης RoboTex (Rasmussen, 2013)**

Οι τιμές που λαμβάνονται από όργανα με laser δεν είναι ευθέως ανάλογες των μετρήσεων που λαμβάνονται από τη μέθοδο της κηλίδας άμμου, λόγω της διαφορετικής αρχής μέτρησης (το όργανο μετρά ουσιαστικά τη μέση υψομετρική διαφορά του βάθους υφής). Έτσι, οι μετρήσεις με laser, που πάντοτε είναι μικρότερες των μετρήσεων με τη μέθοδο της κηλίδας άμμου, θα πρέπει να πολλαπλασιάζονται με ένα διορθωτικό συντελεστή, που τις περισσότερες φορές καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

#### 2.7.4 Μέθοδος ASTM E2157 (Circular texture meter)

Ένα άλλο σύστημα προφίλομέτρησης για την μακροϋφή είναι το CT Meter ή Circular Texture Meter. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί laser αισθητήρα μετατόπισης για να μετρήσει το κάθετο προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος. Το σύστημα CTM υπολογίζει και καταγράφει τους δείκτες MPD που χαρακτηρίζουν τη μακροϋφή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρίνοντας τους δείκτες MPD έχουμε μια ένδειξη του κατά πόσον η υφή της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι θετική (προεξοχές) ή αρνητική (βαθουλώματα).



**Εικόνα 2.17: Circular Texture Meter (NCAT, 2004)**

Συγκεκριμένα, το σύστημα CTM μετρά το προφίλ μιας κυκλικής επιφάνειας διαμέτρου 284 mm (11,2 in) ή περιφέρειας 892 mm (35 in). Το προφίλ της επιφάνειας χωρίζεται σε οχτώ



τμήματα των 111,5 mm (4.4 in) το καθένα. Η μέση τιμή του δείκτη MPD καθορίζεται για καθένα από τα τμήματα του κύκλου. Η τελική τιμή του δείκτη MPD προκύπτει από τον μέσο όρο όλων των επιμέρους τμημάτων (Hanson and Prowell, 2004).

## 2.9 Προδιαγραφές υφής

Για την ασφάλεια των χρηστών της οδού, την αποτελεσματικότερη συντήρηση, τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων, κλπ., καθορίζονται κατώτερα επιτρεπτά όρια στις τιμές του βάθους υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος (Ευαγγελίδης, 2004). Όταν η τιμή του βάθους υφής πλησιάζει τα επιτρεπτά όρια, απαιτείται ο προγραμματισμός των εργασιών για την αποκατάσταση της υφής του οδοστρώματος. Όταν η τιμή του βάθους υφής φτάσει την τιμή του ορίου επέμβασης, το οδόστρωμα κρίνεται επικίνδυνο για την ασφάλεια των χρηστών και απαιτείται άμεση επέμβαση για την αποκατάστασή του.

Τόσο τα όρια του βάθους υφής, όσο και η συχνότητα των μετρήσεων καθορίζονται ανάλογα με την κλίμακα του έργου και τις εκάστοτε απαιτήσεις και νομοθεσία. Παράγοντες όπως οι επιτρεπόμενες ταχύτητες, η ποιότητα της επιφανειακής στρώσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες, η γήρανση των υλικών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να καθοριστούν τα χαμηλότερα όρια της μακροϋφής και τα υψηλότερα όρια της μεγαϋφής.

Σε γενικές γραμμές μπορεί να θεωρηθεί ότι όσο πιο μεγάλης σημασίας είναι ένα οδικό έργο, δηλαδή όσο μεγαλύτερο κυκλοφοριακό φόρτο αναμένεται να εξυπηρετήσει και όσο μεγαλύτερα όρια ταχύτητας έχει, τόσο αυστηρότερα είναι τα όρια τα οποία καθορίζονται για τις τιμές υφής. Αυτό συμβαίνει διότι υψηλότερα όρια ταχύτητας έχουν υψηλότερες απαιτήσεις τριβής για να διασφαλιστούν οι απαραίτητες αποστάσεις ακινητοποίησης των οχημάτων, οι οποίες εξαρτώνται από τη μακροϋφή, ενώ μεγαλύτεροι κυκλοφοριακοί φόρτοι προκαλούν δεκάδες κυκλοφοριακές καταστάσεις που και αυτές έχουν υψηλότερες απαιτήσεις τριβής στο οδόστρωμα (Aavik, 2014).

Πέραν όμως από τον καθορισμό συγκεκριμένων ορίων που περιλαμβάνονται στις προδιαγραφές, θα πρέπει να καθορίζονται και άλλα στοιχεία που είναι απαραίτητα στο πλαίσιο της διαχείρισης των οδοστρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται να θεσπιστούν ποσοστά

αποδοχής ενός οδοστρώματος με βάση την υφή της επιφάνειάς του, δεδομένου ότι σπανίως ικανοποιούνται οι σχετικές απαιτήσεις στο σύνολο (100%) ενός οδοστρώματος. Επιπλέον, η καταγραφή της υφής θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη από το σύστημα μέτρησής της. Παράλληλα, θα πρέπει να ορίζεται από τις προδιαγραφές και το μήκος αναφοράς των μετρήσεων (Λοΐζος, 2012).

### 3. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

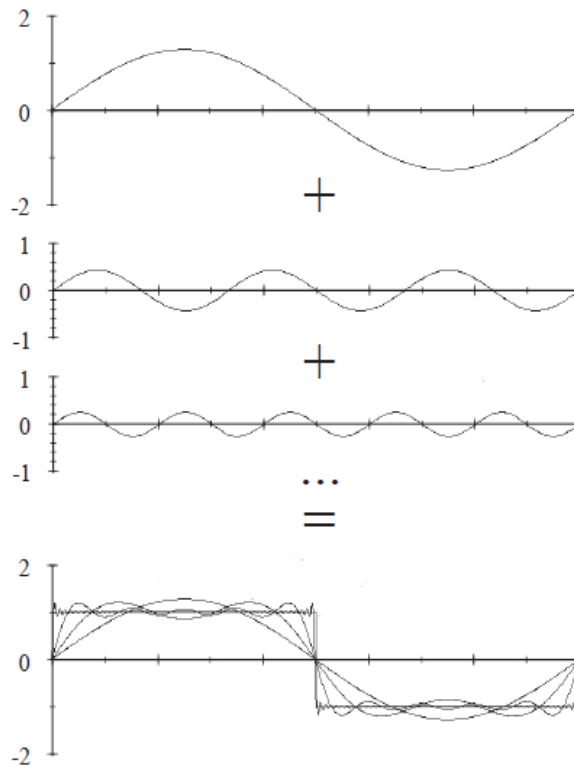
#### 3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, η υφή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος μπορεί να περιγραφεί από τρεις χαρακτηριστικές κατηγορίες μηκών κύματος, οι οποίες είναι οι εξής:

- ✓ Μικροϋφή (microtexture) με μήκη κυματισμών μέχρι 0,5 mm
- ✓ Μακροϋφή (macrotexture) με μήκη κυματισμών από 0,5 mm μέχρι 50 mm
- ✓ Μεγαϋφή (megatexture) με μήκη κυματισμών από 50 mm μέχρι 500 mm και

Μια τυπική επιφάνεια (προφίλ) ενός οδοστρώματος, αποτελείται από ένα φάσμα κυματοειδών γραμμών, με διαφορετικά μήκη κύματος, πλάτη και φάσεις. Επειδή οι κυματοειδείς γραμμές που «χτίζουν» το προφίλ είναι πάρα πολλές και ουσιαστικά προστίθεται η μία στην άλλη, τα μεμονωμένα πλάτη κύματος δεν είναι μεγάλα. Αυτό περιγράφεται μαθηματικώς από το μετασχηματισμό Fourier.

Η δυναμική φασματική ανάλυση ( Power Spectral Density Analysis – PSD Analysis), δίνει την κατανομή ενός χαρακτηριστικού των κυματισμών από τους οποίους αποτελείται μία κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος (π.χ. υψομετρικές αποκλίσεις ή κλίση) σε σχέση με το μήκος κύματος (ή κυματικό αριθμό) των επιμέρους κυματισμών (Sayers and Karamihis, 1998).



**Εικόνα 3.1: Σύνθεση αρμονικών κυματισμών (Sayers and Karamihas, 1998)**

Αρχικώς, η δυναμική φασματική ανάλυση αναπτύχθηκε για τον χαρακτηρισμό των τάσεων. Αυτό υποδηλώνεται και από την ύπαρξη της λέξης “Power” στον όρο PSD. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε και στα οδοστρώματα. Διαφορές ανάμεσα στη δυναμική φασματική ανάλυση οδοστρωμάτων και τάσεων, είναι ότι η διακύμανση έχει μονάδες υψομετρικών αποκλίσεων αντί μονάδες τάσεων και ότι η κατανομή γίνεται για αριθμό κυμάτων (κύκλος/m) αντί για συχνότητα (κύκλος/sec). Δεδομένου λοιπόν ότι αντιπροσωπεύει τη δύναμη ανά μονάδα συχνότητας, οι διαστάσεις του πλάτους που προκύπτει μετά την εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης είναι δύναμη ( $\text{mm}^2$ ) διαιρεμένη από τον κύκλο/m, η οποία είναι  $\text{mm}^2 \text{ m/κύκλο}$  (Wang, 2006).

### 3.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μαθηματική περιγραφή των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος επιτυγχάνεται με το μετασχηματισμό Fourier. Επειδή όμως είναι δύσκολος

να υλοποιηθεί σε H/Y, λόγω του ότι η μεταβλητή της συχνότητας είναι συνεχής και το άθροισμα άπειρο, χρησιμοποιείται μια εναλλακτική αναπαράσταση του εν λόγω μετασχηματισμού, που ονομάζεται Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) (Loprencipe and Cantisani, 2013). Όπως φαίνεται και από το όνομα του, αυτή η ανάλυση βασίζεται στην παραδοχή ότι η συχνότητα είναι διακριτή μεταβλητή. Έστω  $Z_i(x)$  το καταμετρημένο προφίλ όπου  $i=0,1,2,\dots, N-1$ . Τότε έχουμε:

$$Z_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Z_i e^{-j\left(\frac{2\pi k}{N}\right)i}, \quad \text{όπου } j \text{ φανταστικός αριθμός, } j^2 = -1 \quad (3.1)$$

Το αποτέλεσμα του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier είναι μία σταθερού εύρους ζώνης στενή ζώνη φάσματος  $\Delta f$  με σύνθετες τιμές. Το φασματικό εύρος ζώνης  $\Delta f$  εξαρτάται από το διακριτό μήκος προφίλ  $L = (N-1) * \Delta x$  και ισούται με:

$$\Delta f = 1/L \quad (3.2)$$

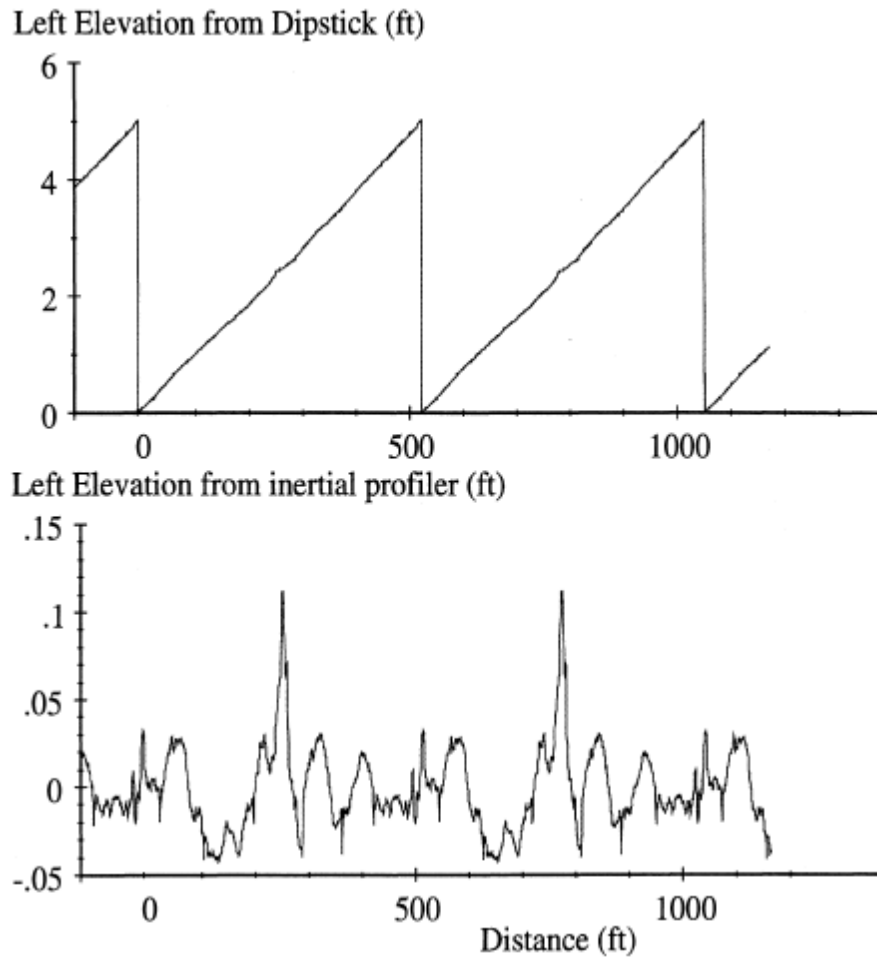
Η συνάρτηση δυναμικής φασματικής ανάλυσης λαμβάνεται διαιρώντας το τετραγωνισμένο εύρος της κάθε στενής ζώνης από το φασματικό εύρος ζώνης  $\Delta f$  σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Z_k^{PSD} = \frac{2 |Z_k|^2}{\Delta f}, \quad \text{για } k = 0, 1, \dots, \left(\frac{N}{2} - 1\right) \quad (3.3)$$

Το αποτέλεσμα είναι ένα φάσμα σταθερού εύρους ζώνης (Loprencipe and Cantisani, 2013).

### 3.3 Δυναμική φασματική ανάλυση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων

Ένα προφίλ κατασκευασμένο από ένα μικρό αριθμό ημιτονοειδών κυμάτων έχει σχεδόν ταυτόσημες τιμές στην αρχή και στο τέλος, και σχεδόν την ίδια κλίση. Ο μετασχηματισμός Fourier έχει μια παραδοχή ότι το προφίλ επαναλαμβάνεται τέλεια. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση των προφίλ των πραγματικών δρόμων. Για παράδειγμα, η Εικόνα 3.2 δείχνει πώς τα προφίλ από δύο διαφορετικές πηγές, θα φαίνονται πέρα από μία μετρημένη απόσταση, έστω 528 ποδιών (160.9 m). Στην πρώτη περίπτωση η επιφάνεια του οδοστρώματος δεν φιλτράρεται ενώ στη δεύτερη φιλτράρεται.



**Εικόνα 3.2:** Αφιλτράριστο και φιλτραρισμένο προφίλ οδοστρώματος(μορφές κυματισμών) μετά από εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier (Sayers and Karamihis, 1996)

Η υποτιθέμενη επανάληψη του σχήματος προφίλ προκαλεί μια τεχνητή ασυνέχεια στην αρχή και στο τέλος του μετρούμενου προφίλ. Εάν το προφίλ φιλτράρεται, προκειμένου να αποκλειστούν τα μεγάλα μήκη κύματος, οι ασυνέχειες θα μπορούσαν να είναι ήσσονος σημασίας. Ωστόσο, αφιλτράριστα προφίλ μπορεί να εισαγάγουν μια μεγάλη ασυνέχεια, όπως φαίνεται και στην εν λόγω απεικόνιση. Η τραχύτητα στο προφίλ είναι ελάχιστα ορατή, σε σύγκριση με ένα μεγάλο πριονωτό σχήμα προφίλ. Επειδή η ασυνέχεια συμβαίνει στην άκρη της μέτρησης, ονομάζεται συνήθως «επίπτωση άκρης» (edge effect). Τέλος, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην πρώτη περίπτωση το πλάτος κύματος είναι περίπου 4 πόδια (1,21 m), ενώ

στη δεύτερη περίπτωση μόνο 0,2 ft (0,061 m). Σαφώς λοιπόν, σε αφιλτράριστα δεδομένα αναμένονται υψηλότερα πλάτη κύματος (Sayers and Karamihas, 1996).

Υπάρχουν δύο μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη δυναμική φασματική ανάλυση για τη μείωση του φαινομένου των επιπτώσεων άκρης. Η μία είναι να υπολογιστεί η γραμμική εξέλιξη στο προφίλ με γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ υψομέτρου και απόστασης, και στη συνέχεια να αφαιρεθεί η τάση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «αφαίρεση της τάσης» (detrending). Η εν λόγω διαδικασία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην εξάλειψη της πριονωτής κυματομορφής. Εν τούτοις, όταν εφαρμόζεται σε ένα προφίλ με μια κάθετη καμπύλη, το προφίλ στο οποίο έχει γίνει αφαίρεση τάσης έχει ένα ιδιαίτερο παραβολικό σχήμα, το οποίο εισάγει ένα διαφορετικό είδος τεχνουργήματος στην υπολογιζόμενη συνάρτηση δυναμικής φασματικής ανάλυσης.

Μία άλλη μέθοδος είναι να «περιοριστούν» τα δεδομένα, το λεγόμενο “windowing”. (Το όνομα υπονοεί ότι τα δεδομένα περιορίζονται σε ό,τι μπορεί να φανεί μέσα από ένα μαθηματικό παράθυρο). Σε αυτή τη μέθοδο, μια μαθηματική συνάρτηση μορφοποίησης πολλαπλασιάζεται με τις τιμές της επιφάνειας του οδοστρώματος, προκειμένου να περιοριστούν οι υψομετρικές αποκλίσεις κοντά στα άκρα, αφήνοντας παράλληλα τις τιμές της οδοστρωματικής επιφάνειας ανέπαφες κοντά στο μέσο της. Μία από τις απλούστερες μαθηματικές συναρτήσεις που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο ονομάζεται κωνικό συνημίτονο.

Τέλος, για να μπορέσουν να συγκριθούν συναρτήσεις δυναμικής φασματικής ανάλυσης προφίλ οδοστρωμάτων, που αποκτήθηκαν από διαφορετικά όργανα μέτρησης, αναπτύχθηκε και μία άλλη συνάρτηση δυναμικής φασματικής ανάλυσης, η οποία χρησιμοποιεί μια διαδικασία που καλείται “drift removal”. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα (4) βήματα:

- Το προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων αντικαθίσταται με ένα προφίλ κλίσης, που λαμβάνεται σημείο προς σημείο αφαιρώντας τις υψομετρικές αποκλίσεις διαδοχικών τιμών και διαιρώντας με το διάστημα του δείγματος.
- Ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται στο προφίλ κλίσης.
- Τα πλάτη κυμάτων της δυναμικής φασματικής ανάλυσης διορθώνονται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πεπερασμένη διαφορά αλγορίθμου που χρησιμοποιείται στο βήμα 1, για τη μετατροπή σε μια συνάρτηση βασισμένη στις αρχικές μονάδες του προφίλ (π.χ.

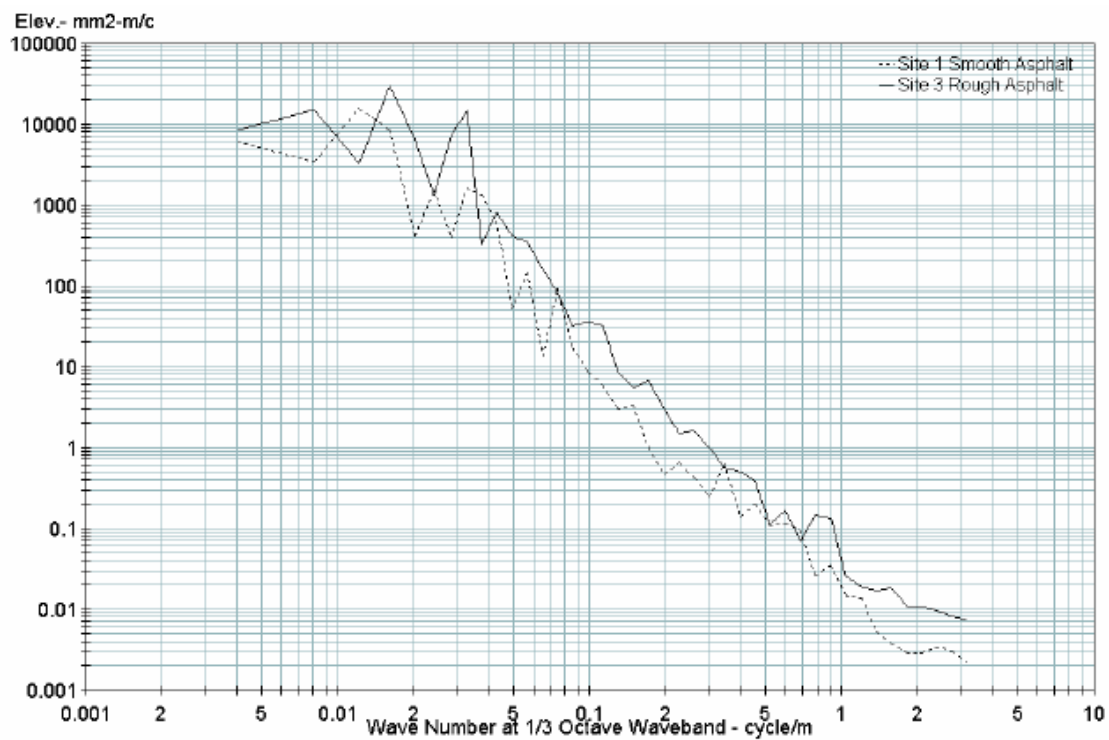
υπομετρικές αποκλίσεις). Ο συντελεστής διόρθωσης είναι μια συνάρτηση του αριθμού κύματος ( $\nu$ ).

$$\text{Συντελεστής διόρθωσης} = \frac{\Delta^2}{4 \sin(\pi \Delta \nu)^2}$$

- Από τα νούμερα που προκύπτουν ύστερα από το βήμα 3, υπολογίζεται ένας μέσος όρος.

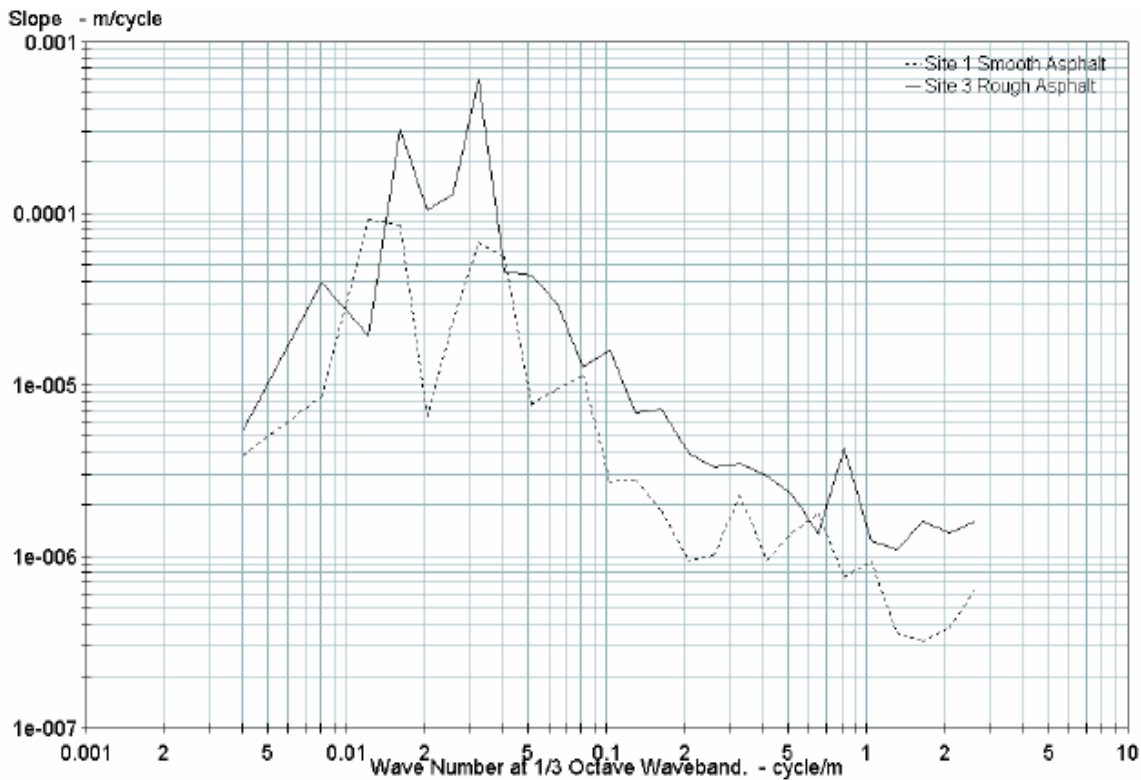
Η μέθοδος είναι αποτελεσματική επειδή οι επιπτώσεις άκρης είναι ασήμαντες όταν ένας μετασχηματισμός Fourier εκτελείται σε ένα δρομικό προφίλ κλίσης (Sayers and Karamihas, 1996). Επίσης, η χρησιμοποίηση του προφίλ κλίσης έναντι του προφίλ υπομετρικών αποκλίσεων ενδείκνυται επειδή το βασικό φάσμα του προφίλ κλίσης σε σχέση με τον αριθμό των κυμάτων είναι πιο ομοιόμορφο και δείχνει τις διαφορές στις ιδιότητες της υψής καλύτερα από το φάσμα για τις υπομετρικές αποκλίσεις. Όπως διαφαίνεται και στην Εικόνα 3.3, το εύρος της δυναμικής φασματικής ανάλυσης για τις υπομετρικές αποκλίσεις εκτείνεται σε 7 τάξεις μεγέθους. Επίσης στις υπομετρικές αποκλίσεις, τα πλάτη για μικρό αριθμό κυμάτων (μεγάλα μήκη κύματος) είναι πολύ υψηλότερα από ότι εκείνα για μεγάλο αριθμό κυμάτων (μικρά μήκη κύματος), που δείχνει ότι μεγάλα μήκη κύματος συνδέονται με μεγάλα πλάτη κύματος. Τα εξέχοντα μήκη κύματος που υπάρχουν στο προφίλ, εμφανίζονται ως δεσπόζουσες αιχμές στην απεικόνιση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης. Όπως επομένως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η μεγάλη διαφορά στο πλάτος μπορεί να περιπλέξει τη στατιστική ανάλυση.





**Εικόνα 3.3: Δυναμική φασματική ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων του προφίλ στις θέσεις 1 και 3 ( Hao Wang, 2006)**

Σε αντίθεση, η δυναμική φασματική ανάλυση του προφίλ κλίσης εκτείνεται μόνο σε 3 τάξεις μεγέθους (Εικόνα 3.4). Στη δυναμική φασματική ανάλυση του προφίλ κλίσης, η διάσταση της ανάλυσης είναι ακριβώς το αντίστροφο της συχνότητας, δηλαδή είναι m/κύκλο (Wang, 2006).



Εικόνα 3.4: Δυναμική φασματική ανάλυση των κλίσεων του προφίλ στις θέσεις 1 και 3 ( Hao Wang, 2006)

Το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την φασματική γραμμή ισούται με τη μέση τιμή του τετραγώνου (Mean Square: MS) του πλάτους των κυματισμών που διερευνώνται. Η τετραγωνική ρίζα της τιμής αυτής (Root Mean Square: RMS) μπορεί να αποτελέσει μέτρο έκφρασης της μεγαυφής και της ομαλότητας. Ο δείκτης RMS μπορεί να προκύψει τόσο από την εφαρμογή της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης σε προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων, οπότε εκφράζεται σε mm, όσο και από την εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης σε προφίλ κλίσεων, οπότε και είναι αδιάστατος. Για την αξιολόγηση της μεγαυφής μιας επιφάνειας ενός οδοστρώματος, γίνεται μελέτη των αντίστοιχων κυματισμών, μέσω της απομόνωσής τους από το σύνολο των κυματισμών του οδοστρώματος, εφαρμόζεται η δυναμική φασματική ανάλυση και κατόπιν, υπολογίζεται ο δείκτης RMS (slope ή elevation) ο οποίος χρησιμοποιείται ως δείκτης έκφρασης της μεγαυφής.

Η δυναμική φασματική ανάλυση επιτρέπει τη μελέτη των χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων και βοηθά στην ανίχνευση των μηκών κύματος του προφίλ της επιφάνειας

των οδοστρωμάτων που θεωρούνται υπεύθυνα για τα προβλήματα της τραχύτητας. Η γνώση της ύπαρξης ορισμένων μηκών κύματος μπορεί να οδηγήσει στην κατάλληλη μέθοδο συντήρησης και εργασιών επισκευής. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι βραχέα μήκη κύματος (λιγότερο από 3 m) είναι το αποτέλεσμα ανωμαλιών στα ανώτερα στρώματα του οδοστρώματος ενώ μεγάλα μήκη κύματος (10 m ή και περισσότερο) είναι το αποτέλεσμα ανωμαλιών στα χαμηλότερα στρώματα του οδοστρώματος (Dore, Flamand and Pascale, 2002).

Η σημασία της δυναμικής φασματικής ανάλυσης στην ανίχνευση των κυματισμών εκείνων που θεωρούνται υπεύθυνοι για τα προβλήματα της τραχύτητας, αποδεικνύεται και από το ρόλο της τραχύτητας στο φαινόμενο της υδρολίσθησης. Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ανάπτυξη δύναμης τριβής δίνει τη δυνατότητα στο όχημα όχι μόνο να πραγματοποιήσει πέδηση, αλλά και να επιταχύνει καθώς και να προβεί σε ελιγμούς. Αναφέρεται συνήθως σε υγρά οδοστρώματα, καθώς η πλειοψηφία των επιφανειών των οδοστρωμάτων παρέχει ένα ικανοποιητικό επίπεδο αντιολισθητικής ικανότητας όταν αυτά βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση. Συγκρίνοντας τη συμπεριφορά ενός οχήματος σε στεγνό οδόστρωμα με εκείνη σε βρεγμένο, παρατηρείται ότι στη δεύτερη περίπτωση το στρώμα νερού μεταξύ επιφάνειας οδοστρώματος και ελαστικού, δρα σαν «λιπαντικό» με αποτέλεσμα να μηδενίζεται ο συντελεστής τριβής και κατ' επέκταση η αντίσταση της επιφάνειας σε ολίσθηση, δηλαδή αναπτύσσεται το φαινόμενο της υδρολίσθησης. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η έγκαιρη γνώση της ύπαρξης ή μη τέτοιων κυματισμών θα οδηγήσει άμεσα σε διορθωτικές ενέργειες, προς αποφυγήν της δημιουργίας ενός τόσο επικίνδυνου φαινομένου.

## **4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

### **4.1 Στοιχεία ανάλυσης**

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία υψής από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα στοιχεία προέρχονταν από διάφορες μετρήσεις υψής, τόσο για το αριστερό, όσο και για το δεξί ίχνος τροχού, σε τμήμα σύγχρονου αυτοκινητοδρόμου ασφαλτικού τάπητα, μήκους 3 χιλιομέτρων. Στόχος της χρησιμοποίησης των στοιχείων αυτών είναι η αξιολόγηση της υψής τους συγκεκριμένου οδοστρώματος, η σύγκριση της υψής μεταξύ αριστερού και δεξιού ίχνους τροχού, η διερεύνηση της μεταβολής της με το χρόνο και τέλος, η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μακροϋψής και μεγαϋψής. Τα δεδομένα αφορούν μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε χρονικό διάστημα περίπου 4 χρόνων και πιο συγκεκριμένα η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε στις 5/2/2008 ενώ η τελευταία στις 14/3/2012.

### **4.2 Περιγραφή δεδομένων υψής**

Όπως προαναφέρθηκε, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν στοιχεία μετρήσεων υψής από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με το υψηλής τεχνολογίας προφιλόμετρο Laser Profiler (LP), του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Το LP καταγράφει τα χαρακτηριστικά των κατανομών της επιφάνειας του οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες κίνησης. Έχει ως βασική μονάδα μία δοκό στην οποία ενσωματώνονται τρεις έως πέντε ηλεκτρονικοί αισθητήρες (lasers). Η δοκός προσαρμόζεται στο πίσω μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος το οποίο κινείται σε συνήθεις ταχύτητες κυκλοφορίας (Λοΐζος κ.ά., 2005).

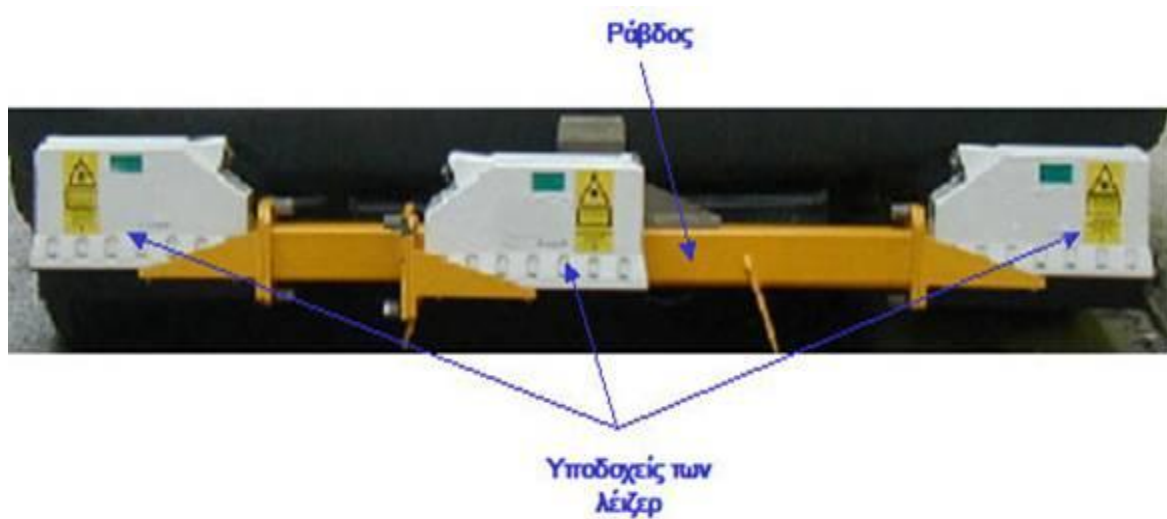
Το LP μετράει και καταγράφει ανά 50 mm κατά την κίνηση του οχήματος τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Την κατακόρυφη επιτάχυνση της δοκού (μέσω του επιταχυνσιόμετρου).

- Τον χρόνο και την απόσταση που καταγράφονται οι δύο προαναφερόμενες παράμετροι (μέσω του ταχύμετρου).



Εικόνα 4.1: Laser Profiler του εργαστηρίου οδοποιίας ΕΜΠ



Εικόνα 4.2: Δοκός και ενσωματωμένοι ηλεκτρονικοί αισθητήρες του Laser Profiler

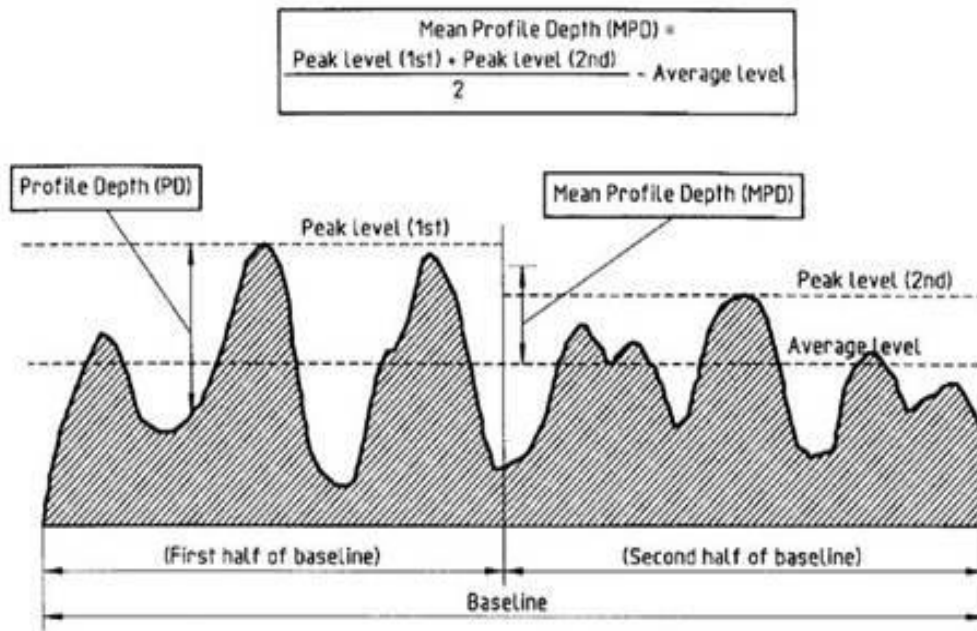
Η μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης με τους ηλεκτρονικούς αισθητήρες εμπεριέχει τόσο την αποτύπωση της μορφής της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος όσο και την κατακόρυφη κίνηση της δοκού, η οποία οφείλεται σε ενδεχόμενες αναπηδήσεις κατά την κίνηση του οχήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη δεύτερη παράμετρο μέτρησης, την κατακόρυφη επιτάχυνση, υπολογίζεται η κατακόρυφη θέση της δοκού σε κάθε σημείο μέτρησης επί της οδού. Συνδυάζοντας την κατακόρυφη θέση με τη σχετική μετατόπιση της δοκού επί της οδού προκύπτει η μορφή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος. Τα στοιχεία συλλογής αποθηκεύονται αυτόματα σε ειδική μονάδα Η/Υ που βρίσκεται στο όχημα. Γίνεται δε επεξεργασία των στοιχείων αυτών με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών (Λοΐζος κ.ά., 2005).

### **4.3 Επεξεργασία δεδομένων συλλογής**

#### *4.3.1 Επεξεργασία δεδομένων μακροϋφής*

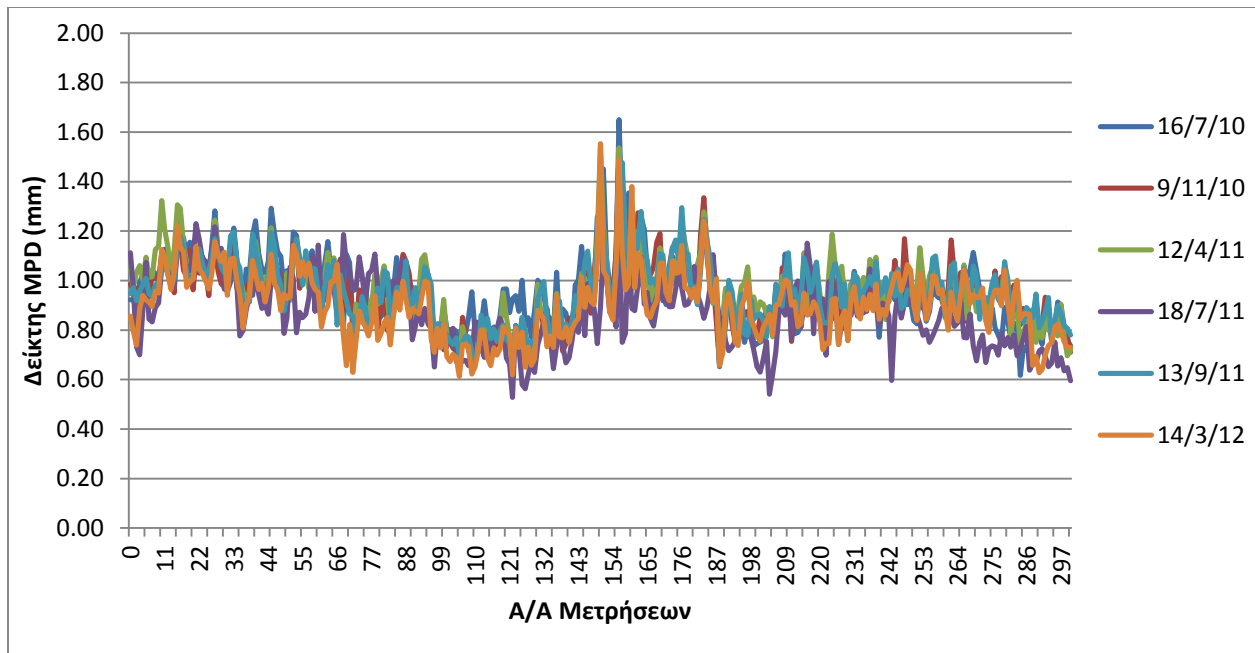
Όπως έχει προαναφερθεί, η μακροϋφή χαρακτηρίζεται με τη χρησιμοποίηση του δείκτη MPD. Κατά τη διάρκεια της καταγραφής της επιφάνειας του οδοστρώματος με το προφιλόμετρο υψηλής ταχύτητας, λαμβάνονται στοιχεία ανά 50 mm, τα οποία με κατάλληλη επί τόπου διεργασία σε ειδική μονάδα Η/Υ που βρίσκεται μέσα στο όχημα, δίνουν τις τιμές του δείκτη MPD για κάποιο μήκος αναφοράς, τόσο για το αριστερό όσο και για το δεξί ίχνος τροχού. Σημειώνεται ότι για τη συγκεκριμένη περίπτωση το μήκος αναφοράς είναι 10 μέτρα. Έτσι, για το εν λόγω συνολικό μήκος 3 χιλιομέτρων του σύγχρονου υπό εξέταση αυτοκινητοδρόμου, προκύπτουν 300 δείκτες MPD για το δεξί ίχνος και άλλοι 300 για το αριστερό ίχνος τροχού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις ημερομηνίες από 05/02/2008 έως 14/03/2008.

Ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται ο δείκτης MPD με βάση τον οποίο επεξεργάζονται τα δεδομένα που λαμβάνονται από το προφιλόμετρο φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος της τιμής του δείκτη MPD εξαρτάται από το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου ορυκτού αδρανούς που χρησιμοποιείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Aavik et al, 2014).

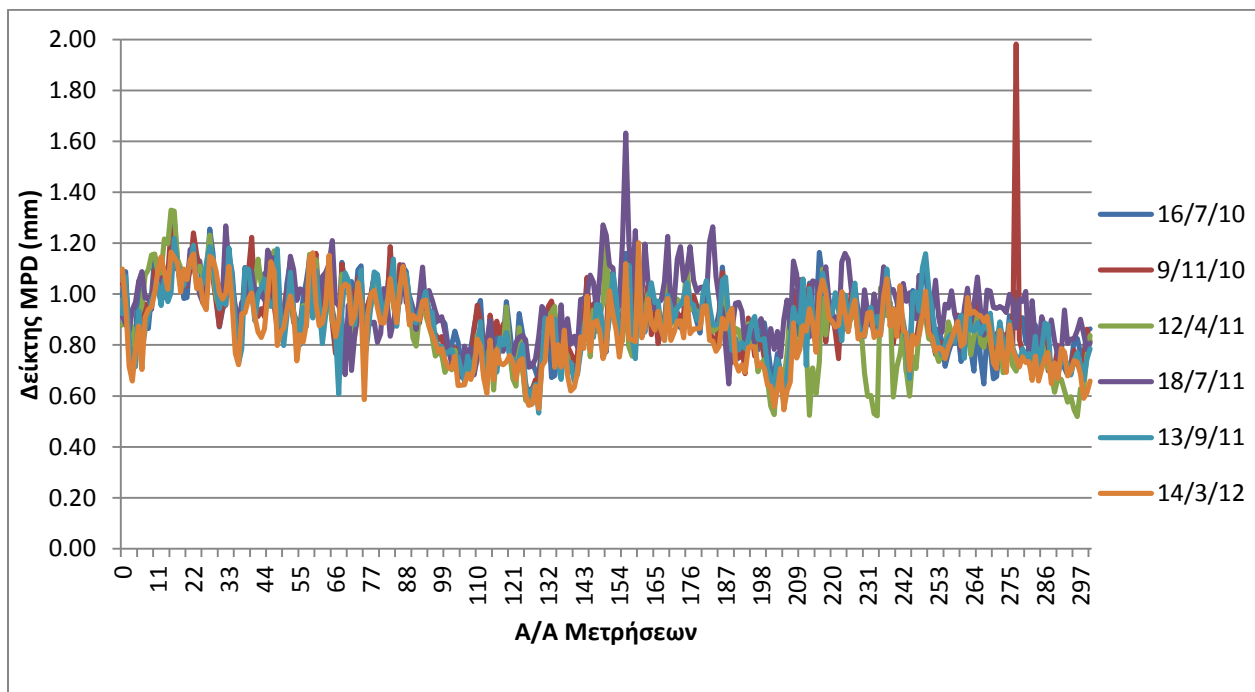


Εικόνα 4.3 : Προσδιορισμός του δείκτη MPD (Aavik et al, 2014)

Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.4 και 4.5, φαίνονται οι μετρήσεις του δείκτη MPD τόσο για το αριστερό όσο και για το δεξί ίχνος τροχού, για τις ημερομηνίες από 16/07/2010 έως 14/03/2010.



**Εικόνα 4.4: Μετρήσεις δείκτη MPD αριστερού ίχνους τροχού**



**Εικόνα 4.5: Μετρήσεις δείκτη MPD δεξιού ίχνους τροχού**

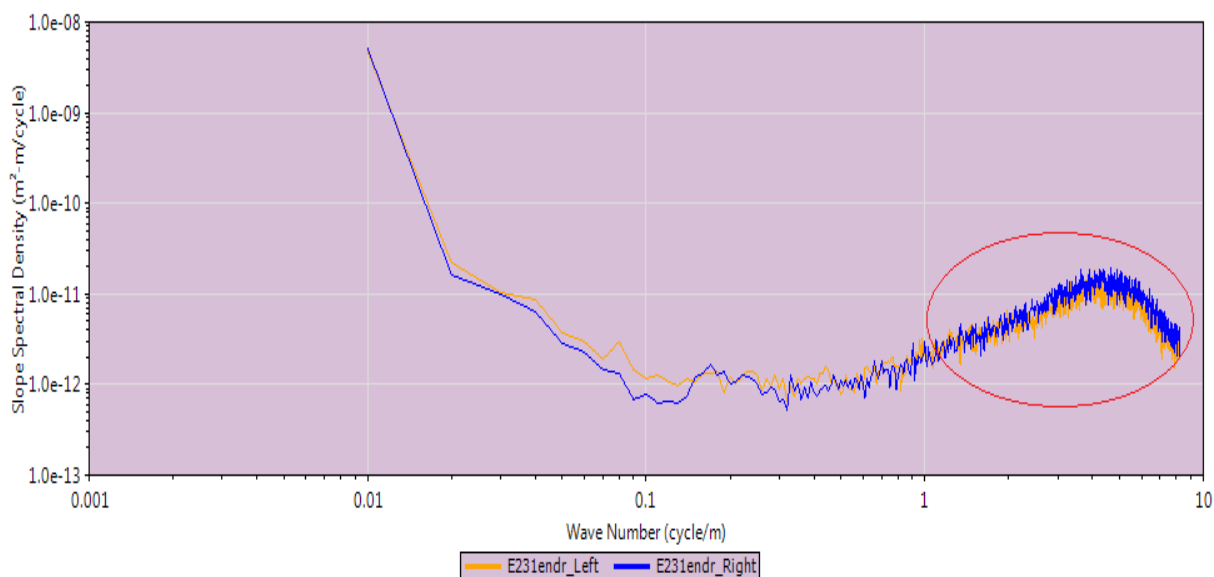


Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται μια πιο ομοιόμορφη κατανομή στις τιμές των μετρήσεων του αριστερού ίχνους τροχού από ότι του δεξιού, καθώς επίσης και μικρότερο εύρος τιμών για το αριστερό ίχνος από ότι για το δεξί.

#### *4.3.2 Επεξεργασία δεδομένων μεγαϋφής*

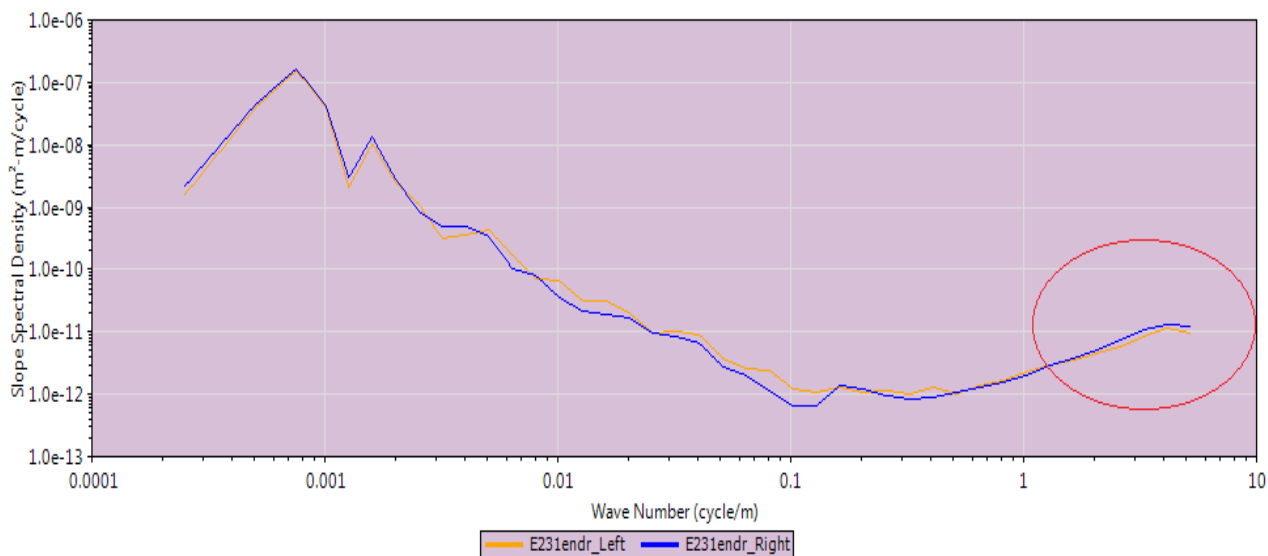
Για την αξιολόγηση της μεγαϋφής, μέσω της εφαρμογής της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (PSD), χρησιμοποιείται ο δείκτης RMS (Root Mean Square), όπως αυτός ορίζεται στο κεφάλαιο 3. Για τον υπολογισμό του, έγινε αξιοποίηση των δεδομένων που λήφθηκαν από την καταγραφή της επιφάνειας του υπό εξέταση οδοστρώματος με το προφίλόμετρο, και πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού ROADRUF, όπου εφαρμόστηκε η δυναμική φασματική ανάλυση και απομονώθηκαν οι κυματισμοί της μεγαϋφής, δηλαδή οι κυματισμοί από 50 mm μέχρι 500 mm. Επειδή η δυναμική φασματική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε προφίλ κλίσεων (slope) και όχι υψομετρικών αποκλίσεων (elevation), οι δείκτες RMS που προέκυψαν είναι αδιάστατοι. Η ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας ζώνες/οκτάβα και συγκεκριμένα 1/3 ζώνης οκτάβας για να οριστεί η απόσταση στους κυματαριθμούς.

Η επιλογή της ζώνης οκτάβας έγινε κατόπιν σχετικής διερεύνησης. Όταν η δυναμική φασματική ανάλυση υπολογίζεται με τη μέθοδο σταθερού εύρους ζώνης (δαστήματος), η απεικόνιση που θα προκύψει σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα θα δώσει μία οπτική εντύπωση, η οποία υπερτονίζει στις υψηλές συχνότητες τη διακύμανση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης. Αυτή η υπερτονισμένη διακύμανση δημιουργείται από την πραγματική κατανομή ισχύος και από την τυχαιότητα του λαμβανόμενου σήματος (Wang, 2006). Στην Εικόνα 4.6 η οποία απεικονίζει την εφαρμογή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης στο υπό εξέταση τμήμα σύγχρονου αυτοκινητοδρόμου μήκους 3 χιλιομέτρων τόσο για το αριστερό όσο και για το δεξί ίχνος τροχού και έγινε με βάση τα δεδομένα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις 03/05/2010 και για σταθερό διάστημα συχνοτήτων επαληθεύεται η προαναφερόμενη διαπίστωση.



**Εικόνα 4.6: Δυναμική φασματική ανάλυση των κλίσεων του προφίλ με σταθερό εύρος ζώνης.**

Έτσι γενικώς στις αναλύσεις της δυναμικής φασματικής ανάλυσης που αφορούν στοιχεία υφής, προτιμάται η μέθοδος εύρους ζώνης 1/3 οκτάβας (1/3 octave-band), ως το εύρος ζώνης συχνοτήτων, διότι δημιουργεί μια εξομάλυνση (smoothing effect) στην απεικόνιση της ανάλυσης και συνεπώς μειώνει τη διακύμανση στις υψηλές συχνότητες, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.7.



**Εικόνα 4.7: Δυναμική φασματική ανάλυση των κλίσεων του προφίλ με εύρος ζώνης 1/3 οκτάβας**

Τελικώς, οι δείκτες RMS που προέκυψαν με την εφαρμογή όλων των προαναφερόντων, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.1: Τιμές του δείκτη RMS μεγαϋφής**

<b>Ημερομηνία</b>	<b>Αναγωγή σε μήνες</b>	<b>RMS Αριστερό</b>	<b>RMS Δεξί</b>
<b>05/02/2008</b>	0	<b>0.00718</b>	<b>0.00843</b>
<b>29/07/2008</b>	6	<b>0.00736</b>	<b>0.00903</b>
<b>03/04/2009</b>	14	<b>0.00773</b>	<b>0.00882</b>
<b>16/07/2009</b>	18	<b>0.00794</b>	<b>0.00847</b>
<b>03/05/2010</b>	27	<b>0.00806</b>	<b>0.00901</b>
<b>16/07/2010</b>	30	<b>0.00787</b>	<b>0.00895</b>
<b>09/11/2010</b>	33	<b>0.00800</b>	<b>0.00883</b>
<b>12/04/2011</b>	39	<b>0.00817</b>	<b>0.00900</b>
<b>18/07/2011</b>	42	<b>0.00779</b>	<b>0.00903</b>
<b>13/09/2011</b>	44	<b>0.00781</b>	<b>0.00912</b>
<b>14/03/2012</b>	50	<b>0.00772</b>	<b>0.00870</b>

Όπως φαίνεται στον πίνακα, οι τιμές RMS που προκύπτουν είναι μικρές. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια του συγκεκριμένου οδοστρώματος, παρουσιάζει μικρά βάθη μεγαϋφής. Αυτό είναι θετικό, καθώς όσο μεγαλύτερα βάθη μεγαϋφής εμφανίζονται σε ένα οδόστρωμα, τόσο υποβαθμίζεται η επιφάνεια κύλισής του.

#### **4.4 Ανάλυση στοιχείων υφής**

Ύστερα από την επεξεργασία των στοιχείων συλλογής η οποία έγινε με τον τρόπο που αναφέρεται παραπάνω, πραγματοποιείται και η ανάλυση και σύγκριση των στοιχείων αυτών με

σκοπό τη διεξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων. Γενικά, η πορεία ανάλυσης που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η σύγκριση της μεταβολής των μετρήσεων των εκάστοτε δεικτών μακροϋφής και μεγαϋφής στο χρόνο, για το αριστερό και το δεξί ίχνος τροχού, καθώς και ο συσχετισμός των υπόψη μεγεθών.

#### 4.4.1 Ανάλυση και σύγκριση στοιχείων μακροϋφής

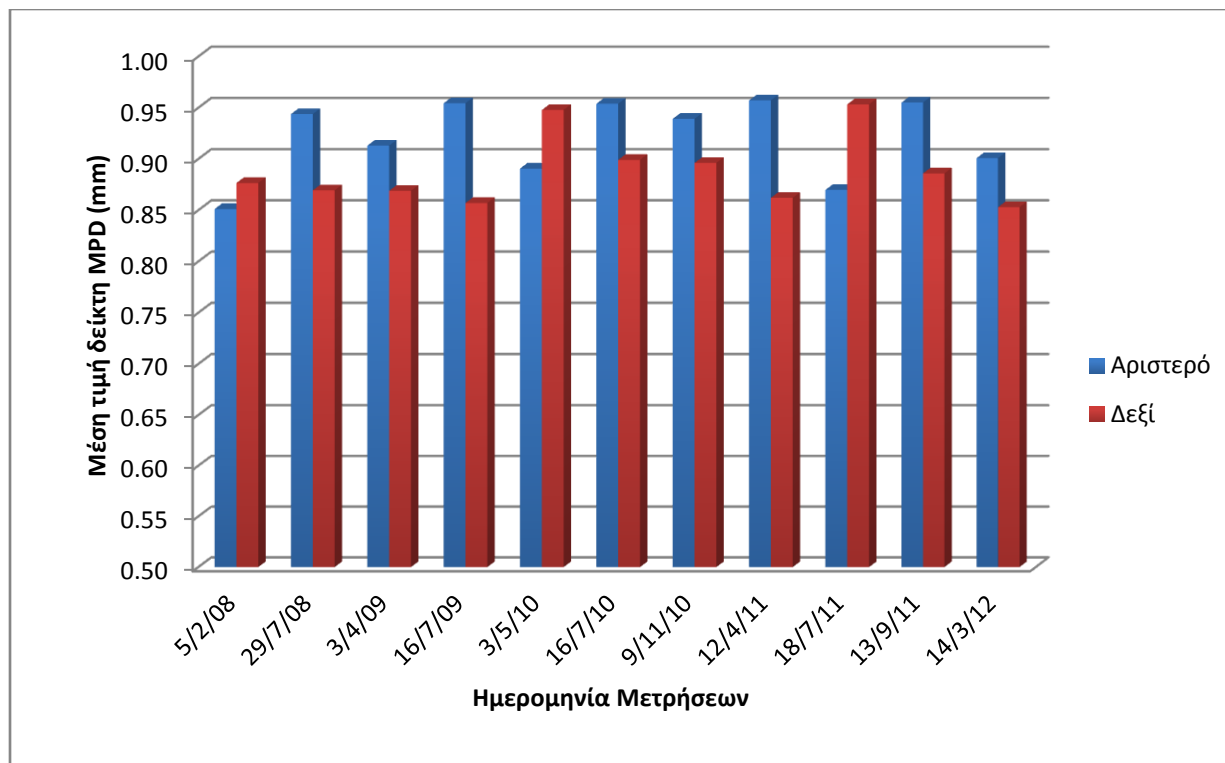
Για τα στοιχεία μακροϋφής, για την κάθε ημερομηνία διεξαγωγής μετρήσεων, καθώς το πλήθος των δεδομένων είναι μεγάλο, υπολογίστηκαν η μέση τιμή (average) των τιμών ανά ημερομηνία, για το αριστερό και το δεξί ίχνος τροχού, η αντίστοιχη τυπική απόκλιση (standard deviation), καθώς και ο συντελεστής μεταβλητότητας CV (coefficient of variation).

Η μέση τιμή ορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\mu = \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1),$$

όπου:  $x$  οι διάφορες τιμές των δεικτών MPD και  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.8 φαίνεται η μεταβολή των μέσων τιμών των δεικτών MPD, συναρτήσει του χρόνου και για τα δύο ίχνη τροχών.



Εικόνα 4.8: Χρονική μεταβολή μέσης τιμής δείκτη MPD μακροϋφής για αριστερό και δεξί ίχνος τροχού

Από την εικόνα του παραπάνω διαγράμματος, που πρόκειται για ένα συγκριτικό διάγραμμα, με μια πρώτη ματιά, παρατηρείται ότι όλες οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0,84 mm και 0,95 mm περίπου, ενώ παρατηρούνται αυξομειώσεις των τιμών χρονικά τόσο για το αριστερό, όσο και για το δεξί ίχνος τροχού.

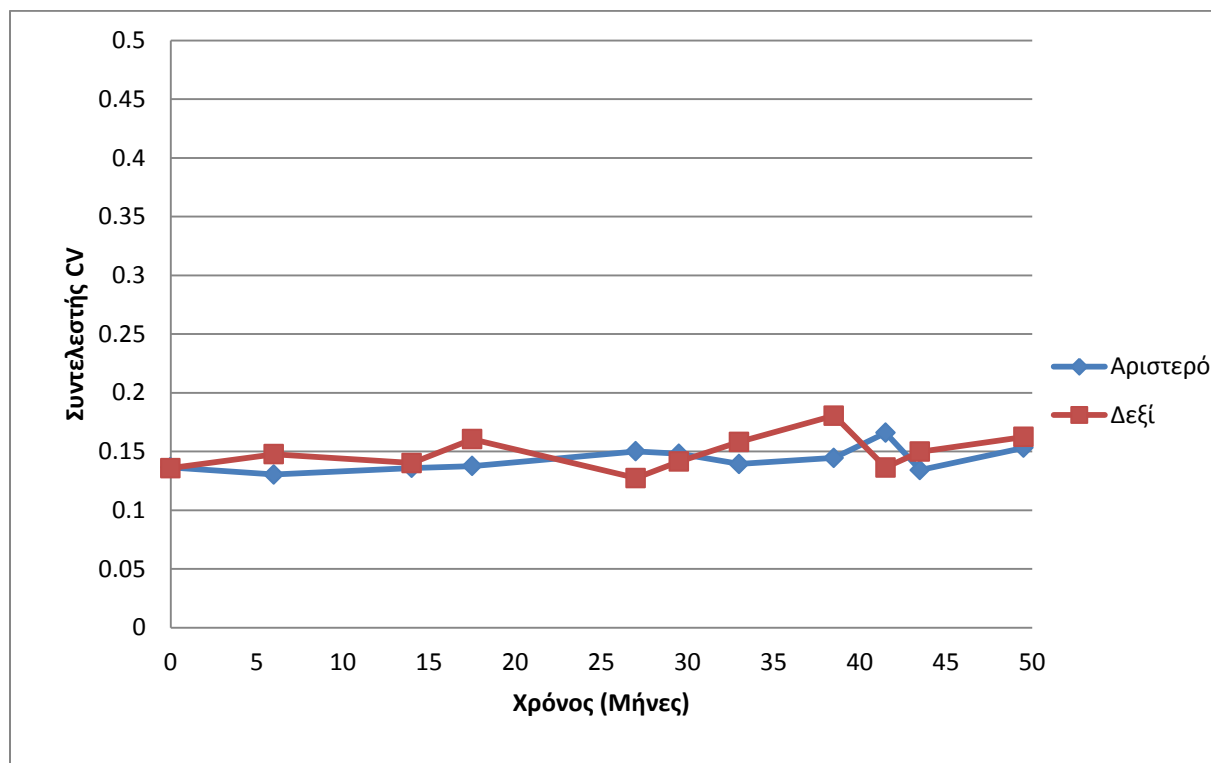
Η τυπική απόκλιση ορίζεται ως η θετική τιμή της ρίζας της διακύμανσης, σύμφωνα με τον τύπο:

$$S = \sqrt{S^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (4.2),$$

όπου  $\mu$  είναι η μέση τιμή των μετρήσεων.

Ο συντελεστής μεταβλητότητας ορίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης ως προς τη μέση τιμή, δηλαδή  $CV = S/\mu$  (4.3). Ο συντελεστής μεταβλητότητας μας δείχνει δηλαδή πόσο μεγάλη είναι η τυπική απόκλιση σε σχέση με τη μέση τιμή. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.9,

δίνεται η μεταβολή του συντελεστή μεταβλητότητας συναρτήσει του χρόνου, ο οποίος εκφράζεται σε μήνες.



Εικόνα 4.9: Χρονική μεταβολή συντελεστή CV για μετρήσεις μακροϋφής για αριστερό και δεξί ίχνος τροχού

Όπως παρατηρείται, το δεξί ίχνος τροχού παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις συντελεστή μεταβλητότητας από ότι το αριστερό ίχνος τροχού. Έτσι, υπάρχει μικρότερη μεταβολή της ομοιογένειας χρονικά στο αριστερό από ότι στο δεξί ίχνος τροχού. Επιπλέον, είναι φανερό ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας για καμία μέτρηση δεν ξεπερνά το 20 %, άρα η διακύμανση των τιμών αυτών ανά δείγμα είναι μικρή και συνεπώς ο μέσος όρος κρίνεται αντιπροσωπευτικός.

Η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρημένων τιμών του δείκτη MPD μακροϋφής για το κάθε ίχνος τροχού και για την εκάστοτε ημερομηνία παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2: Μέση τιμή, τυπική απόκλιση και συντελεστής μεταβλητότητας των μετρημένων τιμών του δείκτη MPD μακροϋφής, για αριστερό και για δεξί ίχνος τροχού.**

Μήνες	Αριστερό ίχνος τροχού			Δεξί ίχνος τροχού		
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής μεταβλητότητας	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής μεταβλητότητας
0	0.85	0.12	0.14	0.88	0.12	0.14
6	0.94	0.12	0.13	0.87	0.13	0.15
14	0.91	0.12	0.14	0.87	0.12	0.14
18	0.95	0.13	0.14	0.86	0.14	0.16
27	0.89	0.13	0.15	0.95	0.12	0.13
30	0.95	0.14	0.15	0.90	0.13	0.14
33	0.94	0.13	0.14	0.90	0.14	0.16
39	0.96	0.14	0.15	0.86	0.16	0.18
42	0.87	0.14	0.17	0.95	0.13	0.14
44	0.96	0.13	0.13	0.89	0.13	0.15
50	0.90	0.14	0.15	0.85	0.14	0.16

Πέραν όμως από τις παραπάνω παρατηρήσεις, ένας άλλος τρόπος σύγκρισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης η οποία εφαρμόζεται τόσο για τη συσχέτιση των τιμών μέτρησης και μεταβολής του χρόνου, όσο και για τη συσχέτιση των τιμών μέτρησης αριστερού και δεξιού ίχνους τροχού μεταξύ τους.

Ο προσδιορισμός της ευθείας της γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$y = \alpha + \beta x \quad (4.4), \quad \text{όπου:}$$

$\alpha$ : η τεταγμένη του σημείου στο οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα  $yy$

$\beta$ : η κλίση της ευθείας ή αλλιώς ο συντελεστής παλινδρόμησης

Οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (4.5) και (4.6) αντίστοιχα:

$$\beta = \frac{v \sum_{i=1}^v x_i y_i - (\sum_{i=1}^v x_i) (\sum_{i=1}^v y_i)}{v \sum_{i=1}^v x_i^2 - (\sum_{i=1}^v x_i)^2} \quad (4.5)$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (4.6)$$

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης  $r$ , δίνεται από τη σχέση (4.7):

$$r = \frac{v \sum_{i=1}^v x_i y_i - (\sum_{i=1}^v x_i) (\sum_{i=1}^v y_i)}{\sqrt{v \sum_{i=1}^v x_i^2 - (\sum_{i=1}^v x_i)^2} \sqrt{v \sum_{i=1}^v y_i^2 - (\sum_{i=1}^v y_i)^2}} \quad (4.7),$$

από τον οποίο προκύπτει ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  ο οποίος ισούται με το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης  $r$  μεταξύ των μεταβλητών  $x$  και  $y$ . Στις αναλύσεις μας θα χρησιμοποιήσουμε τον συντελεστή  $R^2$ .

Ο συντελεστής  $R^2$ , παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και του 1. Μάλιστα στις ακραίες περιπτώσεις που ισούται με 0 και με 1 αυτό ερμηνεύεται ως εξής:

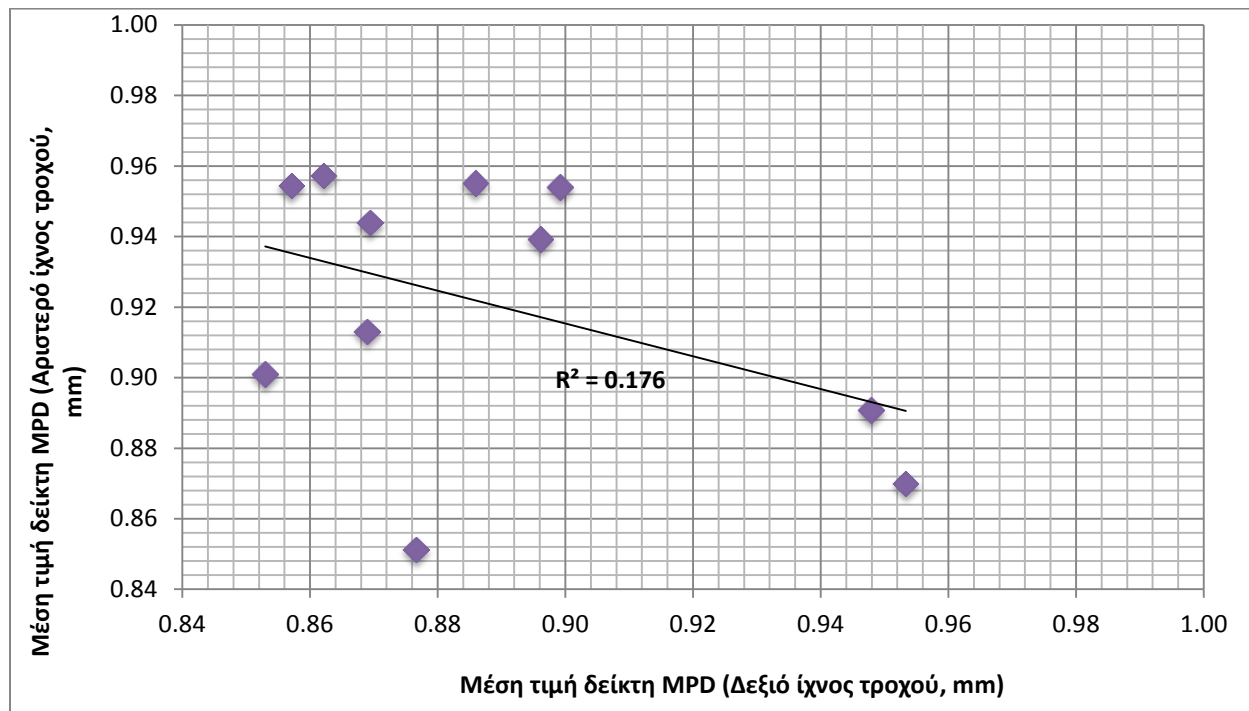
- Εάν  $R^2 = 0$ , η ερμηνευτική μεταβλητή  $x$ , εξηγεί μηδενικό ποσοστό της διακύμανσης της  $y$ .



- Εάν  $R^2 = 1$ , η ερμηνευτική μεταβλητή  $x$ , εξηγεί όλη τη διακύμανση της  $y$ .

Ουσιαστικά, ο συντελεστής προσδιορισμού δίνει το ποσοστό μεταβλητότητας των τιμών της μεταβλητής  $y$  που υπολογίζεται από τη μεταβλητή  $x$  (και αντίστροφα) κι είναι ένας χρήσιμος τρόπος να συνοψίσουμε τη συσχέτιση δύο μεταβλητών. Γενικώς ορίζεται ότι για τιμές του συντελεστή  $R^2 > 50\%$  τα στοιχεία θεωρούνται συσχετισμένα, ενώ για μικρότερες τιμές θεωρούνται ασυσχέτιστα.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.10 αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ των δύο ίχνων τροχών, η αντίστοιχη γραμμή τάσης και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ .



**Εικόνα 4.10: Γραμμική συσχέτιση μέσω των τιμών δεικτών MPD για αριστερό και δεξιό ίχνος τροχού.**

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι φανερό ότι μεταξύ των μέσων MPD αριστερού και δεξιού ίχνους δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση, το οποίο σημαίνει ότι ο τρόπος που μεταβάλλεται το ένα μέγεθος δεν επηρεάζει τον τρόπο που μεταβάλλεται το άλλο.

Όπως φαίνεται από τα προαναφερόμενα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των δεικτών MPD των δυο ίχνων τροχών έχει ήδη επιτευχθεί μέσω της παράθεσης του διαγράμματος στηλών (Εικόνα 4.8) αλλά και μέσω της εφαρμογής της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης για τα δυο ίχνη (Εικόνα 4.10). Όμως υπάρχει και μία άλλη μέθοδος σύγκρισης, προκειμένου να ελεγχθεί περαιτέρω πόσο σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ των μετρημένων τιμών αριστερού και δεξιού ίχνους τροχού. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων.

Στον στατιστικό έλεγχο t-test μας ενδιαφέρει να ελέγξουμε αν μία παράμετρος του πληθυσμού (για παράδειγμα η μέση τιμή ή η διακύμανση) ικανοποιεί μια υπόθεση έναντι μιας εναλλακτικής υπόθεσης. Αρχικά, διαμορφώνεται η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ), κατά την οποία η διαφορά των μετρημένων τιμών μέσων του αριστερού και του δεξιού δείκτη MPD ( $\mu_d$ ) είναι ίση με το μηδέν. Η εναλλακτική υπόθεση ( $H_1$ ) θεωρεί πως η παραπάνω διαφορά είναι διάφορη του μηδενός.

Προκειμένου να γίνει αποδεκτή η μηδενική υπόθεση πρέπει η κρίσιμη τιμή  $t_{critical}$  να είναι μεγαλύτερη από τη στατιστική τιμή  $t_{stat}$  της δοκιμής, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$|t_{stat}| < t_{critical} \quad (4.8),$$

ενώ ο στατιστικός έλεγχος γίνεται μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$t = \frac{\bar{x}_d - \mu_d}{s_d / \sqrt{n_d}} \quad (4.9), \text{ όπου:}$$

$\bar{x}_d$ : η μέση τιμή των διαφορών για κάθε ζεύγος τιμών

$S_d$ : η τυπική απόκλιση των διαφορών για κάθε ζεύγος τιμών και

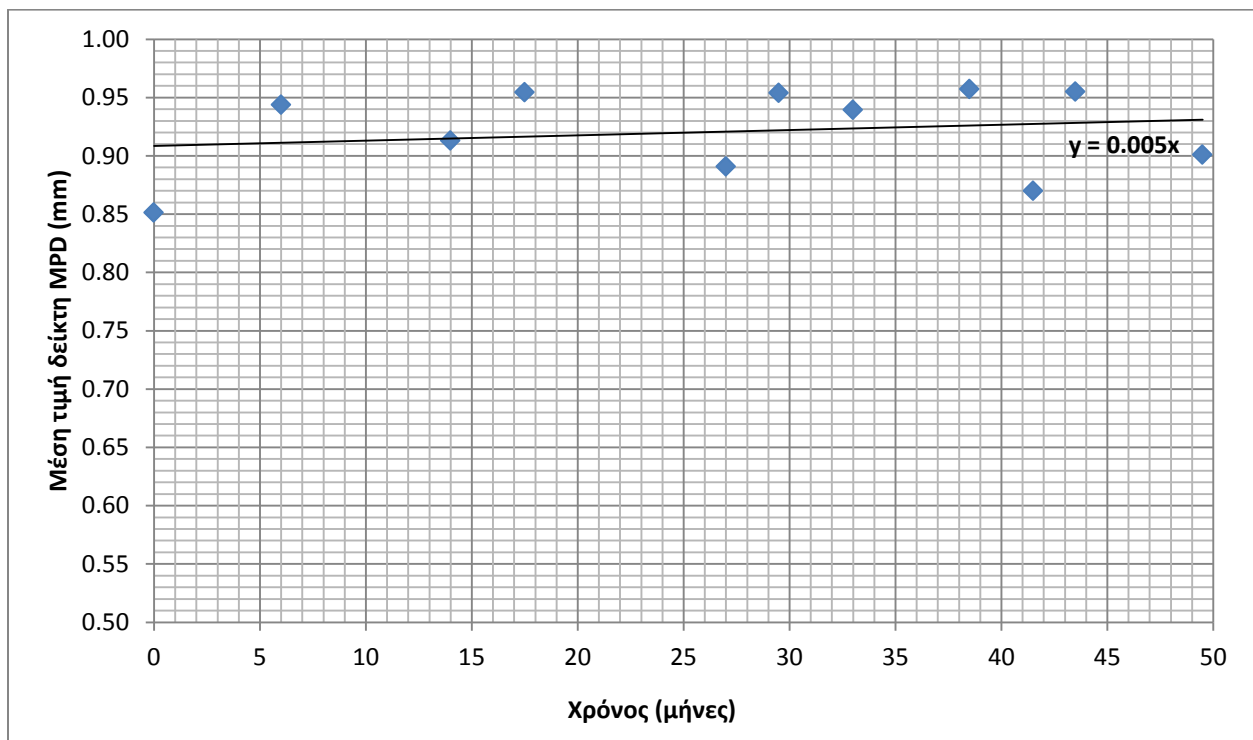
$n_d$ : το μέγεθος των κατά ζεύγη παρατηρήσεων

Όταν ισχύει η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ) η κατανομή της παραπάνω στατιστικής συνάρτησης είναι η t κατανομή (κατανομή student) με  $n - 1$  βαθμούς ελευθερίας.

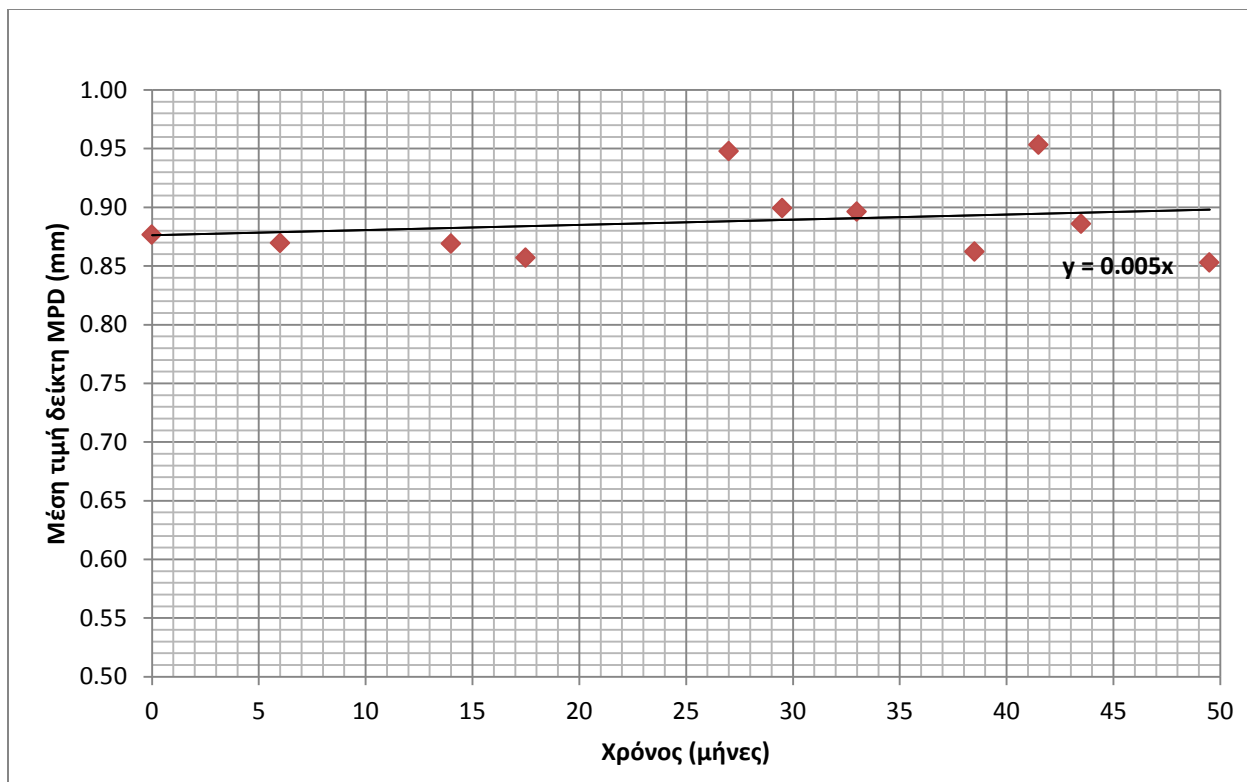
Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 10 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή  $t_{critical} = 2,228$ . Από τον έλεγχο προκύπτει πως η στατιστική τιμή ισούται με  $t_{stat}=1.782$ . Συνεπώς η στατιστική τιμή είναι μικρότερη από την κρίσιμη και κατά επέκταση η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή. Συνεπώς, φαίνεται πως οι διαφορές των μέσων των μετρήσεων των δεικτών MPD του αριστερού και του δεξιού ίχνους τροχού δεν είναι σημαντικές, άρα υπάρχει ομοιογένεια της μακροϋφής εγκάρσια στο οδόστρωμα.

#### 4.4.2 Διερεύνηση της εξέλιξης της μακροϋφής

Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.11 και 4.12 αποτυπώνεται η συσχέτιση του χρόνου με τις υπολογισμένες μέσες τιμές του δείκτη MPD μακροϋφής, η αντίστοιχη γραμμή τάσης και η κλίση της γραμμής αυτής.



**Εικόνα 4.11:** Γραμμική συσχέτιση χρονικής μεταβολής και μέσης τιμής δείκτη MPD μακροϋφής για αριστερό ίχνος τροχού.

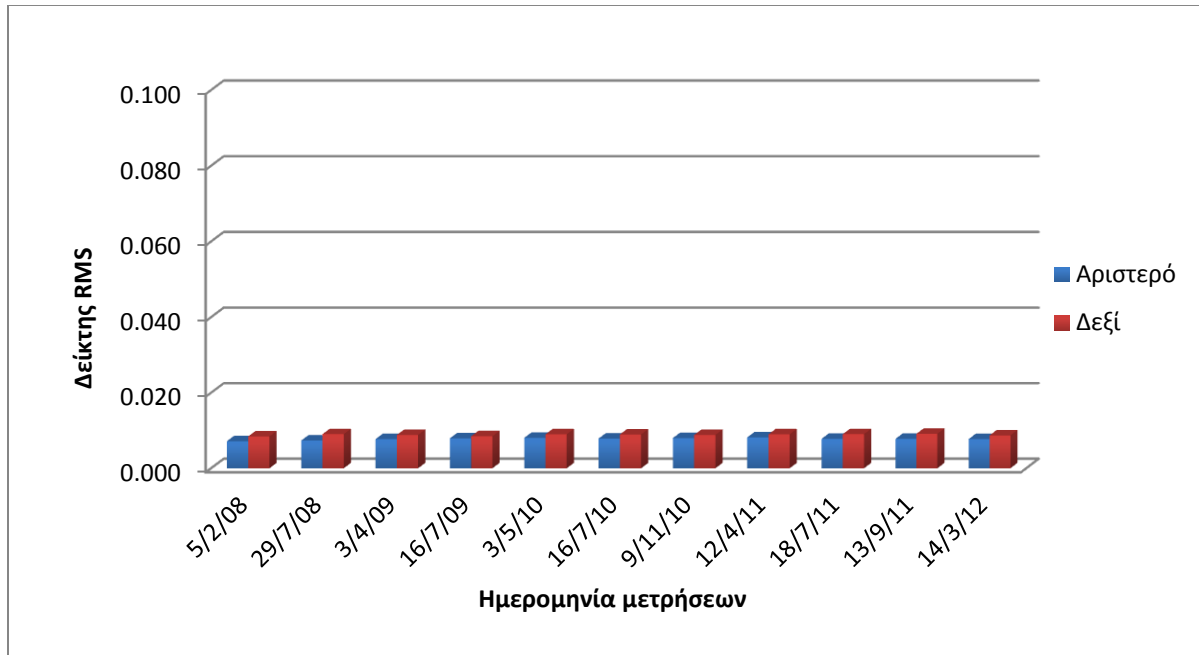


**Εικόνα 4.12:** Γραμμική συσχέτιση χρονικής μεταβολής και μέσης τιμής δείκτη MPD για δεξί ίχνος τροχού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι η κλίση της γραμμής τάσης είναι θετική (και συγκεκριμένα της τάξεως του 0,5%), δηλαδή οι μέσοι δείκτες MPD αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Συνεπώς δεν παρατηρείται υποβάθμιση της μακροϋφής στην επιφάνεια του οδοστρώματος, άρα πρακτικά θεωρείται αμετάβλητη.

#### 4.4.3 Ανάλυση και σύγκριση στοιχείων μεγαϋφής

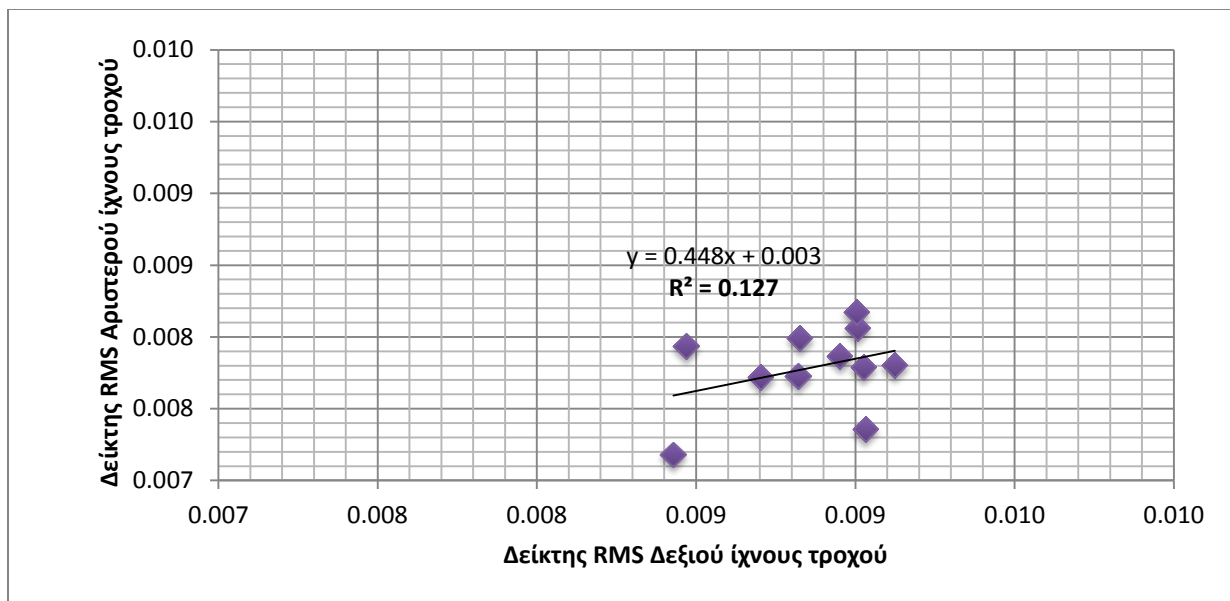
Έχοντας υπολογίσει τους δείκτες RMS των κλίσεων για τους κυματισμούς μεγαϋφής, πραγματοποιείται ανάλυση του σχετικού δείγματος των τιμών μεγαϋφής. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.13, φαίνεται η μεταβολή των δεικτών RMS για το δεξί και αριστερό ίχνος τροχού συναρτήσει του χρόνου.



**Εικόνα 4.13: Χρονική μεταβολή δείκτη RMS μεγαϋφής για αριστερό και δεξί ίχνος τροχού**

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα, στη μεγαϋφή παρατηρούμε ότι για όλες τις μετρήσεις οι τιμές του RMS για το δεξί ίχνος τροχού είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του αριστερού. Επίσης από μια πρώτη ματιά παρατηρείται ότι υπάρχει μια σταθερότητα των τιμών με το πέρασμα του χρόνου.

Για τη σύγκριση των στοιχείων θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, όπως έγινε και στη μακροϋφή. Τα στοιχεία της μεθόδου έχουν οριστεί εκτενώς παραπάνω. Έτσι, στο διάγραμμα της Εικόνας 4.15 αποτυπώνεται η συσχέτιση μεταξύ των δύο ιχνών τροχών, η αντίστοιχη γραμμής τάσης και ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ .



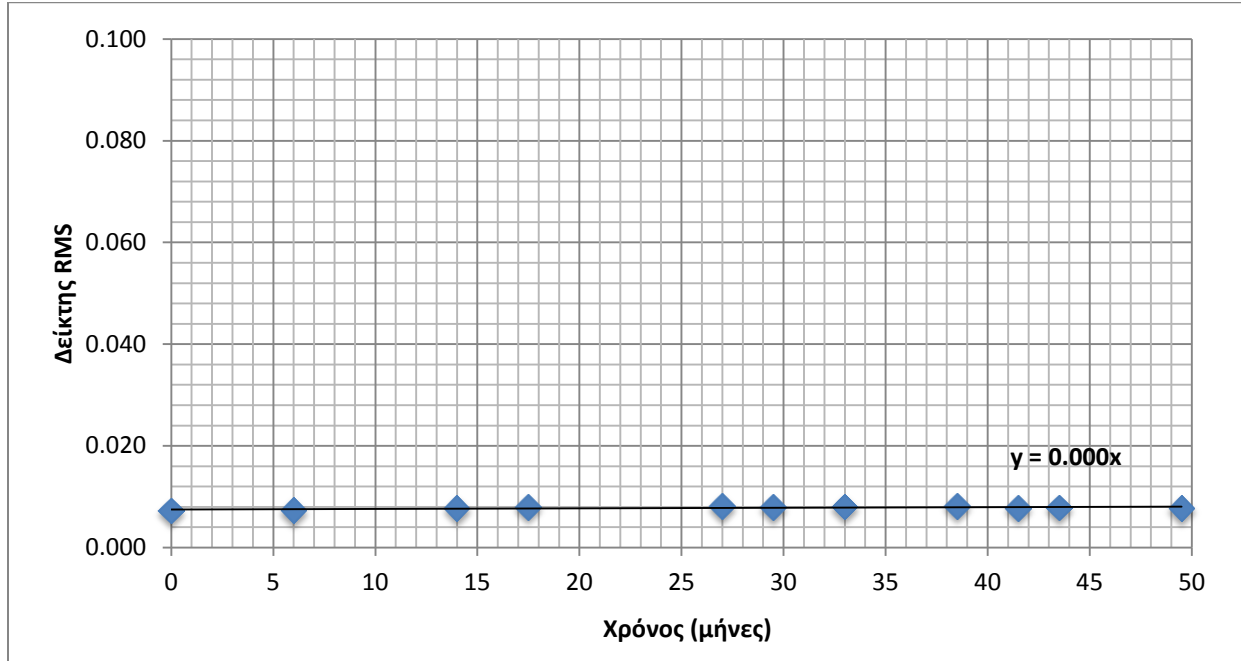
**Εικόνα 4.15: Γραμμική συσχέτιση δεικτών RMS μεγαϋφής για αριστερό και δεξί ίχνος τροχού.**

Από το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας γίνεται αντιληπτό ότι μεταξύ των δεικτών RMS αριστερού και δεξιού ίχνους τροχού δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση, το οποίο σημαίνει ότι ο τρόπος που μεταβάλλεται το ένα μέγεθος δεν επηρεάζει τον τρόπο που μεταβάλλεται το άλλο.

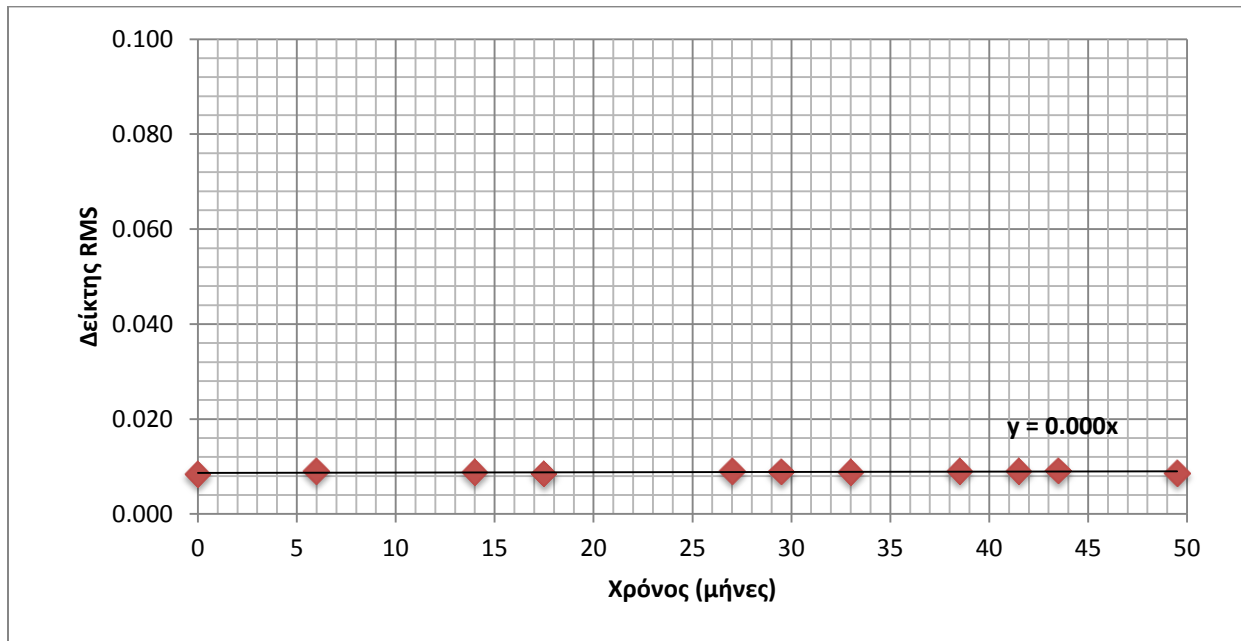
Αντίστοιχα με τη μακροϋφή, προκειμένου να ελεγχθεί περαιτέρω πόσο σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ των μετρημένων τιμών RMS αριστερού και δεξιού ίχνους τροχού θα εφαρμοστεί ο στατιστικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Η διαδικασία που ακολουθείται έχει αναφερθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Συνεπώς, εφαρμόζοντας τη σχέση 4.9, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 10 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή  $t_{critical} = 2,228$ . Από τον έλεγχο προκύπτει πως η στατιστική τιμή ισούται με  $t_{stat} = -11.752$ . Άρα, σύμφωνα και με τη σχέση 4.10, η στατιστική τιμή κατ' απόλυτη τιμή δεν είναι μικρότερη από την κρίσιμη και κατ' επέκταση η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή. Συνεπώς, φαίνεται πως οι διαφορές των μέσων των δεικτών RMS του αριστερού και του δεξιού ίχνους τροχού είναι σημαντικές.

#### 4.4.4 Διερεύνηση της εξέλιξης της μεγαϋφής

Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.16 και 4.17 αποτυπώνονται η συσχέτιση του χρόνου με τις υπολογισμένες τιμές του δείκτη RMS μεγαϋφής για το αριστερό και το δεξί ίχνος τροχού αντίστοιχα, η αντίστοιχη γραμμή τάσης και η κλίση της γραμμής αυτής.



Εικόνα 4.16: Γραμμική συσχέτιση χρονικής μεταβολής και δείκτη RMS μεγαϋφής για αριστερό ίχνος τροχού.

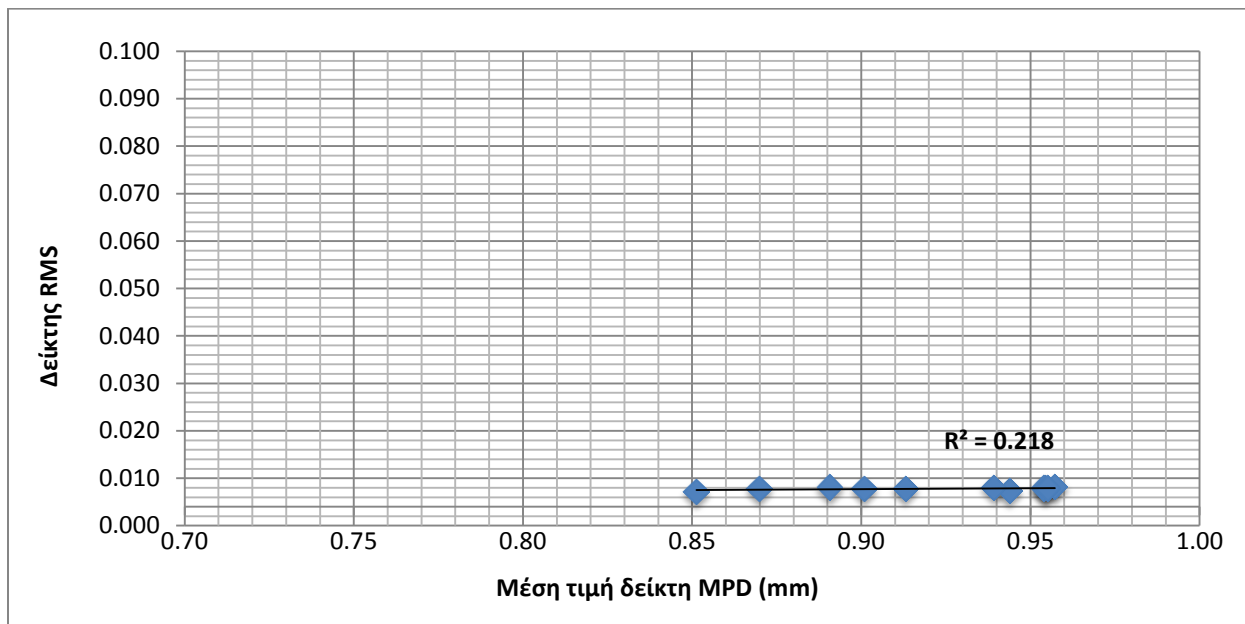


Εικόνα 4.17: Γραμμική συσχέτιση χρονικής μεταβολής και δείκτη RMS μεγαϋφής για δεξί ίχνος τροχού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι οι δείκτες RMS παραμένουν αμετάβλητοι με το πέρασμα του χρόνου, καθώς η κλίση της ευθείας και για τα δυο ίχνη τροχών είναι περίπου μηδενική.

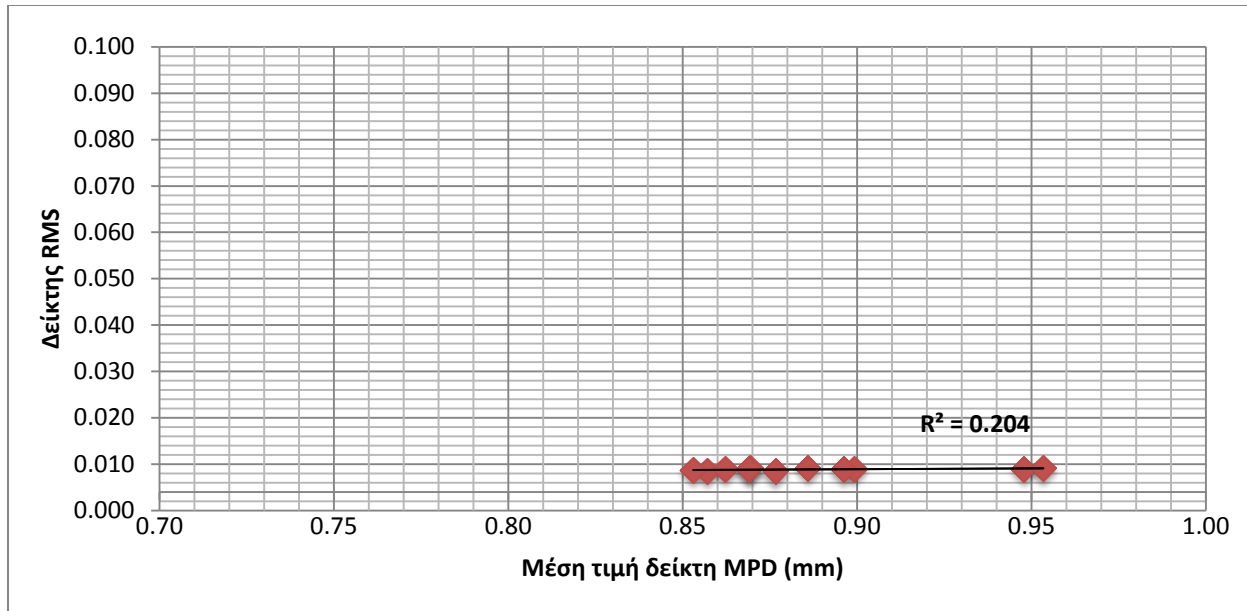
#### 4.4.5 Συσχετισμός στοιχείων μακροϋφής και μεγαϋφής

Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ μακροϋφής και μεγαϋφής αποτελεί το επόμενο βήμα για την ανάλυση. Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.18 και 4.19 φαίνεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μέσων δεικτών MPD μακροϋφής και RMS μεγαϋφής, τόσο για το δεξί όσο και για το αριστερό ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.18: Γραμμική συσχέτιση μέσω των τιμών δεικτών MPD μακροϋφής – δεικτών RMS μεγαϋφής για αριστερό ίχνος τροχού.





**Εικόνα 4.19:** Γραμμική συσχέτιση μέσω των τιμών δεικτών MPD μακροϋφής – δεικτών RMS μεγαϋφής για δεξί ίχνος τροχού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι τα υπόψη μεγέθη δεν εμφανίζουν συσχέτιση μεταξύ τους. Συνεπώς η μεταβολή του ενός μεγεθός δεν επιδρά στη μεταβολή του άλλου.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάλυση και αξιολόγηση της υφής ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα αξιοποιήθηκαν μετρήσεις υφής που πραγματοποιήθηκαν σε τμήμα σύγχρονου αυτοκινητοδρόμου ασφαλτικού τύπου, μήκους 3 χιλιομέτρων. Η έκφραση της μακροϋφής έγινε με τη μέση τιμή των δεικτών MPD ενώ της μεγαϋφής με το δείκτη RMS για το προφίλ κλίσεων των αντίστοιχων κυματισμών. Η ανάλυση των δεικτών MPD και RMS οδήγησε σε επιμέρους συμπεράσματα, όπως αναφέρονται ακολούθως.

Για το υπό διερεύνηση οδόστρωμα προκύπτει ότι παρά την αναμενόμενη φθορά το οποίο υπέστη με το πέρασμα του χρόνου, λόγω της χρησιμοποίησής του και των καιρικών συνθηκών, διαθέτει την απαραίτητη μακροϋφή για την ικανοποίηση των κρίσιμων παραγόντων που αυτή επηρεάζει. Η επίτευξη επαρκούς μακροϋφής οφείλεται τόσο στη χρησιμοποίηση αδρανών με υψηλή αντοχή στη λείανση και καλή απόδοση τριβής, όσο και στην καλή κατασκευή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Παρατηρείται ότι για τα στοιχεία μακροϋφής του αριστερού και του δεξιού ίχνους τροχού προκύπτει μη ύπαρξη μεταξύ τους συσχέτισης, συνεπώς η μεταβολή του ενός δεν επιδρά στην μεταβολή του άλλου. Παρά ταύτα, οι μεταξύ τους διαφορές δεν κρίνονται σημαντικές.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παρούσα εργασία, η ύπαρξη μεγαϋφής στο οδόστρωμα είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο θα πρέπει να αποφεύγεται και οφείλεται κυρίως στην υιοθέτηση κακών κατασκευαστικών πρακτικών και στη φθορά που αυτό υφίσταται με τη χρήση του. Για το υπόψη οδόστρωμα διασφαλίζονται μικρά επίπεδα μεγαϋφής. Για τα στοιχεία μεγαϋφής του αριστερού και του δεξιού ίχνους τροχού δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση στις μεταξύ τους μεταβολές. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών μεγαϋφής δεξιού και αριστερού ίχνους τροχού, ένδειξη ότι δεν υπάρχει ομοιογένεια της μεγαϋφής εγκάρσια στο δρόμο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαϋφή, εν αντιθέσει με τη μακροϋφή, είναι ένα μέγεθος το οποίο δεν προδιαγράφεται από την υπάρχουσα νομοθεσία και ενδεχομένως θα πρέπει να θεσπιστούν κάποια όρια μεγαϋφής, με στόχο την καλύτερη και ορθότερη αξιολόγησή της.

Συνοψίζοντας, το υπό διερεύνηση οδόστρωμα διαθέτει επαρκή μακροϋφή και χαμηλά επίπεδα μεγαϋφής. Μεταξύ των δύο κατηγοριών υφής, δεν παρουσιάζεται συσχέτιση, γεγονός που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση των δυο αυτών μεγεθών.

Τέλος, θα πρέπει να διερευνηθεί και το ενδεχόμενο εξέτασης ενός οδοστρώματος με υποδεέστερα ποιοτικά χαρακτηριστικά, το οποίο έχει υποστεί φθορές και έχουν μειωθεί τόσο η δομική, όσο και η λειτουργική επάρκειά του. Σε τέτοια περίπτωση, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ενδέχεται να αναδείξουν διαφορετικά στοιχεία και τρόπο μεταβολής των μεγεθών μακροϋφής και μεγαϋφής. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η γενική σύσταση αφορά στην αρχική κατασκευή του οδοστρώματος, με την οποία πρέπει να επιτυγχάνεται ένα υψηλό επίπεδο ποιότητας κύλισης. Αυτό σημαίνει, μεταξύ άλλων, επίτευξη επαρκούς βάθους μακροϋφής και ελαχιστοποίηση βάθους μεγαϋφής. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα συμβάλλουν στην εξασφάλιση σημαντικών ωφελών τόσο για τον Κύριο ή τον Διαχειριστή ενός Οδικού Έργου, όσο και για τον χρήστη και το περιβάλλον.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Aavik, A., Kaal, T., and Jentson, M., 2013. Use of pavement surface texture characteristics measurement results in Estonia. *28<sup>th</sup> International Baltic Road Conference*, Vilnius, Lithuania, 26-28 August 2013.

Alauddin, M.A., and Tighe, S.L., 2008. Incorporation of Surface Texture, Skid Resistance and Noise into PMS. *7<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavement Assets*, Calgary Alberta, Canada, 23-28 June 2008.

Bendtsen, H., 2004. *Rolling resistance, fuel consumption - a literature review*. Danish Road Institute, Technical note 23.

Bernhard, R., and Wayson, R., 2004. *An Introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement*. Asphalt Pavement Alliance.

Cerezo, V., and Gothie, M., 2008. Megatexture measurement with a non-contact profilometer : Accuracy of the method and parameters of influence. *87<sup>th</sup> Transportation Research Board (TBR)*, Washington DC, 13-17 January 2008.

Cairney, P., 2006. Macrotexture and Crash Risk – some recent findings from Australia and their implications, *22<sup>th</sup> ARRB Conference – Research into Practice*, Canberra, Australia.

Flintsch, W.G., et al, 2003. *Pavement Surface Macrotexture Measurement and Application*. Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C.

Hall, W.J., 2007. *Pavement texture and friction*. Presentation to: Swift, Applied Research Associates, INC.

Hanson, I.D, and Prowell, D.B., 2004. *Evaluation of circular texture meter for measuring surface texture of pavements*. NCAT Report No. 04-05, Nation Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama.

Loizos, A., and Plati, C., 2008. Evolution Process Of Pavement Roughness Evaluation Benefiting Fron Sensor Technology. *International journal on smart sensing and intelligent systems*, 1 (2), pp. 370-387.

Loprencipe, G., and Canticani, G., 2013. Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics. *Modern Applied Science*, 7 (8), pp. 1-14.

Meyer, W.E., and Reichert, J., 1990. *Surface characteristics of roadways: International Research and Technology*. 1rst ed. Baltimore: ASTM International

McLean, J., and Foley, G., 1998. *Road surface characteristics and condition: effects on road users*. ARRB Transport Research Lt, Research report ARR314, Vermond, South Victoria. Available from: <http://www.arrb.com.au/admin/file/content13/c6/ARR314%20Road%20surface%20characteristics.pdf>

Miller, T.D., 2012. Characterization of Surface Texture: Technology Update, 7<sup>th</sup> *Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Norfolk, Virginia, 19-22 September 2012

Panagouli, O.K., and Kokkalis, A.G., 1998. Skid Resistance and Fractal Structure of Pavement Surface. *Chaos, Solutions and Fractals*, 9 (3), pp. 493-505.

PIARC Technical committee on Surfave Characteristics (C1), 1995. *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*. Technical Report published by PIARC – World Association, France.

Rasmussen, R.O., 2013. Engineering smoother, safer, quieter pavements that also reduce gas consumption. *ceNEWS*, 25 (7), pp. 48-50.

Sakhaeifar, M.S., Liao, G., Waller, B., 2013. *Relationship between Tire-Pavement Interaction Noise and Surface Characteristics in 2009 Pavement Test Track Cycle*. Transportation Research Board Meeting, Washington, D.C., January 2013.

Sayers, W.M., and Karamihas, M.S., 1998. *The little book of profiling*. UMTRI, Michigan, USA

Sayers, W.M., and Karamihas, M.S., 1996. *Interpretation of road roughness profile data*. Final report, Federal Highway administration.

Slimane, A.B., et al., 2005. Characterization of road microtexture by means of image analysis. *10<sup>th</sup> International Conference Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, 4-7 July 2005, Saint Etien, France.

Smith, K.L., and Larson, R., 2011. Engineering Safer Road Surfaces to Help Achieve U.S. Highway Safety Goal. *3<sup>rd</sup> International Conference on Road Safety and Simulation*, 14-16 September 2011, Indianapolis, USA.

The contact patch. Transport technology from the ground up. Available from < <http://the-contact-patch.com/book/road/c1603-the-road-surface> >

Wang, H., 2006. *Road profiler performance evaluation and Accuracy criteria analysis*. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

Ευαγγελίδης, Δ., 2004. *Οδηγίες συντήρησης αυτοκινητοδρόμων-Κύρια συντήρηση οδοστρωμάτων*. Μέρος 1<sup>ο</sup>: Χαρακτηριστικά της Λειτουργικής και Δομικής Κατάστασης των Οδοστρωμάτων, Εγνατία Οδός Α.Ε.

Λοΐζος, Α., 2012. Σημειώσεις για το μάθημα *Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων*. Τεύχος Β: *Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Οδοστρωμάτων*. Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., και Κανελλαΐδης, Γ., 2005. Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών. *2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*, 18-20 Μαΐου, 2005, Βόλος.

Σαχπαζής, Κ., 1988. *Τεχνικογεωλογική έρευνα για αδρανή υλικά αντιολισθηρών οδοστρωμάτων*, Δακτυλογραφημένη Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.