



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

Ανάλυση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών ασφαλικών οδοστρωμάτων στην αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων



Παναγιώτα Κοντογιάννη

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας αλλά και για την συνολική καθοδήγηση και τις συμβουλές της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω, την κα. Μαρία Πομόνη, Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σε θέματα της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη συνολική της υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τους φίλους μου για όλες τις όμορφες στιγμές των φοιτητικών μου χρόνων κοντά τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αντίσταση κύλισης ή διαφορετικά η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα διανυόμενης απόστασης, λόγω της αλληλεπίδρασης ενός οχήματος με την επιφάνεια της οδού, συμβάλλει καθοριστικά στην επιδείνωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης με την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων. Οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για μεγάλο ποσοστό εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, γεγονός που επισημαίνει την αναγκαιότητα απομείωσης της αντίστασης κύλισης προς όφελος της κοινωνίας. Η αντίσταση κύλισης σχετίζεται άμεσα με το ελαστικό και παράλληλα με το οδόστρωμα, καθώς η αλληλεπίδραση τους οδηγεί σε σημαντικές απώλειες ενέργειας και αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος στην αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος και στις συνέπειες που επιφέρει στην αντίσταση κύλισης. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιούνται διαθέσιμα στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας Ε.Μ.Π, τα οποία αφορούν σε μετρήσεις ομαλότητας και υψής οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμων. Η επεξεργασία των στοιχείων πραγματοποιείται με τη χρήση επιλεγμένου αλγορίθμου πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης, κατόπιν συγκριτικής αξιολόγησης των διάφορων αλγορίθμων πρόβλεψης που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Μελετώνται οι διαφορές που προκύπτουν στην αντίσταση κύλισης για δύο ανεξάρτητα τμήματα οδοστρωμάτων με διαφορετική επιφανειακή κατάσταση και αξιολογούνται οι αντίστοιχες συνέπειες στην κατανάλωση καυσίμου, για διάφορες συνθήκες οδήγησης. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα για την επιρροή της επιφάνειας κύλισης στην ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης και τη συσχετιζόμενη κατανάλωση καυσίμου περιλαμβάνονται στα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας.

Λέξεις κλειδιά: αντίσταση κύλισης, οδόστρωμα, ελαστικό, χαρακτηριστικά στρώσης κυκλοφορίας, εκπομπή αέριων ρύπων, απώλειες ενέργειας, κατανάλωση καυσίμων

ABSTRACT

Rolling resistance or otherwise the energy consumed per unit of distance traveled due to the interaction of a vehicle with the road surface contributes to the deterioration of environmental pollution by increasing fuel consumption. Road transport is responsible for a large proportion of CO₂ emissions to the atmosphere, which points out the need to reduce rolling resistance for the benefit of society. The rolling resistance is directly related to the tire and the pavement, as their interaction results in significant energy losses and increased fuel consumption. The present thesis focuses on investigating the influence of pavement surface characteristics on the interaction between the tire and the pavement and its consequences on rolling resistance. To this end, data available from the NTUA Laboratory of Pavement Engineering database coming from roughness and texture measurements are used. The data are processed using a selected rolling resistance algorithm after benchmarking the various prediction algorithms recorded in the international literature. The differences in the rolling resistance of two separate sections of road surface with different surface conditions are studied and the corresponding effects on fuel consumption for different driving conditions are evaluated. The results and implications for the influence of the rolling surface on the development of rolling resistance and the related fuel consumption are included in the individual chapters of this thesis.

Key words: rolling resistance, road pavement, tire, characteristics of road surface, gas emission, energy losses, fuel consumption

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο έρευνας	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομή εργασίας	3
2. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΛΙΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	4
2.1 Γενικά στοιχεία	4
2.2 Παράγοντες επιρροής	7
2.2.1 Δομή ελαστικού.....	7
2.2.2 Συνθήκες λειτουργίας ελαστικού	12
2.2.3 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος.....	15
2.2.4 Καιρικές συνθήκες.....	21
2.3 Αίτια ανάπτυξης φαινομένου	23
2.3.1 Ενεργειακές απώλειες ελαστικού	23
2.3.2 Ενεργειακές απώλειες από την αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος	25
2.3.3 Ενεργειακές απώλειες στο οδόστρωμα	29
2.4 Αντίσταση κύλισης και περιβαλλοντικό αποτύπωμα	29
3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ	33
3.1 Πρακτικές μέτρησης	33
3.1.1 Εργαστηριακές μετρήσεις	33
3.1.2 Μέτρηση με ρυμουλκούμενο όχημα	34
3.1.3 Μέθοδος ακινητοποίησης οχήματος (coast-down method)	37
3.1.4 Έμμεσος προσδιορισμός από μετρήσεις κατανάλωσης καυσίμων	38
3.2 Αλγόριθμοι υπολογισμού.....	39
3.2.1 Γενικά.....	39
3.2.2 Ανασκόπηση αλγορίθμων	40
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	54
4.1 Περιγραφή στοιχείων επιφάνειας κύλισης.....	54
4.2 Διερεύνηση των αλγορίθμων πρόβλεψης	56
4.3 Διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών	60
4.4 Επίδραση παραμέτρων στην κατανάλωση καυσίμων	70

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	75
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1-Δυνάμεις που δρουν στο ελαστικό κατά την κύλιση του.....	4
Εικόνα 2.2-Δυνάμεις αντιστεκόμενες στην κίνηση του οχήματος	6
Εικόνα 2.3-Δομή ελαστικού (βασικά μέρη).....	7
Εικόνα 2.4-Τα δύο είδη σκελετών ενός ελαστικού	8
Εικόνα 2.5-Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με τη δομή του ελαστικού	10
Εικόνα 2.6-Διαμόρφωση συντελεστή αντίστασης κύλισης ανάλογα με τη διάμετρο του ελαστικού για δύο τάξεις ταχυτήτων (υψηλή και χαμηλή).....	11
Εικόνα 2.7-Αντίσταση κύλισης συναρτήσει του φορτίου και της πίεσης του ελαστικού	12
Εικόνα 2.8-Διαμόρφωση συντελεστή αντίστασης κύλισης συναρτήσει της ταχύτητας.....	13
Εικόνα 2.9-Επιρροή του συντελεστή αντίστασης κύλισης από τη θερμοκρασία ελαστικού.....	14
Εικόνα 2.10-Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές (προφίλ)	15
Εικόνα 2.11-Εύρος τιμών IRI σε σχέση με τον τύπο του οδοστρώματος και την ταχύτητα κίνησης	17
Εικόνα 2.12-Επιφανειακή υφή οδοστρώματος.....	18
Εικόνα 2.13 -Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με το βάθος υφής του οδοστρώματος	19
Εικόνα 2.14-Απώλειες υστέρησης σε ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα (αριστερά) και σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα (δεξιά) κατά τη δοκιμή FWD.....	20
Εικόνα 2.15-Φαινόμενο υστέρησης	23
Εικόνα 2.16-Υφή και ομαλότητα οδοστρώματος ανά μήκη κύματος και τα αναμενόμενα αποτελέσματα επιρροής	25
Εικόνα 2.17-Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με την υφή και την ομαλότητα	26
Εικόνα 2.18-Επιρροή της επιφάνειας του οδοστρώματος στην αντίσταση κύλισης	27
Εικόνα 2.19-Συνοπτική απεικόνιση των σχετικών με την παραμόρφωση του ελαστικού μηχανισμών που προκαλούν απώλειες ενέργειας	28
Εικόνα 2.20-Φάσεις και συστατικά του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος	30
Εικόνα 3.1-Τυπική διάταξη της μεθόδου μέτρησης με τύμπανο.....	33
Εικόνα 3.2-Εξοπλισμός μεθόδου μέτρησης με τύμπανο, εργαστήριο TUG (Technical University of Gdansk).....	34
Εικόνα 3.3-Ρυμουλκούμενο τρέιλερ TUG (Technical University of Gdansk)	36
Εικόνα 3.4 -Ρυμουλκούμενο τρέιλερ BASt (Federal Highway Research Institute of Germany)....	36

<i>Εικόνα 3.5-Τυπική συνεισφορά των διαφόρων συντελεστών στην αντίσταση της οδήγησης.....</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 4.1-Road Surface Profilometer (RSP) του ΕΜΠ.....</i>	<i>55</i>
<i>Εικόνα 4.2-Αντίσταση κύλισης για κάθε αλγόριθμο.....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4.3-Κατανομή συχνοτήτων αντίστασης κύλισης του δεδομένου τμήματος με τον αλγόριθμο N2.....</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4.4-Κατανομή συχνοτήτων αντίστασης κύλισης του δεδομένου τμήματος με τον αλγόριθμο N3.....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4.5-Τιμές υφής και διακύμανση για κάθε τμήμα.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4.6-Κατανομή συχνοτήτων υφής τμήματος Α.....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4.7-Κατανομή συχνοτήτων υφής τμήματος Β.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4.8-Τιμές ομαλότητας και διακύμανση για κάθε τμήμα.....</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4.9-Κατανομή συχνοτήτων ομαλότητας τμήματος Α.....</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 4.10-Κατανομή συχνοτήτων ομαλότητας τμήματος Β.....</i>	<i>67</i>
<i>Εικόνα 4.11-Διακύμανση των τιμών αντίστασης κύλισης με τον αλγόριθμο N3.....</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 4.12-Μεταβολή της αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας στο τμήμα Α.....</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 4.13-Μεταβολή της αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας στο τμήμα Β.....</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 4.14-Επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην κατανάλωση καυσίμου.....</i>	<i>72</i>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1-Τιμές της παραμέτρου K_{cr2}	49
Πίνακας 3.2-Παράμετροι της αντίστασης κύλισης της επιφάνειας CR2.....	50
Πίνακας 4.1-Αντίσταση κύλισης που προκύπτει για το ίδιο τμήμα με χρήση διαφορετικού αλγορίθμου	56
Πίνακας 4.2-Ταξινόμηση των οδικών συνδέσεων σε τάξεις βάσει του μέσου βαθμού καμπυλότητας (ADC) και της κατά μήκος κλίσης (RF).....	71
Πίνακας 4.3-Μέσος όρος του μέσου βαθμού καμπυλότητας ADC (rad/km).....	71
Πίνακας 4.4-Μέσος όρος της κατά μήκος κλίσης RF (m/km).....	72

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο έρευνας

Η αντίσταση κύλισης των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα φαινόμενο, το οποίο συγκεντρώνει τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών. Πλέον είναι ευρέως αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι η αντίσταση κύλισης σχετίζεται άμεσα με τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την οικονομία, καθώς αυξάνει την κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων και κατ'επέκταση τους εκπεμπόμενους αέριους ρύπους στην ατμόσφαιρα. Ο τομέας των μεταφορών, μάλιστα, αποτελεί μία από τις ισχυρότερες πηγές εκπομπής αερίων ανάμεσα σε όλους τους τομείς της οικονομίας και ευθύνεται για πάνω από το 30% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι οδικές μεταφορές ειδικότερα ευθύνονται για την συντριπτική πλειοψηφία των εκπομπών αυτών (Araujo, et al., 2019). Έτσι, καθώς η κλιματική αλλαγή αποτελεί ένα από τα μείζονα ζητήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η σύγχρονη κοινωνία, η αντίσταση κύλισης αποτελεί βασικό αντικείμενο πρόσφατων ερευνών, με σκοπό την απομείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών και την οικονομικότερη οδήγηση από άποψη κατανάλωσης καυσίμων.

Αν και στο παρελθόν η ανάπτυξη του φαινομένου της αντίστασης κύλισης συσχετιζόταν αποκλειστικά και μόνο με τις ιδιότητες του ελαστικού, πλέον έχει αποδειχθεί ότι το οδόστρωμα διαδραματίζει εξίσου καθοριστικό ρόλο. Καθίσταται σαφές πια ότι η αντίσταση κύλισης αναπτύσσεται και επηρεάζεται από μια ποικιλία παραγόντων με κυρίαρχη την επίδραση των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων και κυρίως της ομαλότητας και της υφής. Δεδομένης λοιπόν της αλληλεπίδρασης του ελαστικού με την επιφάνεια κύλισής του και της άμεσης εξάρτησης της αντίστασης κύλισης από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη φιλικότερων προς το περιβάλλον συστημάτων μεταφορών έγκειται σε μεγάλο βαθμό στη βελτιστοποίηση της κατασκευής των οδοστρωμάτων. Για τον λόγο αυτό, σε διάφορες έρευνες (Karlsson, et al., 2011; Sandberg, et al., 2011; Chatti & Zaabar, 2012; Hammarström, et al., 2012) έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης συσχετίζοντας την με επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

Ωστόσο, για τη βαθύτερη κατανόηση της επιρροής της επιφανειακής κατάστασης των οδοστρωμάτων στην αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων, θεωρείται απαραίτητη η επιπρόσθετη διερεύνηση του τρόπου αλληλεπίδρασης των δύο μερών που μετέχουν στο φαινόμενο (Jackson, et al., 2011; Sandberg, et al., 2011). Καθώς οι παράμετροι της υφής και της ομαλότητας των οδοστρωμάτων αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους επιρροής της αντίστασης κύλισης όσον αφορά στο οδόστρωμα, ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί στη διερεύνηση του βαθμού επιρροής τους και στη συσχέτιση τους με το φαινόμενο, αποσκοπώντας αφενός στην κατασκευή βιωσιμότερων οδοστρωμάτων και αφετέρου, στην απομείωση των επιπτώσεων που επιφέρουν στο περιβάλλον κατά τον κύκλο ζωής τους.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης των επιφανειακών χαρακτηριστικών των ασφαλικών οδοστρωμάτων στην αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων. Η διερεύνηση περιλαμβάνει αφενός ενδελεχή ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη μελέτη του φαινομένου της αντίστασης κύλισης, συμπεριλαμβανομένων των τρόπων/μεθόδων μέτρησης ή εκτίμησής της και αφετέρου, στοχευμένες πειραματικές αναλύσεις. Για τις τελευταίες, θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν σε μετρήσεις ομαλότητας και υφής οδοστρωμάτων σε τμήματα αυτοκινητοδρόμων και θα αξιοποιηθούν προκειμένου να διερευνηθούν τα εξής:

- 1) Η καταλληλότητα των διαφόρων αλγορίθμων για την καλύτερη εκτίμηση της αντίστασης κύλισης.
- 2) Η επίδραση ενός υποβαθμισμένου οδοστρώματος, όσον αφορά στην επιφανειακή του κατάσταση, στην ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης.
- 3) Η επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμων.
- 4) Η σημασία των γεωμετρικών συνθηκών μιας οδού για την κατανάλωση καυσίμων.

Τα σχετικά αποτελέσματα αξιολογούνται με γνώμονα τις ανάγκες που προκύπτουν από την εξέλιξη των τεχνολογιών στον τομέα των οδικών μεταφορών και οι οποίες αφορούν στη βελτίωση των επιμέρους δομών των έργων συγκοινωνιακής υποδομής, όπως είναι το οδόστρωμα.

1.3 Δομή εργασίας

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

Στο **κεφάλαιο 2**, κατόπιν ενδελεχούς ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τη δημιουργία του φαινομένου της αντίστασης κύλισης και τις διάφορες παραμέτρους επιρροής.

Στο **κεφάλαιο 3**, περιγράφονται οι μέθοδοι μέτρησης και οι αλγόριθμοι υπολογισμού της αντίστασης κύλισης που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διεξαγωγή διαφόρων ερευνητικών προγραμμάτων.

Το **κεφάλαιο 4** αφορά στην επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων στο πλαίσιο της πειραματικής διερεύνησης. Πραγματοποιείται εκτενής περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων στην αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων.

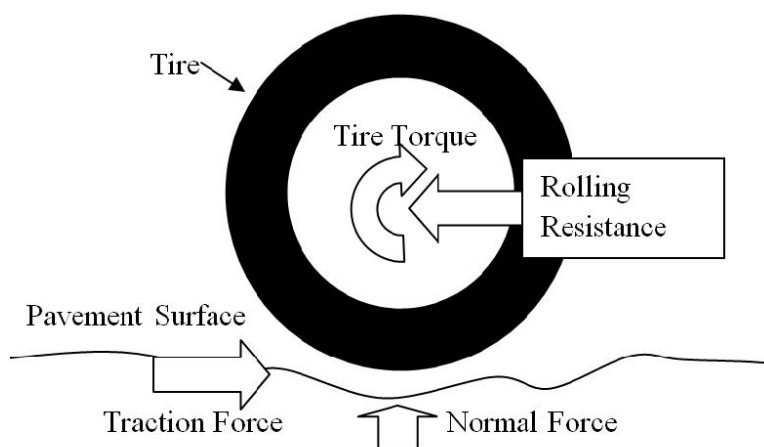
Στο **κεφάλαιο 5**, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 6**, παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΛΙΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Γενικά στοιχεία

Ως αντίσταση κύλισης ορίζεται η απώλεια ενέργειας (ή ενέργεια που καταναλώνεται) ανά μονάδα διανυόμενης απόστασης (Sandberg, et al., 2011), εξαιτίας της αλληλεπίδρασης ενός οχήματος με την επιφάνεια της οδού και επηρεάζεται άμεσα από τις ιδιότητες του ελαστικού και τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια κύλισης. Οι απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν αφορούν κυρίως στο ελαστικό και οφείλονται στις μεταβαλλόμενες τάσεις και παραμορφώσεις που παρατηρούνται σε αυτό κατά την κύλιση, καθώς το πέλμα εισέρχεται και εξέρχεται από την επαφή με το οδόστρωμα. Σε μικρότερο βαθμό, οι απώλειες ενέργειας σχετίζονται με την παραμόρφωση του οδοστρώματος. Για σταθερή ταχύτητα, η δύναμη αντίστασης κύλισης ισούται με τη δύναμη πρόσφυσης (traction force) μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού. Η δύναμη της αντίστασης κύλισης παράγει ροπή αντίθετης κατεύθυνσης από την επιθυμητή κατεύθυνση κίνησης του οχήματος (**Εικόνα 2.1**) (Jackson, et al., 2011).



Εικόνα 2.1-Δυνάμεις που δρουν στο ελαστικό κατά την κύλισή του
Πηγή: (Jackson, et al., 2011)

Ο συντελεστής αντίστασης κύλισης ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (Mukherjee, 2014):

$$C_{rr} = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

όπου:

C_{rr} : ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης κύλισης, F : η δύναμη αντίστασης κύλισης (N), N : η κάθετη δύναμη (N) στην επιφάνεια κύλισης του ελαστικού, δηλαδή το φορτίο που δέχεται το ελαστικό.

Ο συντελεστής αντίστασης κύλισης εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές όπως η πίεση του ελαστικού, η θερμοκρασία του, η ταχύτητα του οχήματος, τα διαστασιολογικά στοιχεία του τροχού και οι συνθήκες επιφάνειας της οδού.

Η αντίσταση κύλισης έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων και την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου με επικρατέστερο ρύπο το διοξείδιο του άνθρακα. Η μείωση της αντίστασης κύλισης μπορεί να οδηγήσει σε σχετικά μικρές αλλαγές όσον αφορά σε ένα μεμονωμένο όχημα. Όμως, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των οχημάτων που χρησιμοποιούν ένα οδόστρωμα, το αποτέλεσμα της μείωσης της αντίστασης κύλισης είναι εξαιρετικά πολύτιμο. Έρευνες αποδεικνύουν ότι για τα συμβατικά οχήματα η μείωση της αντίστασης κύλισης κατά 10% είναι ικανή να αποφέρει σημαντική βελτίωση στην οικονομία καυσίμων της τάξης του 1-2%. (Wang, et al., 2012).

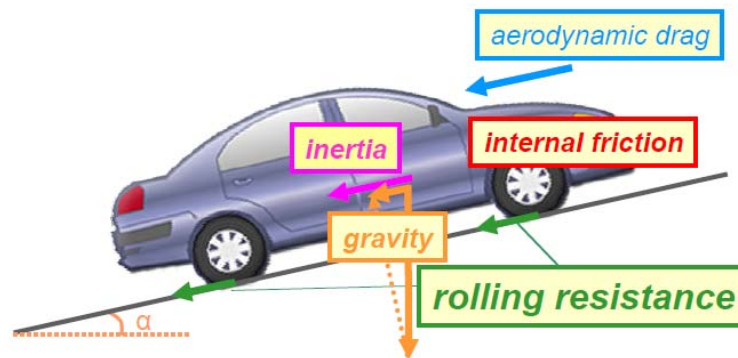
Για τον λόγο αυτό, παγκοσμίως, τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιείται συστηματική προσπάθεια για την ανάπτυξη συστημάτων μέτρησης και αλγορίθμων πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης, μέσω της διερεύνησης του φαινομένου και της κατανόησης της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ελαστικό και στο οδόστρωμα. Η απομείωση της αντίστασης κύλισης καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη βελτιωμένων ελαστικών αλλά και βελτιωμένων οδοστρωμάτων, καθώς και οι δύο αυτές συνιστώσες είναι άμεσα συσχετισμένες με τις ενεργειακές απώλειες που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση οχήματος-οδοστρώματος.

Κατά την κύλιση ενός οχήματος στην επιφάνεια του οδοστρώματος, αναπτύσσονται διάφορες δυνάμεις αλληλεπίδρασης, οι οποίες αντιστέκονται στην προς τα εμπρός κίνησή του. Μία εξ' αυτών είναι και η αντίσταση κύλισης. Οι δυνάμεις αντίστασης που επιδρούν σε ένα όχημα κατά την κίνησή του σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμων, απαιτώντας την κατανάλωση επιπρόσθετης ενέργειας. Συνολικά, οι αντιστεκόμενες στην κίνηση δυνάμεις που δέχεται ένα κινούμενο όχημα απεικονίζονται σχηματικά στην **Εικόνα 2.2** και είναι οι εξής (Sandberg, et al., 2011):

- Δύναμη αντίστασης κύλισης

- Αεροδυναμική δύναμη
- Αδρανειακή δύναμη
- Εσωτερικές δυνάμεις τριβής (απώλειες μετάδοσης, απόδοση του κινητήρα)
- Δύναμη βαρύτητας (κατά την οδήγηση σε κλίση)

Η αεροδυναμική δύναμη σχετίζεται περισσότερο με υψηλές ταχύτητες οδήγησης, η αδρανειακή δύναμη είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την επιτάχυνση ενώ η αντίσταση κύλισης ασκείται σε κάθε κινούμενο όχημα καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του. Η διατήρηση της κίνησης ενός οχήματος επιτυγχάνεται με την κατανάλωση επιπρόσθετης ενέργειας, καθώς απαιτείται και η αναπλήρωση των απωλειών ενέργειας που δημιουργούνται εξαιτίας των ανωτέρω δυνάμεων αντίστασης (Ejsmont & Owczarzak, 2019).



Εικόνα 2.2-Δυνάμεις αντιστεκόμενες στην κίνηση του οχήματος
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

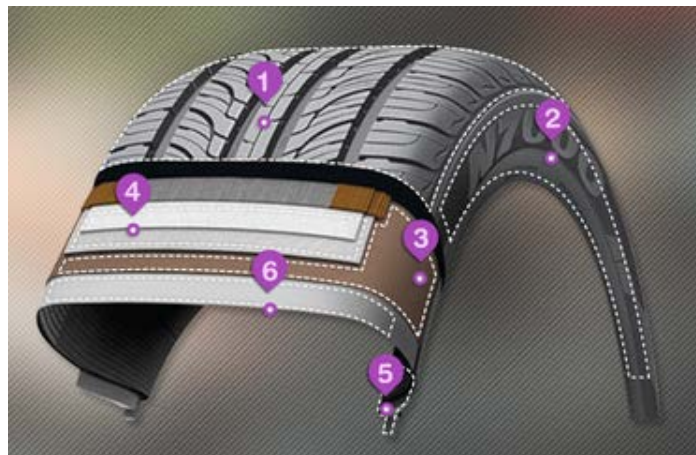
Η μελέτη και ποσοτικοποίηση της αντίστασης κύλισης καθίσταται αναγκαία προϋπόθεση για τη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικότερων και φιλικών προς το περιβάλλον συστημάτων οδικών μεταφορών. Όμως, καθώς η αντίσταση κύλισης αποτελεί αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του ελαστικού και του οδοστρώματος, για την ακριβέστερη εκτίμησή της είναι αναγκαία η κατά το δυνατόν βέλτιστη ποσοτικοποίηση των παραμέτρων επιρροής της που σχετίζονται με το ελαστικό, αλλά και με το οδόστρωμα. Ενώ παλαιότερα δινόταν αποκλειστικά έμφαση στις ιδιότητες του ελαστικού που προκαλούν τις απώλειες ενέργειας, πρόσφατες έρευνες αναφέρονται στην σημαντικότερη επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος στην ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης (Karlsson, et al., 2011; Sandberg, et al., 2011; Chatti & Zaabar, 2012; Hammarström, et al., 2012; Andersen, et al., 2015).

Η **ομαλότητα** και η **μακροϋφή** αποτελούν τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που επηρεάζουν πρωτίστως την αντίσταση κύλισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος ακόμη και ανά λωρίδα μιας οδού, επηρεαζόμενες από το φόρτο κυκλοφορίας, τον τύπο της επιφάνειας και το κλίμα. Συγκεκριμένα, σε διάφορους αλγόριθμους υπολογισμού που έχουν αναπτυχθεί, η έκφραση της αντίστασης κύλισης πραγματοποιείται με τη χρήση των δεικτών **IRI** (International Roughness Index) και **MPD** (Mean Profile Depth) που αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά της ομαλότητας και της μακροϋφής αντίστοιχα (Wang, et al., 2012). Υπάρχουν, ωστόσο, πολλοί άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης, όπως είναι η δομή του ελαστικού, οι συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί καθώς και τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Αναλυτικά αναφέρονται στα ακόλουθα.

2.2 Παράγοντες επιρροής

2.2.1 Δομή ελαστικού

Η δομή του ελαστικού απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.3** και ακολούθως αναφέρονται συνοπτικά τα βασικότερα μέρη από τα οποία αποτελείται, καθώς και η λειτουργία τους (www.glavopoulos.gr, www.nexentire.gr, 2018).

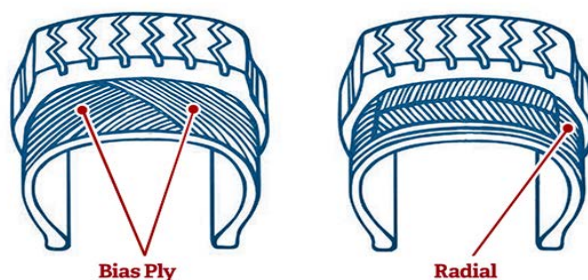


Εικόνα 2.3-Δομή ελαστικού (βασικά μέρη)
Πηγή: (www.nexentire.gr, 2018)

1. **Πέλμα (tread pattern).** Αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό μέρος του ελαστικού καθώς είναι αυτό που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του οδοστρώματος. Είναι κατασκευασμένο από ένα παχύ στρώμα καουτσούκ και η επιφάνεια του φέρει

αυλακώσεις, οι οποίες απομακρύνουν το νερό στην περίπτωση επαφής με βρεγμένο οδόστρωμα, εξασφαλίζοντας έτσι την απαιτούμενη πρόσφυση.

2. **Πλευρικά τοιχώματα (sidewalls).** Αποτελούν ουσιαστικά τα πλαϊνά μέρη του ελαστικού. Πρόκειται για μια περιοχή με εξαιρετικά παχύ στρώμα καουτσούκ. Τα πλαϊνά μέρη είναι αυτά που δέχονται τα εγκάρσια φορτία και σκοπός τους είναι να συγκρατούν το πέλμα του ελαστικού σε επαφή με το οδόστρωμα. Στο πλευρικό τοίχωμα αναφέρονται ακόμη, όλες οι πληροφορίες του ελαστικού, όπως η μάρκα, η διάσταση, η ημερομηνία παραγωγής και διάφορες πληροφορίες ασφαλείας.
3. **Σκελετός (carcass) του ελαστικού** (τα γνωστά λινά). Ο σκελετός αποτελεί τη βάση ενός ελαστικού. Κατασκευάζεται από ίνες χάλυβα ή συνθετικών υλικών. Τα λινά είναι οι λωρίδες υφάσματος που αποτελούν τον σκελετό του ελαστικού και κατασκευάζονται από νήματα ινών που πλέκονται μεταξύ τους σταυρωτά (bias-ply) και επικαλύπτονται με καουτσούκ. Στα σύγχρονα ελαστικά οι ίνες είναι τοποθετημένες κάθετα στη φορά κύλισης και αυτός ο τύπος ελαστικού ονομάζεται ακτινικός (radial). Τα λινά επιτρέπουν στο ελαστικό να είναι εύκαμπτο, αλλά χωρίς ελαστικότητα. Στην **Εικόνα 2.4** απεικονίζονται τα δύο διαφορετικά είδη σκελετού του ελαστικού.



Εικόνα 2.4-Τα δύο είδη σκελετών ενός ελαστικού
Πηγή: (www.glanopoulos.gr, 2019)

4. **Ζώνη (belt).** Η ζώνη αποτελεί ένα ισχυρό περιμετρικό στρώμα από στρώσεις λινών διαφόρων ειδών, ανάμεσα στον σκελετό και στο πέλμα του ελαστικού, με τη βοήθεια της οποίας προσδίδεται ανθεκτικότητα στο ελαστικό. Σκοπός της ζώνης είναι να συγκρατεί το σκελετό και να περιορίζει την παραμόρφωσή του. Παράλληλα εξασφαλίζει τις καλύτερες επιδόσεις κατά την αλλαγή κατεύθυνσης. Η μικρή λοξότμητη ακμή όπου το πέλμα συναντά το πλευρικό τοίχωμα ονομάζεται ώμος

(shoulder). Στην περιοχή του ώμου βρίσκεται μία πολύ χονδρή μάζα καουτσούκ, όπου συμβαίνουν μεγάλες απώλειες ενέργειας.

5. **Στεφάνη (crown).** Η στεφάνη είναι το σημείο επαφής μεταξύ του ελαστικού και της ζάντας. Βρίσκεται στο κέντρο του ελαστικού και αποτελείται από ένα ατσάλινο σύρμα σε σχήμα δαχτυλιδιού που καλύπτει το τέλος του σκελετού. Ο ρόλος της είναι να κρατά τον αέρα υψηλής πίεσης ανάμεσα στο ελαστικό και τη ζάντα.
6. **Ενσωματωμένος αεροθάλαμος.** Αποτελεί το στρώμα καουτσούκ του ελαστικού που δεν χρειάζεται αεροθάλαμο και εξυπηρετεί στον περιορισμό διαρροών αέρα. Αυτό το στρώμα έχει ακριβώς την ίδια λειτουργία με έναν αεροθάλαμο σε ένα συμβατικό ελαστικό.

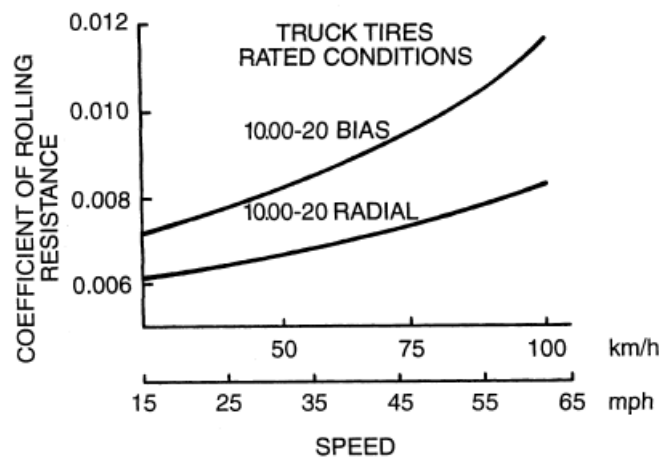
Χαρακτηριστικά του ελαστικού, τα οποία σχετίζονται με διάφορα μέρη της δομής του αλλά και με τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί, κατέχουν την ικανότητα να επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης. Στη συνέχεια, παρατίθενται οι σημαντικότεροι από αυτούς τους παράγοντες επιρροής και ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν στην αύξηση ή την απομείωση της αντίστασης κύλισης.

ι. Τύπος κατασκευής

Γενικά, ένα παχύ πέλμα ελαστικού σε συνδυασμό με χονδρά πλευρικά τοιχώματα και αυξημένο αριθμό στρώσεων λινών στον σκελετό οδηγούν σε μεγαλύτερη αντίσταση κύλισης (Clark, 1971). Αυτό συμβαίνει διότι σε τέτοιου είδους ελαστικά υπάρχει συγκεντρωμένη περισσότερη μάζα καουτσούκ, η οποία έχει την ιδιότητα να παραμορφώνεται κατά την κύλιση, ωστόσο δεν επανέρχεται ποτέ πλήρως στην αρχική της κατάσταση. Αυτό για το ελαστικό σηματοδοτεί απώλειες ενέργειας, αφού κάποιο μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα και επομένως προκαλείται αύξηση της αντίστασης κύλισης.

Ο τύπος σκελετού του ελαστικού συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης. Στην **Εικόνα 2.5** απεικονίζεται η διαφοροποίηση του συντελεστή αντίστασης κύλισης σε ένα συμβατικό (bias-ply) και ένα ακτινικό (radial) ελαστικό συναρτήσει της ταχύτητας. Οι συνθήκες φόρτισης και η πίεση των ελαστικών είναι ίδια και για τους δύο τύπους ελαστικών ενώ η κύλιση και στις δύο περιπτώσεις αφορά σε μια ομαλή και χωρίς κλίση επιφάνεια οδού. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η αντικατάσταση των συμβατικών

ελαστικών με τα σύγχρονα ακτινικά συμβάλλει καθοριστικά στην απομείωση της αντίστασης κύλισης.



Εικόνα 2.5-Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με τη δομή του ελαστικού
Πηγή: (Clark, 1971)

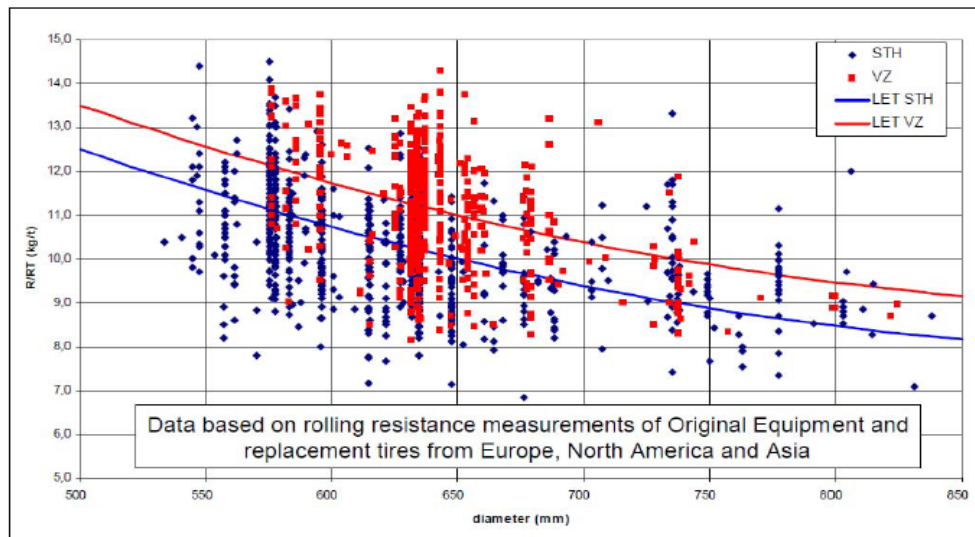
Τα ακτινικά ελαστικά εκτίθενται λιγότερο στη θερμότητα και είναι πιο εύκαμπτα στη δομή τους, γι' αυτό παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση στην κύλιση και έχουν επικρατήσει στην αγορά. Ανεξάρτητα από τον σκελετό, ωστόσο, οι μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν στην εσωτερική δομή του ελαστικού οφείλονται στο καουτσούκ και όχι στον σκελετό ή στη ζώνη του ελαστικού. Η ζώνη κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι τελείως άκαμπτη. Δεδομένου ότι η ζώνη είναι ασυμπίεστη, κατά την κύλιση του ελαστικού, η εσωτερική επένδυση από καουτσούκ που βρίσκεται κάτω από τη ζώνη συμπιέζεται ενώ το καουτσούκ πάνω από τη ζώνη, δηλαδή το πέλμα, επεκτείνεται. Η συμπίεση και η επέκταση των δύο αυτών στρωμάτων καουτσούκ, τα οποία περιβάλλουν τη ζώνη, δημιουργούν απώλειες ενέργειας εξαιτίας της παραμόρφωσής τους. Δεν υπάρχουν, όμως, επαρκή ποσοτικοποιημένα δεδομένα για την επιρροή της εσωτερικής δομής του ελαστικού στην αντίσταση κύλισης (Sandberg, et al., 2011).

ii. Εξωτερικές ιδιότητες του ελαστικού

Από τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του ελαστικού, εκείνα τα οποία ασκούν τη μεγαλύτερη επιρροή στην αντίσταση κύλισης είναι η **διάμετρος** του χείλους του ελαστικού (άμεσα συσχετισμένη με την εξωτερική διάμετρο του ελαστικού), η **αναλογία ύψους/πλάτους** του ελαστικού, η **κατηγορία ταχύτητας** του ελαστικού και το **βάθος του πέλματός** του.

Σημαντικότερη επιρροή από αυτά ασκούν τα διαστασιολογικά στοιχεία, δηλαδή η διάμετρος και η αναλογία ύψους/πλάτους του ελαστικού.

Πιο αναλυτικά, με την αύξηση της διαμέτρου του χείλους παρατηρείται σημαντική μείωση του συντελεστή αντίστασης κύλισης. Αύξηση του ύψους του ελαστικού οδηγεί επίσης σε μείωση του συντελεστή. Η κατηγορία ταχύτητας του ελαστικού αποτελεί ένα ακόμη χαρακτηριστικό, το οποίο σχετίζεται με την αντίσταση κύλισής του. Πιο συγκεκριμένα, τα ελαστικά που ανήκουν στις κατηγορίες υψηλών ταχυτήτων (W,Y,Z) έχει παρατηρηθεί ότι έχουν υψηλότερο συντελεστή αντίστασης κύλισης κατά 10-22% από αυτά των χαμηλών ταχυτήτων (S,T) (Sandberg, et al., 2011). Στην **Εικόνα 2.6** παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κύλισης με την αύξηση της εξωτερικής διαμέτρου του ελαστικού για κατηγορίες ελαστικών υψηλής ταχύτητας και ελαστικών χαμηλότερης ταχύτητας. Οι κατηγορίες ελαστικών H,V αντιπροσωπεύουν κατηγορίες μεσαίας τάξης ταχύτητας. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2.6, τα ελαστικά που ανήκουν σε κατηγορία υψηλότερων ταχυτήτων αναπτύσσουν και μεγαλύτερη αντίσταση κύλισης.



Εικόνα 2.6-Διαμόρφωση συντελεστή αντίστασης κύλισης ανάλογα με τη διάμετρο του ελαστικού για δύο τάξεις ταχυτήτων (υψηλή και χαμηλή)
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

Τέλος, το βάθος του πέλματος εξαρτάται από την κατάσταση του ελαστικού και τη φθορά που έχει υποστεί αυτό στην πάροδο του χρόνου. Κατά τη διάρκεια ζωής του το ελαστικό χάνει σταδιακά την αρχική αντοχή του. Εξαιτίας των φθορών που δέχεται, το βάθος του πέλματός του μικραίνει, επηρεάζοντας σημαντικά την αντίσταση κύλισης. Για τα ελαστικά τυπικών αυτοκινήτων έχει υπολογιστεί ότι η μεταβολή του βάθους του

πέλματος λόγω της φθοράς από 8mm σε 2mm μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντίστασης κύλισης έως και 20% (Sandberg, et al., 2011). Παρά το γεγονός ότι η μείωση του βάθους του πέλματος επιδρά ευνοϊκά στην αντίσταση κύλισης, απαιτείται ένα επαρκές βάθος πέλματος στο ελαστικό για την εξασφάλιση της απαιτούμενης πρόσφυσης και της ασφάλειας στην οδήγηση.

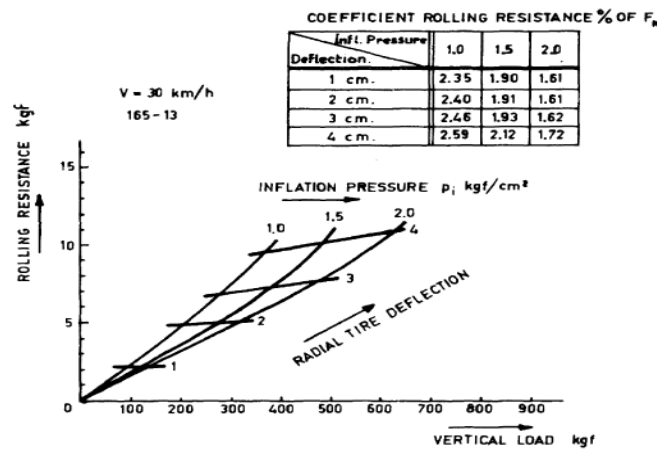
iii. Σύνθεση ελαστικού

Τις τελευταίες δεκαετίες η σύνθεση του καουτσούκ βελτιώνεται σημαντικά, αποδίδοντας πολύτιμα οφέλη για την αντίσταση κύλισης. Διάφορα υλικά πλήρωσης και πολυμερή που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των ελαστικών βελτιώνουν την πρόσφυση ενώ παράλληλα, μειώνουν την υστέρηση. Η αντικατάσταση μέρους της αιθάλης (carbon black) με πυρίτιο (silica) έχει αποδειχθεί ότι έχει πολύ ευνοϊκή επίδραση και αποτελεί έναν συνήθη τρόπο μείωσης της αντίστασης κύλισης (Mukherjee, 2014).

2.2.2 Συνθήκες λειτουργίας ελαστικού

i. Φορτίο και πίεση του ελαστικού

Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη συσχέτιση του φορτίου και την αντίσταση κύλισης συγκλίνουν στο ότι πρόκειται για μία σχεδόν γραμμική σχέση (Εικόνα 2.7).

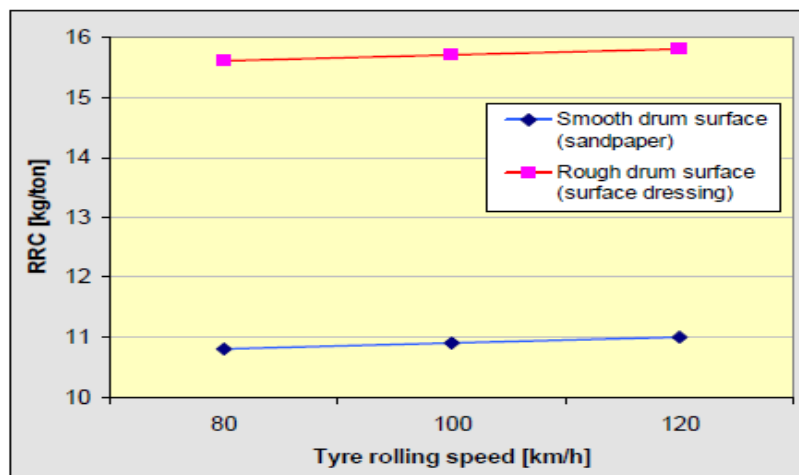


Εικόνα 2.7-Αντίσταση κύλισης συναρτήσει του φορτίου και της πίεσης του ελαστικού
Πηγή: (Clark, 1971)

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 2.7, αύξηση του φορτίου του ελαστικού συνεπάγεται σχεδόν γραμμική αύξηση της αντίστασης κύλισης. Όσον αφορά στην επιρροή από την πίεση του ελαστικού, η χαμηλότερη πίεση από την προτεινόμενη στα ελαστικά έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη κάμψη των πλευρικών τοιχωμάτων και την ανάπτυξη υψηλότερης αντίστασης κύλισης. Η μετατροπή ενέργειας σε θερμότητα στην περιοχή των πλευρικών τοιχωμάτων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε υπερθέρμανση (Mukherjee, 2014).

ii. Ταχύτητα

Η εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης κύλισης από την ταχύτητα έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι σημαντική σε ταχύτητες περίπου κάτω από 130km/h. Ωστόσο, για μεγαλύτερες ταχύτητες ο συντελεστής αυξάνεται σημαντικά. Η **Εικόνα 2.8** δείχνει τη διαμόρφωση του συντελεστή αντίστασης κύλισης σαν συνάρτηση της ταχύτητας τόσο για μια ομαλή, όσο και για μια “ανώμαλη” επιφάνεια κύλισης.



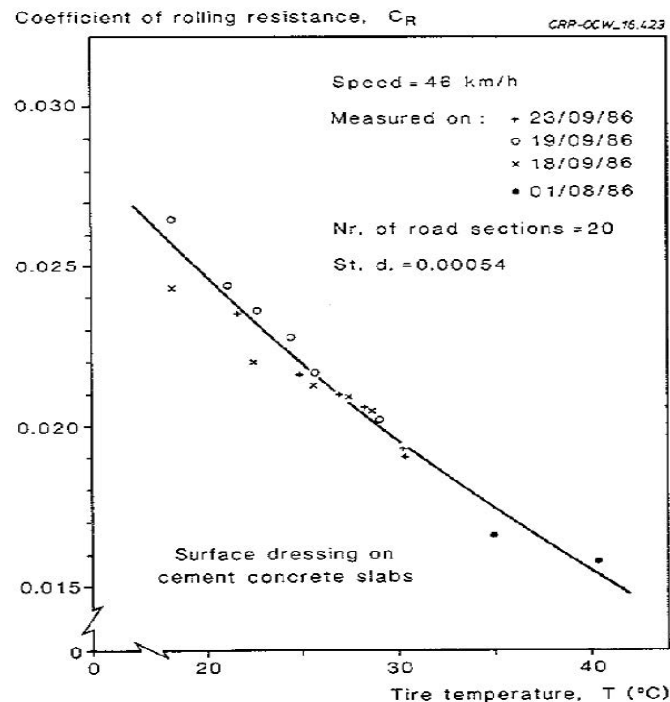
Εικόνα 2.8-Διαμόρφωση συντελεστή αντίστασης κύλισης συναρτήσει της ταχύτητας
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

Η συσχέτιση του συντελεστή αντίστασης κύλισης με την ταχύτητα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.8, προήλθε από ανάλυση μετρήσεων με τύμπανο που πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία του Σουηδικού Εθνικού Ινστιτούτου Έρευνας Οδών και Μεταφορών (Swedish National Road and Transport Research Institute: **VTI**) και του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου του Γκντανσκ (Technical University of Gdansk: **TUG**) στο εργαστήριο του TUG. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε περίπου εκατό δοκιμαστικά ελαστικά αυτοκινήτων, διαφόρων επωνυμιών και διαστάσεων. Από ανάλυση των

μετρήσεων υπολογίστηκε ότι η μέγιστη αύξηση του συντελεστή αντίστασης κύλισης είναι της τάξης του 2% για μεταβολή της ταχύτητας από 80 σε 120km/h (Sandberg, et al., 2011).

iii. Θερμοκρασία

Έχει διαπιστωθεί ότι η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιρροής της αντίστασης κύλισης. Η τιμή της αντίστασης κύλισης μειώνεται αν το ελαστικό έχει υψηλότερη θερμοκρασία (**Εικόνα 2.9**). Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι όταν το ελαστικό ζεσταίνεται, μαλακώνει και έτσι, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να παραμορφωθεί το ελαστικό, γεγονός που σημαίνει ότι καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια κατά τη διαδικασία της κύλισης (Mukherjee, 2014).



Εικόνα 2.9-Επιρροή του συντελεστή αντίστασης κύλισης από τη θερμοκρασία ελαστικού
Πηγή: (Mukherjee, 2014)

iv. Γωνία ολίσθησης

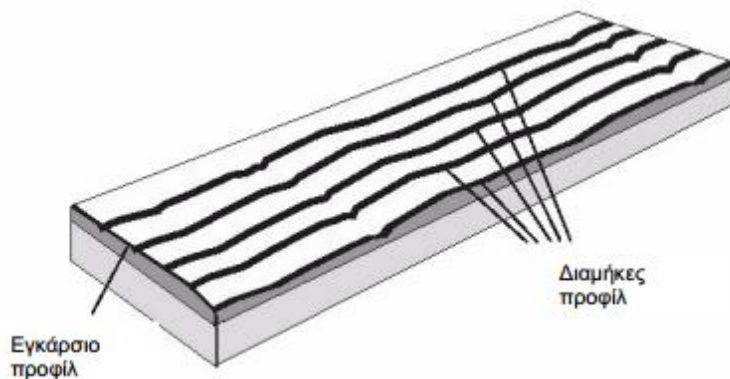
Η ευθυγράμμιση του ελαστικού είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την αντίσταση κύλισης. Η γωνία ολίσθησης ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της πραγματικής

κατεύθυνσης του αυτοκινήτου και της κατεύθυνσης των τροχών. Μια πολύ μικρή γωνία ολίσθησης, ακόμη και της τάξεως του μισού βαθμού, μπορεί να προκαλέσει μια μη αμελητέα αύξηση του συντελεστή αντίστασης κύλισης (Sandberg, et al., 2011).

2.2.3 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος

ι. Ομαλότητα

Η **ομαλότητα** αποτελεί μία από τις κυριότερες παραμέτρους επιρροής της αντίστασης κύλισης. Ως ομαλότητα ορίζεται η απόκλιση της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικώς επίπεδη επιφάνεια και αποτελεί βασική παράμετρο για την αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, καθώς αποτελεί ουσιαστικά και το φυσικό μέγεθος που αντιλαμβάνονται οι χρήστες των οδών. Οι αποκλίσεις αυτές εμφανίζονται ως καθιζήσεις και διογκώσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Διακρίνεται στη «**διαμήκη ομαλότητα**» και στην «**εγκάρσια ομαλότητα**». Η έννοια του προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη και εγκάρσια κατεύθυνση αποτυπώνεται στην **Εικόνα 2.10**.



Εικόνα 2.10-Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές (προφίλ)
Πηγή: (Λοΐζος & Πλατή, 2018)

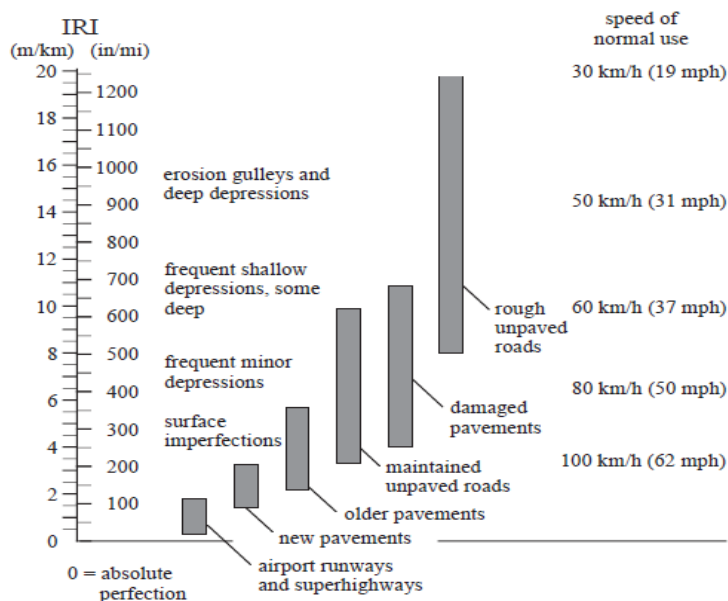
Με τον όρο ομαλότητα αναφερόμαστε κυρίως στην κατά μήκος (διαμήκης) επιπεδότητα. Η «διαμήκης ομαλότητα» περιγράφεται από τους κυματισμούς της επιφάνειας του οδοστρώματος μήκους κυρίως μεταξύ **0.5-50 m**. Μεγάλες τιμές διαμήκους ομαλότητας επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης των οχημάτων και επομένως την άνεση των χρηστών της οδού. Οι αποκλίσεις στη διαμήκη ομαλότητα είναι δυνατό να οφείλονται σε κατασκευαστικές αστοχίες κατά τη διάστρωση των ασφαλτικών στρώσεων και σε βλάβες

που παρουσιάζονται στο οδόστρωμα, όπως καθιζήσεις, διογκώσεις, πτυχώσεις, λακκούβες κτλ.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται διεθνώς για την καταγραφή της ομαλότητας διακρίνεται στις ακόλουθες πέντε βασικές κατηγορίες (Λοΐζος & Πλατή , 2018):

- Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems: RTRRMS)
- Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα (High speed inertial profilers)
- Προφιλογράφοι (Profilographs)
- «Ελαφρά» προφιλόμετρα (Lightweight profilers)
- Χειροκίνητες συσκευές

Ο ευρύτερα διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος δείκτης για την έκφραση της ομαλότητας είναι ο **Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας** (International Roughness Index: **IRI**) εκφρασμένος σε μονάδες κλίσης, για παράδειγμα m/km. Αποτελεί έναν δείκτη αξιολόγησης της ποιότητας κύλισης και αντιπροσωπεύει τους κραδασμούς που αναπτύσσονται σε ένα τυπικό όχημα. Προσδιορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος ενός δρόμου και γι' αυτό μπορεί να μετρηθεί με κάθε ισχύον μηχανήμα καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Η χρήση του είναι ιδιαίτερα κατάλληλη σε περιπτώσεις όπου επιθυμείται η ομαλότητα να συσχετιστεί με την ποιότητα κύλισης, το γενικό κόστος χρήσης του οχήματος, τα δυναμικά φορτία του τροχού και τις γενικές συνθήκες επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Η **Εικόνα 2.11** απεικονίζει το εύρος των τιμών του δείκτη IRI για διάφορους τύπους οδοστρωμάτων και για διάφορες ταχύτητες κίνησης.



Εικόνα 2.11-Εύρος τιμών IRI σε σχέση με τον τύπο του οδοστρώματος και την ταχύτητα κίνησης
Πηγή: (Sayers & Karamihas, 1998)

Μία τιμή IRI 0 m/km σε συγκεκριμένο διάστημα δείγματος σημαίνει ότι η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι εντελώς επίπεδη. Θεωρητικά δεν υπάρχει άνω όριο τιμών IRI, αν και πρακτικά τιμές που ξεπερνούν τα 8 m/km αφορούν σε οδόστρωμα, το οποίο είναι αδιάβατο, εκτός βέβαια των περιπτώσεων όπου η ταχύτητα κίνησης είναι πολύ μικρή (Λοϊζος, et al., 2002).

Ο δείκτης IRI παρουσιάζει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων δεικτών της ομαλότητας:

- Είναι συσχετισμένος με την ταλάντωση των οχημάτων, και κατ' επέκταση με την συμπεριφορά τους.
- Η κλίμακα του είναι συσχετισμένη με την κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος και είναι σταθερή στο χρόνο.
- Είναι μετρήσιμος από την πλειοψηφία των μηχανημάτων καταγραφής της ομαλότητας που καταγράφονται διεθνώς.
- Έχει μονάδες κλίσης (m/km, in/km κλπ).

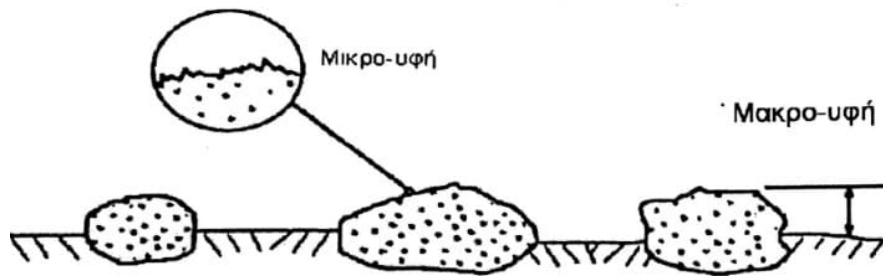
Η ακρίβεια φυσικά των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

Η έλλειψη ομαλότητας οδηγεί στη μείωση της λειτουργικότητας του οδοστρώματος και σε αυξημένο κόστος λειτουργίας του οχήματος για τον χρήστη μέσω της αύξησης της

κατανάλωσης καυσίμων. Πιο αναλυτικά, η έλλειψη διαμήκους ομαλότητας του οδοστρώματος εξαναγκάζει το ελαστικό σε αναπηδήσεις και όσο πιο “ανώμαλο” είναι ένα οδόστρωμα, τόσο πιο πολλές και μεγάλες είναι οι μεταβολές των κατακόρυφων δυνάμεων, υπό τη μορφή της δυναμικής καταπόνησης της κυκλοφορίας, ενώ δημιουργούνται επίσης πλευρικές δυνάμεις μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος που οδηγούν σε αύξηση των ενεργειακών απωλειών. Η αναπήδηση των τροχών προκαλεί ακόμη φθορά στις αναρτήσεις των ελαστικών αλλά και στο ίδιο το οδόστρωμα λόγω της δυναμικής φόρτισης που αναπτύσσεται (Λοΐζος & Πλατή , 2018).

ii. Υφή επιφάνειας οδοστρώματος

Η υφή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος καθορίζει τον ρυθμό απομάκρυνσης του νερού από τη στρώση κυκλοφορίας και κατά συνέπεια σχετίζεται άμεσα με την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η υφή διακρίνεται στην **μικρο-υφή** και στην **μακρο-υφή** (βάθος υφής), όπως απεικονίζεται και στην **Εικόνα 2.12**.



Εικόνα 2.12-Επιφανειακή υφή οδοστρώματος
Πηγή: (Λοΐζος & Πλατή , 2018)

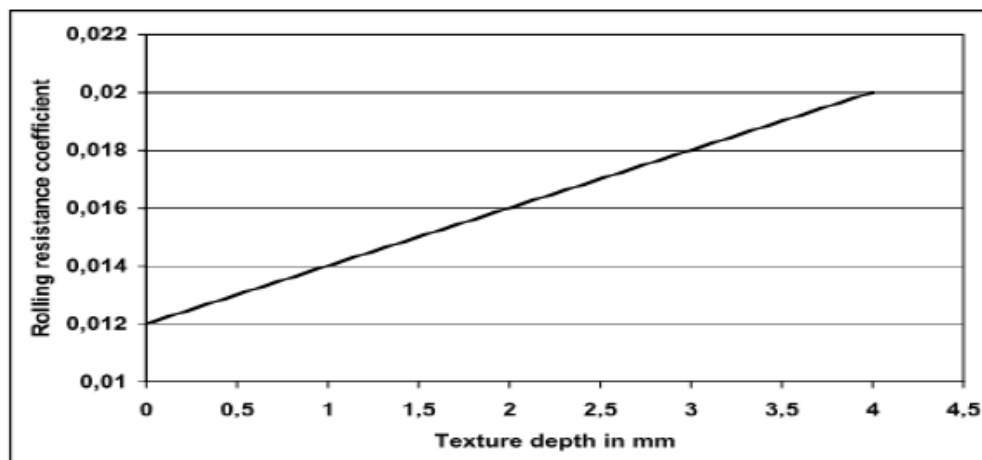
Μικροϋφή ορίζεται η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μία επίπεδη επιφάνεια με χαρακτηριστικές διαστάσεις κατά μήκος της επιφάνειας από 1 μm έως 0.5 mm και αφορά στην αδρότητα της επιφάνειας των αδρανών. Η κατάλληλη μικροϋφή συντελεί στην καταστροφή του υμένα ύδατος, ο οποίος δημιουργείται σε βρεγμένο οδόστρωμα μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού.

Μακροϋφή ορίζεται η απόκλιση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από μία επίπεδη επιφάνεια με μήκη κύματος από 0.5 mm έως 50 mm και συσχετίζεται με την τραχύτητα (ανάγλυφο) της επιφάνειας του οδοστρώματος ως σύνολο, λόγω προεξοχής των αδρανών από την επιφάνεια. Κατάλληλη μακροϋφή στο οδόστρωμα συμβάλλει στην ταχεία απομάκρυνση των επιφανειακών υδάτων από το οδόστρωμα και επομένως,

περιορίζει τα φαινόμενα υδρολίσθησης των οχημάτων, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο ασφάλεια στους χρήστες. Η μακροϋφή (βάθος υφής) του οδοστρώματος μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους, ένας από τους οποίους είναι η μέθοδος της «κηλίδας άμμου» (sand patch), η οποία αποτελεί παραδοσιακή μέθοδο μέτρησης της μακροϋφής.

Τα τελευταία χρόνια, όμως, η καταγραφή του βάθους υφής πραγματοποιείται από σύγχρονα συστήματα με τη χρήση αισθητήρων (laser). Τα συστήματα αυτά συνήθως προσαρμόζονται στα συστήματα μέτρησης της ομαλότητας που χρησιμοποιούν ανάλογο εξοπλισμό και έτσι είναι δυνατή η ταυτόχρονη μέτρηση της ομαλότητας και του βάθους υφής της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα συστήματα προφίλομέτρησης υψηλής ταχύτητας, τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα προσδιορισμού του βάθους υφής κατά μήκος του οδοστρώματος. Το βάθος υφής που υπολογίζεται με αυτά τα συστήματα εκφράζεται μέσω του δείκτη **MPD** (Mean Profile Depth) (Λοΐζος & Πλατή, 2018).

Στην **Εικόνα 2.13** που ακολουθεί αποτυπώνεται η αύξηση που προκαλείται στον συντελεστή αντίστασης κύλισης, συναρτήσει της αύξησης του βάθους υφής της επιφάνειας ενός οδοστρώματος.

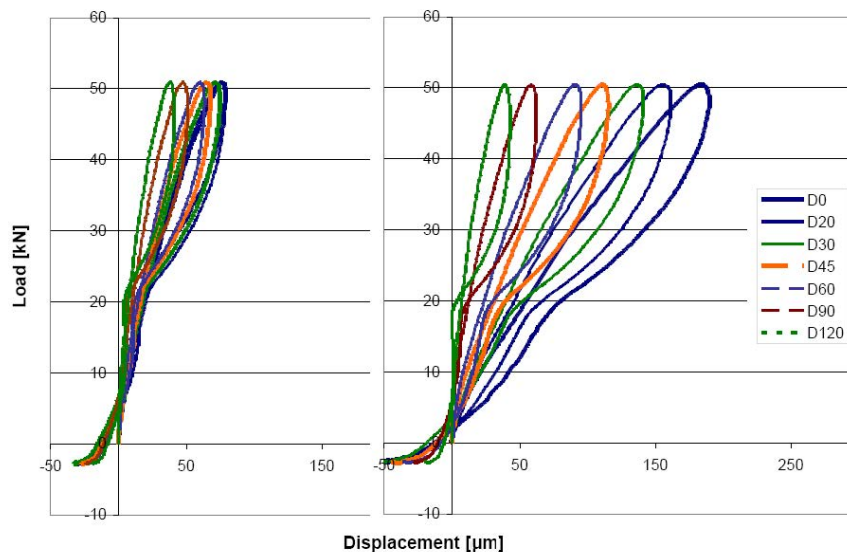


Εικόνα 2.13 -Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με το βάθος υφής του οδοστρώματος
Πηγή: (Mukherjee, 2014)

Πολλές έρευνες έχουν αναδείξει ότι η μακροϋφή της επιφάνειας κύλισης αποτελεί το κατεξοχήν χαρακτηριστικό του οδοστρώματος από το οποίο επηρεάζεται η αντίσταση κύλισης. Για τυπικά ιδιωτικά οχήματα η επιρροή της υφής εκτιμάται περίπου τριπλάσια από την επιρροή της ομαλότητας (Trupia, et al., 2017).

iii. Δυσκαμψία οδοστρώματος

Η δυσκαμψία του οδοστρώματος είναι ακόμη μία ιδιότητα που έχει απασχολήσει ως προς την επιρροή της στην αντίσταση κύλισης. Εξαιτίας της ιδιότητας της υστέρησης της ασφάλτου, έρευνες και βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος αναφέρουν ότι πραγματοποιούνται μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας σε ένα εύκαμπτο ασφαλτικό οδόστρωμα από ότι σε ένα δύσκαμπτο. Για παράδειγμα, οι (Schmidt, et al., 2009) εκτίμησαν την απώλεια ενέργειας που πραγματοποιείται σε ένα δύσκαμπτο και ένα ασφαλτικό οδόστρωμα, παρατηρώντας τις απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν κατά τους κύκλους φόρτισης/αποφόρτισης του οδοστρώματος με το σύστημα του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer: **FWD**). Η συνολική απώλεια ενέργειας αποτελεί το άθροισμα των περιοχών που περιέχονται στις καμπύλες φόρτισης/αποφόρτισης, οι οποίες δημιουργούνται από την παλμική δυναμική φόρτιση του οδοστρώματος που πραγματοποιείται κατά τη δοκιμή FWD. Η αντίσταση κύλισης θεωρήθηκε ότι αποτελεί περίπου το 70-80% της συνολικής απώλειας ενέργειας που εκτιμάται από τη δοκιμή FWD. Όπως απεικονίζεται και στην **Εικόνα 2.14**, η ανάλυση έδειξε ότι οι απώλειες υστέρησης σε ένα ασφαλτικό οδόστρωμα είναι πολύ πιο σημαντικές από ότι σε ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα.



Εικόνα 2.14-Απώλειες υστέρησης σε ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα (αριστερά) και σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα (δεξιά) κατά τη δοκιμή FWD
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

Ωστόσο, η επιρροή της δυσκαμψίας δεν θεωρείται στατιστικά σημαντική και ακόμη, η μειωμένη αντίσταση κύλισης που παρατηρήθηκε στα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι

δυνατό να οφείλεται σε άλλους παράγοντες, όπως στις διαφορετικές μακροϋφές των δύο ειδών οδοστρωμάτων ή στην έλλειψη ελέγχου των υπολοίπων παραμέτρων της επιφάνειας του οδοστρώματος. Συμπερασματικά, η δυσκαμψία του οδοστρώματος δεν μπορεί να θεωρηθεί μία σημαντική παράμετρος επιρροής της αντίστασης κύλισης και παραμένει το ερώτημα σε ποιον βαθμό και υπό ποιες συνθήκες (θερμοκρασία, είδος οδοστρώματος και τύπο διερχόμενων οχημάτων) είναι δυνατόν να αποτελέσει μία σημαντική παράμετρο επιρροής (Sandberg, et al., 2011).

2.2.4 Καιρικές συνθήκες

ι. Θερμοκρασία

Όσον αφορά στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, διαφοροποίηση της θερμοκρασίας ακόμη και κατά έναν βαθμό της κλίμακας Κελσίου οδηγεί σε μεταβολή του συντελεστή αντίστασης κύλισης κατά 0.6%. Για παράδειγμα, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 20 °C συνεπάγεται πτώση του συντελεστή αντίστασης κύλισης κατά 12%. Συνεπώς, απαιτείται η παράμετρος της θερμοκρασίας να ελέγχεται εκτενώς κατά τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης και οι μετρήσεις του συντελεστή αντίστασης κύλισης να διορθώνονται σε μια θερμοκρασία αναφοράς. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο η μέτρηση του θα πρέπει να αποφεύγεται να πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μακριά από αυτή της αναφοράς, καθώς οι διορθώσεις μετέπειτα ως προς αυτή ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα. Ως θερμοκρασία αναφοράς από το πρότυπο ISO 28580 (ISO 28580, 2018) προτείνεται αυτή των 25°C (πιθανόν για εργαστηριακές συνθήκες). Στην Ευρώπη για εξωτερικές μετρήσεις η θερμοκρασία των 20°C φαίνεται καταλληλότερη, καθώς πλησιάζει τη μέση τιμή των ετήσιων θερμοκρασιών που επικρατούν στις ευρωπαϊκές χώρες (Sandberg, et al., 2011). Η διόρθωση του συντελεστή αντίστασης κύλισης από μια τυχαία θερμοκρασία στη θερμοκρασία αναφοράς σύμφωνα με το πρότυπο ISO 28580 εφαρμόζεται με τον εξής τύπο:

$$C_{r,25} = C_{r,T} \times \{1 + k \times (T - T_{ref})\} \quad (2.2)$$

όπου:

$C_{r,25}$: ο συντελεστής αντίστασης κύλισης στη θερμοκρασία αναφοράς, $C_{r,T}$: ο συντελεστής αντίστασης κύλισης σε διαφορετική θερμοκρασία από τη θερμοκρασία αναφοράς που δίνεται από τη σχέση:

$$C_{r,T} = R/F \quad (2.3)$$

R: η δύναμη αντίστασης κύλισης (N), F: το φορτίο του ελαστικού (N), K = 0.008, T: η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις μετρήσεις (°C), Tref: η θερμοκρασία αναφοράς (25°C από τον κανονισμό).

ii. Κατάσταση οδοστρώματος εξαιτίας των καιρικών συνθηκών

Η υγρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος προκαλεί αστάθεια στην κίνηση του οχήματος και επιδρά αρνητικά στην αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων. Για ορισμένα ελαστικά και σε επιφάνεια που δέχεται έντονη βροχόπτωση, παρατηρείται αύξηση της αντίστασης κύλισης έως και 50%. Το πάχος της μεμβράνης του νερού κατέχει καθοριστικό ρόλο στην επιρροή αυτή. Για παράδειγμα, σε χαμηλές ταχύτητες, περί τα 30 km/h, ακόμη και μια πολύ λεπτή μεμβράνη νερού προκαλεί αξιοσημείωτη επίδραση στην αντίσταση κύλισης. Σε υψηλότερο ύψος νερού η αντίσταση κύλισης δεν αυξάνεται εξίσου αρκετά. Εάν πρόκειται, ωστόσο, για μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης, περίπου 50-80 km/h, το πάχος της μεμβράνης νερού έχει και πιο απότομη επίδραση στην αύξηση της αντίστασης κύλισης (Ejsmont, et al., 2015).

Αναμφίβολα, το χιόνι αποτελεί μία ακόμη παράμετρο με σημαντική επιρροή στην αντίσταση κύλισης. Παλαιότερες έρευνες (Lidstrom, 1979; van Es, 1999) που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επιρροής αυτής, έλαβαν υπόψη τους ελαστικά αεροσκαφών, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στην περίπτωση των ελαστικών οχημάτων. Προς το παρόν, το μοντέλο που προτάθηκε από τον (Lidstrom, 1979) εφαρμόζεται κατά το δυνατόν στο σουηδικό πρόγραμμα VETO, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο VTI για την αξιολόγηση της επιρροής του χιονιού στην αντίσταση κύλισης (Sandberg, et al., 2011).

Στο επόμενο υποκεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι μηχανισμοί που οδηγούν σε απώλειες ενέργειας, επηρεαζόμενοι από όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες επιρροής, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη δημιουργία της αντίστασης κύλισης. Τέτοιοι μηχανισμοί αφορούν στο ελαστικό, στο οδόστρωμα αλλά απαραίτητα και στην μεταξύ τους αλληλεπίδραση, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί κατέχει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της αντίστασης κύλισης. Σημειώνεται ότι το πρότυπο ISO 28580 (ISO 28580, 2018) που ορίζει τις διαδικασίες μέτρησης της αντίστασης κύλισης προτείνει για την εκτίμηση της, τον συνυπολογισμό μόνο των απωλειών ενέργειας οι οποίες

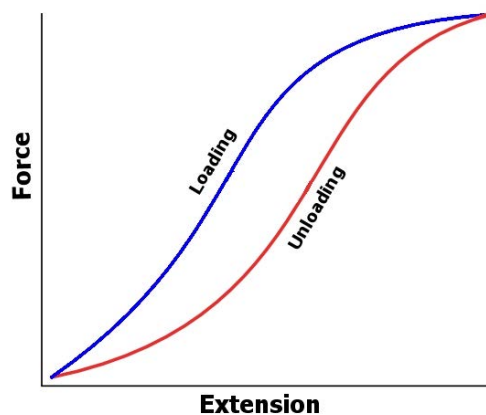
προέρχονται από την παραμόρφωση του ελαστικού. Γι' αυτό και ορίζει μία ξεχωριστή κατηγορία απωλειών ενέργειας, ονομαζόμενη «παρασιτικές απώλειες», οι οποίες αν και συμβαίνουν δεν συνιστάται από τον κανονισμό η προσμέτρηση τους για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης.

2.3 Αίτια ανάπτυξης φαινομένου

2.3.1 Ενεργειακές απώλειες ελαστικού

ι. Ιδιότητα υστέρησης των ελαστικών

Έναν από τους κύριους λόγους δημιουργίας της αντίστασης κύλισης αποτελεί η παραμόρφωση των ελαστικών και η ιδιότητα της υστέρησης που χαρακτηρίζει το υλικό κατασκευής τους. Το καουτσούκ του ελαστικού αποτελείται από στοιχεία τα οποία παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Έχουν δηλαδή ταυτόχρονα, ιξώδη και ελαστική συμπεριφορά. Όταν αυτά τα στοιχεία παραμορφωθούν εξαιτίας κάποιας δύναμης (φορτίο που παραλαμβάνει ο τροχός), δεν επανέρχονται ποτέ πλήρως στο αρχικό τους σχήμα. Ένα μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας ανακτάται, ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο απώλεια ενέργειας. Η αδυναμία ανάκτησης της συνολικής ενέργειας αποτελεί το φαινόμενο της υστέρησης, το οποίο απεικονίζεται γραφικά στην **Εικόνα 2.15**. Η περιοχή που περικλείεται ανάμεσα στις καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης αντιπροσωπεύει τις απώλειες υστέρησης (Sandberg, et al., 2011).



Εικόνα 2.15-Φαινόμενο υστέρησης
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

Εκτός από τη σύνθεση του υλικού του ελαστικού και τη γεωμετρία του, το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από την πίεση του ελαστικού και το φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτό. Το φορτίο του ελαστικού παραλαμβάνεται κυρίως από τον αέρα που εμπεριέχεται στο ελαστικό και σε πολύ μικρότερο βαθμό από τη δομή του ελαστικού. Κατά την κύλιση ενός φορτιζόμενου ελαστικού σε μία επίπεδη επιφάνεια, το τμήμα του ελαστικού που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια γίνεται πεπλατυσμένο και παραμορφώνεται στα άκρα ανάλογα με τη δυσκαμψία του πέλματος, τα πλευρικά τοιχώματα και την εσωτερική δομή του ελαστικού. Μεγαλύτερες παραμορφώσεις παρατηρούνται στα εμπρός και πίσω άκρα της επιφάνειας επαφής. Όμως, τα πλευρικά τοιχώματα ακόμη παραμορφώνονται εξαιτίας της δημιουργίας της πεπλατυσμένης επιφάνειας επαφής από το φορτίο (Andersen, 2015).

ii. Εσωτερική αντίσταση

Καθώς το όχημα αλλάζει ταχύτητα, τα ελαστικά αλλάζουν ταχύτητα περιστροφής, γεγονός που προκαλεί εσωτερική αντίσταση.

iii. Αεροδυναμική αντίσταση του ελαστικού

Καθώς τα ελαστικά κινούνται διαπερνώντας τον αέρα, δημιουργείται αεροδυναμική αντίσταση εξαρτώμενη από τις διαστάσεις του ελαστικού. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 28580 (ISO 28580, 2018), οι απώλειες που προκαλούνται από τον συγκεκριμένο μηχανισμό θεωρείται ότι ανήκουν στην κατηγορία των «παρασιτικών απωλειών», δηλαδή δεν συνιστάται η μέτρηση τους για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης.

iv. Απώλειες μετάδοσης

Αν και οι περισσότερες απώλειες μετάδοσης δεν πραγματοποιούνται στο ελαστικό υπάρχει πάντα απώλεια ενέργειας λόγω της τριβής στο ρουλεμάν του τροχού. Τα ρουλεμάν που βρίσκονται σε καλή κατάσταση θα έπρεπε να έχουν αμελητέα συμβολή στην αντίσταση κύλισης λόγω απώλειας ενέργειας, ωστόσο δεν μπορούν να αποκλειστούν εντελώς οι πιθανότητες επιρροής του παράγοντα αυτού. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 28580 (ISO 28580, 2018) ο μηχανισμός αυτός θεωρείται επίσης

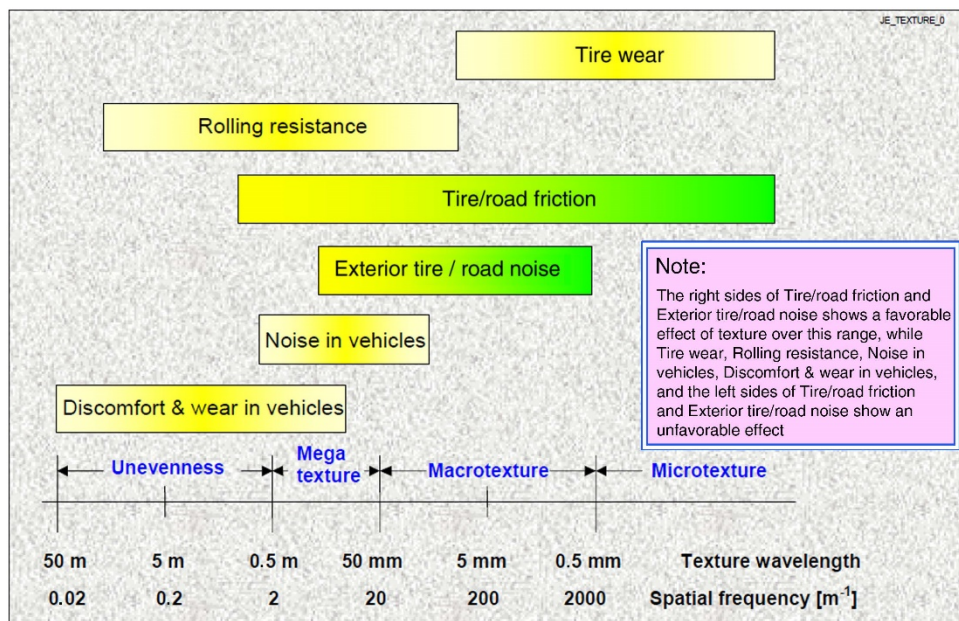
«παρασιτική απώλεια» και δεν πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στην αντίσταση κύλισης (Andersen, 2015).

2.3.2 Ενεργειακές απώλειες από την αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος

ι. Ομαλότητα και υφή επιφάνειας

Κατά την παραμόρφωση του ελαστικού εξαιτίας της υφής του οδοστρώματος προκαλούνται απώλειες υστέρησης. Οι τοπικές παραμορφώσεις του ελαστικού συμβαίνουν στην επιφάνεια επαφής του ελαστικού/οδοστρώματος, όπου τα «μπλοκ» του πέλματος του ελαστικού παραμορφώνονται και διαπερνώνται από αδρανή του οδοστρώματος (Andersen, 2015).

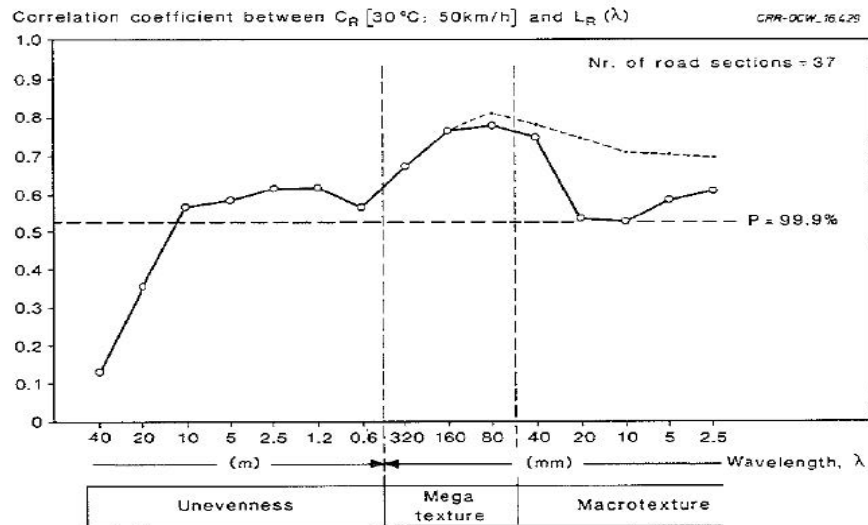
Εξετάζοντας τις μεταβολές που υφίσταται η αντίσταση κύλισης εξαιτίας των επιφανειακών συνθηκών σε όλα τα μήκη κύματος διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης εξαρτάται από την μακροϋφή, τη μεγαϋφή και την ομαλότητα του οδοστρώματος (Εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.16-Υφή και ομαλότητα οδοστρώματος ανά μήκη κύματος και τα αναμενόμενα αποτελέσματα επιρροής

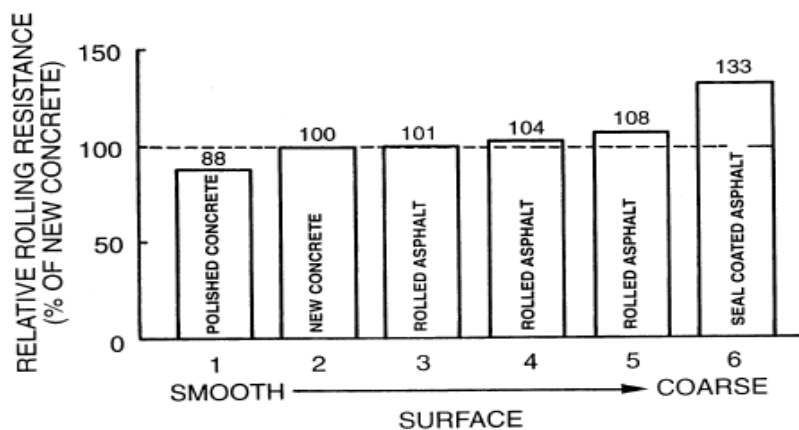
Πηγή: (Andersen , et al., 2015)

Σε μια προσπάθεια συλλογής όλων των αποτελεσμάτων των ερευνών που έχουν διεξαχθεί για τη συσχέτιση της αντίστασης κύλισης με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος, ο (Sandberg, 1997), λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα δεκαπέντε πραγματοποιημένων ερευνών, καταλήγει ότι ο ποσοστιαίος μέσος όρος επιρροής της μακροϋφής είναι 10%, της μεγαϋφής 12% και της ομαλότητας 8%. Φαίνεται ότι η αντίσταση κύλισης είναι περισσότερο ευαίσθητη ως προς τη μεγαϋφή του οδοστρώματος. Όμως, σε μεταγενέστερες έρευνες για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης η παράμετρος της μεγαϋφής δε λαμβάνεται υπόψη. Τα ποσοστά αυτά αντιπροσωπεύουν την επιρροή της επιφάνειας του οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμων συγκρίνοντας τις πιο ομαλές επιφάνειες κυκλοφορίας με τις πιο “ανώμαλες” που μπορούν να εντοπιστούν σε ένα συμβατικό οδικό δίκτυο. Για οδοστρώματα με “κανονικές συνθήκες” είναι πιο αντιπροσωπευτική η χρήση των παραπάνω ποσοστών επιρροής κατά το ήμισυ τους (Sandberg, et al., 2011). Στην **Εικόνα 2.17** αποτυπώνεται η διαμόρφωση του συντελεστή αντίστασης κύλισης σαν συνάρτηση του μήκους κύματος της μακροϋφής, της μεγαϋφής και της ομαλότητας από τις οποίες επηρεάζεται.



Εικόνα 2.17-Συντελεστής αντίστασης κύλισης σε σχέση με την υφή και την ομαλότητα
Πηγή: (Sandberg, 1997)

Γενικά, σε δύσκαμπτα οδοστρώματα και ομαλές επιφάνειες κύλισης, η αντίσταση κύλισης είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που παρατηρείται σε μια “ανώμαλη” επιφάνεια κύλισης (**Εικόνα 2.18**).



Εικόνα 2.18-Επιρροή της επιφάνειας του οδοστρώματος στην αντίσταση κύλισης
Πηγή: (Clark, 1971)

Στην **Εικόνα 2.18** πραγματοποιείται σύγκριση της αντίστασης κύλισης για την κύλιση ενός ελαστικού σε έξι διαφορετικές επιφάνειες με διαφορετική ομαλότητα, από μία ομαλή επιφάνεια σκυροδέματος ως μία μη ομαλή ασφαλτική επιφάνεια. Παρατηρείται ότι η “ανώμαλη” επιφάνεια της ασφάλτου (επιφάνεια νούμερο 6) παρουσιάζει αυξημένη αντίσταση κύλισης κατά 33% σε σχέση με μια νέα ομαλή επιφάνεια σκυροδέματος (επιφάνεια νούμερο 2) (Clark, 1971). Επομένως, περισσότερες “ανωμαλίες” στην επιφάνεια κύλισης συντελούν στην αύξηση της αντίστασης κύλισης.

ii. Φαινόμενο ‘stick-slip’

Η παραμόρφωση των «μπλοκ» του πέλματος του ελαστικού κατά την επαφή με το οδόστρωμα δημιουργεί εφαιπόμενικές κινήσεις εξαιτίας των οποίων τα «μπλοκ» ξεγλιστρούν από την επιφάνεια επαφής όταν την αφήνουν. Εξαιτίας της δράσης του φαινομένου στη διεπιφάνεια του ελαστικού και του οδοστρώματος, στοιχεία του πέλματος αποκολλούνται και εκτρέπονται σε οριζόντιες και πλάγιες κατευθύνσεις (microslippage). Σε αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας προκαλείται από το σπάσιμο των μοριακών δεσμών του καουτσούκ κατά την αποκόλληση, παρά από την παραμόρφωση του πέλματος.

iii. Φαινόμενο ‘stick-snap’

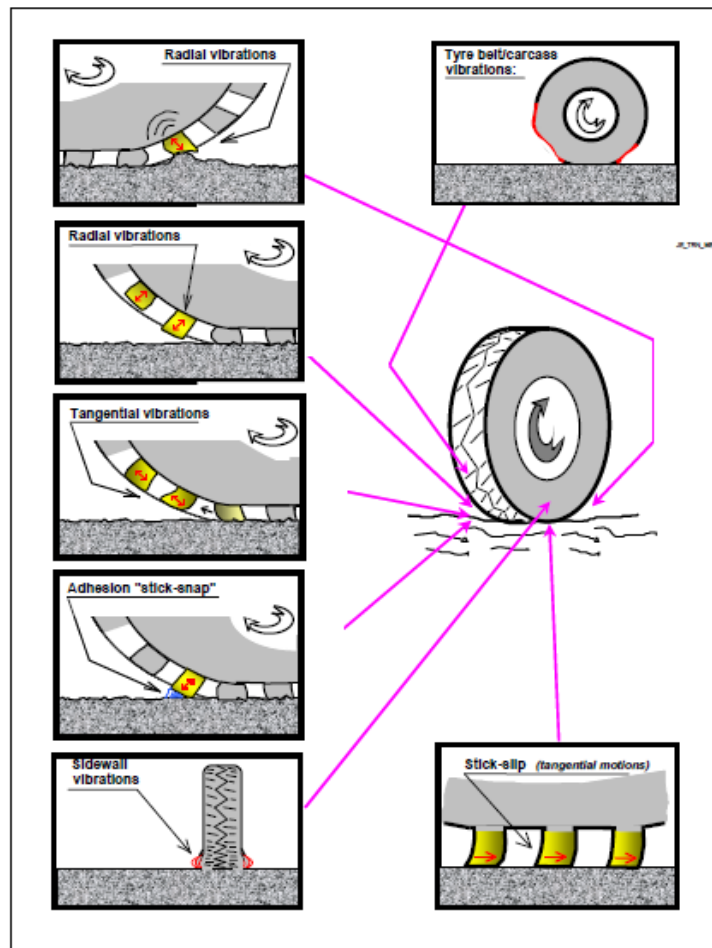
Οι μοριακοί δεσμοί μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος στην περιοχή επαφής αναπτύσσουν συγκολλητικές δυνάμεις, τις οποίες πρέπει να

υπερνικήσει το πέλμα του ελαστικού καθώς αφήνει την επιφάνεια επαφής. Με αυτόν τον τρόπο καταναλώνεται πρόσθετη ενέργεια. (Andersen, 2015).

iv. Παραμόρφωση οδοστρώματος

Η παραμόρφωση του οδοστρώματος υπό την επιβολή του φορτίου του ελαστικού δεν είναι αμελητέα, κυρίως όταν πρόκειται για ασφαλτικό οδόστρωμα. Μεγαλύτερη παραμόρφωση του οδοστρώματος συνεπάγεται μείωση της παραμόρφωσης του ελαστικού με αποτέλεσμα μικρότερες ενεργειακές απώλειες στο ελαστικό.

Στην **Εικόνα 2.19** παρουσιάζονται σχηματικά όλοι οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την παραμόρφωση του ελαστικού εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με το οδόστρωμα και συμβάλλουν στην ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης.



Εικόνα 2.19-Συνοπτική απεικόνιση των σχετικών με την παραμόρφωση του ελαστικού μηχανισμών που προκαλούν απώλειες ενέργειας
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)

2.3.3 Ενεργειακές απώλειες στο οδόστρωμα

i. Παραμόρφωση του οδοστρώματος εξαιτίας του φορτίου του οχήματος

Το οδόστρωμα είναι δυνατό να παραμορφωθεί λόγω της επιβολής των φορτίων κυκλοφορίας, ειδικά εάν χαρακτηρίζεται από μια αδύναμη στρώση βάσης. Η παραμόρφωση που μπορεί να υποστεί το οδόστρωμα εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου που δέχεται το ελαστικό και μεταφέρει στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Όμως, οι απώλειες ενέργειας που προκαλούνται από την παραμόρφωση του οδοστρώματος είναι ανεξάρτητες από το ελαστικό και οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου.

ii. Φθορά και μετακίνηση των αδρανών

Τα αδρανή της επιφάνειας του οδοστρώματος φθείρονται ενώ υπάρχει και η πιθανότητα να μετακινηθούν ελαφρώς υπό την επίδραση εφαπτομενικών δυνάμεων (stick-slip). Τέτοιες μετακινήσεις πρατηρούνται κυρίως κατά την πέδηση του ελαστικού και δημιουργούν απώλειες ενέργειας. Στην περίπτωση αποκόλλησης αδρανών από τη στρώση κυκλοφορίας προκαλούνται απώλειες ενέργειας, λόγω της ύπαρξης ελεύθερων αδρανών που “κινούνται” στην περιοχή επαφής μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος.

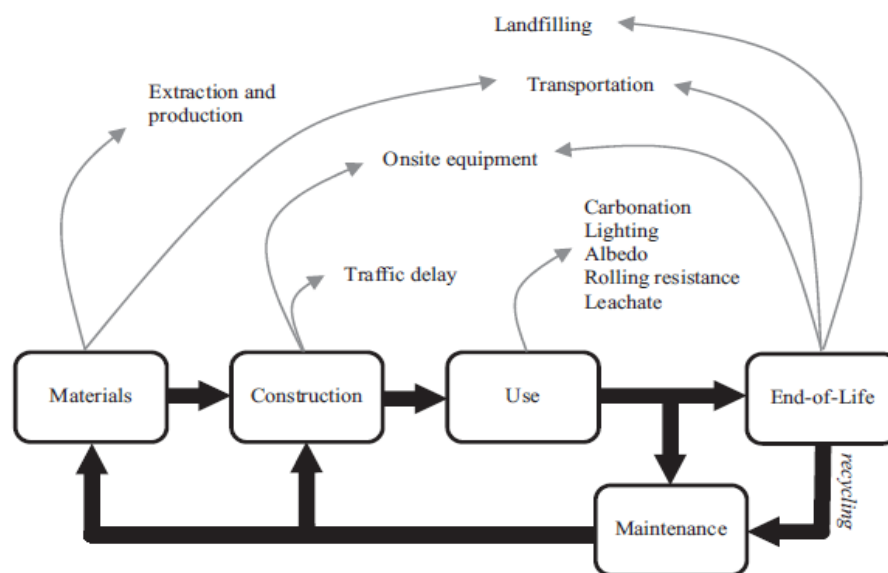
2.4 Αντίσταση κύλισης και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Κατά τη διάρκεια της χρήσης του οδοστρώματος, οι εκπομπές αέριων ρύπων επηρεάζονται από έναν αριθμό παραγόντων μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνεται και η αντίσταση κύλισης. Μάλιστα υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η αντίσταση κύλισης δύναται να αποτελέσει τον κυρίαρχο παράγοντα στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, η αντίσταση κύλισης δρώντας αντίθετα στη φορά κίνησης του οχήματος εξαναγκάζει το όχημα σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμων προκειμένου να υπερνικήσει της αντίδραση αυτή της αντίστασης κύλισης και να διατηρηθεί η κίνησή του. Η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων οδηγεί σε μεγάλη αύξηση των εκπεμπόμενων περιβαλλοντικών ρύπων, αποδεικνύοντας την εξαιρετική σημασία της φάσης χρησιμοποίησης του οδοστρώματος

από τους χρήστες στην εκτίμηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στις οδικές μεταφορές.

Με στόχο την απομείωση της αρνητικής περιβαλλοντικής επιρροής των οδικών μεταφορών, τα τελευταία χρόνια, φορείς διαχείρισης αυτοκινητοδρόμων και ένας ολοένα και αυξανόμενος αριθμός οργανισμών, εταιριών και κυβερνητικών θεσμών εισάγουν στις διαδικασίες διαχείρισης και αξιολόγησης των οδοστρωμάτων καθώς και στην λήψη αποφάσεων, την μελέτη της βιωσιμότητας και τις αρχές της αειφορίας. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται χρήση μιας συστηματικής και οργανωμένης προσέγγισης (Life Cycle Assessment: **LCA**). Το μοντέλο LCA αποτελεί μία δομημένη μεθοδολογία, η οποία επιχειρεί την εκτίμηση και κατ' επέκταση την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος.

Ο τυπικός κύκλος ζωής ενός οδοστρώματος διαχωρίζεται σε πέντε φάσεις (**Εικόνα 2.20**). Περιλαμβάνει την παραγωγή πρώτων υλών, την κατασκευή, την χρήση, την συντήρηση και το τέλος της ζωής του οδοστρώματος. Κάθε μία από τις παραπάνω φάσεις αποτελείται από μία ποικιλία συστατικών, κάθε ένα από το οποία με τη σειρά του εκφράζει μια ιδιαίτερη αλληλεπίδραση μεταξύ του οδοστρώματος και του περιβάλλοντος (Santero, et al., 2011).



Εικόνα 2.20-Φάσεις και συστατικά του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος
Πηγή: (Santero, et al., 2011)

Το στάδιο της χρήσης της οδού από τους χρήστες, αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη φάση από όλες κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και επομένως αποτελεί, ίσως, τον

πιο κρίσιμο και πολύπλοκο παράγοντα στη μέθοδο αξιολόγησης LCA ενός οδοστρώματος, απαιτώντας εξειδικευμένη γνώση πάνω σε αρκετές και μεταξύ τους διαφορετικές περιοχές μελέτης. Υπό το πρίσμα αυτό, η αντίσταση κύλισης αποτελεί μία σημαντική παράμετρο της μεθόδου αξιολόγησης LCA και η συμπερίληψή της σε αυτή είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για την εξαγωγή ασφαλέστερων εκτιμήσεων όσον αφορά στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας των οδοστρωμάτων κατά τον κύκλο ζωής τους.

Όμως, δεδομένου ότι η αντίσταση κύλισης εξαρτάται εν μέρει από τα ελαστικά και τις ιδιότητές τους, αλλά παράλληλα εξαρτάται άμεσα από τον τύπο και τις ανωμαλίες του οδοστρώματος, συμπεραίνεται ότι η διερεύνηση ως προς την χρήση των δύο τελευταίων παραμέτρων στο πλαίσιο της μεθόδου LCA είναι απαραίτητη. Η επίδραση του τύπου του οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων περιστρέφεται γύρω από την ιξωδοελαστική ιδιότητα της ασφάλτου. Έχουν γίνει αρκετές έρευνες σχετικά με την φιλικότερη, ως προς το περιβάλλον, επιλογή ανάμεσα στην άσφαλτο και το σκυρόδεμα (Santero, et al., 2011). Οι περισσότερες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα, δεχόμενα την κυκλοφορία των οχημάτων, παραμορφώνονται και απορροφούν ενέργεια, η οποία υπό διαφορετικές συνθήκες θα χρησιμοποιούνταν για την επιτάχυνση του οχήματος. Αντίθετα, θεωρούν ότι τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα χάρη στη δυσκαμψία τους αποτρέπουν αυτό το φαινόμενο. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί έντονες αμφιβολίες γύρω από αυτά τα συμπεράσματα εξαιτίας του σχετικά μικρού αριθμού τους και του περιορισμένου πεδίου της έρευνάς τους. Ως αποτέλεσμα, αν και οι έρευνες τείνουν στο ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα έχουν καλύτερη αποτελεσματικότητα ως προς την κατανάλωση καυσίμου, η έλλειψη οριστικών αριθμητικών σχέσεων που να συσχετίζουν τον τύπο του οδοστρώματος με την αντίσταση κύλισης και την κατανάλωση καυσίμων είναι αναμφισβήτητο ο λόγος για τον οποίο απουσιάζουν θεωρήσεις για τον τύπο του οδοστρώματος από τις έως τώρα μελέτες της μεθόδου LCA.

Η επιρροή τώρα της επιφάνειας του οδοστρώματος, οφείλεται στην υστέρηση του ελαστικού, εξαιτίας της οποίας χάνεται ενέργεια σε θερμότητα κατά την παραμόρφωση του ελαστικού από τις ανωμαλίες της επιφάνειας, έχοντας συνεπώς αρνητική επιρροή στην οικονομία καυσίμου. Επισημαίνεται ότι η αντίσταση κύλισης που αντιμετωπίζει ένα όχημα κατά την κύλιση του είναι μία μόνο από τις δυνάμεις αντίστασης που δέχεται αλλά και ότι η αντίσταση κύλισης επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους ακόμη, εκτός από την τραχύτητα της επιφάνειας, όπως οι ιδιότητες του ελαστικού και άλλα χαρακτηριστικά,

τα οποία καταναλώνουν διαθέσιμη ενέργεια για την παραμόρφωση είτε του οδοστρώματος είτε του ελαστικού, παρά για τη κίνηση του οχήματος. Ως εκ τούτου, είναι αρκετά περίπλοκη η διαδικασία της απομόνωσης και της ποσοτικοποίησης της επιρροής της επιφάνειας του οδοστρώματος στην κατανάλωση καυσίμου με σκοπό την συμπερίληψη της στη δομή της μεθόδου LCA.

Κατά τη φάση λειτουργίας ενός οδοστρώματος, όπως απεικονίζεται και στην **Εικόνα 2.20**, το οδόστρωμα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον μέσω της αντίστασης κύλισης αλλά και άλλων χαρακτηριστικών όπως η ανθράκωση, ο φωτισμός, η λευκαύγεια και η στράγγιση. Εξαιτίας του γεγονότος ότι στην φάση λειτουργίας του οδοστρώματος οι εκπομπές ρύπων αποτελούν αποτέλεσμα της επίδρασης ποικίλων παραμέτρων, συμπεριλαμβανόμενης και της αντίστασης κύλισης, η ποσοτικοποίηση της επιρροής της συγκεκριμένης φάσης καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη. Αυτή η αδυναμία ποσοτικοποίησης, σε ένα επαρκές επίπεδο αξιοπιστίας, είναι και ο λόγος για τον οποίο στο παρελθόν η φάση λειτουργίας του οδοστρώματος παραλείπονταν από το γενικό πλαίσιο της δομής της μεθόδου LCA (Santero , et al., 2011).

Τα τελευταία χρόνια, όμως, πραγματοποιούνται προσπάθειες για την εκτίμηση της επιρροής της φάσης λειτουργίας ενός οδοστρώματος στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως μέσω της διερεύνησης της αλληλεπίδρασης του ελαστικού του οχήματος με το οδόστρωμα. Η ποσοτικοποίηση της επιρροής της αντίστασης κύλισης, κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος, αναμένεται να συμβάλλει καθοριστικά στην απόκτηση αξιόπιστων αποτελεσμάτων αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Με την επίτευξη του στόχου αυτού η μέθοδος αξιολόγησης LCA, δεδομένου ότι θα συμπεριλαμβάνεται πια η επίδραση της φάσης λειτουργίας της οδού, θα δύναται να μετέχει με σαφώς περισσότερη αξιοπιστία στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων από τους αρμόδιους φορείς (Trupia, et al., 2017).

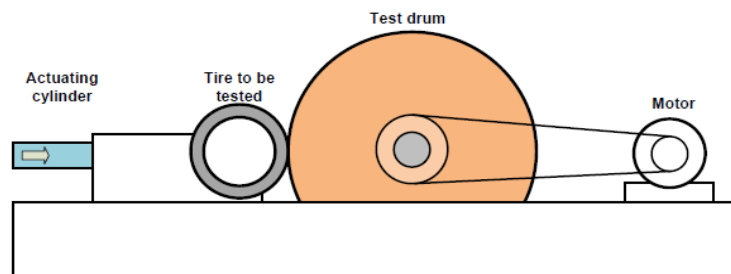
3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΛΙΣΗΣ

3.1 Πρακτικές μέτρησης

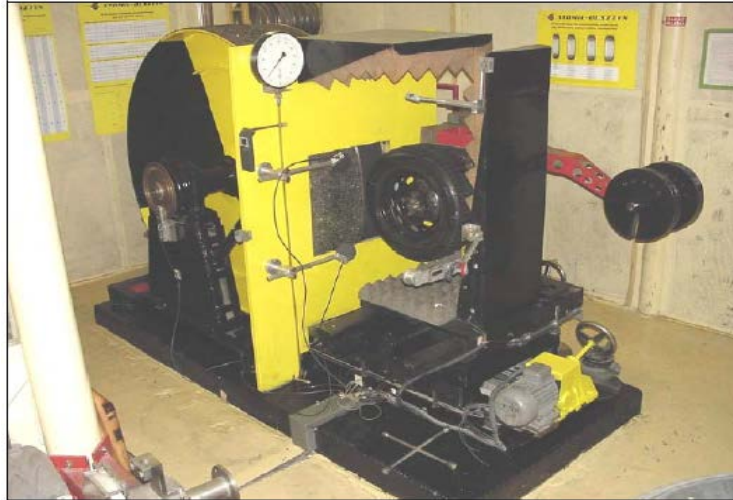
3.1.1 Εργαστηριακές μετρήσεις

Οι εργαστηριακές μετρήσεις αφορούν κυρίως σε μετρήσεις της αντίστασης κύλισης με τη χρήση τυμπάνου. Η ανάπτυξη της μεθόδου χρονολογείται από το 1922. Αποτελεί πρακτική διαδικασία για τον έλεγχο της αντίστασης κύλισης των ελαστικών στο εργαστήριο και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη από τις βιομηχανίες ελαστικών. Πολλές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί για την τυποποίηση της διαδικασίας με την ανάπτυξη πρότυπων προδιαγραφών (ISO 18164, 2005; ISO 28580, 2009; ISO 28580, 2018; SAE J1269, 2019). Από το 2009 και έπειτα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση απαιτείται από τους κατασκευαστές των ελαστικών η αναγραφή στην ετικέτα του ελαστικού και του δείκτη απόδοσης του στην αντίσταση κύλισης, ο οποίος εκτιμάται με την μέθοδο του τυμπάνου.

Η βασική ιδέα της μεθόδου περιλαμβάνει την φόρτιση του ελαστικού, το οποίο τοποθετείται πάνω στο ειδικά σχεδιασμένο τύμπανο. Το τύμπανο συνδέεται με έναν κινητήρα, ο οποίος το περιστρέφει (**Εικόνες 3.1-3.2**). Η αντίσταση κύλισης του ελαστικού επιβραδύνει την περιστροφή του τυμπάνου και υπολογίζοντας την επιβράδυνση αυτή με διάφορους τρόπους, που αναφέρονται στο πρότυπο ISO 28580 (ISO 28580, 2018) εξάγονται συμπεράσματα για την αντίσταση κύλισης του δοκιμαστικού ελαστικού. Το πρότυπο επίσης καθορίζει τους χρόνους μέτρησης, τους τύπους υπολογισμού της αντίστασης κύλισης, τη διόρθωση θερμοκρασίας, τη διόρθωση της καμπυλότητας του τυμπάνου κ.ά. (Andersen, 2015).



Εικόνα 3.1-Τυπική διάταξη της μεθόδου μέτρησης με τύμπανο
Πηγή: (Sandberg, et al., 2011)



Εικόνα 3.2-Εξοπλισμός μεθόδου μέτρησης με τύμπανο, εργαστήριο TUG (Technical University of Gdansk)

Πηγή: (Bergiers, et al., 2011)

Η μέθοδος τυμπάνου είναι από τις πλέον εξεικευμένες τεχνικές μέτρησης της αντίστασης κύλισης, δεδομένου ότι δεν συμπεριλαμβάνει την πολυπλοκότητα παραμέτρων που την επηρεάζουν άμεσα, όπως τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Αυτό εν' μέρει αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου, καθώς την καθιστά την πιο ιδανική μέθοδο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του ελαστικού. Ωστόσο, ο μη συνυπολογισμός των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του οδοστρώματος, δηλαδή της υφής και της ομαλότητάς του, αποτελεί σημαντική παράλειψη για την ακριβή εκτίμηση της αντίστασης κύλισης. Η παράλειψη αυτή θα μπορούσε να αποκατασταθεί με τη χρήση μιας τραχειάς επιφάνειας τυμπάνου. Μια τέτοια προσπάθεια πραγματοποιήθηκε στο TUG, κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις επικαλύπτοντας την επιφάνεια του τυμπάνου με δύο επιφάνειες που προσομοιώνουν το οδόστρωμα με διαφορετική μακροϋφή η κάθε μία, με τιμές $MPD=0.12$ και $MPD=2.4$ (Karlsson, et al., 2011). Αν και με αυτόν τον τρόπο δύναται να εκτιμηθεί η επιρροή της μακροϋφής στην αντίσταση κύλισης και πάλι διατηρούνται αμφιβολίες για την ορθή αναπαράσταση της ποικιλομορφίας των επιφανειών που εντοπίζονται στις πραγματικές οδούς.

3.1.2 Μέτρηση με ρυμουλκούμενο όχημα

Τα πρώτα δημοσιευμένα αποτελέσματα που αφορούν στη μέθοδο μέτρησης της αντίστασης κύλισης με χρήση ρυμουλκούμενου οχήματος παρουσιάστηκαν το 1990 από

τον (Descornet, 1990). Με τη μέθοδο αυτή, έγινε εισαγωγή στη μέτρηση της αντίστασης κύλισης, η επιρροή της επιφάνειας του οδοστρώματος αποδεικνύοντας την ουσιαστική επιρροή της αντίστασης κύλισης, κυρίως από τη μακροϋφή του οδοστρώματος. Το πρώτο ρυμουλκούμενο όχημα κατασκευάστηκε από το Κέντρο Οδικών Ερευνών του Βελγίου (Belgian Road Research Centre: **BRRC**). Από τότε κατασκευάστηκαν αρκετά ακόμη τέτοια οχήματα, όπως αυτά από το **TUG (Εικόνα 3.3)**, το **BASt** (Bundesanstalt für Straßenwesen) από το Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Οδικής Έρευνας της Γερμανίας (Federal Highway Research Institute of Germany) (**Εικόνα 3.4**) και από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ελσίνκι (Helsinki University of Technology: **HUT**), τα τελευταία όχι με ιδιαίτερη επιτυχία. Τα οχήματα BRRC, TUG και BASt όμως χρησιμοποιούνται ευρέως στη μέτρηση της αντίστασης κύλισης και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων (Andersen, et al., 2015). Το όχημα μάλιστα που κατασκευάστηκε στο TUG έχει εκσυγχρονιστεί επιτυγχάνοντας τη μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και της επιρροής από αδρανειακές δυνάμεις και χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη και στην Αμερική.

Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου περιλαμβάνει την τοποθέτηση του ελαστικού στο ρυμουλκούμενο και την επιβολή ενός φορτίου στο ελαστικό. Το τρέιλερ, ρυμουλκείται από κάποιο άλλο όχημα, με σταθερή κατά προτίμηση ταχύτητα. Η αντίσταση κύλισης του ελαστικού, δημιουργεί μια επιβραδυντική δύναμη, η οποία μετράται από το ρυμουλκούμενο τρέιλερ με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του ρυμουλκούμενου TUG μετράται η γωνία εκτροπής του βραχίονα μέτρησης στον οποίο είναι συνδεδεμένος ο τροχός.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι εξειδικευμένη, όπως αυτή της μέτρησης με τη βοήθεια του τυμπάνου, καθώς οι μετρήσεις γίνονται σε πραγματικούς δρόμους λαμβάνοντας έτσι υπόψη τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που επηρεάζουν άμεσα το φαινόμενο. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται υπόψη απώλειες ενέργειας, οι οποίες συμβαίνουν στο οδόστρωμα εξαιτίας των παραμορφώσεων που υφίσταται (Andersen, 2015).



Εικόνα 3.3-Ρυμουλκούμενο τρέιλερ TUG (Technical University of Gdansk)
Πηγή: (Bergiers, et al., 2011)



Εικόνα 3.4 -Ρυμουλκούμενο τρέιλερ BAST (Federal Highway Research Institute of Germany)
Πηγή: (Haider, et al., 2011)

Η μέτρηση της αντίστασης κύλισης με την αξιοποίηση του εξοπλισμού ρυμουλκούμενων τρέιλερ αποτέλεσε μία από τις βασικές περιοχές διερεύνησης του ερευνητικού προγράμματος MIRIAM (Models for Rolling Resistance In Road Infrastructure Asset Management systems) (Bergiers, et al., 2011). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας ερευνητικών φορέων κυρίως από την Ευρώπη, αλλά και από της Ηνωμένες Πολιτείες. Στο πλαίσιο του εν λόγω προγράμματος, αποδείχθηκε ότι η αντίσταση κύλισης συσχετίζεται πολύ καλά τόσο με τη μακροϋφή, όσο και με τη μεγαϋφή του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά τρέιλερ, το TUG, το BRRC και το BAST, καθένα από τα οποία δοκιμάστηκε για μια σειρά διαφορετικών ελαστικών, δημιουργώντας συγκρίσιμες μετρήσεις. Τα τρία χρησιμοποιούμενα τρέιλερ έχουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά στον σχεδιασμό τους που ασφαλώς δυσχεραίνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, ωστόσο και τα τρία πραγματοποιούν μετρήσεις στη διαδρομή του κεντρικού τροχού. Οι δοκιμαστικές

μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη Γαλλία, σε μία πειραματική διάταξη των εγκαταστάσεων του Γαλλικού Ινστιτούτου Επιστήμης και Τεχνολογίας Μεταφορών, Ανάπτυξης και Δικτύων (French institute of sciences and technology for transport, development and networks: IFSTTAR).

Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στο πλαίσιο του εν λόγω προγράμματος και καταγράφηκαν στην έρευνα των (Bergiers, et al., 2011), αποτελείται από δώδεκα τομείς με διαφορετική επιφάνεια κύλισης σε κάθε περίπτωση. Οι επιφάνειες αυτές έχουν διαφορετικό μήκος και πλάτος και καλύπτουν μια ποικιλία υφών με εύρος τιμών του δείκτη MPD από 0.08 έως 2.77. Οι μετρήσεις σε κάθε τρέιλερ πραγματοποιήθηκαν για διάφορους συνδυασμούς ελαστικού, οδικής επιφάνειας, ταχύτητας και κατεύθυνσης. Η μέση τυπική απόκλιση όλων των συνδυασμών για κάθε τρέιλερ ξεχωριστά υπολογίστηκε και εκφράστηκε ως ποσοστό της μέσης αντίστασης κύλισης. Η μικρότερη τυπική απόκλιση (περίπου ίση με 1%) με σημαντική διαφορά έναντι των υπόλοιπων δύο (περίπου 3 %) παρουσιάστηκε στις μετρήσεις προερχόμενες από το τρέιλερ TUG, γεγονός που εξηγεί και την μετέπειτα ευρεία χρήση του σε αντίστοιχες μελέτες. Όμως, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση των άλλων δύο ρυμουλκούμενων θεωρήθηκαν επίσης αποδεκτά. Τα αποτελέσματα του προγράμματος θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά καθώς πλέον παράμετροι του οδοστρώματος και συγκεκριμένα η μακροϋφή και η μεγαϋφή, συσχετίστηκαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με την αντίσταση κύλισης (Bergiers, et al., 2011; Andersen, 2015).

3.1.3 Μέθοδος ακινητοποίησης οχήματος (coast-down method)

Η μέθοδος μέτρησης της αντίστασης κύλισης μέσω της ακινητοποίησης οχήματος λαμβάνει υπόψη της το σύνολο των δυνάμεων που αντιτίθενται στην κίνηση του οχήματος και όχι απλώς της αντίστασης κύλισης όπως ίσχυε στις προηγούμενες μεθόδους.

Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική δύναμη που δρα σε ολόκληρο το όχημα εξάγεται από τη μέτρηση της ταχύτητας ενός οχήματος που κινείται ελεύθερα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα όχημα στο οποίο προσδίδεται μία αρχική ταχύτητα και έπειτα αφήνεται να κυλίσει ελεύθερα από μία συγκεκριμένη αρχική θέση. Καθώς στο όχημα

επιδρούν όλες οι δυνάμεις αντίστασης οι οποίες συνυπάρχουν κατά την κίνηση ενός οχήματος, αυτό επιβραδύνεται έως ότου ακινητοποιηθεί. Σε όλη τη διάρκεια της κίνησης του, από την στιγμή που αφήνεται να κυλίσει ελεύθερα μέχρι τη στιγμή της ακινητοποίησης του, μετράται η ταχύτητά του. Παράλληλα, είναι δυνατό να μετρηθούν και άλλα χαρακτηριστικά, όπως η υφή του οδοστρώματος, η κλίση της οδού, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου κ.ά. (Andersen , et al., 2015). Η ταχύτητα συνήθως μετράται σε υψηλή συχνότητα για ακριβέστερα αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή δεν εξάγει απ'ευθείας συμπεράσματα για την αντίσταση κύλισης αλλά είναι απαραίτητη η χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου για να προκύψουν συμπεράσματα γι' αυτήν. Πραγματοποιώντας μία σειρά μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες και κάνοντας ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου παλινδρόμησης είναι δυνατό να απομονωθεί η συνεισφορά καθεμιάς απ' τις δυνάμεις που αντιστέκονται στην κίνηση του οχήματος στην συνολική αντίσταση που το επιβραδύνει. Για παράδειγμα, εάν πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε διαφορετικές οδούς, οι οποίες διαφέρουν ως προς τα επιφανειακά χαρακτηριστικά τους, είναι εφικτός ο υπολογισμός της αντίστασης κύλισης σαν συνάρτηση των επιφανειακών χαρακτηριστικών.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι των προηγούμενων είναι ότι λαμβάνεται υπόψη ολόκληρο το όχημα και οι απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν κατά την κίνηση του, καθώς και ότι είναι εφαρμόσιμη σε όλους τους τύπους οχημάτων. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της μεθόδου αυτής λαμβάνεται ακόμη υπόψη η επιρροή της ομαλότητας, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό με τις προηγούμενες μεθόδους (Karlsson, et al., 2011).

3.1.4 Έμμεσος προσδιορισμός από μετρήσεις κατανάλωσης καυσίμων

Η μέτρηση της κατανάλωσης καυσίμων είναι ο πιο γενικός τρόπος που μπορεί να ακολουθηθεί για την εκτίμηση της αντίστασης κύλισης επειδή περιλαμβάνει όλες τις πιθανές παραμέτρους που επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης. Η αντίσταση κύλισης είναι βέβαιο ότι επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμων ενός οχήματος. Όμως, η κατανάλωση καυσίμων εξαρτάται από το σύνολο των αντιστεκόμενων δυνάμεων που δέχεται το όχημα. Έτσι, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο να απομονώσει κανείς από τη συνολική κατανάλωση του οχήματος τις απώλειες ενέργειας που οφείλονται αποκλειστικά στην αντίσταση κύλισης. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, για την

εκτίμηση της αντίστασης κύλισης απαιτείται η χρήση κάποιου μοντέλου υπολογισμού. Τα σύγχρονα μοντέλα υπολογισμού της μεθόδου αυτής συμπεριλαμβάνουν πληθώρα παραμέτρων που αφορούν τους τροχούς, τον κινητήρα, το σύστημα οδήγησης, το οδόστρωμα, τις μετεωρολογικές συνθήκες και άλλα (Andersen , et al., 2015).

3.2 Αλγόριθμοι υπολογισμού

3.2.1 Γενικά

Η χρήση των μεθόδων μέτρησης της αντίστασης κύλισης που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα είναι ευρεία. Όμως, η ακριβής διαδικασία που ακολουθείται υφίσταται διαφοροποιήσεις κατά την εφαρμογή μιας μεθόδου από χώρα σε χώρα και από ερευνητή σε ερευνητή, γεγονός που οφείλεται στην έλλειψη αυστηρών πρότυπων προδιαγραφών που θα μπορούσαν να περιορίσουν τέτοια φαινόμενα (Andersen, 2015). Τέτοιες διαφοροποιήσεις καθιστούν πολλές φορές δύσκολη τη σύγκριση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων ακόμη και αν αυτά προέρχονται από εφαρμογή της ίδιας μεθόδου μέτρησης. Τα τελευταία χρόνια, στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην αντίσταση κύλισης, τα αποτελέσματα των μεθόδων μέτρησης της αντίστασης κύλισης αξιοποιούνται για την ανάπτυξη αλγορίθμων, οι οποίοι εκτιμούν την αντίσταση κύλισης. Από την ανάλυση των μετρήσεων οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται συσχετίζονται απ'ευθείας με τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των οδοστρωμάτων εξαγοντας συμπεράσματα για τον βαθμό επιρροής του καθενός στην αντίσταση κύλισης.

Η έκφραση της αντίστασης κύλισης μέσω των αλγορίθμων, περιλαμβάνει τους δείκτες **MPD** και **IRI**. Η υφή και η ομαλότητα αποτελούν τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος με την μέγιστη επιρροή στην αντίσταση κύλισης έναντι άλλων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Από τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, η υφή κατέχει τον καθοριστικότερο ρόλο στην δημιουργία της αντίστασης κύλισης καθώς έχει υπολογιστεί ότι επηρεάζει την αντίσταση κύλισης περίπου στο τριπλάσιο σε σχέση με την ομαλότητα (Trupia, et al., 2017). Η συσχέτιση της μακροϋφής του οδοστρώματος με την αντίσταση κύλισης έχει διερευνηθεί σε διαφορετικές και ανεξάρτητες σειρές μετρήσεων που περιγράφονται αναλυτικά στο πρόγραμμα Miriam (Sandberg, et al., 2011). Η βέλτιστη εκτίμηση της

αντίστασης κύλισης συναρτήσει του δείκτη MPD θεωρείται ότι περιγράφεται από την Εξίσωση 3.1.

$$RRC = X * MPD + Constant \quad (3.1)$$

Ο συντελεστής X υπολογίζεται από 0.0017 έως 0.0020 ενώ ο σταθερός όρος $Constant$ για τυπικά οχήματα παίρνει τιμές από 0.008 έως 0.012 εξαρτώμενος από το ελαστικό και μια πληθώρα άλλων παραμέτρων. Στα ακόλουθα, αναφέρονται οι σπουδαιότερες μελέτες ως προς τη διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην αντίσταση κύλισης. Κατά τη διάρκεια τέτοιων ερευνών αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι υπολογισμού της αντίστασης κύλισης συναρτήσει της ομαλότητας και της υφής αλλά και άλλων παραμέτρων. Επίσης αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι υπολογισμού κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων, μερικοί από τους οποίους αναλύονται στα ακόλουθα.

3.2.2 Ανασκόπηση αλγορίθμων

❖ Πρόγραμμα IERD

Το πρόγραμμα **IERD** (Integration of Energy Usage into Road Design) της Ευρωπαϊκής Ένωσης ολοκληρώθηκε επιτυχώς το 2006. Στο πλαίσιο του προγράμματος, εκτιμήθηκε η δαπάνη ενέργειας, τόσο κατά το στάδιο της κατασκευής, όσο και κατά το στάδιο λειτουργίας μιας οδού με κύκλο ζωής είκοσι χρόνια. Για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία της οδού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης VETO του VTI. Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η κλίση, ο τύπος της επιφάνειας της οδού καθώς και τον όγκο κυκλοφορίας κατά τα είκοσι χρόνια της διάρκειας ζωής της. Περαιτέρω, για τον υπολογισμό των ενεργειακών επιπτώσεων στο στάδιο της κατασκευής αναπτύχθηκε ένα λογισμικό, ονομαζόμενο JOULESAVE, το οποίο λειτουργεί με το πακέτο σχεδιασμού Bentley MX Road. Το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να προσδιορίσει τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας σειράς επιλογών οδικής σχεδίασης, όσον αφορά στην κατανάλωση ενέργειας κατά την κατασκευή της οδού αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας από τα οχήματα κατά τη φάση λειτουργίας. Γι' αυτό τον λόγο η χρήση του λογισμικού θεωρείται ιδανική στη φάση επιλογής διαδρομών, ώστε οι διάφορες επιλογές να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους και να επιλεγεί η αποδοτικότερη από άποψη κατανάλωσης ενέργειας (ECRPD, 2010). Κάθε χώρα που συμμετείχε στην έρευνα, παρείχε οδικά

δεδομένα για τουλάχιστον δύο οδούς. Από την ανάλυση των δεδομένων αξιολογήθηκε η σημασία του μέσου βαθμού καμπυλότητας (Average Degree of Curvature: **ADC**) και της κλίσης της οδού (Rise and Fall:**RF**) για την κατανάλωση ενέργειας και προέκυψε ότι ο μέσος βαθμός καμπυλότητας αποτελεί παράμετρο μικρής σημασίας ενώ η κλίση της οδού αναδείχθηκε σε μείζονος σημασίας παράμετρο επιρροής (Hammarström, et al., 2012).

❖ Πρόγραμμα ECRPD

Το ερευνητικό πρόγραμμα ECRPD (Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation) πραγματοποιήθηκε την περίοδο 2007-2010 και βασίστηκε στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα IERD. Θεωρήθηκε επιθυμητό οι ενεργειακές απαιτήσεις των εργασιών συντήρησης και των υλικών που χρησιμοποιούνται να ενσωματωθούν στο πακέτο λογισμικού JOULESAVE, καθώς η ενέργεια που χρησιμοποιείται σε τέτοιες εργασίες συμβάλλει σημαντικά στη συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής μιας οδού. Το κύριο αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος ήταν η ανάπτυξη μεθόδων για την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά το στάδιο κατασκευής μιας οδού, κατά την συντήρηση αλλά και τη λειτουργία. Το νέο τροποποιημένο λογισμικό που δημιουργήθηκε, ονομάστηκε JOULESAVE2 και πλέον παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέγει τους τύπους υλικών από μια λίστα των πιο συνήθων χρησιμοποιούμενων υλικών και των νέων υλικών «χαμηλής ενέργειας» ενώ παράλληλα, εκτιμάται η απαίτηση ενέργειας για την παραγωγή και τοποθέτηση των υλικών. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε μια νέα έκδοση του VETO, το VETO ECRPD, για τον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία της οδού. Στη νέα αυτή έκδοση συμπεριλαμβάνεται η επίδραση της υποβάθμισης της οδού με το χρόνο και η επίπτωση της αντίστασης κύλισης στην ενέργεια που καταναλώνουν τα οχήματα (ECRPD, 2010; Carlson, et al., 2013). Στο πλαίσιο της έρευνας, για την εκτίμηση της αναπτυσσόμενης αντίστασης κύλισης δημιουργήθηκε ο παρακάτω αλγόριθμος πρόβλεψης. Για την δημιουργία του αλγορίθμου αξιοποιήθηκαν και αναλύθηκαν μετρήσεις από τη μέθοδο της ακινητοποίησης (coastdown measurements) (Hammarström, et al., 2012):

$$Fr = m \times g \times Cr \quad (3.2)$$

όπου:

Fr: η δύναμη αντίστασης κύλισης (N)

$$Cr = Cr01 + Cr02 \times V + dCr(IRI, v) + dCr(MPD) \quad (3.3)$$

$$dCr(IRI, v) = C2 \times IRI + C3 \times IRI \times (V - 20) \quad (3.4)$$

$$dCr(MPD) = C4 \times MPD + C5 \times MPD \times (V - 20) \quad (3.5)$$

όπου V η ταχύτητα σε m/s, οι συντελεστές C2, C3, C4, C5 αντιπροσωπεύουν το όχημα δοκιμών και οι συντελεστές Cr01, Cr02 αποτελούν εκτιμήσεις για ένα μέσο αυτοκίνητο.

Οι συντελεστές επιρροής εκτιμήθηκαν ως εξής:

$$Cr01 = 0.00926, Cr02 = 0.0000695, C2 = 0.00030, C3 = 0.0000347, C4 = 0.00221,$$

$$C5 = 0.000111$$

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι όταν η ομαλότητα οδοστρώματος σε όρους IRI (m/km) αυξηθεί κατά μία μονάδα, η αντίσταση κύλισης αυξάνεται κατά περίπου 2% στα 50 km/h και 6% στα 90 km/h. Επιπλέον, όταν η επιφάνεια της επιφάνειας του οδοστρώματος, εκφραζόμενη από τον δείκτη MPD (mm), αυξάνει μία μονάδα, η αντίσταση κύλισης αυξάνεται κατά 17% στα 50 km/h και κατά 30% περίπου στα 90 km/h. Όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας η οποία μπορεί να επιτευχθεί στα διάφορα στάδια της οδού, η χρήση του λογισμικού έδειξε τα εξής (ECRPD, 2010):

- Στάδιο κατασκευής: Εξοικονόμηση ενέργειας πάνω από 47%
- Στάδιο λειτουργίας: Εξοικονόμηση ενέργειας πάνω από 20%
- Συντήρηση: Εξοικονόμηση ενέργειας πάνω από 30%

❖ Αλγόριθμος BOERE

Ο αλγόριθμος υπολογισμού αντίστασης κύλισης Boere (Rajaei, et al., 2018), ο οποίος αναπτύχθηκε το 2009 αποτελεί ένα μηχανιστικό μοντέλο. Σε αυτή την περίπτωση, η μέση τετραγωνική ρίζα της υφής της επιφάνειας (Root Mean Square: **RMS_{tex}**) χρησιμοποιήθηκε ως μέγεθος συσχέτισης με τον συντελεστή αντίστασης κύλισης CRR. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τριάντα δοκιμαστικά τμήματα με διαφορετική υφή, στα οποία η υφή καταγράφηκε με σταθερό προφیلόμετρο τύπου λείζερ. Η αντίσταση κύλισης συσχετίστηκε με τον δείκτη RMS_{tex} με τη δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου (Εξίσωση 3.6), από όπου προέκυψε ότι μια μείωση της υφής της τάξης του 1mm οδηγεί σε μείωση της αντίστασης κύλισης περίπου 7%. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με μετρήσεις αντίστασης κύλισης που πραγματοποιήθηκαν στην Ολλανδία

με χρήση του τρέιλερ TUG. Από την ανάλυση των πειραματικών αυτών μετρήσεων αναπτύχθηκε δεύτερος αλγόριθμος συσχέτισης της υφής της επιφάνειας με τον συντελεστή αντίστασης κύλισης (Εξίσωση 3.7). Στην περίπτωση των αριθμητικών προσομοιώσεων ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης κύλισης προκύπτει ως εξής:

$$CRR = 0.001 \times RMS_{tex} + 0.0135 \quad (3.6)$$

ενώ για πειραματικές μετρήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$CRR = 0.001 \times RMS_{tex} + 0.0087 \quad (3.7)$$

όπου:

CRR: ο αδιάστατος συντελεστής αντίστασης κύλισης, RMS_{tex} : η μέση τετραγωνική ρίζα της υφής της επιφάνειας.

❖ Έρευνα του VTI

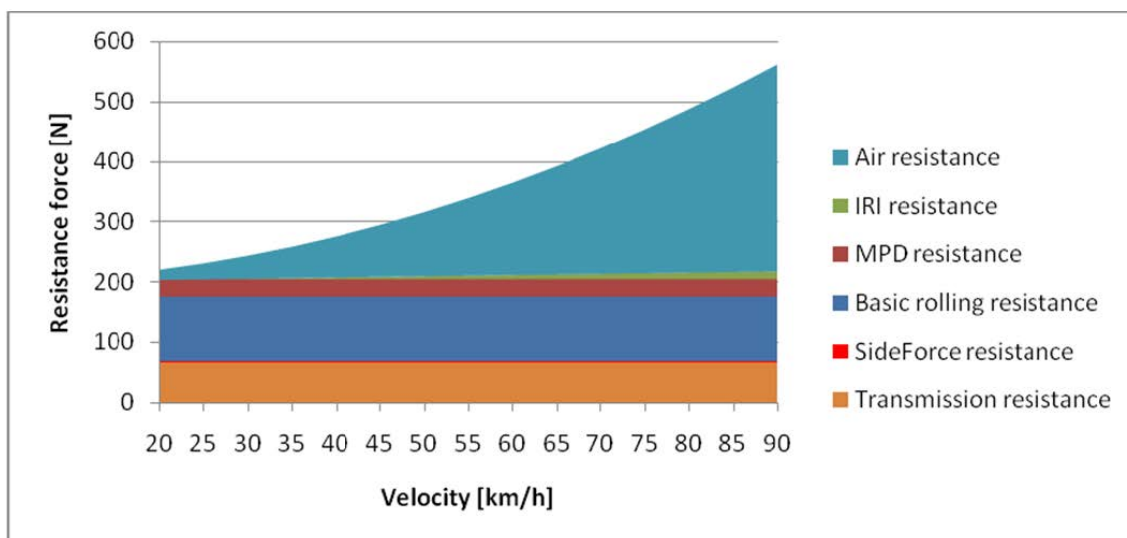
Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2011 από το VTI έγινε προσπάθεια για την καλύτερη εκτίμηση της επιρροής της υφής και των ανωμαλιών της επιφάνειας στην αντίσταση κύλισης. Η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης είναι η ανάλυση μετρήσεων από τη μέθοδο της ακινητοποίησης και εφαρμόζεται τόσο για ένα ιδιωτικό αυτοκίνητο όσο και για ένα βαρύ όχημα. Τη βάση για τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της αντίστασης κύλισης, αποτελεί ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα. Εκφράζει τη συνισταμένη δύναμη που δρα επάνω στο όχημα συμπεριλαμβανόμενων όλων των αντιστεκόμενων δυνάμεων που δρουν στο όχημα κατά την κίνησή του (Andersen , et al., 2015).

$$F_{total} = m \times \frac{du(t)}{dt} = F_{roll} + F_{air} + F_g + F_{misc} \quad (3.8)$$

όπου:

F_{total} : η συνολική δρώσα δύναμη (N), m η μάζα του οχήματος (kg), F_{air} : η αεροδυναμική αντίσταση (N), F_g : η συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση της κίνησης (N), F_{misc} : άλλες δυνάμεις όπως πλευρικές δυνάμεις και απώλειες μετάδοσης (N)

Στην **Εικόνα 3.5** παρουσιάζεται μια τυπική κατανομή της συνολικής αντίστασης κατά την οδήγηση στους διάφορους συντελεστές που δρουν στην ανάπτυξη αντίστασης σε ένα ιδιωτικό όχημα.



Εικόνα 3.5-Τυπική συνεισφορά των διαφόρων συντελεστών στην αντίσταση της οδήγησης
Πηγή: (Karlsson, et al., 2011)

Η εφαρμογή της εξίσωσης του Νόμου του Νεύτωνα με δεδομένα μετρήσεων οδηγεί στην ανάπτυξη ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων μέσω του οποίου οι άγνωστοι συντελεστές επιρροής μπορούν να εκτιμηθούν μέσω παλινδρόμησης. Όσον αφορά σε ένα τυπικό ιδιωτικό αυτοκίνητο, αξιοποιήθηκαν έξι μεγάλες σειρές μετρήσεων με τη μέθοδο ακινητοποίησης, εκ' των οποίων τέσσερις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση κανονικών ελαστικών (Michelin Energy) και δύο με τη χρήση ειδικών χειμερινών ελαστικών. Για την έκφραση της αντίστασης κύλισης η έρευνα του VTI κατέληξε στο ακόλουθο μοντέλο:

$$F_{RR} = m \times g \times (Cr_{00} + Cr_{Temp} \times T + Cr_{MPD} \times MPD + Cr_{IRI} \times IRI + Cr_{IRI_V} \times IRI \times (v-20)) \quad (3.9)$$

όπου:

F_{RR} : η δύναμη αντίστασης κύλισης που δρα σε έναν τροχό ή σε ολόκληρο το όχημα (N)

$m \times g = F_z$: η κάθετη δύναμη αντίδρασης που δρα στον τροχό ή σε ολόκληρο το όχημα (N)

v : η ταχύτητα (m/s)

T : η θερμοκρασία του ελαστικού (°C)

IRI (m/km) και MPD (mm): οι δείκτες ομαλότητας και μακροϋφής αντίστοιχα.

Cr_{00} , Cr_{MPD} , Cr_{IRI} , Cr_{IRI_V} , Cr_{Temp} : συντελεστές επιρροής

Οι εκτιμώμενοι συντελεστές με διαστήματα εμπιστοσύνης 95% που προέκυψαν είναι:

$$Cr_{00} = 0.00648 \quad [0.00631, 0.00664]$$

$$Cr_{Temp} = 0.000104 \quad [0.0000882, 0.000119]$$

$Cr_{MPD} = 0.00172$	[0.00165, 0.00179]
$Cr_{IRI} = 0.000466$	[0.000427, 0.000505]
$Cr_{IRI_V} = 0.0000365$	[0.0000299, 0.0000432]

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η επιρροή της ομαλότητας στην αντίσταση κύλισης είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη της μακροϋφής.

Υπάρχουν πολλοί βαθμοί ελευθερίας στον σχηματισμό της έκφρασης του μοντέλου και τελικά, μπορεί να διαφοροποιηθεί αρκετά από τον προτεινόμενο αλγόριθμο της Εξίσωσης 3.9 ανάλογα με τη συμπερίληψη διαφόρων παραμέτρων. Για παράδειγμα, οι δείκτες MPD και IRI εκφράζουν τα δύο βασικότερα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που επηρεάζουν την αντίσταση κύλισης και γι' αυτό θα πρέπει να συμπεριληφθούν στον αλγόριθμο υπολογισμού. Η θερμοκρασία επίσης, είναι αποδεκτό ότι αποτελεί σημαντική παράμετρο, ωστόσο η αναγκαιότητα ως προς την προσθήκη της έχει κατά καιρούς αμφισβητηθεί. Γενικά, αποτελεί δύσκολη και πολύ περίπλοκη διαδικασία ο προσδιορισμός του καταλληλότερου αλγορίθμου ώστε αυτός να αποτελεί μια αποδεκτή εικόνα της πραγματικότητας. Ήδη τα δεδομένα μετρήσεων υπόκεινται σε διάφορες συσχετίσεις και σφάλματα μετρήσεων που μπορεί να είναι τόσο συστηματικά όσο και τυχαία. Ζωτικής σημασίας κατά την εφαρμογή της μεθόδου ακινητοποίησης για την εκτίμηση της αντίστασης κύλισης είναι ένας ποιοτικός, ρεαλιστικός και όχι περίπλοκος αλγόριθμος για την εξάρτηση μεταξύ των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του οδοστρώματος και της αντίστασης κύλισης. Συνεπώς, απαιτείται ένας απλοποιημένος αλγόριθμος με βάση μερικές βασικές ιδιότητες που περιγράφουν την επιφάνεια του οδοστρώματος και πιθανόν μετεωρολογικά δεδομένα (Karlsson, et al., 2011).

Η εκτίμηση του συντελεστή επιρροής της υφής πραγματοποιήθηκε επιπλέον για το ιδιωτικό όχημα από ανάλυση δεδομένων προερχόμενων από δύο ακόμη μεθόδους μετρήσεων, του ρυμουλκούμενου τρέιλερ και του εργαστηριακού τυμπάνου και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους.

Αξιοποιήθηκαν μετρήσεις, οι οποίες είχαν πραγματοποιηθεί από το ειδικά εξοπλισμένο ρυμουλκούμενο του TUG, κατά τη χρονική περίοδο 2009-2010 και πραγματοποιήθηκε μια ανεξάρτητη εκτίμηση για την επίδραση της μακροϋφής (MPD) στον συντελεστή αντίστασης κύλισης (Karlsson, et al., 2011). Ο συντελεστής επιρροής υπολογίστηκε από την παλινδρόμηση του συντελεστή αντίστασης κύλισης έναντι του δείκτη MPD για έναν αριθμό διαφορετικών μετρήσεων και προέκυψε ίσος με 0.0017. Η τιμή αυτή του

συντελεστή συμφωνεί απόλυτα με την τιμή που προέκυψε και από την ανάλυση δεδομένων μετρήσεων προερχόμενα από τη μέθοδο της ακινητοποίησης (0.00172). Ωστόσο, τα αποτελέσματα δεν είναι ακριβώς συγκρίσιμα εξαιτίας διαφόρων παραμέτρων που διαφοροποιούν ουσιαστικά τις δύο μεθόδους, όπως η χρήση διαφορετικών ελαστικών, η θερμοκρασία αναφοράς κ.α.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις τυμπάνου από το TUG για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν δύο επιφάνειες τυμπάνου με διαφορετικό δείκτη MPD. Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιήθηκε απόπειρα για μια εναλλακτική και ανεξάρτητη εκτίμηση της επίδρασης της μακροϋφής στην αντίσταση κύλισης, δηλαδή του συντελεστή επιρροής CrMPD. Τα δεδομένα καλύπτουν 90 διαφορετικά ελαστικά από διάφορους κατασκευαστές και τύπους ελαστικών, από τα οποία 21 είναι χειμερινά ελαστικά. Για κάθε ελαστικό, οι μετρήσεις αντίστασης κύλισης πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικές ταχύτητες (80, 100 και 120 km/h) και για δύο διαφορετικές τιμές MPD, 0.12 και 2.4. Έτσι, υπάρχουν συνολικά 540 παρατηρήσεις. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την αντίσταση κύλισης είναι:

$$RR = Cr00 + CrMPD \times MPD + CrV \times v \quad (3.10)$$

όπου:

RR: η δύναμη αντίστασης κύλισης (N)

v: η ταχύτητα (m/sec)

MPD: ο δείκτης μακροϋφής (mm)

Αξιοποιώντας τις μετρήσεις τυμπάνου πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης και οι εκτιμώμενοι συντελεστές που προέκυψαν είναι :

$$Cr00 = 0.008829, CrMPD = 0.001777, CrV = 0.0000128$$

Μεταξύ των ελαστικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την έρευνα υπήρξε ένα, το οποίο θεωρείται ότι αντιστοιχεί στα ελαστικά που χρησιμοποιούνται συνήθως κατά τις μετρήσεις με τη μέθοδο ακινητοποίησης του οχήματος. Για το συγκεκριμένο ελαστικό, λοιπόν, ο συντελεστής CrMPD προέκυψε ίσος με 0.001714, τιμή η οποία βρίσκεται πολύ κοντά σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση δεδομένων μετρήσεων από τη μέθοδο της ακινητοποίησης. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής επιρροής της ταχύτητας είναι αρκετά μικρός όταν στον αλγόριθμο δε λαμβάνονται υπόψη στοιχεία ομαλότητας. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται αμφισβήτηση για τη σημαντικότητα της επιρροής της ταχύτητας και προκύπτει το ερώτημα αν η αντίσταση κύλισης συσχετίζεται

περισσότερο με την αυξημένη αντίσταση του αέρα όταν οι τροχοί ή το τύμπανο περιστρέφονται πιο γρήγορα.

❖ Πρόγραμμα MIRIAM

Στο πλαίσιο του προγράμματος MIRIAM (Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems) που διεξήχθη με συμμετοχή Ευρωπαίων και Αμερικανών ερευνητών πραγματοποιήθηκε έρευνα για τις δυνατότητες μείωσης των εκπομπών διοξειδίων του άνθρακα μέσω της μείωσης της αντίστασης κύλισης και της κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων. Ο γενικός στόχος του MIRIAM είναι "μια βιώσιμη και πιο φιλική προς το περιβάλλον οδική υποδομή αναπτύσσοντας μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τη βελτίωση του ελέγχου των εκπομπών CO₂ των οδικών μεταφορών" (Carlson, et al., 2013). Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε από το VTI, στο πλαίσιο του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος, για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης βασίζεται κυρίως σε εμπειρικά δεδομένα μετρήσεων με τη μέθοδο της ακινητοποίησης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στις προγενέστερες έρευνες των (ECRPD, 2010), (Karlsson, et al., 2011). Οι συντελεστές επιρροής, όμως, εκτιμώνται για τρεις ξεχωριστές κατηγορίες οχημάτων, ένα ΙΧ αυτοκίνητο, ένα βαρύ φορτηγό και ένα βαρύ όχημα. Παράλληλα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου, χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης VETO, το οποίο δημιουργήθηκε στο VTI για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών καυσαερίων από την κυκλοφορία, εξαιτίας των διαφόρων χαρακτηριστικών των οχημάτων, των οδών και της οδηγικής συμπεριφοράς. Ο αλγόριθμος του VTI επιτρέπει τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου συσχετίζοντας τις ιδιότητες της επιφάνειας του οδοστρώματος ξεχωριστά για τις τρεις κατηγορίες οχημάτων. Η Εξίσωση 3.11 αφορά στον αλγόριθμο πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης σε σχέση με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος (IRI και MPD). Η Εξίσωση 3.12 αποτελεί τον αλγόριθμο υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει της αντίστασης κύλισης, της ταχύτητας και άλλων μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τις γεωμετρικές συνθήκες της οδού, όπως την κατά μήκος κλίση και την οριζόντια καμπυλότητα (Trupia, et al., 2017).

Αντίσταση κύλισης:

$$Fr = m1 \times g \times (0.00912 + 0.0000210 \times IRI \times v + 0.00172 \times MPD) \quad (3.11)$$

όπου:

F_r : η δύναμη αντίστασης κύλισης (N)

m_1 : η μάζα του οχήματος (kg)

v : η ταχύτητα του οχήματος (m/s)

IRI (m/km) και MPD (mm): οι δείκτες ομαλότητας και μακροϋφής αντίστοιχα.

Κατανάλωση καυσίμου:

$$F_{cs} = 0.286 * ((1.209 + 0.000481 * IRI * v + 0.0394 * MPD + 0.000667 * v^2 + 0.0000807 * ADC * v^2 - 0.00611 * RF + 0.000297 * RF^2)^{1.163}) * v^{0.056} \quad (3.12)$$

όπου:

F_{cs} : η κατανάλωση καυσίμων (L/10km)

ADC: ο μέσος βαθμός καμπυλότητας (rad/km)

RF: η κατά μήκος κλίση της οδού (m/km)

v : η ταχύτητα του οχήματος (m/s).

❖ Πρόγραμμα NCHRP

Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό εργαλείο **HDM-4** (Highway Development and Management Model-version 4). Το HDM-4 αποτελεί ένα λογισμικό, το οποίο αναπτύχθηκε από το PIARC (World Road Association) με σκοπό την πραγματοποίηση ανάλυσης κόστους για τη συντήρηση και αποκατάσταση των οδών (Kerali, 2000; Trupia, et al., 2017). Στο εν λόγω λογισμικό περιλαμβάνονται ένα μοντέλο για την προσομοίωση της αντίστασης κύλισης μέσω των δεικτών IRI και MPD αλλά και ένα που αξιοποιείται για τη σύνδεση των αποτελεσμάτων της αντίστασης κύλισης με την κατανάλωση καυσίμου των οχημάτων. Το λογισμικό HDM-4 αναλύει όλες τις αντιστάσεις που συνυπάρχουν κατά την οδήγηση ενός οχήματος με βάση την ταχύτητά του και την κλίση της οδού (Trupia, et al., 2017). Ο αλγόριθμος υπολογισμού της αντίστασης κύλισης που χρησιμοποιείται στο λογισμικό αναλύεται παρακάτω (Chatti & Zaabar, 2012).

$$F_r = CR2 \times FCLIM \times (b11 \times Nw + CR1 \times (b12 \times M + b13 \times v^2)) \quad (3.13)$$

όπου:

F_r : η δύναμη αντίστασης κύλισης (N)

M : η μάζα του οχήματος (kg)

CR1: παράμετρος αντίστασης κύλισης του ελαστικού

CR1 = 1.3 για σταυρωτά ελαστικά (Bias Ply)

CR1 = 1 για ακτινικά ελαστικά (Radial)

Nw: (Number of wheels) ο αριθμός των τροχών

b11, b12, b13: παράμετροι που σχετίζονται με τη διάμετρο των τροχών και τον αριθμό των τροχών (Nw) και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$b11 = 37 \times WD \quad (3.14)$$

$$b12 = 0.064 / WD \quad (3.15)$$

$$b13 = 0.012 \times Nw / WD^2 \quad (3.16)$$

WD (Wheel Diameter) η διάμετρος του τροχού (m)

v η ταχύτητα του οχήματος (m/s)

CR2 παράμετρος αντίστασης κύλισης της επιφάνειας που δίνεται από τη σχέση:

$$CR2 = kcr2 \times (\alpha0 + \alpha1 \times Tdsp + \alpha2 \times IRI + \alpha3 \times DEF) \quad (3.17)$$

όπου:

kcr2 συντελεστής βαθμονόμησης ανάλογα με τον τύπο του οχήματος (**Πίνακας 3.1**)

Πίνακας 3.1-Τιμές της παραμέτρου Kcr2
Πηγή: (Chatti & Zaabar, 2012)

Vehicle Class	kcr2
Medium Car	0.5
SUV	0.58
Light truck	0.99
Van	0.67
Articulated truck	1.1

$\alpha0, \alpha1, \alpha2, \alpha3$: συντελεστές του μοντέλου που εξαρτώνται από τη μάζα του οχήματος και τον τύπο της οδού (**Πίνακας 3.2**).

Πίνακας 3.2-Παράμετροι της αντίστασης κύλισης της επιφάνειας CR2
Πηγή: (Chatti & Zaabar, 2012)

Surface type	≤2500 kg				>2500 kg			
	α0	α1	α2	α3	α0	α1	α2	α3
Asphalt	0.5	0.02	0.1	0	0.57	0.04	0.04	1.34
Concrete	0.5	0.02	0.1	0	0.57	0.04	0.04	0

Tdsp: το βάθος υφής με τη μέθοδο μέτρησης της κηλίδας άμμου (mm) με

$$Tdsp = 1.02 \times MPD + 0.28 \quad (3.18)$$

DEF: (Benkelman Beam rebound deflection) η απόκλιση του οδοστρώματος (mm) που δίνεται από τη σχέση:

$$DEF = T/30 \times (-0.05 + 0.415 \times e^{-0.024575 \times v}) \quad (3.19)$$

όπου:

T: η θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C), v: η ταχύτητα του οχήματος σε (km/h), FCLIM παράμετρος κλίματος που δίνεται από τη σχέση:

$$FCLIM = 1 + 0.003 \times PCTDS + 0.002 \times PCTDW \quad (3.20)$$

όπου:

PCTDS: το ποσοστό οδήγησης σε χιόνι, PCTDW: το ποσοστό οδήγησης σε υγρή επιφάνεια.

Ο αλγόριθμος που περιλαμβάνεται στο λογισμικό για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμων, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές, καθορισμένους βάσει δεδομένων μετρήσεων, δύναται να συσχετίσει τις αντιστάσεις με την κατανάλωση ενέργειας. Παρακάτω δίνεται ο αλγόριθμος υπολογισμού της κατανάλωσης καυσίμων (Chatti & Zaabar, 2012).

$$IFC = f(P_{tr}, P_{accs} + P_{eng}) = \frac{1000}{v} \times \left(\max(\alpha, \xi * P_{tot} * (1 + dFuel)) \right) \quad (3.21)$$

όπου:

IFC: η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου (mL/km)

v: ταχύτητα του οχήματος (m/s)

P_{tr}: απαιτούμενη ισχύς για την υπέρβαση των δυνάμεων έλξης (kW)

P_{accs}: απαιτούμενη ισχύς για τα εξαρτήματα του κινητήρα (kW)

P_{eng} : απαιτούμενη ισχύς για την υπέρβαση της εσωτερικής τριβής του κινητήρα (kW)

α : κατανάλωση καυσίμου στο ρελαντί (mL/km)

ξ : συντελεστής απόδοσης καυσίμου σε ισχύ (mL/kW/s) που δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \xi_b \times \left(1 + ehp * \frac{(P_{tot} - P_{eng})}{P_{max}} \right) \quad (3.22)$$

ξ_b = βασική απόδοση καυσίμου σε ισχύ (εξαρτάται από τον τύπο της τεχνολογίας: βενζίνη, ντίζελ)

P_{max} : ονομαστική ισχύς κινητήρα (kW)

ehp : αναλογική μείωση της απόδοσης σε υψηλή ισχύ εξόδου (αδιάστατο)

P_{tot} : συνολική ισχύς (kW)

$dFuel$: υπερβολική κατανάλωση καυσίμων λόγω της συμφόρησης ως ποσοστό

Τα αποτελέσματα της έρευνας NCHRP έδειξαν ότι η ομαλότητα και η κλίση της οδού αποτελούν πολύ σημαντικούς παραμέτρους συσχέτισης για την κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ενώ η μακροϋφή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις των προηγούμενων ερευνών που θέλουν την μακροϋφή να κατέχει τον κυρίαρχο ρόλο στην επιρροή της αντίστασης κύλισης (Sandberg, 1997; Karlsson, et al. 2011; Rajaei, et al., 2018). Οι ερευνητές του προγράμματος (Chatti & Zaabar, 2012) απέδωσαν την αντίθεση αυτή των αποτελεσμάτων στο γεγονός ότι σε μεγαλύτερες ταχύτητες η αεροδυναμική αντίσταση αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιρροής στην κατανάλωση καυσίμου, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την αύξηση της αντίστασης κύλισης εξαιτίας της μακροϋφής (Trupia, et al., 2017).

❖ Πρόγραμμα UCPRC

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση της αντίστασης κύλισης και του υπολογισμού των εκπομπών αερίων από τα οχήματα κατά τη διάρκεια χρήσης μιας οδού αποτελεί εκείνη που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα UCPRC (University of California Pavement Research Center) (Wang, et al., 2014). Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα εξετάστηκαν οδοί με διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά στον τύπο του οδοστρώματος (εύκαμπτο, δύσκαμπτο), στον τύπο της οδού (αστική, αγροτική), στον τύπο εισόδου (περιορισμένη, ελεύθερη) και στον τύπο των οχημάτων που χρησιμοποιούν την οδό. Για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HDM-4 όπως αυτό αναλύθηκε

προηγουμένως. Έπειτα, έγινε χρήση του λογισμικού προσομοίωσης MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων. Για κάθε συνδυασμό των χαρακτηριστικών της οδού, μία σειρά τιμών IRI και MPD εισήχθησαν στο πρόγραμμα, για τον υπολογισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης στα αποτελέσματα για την εξαγωγή της αντίστοιχης εξίσωσης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε εκφράζεται από την Εξίσωση 3.23 στο οποίο κάθε ένας από τους συντελεστές διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία συνδυασμού των ανωτέρω χαρακτηριστικών.

$$\text{Tailpipe CO}_2 \text{ emission factor} = \alpha 1 \times \text{MPD} + \alpha 2 \times \text{IRI} + \text{Intercept} \quad (3.23)$$

όπου:

Tailpipe CO₂ emission factor: η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (metric tons per 1000 miles)

$\alpha 1$, $\alpha 2$, Intercept: συντελεστές που προκύπτουν από τη γραμμική παλινδρόμηση.

IRI (m/km) και MPD (mm): οι δείκτες ομαλότητας και μακροϋφής αντίστοιχα.

Ειδικότερα, ο όρος Intercept αντιπροσωπεύει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαιτίας της συνολικής αντίστασης στην οδήγηση, εκτός από αυτή που προκαλείται από τις παραμορφώσεις του οδοστρώματος (υφή, ανωμαλίες), οι οποίες και εκτιμούνται από τις δύο προηγούμενους συντελεστές $\alpha 1$, $\alpha 2$.

Επειδή τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας αφορούν στη φάση λειτουργίας της οδού και μεταβάλλονται ετησίως χρησιμοποιήθηκαν ήδη ανεπτυγμένα μοντέλα του προγράμματος UCPRC που εκτιμούν την απόδοση των δεικτών IRI και MPD στον χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο υπολογισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και μακροπρόθεσμα λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο της φθοράς του οδοστρώματος.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μια αστική εύκαμπτη οδό με περιορισμένη πρόσβαση που χρησιμοποιείται από συνήθη επιβατικά αυτοκίνητα και για το έτος 2019 οι συντελεστές του μοντέλου έχουν υπολογιστεί ως εξής (Wang, et al., 2014):

$$\alpha 1 = 0.001693318, \alpha 2 = 0.009800209, \text{Intercept} = 0.332192688$$

Για την ίδια οδό αλλά με πρόσβαση χωρίς περιορισμό οι συντελεστές είναι οι εξής:

$$\alpha 1 = 0.00099884, \alpha 2 = 0.008293196, \text{Intercept} = 0.417555686$$

Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 προέκυψε ίσος με 0.99, αποδεικνύοντας ότι η εκπομή διοξειδίου του άνθρακα επηρεάζεται σε υψηλό βαθμό από τους δείκτες MPD και IRI για κάθε δυνατό συνδυασμό των χαρακτηριστικών μιας οδού.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Περιγραφή στοιχείων επιφάνειας κύλισης

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν στοιχεία ομαλότητας και υφής από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας Ε.Μ.Π. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε υφιστάμενο ασφαλτικό οδόστρωμα αυτοκινητοδρόμου, στο πλαίσιο της αξιολόγησης της λειτουργικής του κατάστασης.

Το σύστημα καταγραφής που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ομαλότητας και υφής είναι το σύστημα Road Surface Profilometer (RSP) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π (Εικόνα 4.1). Το σύστημα RSP ανήκει στην κατηγορία των προφίλομέτρων υψηλής ταχύτητας (Smith & Ram, 2016). Αποτελείται από μια δοκό η οποία έχει μήκος 3,2 m και στην οποία είναι ενσωματωμένοι επτά ηλεκτρονικοί αισθητήρες (lasers) και δύο επιταχυνσιόμετρα. Η δοκός έχει προσαρμοστεί στο εμπρόσθιο μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος, ώστε να παρέχει μια επίπεδη επιφάνεια για την εγκατάσταση των αισθητήρων. Το RSP καταγράφει 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 ταχύμετρου)

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 H/Y που βρίσκεται στο όχημα.



Εικόνα 4.1-Road Surface Profilometer (RSP) του ΕΜΠ

Πηγή: (Λοΐζος, *et al.*, 2002)

Κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής, τα δεδομένα στοιχεία των μετρήσεων αξιοποιούνται για την πρόβλεψη της αντίστασης κύλισης και τη διερεύνηση της επιρροής της από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Διερευνάται, ακόμη, η επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην κατανάλωση καυσίμου των οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση των στοιχείων περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1. Διερεύνηση επιλεγμένων αλγορίθμων πρόβλεψης ως προς τα αποτελέσματα τους.
2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων αντίστασης κύλισης σε δύο τμήματα οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά της επιφάνειάς τους (ομαλότητα και υφή).
3. Ανάλυση των επιπτώσεων ενός οδοστρώματος με υποβαθμισμένα επιφανειακά χαρακτηριστικά στην κατανάλωση καυσίμων.
4. Ανάλυση των επιπτώσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού στην κατανάλωση καυσίμων.

4.2 Διερεύνηση των αλγορίθμων πρόβλεψης

Στο παρόν υποκεφάλαιο διερευνώνται οι αλγόριθμοι πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία ως προς τα αποτελέσματα τους. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους αποσκοπεί αφενός στην ανάδειξη και αξιολόγηση της διαφορετικότητας των αποτελεσμάτων τους και αφετέρου, στην επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου για τις ανάγκες διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ακριβώς επειδή επιθυμείται η συσχέτιση των επιφανειακών χαρακτηριστικών ενός ασφατικού οδοστρώματος με την αντίσταση κύλισης, στο στάδιο αυτό, από τους αλγόριθμους που καταγράφηκαν επιλέγεται η ανάλυση εκείνων που χρησιμοποιούν συνδυαστικά τους δείκτες ομαλότητας IRI και υφής MPD μαζί με άλλες παραμέτρους.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, θα εξεταστούν οι παρακάτω αλγόριθμοι υπολογισμού όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3:

$$\text{Αλγόριθμος N1: } Fr = m \times g \times (Cr01 + Cr02 \times V + dCr (IRI, v) + dCr (MPD)) \quad (4.1)$$

$$\text{Αλγόριθμος N2: } F_{RR} = m \times g \times (Cr00 + Cr_{Tmp} \times T + Cr_{MPD} \times MPD + Cr_{IRI} \times IRI + Cr_{IRI_V} \times IRI \times (v-20)) \quad (4.2)$$

$$\text{Αλγόριθμος N3: } Fr = m1 \times g \times (0.00912 + 0.0000210 \times IRI \times v + 0.00172 \times MPD) \quad (4.3)$$

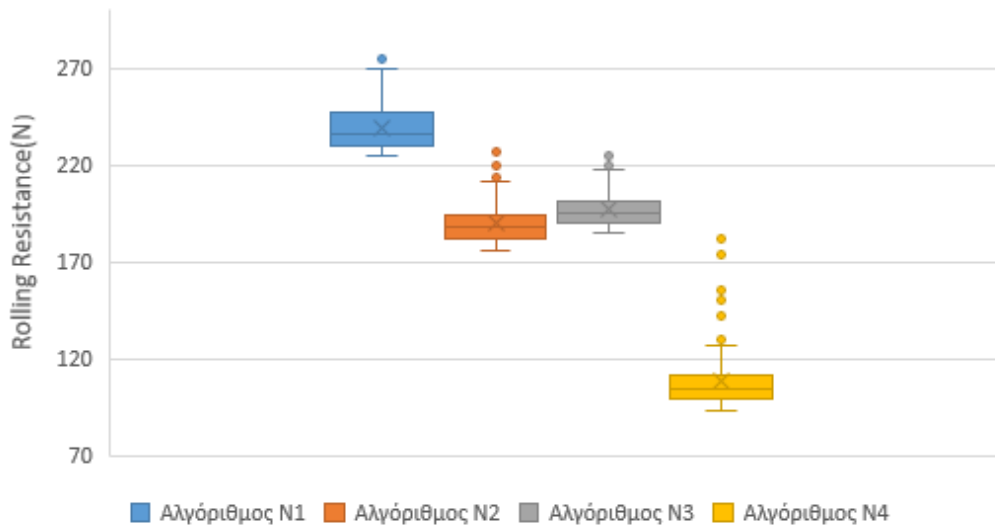
$$\text{Αλγόριθμος N4: } Fr = CR2 \times FCLIM \times (b11 \times Nw + CR1 \times (b12 \times M + b13 \times v^2)) \quad (4.4)$$

Για τις διατιθέμενες τιμές υφής και ομαλότητας, με πεδίο αναφοράς τμήμα αυτοκινητοδρόμου συνολικού μήκους ενός χιλιομέτρου, υπολογίστηκε με κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά η αντίσταση κύλισης που αναπτύσσεται. Για τον αλγόριθμο N4 θεωρήθηκε ότι η παράμετρος κλίματος FCLIM ισούται με τη μονάδα υπό την παραδοχή ότι δεν πραγματοποιείται οδήγηση σε χιόνι ή υγρή επιφάνεια, ενώ η διάμετρος του ελαστικού θεωρήθηκε 0.65m. Τα αποτελέσματα που έδωσαν οι αλγόριθμοι συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 4.1** ως μέσες τιμές του τμήματος.

Πίνακας 4.1-Αντίσταση κύλισης που προκύπτει για το ίδιο τμήμα με χρήση διαφορετικού αλγορίθμου

	Rolling Resistance (N)
Αλγόριθμος N1	238,9
Αλγόριθμος N2	189,6
Αλγόριθμος N3	196,9
Αλγόριθμος N4	108,5

Στην **Εικόνα 4.2** φαίνονται σε θηκογράμματα οι τιμές και η διακύμανση της αντίστασης κύλισης για ολόκληρο το τμήμα που προκύπτει από κάθε αλγόριθμο.



Εικόνα 4.2-Αντίσταση κύλισης για κάθε αλγόριθμο

Διαπιστώνεται ότι οι διάφοροι αλγόριθμοι πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τις εκτιμήσεις τους. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις παραμέτρους επιρροής που εμπεριέχουν, καθώς και στους αντίστοιχους συντελεστές επιρροής που θεωρούν. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στους τέσσερις αλγορίθμους πρόβλεψης που μελετώνται παρατηρούνται τα εξής:

- Ο αλγόριθμος πρόβλεψης N1 δίνει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα.
- Οι αλγόριθμοι N2 και N3 βρίσκονται πολύ κοντά ως προς τις εκτιμήσεις που δίνουν.
- Ο αλγόριθμος N4 υποεκτιμά κατά πολύ, σε σχέση με τους προηγούμενους, την αντίσταση κύλισης του τμήματος.

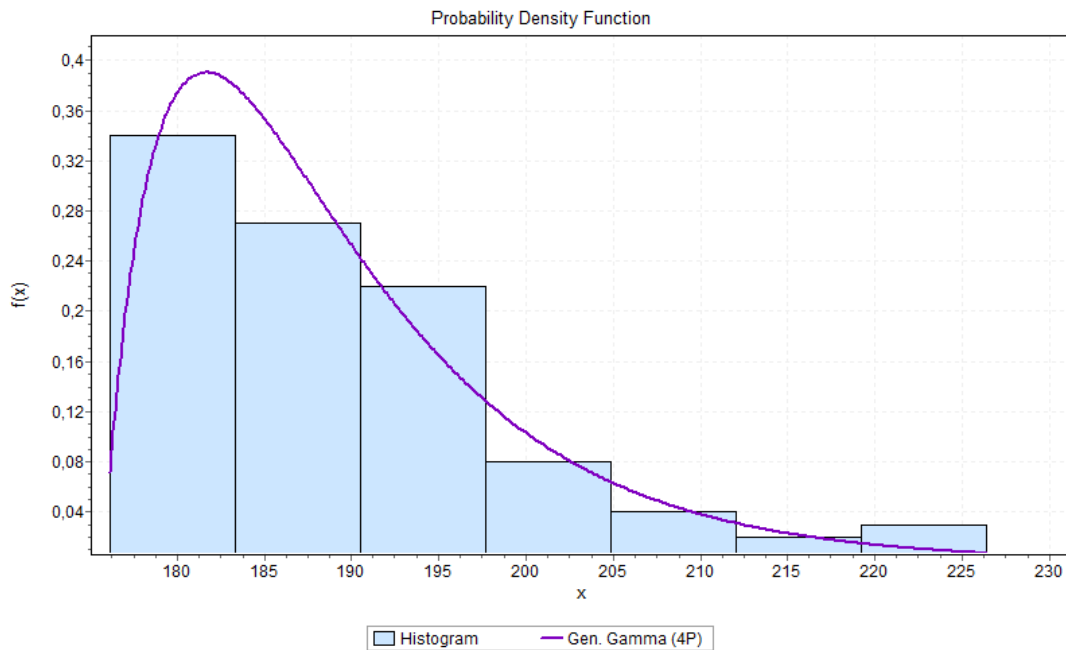
Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος N4 υποεκτιμά την αντίσταση κύλισης συγκριτικά με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, αλλά και επειδή περιλαμβάνει παραμέτρους που απαιτούν αρκετές παραδοχές για την εκτίμηση της αντίστασης κύλισης, δε λαμβάνεται υπόψη στις περαιτέρω αναλύσεις. Οι προαναφερόμενες παραδοχές αφορούν στην παράμετρο που σχετίζεται με το κλίμα (οδήγηση σε χιόνι ή υγρή επιφάνεια) και στη διάμετρο του τροχού του οχήματος.

Τα δυσμενέστερα αποτελέσματα υπολογισμού που προκύπτουν από τη χρήση του αλγόριθμου N1 είναι πιθανό να οφείλονται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις από τη μέθοδο ακινητοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση και την ανάπτυξη του αλγορίθμου αφορούσαν αποκλειστικά και μόνο ένα τυπικό όχημα. Στο μεταγενέστερο ερευνητικό πρόγραμμα του VTI (Karlsson, et al., 2011) κατά το οποίο αναπτύχθηκε και ο αλγόριθμος N2, οι μετρήσεις αφορούσαν τόσο σε ένα τυπικό όχημα, όσο και σε ένα βαρύ όχημα. Η διαφοροποίηση αυτή της μάζας του οχήματος κατά τις μετρήσεις δίνει τη δυνατότητα κατά την ανάλυση να απομονωθούν οι απώλειες μετάδοσης από την αντίσταση κύλισης, εκτιμώντας με αυτόν τον τρόπο την καθαρή αντίσταση κύλισης (Hammarström, et al., 2012). Ο αλγόριθμος N3 που αναπτύσσεται κατά τη διεξαγωγή του ερευνητικού προγράμματος MIRIAM (Hammarström, et al., 2012) στηρίζεται στα προηγούμενα δύο ερευνητικά προγράμματα από τα οποία προκύπτουν οι αλγόριθμοι N1 και N2 αξιοποιώντας τις μετρήσεις τους. Κατόπιν τούτων, για τις περαιτέρω αναλύσεις επιλέγεται να μην χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος N1. Εξάλλου, οι αλγόριθμοι N2 και N3 αποτελούν μια βελτιστοποιημένη εκδοχή υπολογισμού της καθαρής αντίστασης κύλισης απομονώνοντας τις απώλειες μετάδοσης που συνυπάρχουν στους υπολογισμούς του αλγορίθμου N1. Έτσι, η επιλογή περιορίζεται ανάμεσα στους αλγορίθμους N2 και N3.

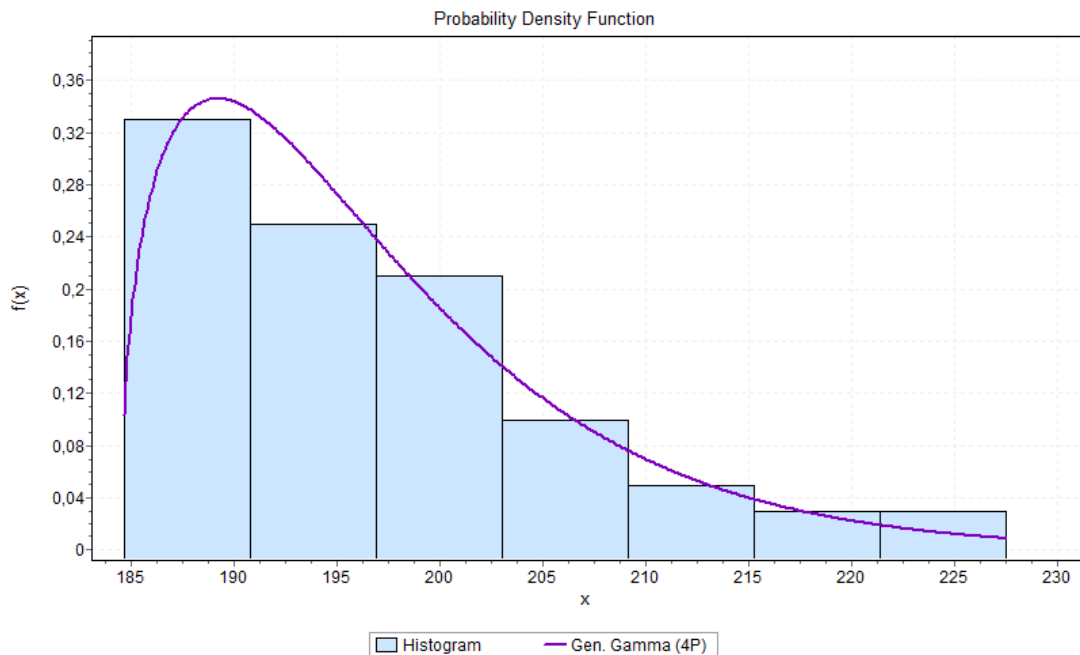
Για τα αποτελέσματα που δίνουν οι αλγόριθμοι N2 και N3 πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω αναλύσεις. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η προσαρμογή των τιμών της αντίστασης κύλισης που προκύπτουν για κάθε αλγόριθμο σε κατανομές συχνοτήτων. Με τον τρόπο αυτόν, επιδιώκεται η καλύτερη δυνατή εκτίμηση μιας χαρακτηριστικής τιμής αντίστασης κύλισης που προκύπτει από τον κάθε αλγόριθμο για το συγκεκριμένο τμήμα οδού. Η επιλογή της καταλληλότερης στατιστικής κατανομής συχνοτήτων των τιμών αντίστασης κύλισης πραγματοποιήθηκε με βάση το κριτήριο καλής προσαρμογής **Kolmogorov-Smirnov** (K-S) για κάθε αλγόριθμο. Ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov πλεονεκτεί σε σχέση με άλλους ελέγχους καλής προσαρμογής, καθώς η κατανομή της στατιστικής συνάρτησης δεν εξαρτάται από την κατανομή από την οποία προέρχεται το δείγμα. Βάσει του συντελεστή προσαρμογής R^2 , προέκυψε ότι η **Γενικευμένη Κατανομή τεσσάρων παραμέτρων (Gen. Gamma 4P)**, η οποία χρησιμοποιείται πολλές φορές για να προσδιορίσει ποιο παραμετρικό μοντέλο είναι κατάλληλο για ένα σύνολο δεδομένων, προσαρμόζεται πολύ καλά στις τιμές αντίστασης κύλισης και των δύο αλγορίθμων.

Στις **Εικόνες 4.3** και **4.4** απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για τις τιμές αντίστασης κύλισης που προέκυψαν στο δεδομένο τμήμα οδού με τον αλγόριθμο N2 και N3

αντίστοιχα, καθώς και η καμπύλη συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gen. Gamma (4P). Παρατηρείται και πάλι ότι οι δύο αλγόριθμοι βρίσκονται πολύ κοντά ως προς τις εκτιμήσεις που δίνουν. Συγκεκριμένα, η επικρατούσα τιμή της αντίστασης κύλισης στην περίπτωση του αλγορίθμου N2 προέκυψε ίση με 181.66 ενώ στην περίπτωση του αλγορίθμου N3 ίση με 189.19. Η διαφοροποίηση των τιμών είναι ανάλογη με αυτή των μέσων τιμών που προκύπτουν από τους δύο αλγορίθμους. Αν και με μικρή διαφορά, λοιπόν, ο αλγόριθμος N3 δίνει μια αυξημένη εκτίμηση της αντίστασης κύλισης σε σχέση με τον N2.



Εικόνα 4.3-Κατανομή συχνότητων αντίστασης κύλισης του δεδομένου τμήματος με τον αλγόριθμο N2



Εικόνα 4.4-Κατανομή συχνοτήτων αντίστασης κύλισης του δεδομένου τμήματος με τον αλγόριθμο N3

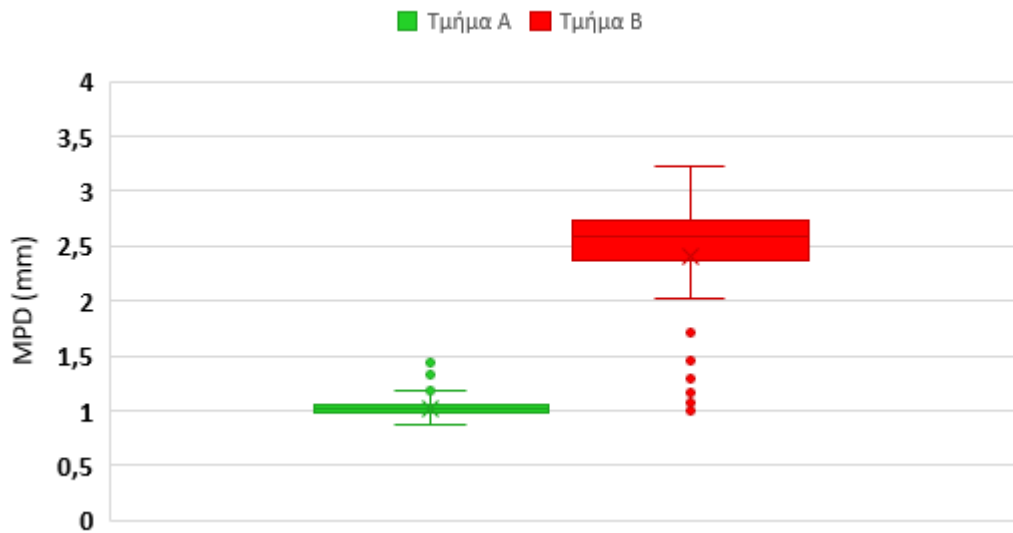
Μεταξύ των αλγορίθμων N2 και N3 επιλέγεται ο αλγόριθμος N3, θεωρώντας ότι αντιπροσωπεύει δυσμενέστερες συνθήκες από άποψη αντίστασης κύλισης. Γενικά, η θεώρηση δυσμενέστερων συνθηκών εξασφαλίζει το αποτέλεσμα αξιολόγησης ενός μεγέθους, στην προκειμένη περίπτωση της αντίστασης κύλισης, η οποία στην παρούσα εργασία προκύπτει ως το προϊόν των χαρακτηριστικών ομαλότητας και υφής των οδοστρωμάτων.

4.3 Διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διερεύνησης επιθυμείται να εξαχθούν συμπεράσματα για την ποσοτικοποίηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην αντίσταση κύλισης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ομαλότητα και η υφή αποτελούν τα δύο βασικότερα χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος που επιδρούν στην αντίσταση κύλισης. Έτσι, η ανάλυση εστιάζει στην ποσοτικοποίηση της επιρροής των δύο αυτών παραμέτρων στην αντίσταση κύλισης και στην αξιολόγηση των επιπτώσεων ενός οδοστρώματος με υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά ομαλότητας και υφής στην αντίσταση κύλισης.

Για τη σύγκριση της αντίστασης κύλισης που προκύπτει για ένα υπό διερεύνηση οδόστρωμα **A**, το οποίο βρίσκεται σε **καλή επιφανειακή κατάσταση** σε σχέση με αυτή για ένα οδόστρωμα **B** με **υποβαθμισμένα επιφανειακά χαρακτηριστικά**, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μετρήσεων ενός τμήματος σχεδόν δύο χιλιομέτρων με “καλές” τιμές δεικτών ομαλότητας (IRI) και υφής (MPD) και ενός ίσου τμήματος με “κακές” τιμές αντίστοιχα των δεικτών ομαλότητας (IRI) και υφής (MPD).

Στην **Εικόνα 4.5** απεικονίζονται σε θηκογράμματα οι αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές υφής στα δύο τμήματα οδοστρώματος και η διακύμανση τους.



Εικόνα 4.5-Τιμές υφής και διακύμανση για κάθε τμήμα

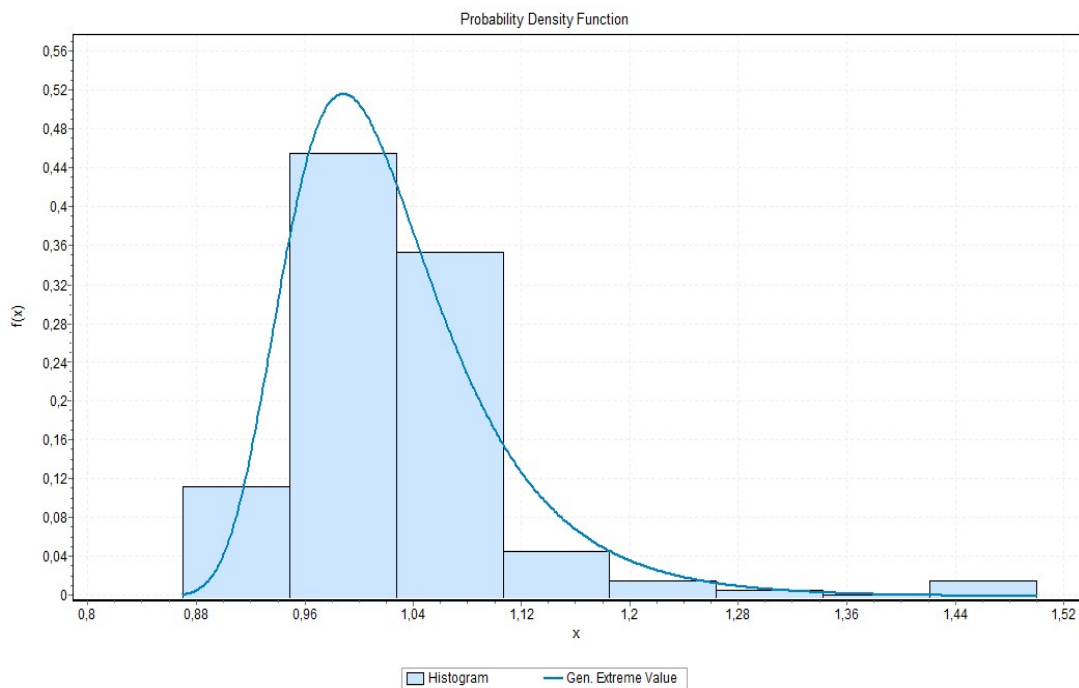
Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των δύο τμημάτων ως προς την υφή τους, το τμήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από καλά επιφανειακά χαρακτηριστικά (Τμήμα A) παρουσιάζει πολύ χαμηλότερες τιμές από εκείνες που παρατηρούνται στο τμήμα με τα υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά (Τμήμα B). Οι τιμές υφής που καταγράφονται στο τμήμα A συγκεντρώνονται γύρω από την μονάδα που σημαίνει γενικά ότι το τμήμα αυτό αποτελεί μία ομαλή επιφάνεια κύλισης. Σημειώνεται, ακόμη, ότι σε αυτό το τμήμα η διακύμανση των τιμών που παρατηρείται είναι μικρή, γεγονός που φανερώνει την ομοιογένεια των τιμών του δείγματος και άρα την ομοιογένεια του συγκεκριμένου τμήματος οδοστρώματος ως προς την υφή που παρουσιάζει.

Αντίθετα, στο δεύτερο υπό εξέταση οδικό τμήμα B, παρατηρούνται εκτός από αρκετά μεγαλύτερες τιμές του δείκτη υφής MPD και μεγάλη διακύμανση στις τιμές του δείγματος. Οι μεγάλες τιμές του δείκτη υφής που παρουσιάζονται στο τμήμα B,

αντιπροσωπεύουν μια τραχειά επιφάνεια κύλισης και συνδέονται άμεσα με αποκολλήσεις αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος, παρουσιάζοντας σε αρκετές περιπτώσεις και λακκούβες. Η μεγάλη διακύμανση που παρατηρείται στις τιμές από την άλλη, αποτυπώνει την γενικότερη ανομοιογένεια που χαρακτηρίζει το τμήμα αυτό ως προς την υφή της επιφάνειάς του.

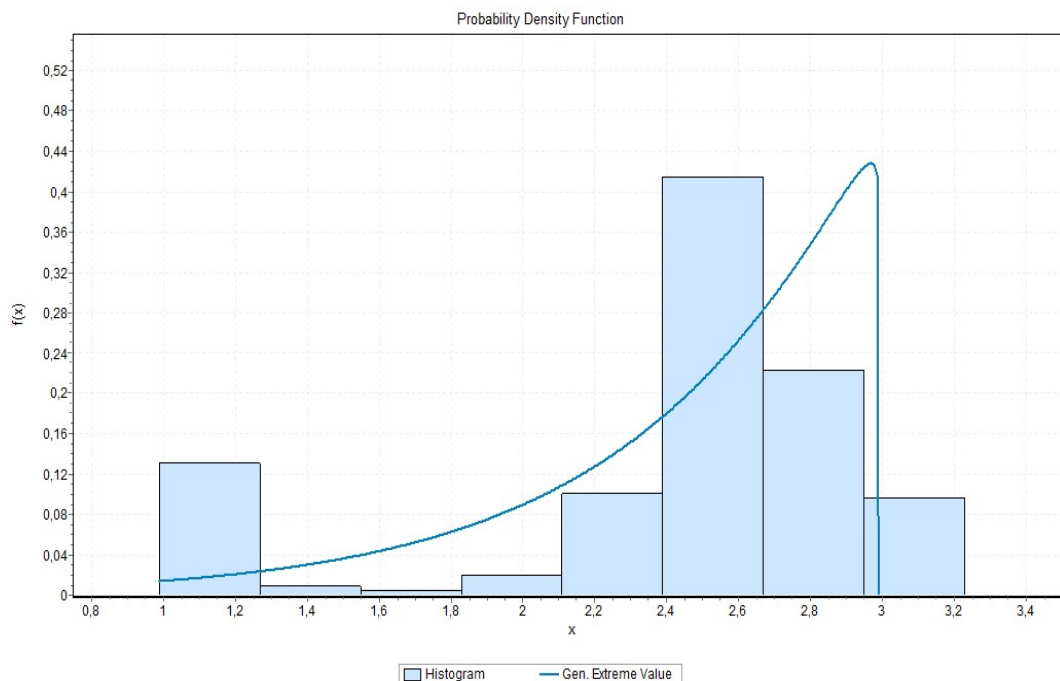
Για την καλύτερη αποτύπωση των διαφορών που παρουσιάζονται στα δύο τμήματα όσον αφορά στην υφή της επιφάνειάς τους πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάλυση με προσαρμογή των τιμών της υφής κάθε τμήματος σε κατανομές συχνοτήτων. Η επιλογή της καταλληλότερης στατιστικής κατανομής, για την προσαρμογή των τιμών της υφής των δύο τμημάτων, πραγματοποιήθηκε και πάλι με βάση το κριτήριο καλής προσαρμογής **Kolmogorov-Smirnov (K-S)**. Η στατιστική κατανομή που επιλέχθηκε στην προκειμένη περίπτωση είναι η **Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών** (Generalized Extreme Value: **GEV**). Η Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών συνδυάζει τις οικογένειες των κατανομών Gumbel, Frechet και Weibull, καθώς συσχετίζει παραδοχές και από τις τρεις αυτές κατανομές. Επιλέχθηκε ως καταλληλότερη, καθώς με βάση το κριτήριο ελέγχου καλής προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov αποδείχθηκε ότι προσαρμόζεται ικανοποιητικά και για τα δύο τμήματα οδοστρώματος.

Στις **Εικόνες 4.6-4.7** που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατανομές συχνοτήτων των τιμών υφής για τα δύο τμήματα που εξετάζονται. Στις Εικόνες απεικονίζονται τα ιστογράμματα συχνοτήτων των τιμών της υφής για κάθε τμήμα και η καμπύλη συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της επιλεγμένης κατανομής.



Εικόνα 4.6-Κατανομή συχνοτήτων υφής τμήματος Α

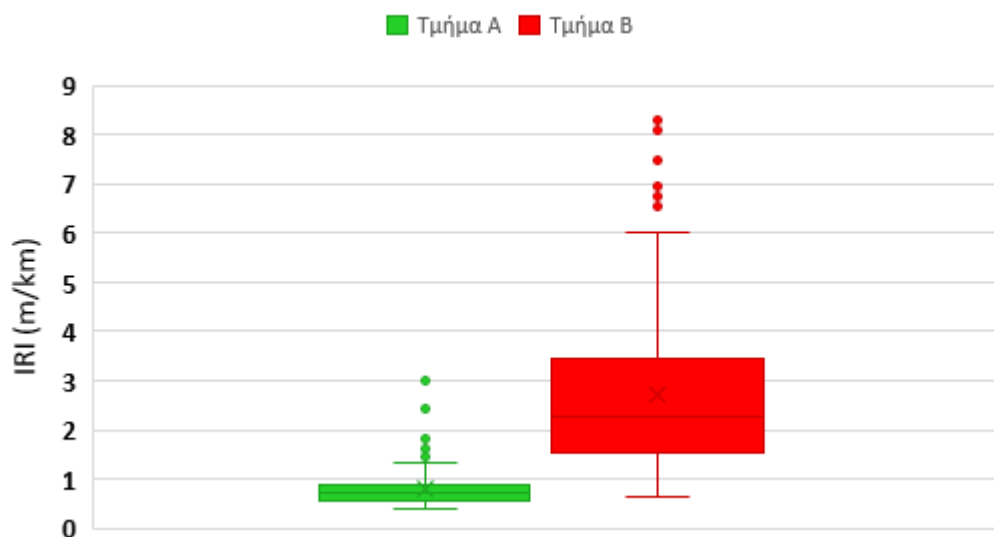
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων της Εικόνας 4.6, οι τιμές υφής που καταγράφονται στο τμήμα Α είναι χαμηλές. Το δείγμα έχει τιμές του δείκτη MPD μικρότερες από 1.5 και από την προσαρμογή της στατιστικής κατανομής η επικρατούσα τιμή του δείγματος προέκυψε ίση με 0.9884. Η διακύμανση που παρατηρείται είναι επίσης μικρή και ίση με 0.00574. Συμπεραίνεται λοιπόν, όπως και προηγουμένως, ότι το τμήμα Α, αντιπροσωπεύει ένα ομαλό και αμοιόμορφο τμήμα οδοστρώματος, όσον αφορά στην υφή του.



Εικόνα 4.7-Κατανομή συχνοτήτων υφής τμήματος Β

Σε πλήρη αντίθεση, όπως φαίνεται από το διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων της Εικόνας 4.7, οι καταγεγραμμένες τιμές υφής στο τμήμα Β με τα υποβαθμισμένα επιφανειακά χαρακτηριστικά είναι πολύ μεγαλύτερες, με επιρατούσα τιμή ίση με 2.9685, ενώ και η διακύμανση παρουσιάζει αντίστοιχη αύξηση και προκύπτει ίση με 0.31382. Από τη μορφή της συνάρτησης της στατιστικής κατανομής γίνεται αντιληπτή και η ανομοιογένεια του τμήματος ως προς την υφή του.

Κατ' αντιστοιχία με την ανάλυση των τιμών υφής που παρουσιάζονται στα δύο τμήματα, αναλύονται οι τιμές ομαλότητας που έχουν καταγραφεί για τα δύο τμήματα. Στην **Εικόνα 4.8** παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη ομαλότητας για τα δύο τμήματα και η διακύμανσή τους σε θηκογράμματα.



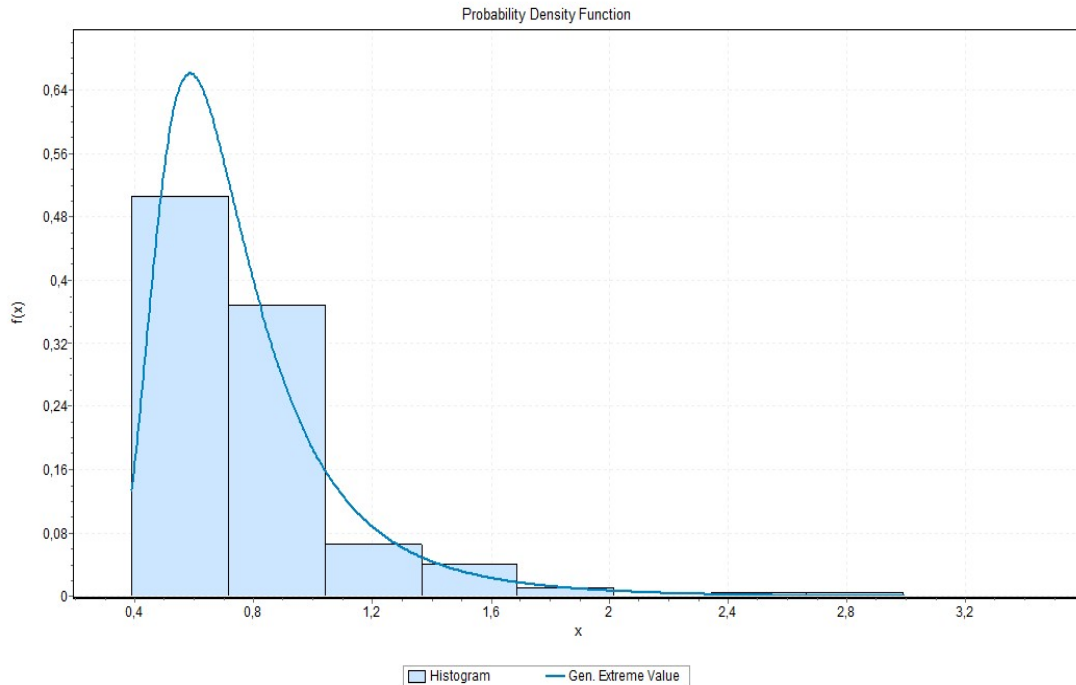
Εικόνα 4.8-Τιμές ομαλότητας και διακύμανση για κάθε τμήμα

Όπως φαίνεται, στο τμήμα Α οι τιμές που καταγράφονται συγκεντρώνονται κάτω από τη μονάδα που σημαίνει ότι το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται από ομολότητα και οι τιμές δεν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση άρα το τμήμα αυτό χαρακτηρίζεται και από ομοιογένεια.

Αντίθετα στο τμήμα Β, οι τιμές που καταγράφηκαν είναι αρκετά μεγαλύτερες, επομένως πρόκειται για ένα τμήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από έλλειψη ομαλότητας σε σχέση με το πρώτο. Ο μέσος όρος των τιμών του δείκτη ομαλότητας IRI σε αυτό τμήμα βρίσκεται περίπου στο 2.5 ενώ παρατηρούνται τιμές στο δείγμα που ξεπερνούν ακόμη και το 6. Τέτοιες τιμές του δείκτη ομαλότητας αντιπροσωπεύουν ένα οδόστρωμα “ανώμαλο” με σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργικότητά του. Παράλληλα, το τμήμα αυτό είναι και πιο ανομοιογενές σε σχέση με το πρώτο, όπως φαίνεται από τη μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών του.

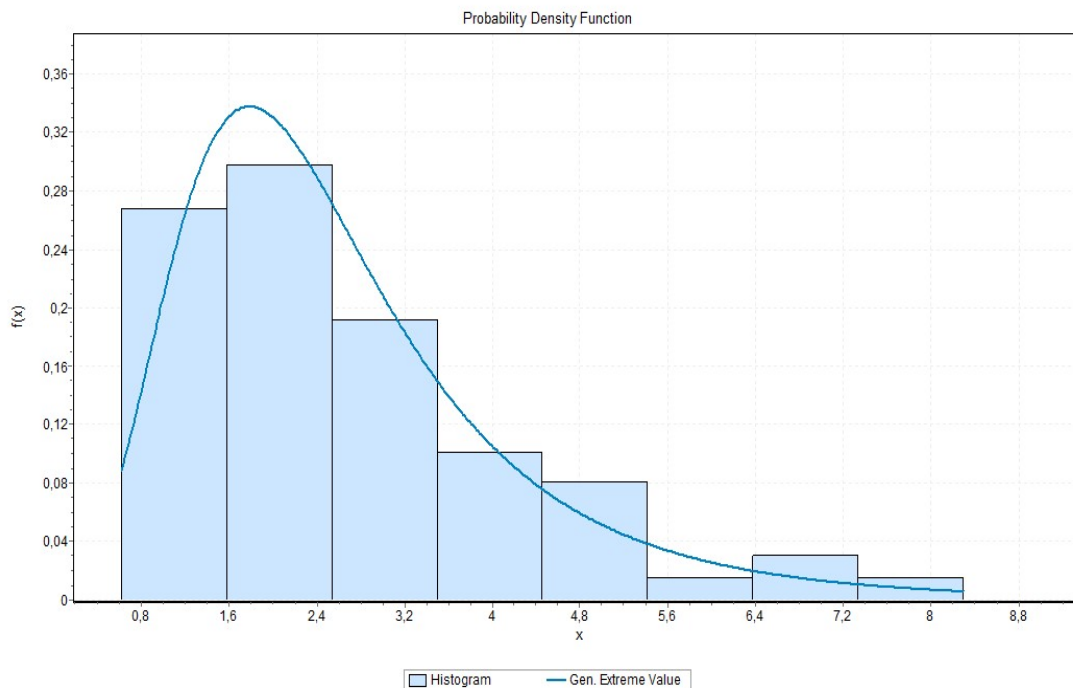
Για την ακριβέστερη απεικόνιση των τιμών ομαλότητας κάθε τμήματος πραγματοποιείται και πάλι προσαρμογή των δειγμάτων ομαλότητας σε κατανομές συχνοτήτων. Γίνεται ξανά χρήση της στατιστικής κατανομής **Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών** (Generalized Extreme Value: **GEV**) για την αποτύπωση των τιμών ομαλότητας και των δύο τμημάτων σε κατανομές συχνοτήτων. Όπως και πριν, η κατανομή αυτή κατείχε μία από της πρώτες θέσης καλής προσαρμογής και ήταν αποδεκτή και στα τα δύο τμήματα για διάφορα επίπεδα σημαντικότητας.

Αντίστοιχα, στις **Εικόνες 4.9** και **4.10** παρουσιάζονται οι κατανομές συχνοτήτων των τιμών ομαλότητας για τα δύο εξεταζόμενα τμήματα, από όπου προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα για τις διαφορές των δύο οδοστρωμάτων όσο αφορά στην επιφάνεια κύλισής τους.



Εικόνα 4.9-Κατανομή συχνοτήτων ομαλότητας τμήματος Α

Η επικρατούσα τιμή του δείκτη ομαλότητας στο τμήμα Α που παρουσιάζει καλύτερα επιφανειακά χαρακτηριστικά προέκυψε ίση με 0.58578. Οι παρατηρούμενες τιμές ομαλότητας κυμαίνονται χαμηλά. Εξαιρούνται ορισμένες τιμές που φτάνουν μέχρι και το 3 αλλά τέτοιες τιμές παρουσιάζονται με πολύ μικρή συχνότητα εμφάνισης. Η διακύμανση που προκύπτει στο δείγμα τιμών ομαλότητας αυτού του τμήματος είναι σχετικά μικρή και ίση 0.13071, επομένως διαπιστώνεται και πάλι ότι το τμήμα χαρακτηρίζεται από σχετική ομοιογένεια ως προς την ομαλότητα του.



Εικόνα 4.10-Κατανομή συχνοτήτων ομαλότητας τμήματος Β

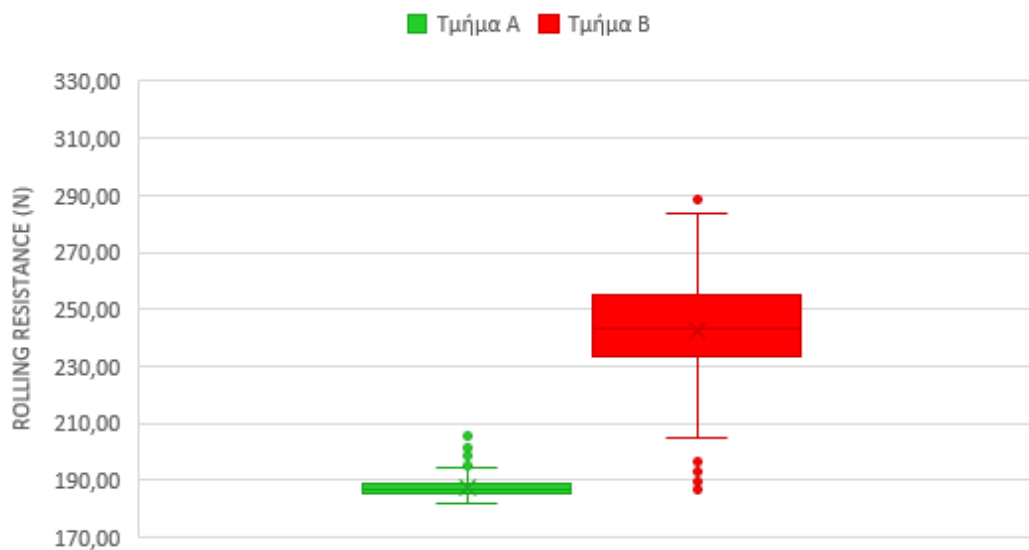
Στην περίπτωση του τμήματος Β με τα υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά, οι τιμές με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης συγκεντρώνονται γύρω από την επικρατούσα τιμή του δείγματος που είναι ίση με 1.7855, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του τμήματος Α. Η τιμή αυτή της ομαλότητας θεωρείται κακή για ένα ασφαλτικό οδόστρωμα σύγχρονου αυτοκινητόδρομου όσον αφορά στην αξιολόγηση της λειτουργικότητας του. Παράλληλα, πολύ σημαντικό είναι ότι η διακύμανση των τιμών του δείγματος προέκυψε εξαιρετικά υψηλή και ίση με 2.8674, γεγονός που σημαίνει ότι στο δείγμα παρουσιάζεται πληθώρα τιμών με αρκετά μεγαλύτερη τιμή ομαλότητας από την επικρατούσα τιμή, οι οποίες φτάνουν μέχρι και το 8 όπως φαίνεται και από το διάγραμμα κατανομής συχνοτήτων. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν ένα τμήμα οδοστρώματος με πολύ κακή ομαλότητα και δυσμενείς επιπτώσεις για τη λειτουργικότητά του, καθώς και μεγάλη ανομοιογένεια εξαιτίας της μεγάλης διακύμανσης τους.

Κατόπιν της μελέτης των επιφανειακών χαρακτηριστικών (υψής και ομαλότητας) των δύο οδοστρωμάτων, τα οποία και συμπεριλαμβάνονται στους αλγορίθμους υπολογισμού αλλά και της διερεύνησης των σημαντικών διαφορών μεταξύ των δύο τμημάτων, αναμένεται από την επεξεργασία των στοιχείων αυτών να προκύψουν άμεσα

συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότητα του καθενός σε σχέση με την αντίσταση κύλισης.

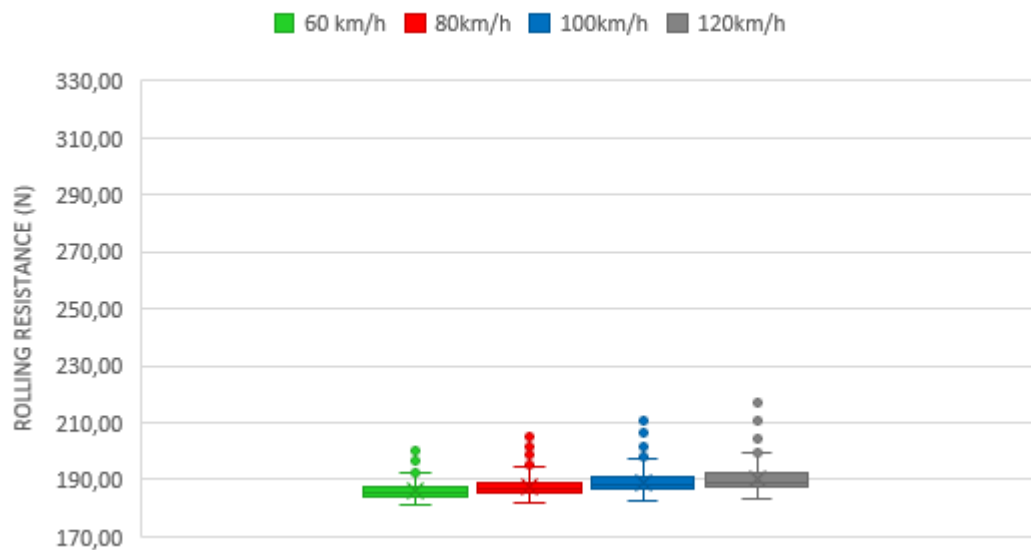
Αρχικά, υπολογίστηκε η αντίσταση κύλισης με τον επιλεγμένο αλγόριθμο υπολογισμού **N3**. Η αντίσταση κύλισης υπολογίστηκε για τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες, των 60, 80, 100 και 120 km/h ώστε να είναι εφικτή και η σύγκριση της αύξησης που προκύπτει στην αντίσταση κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας.

Θεωρώντας ως ταχύτητα αναφοράς αυτή των 80km/h παρατηρείται ότι στο τμήμα Α, όπου καταγράφονται καλύτερες τιμές υφής και ομαλότητας, οι τιμές της αντίστασης κύλισης που προκύπτουν είναι εξαιρετικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του τμήματος Β, όπου το επίπεδο ποιότητας κύλισης είναι υποβαθμισμένο. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή της αντίστασης κύλισης στο τμήμα Α προκύπτει ίση με **187.6 N** ενώ στο τμήμα Β ίση με **242.3 N**. Η διακύμανση ακόμη στο τμήμα Α είναι ελάχιστη ενώ στο τμήμα Β παρατηρείται πολύ μεγάλη ανομοιομορφία των τιμών αντίστασης κύλισης που προκύπτουν (**Εικόνα 4.11**).

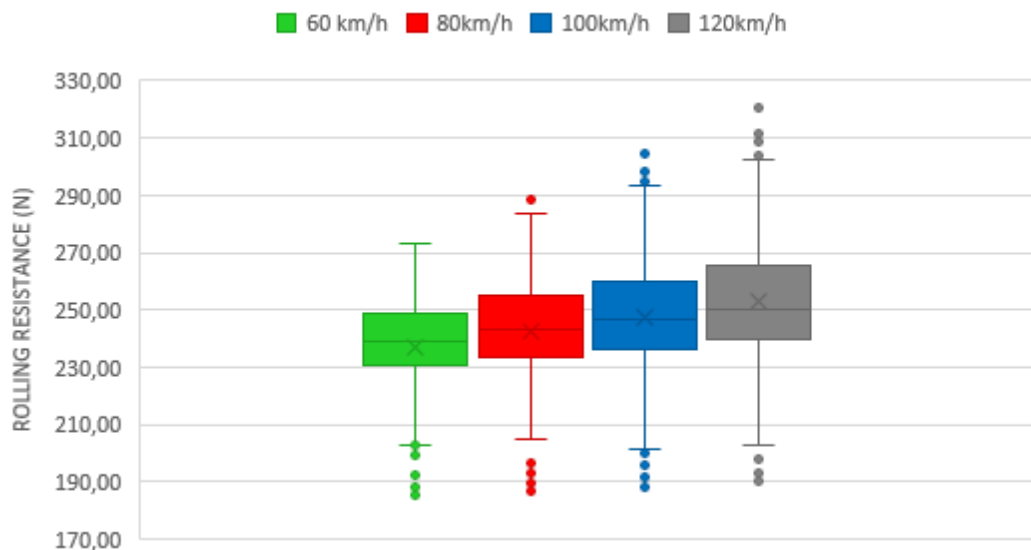


Εικόνα 4.11-Διακύμανση των τιμών αντίστασης κύλισης με τον αλγόριθμο N3

Σε αντίθεση με τις διαφορές που προκύπτουν στην αντίσταση κύλισης για τα δύο τμήματα, φαίνεται ότι η επιρροή της ταχύτητας και στις δύο περιπτώσεις των τμημάτων είναι ιδιαίτερα μικρή, καθώς δεν παρουσιάζεται σημαντική μεταβολή στην αύξηση της αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας (**Εικόνες 4.12-4.13**).



Εικόνα 4.12-Μεταβολή της αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας στο τμήμα Α



Εικόνα 4.13-Μεταβολή της αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας στο τμήμα Β

Στις Εικόνες 4.12, 4.13 αποτυπώνεται η μεταβολή της αντίστασης κύλισης σε σχέση με την ταχύτητα και για τα δύο υπό εξέταση τμήματα, απ' όπου είναι προφανές ότι η επιρροή της ταχύτητας στην αύξηση της αντίστασης κύλισης κατά μέσο όρο είναι πολύ μικρή ανεξάρτητα από τις επιφανειακές συνθήκες του οδοστρώματος. Παρατηρείται, όμως στο τμήμα Β με τα υποβαθμισμένα επιφανειακά χαρακτηριστικά, ότι η αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται και αύξηση της ανομοιομορφίας των τιμών της αντίστασης

κύλισης που προκύπτουν. Η αύξηση της διακύμανσης των τιμών αντίστασης κύλισης με την αύξηση της ταχύτητας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό και στην αρχική ανομοιομορφία που χαρακτήριζε εξ' αρχής το τμήμα αυτό ως προς την υφή και την ομαλότητά του.

4.4 Επίδραση παραμέτρων στην κατανάλωση καυσίμων

Δεδομένου ότι μια επιφάνεια οδοστρώματος με υποβαθμισμένα επίπεδα υφής και ομαλότητας προκαλεί μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο ελαστικό και ευθύνεται για την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας, δηλαδή την αύξηση της αντίστασης κύλισης, είναι λογικό ότι η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται στην περίπτωση μιας τέτοιας επιφάνειας κύλισης. Στο υποκεφάλαιο αυτό, μελετάται η επίπτωση που μπορεί να έχει ένα υποβαθμισμένο, όσον αφορά στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του, οδόστρωμα, στην αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά την οδήγηση. Για το σκοπό αυτό, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου και την ποσοτικοποίηση της επιρροής της από το επίπεδο ποιότητας κύλισης, είναι εκείνος που αναπτύχθηκε επίσης στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος MIRIAM. Η εξίσωση υπολογισμού της κατανάλωσης δίνεται από τον τύπο:

$$Fcs = 0.286 * ((1.209 + 0.000481 * IRI * v + 0.0394 * MPD + 0.000667 * v^2 + 0.0000807 * ADC * v^2 - 0.00611 * RF + 0.000297 * RF^2)^{1.163}) * v^{0.056} \quad (4.5)$$

όπου:

Fcs: η κατανάλωση καυσίμων (L/10km)

ADC: ο μέσος βαθμός καμπυλότητας (rad/km)

RF: η κατά μήκος κλίση της οδού (m/km)

v: η ταχύτητα του οχήματος (m/s).

Η ανάλυση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην κατανάλωση καυσίμων αφορά στα προαναφερθέντα τμήματα Α και Β. Ως ταχύτητα θεωρείται και πάλι αυτή των 80 km/h. Για την εκτίμηση του μέσου βαθμού καμπυλότητας και της κλίσης της οδού στο ερευνητικό πρόγραμμα MIRIAM (Hammarström, et al., 2012) κατηγοριοποιήθηκαν οι οδοί σε τέσσερις τάξεις ανάλογα με το παρατηρούμενο εύρος τιμών του μέσου βαθμού καμπυλότητάς τους και το εύρος τιμών της κατά μήκος κλίσης τους (Πίνακας 4.2). Βάσει της τάξης στην οποία αντιστοιχεί μια οδός και του πλάτους

της, η μέση τιμή του μέσου βαθμού καμπυλότητας (ADC) και της κατά μήκος κλίσης (RF) δίνονται από τους **Πίνακες 4.3-4.4**. Η ταξινόμηση σε τάξεις και ο υπολογισμός των μέσων όρων ADC και RF αφορά οδικές συνδέσεις με σταθερό τύπο οδού (εδώ αυτοκινητόδρομος), σταθερό πλάτος (εδώ >8m) και σταθερό όριο ταχύτητας.

Πίνακας 4.2-Ταξινόμηση των οδικών συνδέσεων σε τάξεις βάσει του μέσου βαθμού καμπυλότητας (ADC) και της κατά μήκος κλίσης (RF)
Πηγή: (Hammarström, et al., 2012)

ADC	RF (m/km)					
(rad/km)	0–5	5–10	10–20	20–25	25–30	>30
0–.3	1	1	2	2	2	3
.3–.4	1	1	2	2	2	3
.4–.5	1	2	2	2	2	3
.5–.7	2	2	2	2	3	3
.7–.85	2	2	2	3	3	3
.85–1	2	2	3	3	3	3
1–1.3	3	3	3	3	3	3
>1.3	3	3	3	4	4	4

Πίνακας 4.3-Μέσος όρος του μέσου βαθμού καμπυλότητας ADC (rad/km)
Πηγή: (Hammarström, et al., 2012)

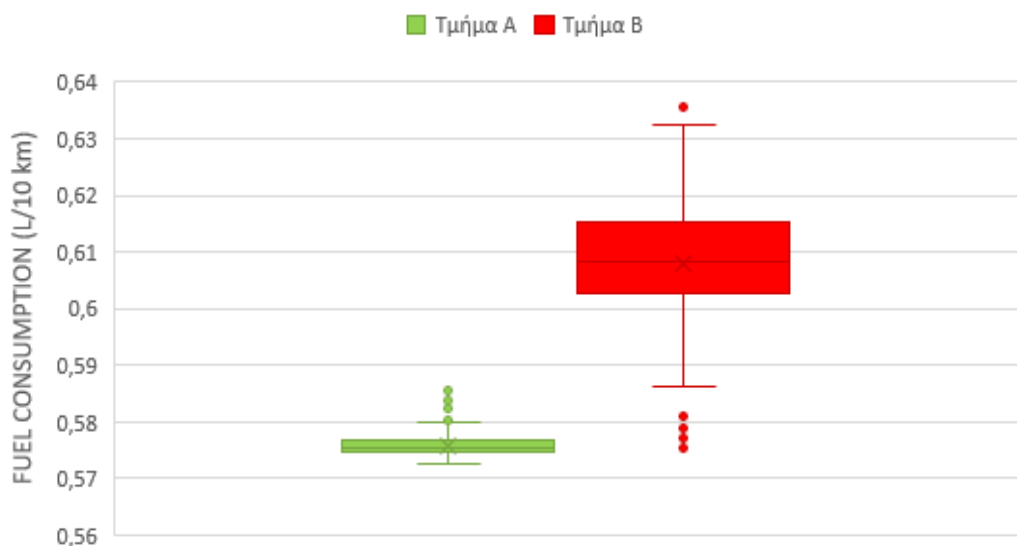
Road type	Sight class				Total
	1	2	3	4	
<8m width	0.20	0.45	2.73	5.00	2.30
>=8m width	0.19	0.45	2.36	6.21	1.32
Mw etc	0.20	0.42	2.57	6.22	1.02
Total	0.20	0.45	2.66	5.14	1.96

Πίνακας 4.4-Μέσος όρος της κατά μήκος κλίσης RF (m/km)
Πηγή: (Hammarström, et al., 2012)

Road type	Sight class				Total
	1	2	3	4	
<8m width	5.2	13.5	15.9	33.5	17.4
>=8m width	4.8	12.6	16.2	32.5	12.9
Mw etc	4.6	13.0	16.8	31.2	11.4
Total	5.0	13.2	16.0	33.4	15.8

Στην εφαρμογή του αλγορίθμου θεωρήθηκε, αρχικά, το μικρότερο εύρος τιμών του μέσου βαθμού καμπυλότητας και της κατά μήκος κλίσης της οδού. Επιλέγεται λοιπόν **1^η τάξη** οδού και για πλάτος αυτοκινητοδρόμου μεγαλύτερο των 8m, καταλήγουμε στις τιμές του μέσου βαθμού καμπυλότητας και της κατά μήκος κλίσης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο. Προκύπτει **ADC** ίσο με **0.19 rad/km** και **RF** ίσο με **4.8 m/km**.

Αξιοποιούνται, τέλος, τα ίδια δεδομένα μετρήσεων υφής και ομαλότητας που χρησιμοποιήθηκαν και για την ανάλυση της επιρροής της αντίστασης κύλισης. Για τα ίδια τμήματα οδοστρώματος Α και Β (δύο χιλιομέτρων το καθένα), η κατανάλωση καυσίμου που υπολογίστηκε βάσει του αλγορίθμου απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.14**:



Εικόνα 4.14-Επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών στην κατανάλωση καυσίμου

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.14, στο τμήμα Α η μέση τιμή της κατανάλωσης καυσίμου που υπολογίστηκε είναι 0.576 L/10 km ενώ στο τμήμα Β με την

υποβαθμισμένη επιφανειακή κατάσταση, τόσο ως προς την ομαλότητα όσο και ως προς την υφή του, η κατανάλωση υπολογίστηκε ίση με 0,608 L/10 km. Αυτό σημαίνει ότι για τη διάνυση μιας απόστασης 1000 km η κατανάλωση στο πρώτο τμήμα είναι 57.6 L ενώ στο τμήμα με την υποβαθμισμένη επιφάνεια κύλισης 60.8 L. Άρα για τη διάνυση 1000 km, η συνολική εξοικονόμηση καυσίμου ανέρχεται στα 3.2 L.

Ολοκληρώνοντας την πειραματική διερεύνηση της παρούσας εργασίας, εξετάζεται η επιρροή των γεωμετρικών συνθηκών της οδού στην κατανάλωση καυσίμου. Για το σκοπό αυτό, η ανάλυση αφορά στο τμήμα του οδοστρώματος με τα υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά της επιφάνειας κύλισης. Σκοπός είναι να διερευνηθεί κατά πόσο ένα οδόστρωμα με μη ποιοτικά επιφανειακά χαρακτηριστικά μπορεί να έχει ακόμη πιο δυσμενείς επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου, όταν συνδυάζεται με οδήγηση σε κλίση ή καμπύλη. Μελετώνται οι εξής δύο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1: αυξημένη κλίση της οδού και μικρή καμπυλότητα, ίση με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη διερεύνηση. Λαμβάνεται λοιπόν η καμπυλότητα σταθερή και ίση με **0.19 rad/km** και η κατά μήκος κλίση της οδού αυξάνεται σε **16.2 m/km** (θεωρώντας 3^η τάξη οδού λόγω αύξησης της κατά μήκος κλίσης), προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επιρροή της κατά μήκος κλίσης της οδού στην κατανάλωση.

Περίπτωση 2: αυξημένη καμπυλότητα της οδού και μικρή κλίση, ίση με αυτή της διερεύνησης που προηγήθηκε. Έτσι, η κλίση της οδού θεωρείται σταθερή και ίση με **4.8 m/km** και αυξάνεται η καμπυλότητα σε **2.36 rad/km** (θεωρώντας 3^η τάξη οδού λόγω αύξησης της καμπυλότητας).

Για τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις, με τη χρήση του αλγορίθμου 4.5, υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμων και εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά στην επιρροή των γεωμετρικών συνθηκών της οδού.

Στην **Περίπτωση 1**, η μέση τιμή της κατανάλωσης καυσίμου προκύπτει ίση με 0.609 L/10 km, τιμή η οποία δε διαφοροποιείται ουσιαστικά από την τιμή που προέκυψε στην αρχική διερεύνηση του υπόψη τμήματος ως προς την κατανάλωση. Έτσι, η κατά μήκος κλίση της οδού φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου. Στην **Περίπτωση 2**, με την αύξηση της καμπυλότητας της οδού, η κατανάλωση καυσίμου προέκυψε ίση με 0.645 L/10 km. Δηλαδή, στα 1000 km παρατηρείται πρόσθετη κατανάλωση καυσίμου 3.7 L κατά την οδήγηση σε οδό με μεγάλες καμπυλότητες.

Παρατηρείται τελικά, ότι η καμπυλότητα αποτελεί μια σημαντική παράμετρο, σε αντίθεση με την κλίση της οδού, για την κατανάλωση καυσίμου του οχήματος. Το γεγονός αυτό, οφείλεται πιθανόν στις συχνές εναλλαγές ταχυτήτων ή στην πέδηση κατά την είσοδο και έξοδο από τις καμπύλες μιας οδού. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα σχετικής έρευνας (Hammarström, et al., 2012), σύμφωνα με την οποία μεγαλύτερης σημασίας παράμετρος επιρροής για την αντίσταση κύλισης είναι η κατά μήκος κλίση, ενώ η καμπυλότητα χαρακτηρίστηκε ως δευτερεύουσα παράμετρος επιρροής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επιρροής των επιφανειακών χαρακτηριστικών ενός ασφατικού οδοστρώματος στην αντίσταση κύλισης και στην κατανάλωση καυσίμων. Πραγματοποιήθηκε, αρχικά, βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μελέτη της επιρροής της αντίστασης κύλισης από διάφορους παράγοντες. Στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν διαθέσιμοι αλγόριθμοι πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης, καθώς και της συσχετιζόμενης κατανάλωσης καυσίμων. Εν συνεχεία, στο στάδιο της πειραματικής διερεύνησης, αξιοποιώντας στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας Ε.Μ.Π και με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων διερευνήθηκε η επιρροή των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων, τόσο στην αντίσταση κύλισης όσο και στην κατανάλωση καυσίμων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επιρροής των γεωμετρικών συνθηκών μιας οδού στην κατανάλωση καυσίμων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα ακόλουθα.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι η υφή και η ομαλότητα του οδοστρώματος επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη της αντίστασης κύλισης. Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης που αναπτύσσεται μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος κατά την κύλιση του ελαστικού. Η υφή ιδιαίτερα, αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο επιρροής και λαμβάνεται υπόψη στους αλγορίθμους πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης με αυξημένο συντελεστή επιρροής σε σχέση με την ομαλότητα.

Από την πειραματική διερεύνηση της εργασίας, προέκυψε ότι οι αλγόριθμοι πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές εκτιμούν διαφορετικά την αντίσταση κύλισης. Οι διαφορές τους ως προς την πρόβλεψη εξαρτώνται κυρίως από τις παραμέτρους επιρροής που λαμβάνουν υπόψη. Επιπλέον, όμως, οφείλονται και στον τύπο και την ποσότητα των μετρήσεων που αξιοποιούν για ανάλυση και ανάπτυξη του εκάστοτε αλγορίθμου, καθώς βάσει αυτών προκύπτουν οι αντίστοιχοι συντελεστές επιρροής.

Από την ανάλυση των στοιχείων υφής και ομαλότητας για τα δύο τμήματα οδοστρωμάτων με διαφορετική επιφανειακή κατάσταση, συμπεραίνεται, ότι ένα οδόστρωμα με υποβαθμισμένα επιφανειακά χαρακτηριστικά επιφέρει πολύ μεγαλύτερη αντίσταση κύλισης, συγκριτικά με ένα οδόστρωμα που χαρακτηρίζεται από ποιοτικά

επιφανειακά χαρακτηριστικά. Το οδόστρωμα με τα ελλειπή επιφανειακά χαρακτηριστικά παρουσίασε και μεγαλύτερη ανομοιογένεια ως προς τις τιμές της αντίστασης κύλισης που προέκυψαν.

Η ταχύτητα ως παράμετρος φαίνεται ότι δε διαφοροποιεί σημαντικά την αντίσταση κύλισης, καθώς κατά την αύξηση της, επιφέρει ελάχιστη αύξηση στις τιμές της αντίστασης κύλισης. Προκαλεί, όμως, με την αύξηση της, αύξηση της ανομοιογένειας των τιμών της αντίστασης κύλισης που προκύπτουν, η οποία προέρχεται ενδεχομένως από την αρχική ανομοιογένεια των υποβαθμισμένων επιφανειακών χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος.

Παράλληλα, ένα οδόστρωμα με υποβαθμισμένη επιφάνεια συντελεί και στην αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων. Αυτό είναι λογικό, καθώς η αύξηση της αντίστασης κύλισης σε ένα τέτοιο οδόστρωμα, πρακτικά σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας κατά την οδήγηση και κατ' επέκταση απαίτηση για μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμων.

Τέλος, από την διερεύνηση της επιρροής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού στην κατανάλωση καυσίμων προέκυψε ότι η παράμετρος την καμπυλότητας μιας οδού οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου, επιδεινώνοντας τις επιπτώσεις ενός υποβαθμισμένου οδοστρώματος στην υπόψη κατανάλωση. Αντίθετα, η κατά μήκος κλίση της οδού φαίνεται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα σχετικής έρευνας (Hammarström, et al., 2012), τα οποία αναφέρουν ότι σημαντικότερη παράμετρος επιρροής για την αντίσταση κύλισης είναι η κατά μήκος κλίση της οδού, ενώ αντίθετα η καμπυλότητα δεν επιδρά σημαντικά στη διαμόρφωσή της. Η αντίθεση αυτή δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση της συμβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μίας οδού στην κατανάλωση καυσίμων και σε σχέση με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει, επίσης, η συσχέτιση της αντίστασης κύλισης με άλλες παραμέτρους επιρροής που αφορούν στα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος πέρα από την ομαλότητα και την υφή. Τέτοια παράμετρος θα μπορούσε να αποτελέσει η δυσκαμψία του οδοστρώματος, η επιρροή της οποίας στην αντίσταση κύλισης παραμένει σχεδόν αδιερεύνητη (Schmidt, et al., 2009; Sandberg, et al., 2011).

Γενικά, η ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης της αντίστασης κύλισης με μεγαλύτερη αξιοπιστία ως προς την ακρίβεια πρόβλεψης αποτελεί ένα καίριο ζήτημα. Η ανάπτυξη όλο και πιο αξιόπιστων αλγορίθμων εκτίμησης της αντίστασης κύλισης πιστεύεται ότι θα ενισχύσει, παράλληλα, τις προσπάθειες συνυπολογισμού του υπόψη μεγέθους στις αναλύσεις για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο LCA, καθιστώντας την με αυτόν τον τρόπο και ένα πολύτιμο εργαλείο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andersen , L. G., Larsen, J., Fraser, E. S., Schmidt, B. & Dyre, J.C., 2015. Rolling Resistance Measurement and Model Development. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 141, pp. 1-10.

Andersen, L. G., 2015. *Rolling Resistance Modelling-From Functional Data Analysis to Asset Management System*, Roskilde: Roskilde University, Department of Science, Systems and Models, IMFUFA.

Araujo, J. P. C., Palha, C.A.O., Martins, F., Silva, H.M.R.D. & Oliveira, J.R.M.F., 2019. Estimation of energy consumption on the tire-pavement interaction for asphalt mixtures with different surface properties using data mining techniques. *Transportation Research Part D*, Volume 67, pp. 421-432.

Bergiers, A., Goubert, L., Anfosso-Lédée, F., Dujardin, N., Ejsmont, J.A., Sandberg, U. & Zöller, M., 2011. *Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems (MIRIAM): Comparison of Rolling Resistance Measuring Equipment - Pilot Study*, Linköping, Sweden: Swedish Road and Transport Research Institute (VTI).

Carlson, A., Hammarström, U. & Eriksson, O., 2013. *Modelling Infrastructure Influence on RoAd Vehicle Energy Consumption (MIRAVEC): Models and methods for the estimation of fuel consumption due to infrastructure parameters*, Sweden: Road Research in Europe.

Chatti, K. & Zaabar, I., 2012. *Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operation Costs*, Washington, DC: The National Academies Press.

Clark, S. K., 1971. *Mechanics of Pneumatic Tires*. Michigan: Department of Engineering Mechanics, University of Michigan.

Descornet, G., 1990. Road-surface influence on tire rolling resistance. *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies STP 1031*, pp. 401-415.

ECRPD, 2010. *Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*, European Union: Intelligent Energy Europe.

Ejsmont, J. & Owczarzak, W., 2019. Engineering method of tire rolling resistance evaluation. *Measurement*, Volume 145, pp. 144-149.

Ejsmont, J., Sjögren, L., Świczko-Żurek, B. & Ronowski, G., 2015. Influence of Road Wetness on Tire-Pavement Rolling Resistance. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Volume 9, pp. 1302-1310.

Haider, M., Conter, M. & Glaeser, K. P., 2011. *MIRIAM Deliverable D 5.2.1: Discussion paper – “What are rolling resistance and other influencing parameters on energy*

consumption in road transport”, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Hammarström, U., Eriksson, J., Karlsson, R. & Yahya, M.-R., 2012. *Rolling resistance model, fuel consumption model and the traffic energy saving potential of changed road surface conditions*, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

ISO 18164, 2005. *Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres – Methods of measuring rolling resistance*, Switzerland: International Standards Organization (ISO).

ISO 28580, 2009. *Passenger car, truck and bus tyres – Methods of measuring rolling resistance – Single point test and correlation of measurement results*, Switzerland: International Standards Organization (ISO).

ISO 28580, 2018. *Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method-Single point test and correlation of measurement results*, Switzerland: International Standards Organization (ISO).

Jackson, R. L., Willis, J. R., Arnold, M. & Palmer, C., 2011. *Synthesis of the effects of pavement properties on tire rolling resistance*, Auburn: National Centre for Asphalt Technology.

Karlsson, R., Hammarstrom , U., Sorensen, H. & Eriksson, O., 2011. *Road surface influence on rolling resistance-Coastdown measurements for a car and an HGV*. Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Kerali, H. G. R., 2000. *Overview of HDM-4. The high-way development and management series, Volume one*, Paris: The World Road Association (PIARC).

Lidstrom, M., 1979. *Aircraft Rolling Resistance in Loose Dry Snow: A theoretical analysis*, Linköping: Swedish Road and Transport Research Institute (VTI).

Mukherjee, D., 2014. Effect of Pavement Conditions on Rolling Resistance. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Volume 3, Issue 7, pp. 141-148.

Rajaei, S., Chatti, K. & Zaabar, I., 2018. *Evaluation of rolling resistance models for pavement surface texture effect*. Doha, CRC Press, pp. 301-304.

SAE J1269, 2019. *Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires*, United States: SAE International.

Sandberg, U., 1997. *Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related Environment, Economy and Safety*, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J.A., Goubert, L., Karlsson, R. & Zöller, M., 2011. *Road surface influence on tyre/road rolling resistance*, Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Sandberg, U., Haider, M., Conter, M., Goubert, L., Bergiers, A., Glaeser, K.-P., Schwalbe, G., Zöller, M., Boujard, O., Hammarstrom, U., Karlsson, R., Ejsmont, J.A., Wang, T. & Harvey, J.T., 2011. *Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems: Rolling Resistance – Basic Information and State-of-the-Art on Measurement methods*, Linköping: Swedish Road and Transport Research Institute (VTI).

Santero, N. J., Masanet, E. & Horvath, A., 2011. Life-cycle assessment of pavements. Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 55, Issue 10, pp. 810-818.

Santero, N. J., Masanet, E. & Horvath, A., 2011. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 55, Issue 9, pp. 801-809.

Sayers, M. W. & Karamihas, S. M., 1998. *The Little Book of Profiling-Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*. Michigan: The Regent of the University of Michigan.

Schmidt, B. & Dyre, J. C., 2012. CO2 emission reduction by exploitation of rolling resistance modelling of pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Volume 48, pp. 311-320.

Schmidt, B., Ullidtz, P. & Eilskov Jensen, B., 2009. Road Pavements and Fuel Consumption. *Nordic Road and Transport Research No. 3*, pp. 14-15.

Smith, K. & Ram, P., 2016. *Measuring and Specifying Pavement Smoothness*, Washington, U.S: Federal Highway Administration.

Trupia, L., Parry, T., Neves, L. C. & Lo Presti, D., 2017. Rolling resistance contribution to a road pavement life cycle carbon footprint analysis. *International Journal Life Cycle Assess*, Volume 22, pp. 972-985.

van Es, G., 1999. *Method for Predicting the Rolling Resistance of Aircraft Tires in Dry Snow*, Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR.

Wang, T., Harvey, J. & Kendall, A., 2014. Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness. *Environmental Research Letters*, Volume 9, pp. 1-10.

Wang, T., Harvey, J. & Kendall, A., 2014. *Supplementary material for "Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness"*, USA: Environmental Research Letters.

Wang, T. et al., 2012. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, Volume 33, pp. 86-96.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2018. Τεύχος Β: Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων. Στο: *Σημειώσεις για το μάθημα «Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων»*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ. & Κανελλαΐδης, Γ., 2002. *Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών*. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.

www.glavopoulos.gr, 2019. [Online]

Available at: <https://www.glavopoulos.com/el/tires-perigrafi/>

[Accessed Δεκέμβριος 2019].

www.nexentire.gr, 2018. [Online]

Available at: <https://www.nexentire.gr/>

[Accessed Ιανουάριος 2020].