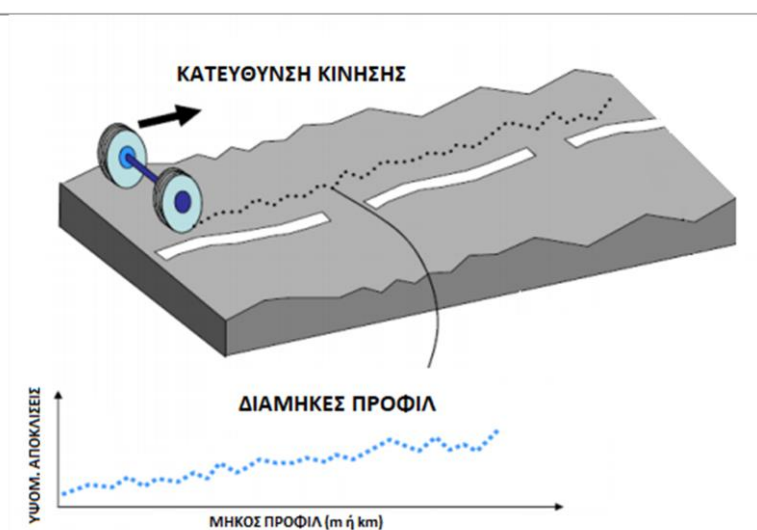




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΪΑΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



ΠΡΙΝΤΖΙΟΥ ΚΛΕΟΠΑΤΡΑ

Επιβλέπουσα: Χ. Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών κ. Χριστίνα Πλατή, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το παρόν θέμα της διπλωματικής μου εργασίας καθώς επίσης και για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αναστάσιο Στεργίου για την πολύτιμη βοήθεια, την προθυμία του και τις συμβουλές που μου προσέφερε κατά την διεκπεραίωση της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλη την συμπαράσταση και την αρωγή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και κυρίως την οικογένειά μου για όσα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια, την κατανόηση και την απaráμιλλη στήριξη τους σε κάθε μου βήμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύθηκε και αξιολογήθηκε η ομαλότητα ασφαλικών οδοστρωμάτων. Η ομαλότητα αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδείχθηκαν τα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας, καθώς και κάποιοι από τους δείκτες ομαλότητας που προκύπτουν από αυτά. Επιπλέον, παρουσιάστηκε η μέθοδος της δυναμικής φασματικής ανάλυσης, μέσω της οποίας γίνεται η απεικόνιση και η αξιολόγηση κυματισμών που έχουν άμεση σχέση με το οδόστρωμα. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκαν στοιχεία τριών τμημάτων ασφαλικών οδοστρωμάτων, προερχόμενα από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιΐας ΕΜΠ, για τα οποία προσδιορίστηκε η ομαλότητα χρησιμοποιώντας το δείκτη RMS υψομετρικών αποκλίσεων των δυναμικών φασματικών αναλύσεων. Γενικό συμπέρασμα είναι ότι η δυναμική φασματική ανάλυση μπορεί να περιγράψει καλύτερα την ομαλότητα ενός οδοστρώματος καθώς μπορεί να συνδέσει ενδεχόμενες απώλειες ομαλότητας με κάποιο αίτιο. Τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία σηματοδοτούν βελτιώσεις όσον αφορά την παρακολούθηση και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to analyze and evaluate the smoothness of the asphalt pavements. Smoothness is the main criterion for evaluating roads. Through the literature review, the smoothness recording systems emerged, as well as some of the smoothness indicators that result from them. In addition, power spectral density (PSD) analysis has been presented, which is used to map and evaluate ripples that are directly connected to the path. In particular, data from three sections of asphalt pavements derived from the database of the NTUA Road Construction Laboratory were used, for which smoothness was dedicated using the RMS dynamic height index. The general conclusion is that dynamic spectral analysis can better describe the smoothness of the roadway as it can relate the possible loss of smoothness to the cause. The detailed findings and the accompanying conclusions provided in this dissertation indicate changes in the monitoring and assessment of roads.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	III
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	V
1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενική ανασκόπηση	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία	2
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	3
2. Ομαλότητα	5
2.1 Γενικά	5
2.2 Συστήματα καταγραφής ομαλότητας	8
2.2.1 Γενικές κατηγορίες συστημάτων καταγραφής ομαλότητας	8
2.2.2 Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης	9
2.2.2 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα	12
2.2.3 Προφίλογράφοι	13
2.2.4 Ελαφρά προφιλόμετρα	15
2.2.5 Χειροκίνητες συσκευές	16
2.2.6 Νέες τεχνολογίες	17
2.3 Δείκτες ομαλότητας	20
2.3.1 International Roughness Index (IRI)	20
2.3.2 Half-Car Roughness Index (HRI)	25
2.3.3 Profile Index (PI)	27
2.3.4 Ride Number (RN)	28
2.3.5 Ανακεφαλαίωση	30
3. Δυναμική φασματική ανάλυση	33
3.1 Γενικά	33
3.2 Μετασχηματισμός Fourier	34
3.3 Φίλτρα ανάλυσης	36
3.4 Μορφές διαγραμμάτων δυναμικής φασματικής ανάλυσης	39
3.5 Ταξινόμηση κυματισμών	45
3.6 Ταξινόμηση κυματικών ζωνών ομαλότητας	49
3.7 Λογισμικά ανάλυσης	52
4. Αναλυτική διαδικασία	58
4.1 Στοιχεία ανάλυσης	58
4.2 Επεξεργασία δεδομένων συλλογής	58

4.3 Περίπτωση Α	63
4.4 Περίπτωση Β.....	66
4.5 Συνδυαστικά αποτελέσματα	69
5. Συμπεράσματα	74
6. Βιβλιογραφία	78
7. Παράρτημα.....	82
7.1 Πίνακες IRI	82
7.2 Πίνακες των τιμών RMS των φιλτραρισμένων αναλύσεων PSD.....	100
7.3 Πίνακες των τιμών RMS με band pass αναλύσεων PSD ανά κυματική ζώνη	121

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 2.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΟΜΕΣ (ΛΟΪΖΟΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΗ, 2018)	5
ΕΙΚΟΝΑ 2.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ.....	6
ΕΙΚΟΝΑ 2.3. ΈΛΛΕΙΨΗ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (BURNS, 1981)	7
ΕΙΚΟΝΑ 2.4. ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ BUMP INTEGRATOR (RAJU, KUMAR AND RAJU, 2012)	10
ΕΙΚΟΝΑ 2.5. ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ MAYSMETER (‘CHAPTER 2 SURFACE CHARACTERISTICS’, 2007)	10
ΕΙΚΟΝΑ 2.6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ PCA ROADMETER (BROKAW, 1967)	11
ΕΙΚΟΝΑ 2.7. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟΥ (SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	12
ΕΙΚΟΝΑ 2.8. ROAD SURFACE PROFILER ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΔΟΠΟΙΑΣ ΕΜΠ (ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ) (ΛΟΪΖΟΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΗ, 2018)	13
ΕΙΚΟΝΑ 2.9. ΣΚΙΤΣΑ ΤΟΥ CALIFORNIA PROFILOGRAPH ΚΑΙ ΤΟΥ RAINHART PROFILE (LOOFT ET AL., 2007)	14
ΕΙΚΟΝΑ 2.10. LIGHTWEIGHT PROFILER (HTTPS://AMEENGINEERING.COM/RESOURCES/INERTIAL-ROAD-PROFILERS-FAQ/)	15
ΕΙΚΟΝΑ 2.11. ΣΥΣΚΕΥΗ DIPSTICK (HTTPS://PAVEMENTINTERACTIVE.ORG/REFERENCE-DESK/PAVEMENT- MANAGEMENT/PAVEMENT-EVALUATION/ROUGHNESS/)	16
ΕΙΚΟΝΑ 2.12. ΣΥΣΚΕΥΗ WALKING PROFILER (HTTPS://ARRBSYSTEMSSA.COM/WALKING-PROFILER-G3.HTML).....	17
ΕΙΚΟΝΑ 2.13. ROAD DOCTOR SURVEY VAN SYSTEM (HTTPS://WWW.ROADSCANNERS.COM/PRODUCTS/ROAD-CLINIC- RDSV/FULL-RDSV-SYSTEM-ROAD-DATA-COLLECTION/)	18
ΕΙΚΟΝΑ 2.14. ΣΥΣΤΗΜΑ ROUGHNESS CAPTURE ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ SMARTPHONE: (Α) ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΟΥ ΤΗΛΕΦΩΝΟΥ ΠΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΙ ΚΑΘΕΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ, (Β) ROUGHNESS CAPTURE INTERFACE ΚΑΙ (Γ) ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ (ISLAM ET AL., 2014)	19
ΕΙΚΟΝΑ 2.15. ΔΙΑΤΑΞΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ IRI (HTTPS://EPG.MODOT.ORG/INDEX.PHP/CATEGORY:610_PAVEMENT_SMOOTHNESS)	22
ΕΙΚΟΝΑ 2.16. ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ (SAYERS AND KARAMIHAS, 1996)	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.17. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ HRI-IRI (M. W. SAYERS, 1989)	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.18. ΜΟΝΤΕΛΟ «ΜΙΣΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ» (SAYERS, 1989).....	26
ΕΙΚΟΝΑ 2.19. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ PI ΑΠΟ ΕΝΑ ΙΧΝΟΣ ΠΡΟΦΙΛΟΓΡΑΦΟΥ (PERERA, KOHN AND TAYABJI, 2005).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.20. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ PI ΚΑΙ IRI ΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (HUANG, 2006).....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.21. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI ΜΕ PI (ΜΕ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ ΤΟ RN) (SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	30
ΕΙΚΟΝΑ 3.1. ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ (SAYERS&KARAMIHAS, 1996)	33
ΕΙΚΟΝΑ 3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ΜΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ(SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	37
ΕΙΚΟΝΑ 3.3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ(SAYERS AND KARAMIHAS, 1996)	37
ΕΙΚΟΝΑ 3.4. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΑΦΑΙΡΕΣΗΣ (SAYERS AND KARAMIHAS, 1996) ...	38
ΕΙΚΟΝΑ 3.5. Η ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΦΙΛΤΡΟ IRI (SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	39
ΕΙΚΟΝΑ 3.6. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ	40
ΕΙΚΟΝΑ 3.7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΛΙΣΗΣ	41
ΕΙΚΟΝΑ 3.8. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ (SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.9. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ (SAYERS AND KARAMIHAS, 1998)	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.10. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΤΩΝ ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΣΤΗ ΘΕΣΗ 1 ΚΑΙ 3 (1/3 ΖΩΝΗ ΟΚΤΑΒΑΣ) (WANG, 2006).....	43
ΕΙΚΟΝΑ 3.11. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ 1 ΚΑΙ 3 (ΤΡΙΤΗ ΖΩΝΗ ΟΚΤΑΒΑΣ) (WANG, 2006)	44
ΕΙΚΟΝΑ 3.12. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΣΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ 1(ΣΤΑΘΕΡΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ) (WANG, 2006) ..	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.13. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΥΦΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (COSSALE, ELLIOTT AND WIDYATMOKO, 2013).....	46
ΕΙΚΟΝΑ 3.14. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ISO 8608 (CAFISO ET AL., 2019)	47
ΕΙΚΟΝΑ 3.15. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ	51
ΕΙΚΟΝΑ 3.16. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ RMS ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD ΚΛΙΣΕΩΝ (BAE AND STOFFELS, 2017).....	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.17. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD ΚΛΙΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΥΟ ΣΥΣΚΕΥΕΣ(SAYERS AND KARAMIHAS, 1996)	53
ΕΙΚΟΝΑ 3.18. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΧΩΡΙΣ ΦΙΛΤΡΟ.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 3.19. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ BUTTERWORTH (ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ).....	55

ΕΙΚΟΝΑ 3.20. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ IRI	56
ΕΙΚΟΝΑ 4.1. ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑΤΑ IRI ΤΩΝ Τ-Α, Τ-Β ΚΑΙ Τ-Γ	59
ΕΙΚΟΝΑ 4.2. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ	60
ΕΙΚΟΝΑ 4.3. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΖΩΝΗ ΑΝΑ ΟΚΤΑΒΑ	61
ΕΙΚΟΝΑ 4.4. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α, Τ-Β ΚΑΙ Τ-Γ ΚΑΙ Ο ΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ..	63
ΕΙΚΟΝΑ 4.5. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Β ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ BAND PASS	63
ΕΙΚΟΝΑ 4.6. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Β ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ HIGH PASS	64
ΕΙΚΟΝΑ 4.7. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Β ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ IRI.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 4.8. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΖΩΝΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Β ΚΑΙ Ο ΧΩΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ	65
ΕΙΚΟΝΑ 4.9. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Γ ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ BAND PASS.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 4.10. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Γ ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ HIGH PASS	67
ΕΙΚΟΝΑ 4.11. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Γ ΜΕ ΦΙΛΤΡΟ IRI	67
ΕΙΚΟΝΑ 4.12. ΑΝΑΛΥΣΗ PSD ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΖΩΝΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ Τ-Α ΚΑΙ Τ-Γ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 4.13. ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PSD ΤΩΝ Τ-Α, Τ-Β ΚΑΙ Τ-Γ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΚΡΑ ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	70
ΕΙΚΟΝΑ 4.14. ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PSD ΤΩΝ Τ-Α, Τ-Β ΚΑΙ Τ-Γ ΓΙΑ ΤΑ ΜΕΣΑΙΑ ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ	70
ΕΙΚΟΝΑ 4.15. ΕΠΙΦΑΝΕΙΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PSD ΤΩΝ Τ-Α, Τ-Β ΚΑΙ Τ-Γ ΓΙΑ ΤΑ ΜΕΓΑΛΑ ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ	71

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. ΚΛΙΜΑΚΑ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ RN	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ IRI, HRI, PI ΚΑΙ RN (M. W. SAYERS ET AL., 1986)	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΗΚΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ PSD(M.W.SAYERS ET AL., 1986).....	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2. ΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ISO 8608 (PAWAR,2018).....	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ IRI ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2. ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΚΟΠΗΣ ΜΕ ΦΙΛΤΡΑ BUTTERWORTH.....	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ ΤΩΝ T-A ΚΑΙ T-B ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ ΤΩΝ T-A ΚΑΙ T-B ΣΤΟΥΣ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.ΤΙΜΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ ΤΩΝ T-A ΚΑΙ T-Γ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΕΜΒΑΔΩΝ ΤΩΝ T-A ΚΑΙ T-Γ ΣΤΟΥΣ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7. ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PSD ΤΩΝ T-A, T-B ΚΑΙ T-Γ, ΑΝΑ ΖΩΝΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-A.....	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-B.....	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΙΚΡΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-Γ	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΣΑΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-A	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΣΑΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-B	123
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΣΑΙΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-Γ	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.14. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-A	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-B.....	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗ ΖΩΝΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΟΥ T-Γ	127
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1. ΤΙΜΕΣ IRI ΑΝΑ 100M ΓΙΑ T-A	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2. ΤΙΜΕΣ IRI ΑΝΑ 100M ΓΙΑ T-B	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3. ΤΙΜΕΣ IRI ΑΝΑ 100M ΓΙΑ T-Γ.....	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΓΙΑ ΤΟ T-A ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ IRI	100
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΓΙΑ ΤΟ T-B ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ IRI	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΓΙΑ ΤΟ T-Γ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ IRI.....	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΤΟΥ T-A ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.8. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΓΙΑ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ BAND PASS	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.9. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΤΟΥ T-Γ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΖΩΝΗΣ	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.10. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΤΟΥ T-A ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ.....	114
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.11. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΤΟΥ T-B ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ.....	116
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.12. ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ, ΥΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PSD, ΤΟΥ T-Γ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΦΙΛΤΡΟ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ	118

1. Εισαγωγή

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης των οδοστρωμάτων παίζει σπουδαίο ρόλο όσον αφορά την εξυπηρέτηση των χρηστών. Συγκεκριμένα, ένα οδόστρωμα κρίνεται ως «εξυπηρετικό» ανάλογα με την ασφάλεια και την άνεση που επιδεικνύει στους χρήστες κατά την κυκλοφορία τους σε αυτό. Η επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος αλλοιώνεται με την πάροδο του χρόνου γεγονός που γίνεται εύκολα αντιληπτό από τους χρήστες. Οι βασικοί παράγοντες που οφείλονται στην αλλαγή της κατάστασης αυτής είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η κυκλοφορία καθώς και η γήρανση των υλικών. Συνεπώς, βλέποντας τους παράγοντες, που επηρεάζουν το οδόστρωμα, γίνεται αντιληπτό ότι η μεταβολή της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος είναι αναπόφευκτη. Για το λόγο αυτό, πέρα της δομικής κατάστασης, κρίσιμη είναι η παρακολούθηση της λειτουργικής κατάστασης αυτού, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η διατήρηση της εξυπηρετικότητάς του, κάνοντας τις ανάλογες επεμβάσεις την κατάλληλη στιγμή.

Στην πράξη τα επιφανειακά χαρακτηριστικά είναι αυτά που γίνονται αντιληπτά από τους χρήστες του οδοστρώματος. Σαν αποτέλεσμα αυτού ήταν η ανάπτυξη διάφορων μεθόδων οι οποίες καταγράφουν τα χαρακτηριστικά αυτά, έτσι ώστε μετά την καταγραφή να συγκρίνονται με τα όρια που έχουν θεσπιστεί. Από τη σύγκριση αυτή συμπεραίνεται αν το οδόστρωμα χρειάζεται επέμβαση ή όχι. Γενικά, τα όρια αυτά αναφέρονται στις προδιαγραφές ενός έργου κατασκευής ή συντήρησης οδοστρωμάτων (Λοΐζος και Πλατή, 2018).

Ένα βασικό επιφανειακό χαρακτηριστικό οδοστρώματος, που αντιλαμβάνονται οι χρήστες μιας οδού είναι η ομαλότητα ή επιπεδότητα. Το επίπεδο ομαλότητας ενός οδοστρώματος καθορίζεται από τις αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από μία θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Η καταγραφή της ομαλότητας είναι απαραίτητη τόσο αμέσως μετά την κατασκευή για τον έλεγχο ποιότητας των οδοστρωμάτων, όσο και σε βάθος λειτουργίας τους στο πλαίσιο παρακολούθησης και αξιολόγησης, για τη διαχείριση της συντήρησής τους. Για την αξιολόγηση της ομαλότητας χρησιμοποιούνται κάποιοι αντιπροσωπευτικοί δείκτες. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας (International Roughness Index, IRI), ο οποίος εκφράζει την ποιότητα κύλισης ενός οδοστρώματος βάσει των κραδασμών που ασκούνται στο όχημα.

Επιπλέον, το στοιχείο που αντιλαμβάνεται ο χρήστης μιας οδού είναι οι κυματισμοί που διαμορφώνουν την τελική επιφάνεια κύλισης ενός οδοστρώματος, αφού αποτέλεσμα των κυματισμών είναι οι κραδασμοί του οχήματος, κατά τη μετακίνηση του πάνω στο οδόστρωμα. Για το λόγο αυτό, χρειάστηκε ο προσδιορισμός ενός νέου μεγέθους, πέρα του δείκτη ομαλότητας IRI. Το μέγεθος αυτό είναι η δυναμική φασματική πυκνότητα (Power Spectral Density: PSD) για την ανάλυση ή διαφορετικά η δυναμική φασματική ανάλυση (PSD analysis) των κυματισμών και τελικά την αξιολόγηση του οδοστρώματος. Η δυναμική φασματική ανάλυση αναπαριστά την κατανομή ενός χαρακτηριστικού των κυματισμών, συνήθως του πλάτους ή της κλίσης, που αντιστοιχεί σε μία κατατομή της επιφάνειας ενός οδοστρώματος ως προς το μήκος κύματος (ή τον αριθμό κυμάτων) των ισοδύναμων κυματισμών (Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., και Κανελλαΐδης, 2005).

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο την ανάδειξη των δυνατοτήτων της φασματικής ανάλυσης των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων για την αξιολόγηση της ομαλότητάς τους. Η φασματική ανάλυση έχει αποδειχθεί ότι παρέχει πληροφορίες για το συσχετισμό της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων με τα δομικά στοιχεία τους. Γενικά, πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι η φασματική ανάλυση βοηθάει στον εντοπισμό της προέλευσης ενδεχόμενης απώλειας ομαλότητας.

Για την επίτευξη του προαναφερόμενου στόχου, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική έρευνα για τη λεπτομερή ανάλυση των μεθόδων προσδιορισμού της ομαλότητας. Κατόπιν, μέσω επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων από την τράπεζα του Εργαστηρίου Οδοποιΐας ΕΜΠ, προερχόμενα από τρία τμήματα ασφαλτικών οδοστρωμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, προκύπτουν τα στοιχεία ομαλότητας τους. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μελέτη και βάση αυτής, διερευνώνται τα αίτια της μείωσης του επιπέδου ομαλότητας. Η μελέτη περιλαμβάνει την επίδραση των φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των κυματισμών της επιφάνειας.

Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται υπό το πρίσμα της διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από 7 κεφάλαια τα οποία περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως.

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται τα εισαγωγικά στοιχεία ενώ παράλληλα γίνεται μια ανασκόπηση των στόχων που έχουν τεθεί στη συγκεκριμένη εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφέρονται γενικά χαρακτηριστικά της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, καθώς και οι τρόποι καταγραφής της. Επίσης, περιγράφονται κάποιοι βασικοί δείκτες ομαλότητας, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία. Πέρα από την ανάλυση των δεικτών γίνεται και αναφορά της συσχέτισής τους μεταξύ τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η μέθοδος της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (PSD) των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται η πειραματική ανάλυση των στοιχείων ομαλότητας οδοστρωμάτων, προερχόμενα από το Εργαστήριο Οδοποιΐας ΕΜΠ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και κυρίως από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αναγράφονται παραπάνω, καθώς επίσης δίνονται και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρεται όλη η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

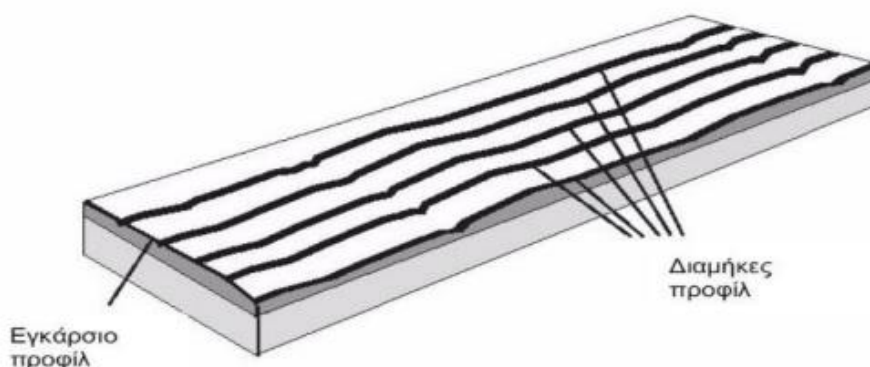
Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνονται λεπτομερώς τα στοιχεία των αναλύσεων.

2. Ομαλότητα

2.1 Γενικά

Η ομαλότητα του οδοστρώματος θεωρείται μέτρο της ποιότητας κύλισης που γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες μιας οδού. Έχει βρεθεί ότι παρέχει ένα καλό μέτρο της συνολικής κατάστασης οδοστρώματος καθώς επίσης και μια μεταβλητή για τη συσχέτιση του κόστους λειτουργίας του οχήματος με την κατάσταση οδοστρώματος. Για αυτούς τους λόγους και λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους της συλλογής δεδομένων, η ομαλότητα συχνά αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης της κατάστασης των οδοστρωμάτων σε επίπεδο δικτύου (McLean and Ramsay, 1996).

Μία κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος ή αλλιώς προφίλ, είναι μία τομή δύο διαστάσεων κατά μήκος μίας νοητής γραμμής και μπορεί να έχει είτε διαμήκη είτε εγκάρσια διεύθυνση (βλ. Εικόνα 2.1). Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση της ομαλότητας χρησιμοποιείται η τομή κατά τη διαμήκη διεύθυνση του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.1. Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές (Λοΐζος και Πλατή, 2018)

Η ομαλότητα μπορεί να αξιολογηθεί με βάση τους κυματισμούς που δημιουργούνται κατά μήκος της επιφάνειας του οδοστρώματος, μήκους κυρίως μεταξύ 0.5-50m (βλ. Εικόνα 2.2). Η ομαλότητα αρχίζει να εμφανίζει προβλήματα όταν υπάρχει απόκλιση του οδοστρώματος από τη θεωρητική επίπεδη επιφάνεια. Οι αποκλίσεις αυτές έχουν

χαρακτηριστικές διαστάσεις και επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης, τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων και τη δυναμική των φορτίσεων.

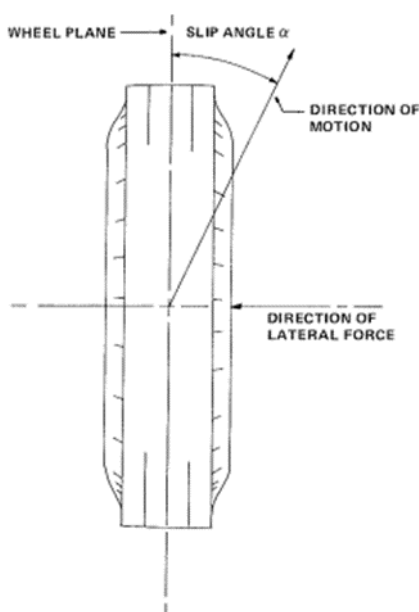


Εικόνα 2.2. Στοιχεία αστοχιών επιτεδότητας

Στη μείωση του επιπέδου ομαλότητας μπορεί να οδηγήσουν διάφοροι παράγοντες, όπως είναι: τα κατασκευαστικά λάθη, ο φόρτος κυκλοφορίας, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα υλικά της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, λάθη κατά την επίστρωση του οδοστρώματος συμβάλλουν στη μείωση της ομαλότητας του πριν καν τεθεί σε λειτουργία. Επιπλέον, βασική αιτία ελάττωσης της ομαλότητας είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, αφού η επαναλαμβανόμενη φόρτιση, λόγω κυκλοφορίας, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμών. Οι ρωγμές αυτόματα υποδηλώνουν υποβάθμιση της ομαλότητας. Οι κλιματολογικές συνθήκες, όπως οι μεταβολές στη θερμοκρασία, οι εναλλαγές παγετού-τήξης και υγρασίας-ξηρασίας, προκαλούν παραμορφώσεις στο οδόστρωμα, καθιστώντας το, με την πάροδο του χρόνου, λιγότερο ομαλό. Τελικά, η ανομοιογένεια των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή, καθώς και η ακατάλληλη συμπύκνωση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ομαλότητας (Perera and Kohn, 2002).

Η σημασία της ομαλότητας για τους χρήστες του οδοστρώματος είναι πολύ σημαντική. Ένα ομαλό οδόστρωμα παρέχει στους χρήστες του άνεση, αλλά και αποτελεσματικότερη κυκλοφορία των οχημάτων σε αυτό. Από την άλλη, τα οδοστρώματα με κακή ποιότητα ομαλότητας δημιουργούν δυσaréσκεια στους οδηγούς, καθώς καθιστούν το ταξίδι άβολο, προκαλούν πολλές φορές μείωση των βέλτιστων ταχυτήτων ταξιδιού, ενώ αποτελεί συχνό φαινόμενο οδοστρώματα τέτοιας ποιότητας να θέτουν σε κίνδυνο την οδική ασφάλεια (Smith *et al.*, 1997). Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν περιπτώσεις, στις οποίες η «ανωμαλία» του εδάφους προκαλεί αναταράξεις στο όχημα και κατά συνέπεια στον οδηγό με κίνδυνο, πέρα

από την άνεση του, να χάσει και τον έλεγχο του οχήματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της αντίδρασης του τροχού όταν έρχεται σε επαφή με οδόστρωμα μειωμένης ομαλότητας, με αποτέλεσμα την αναπήδηση του ελαστικού η οποία φθείρει την ανάρτηση των ελαστικών και καταπονεί το οδόστρωμα (Λοΐζος και Πλατή,2018). Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται πως ο τροχός του οχήματος μπορεί να παρεκκλίνει λόγω της μειωμένης ομαλότητας ενός οδοστρώματος.



Εικόνα 2.3. Έλλειψη ομαλότητας και απώλεια ελέγχου οχήματος (Burns, 1981)

Ατυχήματα μπορεί να προκληθούν σε ένα οδικό δίκτυο εξαιτίας της έλλειψης καλής ομαλότητας, εφόσον αυξάνονται οι μεταβολές των κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα, αλλά και οι πλευρικές δυνάμεις που δημιουργούνται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος (βλ. Εικόνα 2.3) (Λοΐζος και Πλατή,2018).

Ένα επιπλέον βασικό ζήτημα που σχετίζεται με όλα τα είδη οχημάτων και τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν σε σοβαρά ατυχήματα είναι η συχνότητα. Όταν η έλλειψη ομαλότητας κυμαίνεται σε κάποιο επαναλαμβανόμενο εύρος συχνότητας, τότε στην περίπτωση αυτή μπορεί το όχημα και η συχνότητα να βρίσκονται στην ίδια φάση και να δίνεται η εντύπωση ότι ένας δρόμος κακής ομαλότητας είναι ομαλός. Η εξέλιξη του φαινομένου αυτού είναι η αυξανόμενη κατακόρυφη κίνηση του οχήματος ως προς το οδόστρωμα έως ότου τα ελαστικά του οχήματος να μην βρίσκονται πλέον σε επαφή με το δρόμο και να γίνουν

αερομεταφερόμενα. Έτσι, προκαλούνται πολλά προβλήματα που έχουν σχέση με στροφές, το σύστημα πέδησης και με απώλεια του υλικού από τη βάση του οχήματος. Τα μεγάλα φορτηγά, με ελαφρά φορτία, είναι περισσότερο επιρρεπή στο πρόβλημα αυτό, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα επιβατικά οχήματα δεν διατρέχουν κάποιο κίνδυνο (Burns, 1981).

Εμπειρικά έχειδειχθεί ότι ένα όχημα που κινείται αποκλειστικά σε ομαλά οδοστρώματα θα έχει λιγότερο λειτουργικό κόστος από κάποιο άλλο που κινείται σε λιγότερο ομαλό οδόστρωμα και αυτό λόγω της απόσβεσης που προκαλείται από ένα οδόστρωμα με μειωμένη ομαλότητα (Barnes and Langworthy, 2004). Επίσης, το «ανώμαλο» οδόστρωμα δημιουργεί προβλήματα στα ελαστικά του οχήματος, έτσι που η αντικατάσταση των ελαστικών να είναι απαραίτητη. Συνεπώς, η ομαλότητα του οδοστρώματος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα του κόστους επισκευής του οχήματος (Barnes and Langworthy, 2003). Έτσι συμπεραίνεται ότι τα «ανώμαλα» οδοστρώματα δεν αποτελούν μόνο κίνδυνο για τον άνθρωπο αλλά και για τα ίδια τα οχήματα, αφού αρκετές φορές οι βλάβες τους οφείλονται σε καταπόνηση λόγω κίνησης σε λιγότερο ομαλές επιφάνειες (Smith *et al.*, 1997).

Από τα παραπάνω κρίνεται ζωτικής σημασίας η καταγραφή της ομαλότητας, πράγμα που επιτυγχάνεται με διάφορα συστήματα, που με τα χρόνια εξελίσσονται προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια.

2.2 Συστήματα καταγραφής ομαλότητας

2.2.1 Γενικές κατηγορίες συστημάτων καταγραφής ομαλότητας

Ο προσδιορισμός της ομαλότητας είναι απαραίτητος έτσι ώστε να παρακολουθείται η υφιστάμενη κατάσταση μιας οδού ή ενός οδικού δικτύου, που στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων (ΣΔΟ) αλλά και για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης νέων ή επιδιορθωμένων οδοστρωμάτων. Τα δεδομένα προφίλ που λαμβάνονται από τα προφιλόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάγνωση της κατάστασης του συγκεκριμένου τμήματος, για τον προσδιορισμό της κατάλληλης θεραπείας επιδιόρθωσης (αν χρειαστεί) και για περαιτέρω έρευνα. Γενικά, ο εξοπλισμός, με τη βοήθεια του οποίου γίνεται η καταγραφή της ομαλότητας, χωρίζεται στις παρακάτω έξι κατηγορίες (Perera and Kohn, 2002):

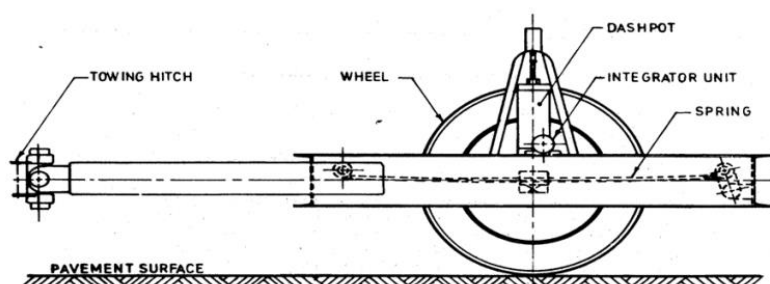
1. Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems : RTRRMS)
2. Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα (High speed inertial profilers)
3. Προφίλογράφοι (Profilers)
4. «Ελαφρά» προφιλόμετρα (Lightweight profilers)
5. Χειροκίνητες συσκευές (Manual devices)
6. Νέες τεχνολογίες

2.2.2 Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης

Τα συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems: RTRRMS) μετρούν την απόκριση του δρόμου στο όχημα ή σε ένα ειδικό ρυμουλκούμενο με τη βοήθεια μορφοτροπέα. Τα αυτοκινούμενα οχήματα ή τα τυποποιημένα ρυμουλκούμενα χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση συσκευών καταγραφής της απόκρισης. Τα συστήματα που αφορούν αυτοκινούμενα οχήματα συσσωρεύουν την κατακόρυφη κίνηση του πίσω τροχού του αυτοκινήτου σε σχέση με το σκελετό του, σε αντίθεση με τα ρυμουλκούμενα που συναθροίζουν την κατακόρυφη κίνηση του ρυμουλκούμενου σε σχέση με το σκελετό του. Από τα πρώτα συστήματα τέτοιου τύπου ήταν το Bureau of Public Roads (BPR) Roughometer. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν διάφορες συσκευές τύπου απόκρισης όπως το Cox Roadmeter, το PCA Roadmeter και το Maysmeter. Οι συγκεκριμένες συσκευές μετρούν δρόμους σε ταχύτητες μέχρι και 80km/h (50mph). Το χαρακτηριστικό των συστημάτων τύπου απόκρισης που τα έκανε τόσο δημοφιλή στο παρελθόν είναι ότι παρείχαν έναν οικονομικό τρόπο απόκτησης της ομαλότητας των οδικών τμημάτων παρ' όλο που είχαν σημαντικά προβλήματα σχετικά με την αναπαραγωγή και τη φόρτωση των δεδομένων. Τα μέτρα που παράγουν έχουν θεωρηθεί από τους μηχανικούς ως ταιριαστά με την εμπειρία τους για τον καθορισμό της ποιότητας οδοστρώματος με ουσιαστικό τρόπο (Perera and Kohn, 2002).

Το Bureau of Public Roads Roughometer (BPR) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1925 και αναγνωρίστηκε ως η καλύτερη συσκευή ομαλότητας υψηλής ταχύτητας που ήταν διαθέσιμη εκείνη τη στιγμή. Το BPR Roughometer αποτελείται από ένα ρυμουλκούμενο τροχό που ρυμουλκείται από ένα αυτοκίνητο ή ένα ελαφρύ φορτηγό. Ο τροχός που είναι τοποθετημένος στο ρυμουλκούμενο υποστηρίζεται από ελατήρια. Οι μεταβολές στην

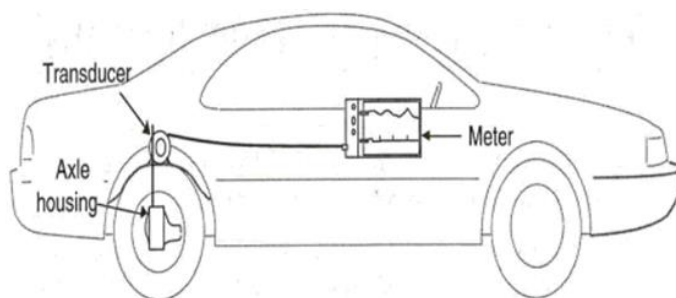
επιφάνεια του οδοστρώματος προκαλούν την κίνηση του τροχού σε σχέση με το σκελετό του οχήματος. Αυτές οι κάθετες κινήσεις συσσωρεύονται και δίνεται η ομαλότητα του οδοστρώματος σε όρους ίντσες ανά μίλι. Αυτή η συσκευή λειτουργεί με ταχύτητα δοκιμής 32 km / h (20 mph) για να συλλέξει τα δεδομένα. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται η διάταξη της συσκευής.



Εικόνα 2.4. Διάταξη του Bump Integrator (Raju, Kumar and Raju, 2012)

Τέτοιου είδους συστήματα, σαν το Bump Integrator, έχουν ηχηρή επίδραση της συχνότητας, η οποία παράγει λανθασμένα αποτελέσματα. Επίσης έγιναν τροποποιήσεις έτσι ώστε να αυξηθεί η χαμηλή ταχύτητα λειτουργίας του εξοπλισμού. Αυτές οι τροποποιήσεις των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών σε υψηλές ταχύτητες οδήγησαν στη σταδιακή ανάπτυξη των προφίλομέτρων υψηλής ταχύτητας (Perera and Kohn, 2002).

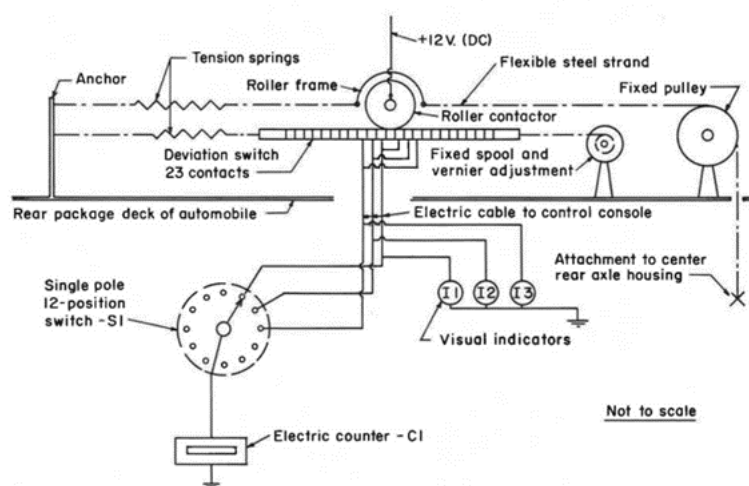
Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζεται η διάταξη του Maysmeter. Η συγκεκριμένη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ομαλότητας του οδοστρώματος από το 1960 έως τις αρχές του 1980. Η συσκευή αυτή μπορούσε να τοποθετηθεί είτε σε ένα συνηθισμένο επιβατικό αυτοκίνητο είτε σε ένα ελαφρύ φορτηγό.



Εικόνα 2.5. Διάταξη του Maysmeter ('Chapter 2 Surface Characteristics', 2007)

Επιπλέον, η Maysmeter καταγράφει τη σχετική κίνηση μεταξύ του άξονα και του σώματος, μετρώντας τις κινήσεις ανάρτησης. Το μέτρο ομαλότητας που λαμβάνεται με αυτή τη συσκευή είναι ίντσες των συνολικών κραδασμών της ανάρτησης, διαιρούμενο με τη διανυόμενη απόσταση σε μονάδες ίντσες ανά μίλι. Το μέτρο της απόκρισης του οχήματος που μετράται με την Maysmeter είναι πολύ παρόμοιο με το περιεχόμενο συχνότητάς του με τις επιταχύνσεις στο αμάξωμα του οχήματος, οπότε συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό για να οδηγήσει τους κραδασμούς (Perera & Kohn, 2002).

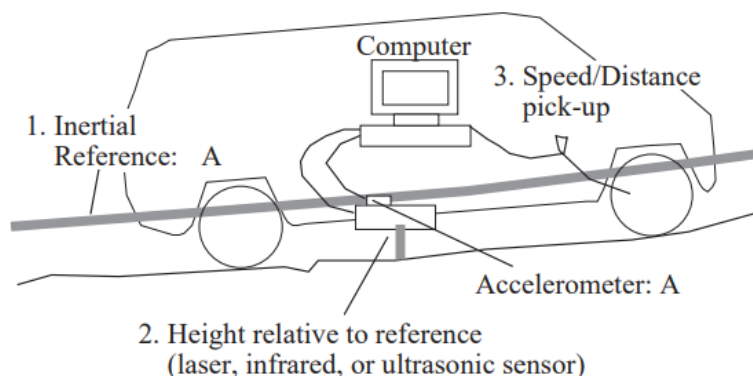
Στην Εικόνα 2.6 ακολουθεί το διάγραμμα του PCA Roadmeter. Το PCA Roadmeter αναπτύχθηκε το 1965. Αυτή η συσκευή μετρά τον αριθμό και το εύρος της κατακόρυφης απόκλισης ανάμεσα στο σκελετό του οχήματος και στο κέντρο του πίσω τροχού. Οι αποκλίσεις καταγράφονται σε ίντσες προσαυξημένες κατά $1/8$ έως και μέγιστη εκτροπή $\pm 1 \frac{1}{2}$ από την ουδέτερη ή μηδενική θέση. Οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ταχύτητα 80km/h (50 mph).



Εικόνα 2.6. Διάγραμμα μηχανικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του PCA Roadmeter (Brokaw, 1967)

2.2.2 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα

Τα προφιλόμετρα υψηλής ταχύτητας είναι τα διαδεδομένα και τεχνολογικά εξελιγμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, καταγράφουν τα χαρακτηριστικά των κατατομών της επιφάνειας του οδοστρώματος σε ταχύτητες αυτοκινητόδρομου. Το πρώτο αδρανειακό προφιλόμετρο υψηλής ταχύτητας αναπτύχθηκε από τους Elson Spangler και William Kelley στην General Motors Research Corporation (Perera and Kohn, 2002). Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός μέτρησης ενός τέτοιου τύπου προφιλόμετρου.



Εικόνα 2.7. Στοιχεία ενός υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρου (Sayers and Karamihas, 1998)

Ο εξοπλισμός μέτρησης αποτελείται από ένα επιταχυνσιόμετρο και έναν ή περισσότερους αισθητήρες που μετράνε την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του επιταχυνσιόμετρου και του εδάφους. Επίσης υπάρχει και το ταχύμετρο, μέσω του οποίου προσδιορίζεται η απόσταση που διανύει. Έπειτα από επεξεργασία των στοιχείων συλλογής προκύπτει η ζητούμενη κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος που αναπαράγουν την ομαλότητα του οδοστρώματος. Εκτός από τη συλλογή δεδομένων ομαλότητας, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σήμερα συλλέγει και άλλα δεδομένα όπως την υφή της επιφάνειάς του, καθώς δίνεται και η δυνατότητα εκτίμησης τους βάθους ενδεχόμενων τροχοαυλακώσεων (Λοΐζος και Πλατή, 2018).

Οι τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στα προφιλόμετρα σήμερα είναι είτε λέιζερ, είτε με υπερήχους, είτε οπτικοί είτε υπέρυθροι. Ο αισθητήρας υπερήχων ήταν ο περισσότερο διαδεδομένος τύπος που χρησιμοποιήθηκε τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, λόγω

προβλημάτων με το συγκεκριμένο τύπο η χρήση τους έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια. Σήμερα οι αισθητήρες λέιζερ είναι οι πιο συνηθισμένοι που χρησιμοποιούνται στα προφιλόμετρα (Perera and Kohn, 2002). Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ένα σύστημα (όχημα) προφίλομέτρου με λέιζερ.



Εικόνα 2.8. Road Surface Profiler του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ (υψηλής ταχύτητα προφιλόμετρο) (Λοΐζος και Πλατή, 2018)

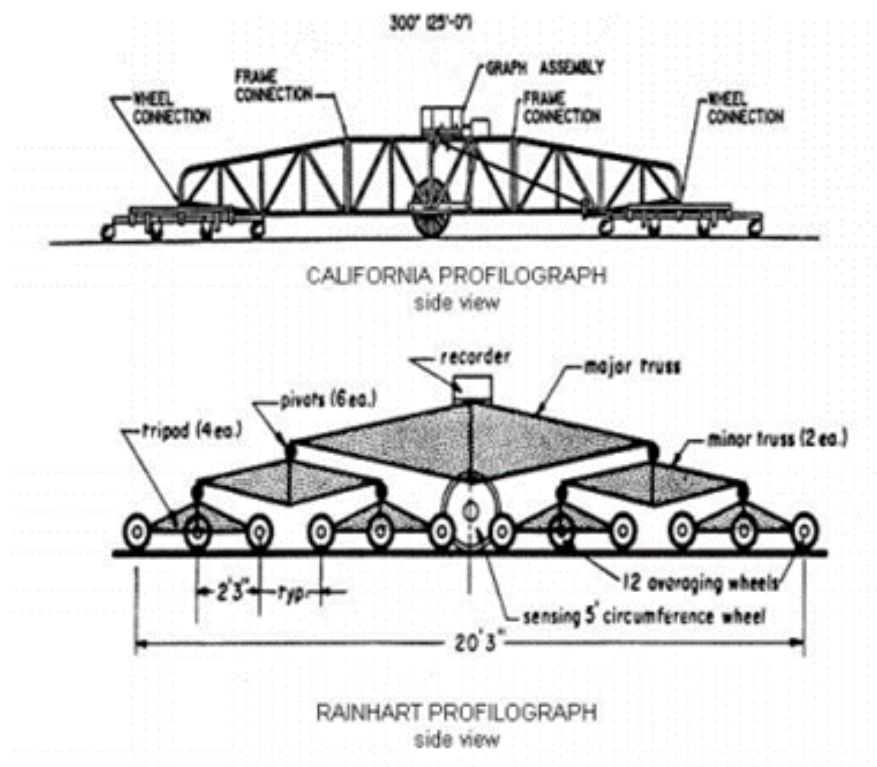
Τα προφιλόμετρα μπορούν επιπλέον να εξοπλιστούν με ένα φωτοκύτταρο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την αυτόματη συλλογή δεδομένων. Διατίθενται δύο τύποι φωτοκύτταρων κάθετα και οριζόντια. Οι κατασκευαστές πορφίλομέτρων υψηλής ταχύτητας είναι οι παρακάτω : Dynatest, International Cybernetics Corporation (ICC), Infrastructure Management Services (IMS), K.J. Law Pathway και Roadware (Perera and Kohn, 2002).

2.2.3 Προφίλογράφοι

Οι προφίλογράφοι εφαρμόστηκαν ευρέως στους κρατικούς αυτοκινητόδρομους κατά τη διάρκεια του 1980 και 1990, αποκλειστικά για τη μέτρηση και τον έλεγχο της ομαλότητας του αρχικού οδοστρώματος. Τα συστήματα αυτά μέτρησης είναι χαμηλής ταχύτητας (2 έως 5 mi / hr [3 έως 8 km / h]) που αποτελούνται από μία άκαμπτη δοκό ή πλαίσιο, έναν κεντρικό τροχό και ένα σύστημα τροχών υποστήριξης για την παροχή δεδομένων. Αρχικά, τα δεδομένα

των οδοστρωμάτων αποτυπώνονταν μηχανικά με ένα καταγραφέα ταινίας που συνδέονταν με το κέντρο του κεντρικού τροχού, αλλά σήμερα οι περισσότερες καταγραφές δεδομένων γίνονται ηλεκτρονικά με υπολογιστές που συνδέονται με τον κεντρικό τροχό (Smith and Ram, 2016).

Χρησιμοποιούνται δύο βασικά μοντέλα προφίλογράφων: ο California profilograph και ο Rainhart profile. Ο πρώτος αποτελείται από 4 έως 12 τροχούς προσαρτημένους στα άκρα ενός πλαισίου μήκους 7,6m, καθώς και τροχούς στο κέντρο του πλαισίου. Από την άλλη ο δεύτερος προφίλογράφος χρησιμοποιεί δώδεκα τροχούς στήριξης ομοιόμορφα σε απόσταση κατά μήκος ενός πλαισίου 7,5m σε αντισταθμίσεις έως μέχρι 560mm έτσι ώστε κανένας τροχός να μην ακολουθεί την ίδια διαδρομή. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι ο προφίλογράφος τύπου Rainhart χρησιμοποιεί δώδεκα τροχούς διατεταγμένους σε τέσσερις ομάδες των τριών (Looft *et al.*, 2007). Κατά συνέπεια, η συσκευή Rainhart δημιουργεί τα δεδομένα από όλο το μήκος της μονάδας και σε πλάτος 1.118 mm, ενώ η πηγή των δεδομένων για τον τύπο της California είναι εγκατεστημένη κοντά στο τέλος της δέσμης 7,6m (Smith and Ram, 2016). Αυτοί οι δύο τύποι φαίνονται στην Εικόνα 2.9:



Εικόνα 2.9. Σκίτσα του California Profilograph και του Rainhart Profile (Looft *et al.*, 2007)

Υπάρχουν πολλά προβλήματα με αυτήν τη μέθοδο προσδιορισμού της ομαλότητας του οδοστρώματος. Ένα πρόβλημα είναι ότι η συσκευή είναι αρκετά μεγάλη. Έχει μήκος 25 ft (7,6m) με αποτέλεσμα να ελίσσεται δύσκολα. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι δεν είναι πρακτική για μεγάλες εκτάσεις δρόμων, αφού είναι χειροκίνητη και συνεπώς μόνο ένα μικρό τμήμα δρόμου μπορεί να αναλυθεί κάθε φορά (Looft *et al.*, 2007).

2.2.4 Ελαφρά προφιλόμετρα

Τα ελαφρά προφιλόμετρα χρησιμοποιούν τις ίδιες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα υψηλής ταχύτητας, αλλά σε ένα μικρότερο, ελαφρύ όχημα, καθιστώντας τα ιδανικά για δοκιμή νέας κατασκευής δύσκαμπτου οδοστρώματος από σκυρόδεμα, που δεν έχει ακόμη επιτύχει αρκετή δύναμη για την υποστήριξη της τακτικής φόρτωσης κυκλοφορίας (Smith and Ram, 2016). Ο όρος ελαφρύ προφιλόμετρο χρησιμοποιείται για αναφορά σε συσκευές στις οποίες το σύστημα καταγραφής της ομαλότητας έχει εγκαταθεί σε ένα ελαφρύ όχημα, όπως ένα όχημα γκολφ ή ένα όχημα παντός εδάφους. Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα αυτά είναι αρκετά δημοφιλή, με πολλούς εργολάβους κρατικών αυτοκινητοδρόμων να επενδύουν σε αυτά (Perera and Kohn, 2002). Στην Εικόνα 2.10 απεικονίζεται ένα ελαφρύ προφιλόμετρο.



Εικόνα 2.10. Lightweight Profiler (<https://amesengineering.com/resources/inertial-road-profilers-faq/>)

Τα προφίλ που καταγράφονται από αυτές τις συσκευές μπορούν να συμβάλλουν στη δημιουργία ενός δείκτη ομαλότητας όπως είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητα (International Roughness Index, IRI), είτε με βάση τα δεδομένα αυτά να δημιουργήσουν μία προσομοίωση

ενός προφίλ από την οποία θα ληφθεί ο δείκτης προφίλ (Profile Index, PI). Οι κύριοι πωλητές ελαφρών προφιλόμετρων είναι οι Ames Engineering (Βλ. Εικόνα 2.10), International Cybernetics Corporation και K. J. Law Engineers (Perera and Kohn, 2002).

2.2.5 Χειροκίνητες συσκευές

Μία ποικιλία μη αυτόματου εξοπλισμού διατίθεται για την αποτύπωση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων. Ο συγκεκριμένος εξοπλισμός μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις παρακάτω ομάδες: στην τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων Road and Level Method, στη συσκευή Dipstick (βλ. Εικόνα 2.11) και στη συσκευή Walking Profiler (βλ. Εικόνα 2.12) (Λοΐζος και Πλατή, 2018).



Εικόνα 2.11. Συσκευή Dipstick (<https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/roughness/>)



Εικόνα 2.12. Συσκευή Walking Profiler (<https://arrbsystemssa.com/walking-profiler-g3.html>)

Η κύρια εφαρμογή αυτών των συσκευών στις μετρήσεις προφίλ δρόμου είναι να ληφθούν οι υψομετρικές μετρήσεις σε τμήματα βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ακρίβειας των προφίλ. Το προφίλ ενός τμήματος δοκιμής που λαμβάνεται από αυτές τις συσκευές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό ενός δείκτη ομαλότητας όπως ο IRI. Ο προαναφερθής δείκτης ομαλότητας μπορεί να συγκριθεί με τον αντίστοιχο δείκτη ομαλότητας που υπολογίστηκε από ένα αδρανειακό profiler έτσι ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια της μέτρησης. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η συλλογή έγκυρων δεδομένων (Perera and Kohn, 2002)

2.2.6 Νέες τεχνολογίες

Με το πέρασμα του χρόνου, παρουσιάστηκε η ανάγκη διερεύνησης νέων και καινοτόμων τρόπων χρήσης δεδομένων προφίλ στην ανάλυση και στη διαχείριση ενός οδοστρώματος, στην αποδοχή της κατασκευής, καθώς και στο σχηματισμό μιας σαφούς σχέσης μεταξύ των παραμέτρων του προφίλ ενός οδοστρώματος και των επιδόσεων ενός οδοστρώματος. Έτσι, επιτεύχθηκε σημαντική ανάπτυξη των τεχνολογιών και των αναλυτικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ομαλότητας των οδοστρωμάτων με πιο εύκολο και πιο ακριβή τρόπο (Perera and Kohn, 2002).

Μία τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο συνδυασμός των συστημάτων καταγραφής ομαλότητας με συστήματα όπως η μονάδα ραντάρ διείσδυσης εδάφους (Ground Penetrating Radar), οι σαρωτές λέιζερ (Laser Scanners) και πολλών αισθητήρων στο ίδιο όχημα (παλιών και νέων τεχνολογιών). Ένα τέτοιο μοντέλο οχήματος αναπτύχθηκε από την εταιρεία Roadscanners (www.roadscanners.com) και ονομάζεται Road Doctor Survey Van System.

Επιπλέον, η συλλογή δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη βοήθεια κινητού τηλεφώνου (smartphone).

➤ Road Doctor Survey Van (RDSV)

Αυτή η μονάδα συλλέγει όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για την ανάλυση της κατάστασης του οδοστρώματος. Το σύστημα RDSV ακολουθεί την ιδέα ενός σύγχρονου αισθητήρα σύντηξης με πολλούς αισθητήρες που μετρούν διάφορες παραμέτρους (Βλ. Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13. Road Doctor Survey Van System (<https://www.roadscanners.com/products/road-clinic-rdsv/full-rdsv-system-road-data-collection/>)

Το σύστημα RDSV αποτελείται από 1) Μονάδα ραντάρ διείσδυσης εδάφους (GPR) εξοπλισμένη με κεραία «κόρνας» συζευγμένη με αέρα με συχνότητα 2 GHz για έρευνα της διηλεκτρικής τιμής της ασφάλτου και γειωμένη κεραία 400 MHz για μελέτη της στρώσης βάσης 2) Road Doctor CamLink σύστημα συλλογής ψηφιακών δεδομένων βίντεο κατά τη διάρκεια της έρευνας. 3) Επιταχυνσιόμετρο 3D τοποθετημένο στον πίσω άξονα του οχήματος χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ομαλότητας οδοστρώματος, των τιμών πτώσης και IRI και 4) έναν 2D σαρωτή λέιζερ που τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του οχήματος και κατέστησε δυνατή τη μέτρηση του επιφανειακού σχήματος, του βάθους αυλακιού και του βάθους τάφρου (Pitoňák and Filipovsky, 2016).

➤ Smartphone

Λόγω της «ανωμαλίας» ενός προφίλ οδοστρώματος δημιουργούνται κάθετες επιταχύνσεις στα κινούμενα οχήματα. Ο βαθμός της κάθετης επιτάχυνσης εξαρτάται από την ένταση και την έκταση του οδοστρώματος, άλλων ανωμαλιών στην επιφάνεια, από την ανάρτηση και την ταχύτητα του οχήματος. Ένα κινητό τηλέφωνο με επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή δεδομένων κάθετης επιτάχυνσης του οχήματος, όπως αναγράφεται σε μελέτες όπως αυτές που διεξήχθησαν στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης για την αναγνώριση τοπικών ελαττωμάτων οδοστρώματος. Αναπτύχθηκε μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου που βασίζεται σε Android, η οποία μπορεί να καταγράψει επιτάχυνση για τον χαρακτηρισμό της ομαλότητας οδοστρώματος και της δυσφορίας του. Η Εικόνα 2.14 δείχνει δεδομένα κάθετης επιτάχυνσης οχήματος που αποκτήθηκαν από την Roughness Capture, μια εφαρμογή smartphone με βάση το Android που δημιουργήθηκε από την Applied Research Associates στο Champaign του Ιλινόις και επικυρώθηκε από ερευνητές του Πανεπιστημίου του Ιλινόις μέσω ενός έργου που χρηματοδοτήθηκε από το Κέντρο Μεταφορών του Πανεπιστημίου NexTrans.



Εικόνα 2.14. Σύστημα Roughness Capture που βασίζεται σε smartphone: (a) εφαρμογή κινητού τηλεφώνου που καταγράφει κάθετη επιτάχυνση, (b) Roughness Capture interface και (c) καταγραφή δεδομένων επιτάχυνσης (Islam *et al.*, 2014)

Τα μοντέρνα smartphone διαθέτουν μια σειρά αισθητήρων, όπως επιταχυνσιόμετρα πολλαπλών αξόνων, αισθητήρες θερμοκρασίας, γυροσκόπια, αισθητήρες έντασης φωτός και αισθητήρες μαγνητικού πεδίου. Το πρόγραμμα Roughness Capture συγκεντρώνει

επιτάχυνση σε τρεις ορθογώνιες κατευθύνσεις, μία χρονική σήμανση και συντεταγμένες GPS και τις αποθηκεύει σε μορφή κειμένου ASCII. Ο ρυθμός συλλογής δεδομένων καθορίζεται από τον χρήστη και γενικά κυμαίνεται από 10 έως 100 δείγματα ανά δευτερόλεπτο, αλλά είναι δυνατοί υψηλότεροι ρυθμοί δειγματοληψίας ανάλογα με το υλικό του smartphone. Γενικά, όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό συλλογής δεδομένων, τόσο καλύτερη είναι η ακρίβεια του προβλεπόμενου προφίλ πεζοδρομίου (με χαμηλότερες αποδόσεις σε πολύ υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας) (Islam *et al.*, 2014).

Η χρήση Smartphone για την καταγραφή της ομαλότητας ενός οδοστρώματος αποτελεί έναν οικονομικό και γρήγορο τρόπο για άμεσα αποτελέσματα. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν είναι τόσο αξιόπιστη όσο η μέθοδος συνδυασμού αισθητήρων. Για το λόγο αυτό όταν χρειάζεται να παρθεί η τελική απόφαση όσον αφορά την επέμβαση ή όχι στο οδόστρωμα συνιστάται η αξιολόγησή του να γίνει με τη μέθοδο όπου συνδυάζονται διάφοροι αισθητήρες.

2.3 Δείκτες ομαλότητας

2.3.1 International Roughness Index (IRI)

Η ομαλότητα ενός οδοστρώματος μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση διάφορων δεικτών που προκύπτουν από την επεξεργασία και ανάλυση των σχετικών στοιχείων συλλογής. Ο ευρύτερα διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος δείκτης είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI, ο οποίος εκφράζεται σε μονάδες κλίσης (m/km) (Λοΐζος και Πλατή, 2018). Τα πλεονεκτήματα του δείκτη IRI σε σχέση με άλλους δείκτες ομαλότητας είναι:

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

Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας (IRI) είναι μια κλίμακα ομαλότητας βασισμένη στην απόκριση ενός γενικού μηχανοκίνητου οχήματος στην ομαλότητα της επιφάνειας του

δρόμου. Η πραγματική του τιμή καθορίζεται λαμβάνοντας μια κατάλληλα ακριβή μέτρηση του προφίλ του δρόμου, την οποία επεξεργάζεται μέσω ενός αλγορίθμου που προσομοιώνει τον τρόπο με τον οποίο ένα όχημα αναφοράς θα ανταποκρίνεται στην επίδραση της κακής ομαλότητας και συσσωρεύοντας τη διαδρομή αναστολής (Gillespie, 1992).

Ο ορισμός IRI περιγράφει μία μέθοδο για τον υπολογισμό του δείκτη ομαλότητας για ένα μόνο διάμηκες «προφίλ» οδοστρώματος, αυθαίρετου μήκους. Η ακρίβεια και η συνάφειά του περιορίζονται από την ποιότητα της μέτρησης του «προφίλ», η οποία εξαρτάται από (α) το σχεδιασμό και την ποιότητα του εξοπλισμού και (β) τη μεθοδολογία και την προσοχή που δόθηκε για τη μέτρηση (Sayers, 1995).

Τα ακόλουθα σημεία ορίζουν πλήρως την έννοια IRI:

1. Το IRI υπολογίζεται από ένα μόνο διάμηκες προφίλ. Το διάστημα δείγματος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 300 mm για ακριβείς υπολογισμούς. Η απαιτούμενη ανάλυση εξαρτάται από το επίπεδο ομαλότητας, με την καλύτερη ανάλυση να απαιτείται για ομαλούς δρόμους. Μία ανάλυση των 0,5 mm είναι κατάλληλη για όλες τις συνθήκες.

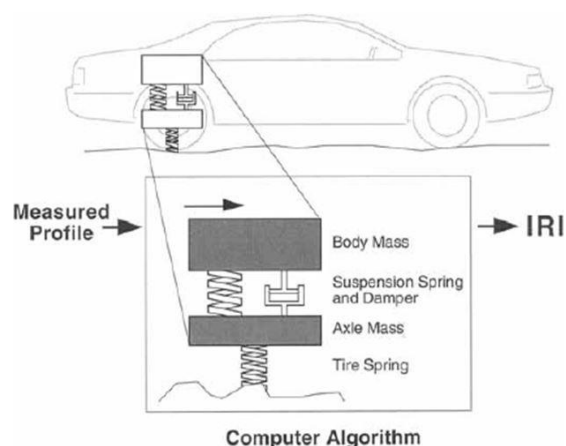
2. Το «προφίλ» θεωρείται ότι έχει σταθερή κλίση μεταξύ των υψομετρικών αποκλίσεων του δείγματος.

3. Το «προφίλ» εξομαλύνεται με κινούμενο μέσο όρο του οποίου το μήκος βάσης είναι 250 mm.

4. Το εξομαλυμένο προφίλ φιλτράρεται χρησιμοποιώντας προσομοίωση «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» με συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων (Golden Car), με ταχύτητα προσομοίωσης 80 km / hr (49,7 mph).

5. Η προσομοιωμένη κίνηση ανάρτησης συσσωρεύεται γραμμικά και διαιρείται με το μήκος του προφίλ για απόδοση IRI. Έτσι, το IRI έχει μονάδες κλίσης, όπως ίντσες ανά μίλι ή μέτρα ανά χιλιόμετρο (Sayers, 1995).

Για τον υπολογισμό του IRI χρησιμοποιείται το θεωρητικό προσομοίωμα του «ενός τετάρτου του οχήματος» (Quarter-car model) (βλ. [Εικόνα 2.17](#)).



Εικόνα 2.15. Διάταξη προσομοιώματος υπολογισμού του IRI
(https://epg.modot.org/index.php/Category:610_Pavement_Smoothness)

Σε κάθε θέση τροχού το όχημα συμπεριφέρεται ως μάζα ελατηρίου που κάθεται σε ανάρτηση με ακαμψία και απόσβεση, η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τη μάζα του άξονα δηλαδή του τροχού, των φρένων και των εξαρτημάτων ανάρτησης. Ο τροχός έρχεται σε επαφή με το δρόμο με το ελαστικό που λειτουργεί σαν ελατήριο. Από την επαφή αυτή λυγίζει το ελαστικό και πιέζεται η ανάρτηση με αποτέλεσμα να προκαλείται δόνηση στις μάζες ελατηρίου και αναρρόφησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Εάν για την ομαλότητα θεωρηθούν οι υψομετρικές αποκλίσεις (είσοδοι μετατόπισης), η κλίση(είσοδος ταχύτητας) ή η αλλαγή κλίσης (είσοδος επιτάχυνσης) το τέταρτο αυτοκίνητο ανταποκρίνεται με ένα καθορισμένο τρόπο. Η απόκριση μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με ένα σχετικά απλό σύνολο δυναμικών εξισώσεων γνωστό ως προσομοίωση τέταρτου αυτοκινήτου. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες (αντιστοιχεί σε μεγάλα μήκη κύματος στο δρόμο) η απόκριση ανάρτησης είναι μηδέν επειδή ο τροχός και ο σκελετός του οχήματος κινούνται πάνω-κάτω μαζί.

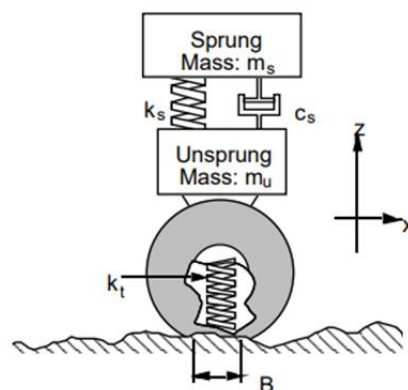
Η απόκριση διατηρείται μέσω των συχνοτήτων κοντά στο 10 Hertz όπου συμβαίνει ο συντονισμός του άξονα. Πάνω από τη συχνότητα συντονισμού του άξονα η απόκριση μειώνεται στο μηδέν καθώς οι προσκρούσεις του δρόμου απλώς εκτρέπουν το ελαστικό χωρίς παραγωγή σημαντικού κτυπήματος στην ανάρτηση (Gillespie, 1992).

Αναλυτικότερα, το προσομοίωμα του ενός τετάρτου του οχήματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη IRI αποτελείται από:

- 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 ίδιας της ανάρτησης.
- Τη μάζα του άξονα (Unsprung mass) (m_u), η οποία αφορά στη μάζα 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 .
- Την απόσβεση c_s .
- Το ελαστικό, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται κι αυτό σαν ελατήριο με σταθερά k_t .

Οι παραπάνω παράμετροι λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές στη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη IRI. Το σύνολο των τιμών αυτών αποτελούν το «χρυσό όχημα» (Golden Car). Για την προσομοίωση της κίνησης του οχήματος η ταχύτητα θεωρείται σταθερή και ίση με 80km/h (Λοΐζος και Πλατή, 2018).

Το μοντέλο αυτό είναι μαθηματικό και ορίζεται από διαφορικές εξισώσεις που συσχετίζουν κινήσεις ενός προσομοιωμένου οχήματος τετάρτου αυτοκινήτου, με παραμέτρους προφίλ δρόμου. Η Εικόνα 2.18 δείχνει ένα μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου, το οποίο περιλαμβάνει τα σημαντικά δυναμικά εφέ που καθορίζουν πώς η τραχύτητα προκαλεί δονήσεις στο αμάξωμα του αυτοκινήτου (Sayers and Karamihas, 1996).



Εικόνα 2.16. Μοντέλο Τετάρτου Οχήματος (Sayers and Karamihas, 1996)

Το σύστημα περιγράφεται από τέσσερις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης που μπορεί να είναι γραμμένο σε μορφή μητρώου:

$$\dot{x} = A x + B h_{ps} \quad (2.3)$$

όπου x είναι ένας πίνακας μεταβλητών κατάστασης (μεταβλητές που μαζί περιγράφουν πλήρως την κατάσταση του προσομοιωμένου συστήματος) και οι συστοιχίες A και B έχουν συντελεστές στις εξισώσεις:

$$x = [z_s, z_s, z_u, z_u]^T \quad (2.4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1+k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$B = [0, 0, 0, k_1/\mu]^T \quad (2.6)$$

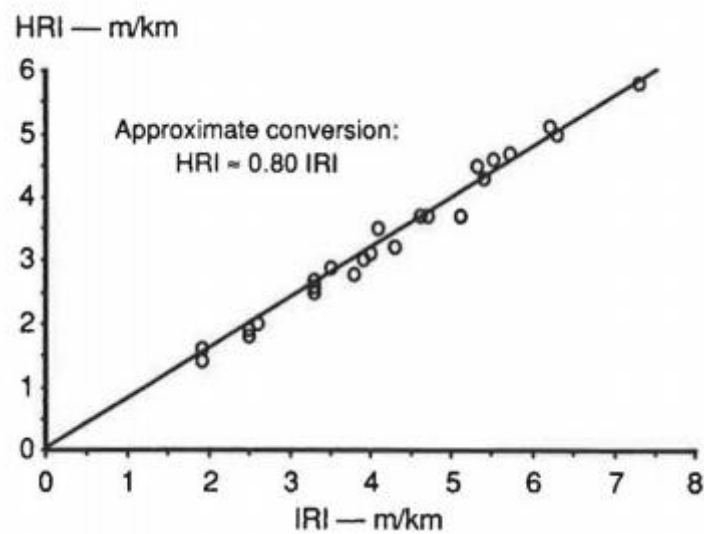
Οι σταθερές και οι μεταβλητές ορίζονται ως εξής:

- s = ρυθμός απόσβεσης ανάρτησης
- h_{ps} = ομαλή ανύψωση προφίλ
- k_s = ρυθμός ελατηρίου ανάρτησης
- k_t = ρυθμός ελατηρίου ελαστικού
- m_s = μάζα ελατηρίου (τμήμα μάζας αμαξώματος αυτοκινήτου που υποστηρίζεται από έναν τροχό)
- m_u = μη αναρτημένη μάζα (μάζα τροχού, ελαστικού και μισού άξονα/ανάρτησης)
- z_s = ύψος (κατακόρυφη συντεταγμένη) μάζας ελατηρίου
- z_u = ύψος (κατακόρυφη συντεταγμένη) της μη αναρτημένης μάζας $c = c_s / m_s$

- $k_1 = k_t / m_s$
- $k_2 = k_s / m_s$
- $\mu = \mu_m / m_s$

2.3.2 Half-Car Roughness Index (HRI)

Υπάρχει μία μέθοδος υπολογισμού της ομαλότητας παρεμφερή με το προσομοίωμα του ενός «τετάρτου οχήματος». Σύμφωνα με αυτή η ομαλότητα υπολογίζεται από τη χρήση και των δύο προφίλ του δρόμου ως εισόδους στην ίδια συσκευή. Από αυτή προκύπτει μια στατιστική επισκόπηση που είναι ανάλογη με ένα μοντέλο «μισού αυτοκινήτου» και παρέχει μια μέτρηση ομαλότητας που ονομάζεται δείκτης ομαλότητας μισού οχήματος (HRI). Οι δύο αναλυτικές προσεγγίσεις, του «τετάρτου οχήματος» και του «μισού οχήματος» είναι τόσο κοντά στην πράξη που πολλοί επαγγελματίες δεν γνωρίζουν τη διαφορά ανάμεσά τους (Sayers, 1989), (βλ. [Εικόνα 2.19](#)).



Εικόνα 2.17. Συσχέτιση HRI-IRI (M. W. Sayers, 1989)

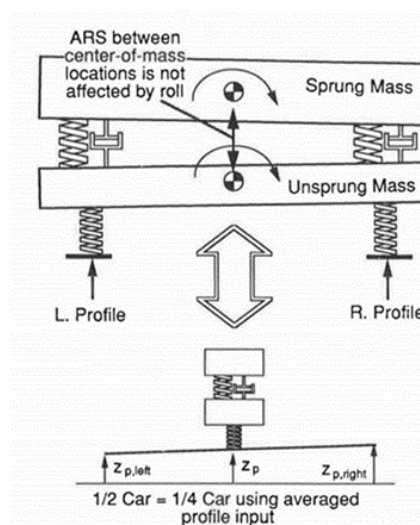
Ένα μοντέλο «μισού αυτοκινήτου» είναι ένα μαθηματικό μοντέλο για ένα σώμα και έναν άξονα με δύο τροχούς ενός οχήματος. Συγκεκριμένα, αυτή η έρευνα παράγει τη μέση διορθωμένη κλίση (Average Rectified Slope, ARS) με τη βοήθεια του «μισού αυτοκινήτου» χρησιμοποιώντας ως τιμές τις παραμέτρους από το «χρυσό όχημα» (βλ. [Κεφ 2.3.1](#)) και ταχύτητα προσομοίωσης 49,7 mi/h (80,0 km/h) (Michael W. Sayers, 1989). Ο δείκτης ομαλότητας είναι το ARS όπως ορίζεται στην εξίσωση :

$$ARS = \frac{1}{L} \int_0^T |z_{\dot{u}} - z_{\dot{s}}| dt \quad (2.7)$$

Όπου:

- ARS= μέση διορθωμένη κλίση,
- T= χρόνος (διάρκεια της δοκιμής),
- L= διάρκεια δοκιμής,
- $z_{\dot{u}}$ = κατακόρυφη ταχύτητα της μη αναρτημένης μάζας (άξονας)
- $z_{\dot{s}}$ = κατακόρυφη ταχύτητα της μάζας ελατηρίου (αμάξωμα οχήματος)

Στην [Εικόνα 2.18](#) φαίνεται ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο οχήματος το οποίο λαμβάνονται δεδομένα και από την αριστερή και από τη δεξιά πλευρά του οχήματος.

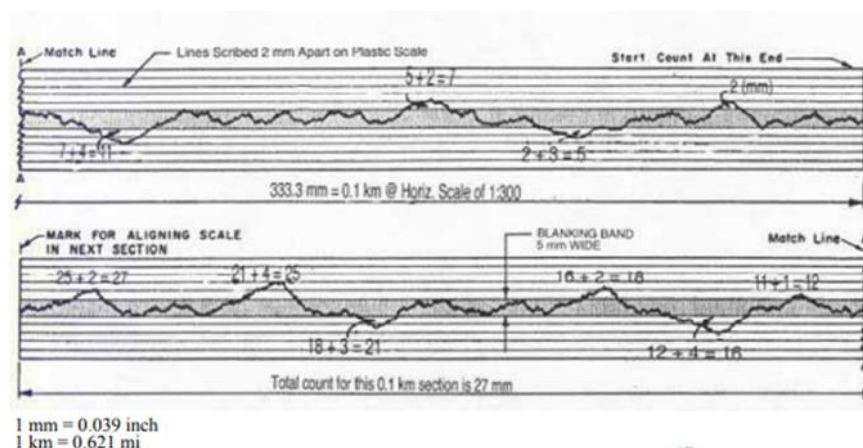


Εικόνα 2.18. Μοντέλο «μισού αυτοκινήτου» (Sayers, 1989)

2.3.3 Profile Index (PI)

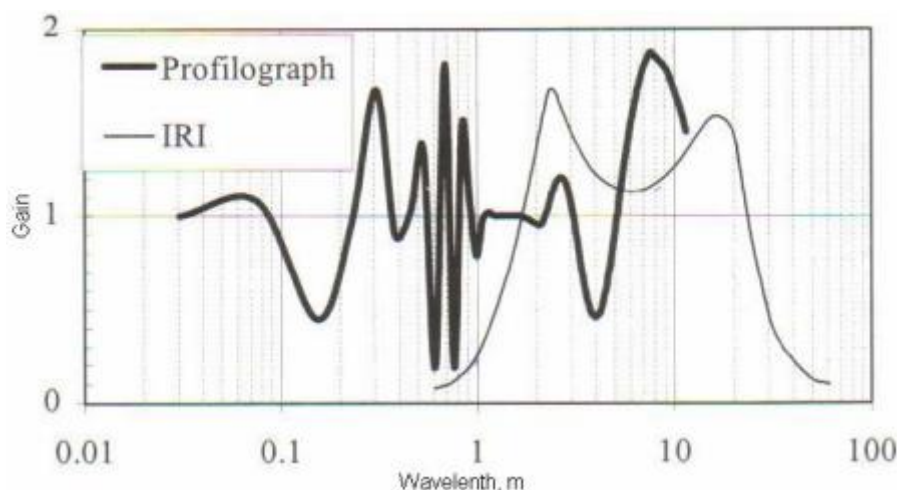
Οι προφίλογράφοι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον υπολογισμό της ομαλότητας των νέων οδοστρωμάτων. Ο προφίλογράφος δίνει ένα ίχνος του προφίλ οδοστρώματος, που περιορίζεται προκειμένου να ληφθεί μια παράμετρος που ονομάζεται δείκτης προφίλ (PI). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ομαλότητας του οδοστρώματος (R. Perera & Kohn, 2002). Δεν υπάρχει γενικός κανόνας για τον περιορισμό των ιχνών του προφίλογράφου, αφού κάθε πολιτεία των ΗΠΑ έχει τις δικές της διαδικασίες για τον καθορισμό του PI. Επομένως, δεν είναι δυνατή η σύγκριση των τιμών PI μεταξύ πολιτειών, αφού δεν θα έχει κάποιο νόημα (R. W. Perera et al., 2005).

Η Καλιφόρνια έχει μεγάλη εμπειρία στη χρήση προφίλογράφων και χρησιμοποιεί τη μέθοδο δοκιμής California 526 για τη μείωση των ιχνών (<https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/californiatestmethods-ctm/ctm-526-apr2002a11y.pdf>). Ένα πρόγραμμα υπολογιστή εκτελεί τις διαδικασίες για τη μείωση των ιχνών των προφίλογράφων και για τη λήψη PI, για ηλεκτρονικούς προφίλογράφους και για τη σάρωση δεδομένων από μηχανικό προφίλογράφο. Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη προφίλ (PI) επιτυγχάνεται με την αποτύπωση του ίχνους και τον καθορισμό της θέσης κενής ζώνης (Perera, Kohn and Tayabji, 2005). Η Εικόνα 2.19 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ιχνους προφίλογράφου και πώς υπολογίζεται το PI (Perera, Kohn and Tayabji, 2005).



Εικόνα 2.19. Προσδιορισμός PI από ένα ίχνος προφίλογράφου (Perera, Kohn and Tayabji, 2005)

Το άθροισμα των καταγεγραμμένων υψών σε ένα δεδομένο τμήμα θα είναι το PI για αυτό το τμήμα. Το PI εκφράζεται σε χιλιοστά ανά χιλιόμετρο (mm / km) ή ίντσες ανά μίλι (ίντσες / μίλι). Στην Εικόνα 2.20 αποτυπώνεται η συσχέτιση του δείκτη IRI με το δείκτη PI.



Εικόνα 2.20. Απόκριση των PI και IRI στο μήκος κύματος (Huang, 2006)

Μολονότι οι δείκτες PI και IRI υπολογίζονται για διαφορετικά μήκη κύματος, στην Εικόνα 2.20 φαίνεται ότι και οι δύο επηρεάζουν τα μήκη κύματος από 2 έως 10 m και συγκεκριμένα τα ενισχύουν. Έτσι, παρατηρείται ότι υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ αυτών των δεικτών. Επίσης, έρευνες έχουν δείξει ότι υπάρχει μια σχετικά καλή στατιστική σχέση μεταξύ τους (Huang, 2006).

2.3.4 Ride Number (RN)

Για δεκαετίες, οι μηχανικοί του οδικού δικτύου έδειχναν ενδιαφέρον για τις απόψεις των ταξιδιωτών σχετικά με την ομαλότητα των αυτοκινητοδρόμων. Ο δείκτης RN εκφράζει την ποιότητα κύλισης του οδοστρώματος, όπως αυτή ορίζεται από τους χρήστες του, πράγμα που την καθιστά μία υποκειμενική αξιολόγηση. Οι μετρήσεις του διαμήκους προφίλ που συλλέγονται με ένα προφίλογράφο υποβάλλονται σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα υπολογιστή για τη λήψη του αριθμού Ride (RN), ο οποίος αντιστοιχεί σε μια μέση βαθμολογία του πίνακα αξιολόγησης (Perera and Kohn, 2002).

Για το RN χρησιμοποιείται κλίμακα από 0 έως 5. Στον Πίνακα 2.1 οι τιμές της κλίμακας που αντιστοιχούν σε κάθε ποιότητα ομαλότητας οδοστρώματος.

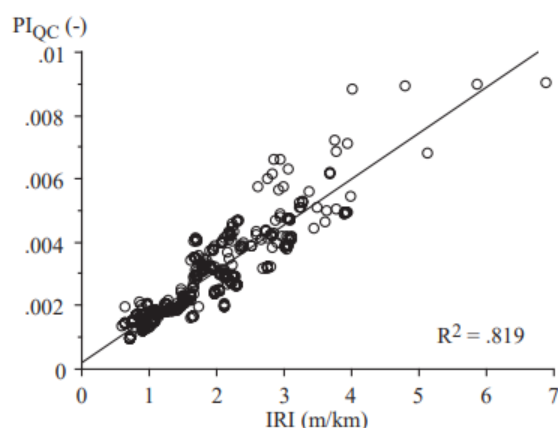
Πίνακας 2.1. Κλίμακα διαβάθμισης RN

Κατάσταση	Αριθμός Ride
Τέλεια	5
Πολύ Καλή	4.5
	4
Καλή	3.5
	3
Μέτρια	2.5
	2
Κακή	1.5
	1
Πολύ Κακή	0.5
Χείριστη	0

Το RN έχει συσχετιστεί μη γραμμικά με το δείκτη προφίλ (PI), που υπολογίζεται από τα δεδομένα προφίλ, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο PI που λαμβάνεται από τον προφίλογράφο δεν έχει καμία ομοιότητα με το PI που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του RN οδοστρώματος. Ο PI κυμαίνεται από 0 (ένα απόλυτα ομαλό προφίλ) έως μια θετική τιμή που είναι ανάλογη με την ομαλότητα, οπότε μετατρέπεται σε κλίμακα από 5 (απόλυτα ομαλή) σε 0 (η χειρότερη ομαλότητα) (Perera & Kohn, 2002). Το RN ορίζεται ως ο εκθετικός μετασχηματισμός του PI σύμφωνα με την εξίσωση:

$$RN = 5e^{(-160PI)} \quad (2.8)$$

Η δομή του προφίλ δρόμου που επηρεάζει το RN είναι διαφορετική από τη δομή που επηρεάζει το IRI (R. Perera & Kohn, 2002). Στην Εικόνα 2.21 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ του IRI και του PI, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του RN (Sayers and Karamihas, 1998).



Εικόνα 2.21. Συσχέτιση IRI με PI (με το οποίο υπολογίζεται το RN) (Sayers and Karamihas, 1998)

Το IRI και το RN δεν θα συσχετίζονται πάντα με τον ίδιο τρόπο, ούτε θα έχουν το ίδιο νόημα. Έτσι, κάθε ένα από αυτά προσφέρει διαφορετικές πληροφορίες σχετικά με την ομαλότητα του οδοστρώματος. Δεν είναι δυνατόν ο προσδιορισμός του μέσου όρου των τιμών RN για τα γειτονικά μέρη του προφίλ. Για παράδειγμα, εάν ένα μίλι έχει τιμή $RN=3$ και το επόμενο έχει $RN=4$, το τμήμα RN δύο μιλίων δεν είναι 3,5, αλλά 3,37 (Perera and Kohn, 2002).

2.3.5 Ανακεφαλαίωση

Γενικά, τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τα διάφορα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας συνοψίζονται σε δείκτες οι οποίοι εκφράζουν τις διάφορες τιμές υψομετρικών αποκλίσεων με μία μόνο τιμή (Perera and Kohn, 2002). Στον Πίνακα 2.2 αναγράφονται οι σημαντικότεροι δείκτες ομαλότητας, οι οποίοι αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 2.2. Δείκτες ομαλότητας IRI, HRI, PI και RN (Sayers, Gillespie and Queiroz, 1986)

Δείκτης	Αρχές	Περιγραφή
IRI	Προσομοίωση τετάρτου-αυτοκινήτου	Μαθηματικό μοντέλο που συνοψίζει τα επίπεδα ομαλότητας που επηρεάζουν την απόκριση του οχήματος με βάση το ένα τέταρτο του οχήματος, με τυποποιημένες τιμές «golden car» με τυπική ταχύτητα προσομοίωσης 80km/h.
HRI	Προσομοίωση μισού-αυτοκινήτου	Μαθηματικό μοντέλο που συνοψίζει τα επίπεδα ομαλότητας που επηρεάζουν την απόκριση του οχήματος με βάση το μισό του οχήματος, που λειτουργεί παρόμοια με αυτό του τετάρτου οχήματος.

PI	Προσομοίωση προφίλογράφου	Δείκτης ομαλότητας που υπολογίζεται από ένα ίχνος προφίλογράφου.
RN	Εκτίμηση άνεσης οδήγησης	Δείκτης ομαλότητας που υπολογίζεται με βάση τη βαθμολογία χρηστών σε κλίμακα 0-5.

Διαπιστώθηκε ότι οι δείκτες IRI και HRI παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ τους, ενώ ο δείκτης PI χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δείκτη RN. Επίσης, ο δείκτης IRI προσφέρει διαφορετικές πληροφορίες για το οδόστρωμα από ότι ο δείκτης RN. Έτσι ορισμένες φορές είναι απαραίτητοι και οι δύο για να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με τις συνθήκες του εκάστοτε οδοστρώματος. Ωστόσο, επικρατεί έντονη διαφωνία μεταξύ των κατασκευαστών των οδοστρωμάτων και των ερευνητών όσον αφορά το γεγονός ότι οι δείκτες συσχετίζουν με ακρίβεια το προφίλ του οδοστρώματος με την άνεση του οδηγού, την επίδραση που μπορεί να έχει το φορτίο στο οδόστρωμα, καθώς και το λειτουργικό κόστος του οχήματος (Perera and Kohn, 2002).

Στον αντίποδα των ανωτέρων, η δυναμική φασματική ανάλυση (power spectral density) των κυματισμών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, έχει αποδειχθεί ότι δίνει σημαντικές πληροφορίες για την ομαλότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιείται για το χαρακτηρισμό του επιπέδου ομαλότητας, αλλά και για τη διερεύνηση των κυματισμών που παρουσιάζουν αυξημένα πλάτη και συνεπώς προκαλούν την απώλεια ομαλότητας σε ένα οδόστρωμα. Περαιτέρω περιγραφή της δυναμικής φασματικής ανάλυσης ακολουθεί στο Κεφάλαιο 3.

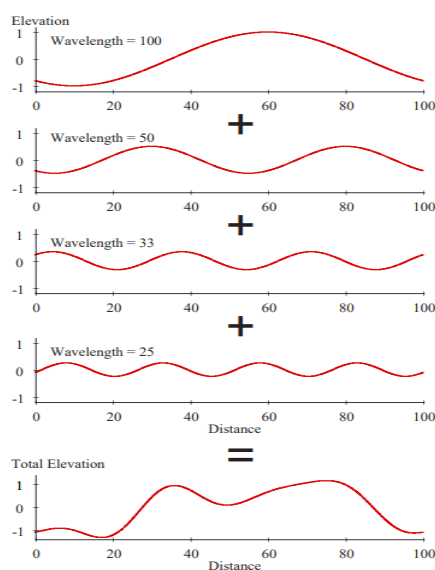
3. Δυναμική φασματική ανάλυση

3.1 Γενικά

Πέρα από τους διάφορους δείκτες που υπάρχουν, κάποιοι εκ των οποίων παρουσιάστηκαν παραπάνω, για τον προσδιορισμό της ομαλότητας μίας κατατομής της επιφάνειας (προφίλ) ενός οδοστρώματος, επιπλέον και τα μήκη κύματος, που περιέχονται σε ένα προφίλ οδοστρώματος, μπορούν να δώσουν κάποια εικόνα για την ομαλότητα. Για να πραγματοποιηθεί ανάλυση με μήκη κύματος χρησιμοποιούνται μέθοδοι που περιλαμβάνουν το μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform), το ψηφιακό φιλτράρισμα (χαμηλής διέλευσης ή υψηλής διέλευσης) και το μετασχηματισμό κύματος (Brown, Liu and Henning, 2010).

Συγκεκριμένα, το προφίλ ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει ένα φάσμα πολλών ημιτονοειδών κυμάτων. Η δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) είναι μια στατιστική αναπαράσταση της σημασίας των διαφόρων κυματισμών που απαρτίζουν το προφίλ (Wang, 2006).

Μαθηματικά, ένα αυθαίρετο προφίλ μπορεί να κατασκευαστεί από μια σειρά ημιτόνων με διαφορετικά μήκη κύματος, πλάτη και φάσεις. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.1 για μόλις τέσσερις ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Για να παρουσιαστούν με ευκρίνεια οι λεπτομέρειες στα μετρούμενα προφίλ, είναι απαραίτητο να προστεθούν πολλά περισσότερα ημίτονα με μικρότερα μήκη κύματος (Sayers and Karamihas, 1996).



Εικόνα 3.1. Σύνθεση αρμονικών κυματισμών (Sayers&Karamihas, 1996)

Από τη μία πλευρά, τα προφίλ του οδοστρώματος συνήθως δεν αποτελούνται από αναγνωρίσιμα ημίτονα. Από την άλλη, ένα αυθαίρετο σχήμα προφίλ μπορεί να κατασκευαστεί τεχνητά προσθέτοντας μαζί μια σειρά από ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Εάν ένα προφίλ ορίζεται με N ίσες αποστάσεις, τότε μπορεί να αποτυπωθεί μαθηματικά με $N/2$ ημίτονα. Επειδή υπάρχουν τόσα πολλά πρόσθετα ημίτονα, τα πλάτη τους δεν είναι μεγάλα. Ο μαθηματικός μετασχηματισμός Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των πλατών των ημιτόνων που θα μπορούσαν να προστεθούν μαζί για την κατασκευή του προφίλ. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να κλιμακωθεί έτσι ώστε να δείχνει τον τρόπο που κατανέμεται η διακύμανση του προφίλ σε αριθμούς κυμάτων που σχετίζονται με ημίτονα. Όταν κλιμακωθεί με αυτόν τον τρόπο, ο μετασχηματισμός ονομάζεται συνάρτηση PSD.

Η λέξη «δυναμική» στη δυναμική φασματική ανάλυση προέρχεται από την εφαρμογή της στα ηλεκτρονικά, όπου εφαρμόζεται για τις τάσεις. Η διακύμανση μιας τάσης είναι ανάλογη με την ισχύ σε μια αντίσταση, έτσι η ανάλυση PSD απεικονίζει την κατανομή της ηλεκτρικής ισχύος σε συχνότητα. Οι ίδιοι μαθηματικοί υπολογισμοί που αναπτύχθηκαν για τον χαρακτηρισμό των μεταβολών τάσης μπορούν να εφαρμοστούν για τα προφίλ οδοστρώματος. Δύο διαφορές μεταξύ της φασματικής ανάλυσης ενός προφίλ οδοστρώματος και τάσεων είναι: (1) η πρώτη έχει μονάδες υψομετρικών αποκλίσεων αντί μονάδες τάσεων και (2) η κατανομή γίνεται για αριθμό κυμάτων (cycle/m) αντί για συχνότητα (cycle/sec) (Sayers and Karamihis, 1996).

Το πλήρες φάσμα των διακυμάνσεων της ομαλότητας μπορεί να εκφραστεί με τη δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) ως συνάρτηση του αριθμού κύματος ή του μήκους κύματος (Brown, Liu and Henning, 2010). Συνήθως, αναφέρονται δύο μορφές ανάλυσης (PSD): η PSD υψομετρικών αποκλίσεων ή μετατόπισης και η PSD της κλίσης. Η ανάλυση PSD των διαμηκών προφίλ δρόμου έχει αποδειχθεί ότι βοηθάει στην απεικόνιση της κατανομής και της έκτασης των διαφόρων μηκών κύματος, που απαρτίζουν ένα προφίλ οδοστρώματος, και κατ' επέκταση στον προσδιορισμό του «τύπου» ομαλότητας για κάθε τμήμα του οδοστρώματος (Hassan, McManus and Evans, 1998).

3.2 Μετασχηματισμός Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή του προφίλ αναλύοντάς το σε σχέση με τη συχνότητα αντί με το χρόνο (απόσταση). Όταν το πλάτος είναι

κλιμακούμενο με τρόπο που δείχνει την κατανομή της ισχύος (διακύμανση) του προφίλ πάνω από τη συχνότητα, αυτή η μετατροπή ονομάζεται PSD. Μαθηματικά, η παράγωγος της ανάλυσης PSD για ένα σημείο συνεχούς χρονοσειράς εισάγεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.1 έως 3.4 (Wang, 2006).

Μετασχηματισμός Fourier:
$$X(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

Ενέργεια Σημείου:
$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |x(w)|^2 dw = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(f)|^2 df \quad (3.2)$$

Ισχύς:
$$P_{av} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |x_T(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |x_T(f)|^2 df = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|x_T(f)|^2}{2T} \right] df \quad (3.3)$$

(Σε περίπτωση που ο μέσος όρος του σημείου είναι μηδέν, η ισχύς ταυτίζεται με τη διακύμανση στη θέση αυτή)

PSD:
$$s_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|x_T(f)|^2}{2T} \quad (3.4)$$

Η συνάρτηση για την ανάλυση PSD ορίστηκε αρχικά ως ο μετασχηματισμός Fourier μιας άλλης στατιστικής συνάρτησης που ονομάζεται συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Αναπτύχθηκε για να χαρακτηρίσει τυχαία δεδομένα, όπως η ταχύτητα του ανέμου (M. Sayers & Karamihas, 1996).

Ο μετασχηματισμός Fourier της αυτοσυσχέτισης της ακολουθίας χρονοσειρών ($R_{tt}(t)$), φαίνεται στην Εξίσωση 3.5.

PSD:
$$s_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{tt}(t)e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.5)$$

Στην πραγματικότητα, το προφίλ θεωρείται στάσιμη στοχαστική διαδικασία και η απόσταση αντικατέστησε την ιδιότητα του χρόνου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί αλγόριθμοι για την εκτίμηση του PSD, όπως είναι ο Fast Fourier Transform (FFT) ή το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης (Newland, 1984).

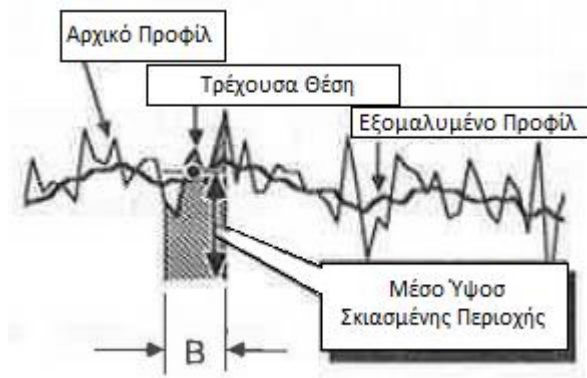
3.3 Φίλτρα ανάλυσης

Για την εύρεση της ομαλότητας ενός προφίλ οδοστρώματος χρησιμοποιούνται μαθηματικοί αλγόριθμοι οι οποίοι ακολουθούν το παρακάτω πρότυπο: α) μετασχηματισμό στο αρχικό προφίλ και β) υπολογισμό μέσου όρου μετασχηματισμένου προφίλ για να εκτιμηθεί η ομαλότητα. Από ένα μετασχηματισμένο προφίλ η ομαλότητα θα προκύψει από τα πιο εμφανή μήκη κύματος, για το λόγο αυτό πριν την εξαγωγή κάποιου αποτελέσματος, που αφορά την ομαλότητα, θα πρέπει να υποστεί φιλτράρισμα το δεδομένο προφίλ (Brown et al., 2010). Επειδή πολλές φορές τα υπερβολικά μεγάλα μήκη κύματος δεν αποτυπώνονται σωστά από τους αδρανειακούς προγραμματιστές χρησιμοποιούνται τα φίλτρα διέλευσης. Αυτά αφαιρούν λανθασμένες πληροφορίες έτσι ώστε να περάσει το έγκυρο μέρος του προφίλ. Σε περιπτώσεις όπου η γραφική παράσταση δεν έχει υποστεί φιλτράρισμα, υπάρχει πιθανότητα απόκρυψης μικρών αποκλίσεων, οι οποίες είναι βασικές για τον έλεγχο ενός προφίλ (Perera and Kohn, 2002).

Με το φιλτράρισμα θα απομακρυνθεί ο ανεπιθύμητος «θόρυβος», βελτιώνοντας την ποιότητα μέτρησης και λαμβάνοντας τις κατάλληλες πληροφορίες από το δεδομένο προφίλ. Τις περισσότερες φορές τα φίλτρα μετασχηματίζουν το προφίλ αφαιρώντας τα πολύ μικρά και πολύ μεγάλα μήκη κύματος, τα οποία οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα, και ενισχύει ορισμένα μήκη κύματος. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι (Brown, Liu and Henning, 2010):

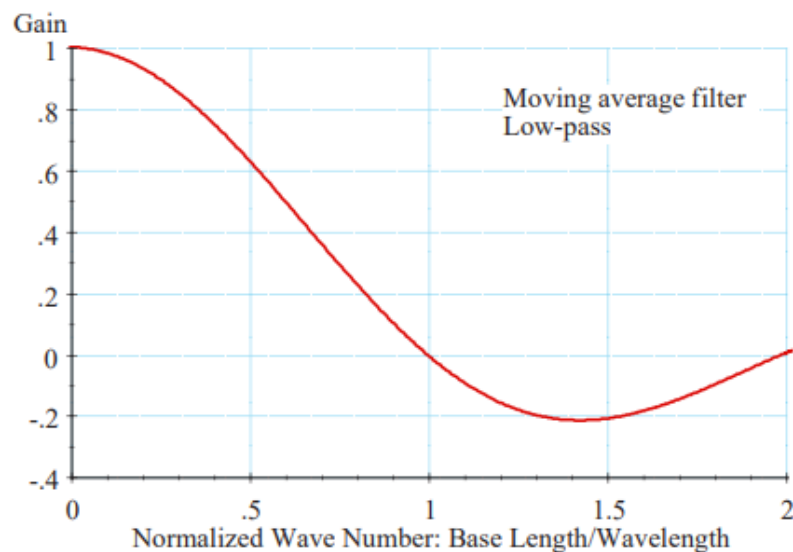
- κινούμενος μέσος όρος εξομάλυνσης (χαμηλής διέλευσης φίλτρο)
- κινούμενος μέσος όρος αφαίρεσης (υψηλής διέλευσης φίλτρο)
- προσομοίωση τετάρτου αυτοκινήτου (IRI)

Στην Εικόνα 3.2 φαίνονται τα αποτελέσματα ανάλυσης μέσα από ένα φίλτρο κινούμενου μέσου όρου.



Εικόνα 3.2. Διαδικασία φιλτραρίσματος με κινούμενο μέσο όρο εξομάλυνσης (Sayers and Karamihas, 1998)

Ο κινούμενος μέσος όρος είναι ένα απλό σχετικά φίλτρο, το οποίο αντικαθιστά κάθε σημείο προφίλ με το μέσο όρο πολλών παρακείμενων σημείων σε κάποιο μήκος βάσης (Sayers and Karamihas, 1996). Η Εικόνα 3.3 παρουσιάζει ένα διάγραμμα, ημιτονοειδής μορφής, που έχει υποστεί φιλτράρισμα χαμηλής διέλευσης.

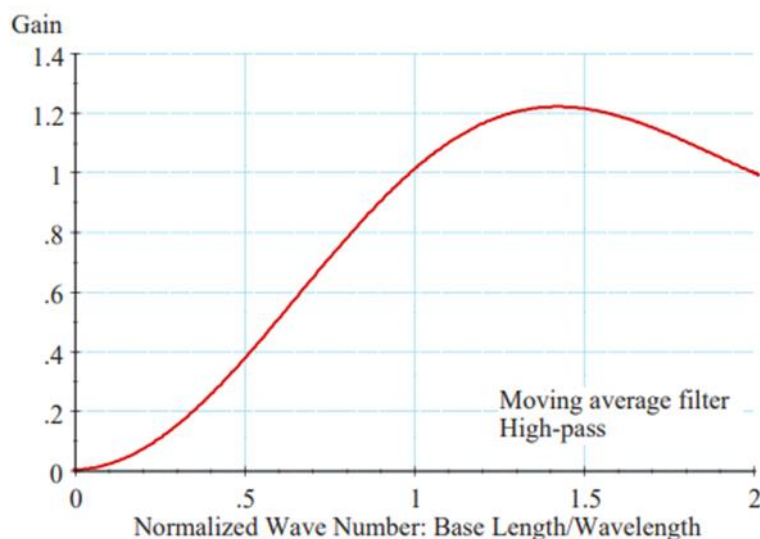


Εικόνα 3.3. Απόκριση αριθμού κύματος σε κινούμενο μέσο όρο εξομάλυνσης (Sayers and Karamihas, 1996)

Ειδικότερα, στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις λόγω κινούμενου μέσου όρου σε σχέση με το μήκος βάσης/μήκος κύματος. Πρέπει να αναφερθεί ότι όταν το μήκος κύματος είναι ίσο με το μήκος βάσης ή με κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους βάσης τότε το αποτέλεσμα είναι μηδέν. Το φίλτρο αυτό εξασθενεί τα σημεία της γραφικής

παράστασης με αριθμούς υψηλών κυμάτων (μικρά μήκη κύματος) (Sayers and Karamihas, 1996).

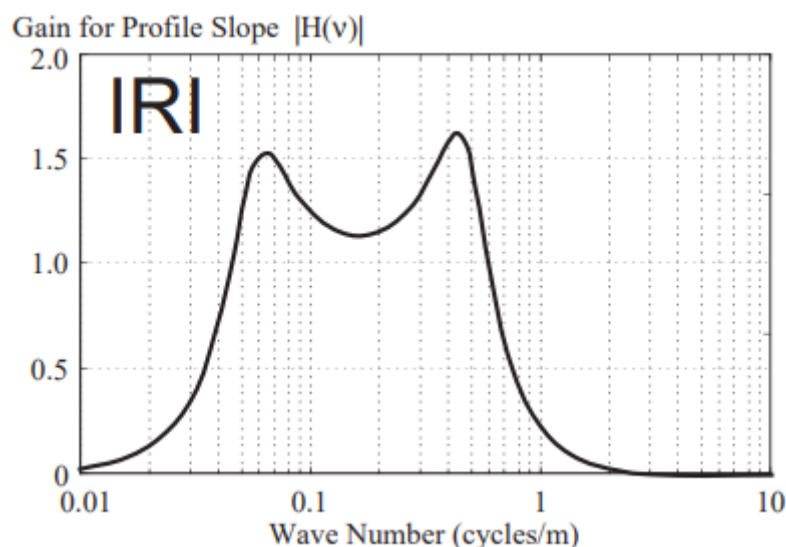
Στην Εικόνα 3.4 αποτυπώνεται το διάγραμμα έπειτα από φιλτράρισμα υψηλής διέλευσης.



Εικόνα 3.4. Απόκριση αριθμού κύματος σε κινούμενο μέσο όρο αφαίρεσης (Sayers and Karamihas, 1996)

Το ίδιο διάγραμμα μπορεί να προκύψει αν από το αρχική ημιτονοειδή συνάρτηση αφαιρέσουμε τη φιλτραρισμένη, με κινούμενο μέσο χαμηλού περάσματος. Αντίθετα, από το φίλτρο χαμηλής διέλευσης, το αντίστοιχο υψηλής διέλευσης αφαιρεί το εξομαλυνμένο προφίλ από το πρωτότυπο. Πιο συγκεκριμένα, εξασθενεί τα σημεία χαμηλού αριθμού κύματος (μεγάλα μήκη κύματος), ενώ αφήνει αμετάβλητα τα υψηλού αριθμού κύματος (Sayers and Karamihas, 1996).

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο δείκτης ομαλότητας IRI είναι ο πιο συνηθισμένος αφού έχει σχέση με πολλά είδη αποκρίσεων του οχήματος. Για το λόγο αυτό έχει σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση και στις προδιαγραφές της κατασκευής. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον υπολογισμό της ανάλυσης PSD ως φίλτρο για μεγαλύτερη ακρίβεια. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται φίλτρο κινούμενου μέσου όρου 250mm, που προσομοιώνει τις επιπτώσεις του ίχνους του τροχού (βλ. Εικόνα 3.5). Το φίλτρο αυτό λειτουργεί σαν φίλτρο χαμηλής διέλευσης, όπου το μήκος αφαίρεσης ισούται με το μήκος βάσης στον μέσο όρο. Μετά το φιλτράρισμα, το προφίλ εξομαλύνεται μειώνοντας τις ρωγμές, χωρίς όμως να αφαιρούνται (Wang, 2006).



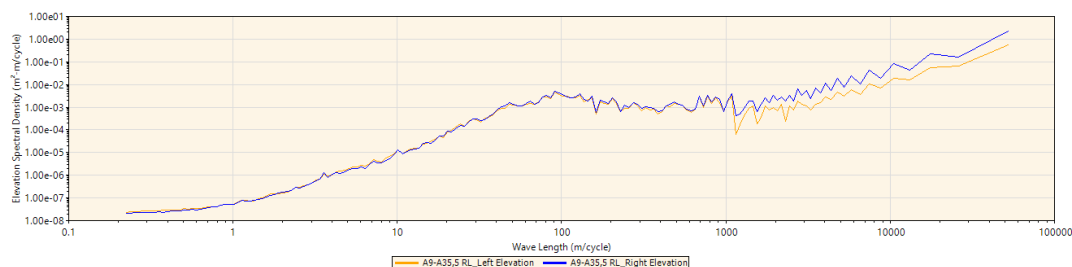
Εικόνα 3.5. Η απόκριση του αριθμού κύματος σε φίλτρο IRI (Sayers and Karamihas, 1998)

Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται ότι μετά το φιλτράρισμα με IRI προέκυψε ισχυρή σχέση μεταξύ IRI και φασματικής ανάλυσης (PSD) των κλίσεων στους μικρούς και μεσαίους αριθμούς κύματος (0,065 cycle/m και 0,42 cycle/m), παρά στους μεγάλους (Sayers and Karamihas, 1998). Είναι γεγονός ότι το IRI επηρεάζεται περισσότερο από την ομαλότητα μικρού και μεσαίου μήκους κύματος, οπότε κάποια αλλαγή στα μεγάλα μήκη κύματος το αφήνει αμετάβλητο (Brown, Liu and Henning, 2010).

3.4 Μορφές διαγραμμάτων δυναμικής φασματικής ανάλυσης

Η μετρούμενη δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) ενός προφίλ οδοστρώματος που ορίζεται σε όρους υψομετρικής απόκλισης έναντι απόστασης μπορεί να γραφτεί ως PSD υψομετρικών αποκλίσεων έναντι μήκους κύματος. Διαγράμματα αναλύσεων PSD, κατά μήκος μιας οδού, φαίνονται στο παράδειγμα της Εικόνας 3.6. Η δεδομένη ανάλυση PSD υψομετρικής απόκλισης δείχνει τη σχέση μεταξύ του τετραγώνου του πλάτους των ημιτόνων που προστίθενται για τη δημιουργία του προφίλ του οδοστρώματος. Ωστόσο, το προφίλ του οδοστρώματος δεν μπορεί να ανακατασκευαστεί μόνο από δεδομένα ανάλυσης PSD. Η μετατόπιση φάσης κάθε ημιτονοειδούς συνάρτησης πρέπει να προσδιοριστεί (μια ξεχωριστή γραφική παράσταση, η οποία σπάνια χρησιμοποιείται). Πριν από την εκτίμηση της ανάλυσης PSD, τα σημεία δείγματος του προφίλ προσαρμόστηκαν ώστε να έχουν μέση τιμή μηδέν, με

αποτέλεσμα η διακύμανση και οι μέσες τετραγωνικές τιμές του προφίλ να είναι ίδιες. Η συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη της φασματικής ανάλυσης είναι τότε ίση με τη μέση τετραγωνική τιμή του προφίλ της οδού.



Εικόνα 3.6. Διάγραμμα φασματικής ανάλυσης υψομετρικής απόκλισης

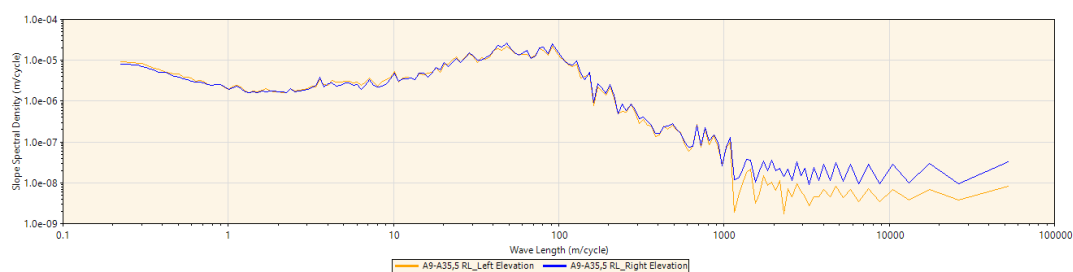
Από την Εικόνα 3.6, μπορεί να αποδειχθεί ότι : καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κυμάτων (μειώνεται το μήκος κύματος), η PSD μειώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή τα πλάτη για μεγάλα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα από αυτά για τα μικρά μήκη κύματος. Έτσι, τα μεγάλα μήκη κύματος σχετίζονται με υψηλές διακυμάνσεις των υψομετρικών αποκλίσεων του προφίλ (Mann, McManus and Holden, 1997).

Εάν μία ημιτονοειδής συνάρτηση, που περιγράφει ένα προφίλ μιας οδού, σχεδιάζεται σε σχέση με τις υψομετρικές αποκλίσεις έναντι της απόστασης, η παράγωγος της θα είναι ένα μία άλλη ημιτονοειδής συνάρτηση σχεδιασμένη σε όρους κλίσης έναντι απόστασης. Το μήκος κύματος στη νέα γραφική παράσταση θα παραμείνει το ίδιο, αλλά το πλάτος και η φάση θα τροποποιηθούν. Για ένα δεδομένο πλάτος στο διάγραμμα υψομετρικών αποκλίσεων, το πλάτος της παραγώγου θα είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος κύματος (Mann, McManus and Holden, 1997). Στον Πίνακα 3.1 αναγράφονται πως επηρεάζουν τα διάφορα μήκη κυματος τα διαγράμματα υψομετρικών αποκλίσεων και κλίσεων.

Πίνακας 3.1. Επίδραση μηκών κύματος στις παραλλαγές αναλύσεων PSD(M.W.Sayers et al., 1986)

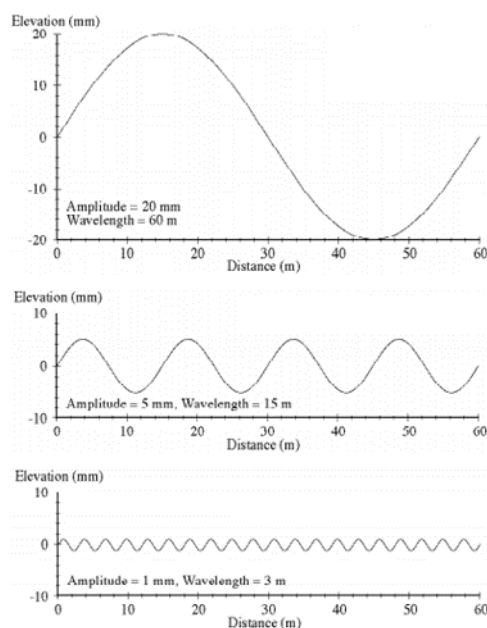
Μήκη Κύματος	Υψομετρική Απόκλιση	Κλίση
Μεγάλα	Σημαντική αύξηση διακύμανσης	Αύξηση διακύμανσης
Μικρά	Αμελητέα επίδραση	Αύξηση διακύμανσης

Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η φασματική ανάλυση (PSD) της κλίσης των προφίλ έναντι του μήκους κύματος για το τμήμα οδοστρώματος (της Εικόνας 3.6).



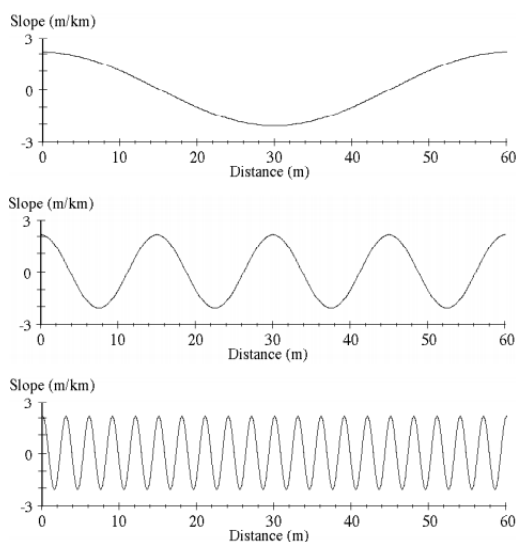
Εικόνα 3.7. Διάγραμμα φασματικής ανάλυσης κλίσης

Στην Εικόνα 3.8 ακολουθεί ένα παράδειγμα ημιτονοειδών συναρτήσεων με διαφορετικά πλάτη και μήκη κύματος.



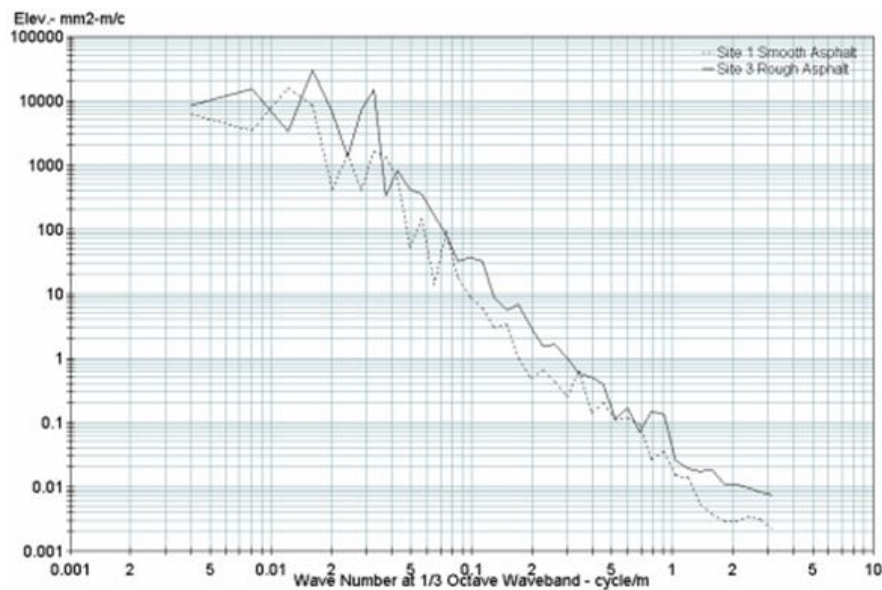
Εικόνα 3.8. Παράδειγμα ημιτονοειδών συναρτήσεων υψομετρικών αποκλίσεων (Sayers and Karamihas, 1998)

Ωστόσο, όλα τα παράγωγα που δίνονται στην Εικόνα 3.9 έχουν το ίδιο πλάτος για τις διάφορες κλίσεις, καθώς τα πλάτη υψομετρικών αποκλίσεων των πρώτων ημιτονοειδών συναρτήσεων έχουν επιλεγεί ανάλογα με τα μήκη κύματος τους (Mann, McManus and Holden, 1997).

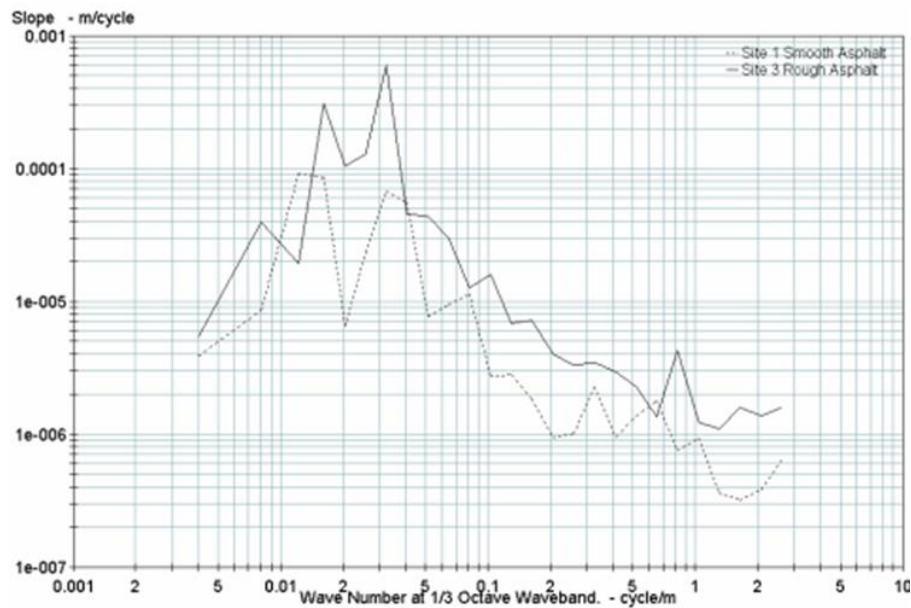


Εικόνα 3.9. Παράδειγμα παραγώγων ημιτονοειδών συναρτήσεων υψομετρικών αποκλίσεων (Sayers and Karamihas, 1998)

Η ανάλυση PSD κλίσης ενός προφίλ χρησιμοποιείται μερικές φορές αντί για την ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων επειδή το βασικό φάσμα της κλίσης του προφίλ πάνω από τους αριθμούς κύματος είναι πιο ομοιόμορφο και δείχνει καλύτερα τις διαφορές στις ιδιότητες ομαλότητας από το δεύτερο (Sayers and Karamihas, 1996). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10, το εύρος της ανάλυσης PSD υψομετρικών αποκλίσεων ενός προφίλ εκτείνεται σε 7 τάξεις μεγέθους. Η μεγάλη διαφορά πλάτους μπορεί να περιπλέξει τη στατιστική ανάλυση. Σε αντίθεση, η ανάλυση PSD κλίσεων του προφίλ καλύπτει μόνο 3 τάξεις μεγέθους (Βλ. Εικόνα 3.11). Στην τελευταία, η διάσταση της ανάλυσης PSD είναι ακριβώς το αντίστροφο της συχνότητας, που είναι m/cycle (Wang, 2006).



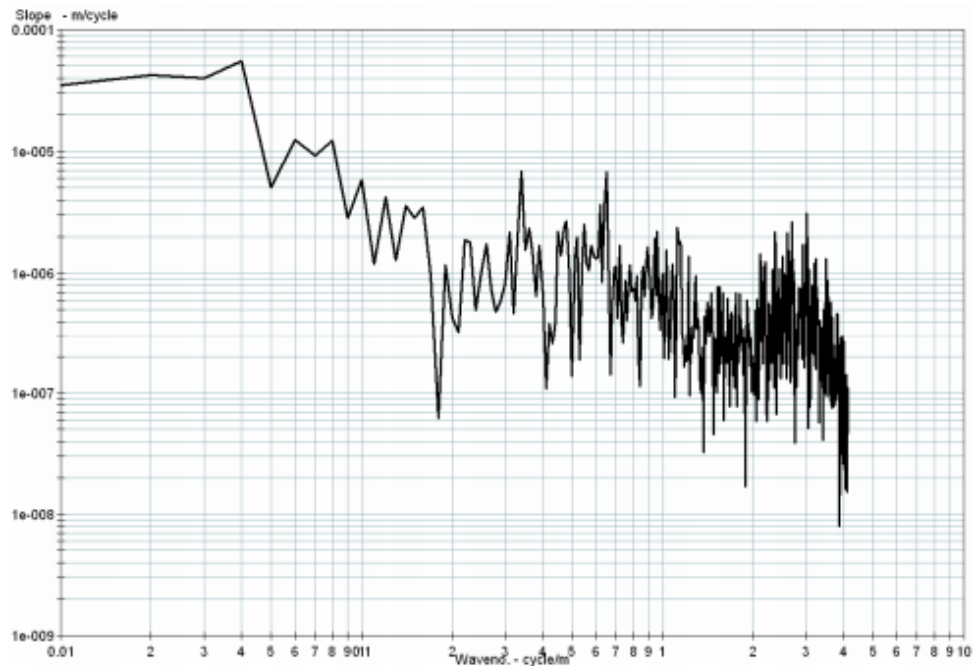
Εικόνα 3.10. Ανάλυση PSD των υψομετρικών αποκλίσεων του προφίλ στη θέση 1 και 3 (1/3 ζώνη οκτάβας) (Wang, 2006)



Εικόνα 3.11. Ανάλυση PSD των κλίσεων του προφίλ στις θέσεις 1 και 3 (τρίτη ζώνη οκτάβας)
(Wang, 2006)

Όπως σχεδιάστηκε στην Εικόνα 3.10, τα πλάτη για μικρό αριθμό κυμάτων (μεγάλα μήκη κύματος) είναι πολύ υψηλότερα παρά για μεγάλων αριθμών κυμάτων (μικρά μήκη κύματος), που υποδηλώνει ότι τα μεγάλα μήκη κύματος σχετίζονται με υψηλά πλάτη διακύμανσης υψομέτρου. Εάν υπάρχουν μήκη κύματος, τα οποία είναι ορατά σε ένα προφίλ, τότε θα εμφανίζονται ως κυρίαρχες αιχμές στο διάγραμμα της ανάλυσης PSD (Wang, 2006).

Όταν η ανάλυση PSD πραγματοποιείται με τη μέθοδο σταθερού εύρους ζώνης, το γράφημα που θα προκύψει σε λογαριθμική κλίμακα θα δώσει μια οπτική εντύπωση, η οποία δίνει υπερβολική έμφαση στις υψηλές συχνότητες της διακύμανση της ανάλυσης PSD που παράγεται από την πραγματική κατανομή ισχύος και από την τυχαιότητα του λαμβανόμενου σήματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12.

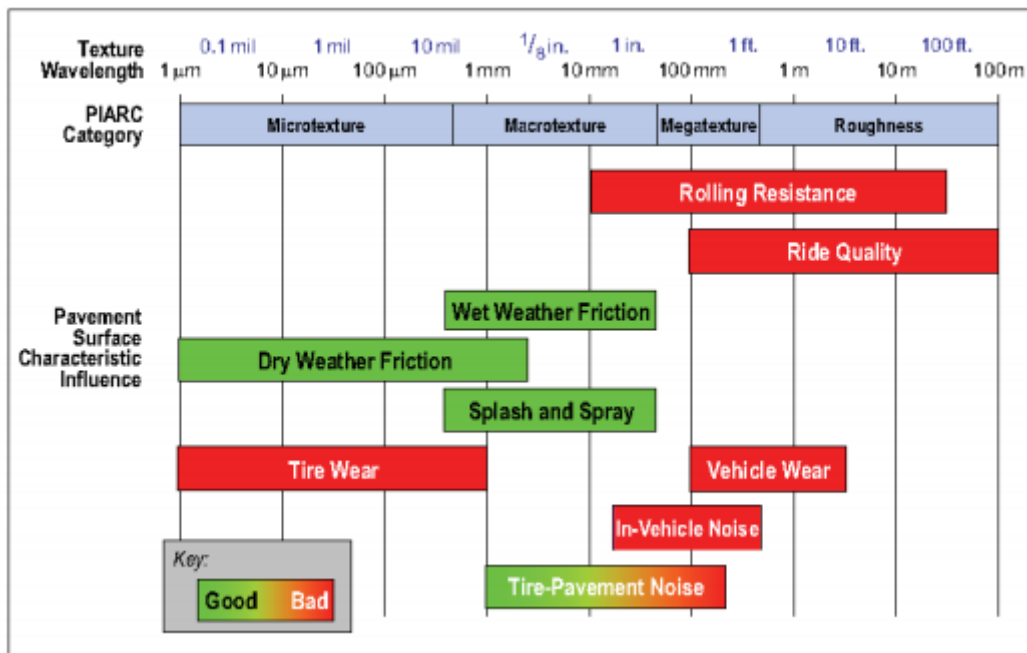


Εικόνα 3.12. Ανάλυση PSD των κλίσεων του προφίλ στην τοποθεσία 1(σταθερό εύρος ζώνης)
(Wang, 2006)

Για το λόγο αυτό, στην τρίτη ζώνη, όπου και οι συχνότητες είναι μεγάλες, χρησιμοποιείται ως εύρος ζώνης συχνότητας η οκτάβα για την ανάλυση PSD. Η μέση τιμή της ανάλυσης PSD πάνω από κάθε 1/3 ζώνη οκτάβας (η οποία αποτελεί την απόσταση των κυματαριθμών) υπολογίζεται ως η ανάλυση PSD στον αριθμό του κεντρικού κύματος. Ο αριθμός κύματος (cycle/ m) είναι το αντίστροφο του μήκους κύματος (m) (Wang, 2006).

3.5 Ταξινόμηση κυματισμών

Εδώ θα αναφερθούν οι ταξινομήσεις της Παγκόσμιας Οδικής Ομοσπονδίας (PIARC) (www.piarc.org/en/), (βλ. [Εικόνα 3.13](#)) και του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) (www.iso.org/home.html), (βλ. [Εικόνα 3.14](#)) .

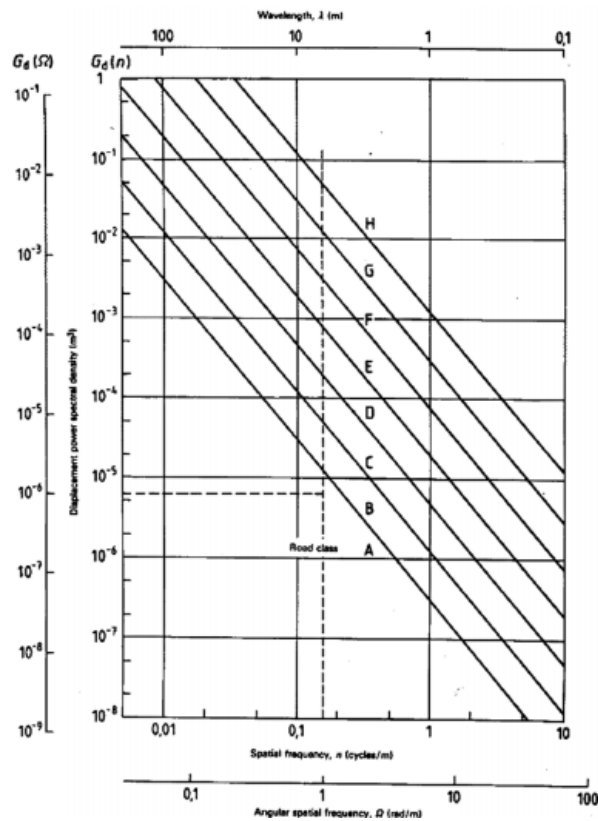


Εικόνα 3.13. Κατάταξη κατηγοριών υφής οδοστρώματος (Cossale, Elliott and Widyatmoko, 2013)

Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η ταξινόμηση κατά PIARC, η οποία διαχωρίζει τους κυματισμούς της επιφάνειας ενός οδοστρώματος σε τρεις κατηγορίες : τη μικρο-υφή, τη μακρο-υφή και την επιφάνεια κακής ομαλότητας. Οι τρεις κατηγορίες είναι τυχαίας φύσεως και κύριο κριτήριο του διαχωρισμού τους είναι τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η ασφάλεια και η ποιότητα οδήγησης (Hegmon, 1979). Οι ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του οδοστρώματος με μήκη κύματος μικρότερα από 0,5 m σχετίζονται με την υφή της επιφάνειας. Τέτοιες διαταραχές δεν θεωρούνται ελαττωματικές, καθώς η υφή επαρκούς ανωμαλίας είναι ζωτικής σημασίας προκειμένου να επιτευχθεί καλή εκκένωση νερού κάτω από τα ελαστικά και καλή αντοχή σε ολίσθηση (Hassan, McManus and Holden, 1999). Οι κατηγορίες της υφής χαρακτηρίζονται από μικρότερα μήκη κύματος συγκριτικά με την ανώμαλη επιφάνεια, αφού μία επιφάνεια αρχίζει να αντιμετωπίζει πρόβλημα με την ομαλότητα όταν τα μήκη κύματος ανήκουν στο εύρος από 0,1 έως 100m και τα πλάτη είναι από 1,0 έως 100mm (Hegmon, 1979).

Το σχέδιο του πρότυπου ISO/DIS 8608, όπως και η PIARC, προτείνει εύρος χωρικών συχνοτήτων 0,01 έως 10 cycle/m για γενικές μετρήσεις προφίλ επιφάνειας δρόμου, υποδεικνύοντας ότι τα μήκη κύματος ομαλότητας που μπορούν να αναλυθούν κυμαίνονται από 0,1 m έως 100 m (Hassan, McManus and Holden, 1999). Η σχέση μεταξύ του πλάτους και του αριθμού κύματος των αναλύσεων PSD, μπορεί να μην είναι η ίδια αλλά είναι παρόμοια για διαφορετικά προφίλ οδοστρωμάτων. Αύτα τα παρόμοια αποτελέσματα βοήθησαν στην

τοποθέτηση ευθείων γραμμών στις υψομετρικές αποκλίσεις της ανάλυσης PSD, έτσι ώστε να υπάρχει μια ένδειξη της βαθμολογίας της ομαλότητας ή της τάξης του οδοστρώματος (Wang, 2006). Αναλυτικότερα, ο ISO πρότεινε την ταξινόμηση της ομαλότητας του δρόμου σε κλάσεις Α έως Η χρησιμοποιώντας τις τιμές της ανάλυσης PSD. Η Εικόνα 3.14 εμφανίζει την ταξινόμηση ISO και το αντίστοιχο φάσμα τιμών της ανάλυσης PSD σε συχνότητα $1/2\pi$ cycle/m, ενώ στον Πίνακα 3.2 φαίνονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση (Xu and Yong, 1992).



Εικόνα 3.14. Ταξινόμηση ομαλότητας κατά ISO 8608 (Cafiso *et al.*, 2019)

Πίνακας 3.2. Οι ταξινομημένες τιμές της ομαλότητας κατά ISO 8608 (Pawar, Mathew and Saraf, 2018)

Road Class	C = waviness index $G_d(\Omega_0)(10^{-6} \text{ m}^3)$ where $\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$		
	lower limit	geometric mean	upper limit
A	-	1	2
B	2	4	8
C	8	16	32
D	32	64	128
E	128	256	512
F	512	1024	2048
G	2048	4096	8192

Βρέθηκε ότι η ομαλότερη επιφάνεια έχει λιγότερη ισχύ σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων από τις λιγότερο ομαλές επιφάνειες. Κατά ISO, το πλάτος της ανάλυσης PSD της επιφάνειας του δρόμου μπορεί να προσεγγιστεί μέσω δύο ευθειών γραμμών με διαφορετικές κλίσεις, καθώς οι καμπύλες PSD πολλών επιφανειών του δρόμου είναι κοίλες (Xu and Yong, 1992).

Η χρησιμότητα της ταξινόμησης κατά ISO την καθιστά εξυπηρετική έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στην εξέλιξη των οχημάτων, αλλά δεν είναι αξιόπιστη όσον αφορά τον προσδιορισμό του φάσματος της ομαλότητας του οδοστρώματος για ολόκληρο το φάσμα των συχνοτήτων (Pawar, Mathew and Saraf, 2018). Ο τρόπος για να γίνει η ταξινόμηση με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι το δείγμα, που θα χρησιμοποιηθεί, να είναι αρκετά μεγάλο. Συγκεκριμένα, το πρότυπο ISO αναφέρεται σε οδοστρώματα με μήκος τουλάχιστον 1km. Αυτό σημαίνει ότι κάνοντας χρήση του ISO επιδιώκεται η εκτίμηση της μέσης κατάστασης του οδοστρώματος για όλο του το μήκος. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιείται το πρότυπο ISO για τον υπολογισμό της ανάλυσης PSD ενός προφίλ αφαιρούνται όλες οι χωρικές πληροφορίες από τα δεδομένα, με αποτέλεσμα η ανάλυση PSD να μην είναι ικανή να δώσει τη θέση όπου υπάρχει πρόβλημα με την ομαλότητα. Επίσης, στην ανάλυση PSD ενός οδοστρώματος το φάσμα θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή Gauss και ακραίες τιμές, που δεν συμπεριλαμβάνονται στην κατανομή, χάνονται. Τέτοιες τιμές θα πρέπει να ελέγχονται

ξεχωριστά έτσι ώστε να μην χάνονται και να χαρακτηρίζεται με περισσότερη ακρίβεια το οδόστρωμα (Brown, Liu and Henning, 2010).

Παραδείγματα της ταξινόμησης κατά ISO παρατηρούνται, στις Εικόνες 3.10 και 3.11, όπου οι συνεχείς γραμμές της ανάλυσης PSD (θέση 3) έχουν υψηλότερα πλάτη από τις διακεκομμένες γραμμές (θέση 1), που επιβεβαιώνουν ότι η τοποθεσία 3 έχει πιο σκληρή επιφάνεια από την τοποθεσία 1.

3.6 Ταξινόμηση κυματικών ζωνών ομαλότητας

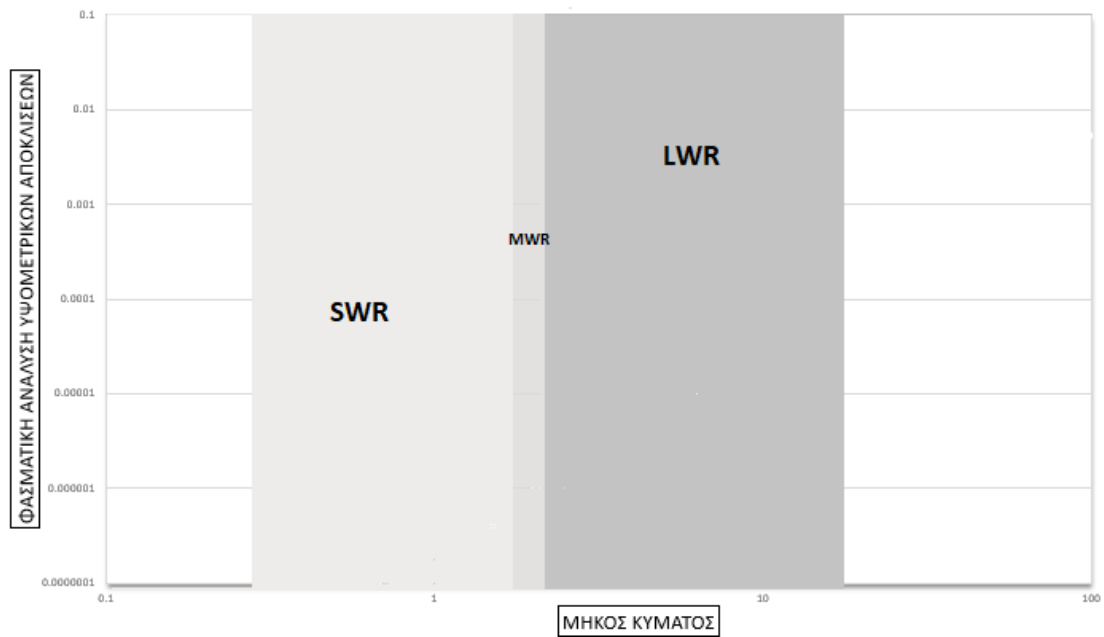
Δεδομένου ότι διαφορετικοί τύποι ομαλότητας συσχετίζονται με διαφορετικά μήκη κύματος, η διαίρεση του φάσματος ομαλότητας σε μεμονωμένα μήκη κύματος μπορεί να βοηθήσει στη γενική κατανόηση της φθοράς. Σε εδάφη που δεν διογκώνονται, η ομαλότητα του οδοστρώματος σχετίζεται με τη διαφορετική μόνιμη παραμόρφωση που προκαλείται από τη φόρτωση της κυκλοφορίας. Η μελέτη του Transport and Road Research Laboratory (TRRL) για την ομαλότητα του οδοστρώματος έδειξε ότι η μείωση της ομαλότητάς του με την πάροδο του χρόνου, σχετίζεται με ουσιαστική ορατή καταπόνηση οδοστρώματος και εκφράζεται κυρίως από χαρακτηριστικά μικρού μήκους κύματος (π.χ. λιγότερο από 3 m). Αντίθετα, τα χαρακτηριστικά μεγάλου μήκους κύματος, που έδειξε η μελέτη μπορεί να υποδηλώνουν προβλήματα στο υπέδαφος και όχι καταπόνηση οδοστρώματος.

Μερικοί συγγραφείς ανέφεραν ότι η ομαλότητα του οδοστρώματος σε τεράστια εδάφη φαίνεται να εμφανίζει κάποια χαρακτηριστικά μήκη κύματος. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος ή η σύσταση του εδάφους μπορεί να επηρεάσουν την ανάλυση PSD του οδοστρώματος, για το λόγο αυτό τα χαρακτηριστικά μήκη κύματος μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Ωστόσο, συνδυάζοντας το σχέδιο του πρότυπου ISO/DIS 8608 και τις ταξινομήσεις που έγιναν κατά PIARC για τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας, κατηγοριοποιήθηκαν οι ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά μήκος κύματος. Το εύρος των μηκών κύματος για τις δυσμορφίες στην επιφάνεια του οδοστρώματος που επηρεάζουν την κίνηση και τη δραστηριότητα ενός κινούμενου οχήματος είναι μεταξύ 0,5 και 35 m. Τα μήκη κύματος μεγαλύτερα από 35 m συνδέονται με την αποτελεσματικότητα της ποιότητας του δρόμου. Επομένως, το εύρος ομαλότητας του διαμήκους προφίλ της επιφάνειας του δρόμου μπορεί να χωριστεί σε πέντε ζώνες κυμάτων, οι οποίες μπορεί να αλληλεπικαλύπτονται (Hassan, McManus and Holden, 1999):

- Η μείωση της ομαλότητας σε πολύ μικρά μήκη κύματος (Very Short Wavelength Roughness, VSWR) (0 έως 0,5 m) συνδέεται με την υφή και το σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος στη στρώση κυκλοφορίας.
- Η μείωση της ομαλότητας σε μικρά μήκη κύματος, (Short Wavelength Roughness, SWR), (0,5 έως 2m) συνδέεται με αστοχίες των άνω στρώσεων του οδοστρώματος ή και με τη βάση ή την υπόβαση όταν το πάχος των άνω στρώσεων είναι μικρό.
- Η μείωση της ομαλότητας σε μεσαία μήκη κύματος, (Medium Wavelength Roughness, MWR), (2 έως 3 m) συνδέεται με αστοχίες στη βάση ή την υπόβαση και ενίοτε σε παραμορφώσεις της εδαφικής στρώσης.
- Η μείωση της ομαλότητας σε μεγάλα μήκη κύματος, (Long Wavelength Roughness, LWR), (3 έως 35 m) αφορά υποχωρήσεις ή ανυψώσεις του υπεδάφους.
- Η μείωση της ομαλότητας σε πολύ μεγάλα μήκη κύματος, (Very Long Wavelength Roughness, VLWR), (35 έως 100 m) αντιστοιχεί σε μήκη κύματος που βρέθηκαν σε ομαλό οδόστρωμα μετά την κατασκευή.

Επιπλέον, έρευνα που διεξήχθη έδειξε ότι η μείωση της ομαλότητας που είναι εμφανής εκφράζεται σε μεγάλο βαθμό από κύματα μικρού μήκους ($\leq 3\text{m}$). Από την άλλη η καθίζηση εδάφους πιθανό να αντικατοπτρίζεται από μεγάλου μήκους κύματα. Γενικά η κατάταξη σε κυματικές ζώνες μπορεί να γνωστοποιήσει την αιτία που οδήγησε στην μείωση του επιπέδου της ομαλότητας (Brown et al., 2010).

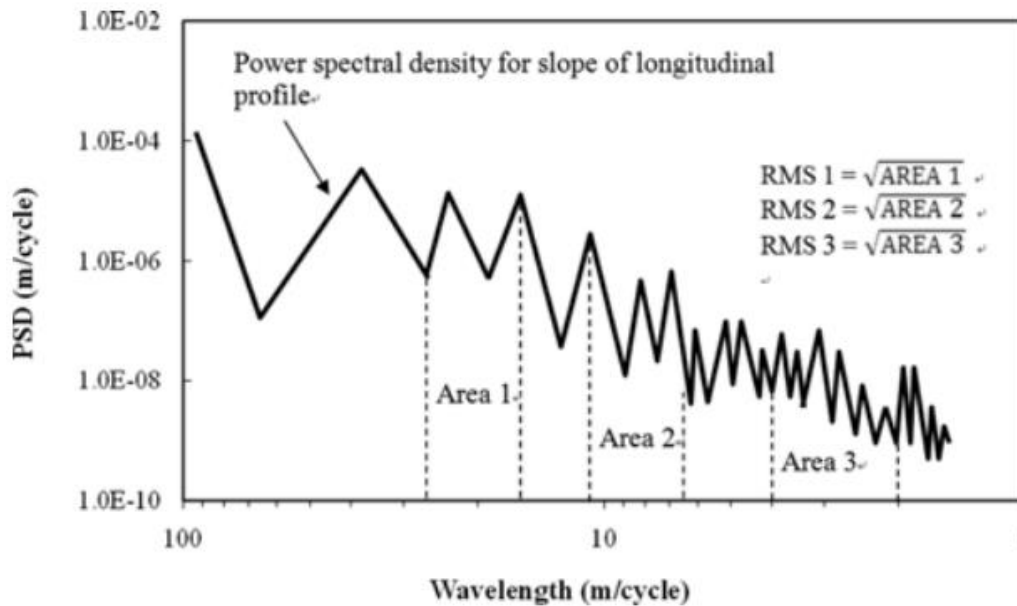
Τα χαρακτηριστικά της ομαλότητας οποιουδήποτε οδοστρώματος μπορούν να παρατηρηθούν και να αναλυθούν ελέγχοντας τις φασματικές ιδιότητες του διαμήκους προφίλ του. Η ανάλυση PSD μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τους τρόπους και την έκταση της υποβάθμισης του οδοστρώματος, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη διαχείριση του οδικού δικτύου πιο αποτελεσματικά. Οι κυματικές ζώνες που εξετάζονται για την πρόβλεψη των διαφορετικών τρόπων υποβάθμισης οδοστρώματος περιλαμβάνουν τη ζώνη LWR (3 έως 35 m, αριθμοί κύματος 0,3333 έως 0,02857 cycle/m), τη ζώνη MWR (2 έως 3 m, αριθμοί κύματος 0,5 έως 0,3333 cycle/m) και το SWR ζώνη (0,5 έως 2 m, αριθμοί κύματος 2,0 έως 0,5 cycle/m) (Hassan, McManus and Holden, 1999). Αυτές οι κυματικές ζώνες αποτυπώνονται στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15. Διάγραμμα φασματικής ανάλυσης υψομετρικών αποκλίσεων

Η συνεισφορά των διαφόρων κυματικών ζωνών στην ομαλότητα μπορεί να εκτιμηθεί με οπτική εξέταση του διαγράμματος PSD των υψομετρικών αποκλίσεων (ή της κλίσης) ή με μέτρηση της ρίζας του μέσου τετραγώνου (Root Mean Square, RMS) του ύψους ή της κλίσης της ανάλυσης PSD για κάθε ζώνη κυμάτων.

Τα διαγράμματα των αναλύσεων PSD μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση ενός δείκτη για τον προσδιορισμό της κατάστασης της επιφάνειας του οδοστρώματος. Αυτός ο δείκτης είναι το μέσο τετράγωνο ρίζας (RMS) υψομετρικών αποκλίσεων ή κλίσης που μετριέται από την επιφάνεια που καταλαμβάνεται κάτω από την καμπύλη της ανάλυσης PSD, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.16. Εκτίμηση του RMS της ανάλυσης PSD κλίσεων (Bae and Stoffels, 2017)

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή που οριοθετείται από την καμπύλη ανάλυσης PSD, τον οριζόντιο άξονα και οποιαδήποτε δύο επιλεγμένες τετμημένες αντιπροσωπεύουν τη συνολική μέση τετραγωνική τιμή της ομαλότητας για μήκη κύματος που βρίσκεται μεταξύ των δύο τεταγμένων (Hassan, McManus and Holden, 1999). Ωστόσο, η τιμή του RMS δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος δείκτης ομαλότητας οδοστρώματος επειδή κυριαρχείται από μεγαλύτερα μήκη κύματος εντός της ζώνης και συνεπώς δεν μπορεί να παρέχει ακριβή εικόνα της κατάστασης σε σχέση με την ομαλότητα του οδοστρώματος. Επιπλέον, δείκτες όπως το RMS δεν λαμβάνουν υπόψη άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανή μείωση ομαλότητας, όπως η ταχύτητα του οχήματος και τα χαρακτηριστικά του οχήματος, και ως εκ τούτου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ποιότητας οδήγησης (Loizos and Plati, 2008).

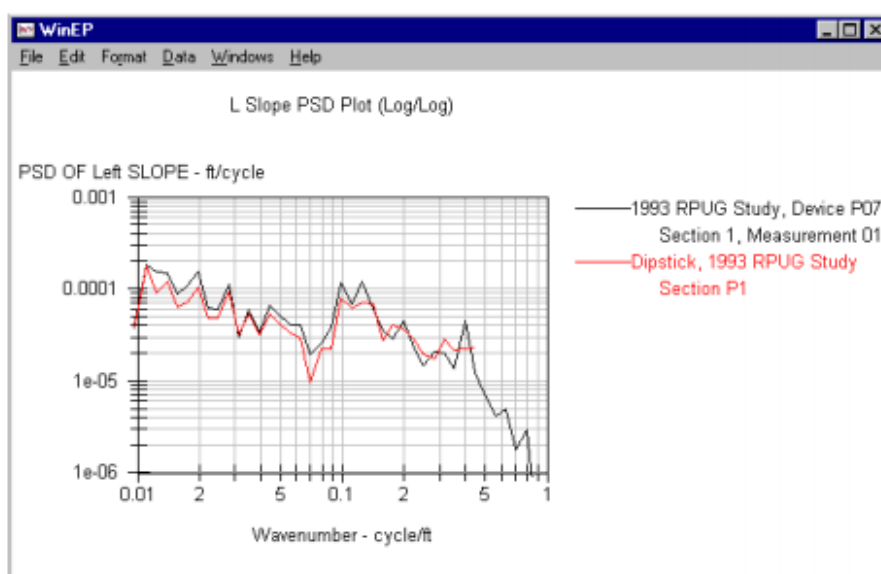
3.7 Λογισμικά ανάλυσης

Τα στοιχεία που συλλέγονται από τα συστήματα καταγραφής ομαλότητας των οδοστρωμάτων επεξεργάζονται στη συνέχεια από υπολογιστή και συγκεκριμένα από ειδικά λογισμικά. Τα δύο πλέον διαδεδομένα λογισμικά είναι το RoadRuf και το ProVAL. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι περιγραφές και των δύο.

Το RoadRuf δημιουργήθηκε από το Ινστιτούτο Ερευνών Μεταφορών του Πανεπιστημίου του Μίσιγκαν (UMTRI) με χρηματοδότηση από την Federal Highway Administration (FHWA) (www.fhwa.dot.gov/about/org/) στο πλαίσιο ενός ερευνητικού έργου που ονομάζεται «Ερμηνεία των δεδομένων προφίλ οδικής τραχύτητας». Συγκεκριμένα, αποτελεί ένα σύνολο εργαλείων, το οποίο παρέχει καλά δοκιμασμένες αναλύσεις προφίλ οδοστρώματων, όπως είναι οι δείκτες IRI και RN, η ανάλυση PSD και προσαρμοσμένα φίλτρα (UMTRI, 1997).

Το RoadRuf αποτελείται από δύο προγράμματα ανάλυσης, το Profan.exe και το Spectrum.exe. Το πρώτο επεξεργάζεται το προφίλ του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας φίλτρα για τους δείκτες IRI και Ride Number. Το δεύτερο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των λειτουργιών της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (PSD), αλλά και τις τιμές RMS. Το συγκεκριμένο λογισμικό δεν απαιτεί τη γνώση λεπτομέρειών σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του, αφού αρκεί η εισαγωγή των δεδομένων για να εξάγει αποτέλεσμα. Ωστόσο, ορισμένες φορές είναι σημαντική η κατανόηση της ανάγνωσης και της γραφής αρχείων (UMTRI, 1997).

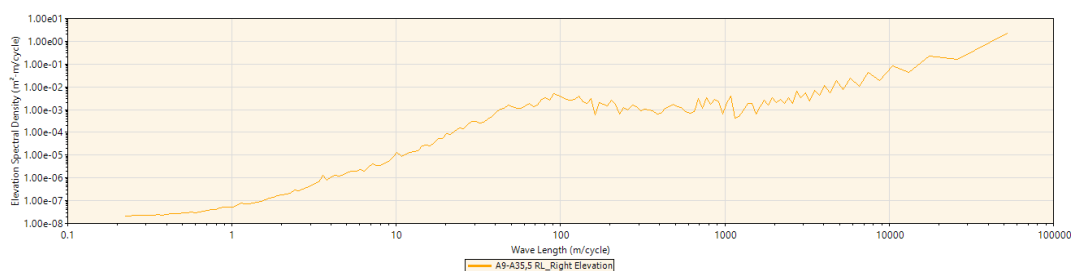
Όσον αφορά τη δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) το RoadRuf περιέχει έναν αναλυτή φάσματος, που χρησιμοποιεί το μετασχηματισμό Fourier (FFT) για να μετατρέψει τη δεδομένη υψομετρική απόκλιση του οδοστρώματος στην ανάλυση (PSD) που δείχνει πώς κατανέμεται η ομαλότητα στα μήκη κύματος (Sayers and Karamihas, 1996). Στην Εικόνα 3.17 ακολουθεί ένα παράδειγμα ανάλυσης PSD έχοντας κάνει χρήση του RoadRuf.



Εικόνα 3.17. Παράδειγμα ανάλυσης PSD κλίσεων για δύο συσκευές (Sayers and Karamihas, 1996)

Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζεται η σύγκριση δύο μετρήσεων του ίδιου προφίλ οδοστρώματος, που έγιναν από διαφορετικές συσκευές, και αναλύθηκαν με τη λειτουργία της ανάλυσης PSD (Sayers and Karamihias, 1996). Υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη λειτουργία της φασματικής ανάλυσης, όπως είναι η ανάλυση υψομέτρου ή κλίσης, τα φίλτρα Butterworth διέλευσης ζώνης και ο υπολογισμός του RMS (UMTRI, 1997).

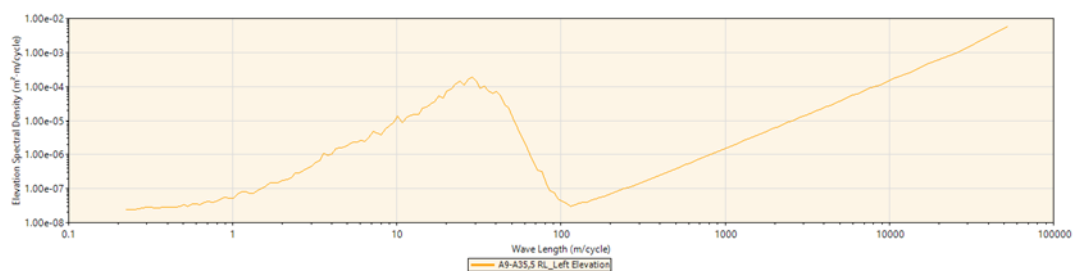
Το ProVAL (Profile Viewing and AnaLysis), το οποίο αναγνωρίζεται ως η εξέλιξη του RoadRuf, είναι μια εφαρμογή λογισμικού μηχανικής που επιτρέπει στους χρήστες να βλέπουν και να αναλύουν προφίλ οδοστρωμάτων με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για τον χρήστη, ενώ παράλληλα επικρατεί έντονα η λεπτομέρεια στις αναλύσεις του (www.smoothpavements.com/content.aspx?id=10). Μία από τις βασικές λειτουργίες του λογισμικού αυτού είναι η δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) των προφίλ οδοστρωμάτων. Για την λογική και την ακριβή ανάλυση πρέπει να επιλεχθεί το σωστό υπολογιστικό ανάλυσης PSD στοιχείο, το κατάλληλο φίλτρο επεξεργασίας, οι ζώνες-οκτάβες και το ανάλογο διάγραμμα, πριν την εκτέλεση της δυναμικής φασματικής ανάλυσης. Στην Εικόνα 3.18 παρουσιάζεται η φασματική ανάλυση (PSD) του αριστερού προφίλ ενός οδοστρώματος, πριν την εφαρμογή κάποιου φίλτρου.



Εικόνα 3.18. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων χωρίς φίλτρο

Πριν χρησιμοποιηθεί η δυναμική φασματική ανάλυση (PSD) το ProVAL δίνει την επιλογή στο χρήστη δύο φίλτρων για ακατέργαστα δεδομένα, του Butterworth ή του IRI. Το φίλτρο Butterworth είναι ουσιαστικά ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης High-Low-Band Pass (υψηλής-χαμηλής-ζώνης διέλευσης), το οποίο χρησιμοποιείται για την αποκοπή χαμηλών ή υψηλών χωρικών συχνοτήτων (ή και των δύο), όπου το όφελος είναι $1 / \sqrt{2}$ (ή 0,7071) (M. Sayers &

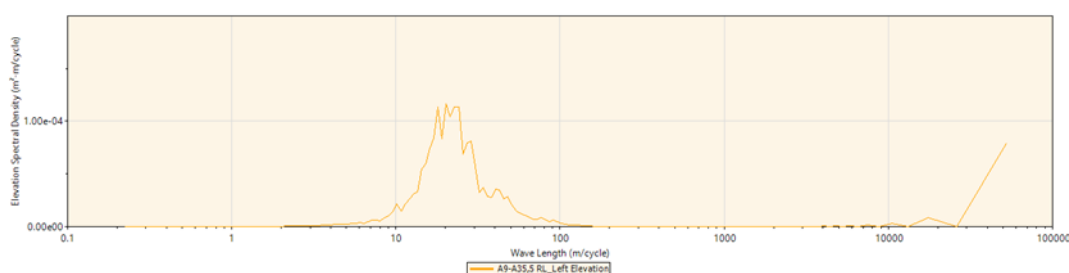
Karamihas, 1996). Με άλλα λόγια το φίλτρο Butterworth χρησιμοποιείται για το φιλτράρισμα των μικρών μήκους κυματισμών (φίλτρο Low Pass) ή των μεγάλων μήκους κυματισμών (φίλτρο High Pass) ή και των δύο (φίλτρο Band Pass) ενός προφίλ οδοστρώματος (Ruiz *et al.*, 2008). Το proVAL δίνει τη δυνατότητα της επιλογής του αριθμού μήκους κύματος που πρόκειται να περικοπεί την εκάστοτε φορά. Αναλυτικότερα, με το Butterworth Low-Pass φιλτράρονται τα μήκη κύματος μικρότερα από το όρισμα ως Short Cutoff (μικρό μήκος κύματος περικοπής), με το Butterworth High-Pass φιλτράρονται τα μήκη κύματος μεγαλύτερα από το όρισμα ως Long Cutoff (μεγάλο μήκος κύματος περικοπής) και με το φίλτρο Butterworth Band-Pass φιλτράρονται τα μήκη κύματος εκτός του εύρους ορίσματος από Short Cutoff έως Long Cutoff (μικρό έως μεγάλο μήκος κύματος περικοπής)(Chang, Dick and Rasmussen, 2006). Στην Εικόνα 3.19 αποτυπώνεται η ανάλυση PSD του προφίλ του οδοστρώματος της Εικόνας 3.18, έπειτα από χρήση του φίλτρου Butterworth High-Pass (υψηλής διέλευσης).



Εικόνα 3.19. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων με φίλτρο Butterworth (υψηλής διέλευσης)

Κάνοντας χρήση του φίλτρου υψηλής διέλευσης πραγματοποιήθηκε περικοπή των μεγάλων μήκους κυματισμών και συγκεκριμένα αυτών με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 30,48 m, δίνοντας έμφαση στις περιοχές που υπάρχει μεγαλύτερο πρόβλημα σε σχέση με την ομαλότητα, πράγμα που διαπιστώθηκε έπειτα από διερεύνηση. Γενικά, το φίλτρο Butterworth σχεδιάστηκε το 1930 από τον Stephen Butterworth έτσι ώστε με τη βοήθεια των μαθηματικών να καθιστά, όσο το δυνατόν είναι εφικτό, επίπεδη και ομαλή τη συχνότητα απόκρισης στη ζώνη διέλευσης. Για το λόγο αυτό αποτελεί ένα βασικό εργαλείο του λογισμικού ProVAL, για τη δυναμική φασματική ανάλυση ενός προφίλ οδοστρώματος (Evans, 2013).

Από την άλλη το φίλτρο IRI έχει την επιλογή του κινούμενου μέσου όρου 250 mm, για περιπτώσεις όπου τα στοιχεία ανάλυσης δεν έχουν υποστεί προεπεξεργασία (Chang, Dick and Rasmussen, 2006). Έπειτα από τη χρήση του φίλτρου IRI στο παραπάνω προφίλ (μη προεπεξεργασμένο) τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 3.20.



Εικόνα 3.20. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων με φίλτρο IRI

Στην ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων με φίλτρο IRI (250mm), στην Εικόνα 3.20, παρουσιάζεται έντονη ευαισθησία στην περιοχή των μεγάλων κυματισμών. Γενικά ο δείκτης IRI επηρεάζεται από μήκη κύματος που ανήκουν στο εύρος τιμών 1,2 m έως 30 m, με αποτέλεσμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το φίλτρο αυτό λειτουργεί σαν φίλτρο χαμηλής διέλευσης (Sayers and Karamihas, 1998).

Παραπάνω έγινε η περιγραφή δύο λογισμικών για οδοστρώματα, του RoadRuf και του ProVAL και πιο συγκεκριμένα αναφέρθηκε με ποιον τρόπο χρησιμοποιεί το καθένα την ανάλυση PSD για τη μελέτη των οδοστρωμάτων. Τα δύο αυτά λογισμικά είναι εύκολα στη χρήση και παρουσιάζουν πάνω κάτω τις ίδιες λειτουργίες για την ανάλυση PSD. Παρ' όλα αυτά, επειδή το RoadRuf είναι αρκετά παλιό πρόγραμμα σε αντίθεση με το ProVAL, που είναι μεταγενέστερο και εμφανώς πιο βελτιωμένο, καθώς επίσης στο πρώτο έχουν παρατηρηθεί σφάλματα και στοιχεία που απαιτούν περισσότερη τεκμηρίωση, για την ανάλυση των δεδομένων επιλέχθηκε το ProVAL (Sayers and Karamihas, 1996).

Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια της ανάλυσης PSD κάνοντας χρήση του λογισμικού ProVAL, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι αναλύσεις των στοιχείων παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4.

4. Αναλυτική διαδικασία

4.1 Στοιχεία ανάλυσης

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ομαλότητας από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιΐας ΕΜΠ. Αναλυτικότερα, δόθηκαν τα στοιχεία ομαλότητας οδοστρώματος από τρία διαφορετικά τμήματα αυτοκινητοδρόμων, T-A, T-B και T-Γ. Γενικά, τα T-A και T-Γ παρουσιάζουν καλή ομαλότητα, ενώ από την άλλη το T-B εμφανίζει υποβαθμισμένο επίπεδο ομαλότητας. Επιπλέον για τα τμήματα αυτά δόθηκαν στοιχεία καταγραφής για το αριστερό, το δεξί και το κεντρικό προφίλ, αλλά για τη δεδομένη διπλωματική επιλέχθηκε να εξεταστεί το δεξί προφίλ για κάθε τμήμα. Τα τμήματα έχουν μήκη 27 km (T-A), 21 km (T-B) και 28 km (T-Γ). Τα στοιχεία αυτά αναλύονται με σκοπό τη διερεύνηση της ομαλότητας κάθε τμήματος ξεχωριστά, τη σύγκριση της ομαλότητας ανά δύο τμήματα, αλλά και τη γνωστοποίηση της αιτίας που οδήγησε σε πιθανή μείωση του επιπέδου της ομαλότητας χρησιμοποιώντας το λογισμικό ProVAL. Αναλυτικότερα, αφού γίνει εξέταση της ομαλότητας των τριών οδοστρωμάτων σε όλη την έκταση τους με το δείκτη ομαλότητας IRI θα συγκριθούν ανά δύο έτσι ώστε να βρεθεί το αίτιο που οδήγησε στη διαφορά της ομαλότητάς τους. Η πρώτη σύγκριση αφορά τα T-A και T-B (Περίπτωση Α), ενώ η δεύτερη τα T-A και T-Γ (Περίπτωση Β).

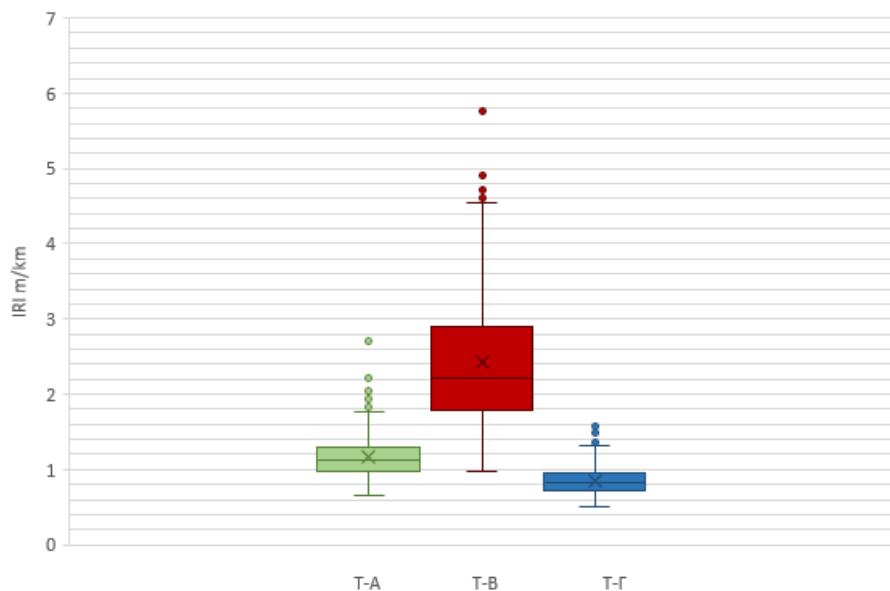
4.2 Επεξεργασία δεδομένων συλλογής

Για την αξιολόγηση της ομαλότητας των τριών οδοστρωμάτων αρχικά έγινε ο υπολογισμός του IRI χρησιμοποιώντας το λογισμικό ProVAL. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε ο δείκτης IRI ανά 100 m για κάθε προφίλ οδοστρώματος (βλ. Παράρτημα: Πίνακες 7.1 και 7.2 και 7.3). Έπειτα, για την καλύτερη ανάλυση των στοιχείων, έγινε η τοποθέτησή τους σε θηκογράμματα (boxplot). Τα θηκογράμματα χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να γίνει η γραφική ταξινόμηση πέντε αριθμητικών δεδομένων, τα οποία υπολογίστηκαν από τους δείκτες IRI ανά 100 m. Αυτές οι πέντε τιμές είναι το ελάχιστο, η μικρότερη τιμή του πρώτου (Q1) και η μεγαλύτερη τιμή του τρίτου (Q3) τεταρτημορίου, το μέγιστο και η διάμεσος, τα οποία υπολογίστηκαν για κάθε οδόστρωμα ξεχωριστά. Επιπλέον για τις μετρήσεις αυτές υπολογίστηκε και ο μέσος όρος, ο οποίος διαφέρει από τη διάμεσο. Τα Q1 και Q3 συγκροτούν

τις πλευρές του ορθογωνίου, που αποτελούν το θηκόγραμμα και είναι παράλληλες στον άξονα x, ενώ η διάμεσος είναι η παράλληλη εντός του ορθογωνίου. Από την άλλη τα μέγιστα και τα ελάχιστα καταλαμβάνουν τις ακραίες τιμές στα διαγράμματα. Τα αριθμητικά δεδομένα των θηκογραμμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και τα θηκογράμματα στην Εικόνα 4.1.

Πίνακας 4.1. Περιγραφικές τιμές IRI των τριών οδοστρωμάτων

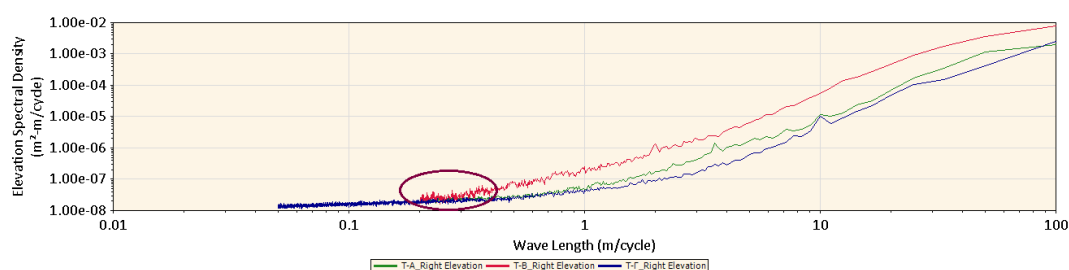
	T-A	T-B	T-Γ
Ελάχιστο	0.66	0.96	0.50
Q1	0.97	1.80	0.71
Διάμεσος	1.12	2.21	0.82
Μέσος όρος ($\bar{x}$)	1.17	2.42	0.85
Q3	1.30	2.89	0.96
Μέγιστο	2.71	5.76	1.58



Εικόνα 4.1. Θηκογράμματα IRI των T-A, T-B και T-Γ

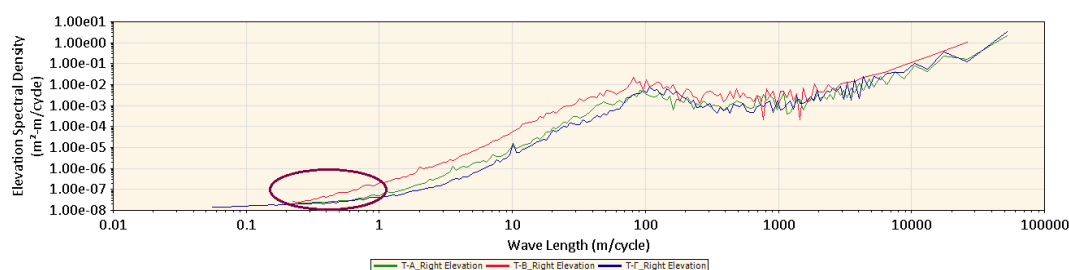
Η τοποθέτηση των τριών θηκογραμμάτων μαζί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, βοηθάει στην καλύτερη σύγκριση των IRI των οδοστρωμάτων. Παρατηρείται ότι για το T-A οι περισσότερες τιμές IRI κυμαίνονται από 1 έως 1,3 m/km, τα οποία ισούνται με το Q1 και το Q3, αντίστοιχα, ενώ παρατηρούνται και κάποιες ελάχιστες ακραίες τιμές, με το δείκτη IRI να κυμαίνεται στα 2 m/km και να παρουσιάζει μέγιστο στα 2,7 m/km. Επομένως το T-A παρουσιάζει καλή ομαλότητα σε όλη την έκταση του, πέρα από ελάχιστα σημεία τα οποία θα χρειαστούν μικροεπεμβάσεις. Ακόμη καλύτερη ομαλότητα από το T-A, παρουσιάζει το T-Γ αφού ο μέσος όρος των τιμών IRI είναι λίγο μικρότερος από 1 m/km, ενώ παρουσιάζει ελάχιστες ακραίες τιμές IRI κάτω από 2 m/km. Από την άλλη πλευρά, οι δείκτες IRI για το T-B κυμαίνονται από 1,8 έως 2,9 m/km, πράγμα που φανερώνει την κακή ποιότητα ομαλότητάς του συγκριτικά με τα άλλα δύο οδοστρώματα. Παρουσιάζει δε περιοχές με $IRI > 4$ m/km καθιστώντας αναγκαία την άμεση επέμβαση. Με αυτό τον τρόπο παρατηρώντας ότι οι μεγαλύτερες τιμές IRI του T-A και του T-Γ, που αποτελούν τις ελάχιστες ακραίες τιμές για αυτά, ανήκουν στο μέσο όρο των τιμών IRI του T-B συμπεραίνεται η μεγάλη διαφορά στα επίπεδα ομαλότητάς τους, για ολόκληρη την έκτασή τους. Από την ανάλυση των τιμών IRI για τα οδοστρώματα προέκυψε ότι το T-B χρειάζεται άμεση επέμβαση.

Έπειτα, με τη βοήθεια της ανάλυσης PSD θα βρεθεί σε ποιες στρώσεις οφείλεται η μειωμένη ομαλότητα των T-B και T-A. Αρχικά, έγινε ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων (elevation) και χρησιμοποιήθηκαν 12 ζώνες ανά οκτάβα έτσι ώστε να οριστεί η απόσταση στους κυματαριθμούς. Η επιλογή της ζώνης ανά οκτάβα αντί για τη μέθοδο σταθερού εύρους ζώνης έγινε έπειτα από διερεύνηση. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται η ανάλυση των υπό εξέταση τμημάτων των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 4.2. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των δεδομένων με σταθερό εύρος ζώνης

Από την Εικόνα 4.2 φαίνεται έντονα η διαφορά όσον αφορά την ομαλότητα των τριών οδοστρωμάτων. Ωστόσο, δεν είναι ευδιάκριτη η αλλαγή της ομαλότητας σε κάθε τμήμα προφίλ, πράγμα που δεν βοηθάει στον προσδιορισμό της, το οποίο είναι το βασικό ζητούμενο. Για το λόγω αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος της ζώνης ανά οκτάβα έτσι ώστε να είναι διακριτές οι αιχμές που προσδίδουν την κακή ποιότητα ομαλότητας σε συγκεκριμένα σημεία. Επιπλέον, με τη χρήση των οκτάβων γίνεται καλύτερη η ανάλυση και στους μεγαλύτερους μήκους κυματισμούς, όπου οι διακυμάνσεις είναι πιο έντονες. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται η διαφορά συγκριτικά με την Εικόνα 4.2, όπου και εφαρμόστηκε η ζώνη ανά οκτάβα.



Εικόνα 4.3. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των δεδομένων με ζώνη ανά οκτάβα

Στην Εικόνα 4.3 απεικονίζεται η δυναμική φασματική ανάλυση των T-A, T-B και T-Γ, χωρίς τη χρήση κάποιου φίλτρου. Όπως έχει αναφερθεί όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια κάτω από τη φασματική γραμμή, τόσο καλύτερη είναι και η ομαλότητα, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή του RMS τόσο πιο ομαλό είναι το οδόστρωμα. Είναι φανερό ότι το T-B βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο ομαλότητας από το T-A και το T-Γ αφού η κόκκινη γραμμή, που αντιστοιχεί στο T-B, βρίσκεται σε όλη την έκτασή της σχεδόν πάνω από την πράσινη και μπλε, που αντιπροσωπεύουν το T-A και το T-Γ, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια καταλαμβάνει περισσότερη επιφάνεια από κάτω της το οποίο υποδηλώνει μεγαλύτερο αριθμό του δείκτη ομαλότητας IRI και εν τέλει χειρότερη ομαλότητα. Με αυτό τον τρόπο επαληθεύονται και οι τιμές του IRI, που υπολογίστηκαν παραπάνω.

Για να αποδειχθεί και εμπράκτως αυτό, θα γίνει υπολογισμός των τιμών RMS των υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD. Αυτό θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου στις αναλύσεις PSD των υψομετρικών αποκλίσεων, για τους κυματισμούς από 0,5 έως 100 m. Ειδικότερα, ο κανόνας του τραπεζίου βοηθάει στο χωρισμό

της περιοχής μεταξύ της καμπύλης και του άξονα x σε πολλά τραπέζια. Έπειτα υπολογίζεται το εμβαδόν κάθε τραπεζίου ξεχωριστά και στη συνέχεια προστίθενται όλα τα εμβαδά από κάθε περιοχή (βλ. [Εικόνα 3.16](#)). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι τιμές του δείκτη RMS υψομετρικών αποκλίσεων.

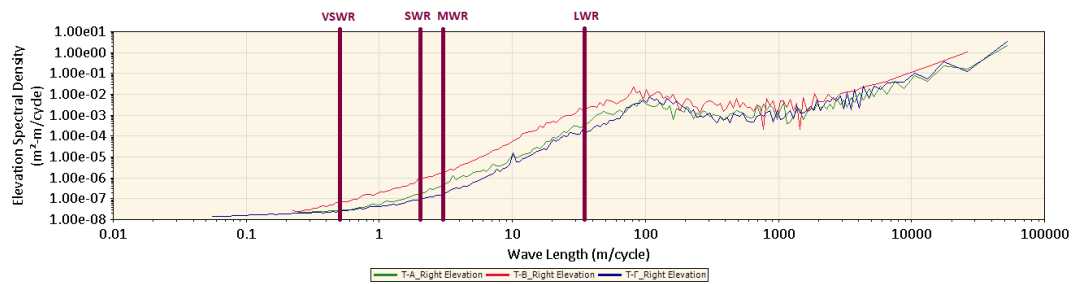
Οι τιμές των RMS δεν μπορούν να οδηγήσουν σε κάποιο συμπέρασμα μόνες τους γι' αυτό στις Περιπτώσεις Α και Β πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών RMS μεταξύ δύο προφίλ διαφορετικής ομαλότητας. Ωστόσο, πριν τη σύγκριση των δύο οδοστρωμάτων, επειδή τα δεδομένα δεν έχουν υποστεί κάποια προεπεξεργασία για ακριβέστερα αποτελέσματα κρίνεται απαραίτητο το φιλτράρισμα στους κυματισμούς των αναλύσεων PSD και έπειτα ο υπολογισμός των τιμών RMS. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα φίλτρα διέλευσης ζώνης Butterworth και IRI (προσομοίωση τετάρτου-οχήματος). Στον [Πίνακα 4.2](#) παρουσιάζονται οι κυματισμοί που περικόπτονται με τη χρήση των φίλτρων χαμηλής διέλευσης (low pass), ζώνης διέλευσης (band pass) και υψηλής διέλευσης (high pass).

Πίνακας 4.2. Κυματισμοί περικοπής με φίλτρα Butterworth

Φίλτρα Butterworth	Κυματισμοί (m)
Low Pass	$\leq 0,5$
Band Pass	$\leq 0,5$ & $35 \leq$
High Pass	$35 \leq$

Οι κυματισμοί περικοπής του [Πίνακα 4.2](#) επιλέχθηκαν με κριτήριο τους κυματισμούς που επηρεάζουν την κίνηση του οχήματος (0,5-35 m). Στην προκειμένη περίπτωση τα μήκη κύματος που θα εξετασθούν είναι από 0,5 m έως 100 m, έτσι το φιλτράρισμα με low pass θα παραλειφθεί. Επιπλέον θα γίνει επεξεργασία και με το φίλτρο IRI, για κινούμενο μέσο όρο 250 mm, το οποίο στην ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων ενισχύει την περιοχή των μεγάλων κυματισμών.

Τελικά, η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί ανά κυματική ζώνη. Συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί ότι διαφορετικά μήκη κυματισμών επηρεάζουν τις στρώσεις του οδοστρώματος. Στην [Εικόνα 4.4](#) παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες κυματικές ζώνες.

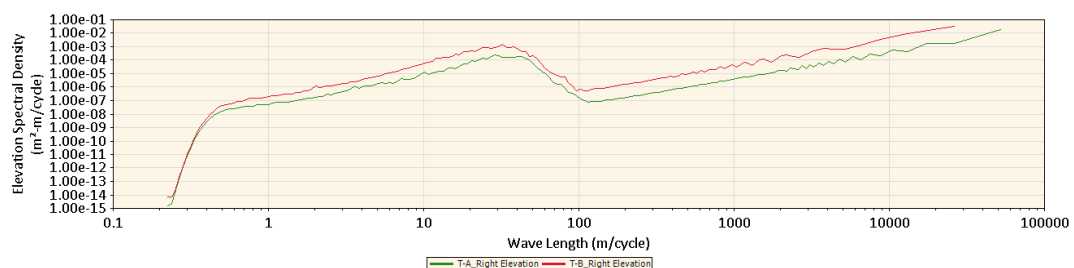


Εικόνα 4.4. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A, T-B και T-Γ και ο χωρισμός σε κυματικές ζώνες

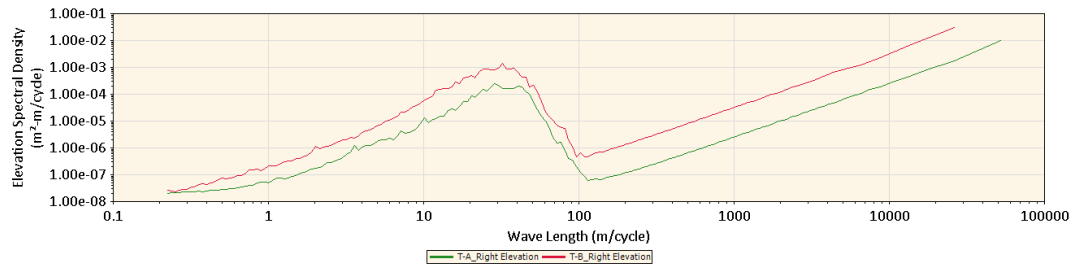
Οι επιφάνειες που θα εξεταστούν για κάθε ανάλυση PSD θα χωριστούν σε μικρά μήκη κύματος (SWR), από 0,5 έως 2 m, μεσαία μήκη κύματος (MWR), από 2 έως 3 m και μεγάλα μήκη κύματος (LWR), από 3 έως 35 m.

4.3 Περίπτωση Α

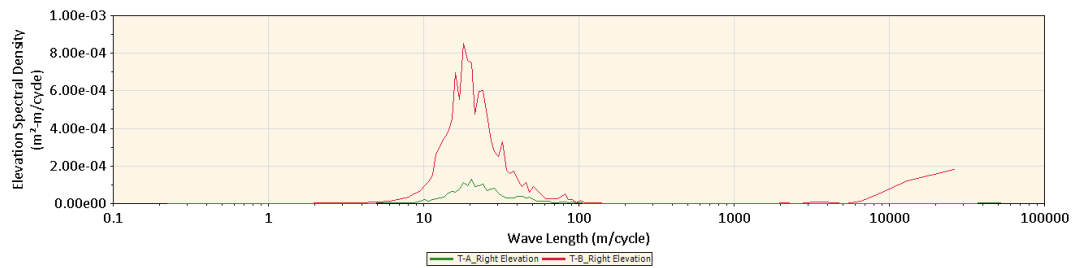
Στην Περίπτωση Α θα συγκριθούν οι αναλύσεις PSD για το T-A και T-B, θέτοντας ως οδόστρωμα αναφοράς το T-A, όντας αυτό με την καλύτερη ομαλότητα. Πρώτα απ'όλα θα γίνει διευρένηση για την επιλογή φίλτρου. Στις Εικόνες 4.5, 4.6 και 4.7 φαίνονται οι αναλύσεις PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-B έπειτα από φιλτραρίσματα band pass, high pass και IRI.



Εικόνα 4.5. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-B με φίλτρο band pass



Εικόνα 4.6. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-B με φίλτρο high pass



Εικόνα 4.7. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-B με φίλτρο IRI

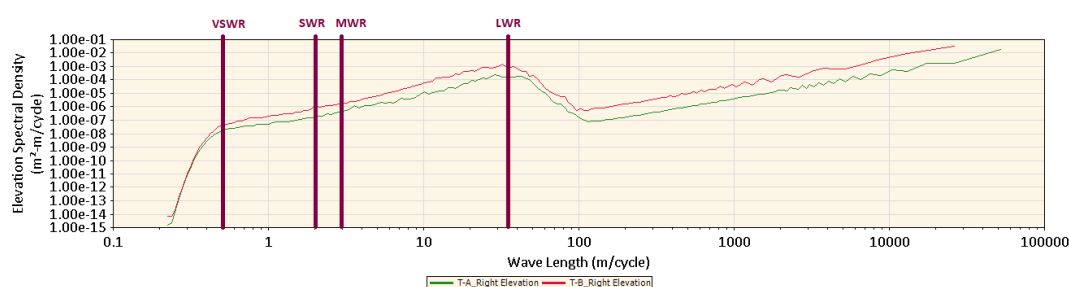
Έτσι, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζιού στις αναλύσεις PSD των υψομετρικών αποκλίσεων, για κάθε φίλτρο, που έγιναν για τα T-A και T-B, υπολογίστηκαν οι τιμές RMS για κυματισμούς από 0,5 έως 100 m (βλ. Παράρτημα Κεφάλαιο 7.2). Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται οι διαφορές των RMS, που καταλαμβάνουν οι αναλύσεις PSD των δύο προφίλ έπειτα από τα φιλτραρίσματα ζώνης διέλευσης (Band pass), υψηλής διέλευσης (High pass) και IRI.

Πίνακας 4.3. Τιμές διαφορών RMS των T-A και T-B έπειτα από φιλτράρισμα

Φίλτρα	Διαφορές RMS (m ²)
Band pass	126286.34 x 10 ⁻⁷
High pass	126196.12 x 10 ⁻⁷
IRI	116512.37 x 10 ⁻⁷

Οι διαφορές των τιμών RMS, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3, δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από φίλτρο σε φίλτρο. Έτσι δεν έχει ιδιαίτερη σημασία η επιλογή του φίλτρου, αφού τα αποτελέσματα με οποιοδήποτε φιλτράρισμα θα έχουν ελάχιστη ως μηδενική απόκλιση μεταξύ τους. Έτσι εδώ επιλέχθηκε το φίλτρο band pass για τη συγκεκριμένη ανάλυση.

Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζονται τα εξεταζόμενα προφίλ, T-A και T-B, έπειτα από φιλτράρισμα ζώνης διέλευσης (band pass) και χωρισμένο σε κυματικές ζώνες.



Εικόνα 4.8. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων έπειτα από φίλτρο ζώνης διέλευσης των T-A και T-B και ο χωρισμός τους σε κυματικές ζώνες

Για τα αποτελέσματα της ανάλυσης της Εικόνας 4.5 χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου, όπως προηγουμένως, υπολογίστηκαν οι τιμές RMS (βλ. Παράρτημα Κεφάλαιο 7.3). Η διαδικασία αυτή έγινε ξεχωριστά για τις περιοχές μικρών (0,5 έως 2 m, SWR), μεσαίων (2 έως 3 m, MWR) και μεγάλων (3 έως 35 m, LWR) κυματισμών, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ξεχωριστή σύγκριση για κάθε περιοχή.

Συγκρίνοντας τις τιμές RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD των T-A και T-B, ανά κυματική ζώνη, η τιμή RMS του T-B είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του T-A σε κάθε κυματική ζώνη. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι το T-B έχει πρόβλημα με την ομαλότητα σε όλη την έκτασή του συγκριτικά με το T-A. Χρησιμοποιώντας τις διαφορές των τιμών RMS των δύο οδοστρωμάτων για μικρούς, μεσαίους και μεγάλους κυματισμούς θα βρεθεί σε ποια στρώση του T-B οφείλεται το πρόβλημα της ομαλότητας. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των διαφορών των RMS των δύο οδοστρώματων, κάτω από τους μικρούς, τους μεσαίους και του μεγάλους κυματισμούς.

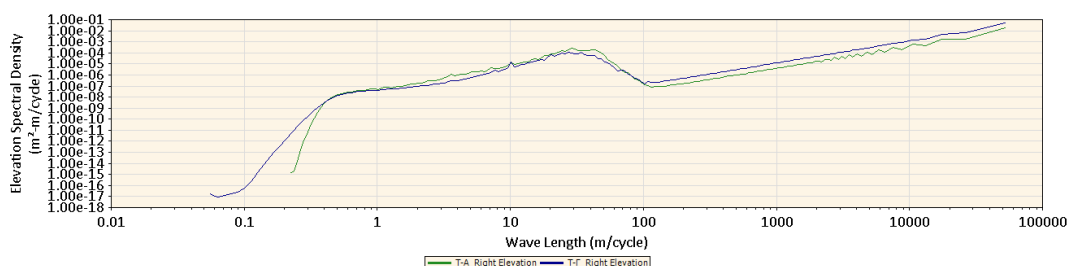
Πίνακας 4 4. Διαφορές των τιμών RMS των T-A και T-B στους επιμέρους κυματισμούς

Κυματισμοί	Διαφορές RMS (m ²)
SWR	2.023×10^{-7}
MWR	9.943×10^{-7}
LWR	103779×10^{-7}

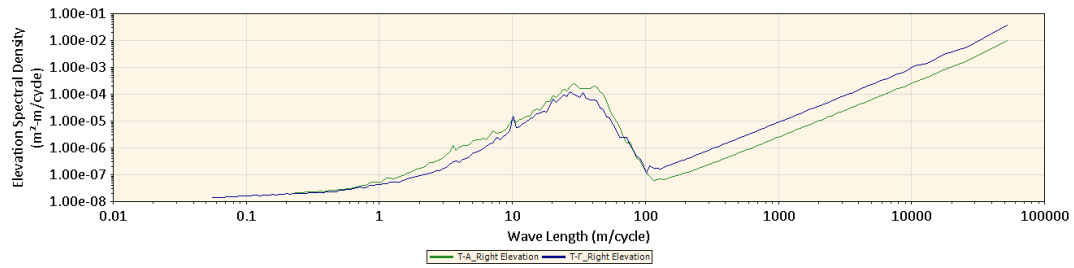
Αναλυτικότερα, η μεγαλύτερη διαφορά των τιμών RMS σημειώνεται για τους μεγάλους κυματισμούς. Εφόσον σημειώνεται αρκετή διαφορά και στους μικρούς και στους μεσαίους κυματισμούς κρίνεται ότι το T-B χρειάζεται ανακατασκευή. Σε περίπτωση που το χαμηλό επίπεδο ομαλότητας του T-B οφειλόταν αποκλειστικά στην περιοχή των μεγάλων κυματισμών δεν θα μπορούσε να βγει ακριβής διάγνωση γιατί η διαφορά στους μεγάλους κυματισμούς δύο οδοστρωμάτων μπορεί να είναι επηρεασμένη και από τις διαφορετικές υψομετρικές αποκλίσεις που επιφέρει ο γεωμετρικός σχεδιασμός δύο οδών. Όσον αφορά το T-A μπορεί να έχει ένα καλό δείκτη ομαλότητας IRI, αλλά για να μπορεί να χαρακτηριστεί με βεβαιότητα ως ομαλό οδόστρωμα χρειάζεται περαιτέρω έρευνα. Αυτή θα διεξαχθεί στο επόμενο Κεφάλαιο.

4.4 Περίπτωση Β

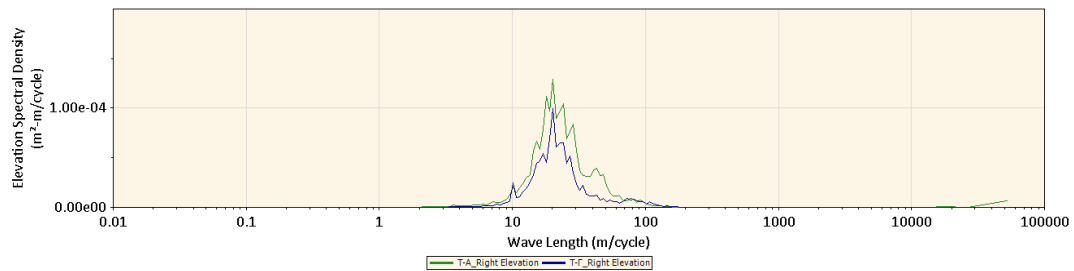
Στην περίπτωση αυτή θα τεθεί ως κριτήριο σύγκρισης το T-Γ, ως το ομαλότερο τμήμα ανάμεσα στα δύο. Όπως και στην περίπτωση της εξέτασης του T-B, πρώτα απ' όλα θα διεξαχθεί διερεύνηση για την επιλογή του φιλτραρίσματος, που θα υποστεί η ανάλυση PSD των T-A και T-Γ. Στις Εικόνες 4.9, 4.10 και 4.11 φαίνονται οι αναλύσεις PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-Γ έπειτα από φίλτραρίσματα band pass, high pass και IRI.



Εικόνα 4.9. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-Γ με φίλτρο band pass



Εικόνα 4.10. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-Γ με φίλτρο high pass



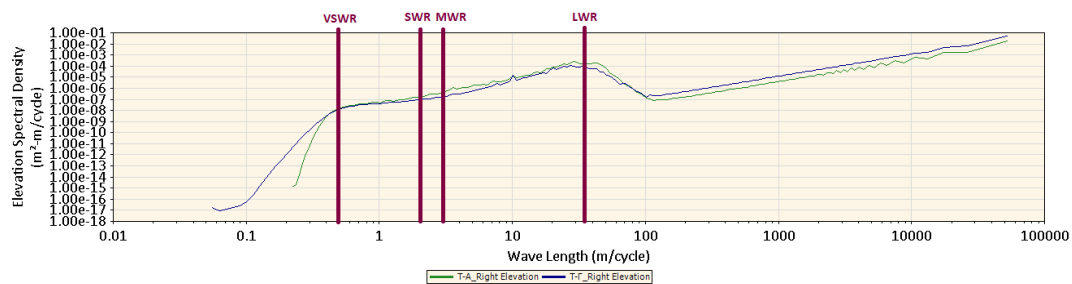
Εικόνα 4.11. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων των T-A και T-Γ με φίλτρο IRI

Με τον ίδιο τρόπο, που υπολογίστηκαν οι τιμές RMS για τα T-A και T-B μετά το φιλτράρισμα των κυματισμών των αναλύσεων PSD, υπολογίστηκαν και για τα T-A και T-Γ, για μήκη κύματος από 0,5 έως 100 m. (βλ. Παράρτημα Κεφάλαιο 7.2). Στον Πίνακα 4.5 αναγράφονται οι διαφορές των τιμών RMS, που καταλαμβάνουν οι αναλύσεις PSD των T-A και T-Γ έπειτα από την επεξεργασία με τα φίλτρα του proVAL (low pass, band pass και IRI) ξεχωριστά.

Πίνακας 4.5. Τιμές διαφορών RMS των T-A και T-Γ έπειτα από φιλτράρισμα

Φίλτρα	Διαφορές RMS (m ²)
Band pass	6089 x 10 ⁻⁷
High pass	6079 x 10 ⁻⁷
IRI	11293.93 x 10 ⁻⁷

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.5, συμπεραίνεται ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ ενώ οι διαφορές των τιμών RMS υψομετρικών αποκλίσεων των δύο αναλύσεων PSD για τα φίλτρα band pass και high pass είναι περίπου ίσες, η διαφορά με το φίλτρο IRI παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση, καθώς είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις διαφορές των υπόλοιπων δύο φίλτρων. Αυτό συμβαίνει επειδή με το φίλτρο IRI ενισχύονται οι μεγάλοι μήκους κυματισμοί (περίπου 3 έως 35 m) , δημιουργώντας μεγαλύτερη διαφορά των επιφανειών T-A και T-Γ, στην περιοχή όπου το T-A καταλαμβάνει μεγαλύτερη επιφάνεια από το T-Γ. Ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση οι κυματισμοί των αναλύσεων PSD θα φιλτραριστούν με το band pass, έτσι ώστε να γίνει ακριβέστερη η εξέταση σε κάθε ζώνη κυματισμών. Ο διαχωρισμός σε κυματικές ζώνες, της Εικόνας 4.9, στην οποία απεικονίζονται οι αναλύσεις PSD των T-A και T-Γ έπειτα από φιλτράρισμα band pass, αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.12.



Εικόνα 4.12. Ανάλυση PSD υψομετρικών αποκλίσεων έπειτα από φίλτρο ζώνης διέλευσης των T-A και T-Γ και χωρισμός σε κυματικές ζώνες

Ομοίως με πριν, υπολογίστηκαν οι τιμές RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD του T-Γ ξεχωριστά για τους μικρούς (SWR), τους μεσαίους (MWR) και τους μεγάλους (LWR) κυματισμούς, έτσι ώστε να συγκριθούν με τους αντίστοιχους κυματισμούς της ανάλυσης PSD του T-A (βλ. Παράρτημα Κεφάλαιο 7.3).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι το T-Γ βρίσκεται σε υψηλότερο επίπεδο ομαλότητας από το T-A σχεδόν σε όλο του το μήκος, πράγμα που είχε διαπιστωθεί και με τους δείκτες IRI. Συνεχίζοντας τη διερεύνηση σχετικά με την ομαλότητα του T-A υπολογίστηκε η συνολική διαφορά των τιμών RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD για τα T-A και T-Γ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.6.

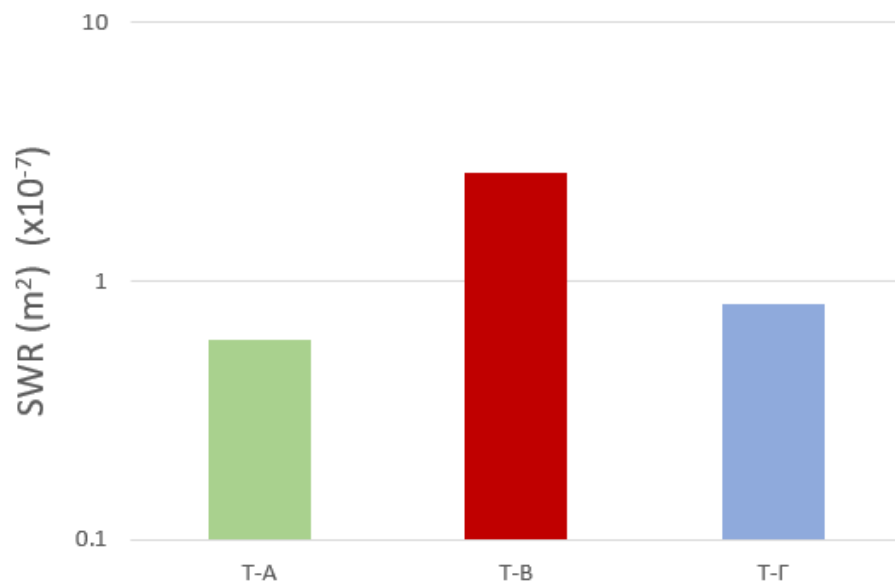
Πίνακας 4.6. Διαφορές των τιμών RMS των T-A και T-Γ στους επιμέρους κυματισμούς

Κυματισμοί	Διαφορές RMS (m ²)
SWR	(-) 0.23×10^{-7}
MWR	1.55×10^{-7}
LWR	5950×10^{-7}

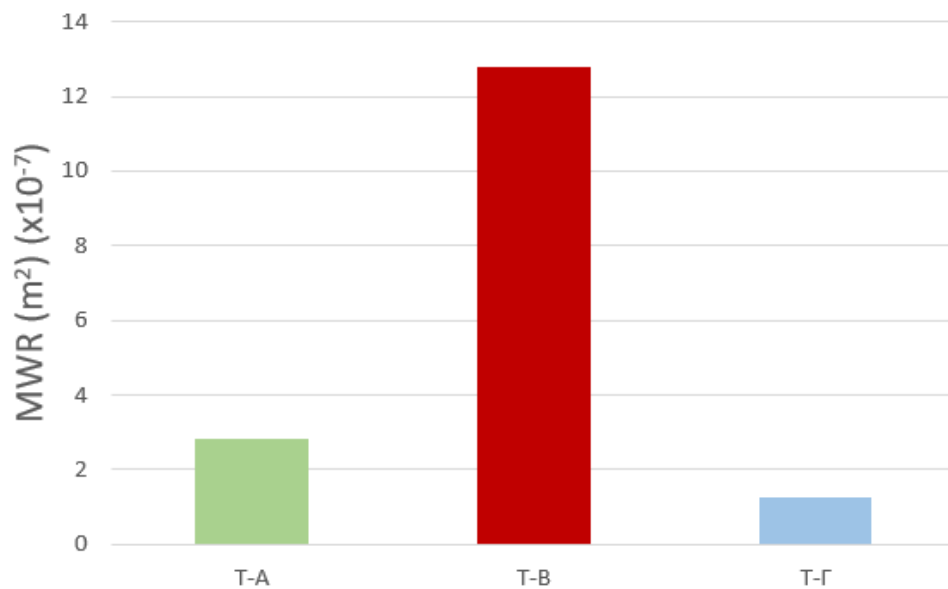
Από τον Πίνακα 4.6 είναι φανερό από το πρόσημο της διαφοράς ότι το T-Γ παρουσιάζει κακή ομαλότητα στους μικρούς κυματισμούς, αφού η ανάλυση PSD έχει μεγαλύτερη τιμή RMS από αυτή του T-A. Αυτό αυτόματα δηλώνει ότι το T-Γ, ένα εμφανώς ομαλό οδόστρωμα, αντιμετωπίζει πρόβλημα είτε στις άνω στρώσεις είτε στη βάση ή στην υπόβαση. Από την άλλη μεγαλύτερο πρόβλημα ομαλότητας αντιμετωπίζει το T-A εξαιτίας παραμορφώσεων στη βάση ή στην υπόβαση, αφού η διαφορά των τιμών RMS των αναλύσεων PSD είναι μεγαλύτερη στους μεσαίους κυματισμούς. Η μεγάλη διαφορά στους μεγάλους κυματισμούς δεν μπορεί να ληφθεί υπόψιν γιατί μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές υψομετρικές που επιφέρει ο γεωμετρικός σχεδιασμός.

4.5 Συνδυαστικά αποτελέσματα

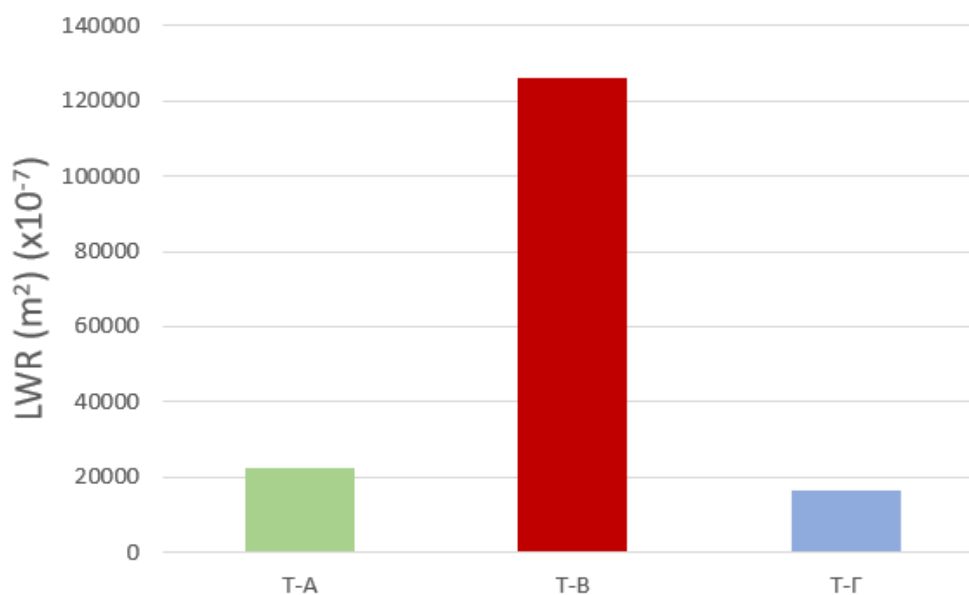
Στις παραπάνω περιπτώσεις βρέθηκαν οι στρώσεις που αντιμετωπίζουν πρόβλημα ομαλότητας, ακόμη και για τα οδοστρώματα με καλό δείκτη ομαλότητας IRI. Στις Εικόνες 4.13, 4.14 και 4.15 αποτυπώνονται οι τιμές RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD κάθε τμήματος ανά ζώνη κυματισμού, ενώ στον Πίνακα 4.7 οι αντίστοιχες τιμές.



Εικόνα 4.13. Οι τιμές των RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD των T-A, T-B και T-Γ για τα μικρά μήκη κύματος



Εικόνα 4.14. Οι τιμές των RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD των T-A, T-B και T-Γ για τα μεσαία μήκη κύματος



Εικόνα 4.15. Οι τιμές των RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD των T-A, T-B και T-Γ για τα μεγάλα μήκη κύματος

Πίνακας 4.7. Οι τιμές των RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD των T-A, T-B και T-Γ, ανά ζώνη κυματισμών

	T-A	T-B	T-Γ
SWR	0.5903×10^{-7}	2.61×10^{-7}	0.82×10^{-7}
MWR	2.82×10^{-7}	12.8×10^{-7}	1.27×10^{-7}
LWR	22150×10^{-7}	125929×10^{-7}	16200×10^{-7}

Είναι φανερό ότι χειρότερη ομαλότητα παρουσιάζει το T-B καθώς η τιμή RMS υψομετρικών αποκλίσεων της ανάλυσης PSD του είναι μεγαλύτερη σε όλες τις κυματικές ζώνες. Αν και το T-Γ, όπως έχει δείξει και ο δείκτης IRI, είναι το οδόστρωμα με την καλύτερη ομαλότητα, στους μικρούς κυματισμούς παρουσιάζει πρόβλημα αφού η τιμή του RMS υψομετρικών αποκλίσεων της ανάλυσης PSD του έρχεται δεύτερη σε σειρά συγκριτικά τις τιμές RMS των T-A και το T-B. Παρ' όλα αυτά για τις κυματικές ζώνες των μεσαίων και μεγάλων κυματισμών, είναι αυτό με την καλύτερη ομαλότητα. Από την άλλη το T-A παρουσιάζει πρόβλημα στις κυματικές ζώνες των μεσαίων και των μεγάλων κυματισμών. Οι κυματικές ζώνες, οι οποίες παρουσιάζουν πρόβλημα, δείχνουν και την αντίστοιχη στρώση η

οποία θα χρειαστεί επισκευή ή παρακολούθηση έτσι ώστε να μην επεκταθεί το πρόβλημα. Με άλλα λόγια το T-A θα χρειαστεί επισκευή στη βάση ή στην υπόβαση, θεωρώντας ότι η διαφορά των τιμών RMS στην περιοχή των μεγάλων κυματισμών με το T-Γ οφείλεται στις διαφορετικές υψομετρικές αποκλίσεις λόγω του γεωμετρικού σχεδιασμού. Αντίθετα, το T-B, το οποίο παρουσιάζει πρόβλημα σε κάθε στρώση χρειάζεται ανακατασκευή, ενώ για το T-Γ αρκεί παρακολούθηση ή μικροεπισκευές στις άνω στρώσεις του, έτσι ώστε να επιτευχθεί αύξηση στη διάρκεια ζωής του.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσαν οι παράμετροι που υπεισέρχονται στη δυναμική φασματική ανάλυση και αποτελούν βασικό κριτήριο αξιολόγησης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης, βρέθηκε ότι πέρα από το δείκτη IRI σημαντικό επίσης κριτήριο για την αξιολόγηση της ομαλότητας αποτελούν και οι κυματισμοί των επιφανειών ενός οδοστρώματος. Αναλυτικότερα, έγινε η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων από τρία τμήματα αυτοκινητοδρόμων 27 km, 21 km και 28 km, τα οποία αναφέρονται ως T-A, T-B και T-Γ, αντίστοιχα, και προήλθαν από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιΐας ΕΜΠ. Αφού έγινε η περιγραφή της ομαλότητας σε όλη τους την έκταση μέσω του δείκτη IRI, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αναλύσεων PSD τους, με χρήση των τιμών RMS υψομετρικών αποκλίσεων και βάσει των ζωνών κυματισμού, στις οποίες χωρίστηκαν οι αναλύσεις PSD, εντοπίστηκαν οι στρώσεις οι οποίες ευθύνονται για την μείωση της ομαλότητάς τους. Ο υπολογισμός του δείκτη IRI και η σύγκριση των αναλύσεων PSD των επιμέρους οδοστρωμάτων ανά κυματική ζώνη οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Ο υπολογισμός των IRI ανά 100 m, για τα τρία τμήματα, ανέδειξε το T-Γ ως το οδόστρωμα με το καλύτερο επίπεδο ομαλότητας, δεύτερο στην κατάταξη ήρθε το T-A με μικρή διαφορά, ενώ το T-B είχε το χειρότερο επιπέδο ομαλότητας. Σε περιπτώσεις οδοστρώματος χαμηλού επιπέδου ομαλότητας, στην προκειμένη περίπτωση το T-B, δεν προτείνεται αυτόματα ανακατασκευή ολόκληρης της διατομής του, παρ' όλα αυτά χρήζει έλεγχου της προέλευσης του προβλήματος.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα T-A και T-B βρέθηκε ότι παρουσιάζουν απόκλιση στις τιμές RMS υψομετρικών αναλύσεων σε κάθε κυματική ζώνη, με αυτή στη ζώνη των μεγάλων κυματισμών να ξεχωρίζει. Η παραπάνω παρατήρηση δεν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κακή ποιότητα της ομαλότητας του T-B οφείλεται σε παρομορφώσεις (ανύψωση ή καθίζηση) της στρώσης έδρασης, καθώς η μεγάλη απόκλιση των επιφανειών σε αυτή τη ζώνη μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές υψομετρικές αποκλίσεις που επιφέρει ο γεωμετρικός σχεδιασμός των οδών. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, επειδή η τιμή RMS υψομετρικών αποκλίσεων του T-B σε κάθε κυματική ζώνη είναι μεγαλύτερη, το T-B χρειάζεται ανακατασκευή. Στις περιπτώσεις που η κακή ποιότητα ομαλότητας, οφείλεται στη στρώση έδρασης κρίνεται απαραίτητη η ανακατασκευή ολόκληρου του οδοστρώματος, γι' αυτό θα πρέπει η αξιολόγηση της να γίνεται με απόλυτη ακρίβεια. Γενικά, όταν πρόκειται για ριζικές

αλλαγές στο οδόστρωμα θα πρέπει να υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα ότι λήφθηκε η σωστή απόφαση.

Αν και το T-A παρουσίασε έναν αρκετά μικρό δείκτη IRI, κοντά σε αυτόν του T-Γ, χρειάζεται μια ακριβέστερη ανάλυση, η οποία θα αναδείξει τυχόν προβλήματα ομαλότητας. Η σύγκριση των T-A και T-Γ έδειξε ότι το T-Γ παρουσιάζει χειρότερη ομαλότητα στους μικρούς κυματισμούς, ενώ για τους μεσαίους και τους μεγάλους το T-A είναι αυτό με τη χαμηλότερο επίπεδο ομαλότητας. Αυτό υποδεικνύει ότι ο δείκτης IRI προσφέρει μία βραχυπρόθεσμη αξιολόγηση του οδοστρώματος, ενώ για μία μακροπρόθεσμη αξιολόγηση η ανάλυση PSD μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες. Η ανάλυση PSD βοηθάει στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος, αφού με τη χρήση της γίνεται ο εντοπισμός της προβληματικής στρώσης, αλλά και ο χρόνος επέμβασης. Επιπρόσθετα, έχοντας ως μέτρο σύγκρισης ένα οδόστρωμα καλής ομαλότητας προσδιορίζεται η έκταση της ζημιάς.

Συνοψίζοντας, η χρήση της φασματικής ανάλυσης είναι ένας καλός τρόπος εντοπισμού των πιθανών αιτίων στα οποία οφείλονται τα μειωμένα επίπεδα ομαλότητας. Η συγκεκριμένη ανάλυση είναι αρκετά σημαντική αφού δίνει πληροφορία σε τι βάθος θα γίνει η επέμβαση στη διατομή του οδοστρώματος. Επιπλέον, ένα οδόστρωμα δεν θα πρέπει να χαρακτηρίζεται αποκλειστικά από ένα δείκτη ομαλότητας, αλλά θα πρέπει να ερευνάται διεξοδικά, για την άμεση αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με την απώλεια ομαλότητας. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα. Ακόμη, όταν τα δεδομένα ενός οδοστρώματος δεν έχουν υποστεί προεπεξεργασία, οι κυματισμοί της ανάλυσης PSD του θα πρέπει να φιλτράρονται έτσι ώστε να πραγματοποιείται μια πιο ορθή αξιολόγηση. Ο συνδυασμός του δείκτη IRI με την ανάλυση PSD ενός οδοστρώματος φαίνεται να δίνει επαρκείς πληροφορίες, αλλά και τα πιθανά αίτια χαμηλού επιπέδου ομαλότητας.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων του δείκτη RMS υψομετρικών αποκλίσεων των αναλύσεων PSD, έτσι ώστε να καταταχθεί σε μία κλίμακα με βάση την οποία θα αξιολογούνται τα οδοστρώματα. Αυτή η κλίμακα είτε θα αφορά όλους τους κυματισμούς της επιφάνειας του οδοστρώματος, είτε επιμέρους τις κυματικές ζώνες ενδιαφέροντος. Μία τέτοια κλίμακα θα προσέδιδε θετικά στην αξιολόγηση των οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησής τους. Επιπλέον, η περαιτέρω διερεύνηση όσον αφορά στο συσχετισμό των παχών των επιμέρους στρώσεων με τις κυματικές ζώνες της επιφάνειας ενός οδοστρώματος πιστεύεται ότι θα στοιχειοθετήσει τον

ακριβέστερο προσδιορισμό του βάθους προέλευσης ενδεχομένων προβλημάτων ομαλότητας.

6. Βιβλιογραφία

www.smoothpavements.com

Bae, A. and Stoffels, S. M. (2017) 'Pavement Roughness Index Impact for Specific Wavebands and Causative Factors', *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), pp. 1764–1773. doi: 10.1007/s12205-016-0551-0.

Barnes, G. and Langworthy, P. (2003) 'The Per-Mile Costs of Operating Automobiles and Trucks', (MN/RC 2003-19), p. 46. Available at: <http://www.lrrb.gen.mn.us/PDF/200319.pdf>.

Barnes, G. and Langworthy, P. (2004) 'Per Mile Costs of Operating Automobiles and Trucks', *Transportation Research Record*, (1864), pp. 71–77. doi: 10.3141/1864-10.

Brokaw, M. P. (1967) 'Development of the PCA Road Meter: A Rapid Method for Measuring Slope Variance', *Hrr* 189, p. 12.

Brown, D., Liu, W. and Henning, T. F. P. (2010) 'Identifying Pavement Deterioration by Enhancing the Definition of Road Roughness'. Available at: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.

Burns, J. C. (1981) 'Roughness and Roadway Safety', *Transportation Research Record*, 836, pp. 8–14.

Cafiso, S. et al. (2019) 'Distress and Profile Data Analysis for Condition Assessment in Pavement Management Systems', *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(5), pp. 527–536. doi: 10.1007/s42947-019-0063-7.

Chang, G. K., Dick, J. C. and Rasmussen, R. O. (2006) 'User's Guide Version 6.0.4', p. 663.

'Chapter 2 Surface Characteristics' (2007), II, pp. 1–28.

Cossale, G., Elliott, R. and Widyatmoko, I. (2013) 'The Importance of Road Surface Texture in Active Safety Design and the Importance of Road Surface Texture in Active Road Safety Design and Assessment.', *International Conference Road Safety and Simulation*, (December).

Evans, R. P. (2013) 'Synchronisation of Road Profile Data and the Assessment of Road Roughness Using Waveband Analysis'.

Gillespie, T. D. (1992) 'Everything You Wanted to Know about Privacy, But Were Afraid to Ask!', *IEEE Security & Privacy Magazine*, 4(3), pp. 5–5. doi: 10.1109/msp.2006.65.

Hassan, R. A., McManus, K. J. and Evans, R. P. (1998) 'Roughness Waveband Characteristics as an Indicator of Pavement Deterioration'.

Hassan, R., McManus, K. and Holden, J. (1999) 'Predicting Pavement Deterioration Modes Using Waveband Analysis', (38), pp. 181–187.

Hegmon, R. R. (1979) 'Definition and Measurement of Pavement Surface Roughness', *Wear*, 57(1), pp. 127–136. doi: 10.1016/0043-1648(79)90146-7.

- Huang, W. (2006) 'Transferring Alabama's Smoothness Specifications from PI-Based to IRI-Based', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 21–25. Available at: <http://www.elsevier.com/locate/scp>.
- Islam, S. et al. (2014) 'Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application', *Transportation Research Record*, 2457, pp. 30–38. doi: 10.3141/2457-04.
- Loizos, A. and Plati, C. (2008) 'An Alternative Approach to Pavement Roughness Evaluation', *International Journal of Pavement Engineering*, 9(1), pp. 69–78. doi: 10.1080/10298430600949894.
- Looft, F. et al. (2007) 'Automated GPS Mapping of Road Roughness', pp. 1–180.
- Mann, A. V., McManus, K. J. and Holden, J. C. (1997) 'Power Spectral Density Analysis of Road Profiles for Road Defect Assessment', *Road and Transport Research*, 6(3), pp. 36–46.
- McLean, J. and Ramsay, E. (1996) 'Interpretations of Road Profile-Roughness Data: Review and Research Needs', *Research Report ARR*, 7(295), pp. 1–25.
- Pawar, P. R., Mathew, A. T. and Saraf, M. R. (2018) 'IRI (International Roughness Index): An Indicator of Vehicle Response', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 5(5), pp. 11738–11750. doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.143.
- Perera, R. W. and Kohn, S. D. (2002) 'Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report', *NCHRP Web Document*, 42.
- Perera, R. W., Kohn, S. D. and Tayabji, S. (2005) 'Achieving a High Level of Smoothness in Concrete Pavements Without Sacrificing Long-Term Performance', *Fhwa-Hrt-05-068*. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/05068/002.cfm>.
- Pitoňák, M. and Filipovsky, J. (2016) 'GPR Application - Non-Destructive Technology for Verification of Thicknesses of Newly Paved Roads in Slovakia', *Procedia Engineering*, 153, pp. 537–549. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.184.
- Raju, C. S. B., Kumar, M. A. and Raju, G. V. R. P. (2012) 'Performance Study of Flexible Pavements on Non Expansive Soils', 2(8), pp. 11–23.
- Ruiz, J. M. et al. (2008) 'Use of Slab Curvature and ProVAL to Identify the Cause of Premature Distresses', *Transportation Research Record*, (2068), pp. 87–96. doi: 10.3141/2068-10.
- Sayers, M. W. (1989) 'Two Quarter-Car Models for Defining Road Roughness: IRI and HRI', *Transportation Research Record*, (1215), pp. 165–172.
- Sayers, M. W. (1995) 'On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile', *Transportation Research Record*.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Queiroz, C. A. V. (1986) 'The International Road Roughness Experiment: A Basis for Establishing a Standard Scale for Road Roughness Measurements', *Transportation Research Record*, pp. 76–85.
- Sayers, M. W. and Karamihas, S. (1996) 'Interpretation of Road Roughness Profile Data', *Federal Highway Administration*, (June), p. 177. doi: 10.1.1.40.5876.

Sayers, M. W. and Karamihas, S. M. (1998) 'The Little Book of Profiling', Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, (September), p. 100.

Smith, K. L. et al. (1997) 'Effect of Initial Pavement Smoothness on Future Smoothness and Pavement Life', (971146), pp. 60–69.

Smith, K. and Ram, P. (2016) 'Measuring and Specifying Pavement Smoothness'. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif16032.pdf>.

UMTRI (1997) 'RoadRuf User Reference Manual', October, (October).

Wang, H. (2006) 'Road Profiler Performance Evaluation and Accuracy Criteria Analysis', Transportation Research, (540), pp. 1–19.

Xu, D. M. and Yong, R. N. (1992) 'Development of a Criterion for Road Surface Roughness Based on Power Spectral Density Function', 29(4), pp. 477–486.

Λοΐζος, Α., Πλατή, Χ., και Κανελλαΐδης, Γ. (2005) 'Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε Σχέση με τους Κυματισμούς της επιφάνειας των οδών', pp. 18–20.

www.amesengineering.com

www.pavementinteractive.org

<https://arrbsystemssa.com/walking-profiler-g3.html>

https://epg.modot.org/index.php/Category:610_Pavement_Smoothness

<https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/californiatestmethods-ctm/ctm-526-apr2002-a11y.pdf>

www.piarc.org/en/

www.iso.org/home.html

www.fhwa.dot.gov/about/org/

7. Παράρτημα

7.1 Πίνακες IRI

Πίνακας 7.1. Τιμές IRI ανά 100m για T-A

T-A			
Αρχή (m)	Τέλος (m)	Μήκος (m)	IRI (m/km)
0	100	100	0.9545603
100	200	100	1.546361
200	300	100	0.8350392
300	400	100	0.7191795
400	500	100	1.072745
500	600	100	1.492568
600	700	100	1.320225
700	800	100	0.7912377
800	900	100	0.8314751
900	1000	100	0.883494
1000	1100	100	1.199962
1100	1200	100	0.6763377
1200	1300	100	0.7205071
1300	1400	100	0.6567426
1400	1500	100	1.031887
1500	1600	100	1.124393
1600	1700	100	1.27504
1700	1800	100	1.139849
1800	1900	100	0.8179107
1900	2000	100	1.033465
2000	2100	100	1.009006
2100	2200	100	0.9892096
2200	2300	100	1.049844
2300	2400	100	0.9303595
2400	2500	100	0.956605
2500	2600	100	1.49264
2600	2700	100	1.457938
2700	2800	100	1.093876
2800	2900	100	1.35124
2900	3000	100	1.05313
3000	3100	100	1.011234
3100	3200	100	1.121698

3200	3300	100	1.122344
3300	3400	100	0.8674606
3400	3500	100	0.8741109
3500	3600	100	1.100977
3600	3700	100	1.172094
3700	3800	100	1.175547
3800	3900	100	1.771208
3900	4000	100	1.201334
4000	4100	100	1.075994
4100	4200	100	1.186826
4200	4300	100	1.233886
4300	4400	100	1.118744
4400	4500	100	1.393853
4500	4600	100	1.289253
4600	4700	100	0.9726573
4700	4800	100	0.9901533
4800	4900	100	0.9434186
4900	5000	100	1.144931
5000	5100	100	1.226115
5100	5200	100	1.021848
5200	5300	100	1.092092
5300	5400	100	1.173724
5400	5500	100	1.070228
5500	5600	100	1.078879
5600	5700	100	1.050699
5700	5800	100	1.488071
5800	5900	100	1.113778
5900	6000	100	2.049207
6000	6100	100	1.027245
6100	6200	100	0.9252528
6200	6300	100	1.018169
6300	6400	100	1.25824
6400	6500	100	1.228574
6500	6600	100	2.067543
6600	6700	100	1.382487
6700	6800	100	1.47986
6800	6900	100	1.444049
6900	7000	100	1.821944
7000	7100	100	1.718938
7100	7200	100	1.237762
7200	7300	100	1.209244
7300	7400	100	1.430511
7400	7500	100	1.489721
7500	7600	100	1.406769

7600	7700	100	1.580071
7700	7800	100	1.452883
7800	7900	100	1.182787
7900	8000	100	1.014387
8000	8100	100	1.070852
8100	8200	100	1.049692
8200	8300	100	0.8855557
8300	8400	100	0.8281746
8400	8500	100	0.8427426
8500	8600	100	0.7969838
8600	8700	100	0.7385187
8700	8800	100	0.7094066
8800	8900	100	0.9168802
8900	9000	100	0.8774109
9000	9100	100	1.276079
9100	9200	100	1.039961
9200	9300	100	0.7901397
9300	9400	100	0.7355127
9400	9500	100	0.7289048
9500	9600	100	0.6596373
9600	9700	100	0.7053717
9700	9800	100	0.7589346
9800	9900	100	1.234012
9900	10000	100	1.590879
10000	10100	100	1.119925
10100	10200	100	1.207139
10200	10300	100	1.155145
10300	10400	100	0.994845
10400	10500	100	1.11759
10500	10600	100	0.9494306
10600	10700	100	0.8347967
10700	10800	100	1.159029
10800	10900	100	1.545671
10900	11000	100	1.273011
11000	11100	100	1.688895
11100	11200	100	1.199125
11200	11300	100	0.9092423
11300	11400	100	0.8924877
11400	11500	100	1.075937
11500	11600	100	1.461273
11600	11700	100	0.8957098
11700	11800	100	0.7750933
11800	11900	100	0.9471721
11900	12000	100	0.9565957

12000	12100	100	1.472427
12100	12200	100	1.099715
12200	12300	100	1.207065
12300	12400	100	0.9595533
12400	12500	100	0.8767217
12500	12600	100	1.268155
12600	12700	100	0.9474217
12700	12800	100	0.9980768
12800	12900	100	0.8535892
12900	13000	100	1.245454
13000	13100	100	0.9635903
13100	13200	100	0.7003862
13200	13300	100	0.9315957
13300	13400	100	1.545406
13400	13500	100	1.397384
13500	13600	100	1.313258
13600	13700	100	0.8833436
13700	13800	100	1.337318
13800	13900	100	1.014862
13900	14000	100	0.9884173
14000	14100	100	1.300755
14100	14200	100	0.9184778
14200	14300	100	1.057178
14300	14400	100	0.8274624
14400	14500	100	1.504058
14500	14600	100	1.886293
14600	14700	100	1.29651
14700	14800	100	1.136367
14800	14900	100	1.389669
14900	15000	100	0.9575554
15000	15100	100	1.074034
15100	15200	100	1.273783
15200	15300	100	1.197457
15300	15400	100	1.346594
15400	15500	100	1.014211
15500	15600	100	1.463563
15600	15700	100	1.005996
15700	15800	100	1.154134
15800	15900	100	1.193624
15900	16000	100	1.044834
16000	16100	100	1.08124
16100	16200	100	1.182164
16200	16300	100	1.172558
16300	16400	100	1.168669

16400	16500	100	1.052276
16500	16600	100	1.296925
16600	16700	100	1.064742
16700	16800	100	0.9677527
16800	16900	100	1.407634
16900	17000	100	1.460783
17000	17100	100	2.709479
17100	17200	100	1.83357
17200	17300	100	1.261548
17300	17400	100	1.014418
17400	17500	100	1.318647
17500	17600	100	1.154445
17600	17700	100	1.304596
17700	17800	100	1.10786
17800	17900	100	1.190914
17900	18000	100	1.340133
18000	18100	100	1.153735
18100	18200	100	1.059101
18200	18300	100	0.9589924
18300	18400	100	1.113395
18400	18500	100	1.424081
18500	18600	100	0.8237579
18600	18700	100	0.8078461
18700	18800	100	0.9079135
18800	18900	100	1.084246
18900	19000	100	1.259735
19000	19100	100	0.9865015
19100	19200	100	0.7685615
19200	19300	100	0.8086537
19300	19400	100	0.8834459
19400	19500	100	0.9650298
19500	19600	100	1.041363
19600	19700	100	0.9419431
19700	19800	100	0.8763951
19800	19900	100	1.671753
19900	20000	100	1.293922
20000	20100	100	1.938609
20100	20200	100	1.496746
20200	20300	100	1.278674
20300	20400	100	1.19483
20400	20500	100	0.8964801
20500	20600	100	0.8772818
20600	20700	100	1.008868
20700	20800	100	1.074459

20800	20900	100	0.9201904
20900	21000	100	1.248843
21000	21100	100	1.647972
21100	21200	100	1.567824
21200	21300	100	1.126841
21300	21400	100	1.011269
21400	21500	100	1.287634
21500	21600	100	1.632449
21600	21700	100	1.333568
21700	21800	100	1.992842
21800	21900	100	1.479361
21900	22000	100	1.286324
22000	22100	100	1.698799
22100	22200	100	1.067752
22200	22300	100	1.21073
22300	22400	100	1.369156
22400	22500	100	1.290683
22500	22600	100	1.198838
22600	22700	100	1.408237
22700	22800	100	1.199514
22800	22900	100	0.9815194
22900	23000	100	1.162357
23000	23100	100	1.248852
23100	23200	100	1.262929
23200	23300	100	1.122365
23300	23400	100	1.114038
23400	23500	100	1.094063
23500	23600	100	0.8578757
23600	23700	100	0.9173392
23700	23800	100	1.19353
23800	23900	100	1.315262
23900	24000	100	1.054825
24000	24100	100	1.075237
24100	24200	100	1.062785
24200	24300	100	1.107756
24300	24400	100	1.739654
24400	24500	100	1.215412
24500	24600	100	1.103643
24600	24700	100	1.208553
24700	24800	100	1.088423
24800	24900	100	0.9028379
24900	25000	100	0.9489553
25000	25100	100	0.8751228
25100	25200	100	1.026482

25200	25300	100	1.256041
25300	25400	100	1.582244
25400	25500	100	1.178019
25500	25600	100	1.278747
25600	25700	100	1.896336
25700	25800	100	2.210402
25800	25900	100	1.828685
25900	26000	100	2.033281
26000	26100	100	1.503658
26100	26200	100	1.024522
26200	26300	100	1.04229
26300	26400	100	1.838329
26400	26500	100	1.590072
26500	26511.1	10.8	1.092014

Πίνακας 7.2. Τιμές IRI ανά 100m για T-B

T-B			
Αρχή (m)	Τέλος (m)	Μήκος (m)	IRI (m/km)
0	100	100	2.258651
100	200	100	2.38308
200	300	100	2.087507
300	400	100	1.158495
400	500	100	1.274271
500	600	100	1.355895
600	700	100	1.487463
700	800	100	1.947812
800	900	100	1.943931
900	1000	100	1.78731
1000	1100	100	1.959371
1100	1200	100	1.812346
1200	1300	100	2.277675
1300	1400	100	1.901763
1400	1500	100	1.613401
1500	1600	100	2.707907
1600	1700	100	1.856359
1700	1800	100	2.560618
1800	1900	100	1.667526
1900	2000	100	1.70427
2000	2100	100	2.028947
2100	2200	100	3.653167
2200	2300	100	2.528991
2300	2400	100	2.894425

2400	2500	100	2.220461
2500	2600	100	2.076053
2600	2700	100	1.433764
2700	2800	100	2.886129
2800	2900	100	2.753724
2900	3000	100	1.788758
3000	3100	100	4.102426
3100	3200	100	4.958384
3200	3300	100	3.000239
3300	3400	100	1.873201
3400	3500	100	1.945015
3500	3600	100	2.099043
3600	3700	100	1.527535
3700	3800	100	1.771181
3800	3900	100	1.418943
3900	4000	100	1.381194
4000	4100	100	1.712194
4100	4200	100	1.795381
4200	4300	100	2.002023
4300	4400	100	3.470318
4400	4500	100	2.392186
4500	4600	100	2.124333
4600	4700	100	2.207446
4700	4800	100	3.471638
4800	4900	100	3.61679
4900	5000	100	2.212694
5000	5100	100	2.557265
5100	5200	100	3.195505
5200	5300	100	4.399537
5300	5400	100	2.137293
5400	5500	100	2.645597
5500	5600	100	2.438914
5600	5700	100	2.581863
5700	5800	100	1.605448
5800	5900	100	2.22661
5900	6000	100	1.708325
6000	6100	100	2.406081
6100	6200	100	2.173659
6200	6300	100	1.793325
6300	6400	100	2.480757
6400	6500	100	1.48141
6500	6600	100	2.308187
6600	6700	100	1.934268
6700	6800	100	1.550999

6800	6900	100	1.655046
6900	7000	100	3.214748
7000	7100	100	2.942844
7100	7200	100	2.975384
7200	7300	100	1.998151
7300	7400	100	1.847206
7400	7500	100	1.815652
7500	7600	100	2.756611
7600	7700	100	3.443417
7700	7800	100	3.230576
7800	7900	100	2.97318
7900	8000	100	4.909167
8000	8100	100	2.652652
8100	8200	100	2.983536
8200	8300	100	2.104576
8300	8400	100	2.885079
8400	8500	100	2.6344
8500	8600	100	1.808041
8600	8700	100	1.906527
8700	8800	100	1.290342
8800	8900	100	1.505942
8900	9000	100	1.811354
9000	9100	100	2.377294
9100	9200	100	2.017982
9200	9300	100	1.830091
9300	9400	100	1.994297
9400	9500	100	2.056427
9500	9600	100	1.521249
9600	9700	100	1.443987
9700	9800	100	1.633792
9800	9900	100	1.336607
9900	10000	100	2.229769
10000	10100	100	1.868304
10100	10200	100	3.667285
10200	10300	100	1.482342
10300	10400	100	1.823116
10400	10500	100	1.737844
10500	10600	100	2.251116
10600	10700	100	3.367833
10700	10800	100	4.160053
10800	10900	100	4.627445
10900	11000	100	4.615144
11000	11100	100	5.760621
11100	11200	100	4.297891

11200	11300	100	3.37657
11300	11400	100	4.538593
11400	11500	100	2.75074
11500	11600	100	2.714758
11600	11700	100	2.4767
11700	11800	100	2.618876
11800	11900	100	2.991795
11900	12000	100	2.897812
12000	12100	100	1.62606
12100	12200	100	1.759552
12200	12300	100	1.718151
12300	12400	100	1.922123
12400	12500	100	1.855121
12500	12600	100	1.670829
12600	12700	100	2.539875
12700	12800	100	2.32443
12800	12900	100	1.952553
12900	13000	100	1.862252
13000	13100	100	3.643914
13100	13200	100	2.867531
13200	13300	100	2.180572
13300	13400	100	3.071468
13400	13500	100	2.148142
13500	13600	100	1.366876
13600	13700	100	2.364552
13700	13800	100	1.775632
13800	13900	100	2.845872
13900	14000	100	2.161159
14000	14100	100	3.938323
14100	14200	100	2.357498
14200	14300	100	3.062839
14300	14400	100	2.140602
14400	14500	100	2.247356
14500	14600	100	1.920967
14600	14700	100	3.575231
14700	14800	100	3.39545
14800	14900	100	1.444632
14900	15000	100	1.019374
15000	15100	100	1.621283
15100	15200	100	0.9648523
15200	15300	100	1.774321
15300	15400	100	2.785237
15400	15500	100	2.999856
15500	15600	100	1.858433

15600	15700	100	1.937891
15700	15800	100	1.983739
15800	15900	100	2.82509
15900	16000	100	2.86828
16000	16100	100	2.729792
16100	16200	100	3.026516
16200	16300	100	2.198571
16300	16400	100	1.735831
16400	16500	100	1.280423
16500	16600	100	1.616189
16600	16700	100	2.075496
16700	16800	100	1.607229
16800	16900	100	2.284908
16900	17000	100	1.883908
17000	17100	100	2.038102
17100	17200	100	3.374006
17200	17300	100	4.711885
17300	17400	100	2.798648
17400	17500	100	4.029059
17500	17600	100	2.620072
17600	17700	100	2.969389
17700	17800	100	3.655406
17800	17900	100	3.549824
17900	18000	100	1.49136
18000	18100	100	1.710768
18100	18200	100	2.569966
18200	18300	100	1.345848
18300	18400	100	2.518686
18400	18500	100	2.113124
18500	18600	100	2.09402
18600	18700	100	3.394824
18700	18800	100	2.937637
18800	18900	100	3.271042
18900	19000	100	4.074761
19000	19100	100	2.226473
19100	19200	100	1.640572
19200	19300	100	4.964458
19300	19400	100	3.589137
19400	19500	100	3.190864
19500	19600	100	2.66354
19600	19700	100	2.559435
19700	19800	100	1.474364
19800	19900	100	2.720318
19900	20000	100	1.602208

20000	20100	100	1.543111
20100	20200	100	1.831204
20200	20300	100	2.137889
20300	20400	100	1.489042
20400	20500	100	2.317752
20500	20600	100	1.967265
20600	20700	100	3.657288
20700	20800	100	2.559943
20800	20900	100	3.265476
20900	20961.8	61.5	2.997145

Πίνακας 7.3. Τιμές IRI ανά 100m για T-Γ

T-Γ			
Αρχή (m)	Τέλος (m)	Μήκος (m)	IRI (m/km)
0	100	100	0.8400712
100	200	100	0.9028884
200	300	100	1.4250711
300	400	100	0.8713906
400	500	100	0.9040855
500	600	100	0.9042842
600	700	100	0.6503111
700	800	100	0.7452647
800	900	100	0.7226267
900	1000	100	0.8101007
1000	1100	100	1.0085013
1100	1200	100	0.8504634
1200	1300	100	0.8090477
1300	1400	100	0.9078639
1400	1500	100	1.0181119
1500	1600	100	0.7423242
1600	1700	100	0.8014628
1700	1800	100	0.8282327
1800	1900	100	0.8263642
1900	2000	100	0.8946772
2000	2100	100	1.1172225
2100	2200	100	0.6754634
2200	2300	100	0.7209145
2300	2400	100	0.7731078
2400	2500	100	1.1789958
2500	2600	100	0.8315667
2600	2700	100	0.6849135
2700	2800	100	0.765986

2800	2900	100	0.9734179
2900	3000	100	0.799124
3000	3100	100	0.833864
3100	3200	100	0.7088913
3200	3300	100	0.7647342
3300	3400	100	1.1548747
3400	3500	100	0.8078527
3500	3600	100	0.9617997
3600	3700	100	1.0464915
3700	3800	100	1.5654368
3800	3900	100	0.6440023
3900	4000	100	0.9813071
4000	4100	100	0.9885641
4100	4200	100	1.200238
4200	4300	100	0.713969
4300	4400	100	0.9225261
4400	4500	100	1.0017414
4500	4600	100	0.693153
4600	4700	100	0.6743824
4700	4800	100	0.8563809
4800	4900	100	0.9657625
4900	5000	100	0.8078899
5000	5100	100	0.7341352
5100	5200	100	0.705296
5200	5300	100	0.8519866
5300	5400	100	0.8343003
5400	5500	100	0.8957811
5500	5600	100	0.8480707
5600	5700	100	0.858262
5700	5800	100	1.0269794
5800	5900	100	1.3830853
5900	6000	100	0.8532177
6000	6100	100	0.9585935
6100	6200	100	1.2164825
6200	6300	100	1.4173828
6300	6400	100	1.3927079
6400	6500	100	1.5131739
6500	6600	100	1.3532875
6600	6700	100	1.1284933
6700	6800	100	0.8965241
6800	6900	100	0.8403605
6900	7000	100	0.8805092
7000	7100	100	0.9193981
7100	7200	100	1.0235196

7200	7300	100	1.2761382
7300	7400	100	1.0030618
7400	7500	100	1.0986433
7500	7600	100	1.2628475
7600	7700	100	1.4861736
7700	7800	100	0.7974225
7800	7900	100	1.5156938
7900	8000	100	1.0188011
8000	8100	100	0.8793883
8100	8200	100	0.8691669
8200	8300	100	0.6895311
8300	8400	100	0.6175405
8400	8500	100	0.6361653
8500	8600	100	0.7045595
8600	8700	100	0.6436415
8700	8800	100	0.7208158
8800	8900	100	0.7327083
8900	9000	100	0.6860477
9000	9100	100	0.5642823
9100	9200	100	0.7779381
9200	9300	100	0.6859928
9300	9400	100	0.562185
9400	9500	100	0.8433666
9500	9600	100	1.005069
9600	9700	100	0.7407871
9700	9800	100	0.6326697
9800	9900	100	0.8905023
9900	10000	100	0.723196
10000	10100	100	0.7475907
10100	10200	100	0.7433245
10200	10300	100	0.8196946
10300	10400	100	0.8262058
10400	10500	100	0.7052537
10500	10600	100	1.1684046
10600	10700	100	0.8431718
10700	10800	100	0.6139068
10800	10900	100	0.8383027
10900	11000	100	0.739489
11000	11100	100	0.7217898
11100	11200	100	0.7374026
11200	11300	100	0.6406577
11300	11400	100	0.9518532
11400	11500	100	0.6443422
11500	11600	100	0.5887079

11600	11700	100	0.5964645
11700	11800	100	0.8174465
11800	11900	100	0.5445833
11900	12000	100	0.5746681
12000	12100	100	0.6852033
12100	12200	100	0.6598206
12200	12300	100	0.6025412
12300	12400	100	0.6016818
12400	12500	100	0.5958982
12500	12600	100	0.5140845
12600	12700	100	0.5441318
12700	12800	100	0.5067706
12800	12900	100	0.5469807
12900	13000	100	1.0113682
13000	13100	100	0.7592654
13100	13200	100	0.8345778
13200	13300	100	1.0330279
13300	13400	100	0.9531676
13400	13500	100	0.9748999
13500	13600	100	0.8676867
13600	13700	100	1.2397379
13700	13800	100	0.9460245
13800	13900	100	0.9180802
13900	14000	100	0.8807511
14000	14100	100	0.7850831
14100	14200	100	1.3143817
14200	14300	100	0.6463982
14300	14400	100	0.7863101
14400	14500	100	0.610931
14500	14600	100	0.6508307
14600	14700	100	0.718174
14700	14800	100	1.0001004
14800	14900	100	0.7908462
14900	15000	100	0.5415939
15000	15100	100	0.7119591
15100	15200	100	0.6313566
15200	15300	100	0.5149407
15300	15400	100	0.6679796
15400	15500	100	0.7769073
15500	15600	100	0.9621773
15600	15700	100	0.8490947
15700	15800	100	1.1022319
15800	15900	100	0.727008
15900	16000	100	0.9245059

16000	16100	100	0.8193709
16100	16200	100	0.6993126
16200	16300	100	0.7987198
16300	16400	100	0.7479972
16400	16500	100	0.765546
16500	16600	100	0.7501597
16600	16700	100	0.65898
16700	16800	100	0.6126779
16800	16900	100	0.6331593
16900	17000	100	0.7238996
17000	17100	100	1.5809072
17100	17200	100	0.7859997
17200	17300	100	0.7107258
17300	17400	100	1.0812694
17400	17500	100	0.8051241
17500	17600	100	1.1002318
17600	17700	100	0.9038911
17700	17800	100	0.6844754
17800	17900	100	0.7247001
17900	18000	100	0.8844851
18000	18100	100	0.9029775
18100	18200	100	0.746933
18200	18300	100	1.0629549
18300	18400	100	0.9564806
18400	18500	100	0.8111007
18500	18600	100	0.8593698
18600	18700	100	1.0104928
18700	18800	100	0.6740947
18800	18900	100	0.7603655
18900	19000	100	0.5982391
19000	19100	100	0.6399567
19100	19200	100	0.686216
19200	19300	100	0.8567876
19300	19400	100	0.5793583
19400	19500	100	0.7464367
19500	19600	100	0.6725427
19600	19700	100	0.6220561
19700	19800	100	0.8315884
19800	19900	100	0.8012028
19900	20000	100	0.8972213
20000	20100	100	0.9598454
20100	20200	100	0.9314795
20200	20300	100	0.8449063
20300	20400	100	0.9323642

20400	20500	100	0.9322282
20500	20600	100	0.7821849
20600	20700	100	0.9765811
20700	20800	100	0.6620088
20800	20900	100	0.7260473
20900	21000	100	0.7172409
21000	21100	100	0.9703847
21100	21200	100	0.9345157
21200	21300	100	0.7361087
21300	21400	100	1.0046521
21400	21500	100	1.1451325
21500	21600	100	0.8257775
21600	21700	100	0.5031363
21700	21800	100	0.7188435
21800	21900	100	0.6345805
21900	22000	100	1.011824
22000	22100	100	0.8106279
22100	22200	100	0.8017323
22200	22300	100	0.6033295
22300	22400	100	0.8257394
22400	22500	100	0.8562277
22500	22600	100	1.0606836
22600	22700	100	0.8257845
22700	22800	100	0.8978393
22800	22900	100	0.8649445
22900	23000	100	0.775538
23000	23100	100	0.8192961
23100	23200	100	1.0760612
23200	23300	100	0.9200343
23300	23400	100	0.6613212
23400	23500	100	0.6750177
23500	23600	100	0.5864014
23600	23700	100	0.641434
23700	23800	100	0.7843555
23800	23900	100	0.7680689
23900	24000	100	0.8425599
24000	24100	100	1.2717518
24100	24200	100	0.7085441
24200	24300	100	0.6579307
24300	24400	100	0.6725117
24400	24500	100	0.7386856
24500	24600	100	0.6603757
24600	24700	100	0.8486691
24700	24800	100	1.0078629

24800	24900	100	0.7709079
24900	25000	100	0.8690471
25000	25100	100	0.825616
25100	25200	100	1.0662837
25200	25300	100	0.8122393
25300	25400	100	0.6587874
25400	25500	100	0.7454786
25500	25600	100	0.7554115
25600	25700	100	0.7123681
25700	25800	100	0.6768572
25800	25900	100	0.8899255
25900	26000	100	0.6981414
26000	26100	100	0.8785992
26100	26200	100	0.7100793
26200	26300	100	0.6010746
26300	26400	100	0.5631935
26400	26500	100	1.0862169
26500	26600	100	0.8142211
26600	26700	100	0.9561478
26700	26800	100	0.8545537
26800	26900	100	0.9349622
26900	27000	100	1.1074278
27000	27100	100	1.0893614
27100	27200	100	1.3806899
27200	27300	100	1.120381
27300	27400	100	1.1201283
27400	27500	100	0.8587948
27500	27600	100	1.0569106
27600	27700	100	0.908404
27700	27800	100	1.0504481
27800	27900	100	1.411566
27900	28000	100	1.488071
28000	28012.03	11.775001	1.4793167

7.2 Πίνακες των τιμών RMS των φιλτραρισμένων αναλύσεων PSD

Πίνακας 7.4. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, για το T-A έπειτα από φίλτρο IRI

T-A (IRI)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523541	2.64558E-11	9.865E-13
0.532405198	3.95703E-11	1.629E-12
0.564063668	6.33688E-11	2.578E-12
0.597604632	9.03355E-11	4.048E-12
0.633140087	1.37469E-10	6.588E-12
0.670788586	2.12512E-10	1.06E-11
0.710675776	3.19035E-10	1.635E-11
0.752934813	4.54808E-10	2.481E-11
0.797706723	6.53586E-10	4.087E-11
0.845140874	1.06984E-09	6.679E-11
0.895395637	1.5884E-09	9.89E-11
0.948638678	2.1267E-09	1.404E-10
1.005047679	2.85246E-09	2.318E-10
1.064810991	4.90599E-09	4.136E-10
1.128127933	8.15885E-09	6.381E-10
1.195210099	1.08649E-08	9.012E-10
1.266281009	1.44959E-08	1.355E-09
1.341578007	2.15007E-08	2.237E-09
1.421352386	3.45764E-08	3.672E-09
1.505870461	5.23157E-08	6.198E-09
1.595414162	8.613E-08	1.031E-08
1.690282583	1.31265E-07	1.666E-08
1.790791988	2.0027E-07	2.603E-08
1.89727819	2.88658E-07	3.788E-08
2.010096312	3.82947E-07	5.164E-08
2.129622936	4.81198E-07	6.601E-08
2.256257057	5.61372E-07	8.872E-08
2.390421152	7.61119E-07	1.044E-07
2.532562971	7.07761E-07	1.116E-07
2.683157206	7.74365E-07	1.294E-07
2.842706203	8.48249E-07	1.473E-07
3.011742592	8.94483E-07	1.739E-07
3.190830231	1.04796E-06	2.153E-07
3.380566835	1.22172E-06	3.329E-07
3.581585884	2.09071E-06	3.598E-07
3.794558287	1.2885E-06	3.281E-07
4.02019453	1.61999E-06	4.152E-07

4.25924778	1.85338E-06	4.477E-07
4.512516022	1.68187E-06	4.848E-07
4.780844688	1.93159E-06	6.287E-07
5.065128803	2.49133E-06	7.786E-07
5.366317272	2.67857E-06	8.417E-07
5.685415268	2.59672E-06	9.487E-07
6.023488522	3.0158E-06	1.007E-06
6.381663799	2.60695E-06	1.216E-06
6.761137962	3.80006E-06	1.912E-06
7.163176537	5.7098E-06	2.246E-06
7.589121342	4.83809E-06	2.23E-06
8.040394783	5.04437E-06	2.692E-06
8.518502235	6.21589E-06	3.598E-06
9.025038719	7.99213E-06	5.509E-06
9.561695099	1.25396E-05	9.366E-06
10.13026333	2.04052E-05	1.058E-05
10.73264122	1.47383E-05	1.113E-05
11.37083721	2.01298E-05	1.496E-05
12.04698277	2.41106E-05	1.931E-05
12.76333427	2.9792E-05	2.385E-05
13.5222826	3.30605E-05	3.625E-05
14.3263607	5.71094E-05	5.28E-05
15.17825127	6.68522E-05	5.661E-05
16.0807991	5.85867E-05	6.579E-05
17.03701401	7.90265E-05	9.685E-05
18.05008698	0.000112168	0.0001122
19.12340355	9.69471E-05	0.0001285
20.26054192	0.000128986	0.0001316
21.4652977	8.94164E-05	0.0001189
22.74168968	9.69375E-05	0.0001365
24.0939827	0.000104869	0.0001247
25.52668762	6.91895E-05	0.0001104
27.04458427	7.62444E-05	0.0001285
28.65274048	8.35834E-05	0.00012
30.3565197	5.72407E-05	8.538E-05
32.16161346	3.73586E-05	6.622E-05
34.07404709	3.1894E-05	6.395E-05
36.10019684	3.12336E-05	6.689E-05
38.24682617	3.10894E-05	7.816E-05
40.52109909	3.76459E-05	9.338E-05
42.93061066	3.98647E-05	9.151E-05
45.48340225	3.18318E-05	8.781E-05
48.18798447	3.31045E-05	7.961E-05
51.05339432	2.24635E-05	5.707E-05

54.08919144	1.51332E-05	4.311E-05
57.30550385	1.1675E-05	3.94E-05
60.71306992	1.14503E-05	4.091E-05
64.32325745	1.12111E-05	3.37E-05
68.14812469	6.41035E-06	2.573E-05
72.20042419	6.29002E-06	3.327E-05
76.49369049	9.20853E-06	3.928E-05
81.04224396	8.06121E-06	3.179E-05
85.86127472	5.13399E-06	3.197E-05
90.96685791	7.39102E-06	3.471E-05
96.37602997	5.44184E-06	2.489E-05
ΣΥΝΟΛΟ		0.0026846

Πίνακας 7.5. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, για το T-B έπειτα από φίλτρο IRI

T-B (IRI)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523124	1.02094E-10	3.556E-12
0.532404721	1.35914E-10	5.216E-12
0.564063132	1.93617E-10	8.078E-12
0.597604156	2.88045E-10	1.3E-11
0.633139551	4.43755E-10	2.004E-11
0.67078799	6.20743E-10	3.299E-11
0.71067518	1.03357E-09	6.024E-11
0.752934158	1.81722E-09	9.774E-11
0.797705948	2.54896E-09	1.467E-10
0.84514004	3.63609E-09	2.04E-10
0.895394683	4.4822E-09	3.205E-10
0.948637605	7.5566E-09	5.469E-10
1.005046606	1.18339E-08	8.67E-10
1.064809799	1.71802E-08	1.295E-09
1.12812674	2.37288E-08	2.09E-09
1.195208669	3.85784E-08	3.523E-09
1.266279578	6.05559E-08	5.671E-09
1.341576457	9.00654E-08	8.604E-09
1.421350837	1.25649E-07	1.477E-08
1.505868793	2.23921E-07	2.406E-08
1.595412493	3.13487E-07	3.99E-08
1.690280676	5.27603E-07	6.495E-08
1.790790081	7.64835E-07	1.09E-07
1.897276044	1.28207E-06	2.193E-07
2.010094166	2.60646E-06	2.954E-07

2.12962079	2.33697E-06	3.21E-07
2.256254673	2.73349E-06	3.875E-07
2.39041853	3.04291E-06	4.306E-07
2.532560349	3.01621E-06	4.936E-07
2.683154345	3.53955E-06	5.805E-07
2.842703104	3.73709E-06	6.555E-07
3.011739254	4.01825E-06	6.895E-07
3.190826893	3.68142E-06	7.727E-07
3.380563498	4.46333E-06	8.482E-07
3.581582546	3.97572E-06	9.089E-07
3.79455471	4.55923E-06	1.169E-06
4.020190716	5.79903E-06	1.437E-06
4.259243965	6.22711E-06	1.623E-06
4.51251173	6.58745E-06	1.922E-06
4.780840397	7.73681E-06	2.43E-06
5.065124035	9.35785E-06	2.931E-06
5.366312027	1.01046E-05	3.728E-06
5.685409546	1.32586E-05	4.653E-06
6.023481846	1.42683E-05	5.653E-06
6.381656647	1.7298E-05	7.128E-06
6.761130333	2.02695E-05	9.658E-06
7.163167953	2.7777E-05	1.225E-05
7.589112759	2.97571E-05	1.49E-05
8.040385246	3.62919E-05	2.064E-05
8.518491745	5.00472E-05	2.691E-05
9.025028229	5.62215E-05	3.364E-05
9.561684608	6.91331E-05	4.72E-05
10.13025188	9.68937E-05	6.496E-05
10.73262882	0.00011878	8.647E-05
11.37082481	0.000152192	0.0001404
12.04697037	0.000263229	0.0002039
12.76332092	0.000306015	0.0002474
13.52226734	0.000346032	0.0002923
14.32634354	0.000381071	0.0003548
15.17823315	0.00045183	0.0005177
16.08077812	0.000695351	0.0005972
17.03699112	0.000553721	0.0007119
18.05006409	0.000851733	0.000865
19.12337875	0.000760038	0.0008571
20.26051521	0.000747348	0.0007382
21.46526909	0.000478095	0.0006852
22.74166107	0.000595599	0.000811
24.09395409	0.000603811	0.0007702
25.5266552	0.000471396	0.0006091

27.04455185	0.000331176	0.0004881
28.65270615	0.000275844	0.0004506
30.35648537	0.000253077	0.0005238
32.16157913	0.000327245	0.0004826
34.07400894	0.00017747	0.000344
36.10015488	0.000162087	0.000359
38.2467804	0.000172368	0.0003365
40.52105331	0.000123594	0.0002607
42.93056488	9.2772E-05	0.0002613
45.48334885	0.000111978	0.0002338
48.18793106	6.09181E-05	0.0002175
51.0533371	9.08752E-05	0.0002418
54.0891304	6.84236E-05	0.0001842
57.30544281	4.61232E-05	0.0001238
60.71300507	2.65382E-05	9.727E-05
64.32319641	2.73457E-05	0.0001028
68.14805603	2.64071E-05	0.0001096
72.2003479	2.76616E-05	0.0001314
76.4936142	3.35548E-05	0.000197
81.04216766	5.30515E-05	0.0001849
85.8611908	2.36667E-05	0.0001134
90.96675873	2.07534E-05	7.229E-05
96.37593079	5.97571E-06	6.205E-05
ΣΥΝΟΛΟ		0.0143358

Πίνακας 7.6. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, για το T-Γ
έπειτα από φίλτρο IRI

T-Γ (IRI)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502524197	3.83578E-11	1.39E-12
0.532405853	5.49719E-11	2.17E-12
0.564064384	8.18129E-11	3.34E-12
0.597605407	1.17148E-10	5.03E-12
0.633140922	1.66138E-10	7.65E-12
0.67078948	2.4013E-10	1.21E-11
0.71067673	3.64289E-10	1.75E-11
0.752935827	4.66054E-10	2.46E-11
0.797707796	6.33944E-10	3.92E-11
0.845142007	1.01728E-09	6.05E-11
0.895396769	1.38944E-09	8.88E-11

0.94863987	1.94701E-09	1.3E-10
1.00504899	2.65172E-09	1.99E-10
1.064812303	4.01357E-09	3.02E-10
1.128129482	5.53661E-09	4.6E-10
1.19521153	8.18014E-09	6.94E-10
1.266282558	1.13577E-08	1.01E-09
1.341579676	1.54883E-08	1.53E-09
1.421354175	2.27915E-08	2.47E-09
1.505872369	3.56098E-08	4.09E-09
1.595416307	5.57841E-08	6.63E-09
1.690284848	8.40823E-08	1.03E-08
1.790794492	1.20298E-07	1.52E-08
1.897280812	1.65443E-07	2.12E-08
2.010098934	2.10479E-07	2.82E-08
2.129625797	2.61516E-07	3.53E-08
2.256260157	2.95375E-07	4.1E-08
2.390424252	3.15096E-07	4.42E-08
2.532566547	3.06544E-07	4.87E-08
2.683160782	3.40472E-07	5.27E-08
2.842710018	3.19667E-07	5.74E-08
3.011746645	3.59023E-07	6.47E-08
3.190834522	3.63165E-07	7.61E-08
3.380571365	4.38644E-07	9.43E-08
3.581590652	4.99095E-07	1.07E-07
3.794563293	5.04187E-07	1.06E-07
4.020199776	4.38891E-07	1.2E-07
4.259253502	5.65871E-07	1.45E-07
4.512522221	5.76444E-07	1.66E-07
4.780850887	6.63601E-07	2.19E-07
5.065135479	8.75063E-07	2.72E-07
5.366324902	9.32878E-07	3.14E-07
5.685422897	1.03522E-06	3.85E-07
6.023496628	1.2406E-06	4.88E-07
6.381672382	1.4837E-06	6.27E-07
6.761146545	1.82247E-06	7.74E-07
7.163185596	2.02818E-06	1.17E-06
7.589130878	3.44914E-06	1.39E-06
8.04040432	2.70182E-06	1.57E-06
8.518511772	3.88076E-06	2.17E-06
9.02504921	4.69575E-06	3.02E-06
9.561706543	6.57601E-06	8.79E-06
10.13027573	2.43456E-05	1.03E-05
10.73265362	9.71696E-06	6.52E-06
11.37085152	1.0721E-05	8.92E-06

12.04699707	1.56625E-05	1.23E-05
12.76334953	1.88172E-05	1.69E-05
13.52229881	2.58433E-05	2.35E-05
14.32637787	3.25604E-05	3.28E-05
15.17826843	4.44631E-05	4.11E-05
16.08081627	4.65995E-05	4.84E-05
17.03703117	5.4558E-05	5.05E-05
18.05010796	4.50615E-05	6.15E-05
19.12342262	6.95197E-05	9.61E-05
20.2605629	9.94252E-05	9.65E-05
21.46531868	6.07634E-05	8.03E-05
22.74171638	6.50049E-05	8.81E-05
24.0940094	6.53608E-05	7.89E-05
25.52671432	4.47552E-05	7.33E-05
27.04461479	5.1771E-05	6.93E-05
28.6527729	3.4355E-05	4.93E-05
30.35655785	2.3538E-05	3.72E-05
32.16165543	1.76816E-05	3.84E-05
34.07408905	2.24973E-05	3.61E-05
36.10024261	1.31309E-05	2.62E-05
38.24687576	1.13129E-05	2.6E-05
40.5211525	1.15394E-05	2.86E-05
42.93066788	1.22181E-05	2.56E-05
45.48345947	7.81093E-06	2.23E-05
48.18804932	8.68955E-06	2.12E-05
51.05346298	6.11815E-06	2.09E-05
54.0892601	7.64571E-06	2.21E-05
57.30557632	6.07292E-06	1.99E-05
60.7131424	5.61412E-06	1.79E-05
64.32334137	4.31492E-06	2.03E-05
68.14820862	6.30582E-06	3.16E-05
72.20050812	9.28191E-06	3.51E-05
76.49378204	7.07198E-06	3.39E-05
81.04234314	7.8504E-06	3.52E-05
85.8613739	6.75517E-06	3.09E-05
90.96696472	5.36073E-06	3.1E-05
96.37614441	6.10073E-06	2.79E-05
Σύνολο		0.001555

Πίνακας 7.7. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, του T-A έπειτα από
φίλτρο διέλευσης ζώνης

T-A (butterworth band pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523541	6.30614E-14	3.22E-15
0.532405198	1.52476E-13	8.72E-15
0.564063668	3.984E-13	2.19E-14
0.597604632	9.07343E-13	5.561E-14
0.633140087	2.22262E-12	1.44E-13
0.670788586	5.42535E-12	3.624E-13
0.710675776	1.27476E-11	8.689E-13
0.752934813	2.83772E-11	2.042E-12
0.797706723	6.28401E-11	5.175E-12
0.845140874	1.55342E-10	1.236E-11
0.895395637	3.36608E-10	2.615E-11
0.948638678	6.45708E-10	5.243E-11
1.005047679	1.21317E-09	1.195E-10
1.064810991	2.78639E-09	2.73E-10
1.128127933	5.83671E-09	5.074E-10
1.195210099	9.29004E-09	8.208E-10
1.266281009	1.38072E-08	1.324E-09
1.341578007	2.1373E-08	2.184E-09
1.421352386	3.33711E-08	3.36E-09
1.505870461	4.61474E-08	5.034E-09
1.595414162	6.62924E-08	7.167E-09
1.690282583	8.48027E-08	9.658E-09
1.790791988	1.07376E-07	1.266E-08
1.89727819	1.30323E-07	1.583E-08
2.010096312	1.50255E-07	1.937E-08
2.129622936	1.73889E-07	2.354E-08
2.256257057	1.97941E-07	3.173E-08
2.390421152	2.75003E-07	3.876E-08
2.532562971	2.70319E-07	4.441E-08
2.683157206	3.19422E-07	5.575E-08
2.842706203	3.79391E-07	6.884E-08
3.011742592	4.35103E-07	8.814E-08
3.190830231	5.49271E-07	1.173E-07
3.380566835	6.86654E-07	1.948E-07
3.581585884	1.25099E-06	2.194E-07
3.794558287	8.09468E-07	2.119E-07

4.02019453	1.06865E-06	2.796E-07
4.25924778	1.2704E-06	3.117E-07
4.512516022	1.19119E-06	3.48E-07
4.780844688	1.40301E-06	4.62E-07
5.065128803	1.84729E-06	5.824E-07
5.366317272	2.01988E-06	6.369E-07
5.685415268	1.9723E-06	7.224E-07
6.023488522	2.30152E-06	7.681E-07
6.381663799	1.98734E-06	9.228E-07
6.761137962	2.87643E-06	1.439E-06
7.163176537	4.28135E-06	1.672E-06
7.589121342	3.57173E-06	1.628E-06
8.040394783	3.64267E-06	1.914E-06
8.518502235	4.36499E-06	2.482E-06
9.025038719	5.43396E-06	3.654E-06
9.561695099	8.1825E-06	5.959E-06
10.13026333	1.27799E-05	6.484E-06
10.73264122	8.74646E-06	6.387E-06
11.37083721	1.12707E-05	8.117E-06
12.04698277	1.27382E-05	9.842E-06
12.76333427	1.47394E-05	1.139E-05
13.5222826	1.5284E-05	1.62E-05
14.3263607	2.50216E-05	2.267E-05
15.17825127	2.82102E-05	2.379E-05
16.0807991	2.45033E-05	2.796E-05
17.03701401	3.39787E-05	4.379E-05
18.05008698	5.24755E-05	5.604E-05
19.12340355	5.19424E-05	7.708E-05
20.26054192	8.36245E-05	9.39E-05
21.4652977	7.22519E-05	0.0001096
22.74168968	9.94592E-05	0.0001578
24.0939827	0.000133855	0.0001758
25.52668762	0.000111515	0.0001984
27.04458427	0.000149851	0.000274
28.65274048	0.000190954	0.0002882
30.3565197	0.00014733	0.0002267
32.16161346	0.000103895	0.000184
34.07404709	8.85154E-05	0.0001723
36.10019684	8.16101E-05	0.000164
38.24682617	7.11762E-05	0.0001667
40.52109909	7.54351E-05	0.0001647
42.93061066	6.12626E-05	0.0001247
45.48340225	3.64703E-05	8.575E-05
48.18798447	2.69428E-05	5.773E-05

51.05339432	1.33499E-05	2.966E-05
54.08919144	6.18957E-06	1.526E-05
57.30550385	3.30258E-06	9.219E-06
60.71306992	2.10839E-06	6.143E-06
64.32325745	1.29489E-06	3.449E-06
68.14812469	5.08427E-07	1.673E-06
72.20042419	3.17441E-07	1.421E-06
76.49369049	3.4466E-07	1.182E-06
81.04224396	1.75115E-07	6.768E-07
85.86127472	1.05777E-07	4.873E-07
90.96685791	8.51138E-08	4.09E-07
96.37602997	6.60934E-08	3.337E-07
Σύνολο		0.0030489

Πίνακας 7.8. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, για το T-B έπειτα από φίλτρο Band Pass

T-B (butterworth band pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523124	1.62689E-13	8.192E-15
0.532404721	3.85579E-13	2.12E-14
0.564063132	9.53852E-13	5.754E-14
0.597604156	2.47743E-12	1.554E-13
0.633139551	6.26761E-12	3.887E-13
0.67078799	1.43803E-11	1.074E-12
0.71067518	3.94665E-11	3.127E-12
0.752934158	1.08515E-10	7.685E-12
0.797705948	2.34801E-10	1.757E-11
0.84514004	5.05968E-10	3.587E-11
0.895394683	9.21382E-10	8.552E-11
0.948637605	2.29125E-09	2.037E-10
1.005046606	4.93212E-09	4.335E-10
1.064809799	9.57538E-09	8.364E-10
1.12812674	1.68446E-08	1.662E-09
1.195208669	3.27049E-08	3.207E-09
1.266279578	5.75497E-08	5.523E-09
1.341576457	8.9159E-08	8.393E-09
1.421350837	1.21271E-07	1.345E-08
1.505868793	1.97068E-07	1.96E-08
1.595412493	2.40768E-07	2.76E-08
1.690280676	3.41147E-07	3.764E-08
1.790790081	4.07849E-07	5.224E-08
1.897276044	5.73307E-07	9.036E-08

2.010094166	1.02859E-06	1.119E-07
2.12962079	8.43441E-07	1.144E-07
2.256254673	9.63824E-07	1.385E-07
2.39041853	1.10074E-06	1.603E-07
2.532560349	1.15506E-06	1.967E-07
2.683154345	1.45779E-06	2.495E-07
2.842703104	1.6698E-06	3.053E-07
3.011739254	1.94272E-06	3.466E-07
3.190826893	1.92837E-06	4.206E-07
3.380563498	2.50477E-06	4.903E-07
3.581582546	2.37331E-06	5.588E-07
3.79455471	2.8742E-06	7.56E-07
4.020190716	3.8269E-06	9.688E-07
4.259243965	4.27812E-06	1.133E-06
4.51251173	4.66717E-06	1.38E-06
4.780840397	5.61813E-06	1.786E-06
5.065124035	6.94412E-06	2.189E-06
5.366312027	7.58875E-06	2.817E-06
5.685409546	1.00666E-05	3.541E-06
6.023481846	1.08804E-05	4.304E-06
6.381656647	1.31527E-05	5.413E-06
6.761130333	1.53755E-05	7.276E-06
7.163167953	2.08196E-05	9.123E-06
7.589112759	2.20149E-05	1.087E-05
8.040385246	2.61768E-05	1.464E-05
8.518491745	3.50557E-05	1.854E-05
9.025028229	3.81639E-05	2.238E-05
9.561684608	4.52593E-05	3.006E-05
10.13025188	6.04855E-05	3.939E-05
10.73262882	7.03066E-05	4.964E-05
11.37082481	8.52565E-05	7.573E-05
12.04697037	0.000138738	0.0001038
12.76332092	0.000151192	0.0001185
13.52226734	0.000160985	0.0001321
14.32634354	0.000167509	0.0001522
15.17823315	0.000189925	0.0002168
16.08077812	0.000290501	0.000253
17.03699112	0.000238599	0.0003239
18.05006409	0.000400853	0.0004333
19.12337875	0.000406474	0.0005022
20.26051521	0.000476768	0.0005193
21.46526909	0.000385271	0.0006339
22.74166107	0.000607925	0.000926
24.09395409	0.000761559	0.0010907

25.5266552	0.000761088	0.0010676
27.04455185	0.000645659	0.0010309
28.65270615	0.00063645	0.0011062
30.35648537	0.000662049	0.0014147
32.16157913	0.000905401	0.0013367
34.07400894	0.000492519	0.0009274
36.10015488	0.000422957	0.0008845
38.2467804	0.000401137	0.0007284
40.52105331	0.000239424	0.0004609
42.93056488	0.000143155	0.0003455
45.48334885	0.000127542	0.0002401
48.18793106	5.00284E-05	0.0001474
51.0533371	5.28402E-05	0.0001219
54.0891304	2.74369E-05	6.372E-05
57.30544281	1.21864E-05	2.878E-05
60.71300507	4.70678E-06	1.461E-05
64.32319641	3.38499E-06	1.121E-05
68.14805603	2.47877E-06	8.557E-06
72.2003479	1.74444E-06	6.731E-06
76.4936142	1.39104E-06	6.186E-06
81.04216766	1.32895E-06	5.155E-06
85.8611908	8.10307E-07	3.515E-06
90.96675873	5.66589E-07	2.87E-06
96.37593079	4.94405E-07	3.025E-06
Σύνολο		0.0156775

Πίνακας 7.9. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, του T-Γ έπειτα από φίλτρο διέλευσης ζώνης

T-Γ (butterworth band pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502524197	1.32E-08	4.35E-10
0.532405853	1.60E-08	5.63E-10
0.564064384	1.96E-08	7.02E-10
0.597605407	2.23E-08	8.39E-10
0.633140922	2.50E-08	9.95E-10
0.67078948	2.79E-08	1.20E-09
0.71067673	3.24E-08	1.35E-09
0.752935827	3.14E-08	1.42E-09
0.797707796	3.22E-08	1.69E-09
0.845142007	3.90E-08	1.98E-09
0.895396769	3.98E-08	2.17E-09
0.94863987	4.16E-08	2.36E-09

1.00504899	4.21E-08	2.66E-09
1.064812303	4.69E-08	3.00E-09
1.128129482	4.77E-08	3.34E-09
1.19521153	5.19E-08	3.71E-09
1.266282558	5.26E-08	3.93E-09
1.341579676	5.19E-08	4.27E-09
1.421354175	5.51E-08	4.95E-09
1.505872369	6.20E-08	5.94E-09
1.595416307	7.07E-08	7.01E-09
1.690284848	7.70E-08	8.06E-09
1.790794492	8.34E-08	9.17E-09
1.897280812	8.88E-08	1.03E-08
2.010098934	9.32E-08	1.17E-08
2.129625797	1.03E-07	1.35E-08
2.256260157	1.10E-07	1.53E-08
2.390424252	1.18E-07	1.69E-08
2.532566547	1.20E-07	1.98E-08
2.683160782	1.43E-07	2.28E-08
2.842710018	1.44E-07	2.70E-08
3.011746645	1.75E-07	3.27E-08
3.190834522	1.90E-07	4.13E-08
3.380571365	2.45E-07	5.45E-08
3.581590652	2.97E-07	6.53E-08
3.794563293	3.17E-07	6.83E-08
4.020199776	2.89E-07	8.09E-08
4.259253502	3.88E-07	1.01E-07
4.512522221	4.07E-07	1.19E-07
4.780850887	4.81E-07	1.60E-07
5.065135479	6.47E-07	2.03E-07
5.366324902	7.00E-07	2.37E-07
5.685422897	7.86E-07	2.93E-07
6.023496628	9.45E-07	3.71E-07
6.381672382	1.13E-06	4.75E-07
6.761146545	1.38E-06	5.82E-07
7.163185596	1.52E-06	8.64E-07
7.589130878	2.54E-06	1.01E-06
8.04040432	1.95E-06	1.12E-06
8.518511772	2.72E-06	1.50E-06
9.02504921	3.19E-06	2.01E-06
9.561706543	4.29E-06	5.56E-06
10.13027573	1.53E-05	6.34E-06
10.73265362	5.77E-06	3.77E-06
11.37085152	6.04E-06	4.84E-06
12.04699707	8.26E-06	6.30E-06

12.76334953	9.33E-06	8.10E-06
13.52229881	1.20E-05	1.06E-05
14.32637787	1.43E-05	1.41E-05
15.17826843	1.89E-05	1.74E-05
16.08081627	1.96E-05	2.08E-05
17.03703117	2.38E-05	2.29E-05
18.05010796	2.14E-05	3.22E-05
19.12342262	3.86E-05	5.94E-05
20.2605629	6.59E-05	7.05E-05
21.46531868	5.11E-05	7.78E-05
22.74171638	7.07E-05	0.000111
24.0940094	9.31E-05	0.000126
25.52671432	8.22E-05	0.000156
27.04461479	0.000122936	0.000181
28.6527729	0.000102411	0.000162
30.35655785	8.72E-05	0.000149
32.16165543	7.83E-05	0.000182
34.07408905	0.000111872	0.000184
36.10024261	7.01E-05	0.000141
38.24687576	6.16E-05	0.000138
40.5211525	6.00E-05	0.000141
42.93066788	5.74E-05	0.000112
45.48345947	3.07E-05	7.86E-05
48.18804932	2.74E-05	6.02E-05
51.05346298	1.46E-05	4.24E-05
54.0892601	1.33E-05	3.37E-05
57.30557632	7.63E-06	2.12E-05
60.7131424	4.83E-06	1.32E-05
64.32334137	2.49E-06	9.63E-06
68.14820862	2.55E-06	1.01E-05
72.20050812	2.43E-06	7.88E-06
76.49378204	1.24E-06	4.73E-06
81.04234314	8.36E-07	3.33E-06
85.8613739	5.47E-07	2.49E-06
90.96696472	4.28E-07	1.89E-06
96.37614441	2.72E-07	1.19E-06
Σύνολο		2.44E-03

Πίνακας 7.10. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, του T-A έπειτα από
φίλτρο υψηλής διέλευσης

T-A (butterworth high pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523541	2.83445E-08	8.451E-10
0.532405198	2.82164E-08	9.312E-10
0.564063668	3.0613E-08	1.024E-09
0.597604632	3.04215E-08	1.116E-09
0.633140087	3.23739E-08	1.275E-09
0.670788586	3.53792E-08	1.47E-09
0.710675776	3.83257E-08	1.639E-09
0.752934813	3.92312E-08	1.791E-09
0.797706723	4.07858E-08	2.117E-09
0.845140874	4.84538E-08	2.544E-09
0.895395637	5.27854E-08	2.786E-09
0.948638678	5.18543E-08	2.882E-09
1.005047679	5.03235E-08	3.387E-09
1.064810991	6.30401E-08	4.421E-09
1.128127933	7.65989E-08	5.041E-09
1.195210099	7.37015E-08	5.147E-09
1.266281009	7.1146E-08	5.534E-09
1.341578007	7.5858E-08	6.511E-09
1.421352386	8.73694E-08	7.691E-09
1.505870461	9.46296E-08	9.296E-09
1.595414162	1.13012E-07	1.129E-08
1.690282583	1.24916E-07	1.342E-08
1.790791988	1.42108E-07	1.605E-08
1.89727819	1.59383E-07	1.877E-08
2.010096312	1.73293E-07	2.186E-08
2.129622936	1.92494E-07	2.565E-08
2.256257057	2.1256E-07	3.367E-08
2.390421152	2.89416E-07	4.049E-08
2.532562971	2.80262E-07	4.577E-08
2.683157206	3.27592E-07	5.695E-08
2.842706203	3.863E-07	6.991E-08
3.011742592	4.4083E-07	8.907E-08
3.190830231	5.53863E-07	1.181E-07
3.380566835	6.91313E-07	1.958E-07
3.581585884	1.2567E-06	2.203E-07
3.794558287	8.11838E-07	2.125E-07
4.02019453	1.0713E-06	2.801E-07
4.25924778	1.27224E-06	3.121E-07
4.512516022	1.19244E-06	3.484E-07
4.780844688	1.40432E-06	4.623E-07

5.065128803	1.84788E-06	5.827E-07
5.366317272	2.02157E-06	6.372E-07
5.685415268	1.9725E-06	7.225E-07
6.023488522	2.30188E-06	7.682E-07
6.381663799	1.9878E-06	9.228E-07
6.761137962	2.87585E-06	1.439E-06
7.163176537	4.28111E-06	1.673E-06
7.589121342	3.57252E-06	1.628E-06
8.040394783	3.64397E-06	1.914E-06
8.518502235	4.36464E-06	2.481E-06
9.025038719	5.43242E-06	3.654E-06
9.561695099	8.18385E-06	5.96E-06
10.13026333	1.27828E-05	6.485E-06
10.73264122	8.74798E-06	6.389E-06
11.37083721	1.12731E-05	8.117E-06
12.04698277	1.27379E-05	9.842E-06
12.76333427	1.47389E-05	1.139E-05
13.5222826	1.52814E-05	1.621E-05
14.3263607	2.50338E-05	2.267E-05
15.17825127	2.81955E-05	2.379E-05
16.0807991	2.4521E-05	2.795E-05
17.03701401	3.39404E-05	4.378E-05
18.05008698	5.24933E-05	5.604E-05
19.12340355	5.19309E-05	7.708E-05
20.26054192	8.3635E-05	9.391E-05
21.4652977	7.2268E-05	0.0001096
22.74168968	9.94926E-05	0.0001578
24.0939827	0.000133902	0.0001758
25.52668762	0.000111512	0.0001983
27.04458427	0.000149813	0.0002741
28.65274048	0.000191058	0.0002883
30.3565197	0.000147314	0.0002266
32.16161346	0.000103809	0.000184
34.07404709	8.85729E-05	0.0001724
36.10019684	8.16457E-05	0.0001639
38.24682617	7.10966E-05	0.0001666
40.52109909	7.53983E-05	0.0001646
42.93061066	6.12331E-05	0.0001247
45.48340225	3.64318E-05	8.575E-05
48.18798447	2.69827E-05	5.775E-05
51.05339432	1.33277E-05	2.96E-05
54.08919144	6.17606E-06	1.52E-05
57.30550385	3.27307E-06	9.111E-06
60.71306992	2.07447E-06	6.009E-06

64.32325745	1.2544E-06	3.369E-06
68.14812469	5.07418E-07	1.642E-06
72.20042419	3.03004E-07	1.353E-06
76.49369049	3.27251E-07	1.116E-06
81.04224396	1.63572E-07	5.977E-07
85.86127472	8.44721E-08	3.971E-07
90.96685791	7.10859E-08	3.161E-07
96.37602997	4.5779E-08	2.166E-07
Σύνολο		0.0030479

Πίνακας 7.11. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, του T-B έπειτα από φίλτρο υψηλής διέλευσης

T-B (butterworth high pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523124	7.43773E-08	2.154E-09
0.532404721	6.97921E-08	2.274E-09
0.564063132	7.38493E-08	2.6E-09
0.597604156	8.11705E-08	3.091E-09
0.633139551	9.28187E-08	3.532E-09
0.67078799	9.48325E-08	4.217E-09
0.71067518	1.16628E-07	5.674E-09
0.752934158	1.51908E-07	6.868E-09
0.797705948	1.54876E-07	7.51E-09
0.84514004	1.61767E-07	7.743E-09
0.895394683	1.4638E-07	8.654E-09
0.948637605	1.78686E-07	1.091E-08
1.005046606	2.08264E-07	1.281E-08
1.064809799	2.20517E-07	1.399E-08
1.12812674	2.21314E-07	1.619E-08
1.195208669	2.61494E-07	1.982E-08
1.266279578	2.96164E-07	2.308E-08
1.341576457	3.16877E-07	2.536E-08
1.421350837	3.18833E-07	3.059E-08
1.505868793	4.04995E-07	3.648E-08
1.595412493	4.09752E-07	4.329E-08
1.690280676	5.02961E-07	5.233E-08
1.790790081	5.38366E-07	6.587E-08
1.897276044	6.98757E-07	1.065E-07
2.010094166	1.18931E-06	1.268E-07
2.12962079	9.32576E-07	1.247E-07
2.256254673	1.03657E-06	1.472E-07
2.39041853	1.15789E-06	1.674E-07

2.532560349	1.19739E-06	2.028E-07
2.683154345	1.49638E-06	2.55E-07
2.842703104	1.70017E-06	3.099E-07
3.011739254	1.96706E-06	3.505E-07
3.190826893	1.9471E-06	4.238E-07
3.380563498	2.51996E-06	4.929E-07
3.581582546	2.38437E-06	5.611E-07
3.79455471	2.88457E-06	7.58E-07
4.020190716	3.83443E-06	9.705E-07
4.259243965	4.28515E-06	1.134E-06
4.51251173	4.67295E-06	1.381E-06
4.780840397	5.62322E-06	1.787E-06
5.065124035	6.95111E-06	2.189E-06
5.366312027	7.58776E-06	2.818E-06
5.685409546	1.00728E-05	3.542E-06
6.023481846	1.08823E-05	4.304E-06
6.381656647	1.31509E-05	5.414E-06
6.761130333	1.53845E-05	7.279E-06
7.163167953	2.08257E-05	9.123E-06
7.589112759	2.20113E-05	1.087E-05
8.040385246	2.61656E-05	1.463E-05
8.518491745	3.50514E-05	1.855E-05
9.025028229	3.81814E-05	2.24E-05
9.561684608	4.52849E-05	3.007E-05
10.13025188	6.0481E-05	3.939E-05
10.73262882	7.02982E-05	4.964E-05
11.37082481	8.52588E-05	7.573E-05
12.04697037	0.000138752	0.0001038
12.76332092	0.000151169	0.0001185
13.52226734	0.000161036	0.0001321
14.32634354	0.000167557	0.0001522
15.17823315	0.000189876	0.0002168
16.08077812	0.000290563	0.000253
17.03699112	0.000238639	0.000324
18.05006409	0.00040104	0.0004334
19.12337875	0.000406505	0.0005022
20.26051521	0.000476781	0.0005193
21.46526909	0.00038526	0.000634
22.74166107	0.00060814	0.0009263
24.09395409	0.000761759	0.001091
25.5266552	0.000761177	0.0010679
27.04455185	0.000645849	0.0010311
28.65270615	0.000636487	0.001106
30.35648537	0.000661815	0.0014139

32.16157913	0.000904744	0.0013358
34.07400894	0.000492244	0.0009269
36.10015488	0.000422679	0.000884
38.2467804	0.000400916	0.0007277
40.52105331	0.000239007	0.0004604
42.93056488	0.000143118	0.0003453
45.48334885	0.000127393	0.0002401
48.18793106	5.01941E-05	0.0001473
51.0533371	5.26503E-05	0.0001216
54.0891304	2.74644E-05	6.359E-05
57.30544281	1.20768E-05	2.847E-05
60.71300507	4.63069E-06	1.418E-05
64.32319641	3.22249E-06	1.063E-05
68.14805603	2.33578E-06	7.979E-06
72.2003479	1.60203E-06	6.13E-06
76.4936142	1.25352E-06	5.594E-06
81.04216766	1.20635E-06	4.391E-06
85.8611908	6.16003E-07	2.602E-06
90.96675873	4.03235E-07	1.905E-06
96.37593079	3.01057E-07	1.859E-06
Σύνολο		0.0156675

Πίνακας 7.12. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS, του T-Γ έπειτα από φίλτρο υψηλής διέλευσης

T-Γ (butterworth high pass)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502524197	2.56882E-08	7.8E-10
0.532405853	2.61929E-08	8.6E-10
0.564064384	2.80469E-08	9.5E-10
0.597605407	2.88553E-08	1E-09
0.633140922	3.01089E-08	1.2E-09
0.67078948	3.18549E-08	1.3E-09
0.71067673	3.56831E-08	1.5E-09
0.752935827	3.35303E-08	1.5E-09
0.797707796	3.37704E-08	1.8E-09
0.845142007	4.03229E-08	2E-09
0.895396769	4.07606E-08	2.2E-09
0.94863987	4.22751E-08	2.4E-09
1.00504899	4.26084E-08	2.7E-09
1.064812303	4.7331E-08	3E-09

1.128129482	4.7987E-08	3.4E-09
1.19521153	5.20801E-08	3.7E-09
1.266282558	5.27058E-08	3.9E-09
1.341579676	5.19936E-08	4.3E-09
1.421354175	5.51877E-08	5E-09
1.505872369	6.20527E-08	5.9E-09
1.595416307	7.07147E-08	7E-09
1.690284848	7.70713E-08	8.1E-09
1.790794492	8.34327E-08	9.2E-09
1.897280812	8.88443E-08	1E-08
2.010098934	9.32443E-08	1.2E-08
2.129625797	1.02671E-07	1.3E-08
2.256260157	1.0993E-07	1.5E-08
2.390424252	1.18031E-07	1.7E-08
2.532566547	1.19862E-07	2E-08
2.683160782	1.42453E-07	2.3E-08
2.842710018	1.43867E-07	2.7E-08
3.011746645	1.7507E-07	3.3E-08
3.190834522	1.90071E-07	4.1E-08
3.380571365	2.45317E-07	5.4E-08
3.581590652	2.96692E-07	6.5E-08
3.794563293	3.1681E-07	6.8E-08
4.020199776	2.88796E-07	8.1E-08
4.259253502	3.87233E-07	1E-07
4.512522221	4.06687E-07	1.2E-07
4.780850887	4.81091E-07	1.6E-07
5.065135479	6.46615E-07	2E-07
5.366324902	7.00498E-07	2.4E-07
5.685422897	7.85376E-07	2.9E-07
6.023496628	9.44781E-07	3.7E-07
6.381672382	1.1279E-06	4.8E-07
6.761146545	1.37921E-06	5.8E-07
7.163185596	1.51922E-06	8.6E-07
7.589130878	2.5379E-06	1E-06
8.04040432	1.94799E-06	1.1E-06
8.518511772	2.72138E-06	1.5E-06
9.02504921	3.18418E-06	2E-06
9.561706543	4.2904E-06	5.6E-06
10.13027573	1.52872E-05	6.3E-06
10.73265362	5.77269E-06	3.8E-06
11.37085152	6.03658E-06	4.8E-06
12.04699707	8.25997E-06	6.3E-06
12.76334953	9.32941E-06	8.1E-06
13.52229881	1.20073E-05	1.1E-05

14.32637787	1.43016E-05	1.4E-05
15.17826843	1.88899E-05	1.7E-05
16.08081627	1.96421E-05	2.1E-05
17.03703117	2.37638E-05	2.3E-05
18.05010796	2.14316E-05	3.2E-05
19.12342262	3.8596E-05	5.9E-05
20.2605629	6.59128E-05	7.1E-05
21.46531868	5.11245E-05	7.8E-05
22.74171638	7.07454E-05	0.00011
24.0940094	9.30598E-05	0.00013
25.52671432	8.21953E-05	0.00016
27.04461479	0.000122934	0.00018
28.6527729	0.000102388	0.00016
30.35655785	8.72497E-05	0.00015
32.16165543	7.82578E-05	0.00018
34.07408905	0.000111879	0.00018
36.10024261	7.01094E-05	0.00014
38.24687576	6.15911E-05	0.00014
40.5211525	5.99437E-05	0.00014
42.93066788	5.73164E-05	0.00011
45.48345947	3.07004E-05	7.9E-05
48.18804932	2.73519E-05	6E-05
51.05346298	1.4596E-05	4.2E-05
54.0892601	1.32814E-05	3.4E-05
57.30557632	7.62773E-06	2.1E-05
60.7131424	4.8049E-06	1.3E-05
64.32334137	2.47388E-06	9.6E-06
68.14820862	2.52123E-06	1E-05
72.20050812	2.41719E-06	7.8E-06
76.49378204	1.21589E-06	4.6E-06
81.04234314	8.25887E-07	3.2E-06
85.8613739	5.14015E-07	2.3E-06
90.96696472	3.91892E-07	1.7E-06
96.37614441	2.48346E-07	1E-06
Σύνολο		0.00244

7.3 Πίνακες των τιμών RMS με band pass αναλύσεων PSD ανά κυματική ζώνη

Πίνακας 4.8. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μικρών κυματισμών του T-A

SWR (T-A)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502523541	6.30614E-14	3.22031E-15
0.532405198	1.52476E-13	8.71995E-15
0.564063668	3.984E-13	2.18979E-14
0.597604632	9.07343E-13	5.56124E-14
0.633140087	2.22262E-12	1.43967E-13
0.670788586	5.42535E-12	3.62435E-13
0.710675776	1.27476E-11	8.68948E-13
0.752934813	2.83772E-11	2.04199E-12
0.797706723	6.28401E-11	5.17465E-12
0.845140874	1.55342E-10	1.23614E-11
0.895395637	3.36608E-10	2.61507E-11
0.948638678	6.45708E-10	5.24287E-11
1.005047679	1.21317E-09	1.19514E-10
1.064810991	2.78639E-09	2.72994E-10
1.128127933	5.83671E-09	5.07367E-10
1.195210099	9.29004E-09	8.20771E-10
1.266281009	1.38072E-08	1.32448E-09
1.341578007	2.1373E-08	2.18359E-09
1.421352386	3.33711E-08	3.36038E-09
1.505870461	4.61474E-08	5.03414E-09
1.595414162	6.62924E-08	7.16708E-09
1.690282583	8.48027E-08	9.65789E-09
1.790791988	1.07376E-07	1.26558E-08
1.89727819	1.30323E-07	1.58272E-08
Σύνολο		5.90308E-08

Πίνακας 4.9. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μικρών κυματισμών του T-B

SWR (T-B)		
Μήκος κύματος	Υψομ. αποκλίσεις	RMS
0.502523124	1.62689E-13	8.19157E-15
0.532404721	3.85579E-13	2.12021E-14
0.564063132	9.53852E-13	5.75443E-14
0.597604156	2.47743E-12	1.55379E-13
0.633139551	6.26761E-12	3.8868E-13
0.67078799	1.43803E-11	1.0739E-12
0.71067518	3.94665E-11	3.12678E-12
0.752934158	1.08515E-10	7.68543E-12
0.797705948	2.34801E-10	1.75689E-11
0.84514004	5.05968E-10	3.58655E-11
0.895394683	9.21382E-10	8.5525E-11
0.948637605	2.29125E-09	2.03732E-10
1.005046606	4.93212E-09	4.33507E-10
1.064809799	9.57538E-09	8.36417E-10
1.12812674	1.68446E-08	1.66194E-09
1.195208669	3.27049E-08	3.20724E-09
1.266279578	5.75497E-08	5.52335E-09
1.341576457	8.9159E-08	8.39348E-09
1.421350837	1.21271E-07	1.34527E-08
1.505868793	1.97068E-07	1.96027E-08
1.595412493	2.40768E-07	2.76026E-08
1.690280676	3.41147E-07	3.76406E-08
1.790790081	4.07849E-07	5.22397E-08
1.897276044	5.73307E-07	9.03616E-08
Σύνολο		2.61311E-07

Πίνακας 4.10. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μικρών κυματισμών του T-Γ

SWR (T-Γ)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
0.502524197	1.32E-08	4.35E-10
0.532405853	1.60E-08	5.63E-10
0.564064384	1.96E-08	7.02E-10
0.597605407	2.23E-08	8.39E-10
0.633140922	2.50E-08	9.95E-10
0.67078948	2.79E-08	1.20E-09
0.71067673	3.24E-08	1.35E-09

0.752935827	3.14E-08	1.42E-09
0.797707796	3.22E-08	1.69E-09
0.845142007	3.90E-08	1.98E-09
0.895396769	3.98E-08	2.17E-09
0.94863987	4.16E-08	2.36E-09
1.00504899	4.21E-08	2.66E-09
1.064812303	4.69E-08	3.00E-09
1.128129482	4.77E-08	3.34E-09
1.19521153	5.19E-08	3.71E-09
1.266282558	5.26E-08	3.93E-09
1.341579676	5.19E-08	4.27E-09
1.421354175	5.51E-08	4.95E-09
1.505872369	6.20E-08	5.94E-09
1.595416307	7.07E-08	7.01E-09
1.690284848	7.70E-08	8.06E-09
1.790794492	8.34E-08	9.17E-09
1.897280812	8.88E-08	1.03E-08
Σύνολο		8.20E-08

Πίνακας 4.11. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεσαίων κυματισμών του T-A

MWR (T-A)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
2.010096312	1.50255E-07	1.93719E-08
2.129622936	1.73889E-07	2.35431E-08
2.256257057	1.97941E-07	3.1726E-08
2.390421152	2.75003E-07	3.87565E-08
2.532562971	2.70319E-07	4.44058E-08
2.683157206	3.19422E-07	5.57475E-08
2.842706203	3.79391E-07	6.88396E-08
Σύνολο		2.82391E-07

Πίνακας 4.12. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεσαίων κυματισμών του T-B

MWR (T-B)		
Μήκος κύματος	Υψομ. αποκλίσεις	RMS
2.010094166	1.02859E-06	1.11879E-07
2.12962079	8.43441E-07	1.14431E-07
2.256254673	9.63824E-07	1.38495E-07

2.39041853	1.10074E-06	1.60322E-07
2.532560349	1.15506E-06	1.9674E-07
2.683154345	1.45779E-06	2.49502E-07
2.842703104	1.6698E-06	3.05323E-07
Σύνολο		1.27669E-06

Πίνακας 4.13. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεσαίων κυματισμών του T-Γ

MWR (T-Γ)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
2.010098934	9.32E-08	1.17E-08
2.129625797	1.03E-07	1.35E-08
2.256260157	1.10E-07	1.53E-08
2.390424252	1.18E-07	1.69E-08
2.532566547	1.20E-07	1.98E-08
2.683160782	1.43E-07	2.28E-08
2.842710018	1.44E-07	2.70E-08
Σύνολο		1.27E-07

Πίνακας 4.14. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεγάλων κυματισμών του T-A

LWR (T-A)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
3.011742592	4.35103E-07	8.81447E-08
3.190830231	5.49271E-07	1.1725E-07
3.380566835	6.86654E-07	1.94752E-07
3.581585884	1.25099E-06	2.1941E-07
3.794558287	8.09468E-07	2.11886E-07
4.02019453	1.06865E-06	2.7958E-07
4.25924778	1.2704E-06	3.11722E-07
4.512516022	1.19119E-06	3.48049E-07
4.780844688	1.40301E-06	4.62004E-07
5.065128803	1.84729E-06	5.82373E-07
5.366317272	2.01988E-06	6.36948E-07
5.685415268	1.9723E-06	7.22432E-07

6.023488522	2.30152E-06	7.6808E-07
6.381663799	1.98734E-06	9.22836E-07
6.761137962	2.87643E-06	1.43885E-06
7.163176537	4.28135E-06	1.67249E-06
7.589121342	3.57173E-06	1.62783E-06
8.040394783	3.64267E-06	1.91426E-06
8.518502235	4.36499E-06	2.48176E-06
9.025038719	5.43396E-06	3.65368E-06
9.561695099	8.1825E-06	5.95928E-06
10.13026333	1.27799E-05	6.48351E-06
10.73264122	8.74646E-06	6.38745E-06
11.37083721	1.12707E-05	8.11675E-06
12.04698277	1.27382E-05	9.84181E-06
12.76333427	1.47394E-05	1.13931E-05
13.5222826	1.5284E-05	1.62044E-05
14.3263607	2.50216E-05	2.26739E-05
15.17825127	2.82102E-05	2.37882E-05
16.0807991	2.45033E-05	2.79607E-05
17.03701401	3.39787E-05	4.37922E-05
18.05008698	5.24755E-05	5.60367E-05
19.12340355	5.19424E-05	7.70791E-05
20.26054192	8.36245E-05	9.38965E-05
21.4652977	7.22519E-05	0.000109585
22.74168968	9.94592E-05	0.000157755
24.0939827	0.000133855	0.000175772
25.52668762	0.000111515	0.000198363
27.04458427	0.000149851	0.000274034
28.65274048	0.000190954	0.000288181
30.3565197	0.00014733	0.000226742
32.16161346	0.000103895	0.000183986
34.07404709	8.85154E-05	0.00017235
Σύνολο		0.002215035

Πίνακας 4.15. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεγάλων κυματισμών του T-B

LWR (T-B)		
Μήκος κύματος	Υψομ. αποκλίσεις	RMS
3.011739254	1.94272E-06	3.46632E-07
3.190826893	1.92837E-06	4.20564E-07
3.380563498	2.50477E-06	4.90293E-07

3.581582546	2.37331E-06	5.58787E-07
3.79455471	2.8742E-06	7.56006E-07
4.020190716	3.8269E-06	9.68766E-07
4.259243965	4.27812E-06	1.13278E-06
4.51251173	4.66717E-06	1.37992E-06
4.780840397	5.61813E-06	1.78562E-06
5.065124035	6.94412E-06	2.18856E-06
5.366312027	7.58875E-06	2.81688E-06
5.685409546	1.00666E-05	3.54079E-06
6.023481846	1.08804E-05	4.30403E-06
6.381656647	1.31527E-05	5.41286E-06
6.761130333	1.53755E-05	7.27589E-06
7.163167953	2.08196E-05	9.12255E-06
7.589112759	2.20149E-05	1.08738E-05
8.040385246	2.61768E-05	1.46378E-05
8.518491745	3.50557E-05	1.85442E-05
9.025028229	3.81639E-05	2.23848E-05
9.561684608	4.52593E-05	3.00615E-05
10.13025188	6.04855E-05	3.93931E-05
10.73262882	7.03066E-05	4.96399E-05
11.37082481	8.52565E-05	7.57266E-05
12.04697037	0.000138738	0.000103846
12.76332092	0.000151192	0.000118463
13.52226734	0.000160985	0.000132067
14.32634354	0.000167509	0.000152247
15.17823315	0.000189925	0.000216803
16.08077812	0.000290501	0.000252966
17.03699112	0.000238599	0.000323906
18.05006409	0.000400853	0.000433258
19.12337875	0.000406474	0.000502183
20.26051521	0.000476768	0.000519272
21.46526909	0.000385271	0.000633854
22.74166107	0.000607925	0.000925972
24.09395409	0.000761559	0.001090749
25.5266552	0.000761088	0.001067649
27.04455185	0.000645659	0.001030915
28.65270615	0.00063645	0.001106178
30.35648537	0.000662049	0.001414696
32.16157913	0.000905401	0.001336712
34.07400894	0.000492519	0.000927444
Σύνολο		0.012592943

Πίνακας 4.16. Μήκος κύματος, υψομετρικές αποκλίσεις, τιμές RMS για τη ζώνη μεγάλων κυματισμών του T-Γ

LWR (T-Γ)		
Μήκος κύματος	Υψομ. Αποκλίσεις	RMS
3.011746645	1.75E-07	3.27E-08
3.190834522	1.90E-07	4.13E-08
3.380571365	2.45E-07	5.45E-08
3.581590652	2.97E-07	6.53E-08
3.794563293	3.17E-07	6.83E-08
4.020199776	2.89E-07	8.09E-08
4.259253502	3.88E-07	1.01E-07
4.512522221	4.07E-07	1.19E-07
4.780850887	4.81E-07	1.60E-07
5.065135479	6.47E-07	2.03E-07
5.366324902	7.00E-07	2.37E-07
5.685422897	7.86E-07	2.93E-07
6.023496628	9.45E-07	3.71E-07
6.381672382	1.13E-06	4.75E-07
6.761146545	1.38E-06	5.82E-07
7.163185596	1.52E-06	8.64E-07
7.589130878	2.54E-06	1.01E-06
8.04040432	1.95E-06	1.12E-06
8.518511772	2.72E-06	1.50E-06
9.02504921	3.19E-06	2.01E-06
9.561706543	4.29E-06	5.56E-06
10.13027573	1.53E-05	6.34E-06
10.73265362	5.77E-06	3.77E-06
11.37085152	6.04E-06	4.84E-06
12.04699707	8.26E-06	6.30E-06
12.76334953	9.33E-06	8.10E-06
13.52229881	1.20E-05	1.06E-05
14.32637787	1.43E-05	1.41E-05
15.17826843	1.89E-05	1.74E-05
16.08081627	1.96E-05	2.08E-05
17.03703117	2.38E-05	2.29E-05
18.05010796	2.14E-05	3.22E-05
19.12342262	3.86E-05	5.94E-05
20.2605629	6.59E-05	7.05E-05
21.46531868	5.11E-05	7.78E-05
22.74171638	7.07E-05	0.000111
24.0940094	9.31E-05	0.000126
25.52671432	8.22E-05	0.000156

27.04461479	0.000122936	0.000181
28.6527729	0.000102411	0.000162
30.35655785	8.72E-05	0.000149
32.16165543	7.83E-05	0.000182
34.07408905	0.000111872	0.000184
Σύνολο		1.62E-03