



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

ΚΟΕ: L7253
ΜΟ: L7384



Διδακτορική Διατριβή

Συμβολή στην αξιολόγηση της ομαλότητας στο πλαίσιο της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων

Χριστίνα Πλατή

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Γεώργιος Κανελλαΐδης, Καθηγητής ΕΜΠ

Ιωάννης Γκόλιας, Καθηγητής ΕΜΠ

Ημερομηνία Εξέτασης: 11 Μαΐου 2009

Περιεχόμενα κειμένου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος	6
1.2 Αντικείμενο της έρευνας.....	9
1.3 Δομή και μεθοδολογία	14
2. ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	16
2.1 Ορισμός και επιδράσεις	16
2.2 Η ομαλότητα σε σχέση με την ποιότητα κύλισης των οδοστρωμάτων	21
2.3 Καταγραφή της ομαλότητας	25
2.4 Δείκτες - μέτρα έκφρασης της ομαλότητας	27
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ.....	30
3.1 Κυματισμοί επίδρασης στην ομαλότητα των οδοστρωμάτων	30
3.2 Επεξεργασία μετρήσεων ομαλότητας	34
3.3 Διεθνής δείκτης ομαλότητας (IRI).....	36
3.3.1 Ορισμός.....	36
3.3.2 Υπολογισμός του δείκτη IRI.....	39
3.4 Δυναμική φασματική ανάλυση	41
3.4.1 Ορισμός.....	41
3.4.2 Υπολογισμός και απεικόνιση αποτελεσμάτων.....	42
4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	46
4.1 Γενικά	46
4.2 Συγκριτική αξιολόγηση οδικών τμημάτων.....	49
4.3 Αξιολόγηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος σε αρχικό χρόνο λειτουργίας..	51
4.4 Αξιολόγηση τεχνολογίας συντήρησης ή αποκατάστασης οδοστρώματος	55
5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ «ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ».....	64
5.1 Γενικά	64
5.2 Η ταχύτητα στον υπολογισμό του δείκτη IRI.....	64
5.3 Συνυπολογισμός της ταχύτητας στα αποτελέσματα της δυναμικής φασματικής ανάλυσης	69

6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ	74
6.1 Γενικά	74
6.2 Παραδοχές.....	75
6.3 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων.....	76
6.3.1 Περιγραφή συλλογής δεδομένων	76
6.3.2 Διαδικασία ανάλυσης	77
6.4 Εκτίμηση ορίων ομαλότητας	79
7. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ	82
7.1 Γενικά	82
7.2 Θεώρηση-Πρόταση για την προσομοίωση της εξέλιξης της ομαλότητας	83
7.3 Διερεύνηση καταλληλότητας προσομοιώματος εκτίμησης παραμενουσών παραμορφώσεων	87
7.4 Αρχές προτεινόμενου προσομοιώματος μηχανικής ανάλυσης	92
7.5 Προκαταρκτικό πρότυπο πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας	97
8. ΟΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ	100
8.1 Περιγραφή του πειράματος	100
8.2 Επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων συλλογής.....	101
8.2.1 Εκτίμηση παχών με την τεχνική γεωραντάρ	101
8.2.2 Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών	104
8.2.3 Επεξεργασία στοιχείων ομαλότητας	106
8.3 Υπολογισμός παραμένουσας παραμόρφωσης	107
8.4 Σύγκριση περιγράμματος παραμορφώσεων και ομαλότητας	109
9. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	116
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	124
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	138

Περιεχόμενα σχημάτων και εικόνων

Σχήμα 1.1: Διαδικασία συντήρησης και προστασίας των οδοστρώματων	7
Σχήμα 1.2: Παράμετροι για την προστασία του οδοστρώματος.....	8
Σχήμα 1.3: Εξέλιξη της συμπεριφοράς διαφορετικών οδοστρώματων με θεώρηση της ομαλότητας.....	11
Σχήμα 2.1: Διαμήκεις και εγκάρσιες κατατομές της επιφάνειας ενός οδοστρώματος	16
Σχήμα 2.2: Η ομαλότητα σε σχέση με την καταπόνηση του οδοστρώματος	17
Σχήμα 2.3: Συμπεριφορά οχήματος κατά την κίνηση του (όπου p =στατικό φορτίο οχήματος)	18
Σχήμα 2.4: Γωνία ολίσθησης τροχού.....	19
Σχήμα 2.5: Μείωση της δύναμης τριβής συναρτήσει της συχνότητας υποβάθμισης του επιπέδου ομαλότητας	20
Σχήμα 2.6: Σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμων για τρία διαφορετικά οχήματα.....	21
Σχήμα 2.7: Μεταβολή της εξυπηρετικότητας ενός οδοστρώματος	23
Σχήμα 2.8: Περιγραφή της ομαλότητας μέσω των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος.....	28
Σχήμα 3.1: Ημιτονοειδής κυματισμός	30
Σχήμα 3.2: Επίδραση των επιμέρους ομάδων κυματισμών στις δυναμικές και δονητικές δυνάμεις που δέχεται το όχημα και οι επιβάτες	32
Σχήμα 3.3: Αντίδραση άξονα και σώματος οχήματος στους διάφορους κυματισμούς.....	33
Σχήμα 3.4: Το φίλτρο του κινούμενου μέσου όρου	35
Σχήμα 3.5: Προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος για τον υπολογισμό του IRI ...	37
Σχήμα 3.7: Μαθηματική σύνθεση των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος ...	41
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα δυναμικής φασματικής ανάλυσης υψομετρικών αποκλίσεων.....	44
Σχήμα 3.9: Διάγραμμα δυναμικής φασματικής ανάλυσης κλισιομετρικών αποκλίσεων.....	45

Εικόνα 4.1: Laser Profiler του ΕΜΠ.....	48
Σχήμα 4.1: Σύγκριση κυματομορφής δύο τμημάτων.....	50
Σχήμα 4.2: Μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI.....	52
Σχήμα 4.3: Ποσοστιαίες διαφορές του δείκτη IRI.....	53
Σχήμα 4.4: Μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας βάσει της PSD ανάλυσης.....	53
Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των μεταβολών των PSD κλισιομετρικών μεταξύ των φάσεων (α) και (β).....	54
Σχήμα 4.6: Διαδικασία «αποκατάστασης» οδοστρώματος.....	56
Σχήμα 4.7: Περιγραφή της βελτίωσης της ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI (δεξιό ίχνος τροχού).....	57
Σχήμα 4.8: Περιγραφή της βελτίωσης της ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI (αριστερό ίχνος τροχού).....	58
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων (δεξιό ίχνος τροχού).....	59
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων στις επιμέρους ομάδες (αριστερό ίχνος τροχού).....	60
Σχήμα 4.11: Φασματική ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων (αριστερό ίχνος τροχού).....	60
Σχήμα 4.12: Φασματική ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων (δεξιό ίχνος τροχού).....	61
Σχήμα 4.13: Περιγραφή της δυνατότητας βελτίωσης της ομαλότητας (δεξιό ίχνος τροχού).....	62
Σχήμα 5.1: Θεωρητική απόκριση προσομοιώματος υπολογισμού του δείκτη IRI.....	65
Σχήμα 5.2: Συντελεστής ενίσχυσης προσομοιώματος υπολογισμού του IRI για διαφορετικές ταχύτητες.....	68
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα απόκρισης προσομοιώματος υπολογισμού του IRI για διαφορετικές ταχύτητες.....	70
Σχήμα 5.4: Υπολογισμός του διαγράμματος απόκρισης.....	71
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα απόκρισης.....	71

Σχήμα 6.1: Συσχέτιση των δεικτών IRI_V και IRI	78
Σχήμα 6.2: Συσχέτιση των δεικτών RMS και IRI_{σ}	79
Σχήμα 7.1: Διαμόρφωση της επιφάνειας του οδοστρώματος.....	83
Σχήμα 7.2: Διαφοροποιήσεις της διατομής του οδοστρώματος από θέση σε θέση.....	84
Σχήμα 7.3: Το οδοστρώμα θεωρούμενο ως σύστημα τριών στρώσεων.....	85
Σχήμα 7.4: Προτεινόμενη θεώρηση προτύπου επιμέρους διατομών κατά μήκος ενός οδοστρώματος.....	86
Σχήμα 7.5: Ενδεικτικό περίγραμμα παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας οδοστρώματος / «ομαλότητα».....	87
Σχήμα 7.6: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ευκάμπτου οδοστρώματος.....	88
Σχήμα 7.7: Η επίδραση θερμοκρασίας και χρόνου φόρτισης στη συμπεριφορά της ασφάλτου.....	89
Σχήμα 7.8: Θεώρηση ρεολογικής συμπεριφοράς ασφατικού υλικού λόγω επιβολής σταθερού φορτίου.....	90
Σχήμα 7.9: Προσομοίωμα κατά Kelvin-Voigt (α) και κατά Burger (β).....	91
Σχήμα 7.10: Σχέση των μεταβλητών $\log \varepsilon_{p_i}$ και $\log N$	94
Σχήμα 7.11: Προτεινόμενο πρότυπο πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας: PROViMA.....	98
Σχήμα 8.1: Σκαρίφημα διάταξης συστήματος GPR σε οδούς.....	102
Σχήμα 8.2: Αρχή λειτουργίας ενός συστήματος GPR.....	102
Σχήμα 8.3: Αποτύπωση της στρωματογραφίας με το σύστημα GPR.....	103
Εικόνα 8.1: Μέτρηση με το σύστημα GPR του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ στην Αττική Οδό.....	103
Εικόνα 8.2: Βαθμονόμηση του συστήματος FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ.....	104
Σχήμα 8.4: Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD.....	105

Σχήμα 8.5: Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού	106
Σχήμα 8.6: Διατομή διερεύνησης.....	107
Εικόνα 8.3: Σύστημα τριαξονικής κυψέλης για δοκιμή σε ερπυσμό και χαλάρωση	108
Σχήμα 8.7: Σύγκριση κατά μήκος βάθους παραμορφώσεων με ομαλότητα – Περίπτωση I	110
Σχήμα 8.8: Σύγκριση κατά μήκος παραμορφώσεων με ομαλότητα – Περίπτωση II.....	110
Σχήμα 8.9: Έλεγχος «συμμεταβολής» PROviMA και IRI – Περίπτωση I.....	114
Σχήμα 8.10: Έλεγχος «συμμεταβολής» PROviMA και IRI – Περίπτωση II.....	114

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 3.1: Παράμετροι «χρυσού οχήματος»	37
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα συσχέτισης των δεικτών IRI_V και IRI	77
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα συσχέτισης των δεικτών RMS και IRI_{10} (IRI)	78
Πίνακας 6.4: Υπολογισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές IRI για νέα οδοστρώματα.....	80
Πίνακας 6.5: Υπολογισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές IRI για υφιστάμενα οδοστρώματα.....	80
Πίνακας 8.1: Τιμές α_i και μ_i	109
Πίνακας 8.2: Αποτελέσματα t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων	113

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή διερευνάται η αξιολόγηση της κατά μήκος ομαλότητας της επιφάνειας ευκάμπτων οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο της επιτελεστικότητάς τους, υπό το πρίσμα της σύγχρονης αντίληψης για την «προστασία» των οδοστρωμάτων, σύμφωνα με την οποία, η έννοια συγκεκριμένης διάρκειας ζωής οδοστρώματος ουσιαστικά δεν υφίσταται. Τα οδοστρώματα συνεχίζουν να λειτουργούν ως αναπόσπαστο μέρος του συγκοινωνιακού ιστού, ως οδοστρώματα μεγάλης διάρκειας (Long Life Pavements: LLP) και επομένως πρέπει, όχι μόνο να συντηρούνται, αλλά και μέσω κατάλληλων διαδικασιών πρόληψης να προστατεύονται, έτσι ώστε να διατηρείται η επιτελεστικότητά τους και πέραν του αρχικού χρόνου σχεδιασμού τους. Η επιτελεστικότητα των οδοστρωμάτων εκφράζεται ως η σύνδεση δύο βασικών απαιτήσεων: της διατήρησης, σε βάθος χρόνου, μίας επαρκούς φέρουσας ικανότητας και της εξασφάλισης ενός επιθυμητού επιπέδου λειτουργικής κατάστασης της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, τόσο σε επίπεδο έργου, όσο και σε επίπεδο δικτύου.

Η ομαλότητα -η οποία ορίζεται ως οι αποκλίσεις της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια- αποτελεί ένα καθοριστικό στοιχείο σύνθεσης της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων, καθώς συνδέεται με τα επιφανειακά-λειτουργικά χαρακτηριστικά ή με τα δομικά χαρακτηριστικά τους, ή κατά περίπτωση και με τα δύο. Κατά τη διερεύνηση των επιμέρους θεμάτων που περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία, η ομαλότητα αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως μία καθοριστική παράμετρος για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης, με αποδέκτες τους χρήστες μίας οδού, αλλά και ως ένα χαρακτηριστικό του οδοστρώματος που μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δομική κατάσταση του. Η μεθοδολογία που ακολουθείται, στην παρούσα διατριβή, χαρακτηρίζεται από επιμέρους θεματικές, με κοινό στόχο, την επίτευξη ενός αντικειμενικού τρόπου αξιολόγησης της ομαλότητας, μέσα και από τη δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης της στο χρόνο, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η διαδικασία διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο προστασίας τους. Τα αποτελέσματα των επιμέρους διερευνήσεων στηρίζονται στην επεξεργασία και ανάλυση μεγάλου αριθμού επιτόπου στοιχείων οδοστρώματος. Η συλλογή των υπόψη στοιχείων πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, κατά τη διάρκεια διαφόρων οδικών πειραμάτων, όπου χρησιμοποιήθηκαν τα Συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Η διεξαγωγή των προαναφερόμενων πειραμάτων έγινε με γνώμονα τη διασαφήνιση του τρόπου εισδοχής της παραμέτρου «ομαλότητα» στη

συμπεριφορά και κατ' επέκταση, στην επιτελεσματικότητα των οδοστρωμάτων, στις διάφορες φάσεις λειτουργίας τους.

Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται μία προσεγγιστική μεθοδολογία, όπου η αξιολόγηση της ομαλότητας αποτελεί το μέσο για τη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων. Μετά από αναφορά στους περιορισμούς που έχει ο ευρέως χρησιμοποιούμενος διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI (International Roughness Index) λόγω του προσομοιώματος υπολογισμού του, η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στις δυνατότητες της δυναμικής φασματικής (Power Spectral Density: PSD) ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Σημειώνεται ότι η PSD ανάλυση χρησιμοποιείται, όχι για να αντικαταστήσει, αλλά για να συμπληρώσει τον δείκτη IRI, ο οποίος αποτελεί ένα μέτρο μόνο της λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος. Η προτεινόμενη προσεγγιστική μεθοδολογία απευθύνεται στρατηγικά στη διερεύνηση επιμέρους θεμάτων, τα οποία είναι κρίσιμα για τον ενασχολούμενο με τα οδοστρώματα οδοποιοί μηχανικό. Η διατριβή εστιάζει σε μερικά από αυτά και συγκεκριμένα στην επιλογή του τρόπου συντήρησης των οδοστρωμάτων, στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του, καθώς και στην αξιολόγηση καινοτόμων τεχνολογιών συντήρησης ή αποκατάστασης των οδοστρωμάτων όπως είναι η επιτόπου ανακύκλωση με αφρώδη άσφαλτο.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διερευνάται επίσης η επίδραση της ταχύτητας κίνησης του οχήματος στην αξιολόγηση της ομαλότητας. Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική είναι γνωστό ότι, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα κίνησης, τόσο πιο έντονες είναι οι δονήσεις που δέχεται το κινούμενο όχημα λόγω των αποκλίσεων της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Η συμβολή της παρούσας διατριβής έγκειται στην τεκμηριωμένη επιστημονική ανάδειξη της σχέσης «ταχύτητα-αξιολόγηση της ομαλότητας», σε συνδυασμό με τη φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Η διερεύνηση οδηγεί στο βασικό συμπέρασμα ότι η απόκριση του οχήματος, αυξάνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση των μεγάλου μήκους κυματισμών, όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Τεκμηριώνεται έτσι ότι, η ένταση των δονήσεων που δέχονται οι επιβαίνοντες στο όχημα, συνεχίζει και είναι μεγάλη και στους μεγάλου μήκους κυματισμούς, όταν το όχημα κινείται με υψηλή ταχύτητα. Το στοιχείο αυτό, πιστεύεται ότι είναι μία σημαντική πληροφορία για τον ενασχολούμενο με τα οδοστρώματα οδοποιοί, καθώς κατά την κατασκευή ή συντήρηση ενός οδοστρώματος, δεν πρέπει να εστιάζει μόνο στη μείωση του πλάτους των μικρού μήκους κυματισμών της επιφάνειας νέων ή αποκατεστημένων οδοστρωμάτων -όπως συνήθως επιδιώκεται μέσω των εξελιγμένων τεχνικών διάστρωσης,

προκειμένου να διασφαλιστεί ένα υψηλό, ή έστω αποδεκτό, επίπεδο ποιότητας κύλισης- αλλά και στη μείωση του πλάτους των μεγαλύτερου μήκους κυματισμών.

Εν συνεχεία αναπτύσσεται μία μεθοδολογία για τον προσδιορισμό κριτηρίων αξιολόγησης της ομαλότητας συνυπολογίζοντας τον παράγοντα «ταχύτητα οχήματος» και αξιοποιώντας τις δυνατότητες της δυναμικής φασματικής (PSD) ανάλυσης. Κατά τη μεθοδολογία αυτή δεν παραμερίζεται ο διεθνής δείκτης IRI, αλλά αξιοποιείται ως το τελικό μέγεθος για τη θέσπιση ορίων ομαλότητας, όσον αφορά στην παραλαβή ή τη συντήρηση των οδοστρωμάτων, σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης στην οδό. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τιμές ορίων ομαλότητας με βάση τον δείκτη IRI, για διάφορες ταχύτητες. Οι προτεινόμενες τιμές, οι οποίες βασίστηκαν στα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας στοιχείων ομαλότητας από 160 οδικά τμήματα, συνδυάζονται με προτάσεις για την καλύτερη εφαρμογή τους στην πράξη, καθώς είναι άμεσα αξιοποιήσιμες.

Ως προς την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας των οδοστρωμάτων, η συνήθης πρακτική είναι η ανάπτυξη απλουστευμένων, στατιστικών αλγορίθμων πρόβλεψης. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα, καθώς επικεντρώνεται στην καταγραφή και σχετική στατιστική επεξεργασία μόνο του δείκτη IRI, για τυχόν εφαρμοσιμότητα σε συγκεκριμένη κατηγορία οδοστρωμάτων, σε επίπεδο δικτύου (network level) και όχι σε επίπεδο έργου (project level) που βασικά ενδιαφέρει τον ενασχολούμενο με τα οδοστρώματα μηχανικό. Έχει παρατηρηθεί ότι τέτοιου είδους αλγόριθμοι πρόβλεψης, όταν εφαρμοστούν σε δίκτυο οδοστρωμάτων, το οποίο παρουσιάζει έστω και μικρές αποκλίσεις ως προς το δίκτυο για το οποίο αναπτύχθηκαν, δεν έχουν αξιοπιστία ως προς τα αποτελέσματά τους. Αντίθετα, η παρούσα διατριβή εστιάζει τόσο στη λειτουργική, όσο και στη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων, η οποία ουσιαστικά εκφράζεται, μόνο μέσω του συνόλου των μηχανικών χαρακτηριστικών των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων. Προς τούτο προτείνεται η ανάπτυξη ενός προκαταρκτικού μηχανιστικού προτύπου πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας.

Ειδικότερα, κατά τη διερεύνηση, το θέμα της πρόβλεψης της ομαλότητας προσομοιάζεται μέσα από τη δημιουργία παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, ως το αθροιστικό αποτέλεσμα των παραμενουσών παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις. Κατόπιν κατάλληλης διερεύνησης γίνεται θεώρηση ιερωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων για την προσομοίωση υπολογισμού των παραμενουσών παραμορφώσεων. Το διάγραμμα των υπολογισμένων παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος ενός υπό διερεύνηση οδοστρώματος περιγράφει τις προβλεπόμενες αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια και κατά συνέπεια εκφράζει, την προβλεπόμενη ομαλότητα

της επιφάνειας του οδοστρώματος για δεδομένη κυκλοφορία και δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η υπόψη προσέγγιση οδηγεί στην ανάπτυξη του προτύπου PROviMA (Prediction of Roughness viewing Mechanical Analysis) ως ένα προκαταρκτικό βήμα για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας στο χρόνο. Το προτεινόμενο πρότυπο έχει εφαρμοσιμότητα σε επίπεδο έργου.

Για τη διερεύνηση της επιφάνειας πρόβλεψης της εξέλιξης της κατά μήκος ομαλότητας, με βάση το προτεινόμενο πρότυπο PROviMA, δηλαδή της ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου. Κατόπιν κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας προκύπτει ότι, τα αποτελέσματα του πειράματος, ως πρώτη προσέγγιση στην πράξη της σύγκλισης των μορφών, συγκρινόμενων διαγραμμάτων, προβλεπόμενων και μετρημένων αποκλίσεων από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, κατά μήκος ενός οδοστρώματος, είναι ενθαρρυντικά.

Το PROviMA, μέσω και της εν δυνάμει εξέλιξής του, πιστεύεται ότι, είναι δυνατό να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο, όχι μόνο για τη διερεύνηση της πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας, αλλά και για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των διαφόρων τύπων μιγμάτων –τόσο μεμονωμένα, όσο και στο σύνολο τους- των στρώσεων ενός οδοστρώματος κατά τον σχεδιασμό του, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση του νέου οδοστρώματος. Ανάλογα ισχύουν και στην περίπτωση σχεδιασμού αποκατάστασης ή ενίσχυσης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Επίσης, με το PROviMA είναι δυνατό να γίνει και η αξιολόγηση διαφόρων τεχνολογιών για την αποκατάσταση ενός εν λειτουργία οδοστρώματος μέσω της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του, στο πλαίσιο διαφόρων εναλλακτικών προτάσεων συντήρησης/αποκατάστασης. Επιπλέον, μέσω της προτεινόμενης προσομοίωσης που περιγράφεται στο πρότυπο PROviMA, θα μπορούσε να διερευνηθεί η συμπεριφορά και νέων υλικών των μιγμάτων.

Σε όλες τις περιπτώσεις, βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου προτύπου PROviMA είναι ότι, για τη λειτουργία του χρησιμοποιούνται στοιχεία, των οποίων η συλλογή γίνεται επιτόπου (in-situ) με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT) και αναλύσεων. Τα συστήματα αυτά, αφενός δε διαταράζουν τη δομή του οδοστρώματος, με άμεσα επίσης οφέλη ως προς την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους για τη διεξαγωγή των μη καταστρεπτικών δοκιμών και αφετέρου, τα αποτελέσματά τους αντιπροσωπεύουν καλύτερα την πραγματική κατάσταση/συμπεριφορά του οδοστρώματος, από τις κλασσικές συνθήκες εργαστηρίου υπό κλίμακα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της έρευνας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, η πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων, σε συνδυασμό με τις προτεινόμενες διαδικασίες ή προσεγγίσεις αξιολόγησης της, μπορούν να αποτελέσουν ισχυρό εφόδιο στο πλαίσιο της ευρύτερης διαχείρισης της προστασίας ενός σύγχρονου οδοστρώματος. Το στοιχείο αυτό πιστεύεται ότι έχει ιδιαίτερα επιστημονικό και πρακτικό χαρακτήρα, τόσο σε διεθνές, όσο και σε εθνικό επίπεδο, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για οδοστρώματα μεγάλης διάρκειας, όπως για παράδειγμα είναι τα οδοστρώματα οδών ή οδικών δικτύων που εντάσσονται σε συστήματα παραχώρησης BOT/PPP (Build-Operate-Transfer / Public-Private-Partnerships).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος

Για τον χρήστη της οδού, η κατάσταση του οδοστρώματος συνδέεται με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του και κατ' επέκταση με την προσφερόμενη προς αυτόν ποιότητα κύλισης, η οποία διαμορφώνει την αίσθηση άνεσης και ασφάλειας. Τα στοιχεία αυτά, προσδιορίζουν για τον χρήστη την *εξυπηρετικότητα – λειτουργικότητα* του οδοστρώματος, η οποία συνδέεται σε επιστημονικούς όρους με τη *λειτουργική* κατάστασή του [1].

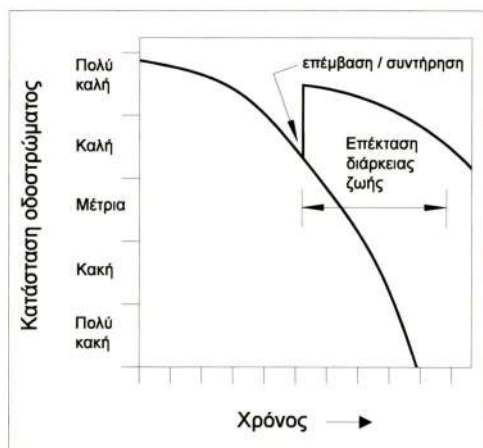
Για τον ενασχολούμενο ή υπεύθυνο για τα οδοστρώματα οδοποιό μηχανικό, τόσο σε επίπεδο έργου όσο και σε επίπεδο δικτύου, πέραν της εξασφάλισης των απαιτούμενων επιφανειακών χαρακτηριστικών, η αξιολόγηση ενός οδοστρώματος συνδέεται με τη *δομική* κατάστασή του. Η δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος εκφράζεται από τη *φέρουσα* ικανότητά του σε κάθε στάδιο λειτουργίας του, συμπεριλαμβανομένου και της φάσης κατασκευής και παραλαβής του οδοστρώματος [2]. Η ικανότητα αυτή, σχετίζεται με τα δομικά χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους μιγμάτων των στρώσεων, τα οποία συνθέτουν τη δομική συμπεριφορά του στο χρόνο. Επομένως, η συνολική συμπεριφορά ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει τόσο τη λειτουργική, όσο και τη δομική κατάστασή του.

Κατά συνέπεια, βασικές απαιτήσεις είναι, η διατήρηση της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος, και ταυτόχρονα, η εξασφάλιση ενός επιθυμητού επιπέδου λειτουργικής κατάστασής του, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Η σύνδεση και η εξασφάλιση αυτών των δύο απαιτήσεων αποτελεί την ευρύτερη έννοια της «επιτελεστικότητας» ενός οδοστρώματος [3], τόσο σε επίπεδο έργου, όσο και σε επίπεδο δικτύου.

Στη σύγχρονη αντίληψη, η έννοια συγκεκριμένης *διάρκειας ζωής* ενός οδοστρώματος ουσιαστικά δεν υφίσταται, ιδιαίτερα δε όταν πρόκειται για βασικούς οδικούς άξονες, καθώς θα οδηγούσε στην αποδοχή ότι τα οδοστρώματα κάποια στιγμή παύουν να λειτουργούν και επομένως, παύουν να υπάρχουν ή πρέπει να αποκατασταθούν πλήρως ή να επανακατασκευαστούν. Εν γένει στην πραγματικότητα μια τέτοια διαδικασία δεν είναι ρεαλιστική, καθώς για παράδειγμα σε επίπεδο λειτουργίας σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων, συντρέχουν, εκτός άλλων, θέματα αποκλεισμού της οδού («road closure») [4], τα οποία έχουν αρνητικές επιπτώσεις, μεταξύ άλλων, στην οδική ασφάλεια. Έτσι, τα σύγχρονα οδοστρώματα πρέπει να παρακολουθούνται διαρκώς, ώστε να μην επιτρέπονται αστοχίες

στις υποκείμενες στρώσεις και κυρίως, στη στρώση έδρασης και κατ' επέκταση, στη γεωτεχνική υποδομή. Οι τυχόν αστοχίες πρέπει να περιορίζονται –αν είναι δυνατόν– στην στρώση κυκλοφορίας. Τα οδοστρώματα, για παράδειγμα, ενός οδικού άξονα (αυτοκινητόδρομος, εθνικής οδός κλπ) συνεχίζουν να λειτουργούν ως αναπόσπαστο κομμάτι του συγκοινωνιακού ιστού διαρκώς, εξ' ου και η έννοια των οδοστρωμάτων μεγάλης διάρκειας που αναφέρονται στην Ευρώπη με τον όρο *Long Life Pavements: LLP* [5] ή στις ΗΠΑ με τον όρο *Perpetual Pavements* [6]. Η άποψη αυτή αποτελεί βασική αρχή λειτουργίας των οδοστρωμάτων που είναι ενταγμένα στα Συστήματα Παραχώρησης BOT/PPP (Build-Operate-Transfer / Public-Private-Partnerships) [7], όμοια των οποίων είναι η Αττική Οδός και άλλα συναφή μεγάλα οδικά έργα υπό κατασκευή στη χώρα μας.

Ο εκάστοτε αρμόδιος φορέας διαχείρισης της λειτουργίας και της συντήρησης (*ελαφριάς ή βαριάς*) μιας οδού ή οδικού δικτύου, καλείται όχι μόνο να εξασφαλίσει την αρχικά προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος με κλασσικές μεθόδους περιοδικής συντήρησης (*routine maintenance*) ή τοπικών αποκαταστάσεων (*minor rehabilitation*), αλλά και να φροντίσει, μέσα από διαδικασίες προληπτικής συντήρησης (*preventing maintenance*) [8], σε συνδυασμό με την περιοδική παρακολούθηση (*monitoring*) [9] της συμπεριφοράς του οδοστρώματος, να αποφύγει συνθήκες ανακατασκευής και να δώσει τη δυνατότητα επάρκειας του οδοστρώματος και πέραν του αρχικού χρόνου σχεδιασμού ή χρόνου ενίσχυσης του (σχήμα 1.1) [10]. Τα προηγούμενα αποτελούν μια σύνθετη διαδικασία, η οποία εντάσσεται πλέον στη σύγχρονη, ευρύτερη αντίληψη για την *προστασία* (*preservation*) των οδοστρωμάτων (σχήμα 1.2) [11].



Σχήμα 1.1: Διαδικασία συντήρησης και προστασίας των οδοστρωμάτων [10]



Σχήμα 1.2: Παράμετροι για την προστασία του οδοστρώματος [11]

Στο πλαίσιο της εξασφάλισης της επιτελεσματικότητας των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους, υπό το πρίσμα της συνεχούς «προστασίας» τους, το πρόβλημα είναι διττό. Αφενός πρέπει να υπάρχει μια αξιόπιστη διαδικασία αξιολόγησης της κατάστασης ενός οδοστρώματος και αφετέρου, πρέπει η αξιολόγηση αυτή να είναι συνδεδεμένη με τη συμπεριφορά του οδοστρώματος, σε βάθος χρόνου λειτουργίας του.

Όσον αφορά στην πρώτη συνιστώσα του προβλήματος, απαιτείται ο καθορισμός μιας τεκμηριωμένης διαδικασίας για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, με στόχο τόσο τη βελτίωση του *αρχικού σχεδιασμού* του, όσο και τη *διαχείριση της συντήρησής* του. Όσον αφορά στη δεύτερη συνιστώσα του προβλήματος, η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος γίνεται μέσω της αξιολόγησης της εξέλιξης των επιμέρους χαρακτηριστικών του, σε βάθος χρόνου. Σε αυτή την περίπτωση, καθοριστικό στοιχείο είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης των χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων για την *πρόληψη*, μέσω της εφαρμογής απαιτούμενων δράσεων ή ενεργειών, οι οποίες απαιτούνται για την αντιμετώπιση προβλεπόμενων αστοχιών ενός οδοστρώματος. Έτσι, είναι δυνατό να υλοποιηθεί μια βέλτιστη στρατηγική προστασίας του οδοστρώματος, σε κάθε στάδιο λειτουργίας του, η οποία οδηγεί και στη διατήρηση της επιτελεσματικότητας του.

Στη σύγχρονη αντίληψη, τα ανωτέρω σκιαγραφούν το γενικό πρόβλημα που απασχολεί τους ενασχολούμενους με τα οδοστρώματα οδοποιούς μηχανικούς. Η προσέγγιση για την επίλυση ενός τέτοιου σύνθετου προβλήματος πιστεύεται ότι μπορεί να γίνει μέσα από τη διερεύνηση των επιμέρους χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων, τα οποία αποτελούν στοιχεία σύνθεσης της επιτελεσματικότητάς τους. Ως ένα τέτοιο κρίσιμο στοιχείο –όπως περιγράφεται στην ακόλουθη ενότητα– θεωρείται η «ομαλότητα» της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη συμβολή για την αξιολόγηση της ομαλότητας στο πλαίσιο της επιτελεσματικότητας των οδοστρωμάτων, δηλαδή στη συμβολή της αξιολόγησης της ομαλότητας σε όλες τις φάσεις λειτουργίας των οδοστρωμάτων, όσο και της πρόβλεψης της εξέλιξής της σε βάθος χρόνου, για τη βέλτιστη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων, αλλά και την προστασία τους.

1.2 Αντικείμενο της έρευνας

Διαχρονικά, στόχος όλων των ενασχολούμενων με την επιστήμη και την τεχνολογία των οδοστρωμάτων ήταν και εξακολουθεί να είναι, η ανεύρεση χαρακτηριστικών ή παραμέτρων των οδοστρωμάτων που να μπορούν, είτε με τη μορφή δεικτών, είτε με κάποια έμμεση διαδικασία, να αποτελέσουν μια ένδειξη, η οποία να αντανakλά συνολικά τη λειτουργική και δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Τις περισσότερες φορές, από φυσικής απόψεως, ο συνδυασμός αυτός είναι εξαιρετικά δύσκολος. Για παράδειγμα, οι πάσης μορφής ρηγματώσεις που ενδεχομένως να καταγράφονται σε ένα οδόστρωμα είναι συνδεδεμένες μόνο με τη δομική κατάσταση του [12], ενώ ο συντελεστής τριβής που μετριέται είναι συνδεδεμένος με την αντιολισθητική ικανότητα της επιφάνειας του και άρα, μόνο με τη λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος.

Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1950, άρχισαν έρευνες για την έκφραση της ποιότητας κύλισης ενός οδοστρώματος μέσω ενός γενικού δείκτη κατάστασης, όπως είναι ο δείκτης εξυπηρετικότητας PSI (Present Serviceability Index) κατά AASHTO, για τον υπολογισμό του οποίου -όπως αναφέρεται ακολούθως στην ενότητα 2.2 της παρούσας- η ομαλότητα έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα [1, 13]. Σύμφωνα επίσης και με τα σχετικά πρόσφατα αποτελέσματα διευρωπαϊκής, επιστημονικής ομάδας εργασίας για την επιλογή και αξιολόγηση μεμονωμένων ή συνδυασμένων δεικτών επιτελεστικότητας ασφαλικών οδοστρωμάτων, στην οποία συμμετείχε και το Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ [14], αλλά και των διεργασιών ανάλογης θεματικής επιστημονικής επιτροπής στις ΗΠΑ [15], η κατά μήκος «ομαλότητα» ή διαφορετικά, *οι αποκλίσεις της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια* [16], μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη παράμετρο των οδοστρωμάτων που να συνδέεται με τα λειτουργικά-επιφανειακά ή με τα δομικά χαρακτηριστικά τους ή κατά περίπτωση και με τα δύο. Για παράδειγμα η έλλειψη ομαλότητας μπορεί να οφείλεται σε επιφανειακές αστοχίες της ασφαλικής στρώσης κυκλοφορίας, αλλά και ενδεχομένως σε σοβαρά προβλήματα της υποδομής (υποχωρήσεις στρώσεων ασύνδετων υλικών, καθιζήσεις εδάφους κ.λπ). Επομένως, η ομαλότητα είναι δυνατό να αποτελέσει μια αποδεκτή ποιοτική ή ποσοτική αναφορά της επιτελεστικότητας ενός οδοστρώματος ως μια παράμετρος έκφρασης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, τόσο σε επίπεδο έργου, όσο και σε επίπεδο δικτύου, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον χρήστη.

Η παραπάνω παρατήρηση θέτει, κατά κάποιο τρόπο, υπό σκέψη τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών για την έκφραση ή την ποσοτικοποίηση των στοιχείων ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων σε ένα μέγεθος υπό τη μορφή ενός ποιοτικού δείκτη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο ευρέως χρησιμοποιούμενος διεθνής δείκτης

ομαλότητας IRI (International Roughness Index) [17], ο οποίος ουσιαστικά συνδέεται μόνο με τη λειτουργική κατάσταση των οδοστρωμάτων, κατά τη διάρκεια ζωής τους.

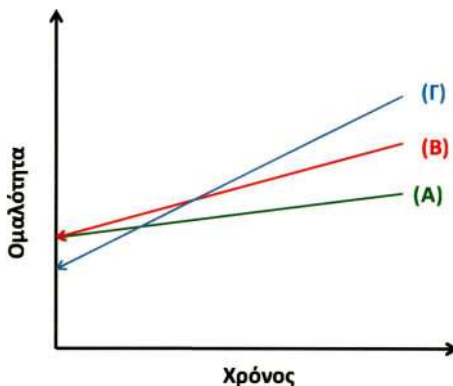
Η διαδικασία αξιόπιστης αξιολόγησης της ομαλότητας, τόσο για την παραλαβή ενός νέου ή αποκαταστημένου οδοστρώματος, όσο και κατά τη διαρκή λειτουργία ενός υφιστάμενου, παραμένει πάντα σημαντική. Δεν αρκεί όμως να υπάρχει μια τέτοια διαδικασία, μόνο για τη διάγνωση της εμφάνισης και κατάταξης της αστοχίας υπό τη μορφή μη αποδεκτής ομαλότητας, σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή, όπως συνήθως γίνεται [18, 19]. Για τη διαχείριση της συντήρησης του οδοστρώματος πρέπει να υπάρχει μια διαδικασία αξιολόγησης, η οποία να συνθέτει, κατά το μέγιστο δυνατό, τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το μέγεθος της ομαλότητας, προκειμένου να επιλέγεται ο καταλληλότερος χρόνος, αλλά και ο τρόπος επέμβασης στο οδόστρωμα. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντική για την εξασφάλιση της επιτελεσματικότητας των συμβατικών οδοστρωμάτων, αλλά και ιδιαίτερα των οδοστρωμάτων μεγάλης διάρκειας, προς όφελος τόσο του χρήστη, όσο και του Κυρίου ή του υπεύθυνου για τη διαχείριση (manager) του οδικού έργου [9].

Έτσι, στην παρούσα έρευνα, η ομαλότητα δεν αντιμετωπίζεται ως ένα μεμονωμένο χαρακτηριστικό μόνο της λειτουργικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, το οποίο αξιολογείται με έγκριτες μεθόδους, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, για την αποδοχή ή όχι της ποιότητας κύλισης [20]. Η αξιολόγηση της ομαλότητας αποτελεί κυρίαρχο μέσο για τη διασφάλιση της επιτελεσματικότητας των οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση, της προστασίας τους. Για την υποστήριξη της θεώρησης αυτής, στην παρούσα εργασία, υπεισέρχεται ως ισχυρό εργαλείο η δυναμική φασματική (Power Spectral Density: PSD) ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, η οποία δεν χρησιμοποιείται απλά ως ένας «διαφορετικός» τρόπος αξιολόγησης της ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος σε συγκεκριμένο χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος, όπως έγινε από ορισμένους ερευνητές [19, 21]. Αντίθετα εισάγεται, αφενός ως μια τεκμηριωμένη διαδικασία υποστήριξης των αποτελεσμάτων αξιολόγησης της ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI και αφετέρου, ως το μέσο για τη συλλογή καθοριστικών πληροφοριών για τη συμπεριφορά του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας του, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την προστασία και κατ' επέκταση τη διασφάλιση ή και την επέκταση της επιτελεσματικότητας των οδοστρωμάτων.

Στο πλαίσιο προστασίας των οδοστρωμάτων, για την ενίσχυση της προαναφερόμενης θεώρησης, όπου η αξιολόγηση της ομαλότητας αποτελεί κυρίαρχο μέσο για τη διασφάλιση της επιτελεσματικότητας των οδοστρωμάτων, απαιτείται η ύπαρξη μιας μεθοδολογίας που να περιλαμβάνει την *πρόληψη* μέσω της εφαρμογής απαραίτητων δράσεων ή ενεργειών επέμβασης σε ένα οδόστρωμα. Έτσι μόνο είναι δυνατό να υλοποιηθεί μια βέλτιστη

στρατηγική προστασίας του οδοστρώματος σε κάθε στάδιο λειτουργίας του, η οποία και οδηγεί στη διατήρηση της επιτελεστικότητας του. Στο πλαίσιο αυτό, βασική προϋπόθεση είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας του οδοστρώματος, καθώς και η συνεχής παρακολούθηση και διόρθωση αυτής της «εκτίμησης», για τη βέλτιστη διαχείριση του οδοστρώματος από την αρχή της κατασκευής ή ανακατασκευής του.

Η πρόβλεψη για την εξέλιξη της ομαλότητας αποτελεί πρόκληση, στο πλαίσιο της ευρύτερης σύγχρονης αντίληψης για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση, για την προστασία τους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι δύο οδοστρώματα (Α) και (Β), αρχικά με το ίδιο επίπεδο ομαλότητας, μπορεί να έχουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους, ανάλογα με τα λοιπά χαρακτηριστικά τους και τους εξωτερικούς παράγοντες επίδρασης (περιβάλλον και κυκλοφορία), αλλά και με την ευρύτερη διαχείριση της συντήρησής τους. Επιπλέον, ένα τρίτο οδόστρωμα (Γ) με καλύτερο των προηγούμενων αρχικό επίπεδο ομαλότητας, μπορεί να έχει χειρότερη συμπεριφορά σε βάθος χρόνου λειτουργίας, ανάλογα πάντα με τα υφιστάμενα χαρακτηριστικά, τις ισχύουσες συνθήκες, καθώς και τις ενδιάμεσες στρατηγικές παρέμβασης, όταν πρόκειται για Συστήματα Διαχείρισης των Οδοστρωμάτων (ΣΔΟ) [8]. Οι προαναφερόμενες, χαρακτηριστικές περιπτώσεις, οι οποίες εκφράζουν διαφορετικές μορφές επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων στον χρόνο, περιγράφονται ποιοτικά από το διάγραμμα του σχήματος 1.3, όπου ο κατακόρυφος άξονας αφορά στην ομαλότητα, υπό την έννοια των αποκλίσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια και ο οριζόντιος άξονας αφορά στο χρόνο λειτουργίας του.



Σχήμα 1.3: Εξέλιξη της συμπεριφοράς διαφορετικών οδοστρωμάτων με θεώρηση της ομαλότητας

Έχουν γίνει διάφορες έρευνες για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας. Οι έρευνες αυτές όμως αφορούν κυρίως στην ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης που βασίζονται σε σχετικά απλουστευτικές διαδικασίες, με γνώμονα τη στατιστική επεξεργασία στοιχείων ομαλότητας [12, 22, 23, 24]. Τα υπόψη στοιχεία, υπό τη μορφή τράπεζας δεδομένων, έχουν προκύψει από την καταγραφή παραμέτρων ενός συγκεκριμένου δείγματος οδοστρωμάτων οδικού δικτύου, για κάποια χρόνια λειτουργίας τους. Η προσέγγιση αυτή, χαρακτηρίζεται ως απλουστευτική, καθώς δεν συμπεριλαμβάνει το φαινομενολογικό κομμάτι της συμπεριφοράς του συστήματος «υλικά/μίγμα επιμέρους στρώσεων-οδόστρωμα».

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των προαναφερόμενων, απλουστευτικών στατιστικών αλγορίθμων πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας είναι ότι τα στοιχεία, βάσει των οποίων έχουν αναπτυχθεί οι υπόψη αλγόριθμοι, προέρχονται από παρατηρήσεις κάποιας συγκεκριμένης μεταβλητής, όπως είναι για παράδειγμα στην περίπτωση της ομαλότητας, ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI [12], μη λαμβάνοντας υπόψη σημαντικές παραμέτρους επιρροής, όπως είναι οι περιβαλλοντικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και στοιχεία συμπεριφοράς των υλικών. Έχει παρατηρηθεί ότι τέτοιου είδους προβλέψεις, όσον αφορά στην ομαλότητα, έχουν σοβαρούς περιορισμούς. Συγκεκριμένα, η μέση περίπτωση για την πιθανότητα εφαρμογής τους απευθύνεται σε ομοειδή οδοστρώματα ή δίκτυα οδοστρωμάτων, κάτι το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό περιορισμό, ιδιαίτερα δε στο πλαίσιο ανάπτυξης ενός Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων (ΣΔΟ). Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι, όποτε οι στατιστικοί αλγόριθμοι πρόβλεψης εφαρμόστηκαν σε δίκτυα οδοστρωμάτων, τα οποία δεν ήταν ομοειδή, τα αποτελέσματά τους δεν επαληθεύτηκαν [25]. Ακόμη όμως και αν οι υπόψη αλγόριθμοι πρόβλεψης εφαρμοστούν σε ομοειδή οδοστρώματα, συχνά υπάρχει η απαίτηση επαναβαθμονόμησης των συντελεστών των στατιστικών αλγορίθμων, κάτι το οποίο συνεπάγεται συλλογή νέων οδικών στοιχείων και νέα στατιστική επεξεργασία, σε μικρό έστω δείγμα τμημάτων οδοστρώματος [25, 26]. Επίσης, από τη διεθνή εμπειρία και πρακτική, φαίνεται ότι οι στατιστικοί αλγόριθμοι πρόβλεψης δεν έχουν καμία εφαρμοσιμότητα σε επίπεδο έργου (project level), όπου άμεσα ενδιαφερόμενος είναι ο οδοποιός μηχανικός, αλλά απευθύνονται αποκλειστικά σε επίπεδο δικτύου (network level), με κύριο αποδέκτη των σχετικών πληροφοριών τον υπεύθυνο διαχείρισης του δικτύου [27, 28].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι στατιστικοί αλγόριθμοι πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του πλέον εξελιγμένου διευρωπαϊκού προγράμματος PARIS [12]. Οι προτεινόμενες απλουστευτικές σχέσεις, όσον αφορά στην πρόβλεψη της ομαλότητας απέτυχαν στην υλοποίησή τους, ενώ αντίστοιχες σχέσεις για την πρόβλεψη ρηγματώσεων

ή τροχοαυλακώσεων στο οδόστρωμα, επαληθεύτηκαν μερικώς στην πράξη και πάντα σε επίπεδο δικτύου. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι η ομαλότητα είναι ένα χαρακτηριστικό που συνδέεται τόσο με τη λειτουργική, όσο και με τη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων και η σύνδεση αυτή είναι αδύνατο να γίνει μέσα από την πρόβλεψη ενός μεμονωμένου δείκτη, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο δείκτης IRI.

Σε κάθε περίπτωση και εφόσον κρίνεται ότι οι υπόψη αλγόριθμοι πρόβλεψης είναι στατιστικά αποδεκτοί, αυτοί κρίνονται κατάλληλοι να εφαρμοστούν μόνο σε επίπεδο δικτύου (network level) και όχι σε επίπεδο έργου (project level). Σε επίπεδο δικτύου, βασικός αποδέκτης των σχετικών αποτελεσμάτων πρόβλεψης είναι ο υπεύθυνος για τη διαχείριση του δικτύου, στον οποίο ενδεχομένως να αρκεί μια απλουστευτική τεχνοοικονομική πληροφορία, στο πλαίσιο της γενικότερης στρατηγικής απορρόφησης και διαχείρισης των διατιθέμενων πόρων. Όμως σε επίπεδο έργου, έχουν μεγάλη σημασία τα στοιχεία που σχετίζονται με τα υλικά των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων και κατ' επέκταση, τα στοιχεία που ερμηνεύουν τη μηχανική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και οδηγούν στη λήψη αποφάσεων, σχετικά με συγκεκριμένες λύσεις συντήρησης, ενίσχυσης ή αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Τα στοιχεία αυτά σε καμία περίπτωση δεν συνυπολογίζονται στους προαναφερόμενους στατιστικούς αλγορίθμους πρόβλεψης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται ακριβώς στο σημείο αυτό, δηλαδή στη συμβολή για την ανάπτυξη ενός μηχανιστικού προτύπου για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας, αρχικά σε επίπεδο έργου. Το πρότυπο αυτό -το οποίο αναπτύσσεται σε προκαταρκτικό στάδιο- σε συνδυασμό με τη σύνθεση μιας διαδικασίας αξιολόγησης της ομαλότητας, σε κάθε φάση λειτουργίας των οδοστρωμάτων, αποτελούν τη βάση της παρούσας εργασίας, στο πλαίσιο της ευρύτερης αντίληψης για την προστασία των οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση τη διατήρηση της επιτελεσματικότητάς τους. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι, μέσω της ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, δεν εντοπίζεται κάποιο πρότυπο πρόβλεψης της κατά μήκος ομαλότητας που να σχετίζεται με τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών και μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στη βασική απαίτηση διασφάλισης της επιτελεσματικότητας και προστασίας των οδοστρωμάτων.

Η έρευνα, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επικεντρώνεται στα εύκαμπτα οδοστρώματα, καθώς αποτελούν κυρίαρχο τύπο οδοστρωμάτων, τόσο σε διεθνές επίπεδο, όσο και σε επίπεδο ελληνικού οδικού δικτύου.

1.3 Δομή και μεθοδολογία

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας, αναπτύσσονται στα κεφάλαια που ακολουθούν, επιμέρους μέθοδοι αξιολόγησης της ομαλότητας υπό την ευρύτερη έννοια της προστασίας του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης και της διαδικασίας πρόβλεψης της εξέλιξης της. Με αφετηρία τις θεμελιώδεις αρχές και διαδικασίες αξιολόγησης της ομαλότητας (Κεφάλαιο 2), αναπτύσσονται βασικές παράμετροι-συνιστώσες των υπόψη διαδικασιών (Κεφάλαιο 3). Οι παράμετροι αυτές, οι οποίες αποτελούν τη βάση για τη διαμόρφωση των προτεινόμενων μεθόδων στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, αφορούν στους κυματισμούς που χαρακτηρίζουν την επιφάνεια ενός οδοστρώματος, τον διεθνή δείκτη ομαλότητας IRI και τα χαρακτηριστικά της φασματικής ανάλυσης των προαναφερόμενων κυματισμών.

Στο πλαίσιο της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων, προτείνεται μια προσεγγιστική μεθοδολογία αξιολόγησης της ομαλότητας τους, σε διάφορες φάσεις λειτουργίας τους, με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της συντήρησής τους. Στη μεθοδολογία αυτή αξιοποιούνται οι δυνατότητες της δυναμικής φασματικής (PSD) ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων και διερευνάται πέραν της λειτουργικής και η δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων, για την πληρέστερη παρακολούθηση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς τους. Μέσω της προσέγγισης αυτής, η PSD ανάλυση δεν αντικαθιστά, αλλά συμπληρώνει τον διεθνή αποδεκτό δείκτη IRI, ο οποίος εξ' ορισμού έχει ορισμένους περιορισμούς που σχολιάζονται στην παρούσα εργασία. Η προτεινόμενη προσεγγιστική μεθοδολογία αφορά στην αξιολόγηση της ομαλότητας για την επιλογή του τρόπου συντήρησης των οδοστρωμάτων, για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε αρχικό στάδιο λειτουργίας τους, καθώς επίσης και για την αξιολόγηση τεχνολογιών συντήρησης των οδοστρωμάτων (Κεφάλαιο 4). Η σχετική διερεύνηση βασίζεται στα αποτελέσματα επεξεργασίας και ανάλυσης στοιχείων ομαλότητας που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια οδικών πειραμάτων σε επίπεδο έργου, τα οποία εντάσσονται στο πλαίσιο των ευρύτερων ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ.

Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της ομαλότητας, υπεισέρχεται και ο παράγοντας της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αξιοποιώντας τις δυνατότητες της PSD ανάλυσης, διερευνάται η σχέση ταχύτητας-ομαλότητας υπό το πρίσμα των αποκλίσεων της επιφάνειας από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, κατανεμημένων σε επιμέρους ομάδες κυματισμών (Κεφάλαιο 5). Ο παράγοντας της ταχύτητας λαμβάνεται υπόψη, εν συνεχεία, κατά την ανάπτυξη μιας άμεσα εφαρμόσιμης μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό κριτηρίων αξιολόγησης της ομαλότητας, τόσο σε νέες κατασκευές, όσο και σε υφιστάμενα οδοστρώματα. Στη μεθοδολογία αυτή, η οποία βασίζεται

σε στοιχεία ομαλότητας που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια κατάλληλου οδικού πειράματος, είναι καθοριστική η συμβολή των δυνατοτήτων της PSD ανάλυσης (Κεφάλαιο 6).

Στο πλαίσιο της εξασφάλισης της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους, υπό το πρίσμα της συνεχούς «προστασίας» τους, κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της ομαλότητας, η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης της αποτελεί σημαντικό στοιχείο. Η διερεύνηση στρέφεται σε αυτή την κατεύθυνση, με έμφαση στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών και μιγμάτων των στρώσεων των οδοστρωμάτων. Μέσα από την προσέγγιση αυτή αναπτύσσεται ένα προκαταρκτικό μηχανικό πρότυπο πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας σε επίπεδο έργου, υπό την έννοια της ανάπτυξης παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους (Κεφάλαιο 7). Η προκαταρκτική εφικτότητα του προτύπου αυτού, διερευνάται σε σχετικό οδικό πείραμα, το οποίο πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης, μέσω κατάλληλων στατιστικών αναλύσεων (Κεφάλαιο 8).

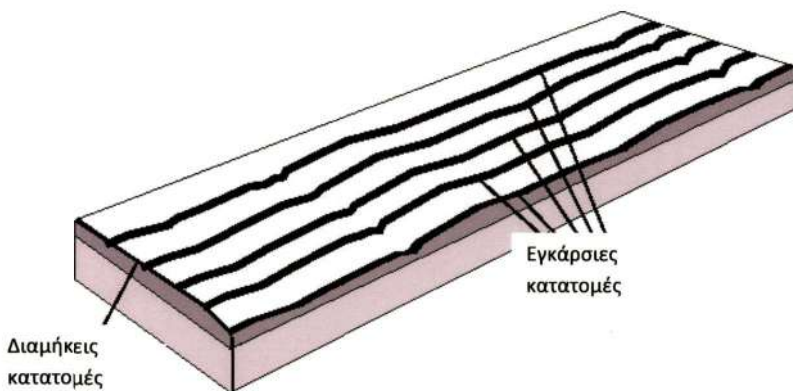
Τα συμπεράσματα που αφορούν στα επιμέρους κεφάλαια της διατριβής -όπως αυτά περιγράφονται στα ανωτέρω- αναπτύσσονται εκτενώς, ανακεφαλαιώνοντας τους στόχους και τα αποτελέσματα της έρευνας (Κεφάλαιο 9). Η σχετική διεθνής βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στη διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται στο τέλος του κειμένου (Κεφάλαιο 10), ενώ τα στοιχεία ανάλυσης περιλαμβάνονται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας.

2. ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Ορισμός και επιδράσεις

Ως ομαλότητα ορίζεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο της εισαγωγής της παρούσας εργασίας, οι αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια [16]. Η έλλειψη ομαλότητας μπορεί επίσης να οριστεί ως η παραμόρφωση της επιφάνειας του οδοστρώματος, η οποία προκαλεί στο όχημα ανεπιθύμητες κατακόρυφες μετακινήσεις που επηρεάζουν την άνεση και ενδεχομένως, την ασφάλεια του χρήστη της οδού [29]. Γενικά, η ομαλότητα επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά και την ποιότητα κύλισης των οχημάτων, τη δυναμική των φορτίσεων του οδοστρώματος, καθώς και την απορροή των επιφανειακών υδάτων [30].

Προβλήματα ομαλότητας εμφανίζονται όταν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις, σε κατακόρυφο επίπεδο, της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη ή εγκάρσια κατεύθυνση (προφίλ) σε σχέση με τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Το «προφίλ» της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη ή εγκάρσια κατεύθυνση παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1 [31].



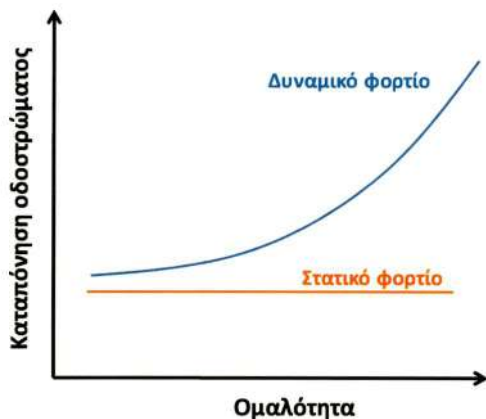
Σχήμα 2.1: Διαμήκεις και εγκάρσιες κατατομές της επιφάνειας ενός οδοστρώματος [31]

Η έννοια της ποιότητας κύλισης είναι συνδεδεμένη με την ομαλότητα κατά τη διαμήκη κατεύθυνση, δηλαδή την κατά μήκος ομαλότητα, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο

διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επομένως, εφεξής ως ομαλότητα θα αναφέρεται η κατά μήκος της οδού ομαλότητα.

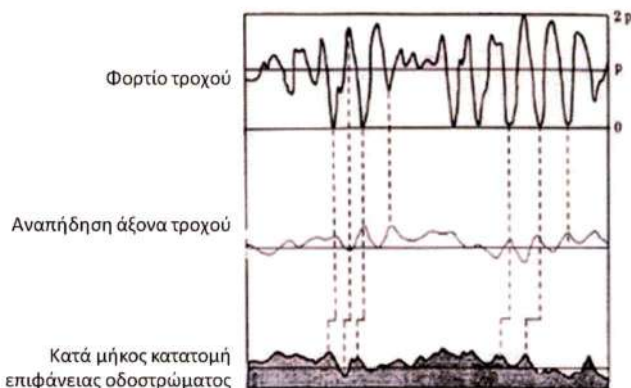
Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ομαλότητα των οδοστρωμάτων είναι ο τρόπος κατασκευής, οι συνθήκες κυκλοφορίας και κατ' επέκταση η καταπόνηση του οδοστρώματος λόγω αξονικών διελεύσεων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα υλικά κατασκευής. Ο τρόπος κατασκευής αφορά όχι μόνο στην ομαλότητα της στρώσης κυκλοφορίας, αλλά και στην ομαλότητα που επιτυγχάνεται κατασκευαστικά στην προσωρινή επιφάνεια των υποκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος. Επιπλέον, ενδεχόμενη ανομοιογένεια των υλικών κατασκευής του οδοστρώματος κατά μήκος της θεωρούμενης οδού, καθώς επίσης και μη ομοιογενής συμπίκνωση των επιμέρους στρώσεων και της στρώσης έδρασης, οδηγούν -λόγω της επιβολής των φορτίων κυκλοφορίας- στη μεταβολή της ομαλότητας ως το αθροιστικό αποτέλεσμα των παραμορφώσεων που δημιουργούνται στις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Η δημιουργία παραμορφώσεων ενισχύεται επίσης από τις συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι για παράδειγμα οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, οι οποίες επιδρούν στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων και κατά συνέπεια, στην συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Η ομαλότητα, η οποία χαρακτηρίζεται τελικά από την εμφάνιση παραμορφώσεων υπό τη μορφή κυματισμών κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, τείνει να αυξάνει με την αθροιστική αύξηση των αξονικών διελεύσεων. Οι επαναλαμβανόμενες αξονικές διελεύσεις επιδρούν μέσω των δυναμικών φορτίων στην υποβάθμιση του προσφερόμενου επιπέδου ποιότητας κύλισης και κατ' επέκταση, στη μείωση της διάρκειας ζωής των οδοστρωμάτων (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Η ομαλότητα σε σχέση με την καταπόνηση του οδοστρώματος

Επιπλέον, ο τρόπος με τον οποίο η έλλειψη ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος επιδρά στα διερχόμενα οχήματα και κατ' επέκταση στους χρήστες της οδού, έχει αποτελέσει ιδιαίτερο αντικείμενο έρευνας [32, 33, 34]. Η κακή κατάσταση ενός οδοστρώματος όσον αφορά στην ομαλότητα της επιφάνειάς του μπορεί να προκαλέσει αναπήδηση των τροχών του οχήματος με αποτέλεσμα τη φθορά της ανάρτησης, των ελαστικών, αλλά και τη καταπόνηση του ίδιου του οδοστρώματος, λόγω της δυναμικής φόρτισης (σχήμα 2.3) [35].



Σχήμα 2.3: Συμπεριφορά οχήματος κατά την κίνηση του (όπου p =στατικό φορτίο οχήματος) [35]

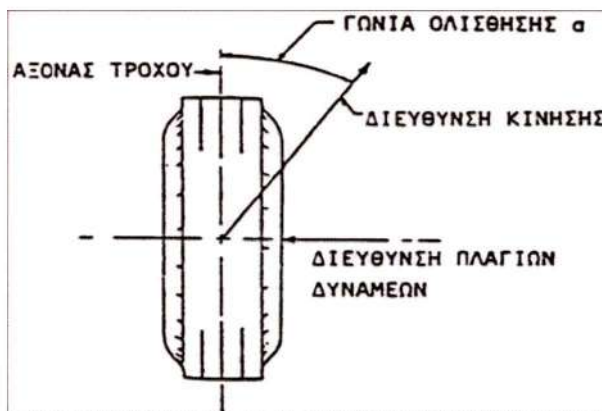
Η ομαλότητα καθορίζει την ποιότητα κύλισης ενός οδοστρώματος, την εκτίμηση δηλαδή που έχουν οι χρήστες για την επιφάνεια μιας οδού [36, 37, 38]. Βασικό συστατικό στην έρευνα που αφορά στην ποιότητα κύλισης είναι η συνάρτηση «επιβάτης - μεταφορά με όχημα» [39]. Αυτή είναι μια εξίσωση ή μια ομάδα εξισώσεων που συσχετίζουν τις φυσικές προσδοκίες από ένα αρχικό περιβάλλον οδού (κίνηση, θόρυβος, άνεση κλπ) με τις αντιδράσεις του επιβάτη (άνεση, αποδεκτικότητα κλπ). Αν όλες οι συνθήκες μιας οδού είναι αποδεκτές και η κύλιση είναι καλή, ο χρήστης αισθάνεται άνετα. Αν αυτά δεν συμβαίνουν, ο χρήστης υπόκειται ενόχληση.

Έρευνες [40, 41] έδειξαν επίσης, ότι η έννοια της ομαλότητας συνδέεται άμεσα με τη δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος, διότι υπάρχει σημαντική διαφορά στις καταπονήσεις που δέχεται ένα ομαλό και ένα μη ομαλό οδόστρωμα. Ένα μη ομαλό οδόστρωμα δέχεται περισσότερες και μεγαλύτερες δυναμικές καταπονήσεις από ένα ομαλό οδόστρωμα, με αποτέλεσμα την ταχύτερη υποβάθμιση της δομικής κατάστασης του και κατά συνέπεια, τη μείωση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του (σχήμα 2.2). Επομένως, ένα αρχικά επίπεδο οδόστρωμα αναμένεται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι ένα λιγότερο

αρχικά επίπεδο οδόστρωμα, με δεδομένο ότι οι υπόλοιποι παράγοντες επίδρασης στη συμπεριφορά ενός οδοστρώματος (κυκλοφορία, περιβάλλον κλπ) είναι ισοδύναμοι. Όμως, αν δεν γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για τη διαχείριση της συντήρησης και κατ' επέκταση για την προστασία του οδοστρώματος, η προηγούμενη διαπίστωση δεν ισχύει.

Η ομαλότητα όμως δεν επιδρά μόνο στη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Επιδρά και στην ασφάλεια του χρήστη μιας οδού, καθώς μπορεί να επιφέρει σοβαρά προβλήματα στην οδήγηση, στην τροχοπέδηση των οχημάτων και στην αντίδραση των οδηγών. Με άλλα λόγια οι αντιδράσεις του οδηγού, η τροχοπέδηση του οχήματος και οι εναλλαγές κινήσεων και ταχυτήτων κατά την οδήγηση συνδέονται με την ομαλότητα του οδοστρώματος [42, 43].

Πιο αναλυτικά, οι ελιγμοί και οι απαραίτητες κινήσεις που κάνει ένας οδηγός όταν κινείται στο οδόστρωμα μιας οδού, σε συνδυασμό με τις αυξομειώσεις της ταχύτητας οδήγησης, έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία πλευρικών δυνάμεων μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Αυτές είναι συνέπεια της κίνησης του οχήματος, της οποίας η διεύθυνση παρατηρείται ότι δεν είναι παράλληλη με τον άξονα του τροχού, αλλά σχηματίζει γωνία α που ορίζεται ως γωνία ολίσθησης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4 μέσω της πηγής [42].

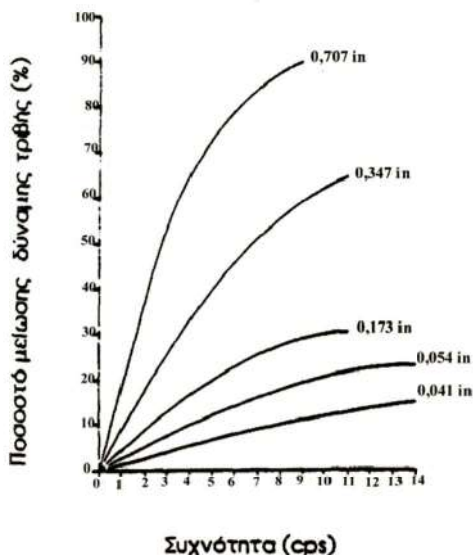


Σχήμα 2.4: Γωνία ολίσθησης τροχού [42]

Ο σωστός έλεγχος του οχήματος απαιτεί την ύπαρξη πλαγίων δυνάμεων, προκειμένου να εξισορροπήσουν τις μεταβολές των κατακόρυφων δυνάμεων που δημιουργούνται κατά τις εναλλαγές των κινήσεων και της ταχύτητας οδήγησης. Όσο μεγαλύτερες είναι οι αποκλίσεις της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, τόσο πιο πολλές

και μεγάλες είναι οι μεταβολές των κατακόρυφων αυτών δυνάμεων και κατά συνέπεια, μεγαλώνει ο κίνδυνος για απώλεια του ελέγχου του οχήματος [44].

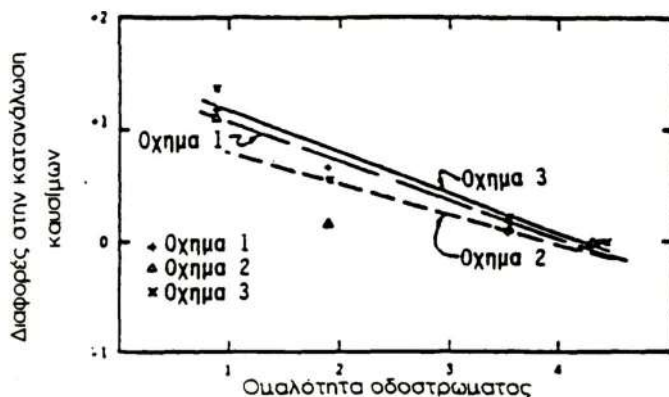
Η επίδραση της ομαλότητας στη δύναμη της τροχοπέδησης είναι επίσης σημαντική. Από μελέτες που έγιναν προέκυψε ότι, όσο η έκταση και η συχνότητα των ανωμαλιών που εμφανίζονται κατά μήκος μιας οδού αυξάνει, τόσο αυξάνει και το ποσοστό της δύναμης της τριβής που χάνεται [45], όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.5 μέσω της πηγής [42].



Σχήμα 2.5: Μείωση της δύναμης τριβής συναρτήσει της συχνότητας υποβάθμισης του επιπέδου ομαλότητας [42]

Επιπλέον, η ομαλότητα ενός οδοστρώματος επιδρά στο λειτουργικό κόστος του οχήματος. Με τον όρο «λειτουργικό κόστος οχήματος» προσδιορίζεται το κόστος που συνδέεται με το οδόστρωμα δηλ. η διαφορά του κόστους οδήγησης σε ένα οδόστρωμα υποβαθμισμένης λειτουργίας συγκρινόμενου με το κόστος οδήγησης σε ένα οδόστρωμα υψηλής λειτουργίας. Αυτό το κόστος αυξάνει όσο μειώνεται η ομαλότητα ενός οδοστρώματος, είτε υπό την έννοια αύξησης του κόστους συντήρησης του οχήματος και κατανάλωσης καυσίμου [46, 47], είτε υπό την έννοια αύξησης του χρόνου μεταβίβασης, καθώς οι οδηγοί μειώνουν την ταχύτητα προκειμένου να αντισταθμίσουν την έλλειψη ομαλότητας και κατ' επέκταση την έλλειψη ασφάλειας που μπορεί να προκαλείται.

Όσον αφορά στη σχέση μεταξύ της ομαλότητας του οδοστρώματος και της κατανάλωσης καυσίμων έρευνες έδειξαν ότι, η κατανάλωση των καυσίμων αυξάνει με τη μείωση της προσφερόμενης προς τους χρήστες μιας οδού ποιότητας κύλισης. Μια τέτοια σχέση έχει μεγάλη βαρύτητα, καθώς η αύξηση του κόστους των καυσίμων και η ανάγκη για τη διαφύλαξη των πηγών ενέργειας είναι σημαντικά θέματα ενδιαφέροντος σε διεθνές επίπεδο. Παράδειγμα της σχέσης κατανάλωσης καυσίμων και ομαλότητας οδοστρώματος δίνεται με το διάγραμμα του σχήματος 2.6 μέσω της πηγής [42].



Σχήμα 2.6: Σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμων για τρία διαφορετικά οχήματα [42]

Ο τρόπος και ο βαθμός επιρροής των προαναφερόμενων παραμέτρων στην αξιολόγηση της ομαλότητας, αποτελεί ένα πολυπαραμετρικό αντικείμενο διερεύνησης.

2.2 Η ομαλότητα σε σχέση με την ποιότητα κύλισης των οδοστρωμάτων

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και τεχνικές αφενός για την αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων και αφετέρου, για τον συσχετισμό της με την προσφερόμενη προς τους χρήστες μιας οδού ποιότητα κύλισης, δηλαδή της εκτίμησης που έχουν οι χρήστες για την επιφάνεια της οδού. Η αξιολόγηση βέβαια της ποιότητας κύλισης εξαρτάται από υποκειμενικούς παράγοντες που σχετίζονται με τις προσδοκίες των χρηστών από μια επιφάνεια κύλισης, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνονται τον περιβάλλοντα χώρο και τις επιδράσεις αυτού.

Για παράδειγμα, πολλές έρευνες έχουν βασιστεί σε ομάδα χρηστών, οι οποίοι βαθμολογούν σε δεδομένη κλίμακα την άνεση που νιώθουν ως οδηγοί ή επιβάτες ενός οχήματος, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τυχόν επιφανειακές φθορές που αντιλαμβάνονται

οπτικά [32, 48, 49, 50]. Τα αποτελέσματα τέτοιου είδους μετρήσεων έχουν κριθεί αρκετές φορές ως σημαντικές ενδείξεις της κατάστασης των οδοστρωμάτων, καθώς αυτά έχουν ως βασικό σκοπό να εξυπηρετούν τους χρήστες. Όμως εμπεριέχουν ένα σημαντικό βαθμό αμφιβολίας και αβεβαιότητας λόγω του υποκειμενικού τους χαρακτήρα [51].

Η αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων αποτέλεσε βασικό αντικείμενο έρευνας κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος της AASHO τη δεκαετία του 1950 [13]. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε με τη βοήθεια της στατιστικής, η σχέση μεταξύ των καταγεγραμμένων στοιχείων της επιφάνειας του οδοστρώματος και της υποκειμενικής από τους χρήστες της οδού αξιολόγησης της προσφερόμενης προς αυτούς ποιότητας κύλισης, σε πιλοτικά οδικά τμήματα. Έτσι αναπτύχθηκε ο δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Index: PSI), ο οποίος εξέφρασε την ποιότητα κύλισης, καθώς προέκυψε από αντικειμενικές μετρήσεις ορισμένων παραμέτρων της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ο υπολογισμός του γίνεται ως ακολούθως:

$$PSI = 5.02 - \log(1 - SV) - 1.38 \cdot RD^2 - 0.01 \cdot \sqrt{C + P} \quad (2.1)$$

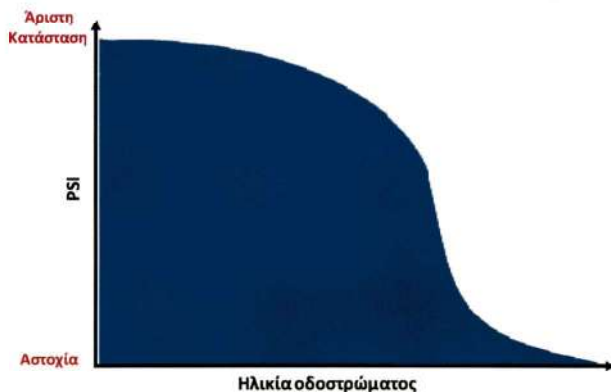
Όπου, *SV* (Slope Variance) είναι η μεταβολή της κλίσης κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος που εκφράζει υπό την έννοια των αποκλίσεων την κατά μήκος ομαλότητα, *RD* (Rutting Depth) είναι το βάθος τροχοαυλάκωσης, *C* (Cracking) είναι οι ρηγματώσεις εκφρασμένες σε ft²/1000 ft² και *P* (Patching) είναι το ποσοστό επιφάνειας που έχει επισκευαστεί με «μπαλώματα» εκφρασμένο σε ft²/1000 ft².

Η μαθηματική έκφραση του δείκτη PSI αντανάκλα μια σύνθεση των διαφόρων μορφών αστοχίας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, της έκτασής τους και της επίδρασης τους στη φθορά του οδοστρώματος και κατ' επέκταση, στην επιτελεστικότητα του [52]. Οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται από 0 έως 5, σε αντιστοιχία με τις βαθμολογίες των χρηστών μιας οδού για την προσφερόμενη προς αυτούς ποιότητα κύλισης στην ίδια κλίμακα. Αποτελεί έτσι ένα μέτρο ποσοτικοποίησης της παρούσας εξυπηρετικότητας ενός οδοστρώματος ή διαφορετικά, της στιγμιαίας ικανότητας ενός οδοστρώματος να «εξυπηρετεί» την κυκλοφορία μιας οδού. Δεν μπορεί, όπως πιστεύεται, να περιγράψει πλήρως τη συμπεριφορά του οδοστρώματος, αλλά σαφώς αποτελεί ένα στοιχείο παρατήρησης για την εξέλιξη της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος στο χρόνο (σχήμα 2.7), υπό την προϋπόθεση ότι καμία παρέμβαση συντήρησης δεν γίνεται στο οδόστρωμα.

Ο δείκτης PSI όμως δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες για τα επιμέρους χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, στοιχείο αδυναμίας όσον αφορά για παράδειγμα στην επιλογή του είδους της καταλληλότερης τεχνικής συντήρησης ή αποκατάστασης. Για παράδειγμα, μέσω

του υπόψη δείκτη, για δύο οδοστρώματα με την ίδια, χαμηλή τιμή PSI, δίνεται στο διαχειριστή του έργου μια γενική πληροφορία για τη βέλτιστη απορρόφηση των πόρων σε επίπεδο δικτύου, αλλά βάσει της ίδια πληροφορίας ο μηχανικός του έργου δεν μπορεί να προχωρήσει στις απαιτούμενες διαδικασίες συντήρησης, διότι χρειάζεται να γνωρίζει ποια χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων ευθύνονται για τη μείωση του δείκτη. Επομένως, ο δείκτης PSI χαρακτηρίζει έναν έμμεσο τρόπο έκφρασης της επιτελεστικότητας του οδοστρώματος, η οποία υπό την ευρύτερη έννοια πρέπει να περιλαμβάνει και στοιχεία της παρούσας κατάστασης του οδοστρώματος, αλλά και της εξέλιξης αυτής στο χρόνο.

Για τον υπολογισμό του δείκτη PSI, όπως αναδεικνύεται και από τη σχέση 2.1, η βαρύτητα της ομαλότητας, υπό την έννοια της μεταβολής της κλίσης κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η βαρύτητα αυτή καθορίστηκε από τις υποκειμενικές εκτιμήσεις των χρηστών-κριτών. Το στοιχείο αυτό, δίνει προβάδισμα στην ομαλότητα όσον αφορά στην αξιολόγηση τόσο της ποιότητας κύλισης, όσο και της λειτουργικής συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος. Πέραν όμως τούτου, σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη [12, 14], η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων για τη συντήρησή τους, γίνεται μέσω δεικτών επιμέρους χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων (π.χ. IRI). Έτσι ένας σύνθετος δείκτης κατάστασης, όπως είναι ο PSI, φαίνεται να περιορίζεται πλέον σήμερα σε επίπεδο στρατηγικών αποφάσεων στο πλαίσιο ενός συστήματος διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της εξυπηρετικότητας ενός οδοστρώματος [13]

Η διερεύνηση για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης των οδοστρωμάτων συνεχίστηκε κατά τη δεκαετία του 1960 [53] με την ανάπτυξη των προφίλομέτρων που

χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή της κατά μήκος κατατομής («προφίλ») της επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι συσκευές αυτές αν και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εξασφαλιστεί ως δεδομένο επεξεργασίας το προφίλ του οδοστρώματος σε προσομοιώσεις λειτουργίας του μηχανικού συστήματος των οχημάτων, αποδείχθηκε ότι ήταν ιδιαίτερα χρήσιμες για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης των οδοστρωμάτων.

Τη δεκαετία του 1970 [54], αναπτύσσονται στατιστικές σχέσεις συσχέτισμού της «γνώμης» των χρηστών μιας οδού για την προσφερόμενη προς αυτούς ποιότητας κύλισης και των μετρήσεων ομαλότητας που πραγματοποιούνται με καταγραφικά συστήματα υψηλής τεχνολογίας. Τη δεκαετία του 1980 [55], η διερεύνηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων στρέφεται στον καθορισμό αποδεκτών δεικτών (indicators) αξιολόγησής της.

Τη δεκαετία του 1990, πραγματοποιούνται προγράμματα παρακολούθησης συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων (Long Term Pavement Performance: LTPP), τα οποία εκτός άλλων συμπεριλαμβάνουν την παρακολούθηση της εξέλιξης της ομαλότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας των οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο της αξιολόγησης της επιτελεστικότητας τους [56]. Επιπλέον, το οδικό πείραμα της PIARC [57], πραγματοποιήθηκε με κύριο στόχο τον εναρμονισμό συσκευών και συστημάτων μέτρησης για την καταγραφή της ομαλότητας.

Τα τελευταία χρόνια, η διερεύνηση έχει στραφεί και σε θέματα που αφορούν, για παράδειγμα, στην παρακολούθηση της εξέλιξης της ομαλότητας, στην βελτιστοποίηση των μεθόδων μέτρησης και ανάλυση της, στην ποσοτικοποίηση της σχέσης επιρροής της από άλλα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων κλπ. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε και το Filter Experiment της FERHL (FERHL Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads), το οποίο εστίασε μεταξύ άλλων στον προσδιορισμό της επαναληψιμότητας, της αντιπροσωπευτικότητας και της ακρίβειας των μετρήσεων ομαλότητας [58]. Επίσης, επιμέρους αντικείμενο διερεύνησης αποτελεί η αξιολόγηση ομαλότητας ως παράμετρος λειτουργίας ενός συστήματος διαχείρισης των οδοστρωμάτων (Pavement Management System: PMS) [59].

Σε κάθε περίπτωση, βασικός στόχος είναι η βελτιστοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης της ομαλότητας, τόσο νέας κατασκευής, όσο και υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Εξάλλου, η διαδικασία αυτή είναι σημαντική παράμετρος στο πλαίσιο της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων, καθώς ελέγχεται και διασφαλίζεται η εξυπηρετικότητα τους σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους.

2.3 Καταγραφή της ομαλότητας

Σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της ομαλότητας είναι η χρήση συσκευών καταγραφής των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων [60]. Η διαδικασία μέτρησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων απευθύνεται στον έλεγχο της επιφανειακής κατάστασης οδών και αεροδρομίων και αφορά τόσο στην αξιολόγηση/αποδοχή της ποιότητας κύλισης νέων αλλά και ενισχυμένων/αποκατεστημένων οδοστρωμάτων όσο και τη λειτουργία ενός Συστήματος Διαχείρισης των Οδοστρωμάτων (Pavement Management System: PMS). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται διεθνώς για την καταγραφή της ομαλότητας διακρίνεται στις ακόλουθες πέντε βασικές κατηγορίες [59]:

1. Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems: RTRMS)
2. Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα (High speed inertial profilers)
3. Προφιλογράφοι (Profilographs)
4. «Ελαφρά» προφιλόμετρα (Lightweight profilers)
5. Χειροκίνητες συσκευές (Manual devices)

Τα συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης καταγράφουν την απόκριση της του οχήματος κατά την κίνηση του στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος. Αυτοκινούμενα οχήματα ή τυπικά τρέιλερ χρησιμοποιούνται για να ενσωματώσουν συσκευές καταγραφής της απόκρισης. Τα συστήματα που αφορούν αυτοκινούμενα οχήματα συναθροίζουν την κατακόρυφη κίνηση του πίσω τροχού σε σχέση με τον σκελετό του οχήματος, ενώ αυτά που αφορούν συρόμενα τρέιλερ συναθροίζουν την κατακόρυφη κίνηση του τρέιλερ σε σχέση με τον σκελετό του οχήματος ρυμούλκησης. Τέτοιου είδους σύστημα είναι και το Bump Integrator που αναφέρεται επίσης σε ελληνικές προδιαγραφές κατασκευής έργων οδοποιίας [61].

Τα συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης έχουν όμως χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν τα στοιχεία συλλογής. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις ομαλότητας με ένα σύστημα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης επηρεάζονται από χαρακτηριστικά του οχήματος όπως είναι για παράδειγμα οι αναρτήσεις, η κατάσταση των επισώτρων και το βάρος του οχήματος. Επίσης, είναι σπάνια αναπαραγόμενες και επηρεάζονται από την ταχύτητα κίνησης. Επιπλέον, οι μετρήσεις ομαλότητας που έχουν πραγματοποιηθεί για το ίδιο οδόστρωμα με δύο διαφορετικά συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης, εν γένει, δεν είναι συγκρίσιμες. Επιπρόσθετο σημαντικό στοιχείο είναι ότι, καθώς με αυτού του

είδους τα συστήματα καταγράφεται η απόκριση του οχήματος, υπάρχει αδυναμία στο να εντοπιστούν μέσα από τη συλλεγόμενη πληροφορία οι θέσεις όπου το οδόστρωμα παρουσιάζει τοπικές ανωμαλίες.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα οδήγησαν στην ανάπτυξη των προφίλομέτρων υψηλής τεχνολογίας. Πρόκειται για συστήματα τα οποία είναι σε θέση να κινούνται σε ταχύτητες πραγματικής κυκλοφορίας χωρίς αυτό να επηρεάζει την ποιότητα και το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Αποτελούνται δε από δύο τουλάχιστον αισθητήρες (συνήθως lasers) - στηριζόμενους σε δοκό που τοποθετείται στο μπροστινό ή πίσω μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος- επιταχυνσιόμετρο, οδομετρητή, ενσωματωμένο αποθηκευτικό-υπολογιστικό σύστημα (H/Y) και κατάλληλα λογισμικά (softwares) ανάλυσης. Οι αισθητήρες καταγράφουν την κατακόρυφη απόσταση της δοκού από την επιφάνεια του οδοστρώματος σε σχέση με το θεωρητικό επίπεδο αναφοράς κίνησης του οχήματος. Τα δεδομένα που συλλέγονται αντανakλούν την κατατομή (profile) της επιφάνειας του οδοστρώματος και επεξεργάζονται με τα κατάλληλα λογισμικά έτσι ώστε να εκφράσουν μέσω αντιπροσωπευτικών δεικτών την ομαλότητα.

Οι προφίλογράφοι αποτελούνται από άκαμπτη δοκό ή πλαίσιο το οποίο υποστηρίζεται από τροχούς τοποθετημένους κατά μήκος. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην καταγραφή των αποκλίσεων της κίνησης του κεντρικού τροχού σε σχέση με κατάλληλα επιλεγμένο σημείο αναφοράς. Σύρονται ή ρυμουλκούνται με μικρές ταχύτητες κατά μήκος της επιφάνειας του εκάστοτε οδοστρώματος, ενώ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ομαλότητας δειγματοληπτικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής νέων οδοστρωμάτων ή επιστρώσεων.

Τελευταία, κατά την κατασκευή νέων στρώσεων οδοστρώματος χρησιμοποιούνται και προφίλομετρα ελαφρού τύπου (Lightweight profilers) [59]. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή των υψηλών ταχυτήτων προφίλομέτρων, με τη διαφορά ότι το σύστημα καταγραφής της ομαλότητας είναι ενσωματωμένο σε ένα ελαφρύ/μικρό όχημα.

Πέρα όμως από τις αυτοματοποιημένες συσκευές και συστήματα καταγραφής υπάρχουν και οι χειρωνακτικές μέθοδοι/συσκευές αποτύπωσης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων. Αυτές συνοψίζονται σε τρεις κατηγορίες: στην τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων (rod and level method), στην συσκευή Dipstick και στη συσκευή Walking Profiler [18].

Η τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με την πυκνότητα των απαιτούμενων σημείων αποτύπωσης, είναι αναμφίβολα η πιο ακριβής μέθοδος καταγραφής της γεωμετρικής μορφής της επιφάνειας του οδοστρώματος, με ότι

όμως αυτό συνεπάγεται όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο αλλά και ανθρώπινο δυναμικό. Ανάλογα είναι και τα μειονεκτήματα της συσκευής Dipstick, ενώ η συσκευή Walking Profiler παρέχει κάποια μικρά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα προηγούμενα καθώς απαιτείται ένας χειριστής και η κίνηση γίνεται με ταχύτητα βαδίσματος.

Όπως είναι αναμενόμενο, η ύπαρξη διάφορων συσκευών για την καταγραφή/μέτρηση και αξιολόγηση της ομαλότητας νέων αλλά και εν λειτουργία οδοστρωμάτων, αποτελεί αντικείμενο προβληματισμού όσον αφορά στην επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου/συσκευής. Το οδικό πείραμα της PIARC [57], αλλά και το FILTER Experiment της FEHRL [62] έδωσαν σημαντικά αποτελέσματα όσον αφορά στον εναρμονισμό (harmonization) των συσκευών/συστημάτων μέτρησης των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων, με στόχο τον συσχετισμό των μεθόδων αξιολόγησης της ομαλότητας.

Σε κάθε περίπτωση όμως, η ύπαρξη αυτοματοποιημένων συστημάτων για τη συλλογή δεδομένων οδοστρώματος αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη συγκρότηση μιας τράπεζας στοιχείων, η οποία υποστηρίζει ένα Σύστημα Διαχείρισης των Οδοστρωμάτων, όπως αυτό προτάσσεται μέσα από τις ανάγκες λειτουργίας επιμέρους οδικών τμημάτων, οδικών δικτύων ή ακόμη και αεροδρομίων. Το υψηλής ταχύτητα προφιλόμετρο Laser Profiler, με συνεπικουρία του Walking Profiler -συστήματα με τα οποία έχει εξοπλιστεί το εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ- δίνουν τη δυνατότητα άμεσης καταγραφής της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Η δυνατότητα συλλογής στοιχείων με τα υπόψη συστήματα αξιοποιείται στο πλαίσιο εκπόνησης του παρόντος πονήματος με στόχο τη συμβολή στη διερεύνηση για την ανάπτυξη θεμάτων που αφορούν στην αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων.

2.4 Δείκτες - μέτρα έκφρασης της ομαλότητας

Για την αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων, όπως αυτή καταγράφεται σύμφωνα με τα παραπάνω, απαραίτητη είναι η έκφρασή της μέσω ενός αντιπροσωπευτικού δείκτη. Τρεις είναι κυρίως οι πιο καθιερωμένοι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την έκφραση της ομαλότητας:

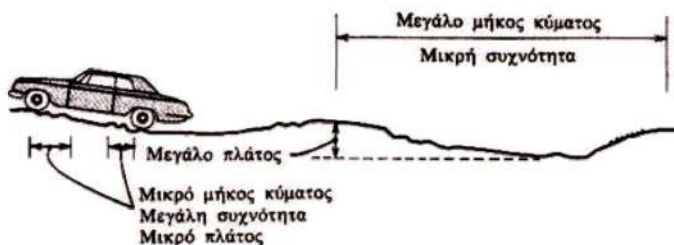
- Ride Number (RN)
- Profile Index (PI) και
- International Roughness Index (IRI)

Ο RN είναι ένας στατιστικός δείκτης που αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [48]. Το 1995 στο Πανεπιστήμιο του Michigan αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη έκδοση του δείκτη [31], ο οποίος κατ' ουσία είναι μια παράμετρος που είναι στενά συνδεδεμένη με την αξιολόγηση ενός οδικού τμήματος από τους ίδιους τους χρήστες.

Ο PI υπολογίζεται με χρήση κατάλληλων λογισμικών από τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται με τον προφίλογράφο ή με αναλόγου τύπου μεθόδους και χρησιμοποιείται για την αποδοχή ή όχι της ομαλότητας νέων οδοστρωμάτων. Δεν μπορεί να αποτελέσει όμως ιστορικό στοιχείο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της επιφανειακής κατάστασης των οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο λειτουργίας ενός Συστήματος Διαχείρισης των Οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση της Οδικής Υποδομής.

Το πρόβλημα αυτό έρχεται να επιλύσει ο δείκτης IRI ή διαφορετικά ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας. Ο δείκτης IRI, λόγω του υπολογιστικού μοντέλου που τον υποστηρίζει, εκφράζει την ομαλότητα του εκάστοτε οδοστρώματος εξασφαλίζοντας την δυνατότητα σύγκρισης των μετρήσεων από διαφορετικές συσκευές αλλά και σε διαφορετικές χρονικές φάσεις λειτουργίας ενός οδοστρώματος [31].

Βέβαια το φυσικό μέγεθος που αντιλαμβάνονται οι χρήστες μιας οδού είναι οι κυματισμοί της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, τα χαρακτηριστικά των οποίων (μήκος και πλάτος) καθορίζουν το εάν και κατά πόσο «ομαλό» είναι ένα οδόστρωμα (σχήμα 2.8). Έχουν δε άμεση σχέση με τους κραδασμούς που υφίσταται το όχημα, επηρεάζοντας έτσι την προσφερόμενη προς τους χρήστες ποιότητα κύλισης, την επιβολή των φορτίων στο οδόστρωμα και την κατανάλωση ενέργειας (καυσίμων).



Σχήμα 2.8: Περιγραφή της ομαλότητας μέσω των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος [1]

Η εισαγωγή της Δυναμικής Φασματικής Πυκνότητας (Power Spectral Density: PSD) για την ανάλυση, ή διαφορετικά η PSD ανάλυση, των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων έχει αποτελέσει ιδιαίτερο αντικείμενο έρευνας [63, 64, 65]. Η PSD ανάλυση,

έχει αξιοποιηθεί και στη διερεύνηση για το συσχετισμό των μηκών κύματος με τη γνωμάτευση των χρηστών για την προσφερόμενη προς αυτούς ποιότητα κύλισης, έτσι όπως αυτή εκφράζεται με τον δείκτη υποκειμενικής αξιολόγησης της ομαλότητας Mean Panel Rating (MPR) [66]. Οι βασικές αρχές της PSD ανάλυσης αναπτύσσονται στο επόμενο κεφάλαιο.

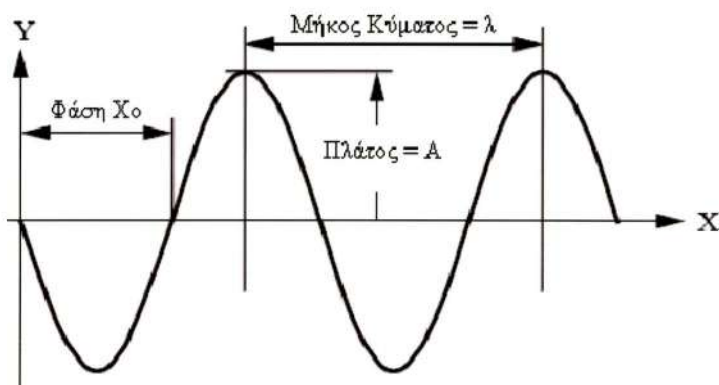
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ

3.1 Κυματισμοί επίδρασης στην ομαλότητα των οδοστρωμάτων

Οι κυματισμοί της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι το φυσικό μέγεθος που εκφράζει την ομαλότητα. Θεωρείται δε ότι οι κυματισμοί που ενδιαφέρουν είναι ημιτονοειδούς μορφής (σχήμα 3.1) [31] και η εξίσωσή τους δίνεται από τη σχέση:

$$Y = A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda}(X - X_0)\right) \quad (3.1)$$

όπου A το πλάτος του κυματισμού, λ το μήκος του και X_0 η φάση του.



Σχήμα 3.1: Ημιτονοειδής κυματισμός [31]

Η τιμή της μέγιστης κλίσης (S) των κυματισμών αυτών προκύπτει από τη παράγωγο της παραπάνω εξίσωσης κύματος για $X_0 = 0$ και είναι:

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot A}{\lambda} \quad (3.2)$$

όπου A το πλάτος του κυματισμού και λ το μήκος κύματος (σχήμα 3.1)

Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι κυματισμοί με διαφορετικό μήκος και πλάτος μπορεί να έχουν ίδια κλίση, η τιμή της οποίας έχει βασικό ρόλο στον υπολογισμό της ομαλότητας [40].

Η ομαλότητα σχετίζεται με τα στοιχεία της διαμήκου κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, με μήκη κύματος μεγαλύτερα από το αποτύπωμα του ελαστικού του οχήματος. Οι κυματισμοί αυτοί προκαλούν την κατακόρυφη κίνηση του οχήματος και ως συνέπεια την αναπήδηση των επιβατών στα καθίσματα τους [59].

Στον υπολογισμό των διαφόρων δεικτών ομαλότητας υπεισέρχονται σε κάποιο βαθμό και ανωμαλίες της επιφάνειας οι οποίες στη πραγματικότητα δεν έχουν σχέση με το φαινόμενο που ορίζεται ως ομαλότητα και δεν περιγράφονται από τη παραπάνω εξίσωση. Τέτοιες ανωμαλίες μπορεί να είναι ρωγμές ή διαβρώσεις (λακκούβες) λόγω φθοράς ή ακόμα και εμπόδια όπως πέτρες. Όλα αυτά όμως καταγράφονται από τα συστήματα μέτρησης οπότε και λαμβάνονται, σε κάποιο βαθμό, υπόψη στον υπολογισμό των δεικτών.

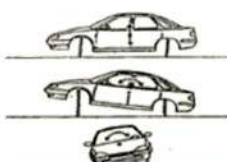
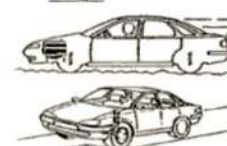
Σημαντικό ρόλο για την καταγραφή των κυματισμών και την εύρεση των αιτίων έλλειψης ομαλότητας σε ένα οδόστρωμα είναι το διάστημα λήψης μετρήσεων. Για να γίνει αντιληπτός ένας ημιτονοειδής κυματισμός μέσω ενός ψηφιακού σήματος θα πρέπει το διάστημα αυτό να μην υπερβαίνει το μισό του μήκους του μικρότερου κυματισμού που μελετάται [67]. Εκτός από το μήκος των κυματισμών σημαντικό ρόλο παίζει και το πλάτος τους. Κυματισμός μεγάλου μήκους με μικρό πλάτος δεν έχει το ίδιο δυσάρεστο αντίκτυπο στο χρήστη όσο ένας μικρότερου μήκους κυματισμός με το ίδιο πλάτος.

Οι κυματισμοί που συνοψίζουν την ομαλότητα της επιφάνειας των οδοστρωμάτων είναι το φυσικό μέγεθος που αντιλαμβάνονται οι χρήστες. Ως κυματισμοί ομαλότητας έχουν οριστεί οι κυματισμοί με μήκος από 0,5 έως 50 μέτρα. Σε αυτό το εύρος μήκους κυματισμών, διαχωρίζονται τρεις ομάδες με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [57]:

- Μικρού μήκους κυματισμοί: 0,78125 – 3,125 μέτρα
- Μεσαίου μήκους κυματισμοί: 3,125 – 12,5 μέτρα
- Μεγάλου μήκους κυματισμοί: 12,5 – 50,0 μέτρα

Οι μικρού μήκους κυματισμοί επιδρούν τόσο στη διέγερση των ελαστικών και την μεταφορά δονητικών δυνάμεων από τον στύλο του τιμονιού, όσο και στην ανάπτυξη δυναμικών δυνάμεων στους τροχούς ενός οχήματος. Η δημιουργία τους οφείλεται κυρίως στον τρόπο διάστρωσης και συμπύκνωσης του αντιολισθηρού τάπητα. Οι μεσαίου μήκους κυματισμοί επιδρούν στην ανάπτυξη κάθετων δυνάμεων στις θέσεις του οδηγού και των επιβατών. Η

δημιουργία τους οφείλεται κυρίως στον τρόπο διάσπρωσης και συμπίκνωσης των ενδιάμεσων στρώσεων του οδοστρώματος. Τέλος, οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί επιδρούν στη συνολική κίνηση του οχήματος και η δημιουργία τους οφείλεται κυρίως στις αρχικές ανομοιομορφίες της στρώσης έδρασης των οδοστρωμάτων (Σχήμα 3.2).

	Κίνηση του οχήματος σε χαμηλές συχνότητες	Επίδραση των μεγάλου μήκους κυματισμών
	Κάθετες δυνάμεις στις θέσεις οδηγού και επιβατών	Επίδραση των μεσαίου μήκους κυματισμών
	Διέγερση των ελαστικών - Δονήσεις μεταφορόμενες από τον στέλο του τιμονιού του οχήματος	Επίδραση των μικρού μήκους κυματισμών
	Δυναμικές δυνάμεις στους στροχούς του οχήματος	

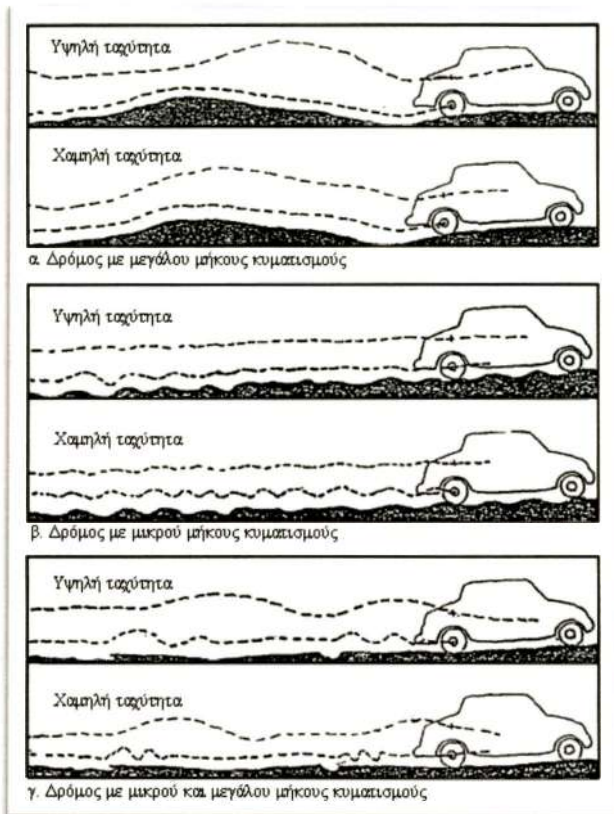
Σχήμα 3.2: Επίδραση των επιμέρους ομάδων κυματισμών στις δυναμικές και δονητικές δυνάμεις που δέχεται το όχημα και οι επιβάτες [60]

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογα με το είδος των κυματισμών που προκαλούν τις ανωμαλίες στο οδόστρωμα, ο επιβάτης και ο άξονας του οχήματος αντιδρούν διαφορετικά (Σχήμα 3.3).

Η συχνότητα των κυματισμών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = \frac{V}{\lambda} = V \cdot v \quad (3.3)$$

όπου f η συχνότητα σε μονάδες cycle/sec, V η ταχύτητα κίνησης (m/sec), λ το μήκος κύματος (m/cycle) και v ο κυματικός αριθμός ($1/\lambda$) (cycle/m).



Σχήμα 3.3: Αντίδραση άξονα και σώματος οχήματος στους διάφορους κυματισμούς [35]

Οι κυματισμοί του οδοστρώματος, που αντιστοιχούν στις συχνότητες οι οποίες θεωρούνται σημαντικές για τον επιβάτη και το όχημα, προκαλούν κατακόρυφη επιτάχυνση η οποία τελικά είναι αυτή που προκαλεί τη δυσφορία που νιώθουν οι επιβάτες. Μάλιστα ο επιβάτης του οχήματος είναι ευαίσθητος σε μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων όταν οι τιμές επιτάχυνσης μικραίνουν [35]. Η επιτάχυνση του οχήματος επηρεάζεται από το μήκος και το πλάτος του κυματισμού και την ταχύτητα κίνησης. Η σχέση υπολογισμού της είναι ημιτονοειδής και είναι της μορφής:

$$a = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin \omega t \quad (3.4)$$

όπου a η επιτάχυνση, A το πλάτος του κυματισμού και ω η κυκλική συχνότητα:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{\lambda} \quad (3.5)$$

Με βάση τα παραπάνω η μέγιστη επιτάχυνση που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$a_{\max} = \omega^2 \cdot A \quad (3.6)$$

Μεγάλη τιμή του πλάτους των κυματισμών δεν σημαίνει κατ' ανάγκη και μεγάλες τιμές συχνότητας και επιτάχυνσης. Σε μεγάλου μήκους κυματισμούς με μεγάλο πλάτος κύματος η επιτάχυνση που αναπτύσσεται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι σε μικρότερου μήκους κυματισμούς με το ίδιο πλάτος.

3.2 Επεξεργασία μετρήσεων ομαλότητας

Για να είναι αξιοποιήσιμα και κατανοητά, τα στοιχεία μιας μέτρησης της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, υπόκεινται σε φιλτράρισμα. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το εκάστοτε σύστημα μέτρησης, δεν είναι σε μορφή που μπορούν να ερμηνευτούν από τον αναλυτή. Για το λόγο αυτό, πρέπει να μετασχηματιστούν με τρόπο τέτοιο ώστε να δίνουν τιμές που να ανταποκρίνονται στα πραγματικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του υπό διερεύνηση οδοστρώματος. Επίσης, το φιλτράρισμα των δεδομένων είναι απαραίτητο για την απομόνωση ενδεχόμενων παρεμβολών που μπορεί να υπάρχουν, όπως για παράδειγμα ηλεκτρονικές παρεμβολές, αν η μέτρηση έχει γίνει με αδρανειακό προφιλόμετρο τύπου λείζερ.

Γενικά, ένα φίλτρο μετατρέπει μια σειρά μετρήσεων σε μια νέα σειρά επεξεργασμένων μετρήσεων, άμεσα αξιοποιήσιμων προς περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται το φίλτρο που βασίζεται στο προσομοίωμα του «ενός τετάρτου του οχήματος», το οποίο περιγράφεται στο ακόλουθο υποκεφάλαιο. Το φίλτρο αυτό, χρησιμοποιείται, στο πλαίσιο και της παρούσας εργασίας, για την εξαγωγή του διεθνούς δείκτη ομαλότητας IRI.

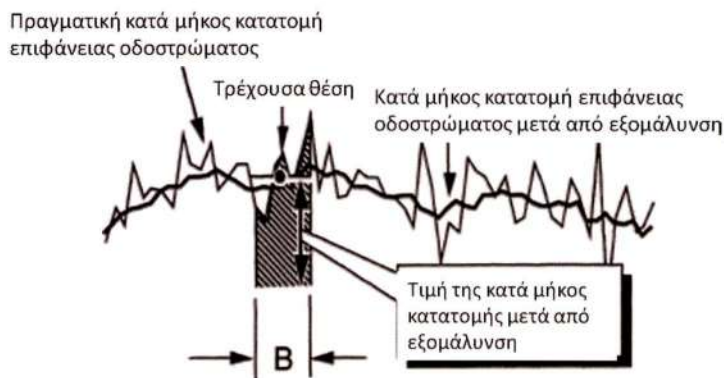
Ένα πιο απλό φίλτρο που συνήθως χρησιμοποιείται στην ανάλυση της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, είναι το φίλτρο του κινούμενου μέσου όρου (moving average filter) [67]. Το φίλτρο αυτό αντικαθιστά κάθε σημείο της κατατομής της επιφάνειας που μελετάται με τη μέση τιμή προεπιλεγμένου πλήθους τιμών εκατέρωθεν της. Με το τρόπο αυτό προκύπτει μια εικόνα εξομάλυνσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της

κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος (προφίλ). Οι νέες τιμές προκύπτουν από τη σχέση:

$$p_{jL} = \frac{1}{N} \sum_{j=i-\frac{B}{2\Delta x}}^{i+\frac{B}{2\Delta x}} p(j) \quad (3.7)$$

όπου, p_{jL} η τιμή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος μετά την εξομάλυνση, N το πλήθος των σημείων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της, Δx η απόσταση μεταξύ των σημείων i και j και B το μήκος αναφοράς.

Η επίδραση του φίλτρου του κινούμενου μέσου περιγράφεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Το φίλτρο του κινούμενου μέσου όρου [67]

Η σχέση 3.7 εκφράζει το φίλτρο εξομάλυνσης ή *χαμηλοπερατό* φίλτρο (low-pass filter) του κινούμενου μέσου όρου. Το φίλτρο αυτό επιτρέπει τη διέλευση κυματισμών μεγάλου μήκους και αποκλείει τη διέλευση κυματισμών με μήκος μικρότερο από μια τιμή, η οποία καθορίζεται από τον αναλυτή.

Υπάρχουν επίσης δύο ακόμη φίλτρα του κινούμενου μέσου: το φίλτρο «αντί – εξομάλυνσης» (anti-smoothing) ή *υψηλοπερατό* φίλτρο (high-pass filter) και το φίλτρο ζώνης (band-pass filter). Το υψηλοπερατό φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση κυματισμών μικρού μήκους και αποκλείει τη διέλευση κυματισμών με μήκος μεγαλύτερο από μια τιμή, η οποία καθορίζεται από τον αναλυτή. Το φίλτρο ζώνης επιτρέπει τη διέλευση κυματισμών ενός εύρους μήκους κύματος που ορίζεται από τον αναλυτή με μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή [67]. Το φίλτρο αυτό χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία για τη δυναμική φασματική

ανάλυση πειραματικών δεδομένων ομαλότητας, όπου το εύρος μήκους των υπό διερεύνηση κυματισμών είναι 0.5 έως 50 μέτρα [57]

Σε κάθε περίπτωση, μετά τη χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης προκύπτουν νέες τιμές πλάτους των κυματισμών. Ο λόγος των τιμών αυτών προς το αρχικό πλάτος των κυματισμών δίνει το *συντελεστή ενίσχυσης (Gain)* των κυματισμών. Από τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης προκύπτει και η βαρύτητα του κάθε κυματισμού στον υπολογισμό και την αξιολόγηση της ομαλότητας του οδοστρώματος [31].

3.3 Διεθνής δείκτης ομαλότητας (IRI)

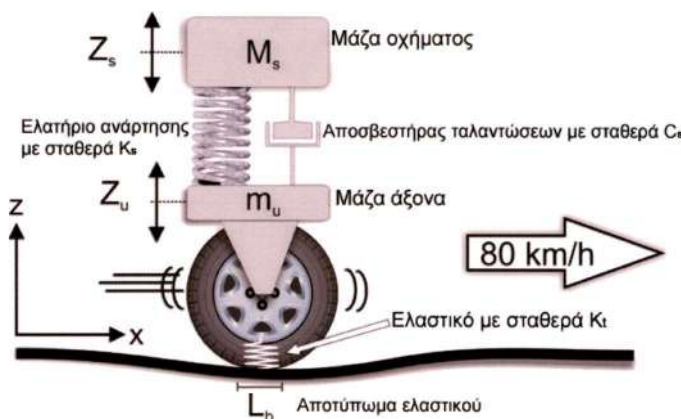
3.3.1 Ορισμός

Ο *διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI* (International Roughness Index) είναι ένας διαδεδομένος και ευρύτατα αποδεκτός δείκτης ομαλότητας. Καθιερώθηκε από τη Διεθνή Τράπεζα (World Bank) στο πλαίσιο του *διεθνούς οδικού πειράματος ομαλότητας IRRE* (International Road Roughness Experiment) που πραγματοποιήθηκε στη Βραζιλία το 1982 [55]. Σκοπός του πειράματος αυτού ήταν η καθιέρωση προδιαγραφών ενιαίας βαθμονόμησης και συμβατότητας μεταξύ των διαφόρων μετρήσεων ομαλότητας οδοστρωμάτων. Στο πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ομαλότητας με όλους τους τότε γνωστούς τύπους συστημάτων μέτρησης. Οι αναλύσεις των μετρήσεων έδειξαν ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των συστημάτων, ενώ η ανάγκη αναγωγής των αποτελεσμάτων μέτρησης σε μια κοινή κλίμακα οδήγησε στην ανάπτυξη του δείκτη IRI.

Η ανάπτυξη του IRI βασίζεται στο προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος («quarter car model»). Πρόκειται για ένα προσομοίωμα το οποίο αποτελείται από έναν τροχό, το πλαίσιο στήριξης του αμαξώματος στον τροχό, το ελατήριο ανάρτησης (suspension spring) και τον αποσβεστήρα ταλαντώσεων (damper), ενώ κινείται με σταθερή ταχύτητα 80 km/h. (σχήμα 3.5). Αναλυτικότερα, το προσομοίωμα που χρησιμοποιείται αποτελείται από [68]:

- τη μάζα του οχήματος (Sprung mass) (M_s) η οποία είναι η μάζα του τμήματος του οχήματος που επιβαρύνει την ανάρτηση και συμπεριλαμβάνει ποσοστά του βάρους των τμημάτων της ανάρτησης.
- τη μάζα του άξονα (Unsprung mass) (m_u), η οποία αφορά στη μάζα του τμήματος του οχήματος που αντιστοιχεί στο βάρος που δεν επιβαρύνει το σύστημα της ανάρτησης, αλλά υποστηρίζεται από τον τροχό ή το ελαστικό και ακολουθεί τις μετακινήσεις του.

- το ελατήριο της ανάρτησης με σταθερά K_s ,
- τον αποσβεστήρα ταλαντώσεων με σταθερά C_s
- το ελαστικό, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται κι αυτό σαν ελατήριο, με σταθερά K_t .



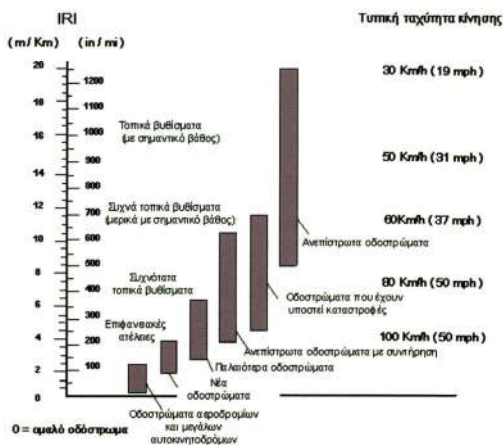
Σχήμα 3.5: Προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος για τον υπολογισμό του IRI [31]

Οι τιμές των επιμέρους στοιχείων λειτουργίας του προσομοιώματος είναι καθορισμένες (πίνακας 3.1) και έχουν χαρακτηριστεί ως παράμετροι του «χρυσού οχήματος» («Golden car») [69].

Πίνακας 3.1: Παράμετροι «χρυσού οχήματος»

V (m/km)	k_s/m_s (s^{-2})	K_t/m_s (s^{-2})	C_s/m_s (s^{-1})	m_u/M_s
80	63.3	653	6	0.15

Ο δείκτης IRI είναι δυνατό να υπολογιστεί με τη χρήση πολλών, διαφορετικού τύπου, οργάνων μέτρησης και συστημάτων οχημάτων απόκρισης. Βέβαια, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του IRI εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία γίνονται οι μετρήσεις. Μια τιμή IRI 0, σημαίνει ότι η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι τελείως επίπεδη, ενώ μια τιμή πάνω από 8, σημαίνει ότι το οδόστρωμα είναι πρακτικά αδιάβατο. Το σχήμα 3.6 δίνει το εύρος διακύμανσης των τιμών IRI ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος και την ταχύτητα κυκλοφορίας [31].



Σχήμα 3.6: Εύρος τιμών IRI [31]

Σημειώνεται ότι, κατά τον καθορισμό της σταθερής ταχύτητας των 80 km/h αγνοήθηκε το γεγονός ότι στην πραγματικότητα τα οχήματα κινούνται με διάφορες ταχύτητες, ανάλογα και με την κατηγορία της οδού. Όμως, η επιλογή της σταθερής ταχύτητας, κατ' ουσία είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των μηχανικών και των φυσικών που ασχολούνται με τη συμπεριφορά του κινούμενου οχήματος [68]. Ο συμβιβασμός αυτός αποτελεί και έναν περιορισμό, όσον αφορά στην αντιπροσωπευτικότητα του διεθνούς δείκτη IRI, για την αξιολόγηση της ομαλότητας, καθώς η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων δεν είναι σταθερή.

Επίσης, ο δείκτης IRI, λόγω των παραμέτρων υπολογισμού του με το προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος (πίνακας 3.1) αντανάκλα την συμπεριφορά ενός μέσου τυπικού οχήματος. Κατά συνέπεια δεν έχει την ικανότητα να περιγράψει την απόκριση βαρέων οχημάτων π.χ. φορτηγών. Επιπλέον, λόγω του φίλτρου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του (προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος), ενισχύεται η βαρύτητα συγκεκριμένου εύρους μήκους κυματισμών (1.2 έως 30 μέτρα), γεγονός που αποδυναμώνει τη συμμετοχή των λοιπών κυματισμών στα αποτελέσματα αξιολόγησης της ομαλότητας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος.

Παρά ταύτα, ο δείκτης IRI κρίνεται ως ένα αντιπροσωπευτικό μέτρο της ομαλότητας, καθώς τη συσχετίζει με το γενικό κόστος λειτουργίας του οχήματος, την ποιότητα κύλισης, τα δυναμικά φορτία και με τη γενική κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δε θεωρείται σκόπιμη η ανεύρεση κάποιου άλλου, καταλληλότερου δείκτη ομαλότητας προς αντικατάσταση του IRI. Εξάλλου, αξίζει να τονισθεί ότι, στην υπό ανάπτυξη, νέα εξελιγμένη μέθοδο του AASHTO, για τη

διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, απαιτείται ως δεδομένο η αρχική θεωρητική τιμή της ομαλότητας υπό την έννοια του δείκτη IRI [9]. Έτσι, στην παρούσα εργασία, επιδιώκεται η ενίσχυση του δείκτη IRI, ως προς τα αποτελέσματα αξιολόγησης της ομαλότητας, μέσω μιας διαδικασίας, όπου θα συνυπολογίζονται τα αποτελέσματα της δυναμικής φασματικής ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, με απώτερο στόχο τη διαχείριση της συντήρησής του ή ακόμη και τη βελτιστοποίηση της αρχικής κατασκευής τους.

3.3.2 Υπολογισμός του δείκτη IRI

Κατά τη θεωρητική πορεία του προσομοιώματος του ενός τετάρτου του οχήματος πάνω στο οδόστρωμα, πραγματοποιούνται μέσω του ελατηρίου ανάρτησης όλες οι κατακόρυφες μετακινήσεις, καθώς αποσβένονται κατά το μέγιστο δυνατό οι ταλαντώσεις της κατακόρυφης κίνησης. Οι κραδασμοί τελικά που υφίσταται το όχημα κατά τη κίνηση του στο οδόστρωμα -συνυπολογίζοντας τη λειτουργία των μηχανικών χαρακτηριστικών του οχήματος- μεταφράζονται σε μεταβλητές οι οποίες ενεργοποιούν κατάλληλες μαθηματικές εξισώσεις (αλγόριθμος) για τον υπολογισμό του δείκτη IRI.

Έτσι όταν για την μέτρηση της ομαλότητας χρησιμοποιείται μια συσκευή με την οποία αποτυπώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος -ή διαφορετικά, το προφίλ (κατατομή) της επιφάνειας κίνησης του οχήματος- αυτά με την ενεργοποίηση και λειτουργία του προαναφερόμενου προσομοιώματος προσδιορίζουν τον δείκτη ομαλότητας IRI. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι βασικές αρχές είναι:

- Ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI υπολογίζεται για μια κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Το διάστημα λήψης μετρήσεων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 300mm.
- Η κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος θεωρείται ότι έχει συνεχή κλίση μεταξύ των υψομετρικών σημείων που λήφθηκαν κατά τη διαδικασία της δειγματομέτρησης.
- Κατά την επεξεργασία των στοιχείων η μετρούμενη κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος εξομαλύνεται με τη χρήση της μεθόδου του κινούμενου μέσου όρου (moving average) με μήκος αναφοράς (base length) 250mm.
- Το εξομαλυμένο, πλέον, προφίλ φιλτράρεται με τη προσομοίωση του ενός τετάρτου του οχήματος με τις συγκεκριμένες παραμέτρους του Χρυσού Οχήματος, στη ταχύτητα των 80km/h.

Το IRI όμως έχει μονάδες κλίσης (m/Km), γεγονός που κάνει το «βήμα» (μήκος δείγματος) καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας του οδοστρώματος, παράμετρο επιρροής για τον προσδιορισμό του. Οι αναλυτικές όμως εξισώσεις υπολογισμού του IRI αναπτύχθηκαν και ελέγχθηκαν με τρόπο έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν την επιρροή τέτοιου είδους παραμέτρων. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να περιγραφούν από τον πίνακα της μορφής :

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot h_{ps} \quad (3.7)$$

με

$$x = [z_s, \dot{z}_s, z_u, \dot{z}_u]^T \quad (3.8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$B = \left[0, 0, 0, \frac{k_1}{\mu} \right]^T \quad (3.10)$$

όπου,

h_{ps} , η απόκλιση της κατατομής του οδοστρώματος κατόπιν εξομάλυνσης,

z_s , η κατακόρυφη συντεταγμένη της μάζας του οχήματος (sprung mass)

z_u , η κατακόρυφη συντεταγμένη της μάζας του άξονα (unsprung mass) και

x , πίνακας των συντεταγμένων της κατακόρυφης μετατόπισης του οχήματος

$\dot{z}$, η παράγωγος της μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου

Τελικά το IRI υπολογίζεται από τη σχέση:

$$IRI = \frac{1}{l} \int_0^{l/v} |z_s - z_u| dt \quad (3.11)$$

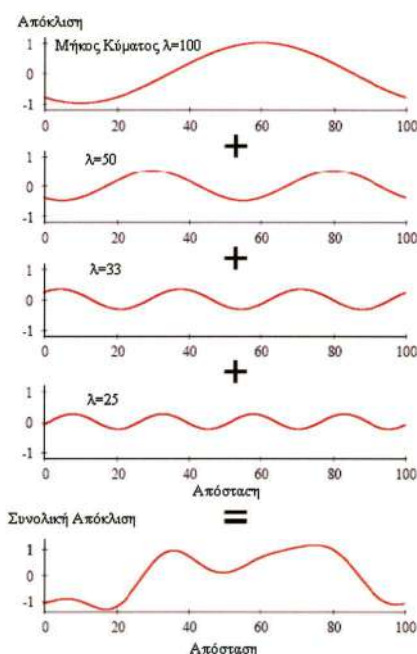
Όπου το $|IRI|$ εκφράζεται σε m/km , l είναι το μήκος του προφίλ σε km και V είναι η ταχύτητα προσομοίωσης ($80km/h$).

Τονίζεται ότι για τη διερεύνηση της ομαλότητας υπάρχουν αρκετές, διαφορετικές μεταξύ τους προσεγγίσεις. Η εξέταση του δείκτη IRI βασίζεται μόνο στη μελέτη εκείνων των περιοχών κυμάτων που εμφανίζουν υψηλή επίδραση στην προσομοίωση του απλού τροχού. Το πραγματικό όμως προφίλ (κατά μήκος κατατομή) της επιφάνειας ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει ένα ευρύτερο φάσμα μηκών κύματος.

3.4 Δυναμική φασματική ανάλυση

3.4.1 Ορισμός

Η κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος δεν έχει εμφανή ομοιότητα με ημιτονοειδείς κυματισμούς. Στη πραγματικότητα αποτελείται από ένα φάσμα κυματισμών διαφόρων μηκών [70]. Είναι όμως δυνατό να κατασκευαστεί μαθηματικά προσθέτοντας διάφορους κυματισμούς (σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Μαθηματική σύνθεση των κυματισμών της επιφάνειας ενός οδοστρώματος [67]

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας, απαιτείται η χρήση πολλών κυματισμών διαφορετικού μήκους, πλάτους και φάσης. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fourier, από τη κατατομή της επιφάνειας που έχει μετρηθεί, υπολογίζονται τα πλάτη των κυματισμών τα οποία αν προστεθούν θα δώσουν τη πραγματική κατατομή της επιφάνειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται δυναμική φασματική ανάλυση (Power Spectral Density: PSD).

Κατά τη διαδικασία της εφαρμογής του μετασχηματισμού Fourier, για την κατά το μέγιστο δυνατό εξαίρεση των σφαλμάτων, από τις τιμές που προκύπτουν υπολογίζεται η μέση τιμή για προκαθορισμένο φάσμα συχνοτήτων. Η μέση τιμή που προκύπτει αντιστοιχεί στη κεντρική συχνότητα του φάσματος αυτού. Το πλήθος των κεντρικών συχνοτήτων ενός δείγματος που παρεμβάλλονται μέχρι το διπλασιασμό της τιμής της συχνότητας του δείγματος καθορίζεται από την τιμή που ορίζει τις μπάντες ανά οκτάβα (bands/octave), οι οποίες καθορίζονται από τον αναλυτή.

3.4.2 Υπολογισμός και απεικόνιση αποτελεσμάτων

Θεωρώντας ότι το προφίλ ή διαφορετικά, η κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος είναι εκ φύσεως τυχαία, η δυναμική φασματική (PSD) ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας, δίνει ένα απευθείας στατιστικό μέτρο της ομαλότητας, καθώς περιγράφει την κατανομή ενός χαρακτηριστικού των κυματισμών από τους οποίους αποτελείται το προφίλ ως συνάρτηση του μήκους κύματος ή του κυματικού αριθμού. Το χαρακτηριστικό, y , του προφίλ της επιφάνειας που αντιπροσωπεύει την ομαλότητα, είναι συνάρτηση της χωρικής απόστασης, x , κατά μήκος του οδοστρώματος. Οι εξισώσεις Fourier που ακολουθούν δείχνουν πως είναι δυνατό να υπολογιστεί και να αναπαραχθεί η κατά μήκος κατατομή του οδοστρώματος [71].

$$S_y\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_y(X) e^{-\frac{iX}{\lambda}} dX \quad (3.12)$$

$$R_y(X) = \int_{-\infty}^{\infty} S_y(X) e^{\frac{iX}{\lambda}} d\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (3.13)$$

Όπου X είναι η απόσταση μεταξύ δύο σημείων κατά μήκος του οδοστρώματος, $S_y\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ είναι η PSD ομαλότητα σε σχέση με το μήκος κύματος λ , το οποίο αντιπροσωπεύει τη χωρική συχνότητα και $R_y(X)$ είναι η χωρική εξίσωση αυτοσυσχέτισης η οποία ορίζεται ως:

$$R_y(X) = E[y(x) \cdot y(x+X)] \quad (3.14)$$

με $E[\cdot]$ να αντιπροσωπεύει την προσδοκία μιας τυχαίας διαδικασίας η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$E[y(x)] = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{1}{X} \int_0^X y(x) dx \quad (3.15)$$

Με βάση τη στοχαστική θεωρία, η ομαλότητα ως αποτέλεσμα της δυναμικής φασματικής ανάλυσης $S_y(\omega)$ και ως συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας (ή κυκλικής συχνότητας) ω , περιγράφεται ως εξής:

$$S_y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_y(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.16)$$

$$R_y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3.17)$$

Όπου t είναι το κενό χρόνου και $R_y(t)$ είναι η προσωρινή εξίσωση αυτοσυσχέτισης.

Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα όχημα κινείται κατά μήκος ενός οδοστρώματος μήκους X με σταθερή ταχύτητα V . Η σχέση μεταξύ μήκους και ταχύτητας είναι:

$$X = V \cdot t \quad (3.18)$$

Όπου t είναι ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα να διανύσει το υπό διερεύνηση τμήμα οδοστρώματος. Βάσει αυτού η σχέση 3.12 δίνει:

$$S_y\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_y(Vt) e^{-i\left(\frac{\omega}{V}\right)Vt} d(Vt) = \frac{V}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_y(t) e^{-i\omega t} d(t) = V \cdot S_y(\omega) \quad (3.19)$$

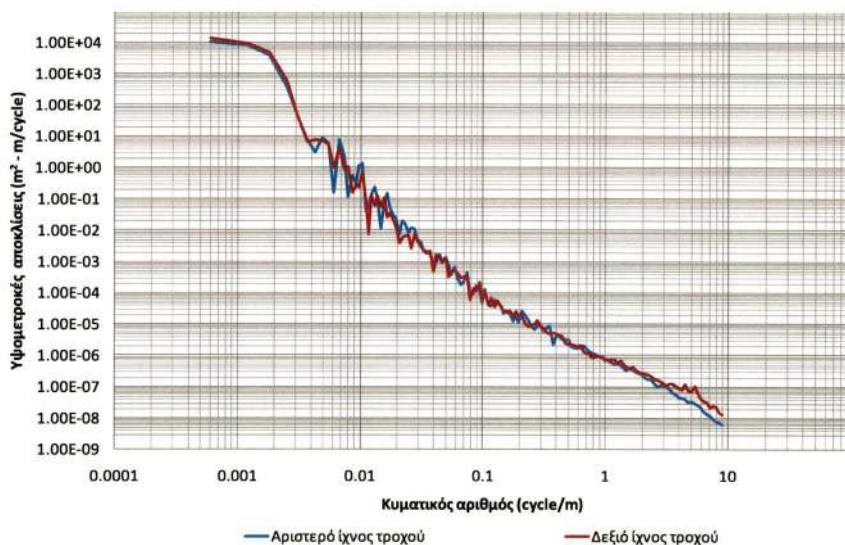
$$\text{όπου } \omega = \frac{V}{\lambda}.$$

Οι τιμές που υπολογίζονται από τη δυναμική φασματική ανάλυση PSD μπορούν να απεικονιστούν γραφικά από το διάγραμμα κατανομής των υψομετρικών αποκλίσεων από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια (PSD υψομετρικών αποκλίσεων). Το διάγραμμα αυτό, αναπαριστά τη σχέση μεταξύ του τετραγώνου του πλάτους των κυματισμών που συναποτελούν την κατατομή της επιφάνειας και του κυματικού αριθμού ή του μήκους κύματος. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται η τάση, όσο μεγαλώνει ο κυματικός αριθμός (μικραίνει το μήκος κύματος), να μειώνεται η τιμή του PSD (σχήμα 3.8). Αυτό συμβαίνει

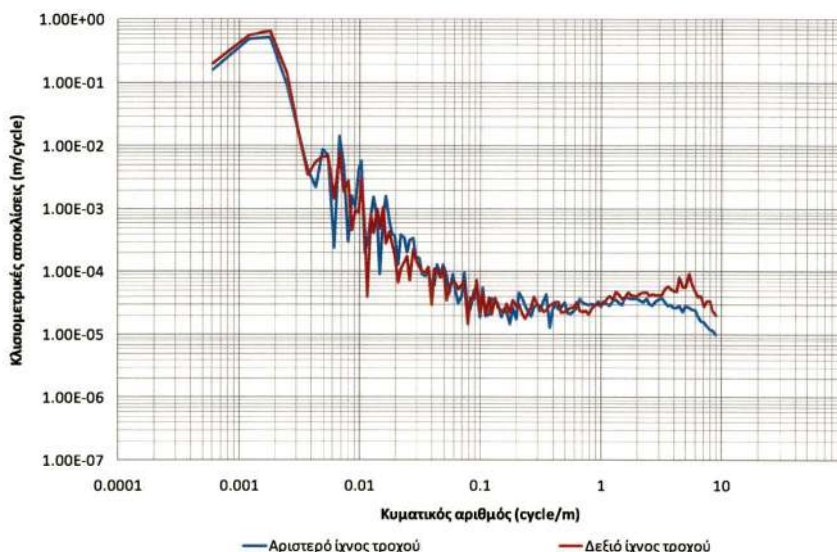
καθώς οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί που υπολογίζονται, έχουν και μεγαλύτερα πλάτη από τους κυματισμούς μικρότερου μήκους.

Γραφικά μπορεί να παρασταθεί όμως, εκτός από την υψομετρική απόκλιση και η κλισιομετρική απόκλιση (PSD κλισιομετρικών αποκλίσεων) (σχήμα 3.9). Στην περίπτωση αυτή, το μήκος κύματος παραμένει το ίδιο, αλλά οι τιμές του κατακόρυφου άξονα είναι τώρα ανάλογες του μήκους.

Το διάγραμμα των κλισιομετρικών αποκλίσεων είναι γενικά πιο ομοιογενές από το διάγραμμα των υψομετρικών αποκλίσεων. Σε σχέση με το διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων, στο διάγραμμα κλίσεων παρατηρείται ότι οι τιμές του κατακόρυφου άξονα αφορούν σε μικρότερο φάσμα τιμών και έτσι είναι πιο απλή η σύγκριση και η μελέτη των κυματισμών.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα δυναμικής φασματικής ανάλυσης υψομετρικών αποκλίσεων



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα δυναμικής φασματικής ανάλυσης κλισιομετρικών αποκλίσεων

Από το παράδειγμα των διαγραμμάτων της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, τα οποία στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν με βάση στοιχεία που συλλέχθηκαν σε τμήμα του αυτοκινητοδρόμου Αθηνών-Κορίνθου του ΠΑΘΕ (Πίνακες Π1 και Π2 του Παραρτήματος), φαίνεται η επίδραση των κυματισμών στην ομαλότητα του οδοστρώματος. Το εμβαδόν της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από τη καμπύλη του κάθε διαγράμματος δίνει τον ολικό «τετραγωνικό μέσο» των τιμών της ομαλότητας (total mean square roughness) [31]. Μια μορφή ποσοτικοποίησης της ομαλότητας ενός οδοστρώματος, μέσα από το διάγραμμα δυναμικής φασματικής ανάλυσης των υψομετρικών ή κλισιομετρικών αποκλίσεων, είναι ο δείκτης RMS (Root Mean Square) της «ενεργού τιμής» (τετραγωνικής ρίζας της μέσης τιμής των τετραγώνων). Πρόκειται για την τετραγωνική ρίζα του εμβαδού της περιοχής κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος. Με τη μέθοδο όμως αυτή στον υπολογισμό της ομαλότητας κυρίαρχο ρόλο φαίνεται να έχουν οι κυματισμοί μεγάλου μήκους (και πλάτους) και υποεκτιμάται, κατά κάποιο τρόπο, ο ρόλος των μικρότερων κυματισμών.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί, η ομαλότητα αφενός είναι βασικός παράγοντας για την άνεση, αλλά και την ασφάλεια του χρήστη μιας οδού και αφετέρου, αποτελεί μια χαρακτηριστική παράμετρο που συνδέεται κατά περίπτωση και με τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Επομένως η αξιολόγησή της είναι σημαντική τόσο σε επίπεδο έργου, όσο και σε επίπεδο δικτύου.

Σε επίπεδο δικτύου, η ομαλότητα χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό του δικτύου σε ομοειδή τμήματα, έτσι ώστε μέσω κατάλληλων κριτηρίων αποδοχής της κατάστασης ενός οδοστρώματος, να καθοριστούν οι προτεραιότητες λειτουργικής συντήρησης ή αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Ένας ποιοτικός δείκτης όπως είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI κρίνεται ως κατάλληλος για την περιγραφή και τη σύνοψη των χαρακτηριστικών ομαλότητας. Ο υπεύθυνος διαχείρισης εξάλλου του δικτύου, σε πρώτη φάση, θέλει μια γρήγορη πληροφορία σχετικά με την κατάσταση των οδοστρωμάτων, κάτι το οποίο προσφέρει ο δείκτης IRI, προκειμένου να ιεραρχήσει τις ανάγκες συντήρησης και να απορροφήσει τα διατιθέμενα κονδύλια. Σε δεύτερη φάση θα ασχοληθεί με το τεχνικό κομμάτι της συντήρησης των οδοστρωμάτων σε επίπεδο έργου/ων, σύμφωνα με τις ανάγκες διατήρησης της επιτελεστικότητας τους.

Σε επίπεδο έργου, η ομαλότητα χρησιμοποιείται με στόχο τον εντοπισμό των περιοχών όπου απαιτείται αποκατάσταση των λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος, είτε στο πλαίσιο ελέγχου της ποιότητας της κατασκευής, είτε στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων. Αν και ο δείκτης IRI εκφράζει τις αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια και αναμφίβολα αποτελεί ένα εύχρηστο μέτρο αξιολόγησης της ομαλότητας, εκ της φύσεως του ορισμού του, δεν μπορεί να δώσει εμπειριστατωμένη πληροφόρηση σχετικά με την μορφή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας ή τα αίτια για την έλλειψη ομαλότητας.

Αντίθετα, η δυναμική φασματική ή διαφορετικά, η PSD ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας του οδοστρώματος περιγράφει, μέσω της κατανομής των κλισιομετρικών ή των υψομετρικών αποκλίσεων της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος ανά μήκος κυματισμού ή κυματικού αριθμού, την ομαλότητα του οδοστρώματος. Έτσι είναι δυνατό να μελετηθεί η συμβολή των μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μήκους κυματισμών στη

διαμόρφωση της ομαλότητας αφού συνδέονται με τη διάστρωση ή την κατάσταση των επιμέρους στρώσεων.

Οι δυνατότητες που μπορεί να προσδώσει η PSD ανάλυση διερευνώνται στην παρούσα εργασία, όχι προς αντικατάσταση του δείκτη IRI, αλλά προς ενίσχυση των πληροφοριών που μπορεί να συλλέξει ο αναλυτής-μηχανικός προκειμένου να αξιολογήσει καλύτερα την ομαλότητα. Η αξιολόγηση αυτή, πέραν του ότι συμπεριλαμβάνει τον έλεγχο για τη διασφάλιση της άνεσης και της ασφάλειας του χρήστη, στοχεύει στην καλύτερη τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ομαλότητας. Έτσι πιστεύεται ότι, είναι δυνατό να ερμηνευθεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος υπό τις συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος, δίνοντας ενδεχομένως μεταξύ άλλων πληροφορίες για την ποιότητα της κατασκευής ή την αποτελεσματικότητα της εκάστοτε τεχνολογίας συντήρησης ή αποκατάστασης ενός οδοστρώματος, σε σχέση πάντα με την ομαλότητα.

Με δεδομένα τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία, επιμέρους στόχος είναι η ανάπτυξη μιας προσεγγιστικής μεθοδολογίας, όπου η αξιολόγηση της ομαλότητας, αποτελεί το μέσο για τον εντοπισμό των αιτιών ενδεχόμενης έλλειψης κατά μήκος ομαλότητας και τη συλλογή στοιχείων, έτσι ώστε να επιλεγεί ή να αξιολογηθεί ο τρόπος συντήρησης/τοπικής αποκατάστασης ενός οδοστρώματος, σε βάθος χρόνου λειτουργίας του. Στη μεθοδολογία αυτή βασικό εργαλείο αποτελεί η δυναμική φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Υπό το πρίσμα της προαναφερόμενης προσεγγιστικής μεθοδολογίας, σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν επιμέρους οδικά πειράματα, τα οποία ως κύριο αντικείμενο είχαν τη συστηματική συλλογή και ανάλυση στοιχείων ομαλότητας σε επίπεδο έργου. Η συλλογή των στοιχείων ομαλότητας πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις με το εξελεγμένο Σύστημα καταγραφής της κατά μήκος ομαλότητας (Laser Profiler) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (εικόνα 4.1).

Το σύστημα Laser Profiler ανήκει στην κατηγορία των εν κινήσει με υψηλή ταχύτητα προφίλομέτρων [72]. Έχει ως βασική μονάδα μια δοκό στην οποία είναι ενσωματωμένοι τρεις ηλεκτρονικοί αισθητήρες (lasers). Η δοκός έχει προσαρμοστεί στο πίσω μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος, έτσι ώστε οι τρεις αισθητήρες να έχουν τις εξής θέσεις: στο δεξιό τροχό, στον αριστερό τροχό και στην ενδιάμεση αυτών θέση.

Το Laser Profiler καταγράφει κάθε 50 mm κατά την κίνηση του οχήματος τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.

- Την κατακόρυφη επιτάχυνση της δοκού
- Τον χρόνο και την απόσταση που καταγράφονται οι δύο προαναφερόμενες παράμετροι.



Εικόνα 4.1: Laser Profiler του ΕΜΠ

Η μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης με τους αισθητήρες, εμπεριέχει τόσο την αποτύπωση της μορφής της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, όσο και την κατακόρυφη κίνηση της δοκού, η οποία οφείλεται σε τυχόν 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 την σχετική μετατόπιση της δοκού επί της οδού, προκύπτει η μορφή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για την αποτύπωση της ομαλότητας σε κάθε περίπτωση οδικού πειράματος. Γενικά, τα στοιχεία ομαλότητας λόγω της μεγάλης πυκνότητας συλλογής τους, είναι αδύνατο να αξιολογηθούν στην ακατέργαστη μορφή τους. Έτσι, προκειμένου τα ακατέργαστα στοιχεία ομαλότητας να μετατραπούν σε εργάσιμες πληροφορίες προς επεξεργασία και ανάλυση, χρησιμοποιούνται κατάλληλα λογισμικά, με τα οποία φιλτράρονται και προ-επεξεργάζονται (pre-processing) τα υπόψη στοιχεία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τέτοιου είδους λογισμικά [73, 74] χρησιμοποιήθηκαν, αφενός για τον υπολογισμό του δείκτη IRI και αφετέρου για τη δυναμική φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας των υπό διερεύνηση οδοστρωμάτων. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν το πρωτογενές υλικό προς επεξεργασία και ανάλυση, τόσο στο παρόν κεφάλαιο, όσο και σε ακόλουθα κεφάλαια.

Η συλλογιστική για την εκπόνηση των επιμέρους οδικών πειραμάτων, καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα της επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων ομαλότητας, αναπτύσσονται στα ακόλουθα εδάφια.

4.2 Συγκριτική αξιολόγηση οδικών τμημάτων

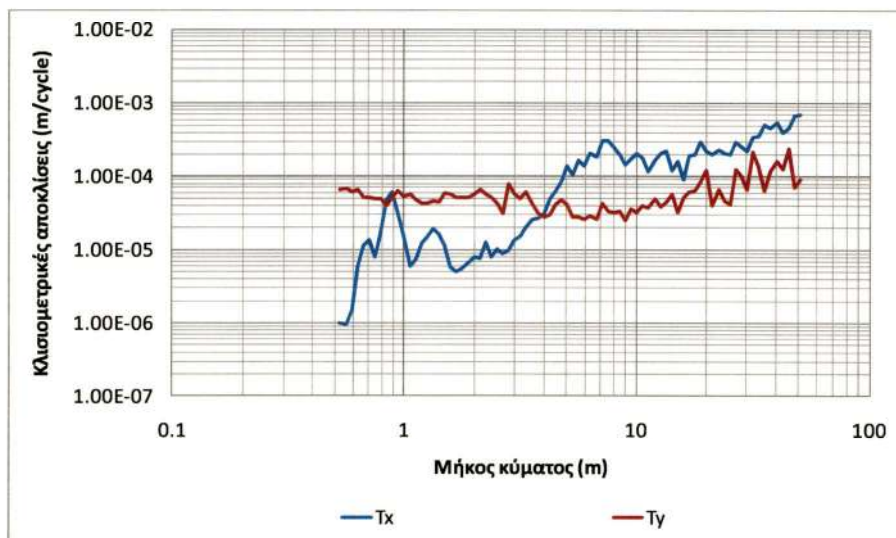
Ενώ για τον δείκτη IRI υπάρχει μια σαφής κλίμακα κατάταξης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων, δεν συμβαίνει το ίδιο με τα αποτελέσματα που δίνει η φασματική ανάλυση. Πέρα από την γενική αρχή ότι όσο χαμηλότερα είναι η φασματική γραμμή τόσο πιο ομαλή είναι η επιφάνεια ενός οδοστρώματος, δεν είναι εύκολο το φάσμα των κυματισμών της επιφάνειας να συνοψίσει τα χαρακτηριστικά ομαλότητας, παρά μόνο να τα περιγράψει. Είναι δυνατό όμως να δώσει σαφή συμπεράσματα όταν συγκρίνονται δύο ή περισσότερες επιφάνειες οδοστρώματος [75].

Με δεδομένο το παραπάνω, αναζητήθηκαν επί του οδικού άξονα Αθηνών-Λαμίας του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ τμήματα τα οποία ήταν προς συντήρηση/αποκατάσταση, με κοινό πρόβλημα ως προς τους χρήστες της οδού την έλλειψη ομαλότητας των οδοστρωμάτων. Από τα τμήματα αυτά επιλέχθηκαν δύο, της τάξης περίπου των 1000 μέτρων, τα οποία βρίσκονταν σε ευθυγραμμία της οδού και είχαν ανάλογα χαρακτηριστικά: ομοειδή επιφανειακή κατάσταση, ιδιαίτερα χαμηλή ποιότητα κύλισης, ίδια περίπτωση κυκλοφορία, κοινές συνθήκες περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι ο υπόψη οδικός άξονας λειτουργεί ήδη υπό το καθεστώς συστήματος παραχώρησης, όπου η διαχείριση της συντήρησης αποτελεί μείζον θέμα.

Στα υπόψη τμήματα καταγράφηκε η ομαλότητα της επιφάνειας των οδοστρωμάτων με το σύστημα Laser Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Έγινε επεξεργασία των στοιχείων συλλογής και υπολογίστηκε η μέση τιμή του δείκτη IRI για κάθε τμήμα. Από τα αποτελέσματα υπολογισμών αποδείχθηκε ότι τα δύο οδικά τμήματα (Τx και Ty) είχαν μη αποδεκτή ομαλότητα, καθώς υπολογίστηκε ο δείκτης IRI με τιμές 5.30 και 4.66 αντίστοιχα, κατά μήκος του δεξιού ίχνους τροχού. Αναλύοντας εν συνεχεία φασματικά την υπό διερεύνηση κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας των δύο τμημάτων για τα μήκη κύματος της ομαλότητας δηλ 0.5 έως 50 m, προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 4.1 υπό την έννοια των κλισιομετρικών αποκλίσεων των κυματισμών.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 4.1 (βλ. στοιχεία Πίνακα Π2 του Παραρτήματος), ενώ το τμήμα Τx, με βάση τις τιμές IRI, είναι όσον αφορά στην ομαλότητα, χειρότερο του τμήματος Ty, προκύπτει με βάση τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης ότι το τμήμα

Τχ παρουσιάζει σε σχέση με το τμήμα Τγ μικρότερες κλίσεις στους μικρού μήκους κυματισμούς, και μεγαλύτερες κλίσεις στους μεσαίου και μεγάλου μήκους κυματισμούς. Όμως, όπως αναφέρεται και στην πηγή [76], οι κυματισμοί μικρού μήκους σχετίζονται με τη στρώση κυκλοφορίας, οι κυματισμοί μεσαίου μήκους με τις υποκείμενες αυτής στρώσεις του οδοστρώματος και οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί με την εδαφική στρώση. Άρα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πρόβλημα ομαλότητας στο τμήμα Τχ οφείλεται σε ενδεχόμενες αστοχίες των στρώσεων βάσης από ασύνδετο υλικό και σε τυχόν υποχωρήσεις της στρώσης έδρασης, ενώ το πρόβλημα ομαλότητας στο τμήμα Τγ οφείλεται κυρίως στην ασφαλική στρώση κυκλοφορίας.



Σχήμα 4.1: Σύγκριση κυματομορφής δύο τμημάτων

Η παραπάνω διερεύνηση, ανατρέπει τα συγκριτικά αποτελέσματα ομαλότητας με βάση τον δείκτη IRI. Έτσι ενώ το τμήμα Τχ είναι, βάσει του δείκτη IRI, χειρότερο από άποψης ομαλότητας του Τγ, οι χρήστες των οδικών τμημάτων θα δυσανασχετούν περισσότερο στο τμήμα Τγ, καθώς οι κυματισμοί μικρού μήκους που έχουν σχέση με την άνεση που νιώθουν [77] είναι στο τμήμα αυτό συγκριτικά χειρότεροι.

Επίσης, η PSD ανάλυση δίνει εμπεριστατωμένη πληροφόρηση, σχετικά με την πηγή του προβλήματος. Η προσέγγιση αυτή, μεθοδολογικά, μπορεί να αξιοποιηθεί στην επιλογή της καταλληλότερης επέμβασης για την αποκατάσταση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων και κατά συνέπεια την επαναφορά ενός αποδεκτού για τους χρήστες της εκάστοτε οδού επιπέδου ποιότητας κύλισης. Έτσι, γίνεται εφικτή η αποφυγή λαθών όσον

αφορά στη συντήρηση ή αποκατάσταση ενός οδοστρώματος, αποφεύγοντας ενδεχομένως και την άσκοπη απορρόφηση πόρων. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση του πειράματος, η αποκατάσταση της ομαλότητας στο οδικό τμήμα Τx απαιτεί μια εις βάθος επέμβαση στο οδόστρωμα, ενώ για το τμήμα Ty ενδεχομένως η επέμβαση να μπορεί να περιοριστεί στην ασφαλική στρώση κυκλοφορίας, εφόσον βέβαια το επιτρέπει και η δομική κατάσταση του υπόψη οδοστρώματος.

4.3 Αξιολόγηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος σε αρχικό χρόνο λειτουργίας

Η αξιολόγηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος σε αρχικό χρόνο λειτουργίας (early life), είναι δυνατό να δώσει σημαντικές πληροφορίες, αφενός για την ποιότητα της κατασκευής και αφετέρου για τις μεταβολές επιμέρους χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν στο πλαίσιο της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του σε βάθος χρόνου λειτουργίας του. Οι πληροφορίες αυτές συνδέονται αντιστοίχως, αφενός με τη διαδικασία παραλαβής/αποδοχής ενός νέου οδοστρώματος, και αφετέρου με τη διαδικασία πρόληψης ενδεχόμενων δράσεων επέμβασης για την προστασία του οδοστρώματος κατά τον προβλεπόμενο χρόνο λειτουργίας του.

Υπάρχουν διάφορα αίτια που προκαλούν την έλλειψη ομαλότητας στην επιφάνεια ενός εν λειτουργία οδοστρώματος: η επιβολή της κυκλοφορίας, οι επιδράσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών, τα δομικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, τα «λάθη» κατά την κατασκευή. Τα «λάθη» αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα, ένα νέο οδόστρωμα να παρουσιάζει στην επιφάνεια του σχετικές αποκλίσεις από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, πριν ακόμη δοθεί στην κυκλοφορία. Εν συνεχεία, η ομαλότητα αναμένεται να υποβαθμιστεί περαιτέρω λόγω της επιβολής των φορτίων κυκλοφορίας και των συνθηκών περιβάλλοντος, παράμετροι οι οποίοι επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά ενός οδοστρώματος και κατά επέκταση, στην επιτελεστικότητα του.

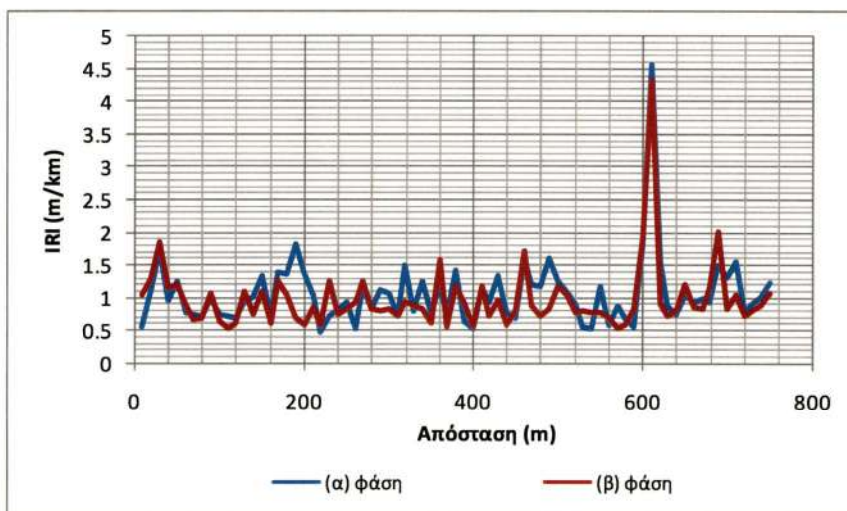
Μεθοδολογικά προτείνεται ότι, η αξιολόγηση της μεταβολής της ομαλότητας σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, είναι δυνατό να δώσει πληροφορίες όσον αφορά στη πρόβλεψη για τη συμπεριφορά του οδοστρώματος, αλλά και για τη βελτίωση της κατασκευής. Για την τεκμηρίωση αυτής της προσέγγισης, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα. Για το πείραμα επιλέχτηκε τμήμα του υψηλών προδιαγραφών αυτοκινητοδρόμου της Αττικής Οδού, περίπου 750 μέτρων, το οποίο βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Ασπρόπυργου. Εκεί, καταγράφηκε με το σύστημα

του Εργαστηρίου Οδοποιίας, στη δεξιά λωρίδα, του αριστερού κλάδου, κατά μήκος του δεξιού ίχνους τροχού. Οι μετρήσεις ομαλότητας πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις [78]:

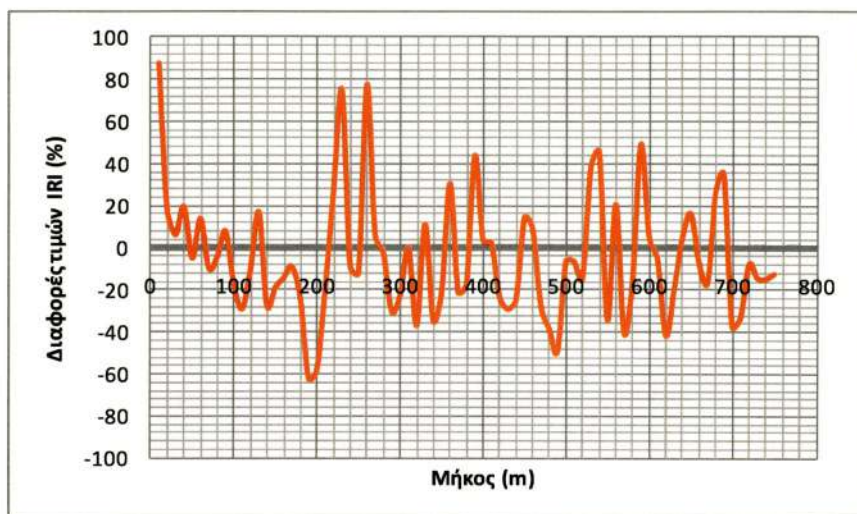
(α) μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του υπόψη οδοστρώματος και

(β) μετά τη διέλευση κυκλοφορίας δύο (2) ετών περίπου.

Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής (βλ. στοιχεία Πίνακα Π4 του Παραρτήματος) με βάση τον δείκτη IRI, ο οποίος υπολογίστηκε ανά 10 μέτρα, δεν έδειξε κάποια συστηματική μεταβολή, δηλαδή μείωση ή αύξηση του επιπέδου ομαλότητας (σχήμα 4.2). Επιπλέον, η διερεύνηση των ποσοστιαίων διαφορών των τιμών IRI για τις δύο φάσεις οδήγησε σε μεγάλες διακυμάνσεις (σχήμα 4.3). Επομένως, δεν προκύπτει μια σαφής απάντηση όσον αφορά στο ποια είναι η μεταβολή της ομαλότητας στο χρονικό διάστημα όπου μελετάται.

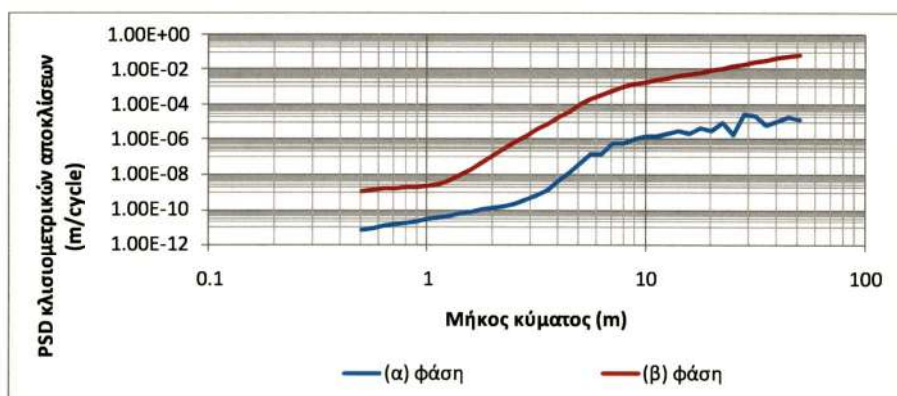


Σχήμα 4.2: Μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI

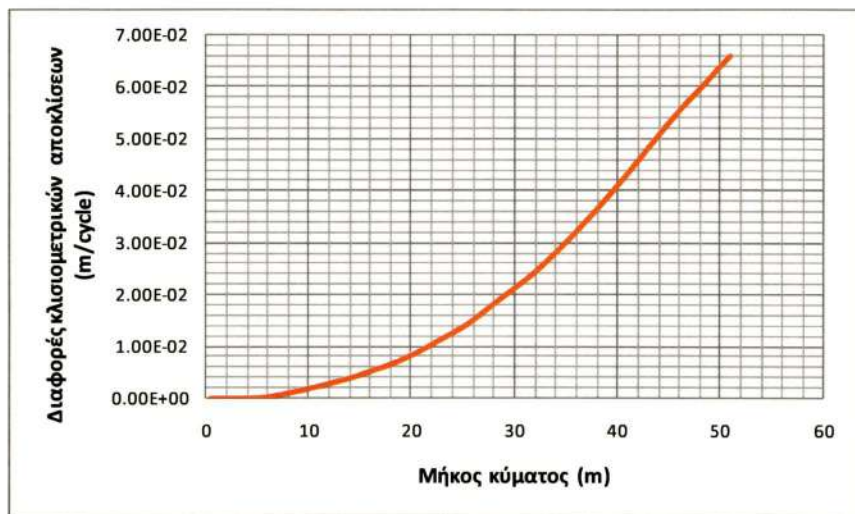


Σχήμα 4.3: Ποσοστιαίες διαφορές του δείκτη IRI

Αντίθετα, η PSD ανάλυση των κλισιομετρικών αποκλίσεων των κυματισμών που σχετίζονται με την ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος (βλ. στοιχεία Πίνακα Π5 του Παραρτήματος), δηλ. αυτών που το μήκος κύματος κυμαίνεται από 0.5 έως 50 μέτρα, απέδειξε την αύξηση των κλίσεων των κυματισμών και κατά συνέπεια την υποβάθμιση του επιπέδου ομαλότητας (σχήμα 4.4). Επιπλέον, για να αξιολογηθεί περαιτέρω η προαναφερόμενη «υποβάθμιση», αναλύονται και διερευνώνται οι διαφορές των κλισιομετρικών αποκλίσεων ανά μήκος κύματος, έτσι όπως αυτές προκύπτουν από τη PSD ανάλυση. Το σχήμα 4.5 απεικονίζει γραφικά τις διαφορές αυτές.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας βάσει της PSD ανάλυσης



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση των μεταβολών των PSD κλισιομετρικών μεταξύ των φάσεων (α) και (β)

Όπως προκύπτει από το σχήμα 4.5, οι διαφορές των κλισιομετρικών αποκλίσεων μεταξύ των δύο φάσεων, αν και γενικά είναι μικρές, αυξάνουν με την αύξηση του μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, ενώ για τις περιοχές των μικρού και μεσαίου μήκους κυματισμών -δηλ. από 0,78125 έως 3,125 και 3,125 έως 12,5 μέτρα αντίστοιχα- οι διαφορές είναι σχεδόν αμελητέες, στην περιοχή των μεγάλου μήκους κυματισμών (12,5 έως 50 μέτρα) οι υπό διερεύνηση διαφορές αυξάνονται βαθμιαία.

Όμως, όπως αναφέρεται στην πηγή [76], οι κυματισμοί μικρού μήκους σχετίζονται με τη στρώση κυκλοφορίας, οι κυματισμοί μεσαίου μήκους με τις υποκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος και τέλος, οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί με την εδαφική στρώση. Επομένως, βάσει των φαινομενολογικών αποτελεσμάτων του σχήματος 4.4, μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι, τόσο η στρώση κυκλοφορίας, όσο και οι υποκείμενες αυτής στρώσεις του υπό διερεύνηση οδοστρώματος, παρουσιάζουν μια σταθερή συμπεριφορά έναντι της επιβολής της κυκλοφορίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών, σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Η διαπίστωση αυτή, αποτελεί ένα κρίσιμο υποστηρικτικό στοιχείο της άποψης ότι δεν αναμένεται οι υπόψη στρώσεις να παρουσιάσουν απρόβλεπτη συμπεριφορά.

Οι μεταβολές όμως των κλισιομετρικών αποκλίσεων στους μεγάλου μήκους κυματισμούς, οδηγούν στο ενδεχόμενο σταδιακών υποχωρήσεων μικρής κλίμακας της εδαφικής στρώσης. Οι υποχωρήσεις της εδαφικής στρώσης –οι οποίες εν δυνάμει είναι δυνατό να οδηγήσουν σε καθιζήσεις της ευρύτερης οδικής υποδομής [79]- αθροίζόμενες στο χρόνο,

είναι δυνατό να προκαλέσουν υποχωρήσεις και στις υπερκείμενες αυτής στρώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους αθροιζόμενες θα εμφανιστούν ως παραμορφώσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Σε μια τέτοια περίπτωση, αφενός υποβαθμίζεται το επίπεδο ομαλότητας και αφετέρου διαταράσσεται η δομική κατάσταση του υπό διερεύνηση οδοστρώματος, κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στο πλαίσιο της διαχείρισης της συντήρησης του υπό διερεύνηση οδοστρώματος.

Τα παραπάνω στοιχεία και γενικώς, τα αποτελέσματα αξιολόγησης της εξέλιξης της ομαλότητας βάσει της PSD ανάλυσης, μεθοδολογικά φαίνεται ότι, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα κατά την προσέγγιση πρόβλεψης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, για την πρόληψη απαιτούμενων δράσεων/ενεργειών επέμβασης σε αυτά. Πέραν τούτου όμως, η παραπάνω διερεύνηση δίνει έμφαση στο γεγονός ότι, η μονοσήμαντη αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων βάσει του ποιοτικού δείκτη IRI, είναι δυνατό να αποδώσει τη γενική κατάσταση της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, μπορεί όμως και να «συγκαλύψει» πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών της επιφάνειάς του. Οι πληροφορίες αυτές όμως, σύμφωνα με τα αναφερόμενα παραπάνω, μπορούν να αξιοποιηθούν, αφενός σε θέματα στρατηγικής που σχετίζονται με τη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων και αφετέρου, για την αναθεώρηση θεμάτων που αφορούν στη διαστασιολόγηση και κατασκευή των οδοστρωμάτων.

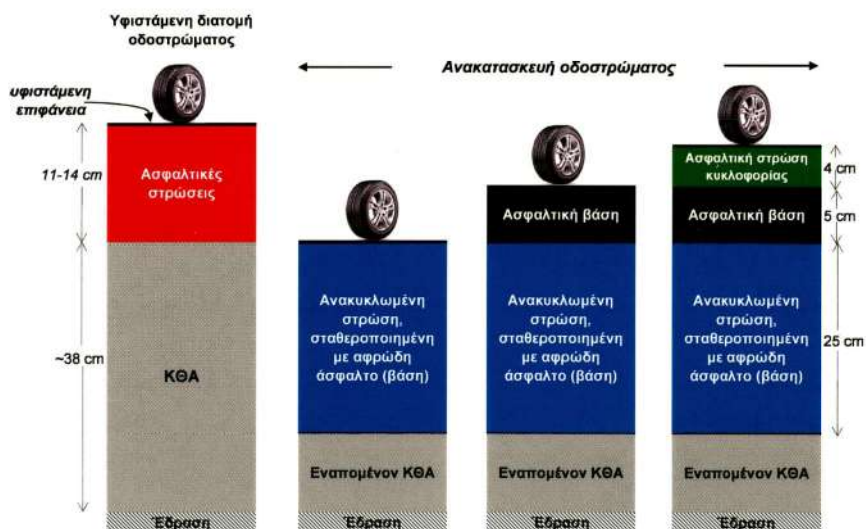
4.4 Αξιολόγηση τεχνολογίας συντήρησης ή αποκατάστασης οδοστρώματος

Για την αξιολόγηση μιας μεθόδου ή τεχνολογίας συντήρησης ή αποκατάστασης του οδοστρώματος, βασικό κριτήριο είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος συμπεριλαμβανομένης της ομαλότητας. Επομένως αντίστροφα, η διερεύνηση της ομαλότητας, τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά την ολοκλήρωση των εργασιών συντήρησης ή αποκατάστασης ενός οδοστρώματος, πιστεύεται ότι μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την εφαρμοζόμενη μέθοδο ή τεχνολογία.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, το οποίο συντάσσεται στην προτεινόμενη προσεγγιστική μεθοδολογία για την αξιολόγηση της ομαλότητας, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα για τη διερεύνηση της ομαλότητας σε όλα τα στάδια συντήρησης ή αποκατάστασης ενός οδοστρώματος. Μετά από προκαταρκτική διερεύνηση, πεδίο εφαρμογής της υπόψη διερεύνησης αποτέλεσε πειραματικό οδόστρωμα στον οδικό άξονα Αθηνών-Λαμίας του αυτοκινητόδρομου ΠΑΘΕ, μήκους της τάξης των 1300 μέτρων, το οποίο λόγω πολλαπλών προβλημάτων αστοχίας, συμπεριλαμβανομένου και της έλλειψης ομαλότητας,

ανακατασκευάστηκε με τη μέθοδο της επί τόπου ψυχρής ανακύκλωσης με χρήση αφρώδους ασφάλτου [80]. Σημειώνεται ότι η υπόψη τεχνολογία, αποτελεί μια πρωτότυπη για τα ελληνικά δεδομένα μέθοδο αποκατάστασης υφιστάμενων οδοστρωμάτων, με ικανοποιητικά μέχρι στιγμής αποτελέσματα όσον αφορά στα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των αποκαταστημένων πλέον οδοστρωμάτων [81, 82]. Βέβαια διεθνώς, δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα επαρκή στοιχεία ως προς την ποιότητα της επιφάνειας κύλισης που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της υπόψη μεθόδου, με καθοριστικό χαρακτηριστικό την κατά μήκος ομαλότητα.

Η διαδικασία αποκατάστασης του πειραματικού οδοστρώματος περιγράφεται συνοπτικά ως εξής: Αφαίρεση μέρους του ασφαλτικού υλικού, ανακύκλωση του υπολειπόμενου ασφαλτικού υλικού, καθώς και του μεγαλύτερου μέρους της από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ) σταθεροποιημένης βάσης -σε βάθος συνολικά περί τα 25 εκατοστά- με προσθήκη αφρώδους ασφάλτου και εν συνεχεία διάστρωση ασφαλτικής βάσης πάχους 5 εκατοστών και προσθήκη αντιολισθηρού ασφαλτικού τάπητα πάχους 4 εκατοστών. Η διατομή του «αποκατεστημένου» πλέον οδοστρώματος, το οποίο κατ' ουσία είναι ημι-εύκαμπτο προς εύκαμπτο ασφαλτικό οδόστρωμα, φαίνεται στο σχήμα 4.6.

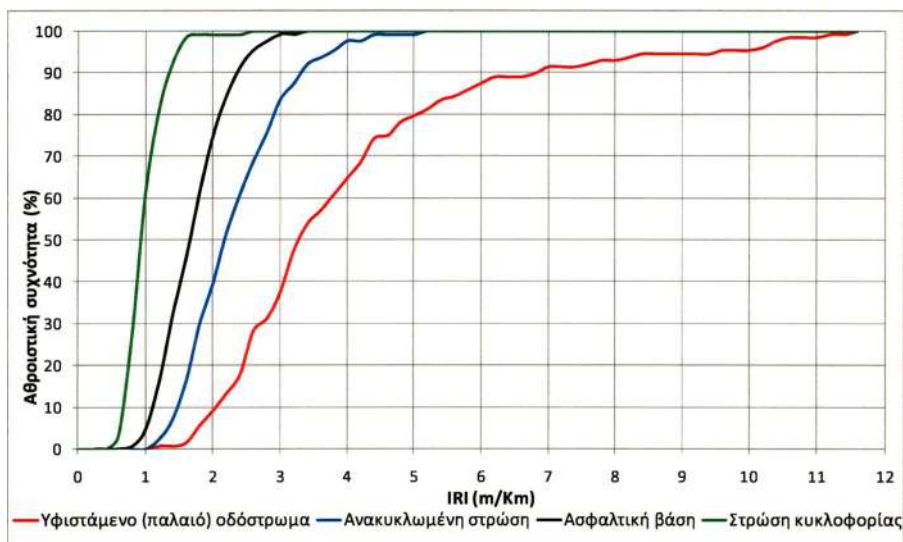


Σχήμα 4.6: Διαδικασία «αποκατάστασης» οδοστρώματος

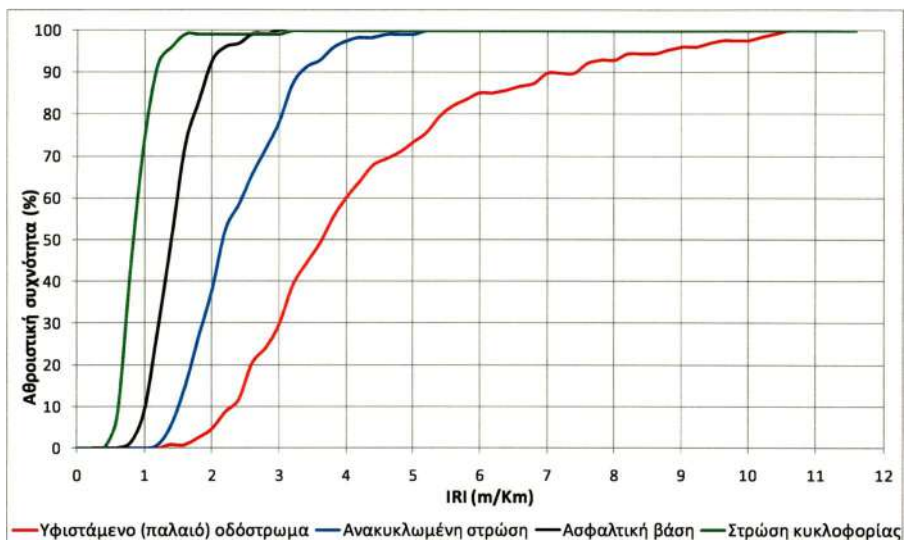
Η ομαλότητα του πειραματικού οδοστρώματος καταγράφηκε με το σύστημα Laser Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ κατά μήκος των θεωρητικών ιχνών τροχών σε διάφορες φάσεις, οι οποίες -σύμφωνα και με το σχήμα 4.6- αντιστοιχούν:

- i. στην υφιστάμενη (παλαιά) επιφάνεια
- ii. στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης και σταθεροποιημένης με αφρώδη άσφαλτο στρώση
- iii. στην επιφάνεια της ασφαλτικής βάσης και
- iv. στην επιφάνεια της στρώσης κυκλοφορίας (αντιολισθηρός ασφαλτικός τάπητας).

Από την επεξεργασία των στοιχείων καταγραφής της ομαλότητας και τον υπολογισμό του δείκτη IRI, ανά 10 μέτρα (βλ. στοιχεία Πινάκων Π6 και Π7 του Παραρτήματος), προέκυψε ότι, σε κάθε φάση ανακατασκευής του οδοστρώματος, η ομαλότητα της εκάστοτε επιφάνειας βελτιωνόταν, όπως χαρακτηριστικά περιγράφεται από τα διαγράμματα αθροιστικών συχνοτήτων των σχημάτων 4.7 και 4.8. Κατά συνέπεια, ενδεχόμενος έλεγχος διασφάλισης της ποιότητας της κατασκευής όσον αφορά στην ομαλότητα των επιμέρους επιφανειών του ανακατασκευασμένου οδοστρώματος θα αποδείκνυε τη συστηματική βελτίωση του επιπέδου ομαλότητας.



Σχήμα 4.7: Περιγραφή της βελτίωσης της ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI (δεξιό ίχνος τροχού)



Σχήμα 4.8: Περιγραφή της βελτίωσης της ομαλότητας βάσει του δείκτη IRI (αριστερό ίχνος τροχού)

Πέραν του υπολογισμού και της ανάλυσης των τιμών του δείκτη IRI, πραγματοποιήθηκε και η δυναμική φασματική ανάλυση των κυματισμών των υπό διερεύνηση επιφανειών. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων της εκάστοτε επιφάνειας προκειμένου να δοθεί έμφαση στη μελέτη του πλάτους των κυματισμών. Με βάση τις υψομετρικές αποκλίσεις, διερευνήθηκε κατά πόσο τα αποτελέσματα αξιολόγησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων βάσει των τιμών του δείκτη IRI εναρμονίζονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη διαδικασία φασματικής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό, υπολογίστηκε ο δείκτης RMS των υψομετρικών αποκλίσεων στις εξής περιπτώσεις: στο σύνολο των κυματισμών, στην περιοχή κυματισμών μικρού, μεσαίου και μεγάλου μήκους, κατά μήκος των δύο ιχνών τροχού του οχήματος (δεξιό και αριστερό).

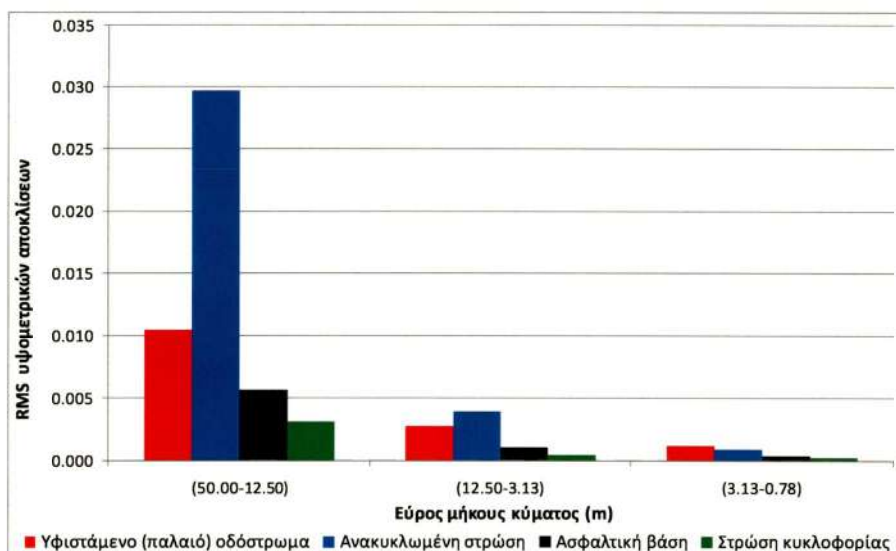
Η δημιουργία των μικρού μήκους κυματισμών οφείλεται, όπως ήδη έχει προαναφερθεί, κυρίως στον τρόπο διάστρωσης και συμπίκνωσης του αντιολισθηρού ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας. Η κατασκευή του αντιολισθηρού τάπητα πέρα από το δομικό χαρακτήρα του, πρέπει να εστιάζει στην εξασφάλιση χαρακτηριστικών ομαλότητας, έτσι ώστε σε συνδυασμό με την αντιολισθητική του ικανότητα, να παρέχει στους χρήστες των οδών άνεση και ασφάλεια.

Σε μια τέτοια περίπτωση ο δείκτης IRI, στο πλαίσιο προδιαγραφών ελέγχου των οδοστρωμάτων, είναι ένα κατάλληλο μέτρο για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης. Δεν μπορεί όμως να δώσει επαρκή πληροφόρηση για τις υποκείμενες του αντιολισθηρού

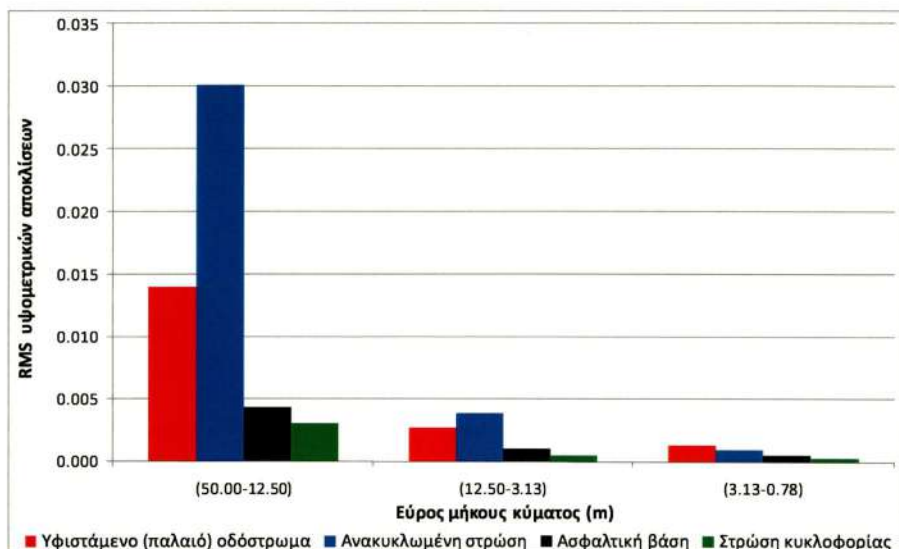
τάπητα στρώσεις του οδοστρώματος. Η πληροφόρηση αυτή όμως είναι δυνατό να αντληθεί από τη δυναμική φασματική ανάλυση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, καθώς περιγράφει τις υψομετρικές αποκλίσεις όλων των κυματισμών.

Παρά ταύτα, διερευνώντας -μέσω της δυναμικής φασματικής ανάλυσης και του δείκτη RMS των υψομετρικών αποκλίσεων (βλ. στοιχεία Πίνακα Π8 του Παραρτήματος) - τους κυματισμούς που δημιουργούνται στην εκάστοτε επιφάνεια παρατηρείται ότι η βελτίωση της ομαλότητας που δίνει ο δείκτης IRI, οφείλεται μόνο στους μικρού μήκους κυματισμούς, καθώς είναι εμφανές στα σχήματα 4.9 και 4.10 ότι, οι υψομετρικές αποκλίσεις και κατά συνέπεια τα πλάτη των μεγάλου και μεσαίου μήκους κυματισμών αυξάνουν. Το φαινόμενο είναι δε πιο έντονο στους μεγάλου μήκους κυματισμούς.

Εν συνεχεία, η διάστρωση των ασφαλικών στρώσεων επιφέρει περαιτέρω βελτίωση της ομαλότητας σε όλα τα μήκη κύματος. Η πιο σημαντική βελτίωση της ομαλότητας αντιστοιχεί στους μεγάλου μήκους κυματισμούς.

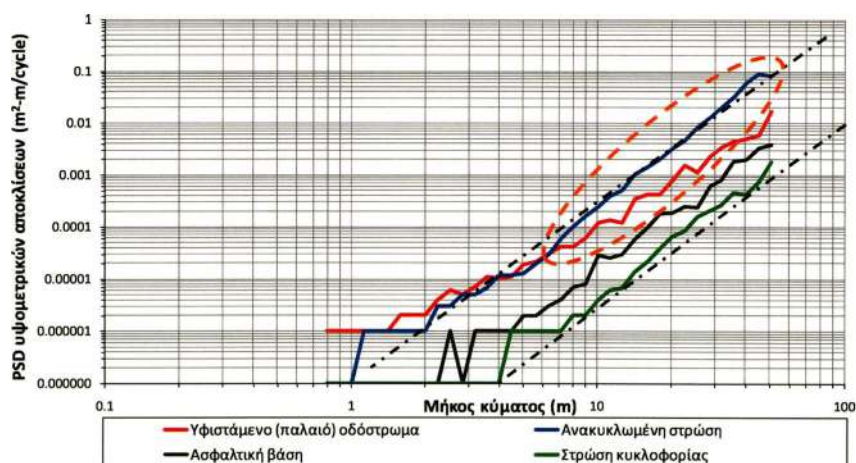


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων (δεξιό ίχνος τροχού)

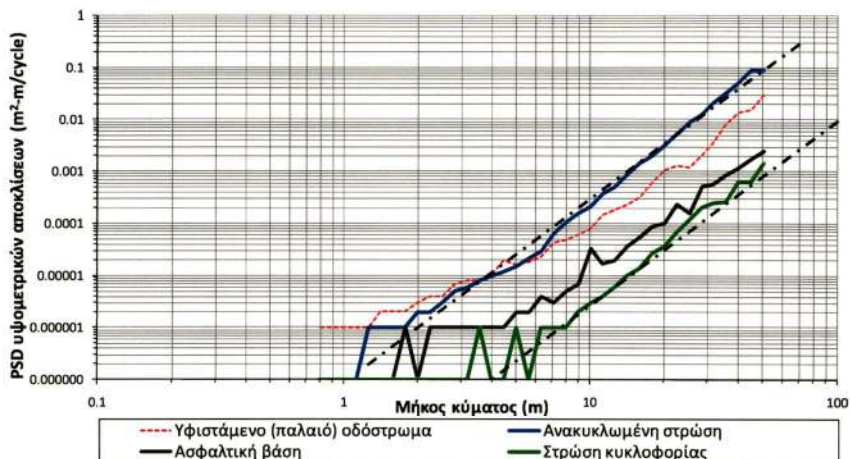


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων στις επιμέρους ομάδες (αριστερό ίχνος τροχού)

Ένα αξιοσημείωτο σημείο είναι ότι η βελτίωση των κυματισμών λόγω της διάστρωσης των ασφαλικών στρώσεων ακολουθεί –σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα- εν παραλλήλω την κυματομορφή της προσωρινά θεωρούμενης επιφάνειας βάσης (ανακυκλωμένη στρώση) (σχήματα 4.11 και 4.12) (βλ. στοιχεία Πίνακα 9 του Παραρτήματος).



Σχήμα 4.11: Φασματική ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων (αριστερό ίχνος τροχού)



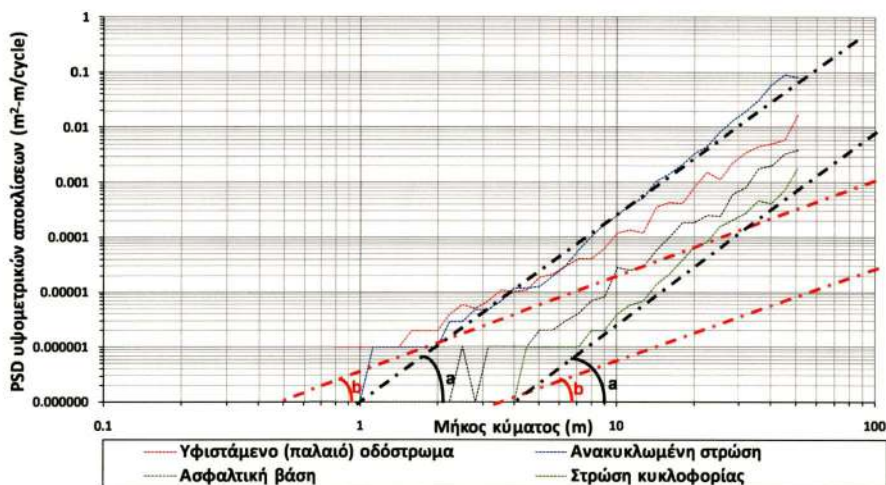
Σχήμα 4.12: Φασματική ανάλυση των υψομετρικών αποκλίσεων (δεξιό ίχνος τροχού)

Επομένως στην περίπτωση όπου επιτυγχανόταν, οι κυματισμοί της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης να παρουσίαζαν μικρότερο πλάτος (υψομετρική απόκλιση), η τελική επιφάνεια κύλισης του ανακατασκευασμένου πλέον οδοστρώματος θα ήταν σαφώς πιο ομαλή. Συγκεκριμένα, αν η κλίση (a) της εντοπιζόμενης παράλληλης ζώνης μετατόπισης των φασματικών γραμμών, οι οποίες αντιστοιχούν στις επιμέρους φάσεις της κατασκευής, ήταν μικρότερη (δηλαδή b), τότε θα υπήρχε περαιτέρω βελτίωση της ομαλότητας που επιτυγχάνεται στην επιφάνεια του αποκατεστημένου πλέον οδοστρώματος. Το σχήμα 4.13 περιγράφει με χαρακτηριστικό τρόπο τη διαπίστωση αυτή.

Πέραν των παραπάνω συμπερασμάτων, η δυναμική φασματική ανάλυση δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού κάποιων κρίσιμων θεμάτων όσον αφορά στην αξιολόγηση της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας. Έτσι, σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση ανακατασκευής του οδοστρώματος, τα πάχη των ασφαλτικών επιστρώσεων προσδίδουν μια ελάχιστα απαιτούμενη δομική επάρκεια στο οδόστρωμα, καθιστώντας, τη φιλική προς το περιβάλλον, τεχνολογία της ψυχρής ανακύκλωσης, ως ελκυστική λύση για τον Κύριο του Έργου (ΚτΕ) [81]. Όμως, με βάση τα αποτελέσματα της PSD ανάλυσης, αποδεικνύεται ότι για την περαιτέρω βελτίωση της ομαλότητας και την επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου ποιότητας κύλισης, ιδιαίτερα σε οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων, απαιτούνται ασφατικές στρώσεις μεγαλύτερου πάχους.

Αύξηση όμως του συνολικού πάχους των ασφαλτικών στρώσεων επίστρωσης του ανακυκλωμένου υλικού, σημαίνει αύξηση του αρχικού κόστους ανακατασκευής, παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική σε μια τεχνο-οικονομική ανάλυση στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης του οδοστρώματος. Ενδεχομένως, το γεγονός αυτό να καθιστούσε την υπόψη τεχνολογία ασύμφορη, αλλά θα επιτυγχάνονταν ένα υψηλό επίπεδο ομαλότητας, στοιχείο που θα ικανοποιούσε τους χρήστες της οδού, καθώς καλούνται να πληρώσουν διόδια για τις προσφερόμενες προς αυτούς υπηρεσίες.

Βέβαια στην προκειμένη περίπτωση, η απαίτηση για αύξηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων προκύπτει και από τα αποτελέσματα έρευνας [83, 84], σύμφωνα με τα οποία, το ανακυκλωμένο νέο υλικό βάσης, προκειμένου να λειτουργήσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων του, χρειάζεται κάποιο χρόνο ωρίμανσης (curing). Στο χρόνο αυτό, το αυξημένο -σε σχέση με τη διαστασιολόγηση- πάχος ασφαλτικών στρώσεων, πέραν του ότι βελτιώνει το επίπεδο ομαλότητας που επιτυγχάνεται στην επιφάνεια κύλισης, είναι απαραίτητο για την προστασία του οδοστρώματος, μέχρι αυτό να είναι σε θέση να λειτουργήσει σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του, δεδομένου ότι στην κρίσιμη αυτή φάση οι ασφαλτικές στρώσεις παραλαμβάνουν τη μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση [84].



Σχήμα 4.13: Περιγραφή της δυνατότητας βελτίωσης της ομαλότητας (δεξιό ίχνος τροχού)

Συμπερασματικά αναφέρεται ότι, ο συνδυασμός της λειτουργικής, μέσω της PSD ανάλυσης και της δομικού χαρακτήρα ανάλυσης, θα βελτιστοποιούσε την εφαρμογή, της κατά τα άλλα εξαιρετικά επιτυχούς τεχνολογίας (CIPR) [81], έστω και με σχετικά αυξημένο κόστος, συνυπολογίζοντας και το όφελος από το κόστος αποκλεισμού της οδού, το οποίο είναι αναπόφευκτο κατά τις συμβατικές μεθόδους συντήρησης/αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Αξίζει να τονισθεί ότι, η αύξηση του πάχους των ασφαλικών επιστρώσεων, πέραν της περαιτέρω βελτίωσης της ομαλότητας, θα είχε ευεργετικές επιπτώσεις και στην περίπτωση τυχόν εμφάνισης, μεμονωμένων ανακλαστικών ρηγματώσεων από υποκείμενες στρώσεις. Το στοιχείο αυτό αφορά στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εφαρμόστηκε η νέα τεχνολογία ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλο για την αποκατάσταση αστοχιών ημι-ακάμπτων οδοστρωμάτων των εθνικών οδών, με εναπομένονσα –για οικονομικούς λόγους- υποκείμενη στρώση ΚΘΑ [85, 86].

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα της PSD ανάλυσης, για την επίτευξη καλύτερης ομαλότητας στην επιφάνεια κύλισης, πέραν της αύξησης του πάχους, μια σύσταση θα ήταν να γίνεται καλύτερη διάστρωση της ανακυκλωμένης στρώσης, έτσι ώστε να έχει πιο ομαλούς κυματισμούς στην προσωρινή επιφάνεια της, των οποίων το πλάτος θα μειωνόταν λόγω της διάστρωσης των ασφαλικών επιστρώσεων. Σε μια τέτοια περίπτωση ενδεχομένως να πρέπει να διερευνηθούν οι δυνατότητες βελτίωσης κατά την εφαρμογή της υπόψη τεχνολογίας.

Τα παραπάνω συμπεράσματα, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν, για την περαιτέρω εφαρμογή της τεχνολογίας επιτόπου ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλο για την αποκατάσταση των οδοστρωμάτων και άλλων οδικών τμημάτων, ή ακόμα και να αποτελέσουν «πilotο», για την αξιοποίηση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων για την αξιολόγηση και άλλων πρωτότυπων τεχνολογιών. Η δυνατότητα βελτίωσης της υπόψη τεχνολογίας ως προς το θέμα της ομαλότητας, θα πρόσδιε στο εκάστοτε, αποκαταστημένο πλέον οδόστρωμα, περαιτέρω διάρκεια ζωής, δεδομένου ότι όσο καλύτερη είναι η ομαλότητα, τόσο περιορίζονται οι ανομοιομορφες καταπονήσεις που δέχεται ένα οδόστρωμα, οι οποίες αφενός βάλλουν το δομικό χαρακτήρα του και αφετέρου, επηρεάζουν την εξυπηρετικότητα του και κατ' επέκταση, την επιτελεστικότητα του. Το στοιχείο αυτό εξάλλου είναι καθοριστικό στην σύγχρονη αντίληψη για την προστασία των οδοστρωμάτων, η οποία αναδεικνύει την αξία της ομαλότητας τους [87].

5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ «ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ»

5.1 Γενικά

Η ταχύτητα κίνησης και η ομαλότητα της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, είναι αδιάσπαστοι παράγοντες για τον καθορισμό των δονήσεων που δέχεται ένα οδόστρωμα. Η ταχύτητα επηρεάζει το όχημα με δύο τρόπους. Πρώτον, οι μεταβολές των αποκλίσεων κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, λειτουργούν για το όχημα ως αλλαγές των αποκλίσεων με το χρόνο, οι οποίες εκφράζονται με τη σχέση της οριζόντιας θέσης του και του χρόνου που καθορίζεται από την ταχύτητα κίνησής του. Δηλαδή η απόκλιση Z είναι μια συνάρτηση του χρόνου που εξαρτάται από την κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος και την ταχύτητα του οχήματος, σύμφωνα με τη σχέση [88]:

$$Z(x) = z(V, t) \quad (5.1)$$

Όπου $Z(x)$ είναι η κατά μήκος κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος ως συνάρτηση της θέσης του οχήματος κατά μήκος της οδού x , V είναι η ταχύτητα του οχήματος και t ο χρόνος κίνησης.

Η σχέση (5.1), η οποία κατ' ουσία βασίζεται στη θεμελιώδη σχέση (3.1) για $x = V \cdot t$, εκφράζει ότι οι αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος προκαλούν τόσο πιο έντονες δονήσεις στο όχημα, όσο μεγαλώνει η ταχύτητα κίνησης. Επίσης, όσο πιο μεγάλες είναι οι αποκλίσεις, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της ταχύτητας στη δημιουργία δονήσεων. Η επίδραση της ταχύτητας στο όχημα και κατ' επέκταση στους επιβαίνοντες, προσδιορίζεται λοιπόν από τη φύση της ομαλότητας.

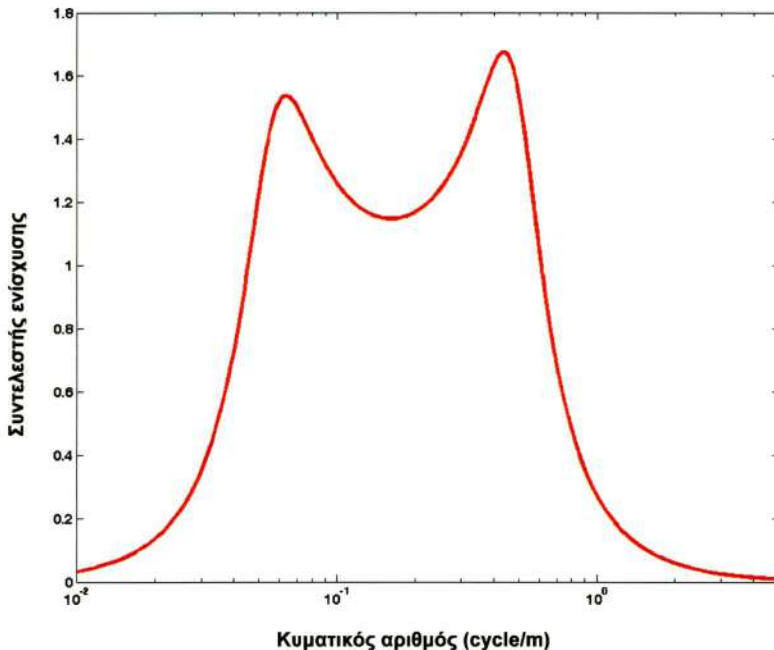
Γενικά η σχέση μεταξύ ταχύτητας και ομαλότητας φαίνεται ότι εξαρτάται από τη φασματική κατανομή των αποκλίσεων στους επιμέρους μήκους κυματισμούς. Η σχέση αυτή διερευνάται περαιτέρω για τον συνυπολογισμό του παράγοντα *ταχύτητα κίνησης του οχήματος* στην αξιολόγηση της ομαλότητας.

5.2 Η ταχύτητα στον υπολογισμό του δείκτη IRI

Το προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη IRI έχει σχεδιασθεί, έτσι ώστε να ενισχύει το πλάτος της ταλάντωσης που

προκαλείται από κυματισμούς συγκεκριμένου μήκους. Το αποτέλεσμα είναι ο υπόψη δείκτης να επηρεάζεται εντονότερα από αυτούς τους κυματισμούς. Η θεωρητική απόκριση του προσομοιώματος υπολογισμού του δείκτη IRI, στα διάφορα μήκη κυματισμών φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Στην ουσία, το σχήμα 5.1 περιγράφει τον συντελεστή ενίσχυσης των κυματισμών της κατά μήκος κατατομής του οδοστρώματος, ο οποίος προκύπτει ως ο λόγος του φιλτραρισμένου προς το αφιλτράριστο πλάτος των κυματισμών. Εκφράζει δηλαδή τη βαρύτητα του κάθε κυματισμού στον υπολογισμό του δείκτη IRI. Ή διαφορετικά, το συντελεστή με τον οποίο το προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος πολλαπλασιάζει το πραγματικό πλάτος του εκάστοτε κυματισμού της επιφάνειας του οδοστρώματος, ώστε να υπολογιστεί η τελική τιμή του δείκτη IRI.



Σχήμα 5.1: Θεωρητική απόκριση προσομοιώματος υπολογισμού του δείκτη IRI [31]

Με βάση λοιπόν την περιγραφή του συντελεστή ενίσχυσης, οι κυματισμοί οι οποίοι επηρεάζουν το όχημα και κατ' επέκταση έχουν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του διεθνούς δείκτη ομαλότητας IRI, είναι οι κυματισμοί μήκους 1.2 m - 30 m, οι οποίοι αντιστοιχούν στους κυματικούς αριθμούς 0,033 - 0,833. Το διάγραμμα αυτό, βάσει του

ορισμού του IRI, αντιστοιχεί σε ταχύτητα προσομοίωσης 80 km/h. Για διαφορετικές όμως ταχύτητες προσομοίωσης η απόκριση του οχήματος και η βαρύτητα των κυματισμών ενδέχεται να αλλάζουν.

Ας εξετάσουμε λοιπόν την κίνηση του συστήματος ανάρτησης από την οποία προκύπτει και το παραπάνω διάγραμμα. Αυτή μπορεί να περιγραφεί από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις [89]:

$$m_u \cdot \ddot{\xi} + m_u \cdot \ddot{Z}_u = k_t \cdot Z_u - C_s \cdot \dot{Z}_s - k_s \cdot Z_s \quad (5.2)$$

$$M_s \cdot \ddot{\xi} + M_s \cdot \ddot{Z}_u + M_s \cdot \ddot{Z}_s = C_s \cdot \dot{Z}_s - k_s \cdot Z_s \quad (5.3)$$

Όπου

ξ : η υψομετρική απόκλιση της επιφάνειας του οδοστρώματος,

Z_u και Z_s : σχετική κατακόρυφη μετατόπιση της μάζας τμήματος του οχήματος και της μάζας του άξονα, αντίστοιχα,

M_u και m_s : μάζα τμήματος του οχήματος και μάζα άξονα αντίστοιχα,

k_t και k_s : σταθερά ελαστικού και ελατηρίου ανάρτησης αντίστοιχα και

C_s : σταθερά αποσβεστήρα ταλαντώσεων

Επίσης οι σχετικές μετατοπίσεις υπολογίζονται και ως συνάρτηση του χρόνου t δηλ.

$$Z_u(t) = \xi - y_u(t) \quad (5.4)$$

$$Z_s(t) = y_u(t) - y_s(t) \quad (5.5)$$

Όπου

y_u και y_s είναι η απόλυτη μετατόπιση της μάζας τμήματος του οχήματος και του άξονα αντίστοιχα. Σημειώνεται, ότι με μια ή δύο τελείες πάνω από το εκάστοτε σύμβολο συμβολίζεται η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος του χρόνου.

Από την επεξεργασία των στοιχείων και του συστήματος ανάρτησης του προσομοιώματος προκύπτουν οι εξισώσεις της συχνότητας απόκρισης (Frequency Response Function: FRF):

$$H_s(\omega) = Z_s(\omega) / \xi \quad (5.6)$$

$$H_u(\omega) = Z_u(\omega) / \xi \quad (5.7)$$

$$\xi = \exp(\ell \cdot \omega \cdot t) \quad (5.8)$$

Από τις τρεις παραπάνω εξισώσεις μόνο η συχνότητα απόκρισης H_s επηρεάζει το IRI. Θεωρώντας λοιπόν τις παραμέτρους του προσομοιώματος του ενός τετάρτου του οχήματος, η εξίσωση 5.6 παίρνει τη μορφή:

$$H_s = \frac{-\beta\omega^2}{\omega^4 - i(\bar{h}\alpha_s + \alpha_s)\omega^3 - (\beta_l + \beta_s + \bar{h}\beta_s)\omega^2 + i\alpha_s\beta_l\omega + \beta_l\beta_s} \quad (5.9)$$

όπου,

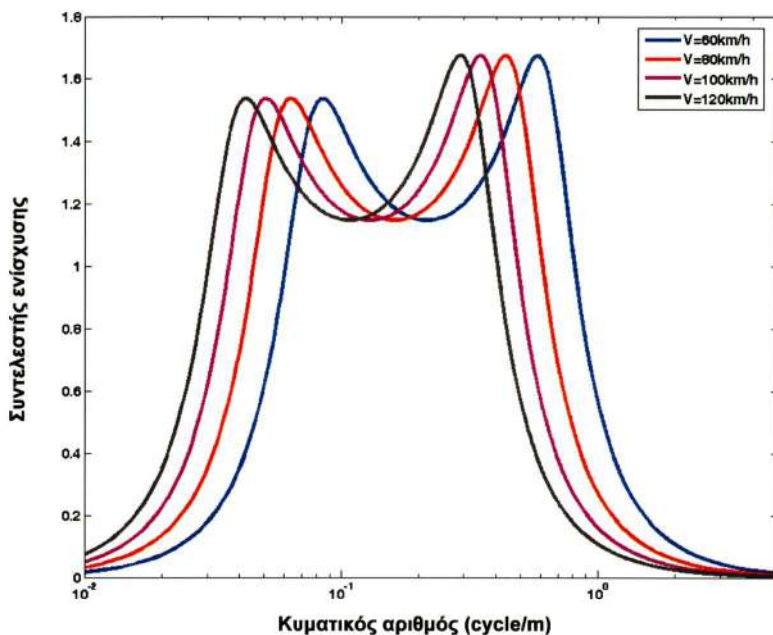
ω είναι η κυκλική συχνότητα, $\bar{h} = m_s/M_u$, $\alpha_s = C_s/m_s$, $\beta_s = k_s/m_s$ και $\beta_l = k_l/M_u$.

Αντικαθιστώντας στις προηγούμενες παραμέτρους τις τιμές των παραμέτρων του «χρυσού οχήματος» (βλ. πίνακα 3.1) προκύπτει ότι: $\bar{h} = 6.67$, $\alpha_s = 6 \text{ s}^{-1}$, $\beta_s = 63.3 \text{ s}^{-2}$, $\beta_l = 4353 \text{ s}^{-2}$.

Με δεδομένο λοιπόν τις παραμέτρους του «χρυσού οχήματος» θεωρείται ως μεταβλητή η ταχύτητα προσομοίωσης V , η οποία υπεισέρχεται στην εξίσωση 5.8 μέσω της κυκλικής συχνότητας $\omega = 2\pi V/\lambda$ (σχέση 3.5).

Θεωρώντας ότι η ταχύτητα προσομοίωσης V αντιπροσωπεύει την ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος, επιλέγονται διαφορετικές ταχύτητες για τον υπολογισμό της συχνότητας απόκρισης H_s και κατ' επέκταση, για τον υπολογισμό του δείκτη IRI. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη διεθνή [90, 91] όσο και την ελληνική πρακτική [92] όσον αφορά σε μέγιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες κίνησης σε αυτοκινητοδρόμους, οδούς ταχείας κυκλοφορίας ή άλλα οδικά δίκτυα, κρίθηκαν ως σταθμισμένες και αντιπροσωπευτικές για το σκοπό της έρευνας οι ταχύτητες των: 60, 80, 100 και 120 km/h.

Τα αποτελέσματα υπολογισμού της συχνότητας απόκρισης για τα επιμέρους μήκη κύματος (βλ. στοιχεία Πίνακα Π10 του Παραρτήματος), ή διαφορετικά για τους επιμέρους κυματικούς αριθμούς, με μεταβλητή την ταχύτητα V που παίρνει τιμές 60, 80, 100 και 120 km/h, δίνονται από το διάγραμμα του συντελεστή ενίσχυσης ανά ταχύτητα, του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2: Συντελεστής ενίσχυσης προσομοιώματος υπολογισμού του IRI για διαφορετικές ταχύτητες

Από το διάγραμμα Συντελεστή ενίσχυσης – Κυματικού αριθμού του σχήματος 5.2, προκύπτει ότι με την αύξηση της ταχύτητας μειώνεται ο κυματικός αριθμός που επηρεάζει τον υπολογισμό του δείκτη IRI. Άρα υπάρχει αύξηση του μήκους των κυματισμών που συντελούν στην αύξηση της τιμής του δείκτη IRI.

Πέρα όμως, από την αύξηση του μήκους παρατηρείται και σημαντική διεύρυνση του εύρους των κυματισμών. Συγκεκριμένα, από τα 80 km/h στα 120 km/h, διπλασιάζεται το εύρος των τιμών που επηρεάζουν τον υπολογισμό του δείκτη. Λόγω της λογαριθμικής κλίμακας του διαγράμματος, το στοιχείο αυτό μπορεί να μη γίνεται αμέσως αντιληπτό. Παρόλα αυτά η λογαριθμική κλίμακα ενδείκνυται στην προκειμένη περίπτωση, καθώς τα μήκη κύματος που εξετάζονται έχουν μεγάλο εύρος και αλλιώς δεν θα ήταν δυνατό να παρασταθούν ικανοποιητικά.

Οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί λοιπόν αποκτούν πολύ μεγάλη σημασία για τις μεγάλες ταχύτητες, ενώ για τα 80 km/h δεν έχουν σχεδόν καμία επίδραση. Αντίθετα, οι μικροί

μήκους κυματισμοί έχουν μειωμένη βαρύτητα όσο αυξάνεται η ταχύτητα κίνησης, αλλά εξακολουθούν να έχουν συμβολή στην αντίληψη της ομαλότητας του οδοστρώματος.

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης παραμένει η ίδια για όλες τις ταχύτητες αφού η αντίδραση στους κυματισμούς περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του οχήματος. Αυτό οφείλεται στην μάζα του άξονα του οχήματος η οποία έχει την ιδιότητα να συντονίζεται σε κυματισμούς αυτής της συχνότητας, οπότε και να παράγει τόσο μεγάλη αντίδραση.

5.3 Συνυπολογισμός της ταχύτητας στα αποτελέσματα της δυναμικής φασματικής ανάλυσης

Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί, η δυναμική φασματική ή PSD ανάλυση δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το πώς οι κυματισμοί επιδρούν στην ομαλότητα της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Δεν μπορεί όμως να δώσει στοιχεία σχετικά με την απόκριση του οχήματος στους κατά μήκους κυματισμούς της επιφάνειας, όπως συμβαίνει με τον δείκτη IRI λόγω του προσομοιώματος υπολογισμού του. Πολύ περισσότερο, δεν μπορεί να αποδώσει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα επιβάτης-όχημα αντιδρά στις υψομετρικές ή κλισιομετρικές αποκλίσεις της επιφάνειας λόγω μεταβολής της ταχύτητας κίνησης.

Η άρση των παραπάνω περιορισμών θα μπορούσε να βασιστεί στο συνδυασμό της φασματικής ανάλυσης της κυματομορφής της επιφάνειας του οδοστρώματος και της απόκρισης του οχήματος στις διάφορες ταχύτητες. Μέσω μιας τέτοιας διαδικασίας είναι δυνατό να συνυπολογιστεί η βαρύτητα του κάθε κυματισμού στην αντίληψη της ομαλότητας για διαφορετικές ταχύτητες.

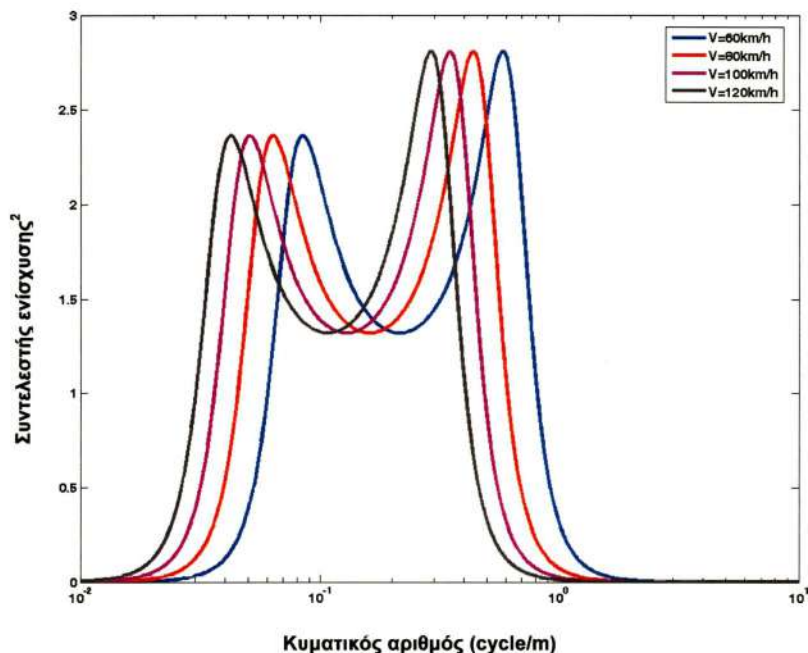
Ο προαναφερόμενος συνδυασμός προκύπτει μέσω του πολλαπλασιασμού των διαγραμμάτων φασματικής ανάλυσης με τις αντίστοιχες τιμές ανά κυματισμό του συντελεστή ενίσχυσης, υψωμένες όμως στο τετράγωνο [68]. Η σχετική εξίσωση είναι της μορφής:

$$G_{zs} = |H_s|^2 \times G_z \quad (5.10)$$

όπου G_{zs} είναι η δυναμική απόκριση του οχήματος για συχνότητα f , H_s είναι ο συντελεστής ενίσχυσης της απόκρισης στους κυματισμούς μιας δεδομένης επιφάνειας οδοστρώματος και G_z είναι η δυναμική φασματική ανάλυση των κυματισμών της υπόψη επιφάνειας.

Πιο αναλυτικά για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, χρησιμοποιούνται οι τιμές των τετραγώνων των μεγεθών που εξετάζονται

(κλισιομετρικών ή υψομετρικών αποκλίσεων) για να αποφευχθούν αντίστοιχες αρνητικές τιμές. Αντίστοιχα, το διάγραμμα του συντελεστή ενίσχυσης αναπτύσσεται με υψωμένες τις τιμές του στο τετράγωνο, έτσι ώστε να δοθεί έμφαση στην επίδραση των κυματισμών (σχήμα 5.3) (βλ. στοιχεία Πίνακα Π11 του Παραρτήματος).

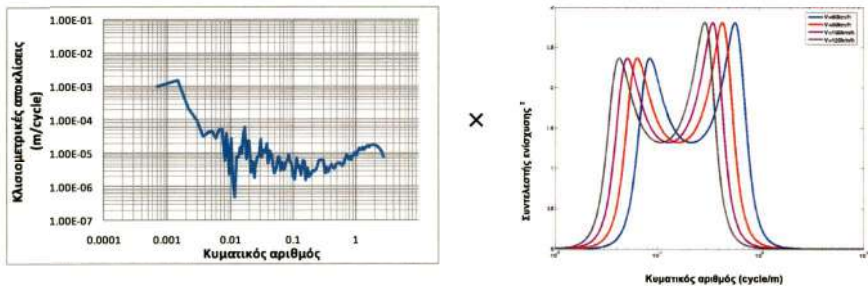


Σχήμα 5.3: Διάγραμμα απόκρισης προσομοιώματος υπολογισμού του IRI για διαφορετικές ταχύτητες

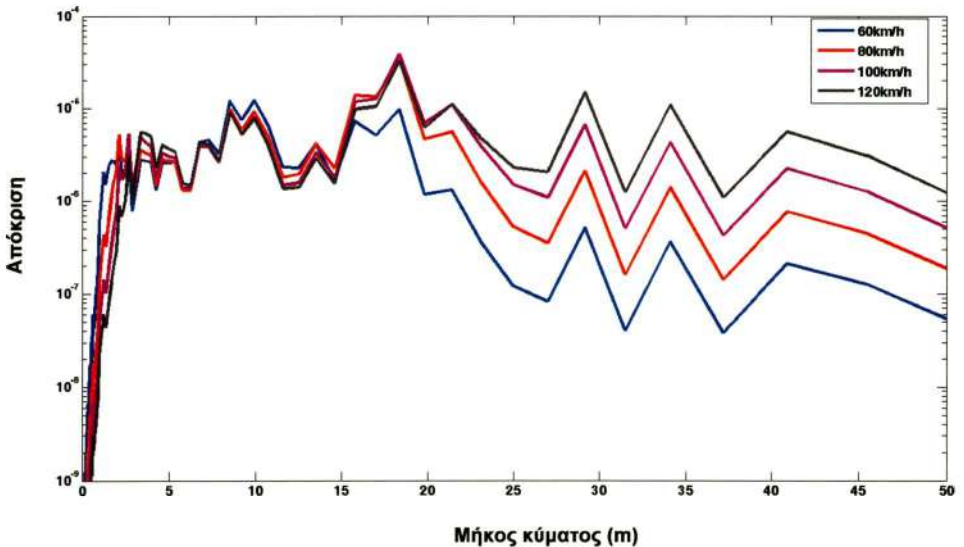
Χρησιμοποιώντας, τα στοιχεία ομαλότητας πειραματικού οδοστρώματος του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ (βλ. στοιχεία Πίνακα Π12 του Παραρτήματος), το οποίο ανήκει σε τμήμα του αυτοκινητοδρόμου Αθηνών-Λαμίας, μήκους 160 μέτρων περίπου, εφαρμόζεται η σχέση 5.10. Επιλέγοντας τα διαγράμματα των κλισιομετρικών αποκλίσεων για την περιγραφή της ομαλότητας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, οι τιμές των μέσων κλισιομετρικών αποκλίσεων ανά μήκος κύματος πολλαπλασιάζονται με τις αντίστοιχες τετραγωνισμένες τιμές του συντελεστή ενίσχυσης για τις θεωρούμενες ταχύτητες (σχήμα 5.4). Το αποτέλεσμα είναι το διάγραμμα του σχήματος 5.5. που ορίζεται ως *διάγραμμα απόκρισης* [93, 94]. Τα σχετικά στοιχεία περιλαμβάνονται στον Πίνακα Π13 του Παραρτήματος.

Με βάση το διάγραμμα του σχήματος 5.5 προκύπτει γενικά ότι, στην πλειοψηφία των επιμέρους μήκους κυματισμών, όσο αυξάνει η ταχύτητα, η απόκριση του οχήματος τείνει να

αυξάνει. Η τάση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στους κυματισμούς μεγάλου μήκους. Μάλιστα τις περιπτώσεις των ταχυτήτων των 100 και ιδιαίτερα των 120 km/h, η απόκριση του οχήματος στους μεγάλους μήκους κυματισμούς τείνει να είναι στα επίπεδα απόκρισης του οχήματος στους μικρού και μεσαίου μήκους κυματισμούς. Επομένως, η ένταση των δονήσεων που αισθάνεται ο χρήστης της οδού, συνεχίζει και είναι μεγάλη και στους μεγάλους μήκους κυματισμούς, όταν η ταχύτητα κίνησης είναι υψηλή.



Σχήμα 5.4: Υπολογισμός του διαγράμματος απόκρισης



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα απόκρισης

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, αναδεικνύεται η σημασία της ταχύτητας κίνησης στην απόκριση του οχήματος ανάλογα με τους επιμέρους μήκους κυματισμούς. Ένας δείκτης, όπως είναι ο IRI, του οποίου η ταχύτητα του προσομοιώματος υπολογισμού του είναι σταθερή (80 km/h), αποτελεί αναμφίβολα ένα χρήσιμο μέτρο της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος. Όμως, ο συνδυασμός της φασματικής ανάλυσης και του συντελεστή ενίσχυσης που χρησιμοποιείται στο προσομοίωμα υπολογισμού του IRI, για διάφορες ταχύτητες, δίνει κρίσιμες πληροφορίες για την απόκριση του οχήματος στους επιμέρους κυματισμούς. Αποδεικνύεται έτσι ότι, η επίδραση των μεγάλου μήκους κυματισμών στην απόκριση του οχήματος αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας. Και σύμφωνα με τα διαγράμματα των σχημάτων 5.2 και 5.3 η βαρύτητα των κυματισμών αυτών στην αξιολόγηση της απόκρισης του οχήματος είναι σημαντική και γίνεται ακόμη πιο σημαντική όσο αυξάνει η ταχύτητα. Επομένως, στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων, ο κατασκευαστής-οδοποιός δεν πρέπει να εστιάζει μόνο στη μείωση του πλάτους των μικρού μήκους κυματισμών της επιφάνειας νέων ή αποκατεστημένων οδοστρωμάτων, προκειμένου να διασφαλίσει ένα υψηλό, ή έστω αποδεκτό, επίπεδο ποιότητας κύλισης, αλλά και στη μείωση του πλάτους των μεγαλύτερου μήκους κυματισμών. Η σύγχρονη τεχνολογία και τα εξελιγμένα μηχανήματα, σε συνδυασμό με την αποφυγή κακοτεχνιών αναμφίβολα μπορούν να οδηγήσουν προς την κατεύθυνση αυτή.

Κατά την αξιολόγηση λοιπόν της ομαλότητας ενός οδοστρώματος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα κίνησης στην οδό. Το στοιχείο αυτό πρέπει να υπεισέρχεται στον καθορισμό κριτηρίων αξιολόγησης, όταν αυτά στηρίζονται σε κάποιο δείκτη. Ο δείκτης IRI ήδη με την κλίμακα κατάταξης του, προδιαγράφεται ανάλογα με την επιφανειακή κατάσταση των οδοστρωμάτων αναφέροντας τη συνήθη ταχύτητα κίνησης πάνω σε αυτά. Όμως ο καθορισμός συγκεκριμένων τιμών ως κριτήρια αξιολόγησης για την παραλαβή ή τη συντήρηση ενός οδοστρώματος χρειάζεται μια ενδελεχή διερεύνηση, η οποία να συμπεριλαμβάνει τον παράγοντα «ταχύτητα κίνησης» του οχήματος υπό το πρίσμα μιας τεκμηριωμένης προσέγγισης. Μια τέτοια προσέγγιση πιστεύεται ότι θα μπορούσε να βασιστεί στα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων.

Πέραν τούτων, το διάγραμμα απόκρισης για τις επιμέρους ταχύτητες του σχήματος 5.5, θα μπορούσε να οδηγήσει και στην ανάπτυξη ενός νέου δείκτη ομαλότητας. Αυτός θα μπορούσε να οριστεί ως η τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από τη γραμμή της απόκρισης για κάθε ταχύτητα. Σημειώνεται ότι, η έκφραση μέσω της τετραγωνικής ρίζας και όχι για παράδειγμα μέσω της κυβικής ρίζας, βασίζεται στο ότι -κατά τα πρότυπα υπολογισμού του δείκτη RMS των υψομετρικών ή κλισιομετρικών αποκλίσεων

της φασματικής ανάλυσης- η έννοια της επιφάνειας περιγράφεται με δύο διαστάσεις. Ένας τέτοιος δείκτης, εκτός του ότι θα συνυπολογίζει τον παράγοντα «ταχύτητα», θα παρέχει πληροφορίες για τους κυματισμούς του εξεταζόμενου οδοστρώματος [93]. Βέβαια πιστεύεται ότι η συμβολή των μηχανολόγων-επιστημόνων [68] είναι απαραίτητη για τον περιορισμό των παραμέτρων επιρροής στον δείκτη αυτό, όπως είναι για παράδειγμα η αυξημένη και ψευδεπίγραφη βαρύτητα των μεγάλου μήκους κυματισμών, μέσω κατάλληλης προσαρμογής του συντελεστή ενίσχυσης των κυματισμών για τον υπολογισμό του διαγράμματος απόκρισης. Όμως, ο προβληματισμός αυτός είναι πέραν των στόχων της παρούσας εργασίας.

6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ

6.1 Γενικά

Ο έλεγχος για την αξιολόγηση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος χαρακτηρίζεται βασικά από τρία στοιχεία: τον τρόπο καταγραφής της, τον δείκτη αξιολόγησης της και το όριο ως προς την τιμή αποδοχής του δείκτη ομαλότητας. Διεθνώς, οι προδιαγραφές ομαλότητας συνήθως δεν σχετίζονται απευθείας με την αντίληψη των χρηστών μιας οδού για το προσφερόμενο σε αυτούς επίπεδο ποιότητας κύλισης. Χρησιμοποιώντας απλώς εμπειρίες ως προς το ποιες είναι οι προσδοκίες των χρηστών για την ποιότητα κύλισης ενός οδοστρώματος, θέτονται κατά περίπτωση, όρια ομαλότητας σύμφωνα με την πολιτική του Κυρίου ή του αρμόδιου φορέα διαχείρισης του έργου [95, 96]. Επομένως η διαδικασία θέσπισης ορίων ομαλότητας δεν είναι μονοσήμαντη. Κατά συνέπεια υπάρχει πάντα η ανάγκη ανάπτυξης ενός αναλυτικού οδηγού προδιαγραφών που να καλύπτει τη χρήση ενός συστήματος για τον έλεγχο, την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της ομαλότητας σε σχέση με κατάλληλα όρια του χρησιμοποιούμενου δείκτη ομαλότητας [59], αλλά και των παραμέτρων επιρροής του [97]. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI και πολλές προδιαγραφές ομαλότητας κάνουν αναφορά σε αυτόν.

Επίσης πολλές προδιαγραφές έργων κατασκευής οδοστρωμάτων ή ακόμη και Συστημάτων Παραχώρησης (BOT/PPP) [7, 98] για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων δεν αναφέρονται σε δείκτες ομαλότητας, αλλά σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειάς τους. Θέτουν δηλαδή όρια υψομετρικής απόκλισης της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, μετρούμενη με συγκεκριμένα όργανα ή διαδικασία. Για παράδειγμα, σε ελληνικές τεχνικές συγγραφές υποχρεώσεων για τη συντήρηση οδοστρωμάτων, σε υφιστάμενες οδούς εντεταγμένες σε συστήματα παραχώρησης –οι οποίες βασίζονται σε διεθνείς προδιαγραφές– αναφέρεται ότι, «η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειας ενός τρίμετρου πήχη δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5 mm». Τέτοιου είδους προδιαγραφές, οι οποίες είναι καθιερωμένες διεθνώς, είναι δυνατό να εξασφαλίζουν μια ομαλή επιφάνεια οδοστρώματος, αλλά είναι δύσκολη η πραγματοποίηση της υπόψη διαδικασίας μετρήσεων καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Στην πράξη, η εφικτότητα τέτοιου είδους μετρήσεων περιορίζεται μόνο κατά την κατασκευή ενός νέου οδοστρώματος, όπου δειγματοληπτικοί έλεγχοι της ομαλότητας πραγματοποιούνται για τη διασφάλιση της ποιότητας της κατασκευής.

Η θέσπιση προδιαγραφών που εξασφαλίζουν ικανοποιητικά επίπεδα ομαλότητας με τη χρήση δεικτών, όπως ο δείκτης IRI, αναμφίβολα απλοποιεί τη διαδικασία ελέγχου, αξιολόγησης και αποδοχής ή όχι της προσφερόμενης προς τους χρήστες ποιότητας κύλισης. Το βασικό πλεονέκτημα του δείκτη IRI, όπως ήδη έχει αναφερθεί, είναι το γεγονός ότι μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από οποιοδήποτε σύστημα καταγραφής της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Επίσης, στο σχήμα 3.6, περιγράφεται η κλίμακα που δίνει τη γενική κατάταξη του δείκτη IRI, ανάλογα με την κατάσταση του οδοστρώματος [31]. Όμως ο καθορισμός μιας συγκεκριμένης τιμής για την παραλαβή ενός νέου ή αποκαταστημένου οδοστρώματος ή για την επέμβαση σε ένα εν λειτουργία οδόστρωμα, αποτελεί πάντα ένα καίριο θέμα, το οποίο δεν καλύπτει η υπόψη κλίμακα. Επίσης, ένα ερώτημα είναι, η εφικτότητα αντιστοίχισης ενός γεωμετρικά προσδιοριζόμενου ορίου ομαλότητας και ενός ορίου αποδοχής της ποιότητας κύλισης ενός οδοστρώματος με βάση τον δείκτη IRI.

Δεδομένων των παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο, αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για την ανάπτυξη κριτηρίων αξιολόγησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων σε κάθε φάση λειτουργία τους. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας στηρίζονται σε στοιχεία ομαλότητας, τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια οδικού πειράματος, του οποίου η οργάνωση εντάσσεται στις ερευνητικές δραστηριότητες του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν συστηματικά συνυπολογίζοντας τον παράγοντα *ταχύτητα κίνησης*.

6.2 Παραδοχές

Δεδομένου ότι ο δείκτης IRI είναι άμεσα συνδεδεμένος με τις δονήσεις ενός οχήματος, έχει καθιερωθεί ως ένα σταθμισμένο μέτρο για την αξιολόγηση της ομαλότητας [99]. Όμως, ο δείκτης IRI δεν προσφέρει αρκετές πληροφορίες για τη μορφή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος δηλαδή του «προφίλ», ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ατελειών στην επιφάνεια του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα μπορεί να γίνει με τη διαδικασία μέτρησης με πήχη. Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν στην σκέψη ότι, για τον προσδιορισμό τιμών IRI ως όρια ελέγχου για την αποδοχή της ομαλότητας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, τόσο τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης των κυματισμών, όσο και η διαδικασία μέτρησης της μέγιστης επιτρεπόμενης απόστασης μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και οποιουδήποτε σημείου ενός καθορισμένου μήκους πήχη.

Θεωρώντας λοιπόν ότι το «προφίλ» ενός οδοστρώματος είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη με μήκος κύματος λ και πλάτος A , οι αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι δυνατό να μετρηθούν με την εφαρμογή ενός πήχη μήκους λ . Η μέγιστη τότε απόσταση (d) μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του εφαρμοζόμενου πήχη θα είναι:

$$d = 2 \cdot A \quad (6.1)$$

Βασιζόμενοι στις εξισώσεις 3.2 και 6.1 η σχέση μεταξύ της μέγιστης απόστασης d και της μέγιστης κλίσης του θεωρούμενου ημιτονοειδούς κυματισμού της επιφάνειας του οδοστρώματος εκφράζεται ως ακολούθως:

$$S = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \quad (6.2)$$

Επομένως, αν ορισθεί μια τιμή για τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση (d) μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και του εφαρμοζόμενου πήχη, τότε μπορεί να υπολογιστεί βάσει της εξίσωσης 6.2, η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης κλίσης του κυματισμού που θεωρητικά περιγράφει την επιφάνεια του οδοστρώματος.

Επιπροσθέτως, η φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού των κλισιομετρικών αποκλίσεων. Μέτρο έκφρασης των κλισιομετρικών αποκλίσεων αποτελεί η τετραγωνική ρίζα του τετραγώνου της μέσης κλίσης των κυματισμών της επιφάνειας του οδοστρώματος (RMS κλισιομετρικών αποκλίσεων). Στο πλαίσιο λοιπόν προσδιορισμού μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών ορίζεται ότι η υπολογιζόμενη τιμή RMS δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση S [100].

Με δεδομένα τα παραπάνω αναπτύσσεται ακολούθως μια διαδικασία για τον συσχετισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης κλίσης S και του δείκτη ομαλότητας IRI.

6.3 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

6.3.1 Περιγραφή συλλογής δεδομένων

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν πειραματικά οδοστρώματα μήκους περίπου 200 μέτρων, στα οποία μετρήθηκε η κατά μήκος ομαλότητα με το σύστημα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Το συγκεκριμένο μήκος των 200 μέτρων επιλέχθηκε με βάση την απαίτηση τα υπό διερεύνηση τμήματα να περιλαμβάνουν όλους τους κυματισμούς ομαλότητας (0.5 έως 50 μέτρα) και θεωρήθηκε ως μέγιστο μήκος αναφοράς του δείκτη IRI κατά μήκος μιας οδού. Τα τμήματα οδοστρωμάτων επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά δείγματα τεσσάρων ηλικιών

οδοστρώματος, οι οποίες ορίστηκαν ως εξής: (α) μικρότερης του 1 έτους, (β) 1 – 5 ετών, (γ) 5-10 ετών και (δ) μεγαλύτερης των 10 ετών. Η κάθε κατηγορία οδοστρώματος περιελάμβανε 40 τμήματα (σύνολο δείγματος: 160 οδικά τμήματα). Τα τμήματα αυτά βρίσκονται επί του αυτοκινητοδρόμου ΠΑΘΕ, στους οδικούς άξονες Αθηνών-Κορίνθου και Αθηνών-Λαμίας και επί της Αττικής Οδού.

6.3.2 Διαδικασία ανάλυσης

Η επεξεργασία και ανάλυση της καταγεγραμμένης ομαλότητας πραγματοποιήθηκε κατά μήκος του δεξιού ίχνους τροχού. Συγκεκριμένα, αφενός υπολογίστηκε ο δείκτης IRI και αφετέρου αναλύθηκαν φασματικά οι κλισιομετρικές αποκλίσεις των κατά μήκος κατατομών της επιφάνειας των επιμέρους οδοστρωμάτων και υπολογίστηκε ο δείκτης RMS για τους κυματισμούς ομαλότητας που κυμαίνονται από 0.5 έως 50 μέτρα.

Όσον αφορά στον δείκτη IRI, η παράμετρος «ταχύτητα» που υπεισέρχεται στο προσομοίωμα υπολογισμού του θεωρήθηκε ως μεταβλητή. Κατά συνέπεια ο δείκτης IRI υπολογίστηκε με θεώρηση τεσσάρων ενδεικτικών ταχυτήτων: 60, 80, 100 και 120 km/h. Έτσι ορίστηκε για την κάθε ταχύτητα V ο δείκτης ομαλότητας IRI_V . Όμως η ταχύτητα αναφοράς για τον υπολογισμό του IRI είναι 80 km/h. Για το λόγο αυτό διερευνήθηκε η σχέση του δείκτη IRI_V με τον δείκτη IRI για κάθε ταχύτητα [101]. Η συσχέτιση των δύο δεικτών έδωσε γραμμικές σχέσεις της μορφής:

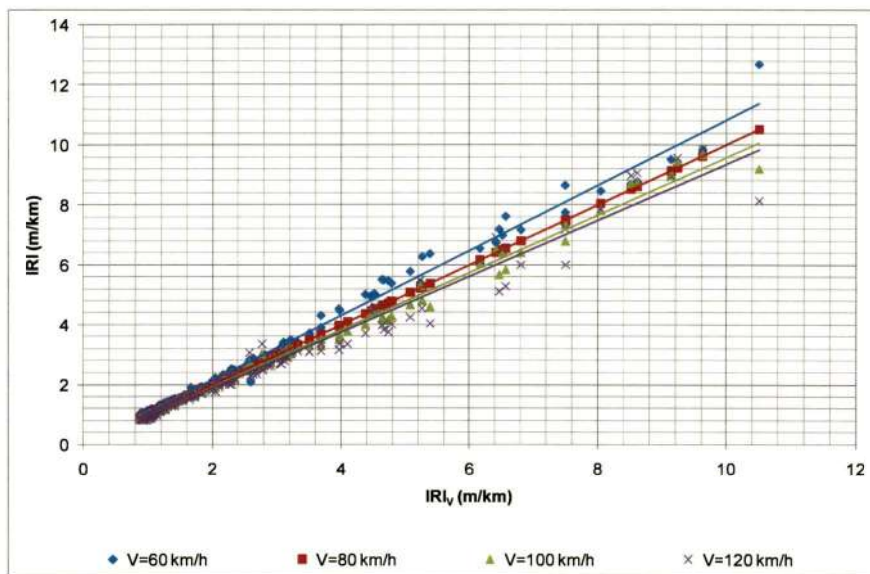
$$IRI = \alpha \cdot IRI_V + \beta \quad (6.3)$$

Για όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι υψηλός (~1). Οι τιμές των σχετικών παραμέτρων των αποτελεσμάτων της γραμμικής συσχέτισης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.1, ενώ οι συσχετίσεις παρίσταται γραφικά στο Σχήμα 6.1.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα συσχέτισης των δεικτών IRI_V και IRI

V (m/km)	α	β	R^2
60	1.084	0.036	0.989
80	1	0	1
100	0.957	0.008	0.992
120	0.933	0.005	0.971

Με βάση τη σχέση 6.3 είναι δυνατή η αναγωγή του δείκτη IRI_V στον δείκτη IRI . Έτσι για κάθε ταχύτητα είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός του δείκτη IRI ως ένας ισοδύναμος δείκτης στην ταχύτητα των 80 km/h, ο οποίος αναφέρεται εφεξής και ως IRI_{σ} .



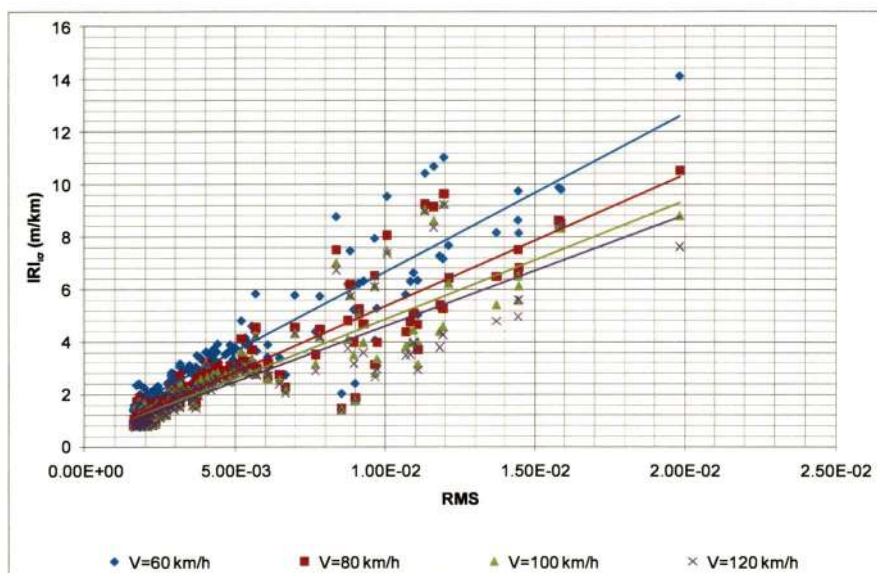
Σχήμα 6.1: Συσχέτιση των δεικτών IRI_V και IRI

Οι υπολογισμένες πλέον τιμές του δείκτη IRI_{σ} συσχετίζονται εν συνεχεία με τους αντίστοιχους δείκτες RMS των κλίσεων που έχουν υπολογιστεί για κάθε τμήμα. Ο συσχετισμός των δύο δεικτών δίνει μια γραμμική σχέση της μορφής .

$$IRI_{\sigma} = \gamma \cdot RMS + \delta \quad (6.4)$$

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα συσχέτισης των δεικτών RMS και IRI_{σ} (IRI)

V (m/km)	γ	δ	R^2
60	602.8	0.643	0.866
80	501.2	0.328	0.836
100	451.0	0.356	0.800
120	422.8	0.360	0.761



Σχήμα 6.2: Συσχέτιση των δεικτών RMS και IRI_{σ}

Παραπάνω, οι τιμές των σχετικών παραμέτρων των αποτελεσμάτων της γραμμικής συσχέτισης περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.2, ενώ οι συσχετίσεις παρίσταται γραφικά στο Σχήμα 6.2. Για όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι περισσότερο από ικανοποιητικός. Άρα η σχέση 6.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια για τον υπολογισμό του δείκτη IRI με βάση τον δείκτη RMS των κλισιομετρικών αποκλίσεων.

Το σύνολο των στοιχείων συσχέτισης περιλαμβάνονται στους Πίνακες 14 και 15 του Παραρτήματος.

6.4 Εκτίμηση ορίων ομαλότητας

Η διαδικασία που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα δίνει τη δυνατότητα συσχετισμού της μέγιστης επιτρεπόμενης απόστασης μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και οποιουδήποτε σημείου ενός καθορισμένου μήκους πήχη με όρια τιμών του δείκτη IRI.

Στην περίπτωση λοιπόν ελέγχου για την αποδοχή της ομαλότητας ενός νέου οδοστρώματος ορίζεται για παράδειγμα σε ελληνικές τυπικές συγγραφές υποχρεώσεων

έργων οδοποιίας –ανάλογες των οποίων υπάρχουν διεθνώς-, ότι «η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειας ενός τετράμετρου πήχη δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3 mm». Με βάση την προαναφερόμενη διαδικασία η απαίτηση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό των ορίων IRI του Πίνακα 6.4, ανάλογα με τη θεωρούμενη ταχύτητα κυκλοφορίας.

Με ανάλογο τρόπο ορίζονται οι μέγιστες τιμές IRI για υφιστάμενα οδοστρώματα σε τεχνικές συγγραφές υποχρεώσεων έργων συντήρησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων όπου ορίζεται ότι «η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειας ενός τρίμετρου πήχη δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5 mm» (Πίνακας 6.5). Διαφορετικά απαιτείται η αποκατάσταση/συντήρηση της επιφάνειας του οδοστρώματος και η επανάκτηση των χαρακτηριστικών της επιθυμητής ποιότητας κύλισης.

Πίνακας 6.4: Υπολογισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές IRI για νέα οδοστρώματα

V (m/km)	IRI (m/km)
60	2.06
80	1.51
100	1.42
120	1.36

Πίνακας 6.5: Υπολογισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές IRI για υφιστάμενα οδοστρώματα

V (m/km)	IRI (m/km)
60	3.80
80	2.95
100	2.71
120	2.57

Σημαντικό στοιχείο επίσης για τον προσδιορισμό των παραπάνω ορίων, είναι το μήκος αναφοράς του δείκτη IRI που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 200 m. Όσο μικρότερο είναι, τόσο πιο πολύ εντοπίζονται οι τοπικές ανωμαλίες. Για το λόγο αυτό το όριο αποδοχής πρέπει να θεσπίζεται σε σχέση με το μήκος αναφοράς του δείκτη IRI. Το μήκος αναφοράς πρέπει να είναι συσχετισμένο με το σκοπό της κατά περίπτωση έρευνας. Αν σκοπός είναι ο

έλεγχος για τη διασφάλιση ποιότητας της κατασκευής σε επίπεδου έργου, το μήκος αναφοράς πρέπει να είναι μικρό π.χ. 10 μέτρα ή 20 μέτρα. Αν σκοπός είναι ο έλεγχος της ποιότητας κύλισης του οδοστρώματος σε επίπεδο άξονα ή δικτύου, τότε το μήκος αναφοράς μπορεί να είναι μεγαλύτερο π.χ. 100 ή 200 μέτρα. Η τιμή του ορίου ομαλότητας πρέπει να μικραίνει με τη μείωση του μήκους αναφοράς.

Πέραν όμως των παραπάνω, κατά τη θέσπιση ορίων ομαλότητας, ειδικά για τον έλεγχο και την παραλαβή ενός οδοστρώματος, μια επιπρόσθετη παράμετρος είναι, ο καθορισμός ποσοστού αποδοχής της ομαλότητας επί του συνόλου της επιφάνειας ενός οδοστρώματος [95]. Η 100% επί της επιφάνειας του οδοστρώματος αποδοχή της ομαλότητας μπορεί να μην είναι ρεαλιστική, στην περίπτωση που το μήκος αναφοράς είναι μικρό, με αποτέλεσμα τον υπερτονισμό των εντοπιζόμενων τοπικών ανωμαλιών. Έτσι, ένα μικρότερο ποσοστό επί της επιφάνειας του οδοστρώματος αποδοχής της ομαλότητας, για παράδειγμα 85%, να είναι ενδεχομένως καταλληλότερο όταν το μήκος αναφοράς είναι μικρό π.χ. 10 μέτρα. Επιπλέον, το ποσοστό αυτό θα μπορούσε να συνδεθεί με μια μορφή επιβράβευσης για την κατασκευή του οδοστρώματος (π.χ. όταν είναι μεγαλύτερο του 95%) ή επιβολής προστίμου ή κυρώσεων προς τον κατασκευαστή (π.χ. όταν είναι μικρότερο του 75%).

7. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ

7.1 Γενικά

Πέραν της αξιολόγησης της ομαλότητας σε κάθε φάση λειτουργίας ενός οδοστρώματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την προστασία του οδοστρώματος και κατ' επέκταση, για τη διασφάλιση της επιτελεστικότητας του, η δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας είναι καθοριστική. Δεδομένων των μειονεκτημάτων των στατιστικών αλγορίθμων πρόβλεψης που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς μέχρι σήμερα σε επίπεδο δικτύου (βλ. κεφάλαιο 1), η διερεύνηση στην παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ενός προκαταρκτικού προτύπου πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας, κυρίως σε επίπεδο έργου, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχές της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών των επιμέρους μιγμάτων των στρώσεων και κατ' επέκταση, του συνόλου των οδοστρωμάτων.

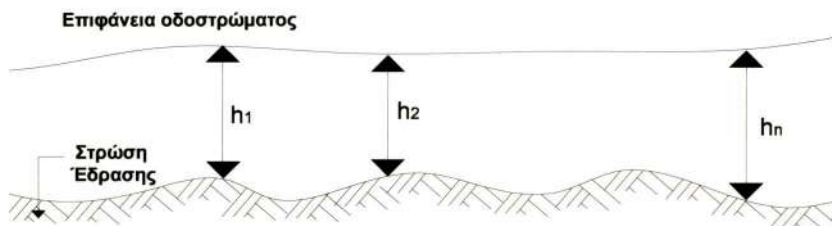
Αν και έχουν γίνει διάφορες απόπειρες διεθνώς για την ανάπτυξη μηχανιστικών προτύπων πρόβλεψης διαφόρων χαρακτηριστικών ή φαινομένων που χαρακτηρίζουν το οδόστρωμα σε βάθος χρόνου λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα είναι η εκτίμηση των παραμενουσών παραμορφώσεων [102], δεν υπάρχει αντίστοιχη θεώρηση για την πρόβλεψη της ομαλότητας. Ίσως αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι, η πλειονότητα των ερευνητών έχουν ταυτίσει την έννοια της ομαλότητας μόνο με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και κατ' επέκταση με τον διεθνή δείκτη ομαλότητας IRI, θεωρώντας ότι η πληροφόρηση που δίνει είναι επαρκής.

Έτσι στο παρόν κεφάλαιο, προτείνεται η προσομοίωση της εξέλιξης της ομαλότητας στηριζόμενη στις αρχές της επιστήμης της μηχανικής, η οποία αφενός μελετά την κίνηση και την επίδραση των δυνάμεων στα σώματα και αφετέρου, εξηγεί τα φαινόμενα με βάση τα φυσικά αίτια. Όταν πρόκειται για τα οδοστρώματα, τα υπό διερεύνηση φαινόμενα είναι οι αποκρίσεις μέσα στο «σώμα» ενός οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις, αποκλίσεις/υποχωρήσεις), ενώ τα φυσικά αίτια είναι τα φορτία και οι ιδιότητες ή τα χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων.

7.2 Θεώρηση-Πρόταση για την προσομοίωση της εξέλιξης της ομαλότητας

Η μηχανική συμπεριφορά των στρώσεων του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου είναι ιδιαίτερα σύνθετη και πολυπαραμετρική. Η προσομοίωση της όμως αποτελεί στοιχείο «κλειδί» για τις διαδικασίες, αφενός βελτιστοποίησης της διατομής κατασκευής του οδοστρώματος και αφετέρου, ασφαλέστερης πρόληψης των απαιτούμενων δράσεων επέμβασης, οι οποίες ενδεχομένως να τροποποιούνται βάσει των αποτελεσμάτων της συστηματικής παρακολούθησης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Με το δεδομένο αυτό, στην παρούσα εργασία τίθεται ένας προβληματισμός και κατ' επέκταση, μια εναλλακτική προσέγγιση για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος, αξιοποιώντας την έως τώρα διεθνή εμπειρία στον τομέα αυτό.

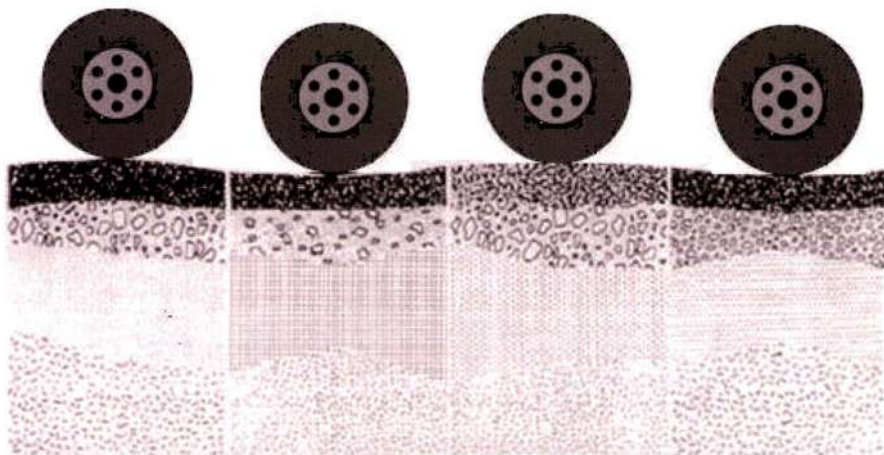
Η προσέγγιση αυτή έχει ως βάση το γεγονός, ότι το πρόβλημα έλλειψης της κατά μήκος ομαλότητας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος αρχίζει ήδη από την κατασκευή του. Η διαμορφωμένη στρώση έδρασης, όσο και καλά να έχει κατασκευαστεί, δεν είναι ποτέ τελείως επίπεδη, αλλά παρουσιάζει κατά μήκος της οδού μια σχετική ανομοιομορφία. Η ανομοιομορφία αυτή (σε υλικά, πάχη κλπ) αν και βελτιώνεται με την προσθήκη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, επηρεάζει τη διαμόρφωση της τελικής επιφάνειας του (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Διαμόρφωση της επιφάνειας του οδοστρώματος

Η έλλειψη ομαλότητας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια αμέσως μετά την κατασκευή του, ακόμη και αν είναι μικρής κλίμακας, αναμένεται να μεγαλώσει με την κυκλοφορία και την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η επιβολή των αξονικών φορτίων κυκλοφορίας σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές συνθήκες οδηγεί, λόγω και της ανομοιογένειας των υλικών των στρώσεων από θέση σε θέση κατά μήκος του οδοστρώματος, μέσω και της διαδικασίας –τουλάχιστον σε αρχικό στάδιο λειτουργίας– επανασυμπύκνωσης των υλικών των επιμέρους μιγμάτων, στη μεταβολή των παχών των

επιμέρους στρώσεων (σχήμα 7.2). Η μεταβολή αυτή γίνεται ακόμη πιο χαρακτηριστική, αν ληφθεί υπόψη ότι, εξ αρχής κατά μήκος μιας οδού τα πάχη των στρώσεων δεν είναι σταθερά από διατομή σε διατομή (σχήμα 7.1 & 7.2). Το στοιχείο αυτό αναδεικνύεται και από την «ανοχή» των προδιαγραφών αποδοχής ή παραλαβής νέων οδοστρωμάτων όσον αφορά στις επιτρεπόμενες αποκλίσεις των παχών και στις διαδικασίες διάστρωσης των στρώσεων [103, 104].



Σχήμα 7.2: Διαφοροποιήσεις της διατομής του οδοστρώματος από θέση σε θέση

Το αποτέλεσμα της επιβολής των αξονικών φορτίων κυκλοφορίας, είναι η δημιουργία παραμενουσών παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις και κατ' επέκταση στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η μεταβλητότητα των επιφανειακών παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με το αρχικό επίπεδο ομαλότητας οδηγεί στη δημιουργία κυματισμών, των οποίων το πλάτος αυξάνεται με την περαιτέρω επιβολή των συνθηκών κυκλοφορίας και περιβάλλοντος, καθώς και την ανομοιομορφη μηχανική απόκριση των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, σε συνδυασμό και με τη μεταβλητότητα των παχών των στρώσεων.

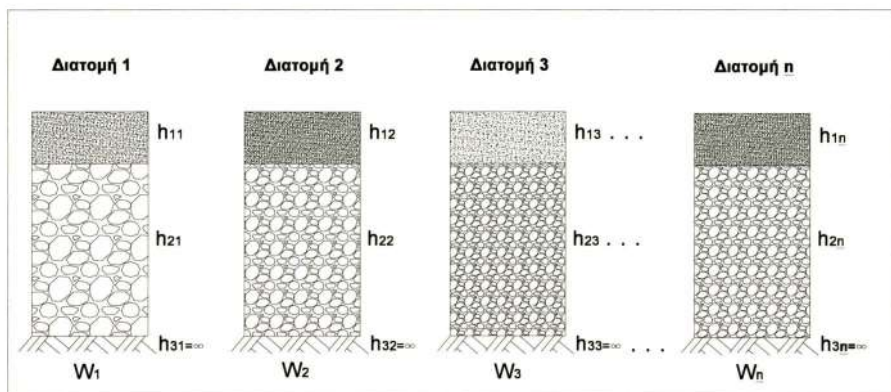
Σε ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στην επιφάνεια του προέρχονται κυρίως τόσο από υποχωρήσεις των ασφαλτικών στρώσεων, όσο και από υποχωρήσεις του εδάφους και των ασύνδετων υλικών. Γενικά αναμένεται δημιουργία παραμενουσών παραμορφώσεων σε κάθε στρώση ενός οδοστρώματος. Η συνολική παραμόρφωση στην επιφάνεια της οδού είναι η συνισταμένη αυτών των επιμέρους παραμενουσών παραμορφώσεων [105, 106].

Αθροιζόμενες λοιπόν όλες οι επιμέρους παραμορφώσεις με την πάροδο του χρόνου και σε συνδυασμό με την αύξηση των αξονικών διελεύσεων φόρτισης, είναι δυνατό να δημιουργήσουν μια σημαντική συνολική παραμένουσα παραμόρφωση στην επιφάνεια ενός ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας, εύκαμπτου οδοστρώματος, γεγονός που επηρεάζει την ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος και κατά συνέπεια την εξυπηρετικότητα/λειτουργικότητα του, όσο και τη δομική αντοχή του. Ως μέτρο έκφρασης της συνολικής παραμόρφωσης ορίζεται το *βάθος παραμόρφωσης* που μετριέται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, στην υπό διερεύνηση θέση [107].

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η προσομοίωση της εξέλιξης της ομαλότητας μέσω της ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος ενός οδοστρώματος, σε βάθος χρόνου λειτουργίας του. Προς χάρη της προσομοίωσης αυτής, ένα εύκαμπτο οδόστρωμα πολλαπλών, επαλλήλων στρώσεων, εμφανίζεται προς απλούστευση ως σύστημα τριών στρώσεων (i), οι οποίες είναι το σύνολο των ασφατικών στρώσεων, η στρώση ασύνδετων υλικών (αμμοχάλικα) και η εδαφική στρώση έδρασης (σχήμα 7.3). Το οδόστρωμα αυτό, αν και είναι ενιαίο, αποτελείται κατά μήκος από στοιχειώδη τμήματα, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά, ενώ οι διατομές τους (j) παρουσιάζουν εύλογες διαφοροποιήσεις, αφενός ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων και αφετέρου, ως προς τα πάχη των στρώσεων (h_{ij}) (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.3: Το οδόστρωμα θεωρούμενο ως σύστημα τριών στρώσεων

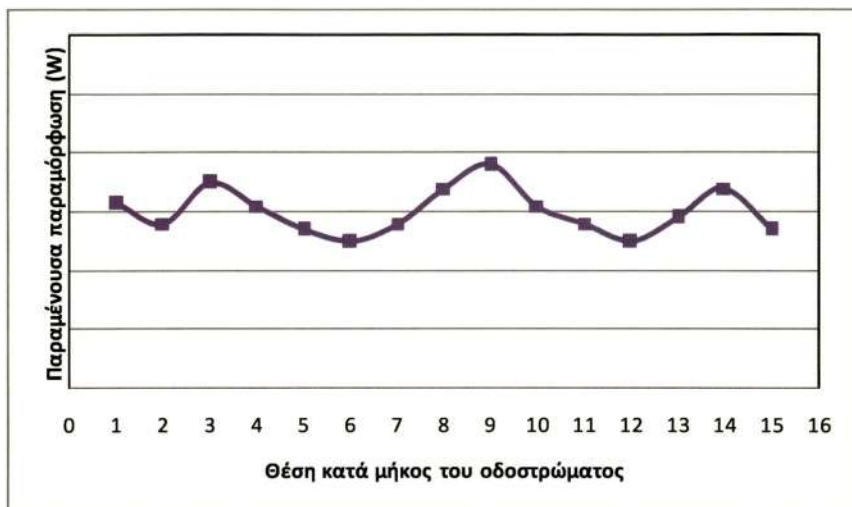


Σχήμα 7.4: Προτεινόμενη θεώρηση προτύπου επιμέρους διατομών κατά μήκος ενός οδοστρώματος

Επομένως βασικές παραδοχές κατά την προτεινόμενη προσομοίωση πρόβλεψης της εξέλιξης της κατά μήκος ομαλότητας ενός οδοστρώματος είναι:

1. Κατά μήκος το οδόστρωμα δεν είναι ομογενές, αλλά διαφοροποιείται ως προς τα χαρακτηριστικά των υλικών και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων
2. Η έλλειψη ομαλότητας ή διαφορετικά, οι αποκλίσεις από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, οφείλονται κατά κύριο λόγο στη μεταβλητότητα των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Για κάθε επιμέρους θεωρούμενη διατομή j ($j=1\dots n$), δεδομένων των χαρακτηριστικών της, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση (W_j) (σχήμα 7.4), η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος και προκύπτει ως το άθροισμα των παραμενουσών παραμορφώσεων της κάθε στρώσης i ($i=1\dots 3$). Το περίγραμμα των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος χαρακτηρίζει τις αποκλίσεις από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια ή διαφορετικά, την ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος (σχήμα 7.5).



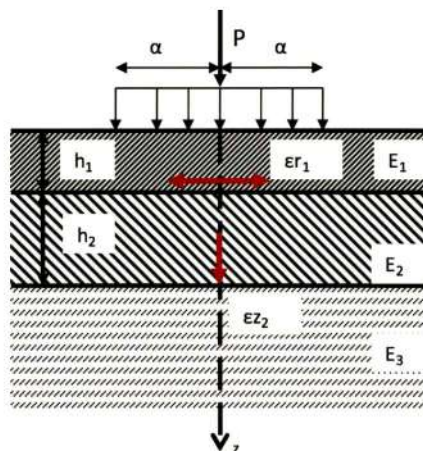
Σχήμα 7.5: Ενδεικτικό περίγραμμα παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας οδοστρώματος / «ομαλότητα»

Η προτεινόμενη έκφραση της ομαλότητας μέσω των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, δημιουργεί αυτόματα την απαίτηση για μια αξιόπιστη εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Η απαίτηση αυτή, οδηγεί περαιτέρω στην ανάγκη μιας μηχανιστικής προσέγγισης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων ως προς την εξέλιξη της ομαλότητας και κατά συνέπεια, στην δημιουργία ενός κατάλληλου μηχανιστικού προτύπου αναπαράστασης του φαινομένου.

7.3 Διερεύνηση καταλληλότητας προσομοιώματος εκτίμησης παραμενουσών παραμορφώσεων

Ως γνωστόν, η θεωρία των ελαστικών επαλλήλων στρώσεων [108] αποτελεί ως σήμερα τη βάση για την ανάλυση στην πράξη ευκάμπτων οδοστρωμάτων, τόσο στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης νέων οδοστρωμάτων, όσο και για τη δομική αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση, για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής τους. Με αυτή τη θεώρηση είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί με αρκετή επιτυχία το φαινόμενο της κόπωσης των ασφαλομιγμάτων. Στην περίπτωση αυτή, το όριο της ελαστικής αντοχής στη θεωρία της μηχανικής του συνεχούς μέσου εκφράζεται ικανοποιητικά μέσω της εκτίμησης των ελαστικών ανηγμένων παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας

(σχήμα 7.6). Επιπλέον, η αρχή αυτή προσομοιώνει, αν και με περιορισμένες δυνατότητες, τη μηχανική συμπεριφορά, ως προς τις παραμένουσες υποχωρήσεις, των ασύνδετων μη κατεργασμένων στρώσεων και κατ' επέκταση, της ευρύτερης εδαφικής στρώσης έδρασης του οδοστρώματος.



Σχήμα 7.6: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ευκάμπτου οδοστρώματος [42]

Και στις δύο περιπτώσεις αστοχίας (σχήμα 7.6), θεωρείται ότι ο χρόνος επιβολής του φορτίου φόρτισης του οδοστρώματος, δηλαδή επαφής επισώτρου και ασφαλιτοάπτητα κυκλοφορίας είναι απειροστός [109]. Έτσι η φόρτιση αποκτά ψευδοστατικό-ελαστικό χαρακτήρα.

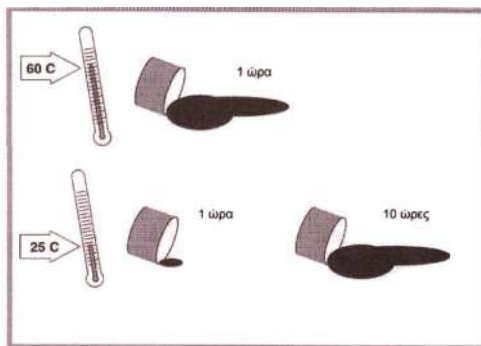
Όμως, η προσέγγιση αυτή δε μπορεί να θεωρηθεί ως επαρκής όταν πρόκειται για διερεύνηση των παραμενουσών παραμορφώσεων σε ένα οδόστρωμα, οι οποίες περιλαμβάνουν και την κυρίαρχη συμβολή των ασφαλικών στρώσεων στο σύνολο της αστοχίας στην επιφάνεια του. Και είναι τόσο μεγαλύτερη η συμβολή αυτή, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος επιβολής των αξονικών φορτίων στο οδόστρωμα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιρρέπεια του ασφαλικού συνδετικού σε παραμένουσες παραμορφώσεις λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς του, όπως αναφέρεται εκτός άλλων στις πηγές [105, 110, 111]]. Τα φαινόμενο αυτό αυξάνει, όσο αυξάνεται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων [111]. Για τον λόγο αυτόν εξάλλου αποφεύγεται, για παράδειγμα, η χρήση ασφαλικών στρώσεων σε δάπεδα διοδίων, στάθμευσης αεροδρομίων κλπ.

Σε αντίθεση με πολλά παραδοσιακά δομικά υλικά, όπως σίδηρο, τσιμέντο κλπ, των οποίων οι ιδιότητες είναι σταθερές, η συμπεριφορά της ασφάλτου υπό την επίδραση της διάρκειας

φόρτισης και της θερμοκρασίας μεταβάλλεται από ελαστική σε ιξώδη. Όταν η εντατική κατάσταση (επιβολή τάσης) συμβαίνει για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και ταυτόχρονα, η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ασφαλτος συμπεριφέρεται ως καθαρά ελαστικό (ψαθυρό) υλικό. Αντίθετα, όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα ή/και η θερμοκρασία είναι υψηλή, η συμπεριφορά της ασφάλτου είναι ιξωδοελαστική. Στην πραγματικότητα όμως, οι συνθήκες που εμφανίζονται στην πράξη είναι μια ενδιάμεση κατάσταση των παραπάνω συνθηκών.

Τα προαναφερόμενα ως προς τη συμπεριφορά και ροή της ασφάλτου ως συνδετικού υλικού του ασφαλτομίγματος σκιαγραφούνται και στο σχήμα 7.7 [112], όπου αποδίδεται η επίδραση τόσο της θερμοκρασίας, όσο και του χρόνου φόρτισης ενός ασφαλτικού υλικού. Επιπλέον, αποδίδεται και ο συσχετισμός μεταξύ της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης. Η συμπεριφορά του ασφαλτικού συνδετικού υλικού ενός ασφαλτομίγματος σε υψηλές θερμοκρασίες για μικρό χρόνο φόρτισης είναι ισοδύναμη με τη συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρόνο φόρτισης.

Κατά συνέπεια, από πλευρά μηχανικής ρεολογικής συμπεριφοράς, η ασφαλτος και κατ' επέκταση το ασφαλτόμιγμα, συμπεριφέρεται ως ιξωδοελαστικό υλικό και οι μηχανικές ιδιότητές του εξαρτώνται τόσο από τη θερμοκρασία (T°), όσο και από το χρόνο (t) επιβολής του φορτίου και επομένως και της τάσης (σ).



Σχήμα 7.7: Η επίδραση θερμοκρασίας και χρόνου φόρτισης στη συμπεριφορά της ασφάλτου [112]

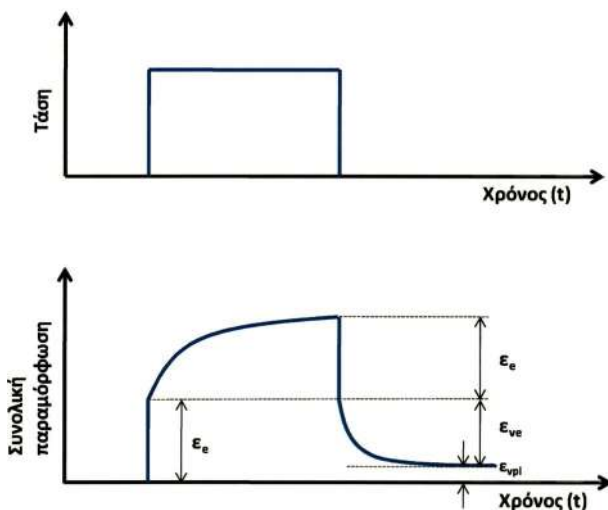
Επομένως, λόγω της ιξωδοελαστικής θεώρησης, η συνολική παραμόρφωση ενός ασφαλτομίγματος μιας επιμέρους ασφαλτικής στρώσης σε σχέση με το χρόνο ($\epsilon_p(t)$) περιγράφεται στο σχήμα 7.8, ενώ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\epsilon_p(t) = \epsilon_e + \epsilon_v(t) = \epsilon_e + \epsilon_{ve} + \epsilon_{vpl} \quad (7.1.)$$

όπου,

ϵ_e : ελαστική παραμόρφωση, $\epsilon_v(t)$: ιξώδης παραμόρφωση, ϵ_{ve} : ιξωδοελαστική παραμόρφωση και ϵ_{vpl} : ιξωδοπλαστική παραμόρφωση.

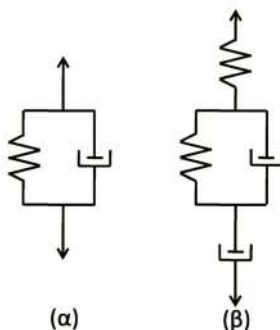
Όπως προκύπτει από το σχήμα 7.8, αρχικά, με την επιβολή της τάσης λόγω φορτίου, έχουμε μια άμεση απόκριση του υλικού λόγω ελαστικής παραμόρφωσης (ϵ_e), η οποία ουσιαστικά αποτελεί την κλασσική θεώρηση ελαστικής ανάλυσης οδοστρωμάτων πολλαπλών, ελαστικών στρώσεων. Η συνέχιση της επιβολής του φορτίου και κατ' επέκταση της τάσης για ένα συγκεκριμένο χρόνο (t_1), υπό την ευρύτερη έννοια του κινούμενου φορτίου [113], εξακολουθεί να προκαλεί παραμόρφωση ιξώδους μορφής. Μέσω του φαινομένου της χαλάρωσης [114] τη χρονική στιγμή t_1 λόγω αποφόρτισης, το υλικό και κατ' επέκταση το ασφαλτόμιγμα αποκρίνεται μέσω της ιξώδους παραμόρφωσης ($\epsilon_v(t)$), η οποία περιλαμβάνει ένα κύριο ιξωδοελαστικό μέρος (ϵ_{ve}) και ενδεχομένως, ένα περιορισμένο, μη επιστρέψιμο μέρος (ϵ_{vpl}). Σημειώνεται ότι συχνά στην πράξη υπεισέρχεται το φαινόμενο της επανάκτησης των χαρακτηριστικών της ασφάλτου, το οποίο αντισταθμίζει μέχρι ενός σημείου το μη επιστρέψιμο μέρος των παραμορφώσεων λόγω φόρτισης [112].



Σχήμα 7.8: Θεώρηση ρεολογικής συμπεριφοράς ασφαλτικού υλικού λόγω επιβολής σταθερού φορτίου [111]

Το μαθηματικό προσομοίωμα της μηχανικής και ιδιαίτερα της ρεολογίας που αναπαριστά το παραπάνω φαινόμενο φόρτισης-ερπυσμού και ανάκτησης-χαλάρωσης ασφαλτικού

υλικού, προκύπτει από συνδυασμό του αναλόγου υπό τη μορφή ελατηρίου του Hooke και του αναλόγου του ιξώδους/ρευστού-ιξωδοπλαστικού του υλικού κατά Newton, ως το συνδυαστικό μηχανιστικό προσομοίωμα κατά Kelvin-Voigt (σχήμα 7.9 (α)) και της επέκτασης αυτού κατά Burger (σχήμα 7.9 (β)) [115]. Τα παραπάνω επεκτείνονται και στην περίπτωση της μηχανικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων [111].



Σχήμα 7.9: Προσομοίωμα κατά Kelvin-Voigt (α) και κατά Burger (β) [115]

Στο σημείο αυτό, αναφέρεται ότι η λεγόμενη ιξωδοπλαστική παραμόρφωση εξακολουθεί να αποτελεί ως σήμερα, ένα εξαιρετικά πολύπλοκο και σύνθετο μαθηματικό πρόβλημα της μηχανικής που δεν περιορίζεται σε θέματα ασφάλτου [102]. Τα τελευταία χρόνια, ερευνητές στα οδοστρώματα έχουν αποπειραθεί με τη βοήθεια σύνθετων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων να δώσουν λύση σε θέματα ιξωδοπλαστικής (μη γραμμικής) μηχανικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων. Όμως σχετικές πρόσφατες εξελιγμένες έρευνες στο πεδίο αυτό, κατέδειξαν ότι υπάρχουν κάποια θετικά βήματα [116], τα οποία όμως περιορίζονται αυστηρά στη σφαίρα της θεμελιώδους εργαστηριακής έρευνας και προσομοίωσης μιγμάτων, βασισμένης σε εξειδικευμένες και μη τυποποιημένες δοκιμές.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που εξηγούν την αργή εξέλιξη της επιστήμης των οδοστρωμάτων στο πεδίο αυτό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, σύμφωνα και με την εμπειρία συμμετοχής του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ σε σχετική επιτροπή της RILEM, μερικούς από αυτούς τους λόγους είναι η χρονοβόρα λογισμική διαδικασία που απαιτεί η αξιοποίηση σύνθετων πρότυπων πεπερασμένων στοιχείων [117], ο παράγοντας εναρμονισμού μεταξύ των δοκιμών στο εργαστήριο από τους διάφορους ερευνητές, καθώς και η ανάγκη συμφωνίας ως προς την αποδοχή καταστατικού προσομοιώματος της μηχανικής για τα υλικά [116]. Είναι προφανές λοιπόν ότι, χρειάζεται ακόμη ιδιαίτερα αρκετός χρόνος, προκειμένου η επιστήμη των οδοστρωμάτων να οδηγηθεί στην ανάπτυξη ανάλογων προτύπων ή

προτύπων που εκφράζουν ικανοποιητικά την επιτόπου συμπεριφορά των οδοστρωμάτων σε κλίμακα 1:1 ((Real Loading Testing: RLT) ή έστω εναλλακτικά σε εγκαταστάσεις τύπου ελεγχόμενης επιταχυνόμενης φόρτισης (ALF: Accelerating Loading Facilities).

Αξίζει να τονισθεί ότι ανάλογες, σχετικά πρόσφατα απόπειρες, στο πλαίσιο του πολυσυζητημένου νέου οδηγού του AASHTO [118], δεν κατέστησαν δυνατή μια ολοκληρωμένη πρακτική απάντηση στο θέμα, τουλάχιστον όσον αφορά στις παραμένουσες παραμορφώσεις. Γενικά, μέχρι σήμερα [119] οι έρευνες συνεχίζονται σε αυστηρά προκαταρκτικό επίπεδο θεμελιώδους πειραματικής επιστημονικής διαδικασίας [120]. Το θέμα αυτό αναμένεται να αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικής ενασχόλησης στο μέλλον. Κατά συνέπεια κρίνεται ότι δεν είναι σκόπιμο να γίνει περαιτέρω ανάπτυξη του θέματος στην παρούσα εργασία, καθώς ξεπερνάει το στόχο της.

Με δεδομένα όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία, η διερεύνηση για την ανεύρεση ενός αντιπροσωπευτικού προσομοίωμα έκφρασης της ιξώδους-ρεολογικής συμπεριφοράς της ασφάλτου, για την πρόβλεψη και εκτίμηση των παραμορφώσεων στη διάρκεια του χρόνου ζωής ενός οδοστρώματος, οδήγησε στην επιλογή του συστήματος VESYS (Visco-Elastic SYStem) [121]. Πρόκειται για ένα διεθνώς αποδεκτό προσομοίωμα που βασίζεται στη θεώρηση ιξωδοελαστικών συμπεριφοράς των υλικών των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων ενός τυπικού ευκάμπτου οδοστρώματος, το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε από τη Federal Highway Administration (FHWA), ενώ ακολούθησαν διάφορες τροποποιήσεις [122].

Η αδυναμία, λόγω πολυπλοκότητας και χρονοβόρας εφαρμογής, των αλγορίθμων που βασίζονται στα πεπερασμένα στοιχεία, ενισχύει τη χρηστικότητα του συστήματος VESYS, το οποίο έχει διαχρονικά υποστεί διάφορες βελτιώσεις προς όφελος της εφαρμοσμένης έρευνας. Αξίζει να τονισθεί ότι, τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα εφαρμογής του VESYS στην πράξη είναι ιδιαίτερα θετικά [123, 124, 125]. Οι βασικές αρχές του υπόψη συστήματος, που επιλέγεται ως προσομοίωμα για την πρόβλεψη των παραμενουσών παραμορφώσεων, στην επιφάνεια ενός οδοστρώματος και κατά συνέπεια για την πρόβλεψη της κατά μήκος ομαλότητας, παρουσιάζονται στην ακόλουθη ενότητα.

7.4 Αρχές προτεινόμενου προσομοιώματος μηχανικής ανάλυσης

Με δεδομένο το πλαίσιο που ήδη τέθηκε για την εκτίμηση του περιγράμματος των τιμών παραμένουσας παραμόρφωσης και κατ' επέκταση της ομαλότητας κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, επιλέχθηκε για τον υπολογισμό των παραμενουσών

παραμορφώσεων η εξελεγμένη μορφή του συστήματος VESYS [121]. Το υπόψη σύστημα το οποίο αφορά σε μηχανιστικά προσομοιώματα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, βασίζεται ως προς το μέρος των παραμενουσών παραμορφώσεων, στην ιξωδοελαστική θεώρηση των υλικών των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων ενός υπό ανάλυση οδοστρώματος.

Βασικές παραδοχές του συστήματος προσομοίωσης είναι, αφενός ότι η πρόβλεψη αφορά στο μέγιστο βάθος της παραμόρφωσης και αφετέρου ότι, η μορφολογία της παραμόρφωσης εγκάρσια της οδού δεν λαμβάνεται υπόψη. Η μεθοδολογία στην οποία στηρίζεται το προτεινόμενο σύστημα έχει ως βασική υπόθεση ότι, η εξέλιξη στο χρόνο της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι μια συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων αξονικών φορτίσεων N , μέσω των γενικών καταστατικών αρχών της εργαστηριακής δοκιμής ερπυσμού-χαλάρωσης [115, 126] και λαμβάνει τη γενική μορφή:

$$\varepsilon_a(N) = I \cdot N^S \quad (7.2)$$

Όπου I και S είναι οι σταθερές των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων και $\varepsilon_a(N)$ η αθροιστική (accumulated) παραμόρφωση λόγω επιβολής απλού αξονικού φορτίου κατά τη $N^{\text{η}}$ επανάληψη φόρτισης.

Παραγωγίζοντας τη σχέση 7.2 ως προς N και διαιρώντας αμφότερα τα μέρη με την ελαστική πειραματική παραμόρφωση ε_e στη $200^{\text{η}}$ επανάληψη, προκύπτει η παραμένουσα παραμόρφωση $\varepsilon_{p_i}(N)$ λόγω μονής φόρτισης (δηλ. στην $N^{\text{η}}$ επανάληψη φόρτισης) ως εξής:

$$\frac{1}{\varepsilon_e} \frac{d\varepsilon_a(N)}{dN} = \frac{1}{\varepsilon_e} \frac{d(I \cdot N^S)}{dN} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\varepsilon_e} \varepsilon_p(N) = \frac{I \cdot S}{\varepsilon_e} N^{S-1} \Rightarrow$$

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_e \cdot \mu \cdot N^{-\alpha} \quad (7.3)$$

όπου μ είναι η παράμετρος παραμενουσών παραμορφώσεων που εκφράζει τη σταθερά της αναλογίας μεταξύ παραμενουσών και ελαστικών παραμορφώσεων και α είναι η παράμετρος παραμενουσών παραμορφώσεων που εκφράζει το ποσοστό της μείωσης της

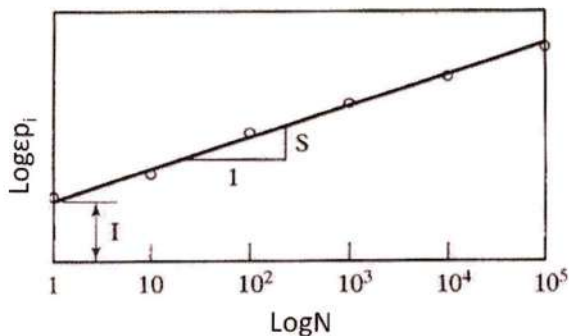
παραμένουσας παραμόρφωσης σε σχέση με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων φόρτισης.

Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για κάθε στρώση i του οδοστρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{pi} = \int_0^N \varepsilon_{pi}(N) dN = \varepsilon_{ei} \cdot \mu_i \cdot \frac{N^{1-\alpha_i}}{1-\alpha_i} \quad (7.4)$$

Η λογαρίθμηση της εξίσωσης 7.4 δίνει τη σχέση 7.5, η οποία δείχνει ότι η μεταβλητή $\log \varepsilon_{pi}$ είναι ανάλογη της μεταβλητής $\log N$ (σχήμα 7.10).

$$\log \varepsilon_{pi} = \log\left(\frac{\varepsilon_{ei} \cdot \mu_i}{1-\alpha_i}\right) + (1-\alpha_i) \log N \quad (7.5)$$



Σχήμα 7.10: Σχέση των μεταβλητών $\log \varepsilon_{pi}$ και $\log N$

Η κλίση (S_i) της γραμμής αναλογίας του σχήματος 7.10 είναι:

$$S_i = 1 - \alpha_i \quad (7.6)$$

Άρα,

$$\alpha_i = 1 - S_i \quad (7.7)$$

Η ελάχιστη τιμή της μεταβλητής $\log \varepsilon_{\rho_i}$, η οποία συμβολίζεται με I προκύπτει για $N=1$, το οποίο δίνει:

$$I_i = \frac{\varepsilon_{ei} \cdot \mu_i}{1 - a_i} \quad (7.8)$$

Οπότε

$$\mu_i = \frac{I_i \cdot S_i}{\varepsilon_{ei}} \quad (7.9)$$

Οι προηγούμενες εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των σταθερών μ_i και a_i για κάθε στρώση i . Η ευρύτερη ερμηνεία που αποδίδεται στα a και μ για τις δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης, μέσω της κλίσης και της διαφοράς ύψους, όπως υπολογίζονται με βάση το σχήμα 7.10, θεωρείται ομοειδής με τις αντίστοιχες θεωρήσεις ανάπτυξης καταστατικών νόμων αστοχίας σε κόπωση ασφατομιγμάτων [127]. Επίσης αναφέρεται ότι, παλαιότερες επισταμένες έρευνες, τόσο στο εργαστήριο όσο και επιτόπου, για τον προσδιορισμό των υπόψη παραμέτρων, θεωρούν το οδόστρωμα ως ένα σύστημα στρώσεων με ενιαία χαρακτηριστικά παραμόρφωσης των υλικών των στρώσεων [126]. Όμως, μια τέτοια απλουστευτική θεώρηση δεν ανταποκρίνεται πλέον στην πραγματικότητα και γι' αυτό δεν ελήφθη υπόψη στην παρούσα έρευνα.

Στο πλαίσιο του επιλεγμένου συστήματος ανάλυσης, το μέτρο παραμόρφωσης των επιμέρους υλικών για φόρτιση και αποφόρτιση σε ερπυσμό-χαλάρωση ($E_i(N)$) εκτιμάται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_i(N) = \frac{E_{ei}}{1 - \mu_i N^{-a_i}} = E_{ei} \cdot \frac{N^{a_i}}{N^{a_i} - \mu_i} \quad (7.10)$$

Όπου E_{ei} το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης i , N ο αριθμός των αξονικών διελεύσεων και μ_i και a_i οι σταθερές της στρώσης i .

Η σχέση 7.10 αρχικά διερευνήθηκε και σχολιάστηκε στην πηγή [40] και επιβεβαιώθηκε από μεταγενέστερες έρευνες [111, 122].

Μέσω του παραπάνω μέτρου παραμόρφωσης δίνεται η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη εκτός από τον παράγοντα των διελεύσεων N , τόσο η θερμοκρασία (T°), όσο και ο χρόνος (t), λόγω της ιξωδοελαστικής θεώρησης και η συχνότητα (f) φόρτισης.

Αξίζει να τονισθεί ότι, στη νέα εξελιγμένη μορφή του υπόψη συστήματος, το νερό/υγρασία στη στρώση έδρασης και κατ' επέκταση στις στρώσεις από ασύνδετο υλικό, λειτουργεί από πλευράς μηχανικής, κατά κάποιο τρόπο, ως ιξωδοελαστικό «ψευδοσυνδετικό» ρεολογικής υφής, υπό την ευρύτερη έννοια των καλά συμπυκνωμένων και επάλληλα κατασκευασμένων στρώσεων. Η αρχή αυτή βασίζεται εκτός άλλων στη θεώρηση που περιλαμβάνεται στην πηγή [128], όπου τεκμηριώνεται συστηματικά η επιλογή της ιξωδοελαστικής θεώρησης για την προσομοίωση και αντιμετώπιση των τροχοαυλακώσεων στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η θεώρηση αυτή έχει επανεπιβεβαιωθεί από πρόσφατες θεμελιώδεις έρευνες [102].

Όσον αφορά στη κλασσική θεώρηση υποχωρήσεων/καθιζήσεων της γεωτεχνικής υποδομής-έδρασης και κατ' επέκταση των βασικών αρχών που αναφέρονται στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας [129, 130] (σχήμα 7.6), αυτή λαμβάνεται υπόψη από το προτεινόμενο σύστημα, καθώς περιλαμβάνει ως υπορουτίνα τον υπολογισμό των ψευδοελαστικών υποχωρήσεων/παραμορφώσεων σε σύστημα πολλαπλών στρώσεων.

Κατά συνέπεια, η συνολική ψευδοελαστική υποχώρηση σε κάθε στρώση θεωρείται ότι είναι η συνολική συμπίκνωση της στρώσης, η οποία στη θεωρία των πολλαπλών στρώσεων της μηχανικής του συνεχούς μέσου δίνεται από τη διαφορά των υποχωρήσεων στις διεπιφάνειες της στρώσης. Έτσι για κάθε στρώση, το βάθος παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί, βάσει και της σχέσης 7.4, ως εξής:

$$W_i(N) = \Delta W \cdot \frac{\mu_i}{1 - \alpha_i} N^{(1-\alpha_i)} = (W^+ - W^-) \cdot \frac{\mu_i}{1 - \alpha_i} N^{(1-\alpha_i)} \quad (7.11)$$

όπου,

$W_i(N)$ = συνολική παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης i (μη συμπεριλαμβανομένης της $i+1$ στρώσης έδρασης του οδοστρώματος), η οποία συμβολίζεται επίσης και ως $\varepsilon_{pi}(N)$.

W^+ , W^- = ελαστικές υποχωρήσεις στην πάνω και κάτω διεπιφάνεια της στρώσης αντίστοιχα

μ_i, α_i = παράμετροι παραμενουσών παραμορφώσεων για κάθε υλικό στρώσης

$i = 1 \dots \kappa$, ο αριθμός της στρώσης

Για την ημι-πεπερασμένη στρώση της έδρασης ($\kappa+1$) η εξίσωση (7.11) μετατρέπεται σε:

$$W_{\kappa+1}(N) = W_{\kappa+1}^+ \cdot c \frac{\mu_{\kappa+1}}{1 - \alpha_{\kappa+1}} N^{(1 - a_{\kappa+1})} \quad (7.12)$$

όπου $W_{\kappa+1}(N)$ είναι η υποχώρηση της στρώσης έδρασης, $W_{\kappa+1}^+$ η ελαστική υποχώρηση της πάνω διεπιφάνειας της στρώσης έδρασης και c είναι ο λόγος των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, λόγω επιβολής φορτίου πολλαπλών αξόνων και μονού άξονα αντίστοιχα.

Κατόπιν τούτων, είναι δυνατό να υπολογιστεί το βάθος W της συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης σε ένα δεδομένο σημείο της επιφάνειας του οδοστρώματος, ως το άθροισμα των παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια της κάθε στρώσης [111, 131].

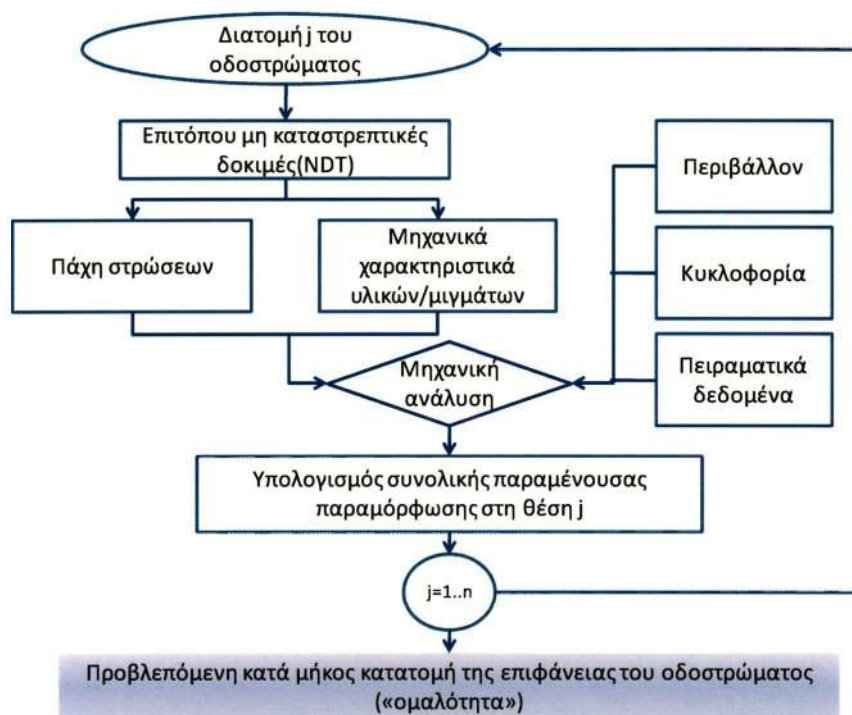
$$W = W(N) = \sum_{i=1}^{\kappa+1} W_i(N) \quad (7.13)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ενεργοποιούνται, μέσω του λογισμικού συστήματος, για τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια των τμημάτων στοιχειώδους μήκους, προτείνοντας ότι η κατά μήκος απεικόνιση τους αναπαράγει το επίπεδο ομαλότητας του υπό διερεύνηση οδοστρώματος, όπως χαρακτηριστικά περιγράφεται στο ποιοτικό διάγραμμα του σχήματος 7.5.

7.5 Προκαταρκτικό πρότυπο πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας

Με βάση την προσέγγιση που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, η πρόβλεψη της ομαλότητας βασίζεται στη μηχανική ανάλυση για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Αναπτύσσεται έτσι το προκαταρκτικό πρότυπο ανάλυσης PROviMA (**P**rediction of **R**oughness **v**iewing **M**echanical **A**nalysis), το οποίο αφορά στην προτεινόμενη διαδικασία πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας. Τα βήματα λειτουργίας του προτεινόμενου προτύπου παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 7.11. Βασικό συστατικό του προτεινόμενου προτύπου είναι η προϋπόθεση χρήσης μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) [5, 125] για την καταγραφή των επιτόπου

στοιχείων οδοστρώματος που χρησιμοποιούνται για περαιτέρω ανάλυση. Περισσότερα επί του θέματος αναπτύσσονται στο ακόλουθο κεφάλαιο.



Σχήμα 7.11: Προτεινόμενο πρότυπο πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας: PROviMA

Το προτεινόμενο πρότυπο είναι απαλλαγμένο από τα μειονεκτήματα των στατιστικών αλγορίθμων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Και αυτό γιατί στηρίζεται στα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, τα οποία προσδιορίζονται στην αρχική φάση λειτουργίας μετά την κατασκευή ενός νέου ή την ενίσχυση ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Επίσης, δεν εμπεριέχει στατιστικούς παράγοντες που να χρειάζονται βαθμονόμηση, γεγονός που σχετίζεται με έναν ικανοποιητικό βαθμό αξιοπιστίας.

Η παρούσα προσέγγιση για την πρόβλεψη της ομαλότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος, δίνει έμφαση στον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος. Κατά την προσέγγιση αυτή, τα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων του οδοστρώματος είναι βασικές παράμετροι. Κατά συνέπεια, η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζονται ή υπολογίζονται οι τιμές τους,

υπεισέρχεται στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων ανάλυσης για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, στοιχείο το οποίο επηρεάζει και το προβλεπόμενο επίπεδο ομαλότητας.

Η προτεινόμενη προσέγγιση, πέραν της διαχείρισης της συντήρησης, θα μπορούσε ενδεχομένως να αξιοποιηθεί και για την αξιολόγηση σε επίπεδο έργου των διαφόρων τύπων μιγμάτων των στρώσεων ενός οδοστρώματος κατά το σχεδιασμό του, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση του νέου οδοστρώματος ή η ενίσχυση ενός υφιστάμενου. Με ανάλογο τρόπο, είναι δυνατό να γίνει και η αξιολόγηση διαφόρων προτάσεων διαστασιολόγησης οδοστρώματος ή τεχνολογιών για την αποκατάσταση ενός εν λειτουργία οδοστρώματος μέσω της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του.

Ενδιαφέρον επίσης θα παρουσίαζε η αξιοποίηση του PROvIMA, στο πλαίσιο της θεμελιώδους έρευνας για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς συμβατικών, καθώς και νέων υλικών των μιγμάτων, μέσω της προτεινόμενης προσομοίωσης. Γενικά, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων δεν παύει να είναι ένα αδιαφιλονίκητο θεωρητικό εργαλείο για ερευνητικούς σκοπούς, προκειμένου να αποφασιστεί αν είναι σκόπιμο να γίνει οποιουδήποτε τύπου επένδυση σε επίπονες ή χρονοβόρες δοκιμές στο εργαστήριο, σε εγκαταστάσεις τύπου ALF ή σε επιτόπου δοκιμές (Real Loading Testing: RLT) [119].

8 ΟΔΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ

8.1 Περιγραφή του πειράματος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα για τη διερεύνηση της εφικτότητας πρόβλεψης της εξέλιξης της κατά μήκος ομαλότητας, υπό την έννοια της ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων, σύμφωνα με το προτεινόμενο πρότυπο PROViMA, που αναπτύσσεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πεδίο εφαρμογής της διερεύνησης αποτέλεσε τμήμα του αυτοκινητοδρόμου της Αττικής Οδού (περιοχή σήραγγας Μαύρης Ψρας). Το υπό διερεύνηση οδόστρωμα, το οποίο χαρακτηρίζεται ως οδόστρωμα *μακράς διάρκειας*, είναι κατασκευασμένο με τυπική διατομή ευκάμπτου οδοστρώματος.

Αρχικά, στο πειραματικό οδικό τμήμα, μήκους 350 μέτρων περίπου, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου μετρήσεις με τα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (Non Destructive Testing: NDT) [132] αμέσως μετά την κατασκευή του οδοστρώματος στη λωρίδα κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων. Ελήφθησαν υπόψη οι βασικές αρχές πραγματοποίησης μετρήσεων σε μακράς διάρκειας οδοστρώματα (LTPP) [133]. Η πυκνότητα των μετρήσεων ήταν ανά είκοσι (20) μέτρα, με παραδοχή ότι, οι υπό διερεύνηση διατομές οδοστρώματος είναι σχετικά σε μικρή απόσταση και άρα αντιπροσωπευτικές ως προς το θεωρούμενο πρότυπο των κατά μήκος διαφοροποιημένων διατομών οδοστρώματος για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας. Η απόσταση των 20 μέτρων επιλέχθηκε, αφενός γιατί περιλαμβάνει κυματισμούς ομαλότητας, καθώς είναι μεγαλύτερη των 0.5 και μικρότερη των 50 μέτρων και αφετέρου, διότι είναι αρκετά μικρή ώστε να θεωρηθεί ότι στα επιμέρους τμήματα, τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος είναι ομογενή.

Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία συλλογής αφορούσαν κυρίως σε στοιχεία παχών και μηχανικών χαρακτηριστικών των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων των υπό διερεύνηση διατομών οδοστρώματος. Τα στοιχεία αυτά, αποτέλεσαν τα πρωτογενή δεδομένα στις εξισώσεις εκτίμησης των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος, λόγω της επιβολής τόσο ενός καθορισμένου αριθμού αξονικών διελεύσεων βαρέων οχημάτων, όσο και των υφιστάμενων συνθηκών περιβάλλοντος.

Για την εκτίμηση των παχών, χρησιμοποιήθηκε το γεωφυσικό σύστημα Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar: GPR) [134], ενώ για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το

Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) [135]. Η επεξεργασία και ανάλυση των πρωτογενών στοιχείων συλλογής για την εξαγωγή των επιθυμητών δεδομένων έγινε με βάση τις γεωφυσικές ιδιότητες των υλικών οδοστρώσεως για τα στοιχεία GPR και τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων για τα στοιχεία FWD. Επίσης ελήφθησαν υπόψη τα στοιχεία σχεδιασμού του οδοστρώματος (διατομή μελέτης).

Σε δεύτερη φάση του πειράματος, έγινε καταγραφή της κατά μήκος ομαλότητας του υπό διερεύνηση οδοστρώματος, με το σύστημα Laser Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, μετά τη διέλευση καθορισμένου αριθμού αξονικών φορτίων. Η ομαλότητα, όπως και όλα τα άλλα στοιχεία συλλογής, αφορούσαν στο δεξιό ίχνους τροχού της λωρίδας κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων (δεξιά).

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, στόχο του πειράματος αποτέλεσε η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης της ομαλότητας, υπό την έννοια των παραμενουσών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος ενός οδοστρώματος, σε σχέση με τα αποτελέσματα ανάλυσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, για δεδομένη κυκλοφορία και περιβαλλοντικές συνθήκες.

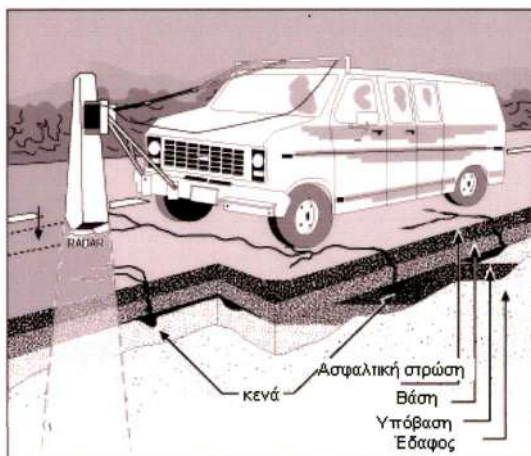
8.2 Επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων συλλογής

8.2.1 Εκτίμηση παχών με την τεχνική γεωραντάρ

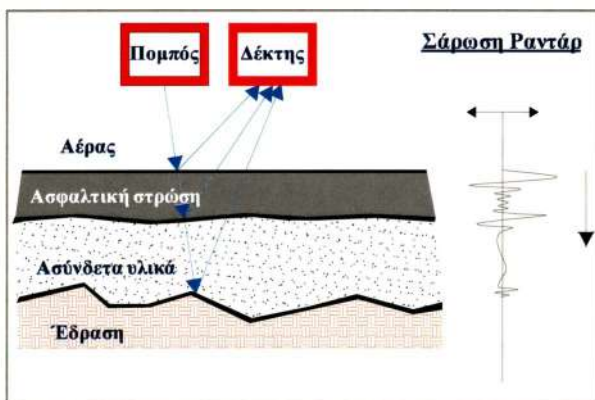
Το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar: GPR) είναι ο γενικός όρος που αποδίδεται σε τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (συχνοτήτων από 1 έως 2500 MHz) , για την αναγνώριση του εσωτερικού των κατασκευών ή του εδάφους [136]. Ιστορικά, η χρήση του GPR αρχικά επικεντρώθηκε στην αναγνώριση της στρωματογραφίας του εδάφους, αλλά πιο πρόσφατα, άρχισε να χρησιμοποιείται ως μη καταστρεπτικό σύστημα ελέγχου (μη μεταλλικών) κατασκευών, όπως είναι για παράδειγμα το οδόστρωμα (σχήμα 8.1).

Ένα τυπικό σύστημα GPR αποτελείται από τη διάταξη πομπού/δέκτη, την κεραία (ή τον συνδυασμό κεραιών), τη μονάδα ελέγχου και τη βάση δεδομένων όπου εισάγονται τα στοιχεία συλλογής. Η θεμελιώδης αρχή λειτουργίας του GPR, βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, αφού τα σήματα που εκπέμπει είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία περιγράφονται μαθηματικά από τις εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

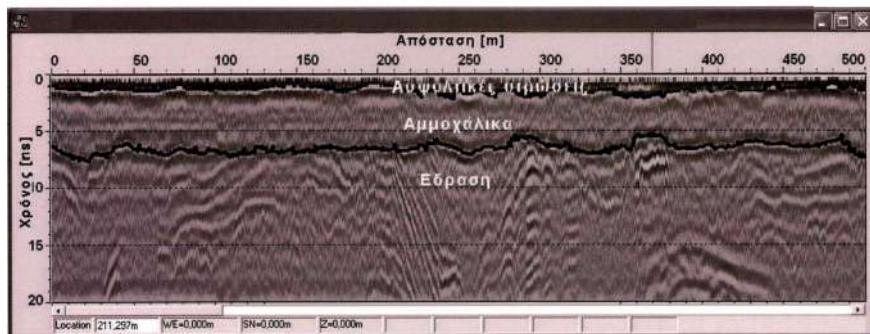
Πιο συγκεκριμένα, ένα σύστημα GPR δημιουργεί βραχείς παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, οι οποίοι διεισδύουν στη δομή του οδοστρώματος και ανακλώνται κάθε φορά που συναντούν υλικά με διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά (διηλεκτρική σταθερά) (σχήμα 8.2). Το εύρος και ο χρόνος άφιξης των κυμάτων στον δέκτη χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παχών, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος, ακολουθώντας μια σύνθετη διαδικασία για την αποτύπωση και ανάλυση της στρωματογραφίας του (βλ. σχήμα 8.3) [137].



Σχήμα 8.1: Σκαρίφημα διάταξης συστήματος GPR σε οδούς [137]



Σχήμα 8.2: Αρχή λειτουργίας ενός συστήματος GPR [137]



Σχήμα 8.3: Αποτύπωση της στρωματογραφίας με το σύστημα GPR

Σημειώνεται ότι βασικό σκέλος του Συστήματος GPR είναι οι κεραίες ραντάρ με συχνότητες από 400-1500 MHz, οι οποίες χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή συνδυαστικά ανάλογα με το είδος και το βάθος της γεωέρευνας. Επίσης, περιλαμβάνει εκτός των κεραιών και του σχετικού εξοπλισμού υποστήριξης τους, εξειδικευμένα λογισμικά για την συλλογή και ανάλυση των σχετικών στοιχείων.

Το σύστημα GPR του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (εικόνα 8.1) που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας περιλαμβάνει ειδικό λογισμικό καταγραφής [138], το οποίο είναι απαραίτητο για την καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται με την τεχνική του γεωραντάρ. Επίσης, περιλαμβάνει και ειδικό λογισμικό επεξεργασίας και ανάλυσης [139], μέσω του οποίου, τα ακατέργαστα δεδομένα συλλογής (π.χ. χρόνος διάδοσης του κύματος μέσα στο οδόστρωμα), μετατρέπονται σε χρήσιμες πληροφορίες (π.χ. πάχη στρώσεων).



Εικόνα 8.1: Μέτρηση με το σύστημα GPR του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ στην Αττική Οδό

Στην προκειμένη περίπτωση όπου στόχος ήταν ο προσδιορισμός του πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος κρίθηκε ως ικανοποιητική και χρησιμοποιήθηκε η κεραία των 1 GHz. Η ανάλυση των στοιχείων συλλογής με την υπόψη κεραία δίνει με αρκετή ακρίβεια - κατόπιν σύνθετης ανάλυσης- τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, ιδιαίτερα δε της ασφαλικής στρώσης [140, 141, 142].

8.2.2 Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών

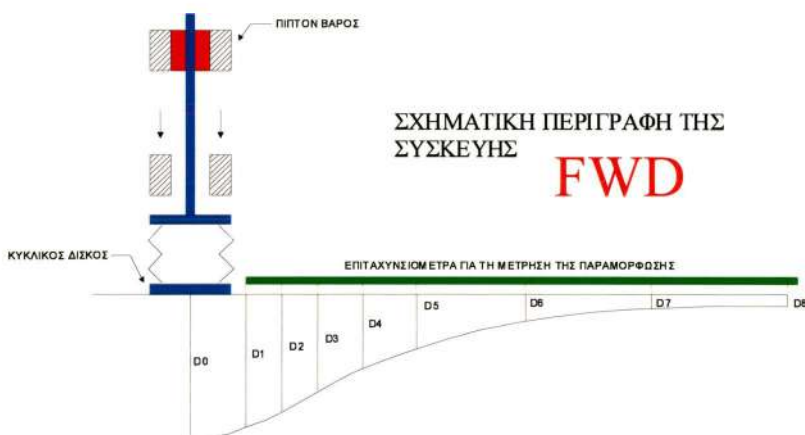
Το σύστημα Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ [143] (εικόνα 8.2), χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή στοιχείων του οδοστρώματος, με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Ανήκει στην κατηγορία των συστημάτων/συσκευών που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν την ελαστική υποχώρηση του οδοστρώματος. Οι μετρήσεις των ελαστικών υποχωρήσεων γίνονται ανά αποστάσεις 20 έως 40 cm με τη βοήθεια γεωφώνων / μικρομέτρων.



Εικόνα 8.2: Βαθμονόμηση του συστήματος FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ

Αναλυτικότερα, η βασική λειτουργία του Συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Σημειώνεται ότι ανάλογες μετρήσεις διεθνώς πραγματοποιούνται με πέντε έως το πολύ επτά γεώφωνα [144]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αξιοποιήθηκαν οι μέγιστες δυνατότητες του συστήματος FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, καθώς χρησιμοποιήθηκαν εννέα γεώφωνα, στοιχείο που δίνει καλύτερη ακρίβεια [125, 135] για την ανάλυση των στρώσεων από ασύνδετα υλικά, αλλά και της φέρουσας ικανότητας της διαμορφωμένης στρώσης έδρασης του οδοστρώματος (σχήμα 8.4). Το πίπτον βάρος προσκρούει σε μια ειδικά

σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή επιβάλλει στο οδόστρωμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 25 – 30 msec ή 45 – 60 msec (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός άξονα οχήματος. Για παράδειγμα, η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 ms.

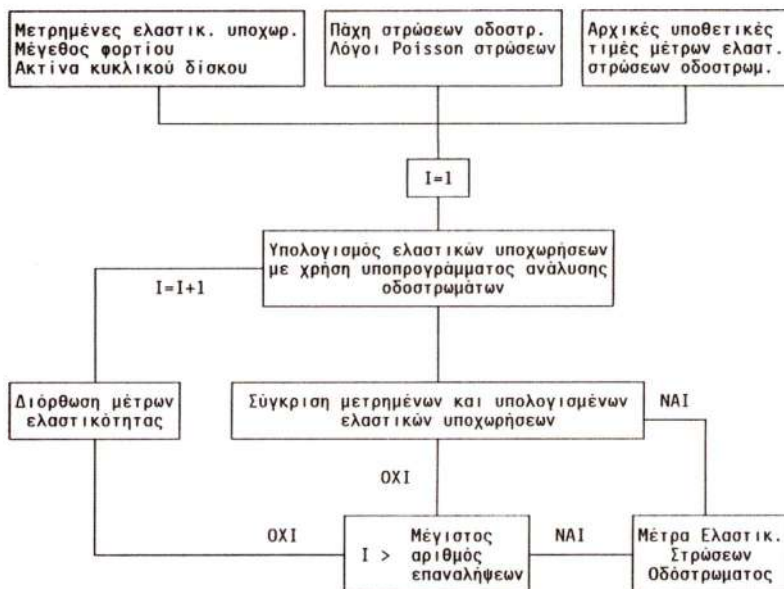


Σχήμα 8.4: Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD

Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα εφαρμογής επιτόπου δοκιμών με το FWD [135, 145]. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα, καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Οι ελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κλπ.) είναι δυνατό να δώσουν μια πλήρη πληροφόρηση για τη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.

Στην παρούσα εργασία, μετρήθηκαν οι ελαστικές υποχωρήσεις, ανά 20 μέτρα, κατά μήκος του δεξιού ίχνους τροχού του οδοστρώματος, αφού είχε προηγηθεί βαθμονόμηση του συστήματος σε ομοειδές τμήμα οδοστρώματος [144], σύμφωνα με επικαιροποιημένες διαδικασίες στο υπόψη θέμα [135]. Τονίζεται ότι η διαδικασία βαθμονόμησης, πριν από τις

μετρήσεις, αποτελεί πλέον βασικό στοιχείο για τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και κατ' επέκταση των αποτελεσμάτων ανάλυσης. Οι μετρημένες υποχωρήσεις (βλ. στοιχεία Πίνακα Π16 του Παραρτήματος) μετατράπηκαν, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, σε μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων εκφρασμένα στα αντίστοιχα μέτρα δυσκαμψίας ή ελαστικότητας. Οι σχετικοί εκτενείς υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με την διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, όπως αυτή περιγράφεται στο σχήμα 8.5.



Σχήμα 8.5: Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού [145]

Τα μέτρα ελαστικότητας E που προσδιορίστηκαν για κάθε στρώση, σε κάθε θέση, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του $E(N)$, σύμφωνα με τη σχέση 7.10.

8.2.3 Επεξεργασία στοιχείων ομαλότητας

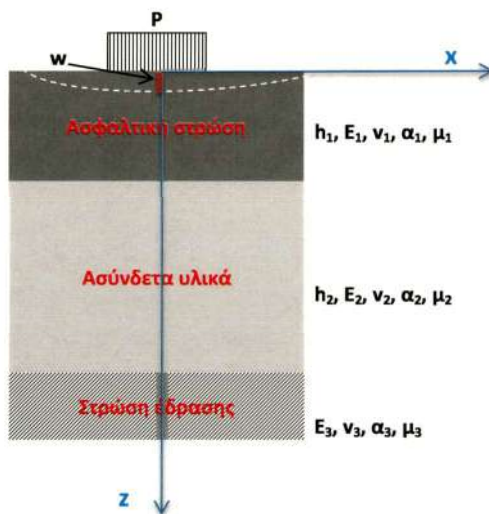
Για την καταγραφή της κατά μήκος ομαλότητας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Laser Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (εικόνα 4.1). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υπόψη σύστημα ανήκει στην κατηγορία των εν κινήσει με υψηλή ταχύτητα προφίλομέτρων και έχει ως βασική μονάδα μια δοκό στην οποία είναι ενσωματωμένοι οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες (lasers).

Θεωρώντας τα επιμέρους τμήματα μήκους 20 μέτρων που ορίζονται ως οι μεταξύ αποστάσεις των υπό διερεύνηση θέσεων επί του οδοστρώματος, έγινε επεξεργασία και

ανάλυση των στοιχείων ομαλότητας. Έτσι υπολογίστηκε ο δείκτης IRI (m/km) ανά 20 μέτρα, αντιστοιχίζοντας σε κάθε τμήμα μια τιμή ομαλότητας, στο χρόνο θεώρησης των δεδομένων αξονικών διελεύσεων.

8.3 Υπολογισμός παραμένουσας παραμόρφωσης

Το βάθος παραμόρφωσης (w) υπολογίστηκε για κάθε θεωρούμενη, επιμέρους διατομή (σχήμα 8.6), σύμφωνα με το πρότυπο PROvIMA. Για τον υπολογισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης έγινε παραδοχή ότι τα επιμέρους τμήματα μικρού μήκους είναι ομογενή και άρα σε κάθε θεωρούμενο τμήμα αντιστοιχεί μια τιμή παραμόρφωσης. Οι υπολογισμοί έγιναν με θεώρηση των παχών τόσο με βάση τα στοιχεία σχεδιασμού του οδοστρώματος - όπου η διατομή είναι σταθερή και ενιαία κατά μήκος του οδοστρώματος, με διαφοροποιήσεις μόνο ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά του-, όσο και χρησιμοποιώντας τα στοιχεία των παχών των στρώσεων που προσδιορίστηκαν με την γεωφυσική μέθοδο του γεωραντάρ.



Σχήμα 8.6: Διατομή διερεύνησης

Για την επιλογή των πλέον κατάλληλων για το υπόψη οδικό πείραμα τιμών των παραμέτρων α και μ των επιμέρους στρώσεων, έγινε εκτεταμένη βιβλιογραφική διερεύνηση. Η τελική επιλογή όμως στηρίχθηκε σε νεότερες εργαστηριακές έρευνες που αφορούσαν σε δοκιμές υλικού σε τριαξονικές κυψέλες (Triaxial Cell Testing System) για

εκτίμηση της συμπεριφοράς σε ερπυσμό και χαλάρωση σε ασφαλτομίγματα (εικόνα 8.3), καθώς και σε συναφείς τριαξονικές δοκιμές καταπόνησης ασύνδετων υλικών και υλικών εδάφους [102, 146].



Εικόνα 8.3: Σύστημα τριαξονικής κυψέλης για δοκιμή σε ερπυσμό και χαλάρωση [122]

Βέβαια, στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης, η τελική επιλογή των παραμέτρων α και μ για κάθε στρώση (i) προέκυψε από σταθμισμένη σταδιακή θεώρηση των αποτελεσμάτων, τόσο από εργαστηριακές, όσο και από επιτόπου δοκιμές. Με αυτόν τον τρόπο, έγινε προσπάθεια οι τιμές των υπόψη παραμέτρων να ανταποκρίνονται ικανοποιητικά σε ομοειδή υλικά και χαρακτηριστικά μιγμάτων που χρησιμοποιούνται στη χώρα μας και συγκεκριμένα στο οδόστρωμα όπου πραγματοποιήθηκε το οδικό πείραμα. Την προσπάθεια αυτή ενίσχυσε και η ανταλλαγή απόψεων και εμπειριών, στο πλαίσιο ευρύτερης συνεργασίας του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ με τα Πανεπιστήμια του Τέξας A&M και της Αριζόνας.

Όσον αφορά στις ασφαλτικές στρώσεις, οι οποίες στην παρούσα διερεύνηση αποτελούνται από δύο τύπους – ισοπεδωτική A265B [147] και αντιολισθηρή ασφαλτική στρώση ημι-ανοικτού τύπου [148] έγινε παραδοχή ότι αποτελούν μια ενιαία στρώση. Κατά την παραδοχή αυτή θεωρήθηκε ότι η αντιολισθηρή ασφαλτική στρώση ακολουθεί κοκκομετρική διαβάθμιση σύνθεσης στο κάτω όριο ποσοστού κενών [147], προσεγγίζοντας έτσι τα κενά της υποκείμενης αυτής A265B ισοπεδωτικής στρώσης. Έτσι, η επιλογή των α και μ της ενιαίας ασφαλτικής στρώσης προέκυψε από μια συνδυαστική διαδικασία με τη βοήθεια των

παχών των επιμέρους ασφαλικών στρώσεων. Ανάλογη παραδοχή έγινε και στην περίπτωση των δύο στρώσεων ασύνδετων υλικών (αμμοχάλικα), όπου θεωρήθηκαν ως μια στρώση (βάση) για την επιλογή των αντίστοιχων α και μ . Οι σχετικές τιμές που προέκυψαν, συμπεριλαμβανομένου και της στρώσης έδρασης, φαίνονται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Τιμές α και μ

	Ασφαλτική στρώση	Ασύνδετα υλικά (αμμοχάλικα)	Στρώση έδρασης
α	0.78	0.90	0.90
μ	0.35	0.20	0.20

Όσον αφορά στα στοιχεία θερμοκρασίας που απαιτεί το προσομοίωμα πρόβλεψης των παραμενουσών παραμορφώσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του έτους για τη συγκεκριμένη περιοχή, όπου βρίσκεται το υπόψη οδικό τμήμα, σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) (βλ. Πίνακα Π17 του Παραρτήματος). Τέλος, το σύνολο των αξονικών διελεύσεων βαρέων οχημάτων που αφορά στον χρόνο πραγματοποίησης των μετρήσεων ομαλότητας, για τον οποίο πραγματοποιήθηκε και η πρόβλεψη των παραμενουσών παραμορφώσεων, βασίστηκε σε στοιχεία κυκλοφορίας που διέθεσε ο φορέας λειτουργίας και διαχείρισης του αυτοκινητοδρόμου.

8.4 Σύγκριση περιγράμματος παραμορφώσεων και ομαλότητας

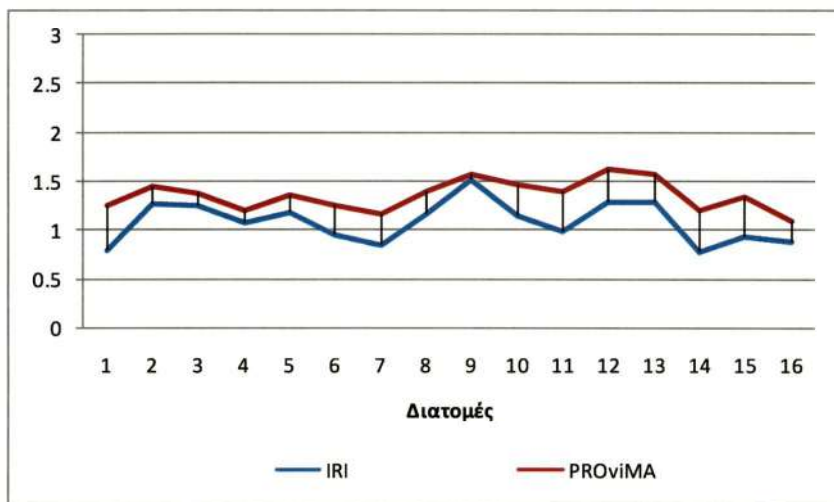
Μετά τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδικού τμήματος, πραγματοποιείται η σύγκριση του περιγράμματος των παραμορφώσεων με το περίγραμμα ομαλότητας, έτσι όπως αυτό αναπαράγεται με βάση τον δείκτη IRI. Αν και η φύση των δύο μεγεθών είναι διαφορετική, η υπόψη σύγκριση θεωρείται θεμιτή, καθώς και τα δύο μεγέθη εκφράζουν τις αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Η σύγκριση λοιπόν έγκειται ως προς τη μορφή των θεωρούμενων αποκλίσεων κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι υπολογισμοί για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων βασίστηκαν στα εξής πάχη στρώσεων:

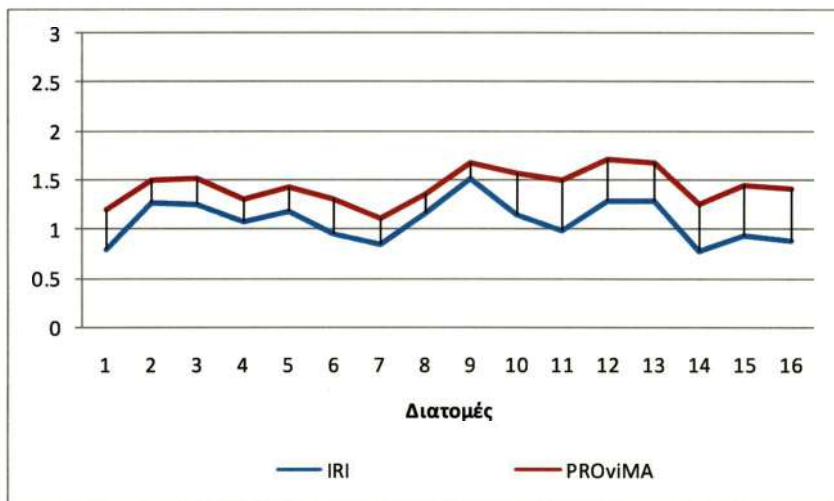
- Ι. Πάχη στρώσεων σχεδιασμού/διαστασιολόγησης οδοστρώματος

II. Πάχη στρώσεων προσδιορισμένα με την τεχνική GPR

Με βάση τις περιπτώσεις I και II προκύπτουν κατά αντιστοιχία τα διαγράμματα στα σχήματα 8.7-8.8, της σύγκρισης της μορφής της καταγεγραμμένης κατά μήκος ομαλότητας με αυτή των υπολογισμένων κατά μήκος παραμορφώσεων (βλ. στοιχεία Πίνακα Π18 και Π19 του Παραρτήματος).



Σχήμα 8.7: Σύγκριση κατά μήκος βάθους παραμορφώσεων με ομαλότητα – Περίπτωση I



Σχήμα 8.8: Σύγκριση κατά μήκος παραμορφώσεων με ομαλότητα – Περίπτωση II

Από τα υπόψη διαγράμματα προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

1. Το περίγραμμα του βάθους παραμορφώσεων που προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο PROnIMA φαίνεται να ακολουθεί τη μορφή του περιγράμματος της κατά μήκος ομαλότητας, έτσι όπως αυτή αναπαρίσταται με βάση τον δείκτη IRI.
2. Θεωρώντας το βάθος παραμόρφωσης και τον δείκτη IRI αδιάστατα μεγέθη, οι τιμές του πρώτου φαίνεται να είναι σταθερά μεγαλύτερες.

Η πρώτη παρατήρηση αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη ότι οι υπολογισμένες παραμορφώσεις περιγράφουν την κατά μήκος ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος. Επομένως, μέσω του προτεινόμενου προτύπου PROVIMA, είναι δυνατό να προβλεφθεί η διακύμανση των τιμών ομαλότητας κατά μήκος ενός οδικού τμήματος, αξιοποιώντας επιπλέον τα δομικά και μηχανικά χαρακτηριστικά ενός νέας κατασκευής οδοστρώματος, τα οποία μπορούν να προσδιοριστούν με σύγχρονες, επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές (NDT).

Η προαναφερόμενη διακύμανση, βασίζεται κατά κύριο λόγο στις κατά μήκος διαφοροποιήσεις της διατομής του οδοστρώματος που αφορούν στα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων. Ο προσδιορισμός της διακύμανσης αυτής φαίνεται να είναι σημαντικός στην περίπτωση που ενδιαφέρει η ομοιογένεια των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων, όπως είναι η ομαλότητα, σε βάθος χρόνου λειτουργίας ενός οδοστρώματος. Εξάλλου εκτός από ένα επιθυμητό επίπεδο ομαλότητας, βασική απαίτηση είναι το οδόστρωμα να είναι ομοιογενές και σταθερό κατά μήκος μιας οδού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μια αν όχι υψηλή, ικανοποιητική ποιότητα κύλισης για τους χρήστες της οδού.

Βέβαια στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων, σημαντικό στοιχείο θα ήταν οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις να συσχετιστούν με τις τιμές ομαλότητας. Στην προκειμένη περίπτωση, το γεγονός ότι τα υπολογισμένα βάθη παραμόρφωσης εμφανίζονται να είναι σταθερά μεγαλύτερα από τις τιμές ομαλότητας –θεωρώντας και τα δύο μεγέθη ως αδιάστατα- μπορεί να είναι καθ' όλα τυχαίο. Η πολυπαραμετρική ανάλυση που πραγματοποιείται με βάση τις σχέσεις 7.11 – 7.13, βασίζεται σε προσεγγίσεις όσον αφορά στα υλικά, στις διελεύσεις και στις κλιματολογικές συνθήκες και όχι σε πραγματικές τιμές, κάτι που πρακτικά θα ήταν αδύνατο. Η δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης στο εργαστήριο όσον αφορά στις παραμέτρους των υλικών των στρώσεων α και μ για το συγκεκριμένο οδόστρωμα, ενδεχομένως να οδηγήσει σε ακριβέστερο προσδιορισμό των υπόψη παραμέτρων και κατά συνέπεια σε διαφοροποίηση από τα παρόντα αποτελέσματα πρόβλεψης των παραμενουσών παραμορφώσεων.

Επιπλέον, η οποιαδήποτε προσπάθεια για την ανάπτυξη μιας γενικής, στατιστικής σχέσης για την σύνδεση της ομαλότητας και των παραμορφώσεων κατά μήκος ενός οδοστρώματος, θα έπρεπε να στηρίζεται σε μια πληθώρα δεδομένων από διάφορα και πολλά οδικά τμήματα. Σε μια τέτοια διαδικασία, σημαντικό στοιχείο διερεύνησης θα αποτελούσε η καταλληλότητα του δείκτη IRI ή κάποιου άλλου μέτρου έκφραση της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, για την ανάδειξη μιας αξιόπιστης σχέσης συσχετισμού των παραμορφώσεων και της ομαλότητας.

Επομένως, το στοιχείο που έχει ενδεχομένως ενδιαφέρον στην προκειμένη περίπτωση, είναι η αξιολόγηση της διακύμανσης των αντιστοιχών τιμών PROViMA και IRI, θεωρώντας τις διαφοροποιήσεις ως προς την εκτίμηση του παράγοντα «πάχος στρώσης» για τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος του οδοστρώματος. Η ακρίβεια της τεχνικής GPR στον υπολογισμό των παχών των επιμέρους στρώσεων υπεισέρχεται στο αποτέλεσμα υπολογισμού του βάθους παραμόρφωσης. Κατά συνέπεια, με δεδομένο ότι το κατά μήκος περίγραμμα των παραμενουσών παραμορφώσεων ακολουθεί το περίγραμμα της κατά μήκος ομαλότητας, ο προσδιορισμός των παχών των στρώσεων με την τεχνική GPR δίνει αναμφίβολα διαφοροποιήσεις ως προς τα θεωρητικά πάχη σχεδιασμού, τα οποία βέβαια εξαρτώνται -εκτός άλλων- από την ποιότητα και την ομοιογένεια της κατασκευής.

Στα διαγράμματα των σχημάτων 8.7-8.8, επισημαίνονται οι διαφορές των τιμών PROViMA και IRI, ως η κατ' αντιστοιχία απόσταση των περιγραμμάτων παραμορφώσεων και ομαλότητας. Προκειμένου να διερευνηθεί η εφικτότητα συμμεταβολής των δύο περιγραμμάτων, γίνεται έλεγχος των αποκλίσεων των υπόψη διαφορών ως προς τη διαφορά των μέσων όρων των δύο θεωρούμενων δειγμάτων, δηλαδή των τιμών PROViMA και IRI. Ο έλεγχος αυτός αφορά στη *μηδενική υπόθεση* (H_0) ότι δηλαδή

$$H_0 : \mu_d = \mu_1 - \mu_2 \quad (8.1)$$

Όπου μ_1 είναι ο μέσος όρος των τιμών PROViMA και μ_2 ο μέσος όρος των τιμών IRI.

Για τον έλεγχο της προαναφερόμενης μηδενικής υπόθεσης χρησιμοποιείται το στατιστικό *t*-test των *κατά ζεύγη παρατηρήσεων* σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [149]:

$$t = \frac{\bar{x}_d - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} \quad (8.2)$$

Όπου, n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων (μέγεθος δείγματος) των διαφορών, $\bar{x}_d$ και s_d είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του υπόψη δείγματος, ενώ ο έλεγχος βασίζεται στους βαθμούς ελευθερίας $df = n - 1$.

Βασικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή του ελέγχου όπως περιγράφεται στα ανωτέρω είναι:

1. Οι μεταβλητές/παρατηρήσεις των αρχικών δειγμάτων είναι ζευγαρωτές.
2. Το δείγμα των διαφορών είναι ένα τυχαίο δείγμα του πληθυσμού των διαφορών.
3. Η κατανομή του δείγματος είναι κανονική.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις ισχύουν στις δύο περιπτώσεις (I και II) του δείγματος των διαφορών των μέσων τιμών PROviMA και IRI. Επομένως για κάθε ταχύτητα υπολογίζεται η τιμή t_{stat} σύμφωνα με τη σχέση 8.2 (πίνακας 6.2) και συγκρίνεται με την κρίσιμη τιμή t_{kp} , έτσι όπως αυτή προκύπτει από τους πίνακες κατανομής του χρησιμοποιούμενου στατιστικού ελέγχου. Συγκεκριμένα προκύπτει ότι, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και με βαθμούς ελευθερίας $df = 16 - 1 = 15$ το t_{kp} είναι 2.13.

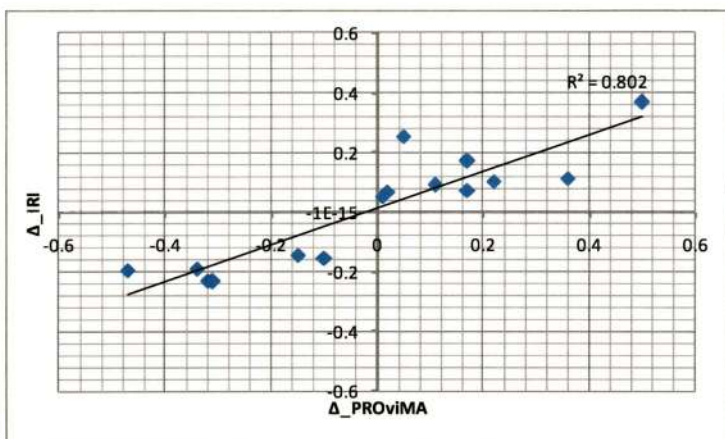
Πίνακας 8.2: Αποτελέσματα t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων

	Περίπτωση I	Περίπτωση II
$ t_{stat} $	1.3E-05	8.41E-06

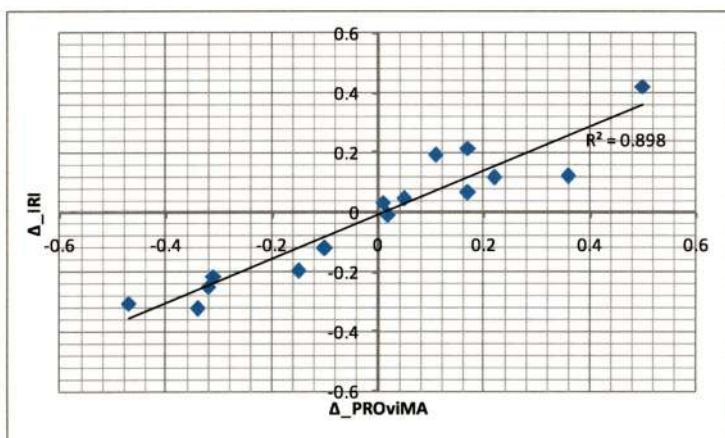
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 8.2, για κάθε περίπτωση ισχύει ότι $t_{stat} \leq t_{kp}$. Επομένως, η μηδενική υπόθεση ισχύει σε κάθε περίπτωση και κατά συνέπεια, οι διαφορές των τιμών PROviMA και IRI δεν αποκλίνουν σημαντικά από τη διαφορά των μέσων όρων των τιμών τους.

Εν συνεχεία, προκειμένου να αναδειχθεί η διαφορά των αποτελεσμάτων, ως προς τη συμμεταβολή των περιγραμμάτων PROviMA και IRI, μεταξύ των περιπτώσεων I και II, διερευνάται η μεταβολή της κάθε καμπύλης. Συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση και για κάθε καμπύλη, δηλαδή PROviMA ή IRI, υπολογίζεται η διαφορά της κάθε τιμής από την αμέσως προηγούμενη, ορίζοντας έτσι δύο νέα δείγματα τιμών ως $\Delta_PROviMA$ και Δ_IRI , τα οποία εκφράζουν τη μεταβολή της εκάστοτε παραμέτρου από θέση σε θέση. Για κάθε περίπτωση,

γίνεται συσχέτιση των δειγμάτων αυτών, προκειμένου να ελεγχθεί συμμεταβολή ή όχι των θεωρούμενων καμπύλων (σχήματα 8.9 και 8.10).



Σχήμα 8.9: Έλεγχος «συμμεταβολής» PROViMA και IRI – Περίπτωση I



Σχήμα 8.10: Έλεγχος «συμμεταβολής» PROViMA και IRI – Περίπτωση II

Όπως φαίνεται από τους συντελεστές συσχέτισης των δύο δειγμάτων, οι οποίοι αναγράφονται στα σχήματα 8.10 και 8.11, η συμμεταβολή των δύο καμπύλων PROViMA και IRI στην Περίπτωση I είναι εμφανής, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης είναι ικανοποιητικός ($R^2=0.802$), ενώ στην Περίπτωση II, η αντίστοιχη συμμεταβολή είναι ακόμα πιο βελτιωμένη, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης είναι υψηλός ($R^2=0.898$).

Ο συγκεκριασμός των παραπάνω παρατηρήσεων, οδηγεί σε διάφορα συμπεράσματα όσον αφορά στη θεώρηση των παχών των επιμέρους στρώσεων για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται τα πάχη μελέτης/διαστασιολόγησης της κατασκευής, οι διακυμάνσεις του περιγράμματος των παραμορφώσεων οφείλονται αποκλειστικά στις κατά μήκος διαφοροποιήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων, έτσι όπως αυτά προσδιορίζονται με βάση τους επιτόπου μη καταστρεπτικούς ελέγχους με το σύστημα FWD. Στην περίπτωση προσδιορισμού των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος με την τεχνική GPR, οι διακυμάνσεις του περιγράμματος των παραμορφώσεων οφείλονται τόσο στις κατά μήκος διαφοροποιήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων, όσο και στις κατά μήκος διαφοροποιήσεις των παχών.

Η στατιστική προσέγγιση αποδεικνύει ότι η συμμεταβολή PROvIMA και IRI είναι καλύτερη στην περίπτωση όπου τα πάχη έχουν προσδιοριστεί με την τεχνική GPR. Βέβαια, η ακρίβεια στον υπολογισμό των παχών των επιμέρους στρώσεων με την τεχνική GPR, υπεισέρχεται στον υπολογισμό των παραμορφώσεων, στοιχείο που κατά συνέπεια επηρεάζει και την ακρίβεια της πρόβλεψης της ομαλότητας με την προτεινόμενη διαδικασία. Είναι προφανές ότι η κλασσική διαδικασία πυρηνοληψίας, αν και ακριβής ως προς την εκτίμηση των παχών, δεν περιλαμβάνεται για εύλογους λόγους στο πρότυπο PROvIMA, παρά μόνο για τυχόν δειγματοληπτικούς ελέγχους της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του GPR. Επίσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μετρημένα στοιχεία κυκλοφορίας. Όμως εν γένει, για την ενεργοποίηση του προτεινόμενου προτύπου PROvIMA, χρειάζεται να εκτιμηθεί η κυκλοφορία για την πρόβλεψη σε βάθος χρόνου και κατά συνέπεια, η αξιοπιστία ενός ενδεχόμενου σεναρίου εξέλιξης της κυκλοφορίας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ακρίβεια των σχετικών αποτελεσμάτων υπολογισμού.

Η εισαγωγή μη καταστρεπτικών ελέγχων για την τροφοδότηση του προτεινόμενου προτύπου PROvIMA πιστεύεται ότι αποτελεί βασικό πλεονέκτημα του. Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές (NDT) που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παχών και των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων ενός οδοστρώματος, δε διαταράζουν τη δομή του οδοστρώματος και έχουν άμεσα οφέλη ως προς την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους για τη διεξαγωγή των απαιτούμενων ελέγχων. Επίσης, τα αποτελέσματα τους αντιπροσωπεύουν την επιτόπου κατάσταση του οδοστρώματος, κάτι το οποίο δεν επιτυγχάνεται με τους κλασσικούς, αντίστοιχους εργαστηριακούς ελέγχους.

9. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, βασίζεται στη σύνδεση της ομαλότητας, τόσο με τη λειτουργική όσο και με τη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Η σύνδεση αυτή, αποτέλεσε το καθοριστικό στοιχείο για τη διερεύνηση επιμέρους κρίσιμων θεμάτων, με στόχο τη συμβολή στην ευρύτερη αξιολόγηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της επιτελεστικότητας τους. Η επιτελεστικότητα όμως των οδοστρωμάτων, αντιμετωπίζεται υπό το πρίσμα της σύγχρονης αντίληψης για την *προστασία* των οδοστρωμάτων. Σύμφωνα με την αντίληψη αυτή, τα οδοστρώματα συνεχίζουν να λειτουργούν ως αναπόσπαστο κομμάτι του συγκοινωνιακού ιστού στην πραγματικότητα για πάντα και κατά συνέπεια, πρέπει να συνεχίζουν να επιτελούν και πέραν του χρόνου σχεδιασμού ή του χρόνου ενίσχυσης τους.

Επομένως, πρέπει όχι μόνο να εξασφαλίζεται η αρχικά προβλεπόμενη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων με κλασσικές μεθόδους συντήρησης ρουτίνας ή τοπικών αποκαταστάσεων, αλλά και να δίνεται η δυνατότητα, μέσα από διαδικασίες προληπτικής συντήρησης σε συνδυασμό και με την περιοδική παρακολούθηση της κατάστασης τους, αυτά να επιτελούν και πέραν του αρχικά καθορισμένου χρόνου λειτουργίας τους, επεκτείνοντας στην ουσία διαρκώς το χρόνο ζωής τους. Για την πρόληψη απαιτούμενων δράσεων επέμβασης σε αυτά, βασική προϋπόθεση είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, η οποία εμπεριέχει και την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας ως σημαντικής παραμέτρου της επιτελεστικότητας τους.

Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, η διαδικασία αξιόπιστης αξιολόγησης της ομαλότητας παραμένει πάντα σημαντική, τόσο για την παραλαβή ενός νέου ή αποκαταστημένου οδοστρώματος, όσο και κατά τη διαρκή λειτουργία ενός υφιστάμενου. Δεν αρκεί όμως να υπάρχει μια τέτοια διαδικασία μόνο για την αντιμετώπιση της εμφάνισης αστοχίας και της αξιολόγησης της, υπό τη μορφή μη αποδεκτής ομαλότητας σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή, διότι τότε η διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων θα είχε έναν απρόβλεπτο και εμπειρικό χαρακτήρα. Σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη για τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων για τη λειτουργία και συντήρηση των οδοστρωμάτων, πρέπει να προβλέπονται μέσα από τη συμπεριφορά τους οι ανάγκες συντήρησης, οι οποίες να επιβεβαιώνονται ή να επαναπροσδιορίζονται με βάση τα αποτελέσματα σχετικής παρακολούθησης.

Καθοριστικό στοιχείο για την αντιμετώπιση αυτής της σύνθετης διαδικασίας, είναι η ύπαρξη μεθοδολογίας που να περιλαμβάνει την πρόληψη απαραίτητων δράσεων ή ενεργειών επέμβασης σε ένα οδόστρωμα για την υλοποίηση μιας βέλτιστης στρατηγικής προστασίας

του σε κάθε στάδιο λειτουργίας του, η οποία και οδηγεί στη διατήρηση της επιτελεστικότητας του. Στο πλαίσιο αυτό, βασική προϋπόθεση είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος, η οποία περιλαμβάνει και το κρίσιμο πεδίο που αφορά στην εξέλιξη της ομαλότητας σε βάθος χρόνου λειτουργίας, καθώς αυτή αποτελεί σημαντική παράμετρο της επιτελεστικότητας του.

Κατά τη διερεύνηση των επιμέρους θεμάτων που περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία, η ομαλότητα αντιμετωπίζεται όχι μόνο ως μια καθοριστική παράμετρος για τον έλεγχο και τη διασφάλιση της ποιότητας κύλισης με αποδέκτες τους χρήστες μιας οδού, αλλά και ως ένα χαρακτηριστικό του οδοστρώματος που μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δομική κατάσταση του. Έτσι, η έρευνα αφορά στη συμβολή για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης της ομαλότητας, στο πλαίσιο τόσο του ποιοτικού ελέγχου, όσο και της διαχείρισης της συντήρησης, ενώ περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός προκαταρκτικού μηχανιστικού προτύπου για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας, στο πλαίσιο «προστασίας» των οδοστρωμάτων για τη διασφάλιση της επιτελεστικότητας τους.

Για τη διαρκή αξιολόγηση της ομαλότητας στα διάφορα στάδια λειτουργίας των οδοστρωμάτων και με γνώμονα την παρακολούθηση και τον έλεγχο της επιτελεστικότητας τους, αναδεικνύονται οι δυνατότητες και η πρακτική συμβολή της δυναμικής φασματικής ή διαφορετικά της PSD (Power Spectral Density) ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας. Η PSD ανάλυση, λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών της και της ανάγκης ερμηνείας των αποτελεσμάτων της, αποτελεί στην αντίληψη του οδοποιού/μηχανικού μια δύσκολη και θεωρητικά «απόμακρη» διαδικασία για την αξιολόγηση της ομαλότητας, για αυτό και στην πράξη δεν χρησιμοποιείται, παρά μόνο σε ένα περιορισμένο επίπεδο έρευνας. Όμως, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια για την ανάδειξη των πρακτικών δυνατοτήτων της PSD ανάλυσης, όχι για να αντικαταστήσει, αλλά για να συμπληρώσει τον δείκτη IRI. Ο υπόψη διεθνής δείκτης, αν και εξ' ορισμού έχει κάποιους περιορισμούς λόγω του προσομοιώματος υπολογισμού του, δεν έχει πάψει να αποτελεί ένα εύχρηστο μέτρο αναφοράς για την αξιολόγηση της ομαλότητας, κάτι το οποίο αποδεικνύει και η υιοθέτησή του στον υπό ανάπτυξη, νέο εξελιγμένο οδηγό του AASHTO, για τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων.

Η ανάπτυξη μιας προσεγγιστικής μεθοδολογίας, όπου η αξιολόγηση της ομαλότητας είναι κυρίαρχο μέσο για τη διασφάλιση της επιτελεστικότητας των οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση, της προστασίας τους, βασίζεται στην PSD ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η PSD δεν χρησιμοποιείται απλά ως ένας «διαφορετικός» τρόπος αξιολόγησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων, μέσω της περιγραφής της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας τους, σε δεδομένο χρόνο λειτουργίας τους, όπως γίνεται,

σε περιορισμένη κλίμακα, διεθνώς από διάφορους ερευνητές. Αντίθετα, αποτελεί βασικό εργαλείο για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο οδικού πειράματος, εντοπίστηκαν, μέσα από τη φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας συγκρινόμενων οδοστρωμάτων, τα ενδεχόμενα αίτια του προβλήματος ομαλότητας που παρουσίαζαν τα υπόψη οδοστρώματα. Η πληροφορία αυτή εκτιμάται ως ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τη διαδικασία επιλογής μιας κατάλληλης μεθόδου συντήρησης ή αποκατάστασης για την επαναφορά των χαρακτηριστικών λειτουργίας του εκάστοτε οδοστρώματος.

Επίσης, μέσω της προτεινόμενης προσεγγιστικής μεθοδολογίας, είναι δυνατό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα από την παρακολούθηση και αξιολόγηση της ομαλότητας, ως βασικό χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος, σε αρχικό, κρίσιμο χρόνο λειτουργίας του. Από την ανάλυση των δεδομένων ομαλότητας, σχετικού οδικού πειράματος, κατά τη διάρκεια του οποίου αξιολογήθηκε η μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας τμήματος αυτοκινητοδρόμου, σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος δύο χρόνων, φαίνεται ότι η PSD ανάλυση δίνει μια πιο σαφή, σε σχέση με τον δείκτη IRI, εικόνα της εξέλιξης της ομαλότητας. Έτσι, ενώ με βάση τον δείκτη IRI δεν δόθηκε μια σαφής απάντηση για το ποια είναι η εξέλιξη της ομαλότητας σε αρχικό στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος, η PSD ανάλυση μέσω της κατάταξης και της διερεύνησης της μεταβολής των καταγεγραμμένων κυματισμών έδωσε μια ξεκάθαρη εικόνα της αύξησης των κλισιομετρικών αποκλίσεων των κυματισμών. Ταυτόχρονα έδωσε και ενδιαφέρουσες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των στρώσεων του οδοστρώματος, αλλά και την ποιότητα της κατασκευής. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατό να αξιοποιηθούν για τον εντοπισμό εγγενών προβλημάτων που ενδεχομένως υπάρχουν ή προβλημάτων που αρχίζουν να δημιουργούνται λόγω της επιβολής της κυκλοφορίας, των συνθηκών περιβάλλοντος, της επανασυμπύκωσης των υλικών των στρώσεων κλπ και κατ' επέκταση, να χρησιμοποιηθούν για τον προγραμματισμό των εργασιών συντήρησης ή αποκατάστασης των οδοστρωμάτων.

Η προτεινόμενη προσεγγιστική μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σε τεχνολογικό επίπεδο, για την αξιολόγηση μιας μεθόδου ή τεχνολογίας συντήρησης/αποκατάστασης ενός οδοστρώματος. Σε σχετικό οδικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διερευνήθηκε η μεταβολή του επιπέδου ομαλότητας, σε κάθε φάση αποκατάστασης πειραματικού οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης και της αρχικής κατάστασής του. Στο οδόστρωμα αυτό, στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος της ψυχρής επιτόπου ανακύκλωσης με χρήση αφρώδους ασφάλτου, με βασικό στόχο την αποκατάσταση της δομικής κατάστασής του, αναδείχθηκαν

μέσω των αποτελεσμάτων της PSD ανάλυσης, οι βελτιώσεις που θα έπρεπε να γίνουν στην εφαρμογή της υπόψη τεχνολογίας, προς όφελος της ποιότητας κύλισης της τελικής στρώσης κυκλοφορίας. Οι προτεινόμενες βελτιώσεις φαίνεται μάλιστα να συνάγουν με τα αποτελέσματα διεθνώς αναγνωρισμένων ερευνών του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, οι οποίες στηρίζονται αμιγώς στην κλασσική θεώρηση της μηχανικής ανάλυσης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων, σε αντίθεση με τη συγκεκριμένη διερεύνηση, η οποία στηρίζεται μόνο στη PSD ανάλυση. Δηλαδή, αναδεικνύεται η σύνδεση λειτουργικής και δομικής αξιολόγησης των υπόψη οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της επιτελεστικότητας τους και υπό το πρίσμα της έγκαιρης προστασίας τους. Πιο γενικά, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, η προτεινόμενη προσεγγιστική μεθοδολογία αξιολόγησης, μέσω της αξιολόγησης της ομαλότητας και βασιζόμενη στη PSD ανάλυση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας καινοτόμων τεχνολογιών συντήρησης ή αποκατάστασης ενός οδοστρώματος, όπως είναι η επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση με χρήση αφρώδους ασφάλτου.

Ένα άλλο κρίσιμο επιμέρους θέμα διερεύνησης, αποτέλεσε η επίδραση της ταχύτητας στην αξιολόγηση της ομαλότητας. Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική είναι γνωστό ότι όσο μεγαλώνει η ταχύτητα κίνησης τόσο πιο έντονες είναι οι δονήσεις που δέχεται το κινούμενο όχημα λόγω των αποκλίσεων της επιφάνειας ενός οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Στην παρούσα εργασία η σχέση ταχύτητας-ομαλότητας διερευνάται υπό το πρίσμα των αποκλίσεων της επιφάνειας, κατανεμημένων όμως στους επιμέρους κυματισμούς. Από τα σχετικά αποτελέσματα ανάλυσης πειραματικών δεδομένων, προέκυψε ότι εν γένει, όσο αυξάνει η ταχύτητα, αυξάνεται η απόκριση του οχήματος και η αύξηση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στους κυματισμούς μεγάλου μήκους. Μάλιστα στις περιπτώσεις των υψηλών ταχυτήτων διερεύνησης, η απόκριση του οχήματος στους μεγάλου μήκους κυματισμούς τείνει να είναι στα επίπεδα απόκρισης του οχήματος στους μικρού και μεσαίου μήκους κυματισμούς. Κατά συνέπεια, η ένταση των δονήσεων που δέχεται το οδόστρωμα συνεχίζει να είναι μεγάλη και στους μεγάλου μήκους κυματισμούς, όταν η ταχύτητα κίνησης είναι υψηλή, με αποτέλεσμα τη συνεχή δυσφορία του χρήστη της οδού. Επομένως, στο πλαίσιο κατασκευής ή διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων, ο ενασχολούμενος με τα οδοστρώματα οδοποιός, κατά τη διάστρωση, δεν πρέπει να εστιάζει μόνο στη μείωση του πλάτους των μικρού μήκους κυματισμών της επιφάνειας νέων ή αποκαταστημένων οδοστρωμάτων, προκειμένου να διασφαλίσει ένα υψηλό, ή έστω αποδεκτό, επίπεδο ποιότητας κύλισης, αλλά και στη μείωση του πλάτους των μεγαλύτερου μήκους κυματισμών.

Πιστεύεται λοιπόν ότι, η αξιολόγηση της ομαλότητας, σε κάθε φάση λειτουργίας ενός οδοστρώματος, πρέπει απαραίτητα να είναι συνδυασμένη με τη δυναμική φασματική ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας του, η οποία με τη ραγδαία εξέλιξη των λογισμικών ανάλυσης μπορεί να γίνει σχετικά γρήγορα και να υποστηρίξει τα αποτελέσματα αξιολόγησης ενός εύχρηστου δείκτη, όπως είναι ο IRI. Με βάση επίσης και την ανάδειξη της σημασίας της ταχύτητας, στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μεθοδολογία για την εκτίμηση κριτηρίων αξιολόγησης της ομαλότητας, σε διάφορα στάδια λειτουργίας των οδοστρωμάτων, για διαφορετικές ταχύτητες κυκλοφορίας.

Η προσέγγιση για την ανάπτυξη των κριτηρίων ομαλότητας στηρίζεται στην απευθείας μέτρηση των αποκλίσεων της επιφάνειας ενός οδοστρώματος και στα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης των κυματισμών της. Έτσι, κατά τη διεξαγωγή ενός μεγάλου οδικού πειράματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ομαλότητας σε πλήθος οδικών τμημάτων, όπου τα οδοστρώματα διέφεραν ως προς την ηλικία τους και κατά συνέπεια ως προς την κατάσταση τους. Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής, οδήγησε στην εκτίμηση ορίων ομαλότητας για τον δείκτη IRI, τα οποία προήλθαν από το συσχετισμό του υπόψη δείκτη με τα σχετικά αποτελέσματα της PSD ανάλυσης και την αξιοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν τα βασικά χαρακτηριστικά των κυματισμών. Τα κριτήρια αυτά, τα οποία μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν στην πράξη, αναπτύχθηκαν σε αντιστοιχία με θεωρούμενες ταχύτητες κίνησης, καθώς όπως αποδεικνύεται στην παρούσα διερεύνηση, η ταχύτητα έχει μεγάλη σημασία στον τρόπο με τον οποίο οι κυματισμοί της επιφάνειας του οδοστρώματος υπεισέρχονται στην αξιολόγηση της ομαλότητας. Επιπλέον, για τη διατύπωση των υπόψη κριτηρίων σε προδιαγραφές ή οδηγίες για την ομαλότητα γίνονται προτάσεις, σχετικά με το μήκος αναφοράς του δείκτη IRI, αλλά και τον καθορισμό ενός ποσοστού επί της υπό διερεύνηση επιφάνειας για την αποδοχή της ποιότητα κύλισης με βάση τα υπόψη κριτήρια.

Η ομαλότητα των οδοστρωμάτων συνδέεται μέσω της επιτελεστικότητας τους και με τη σύγχρονη αντίληψη για την προστασία των οδοστρωμάτων, η οποία είναι μια σύνθετη διαδικασία, με βασική προϋπόθεση ευρύτερα, τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους και ειδικότερα, τη δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας. Διεθνώς, η πρόβλεψη της ομαλότητας περιορίζεται σε απλοϊκούς, στατιστικούς αλγορίθμους πρόβλεψης. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα, καθώς επικεντρώνεται στην καταγραφή και σχετική στατιστική επεξεργασία του δείκτη IRI, για τυχόν εφαρμοσιμότητα μόνο σε συγκεκριμένη κατηγορία οδοστρωμάτων, σε επίπεδο δικτύου. Αντίθετα, η παρούσα διερεύνηση εστιάζει στην πραγματική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων, η οποία ουσιαστικά εκφράζεται, μόνο μέσω του συνόλου των μηχανικών

χαρακτηριστικών των μιγμάτων των στρώσεων. Προς τούτο προτείνεται η ανάπτυξη ενός προκαταρκτικού μηχανιστικού προτύπου πρόβλεψης της εξέλιξης της ομαλότητας. Η ανάλυση αυτή είναι κατάλληλη σε επίπεδο έργου (project level).

Κατά τη διερεύνηση, το θέμα της πρόβλεψης της ομαλότητας προσομοιάζεται μέσα από τη δημιουργία παραμορφώσεων κατά μήκος της επιφάνειας ενός οδοστρώματος, ως το αθροιστικό αποτέλεσμα των παραμενουσών παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις. Βασική παραδοχή είναι ότι, ένα οδόστρωμα δεν είναι ομογενές, αλλά αποτελείται κατά μήκος από επιμέρους διατομές, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά τόσο ως προς τα πάχη, όσο και ως προς τα μίγματα των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Άρα, ο υπολογισμός των παραμενουσών παραμορφώσεων μέσω του θεωρούμενου προσομοιώματος δίνει διαφορετική τιμή από διατομή σε διατομή. Το διάγραμμα των υπολογισμένων παραμενουσών παραμορφώσεων κατά μήκος του υπό διερεύνηση οδοστρώματος προσομοιώνει τις προβλεπόμενες αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια και κατά συνέπεια εκφράζει, την προβλεπόμενη ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος για δεδομένη κυκλοφορία και δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η υπόψη προσέγγιση στηρίζεται στη μηχανική ανάλυση των οδοστρωμάτων και υλοποιείται με το προτεινόμενο πρότυπο PROviMA (Prediction of Roughness viewing Mechanical Analysis) ως ένα προκαταρκτικό βήμα για την πρόβλεψη της εξέλιξης της ομαλότητας στο χρόνο, αρχικά σε επίπεδο έργου.

Σημειώνεται ότι, η αναζήτηση για την επιλογή ενός μηχανιστικού συστήματος ή προσομοιώματος για την εκτίμηση των παραμενουσών παραμορφώσεων αποτελεί ένα κρίσιμο θέμα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η κατανόηση των αρχών της μηχανικής των οδοστρωμάτων και της συμπεριφοράς τους σε βάθος χρόνου λειτουργίας τους, δίνει το πλαίσιο για την επιλογή ενός κατάλληλου για το σκοπό της έρευνας μηχανιστικού προσομοιώματος. Στην παρούσα εργασία, μέσα από ενδελεχή διερεύνηση, επιλέγεται ως κατάλληλο για τον υπολογισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων, προσομοίωμα, το οποίο εκφράζει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των υλικών των επιμέρους στρώσεων.

Για τη διερεύνηση της εφικτότητας πρόβλεψης της εξέλιξης της κατά μήκος ομαλότητας υπό την έννοια της ανάπτυξης παραμενουσών παραμορφώσεων στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων, σύμφωνα με το προτεινόμενο πρότυπο PROviMA, πραγματοποιήθηκε οδικό πείραμα σε τμήμα αυτοκινητοδρόμου. Με βάση τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά και με κατάλληλες παραδοχές σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων των στρώσεων, αναπτύχθηκε το διάγραμμα των παραμενουσών παραμορφώσεων -έτσι όπως προκύπτει με εφαρμογή του PROviMA-,

καθώς και το διάγραμμα της κατά μήκος ομαλότητας, σε δεδομένο χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα σχετικών στατιστικών αναλύσεων για τη σύγκριση των μετρημένων και των προβλεπόμενων, μέσω του PROviMA, αποκλίσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος από τη θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια, ήταν ιδιαίτερα ευοίωνα, καθώς προκύπτει ενθαρρυντική σύγκλιση των μορφών των συγκρινόμενων διαγραμμάτων. Η σύγκλιση αυτή είναι καλύτερη στην περίπτωση όπου τα πάχη των στρώσεων έχουν εκτιμηθεί με τη βοήθεια γεωφυσικής μεθόδου (GPR), η οποία πιστεύεται ότι αναπαριστά σαφώς καλύτερα την πραγματική κατάσταση του οδοστρώματος.

Όμως σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητη η περαιτέρω εξέλιξη του προτεινόμενου προτύπου PROviMA. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να αφορά στον ακριβέστερο προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και μιγμάτων των στρώσεων, όπως για παράδειγμα είναι η περαιτέρω έρευνα στο πλαίσιο της εκτίμησης των παραμέτρων α και μ των παραμενουσών παραμορφώσεων, μέσω συνδυασμού εξελιγμένων δοκιμών στο εργαστήριο και περαιτέρω συστηματικής βαθμονόμησης των αποτελεσμάτων τους, με επιτόπου συναφή, στοιχεία από πειραματικά οδοστρώματα. Μια τέτοια έρευνα αποτελεί από μόνη της ένα θεμελιώδες θέμα. Επιπλέον πιστεύεται ότι μια περαιτέρω εξέλιξη της έρευνας είναι η διερεύνηση εφικτότητας ως προς το υπόψη θέμα της χρήσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων μη γραμμικής, δυναμικής ανάλυσης για τη θεώρηση τη ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των υλικών.

Πέραν της πρόληψης και της προστασίας του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας του, η πρόβλεψη της ομαλότητας μέσω του προτύπου PROviMA είναι δυνατό να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των διαφόρων τύπων μιγμάτων των στρώσεων ενός οδοστρώματος κατά το σχεδιασμό του, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση του νέου οδοστρώματος. Με ανάλογο τρόπο, είναι δυνατό να γίνει και η αξιολόγηση διαφόρων προτάσεων ή τεχνολογιών για την αποκατάσταση ενός εν λειτουργία οδοστρώματος μέσω της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του, στο πλαίσιο διαφόρων εναλλακτικών προτάσεων συντήρησης/αποκατάστασης. Επιπλέον, μέσω της προτεινόμενης προσομοίωσης που περιγράφει το πρότυπο PROviMA, θα μπορούσε να διερευνηθεί η συμπεριφορά συμβατικών, καθώς και νέων υλικών των μιγμάτων.

Σε όλες τις περιπτώσεις, βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου προτύπου PROviMA είναι ότι, για η λειτουργία του βασίζεται στη χρησιμοποίηση συστημάτων μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT). Οι δοκιμές αυτές, αφενός δεν διαταράζουν τη δομή του οδοστρώματος, με άμεσα επίσης οφέλη ως προς την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους για τη διεξαγωγή των απαιτούμενων ελέγχων και αφετέρου, τα αποτελέσματα τους αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση του οδοστρώματος. Επιπλέον, πιστεύεται

ότι η περαιτέρω ανάπτυξη και επέκταση του προτύπου, μπορεί εν δυνάμει να οδηγήσει στη δημιουργία βάσιμων προϋποθέσεων, για την εφαρμογή του σε επίπεδο δικτύου.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συγκλίνουν στην ανάδειξη της σημασίας ύπαρξης ενός συστήματος πρόβλεψης και αξιολόγησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων, όπου το ενδεχόμενο πρόβλημα ομαλότητας δεν απορρέει μόνο από τη λειτουργική κατάσταση τους, αλλά τίθεται και με βάση τη δομική κατάστασή τους. Πιστεύεται ότι η θεώρηση αυτή αποτελεί βασικό στοιχείο για τη διασφάλιση της επιτελεσματικότητας των σύγχρονων οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο της ευρύτερης διαχείρισης και προστασίας τους.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yoder E. J. & Witczak M. W. 1975. Principles of pavement design. 2nd edition, Wiley J. & Sons publishers.
- [2] Ullitdz, P. 1987. Pavement analysis. Elsevier Science publishers, Amsterdam.
- [3] Κόλλιας, Σ. & Λοΐζος, Α. 2004. Ειδικά θέματα οδοστρωμάτων. Σημειώσεις, 9ο εξαμ. Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.
- [4] COST-343 2000. Reduction in road closure by improved pavement maintenance procedures. Final report, EU.
- [5] FEHRL 2004. ELLPAG: A guide to the use of long-life fully-flexible pavements. FEHRL Report 2004/01, Brussels, Belgium.
- [6] APA 2002. Perpetual pavements: A synthesis. APA 101, Asphalt Pavement Alliance, National Asphalt Pavement Association (NAPA) – Asphalt Institute (AI) – State Asphalt Pavement Associations (SAPA)
- [7] EIC 2003. White book on BOT/PPP. European International Contractors, Germany
- [8] NCHRP 1996. Cost effective preventive pavement maintenance. Synthesis of Highway Practice 223, National Cooperative Research Program, National Academy Press, Washington, D.C.
- [9] TRB 2009. Pavement Monitoring and Evaluation. Committee AFD20, Transportation Research Board (TRB) 88th Annual Meeting, Washington, D.C.
- [10] FHWA 2003. Pavement preservation compendium. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation
- [11] FHWA 2006. Pavement preservation compendium II. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation
- [12] PARIS 1999. Performance analysis of road infrastructure. Report, Transport Research, 4th Framework Program, Road Transport, Transport DG-109.
- [13] Carey, W.N. & Irick, P.E. 1960. The Pavement serviceability – Performance concept. Highway Research Board Bulletin 250.

- [14] COST-354 2008. The way forward for pavement performance indicators. Cost Action 354 Performance Indicators for Road Pavements, Final Report, EU.
- [15] TRB Committee AFD90, 2009. Surface Properties - Vehicle Interaction. Transportation Research Board (TRB) 88th Annual Meeting, Washington, D.C
- [16] OECD 1984. Road surface characteristics: their interaction and their optimization. Road Transport Research, Paris, France.
- [17] Gillespie, T.D. 1992. Everything you always wanted to know about IRI, but you afraid to ask!. Report, Road Profile Users Group Meeting, Lincoln, Nebraska.
- [18] Austroads 2001. Guidelines for road condition monitoring, Part 1: Pavement Roughness. Austroads Inc., Sydney
- [19] Shahin M. Y. 2005. Pavement management for airports, roads, and parking lots, 2nd edition, published by Springer Science.
- [20] AASHTO 2008. Pavement smoothness: Comparative performance measurement. Report, American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- [21] Karamihas, S. & Senn, K. A. 2009. Detailed profile analysis on the Arizona SPS-5 project. 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., Paper #09-3020 (DVD-Compendium).
- [22] Jiang, Y. & Li, S. 2005. Gray system model for estimating the pavement international roughness index. Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE), 19(1): 62-68.
- [23] Lee, D. G. 2007. Dynamic prediction model of as-built roughness in asphaltic concrete pavement construction. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 133(2): 90-94.
- [24] Loizos, A., Roberts, J. & Crank, S. 2002. Asphalt pavement deterioration models for mild climatic conditions. Proceedings, 9th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Copenhagen.
- [25] Λοΐζος, Α. & Παπανικολάου, Α. 2005. Προκαταρκτική αξιολόγηση προσομοίωσης συμπεριφοράς οδοστρωμάτων στο πλαίσιο συστημάτων διαχείρισης τους. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, 1(2-3): 59-72.

- [26] Roberts, J., Roper, R. & Loizos A. 2003. PLATO: A new engine for the implementation of HDM technology for road infrastructure management analysis. *Road & Transport Research*, 12(2): 81-100.
- [27] Li N., Haas P. & Xie W. C. 1997. Development of a new asphalt pavement performance prediction model. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 24(4): 547-559
- [28] Ruotoistenmäki A., Seppälä T. & Kanto A. 2006. Comparison of modeling and measurement accuracy of road condition data. *Journal of Transportation Engineering*, 132(9): 715-721
- [29] Lengren, C. A. & Granlund J. 2002. Relating road roughness to human discomfort and health impact. *Proceedings, 9th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Copenhagen*.
- [30] ASTM 1992. *Vehicle, Tire, Pavement Interface*. STP 1164, American Society for Testing and Materials, J. J. Henry & J. C. Sayers (eds), Philadelphia.
- [31] Sayers, M. W. & Karamihas, S. M. 1998. *The little book of profiling*. University of Michigan.
- [32] Loizos A., Golias I., Kanellaidis G. & Kondou M. 1994. Effects of vehicle type and users characteristics on roadway roughness perception. *Road & Transport Research*, 3(4): 57-65.
- [33] Sun, L. 2001. Computer simulation and field measurement of dynamic pavement loading. *Mathematics and Computers in Simulation*, Elsevier, 56(3): 297-313.
- [34] Sun, L. 2002. Optimum design of "road-friendly" vehicle suspension systems subjected to rough pavement surfaces. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, 26(5): 635-652.
- [35] SNRA 2000. *Whole body vibration when riding on rough roads*. Road Engineering Division, National Road Management Division, Swedish National Road Administration.
- [36] Jannoff, M.S. 1981. *Pavement roughness and rideability field evaluation*. Report 308, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.

- [37] Nakamura, V.F. & Michael H.L. 1963. Serviceability ratings of highway pavements. Highway Research Record 40: 21-36.
- [38] Potter D. 1992. An investigation of car users' perceptions of the ride quality of roads. Road and Transport Research, 1(1): 6-26.
- [39] Richards, L. G. 1982. Subjective ride quality testing procedures. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 894: 36-42.
- [40] Gerlach, A., Loizos, A. & Lucke, H. 1987. The influence of stiffness progress of different pavement layers on the size and shape of rut depth in the pavement surface. Proceedings, 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA, I: 72-81.
- [41] Liu, C. & Gazis D. 1999. Surface roughness effect on dynamic response of pavements. Journal of Transportation Engineering, 125(4): 332-337.
- [42] Λοΐζος Α. 2008. Οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων. Σημειώσεις, 8ο εξαμ. Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.
- [43] Burns, J.C. 1981. Roughness and roadway safety. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 836: 8-14.
- [44] Gillespie, T. D. 1981. Technical considerations in the worldwide standardization of road roughness measurement. Report to the World Bank, UM-HSRI-81-28, Highway Safety Research Institute, University of Michigan.
- [45] Elmadany, M. M. Dokainish, M. A. & Allan A. B. 1979. Ride dynamics of articulated vehicles-A Literature survey. Vehicle System Dynamics 8: 287-316.
- [46] Zaniewski, J. P. and B. C. Butler 1985. Vehicle operating costs related to operating mode, road design and pavement condition. In Measuring Road Roughness and its Effect on User Cost and Comfort, ASTM STP 884, T. D. Gillespie & Michael Sayers (eds), American Society for Testing and Materials.
- [47] Ross, F.R. 1982. Effect of pavement roughness on vehicle fuel consumption. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 846: 1-6.
- [48] Janoff, M. S. 1988. Pavement roughness and rideability field evaluation. Report 308, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C.

- [49] Loizos A. 2001. A simplified application of fuzzy set theory for the evaluation of pavement roughness. *Road & Transport Research* 10(4): 21-32.
- [50] Loizos, A. & Plati, C. 2002. Road roughness measured by profilograph in relation to users's perception and the need for repair: A case study. *Proceedings, 14th Road Profiler User Group (RPUG) Annual Meeting, Roanoke, VA.*
- [51] Garg, A., Horowitz, A. & Ross, F. 1988. Establishing relationships between pavement roughness and perceptions of acceptability. *Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record* 1196: 276-285.
- [52] Terzi, S. 2006. Modeling the pavement present serviceability index of flexible highway pavements using data mining. *Journal of Applied Sciences* 6 (1): 193-197
- [53] Spangler, E.B. & Kelly, W. J. 1966. GMR road profilometer- A method for measuring road profile. *Highway Research Record* 121: 27-54.
- [54] Nick, J.B. & Janoff, M.S. 1983. Evaluation of panel rating methods for assessing pavement ride quality. *Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record* 946: 5-13.
- [55] Sayers, M.W., Gillespie, T.D. & Queiroz, C.A.V. 1986. International experiment to establish correlations and standard calibration methods for road roughness measurements. Final report, UMTRI-84-12-1, University of Michigan Transportation Research
- [56] SHRP 1994. Manual for Profile Measurements: Operational Field Guidelines. SHRP-P-378, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C.
- [57] PIARC 2002. International experiment to harmonize longitudinal and transverse profile measurement and reporting procedure. Technical Report, PIARC Technical Committee on Surface Characteristics (C1), PIARC – World Road Association, France.
- [58] FERHL 2001. Filter experiment longitudinal analysis. Final report
- [59] Perera R. W. & Kohn, S. D. 2002. Issues in pavement smoothness: A summary report. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.

- [60] Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ. & Κανελλαΐδης Γ. 2002. Αξιολόγηση της Ομαλότητας Υφιστάμενων Ασφαλτικών Οδοστρωμάτων. Proceedings, 3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, November, II: 933-946.
- [61] Jordan, P. G. & Young, J. G. 1981. Development in the calibration and use of the bump integrator. The Highway Engineer 28(4): 2-8.
- [62] De Wit L. B., Kempkens E., Sjogren L. & Ducros D. M. 1999. FILTER Experiment: Organization and carrying out comparison experiment of high speed longitudinal and transverse road evenness measuring equipment used in Europe. FERHL. Interim Report published by Road and Hydraulic Engineering Division (DWW), Netherlands
- [63] Marcondes J. 1991. Spectral analysis of highway pavement roughness. Journal of Transportation Engineering, 117(5): 540-549.
- [64] Sun L. & Kennedy T. W. 2002. Spectral analysis and parametric study of stochastic pavement loads. Journal of Engineering Mechanics, 128(3): 318-327.
- [65] Sun L. 2002 Optimum design of "road-friendly" vehicle suspension systems subjected to rough pavement surfaces. Applied Mathematical Modelling, 26 (5): 635-652.
- [66] Sayers, M. W. & Karamihas, S. M. 1996. Estimation of rideability by analyzing longitudinal road profile. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 1536: 110-116.
- [67] Sayers, M. W. & Karamihas S. M. 1996. Interpretation of road roughness profile data. Final Report, Federal Highway Administration.
- [68] Gillespie T. D. 1992. Fundamentals on vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers (SAE).
- [69] Sayers, M. 1995. On the calculation of international roughness index for the longitudinal road profile. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 1501: 1-12.
- [70] Dore, G., Flamand, M. & Pascale, P. 2002. Analysis of the wavelength content of the longitudinal profiles for C-LTPP test sections. Canadian Journal of Civil Engineering, 29: 50-57.

- [71] Sun, L. 2003. Simulation of pavement roughness and IRI based on power spectral density. *Mathematics and Computers in Simulation* 61(2): 77–88
- [72] ARRB, 2002. Portable Laser Profiler- Data Acquisition User Manual. Melbourne, Australia.
- [73] ARRB, 2002. Portable Laser Profiler- Data Analysis User Manual. Melbourne, Australia
- [74] FHWA 2005. ProVal Version 2.5 - Pavement Profile Viewing and Analysis User's Guide. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C.
- [75] Λοϊζος, Α., Πλατή, Χ. & Κανελλαΐδης, Γ. 2005. Ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών, Πρακτικά, 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
- [76] Mann, A. V., McManus, K. J. & Holden, J. C. 1997. Power spectral density analysis of road profiles for road defect assessment. *Road and Transport Research*, 6 (3): 36-47.
- [77] ISO 1990. Mechanical vibration and Shock. ISO 2631/1-1985(E), ISO Standards Handbook, International Organization for Standardization.
- [78] Loizos, A. & Plati, C. 2008. Evolutional process of pavement roughness evaluation benefiting from sensor technology. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems (IJSSIS)*, 1(2): 370-387
- [79] Mouratidis, A. & Nikolidakis, P. 2002. Settlement analysis of a roadway embankment body. *Proceedings, 3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, Thessaloniki, November, 1: 283-292.
- [80] Loizos, A., Plati, C. & Wix, R. 2007. Assessing the ride quality of a cold in- place recycled. *Pavement. Road & Transport Research*, 16(1): 3-19.
- [81] Loizos, A., Collings, D. & Jenkins, K. 2004. Rehabilitation of a major greek highway by recycling/stabilising with foamed bitumen», *Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements in South Africa (CAPSA)*, Sun City, SA.
- [82] Loizos, A. 2007. In-situ characterization of foamed bitumen treaded layer mixes for heavy-duty pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2): 123-135.

- [83] Loizos, A., Papavasiliou, V. & Plati, C. 2006. Evaluation of cold in-place pavement recycling using foamed asphalt. Proceedings, 10th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP) Quebec.
- [84] Loizos, A., Papavasiliou, V. & Plati, C. 2007. Early life performance of cold-in place pavement recycling using the foamed asphalt technique. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 2005: 36-43.
- [85] Loizos, A. & Papavasiliou, V. 2008. Evaluation of cracking in recycled pavements with foamed asphalt and cement stabilization. Proceedings, 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, In: Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories, Imad L. Al-Qadi, Tom Scarpas, & Andreas Loizos (eds), 519-528.
- [86] Loizos, A., Papavasiliou, V. & Plati, C. 2008. Quality control of cold-in place recycled asphalt pavement using non-destructive tests. Proceedings, 4th International Gulf Conference on Roads, Doha, Qatar, I. Al-Qadi, T. Sayed, N. Alnuaimi & E. Masad (eds): 653-662.
- [87] McGee, K. K. & Gillespie, J. S. 2007. Value of pavement smoothness. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 2040: 48-54
- [88] Gillespie, T. D., Karamihas, S. M., Sayers, M. W., Nasim M. A., Hansen, W., Ehsan N. & Cebon D., 1993. Effects of heavy-vehicle characteristics on pavement response and performance. Report 353, National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, Washington D.C.
- [89] Sun, L. 2001. Developing spectrum-based models for International Roughness Index and Present Serviceability Index. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 127(6): 463-470.
- [90] <http://www.iihs.org/laws/speedlimits.aspx>
- [91] <http://www.europe.org/speedlimits.html>
- [92] Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών 2007. Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας (ΚΟΚ), Άρθρο 20: Όρια ταχύτητας, 62-66.
- [93] Loizos, A. & Plati, C. 2008. An alternative approach to pavement roughness evaluation. International Journal of Pavement Engineering (IJPE), 9 (1): 69 – 78.

- [94] Loizos, A., Plati, C., Terovviti, E. & Kanellaidis G. 2007. Development of pavement roughness index using power spectral density analysis. Proceedings, International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, Athens, 1505-1514.
- [95] C-SHRP, 1999. Summary in pavement smoothness specifications in Canada and around the world. Canadian Strategic Highway Research Program, Technical Brief, No 16.
- [96] Nemmers, C. J., P.E., Gagarin, N. & Mekemson, J. R., 2006. Assessing IRI vs. PI as a measurement of pavement smoothness. Performing Organization Report for Missouri Department of Transportation, Sponsoring Agency MoDOT.
- [97] Wilde, W. J., Izevbekhai, B. I. & Krause, M. H. 2007. Comparison of profile index and international roughness index for pavement smoothness incentive specifications. Proceedings (CD Compendium), 86th Annual Meeting Transportation Research Board, Washington D.C.
- [98] Καλτσούνης, Α. 2001. Σύστημα σύμβασης παραχώρησης. Τόμος 2, τεύχος 1, εκδόσεις εργαστηρίου συγκοινωνιακής τεχνικής, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [99] Swan, M. & Karamihas, S. 2003. Use of a ride quality index for construction quality control and acceptance specifications. Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record 1861: 10-16
- [100] Plati, C. & Loizos, A. 2009. A method for benefiting pavement quality assurance measures related to roughness condition surveys. Proceedings, 8th International Conference on the Bearing Capacity of the Roads, Railways and Airfields (BCR2A), Champaign, Illinois, USA.
- [101] Washnigton, S. P., Karlaftis, M. G. & Mannering, F. L. 2003. Statistical and econometric methods for transportation data analysis. Chapman & Hall/CRC publishers.
- [102] Loizos, A., Scarpas, T. & Al-Qadi, I. 2007. Advanced characterization of pavement and soil engineering materials. Proceedings, International Conference on Advanced Characterization of Pavement and Soil Engineering Materials, published by Taylor & Francis, Athens, Greece.

- [103] ASTM 2009. Volume 04.03 - Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems. ASTM Standards.
- [104] ΥΠΕΧΩΔΕ 2003. Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων (ΤΣΥ) Οδικών Έργων Παραχώρησης, ΕΥΔΕ/ΟΑΠ.
- [105] Collop, A.C. & Cebon, D. 1997. A theoretical model of long term flexible pavement performance. Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Seattle, USA, I: 631-646.
- [106] Uzan, J. 2004. Permanent deformation in flexible pavements. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 130(1):6-13.
- [107] Sousa, J. B., Craus, J. & Monismith, C. L. 1991. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete. SHRP-A/IR-91-104, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- [108] Brown, S. 1997. Achievements and challenges in asphalt pavement engineering. Keynote lecture, Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Seattle, USA.
- [109] Brown, S. 2004. Design considerations for pavement and rail track foundations. Keynote lecture, Proceedings, International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece, A. G. Correia & A. Loizos (eds): 61-72.
- [110] Νικολαΐδης, Α. 1999. Συμπεριφορά ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Ι(3): 91-102.
- [111] Blab R. & Eberhardsteiner J. 2005. Methods for optimization of flexible road pavements. Progress Report of the Christian Doppler Research Laboratory, Technical University of Wien.
- [112] Asphalt Institute 1995. Superpave asphalt binder specification. Superpave Series No1, (SP-1), Asphalt Institute, USA.
- [113] Θεοδωρακόπουλος, Δ. & Μπέσκος, Δ. 2000. Δυναμική ανάλυση οδοστρωμάτων υπό την επίδραση κινούμενων φορτίων. Τελική έκθεση προγράμματος ΠΕΝΕΔ, Εργαστήριο Συγκοινωνιακών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

- [114] Timoshenko, S. 1970. Strength of materials. Part II Advanced, 3rd edition, D. Van Nostrand Company Inc. publishers, Holland.
- [115] Kim, R. Y. 2009. Modeling of asphalt concrete. ASCE Press.
- [116] RILEM TC-106 ATB 2008. Advanced testing and characterization of bituminous materials. '08 Annual Meeting of RILEM TC 206-ATB, University of Cagliari, Italy.
- [117] Scarpas, A. 1993. CAPA Finite Elements System-Version 2.6, FEMA User's Manual, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [118] AASHTO 1993. AASHTO guide for design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C.
- [119] Witczak, M. W., Kalogh, T., Pellinen, T., El-Basyouny, M. & Von Quintus, H. 2002. Simple performance test for superpave mix design. NCHRP Report 465, National Cooperative Research Program, National Research Council, Washington D.C.
- [120] TRB Committee AFD60 2009. Flexible pavement design. Transportation Research Board (TRB) 88th Annual Meeting, Washington, D.C
- [121] Zhou, F. & Scullion T. 2004. Guidelines for developing input parameters of enhanced VESYS5 program. Report No. FHWA/TX-05/9-1502-01-P5, Texas Transportation Institute, Texas A&M University
- [122] Zhou, F. & Scullion T. 2006. Asphalt pavement performance analysis tool TTI VESYS5W. Report No FHWA/TX-06/9-1502-01-5, Texas Transportation Institute, Texas A&M University
- [123] Kennis, W. & Wang, W. 1997. Calibrating mechanistic flexible pavement rutting models from full scale accelerated tests. Proceedings, 8th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP), Seattle, USA.
- [124] Chen, D-H. & Hugo, F. 2001. Comparison of two pavement rehabilitation strategies. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 127(1): 47-58.
- [125] TRB Committee AFD80 2009. Strength and deformation characteristics of pavement sections. Transportation Research Board (TRB) 88th Annual Meeting, Washington, D.C

- [126] Fritz, H.W. & Eustacchio, E. 1991. Mechanical tests for bituminous mixes- Characterization, design and quality control. Proceedings, 4th RILEM International Symposium on Bitumen and Asphalt Testing, TC 101-BAT, Budapest.
- [127] Huang, Y. H. 2004. Pavement analysis and design. 2nd Edition, Pearson Education, Inc.
- [128] Collop, A. C., Cebon, D. & Hardy, M.S.A. 1995. Viscoelastic approach to rutting in flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering (ASCE)*, 121(1): 82-93.
- [129] Peattie, K. R. 1978. Flexible pavement design. In: *Developments in highway pavement engineering -1*, P.S. Pell (ed), Applied Science Publishers Ltd, London, England, 1-40.
- [130] Brown, S. F. 1978. Material characteristics for analytical pavement design. In: *Developments in highway pavement engineering -1*, P.S. Pell (ed), Applied Science Publishers Ltd, London, England, 41-92.
- [131] El-Basyouny, M. M., Witczak, M. W. & Zapata, C. E. 2007. Development of ac rutting model using permanent strain database. Proceedings (CD Compendium), TRB 86th Annual Meeting, Washington D.C.
- [132] COST-325 1997. New road monitoring equipment and methods. Final report, COST Action, EU.
- [133] Simpson, A. L., Ostrom, B. K. & Schmalzer, P. N. 2006. Guidelines for the collection of long-term pavement performance data. FHWA-HRT-06-067, Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.
- [134] Saarenketo, T. & Scullion, T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43: 119-138.
- [135] Aalavi, S., LeCates, J. F. & Tavares, M.P. 2008. Falling weight deflectometer usage. NCHRP Synthesis 381, National Cooperative Highway Research Program, A Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C.
- [136] Maser, K. 1996. Condition assessment of transportation infrastructure using ground penetrating radar. *Journal of Infrastructure Systems (ASCE)*, 2(2): 94-101.

- [137] Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ. & Ζάχος, Γ. 2005. Εκτίμηση παχών ασφαλικών στρώσεων οδοστρώματος με χρήση γεωφυσικής μεθόδου, Πρακτικά, Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
- [138] GSSI 2001. Radan for Windows: User's manual. Geophysical Survey Systems Inc.
- [139] ROADSCANNERS 2001. RoadDoctor software: User's guide. Finland: Roadscanners Oy.
- [140] Loulizi, A., Al-Qadi I. & Lahouar S. 2003. Optimization of ground penetrating radar to predict layer thicknesses in flexible pavements. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 129(1): 93-99.
- [141] Loizos, A. and Plati, C. 2007. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. NDT & E International, 40(2): 147-157.
- [142] Loizos, A. and Plati, C. 2007. Accuracy of ground penetrating radar horn-antenna technique for sensing pavement subsurface. Sensors Journal (IEEE), 7(5): 842 – 850.
- [143] Dynatest 2001. 8002 FWD Test System: Owner's Manual, Denmark
- [144] COST-336 1998. Guidelines for evaluation of flexible pavement of project level using falling weight deflectometer. Cost Action 336, Final Report, EU.
- [145] Λοΐζος, Α. & Σαριδάκης Δ. 1994. Αξιολόγηση μετρήσεων φέρουσας ικανότητας ασφαλιστοπατήτων οδοστρωμάτων. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, 14(4): 99-124.
- [146] Ellis, E., Yu, H. S., McDowell, G., Dawson, A. & Thom, N. 2008. Advances in transportation geotechnics. Proceedings, 1st International Conference on Transportation Geotechnics, Nottingham, UK.
- [147] ΣΕΠΤΕΠ 2002. Α-100: Ασφαλικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου για ασφαλικές στρώσεις. Σχέδιο Ελληνικών Προτύπων Τεχνικών Προδιαγραφών, Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (ΙΟΚ), ΥΠΕΧΩΔΕ.
- [148] ΕΥΔΕ-ΠΑΘΕ 1999. Αντιολισθηρές στρώσεις κυκλοφορίας. Σχέδιο τεχνικών οδηγιών, ΥΠΕΧΩΔΕ.

- [149] Devore, J. & Peck, R. 2001. Statistics- The exploration and analysis of data. 4th Edition, Thomson learning Inc.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1: Στοιχεία υποκεφαλαίου 3.4.2 (σχήμα 3.8)

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Υψομετρικές αποκλίσεις (m ² - m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.0006	1.09E+04	1.37E+04
0.0012	8.39E+03	9.51E+03
0.0018	3.94E+03	4.96E+03
0.0025	3.89E+02	5.93E+02
0.0031	4.59E+01	4.54E+01
0.0037	7.96E+00	6.56E+00
0.0043	3.06E+00	7.71E+00
0.0049	9.52E+00	7.15E+00
0.0055	5.87E+00	5.49E+00
0.0061	1.61E-01	9.96E-01
0.0068	8.15E+00	4.39E+00
0.0074	2.22E+00	8.90E-01
0.008	1.20E-01	1.10E+00
0.0086	5.55E-01	1.58E-01
0.0092	3.15E-01	2.76E-01
0.0098	1.12E+00	2.34E-01
0.0104	1.36E+00	7.10E-01
0.0111	4.14E-02	8.92E-02
0.0117	5.52E-02	7.38E-03
0.0124	1.31E-01	1.30E-01
0.0132	2.33E-01	6.20E-02
0.0139	9.37E-02	1.29E-01
0.0148	1.08E-02	5.67E-02
0.0157	8.67E-02	1.09E-01
0.0166	1.50E-01	2.64E-02
0.0176	5.31E-02	3.59E-02
0.0186	2.99E-02	2.02E-02
0.0197	2.48E-02	1.21E-02
0.0209	7.62E-03	3.93E-03
0.0221	2.02E-02	5.73E-03
0.0234	1.61E-02	6.63E-03
0.0248	8.42E-03	7.18E-03
0.0263	1.19E-02	2.69E-03
0.0279	1.13E-02	7.40E-03
0.0295	5.04E-03	4.54E-03
0.0313	4.30E-03	3.06E-03
0.0332	2.12E-03	2.36E-03
0.0351	1.81E-03	2.04E-03
0.0372	1.91E-03	2.23E-03
0.0394	8.78E-04	4.87E-04

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Υψομετρικές αποκλίσεις (m ² - m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.0418	9.01E-04	1.65E-03
0.0443	1.72E-03	1.35E-03
0.0469	1.04E-03	9.33E-04
0.0497	1.36E-03	1.21E-03
0.0526	7.99E-04	3.19E-04
0.0558	3.70E-04	4.85E-04
0.0591	6.64E-04	5.20E-04
0.0626	3.12E-04	4.17E-04
0.0663	1.83E-04	3.08E-04
0.0703	2.16E-04	3.27E-04
0.0744	4.59E-04	3.19E-04
0.0789	9.49E-05	6.01E-05
0.0836	9.30E-05	1.42E-04
0.0885	1.67E-04	1.18E-04
0.0938	1.35E-04	2.16E-04
0.0994	4.93E-05	5.79E-05
0.1053	1.29E-04	1.10E-04
0.1115	4.00E-05	4.17E-05
0.1182	3.85E-05	6.99E-05
0.1252	6.11E-05	3.44E-05
0.1326	4.91E-05	5.62E-05
0.1405	4.08E-05	3.55E-05
0.1489	2.20E-05	2.78E-05
0.1577	2.70E-05	2.32E-05
0.1671	2.18E-05	2.78E-05
0.1771	1.21E-05	1.82E-05
0.1876	1.94E-05	2.52E-05
0.1987	1.16E-05	1.80E-05
0.2106	2.67E-05	1.71E-05
0.2231	1.95E-05	1.06E-05
0.2363	1.32E-05	8.16E-06
0.2504	9.19E-06	9.54E-06
0.2653	7.02E-06	1.02E-05
0.2811	8.95E-06	1.30E-05
0.2978	8.70E-06	8.69E-06
0.3155	6.19E-06	7.21E-06
0.3342	8.02E-06	5.35E-06
0.3541	9.04E-06	5.01E-06
0.3752	2.33E-06	5.27E-06
0.3975	4.03E-06	5.04E-06
0.4211	4.44E-06	4.70E-06

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Υψομετρικές αποκλίσεις (m ² - m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.4462	3.31E-06	4.16E-06
0.4727	3.07E-06	2.54E-06
0.5008	3.39E-06	2.35E-06
0.5306	2.03E-06	2.24E-06
0.5621	1.74E-06	2.19E-06
0.5956	1.75E-06	1.97E-06
0.631	1.72E-06	2.13E-06
0.6685	2.17E-06	1.36E-06
0.7082	1.67E-06	1.16E-06
0.7504	1.39E-06	1.08E-06
0.795	1.20E-06	8.42E-07
0.8423	1.11E-06	9.64E-07
0.8923	9.33E-07	9.64E-07
0.9454	9.69E-07	8.64E-07
1.0016	7.23E-07	7.91E-07
1.0612	7.70E-07	6.98E-07
1.1243	6.20E-07	7.55E-07
1.1911	5.27E-07	7.59E-07
1.262	5.66E-07	5.84E-07
1.337	5.22E-07	7.09E-07
1.4165	4.14E-07	5.58E-07
1.5007	3.45E-07	4.38E-07
1.59	3.92E-07	3.96E-07
1.6845	3.57E-07	4.32E-07
1.7847	3.05E-07	3.48E-07
1.8908	2.79E-07	3.05E-07
2.0032	2.49E-07	2.75E-07
2.1223	2.04E-07	2.69E-07
2.2485	1.76E-07	2.45E-07
2.3823	1.74E-07	2.21E-07
2.5239	1.28E-07	1.75E-07
2.674	1.09E-07	1.65E-07
2.833	1.15E-07	1.45E-07
3.0015	1.11E-07	1.31E-07
3.1799	1.05E-07	1.16E-07
3.369	8.41E-08	1.25E-07
3.5694	6.49E-08	1.32E-07
3.7816	5.98E-08	1.06E-07
4.0065	4.86E-08	9.04E-08
4.2447	4.45E-08	7.98E-08
4.4971	4.25E-08	1.22E-07

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Υψομετρικές αποκλίσεις (m ² - m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
4.7645	3.17E-08	7.73E-08
5.0478	3.58E-08	7.04E-08
5.348	3.10E-08	1.03E-07
5.666	2.68E-08	6.73E-08
6.0029	2.39E-08	4.62E-08
6.3599	1.73E-08	3.56E-08
6.738	1.39E-08	3.35E-08
7.1387	1.23E-08	2.15E-08
7.5632	1.01E-08	2.47E-08
8.0129	8.45E-09	2.38E-08
8.4894	7.67E-09	1.55E-08
8.9942	6.35E-09	1.30E-08

Πίνακας Π2: Στοιχεία υποκεφαλαίου 3.4.2 (σχήμα 3.9)

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.0006	1.63E-01	2.04E-01
0.0012	5.00E-01	5.67E-01
0.0018	5.28E-01	6.66E-01
0.0025	9.28E-02	1.41E-01
0.0031	1.71E-02	1.69E-02
0.0037	4.27E-03	3.52E-03
0.0043	2.24E-03	5.63E-03
0.0049	9.08E-03	6.82E-03
0.0055	7.09E-03	6.63E-03
0.0061	2.41E-04	1.48E-03
0.0068	1.47E-02	7.91E-03
0.0074	4.76E-03	1.91E-03
0.008	3.03E-04	2.77E-03
0.0086	1.62E-03	4.62E-04
0.0092	1.06E-03	9.27E-04
0.0098	4.28E-03	8.94E-04
0.0104	5.86E-03	3.06E-03
0.0111	2.00E-04	4.31E-04
0.0117	3.00E-04	4.00E-05
0.0124	7.95E-04	7.92E-04
0.0132	1.60E-03	4.24E-04
0.0139	7.19E-04	9.88E-04
0.0148	9.29E-05	4.89E-04
0.0157	8.39E-04	1.05E-03
0.0166	1.63E-03	2.86E-04
0.0176	6.47E-04	4.38E-04
0.0186	4.09E-04	2.76E-04
0.0197	3.81E-04	1.86E-04
0.0209	1.31E-04	6.77E-05
0.0221	3.91E-04	1.11E-04
0.0234	3.50E-04	1.44E-04
0.0248	2.05E-04	1.75E-04
0.0263	3.27E-04	7.36E-05
0.0279	3.46E-04	2.27E-04
0.0295	1.74E-04	1.56E-04
0.0313	1.66E-04	1.18E-04
0.0332	9.18E-05	1.02E-04
0.0351	8.81E-05	9.95E-05
0.0372	1.05E-04	1.22E-04
0.0394	5.39E-05	2.99E-05

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.0418	6.21E-05	1.13E-04
0.0443	1.33E-04	1.04E-04
0.0469	8.99E-05	8.10E-05
0.0497	1.32E-04	1.18E-04
0.0526	8.74E-05	3.49E-05
0.0558	4.54E-05	5.96E-05
0.0591	9.15E-05	7.16E-05
0.0626	4.83E-05	6.45E-05
0.0663	3.18E-05	5.35E-05
0.0703	4.21E-05	6.38E-05
0.0744	1.01E-04	6.97E-05
0.0789	2.33E-05	1.48E-05
0.0836	2.56E-05	3.92E-05
0.0885	5.17E-05	3.65E-05
0.0938	4.69E-05	7.52E-05
0.0994	1.92E-05	2.26E-05
0.1053	5.65E-05	4.79E-05
0.1115	1.97E-05	2.05E-05
0.1182	2.12E-05	3.85E-05
0.1252	3.78E-05	2.13E-05
0.1326	3.41E-05	3.90E-05
0.1405	3.18E-05	2.77E-05
0.1489	1.93E-05	2.43E-05
0.1577	2.65E-05	2.28E-05
0.1671	2.40E-05	3.07E-05
0.1771	1.50E-05	2.25E-05
0.1876	2.69E-05	3.50E-05
0.1987	1.81E-05	2.81E-05
0.2106	4.68E-05	2.99E-05
0.2231	3.82E-05	2.09E-05
0.2363	2.91E-05	1.80E-05
0.2504	2.27E-05	2.36E-05
0.2653	1.95E-05	2.82E-05
0.2811	2.79E-05	4.05E-05
0.2978	3.04E-05	3.04E-05
0.3155	2.43E-05	2.83E-05
0.3342	3.54E-05	2.36E-05
0.3541	4.47E-05	2.48E-05
0.3752	1.30E-05	2.93E-05
0.3975	2.51E-05	3.14E-05
0.4211	3.11E-05	3.28E-05

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
0.4462	2.60E-05	3.27E-05
0.4727	2.70E-05	2.23E-05
0.5008	3.35E-05	2.32E-05
0.5306	2.25E-05	2.48E-05
0.5621	2.16E-05	2.72E-05
0.5956	2.44E-05	2.75E-05
0.631	2.70E-05	3.33E-05
0.6685	3.82E-05	2.40E-05
0.7082	3.29E-05	2.30E-05
0.7504	3.07E-05	2.40E-05
0.795	2.97E-05	2.09E-05
0.8423	3.09E-05	2.68E-05
0.8923	2.92E-05	3.01E-05
0.9454	3.39E-05	3.03E-05
1.0016	2.84E-05	3.11E-05
1.0612	3.39E-05	3.07E-05
1.1243	3.06E-05	3.73E-05
1.1911	2.92E-05	4.20E-05
1.262	3.51E-05	3.63E-05
1.337	3.63E-05	4.93E-05
1.4165	3.23E-05	4.35E-05
1.5007	3.01E-05	3.82E-05
1.59	3.84E-05	3.87E-05
1.6845	3.91E-05	4.73E-05
1.7847	3.74E-05	4.27E-05
1.8908	3.82E-05	4.18E-05
2.0032	3.81E-05	4.22E-05
2.1223	3.49E-05	4.61E-05
2.2485	3.37E-05	4.70E-05
2.3823	3.73E-05	4.74E-05
2.5239	3.07E-05	4.18E-05
2.674	2.89E-05	4.38E-05
2.833	3.42E-05	4.31E-05
3.0015	3.66E-05	4.34E-05
3.1799	3.87E-05	4.28E-05
3.369	3.43E-05	5.12E-05
3.5694	2.94E-05	5.99E-05
3.7816	3.00E-05	5.30E-05
4.0065	2.70E-05	5.02E-05
4.2447	2.73E-05	4.89E-05
4.4971	2.87E-05	8.27E-05

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Αριστερό ίχνος τροχού	Δεξιό ίχνος τροχού
4.7645	2.36E-05	5.74E-05
5.0478	2.91E-05	5.74E-05
5.348	2.76E-05	9.18E-05
5.666	2.60E-05	6.53E-05
6.0029	2.52E-05	4.86E-05
6.3599	1.97E-05	4.04E-05
6.738	1.70E-05	4.09E-05
7.1387	1.60E-05	2.81E-05
7.5632	1.39E-05	3.42E-05
8.0129	1.23E-05	3.47E-05
8.4894	1.17E-05	2.37E-05
8.9942	1.00E-05	2.05E-05

Πίνακας Π3: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.2

Μήκος Κύματος (m)	Κλαιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Τμήμα Tx	Τμήμα Ty
0.53	1.01E-06	6.64E-05
0.56	9.71E-07	6.93E-05
0.59	1.48E-06	6.14E-05
0.63	5.97E-06	6.64E-05
0.67	1.14E-05	5.18E-05
0.71	1.36E-05	5.06E-05
0.75	7.98E-06	5.01E-05
0.79	1.76E-05	4.87E-05
0.84	4.76E-05	3.94E-05
0.89	6.09E-05	5.10E-05
0.94	3.21E-05	6.40E-05
1.00	1.55E-05	5.24E-05
1.06	6.06E-06	5.78E-05
1.12	7.42E-06	4.75E-05
1.19	1.21E-05	4.35E-05
1.26	1.52E-05	4.35E-05
1.33	1.97E-05	4.61E-05
1.41	1.60E-05	4.46E-05
1.50	1.14E-05	5.81E-05
1.59	5.77E-06	5.73E-05
1.68	4.98E-06	5.15E-05
1.78	5.67E-06	5.17E-05
1.89	6.71E-06	5.06E-05
2.00	7.94E-06	5.80E-05
2.12	7.76E-06	6.62E-05
2.24	1.25E-05	5.63E-05
2.38	7.91E-06	5.12E-05
2.52	1.02E-05	4.26E-05
2.67	8.80E-06	3.15E-05
2.83	9.96E-06	7.89E-05
3.00	1.38E-05	5.65E-05
3.17	1.53E-05	4.96E-05
3.36	2.02E-05	6.06E-05
3.56	2.60E-05	4.10E-05
3.77	2.70E-05	3.06E-05
4.00	3.08E-05	2.79E-05
4.24	4.88E-05	2.99E-05
4.49	6.29E-05	4.07E-05
4.76	8.55E-05	4.83E-05
5.04	1.39E-04	4.13E-05
5.34	1.05E-04	2.75E-05
5.66	1.66E-04	2.78E-05

Μήκος Κύματος (m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)	
	Τμήμα Τx	Τμήμα Τy
5.99	1.41E-04	2.59E-05
6.35	2.06E-04	2.92E-05
6.73	1.89E-04	2.60E-05
7.13	3.10E-04	4.27E-05
7.55	3.05E-04	3.30E-05
8.00	2.47E-04	3.23E-05
8.47	2.02E-04	3.36E-05
8.98	1.45E-04	2.54E-05
9.51	1.70E-04	3.60E-05
10.08	2.09E-04	3.23E-05
10.68	1.81E-04	4.05E-05
11.31	1.16E-04	3.69E-05
11.98	1.65E-04	4.87E-05
12.70	2.10E-04	3.89E-05
13.45	2.21E-04	4.48E-05
14.25	1.22E-04	5.60E-05
15.10	1.63E-04	3.21E-05
16.00	9.06E-05	5.12E-05
16.95	1.91E-04	6.16E-05
17.96	1.98E-04	6.41E-05
19.02	3.00E-04	8.41E-05
20.16	2.25E-04	1.20E-04
21.35	2.02E-04	4.01E-05
22.62	2.33E-04	6.62E-05
23.97	2.03E-04	4.62E-05
25.39	2.00E-04	4.17E-05
26.90	2.95E-04	1.26E-04
28.50	2.56E-04	9.98E-05
30.20	2.26E-04	6.57E-05
31.99	3.35E-04	2.11E-04
33.90	3.56E-04	1.34E-04
35.91	4.99E-04	6.29E-05
38.05	4.58E-04	1.16E-04
40.31	5.34E-04	1.62E-04
42.71	3.87E-04	1.23E-04
45.25	4.48E-04	2.39E-04
47.94	6.73E-04	7.06E-05
50.79	7.06E-04	9.22E-05

Πίνακας Π4: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.3 – Δείκτης IRI

Απόσταση (m)	IRI (m/km)	
	α' φάση	β' φάση
10	0.56	1.05
20	1.09	1.29
30	1.74	1.85
40	0.96	1.15
50	1.27	1.21
60	0.78	0.89
70	0.74	0.67
80	0.73	0.70
90	0.99	1.07
100	0.76	0.63
110	0.73	0.52
120	0.69	0.62
130	0.93	1.09
140	1.02	0.74
150	1.34	1.09
160	0.71	0.61
170	1.39	1.27
180	1.36	1.04
190	1.83	0.70
200	1.38	0.58
210	1.05	0.85
220	0.47	0.60
230	0.72	1.26
240	0.83	0.76
250	0.94	0.83
260	0.53	0.94
270	1.18	1.26
280	0.84	0.82
290	1.13	0.79
300	1.07	0.83
310	0.73	0.73
320	1.50	0.95
330	0.79	0.88
340	1.25	0.82
350	0.78	0.62
360	1.21	1.58
370	0.72	0.57
380	1.42	1.18
390	0.64	0.92
400	0.53	0.55
410	1.14	1.17
420	0.95	0.73
430	1.35	0.96
440	0.77	0.58
450	0.70	0.80
460	1.58	1.72

Απόσταση (m)	IRI (m/km)	
	α' φάση	β' φάση
470	1.20	0.87
480	1.17	0.72
490	1.60	0.82
500	1.26	1.18
510	1.11	1.04
520	0.91	0.78
530	0.57	0.79
540	0.53	0.77
550	1.17	0.77
560	0.58	0.70
570	0.87	0.52
580	0.70	0.59
590	0.55	0.82
600	1.83	1.93
610	4.58	4.33
620	1.57	0.92
630	0.88	0.71
640	0.76	0.80
650	1.04	1.21
660	0.93	0.86
670	0.99	0.83
680	0.94	1.19
690	1.49	2.01
700	1.32	0.83
710	1.55	1.04
720	0.78	0.72
730	0.92	0.79
740	1.03	0.88
750	1.23	1.08

Πίνακας Π15: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.3 – Φασματική ανάλυση

Μήκος κύματος (m)	Κλισημετρικές αποκλίσεις (m/cycle) (δεξιό ίχνος τροχού)	
	α' φάση	β' φάση
0.5019	6.55E-12	1.09E-09
0.5634	8.14E-12	1.26E-09
0.6323	1.04E-11	1.43E-09
0.7098	1.30E-11	1.60E-09
0.7967	1.64E-11	1.73E-09
0.8943	2.05E-11	1.85E-09
1.0038	2.62E-11	2.05E-09
1.1267	3.32E-11	2.61E-09
1.2647	4.21E-11	4.22E-09
1.4196	5.35E-11	8.93E-09
1.5934	6.90E-11	2.12E-08
1.7886	9.18E-11	5.17E-08
2.0076	1.29E-10	1.26E-07
2.2534	1.41E-10	2.97E-07
2.5294	2.22E-10	6.94E-07
2.8392	3.44E-10	1.61E-06
3.1868	5.88E-10	3.70E-06
3.5771	1.30E-09	8.43E-06
4.0152	4.25E-09	1.91E-05
4.5069	1.34E-08	4.29E-05
5.0588	3.90E-08	9.27E-05
5.6783	1.51E-07	1.95E-04
6.3737	1.41E-07	3.71E-04
7.1542	5.83E-07	6.41E-04
8.0303	6.39E-07	1.00E-03
9.0137	9.89E-07	1.42E-03
10.1176	1.61E-06	1.91E-03
11.3566	1.56E-06	2.50E-03
12.7474	2.19E-06	3.20E-03
14.3084	3.36E-06	4.04E-03
16.0607	2.36E-06	5.21E-03
18.0275	4.94E-06	6.55E-03
20.2352	2.96E-06	8.45E-03
22.7132	9.63E-06	1.11E-02
25.4947	1.94E-06	1.43E-02
28.6169	2.80E-05	1.91E-02
32.1213	2.41E-05	2.45E-02
36.055	6.49E-06	3.22E-02
40.4703	1.09E-05	4.20E-02
45.4264	1.95E-05	5.39E-02
50.9894	1.28E-05	6.59E-02

Πίνακας Π6: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.4-Δείκτης IRI (δεξιό ίχνος τροχού)

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (δεξιό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.01	1.98	2.25	1.93	1.24
0.02	3.19	2.61	2.75	1.28
0.03	3.13	1.92	2.38	0.91
0.04	2.52	2.95	1.78	1.14
0.05	2.46	2.26	1.54	1.05
0.06	3.98	2.01	1.25	0.84
0.07	3.66	2.5	1.54	0.79
0.08	1.64	1.62	1.92	1.03
0.09	1.7	1.47	1.62	0.85
0.1	2.09	1.32	1.3	0.8
0.11	2.45	1.01	1.18	0.76
0.12	1.88	1.41	2.1	0.79
0.13	2.59	1.64	1.04	0.82
0.14	2.23	1.25	1.29	0.97
0.15	2.55	1.51	1.67	0.87
0.16	4.11	2.15	1.93	0.78
0.17	5.47	1.48	1.85	1.11
0.18	1.88	2.3	1.66	1.2
0.19	2.66	1.49	1.06	1.46
0.2	2	1.37	0.99	1.25
0.21	2.99	1.12	1.16	1.47
0.22	7.64	1.45	1.14	1.52
0.23	1.79	2.01	2.73	1.55
0.24	2.25	1.67	1.29	1.25
0.25	1.74	1.23	1.98	1.2
0.26	2.09	1.42	1.26	1.12
0.27	2.71	1.72	1.25	1.15
0.28	2.13	1.88	1.46	1.21
0.29	1.09	1.82	1.33	1.31
0.3	1.84	2.1	0.94	0.74
0.31	1.67	1.44	1.37	0.96
0.32	5.77	1.66	2.02	0.97
0.33	3.34	3.48	1.65	0.65
0.34	3.84	4.25	1.3	0.78
0.35	3.36	3.88	1.47	1.01
0.36	3.39	4.34	1.3	0.84
0.37	5.12	2.18	1.12	0.66
0.38	2.99	1.77	1.66	1.42
0.39	2.74	1.22	1.18	0.88
0.4	3.02	1.65	1.31	1.13

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (δεξιό (χνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.41	2.4	1.11	1.72	1.1
0.42	2.14	1.88	0.64	1.22
0.43	3.12	2.85	1.31	0.91
0.44	6.11	3.19	1.19	0.58
0.45	4.08	2.62	1.04	1.07
0.46	3.28	2.1	0.94	0.98
0.47	13.68	2.44	1.42	1.1
0.48	4.99	1.56	1.05	0.78
0.49	2.96	1.83	1.7	0.66
0.5	7.54	1.71	1.27	0.64
0.51	2.78	2.41	1.78	1.22
0.52	4.26	3.96	1.61	0.98
0.53	4.57	3.02	1.42	0.97
0.54	5.26	1.95	1.03	0.8
0.55	3.57	2.45	1.87	1.35
0.56	10.55	2.13	1.3	0.8
0.57	4.39	2.53	1.33	1.34
0.58	5.37	3.6	1.74	0.55
0.59	4.75	1.73	1.04	1.26
0.6	8.25	3.4	0.94	0.86
0.61	6.93	3.69	1.88	0.86
0.62	4.25	3.07	1.44	0.99
0.63	3.13	2.78	1.09	0.89
0.64	4.38	1.66	1.58	1.06
0.65	3.67	1.73	1.38	0.83
0.66	4.24	1.98	1.5	0.89
0.67	2.89	3.4	1.89	1.04
0.68	5.31	2.68	1.88	1.19
0.69	10.34	2.46	1.37	0.76
0.7	11.2	3.31	1.57	0.93
0.71	10.4	1.69	1.13	0.77
0.72	9.55	2.55	0.84	0.94
0.73	10.05	2.24	1.91	0.94
0.74	5.97	2.27	2.05	1.33
0.75	4.07	1.66	2.1	1.14
0.76	4.7	1.75	2.15	1.05
0.77	4.73	1.93	2.21	0.61
0.78	2.99	2.44	2.04	0.83
0.79	2.54	2.92	1.56	1.1
0.8	3.31	2.18	1.27	1.27
0.81	3.5	2.98	1.5	0.74
0.82	4.33	2.1	1.68	0.62

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (δεξιό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.83	3.47	3.29	1.93	0.81
0.84	3.33	2.98	1.55	0.9
0.85	3.32	3.69	2.88	1.03
0.86	2.84	2.9	3.22	0.64
0.87	2.57	1.9	1.09	0.67
0.88	5.01	3.04	2.52	1.03
0.89	4.76	2.95	2.09	0.68
0.9	3.15	2.07	2.07	0.69
0.91	2.28	1.62	1.71	0.95
0.92	2.59	1.28	1.64	0.63
0.93	3.69	1.76	2.3	0.61
0.94	3.93	2.45	1.38	0.72
0.95	4.25	2.52	1.68	0.88
0.96	4.07	5.34	2.04	0.85
0.97	4.98	2.64	1.53	2.51
0.98	5.84	2.82	1.82	1.71
0.99	3.06	2.32	1.5	0.6
1	4.06	3.4	2.28	0.83
1.01	3.63	2.83	1.97	1.54
1.02	8.07	2.25	1.56	0.92
1.03	6.76	3.22	1.44	0.57
1.04	3.21	2.73	2.41	0.81
1.05	3.06	3.84	1.84	0.85
1.06	2.02	1.94	1.69	0.95
1.07	3.19	2.31	1.73	0.66
1.08	5.63	3.07	1.42	0.8
1.09	2.91	2.08	2.55	0.95
1.1	2.5	2.06	2.32	0.99
1.11	2.33	2.16	1.92	1.11
1.12	3.11	2.62	2.55	0.76
1.13	2.44	1.88	2.32	0.7
1.14	3.99	2.23	2.23	0.68
1.15	3.87	2.01	1.7	1.08
1.16	3.16	1.43	2.97	1.24
1.17	3.09	1.93	2.22	1.05
1.18	1.54	2.87	1.92	0.81
1.19	2.56	2.73	1.64	0.99
1.2	2.51	2.05	2.06	0.91
1.21	3.73	1.47	1.66	1.17
1.22	6.07	1.5	2.15	0.77
1.23	6.97	2.23	1.26	0.84
1.24	3.07	1.83	1.84	1.07

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (δεξιό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
1.25	2.87	2.7	2.59	0.99
1.26	2.28	2.34	1.91	0.91
1.27	2.56	2.37	2.01	1.41
1.28	3.51	1.69	2.74	1.58

Πίνακας Π7: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.4-Δείκτης IRI (αριστερό ίχνος τροχού)

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (αριστερό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.01	4.55	1.89	1.11	0.92
0.02	5.78	1.81	1.98	1.55
0.03	6.85	1.35	1.11	1.29
0.04	7.48	1.38	0.89	1.27
0.05	4.21	1.85	2.98	0.63
0.06	8.8	2.32	1.49	0.75
0.07	7.78	2.08	1.65	0.73
0.08	9.51	1.42	1.45	0.97
0.09	5.4	1.41	1.61	0.66
0.1	5.37	1.68	1.51	0.56
0.11	3.27	1.94	0.83	0.76
0.12	4.05	3.74	1.84	0.96
0.13	4.82	1.97	1.15	0.77
0.14	4.05	2.11	1.37	0.71
0.15	5.99	2.95	1.17	0.54
0.16	6.84	1.48	2.49	0.57
0.17	7.46	3.22	1.3	0.86
0.18	4.4	2.08	1.41	1.07
0.19	4.66	1.79	1.58	0.68
0.2	2.75	1.76	1.68	0.96
0.21	4.87	2.12	1.47	0.8
0.22	5.16	2.15	1.58	1.14
0.23	3.71	2.54	2.22	0.95
0.24	5.39	1.97	1.22	1.03
0.25	3.77	1.34	1.53	0.87
0.26	4.67	2.01	1.51	0.65
0.27	3.22	2.07	0.96	1.07
0.28	3.14	2.02	1.32	0.79
0.29	3.09	1.51	1.15	0.84
0.3	3.82	2.15	0.79	1.08
0.31	3.05	2.92	0.97	0.64
0.32	4.24	1.89	1.23	0.83
0.33	5.41	1.59	1.62	1.1
0.34	4.5	3.57	1.13	1.18
0.35	5.52	2.66	2.02	0.89
0.36	8.91	1.54	1.07	0.59
0.37	5.35	1.67	1.17	1.09
0.38	8.14	1.15	1.24	0.95
0.39	5.81	1.34	1.27	0.82
0.4	6.48	1.64	1.83	1.05

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (αριστερό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.41	3.35	1.66	1.51	1.19
0.42	6.67	1.32	0.66	0.72
0.43	5.57	1.66	0.95	0.95
0.44	5.11	4.42	1.44	0.66
0.45	2.86	3.23	0.85	0.73
0.46	6.82	3.21	1.1	0.66
0.47	3.8	3.16	1.7	0.83
0.48	2.81	2.41	1.29	0.83
0.49	4	1.7	1.39	0.86
0.5	5.7	1.82	1.18	1.21
0.51	4	3.19	1.2	0.89
0.52	4.26	2.4	1.74	0.92
0.53	3.21	3.71	1.43	1.01
0.54	3.53	3.19	1.5	0.69
0.55	2.52	2.13	1.53	0.89
0.56	5.28	3.14	1.04	0.9
0.57	5.04	2.48	1.49	0.71
0.58	4.07	2.8	1.5	0.76
0.59	4.08	2.03	1.22	0.82
0.6	3.15	3.2	1.24	0.94
0.61	2.03	3.8	1.57	1.04
0.62	2.54	2.62	0.93	0.74
0.63	4.33	1.89	0.98	0.74
0.64	3.68	1.69	1.16	0.73
0.65	3.44	2.76	1.47	0.57
0.66	3.2	1.36	1.76	0.75
0.67	3.95	2.17	1.84	0.99
0.68	2.59	1.98	1.97	0.66
0.69	7.42	1.82	1.49	0.63
0.7	10.57	2.71	1.86	0.61
0.71	10.15	1.83	1.28	0.58
0.72	8.03	3.24	1.22	0.82
0.73	9.39	1.47	0.87	0.55
0.74	2.95	2.4	1.48	0.7
0.75	2.32	1.62	0.81	0.86
0.76	2.74	2.01	1.36	0.74
0.77	3.61	1.67	1.13	0.73
0.78	3.64	1.84	1.56	0.43
0.79	2.42	1.8	1.34	0.64
0.8	3.02	3.81	1.5	1.17
0.81	2.3	2.52	2.14	1.18
0.82	3.71	2.5	2	0.7

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (αριστερό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
0.83	2.58	3.09	1.16	0.6
0.84	3.05	2.5	1.66	0.91
0.85	2.92	1.87	1.18	1.1
0.86	2.9	2.36	1.17	0.79
0.87	10.36	1.6	1.21	0.57
0.88	3.5	2.91	1.88	0.65
0.89	3.83	3.18	1.08	0.86
0.9	2.02	2.99	1.15	0.62
0.91	3.05	1.77	1.84	1.5
0.92	3.82	2.53	1.67	0.72
0.93	3.54	2.76	1.09	0.79
0.94	4.95	1.69	1.33	0.72
0.95	2.51	4.04	1.66	0.99
0.96	3.02	3.62	1.55	1.02
0.97	2.45	3.06	1.29	3.01
0.98	1.79	2.3	1.5	0.99
0.99	2	1.56	1.6	1.07
1	1.99	2.42	1.66	1.15
1.01	1.99	2.65	1.38	0.87
1.02	2.05	2.1	1.14	0.76
1.03	3.37	2.96	1.06	1.14
1.04	3.53	2.9	1.52	0.69
1.05	2.56	3.14	1.39	0.76
1.06	1.29	2.87	1.88	0.99
1.07	2.33	1.97	2.16	0.95
1.08	2.68	2.27	1.14	1.27
1.09	2.55	1.58	1.6	1.24
1.1	2.52	3.03	2.47	1.1
1.11	3.09	2.95	1.28	0.98
1.12	2.22	2.79	1.61	0.74
1.13	2.02	1.44	1.51	0.77
1.14	3.09	3.32	1.54	0.82
1.15	1.77	3.12	1.33	1.14
1.16	3.24	3.08	2.1	1.48
1.17	2.42	5.43	1.24	0.8
1.18	2.91	3.89	1.32	0.61
1.19	2.63	3.5	1.18	1.1
1.2	2.13	2.17	1.34	0.84
1.21	3.56	2.21	1.83	0.7
1.22	6.23	1.59	1.73	0.9
1.23	4.05	2.26	1.13	0.68
1.24	2.9	2.09	1.32	0.62

Απόσταση (km)	IRI (m/km) (αριστερό ίχνος τροχού)			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
1.25	2.62	2.01	1.91	0.88
1.26	3.37	1.61	1.39	0.65
1.27	3.64	2.6	2.57	1.06
1.28	3.1	2.17	1.18	1.42

Πίνακας Π8: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.4-Δείκτης RMS

Εύρος μήκος κύματος (m)	Δείκτης RMS			
	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
	<i>Αριστερό ίχνος τροχού</i>			
50.00-0.78	1.43E-02	3.04E-02	4.54E-03	3.19E-03
50.00-12.50	1.40E-02	3.01E-02	4.39E-03	3.14E-03
12.50-3.13	2.73E-03	3.94E-03	1.06E-03	4.85E-04
3.13-0.78	1.30E-03	9.96E-04	4.98E-04	2.69E-04
	<i>Δεξιό ίχνος τροχού</i>			
50.00-0.78	1.10E-02	3.00E-02	5.82E-03	3.23E-03
50.00-12.50	1.05E-02	2.97E-02	5.70E-03	3.17E-03
12.50-3.13	2.83E-03	3.99E-03	1.10E-03	5.44E-04
3.13-0.78	1.24E-03	9.81E-04	4.10E-04	2.68E-04

Πίνακας Π9: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 4.4 – Φασματική ανάλυση (Υψομετρικές αποκλίσεις)

Υψομετρικές αποκλίσεις (m ² -m/cycle)				
Μήκος κύματος (m)	Υφιστάμενο (παλαιό) οδόστρωμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασφαλτική βάση	Στρώση κυκλοφορίας
50.7459657	0.016928	0.083007	0.00383	0.001785
45.21000045	0.005868	0.092387	0.003244	0.000712
40.27710649	0.005036	0.060228	0.001956	0.000412
35.88216298	0.004501	0.031397	0.001797	0.000459
31.96828746	0.00344	0.019807	0.000782	0.000265
28.48029164	0.002289	0.013182	0.000606	0.000204
25.37298285	0.001147	0.00833	0.000241	0.000159
22.60448925	0.001555	0.004624	0.000248	0.000083
20.13855325	0.000796	0.00331	0.000185	0.000067
17.94140338	0.00042	0.002076	0.000181	0.000038
15.98388824	0.00043	0.001446	0.000097	0.000021
14.24014582	0.00035	0.001047	0.000057	0.000014
12.68649142	0.00012	0.000522	0.000029	0.000007
11.30237237	0.000136	0.0004	0.000025	0.000006
10.06927662	0.00012	0.00025	0.000028	0.000004
8.970701688	0.000062	0.000169	0.000008	0.000002
7.99194412	0.000041	0.000102	0.000007	0.000002
7.120022214	0.000041	0.000059	0.000004	0.000001
6.343205475	0.00003	0.00003	0.000003	0.000001
5.651186184	0.000021	0.00002	0.000002	0.000001
5.034612964	0.000019	0.000013	0.000002	0.000001
4.485330726	0.000011	0.000012	0.000001	0.000001
3.995988028	0.00001	0.000012	0.000001	0
3.560011107	0.000011	0.000007	0.000001	0
3.171612797	0.000007	0.000005	0.000001	0
2.825585108	0.000005	0.000005	0	0
2.517312819	0.000006	0.000003	0.000001	0
2.242670392	0.000004	0.000003	0	0
1.997990022	0.000002	0.000001	0	0
1.780008722	0.000002	0.000001	0	0
1.585806398	0.000002	0.000001	0	0
1.412792554	0.000001	0.000001	0	0
1.258654825	0.000001	0.000001	0	0
1.121333939	0.000001	0.000001	0	0
0.998995011	0.000001	0	0	0
0.890003569	0.000001	0	0	0
0.792903199	0.000001	0	0	0

Πίνακας Π10: Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή ενίσχυσης υποκεφαλαίου 5.2

Μήκος κύματος (m)	Συντελεστής ενίσχυσης (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
409.3327876	0.001035251	0.001840566	0.002879385	0.00414916
204.6663938	0.004151656	0.007395959	0.011600098	0.01676829
136.425648	0.009383927	0.016772926	0.026421075	0.03839481
102.3227259	0.01678197	0.030137453	0.047762659	0.06992773
81.85985593	0.026424606	0.047742777	0.07626197	0.11273631
68.21747732	0.038413163	0.069922691	0.112777104	0.16869896
58.47269325	0.052874805	0.097103288	0.158421218	0.24027134
51.16398056	0.06996447	0.129812675	0.214587594	0.33047662
45.4772841	0.089875819	0.168707596	0.282983649	0.4427284
40.92992796	0.11280988	0.214513592	0.365459105	0.57988688
37.20930233	0.1390261	0.268118073	0.463989131	0.74275442
34.10873866	0.168812958	0.330490347	0.580136837	0.92667712
31.48515475	0.202496585	0.402644659	0.714236656	1.11778728
29.1511194	0.242089684	0.489165586	0.87042108	1.29907295
26.99055331	0.290543925	0.596521689	1.049403681	1.443384
24.98937951	0.350228398	0.7287284	1.23529119	1.52276744
23.13743637	0.424066233	0.887477109	1.397191253	1.5354611
21.42199182	0.515789994	1.068187395	1.502096622	1.50238839
19.8341862	0.629465693	1.253205237	1.537499951	1.44796185
18.36412385	0.768761809	1.410731115	1.518111943	1.38887833
17.00275445	0.934320658	1.5087158	1.46904718	1.3336502
15.74257737	1.118518304	1.537623492	1.410304526	1.28568063
14.5755597	1.299730328	1.514127271	1.353069366	1.24575682
13.49509453	1.44385035	1.463340806	1.302259389	1.21361148
12.49484588	1.522930576	1.404372685	1.259399393	1.18860925
11.56858435	1.535401819	1.347636509	1.224479188	1.17007844
10.71111064	1.502210523	1.297596256	1.1969507	1.15746907
9.917093102	1.447732889	1.255541527	1.176128769	1.15038187
9.182061924	1.388652273	1.221398542	1.16141475	1.14860177
8.501377223	1.333448174	1.194569034	1.152345914	1.15209747
7.871226731	1.285504984	1.174386757	1.148642653	1.16103151
7.287779851	1.245616888	1.160255818	1.150204101	1.1757731
6.747547267	1.21350068	1.151735481	1.15712209	1.19691526
6.247383908	1.188523169	1.148561715	1.169688071	1.22528589
5.784325634	1.170019314	1.150652982	1.188408971	1.26195064
5.355555318	1.157430947	1.158120477	1.214029402	1.30816032
4.958571138	1.150365011	1.171277114	1.247531198	1.36511261
4.591009884	1.14860516	1.190654063	1.290109293	1.43334293
4.25070668	1.152121208	1.217016013	1.343021789	1.51118889
3.935613365	1.161077357	1.251372378	1.407165228	1.59153564
3.643889925	1.175842573	1.294930269	1.481941539	1.65638328

Μήκος κύματος (m)	Συντελεστής ενίσχυσης (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
3.373785016	1.19701004	1.348942582	1.56275331	1.67317133
3.123701711	1.225410538	1.414218208	1.636271918	1.60600141
2.892154453	1.262112827	1.489908911	1.675117771	1.4478499
2.677770488	1.308362419	1.570788254	1.641704062	1.23564383
2.479279422	1.36535859	1.642321871	1.514521554	1.01885946
2.295504942	1.433629776	1.675635507	1.315998536	0.82742188
2.125348823	1.511506578	1.633188671	1.096069684	0.66988119
1.967806683	1.591834699	1.497076872	0.89347175	0.54394485
1.821941643	1.65656835	1.294074247	0.723470617	0.44406909
1.686889662	1.673090854	1.074541192	0.586576653	0.3647106
1.561848416	1.60554838	0.874860775	0.477867441	0.30126843
1.446077226	1.447094168	0.708307513	0.391611239	0.25016825
1.33885244	1.234780542	0.57449719	0.322825043	0.20869248
1.239641248	1.018056735	0.468293646	0.267576318	0.17478819
1.147752471	0.826741796	0.383996423	0.222856853	0.14689252
1.062674411	0.669332544	0.316728961	0.18639258	0.12380949
0.983903341	0.543509084	0.262657726	0.156459332	0.10461373
0.910971651	0.443724565	0.218858912	0.131739924	0.08858162
0.843445543	0.364436022	0.183120034	0.111218711	0.0751417
0.780924818	0.30104804	0.153763431	0.094105192	0.06383886
0.723038613	0.249989548	0.129506608	0.079777396	0.05430721
0.66944307	0.208547214	0.109359718	0.067741204	0.04625022
0.61982024	0.174668506	0.092551274	0.057600741	0.03942603
0.573875906	0.146793766	0.078473816	0.049036191	0.03363604
0.531337206	0.123727706	0.066644275	0.041787174	0.02871624
0.491951671	0.104545563	0.056675256	0.0356404	0.02453054
0.455485618	0.088524482	0.048253547	0.030420118	0.02096556
0.421722593	0.075093721	0.041124025	0.02598073	0.01792641
0.390462257	0.06379846	0.035077565	0.022201094	0.01533349
0.361519176	0.0542731	0.029941747	0.018980008	0.01311977
0.334721423	0.046221361	0.02557364	0.016232604	0.01122868
0.30991012	0.039401584	0.021854308	0.013887548	0.0096124
0.286937953	0.033615283	0.018684319	0.011884677	0.00823041
0.265668532	0.028698572	0.015980288	0.010171315	0.0070483
0.245975775	0.024515506	0.013672103	0.008709934	0.00603685
0.227742757	0.020952747	0.011700611	0.007458516	0.00517119
0.210861252	0.017915488	0.010015822	0.00638788	0.00443014
0.195231128	0.015324171	0.008575403	0.005471652	0.00379563
0.180759555	0.013111804	0.007343434	0.004687369	0.00325226
0.167360684	0.011221873	0.006289406	0.004015889	0.00278685
0.154955036	0.009606584	0.005387367	0.003440887	0.00238819
0.143468935	0.008225429	0.004615212	0.002948424	0.00204666

Μήκος κύματος (m)	Συντελεστής ενίσχυσης (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
0.132834266	0.007044043	0.003954105	0.002526596	0.00175404
0.122987887	0.006033211	0.003387975	0.002165232	0.00150331
0.113871379	0.005168079	0.002903104	0.001855635	0.00128847

Πίνακας Π11: Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή ενίσχυσης² υποκεφαλαίου 5.3

Μήκος κύματος (m)	Συντελεστής ενίσχυσης ² (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
409.3327876	1.07175E-06	3.38768E-06	8.29086E-06	1.72155E-05
204.6663938	1.72362E-05	5.47002E-05	0.000134562	0.000281175
136.425648	8.80581E-05	0.000281331	0.000698073	0.001474161
102.3227259	0.000281635	0.000908266	0.002281272	0.004889887
81.85985593	0.00069826	0.002279373	0.005815888	0.012709476
68.21747732	0.001475571	0.004889183	0.012718675	0.028459338
58.47269325	0.002795745	0.009429049	0.025097282	0.057730317
51.16398056	0.004895027	0.01685133	0.046047835	0.109214793
45.4772841	0.008077663	0.028462253	0.080079746	0.196008438
40.92992796	0.012726069	0.046016081	0.133560357	0.336268794
37.20930233	0.019328256	0.071887301	0.215285914	0.551684126
34.10873866	0.028497815	0.109223869	0.33655875	0.858730487
31.48515475	0.041004867	0.162122722	0.510134001	1.249448411
29.1511194	0.058607415	0.239282971	0.757632857	1.687590536
26.99055331	0.084415772	0.355838126	1.101248086	2.083357363
24.98937951	0.12265993	0.531045081	1.525944324	2.318820679
23.13743637	0.17983217	0.78761562	1.952143398	2.357640795
21.42199182	0.266039318	1.141024311	2.256294261	2.257170888
19.8341862	0.396227059	1.570523366	2.363906098	2.096593511
18.36412385	0.590994718	1.990162278	2.304663871	1.928983005
17.00275445	0.872955091	2.276223364	2.158099616	1.77862286
15.74257737	1.251083196	2.364286004	1.988958855	1.652974694
14.5755597	1.689298925	2.292581391	1.830796708	1.551910051
13.49509453	2.084703835	2.141366314	1.695879516	1.472852813
12.49484588	2.319317541	1.972262639	1.58608683	1.412791956
11.56858435	2.357458745	1.816124159	1.499349282	1.369083555
10.71111064	2.256636456	1.683756045	1.432690979	1.339734639
9.917093102	2.095930518	1.576384527	1.383278882	1.323378457
9.182061924	1.928355135	1.491814399	1.348884222	1.319286028
8.501377223	1.778084033	1.426995176	1.327901106	1.327328584
7.871226731	1.652523064	1.379184255	1.319379945	1.347994172
7.287779851	1.551561432	1.346193564	1.322969475	1.382442386
6.747547267	1.472583901	1.326494619	1.33893153	1.432606129
6.247383908	1.412587323	1.319194014	1.368170184	1.501325507
5.784325634	1.368945196	1.324002286	1.412315882	1.592519418
5.355555318	1.339646397	1.34124304	1.473867389	1.711283427
4.958571138	1.323339658	1.371890078	1.556334091	1.863532437
4.591009884	1.319293813	1.417657097	1.664381988	2.054471962
4.25070668	1.327383278	1.481127976	1.803707526	2.283691858
3.935613365	1.348100628	1.565932828	1.98011398	2.532985708
3.643889925	1.382605757	1.6768444	2.196150724	2.743605568

	Συντελεστής ενίσχυσης ² (ανά ταχύτητα)			
Μήκος κύματος (m)	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
3.373785016	1.432833036	1.819646088	2.442197907	2.79950229
3.123701711	1.501630987	2.000013139	2.677385791	2.579240527
2.892154453	1.592928788	2.219828563	2.806019547	2.096269346
2.677770488	1.711812219	2.46737574	2.695192228	1.526815682
2.479279422	1.864204078	2.697221129	2.293775538	1.038074605
2.295504942	2.055294335	2.807754353	1.731852146	0.684626972
2.125348823	2.284652135	2.667305235	1.201368753	0.44874081
1.967806683	2.53393771	2.241239162	0.798291767	0.295875998
1.821941643	2.7442187	1.674628157	0.523409734	0.197197359
1.686889662	2.799233004	1.154638773	0.34407217	0.133013821
1.561848416	2.5777856	0.765381376	0.228357291	0.090762669
1.446077226	2.094081532	0.501699532	0.153359363	0.062584152
1.338885244	1.524682988	0.330047022	0.104216008	0.043552552
1.239641248	1.036439516	0.219298939	0.071597086	0.03055091
1.147752471	0.683501998	0.147453253	0.049665177	0.021577413
1.062674411	0.448006055	0.100317235	0.034742194	0.015328789
0.983903341	0.295402124	0.068989081	0.024479523	0.010944033
0.910971651	0.19689149	0.047899223	0.017355407	0.007846703
0.843445543	0.132813614	0.033532947	0.012369602	0.005646274
0.780924818	0.090629922	0.023643193	0.008855787	0.0040754
0.723038613	0.062494774	0.016771962	0.006364433	0.002949273
0.66944307	0.04349194	0.011959548	0.004588871	0.002139083
0.61982024	0.030509087	0.008565738	0.003317845	0.001554412
0.573875906	0.02154841	0.00615814	0.002404548	0.001131383
0.531337206	0.015308545	0.004441459	0.001746168	0.000824622
0.491951671	0.010929775	0.003212085	0.001270238	0.000601747
0.455485618	0.007836584	0.002328405	0.000925384	0.000439555
0.421722593	0.005639067	0.001691185	0.000674998	0.000321356
0.390462257	0.004070243	0.001230436	0.000492889	0.000235116
0.361519176	0.002945569	0.000896508	0.000360241	0.000172128
0.334721423	0.002136414	0.000654011	0.000263497	0.000126083
0.30991012	0.001552485	0.000477611	0.000192864	9.23982E-05
0.286937953	0.001129987	0.000349104	0.000141246	6.77396E-05
0.265668532	0.000823608	0.00025537	0.000103493	4.96785E-05
0.245975775	0.00060101	0.000186926	7.5863E-05	3.64436E-05
0.227742757	0.000439018	0.000136904	5.56295E-05	2.67413E-05
0.210861252	0.000320965	0.000100317	4.0805E-05	1.96262E-05
0.195231128	0.00023483	7.35375E-05	2.9939E-05	1.44068E-05
0.180759555	0.000171919	5.3926E-05	2.19714E-05	1.05772E-05
0.167360684	0.00012593	3.95566E-05	1.61274E-05	7.76655E-06
0.154955036	9.22865E-05	2.90237E-05	1.18397E-05	5.70345E-06
0.143468935	6.76577E-05	2.13002E-05	8.6932E-06	4.1888E-06

Μήκος κύματος (m)	Συντελεστής ενίσχυσης ² (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
0.132834266	4.96185E-05	1.5635E-05	6.38369E-06	3.07665E-06
0.122987887	3.63996E-05	1.14784E-05	4.68823E-06	2.25995E-06
0.113871379	2.6709E-05	8.42801E-06	3.44338E-06	1.66014E-06

Πίνακας Π12: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 5.3 (παράδειγμα σχήματος 5.4)

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)
0.0201	2.47E-05
0.0213	2.85E-06
0.0226	5.87E-06
0.0239	1.99E-06
0.0253	4.29E-06
0.0268	7.75E-06
0.0284	8.34E-06
0.0301	2.79E-05
0.0319	7.86E-06
0.0338	1.30E-05
0.0358	1.17E-05
0.0379	1.98E-05
0.0402	5.29E-06
0.0426	1.24E-05
0.0451	9.16E-06
0.0478	3.92E-06
0.0506	2.66E-06
0.0536	3.68E-06
0.0568	7.83E-06
0.0602	8.16E-06
0.0638	3.11E-06
0.0676	5.51E-06
0.0716	3.29E-06
0.0759	5.52E-06
0.0804	5.95E-06
0.0852	9.38E-06
0.0902	5.67E-06
0.0956	4.47E-06
0.1013	2.11E-06
0.1073	1.68E-06
0.1137	7.44E-06
0.1204	3.76E-06
0.1276	4.34E-06
0.1352	2.30E-06
0.1432	6.41E-06
0.1517	5.85E-06
0.1608	1.64E-06
0.1703	3.86E-06
0.1805	2.11E-06
0.1912	2.46E-06
0.2026	3.24E-06
0.2146	3.03E-06

Κυματικός αριθμός (cycle/m)	Κλισιομετρικές αποκλίσεις (m/cycle)
0.2274	3.19E-06
0.2409	4.01E-06
0.2552	6.34E-06
0.2704	6.38E-06
0.2865	6.67E-06
0.3035	6.34E-06
0.3215	2.66E-06
0.3407	4.03E-06
0.3609	2.87E-06
0.3824	3.74E-06
0.4051	4.75E-06
0.4292	4.00E-06
0.4547	3.69E-06
0.4818	4.81E-06
0.5104	5.24E-06
0.5408	5.15E-06
0.5729	5.10E-06
0.607	4.24E-06
0.6431	5.66E-06
0.6813	6.72E-06
0.7218	9.55E-06
0.7647	7.02E-06
0.8102	8.37E-06
0.8584	6.78E-06
0.9094	8.95E-06
0.9635	1.07E-05
1.0208	9.07E-06
1.0815	1.14E-05
1.1458	1.47E-05
1.2139	1.29E-05
1.2861	1.57E-05
1.3626	1.30E-05
1.4436	1.51E-05
1.5295	1.82E-05
1.6204	1.59E-05
1.7168	1.76E-05
1.8189	1.73E-05
1.927	1.93E-05
2.0416	1.83E-05

Πίνακας Π13: Αποτελέσματα υπολογισμού απόκρισης υποκεφαλαίου 5.3

Μήκος κύματος (m)	Απόκριση (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
51.16398056	4.41E-08	1.52E-07	4.14E-07	9.83E-07
45.4772841	1.29E-07	4.55E-07	1.28E-06	3.14E-06
40.92992796	2.16E-07	7.82E-07	2.27E-06	5.72E-06
37.20930233	3.87E-08	1.44E-07	4.31E-07	1.1E-06
34.10873866	3.7E-07	1.42E-06	4.38E-06	1.12E-05
31.48515475	4.1E-08	1.62E-07	5.1E-07	1.25E-06
29.1511194	5.27E-07	2.15E-06	6.82E-06	1.52E-05
26.99055331	8.44E-08	3.56E-07	1.1E-06	2.08E-06
24.98937951	1.23E-07	5.31E-07	1.53E-06	2.32E-06
23.13743637	3.6E-07	1.58E-06	3.9E-06	4.72E-06
21.42199182	1.33E-06	5.71E-06	1.13E-05	1.13E-05
19.8341862	1.19E-06	4.71E-06	7.09E-06	6.29E-06
18.36412385	1E-05	3.38E-05	3.92E-05	3.28E-05
17.00275445	5.24E-06	1.37E-05	1.29E-05	1.07E-05
15.74257737	7.51E-06	1.42E-05	1.19E-05	9.92E-06
14.5755597	1.69E-06	2.29E-06	1.83E-06	1.55E-06
13.49509453	4.17E-06	4.28E-06	3.39E-06	2.95E-06
12.49484588	2.32E-06	1.97E-06	1.59E-06	1.41E-06
11.56858435	2.36E-06	1.82E-06	1.5E-06	1.37E-06
10.71111064	6.77E-06	5.05E-06	4.3E-06	4.02E-06
9.917093102	1.26E-05	9.46E-06	8.3E-06	7.94E-06
9.182061924	7.71E-06	5.97E-06	5.4E-06	5.28E-06
8.501377223	1.24E-05	9.99E-06	9.3E-06	9.29E-06
7.871226731	3.31E-06	2.76E-06	2.64E-06	2.7E-06
7.287779851	4.65E-06	4.04E-06	3.97E-06	4.15E-06
6.747547267	4.42E-06	3.98E-06	4.02E-06	4.3E-06
6.247383908	1.41E-06	1.32E-06	1.37E-06	1.5E-06
5.784325634	1.37E-06	1.32E-06	1.41E-06	1.59E-06
5.355555318	2.68E-06	2.68E-06	2.95E-06	3.42E-06
4.958571138	2.65E-06	2.74E-06	3.11E-06	3.73E-06
4.591009884	2.64E-06	2.84E-06	3.33E-06	4.11E-06
4.25070668	1.33E-06	1.48E-06	1.8E-06	2.28E-06
3.935613365	2.7E-06	3.13E-06	3.96E-06	5.07E-06
3.643889925	2.77E-06	3.35E-06	4.39E-06	5.49E-06
3.373785016	2.87E-06	3.64E-06	4.88E-06	5.6E-06
3.123701711	1.5E-06	2E-06	2.68E-06	2.58E-06
2.892154453	7.93E-07	1.11E-06	1.4E-06	1.04E-06
2.677770488	3.42E-06	4.93E-06	5.39E-06	3.05E-06
2.479279422	1.86E-06	2.7E-06	2.29E-06	1.04E-06
2.295504942	2.06E-06	2.81E-06	1.73E-06	6.85E-07
2.125348823	4.57E-06	5.33E-06	2.4E-06	8.97E-07
1.967806683	2.53E-06	2.24E-06	7.98E-07	2.96E-07
1.821941643	2.74E-06	1.67E-06	5.23E-07	1.97E-07
1.686889662	2.8E-06	1.15E-06	3.44E-07	1.33E-07
1.561848416	2.58E-06	7.65E-07	2.28E-07	9.08E-08
1.446077226	2.09E-06	5.02E-07	1.53E-07	6.26E-08
1.338885244	1.52E-06	3.3E-07	1.04E-07	4.36E-08
1.239641248	2.07E-06	4.39E-07	1.43E-07	6.11E-08

Μήκος κύματος (m)	Απόκριση (ανά ταχύτητα)			
	60 km/h	80km/h	100 km/h	120 km/h
1.147752471	1.37E-06	2.95E-07	9.93E-08	4.32E-08
1.062674411	8.96E-07	2.01E-07	6.95E-08	3.07E-08
0.983903341	5.91E-07	1.38E-07	4.9E-08	2.19E-08
0.910971651	1.97E-07	4.79E-08	1.74E-08	7.85E-09
0.843445543	1.33E-07	3.35E-08	1.24E-08	5.65E-09
0.780924818	9.06E-08	2.36E-08	8.86E-09	4.08E-09
0.723038613	6.25E-08	1.68E-08	6.36E-09	2.95E-09
0.66944307	4.35E-08	1.2E-08	4.59E-09	2.14E-09
0.61982024	6.1E-08	1.71E-08	6.64E-09	3.11E-09
0.573875906	2.15E-08	6.16E-09	2.4E-09	1.13E-09
0.531337206	3.06E-08	8.88E-09	3.49E-09	1.65E-09
0.491951671	1.09E-08	3.21E-09	1.27E-09	6.02E-10

Πίνακας 14: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 6.3.2 – Συσχέτιση των δεικτών IRI_V και IRI

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	IRI (m/km)	IRI _V (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
1	0-1	2.75	2.8	2.75	2.66	2.55
2		2.27	2.43	2.27	2.08	1.98
3		2.82	3.01	2.82	2.75	2.74
4		1.9	1.96	1.9	1.93	1.93
5		0.91	1.03	0.91	0.84	0.8
6		1.04	1.14	1.04	1.03	1.03
7		1.03	1.17	1.03	0.99	0.99
8		1.17	1.31	1.17	1.11	1.1
9		0.93	1.07	0.93	0.88	0.86
10		1.02	1.16	1.02	0.92	0.85
11		1.05	1.16	1.05	1	0.95
12		0.88	0.99	0.88	0.86	0.83
13		1.05	1.19	1.05	0.94	0.87
14		2.26	2.21	2.26	2.25	2.17
15		1.81	1.89	1.81	1.79	1.74
16		3.12	3.29	3.12	2.95	2.8
17		2.15	2.16	2.15	2.17	2.08
18		1.49	1.55	1.49	1.48	1.46
19		1.69	1.75	1.69	1.71	1.77
20		1.18	1.28	1.18	1.13	1.12
21		1.22	1.34	1.22	1.15	1.14
22		0.96	1.04	0.96	0.95	0.9
23		1.19	1.27	1.19	1.14	1.08
24		1.22	1.28	1.22	1.18	1.14
25		1	1.09	1	0.96	0.95
26		1.1	1.18	1.1	1.05	1.01
27		1.03	1.17	1.03	0.93	0.85
28		0.94	1.07	0.94	0.86	0.81
29		0.98	1.09	0.98	0.87	0.81
30		1.01	1.09	1.01	0.98	0.95
31		1.01	1.07	1.01	1.02	1.04
32		0.88	0.94	0.88	0.89	0.91
33		1.24	1.32	1.24	1.26	1.33
34		1.14	1.26	1.14	1.05	0.97
35		1.03	1.12	1.03	0.97	0.93
36		1.07	1.16	1.07	1.03	1
37		1.2	1.26	1.2	1.17	1.13
38		1.29	1.3	1.29	1.29	1.3
39		1.13	1.18	1.13	1.13	1.14
40		1.37	1.51	1.37	1.35	1.37

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	IRI (m/km)	IRI _v (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
41	1 - 5	1.03	1.13	1.03	0.99	0.99
42		0.98	1.06	0.98	0.97	0.99
43		1.4	1.5	1.4	1.39	1.4
44		1.3	1.43	1.3	1.26	1.28
45		0.99	1.14	0.99	0.98	0.98
46		1.06	1.21	1.06	0.99	0.95
47		1.2	1.32	1.2	1.16	1.13
48		1.07	1.21	1.07	1.01	0.98
49		1.26	1.41	1.26	1.18	1.15
50		1.06	1.19	1.06	0.98	0.95
51		1.04	1.14	1.04	0.98	0.94
52		1.08	1.19	1.08	0.98	0.94
53		1.13	1.19	1.13	1.1	1.07
54		1.61	1.67	1.61	1.61	1.61
55		1.63	1.7	1.63	1.62	1.65
56		1.54	1.61	1.54	1.52	1.51
57		1.26	1.38	1.26	1.19	1.17
58		1.17	1.22	1.17	1.16	1.14
59		1.27	1.37	1.27	1.21	1.15
60		1.37	1.4	1.37	1.33	1.27
61		1.42	1.52	1.42	1.34	1.29
62		1.73	1.76	1.73	1.71	1.64
63		1.85	1.89	1.85	1.79	1.69
64		1.73	1.84	1.73	1.67	1.65
65		0.98	1.11	0.98	0.94	0.93
66		0.9	1.08	0.9	0.83	0.82
67		1.46	1.55	1.46	1.46	1.49
68		1.67	1.74	1.67	1.64	1.56
69		1.65	1.63	1.65	1.59	1.49
70		1.42	1.55	1.42	1.39	1.4
71		1.43	1.47	1.43	1.44	1.48
72		1.54	1.62	1.54	1.48	1.45
73		1.47	1.54	1.47	1.44	1.45
74		1.42	1.52	1.42	1.34	1.29
75		1.73	1.76	1.73	1.71	1.64
76		1.85	1.89	1.85	1.79	1.69
77		1.73	1.84	1.73	1.67	1.65
78		0.98	1.11	0.98	0.94	0.93
79		0.9	1.08	0.9	0.83	0.82
80		1.85	1.9	1.85	1.84	1.88
81	5 - 10	2.9	2.92	2.9	2.86	2.79

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	IRI (m/km)	IRI _V (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
82	5 - 10	2.6	2.1	2.6	2.46	2.3
83		2.87	2.96	2.87	2.77	2.62
84		2.17	2.34	2.17	2.13	2.12
85		2.1	2.18	2.1	2.07	2.07
86		1.83	1.94	1.83	1.76	1.69
87		2.3	2.49	2.3	2.14	2
88		2.31	2.41	2.31	2.38	2.43
89		3.33	3.42	3.33	3.24	3.11
90		2.64	2.89	2.64	2.46	2.34
91		2.29	2.28	2.29	2.36	2.35
92		2.05	2.24	2.05	1.89	1.76
93		2.1	2.17	2.1	2.11	2.06
94		3.06	3.1	3.06	2.9	2.7
95		3.07	3.26	3.07	2.87	2.67
96		2.91	3	2.91	2.72	2.62
97		1.67	1.92	1.67	1.63	1.6
98		1.62	1.68	1.62	1.61	1.62
99		1.72	1.81	1.72	1.64	1.56
100		2.11	2.21	2.11	2	1.91
101		2.26	2.35	2.26	2.26	2.31
102		2.64	2.87	2.64	2.56	2.49
103		2.3	2.54	2.3	2.21	2.14
104		2.09	2.13	2.09	2.07	2.03
105		2.29	2.45	2.29	2.23	2.14
106		2.54	2.68	2.54	2.47	2.4
107		3.69	3.92	3.69	3.51	3.38
108		2.04	2.1	2.04	2.04	2.03
109		2.35	2.5	2.35	2.23	2.14
110		2.41	2.44	2.41	2.37	2.44
111		2.48	2.48	2.48	2.47	2.44
112		2.23	2.28	2.23	2.15	2.07
113		3.17	3.01	3.17	3.32	3.35
114		2.79	2.78	2.79	2.66	2.49
115		2	2.12	2	1.89	1.78
116		3.09	3.03	3.09	3.2	3.24
117		2.69	2.6	2.69	2.54	2.35
118		2.79	2.79	2.79	2.61	2.46
119		4.1	4.11	4.1	3.79	3.36
120		2.19	2.14	2.19	2.12	2
121	>10	5.39	6.39	5.39	4.6	4.04
122		3.98	4.5	3.98	3.66	3.37

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	IRI (m/km)	IRI _V (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
123	>10	3.11	3.17	3.11	3.08	3.02
124		2.96	3.05	2.96	2.89	2.9
125		5.08	5.8	5.08	4.66	4.25
126		5.27	6.29	5.27	4.81	4.55
127		3.97	4.55	3.97	3.51	3.16
128		3.22	3.51	3.22	3.02	3.04
129		3.17	3.27	3.17	2.99	2.89
130		10.51	12.69	10.51	9.21	8.15
131		6.47	7.21	6.47	5.67	5.12
132		3.69	4.32	3.69	3.29	3.13
133		4.74	5.5	4.74	4.16	3.76
134		4.64	5.53	4.64	4.2	3.98
135		7.5	8.67	7.5	6.8	6
136		4.79	5.4	4.79	4.29	4.01
137		4.67	5.51	4.67	4.16	3.83
138		4.38	5.03	4.38	4	3.72
139		3.11	3.43	3.11	2.94	2.82
140		3.12	3.31	3.12	2.97	2.91
141		3.24	3.28	3.24	3.17	3.1
142		6.57	7.64	6.57	5.84	5.3
143		6.81	7.19	6.81	6.41	6
144		3.51	3.73	3.51	3.3	3.08
145		8.62	8.79	8.62	8.75	9.07
146		6.42	6.76	6.42	6.52	6.91
147		9.63	9.85	9.63	9.68	9.87
148		9.14	9.53	9.14	9.01	8.95
149		2.58	2.83	2.58	2.71	3.06
150		6.52	7.01	6.52	6.41	6.51
151		4.46	4.97	4.46	4.41	4.45
152		4.54	5.01	4.54	4.52	4.61
153		7.5	7.77	7.5	7.34	7.21
154		4.52	5.06	4.52	4.43	4.51
155		8.52	8.72	8.52	8.71	8.99
156		5.24	5.41	5.24	5.3	5.48
157		9.24	9.29	9.24	9.45	9.58
158		8.05	8.48	8.05	7.82	7.89
159		2.77	2.75	2.77	3.01	3.35
160		6.17	6.57	6.17	6.06	6.13

Πίνακας 15: Στοιχεία ομαλότητας υποκεφαλαίου 6.3.2 – Συσχέτιση των δεικτών IRI_σ και RMS

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	RMS	IRI _σ (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
1	0-1	0.00648968	3.40	2.75	2.55	2.38
2		0.00340528	2.99	2.27	2.00	1.85
3		0.00438757	3.62	2.82	2.64	2.56
4		0.00360841	2.48	1.90	1.86	1.81
5		0.001701	1.48	0.91	0.81	0.75
6		0.00185331	1.60	1.04	0.99	0.97
7		0.002069	1.63	1.03	0.96	0.93
8		0.00196844	1.78	1.17	1.07	1.03
9		0.00227292	1.52	0.93	0.85	0.81
10		0.00188919	1.62	1.02	0.89	0.80
11		0.00212883	1.62	1.05	0.97	0.89
12		0.001627	1.43	0.88	0.83	0.78
13		0.00178233	1.65	1.05	0.91	0.82
14		0.00668859	2.76	2.26	2.16	2.03
15		0.00277595	2.41	1.81	1.72	1.63
16		0.00442135	3.93	3.12	2.83	2.62
17		0.00378074	2.70	2.15	2.08	1.95
18		0.00212007	2.04	1.49	1.42	1.37
19		0.0024101	2.26	1.69	1.64	1.66
20		0.00218904	1.75	1.18	1.09	1.05
21		0.00199263	1.81	1.22	1.11	1.07
22		0.00235281	1.49	0.96	0.92	0.84
23		0.00205438	1.74	1.19	1.10	1.01
24		0.00210763	1.75	1.22	1.14	1.07
25		0.00169312	1.54	1.00	0.93	0.89
26		0.00175479	1.64	1.10	1.01	0.95
27		0.00176019	1.63	1.03	0.90	0.80
28		0.00174372	1.52	0.94	0.83	0.76
29		0.00171814	1.54	0.98	0.84	0.76
30		0.00172752	1.54	1.01	0.95	0.89
31		0.00175249	1.52	1.01	0.98	0.98
32		0.00164056	1.38	0.88	0.86	0.85
33		0.0021392	1.79	1.24	1.21	1.25
34		0.00178187	1.73	1.14	1.01	0.91
35		0.00180809	1.57	1.03	0.94	0.87
36		0.00185787	1.62	1.07	0.99	0.94
37		0.00193481	1.73	1.20	1.13	1.06
38		0.00198829	1.77	1.29	1.24	1.22
39		0.00189981	1.64	1.13	1.09	1.07
40		0.00209557	2.00	1.37	1.30	1.28
41	1 - 5	0.00175192	1.58	1.03	0.96	0.93

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	RMS	IRIα (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
42	1 - 5	0.00178764	1.51	0.98	0.94	0.93
43		0.00217154	1.99	1.40	1.34	1.31
44		0.0027011	1.91	1.30	1.21	1.20
45		0.00191725	1.60	0.99	0.95	0.92
46		0.00176162	1.67	1.06	0.96	0.89
47		0.00199589	1.79	1.20	1.12	1.06
48		0.00179665	1.67	1.07	0.97	0.92
49		0.00197611	1.89	1.26	1.14	1.08
50		0.0017452	1.65	1.06	0.95	0.89
51		0.00165536	1.60	1.04	0.95	0.88
52		0.00174914	1.65	1.08	0.95	0.88
53		0.00187452	1.65	1.13	1.06	1.00
54		0.00238632	2.17	1.61	1.55	1.51
55		0.00232976	2.20	1.63	1.56	1.54
56		0.00221617	2.11	1.54	1.46	1.41
57		0.00251504	1.86	1.26	1.15	1.10
58		0.00211439	1.68	1.17	1.12	1.07
59		0.00190316	1.85	1.27	1.17	1.08
60		0.00196967	1.88	1.37	1.28	1.19
61		0.00184862	2.01	1.42	1.29	1.21
62		0.00198966	2.27	1.73	1.64	1.54
63		0.00182079	2.41	1.85	1.72	1.58
64		0.00173681	2.35	1.73	1.61	1.54
65		0.00190069	1.56	0.98	0.91	0.87
66		0.00200678	1.53	0.90	0.80	0.77
67		0.00856393	2.04	1.46	1.41	1.40
68		0.00368826	2.25	1.67	1.58	1.46
69		0.00298003	2.13	1.65	1.53	1.40
70		0.00238046	2.04	1.42	1.34	1.31
71		0.00269355	1.95	1.43	1.39	1.39
72		0.00242836	2.12	1.54	1.42	1.36
73		0.00254098	2.03	1.47	1.39	1.36
74		0.00272233	2.01	1.42	1.29	1.21
75		0.00238632	2.27	1.73	1.64	1.54
76		0.00286947	2.41	1.85	1.72	1.58
77		0.00359974	2.35	1.73	1.61	1.54
78		0.00209031	1.56	0.98	0.91	0.87
79		0.00209739	1.53	0.90	0.80	0.77
80		0.00901719	2.42	1.85	1.77	1.76
81	5 - 10	0.0046789	3.53	2.90	2.75	2.61
82		0.00420752	2.64	2.60	2.36	2.15
83		0.00407761	3.57	2.87	2.66	2.45

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τεμήματος (έτη)	RMS	IRI ₁₀ (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
84	5 -10	0.00329165	2.90	2.17	2.05	1.98
85		0.00287762	2.72	2.10	1.99	1.94
86		0.00277788	2.46	1.83	1.69	1.58
87		0.00345273	3.06	2.30	2.06	1.87
88		0.00368106	2.97	2.31	2.29	2.27
89		0.00525724	4.07	3.33	3.11	2.91
90		0.00373704	3.49	2.64	2.36	2.19
91		0.00288817	2.83	2.29	2.27	2.20
92		0.0029623	2.79	2.05	1.82	1.65
93		0.00296065	2.71	2.10	2.03	1.93
94		0.00427948	3.72	3.06	2.78	2.52
95		0.00484244	3.89	3.07	2.75	2.50
96		0.00476724	3.61	2.91	2.61	2.45
97		0.00316253	2.44	1.67	1.57	1.50
98		0.00239215	2.18	1.62	1.55	1.52
99		0.00244201	2.32	1.72	1.58	1.46
100		0.00290992	2.76	2.11	1.92	1.79
101		0.00345275	2.91	2.26	2.17	2.16
102		0.00420027	3.47	2.64	2.46	2.33
103		0.00348727	3.11	2.30	2.12	2.00
104		0.00299466	2.67	2.09	1.99	1.90
105		0.00341306	3.02	2.29	2.14	2.00
106		0.00394557	3.27	2.54	2.37	2.24
107		0.00556729	4.61	3.69	3.37	3.16
108		0.00297604	2.64	2.04	1.96	1.90
109		0.00316353	3.07	2.35	2.14	2.00
110		0.00395398	3.00	2.41	2.28	2.28
111		0.00369782	3.05	2.48	2.37	2.28
112		0.00354096	2.83	2.23	2.07	1.94
113		0.00402824	3.62	3.17	3.19	3.13
114		0.00386505	3.37	2.79	2.55	2.33
115		0.00305729	2.66	2.00	1.82	1.67
116		0.00493991	3.64	3.09	3.07	3.03
117		0.00317565	3.18	2.69	2.44	2.20
118		0.00427303	3.38	2.79	2.51	2.30
119		0.00521024	4.82	4.10	3.64	3.14
120		0.00304731	2.68	2.19	2.04	1.87
121	>10	0.0118284	7.29	5.39	4.41	3.77
122		0.00896675	5.24	3.98	3.51	3.15
123		0.00499768	3.80	3.11	2.96	2.82
124		0.00572043	3.67	2.96	2.77	2.71
125		0.0109555	6.65	5.08	4.47	3.97

Τμήμα (α/α)	"Ηλικία" τμήματος (έτη)	RMS	IRIα (m/km)			
			V=60 km/h	V=80 km/h	V=100 km/h	V=120 km/h
126	>10	0.0119413	7.18	5.27	4.61	4.25
127		0.00974073	5.29	3.97	3.37	2.95
128		0.00534717	4.16	3.22	2.90	2.84
129		0.00609846	3.90	3.17	2.87	2.70
130		0.0198383	14.12	10.51	8.82	7.61
131		0.0137269	8.18	6.47	5.43	4.78
132		0.0111027	5.04	3.69	3.16	2.93
133		0.0108549	6.32	4.74	3.99	3.51
134		0.0110929	6.35	4.64	4.03	3.72
135		0.0144564	9.76	7.50	6.52	5.60
136		0.00877273	6.21	4.79	4.11	3.75
137		0.00929063	6.33	4.67	3.99	3.58
138		0.0106976	5.81	4.38	3.84	3.48
139		0.0096788	4.08	3.11	2.82	2.64
140		0.00545819	3.95	3.12	2.85	2.72
141		0.00535513	3.92	3.24	3.04	2.90
142		0.0144458	8.64	6.57	5.60	4.95
143		0.0144774	8.15	6.81	6.14	5.60
144		0.0076877	4.40	3.51	3.17	2.88
145		0.0158068	9.89	8.62	8.38	8.47
146		0.012123	7.69	6.42	6.25	6.45
147		0.0119637	11.04	9.63	9.27	9.21
148		0.0116328	10.69	9.14	8.63	8.36
149		0.00608992	3.43	2.58	2.60	2.86
150		0.00966161	7.96	6.52	6.14	6.08
151		0.00783059	5.75	4.46	4.23	4.16
152		0.00699908	5.79	4.54	4.33	4.31
153		0.00837842	8.78	7.50	7.03	6.73
154		0.00568538	5.85	4.52	4.25	4.21
155		0.0158878	9.81	8.52	8.34	8.39
156		0.00913483	6.22	5.24	5.08	5.12
157		0.0113366	10.43	9.24	9.05	8.94
158		0.0100767	9.55	8.05	7.49	7.37
159		0.00493325	3.34	2.77	2.89	3.13
160		0.00884704	7.48	6.17	5.81	5.72

Πίνακας Π16: Στοιχεία μετρημένων υποχωρήσεων οδικού πειράματος του κεφαλαίου 8

StationID	History	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
1	TRUE	49.55	59.30	45.60	39.30	32.20	26.30	19.00	14.90	12.30	10.80
2	TRUE	49.62	61.70	48.90	42.60	34.60	28.30	19.80	14.20	11.20	9.70
3	TRUE	49.41	55.90	44.40	38.80	31.00	25.20	18.60	14.30	12.10	10.00
4	TRUE	49.47	60.40	47.50	41.40	34.00	28.50	20.60	15.40	12.40	10.60
5	TRUE	49.23	59.10	47.50	41.40	34.30	28.70	20.50	14.90	12.20	10.00
6	TRUE	49.47	40.50	33.30	28.90	23.30	19.30	13.80	10.00	8.40	6.90
7	TRUE	49.43	55.70	45.60	37.50	31.40	26.00	18.90	13.60	10.70	10.50
8	TRUE	49.43	62.50	48.40	40.60	31.80	27.80	17.90	15.50	11.00	9.20
9	TRUE	49.52	63.70	51.40	43.70	36.40	29.70	21.70	17.30	13.60	12.60
10	TRUE	49.68	69.00	55.50	48.20	38.50	31.30	21.80	16.10	13.20	11.80
11	TRUE	49.59	84.20	70.00	61.00	50.00	41.40	29.70	22.30	17.90	15.00
12	TRUE	49.52	61.70	47.40	40.30	32.30	26.70	19.60	15.50	13.40	11.90
13	TRUE	49.76	50.90	39.80	33.70	26.10	20.20	14.50	13.10	11.10	9.70
14	TRUE	49.73	53.70	41.50	34.30	26.80	21.20	14.90	12.60	10.10	9.40
15	TRUE	49.57	45.80	33.90	28.70	23.10	19.00	14.20	11.40	10.00	9.30
16	TRUE	49.64	52.10	37.90	32.00	25.30	20.50	14.50	11.20	10.30	9.00

Πίνακας 17: Στοιχεία θερμοκρασίας περιοχής οδικού πειράματος του κεφαλαίου 8

	Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία (°C)
ΙΑΝ	5.4	9.2	13
ΦΕΒ	5.6	9.7	13.6
ΜΑΡ	7.1	11.8	15.8
ΑΠΡ	10.1	15.9	20.1
ΜΑΙ	14.9	21.4	25.7
ΙΟΥΝ	19.5	26.1	30.6
ΙΟΥΛ	22.3	28.6	32.9
ΑΥΓ	22.2	28.2	32.7
ΣΕΠ	18.8	24.3	28.9
ΟΚΤ	14.6	19	23.2
ΝΟΕ	10.4	14.4	18.5
ΔΕΚ	7.2	10.9	14.7

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικά στοιχεία οδοστρώματος κεφαλαίου 8 – Περίπτωση Ι

Διατομή (α/α)	Πάχος ασφαλτικής στρώσης (mm)	Πάχος στρώσης από ασύνδετο υλικό (mm)	IRI (m/km)	PROvIMA (mm)
1	190	250	0.80	1.25
2	190	250	1.27	1.44
3	190	250	1.25	1.37
4	190	250	1.08	1.20
5	190	250	1.18	1.36
6	190	250	0.96	1.25
7	190	250	0.85	1.16
8	190	250	1.17	1.39
9	190	250	1.51	1.58
10	190	250	1.15	1.47
11	190	250	0.98	1.39
12	190	250	1.29	1.62
13	190	250	1.28	1.57
14	190	250	0.78	1.20
15	190	250	0.93	1.35
16	190	250	0.88	1.09

Πίνακας 19: Συγκεντρωτικά στοιχεία οδοστρώματος κεφαλαίου 8 – Περίπτωση II

Διατομή (α/α)	Πάχος ασφαλτικής στρώσης (mm)	Πάχος στρώσης από ασύνδετο υλικό (mm)	IRI (m/km)	PROvIMA (mm)
1	195	282	0.80	1.20
2	198	277	1.27	1.51
3	207	269	1.25	1.52
4	198	277	1.08	1.30
5	198	277	1.18	1.42
6	210	277	0.96	1.31
7	207	277	0.85	1.11
8	207	267	1.17	1.36
9	207	267	1.51	1.69
10	229	243	1.15	1.56
11	207	267	0.98	1.50
12	207	267	1.29	1.71
13	198	277	1.28	1.68
14	207	267	0.78	1.26
15	207	267	0.93	1.46
16	200	274	0.88	1.41

