



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΕΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ
ΔΙΑΔΡΟΜΟΥ ΠΡΟΣΓΕΙΩΣΗΣ - ΑΠΟΓΕΙΩΣΗΣ
ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ



ΦΑΝΟΥΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπουσα: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνώνται οι παράμετροι αξιολόγησης της ομαλότητας οδοστρωμάτων διαδρόμων προσγείωσης/απογείωσης (Π/Α) αεροδρομίων. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύεται η σημασία της ομαλότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, κυρίως σε θέματα ασφάλειας, και σχολιάζονται οι λόγοι για τους οποίους η ομαλότητα οδοστρωμάτων αεροδρομίων πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα διαφορετικό θέμα από την ομαλότητα οδοστρωμάτων οδών. Επίσης, παρουσιάζονται τα διάφορα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας, καθώς και διεθνείς προδιαγραφές ομαλότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ενώ λεπτομερής αναφορά γίνεται στα διάφορα προσομοιώματα και τους δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ομαλότητας. Κατόπιν, αξιοποιώντας στοιχεία ομαλότητας από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, προερχόμενα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υφιστάμενο διάδρομο Π/Α αεροδρομίου, υπολογίζονται μέσω του λογισμικού ProFAA της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των Η.Π.Α (Federal Aviation Administration: FAA) οι υπόψη δείκτες ομαλότητας. Πραγματοποιούνται αξιολόγηση και συγκριτικές αναλύσεις των επιμέρους δεικτών και τα σχετικά αποτελέσματα οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα, όσον αφορά στους δείκτες και την ικανότητα τους να εκφράζουν αφενός, τα χαρακτηριστικά ομαλότητας ενός διαδρόμου Π/Α και αφετέρου, την απόκριση των αεροσκαφών. Τα συμπεράσματα αυτά στοιχειοθετούν προτάσεις για μελλοντική έρευνα, όσον αφορά στην αξιολόγηση της ομαλότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

ABSTRACT

In the present thesis, the evaluation parameters of roughness of airport landing/take off runway pavements are investigated. Through literature review the importance of airport pavement roughness, focused mainly on security issues, is highlighted and the reasons why airport pavement roughness should be treated as a separate issue from road pavement roughness are discussed. Also, the various roughness recording systems are presented, as well as international specifications of airport pavement roughness, while the various models and the indices used for evaluating roughness are detailed reported. Then, by utilizing roughness data derived from the data base of NTUA Pavement Engineering Laboratory that had been measured in an in-service airport runway, the considered roughness indices are calculated through the Federal Aviation Administration's software program ProFAA. Evaluation and comparative analysis of the various indices are made and the related results lead to useful conclusions, regarding the indices and their ability to express on the one hand, the characteristics of runway roughness and on the other hand, the response of aircrafts. These conclusions constitute recommendations for future research, regarding the evaluation of airport pavement roughness.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενική ανασκόπηση	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3	Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	3
2	ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ	5
2.1	Γενικά στοιχεία ομαλότητας	5
2.2	Σημασία καταγραφής ομαλότητας.....	7
2.3	Συστήματα καταγραφής ομαλότητας.....	11
2.3.1	Γενικά.....	11
2.3.2	Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης.....	12
2.3.3	Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα	13
2.3.4	«Ελαφρά» προφιλόμετρα.....	14
2.3.5	Προφιλογράφοι.....	15
2.3.6	Χειροκίνητες συσκευές.....	16
2.4	Ίχνη καταγραφής.....	20
2.5	Όρια προδιαγραφών ομαλότητας.....	22
2.6	Αξιολόγηση της ομαλότητας.....	27
2.6.1	Γενικά.....	27
2.6.2	Μέθοδος της Boeing και δείκτης BBI	29
2.6.3	Προσομοίωση του πήχη.....	36
2.6.4	Προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» και δείκτης IRI	38
2.6.5	Φιλτράρισμα των κυματισμών της κατά μήκος κατατομής.....	42
2.6.6	Προσομοίωση αεροσκάφους	45
3	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	47
3.1	Περιγραφή στοιχείων ομαλότητας.....	47

3.2	Επεξεργασία στοιχείων	49
3.3	Αποτελέσματα δεικτών ομαλότητας	50
3.3.1	Αποτελέσματα δείκτη BBI.....	50
3.3.2	Αποτελέσματα δείκτη IRI.....	52
3.3.3	Αποτελέσματα δείκτη SE.....	54
3.3.4	Αποτελέσματα δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο	56
4	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	59
4.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων ανά ίχνος καταγραφής	59
4.1.1	Δείκτης BBI	59
4.1.2	Δείκτης IRI.....	60
4.1.3	Δείκτης SE	62
4.1.4	Δείκτης RMSVA στο πιλοτήριο	63
4.2	Σύγκριση και συσχέτιση κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους και στο πιλοτήριο του αεροσκάφους.....	64
4.3	Σύγκριση και συσχέτιση δεικτών BBI, IRI και SE.....	67
4.4	Σύγκριση και συσχέτιση δεικτών BBI, IRI και κατακόρυφης επιτάχυνσης.....	69
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	73
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	81

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές [4]	5
Εικόνα 2.2 Κύρια στοιχεία κυματισμών επιπεδότητας [7]	6
Εικόνα 2.3 Συνέπειες έλλειψης ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων [1].....	8
Εικόνα 2.4 Bump Intergrator	13
Εικόνα 2.5 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρο [16]	14
Εικόνα 2.6 Προφιλόμετρο ελαφρού τύπου [16]	15
Εικόνα 2.7 California Profilograph [18]	16
Εικόνα 2.8 Μέθοδος auto rod and level [16]	17
Εικόνα 2.9 Συσκευή Dipstick [21].....	18
Εικόνα 2.10 Συσκευή Walking Profiler [23]	19
Εικόνα 2.11 Καταγραφή ομαλότητας με πήχη [18] [24].....	19
Εικόνα 2.12 Ίχνη καταγραφής για ADG II και III.....	21
Εικόνα 2.13 Ίχνη καταγραφής για ADG IV, V και VI.....	21
Εικόνα 2.14 Κριτήρια ομαλότητας με βάση τη μέθοδο Boeing Bump	25
Εικόνα 2.15 Μέτρηση ύψους απόκλισης [6]	30
Εικόνα 2.16 Ορισμός ελάχιστου μήκους ευθείας [6]	31
Εικόνα 2.17 Κριτήρια αποδοχής μεθόδου BBM [14].....	31
Εικόνα 2.18 Παράδειγμα υπολογισμού όριου αποδεκτού ύψους απόκλισης [34]	34
Εικόνα 2.19 Κριτήρια δείκτη BBI [6].....	35
Εικόνα 2.20 Φυσική εφαρμογή κυλιόμενου πήχη [34].....	36
Εικόνα 2.21 Προσομοίωση λειτουργίας πήχη μέσω του ProFAA [28].....	37
Εικόνα 2.22 Προσομοίωση κυλιόμενου πήχη μέσω του ProFAA [28].....	38
Εικόνα 2.23 Το προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» [39]	39
Εικόνα 2.24 Εύρος τιμών IRI σε σχέση με τους διάφορους τύπους οδοστρώματων και τις ταχύτητες προσπέλασής τους [2].....	41
Εικόνα 2.25 Τυπικό προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος [10]	43
Εικόνα 2.26 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με υψηλής διέλευσης φίλτρο 5m [10].....	43
Εικόνα 2.27 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με χαμηλής διέλευσης φίλτρο 10m [10].....	44
Εικόνα 2.28 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με φίλτρο ζώνης διέλευσης 5 ως 10m [10]	44
Εικόνα 2.29 Απόκριση αεροσκάφους στο καταγεγραμμένο προφίλ οδοστρώματος [15].....	45
Εικόνα 2.30 Παράμετροι της προσομοίωσης αεροσκάφους μέσω του ProFAA [40].	46
Εικόνα 3.1 Road Surface Profilometer του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ	48
Εικόνα 3.2 Ίχνη καταγραφής της αναλυτικής διαδικασίας	49
Εικόνα 3.3 Αποτελέσματα BBI αριστερού ίχνους.....	50
Εικόνα 3.4 Αποτελέσματα BBI κεντρικού ίχνους	51
Εικόνα 3.5 Αποτελέσματα BBI δεξιού ίχνους.....	51
Εικόνα 3.6 Αποτελέσματα IRI αριστερού ίχνους.....	52

Εικόνα 3.7 Αποτελέσματα IRI κεντρικού ίχνους	53
Εικόνα 3.8 Αποτελέσματα IRI δεξιού ίχνους	53
Εικόνα 3.9 Αποτελέσματα SE-3m αριστερού ίχνους	54
Εικόνα 3.10 Αποτελέσματα SE-3m κεντρικού ίχνους.....	55
Εικόνα 3.11 Αποτελέσματα SE-3m δεξιού ίχνους	55
Εικόνα 3.12 Αποτελέσματα RMSVA CP αριστερού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots.....	56
Εικόνα 3.13 Αποτελέσματα RMSVA CP κεντρικού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots.....	57
Εικόνα 3.14 Αποτελέσματα RMSVA CP δεξιού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots.....	57
Εικόνα 4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων BBI ανά ίχνος	59
Εικόνα 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI ανά ίχνος.....	61
Εικόνα 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων SE-3m ανά ίχνος.....	62
Εικόνα 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP ανά ίχνος.....	63
Εικόνα 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - αριστερό ίχνος,	64
Εικόνα 4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - κεντρικό ίχνος.....	65
Εικόνα 4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - δεξιό ίχνος.....	65
Εικόνα 4.8 Γραμμική συσχέτιση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους - όλα τα ίχνη	66
Εικόνα 4.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και SE-3m δεξιού ίχνους.....	67
Εικόνα 4.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων BBI και SE-3m δεξιού ίχνους.....	67
Εικόνα 4.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και BBI δεξιού ίχνους	68
Εικόνα 4.12 Αποτελέσματα κατακόρυφης επιτάχυνσης στο πιλοτήριο του αεροσκάφους B727 για ταχύτητα 100 knots – δεξιό ίχνος.....	69
Εικόνα 4.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και BBI δεξιού ίχνους	70
Εικόνα 4.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP και BBI δεξιού ίχνους.....	70
Εικόνα 4.15 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP και IRI δεξιού ίχνους.....	71
Εικόνα Π.1 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI αριστερό ίχνος.....	81
Εικόνα Π.2 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI κεντρικό ίχνος	81
Εικόνα Π.3 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI δεξιό ίχνος.....	82
Εικόνα Π.4 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI όλα τα ίχνη	82
Εικόνα Π.5 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m αριστερό ίχνος.....	83
Εικόνα Π.6 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m κεντρικό ίχνος	83
Εικόνα Π.7 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m δεξιό ίχνος	84
Εικόνα Π.8 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m όλα τα ίχνη	84
Εικόνα Π.9 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m αριστερό ίχνος	85
Εικόνα Π.10 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m κεντρικό ίχνος.....	85
Εικόνα Π.11 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m δεξιό ίχνος.....	86
Εικόνα Π.12 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m όλα τα ίχνη.....	86
Εικόνα Π.13 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI αριστερό ίχνος.....	87

Εικόνα Π.14 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI κεντρικό ίχνος	87
Εικόνα Π.15 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI δεξιό ίχνος	88
Εικόνα Π.16 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI όλα τα ίχνη	88
Εικόνα Π.17 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI αριστερό ίχνος	89
Εικόνα Π.18 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI κεντρικό ίχνος.....	89
Εικόνα Π.19 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI δεξιό ίχνος.....	90
Εικόνα Π.20 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI όλα τα ίχνη.....	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Όρια επιφανειακών ανωμαλιών ICAO [25]	23
Πίνακας 2.2 Προδιαγραφές για αξιολόγηση με πήχη	26
Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα συντελεστή R^2 γραμμικής συσχέτισης δεικτών BBI, IRI και SE-3m	68
Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα συντελεστή R^2 γραμμικής συσχέτισης του δείκτη RMSVA CP με τους δείκτες BBI και IRI.....	71

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου λειτουργικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων των διαδρόμων αεροδρομίων αποτελεί κύρια προτεραιότητα για τις αρχές ενός αεροδρομίου λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσουν τα αεροσκάφη, τόσο κατά την απογείωση όσο και κατά την προσγείωσή τους. Η παραπάνω απαίτηση, παρόλο που υφίσταται και για τα οδοστρώματα των οδών, είναι αυστηρότερη για τα οδοστρώματα αεροδρομίων, δεδομένων των υψηλών επιπέδων ασφαλείας που επιδιώκονται κατά τη λειτουργία του αεροδρομίου. Πολλές φορές η κατάσταση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα με σοβαρές επιπτώσεις [1]. Συνεπώς, η διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου εξυπηρετικότητας και ασφάλειας αποτελεί ένα βασικό θέμα.

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

Η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό επιφανειακών ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, που επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης των αεροσκαφών. Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα διάδρομο προσγείωσης – απογείωσης (Π/Α) αεροσκαφών, είναι η ολισθηρότητα και η ομαλότητα – επιπεδότητα. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται συνήθως μέσω μετρήσεων και καταγραφών με ειδικά συστήματα καταγραφής.

Η ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ποιοτικό χαρακτηριστικό του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζει την κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος και έχει άμεση σχέση με την ασφάλεια των πτήσεων των αεροσκαφών, καθώς επιδρά στη ποιότητα κύλισης και την πέδηση των αεροσκαφών, με την άνεση των πιλότων και των επιβατών, με την αύξηση του λειτουργικού κόστους και την φθορά των αεροσκαφών. Επομένως ο έγκαιρος και επαρκής προσδιορισμός της μέσω διαφόρων μεθόδων μετρήσεων, καθώς και η εφαρμογή διαφόρων τρόπων αναλύσεων για τη αξιολόγησή της και την διεξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων, καθίσταται αναγκαίος, προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη και ορθή πολιτική αξιολόγησης της λειτουργικής κατάστασης ενός οδοστρώματος.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και ανάλυση της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων διαδρόμων Π/Α αεροδρομίων, καθώς και η διερεύνηση των παραμέτρων αξιολόγησής της. Ως πρώτο βήμα, θα γίνει ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά στις παραμέτρους, αλλά και την αξιολόγηση της ομαλότητας, συμπεριλαμβανομένου των μεθόδων και συστημάτων καταγραφής της. Εν συνεχεία, θα γίνει αναφορά και σχολιασμός όσον αφορά αφενός σε ισχύουσες προδιαγραφές ομαλότητας αεροδρομίων και αφετέρου, τους διάφορους δείκτες ομαλότητας που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγησή της διεθνώς. Τέλος, προβλέπεται η επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων ομαλότητας για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση των επιμέρους δεικτών, καθώς και συγκριτικές αναλύσεις, προκειμένου να διερευνηθεί η ικανότητα των υπόψη δεικτών να εκφράζουν τα χαρακτηριστικά της ομαλότητας και την απόκριση του αεροσκάφους.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Ακολούθως δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που αποτελούν την παρούσα διπλωματική εργασία. Το παρόν κεφάλαιο είναι εισαγωγικό.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται η έννοια της ομαλότητας της επιφάνειας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Γίνεται αναφορά στην σημαντικότητα της καταγραφής της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων και στις διαφορές σε σχέση με την ομαλότητα οδών. Ακόμα αναφέρονται τα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας, τα προτεινόμενα ίχνη καταγραφής, καθώς και οι προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά σε διάφορες μεθόδους και δείκτες για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι διαδικασίες επεξεργασίας και ανάλυσης στοιχείων ομαλότητας, τα οποία ελήφθησαν από τη τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ καθώς και τα αποτελέσματα των διάφορων δεικτών.

Στο κεφάλαιο 4 περιλαμβάνονται οι συγκριτικές αναλύσεις και οι συσχετίσεις των δεικτών ομαλότητας που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας.

Στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς και διάφορες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

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

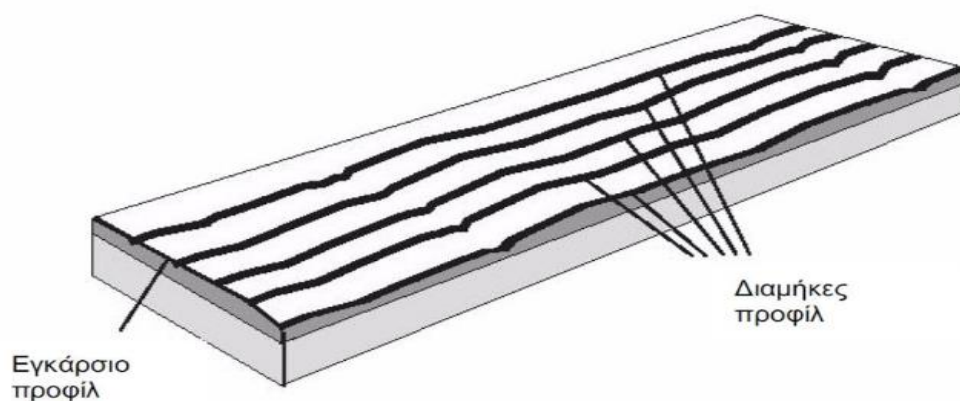
Τέλος στο Παράρτημα περιλαμβάνονται τα γραφήματα συσχέτισης των επιμέρους δεικτών ομαλότητας.

2 ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

2.1 Γενικά στοιχεία ομαλότητας

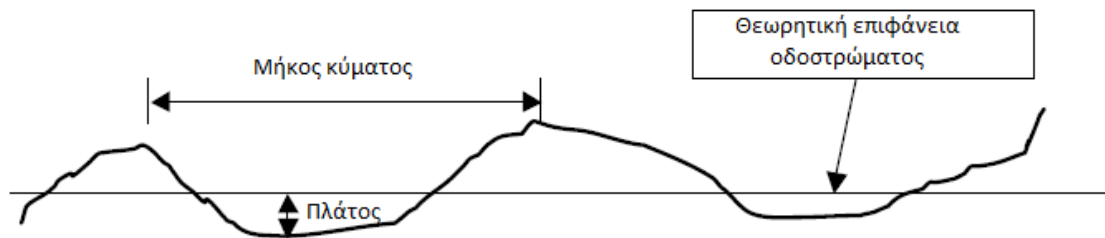
Η ομαλότητα ενός οδοστρώματος αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασής του. Σαν έλλειψη ομαλότητας ορίζεται το σύνολο των κατά μήκος αποκλίσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος από την πραγματική επίπεδη επιφάνεια, με χαρακτηριστικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων, τη δυναμική των φορτίσεων των οδοστρωμάτων και την ποιότητα κύλισης [2].

Η ομαλότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος (προφίλ). Το προφίλ είναι μια δισδιάστατη τομή που λαμβάνεται κατά μήκος μιας φανταστικής γραμμής. Προβλήματα ομαλότητας προκύπτουν όταν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις, σε κατακόρυφο επίπεδο, του πραγματικού προφίλ του οδοστρώματος σε σχέση με το θεωρητικό προφίλ. Η ομαλότητα διακρίνεται στη «διαμήκη ομαλότητα» και στην «εγκάρσια ομαλότητα». Το προφίλ του οδοστρώματος κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1 [3].



Εικόνα 2.1 Επιφάνεια οδοστρώματος και κατατομές [4]

Με τον όρο ομαλότητα αναφερόμαστε κυρίως στην κατά μήκος επιπεδότητα. Η διαμήκης ή κατά μήκος ομαλότητα περιγράφεται από τους κυματισμούς (βλέπε Εικόνα 2.2) της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η παράμετρος αυτή είναι συνυφασμένη με την αξιολόγηση της ομαλότητας. Στα οδοστρώματα οδών η ομαλότητα περιγράφεται από τους κυματισμούς μήκους κυρίως 0,5-50 μέτρα [2]. Ωστόσο η ομαλότητα οδών δεν εξετάζει τα μεγαλύτερα μήκη κύματος που είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της ομαλότητας αεροδρομίων, γιατί στα επιβατικά οχήματα και φορτηγά η απόσταση μεταξύ των αξόνων τροχών είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το πολύ μεγαλύτερο μεταξόνιο (wheelbase) των αεροσκαφών [5]. Έρευνα της Boeing έχει αποδείξει ότι αποκλίσεις με μήκος κύματος άνω των 120 μέτρων δεν συντελούν στη δυναμική απόκριση του αεροσκάφους και δεν το επηρεάζουν [6].



Εικόνα 2.2 Κύρια στοιχεία κυματισμών επιπεδότητας [7]

Πέρα από τον όρο ομαλότητα (smoothness), στην ευρωπαϊκή βιβλιογραφία συναντάται και ο όρος επιπεδότητα (evenness). Αντίστοιχα στην αμερικανική βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος τραχύτητα (roughness). Και οι τρεις εκφράζουν ακριβώς το ίδιο μέγεθος, δηλαδή την απόκλιση της επιφάνειας του οδοστρώματος από την τελειώς επίπεδη επιφάνεια. Στην Ελλάδα δεν έχει καθοριστεί ποιος είναι ο προσφορότερος όρος για να περιγράψει το μέγεθος αυτό, το οποίο τότε αποδίδεται με τον όρο ομαλότητα και τότε με τον όρο επιπεδότητα [4].

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που συμβάλλουν στην υποβάθμιση του επιπέδου ομαλότητας [8]:

- Κατασκευαστικά λάθη
- Φορτία κυκλοφορίας
- Περιβαλλοντικές επιδράσεις
- Υλικά κατασκευής

Στα νέα οδοστρώματα η έλλειψη ομαλότητας οφείλεται σε κατασκευαστικά λάθη κατά τη διάστρωση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος αλλά και σε ανεπάρκεια ποιότητας υλικού και εξοπλισμού. Οι ανωμαλίες λόγω κακής κατασκευής μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στο προφίλ του οδοστρώματος σε σχέση με το προφίλ σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το οδόστρωμα να μην μπορεί να παραδοθεί για να δεχτεί την κυκλοφορία λόγω έλλειψης της απαιτούμενης ομαλότητας.

Η υποβάθμιση της ομαλότητας εντείνεται με την αύξηση των φορτίων κυκλοφορίας. Τα επαναλαμβανόμενα φορτία κυκλοφορίας μπορεί να προκαλέσουν αστοχίες στο οδόστρωμα, όπως ρωγμές, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της έλλειψης ομαλότητας.

Περιβαλλοντικές επιδράσεις όπως η αύξηση του παγετού και οι αλλαγές του όγκου λόγω συστολής ή διαστολής της υπόστρωσης συμβάλλουν στη μείωση της ομαλότητας με το πέρασμα του χρόνου.

Ανομοιομορφίες στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του οδοστρώματος, καθώς και μη ομοιόμορφη συμπύκνωση των στρώσεων του οδοστρώματος και της υπόστρωσης μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην αυξημένη έλλειψη ομαλότητας.

Μικρού μήκους κυματισμοί (ως και 3 μέτρα) είναι συνήθως συνέπεια ατελειών της επιφανειακής στρώσης του οδοστρώματος, ενώ μεγάλου μήκους κυματισμοί (πάνω από 10 μέτρα) οφείλονται κατά κύριο λόγο στις υποκείμενες στρώσεις. Τονίζεται ότι ενδεχόμενη αρχική έλλειψη ομαλότητας συνήθως εντείνεται με το πέρασμα του χρόνου [2].

2.2 Σημασία καταγραφής ομαλότητας

Η παρακολούθηση και η καταγραφή της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων είναι κρίσιμης σημασίας κυρίως για λόγους ασφάλειας των κινήσεων των αεροσκαφών. Στα αεροδρόμια, η ομαλότητα έχει οριστεί ως προς τις επιφανειακές ανωμαλίες που μπορεί να βλάψουν την ασφαλή λειτουργία του αεροσκάφους, να προκαλέσουν ζημιά, ή να αυξήσουν την καταπόνηση στα

εξαρτήματα του αεροσκάφους. Η έλλειψη ομαλότητας μπορεί να προκαλέσει αυξημένη καταπόνηση σε κρίσιμα εξαρτήματα του αεροσκάφους το οποίο αυξάνει τον κίνδυνο πρόωρης αστοχίας και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε αδυναμία απογείωσης του αεροσκάφους (βλέπε Εικόνα 2.3). Μπορεί να προκαλέσει αυξημένες δονήσεις στο αεροσκάφος που έχουν ως αποτέλεσμα τις διαμαρτυρίες των επιβατών και των πιλότων που μπορεί να δυσκολεύονται να επικεντρωθούν σε κρίσιμα όργανα του πιλοτηρίου ή μπορεί να έχουν δυσκολία χειρισμού του ελέγχου κατά την απογείωση ή την προσγείωση. Η μειωμένη ομαλότητα ενός διαδρόμου μπορεί ακόμα να μειώσει την ικανότητα πέδησης (επιβράδυνσης) του αεροσκάφους, καθώς αυτό αναπτύσσει ή ανταποκρίνεται με κατακόρυφες επιταχύνσεις [9].



Εικόνα 2.3 Συνέπειες έλλειψης ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων [1]

Όπως περιγράφεται και από την Εικόνα 2.3, η έλλειψη ομαλότητας μπορεί να έχει σαν συνέπεια πιθανές φθορές του αεροσκάφους και αύξηση του λειτουργικού κόστους. Ακόμα η έλλειψη ομαλότητας έχει σαν συνέπεια και την καταπόνηση του οδοστρώματος, λόγω της δυναμικής φόρτισης που αναπτύσσεται, που οδηγεί σε μείωση του χρόνου ζωής του και σε ενδεχόμενη απαίτηση επισκευών υψηλού κόστους.

Ο Gerardi το 1997, σε ένα άρθρο του πάνω στην ομαλότητα αεροδρομίων, παρέθεσε κάποιες μελέτες στις οποίες η ομαλότητα αεροδρομίων συνέβαλλε σε αεροπορικά ατυχήματα. Σ' αυτές τις μελέτες ο Gerardi δίνει έμφαση στο πως η έλλειψη ομαλότητας αυξάνει την απόσταση που διανύει το αεροσκάφος για να ακινητοποιηθεί, αυξάνει την καταπόνηση του αεροσκάφους, και μπορεί να προκαλέσει αυξημένη ζημιά στα φορεία και στα συστήματα ανάρτησης του αεροσκάφους. Το άρθρο καταλήγει με μια πρόταση να θεσπιστούν επίσημα αποδεκτά όρια ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων [10]. Σε ένα άλλο άρθρο του το 2007 [11], ο Gerardi αναφέρεται στις επιπτώσεις της ομαλότητας κατά την κίνηση του αεροσκάφους σε ένα διάδρομο και δίνει έμφαση στις επιπτώσεις όταν κατά την απογείωση του αεροσκάφους αποφασίζεται από τον πιλότο η ματαίωση της πτήσης.

Η καταγραφή και η αξιολόγηση της ομαλότητας για τα οδοστρώματα αεροδρομίων διαφέρει σε σχέση με την ομαλότητα για τα οδοστρώματα οδών. Τα αεροσκάφη έχουν πολύ μεγαλύτερο βάρος και διαφορετική δομή από τα οχήματα και ταξιδεύουν σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων, με αποτέλεσμα να αντιδρούν διαφορετικά στις επιφανειακές ανωμαλίες του οδοστρώματος. Επίσης, η απόσταση ανάμεσα στα φορεία τροχών του αεροσκάφους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το μεταξόνιο των επιβατικών οχημάτων και των φορτηγών, καθιστώντας το αεροσκάφος πιο ευαίσθητο σε μεγαλύτερου μήκους κυματισμούς. Ακόμα, κατά τις διαδικασίες της απογείωσης και της προσγείωσης το οδόστρωμα και το αεροσκάφος καταπονούνται με μεγαλύτερα δυναμικά φορτία. Επιπλέον το αεροσκάφος πραγματοποιεί κινήσεις και κατά τις δύο κατευθύνσεις κατά μήκος του διαδρόμου που έχει ως αποτέλεσμα οι αντιδράσεις του αεροσκάφους να εξαρτώνται από την κατεύθυνση της κίνησης [10]. Τελικά υπάρχουν τόσες πολλές διαφορές μεταξύ αεροσκαφών και οχημάτων που οι μελέτες ομαλότητας για τα οδοστρώματα αεροδρομίων και για τα οδοστρώματα οδών θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως διαφορετικά θέματα [12].

Στις οδούς, η ομαλότητα ορίζεται κυρίως ως προς τη ποιότητα κύλισης και την άνεση για τον επιβάτη ενός οχήματος. Οι κατασκευαστές οχημάτων σχεδιάζουν τα συστήματα ανάρτησης ώστε να μειώσουν την επιρροή των κοινών ανωμαλιών του οδοστρώματος και να βελτιώσουν την ποιότητα κύλισης. Αντίθετα η ομαλότητα στα οδοστρώματα αεροδρομίων δεν ορίζεται (κυρίως) ως προς την ποιότητα κύλισης. Η άνεση για τον επιβάτη, αν και σημαντική, δεν αποτελεί πρωταρχικό θέμα αφού το

μέγεθος της δυσφορίας είναι μικρό και ο χρόνος έκθεσης είναι περιορισμένος σε κάποια δευτερόλεπτα. Ο πρωταρχικός σκοπός ενός συστήματος ανάρτησης αεροσκάφους είναι να απορροφήσει την ενέργεια που δαπανάται κατά τη διάρκεια της προσγείωσης. Τα συστήματα ανάρτησης του αεροσκάφους έχουν μικρότερη ικανότητα να αμβλύνουν τις επιπτώσεις των επιφανειακών ανωμαλιών λόγω του μεγέθους της ενέργειας που πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά τη διάρκεια της προσγείωσης [6]. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να ελεγχθούν οι συνέπειες της ομαλότητας στην επιφάνεια του οδοστρώματος και όχι μέσω των συστημάτων ανάρτησης του αεροσκάφους.

Επομένως, η ομαλότητα στους διαδρόμους αεροδρομίων ορίζεται κυρίως ως προς τη κόπωση στα εξαρτήματα του αεροσκάφους (αυξημένες τάσεις και φθορά) και σε άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφαλή λειτουργία του αεροσκάφους (αυξημένες δονήσεις και δυνάμεις βαρύτητας) και όχι τόσο ως προς την ποιότητα κύλισης και την άνεση του επιβάτη [9].

Ακόμα, ο ρόλος των πιλότων είναι σημαντικός για την καταγραφή της ομαλότητας. Τα παράπονα και οι παρατηρήσεις τους, παρ' ότι δεν δείχνουν με βεβαιότητα ότι προκαλείται κόπωση και φθορά στα εξαρτήματα του αεροσκάφους, αποτελούν συχνά την πρώτη ένδειξη έλλειψης της απαιτούμενης ομαλότητας του οδοστρώματος [6].

Η καταγραφή και αξιολόγηση της ομαλότητας στα αεροδρόμια αφορά σε δύο κατηγορίες ομαλότητας [13]:

- Απομονωμένες αποκλίσεις (διογκώσεις και καθιζήσεις) στο προφίλ όπου μια υπερβολική αλλαγή στην ανύψωση εμφανίζεται σε σχέση με το μήκος βάσης της απόκλισης. Αποκλίσεις μικρού μήκους κυμαίνονται από σχεδόν μηδενικού μήκους, όπως είναι μια απότομη κάθετη υψομετρική αλλαγή, μέχρι μήκους που αντιστοιχεί περίπου στην απόσταση μεταξύ των αξόνων τροχών (μεταξόνιο) ενός τυπικού επιβατικού οχήματος. Αποκλίσεις μεγάλου μήκους κυμαίνονται μέχρι περίπου 60 μέτρα και μπορεί να έχουν διάφορες συνέπειες για το αεροσκάφος.
- Μέσα επίπεδα ομαλότητας του προφίλ για ολόκληρο το διάδρομο (ή για τμήματα του διαδρόμου). Η μέση ομαλότητα του προφίλ μπορεί να καθοριστεί αναλύοντας ένα προφίλ οδοστρώματος για τον υπολογισμό ενός

δείκτη μέσης ομαλότητας. Ένας δείκτης μέσης ομαλότητας μπορεί να συμπεριληφθεί σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων για την πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών του οδοστρώματος και την ανάγκη για αποκατάσταση του οδοστρώματος.

2.3 Συστήματα καταγραφής ομαλότητας

2.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η ομαλότητα επηρεάζει σημαντικά πολλά βασικά στοιχεία τόσο για το οδόστρωμα όσο και για το αεροσκάφος και τους επιβάτες. Επομένως η επίδραση της ομαλότητας καθιστά απαραίτητη τη παρακολούθησή και αξιολόγησή της, όχι μόνο κατά την κατασκευή του έργου, αλλά και κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του οδοστρώματος. Η παρακολούθηση και «απομόνωση» της ομαλότητας απαιτεί την καταγραφή της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος που γίνεται συνήθως με τη μέτρηση των υψομετρικών αποκλίσεων (elevation) της κατατομής. Η μετακίνηση στο διάδρομο με ένα όχημα υψηλής ταχύτητας δεν είναι ενδεικτική λόγω των διαφορών στο μεταξόνιο, στη μάζα, στη ταχύτητα και στο σύστημα ανάρτησης ανάμεσα στα αεροσκάφη και στα οχήματα. Επίσης, οπτικές παρατηρήσεις λογικά δεν θα αποκαλύψουν προβλήματα ομαλότητας, είτε επειδή οι ανωμαλίες είναι συχνά πολύ μεγάλες σε μήκος ή μικρές σε βάθος για να εντοπιστούν με το μάτι [9] [14].

Γενικά, είναι επιθυμητό να πραγματοποιείται καταγραφή της διαμήκου κατατομής της επιφάνειας των νέων ή αποκατεστημένων οδοστρωμάτων πριν ή όσο το δυνατόν συντομότερα μετά την έναρξη λειτουργίας τους. Η καταγραφή της κατατομής της επιφάνειας του διαδρόμου θα χρησιμεύσει επίσης ως έλεγχος για την επάρκεια της κατασκευής, καθώς και να παρέχει μια αναφορά ή «σημείο αναφοράς» βάσει του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί επακόλουθη καταγραφή ή υποβάθμιση της ομαλότητας σε όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος [13].

Η συχνότητα και το χρονοδιάγραμμα των μετρήσεων ομαλότητας καθορίζεται από την διαχείριση του αεροδρομίου. Τα παράπονα των πιλότων είναι συχνά η πρώτη

ένδειξη ότι μπορεί να υπάρχει έλλειψη ομαλότητας του οδοστρώματος και ότι περαιτέρω έρευνα (καταγραφή του προφίλ του οδοστρώματος) μπορεί να απαιτηθεί [13].

Σε ένα διάδρομο αεροδρομίου πραγματοποιούνται συνεχώς κινήσεις αεροσκαφών, οπότε η απόκτηση του απαιτούμενου χρόνου πρόσβασης για να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις της ομαλότητας μπορεί να είναι δύσκολη. Η μέθοδος καταγραφής της κατατομής του οδοστρώματος πρέπει να είναι γρήγορη, οικονομική, λεπτομερής και ακριβής [15].

Για την αξιολόγηση της ομαλότητας χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα συστήματα καταγραφής των επιφανειακών χαρακτηριστικών των οδοστρωμάτων. Σημειώνεται ότι στις προδιαγραφές επιτελεστικότητας ενός έργου δεν ορίζεται κάποιο συγκεκριμένο όχημα για την καταγραφή της ομαλότητας. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται διεθνώς για την καταγραφή της ομαλότητας διακρίνεται στις ακόλουθες πέντε βασικές κατηγορίες [2]:

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

Περισσότερα στοιχεία για τις κατηγορίες των συστημάτων καταγραφής της ομαλότητας δίνονται στα ακόλουθα εδάφια.

2.3.2 Συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης

Τα συστήματα καταγραφής της μηχανικής απόκρισης μετρούν την απόκριση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων στο όχημα. Αυτοκινούμενα οχήματα ή τυπικά τρέιλερ χρησιμοποιούνται για να ενσωματώσουν συσκευές καταγραφής της απόκρισης. Αντιπροσωπευτικό σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι το Bump Intergrator (βλέπε Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4 Bump Intergrator

Τα συστήματα που αφορούν αυτοκινούμενα οχήματα συναθροίζουν την κατακόρυφη κίνηση του πίσω τροχού σε σχέση με τον σκελετό του οχήματος, ενώ αυτά που αφορούν συρόμενα τρέιλερ συναθροίζουν την κατακόρυφη κίνηση του τρέιλερ σε σχέση με τον σκελετό του οχήματος ρυμούλκησης [2].

2.3.3 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρα

Τα προφιλόμετρα υψηλής ταχύτητας (βλέπε Εικόνα 2.5) είναι τα πιο τεχνολογικά εξελιγμένα και ευρέως διαδεδομένα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Καταγράφουν τα χαρακτηριστικά των κατατομών της επιφάνειας του οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες κίνησης. Για την καταγραφή χρησιμοποιείται ένα επιταχυνσιόμετρο (accelerometer) και ένας ή περισσότεροι αισθητήρες (laser) που μετράνε την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του επιταχυνσιόμετρου και του εδάφους. Επίσης μέσω του ταχύμετρου του οχήματος προσδιορίζεται η απόσταση που διανύεται.



Εικόνα 2.5 Υψηλής ταχύτητας προφιλόμετρο [16]

Κατόπιν επεξεργασίας των στοιχείων συλλογής προκύπτει η ζητούμενη κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος που αναπαράγουν την ομαλότητα του οδοστρώματος. Στα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτής της κατηγορίας συγκαταλέγεται εκτός άλλων και η δυνατότητα μέτρησης και άλλων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, όπως η υφή της επιφάνειάς του, καθώς και η δυνατότητα πραγματοποίησης εκτιμήσεων σχετικά με το βάθος ενδεχόμενων τροχοαυλακώσεων [2].

2.3.4 «Ελαφρά» προφιλόμετρα

Τα προφιλόμετρα ελαφρού τύπου (βλέπε Εικόνα 2.6) χρησιμοποιούνται κυρίως κατά την κατασκευή νέων στρώσεων οδοστρώματος. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια με αυτή των υψηλών ταχυτήτων προφιλόμετρων, με τη διαφορά ότι το σύστημα καταγραφής της ομαλότητας είναι ενσωματωμένο σε ένα ελαφρύ/μικρό όχημα [2].



Εικόνα 2.6 Προφιλόμετρο ελαφρού τύπου [16]

Τα προφιλόμετρα που αναπτύχθηκαν για τη μέτρηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα οδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα οδοστρώματα αεροδρομίων. Ωστόσο, τα περισσότερα προφιλόμετρα καταγράφουν μήκη κύματος έως και 45 μέτρα μόνο, ενώ ένα αεροσκάφος ανταποκρίνεται σε μήκη κύματος μέχρι περίπου 120 μέτρα. Κατά την εφαρμογή των προφιλόμετρων προσοχή πρέπει να δοθεί στην αφαίρεση ή τη ρύθμιση των φίλτρων για να επιτρέπεται η μέτρηση μεγαλύτερου μήκους κύματος [15].

Τα προφιλόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδρόμους, εφόσον είναι σε θέση να εξάγουν ένα διαμήκες προφίλ σε μια μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από λογισμικό ανάλυσης ομαλότητας, όπως το λογισμικό ProFAA [17] της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των Η.Π.Α (Federal Aviation Administration: FAA).

2.3.5 Προφίλογράφοι

Οι προφίλογράφοι αποτελούνται από άκαμπτη δοκό ή πλαίσιο το οποίο υποστηρίζεται από τροχούς τοποθετημένους κατά μήκος. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην καταγραφή των αποκλίσεων της κίνησης του κεντρικού τροχού σε σχέση με κατάλληλα επιλεγμένο σημείο αναφοράς [2]. Αντιπροσωπευτικό σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι ο California Profilograph (βλέπε Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 California Profilograph [18]

Οι προφίλογράφοι σύρονται ή ρυμουλκούνται με μικρές ταχύτητες κατά μήκος της επιφάνειας του εκάστοτε οδοστρώματος, ενώ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ομαλότητας δειγματοληπτικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής νέων οδοστρωμάτων ή επιστρώσεων. Η FAA συμπεριλαμβάνει τον προφιλόγραφο στις κατασκευαστικές της προδιαγραφές.

2.3.6 Χειροκίνητες συσκευές

Τα χειροκίνητα συστήματα της αποτύπωσης της ομαλότητας των οδοστρωμάτων συνοψίζονται σε τρεις κατηγορίες: στην τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας του οδοστρώματος (rod and level method), στη συσκευή Dipstick και στη συσκευή Walking Profiler.

Η τοπογραφική αποτύπωση της επιφάνειας του οδοστρώματος (rod and level method), σε συνδυασμό με υψηλή πυκνότητα των απαιτούμενων σημείων αποτύπωσης, είναι αναμφίβολα η πιο ακριβής μέθοδος καταγραφής της γεωμετρικής κατατομής της επιφάνειας ενός οδοστρώματος. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα στατικό τρίποδο όργανο το οποίο τοποθετείται πάνω στο οδόστρωμα και μια κατακόρυφη σταδία η οποία μετακινείται σε ίσα διαστήματα από το όργανο. Μέσω του οργάνου διαβάζονται από τη σταδία οι υψομετρικές τιμές. Το μεγάλο πλήθος των απαιτούμενων σημείων καθιστά όμως τη διαδικασία αυτή εξαιρετικά χρονοβόρα και

δαπανηρή καθώς απαιτεί δύο άτομα για τη μέτρηση. Το πρότυπο ASTM E1364 [19] περιγράφει τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται για τη συλλογή δεδομένων με τη μέθοδο της τοπογραφικής αποτύπωσης της επιφάνειας του οδοστρώματος σε ένα τμήμα δοκιμής. Πλέον υπάρχει η αυτοματοποιημένη μέθοδος τοπογραφικής αποτύπωσης (automated rod and level) (βλέπε Εικόνα 2.8) και η σταδία έχει αντικατασταθεί από ένα ψηφιακό ιστό που είναι τοποθετημένος σε μια χειράμαξα και καταγράφει το υψόμετρο αναφοράς που καθορίζεται από ένα περιστρεφόμενο αισθητήρα που βρίσκεται στο όργανο [20].



Εικόνα 2.8 Μέθοδος auto rod and level [16]

Η συσκευή Dipstick (βλέπε Εικόνα 2.9) είναι μια χειροκίνητη συσκευή η οποία στέκεται σε δύο πόδια και περιλαμβάνει έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος καταγράφει τα δεδομένα και εκτελεί τους αριθμητικούς υπολογισμούς που χρειάζονται για την παραγωγή ενός προφίλ.



Εικόνα 2.9 Συσκευή Dipstick [21]

Ο χειριστής οδηγεί τη συσκευή κατά μήκος της διαδρομής που πρέπει να μετρηθεί. Η απόσταση μεταξύ των δύο ποδιών είναι ρυθμιζόμενη (συνήθως 0,305 μέτρα). Περιέχει ένα κλισιόμετρο που μετράει την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο ποδιών. Για την μέτρηση του προφίλ κατά μήκος μια γραμμής στο οδόστρωμα, γέρνεις τη συσκευή έτσι ώστε το μπροστινό πόδι να δέχεται όλο το βάρος, ανυψώνοντας το πίσω πόδι ελαφρώς πάνω από το έδαφος. Τότε περιστρέφεις τη συσκευή κατά 180 μοίρες ως προς το μπροστινό πόδι, τοποθετώντας το άλλο πόδι (που ήταν πίσω) μπροστά, κατά μήκος της γραμμής μέτρησης. Ο υπολογιστής παρακολουθεί τον αισθητήρα συνεχώς. Όταν αισθανθεί ότι το όργανο έχει σταθεροποιηθεί, τότε αυτόματα καταγράφει την υψομετρική αλλαγή και παράγει ένα ήχο που δείχνει ότι το επόμενο βήμα μπορεί να πραγματοποιηθεί. Το υψόμετρο αναφοράς είναι το μέγεθος που υπολογίζεται για το προηγούμενο σημείο. Το ύψος σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς προκύπτει από τη γωνία της συσκευής σε σχέση με τη βαρύτητα, μαζί με την απόσταση μεταξύ των δύο ποδιών. Η διαμήκης απόσταση καθορίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των μετρήσεων με το διάστημα δείγματος [22].

Η συσκευή Walking Profiler (βλέπε Εικόνα 2.10) είναι ένα σύστημα που βασίζεται σε ένα κλισιόμετρο με πολλούς τροχούς που ωθείται από ένα χειριστή με ταχύτητα βαδίσματος. Η τυπική ταχύτητα λειτουργίας είναι 0,8 χλμ/ώρα. Η συσκευή

συνεχώς καταγράφει τη σχετική ανύψωση των διαδοχικών σημείων ανά διάστημα 241 χιλιοστών (9,5 in), και αποθηκεύει τις μετρήσεις σε ένα ενσωματωμένο στη συσκευή φορητό υπολογιστή. Όλες οι σταδιακές αλλαγές δίνουν το ύψος του κάθε μετρούμενου σημείου και την απόσταση της επιφάνειας σε σχέση με το σημείο εκκίνησης. Η συσκευή είναι ικανή να μετρά υψομετρικές τιμές με ακρίβεια ± 2 χιλιοστών σε 100 μέτρα οριζόντιας απόστασης [8]. Ακόμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση των προφίλομέτρων υψηλής ταχύτητας.



Εικόνα 2.10 Συσκευή Walking Profiler [23]

Ακόμα, η καταγραφή της ομαλότητας μπορεί να γίνει με τη χρήση κανόνα-πήχη (straight-edge). Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 2.11, ένας ευθύγραμμος πήχης τοποθετείται κατά μήκος πάνω στο οδόστρωμα. Με κατάλληλη μετρητική διάταξη μετράται η απόκλιση του οδοστρώματος από την επιφάνεια του πήχη.



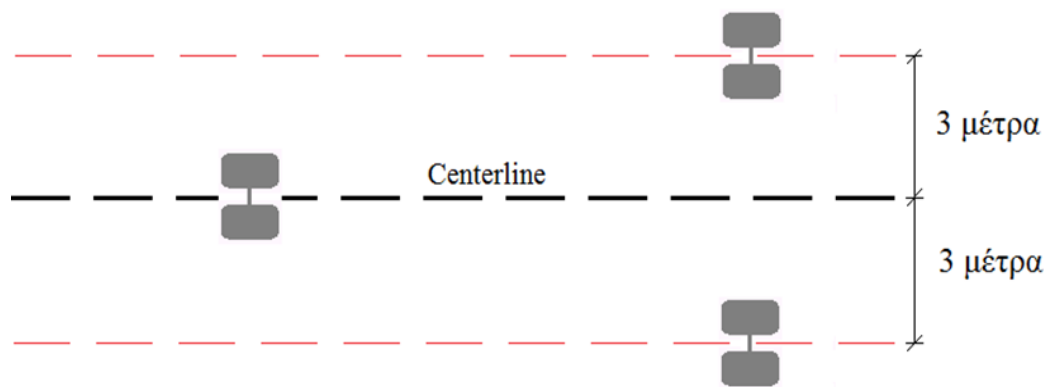
Εικόνα 2.11 Καταγραφή ομαλότητας με πήχη [18] [24]

Η καταγραφή με τη μέθοδο του πήχη πραγματοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας των νέων οδοστρωμάτων και περιλαμβάνεται στις προδιαγραφές των περισσότερων οργανισμών όπως είναι η FAA και ο ICAO. Επίσης πραγματοποιείται συνήθως επιπρόσθετα όταν απαιτείται λεπτομερής καταγραφή της ομαλότητας. Γενικά δεν αποτελεί ακριβό εξοπλισμό ωστόσο αποτελεί σχετικά χρονοβόρα μέθοδο μέτρησης του προφίλ και έχει περιορισμένη ακρίβεια.

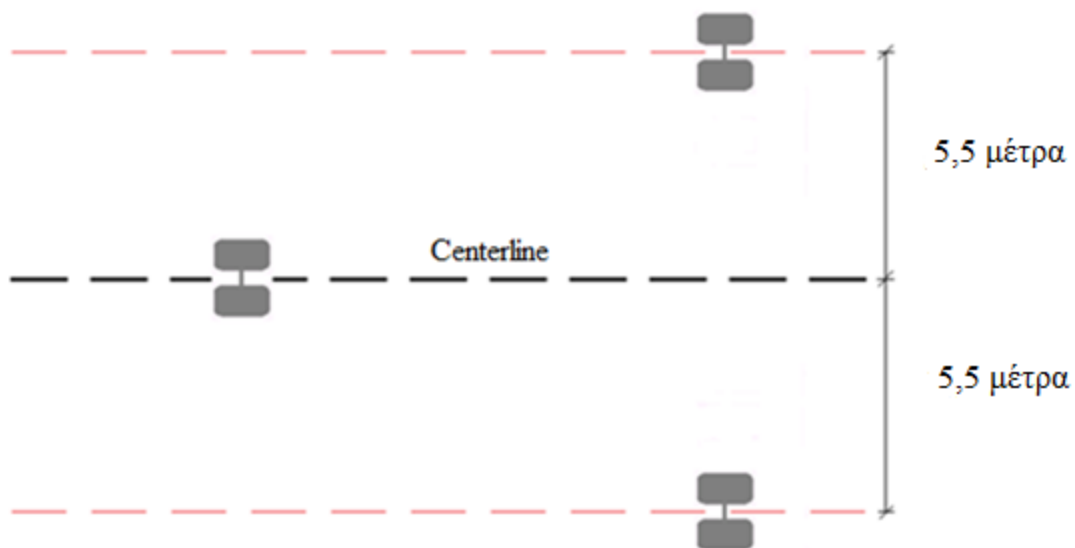
2.4 Ίχνη καταγραφής

Η καταγραφή του προφίλ του οδοστρώματος ενός διαδρόμου αεροδρομίου πρέπει να διεξάγεται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής (centerline) του διαδρόμου τουλάχιστον για τις περιοχές που έχουν αναφερθεί ως μη ομαλές, αλλά είναι προτιμότερο να διεξάγεται για όλο το μήκος του διαδρόμου. Η καταγραφή των προφίλ κατά μήκος των ιχνών όπου λογικά θα είναι τα κύρια φορεία τροχών του αεροσκάφους, είναι πολύ χρήσιμη για τον καθορισμό της πλήρους έκτασης της ομαλότητας και της απόκρισης του αεροσκάφους. Ακόμα γενικά συνίσταται το κατά μήκος διάστημα μεταξύ των σημείων καταγραφής να είναι το πολύ 3 μέτρα [14] [9].

Η θέση των φορείων ενός αεροσκάφους ως προς την κεντρική γραμμή διαφέρει από αεροσκάφος σε αεροσκάφος αλλά δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτει ακριβώς η θέση των φορείων τροχών με τη θέση των μετρήσεων. Η FAA συνιστά τη καταγραφή του προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του διαδρόμου καθώς και των προφίλ σε πλευρική μετατόπιση (αριστερά και δεξιά) από την κεντρική γραμμή, για την προσέγγιση των ιχνών των κύριων φορείων τροχών του αεροσκάφους που χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο (βλέπε Εικόνες 2.12 και 2.13).



Εικόνα 2.12 Ίχνη καταγραφής για ADG II και III



Εικόνα 2.13 Ίχνη καταγραφής για ADG IV, V και VI

Όπως περιγράφεται στις Εικόνες 2.12 και 2.13, η FAA προτείνει μέτρηση σε πλευρική μετατόπιση περίπου 3 μέτρων (10 πόδια) για κατηγορίες αεροσκάφους σχεδιασμού (ADG) II και III, ενώ για κατηγορίες αεροσκάφους σχεδιασμού (ADG) IV, V και VI προτείνει μέτρηση σε πλευρική μετατόπιση περίπου 5,5 μέτρων (17,5 πόδια). Αν η κυκλοφορία εξυπηρετεί όλες τις κατηγορίες αεροσκαφών τότε πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε όλες τις παραπάνω θέσεις [6].

2.5 Όρια προδιαγραφών ομαλότητας

Για την ασφάλεια των πτήσεων και των χρηστών, την αποτελεσματικότερη συντήρηση, τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων, κλπ., καθορίζονται κατώτερα επιτρεπτά όρια στις τιμές του συντελεστή ομαλότητας του οδοστρώματος. Όταν η τιμή του συντελεστή ομαλότητας πλησιάζει τα επιτρεπτά όρια, απαιτείται ο προγραμματισμός των εργασιών για την αποκατάσταση της ομαλότητας του οδοστρώματος. Όταν η τιμή του συντελεστή ομαλότητας φτάσει την τιμή του ορίου επέμβασης, το οδόστρωμα κρίνεται επικίνδυνο για την ασφάλεια και απαιτείται άμεση επέμβαση για την αποκατάστασή του [3].

Ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization: ICAO) παραθέτει κάποιες προτεινόμενες προδιαγραφές ομαλότητας στο Προσάρτημα A-5 του Παραρτήματος 14 (Annex 14). Η 6η έκδοση του ICAO Annex 14 [25], που είναι η πιο πρόσφατη, αναφέρει:

- Με την υιοθέτηση ορίων για τις παρατυπίες της επιφάνειας του διαδρόμου, το ακόλουθο κατασκευαστικό πρότυπο είναι εφικτό για μικρές αποστάσεις 3 μέτρων και είναι σύμφωνο με την ορθή τεχνική πρακτική: Εκτός από εγκάρσια της στέψης του οδοστρώματος ή εγκάρσια στα κανάλια αποστράγγισης, η τελική επιφάνεια της επιφανειακής στρώσης πρέπει είναι τέτοιας ομαλότητας που, όταν ελέγχεται με πήχη 3 μέτρων τοποθετημένο οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε κατεύθυνση στην επιφάνεια, δεν υπάρχει απόκλιση μεγαλύτερη από 3 χιλιοστά μεταξύ του κάτω μέρους του πήχη και της επιφάνειας του οδοστρώματος οπουδήποτε κατά μήκος του πήχη.
- Όταν εισάγονται φώτα ή σχάρες αποστράγγισης στην επιφάνεια του διαδρόμου, πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να εξασφαλιστεί ότι διατηρείται επαρκής ομαλότητα της επιφάνειας του διαδρόμου.
- Η λειτουργία των αεροσκαφών και η διαφορική καθίζηση των επιφανειακών θεμελίων θα οδηγήσουν τελικά σε αύξηση των επιφανειακών ανωμαλιών. Γενικά, απομονωμένες ανωμαλίες της τάξης των 2,5 έως 3 εκατοστών σε απόσταση 45 μέτρων είναι ανεκτές. Αν και οι μέγιστες αποδεκτές ανωμαλίες ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο και την ταχύτητα ενός αεροσκάφους, τα όρια των αποδεκτών επιφανειακών

ανωμαλιών μπορούν να εκτιμηθούν σε ένα εύλογο βαθμό. Ο Πίνακας 2.1 περιγράφει τα μέγιστα και προσωρινά αποδεκτά όρια. Σε περίπτωση υπέρβασης των μέγιστων ορίων, πρέπει να πραγματοποιηθούν διορθωτικές ενέργειες το συντομότερο δυνατό ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα κύλισης. Σε περίπτωση υπέρβασης των προσωρινά αποδεκτών ορίων, στα τμήματα του διαδρόμου που παρουσιάζεται τέτοια ομαλότητα θα πρέπει να ληφθούν διορθωτικά μέτρα αμέσως εάν οι κινήσεις των αεροσκαφών πρόκειται να συνεχιστούν.

Πίνακας 2.1 Όρια επιφανειακών ανωμαλιών ICAO [25]

	Ελάχιστο αποδεκτό μήκος επιφανειακής ανωμαλίας (μέτρα)								
	3	6	9	12	15	20	30	45	60
Επιφανειακή ανωμαλία									
Μέγιστο ύψος (ή βάθος) επιφανειακής ανωμαλίας (εκατοστά)	3	3.5	4	5	5.5	6	6.5	8	10
Προσωρινά αποδεκτό ύψος (ή βάθος) επιφανειακής ανωμαλίας (εκατοστά)	3.5	5.5	6.5	7.5	8	9	11	13	15

Επισημαίνεται ότι «επιφανειακή ανωμαλία» σημαίνει μεμονωμένες (isolated) υψομετρικές αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος που δεν βρίσκονται κατά μήκος μιας ενιαίας κλίσης σε ένα οποιοδήποτε δεδομένο τμήμα του διαδρόμου. Για το σκοπό αυτό, ένα «τμήμα διαδρόμου» ορίζεται εδώ, για να σημαίνει ένα τμήμα του διαδρόμου στο οποίο επικρατεί μια συνεχής γενική ανηφόρα, κατηφόρα ή επίπεδη κλίση. Το μήκος αυτού του τμήματος γενικά κυμαίνεται μεταξύ 30 και 60 μέτρων, και μπορεί να είναι μεγαλύτερο, ανάλογα με τη διαμήκη κατατομή και τη κατάσταση του οδοστρώματος.

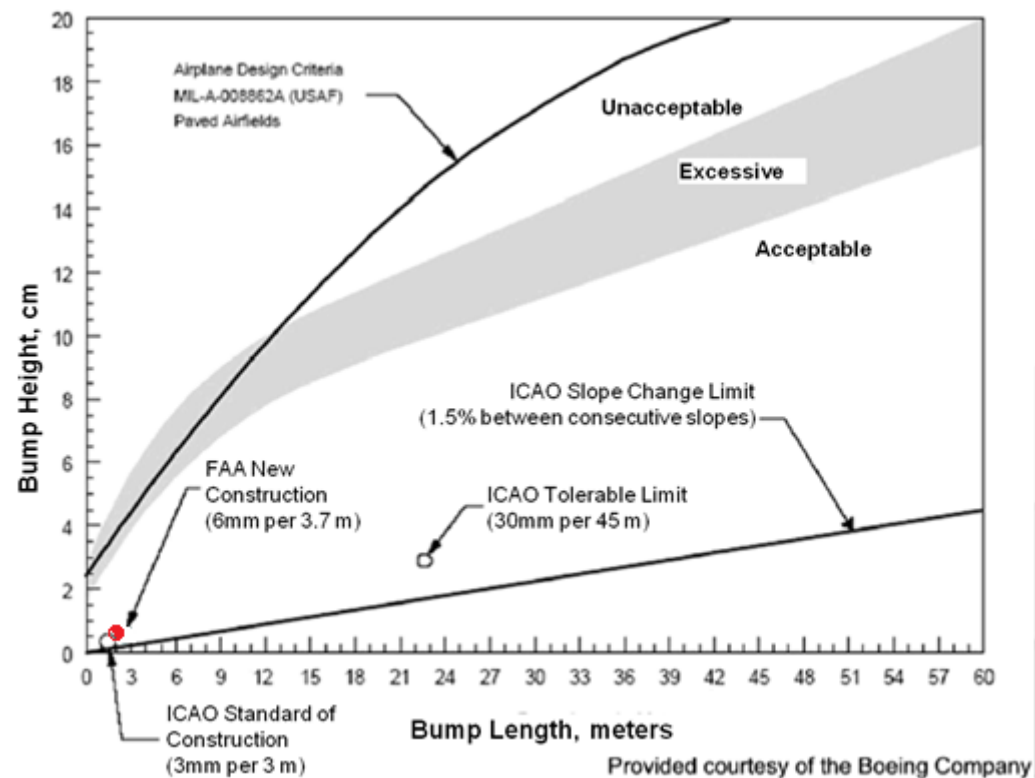
Επίσης ο ICAO αναφέρει ότι η παραμόρφωση του οδοστρώματος με το χρόνο μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα του σχηματισμού στρώματος νερού στο οδόστρωμα. Ένα στρώμα νερού πάχους έως περίπου 3 χιλιοστά, ιδιαίτερα αν βρίσκεται σε σημείο όπου πιθανόν πρόκειται να το συναντήσει ένα αεροσκάφος που προσγειώνεται, μπορεί να προκαλέσει υδρολίσθηση. Υδρολίσθηση είναι το

φαινόμενο κατά το οποίο δημιουργείται υδάτινος υμένας μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος με αποτέλεσμα να μηδενίζεται ο συντελεστής τριβής και κατ' επέκταση η αντίσταση της επιφάνειας σε ολίσθηση.

Στη πιο πρόσφατη εγκύκλιο της FAA (AC Standards for Specifying Construction of Airports, 2014) [26], στο Μέρος 5, αναφέρεται η παρακάτω προδιαγραφή για την ομαλότητα της τελικής επιφάνειας νέων ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων:

- Η τελική επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος δεν πρέπει να έχει αποκλίσεις μεγαλύτερες από 6 χιλιοστά όταν αξιολογείται με ένα πήχη μήκους 3,7 μέτρα. Ο πήχης τοποθετείται πάνω στο οδόστρωμα και ουσιαστικά στηρίζεται στα δύο υψηλότερα επιφανειακά σημεία του οδοστρώματος κατά μήκος του πήχη. Η τιμή της απόκλισης ισούται με την μέγιστη απόκλιση μεταξύ της επιφάνειας του οδοστρώματος και της επιφάνειας του πήχη, αλλά για την περιοχή μεταξύ των σημείων στα οποία στηρίζεται ο πήχης.

Η Εικόνα 2.14 παρουσιάζει μια σύγκριση των προδιαγραφών ομαλότητας του ICAO και της FAA με βάση τη μέθοδο Boeing Bump που θα δούμε εκτενέστερα στο υποκεφάλαιο 2.6. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14, ο ICAO υιοθετεί και μια προδιαγραφή για την μέγιστη αλλαγή σε διαδοχικές κατά μήκος κλίσεις που δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1,5%. Ακόμα στην εικόνα παρουσιάζεται και μια καμπύλη γραμμή που αντιπροσωπεύει τα όρια που υιοθετεί η Αεροπορία των Η.Π.Α (United States Air Force: USAF). Λόγω διαφορών στις απαιτήσεις των αεροσκαφών, η γραμμή της USAF αναπτύχθηκε για πιο αυστηρά όρια σε σχέση με τα εμπορικά αεροσκάφη [14].



Εικόνα 2.14 Κριτήρια ομαλότητας με βάση τη μέθοδο Boeing Bump

Η Υπηρεσία Μεταφορών του Καναδά (Transport Canada) υιοθετεί το παρακάτω όριο για αποδοχή νέων ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων [27]: Η τελική επιφάνεια του οδοστρώματος δεν πρέπει να έχει ανωμαλίες που υπερβαίνουν τα 5 χιλιοστά όταν ελέγχεται με ένα πήχη 4,5 μέτρων, τοποθετημένο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Το Σώμα Μηχανικών Στρατού της Αμερικής (United States Army Corps of Engineers: USACE) υιοθετεί το όριο για την διαμήκη ομαλότητα ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων ότι η τελική επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος όταν αξιολογείται με ένα πήχη μήκους 3,7 μέτρα δεν πρέπει να έχει αποκλίσεις μεγαλύτερες από 3 χιλιοστά στα σημεία του προφίλ που βρίσκονται ανάμεσα στα σημεία που στηρίζεται ο πήχης. Για την εγκάρσια ομαλότητα, το όριο αποδοχής αποκλίσεων είναι 6 χιλιοστά στα σημεία του προφίλ που βρίσκονται ανάμεσα στα σημεία που στηρίζεται ο πήχης, για μέτρηση με πήχη 3,7 μέτρων [28] [29].

Σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές, η απαίτηση για την ομαλότητα της αντιολισθηρής στρώσης ασφαλτικού σκυροδέματος είναι: Παράλληλα στον άξονα

της οδού, οι κυματισμοί ή άλλες τοπικές ανωμαλίες δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 5 χιλιοστά. Η μέτρηση θα πραγματοποιείται με 4μετρο πήχη. Εγκάρσια στον άξονα της οδού, οι αποκλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 3 χιλιοστά. Η μέτρηση θα πραγματοποιείται με 3μετρο πήχη [30].

Στον Πίνακα 2.2 συνοψίζονται οι προαναφερόμενες προδιαγραφές (διαμήκους) ομαλότητας νέων ασφαλτικών οδοστρωμάτων με τη μέθοδο του πήχη. Επισημαίνεται ότι υπάρχουν δύο επιλογές για τη μέθοδο του πήχη: ο έλεγχος των υψομετρικών αποκλίσεων είτε για τα σημεία που αντιστοιχούν σε όλο το μήκος του πήχη είτε για τα σημεία μεταξύ των σημείων στήριξης του πήχη.

Πίνακας 2.2 Προδιαγραφές για αξιολόγηση με πήχη

	ICAO	FAA	Transport Canada	USACE	Ελληνικές Προδιαγραφές
Μήκος πήχη	3m	3,7m	4,5m	3,7m	4m
Όλο/Μεταξύ	Όλο	Μεταξύ	Όλο	Μεταξύ	Όλο
Όριο Αποδοχής	3mm	6mm	5mm	3mm	5mm
Πηγή	ICAO Annex 14	AC 150/5370- 10G	ASG-20 Pavement Construction Methods and Inspections	UFGS 2749	ΠΕΤΕΠ 05-03- 12-01

Κατά το σχεδιασμό και τον καθορισμό ορίων για τον έλεγχο των αποκλίσεων της επιφάνειας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι επειδή η ομαλότητα του οδοστρώματος θα υποβαθμιστεί με το χρόνο, τα κατασκευαστικά όρια ομαλότητας που υιοθετούνται θα πρέπει να είναι πιο αυστηρά από τα αντίστοιχα που καθορίζονται για τη συντήρηση των οδοστρωμάτων [13].

2.6 Αξιολόγηση της ομαλότητας

2.6.1 Γενικά

Αφού γίνει η καταγραφή του προφίλ του οδοστρώματος, ξεκινάει η διαδικασία της ποσοτικοποίησης και αξιολόγησης της ομαλότητας του οδοστρώματος. Μέσω της αξιολόγησης μπορούν να δοθούν στατιστικές πληροφορίες στους διαχειριστές του αεροδρομίου που είναι σημαντικές για τον προγραμματισμό εργασιών συντήρησης και επιδιόρθωσης. Η ομαλότητα συνήθως υποβαθμίζεται εκθετικά με τον χρόνο, άρα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη γιατί αλλιώς μπορεί γρήγορα να οδηγήσει στην ανάγκη για εξ' ολοκλήρου αντικατάσταση του οδοστρώματος. Η αντικατάσταση είναι πολύ πιο ακριβή και χρονοβόρα από την συντήρηση και την επισκευή του οδοστρώματος. Επομένως η αξιολόγηση της ομαλότητας είναι αναγκαία για την αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης οδοστρώματος.

Στο παρελθόν, πολλές έρευνες είχαν επικεντρωθεί στην αξιολόγηση της ομαλότητας μέσω της μεθόδου της δυναμικής φασματικής ανάλυσης (Power Spectral Density Analysis – PSD Analysis), η οποία δίνει την κατανομή ενός χαρακτηριστικού των κυματισμών από τους οποίους αποτελείται μία κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος (π.χ. πλάτος ή κλίση) σε σχέση με το μήκος κύματος (ή κυματικό αριθμό) των επιμέρους κυματισμών [22]. Είναι ένα στατιστικό μέτρο της ομαλότητας για όλο το μήκος του διαδρόμου ή για τμήματά του. Η δυναμική φασματική ανάλυση δίνει μια ένδειξη της μέσης ομαλότητας, αλλά δεν κάνει διάκριση μεταξύ πολλών ανωμαλιών μικρού πλάτους και λίγων ανωμαλιών μεγάλου πλάτους σε ένα δεδομένο μήκος κύματος. Είναι χρήσιμη για ανάλυση των φορτίων του αεροσκάφους και των προβλημάτων καταπόνησης, ωστόσο δεν δίνει πληροφορίες για την τοποθεσία ελλειπούς ομαλότητας στο διάδρομο [14].

Το 1967 καθιερώθηκε, από έρευνες των Morris και Hall [31] που δημοσιεύτηκαν από την Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration: NASA), ότι η απόκριση του αεροσκάφους στις επιφανειακές ανωμαλίες απαιτούσε δοκιμαστικά όρια για την κατακόρυφη επιτάχυνση στη θέση του πιλοτηρίου του αεροσκάφους [14]. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ομαλότητα όχι μόνο είναι συνάρτηση της συχνότητας

απόκρισης του αεροσκάφους αλλά και ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός και κατασκευή του οδοστρώματος έχει κυρίαρχη θέση για την μείωση των επιπτώσεων της ομαλότητας στο αεροσκάφος. Πρακτικά, ένας διάδρομος θα μπορούσε να κριθεί ομαλός από κάποιους πιλότους και μη ομαλός από κάποιους άλλους, ακόμα και με τα ίδια επίπεδα ομαλότητας με βάση την δυναμική φασματική ανάλυση. Έγινε λοιπόν αναγκαίο να συσχετιστεί η ομαλότητα με την επιτάχυνση στο πιλοτήριο και να επικεντρωθούν οι προσπάθειες αποκατάστασης σε εκείνα τα τμήματα του διαδρόμου που δημιουργούν ανεπιθύμητες επιταχύνσεις. Με βάση αυτές τις έρευνες [31], που αργότερα επιβεβαιώθηκαν από τους Hall, Hunter και Morris [32], καθιερώθηκε μια μέγιστη αποδεκτή κατακόρυφη επιτάχυνση στο πιλοτήριο, από την άποψη του πιλότου, ίση με $\pm 0.4g$ (επιτάχυνση λόγω βαρύτητας). Αυτή θεωρήθηκε η διαχωριστική γραμμή μεταξύ ικανοποιητικού και μη ικανοποιητικού διαδρόμου, και κάθε μεγαλύτερη τιμή επιτάχυνσης θα δημιουργούσε δυσκολίες στους πιλότους. Επίσης, τη δεκαετία του 1970, ο Gerardi [33] πραγματοποίησε μια σειρά μελετών για να αναπτύξει ένα μοντέλο (άκαμπτου) σώματος αεροσκάφους για την προσομοίωση της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο θάλαμο του πιλοτηρίου και στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους, καθώς και τα φορτία που δέχεται το οδόστρωμα στις θέσεις των κύριων φορείων και του ρινιαίου φορείου του αεροσκάφους. Το μοντέλο εφαρμόστηκε περαιτέρω για να γίνει το εμπορικό λογισμικό, APRas (Airport Pavement Roughness assessment software). Στοιχεία του λογισμικού APRas έχουν ενσωματωθεί στο λογισμικό ProFAA, που είναι το λογισμικό της FAA για την αξιολόγηση της ομαλότητας [9].

Στο τομέα των έργων κατασκευής οδοστρωμάτων γενικότερα έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες για την αναγνώριση, ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση της ομαλότητας. Σε αρκετές από αυτές αναπτύχθηκαν μέθοδοι για τον υπολογισμό ενός δείκτη που δημιουργήθηκε για την ποσοτικοποίηση της ομαλότητας. Αν και η ποσοτικοποίηση είναι ο κοινός σκοπός για όλους τους δείκτες, η μεθοδολογία υπολογισμού τους διαφέρει, με αποτέλεσμα κάποιοι από αυτούς να χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Επίσης είναι σημαντικό το γεγονός ότι σχεδόν όλοι οι δείκτες χρησιμοποιούν μεθοδολογίες βασισμένες σε οχήματα και οδούς [10]. Παρ' ότι έχουν γίνει έρευνες ώστε να καθιερωθεί ένας καινούργιος δείκτης που να σχετίζεται ειδικά με τα αεροσκάφη, όπως είναι η έρευνα των Chen και Chou [12], κανένας δεν έχει υιοθετηθεί επίσημα από την FAA.

Το ProFAA [17] είναι το λογισμικό της FAA για την ανάλυση και αξιολόγηση της ομαλότητας του προφίλ του οδοστρώματος. Το ProFAA δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις υψομετρικές αποκλίσεις (elevation) του προφίλ της επιφάνειας του οδοστρώματος που καταγράφονται συνήθως με ένα προφιλόμετρο. Η ανάλυση δεδομένων που πραγματοποιείται από το πρόγραμμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό δεικτών όπως ο Δείκτης Boeing Bump (Boeing Bump Index: BBI), ο Δείκτης Προσομοίωσης Πήχη (Straightedge Index: SE), ο Δείκτης Προσομοίωσης Κυλιόμενου Πήχη (Rolling Straightedge Index: RSE), ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας (International Roughness Index: IRI) και ο δείκτης RMS του προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων (Root Mean Square Bandpass Filter: RMS BP). Επίσης πραγματοποιεί τη προσομοίωση της απόκρισης του αεροσκάφους υπολογίζοντας τις κατακόρυφες επιταχύνσεις στο θάλαμο του πιλοτηρίου και στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους καθώς και τα δυναμικά φορτία στο ρινιαίο και στα κύρια φορεία τροχών του αεροσκάφους.

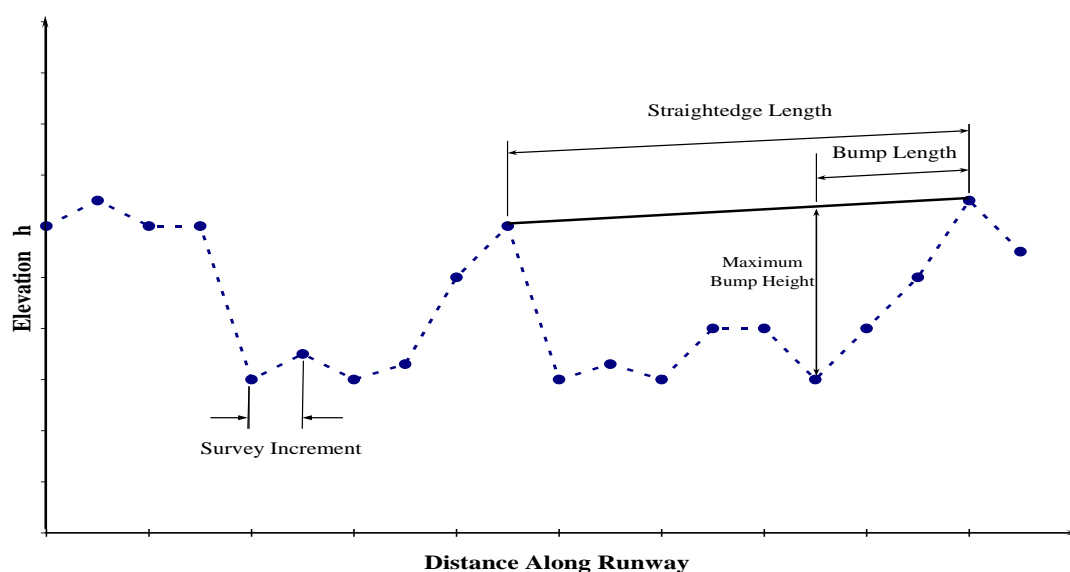
2.6.2 Μέθοδος της Boeing και δείκτης BBI

Η μέθοδος της Boeing (Boeing Bump Method: BBM) αναπτύχθηκε για τον χαρακτηρισμό της ομαλότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αυτή η μέθοδος περιγράφεται λεπτομερώς σε ένα άρθρο [14] που δημοσιεύτηκε το 1995 από την Boeing. Παρέχει οδηγίες σχετικά με την αξιολόγηση ενός προφίλ της επιφάνειας οδοστρώματος για τον εντοπισμό πιθανών μεμονωμένων αποκλίσεων που μπορεί να επηρεάζουν τις λειτουργίες του αεροσκάφους. Οι οδηγίες, οι οποίες βασίζονται σε πλήρως φορτωμένα αεροσκάφη που λειτουργούν σε ταχύτητες περιστροφής (130-200 κόμβους), είναι κατάλληλες για εφαρμογές σε διάδρομο αεροδρομίου. Παρέχει συντηρητικά αποτελέσματα για τις περιοχές του οδοστρώματος με αργή κίνηση της κυκλοφορίας, όπως είναι οι τροχόδρομοι και τα δάπεδα στάθμευσης [6].

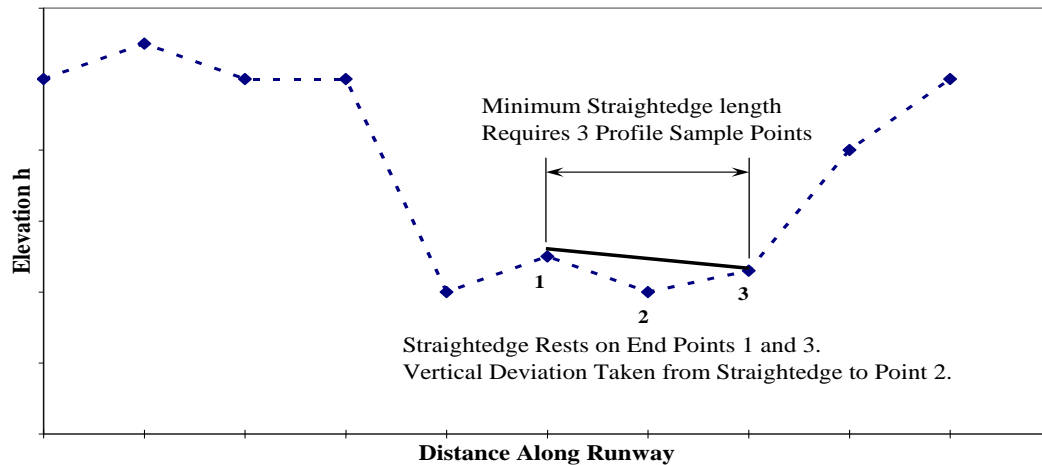
Η μέθοδος BBM ορίζει την ευθεία (straightedge) μεταξύ δύο σημείων επί του διαμήκους προφίλ ανύψωσης ενός οδοστρώματος και τη μέτρηση της απόκλισης από την ευθεία προς την επιφάνεια του οδοστρώματος. Η διαδικασία αναφέρει ως «ύψος απόκλισης» (bump height) τη μέγιστη κάθετη απόκλιση, θετική ή αρνητική, από την

ευθεία (τα άκρα της οποίας ακουμπούν πάνω στο προφίλ) ως την επιφάνεια του οδοστρώματος όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.15. Το «μήκος απόκλισης» (bump length) είναι η συντομότερη απόσταση από τα δύο άκρα της ευθείας μέχρι τη θέση όπου μετράται η μεμονωμένη κάθετη απόκλιση [6]. Η αιτία της χρησιμοποίησης της συντομότερης απόστασης στον ορισμό του μήκους απόκλισης είναι πως το αεροσκάφος πραγματοποιεί κινήσεις και κατά τις δύο κατευθύνσεις. Η λογική πίσω από αυτή τη μέθοδο είναι ότι το αεροσκάφος επηρεάζεται περισσότερο από ένα μεμονωμένο περιστατικό ελλειπούς ομαλότητας ή από μια σειρά επαναλαμβανόμενων περιστατικών. Επιπλέον αναφέρει ότι η περίπτωση αποκλίσεων που συνδυάζουν μικρότερο μήκος και μεγαλύτερο ύψος είναι πιο καταστροφικές για τα αεροπλάνα [10].

Η μέθοδος BBM χρησιμοποιεί μήκη ευθείας (μήκη κύματος) μέχρι και 120 μέτρα. Ωστόσο επειδή η μέθοδος αξιολογεί απομονωμένες αποκλίσεις, ο όρος «μήκος κύματος» έχει αντικατασταθεί από τον όρο «μήκος απόκλισης». Έρευνα της Boeing έχει αποδείξει ότι αποκλίσεις με μήκος κύματος άνω των 120 μέτρων δεν συντελούν στη δυναμική απόκριση του αεροπλάνου και δεν το επηρεάζουν. Το ελάχιστο μήκος της ευθείας είναι ίσο με το διπλάσιο του διαστήματος δείγματος. Η μέθοδος απαιτεί τουλάχιστον τρία σημεία δεδομένων του προφίλ για να ληφθεί μια απόκλιση από την ευθεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.16. Τα εξωτερικά δύο σημεία ορίζουν τα άκρα της ευθείας, και το εσωτερικό σημείο δίνει την απόκλιση του προφίλ [6].

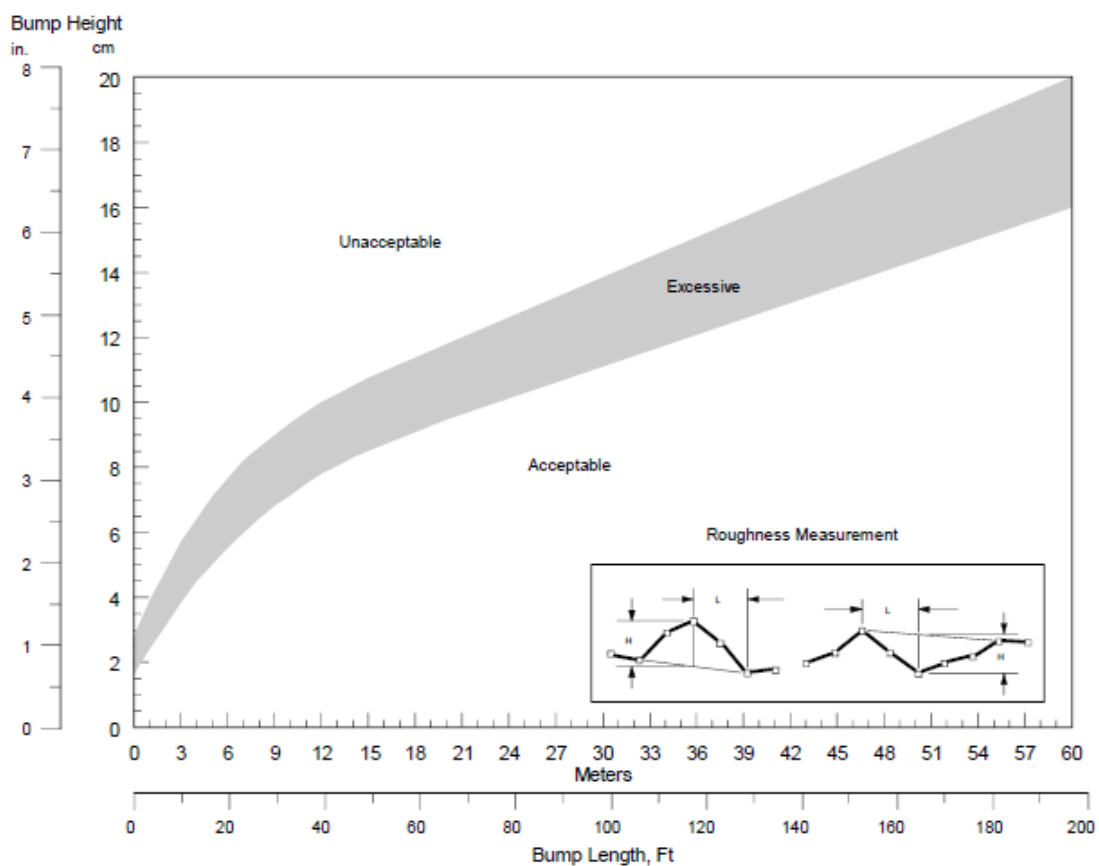


Εικόνα 2.15 Μέτρηση ύψους απόκλισης [6]



Εικόνα 2.16 Ορισμός ελάχιστου μήκους ευθείας [6]

Η μέθοδος αξιολογεί κάθε συνδυασμό ύψους και μήκους απόκλισης με βάση την Εικόνα 2.17, που παρουσιάζει τα κριτήρια της αξιολόγησης και δείχνει τα όρια της Αποδεκτής, Οριακής (υπερβολική καμπύλη) και Μη Αποδεκτής ομαλότητας για μία μεμονωμένη απόκλιση.



Εικόνα 2.17 Κριτήρια αποδοχής μεθόδου BBM [14]

- Αποδεκτή (Acceptable): Η FAA αναμένει τα νέα ή αποκατεστημένα οδοστρώματα να έχουν συνδυασμούς ύψους-μήκους αποκλίσεων που να καταλήγουν στην αποδεκτή περιοχή. Οι επιχειρήσεις για όλα τα αεροσκάφη είναι αποδεκτές. Η εμπειρία δείχνει ότι οι πιλότοι αρχίζουν να αναφέρουν προβλήματα ομαλότητας καθώς οι συνθήκες προσεγγίζουν την οριακή ζώνη. Τότε οι διαχειριστές του αεροδρομίου θα πρέπει να αρχίσουν τον εντοπισμό των αποκλίσεων και την προετοιμασία για διορθωτικές ενέργειες. Όταν βρισκόμαστε εκτός αποδεκτής περιοχής, η καταπόνηση των φορείων του αεροσκάφους γίνεται όλο και πιο κρίσιμη από την ταλαιπωρία των επιβατών ή τους περιορισμούς της επιτάχυνσης στο πιλοτήριο.
- Οριακή (υπερβολική καμπύλη) (Excessive): Η FAA ενθαρρύνει τους διαχειριστές του αεροδρομίου για την επιδιόρθωση οδοστρωμάτων καθώς τα επίπεδα ομαλότητας εισάγονται στην οριακή ζώνη. Ομαλότητα αυτού του επιπέδου θα δημιουργήσει έντονη δυσφορία για όλους τους επιβαίνοντες στο αεροσκάφος. Μπορεί επίσης να δημιουργήσει προβλήματα στους πιλότους και αδυναμία να κατευθύνουν το αεροσκάφος, καθώς και υπερβολική μείωση στη διάρκεια ζωής των φορείων του αεροσκάφους. Είναι απαραίτητη η άμεση επισκευή του οδοστρώματος, αλλά όχι το κλείσιμό του.
- Μη Αποδεκτή (Unacceptable): Όταν το επίπεδο της ομαλότητας βρίσκεται στην μη αποδεκτή περιοχή τότε απαιτούνται άμεσες ενέργειες. Επισκευές είναι απαραίτητες για την αποκατάσταση του οδοστρώματος σε ένα αποδεκτό επίπεδο.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17, τα κριτήρια της BBM περιορίζονται σε μήκη αποκλίσεων μέχρι 60 μέτρα (δηλαδή μήκη κύματος μέχρι 120 μέτρα), γιατί θεωρείται ότι παρατυπίες με μεγαλύτερο μήκος δεν συμβάλλουν στη φθορά του αεροσκάφους.

Η μέθοδος BBM έχει κάποιους περιορισμούς. Πρώτον, αναφέρεται μόνο στο προφίλ του οδοστρώματος χωρίς να αναφέρεται και στην απόκριση του αεροσκάφους. Επίσης αναφέρεται σε απομονωμένα περιστατικά αποκλίσεων και όχι στη συνολική διακύμανση των υψομετρικών αποκλίσεων του προφίλ, όπως θα

μπορούσε να αναφερθεί ένας στατιστικός δείκτης όπως ο Root Mean Square (RMS). Ακόμα η μέθοδος BBM δεν απευθύνεται στις συνέπειες των επαναλαμβανόμενων μεγάλου μήκους κυματισμών, όπου η συχνότητα της απόκρισης του αεροσκάφους είναι σημαντική [10].

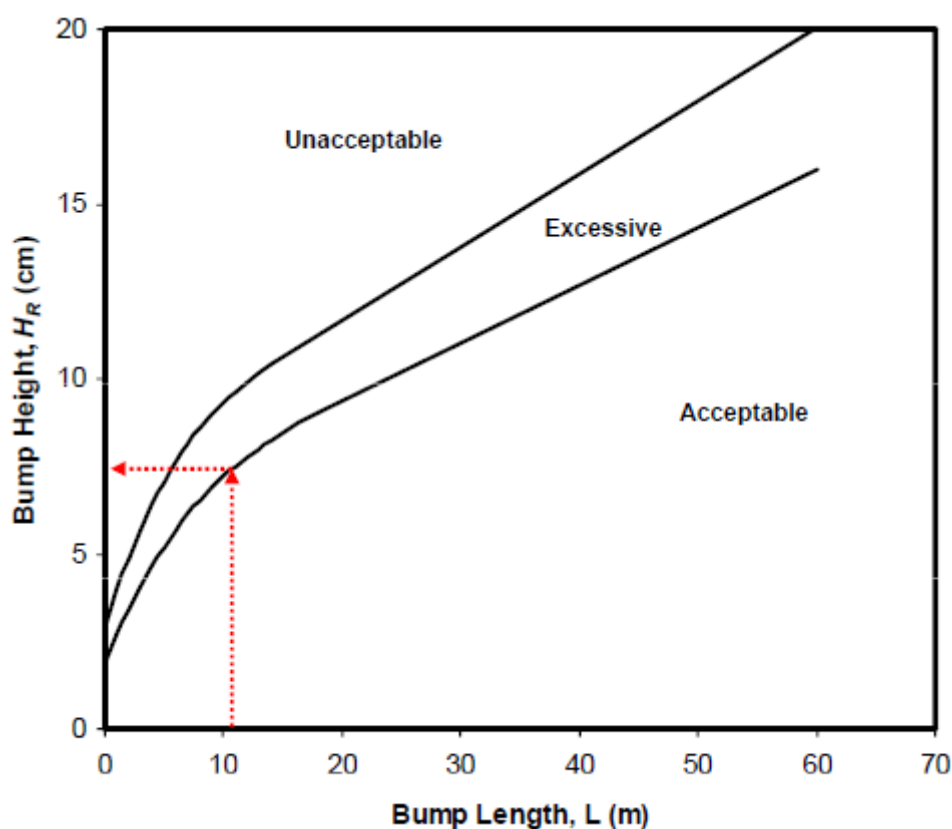
Η εφαρμογή της μεθόδου BBM σε ένα προφίλ οδοστρώματος μπορεί να είναι μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία, διότι κάθε σημείο του προφίλ έρευνας πρέπει να αξιολογηθεί για όλα τα πιθανά μήκη ευθείας. Για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση, τόσο το ύψος όσο και το μήκος απόκλισης είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται στρατηγικές για τη βελτίωση της ομαλότητας μέσω συντήρησης [6].

Η FAA, για να συνοψίσει τα κριτήρια της μεθόδου BBM, δημιούργησε τον δείκτη Boeing Bump Index (BBI). Ο υπολογισμός του δείκτη BBI γίνεται μέσω του λογισμικού ProFAA το οποίο χρησιμοποιεί μια φανταστική ευθεία, το μήκος της οποίας κυμαίνεται από 0,5 μέτρα (δύο φορές το διάστημα δείγματος) μέχρι 120 μέτρα (394 feet) (μέγιστο μήκος κυματισμού). Η ευθεία τοποθετείται έτσι ώστε το σημείο αρχής της να είναι πάνω σε ένα σημείο δείγματος του προφίλ, και το σημείο τέλους της σε ένα σημείο δείγματος που να αντιστοιχεί στο μήκος της ευθείας κατά μήκος του προφίλ. Το ύψος απόκλισης, το μήκος απόκλισης και ο δείκτης BBI υπολογίζονται ως ακολούθως:

- Ύψος απόκλισης: Μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ της ευθείας και του προφίλ για τα όλα τα σημεία δείγματος μεταξύ των σημείων αρχής και τέλους της ευθείας.
- Μήκος απόκλισης: Η μικρότερη απόσταση μεταξύ α) της απόστασης κατά μήκος του προφίλ από την αρχή της ευθείας μέχρι το σημείο του ύψους απόκλισης και β) της απόστασης κατά μήκος του προφίλ από το σημείο του ύψους απόκλισης μέχρι το τέλος της ευθείας.
- Δείκτης BBI: Ο λόγος (ύψος απόκλισης) / (όριο αποδεκτού ύψους απόκλισης). Το όριο του αποδεκτού ύψους απόκλισης (ανώτερο όριο της αποδεκτής ζώνης) είναι αυτό που αντιστοιχεί στο υπολογισμένο μήκος απόκλισης όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικόνας 2.18 .

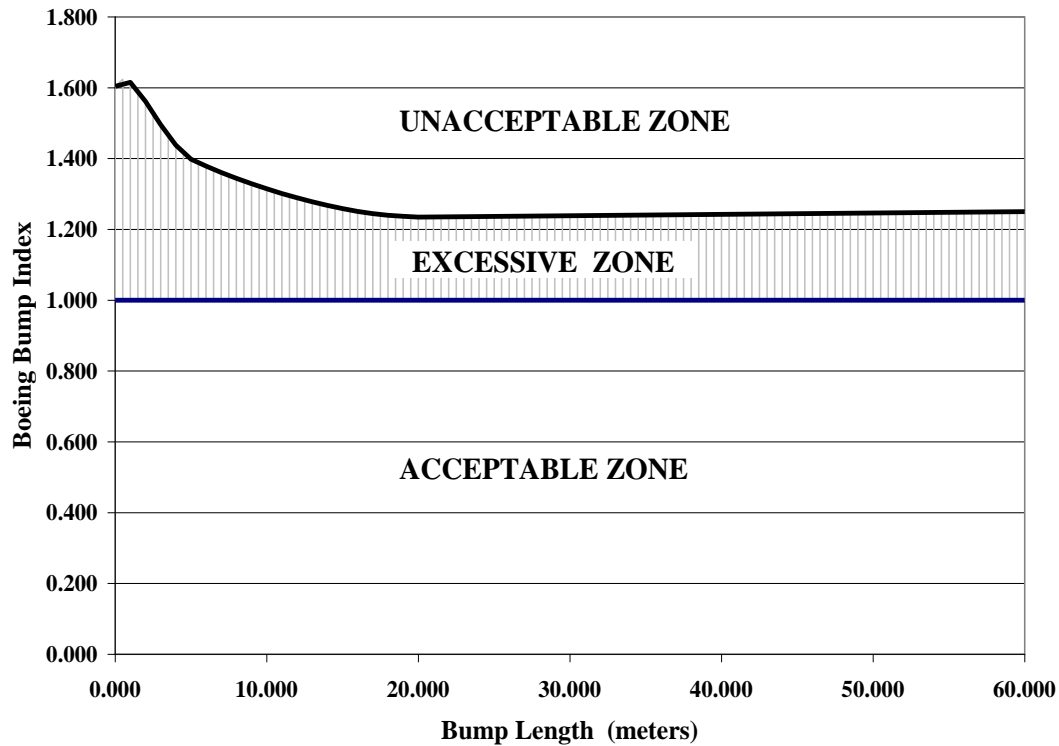
Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για όλα τα μήκη ευθειών με το ίδιο σημείο αρχής και βρίσκεται η μέγιστη τιμή του δείκτη BBI. Αυτή η μέγιστη τιμή είναι η τιμή του δείκτη BBI για το επιλεγμένο σημείο αρχής του δείγματος. Στη συνέχεια

επιλέγεται καινούργιο σημείο αρχής (το επόμενο) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπολογιστεί ο δείκτης BBI για όλα τα σημεία δείγματος του προφίλ [10].



Εικόνα 2.18 Παράδειγμα υπολογισμού όριου αποδεκτού ύψους απόκλισης [34]

Η αξιολόγηση ενός προφίλ οδοστρώματος με τον δείκτη BBI είναι παρόμοια με αυτή που γίνεται με τη μέθοδο BBM. Ο BBI βασίζεται στις ίδιες τρεις περιοχές ομαλότητας (Αποδεκτή, Οριακή, Μη Αποδεκτή) που περιγράφονται προηγουμένως για τη μέθοδο BBM. Η Εικόνα 2.19 εκφράζει τις έννοιες της Εικόνας 2.17 από την άποψη του δείκτη BBI ως προς το μήκος απόκλισης και επαναδιατυπώνει την Αποδεκτή, την Οριακή και την Μη Αποδεκτή ζώνη αξιολόγησης από την άποψη του BBI [6]. Σημειώνεται ότι η Οριακή ζώνη αποδεκτών τιμών έχει τη μορφή Υπερβολής (Excessive). Τιμές του BBI μικρότερες από 1 αντιστοιχούν στην Αποδεκτή περιοχή και δείχνουν ότι μια απόκλιση δεν θα προκαλέσει άμεση ζημιά στο αεροσκάφος. Τιμές του BBI μεγαλύτερες από 1 αντιστοιχούν είτε στην Οριακή είτε στην Μη Αποδεκτή περιοχή και δείχνουν ότι είναι πιθανόν να προκληθεί ενδεχόμενη ζημιά στο αεροσκάφος. Τιμές περίπου 0,25 θεωρούνται λογικές για νέα οδοστρώματα [35].

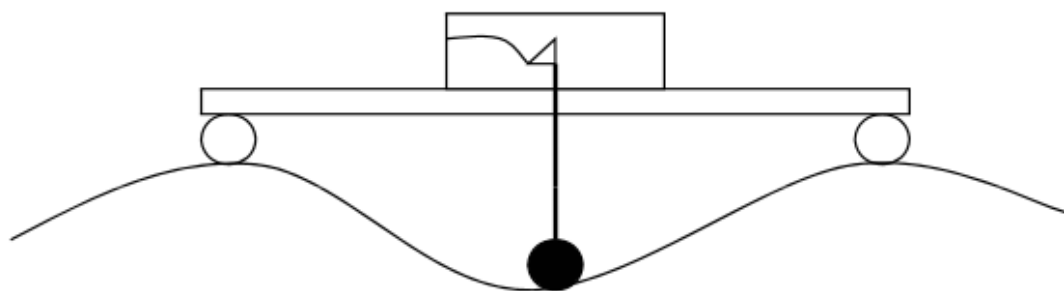


Εικόνα 2.19 Κριτήρια δείκτη BBI [6]

Ο δείκτης BBI εντοπίζει γρήγορα ενδεχόμενη κακή ποιότητα της επιφάνειας κύλισης του αεροσκάφους, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν ορισμένα θεμελιώδη ζητήματα που περιορίζουν την αποτελεσματικότητά του. Επειδή ο δείκτης αυτός αξιολογεί μόνο το μήκος κύματος και το πλάτος του περιστατικού (event) απόκλισης, μπορεί να αξιολογήσει μόνο ένα περιστατικό τη φορά. Πολλές έρευνες έχουν διαπιστώσει ότι η κακή απόκριση του αεροσκάφους οφείλεται σε διάφορα διαδοχικά περιστατικά, καθένα από τα οποία θα μπορούσε να βρεθεί αποδεκτό από τον BBI. Στη πραγματικότητα, το αεροσκάφος ανταποκρίνεται στην «αλυσίδα» των περιστατικών ως σύνολο [36].

2.6.3 Προσομοίωση του πήχη

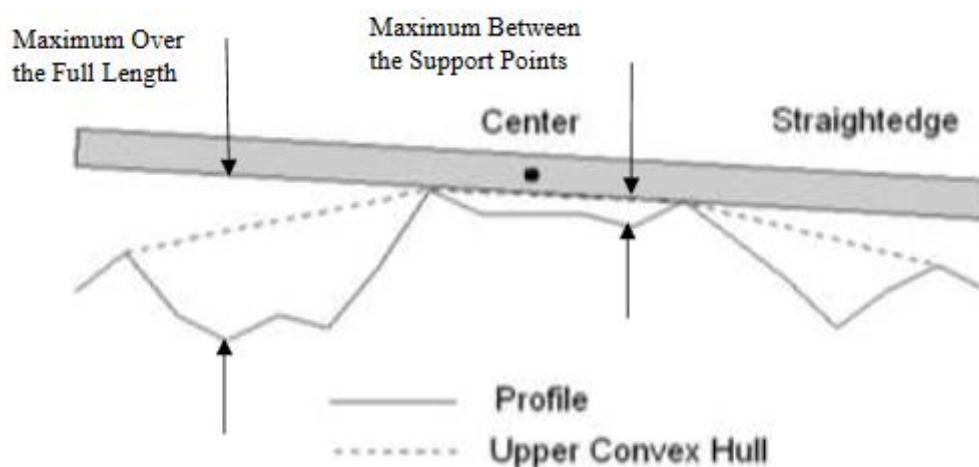
Ο πήχης (straightedge) είναι το φυσικό εργαλείο που χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο της ομαλότητας νέων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, τόσο για εμπορικά όσο και για στρατιωτικά αεροδρόμια. Επομένως, η προσομοίωση της λειτουργίας του σε ένα καταγεγραμμένο προφίλ του οδοστρώματος είναι σημαντική, έστω και μόνο για να δημιουργήσει συσχετισμούς με άλλες μεθόδους αξιολόγησης. Μια προτεινόμενη αντικατάσταση είναι αυτό που εδώ ονομάζεται κυλιόμενος πήχης (rolling straightedge). Μια φυσική εφαρμογή ενός κυλιόμενου πήχη (βλέπε Εικόνα 2.20) έχει μια δοκό τοποθετημένη σε στηρίγματα στα άκρα της δοκού. Η απόσταση από τη δοκό προς την επιφάνεια του οδοστρώματος μετράται με μία συσκευή που μπορεί να κινείται κατά μήκος της δοκού. Η μέτρηση των εγκάρσιων προφίλ των οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων γίνεται συχνά με τέτοιες συσκευές [28].



Εικόνα 2.20 Φυσική εφαρμογή κυλιόμενου πήχη [34]

Η μέθοδος υπολογισμού του δείκτη Straightedge Index (SE) μέσω του λογισμικού ProFAA ουσιαστικά προσομοιώνει τον έλεγχο της ομαλότητας με τη μέθοδο του πήχη. Κατά την χρησιμοποίησή του, ο φυσικός πήχης στηρίζεται στα δύο υψηλότερα σημεία του προφίλ του οδοστρώματος που βρίσκονται κάτω από τον πήχη. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.21. Το λογισμικό ProFAA προσομοιώνει την λειτουργία του πήχη, τοποθετώντας το ένα άκρο του πήχη σε ένα συγκεκριμένο σημείο δείγματος του προφίλ και υπολογίζει την «ανώτερη καμπύλη γραμμή» (upper convex hull) για όλα τα σημεία του δείγματος του προφίλ που αντιστοιχούν σε όλο το μήκος του εικονικού πήχη. Τα δύο υψηλότερα σημεία της καμπύλης είναι τα σημεία που στηρίζεται ο πήχης, και ορίζουν μια ευθεία γραμμή που αντιπροσωπεύει την

κάτω άκρη (bottom edge) του πήχη προσομοίωσης. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η κάθετη απόσταση από την ευθεία που αντιπροσωπεύει τον πήχη, για κάθε σημείο δείγματος του προφίλ κάτω από τον πήχη. Η μέγιστη (απόλυτη) τιμή όλων των κάθετων αποστάσεων αναφέρεται ως η μέγιστη απόκλιση του προφίλ από τον πήχη, σε όλο το μήκος (over the full length) του πήχη. Το ProFAA έχει και μια δεύτερη επιλογή, που επιλέγεται από τον χρήστη, και υπολογίζει την μέγιστη απόκλιση για το τμήμα του πήχη που βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία στήριξής του (between the support points). Επίσης, το μήκος του εικονικού πήχη επιλέγεται από τον χρήστη (1,5 μέχρι 457,2 μέτρα).

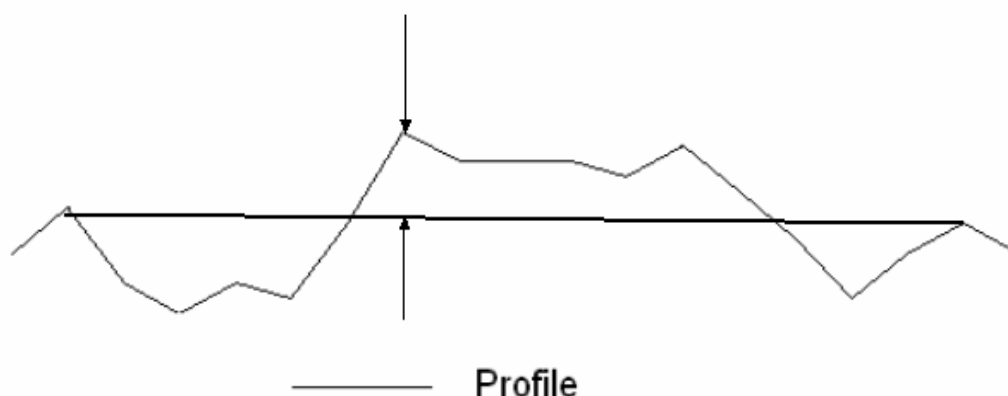


Εικόνα 2.21 Προσομοίωση λειτουργίας πήχη μέσω του ProFAA [28]

Αφού βρεθεί η μέγιστη απόκλιση για την πρώτη τοποθέτηση του πήχη κατά μήκος του προφίλ, η άκρη του πήχη μετακινείται στο επόμενο σημείο δείγματος κατά μήκος του προφίλ. Υπολογίζεται η μέγιστη απόκλιση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να καλυφθεί το καθορισμένο μήκος του δείκτη. Τότε υπολογίζεται η μέση τιμή όλων των μέγιστων αποκλίσεων που αποτελεί και την τιμή του δείκτη SE για το καθορισμένο μήκος.

Ο υπολογισμός του δείκτη Rolling Straightedge Index (RSE) μέσω του λογισμικού ProFAA προσομοιώνει τη λειτουργία του κυλιόμενου πήχη. Το ένα άκρο του πήχη βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του προφίλ και το άλλο άκρο βρίσκεται σε ένα αντίστοιχο σημείο του προφίλ του δείγματος, ώστε να είναι και τα δύο στο ίδιο κατακόρυφο ύψος σε σχέση με το προφίλ. Αυτά τα δύο σημεία, στη

συνέχεια, ορίζουν την ευθεία γραμμή που ορίζει τον προσομοιωμένο πήχη [37]. Ο πήχης μπορεί να κόβει το προφίλ όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.22.



Εικόνα 2.22 Προσομοίωση κυλιόμενου πήχη μέσω του ProFAA [28]

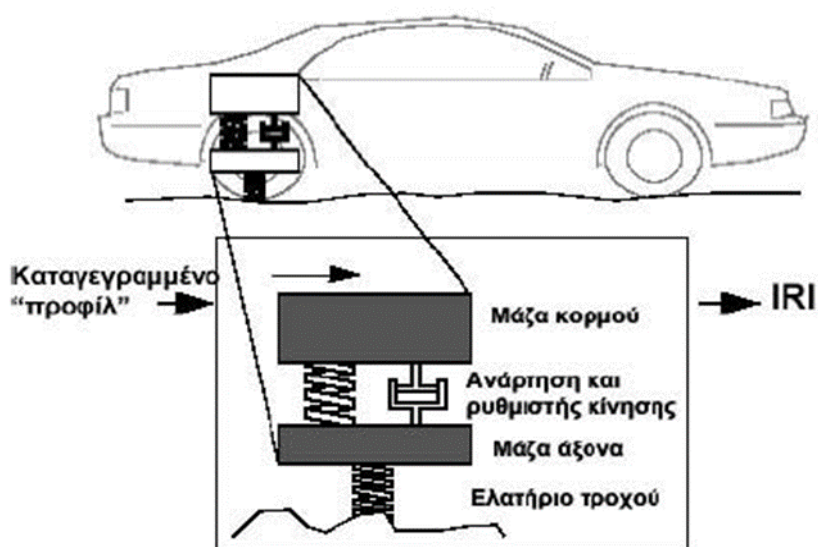
Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η μέγιστη κάθετη απόσταση των εσωτερικών σημείων του προφίλ από τον πήχη, σε όλο το μήκος του πήχη, που αναφέρεται ως η μέγιστη απόκλιση. Η τιμή του δείκτη RSE για το καθορισμένο μήκος υπολογίζεται με τη μετακίνηση του πήχη κατά μήκος του προφίλ και υπολογίζοντας την μέση τιμή των μέγιστων αποκλίσεων, όπως ακριβώς γίνεται για τον δείκτη SE.

2.6.4 Προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» και δείκτης IRI

Η έκφραση της κατά μήκος ομαλότητας μπορεί να γίνει μέσω του Διεθνή Δείκτη Ομαλότητας (International Roughness Index: IRI). Ο δείκτης IRI είναι ένας δείκτης αξιολόγησης της ποιότητας κύλισης και αντιπροσωπεύει τους κραδασμούς που προκαλούνται σε ένα τυπικό όχημα. Προσδιορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του οδοστρώματος και γι' αυτό μπορεί να μετρηθεί με κάθε ισχύον μηχανήμα καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων [38].

Ο υπολογισμός του IRI βασίζεται στο προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» (Quarter Car Model) που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.23. Το

προσομοίωμα υπολογίζει την εκτροπή της ανάρτησης ενός προσομοιωμένου μηχανικού συστήματος με απόκριση παρόμοια με ένα επιβατικό όχημα. Η εκτροπή της ανάρτησης αθροίζεται και στη συνέχεια διαιρείται με τη διανυόμενη απόσταση για να δώσει ένα δείκτη με μονάδες κλίσης (m/km ή in/mi) [8]. Το προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» είναι αυτό ακριβώς που περιγράφει η ονομασία του δηλαδή μία γωνία (ένα τέταρτο) ενός οχήματος. Αποτελείται από ένα τροχό με ένα κατακόρυφο ελατήριο, τη μάζα του άξονα που υποστηρίζει ο τροχός, μία ανάρτηση και ένα διάφραγμα ρύθμισης της κίνησης, καθώς και από τη μάζα του τμήματος του κορμού του οχήματος που υποστηρίζεται από την ανάρτηση για τον συγκεκριμένο τροχό [39].



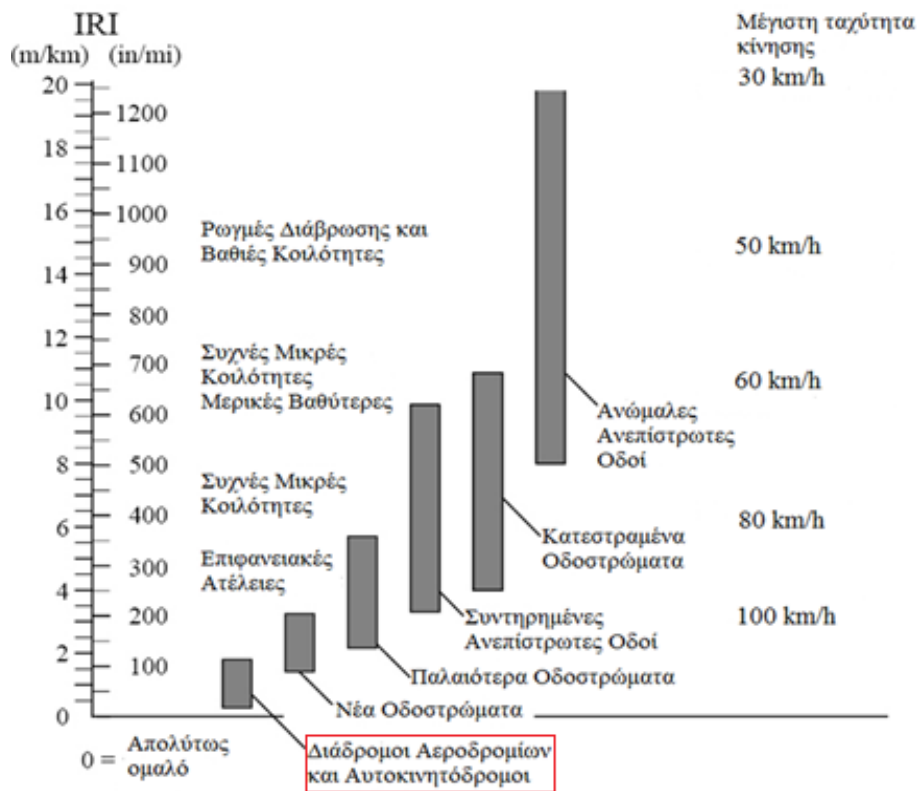
Εικόνα 2.23 Το προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου» [39]

Το προσομοίωμα αυτό αναπτύχθηκε από την Παγκόσμια Τράπεζα (World Bank) κατά τη διάρκεια του Διεθνούς Οδικού Πειράματος στην Βραζιλία (International Road Roughness Experiment: IRRE) και φέρει τις ιδιότητες ενός τυπικού οχήματος που επονομάστηκε «χρυσό όχημα» (Golden Car), το οποίο είναι έτσι σταθμισμένο ώστε να επιτυγχάνεται ο καλύτερος συσχετισμός μεταξύ των δεδομένων ομαλότητας που εξάγονται μέσω αυτού (τιμές IRI) και των στοιχείων που εισάγονται σε αυτό κατά την καταγραφή της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Για την προσομοίωση της κίνησης του οχήματος η ταχύτητα θεωρείται σταθερή και ίση με 80 km/h.

Οι αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού (αλγόριθμος) του IRI αναπτύχθηκαν και ελέγχθηκαν με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την επιρροή μερικών παραμέτρων που μετρούνται από το μηχάνημα καταγραφής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, όπως είναι για παράδειγμα το διάστημα δείγματος. Επιπλέον ο δείκτης IRI παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά [39]:

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

Ο δείκτης IRI εκφράζει την ποιότητα της ομαλότητας η οποία επιδρά στην απόκριση του οχήματος και είναι περισσότερο απαραίτητη όταν επιθυμείται η ομαλότητα να συσχετιστεί με το γενικό κόστος χρήσης οχήματος, την ποιότητα κύλισης, τα δυναμικά φορτία τροχού και με γενικές συνθήκες επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Μία τιμή IRI ίση με 0 m/km σε συγκεκριμένο διάστημα δείγματος σημαίνει ότι η επιφάνεια του οδοστρώματος είναι εντελώς επίπεδη. Θεωρητικά δεν υπάρχει άνω όριο τιμών IRI, αν και πρακτικά τιμές που ξεπερνούν τα 8 m/km αφορούν οδόστρωμα το οποίο είναι αδιάβατο, εκτός βέβαια των περιπτώσεων όπου η ταχύτητα κίνησης είναι πολύ μικρή. Για διαδρόμους αεροδρομίων η τιμή του IRI κυμαίνεται περίπου από 0,5 ως 2 m/km, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.24.



Εικόνα 2.24 Εύρος τιμών IRI σε σχέση με τους διάφορους τύπους οδοστρωμάτων και τις ταχύτητες προσπέλασής τους [2]

Συνοψίζοντας αναφέρεται ότι ο δείκτης IRI είναι ένα μέτρο ομαλότητας βασισμένο στον τρόπο με τον οποίο ανταποκρίνεται το όχημα στην ομαλότητα ή αντίστροφα, στην έλλειψη ομαλότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η πραγματική τιμή του δείκτη προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη μία ακριβή καταγραφή της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος, της οποίας η επεξεργασία γίνεται με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου που εξομοιώνει τον τρόπο με τον οποίο το αναφερόμενο όχημα ανταποκρίνεται στα δεδομένα ομαλότητας, συνυπολογίζοντας τη διαδρομή της ανάρτησης [39].

Παρ' ότι ο δείκτης IRI αναπτύχθηκε για οδούς βασισμένος στο προσομοίωμα του «ενός τετάρτου αυτοκινήτου», έχει χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων. Η μεθοδολογία δεν άλλαξε για να λάβει υπόψιν τα στοιχεία του αεροσκάφους, επομένως η εφαρμοσιμότητα είναι άγνωστη. Γι' αυτό η FAA δεν υιοθετεί επισήμως τον δείκτη IRI στις κατασκευαστικές προδιαγραφές της, αν και τον χρησιμοποιεί για αξιολόγηση και σύγκριση.

Ακόμα αναφέρεται ότι ο δείκτης IRI επηρεάζεται από κυματισμούς μήκους 1,2 έως 30 μέτρα [22], ενώ όπως αναφέρθηκε στη μέθοδο BBM κυματισμοί μήκους έως 120 μέτρα επηρεάζουν τα αεροσκάφη. Οι Chen και Chou [12] συνέκριναν τα αποτελέσματα προσομοίωσης αεροσκάφους μέσω του λογισμικού APRas (παρόμοιο με ProFAA) με τα αποτελέσματα του IRI. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι αποκρίσεις του αεροσκάφους (κατακόρυφη επιτάχυνση και δυναμικά φορτία) δεν ήταν πανομοιότυπες με τις αποκρίσεις του IRI, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο IRI δεν είναι κατάλληλος για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων.

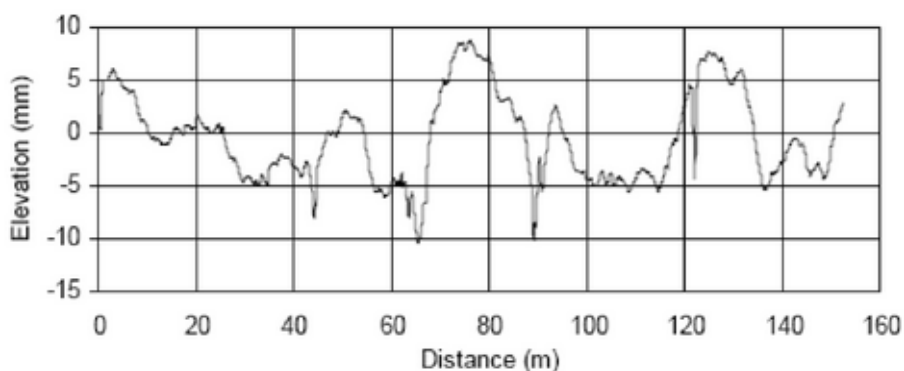
2.6.5 Φιλτράρισμα των κυματισμών της κατά μήκος κατατομής

Τα καταγεγραμμένα προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων του οδοστρώματος, όταν απεικονίζονται είναι παρόμοια με τα ηλεκτρονικά σήματα. Αυτά τα «σήματα» προφίλ οδοστρώματος μπορούμε να τα επεξεργαστούμε χρησιμοποιώντας τεχνικές που εφαρμόζονται στα ηλεκτρονικά σήματα. Η επεξεργασία των σημάτων (πριν την ανάλυση) ονομάζεται φιλτράρισμα. Το φιλτράρισμα χρησιμοποιείται για να εξάγει τα κατάλληλα δεδομένα από τα καταγεγραμμένα σήματα. Αυτά τα φίλτρα αφαιρούν τους κυματισμούς που είναι έξω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Για τα προφίλ οδοστρωμάτων, το φιλτράρισμα χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τους κυματισμούς που δεν επηρεάζουν την ποιότητα κύλισης, όπως εκείνους που είναι μικρότεροι από την μακρουφή του οδοστρώματος και εκείνους που είναι μεγαλύτεροι από γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος που εκλαμβάνονται ως κατά μήκος κλίση ή καμπυλότητα [10].

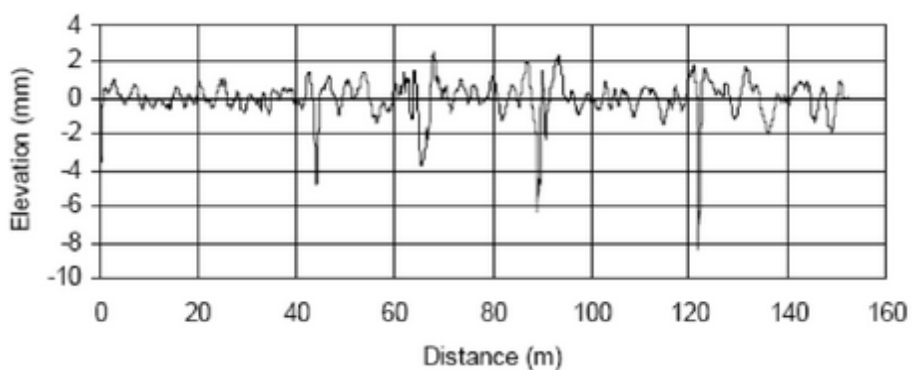
Υπάρχουν διάφοροι τύποι φίλτρων που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάλυση προφίλ οδοστρωμάτων. Μερικά μόνο από αυτά είναι τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης (lowpass), υψηλής διέλευσης (highpass) και ζώνης διέλευσης (bandpass). Τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης αφαιρούν κυματισμούς μικρότερους από μια συγκεκριμένη τιμή. Τα φίλτρα υψηλής διέλευσης αφαιρούν κυματισμούς μεγαλύτερους από μια συγκεκριμένη τιμή. Τα φίλτρα ζώνης διέλευσης διατηρούν κυματισμούς μιας συγκεκριμένης κυματικής ζώνης και αφαιρούν όλες τις τιμές που

είναι έξω από την κυματική ζώνη. Παραδείγματα αυτών των φίλτρων για ένα δείγμα προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων φαίνονται στις Εικόνες 2.26, 2.27 και 2.28.

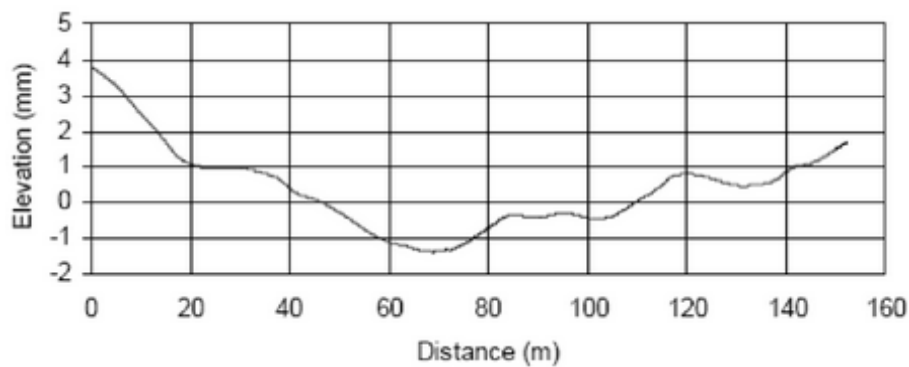
Στην Εικόνα 2.25, παρουσιάζεται μια τυπική απεικόνιση ενός προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι παρόμοια με ένα ηλεκτρονικό σήμα. Στην Εικόνα 2.26, χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο υψηλής διέλευσης για να αφαιρέσει όλους τους κυματισμούς που είναι μεγαλύτεροι από 5 μέτρα. Στην Εικόνα 2.27, χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης για να αφαιρέσει όλους τους κυματισμούς που είναι μικρότεροι από 10 μέτρα. Στην Εικόνα 2.28, χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο ζώνης διέλευσης για να αφαιρέσει όλους τους κυματισμούς που είναι μικρότεροι από 5 μέτρα και όλους τους κυματισμούς που είναι μεγαλύτεροι από 10 μέτρα.



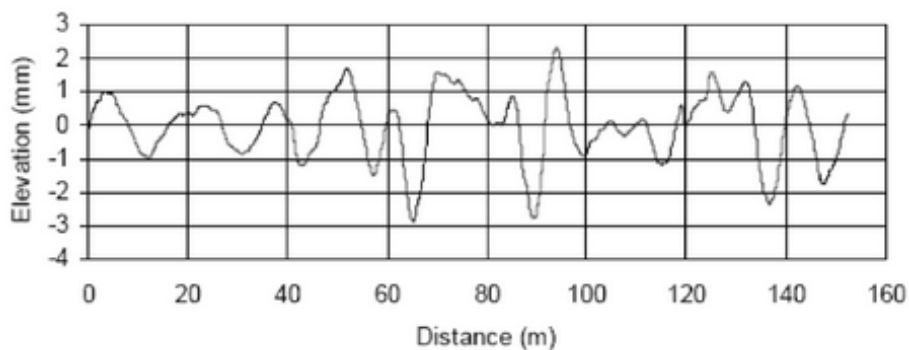
Εικόνα 2.25 Τυπικό προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος [10]



Εικόνα 2.26 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με υψηλής διέλευσης φίλτρο 5m [10]



Εικόνα 2.27 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με χαμηλής διέλευσης φίλτρο 10m [10]



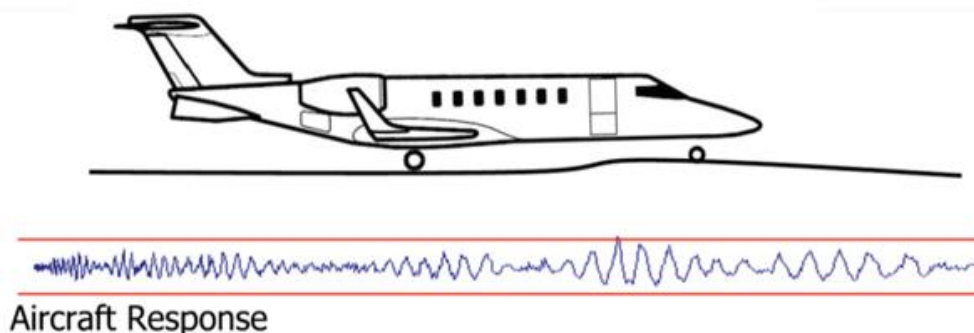
Εικόνα 2.28 Προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων οδοστρώματος με φίλτρο ζώνης διέλευσης 5 ως 10m [10]

Αφού πραγματοποιηθεί φιλτράρισμα των κυματισμών του προφίλ, στη συνέχεια γίνεται ανάλυση δεδομένων. Η ανάλυση δεδομένων μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας διάφορες στατιστικές μεθόδους. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται μέσω του ProFAA είναι ο δείκτης RMS του προφίλ χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο ζώνης διέλευσης (Root Mean Square Bandpass Filter: RMS BP). Ο RMS είναι ένα στατιστικό μέτρο του μεγέθους μιας μεταβαλλόμενης ποσότητας. Μαθηματικά ορίζεται ως «η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων από ένα μέσο». Εφαρμόζοντας αυτόν τον ορισμό στο σήμα του προφίλ οδοστρώματος, ο υπολογισμός του δείκτη RMS ξεκινά τετραγωνίζοντας όλες τις τιμές μέσα στο σήμα. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος των τετραγώνων. Τέλος, υπολογίζεται η τετραγωνική ρίζα του μέσου και η τιμή αυτή είναι ο δείκτης RMS για το σήμα. Μέσω του ProFAA υπολογίζεται ο δείκτης RMS BP για το φιλτραρισμένο προφίλ και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ομαλότητα του οδοστρώματος.

2.6.6 Προσομοίωση αεροσκάφους

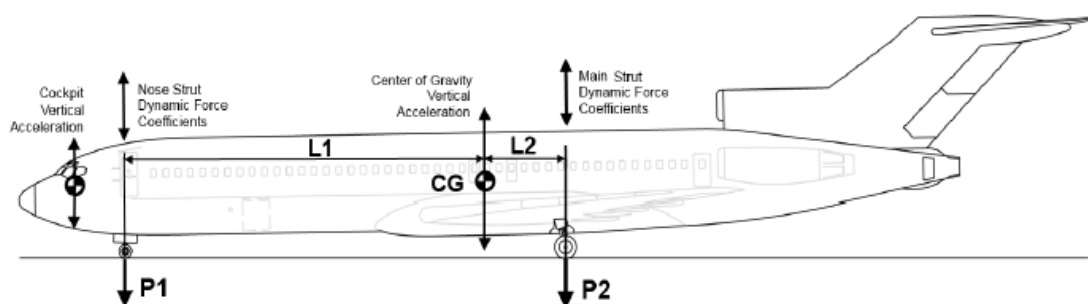
Η ομαλότητα στα οδοστρώματα αεροδρομίων μπορεί να αξιολογηθεί με την προσομοίωση της κίνησης του αεροσκάφους κατά μήκος του διαδρόμου ή τροχοδρόμου μέσω του λογισμικού ProFAA. Με την πρόβλεψη της απόκρισης (αντίδρασης) του αεροσκάφους (κατά την κίνηση) στο καταγεγραμμένο προφίλ οδοστρώματος, περιοχές υποβαθμισμένης ομαλότητας μπορούν να βρεθούν επακριβώς και η ποιότητα κύλισης μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά με ακρίβεια. Το πρόγραμμα ProFAA προσομοιώνει μόνο επιχειρήσεις τροχοδρόμησης, δηλαδή κινήσεις του αεροσκάφους με σταθερές ταχύτητες, και όχι επιχειρήσεις απογείωσης ή προσγείωσης. Η ταχύτητα του αεροσκάφους μπορεί να επιλεγεί μεταξύ 10 έως 200 κόμβων (knots). Γενικά προτείνεται ταχύτητα 20 κόμβων για κίνηση σε τροχόδρομο και ταχύτητα 100 κόμβων για κίνηση σε διάδρομο. Σε αυτό το πρόγραμμα η προσομοίωση της απόκρισης του αεροσκάφους μπορεί να γίνει για τα παρακάτω αντιπροσωπευτικά εμπορικά αεροσκάφη: Boeing 727 και Boeing 747 και McDonnell Douglas DC 9 και DC 10 [17]. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι προσομοιώνοντας την κίνηση ενός αεροσκάφους με μεγάλο μεταξόνιο και ενός αεροσκάφους με μικρό μεταξόνιο (π.χ. Boeing 747 και Boeing 727), μπορούν να ανιχνευθούν διαφορετικές περιοχές ομαλότητας [15].

Το πλεονέκτημα της προσομοίωσης αεροσκάφους είναι ότι αντιπροσωπεύει την απόκριση του συνολικού σώματος του αεροσκάφους. Δηλαδή πώς η απόκριση του κύριου φορείου τροχών κατευθύνει την απόκριση του ρινιαίου φορείου τροχών. Επειδή είναι μια τεχνική που βασίζεται στην απόκριση (αντίδραση), η τοποθεσία της περιοχής ή συμβάντος που δημιουργεί πρόβλημα στη ποιότητα κύλισης προσδιορίζεται με σαφήνεια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.29 [15].



Εικόνα 2.29 Απόκριση αεροσκάφους στο καταγεγραμμένο προφίλ οδοστρώματος [15]

Μέσω της προσομοίωσης του αεροσκάφους από το ProFAA μπορούν να υπολογιστούν, για ένα μήκος αναφοράς, οι τιμές του δείκτη RMS κατακόρυφης επιτάχυνσης (Root Mean Square Vertical Acceleration: RMSVA) στο πιλοτήριο (cockpit) και στο κέντρο βάρους (center of gravity) του αεροσκάφους, και οι τιμές του δείκτη RMS δυναμικών φορτίων στην ανάρτηση του ρινιαίου φορείου του αεροσκάφους και στην ανάρτηση των κύριων φορείων. Αυτές οι υπολογιζόμενοι παράμετροι της αλληλεπίδρασης οδοστρώματος-αεροσκάφους απεικονίζονται (ως διανύσματα) στην Εικόνα 2.30 [40].



Εικόνα 2.30 Παράμετροι της προσομοίωσης αεροσκάφους μέσω του ProFAA [40]

Γενικά δεν περιλαμβάνονται στις προδιαγραφές επίσημα όρια όσον αφορά τις παραμέτρους αυτές (κατακόρυφη επιτάχυνση και δυναμικά φορτία). Ωστόσο όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.6.1, η NASA έχει καθιερώσει ως όριο μέγιστης αποδεκτής κατακόρυφης επιτάχυνσης στο πιλοτήριο την τιμή 0,4g. Ακόμα για νέα οδοστρώματα η επιτρεπόμενη κατακόρυφη επιτάχυνση στο πιλοτήριο είναι 0,2g [7].

Από μια μακροπρόθεσμη προοπτική διαχείρισης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, είναι προφανής η σημαντικότητα της εξέτασης της δυναμικής απόκρισης του αεροσκάφους κατά τη διάρκεια των αναλύσεων της ομαλότητας. Η δυναμική φόρτιση, που προκαλείται από την απόκριση των συστημάτων ανάρτησης του αεροσκάφους σε εντοπισμένη ομαλότητα, μπορεί να μεταδώσει στο οδόστρωμα φορτία που υπερβαίνουν σημαντικά τα στατικά φορτία και να συντομεύσει δραματικά τη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων [40].

3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Περιγραφή στοιχείων ομαλότητας

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ομαλότητας από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα στοιχεία προέρχονται από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υφιστάμενο διάδρομο προσγείωσης-απογείωσης αεροδρομίου, ασφαλτικού οδοστρώματος εύκαμπτου τύπου, μήκους περίπου 2.300 μέτρων, στο πλαίσιο της αξιολόγησης των λειτουργικών και δομικών χαρακτηριστικών του.

Το σύστημα καταγραφής που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ομαλότητας είναι το σύστημα Road Surface Profilometer (RSP) του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (Εικόνα 3.1). Το σύστημα RSP ανήκει στην κατηγορία των εν κινήσει με υψηλή ταχύτητα προφίλομέτρων. Έχει ως βασική μονάδα μια δοκό η οποία έχει μήκος 3,2 m και στην οποία είναι ενσωματωμένοι επτά ηλεκτρονικοί αισθητήρες (lasers) και δύο επιταχυνσιόμετρα. Η δοκός έχει προσαρμοστεί στο εμπρόσθιο μέρος κατάλληλα διαμορφωμένου οχήματος, ώστε να παρέχει μια επίπεδη επιφάνεια για την εγκατάσταση των αισθητήρων. Το RSP καταγράφει κατά την κίνηση του οχήματος τις ακόλουθες παραμέτρους:

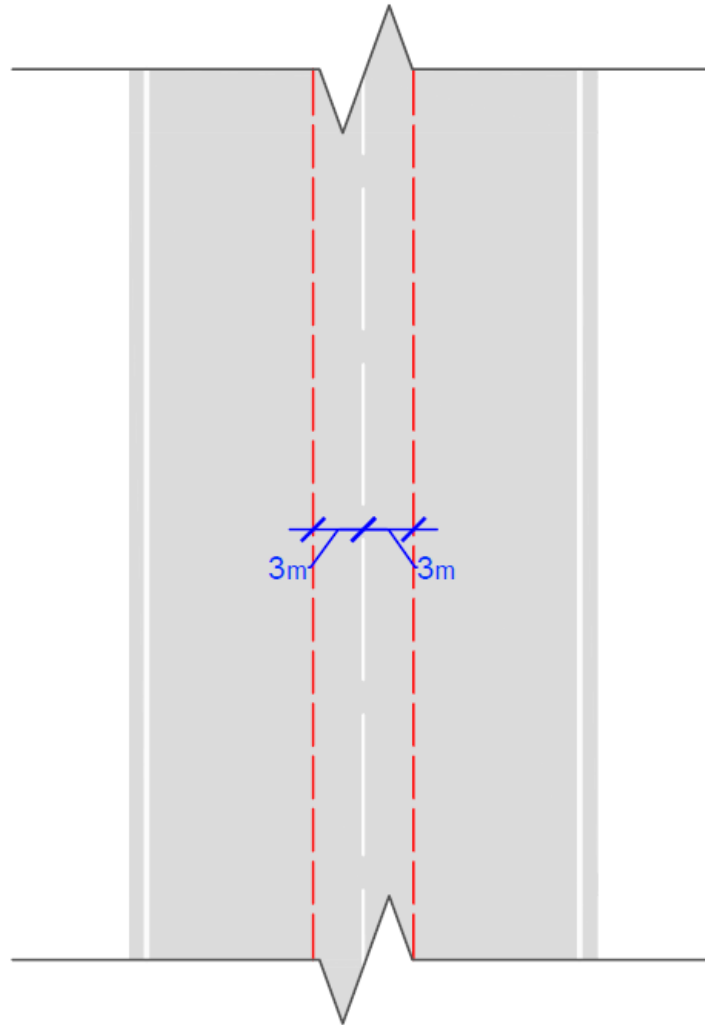
- Την κατακόρυφη μετατόπιση της δοκού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Την κατακόρυφη επιτάχυνση της δοκού (μέσω του επιταχυνσιομέτρου).
- Τον χρόνο και την απόσταση που καταγράφονται οι δύο προαναφερόμενες παράμετροι (μέσω του ταχύμετρου).



Εικόνα 3.1 Road Surface Profilometer του Εργαστηρίου Οδοποιΐας του ΕΜΠ

Η μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης με τους ηλεκτρονικούς αισθητήρες εμπεριέχει τόσο την αποτύπωση της μορφής της κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος όσο και την κατακόρυφη κίνηση της δοκού, η οποία οφείλεται σε ενδεχόμενες αναπηδήσεις κατά την κίνηση του οχήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη δεύτερη παράμετρο μέτρησης, την κατακόρυφη επιτάχυνση, υπολογίζεται η κατακόρυφη θέση της δοκού σε κάθε σημείο μέτρησης επί του διαδρόμου. Συνδυάζοντας την κατακόρυφη θέση με τη σχετική μετατόπιση της δοκού επί του διαδρόμου προκύπτει η μορφή της κατά μήκος κατατομής της επιφάνειας του οδοστρώματος. Τα στοιχεία συλλογής αποθηκεύονται αυτόματα σε ειδική μονάδα Η/Υ που βρίσκεται στο όχημα.

Για την αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τα καταγεγραμμένα προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του διαδρόμου (κεντρικό ίχνος τροχού) καθώς και σε πλευρική μετατόπιση περίπου 3 μέτρων αριστερά και δεξιά από την κεντρική γραμμή (αριστερό και δεξί ίχνος τροχού). Τα ίχνη φαίνονται διαγραμματικά στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Ίχνη καταγραφής της αναλυτικής διαδικασίας

Ουσιαστικά αυτό είναι και το πρότυπο της FAA, που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.4, για τα ίχνη καταγραφής της ομαλότητας όταν το αεροσκάφος σχεδιασμού του διαδρόμου είναι μικρής ατράκτου (ADG II και III).

3.2 Επεξεργασία στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σύστημα RSP καταγράφει τα προφίλ υψομετρικών αποκλίσεων και τα στοιχεία αποθηκεύονται αυτόματα σε ειδική μονάδα Η/Υ που βρίσκεται στο όχημα. Μέσω του λογισμικού ProFAA [17] της FAA έγινε επεξεργασία των στοιχείων για να προκύψουν οι τιμές των δεικτών ομαλότητας για

το αριστερό, το κεντρικό και το δεξί ίχνος τροχού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αναλύθηκαν οι τιμές των δεικτών για μήκος αναφοράς 45 μέτρων. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αναλυτική διαδικασία είναι οι BBI, IRI, SE και RMSVA. Ακόμα για την συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δεικτών χρησιμοποιήθηκε η γραμμική παλινδρόμηση και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 καθώς και ο έλεγχος σημαντικότητας t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων.

3.3 Αποτελέσματα δεικτών ομαλότητας

3.3.1 Αποτελέσματα δείκτη BBI

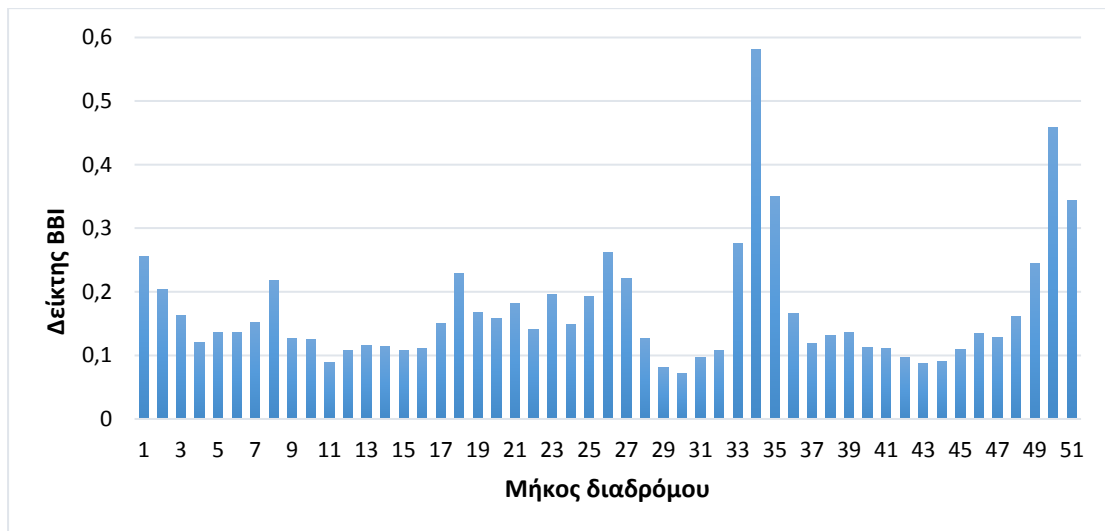
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο δείκτης BBI χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των υψομετρικών αποκλίσεων που αυξάνουν την πίεση στα εξαρτήματα του αεροσκάφους, μειώνουν την ικανότητα πέδησης των αεροσκαφών και προκαλούν δυσφορία στους πιλότους και στους επιβάτες. Η μέθοδος υπολογισμού του BBI εξετάζει κυματισμούς μέχρι και 120 μέτρα. Στα διαγράμματα των Εικόνων 3.3, 3.4 και 3.5 φαίνονται τα αποτελέσματα του δείκτη BBI για το αριστερό, κεντρικό και δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 3.3 Αποτελέσματα BBI αριστερού ίχνους



Εικόνα 3.4 Αποτελέσματα BBI κεντρικού ίχνους

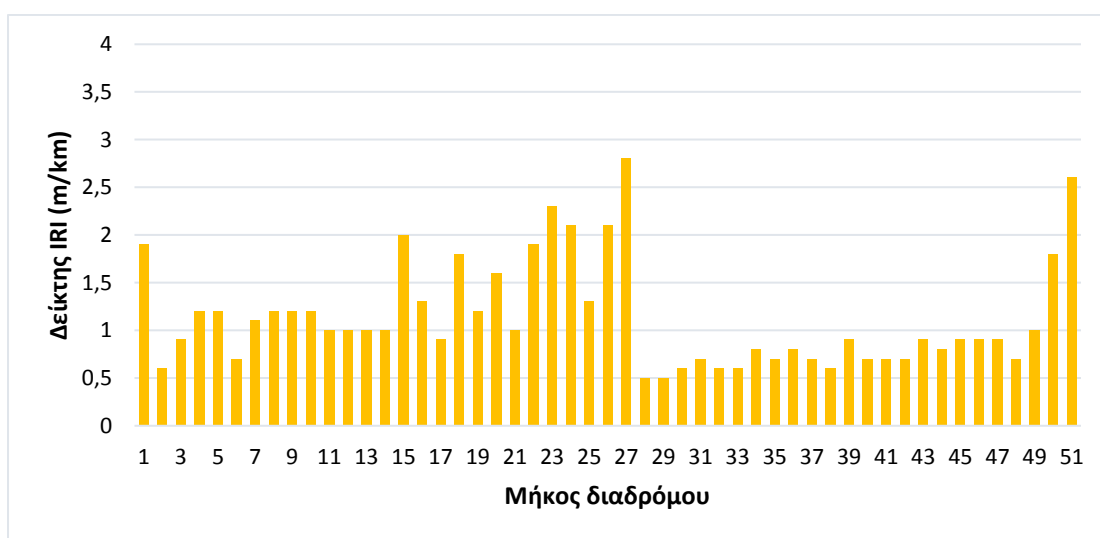


Εικόνα 3.5 Αποτελέσματα BBI δεξιού ίχνους

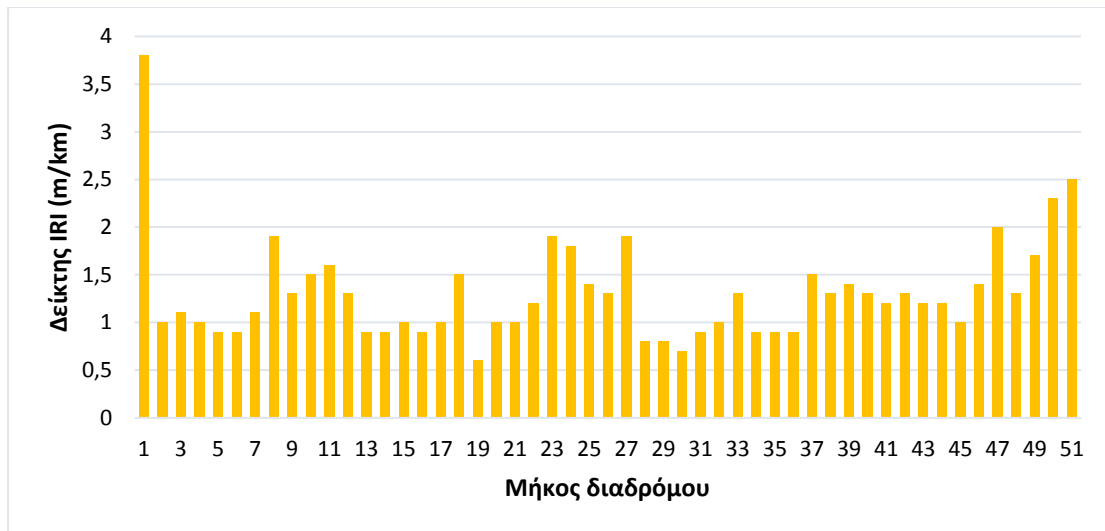
Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, ο δείκτης BBI παίρνει χαμηλές τιμές (μικρότερες της μονάδας που είναι το όριο της αποδεκτής περιοχής). Αυτό δείχνει ότι η κατάσταση του οδοστρώματος κρίνεται αρκετά καλή.

3.3.2 Αποτελέσματα δείκτη IRI

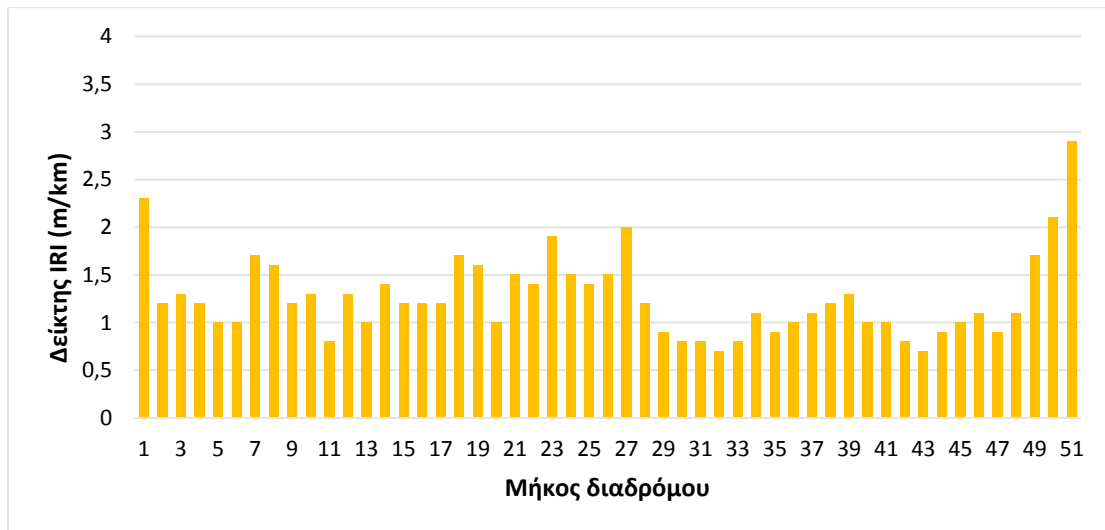
Ο δείκτης IRI είναι ένα διεθνώς αποδεκτό μέτρο για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα οδών, και παρόλο που δεν είναι τόσο αποδεκτό για διαδρόμους αεροδρομίων, χρησιμοποιείται για ανάλυση και αξιολόγηση, ακόμη και σε προδιαγραφές. Αν και η απόκριση του IRI δεν είναι ευαίσθητη στους μεγαλύτερους κυματισμούς που αναφέρεται από την Boeing ότι επηρεάζουν τα αεροσκάφη, είναι ευαίσθητη σε ένα σημαντικό εύρος κυματισμών αποκλίσεων του οδοστρώματος. Στα διαγράμματα των Εικόνων 3.6, 3.7 και 3.8 φαίνονται τα αποτελέσματα του δείκτη IRI για το αριστερό, κεντρικό και δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 3.6 Αποτελέσματα IRI αριστερού ίχνους



Εικόνα 3.7 Αποτελέσματα IRI κεντρικού ίχνους

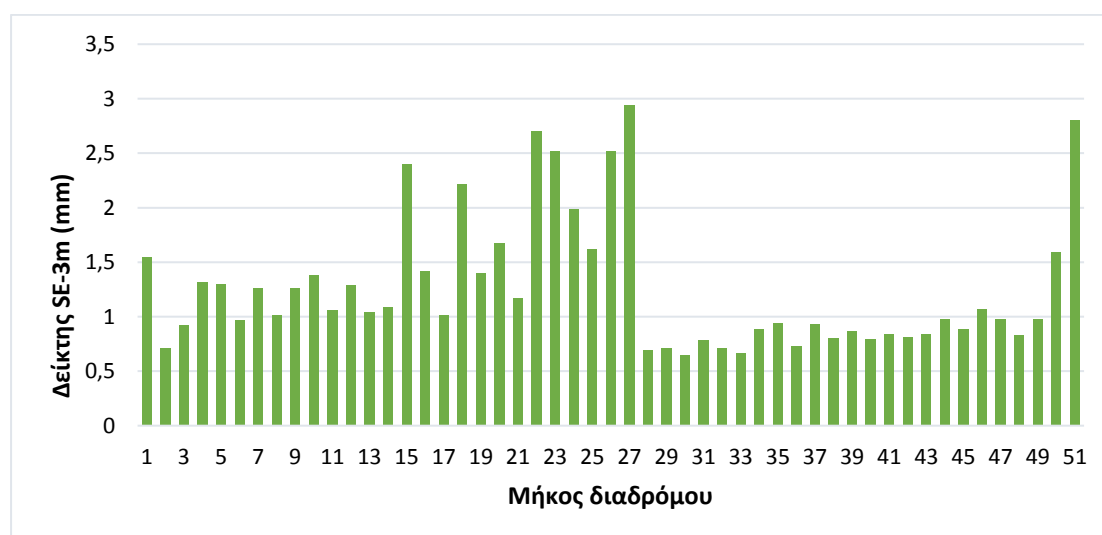


Εικόνα 3.8 Αποτελέσματα IRI δεξιού ίχνους

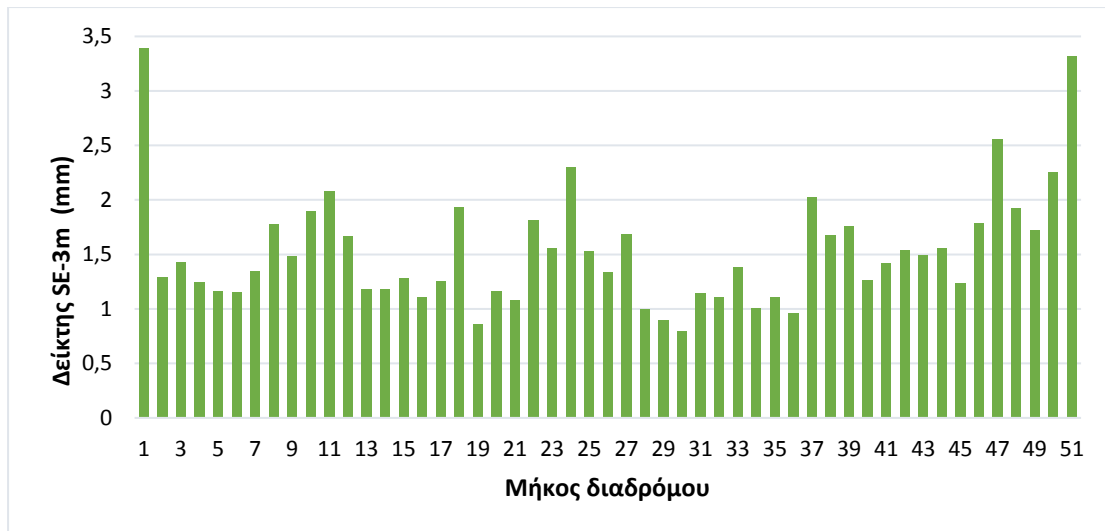
Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, ο IRI παίρνει γενικά λογικές τιμές (0,5-2m/km) για διάδρομο αεροδρομίου.

3.3.3 Αποτελέσματα δείκτη SE

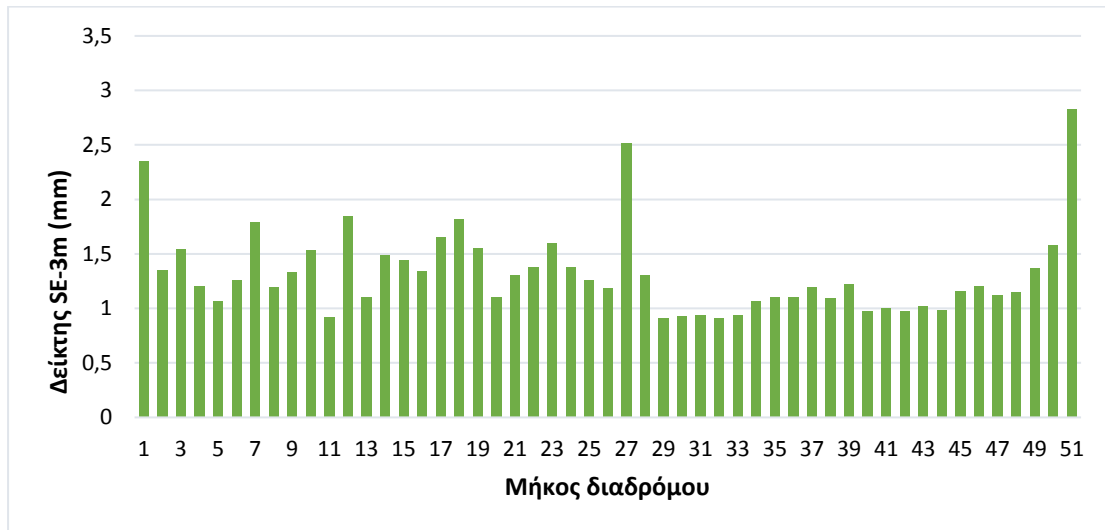
Γενικά για την αποδοχή της ομαλότητας νέων οδοστρωμάτων γίνεται έλεγχος με τη χρησιμοποίηση πήχη κατά μήκος του οδοστρώματος. Το πρότυπο του ICAO για την ομαλότητα νέων οδοστρωμάτων διαδρόμων είναι ότι δεν πρέπει να υπάρχουν αποκλίσεις μεγαλύτερες από 3mm οπουδήποτε κάτω από ένα πήχη 3m. Ωστόσο η ανάλυση της επιφάνειας οδοστρωμάτων με τη μέθοδο του πήχη δεν είναι ούτε πρακτική για μια μεγάλη επιφάνεια του οδοστρώματος, ούτε αντιπροσωπευτική της αναμενόμενης ανταπόκρισης του αεροσκάφους στη καταγεγραμμένη ομαλότητα που αναφέρεται με τη χρήση ενός μικρού μήκους πήχη. Στις Εικόνες 3.9, 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη SE-3m (3m πήχης) για το αριστερό, κεντρικό και δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 3.9 Αποτελέσματα SE-3m αριστερού ίχνους



Εικόνα 3.10 Αποτελέσματα SE-3m κεντρικού ίχνους



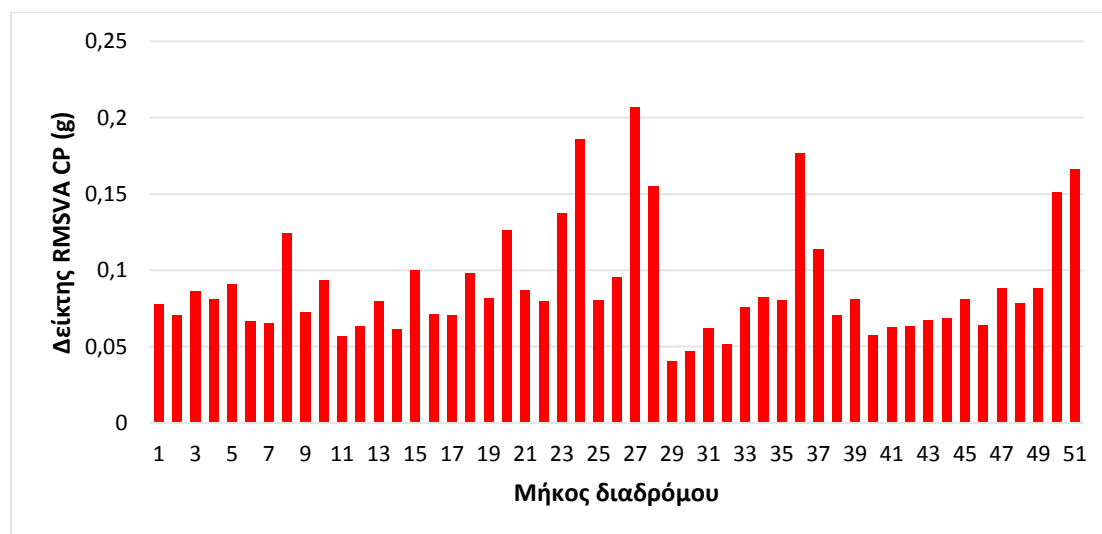
Εικόνα 3.11 Αποτελέσματα SE-3m δεξιού ίχνους

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, ο δείκτης SE-3m παίρνει γενικά χαμηλές τιμές (μικρότερες από 3mm), ειδικά εφόσον πρόκειται για υφιστάμενο οδόστρωμα.

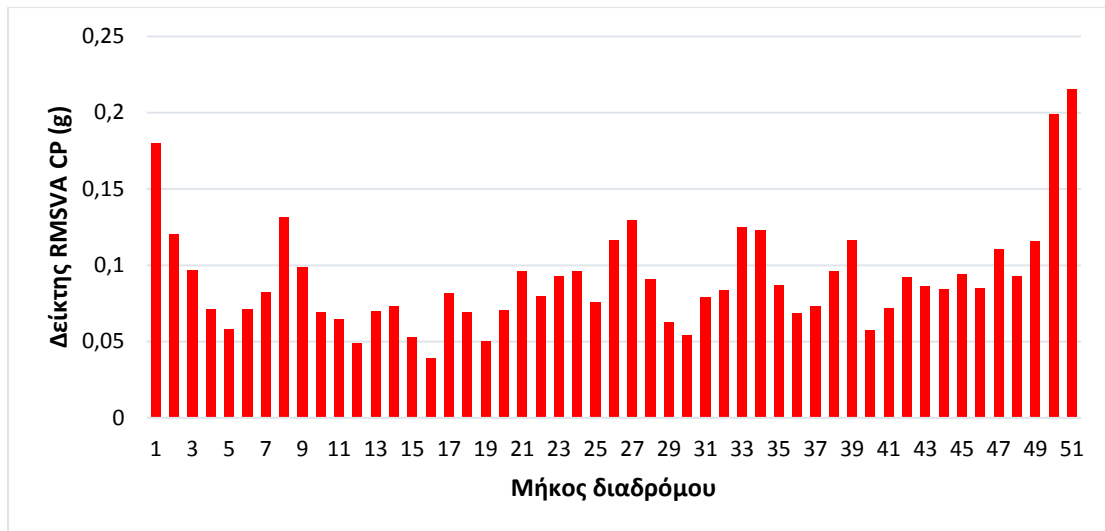
3.3.4 Αποτελέσματα δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μέσω του ProFAA μπορεί να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της απόκρισης του αεροσκάφους για τα καταγεγραμμένα προφίλ οδοστρώματος. Η διαδικασία της προσομοίωσης απαιτεί τον προσδιορισμό ενός αεροσκάφους σχεδιασμού και της ταχύτητας κίνησης του αεροσκάφους. Για την υπόψη αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ως αεροσκάφος σχεδιασμού το Boeing 727 και ταχύτητα κίνησης 100 knots. Με τη χρησιμοποίηση του Boeing 727 ικανοποιείται και η πρόταση της FAA για τα ίχνη καταγραφής καθώς για το συγκεκριμένο αεροσκάφος προτείνονται τα ίχνη καταγραφής που χρησιμοποιήσαμε για την υπόψιν αξιολόγηση.

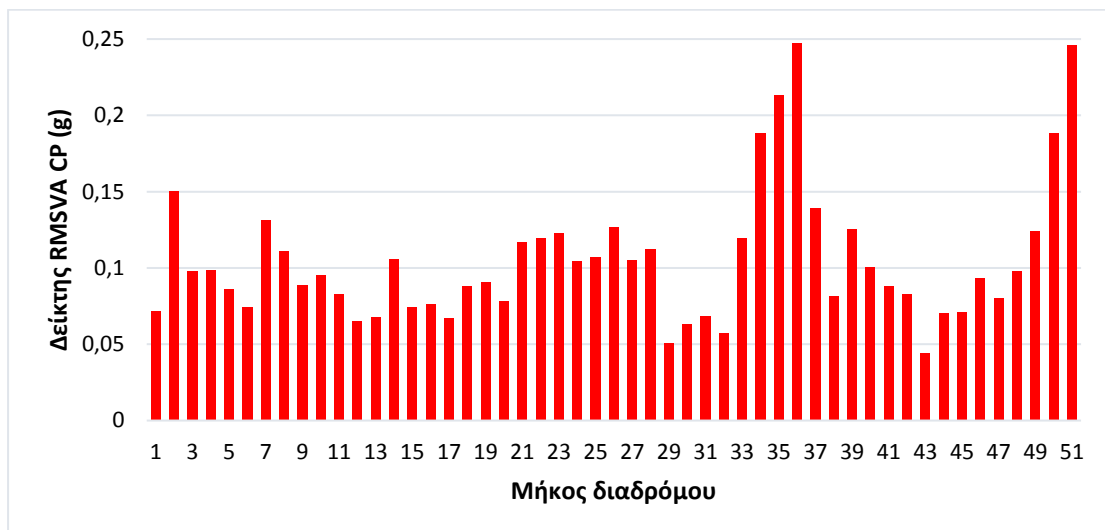
Στις Εικόνες 3.12, 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του RMSVA στο πιλοτήριο του αεροσκάφους (RMSVA CP) για τα τρία ίχνη τροχών.



Εικόνα 3.12 Αποτελέσματα RMSVA CP αριστερού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots



Εικόνα 3.13 Αποτελέσματα RMSVA CP κεντρικού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots



Εικόνα 3.14 Αποτελέσματα RMSVA CP δεξιού ίχνους – Boeing 727, ταχύτητα 100 knots

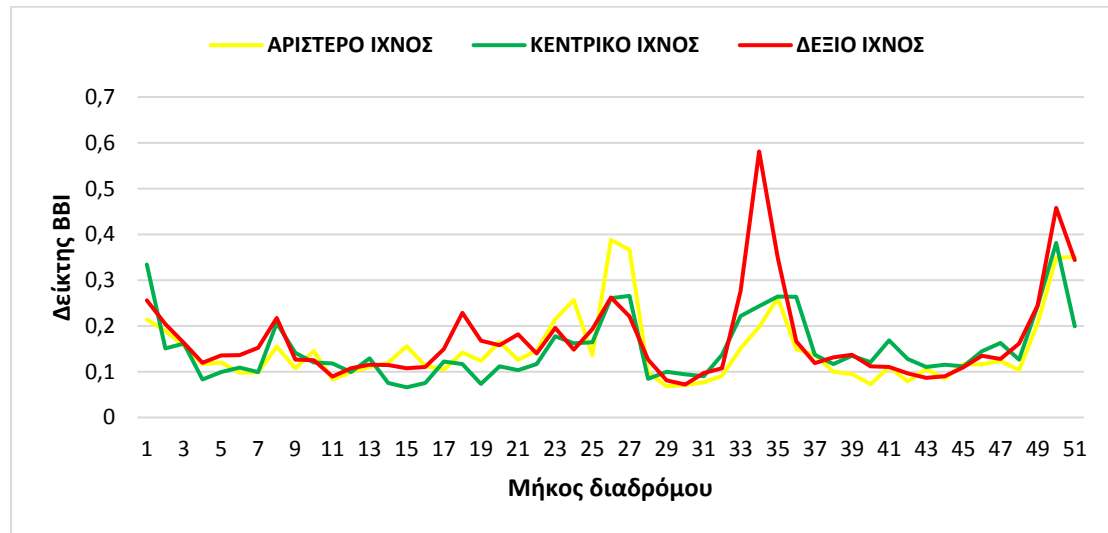
Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, ο δείκτης RMSVA CP παίρνει σε γενικές γραμμές λογικές τιμές κρίνοντας ικανοποιητική την κατάσταση του οδοστρώματος.

4 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανά ίχνος καταγραφής

4.1.1 Δείκτης BBI

Αρχικά γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων του δείκτη BBI για τα διάφορα ίχνη. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του BBI για το αριστερό, το κεντρικό και το δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων BBI ανά ίχνος

Πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη παρατηρήσεων προκειμένου να ελεγχθεί περαιτέρω πόσο σημαντικές είναι οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα τρία ίχνη τροχών. Στον στατιστικό έλεγχο t-test μας ενδιαφέρει να ελέγξουμε αν μία παράμετρος του πληθυσμού (για παράδειγμα η μέση τιμή) ικανοποιεί μια υπόθεση έναντι μιας εναλλακτικής υπόθεσης. Αρχικά, διαμορφώνεται η μηδενική υπόθεση (H_0), κατά την οποία η διαφορά των μετρημένων μέσων τιμών του δείκτη για δύο ίχνη τροχών είναι ίση με το μηδέν. Η εναλλακτική υπόθεση (H_1) θεωρεί πως η παραπάνω διαφορά είναι διάφορη του μηδενός. Προκειμένου να γίνει αποδεκτή η μηδενική υπόθεση πρέπει η κρίσιμη τιμή $t_{critical}$ να

είναι μεγαλύτερη από την απόλυτη τιμή της στατιστικής τιμής t_{stat} της δοκιμής δηλαδή πρέπει $|t_{stat}| < t_{critical}$.

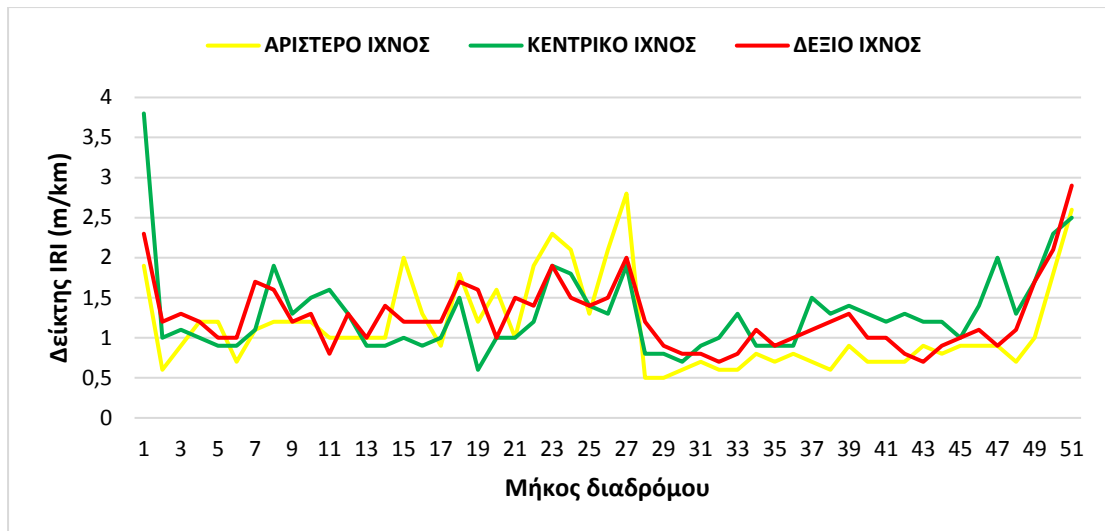
Για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 50 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή $t_{critical} = 2,009$. Από τους ελέγχους προκύπτει πως η απόλυτη στατιστική τιμή ισούται με:

- $|t_{stat}| = 0,201$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του κεντρικού ίχνους,
- $|t_{stat}| = 2,171$ για το ζεύγος τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους και
- $|t_{stat}| = 2,122$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του δεξιού ίχνους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του κεντρικού ίχνους, η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή, ενώ για τα άλλα δύο ζεύγη δεν γίνεται αποδεκτή. Συνεπώς, φαίνεται πως οι διαφορές των τιμών του BBI του αριστερού και του κεντρικού ίχνους δεν είναι σημαντικές, ενώ οι διαφορές των τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους καθώς και του αριστερού και του δεξιού ίχνους είναι σημαντικές. Επομένως, μεταξύ του αριστερού και του κεντρικού ίχνους υπάρχει ομοιογένεια της ομαλότητας εγκάρσια στο οδόστρωμα ενώ δεν υπάρχει ομοιογένεια μεταξύ του κεντρικού και δεξιού ίχνους.

4.1.2 Δείκτης IRI

Ακολούθως, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων του δείκτη IRI. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του IRI για το αριστερό, το κεντρικό και το δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI ανά ίχνοσ

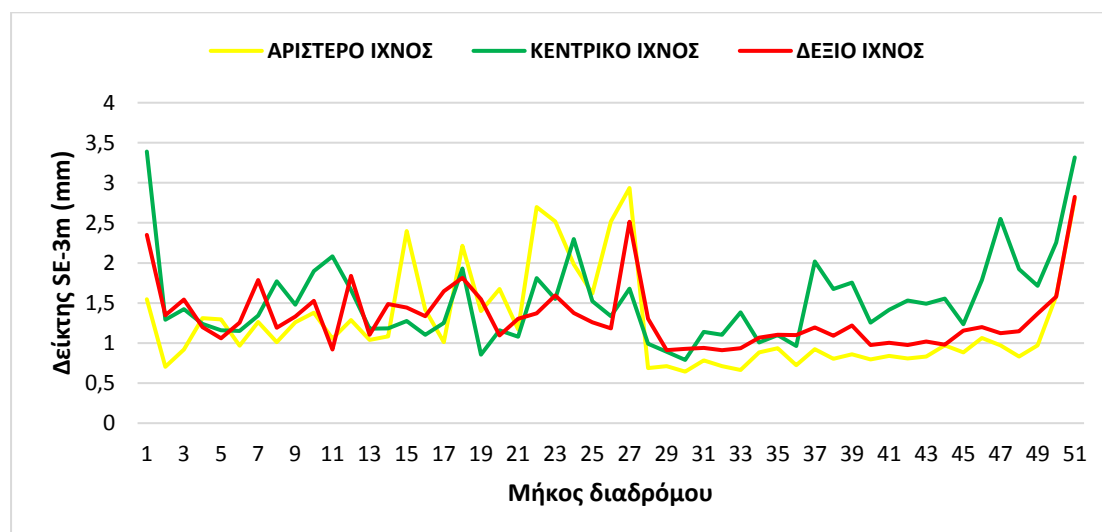
Έπειτα, πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη αποτελεσμάτων του IRI για τα τρία ίχνη. Όπως προηγουμένως, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 50 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή $t_{critical} = 2,009$. Από τους ελέγχους προκύπτει πως η απόλυτη στατιστική τιμή ισούται με:

- $|t_{stat}| = 2,226$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του κεντρικού ίχνους,
- $|t_{stat}| = 0,719$ για το ζεύγος τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους και
- $|t_{stat}| = 2,38$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του δεξιού ίχνους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διαφορές των τιμών του IRI του αριστερού και του κεντρικού ίχνους καθώς και του αριστερού και του δεξιού ίχνους είναι σημαντικές, ενώ οι διαφορές των τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους δεν είναι σημαντικές. Συνεπώς, φαίνεται πως μεταξύ του αριστερού και του κεντρικού ίχνους δεν υπάρχει ομοιογένεια της ομαλότητας εγκάρσια στο οδόστρωμα ενώ υπάρχει ομοιογένεια μεταξύ του κεντρικού και δεξιού ίχνους. Όμως οι ενδείξεις αυτές δεν συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον BBI που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1.

4.1.3 Δείκτης SE

Στη συνέχεια, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων του δείκτη SE-3m. Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη SE-3m για το αριστερό, το κεντρικό και το δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων SE-3m ανά ίχνος

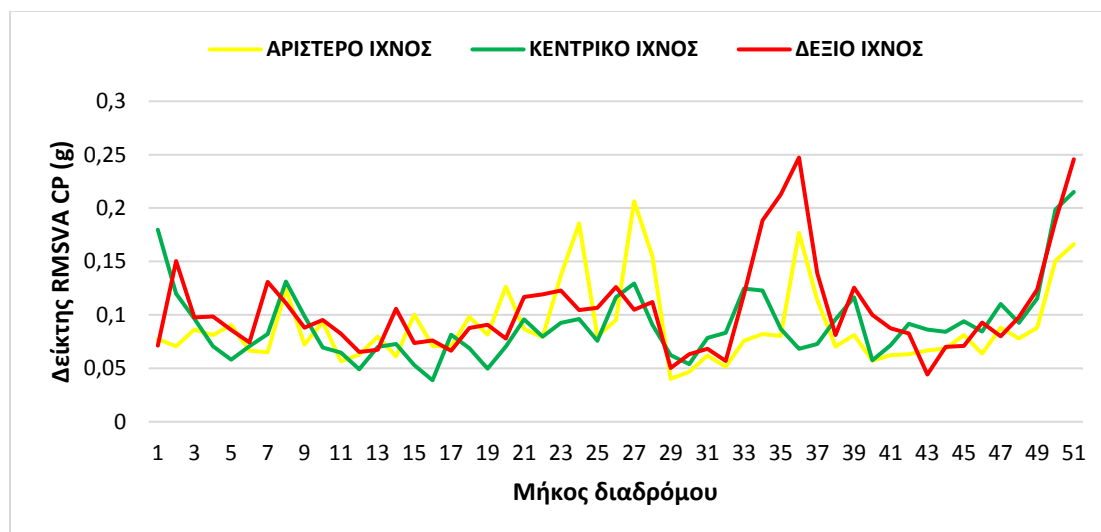
Ακολούθως, πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη αποτελεσμάτων του SE-3m για τα τρία ίχνη. Όπως προηγουμένως, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 50 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή $t_{critical} = 2,009$. Από τους ελέγχους προκύπτει πως η απόλυτη στατιστική τιμή ισούται με:

- $|t_{stat}| = 2,958$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του κεντρικού ίχνους,
- $|t_{stat}| = 3,215$ για το ζεύγος τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους και
- $|t_{stat}| = 0,939$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του δεξιού ίχνους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διαφορές των τιμών του SE-3m του αριστερού και του κεντρικού ίχνους καθώς και του κεντρικού και του δεξιού ίχνους είναι σημαντικές, ενώ οι διαφορές των τιμών του αριστερού και του δεξιού ίχνους δεν είναι σημαντικές. Όμως οι ενδείξεις αυτές δεν συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον BBI που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1.

4.1.4 Δείκτης RMSVA στο πιλοτήριο

Έπειτα, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων του δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο (RMSVA CP). Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη RMSVA CP για το αριστερό, το κεντρικό και το δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP ανά ίχνος

Ακολούθως, πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος t-test των κατά ζεύγη αποτελεσμάτων του RMSVA CP για τα τρία ίχνη. Όπως προηγουμένως, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για 50 βαθμούς ελευθερίας προκύπτει κρίσιμη τιμή $t_{critical} = 2,009$. Από τους ελέγχους προκύπτει πως η απόλυτη στατιστική τιμή ισούται με:

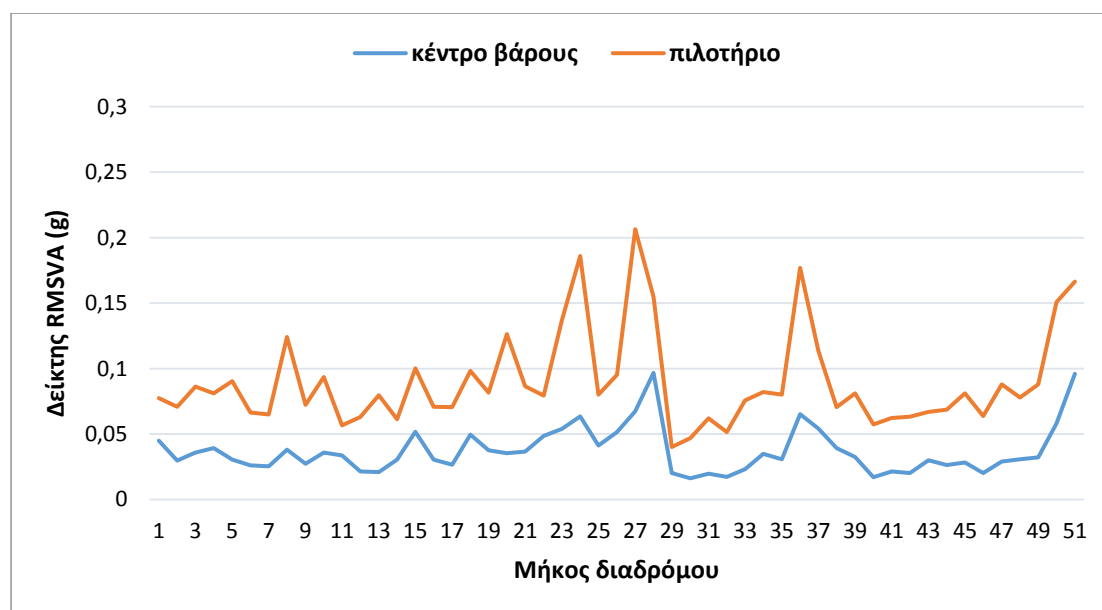
- $|t_{stat}| = 0,24$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του κεντρικού ίχνους,
- $|t_{stat}| = 2,412$ για το ζεύγος τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους και
- $|t_{stat}| = 2,667$ για το ζεύγος τιμών του αριστερού και του δεξιού ίχνους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως οι διαφορές των τιμών του RMSVA CP του αριστερού και του κεντρικού ίχνους δεν είναι σημαντικές, ενώ οι διαφορές των τιμών του κεντρικού και του δεξιού ίχνους καθώς και του αριστερού και του δεξιού ίχνους είναι σημαντικές. Επομένως, μεταξύ του αριστερού και του κεντρικού ίχνους υπάρχει ομοιογένεια της ομαλότητας εγκάρσια στο οδόστρωμα ενώ δεν υπάρχει ομοιογένεια

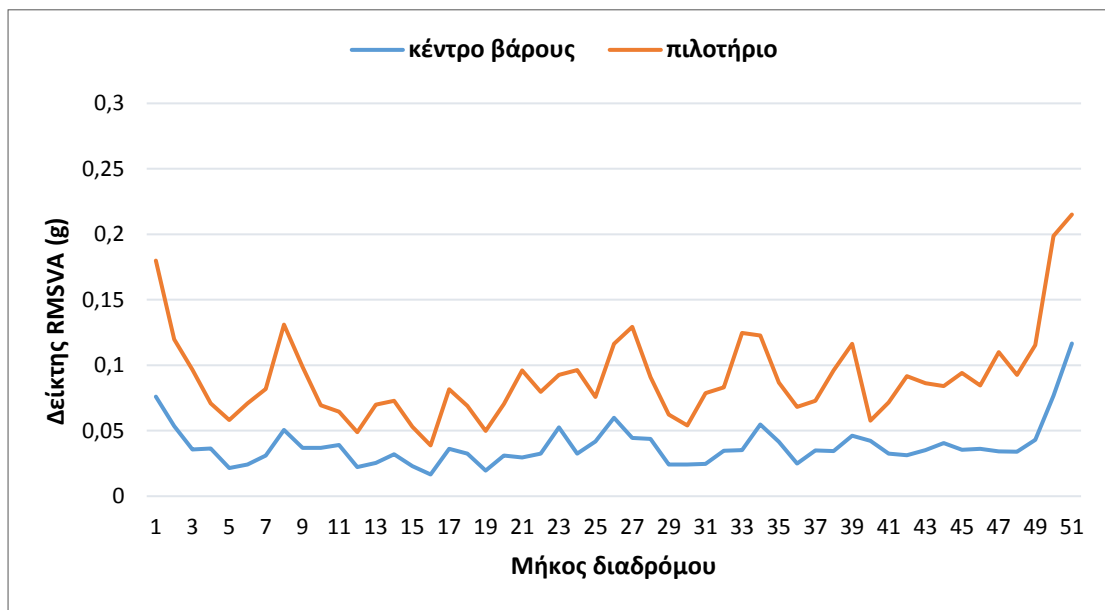
μεταξύ του κεντρικού και δεξιού ίχνους. Οι ενδείξεις αυτές συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον BBI που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 4.1.

4.2 Σύγκριση και συσχέτιση κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους και στο πιλοτήριο του αεροσκάφους

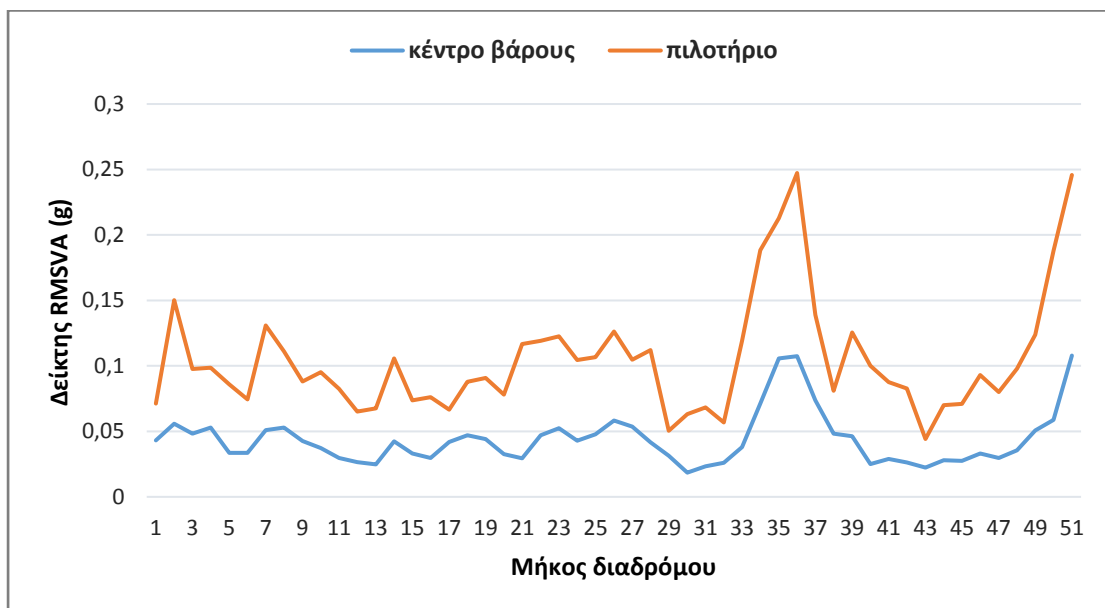
Στην συνέχεια γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους. Για την υπόψη αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ως αεροσκάφος σχεδιασμού το Boeing 727 και ταχύτητα κίνησης 100 knots. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης RMSVA. Στις Εικόνες 4.5, 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους για τα τρία ίχνη τροχών.



Εικόνα 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - αριστερό ίχνος,



Εικόνα 4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - κεντρικό ίχνος

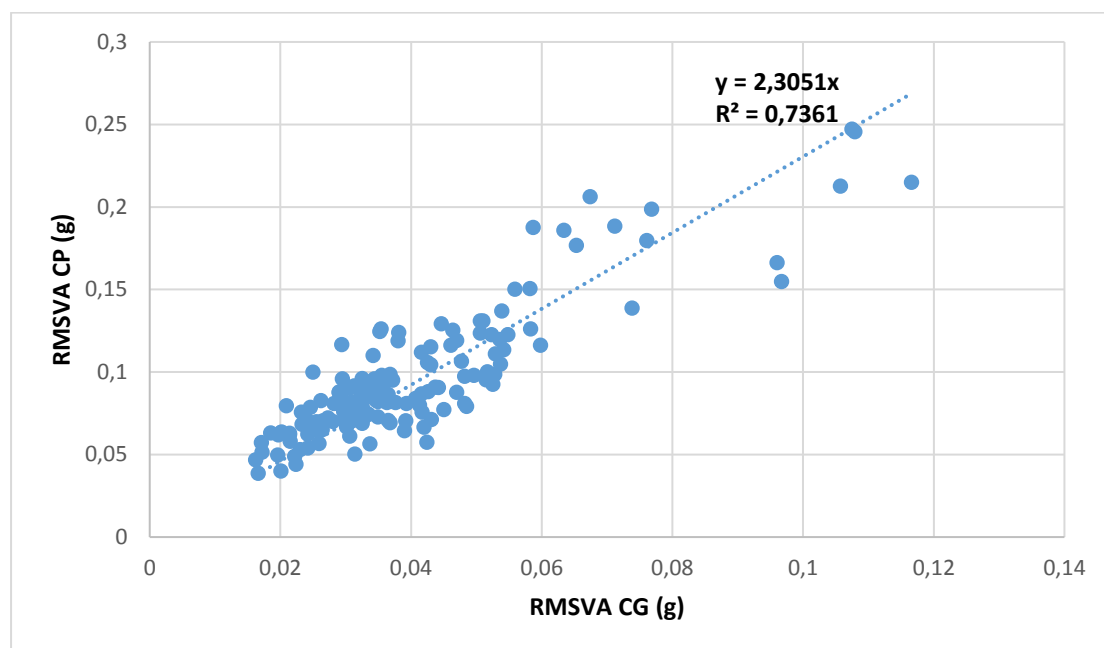


Εικόνα 4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους Boeing 727 για ταχύτητα 100 knots - δεξιό ίχνος

Από τα διαγράμματα των παραπάνω εικόνων, παρατηρείται ότι οι τιμές του δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο είναι πάντα μεγαλύτερες από τις τιμές του δείκτη RMSVA στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι ο θάλαμος του πιλοτηρίου είναι πιο ευαίσθητος στις επιπτώσεις της ομαλότητας σε

σχέση με την περιοχή των επιβατών στην καμπίνα, πράγμα που σημαίνει ότι η ομαλότητα στα οδοστρώματα αεροδρομίων σχετίζεται περισσότερο με την ασφάλεια της πτήσης απ' ό τι με την άνεση των επιβατών.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση για τα αποτελέσματα του RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους και για τα τρία ίχνη τροχών (βλέπε Εικόνα 4.8).

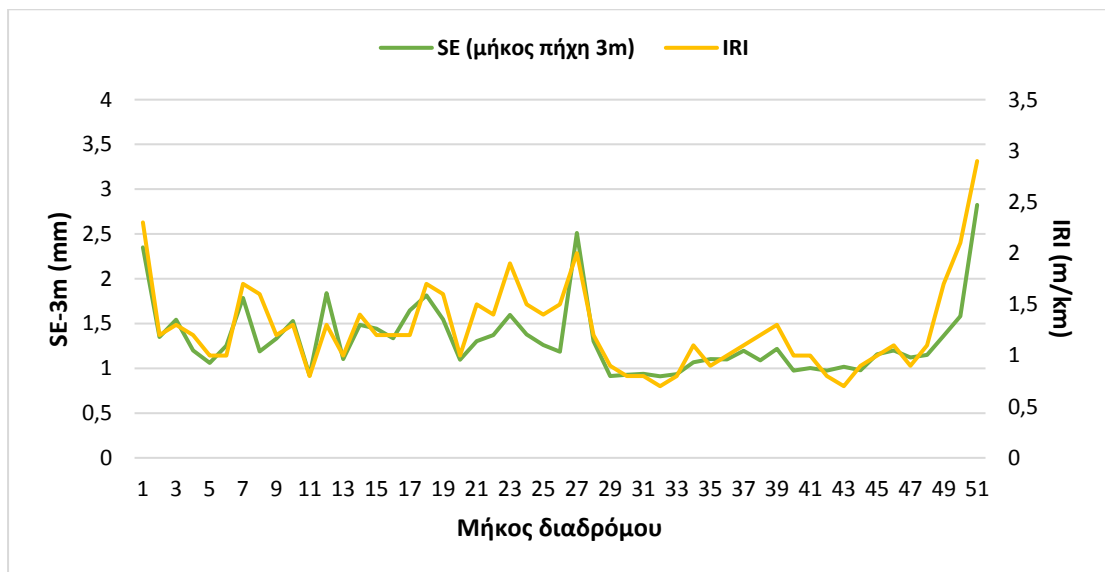


Εικόνα 4.8 Γραμμική συσχέτιση αποτελεσμάτων RMSVA στο πιλοτήριο και στο κέντρο βάρους αεροσκάφους - όλα τα ίχνη

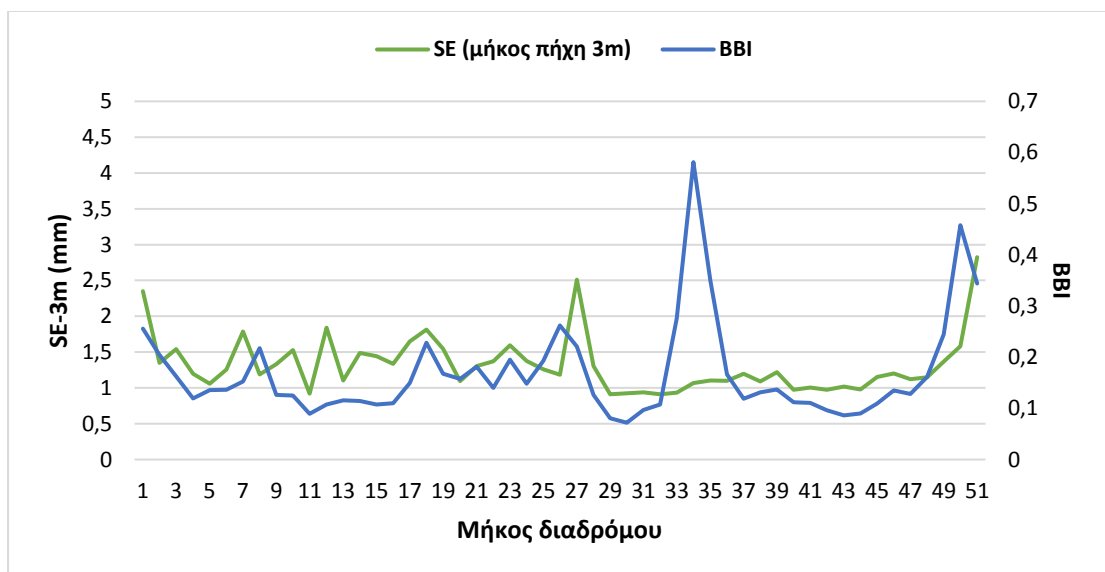
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8 υπάρχει καλή συσχέτιση ($R^2 = 0,74$) μεταξύ των τιμών του δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο (RMSVA CP) και του δείκτη RMSVA στο κέντρο βάρους του αεροσκάφους (RMSVA CG). Ακόμα προκύπτει ότι οι τιμές του δείκτη RMSVA στο πιλοτήριο είναι περίπου 2,3 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές του δείκτη RMSVA στο κέντρο βάρους.

4.3 Σύγκριση και συσχέτιση δεικτών BBI, IRI και SE

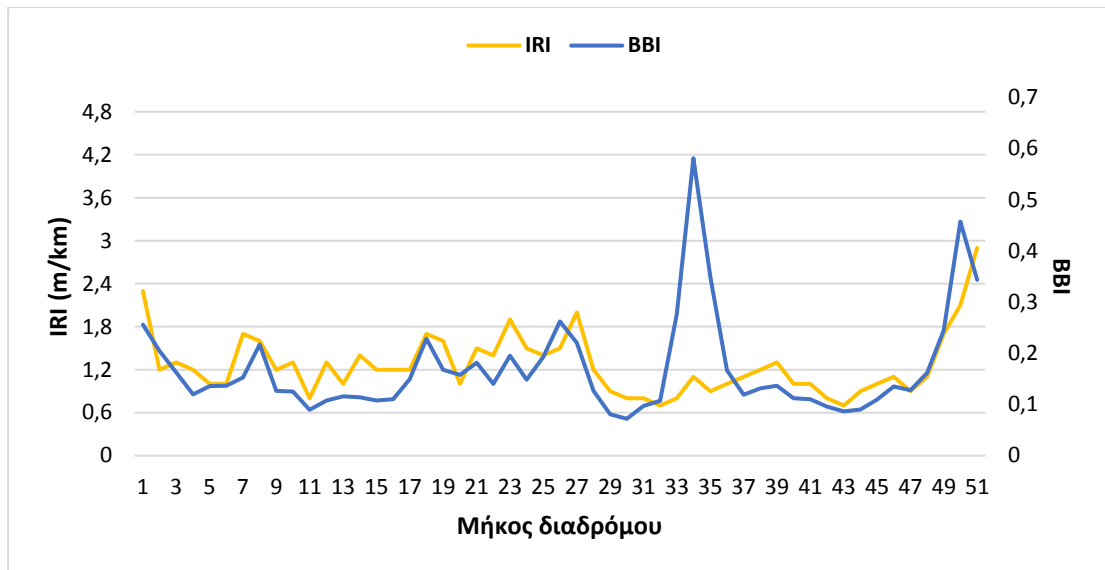
Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση και συσχέτιση ανάμεσα στους δείκτες BBI, IRI και SE-3m. Αρχικά γίνεται σύγκριση της τάσης των αποτελεσμάτων ανάμεσα στους δείκτες για το δεξιό ίχνος τροχού. Στην Εικόνα 4.9 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του δείκτη SE-3m ακολουθούν σχεδόν την ίδια τάση με τα αποτελέσματα του IRI. Στις Εικόνες 4.10 και 4.11 παρατηρείται ότι στη περιοχή των σημείων 33-35 παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στις τιμές του BBI ενώ οι τιμές του IRI και του SE-3m παραμένουν επίπεδες.



Εικόνα 4.9 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και SE-3m δεξιού ίχνους



Εικόνα 4.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων BBI και SE-3m δεξιού ίχνους



Εικόνα 4.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και BBI δεξιού ίχνους

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης R^2 για τη γραμμική παλινδρόμηση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δεικτών BBI, IRI και SE-3m για κάθε ίχνος ξεχωριστά αλλά και για τα τρία ίχνη μαζί. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνονται στις Εικόνες Π.1 έως και Π.12 του Παραρτήματος. Παρατηρείται ότι ο IRI έχει πολύ καλή συσχέτιση με τον SE-3m και ειδικά για το αριστερό ίχνος έχει πολύ υψηλή συσχέτιση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο IRI επηρεάζεται κυρίως από τους πιο μικρούς κυματισμούς μήκους 1,2 - 30 μέτρα. Ο BBI έχει χαμηλή συσχέτιση με τον SE-3m εκτός από το αριστερό ίχνος που έχει μια μέτρια συσχέτιση, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι ο BBI επηρεάζεται περισσότερο από τους μεγαλύτερους κυματισμούς και όχι τόσο από τους μικρότερους. Ο BBI έχει μια σχετικά καλύτερη συσχέτιση με τον IRI απ' ότι με τον SE-3m ωστόσο δεν είναι ικανοποιητική.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα συντελεστή R^2 γραμμικής συσχέτισης δεικτών BBI, IRI και SE-3m

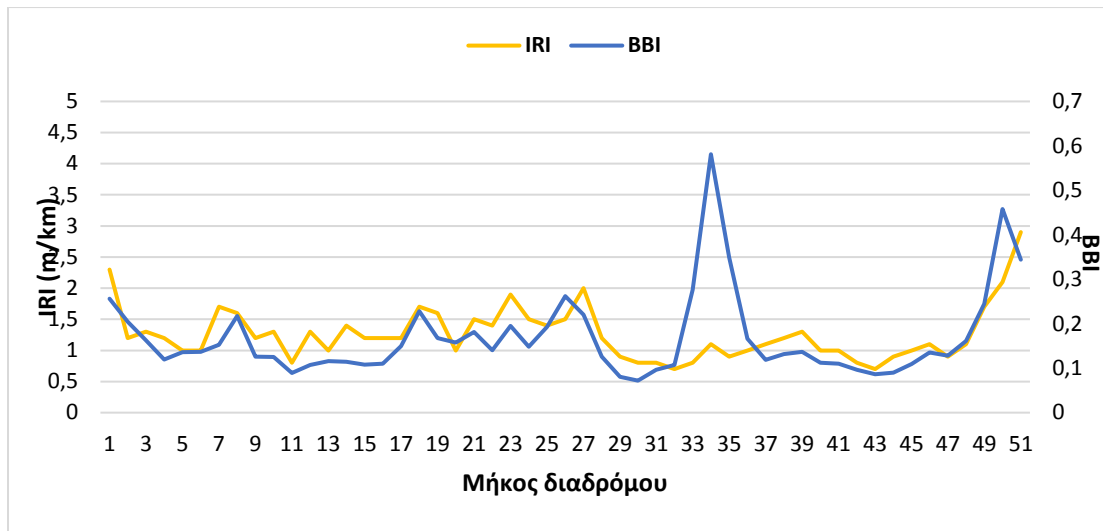
	BBI – IRI	BBI – SE-3m	IRI – SE-3m
Αριστερό ίχνος	0,5329	0,4337	0,9189
Κεντρικό ίχνος	0,3862	0,181	0,8279
Δεξί ίχνος	0,2253	0,0965	0,7705
Όλα τα ίχνη	0,3464	0,1934	0,8399

4.4 Σύγκριση και συσχέτιση δεικτών BBI, IRI και κατακόρυφης επιτάχυνσης

Στη συνέχεια γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των BBI και IRI με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της απόκρισης του αεροσκάφους. Για την προσομοίωση του αεροσκάφους χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο πιλοτήριο σε μονάδες βαρύτητας(g) ενός προσομοιωμένου Boeing 727 για κίνηση με ταχύτητα 100 knots. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.12 και 4.13, στη περιοχή όπου η κατακόρυφη επιτάχυνση παρουσιάζει μέγιστη τιμή (μάλιστα ξεπερνάει την τιμή 0,4g που είναι το όριο για αποδεκτή ομαλότητα), αντίστοιχα και ο BBI παρουσιάζει μέγιστη τιμή, ενώ ο IRI παραμένει χαμηλά. Ο BBI εντοπίζει την περιοχή που παρουσιάζει κακή απόκριση του αεροσκάφους ωστόσο, αξιολογεί την περιοχή ως αποδεκτή.

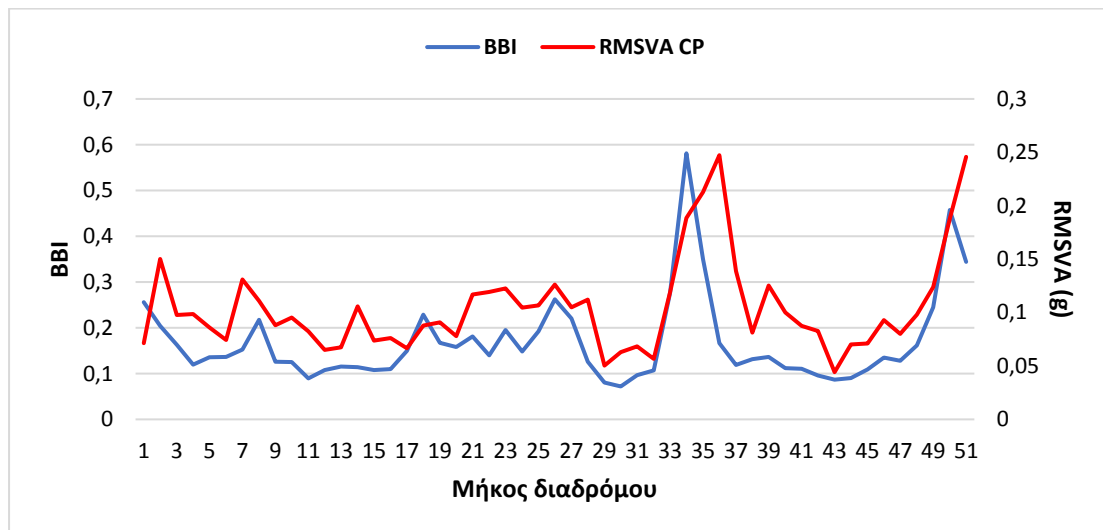


Εικόνα 4.12 Αποτελέσματα κατακόρυφης επιτάχυνσης στο πιλοτήριο του αεροσκάφους B727 για ταχύτητα 100 knots – δεξιό ίχνος

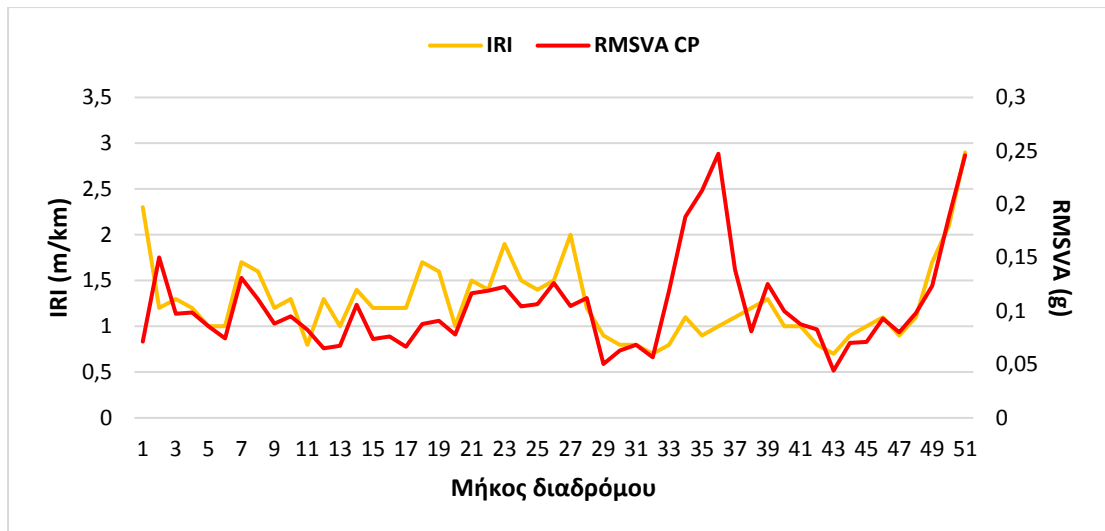


Εικόνα 4.13 Σύγκριση αποτελεσμάτων IRI και BBI δεξιού ίχνους

Παρουσιάζονται επίσης στις Εικόνες 4.14 και 4.15 τα αποτελέσματα συγκριτικά του δείκτη RMSVA CP και των δεικτών BBI και IRI για το δεξί ίχνος τροχού.



Εικόνα 4.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP και BBI δεξιού ίχνους



Εικόνα 4.15 Σύγκριση αποτελεσμάτων RMSVA CP και IRI δεξιού ίχνους

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης R^2 από τη σύγκριση (γραμμική παλινδρόμηση) των δεικτών BBI, IRI με τον RMSVA CP για κάθε ίχνος ξεχωριστά, αλλά και για τα τρία ίχνη μαζί. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνονται στις Εικόνες Π.13 έως και Π.20 του Παραρτήματος. Παρατηρείται ότι και οι δύο δείκτες δεν έχουν ιδιαίτερα καλή συσχέτιση με τον RMSVA CP αν και ο BBI έχει σε γενικές γραμμές καλύτερη συσχέτιση, αλλά όχι ικανοποιητική.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα συντελεστή R^2 γραμμικής συσχέτισης του δείκτη RMSVA CP με τους δείκτες BBI και IRI

	BBI - RMSVA CP	IRI - RMSVA CP
Αριστερό ίχνος	0,4419	0,3925
Κεντρικό ίχνος	0,5399	0,522
Δεξί ίχνος	0,4658	0,1771
Όλα τα ίχνη	0,4834	0,3257

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση της ομαλότητας ασφαλτικών οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Συνοψίζοντας τα όσα έχουν αναφερθεί, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, όσο και από την αναλυτική διαδικασία, καθώς και διάφορες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε ότι η ομαλότητα στα οδοστρώματα αεροδρομίων είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί επηρεάζει την ασφάλεια των πτήσεων και των επιβατών. Επίσης συμπεραίνεται ότι η ομαλότητα για τα οδοστρώματα αεροδρομίων πρέπει να αντιμετωπίζεται ως διαφορετικό θέμα από την ομαλότητα οδών, λόγω των πολλών διαφορών ανάμεσα στα αεροσκάφη και στα επιβατικά οχήματα και φορτηγά, καθώς και λόγω του ότι για την ομαλότητα οδών δεν λαμβάνονται υπόψη οι μεγαλύτερου μήκους κυματισμοί (50-120m), οι οποίοι είναι σημαντικοί για την απόκριση του αεροσκάφους. Επιπλέον σημαντικός στην αξιολόγηση της ομαλότητας είναι ο ρόλος των πιλότων ως χρήστες των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, καθώς τα παράπονα και οι παρατηρήσεις τους αποτελούν συχνά την πρώτη ένδειξη έλλειψης της απαιτούμενης ομαλότητας του οδοστρώματος.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η προσομοίωση του αεροσκάφους ως ένα σημαντικό «εργαλείο» για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων. Η προσομοίωση της απόκρισης του αεροσκάφους που κινείται σε υψηλές ταχύτητες μπορεί να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό κάθετων επιταχύνσεων καθώς και δυναμικών φορτίων στα φορεία τροχών του αεροσκάφους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αεροσκάφους συσχετίζονται με τα παράπονα των πιλότων, προσδιορίζουν με ακρίβεια την τοποθεσία ελλειπούς ομαλότητας στο οδόστρωμα, ιδιαίτερα όσον αφορά στις αποκλίσεις των μεγαλύτερων κυματισμών, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποδοχή της ομαλότητας ενός διαδρόμου Π/Α.

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης αξιολογήθηκαν στοιχεία ομαλότητας από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, τα οποία αφορούσαν σε υφιστάμενο ασφαλτικό οδόστρωμα διαδρόμου προσγείωσης – απογείωσης

αεροδρομίου μήκους περίπου 2.300 μέτρων. Μέσω του λογισμικού ProFAA της FAA υπολογίστηκαν τα αποτελέσματα των διάφορων δεικτών ομαλότητας για το αριστερό, κεντρικό, και δεξί ίχνος τροχού. Η ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων οδήγησε σε διάφορα συμπεράσματα που αναφέρονται ακολούθως.

- Για το υπό διερεύνηση οδόστρωμα τα αποτελέσματα των διάφορων δεικτών έδειξαν ότι παρά την αναμενόμενη φθορά που αναμένεται με το πέρασμα του χρόνου, λόγω της χρησιμοποίησής του και των καιρικών συνθηκών, σε γενικές γραμμές η κατάσταση του οδοστρώματος εμφανίζεται ικανοποιητική, από άποψη λειτουργικής κατάστασης.
- Τα αποτελέσματα των δεικτών BBI και RMSVA στο πιλοτήριο έδωσαν μια ένδειξη ομοιογενούς ομαλότητας εγκαρσίως, στο ήμισυ του πλάτους του διαδρόμου Π/Α, αριστερά του κεντρικού άξονα. Τα αποτελέσματα του IRI έδωσαν μια ένδειξη ομοιογενούς ομαλότητας εγκαρσίως, στο ήμισυ του πλάτους του διαδρόμου Π/Α, δεξιά του κεντρικού άξονα, ενώ τα αποτελέσματα του SE-3m δεν έδωσαν σαφές συμπέρασμα όσον αφορά την ομοιογένεια εγκαρσίως. Εν κατακλείδι, η ανάλυση των επιμέρους δεικτών, όσον αφορά στην αξιολόγηση της ομοιογένειας της ομαλότητας εγκαρσίως, δεν δίνει ομοειδή αποτελέσματα.
- Ο θάλαμος του πιλοτηρίου είναι πιο ευαίσθητος στις επιπτώσεις της ομαλότητας σε σχέση με την περιοχή των επιβατών στην καμπίνα (κέντρο βάρους αεροσκάφους), στοιχείο που δείχνει ότι η ομαλότητα στα οδοστρώματα αεροδρομίων σχετίζεται περισσότερο με την ασφάλεια της πτήσης απ' ό,τι με την άνεση των επιβατών.
- Τα αποτελέσματα με τη μέθοδο του πήχη (SE-3m) παρουσίασαν πολύ υψηλή συσχέτιση με τα αποτελέσματα του IRI γεγονός το οποίο δείχνει ότι ο IRI επηρεάζεται κυρίως από μικρότερους κυματισμούς.
- Τα αποτελέσματα με τη μέθοδο του πήχη (SE-3m) παρουσίασαν χαμηλή συσχέτιση με τον BBI, συμπεραίνοντας έτσι ότι ο BBI δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τους μικρότερους κυματισμούς.
- Η μέθοδος του πήχη είναι καλή για την αξιολόγηση νέων οδοστρωμάτων (όπου δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα μεγάλοι μήκους κυματισμοί λόγω της λειτουργίας των αεροσκαφών), αλλά λόγω περιορισμένου μεγέθους δεν

μπορεί να εντοπίσει όλους τους κυματισμούς που επηρεάζουν την απόκριση του αεροσκάφους.

- Γενικά, ο δείκτης IRI αντιπροσωπεύει την προσομοίωση της απόκρισης ενός μοναδικού συστήματος ανάρτησης οχήματος. Στην προκειμένη περίπτωση, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανάλυση με τον IRI δεν είναι αντιπροσωπευτική της απόκρισης του αεροσκάφους, καθώς και ότι δεν εντοπίζει τους μεγαλύτερου μήκους κυματισμούς που είναι σημαντικοί για την απόκριση του αεροσκάφους. Επομένως δεν συνίσταται η χρησιμοποίησή του για τα οδοστρώματα αεροδρομίων.
- Ο BBI εντοπίζει τις περιοχές υποβαθμισμένης ομαλότητας, κυρίως λόγω μεγαλύτερου μήκους κυματισμών, ωστόσο δεν έχει ιδιαίτερα καλή συσχέτιση με την απόκριση του αεροσκάφους. Επειδή ο δείκτης αυτός αξιολογεί μόνο το μήκος κύματος και το πλάτος του περιστατικού (απόκλισης), μπορεί να αξιολογήσει μόνο ένα περιστατικό τη φορά. Πολλές έρευνες έχουν διαπιστώσει ότι η κακή απόκριση του αεροσκάφους οφείλεται σε διάφορα διαδοχικά περιστατικά, καθένα από τα οποία θα μπορούσε να βρεθεί αποδεκτό από τον BBI.

Κατόπιν τούτων, προκύπτουν κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα όσον αφορά στην αξιολόγηση της ομαλότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ως ακολούθως:

- Δεδομένων των παραπάνω συμπερασμάτων κρίνεται ότι ο BBI είναι ο πιο αποδοτικός δείκτης για την αξιολόγηση της ομαλότητας, ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν κάποια θεμελιώδη ζητήματα που περιορίζουν την αποτελεσματικότητά του. Για το λόγο αυτό συνίσταται η έρευνα για τη δημιουργία ενός δείκτη που να σχετίζεται με την απόκριση των αεροσκαφών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (απογείωση, προσγείωση). Σ' αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι τα αεροσκάφη κινούνται σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων, καθώς και ότι κατά την απογείωση και την προσγείωση το αεροσκάφος επιταχύνει ή επιβραδύνει.

- Θέσπιση ενός γενικού προτύπου για την αξιολόγηση της ομαλότητας στα οδοστρώματα αεροδρομίων. Να γίνει προσπάθεια να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση και η άποψη των πιλότων που είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς είναι εκείνοι οι οποίοι επηρεάζονται περισσότερο από τις επιπτώσεις της ομαλότητας.
- Καθιέρωση επίσημων κριτηρίων που καθορίζουν πότε ένα οδόστρωμα διαδρόμου προσγείωσης – απογείωσης αεροδρομίου έχει γίνει ακατάλληλο για χρήση ή ενδιάμεσων ορίων επέμβασης για τη διατήρηση ενός αποδεκτού επιπέδου λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Λοΐζος και Χ. Πλατή, «Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων,» σε *Τεύχος Α - Οδοστρώματα Αεροδρομίων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Οδοποιίας, 2014.
- [2] Α. Λοΐζος και Χ. Πλατή, «Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων,» σε *Τεύχος Β - Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Οδοποιίας, 2014.
- [3] Δ. Ευαγγελίδης, «Οδηγίες συντήρησης αυτοκινητοδρόμων-Κύρια συντήρηση οδοστρωμάτων,» σε *Μέρος Ιο: Χαρακτηριστικά της Λειτουργικής και Δομικής Κατάστασης των Οδοστρωμάτων*, Εγνατία Οδός Α.Ε., 2004.
- [4] Δ. Ταπεινόπουλος, Διπλωματική εργασία "Σύγχρονα συστήματα καταγραφής επιφανειακών χαρακτηριστικών οδοστρωμάτων", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2010.
- [5] I. Song, A. Larkin και S. Augustin, «PROFILE DATA COMPARISONS FOR AIRFIELD RUNWAY PAVEMENTS,» σε *2014 FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE*, Galloway, New Jersey, USA, August 2014.
- [6] FAA, «Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Runway Roughness. Advisory Circular AC150/5380-9,» Washington, 2009.
- [7] S. H. Cardoso, «PRACTICAL MANUAL ON THE AIRCRAFT-PAVEMENT INTERACTION AND RUNWAY ROUGHNESS EVALUATION,» Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2002.
- [8] R. W. Perera και S. D. Kohn, «Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report,» 2002.
- [9] S. Emery, A. Hefer και E. Horak, «Roughness of Runways and Significance of Appropriate Specifications and Measurement,» 2015.
- [10] J. E. Woods, A STUDY OF AIRPORT PAVEMENT ROUGHNESS AND AIRCRAFT-PAVEMENT INTERACTION USING WAVELET ANALYSIS, San Antonio: University of Texas, ProQuest, 2008.
- [11] T. Gerardi, «THE IMPACT OF RUNWAY ROUGHNESS IN A HIGH SPEED ABORTED TAKEOFF,» σε *2007 FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE*, Atlantic City, New Jersey, USA, 2007.
- [12] Y.-h. Chen και C.-p. Chou, «ASSESSMENT OF AIRCRAFT'S VERTICAL RESPONSES TO DEVELOP THE ROUGHNESS EVALUATION INDEX FOR AIRPORT PAVEMENT,» σε *2004 FAA WORLDWIDE AIRPORT*

TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE, Atlantic City, New Jersey, USA, 2004.

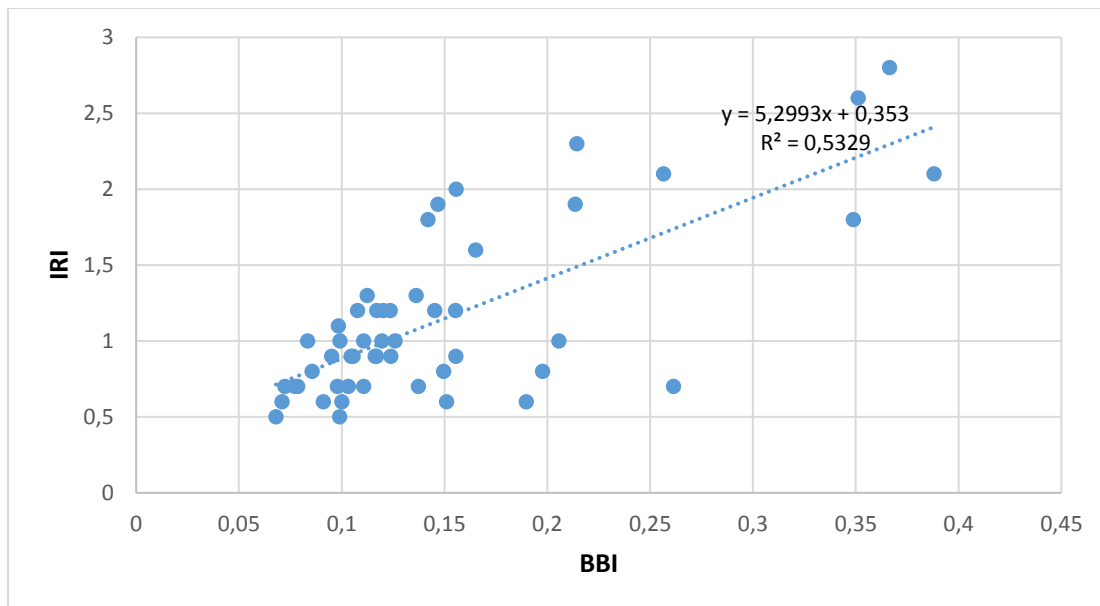
- [13] Transports Canada, «Measurement and Evaluation of Runway Roughness. Advisory Circular AC 302-023,» Transport Canada, 2015.
- [14] Boeing, «Runway Roughness Measurement Quantification and Application – The Boeing Method. Pubn D6-81746. Airport Technology Organization,» Boeing Aircraft Company, Seattle, 2002.
- [15] P. A. van Gelder και M. J. A. Stet, «Evaluation Methods for longitudinal evenness of runway pavements,» National Aerospace Laboratory NLR, 2009.
- [16] T. Gerardi, «Airfield Pavement Roughness-Gaps in the Industry-,» σε *ASTM E17 Seminar on Airport Pavement Roughness Issues*, December 5, 2006.
- [17] FAA, «ProFAA - the Federal Aviation Administration computer program for roughness index analysis. User's Manual (draft),» Airport Technology, Research and Development Branch, FAA, Washington, 2009.
- [18] M. Gerardi, «Airfield Pavement Smoothness Airport Pavement Workshop,» APR Consultants.
- [19] ASTM E1364 - 95(2012) Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method.
- [20] APR, «<http://www.aprconsultants.com/auto-rod-and-level-2/>».
- [21] <http://www.kamsolns.com/concrete.htm>.
- [22] M. W. Sayers και S. M. Karamihas, «The little book of profiling,» UMTRI, Michigan, USA, 1998.
- [23] IPRF, «Airfield Concrete Pavement Smoothness – a Handbook. Report IPRF-01-G-002-02-4. Innovative Pavement Research Foundation,» Skokie, IL, April, 2007.
- [24] <https://www.speedcrete.co.uk/straightedge-measuring-wedge.html>.
- [25] ICAO, «Annex 14 Aerodromes. Vol.1. Aerodrome design and operations. 6th edition,» International Civil Aviation Organisation, 2013.
- [26] FAA, «Standards for Specifying Construction of Airports. Advisory Circular AC150/5370-10G,» Washington, 2014.
- [27] «CANADIAN STANDARDS AND RECOMMENDED PRACTICES, ASG-20 PAVEMENT CONSTRUCTION: METHODS AND INSPECTION,» Public Works and Government Services Canada (PWGSS), 1996.
- [28] G. F. Hayhoe και I. Song, «Airport Pavement Roughness Index Relationships

- Using the Federal Aviation Administration (FAA) Profiling System,» 2006.
- [29] G. F. Hayhoe και I. Song, «Pavement Profile Analysis Methods Using ProFAA,» σε *Transportations Systems Workshop 2012*, Renaissance Austin Hotel, Austin, Texas, 5 – 8 March 2012.
- [30] «ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ. ΠΕΤΕΠ 05-03-12-01 Αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος,» Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., 2006.
- [31] G. Morris και A. Hall, «Recent Studies of Runway Roughness,» σε *NASA SP-83, Conference on Aircraft Operating Problems*, May 1965.
- [32] A. Hall, G. Morris και P. Hunter, «Status of Research on Runway Roughness,» σε *Langley Research Center, NASA SP-270*, May 1971.
- [33] A. Gerardi, «Digital simulation of flexible aircraft response to symmetrical and asymmetrical runway roughness. Technical Report AFFDL-TR-77-37.,» Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base , Ohio, 1977.
- [34] I. Song, «Roughness Index Computations by Straightedge Type Measurements in ProFAA,» σε *2008 Road Profiler User's Group Meeting*, Austin, Texas, October 28, 2008.
- [35] J. Rapol, «EVALUATION OF GRADE AND STRAIGHTEDGE TOLERANCES IN FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION PAVEMENT CONSTRUCTION SPECIFICATIONS,» σε *2002 FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION TECHNOLOGY AIRPORT TRANSFER CONFERENCE*, Washington, DC 20591, U.S.A, 2002.
- [36] M. Gerardi, «The Boeing Bump Index – Additional Methodologies Recommended,» APR consultants, 2015.
- [37] G. Hayhoe, «ProFAA Update,» FAA, Airport Pavement Working Group, Sheraton Atlantic City Convention Center, April 25, 2012.
- [38] T. Gillespie, «Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask! Road Profile Users Group Meeting,» Lincoln, Nebraska, 1992.
- [39] Α. Λοΐζος, Χ. Πλατή και Γ. Κανελλαΐδης, «Ο Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας IRI σε σχέση με τους κυματισμούς της επιφάνειας των οδών,» σε *2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005*, 2005.
- [40] D. Mesher, B. Palsat και T. De Lustrac, «Comprehensive Airport Pavement Surface Profile Collection and Analysis,» σε *Advances in the Data Collection and Usage for Pavement Management Systems Session of the 2015 Conference of the Transportation Association of Canada*, Charlottetown, PEI, 2015.
- [41] D. Goldman και H. Von Gierke, «Shock and Vibration Handbook Volume 1,»

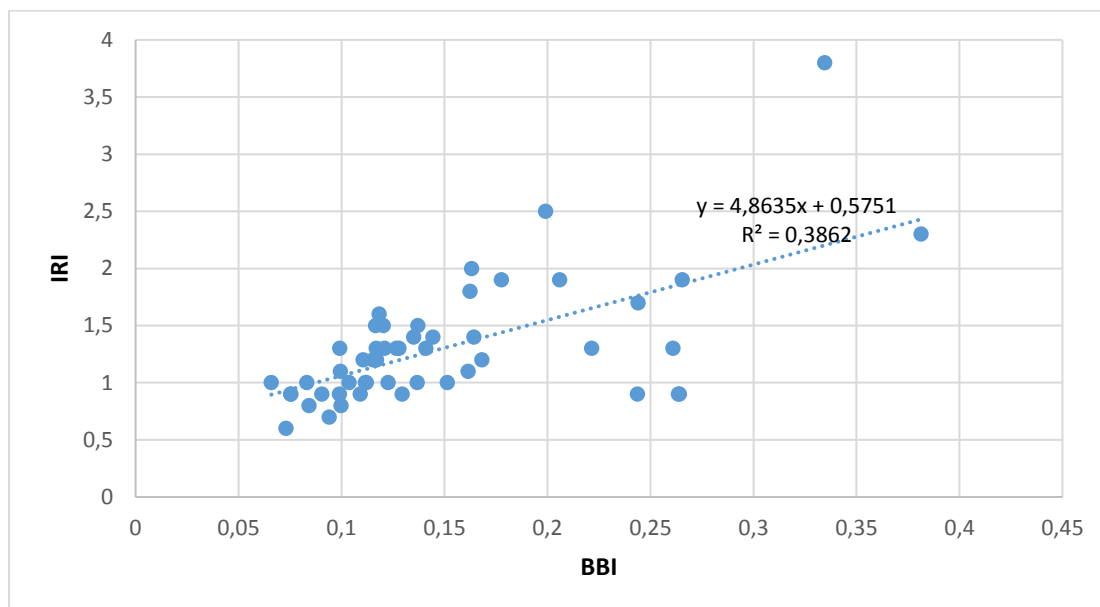
Chapter 44,» McGraw-Hill, New York, 1977.

- [42] G. F. Hayhoe, «Airport Pavement Rideability Rating for Maintenance Evaluation,» σε *Airports Conference*, Hershey Lodge, Hershey, PA, March 22, 2016.

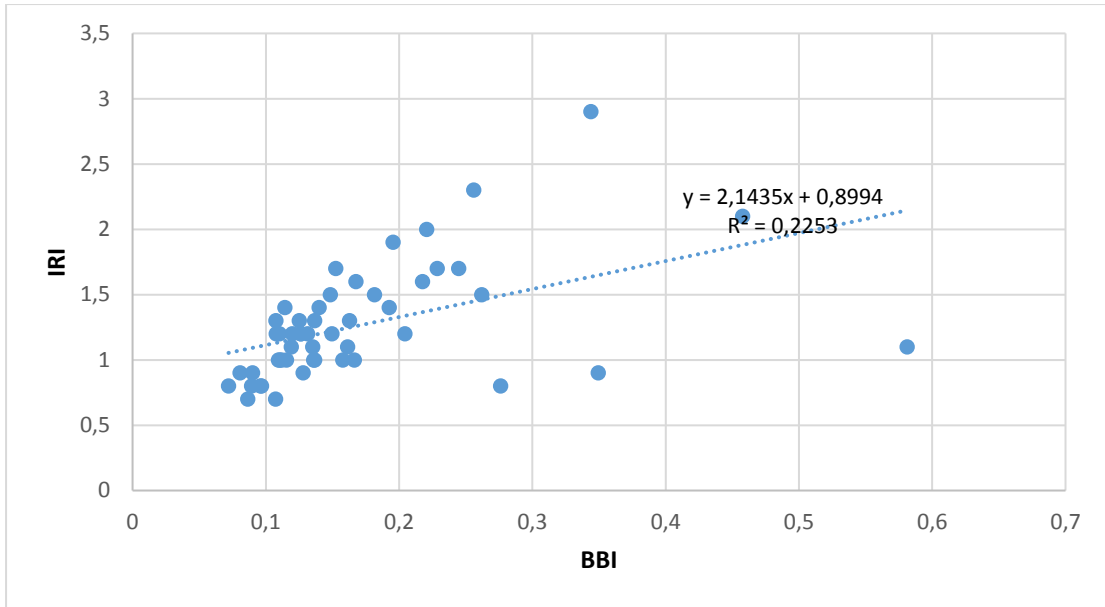
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



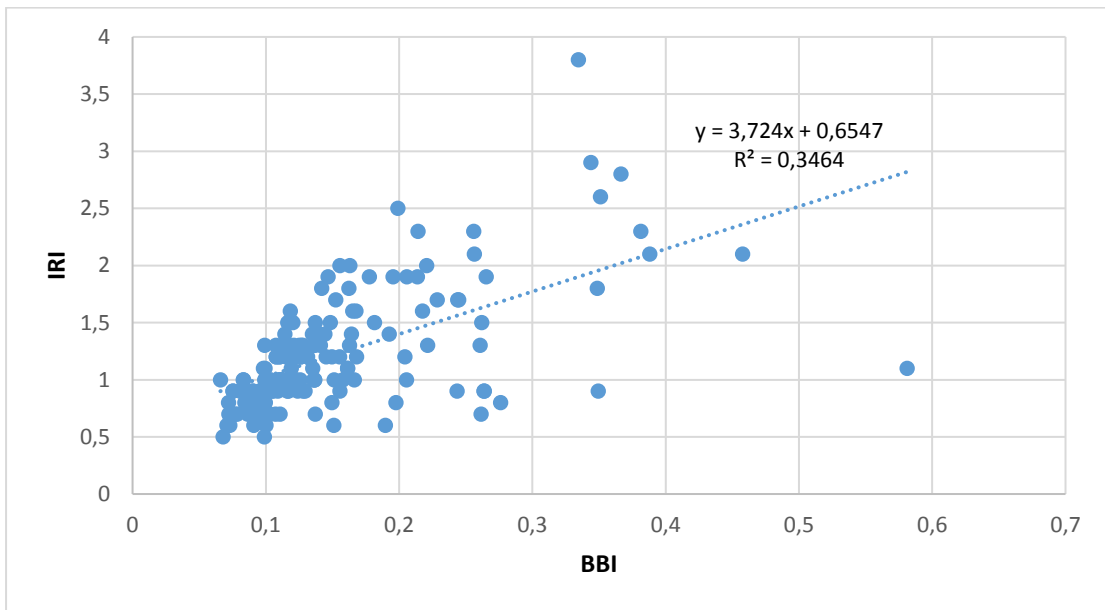
Εικόνα Π.1 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI αριστερό ίχνος



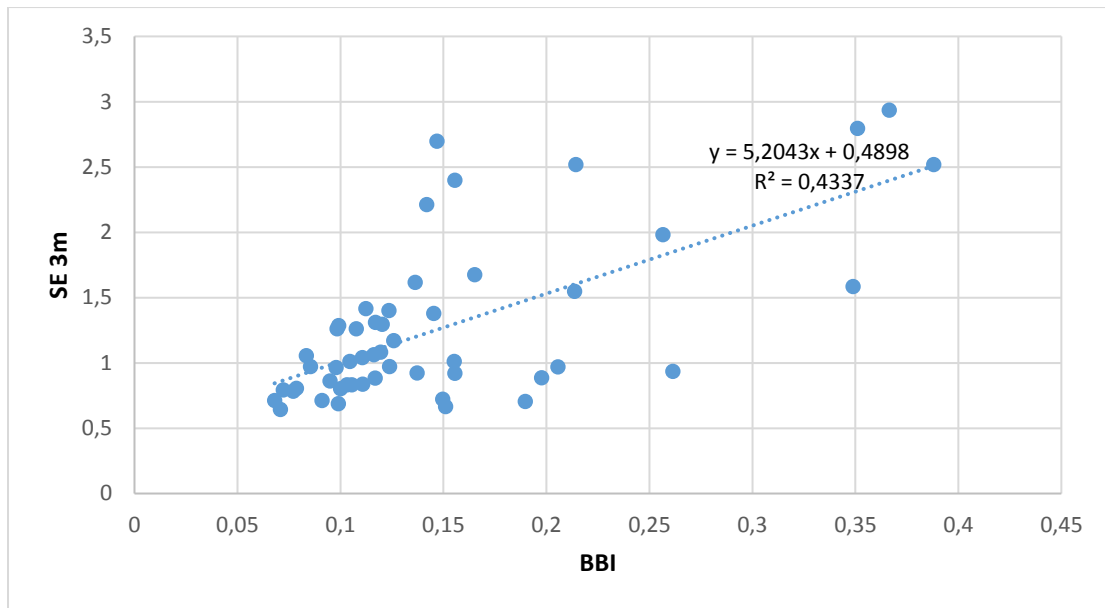
Εικόνα Π.2 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI κεντρικό ίχνος



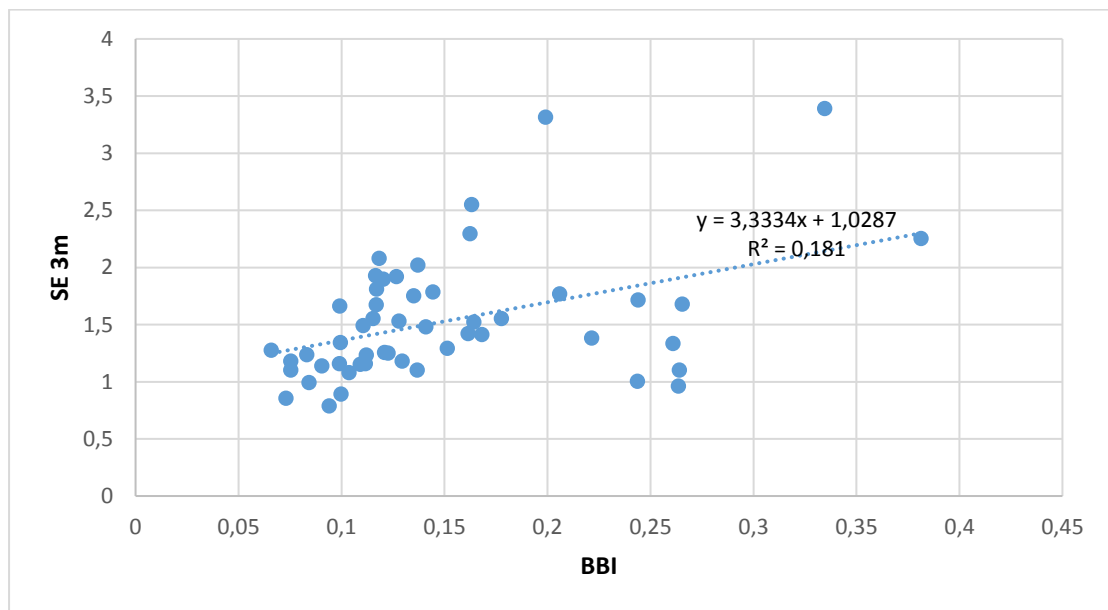
Εικόνα Π.3 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI δεξιό ίχνος



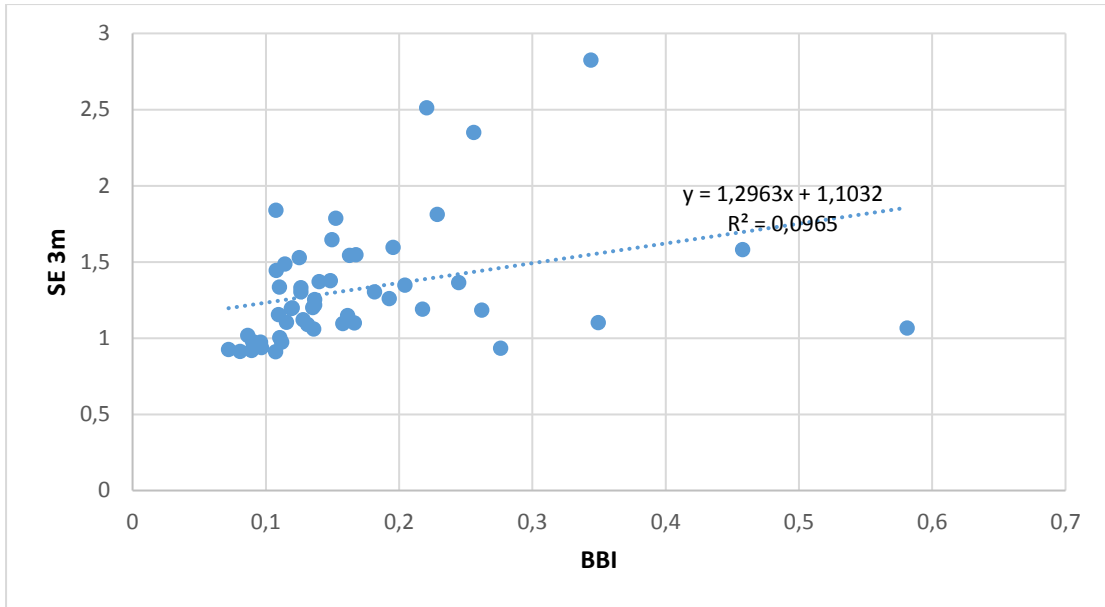
Εικόνα Π.4 Γραμμική συσχέτιση IRI BBI όλα τα ίχνη



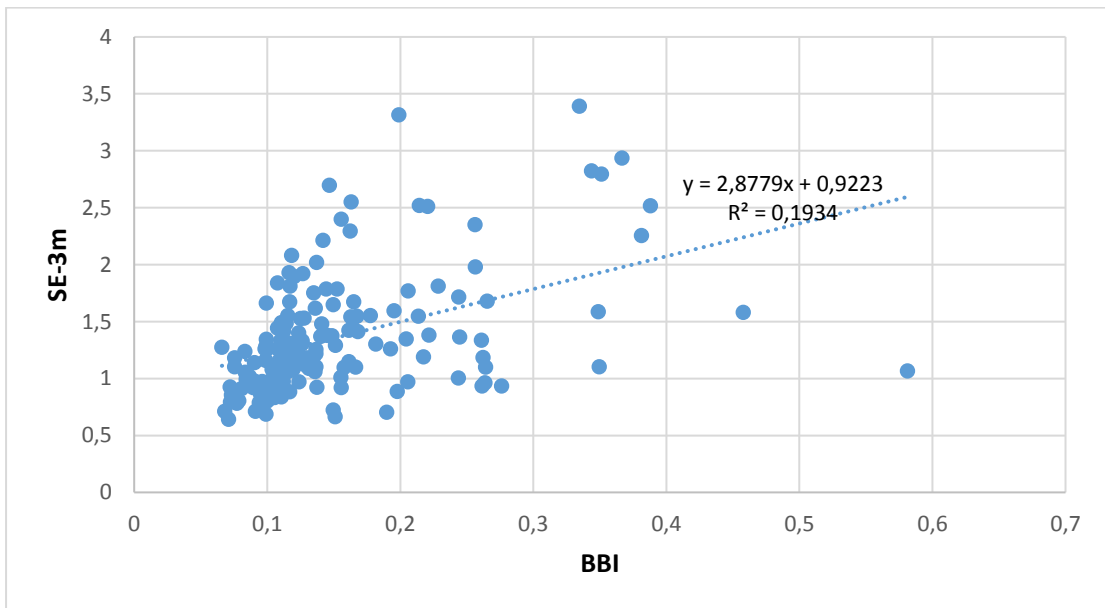
Εικόνα Π.5 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m αριστερό ίχνος



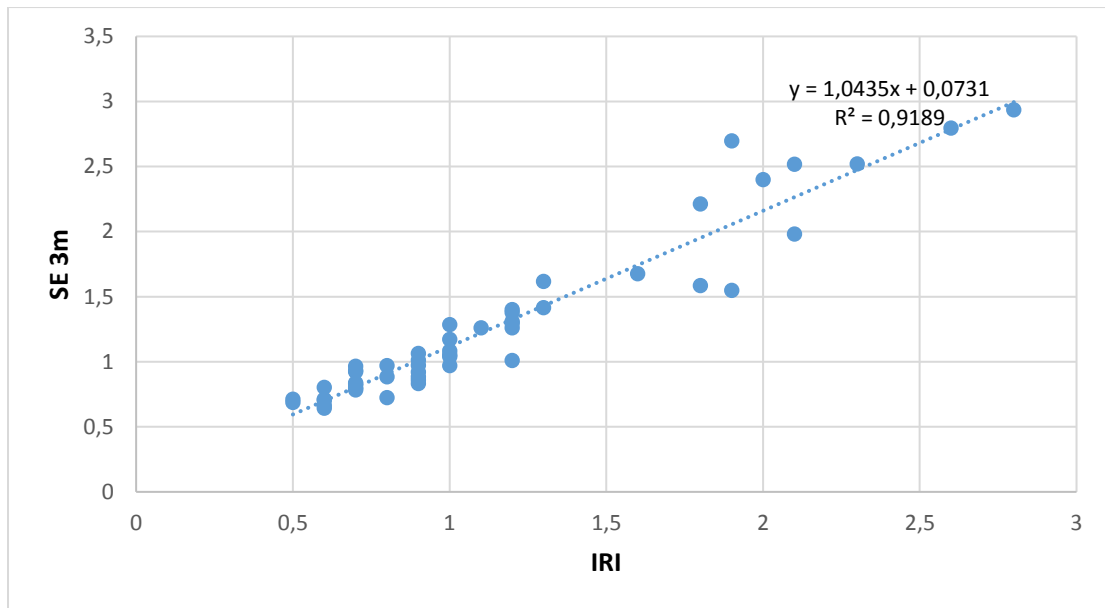
Εικόνα Π.6 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m κεντρικό ίχνος



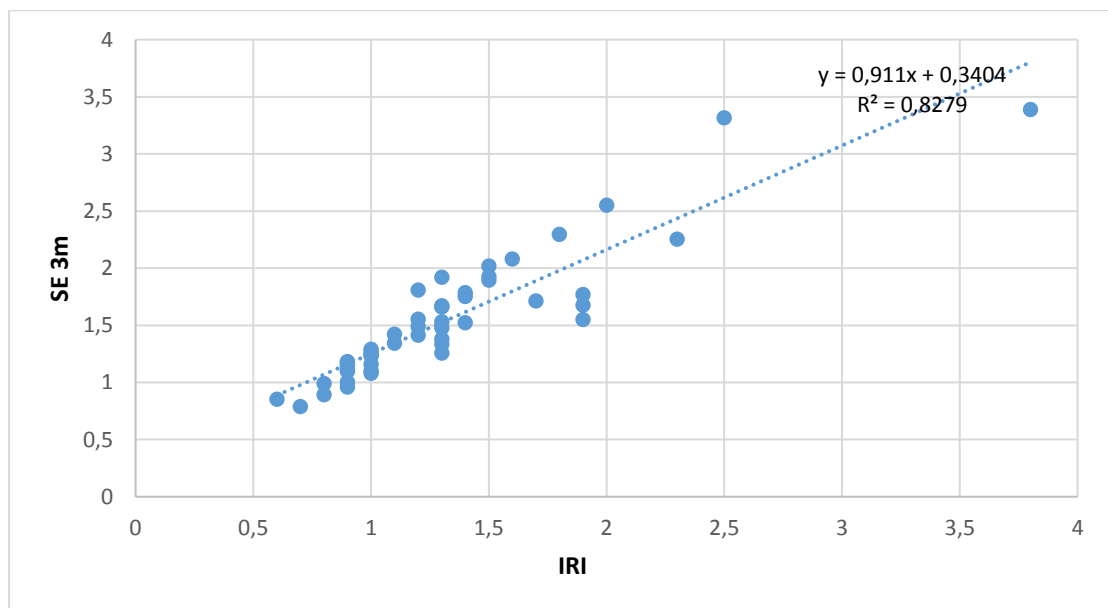
Εικόνα Π.7 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m δεξιό ίχνος



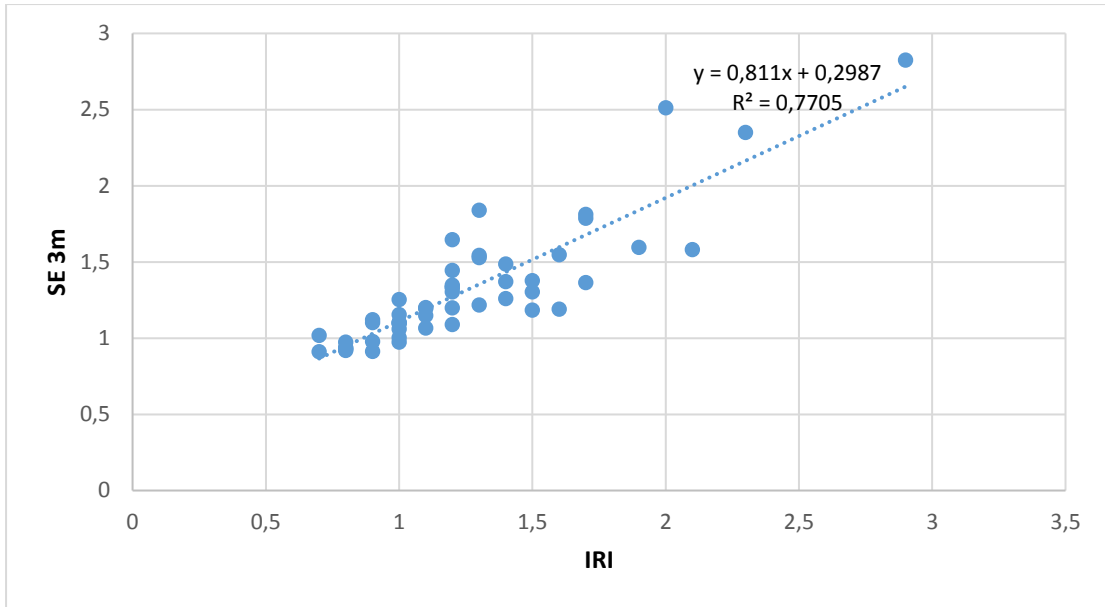
Εικόνα Π.8 Γραμμική συσχέτιση BBI SE-3m όλα τα ίχνη



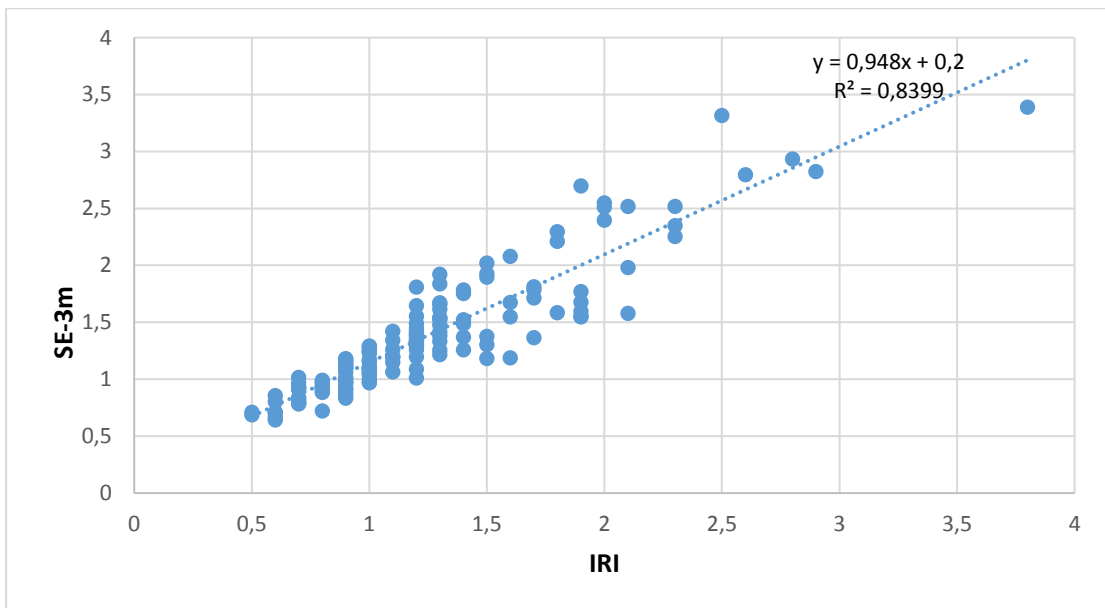
Εικόνα Π.9 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m αριστερό ίχνος



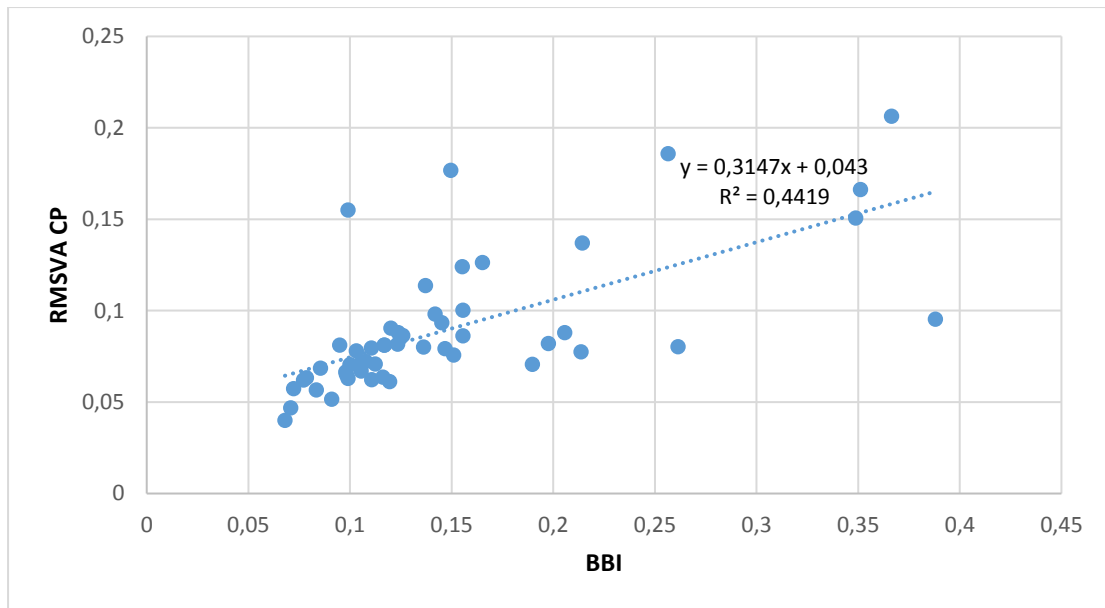
Εικόνα Π.10 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m κεντρικό ίχνος



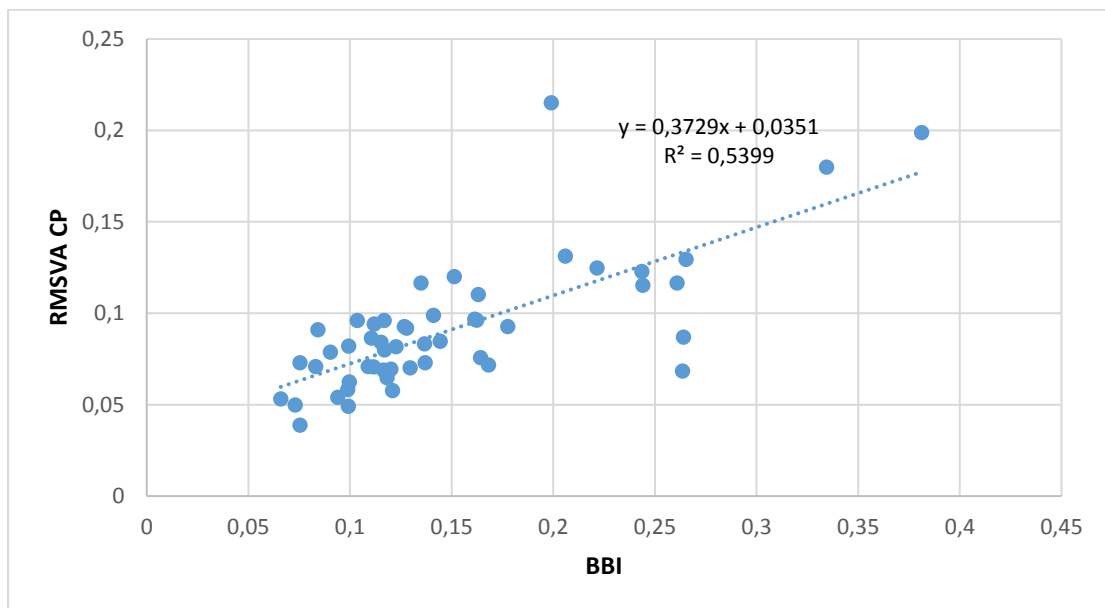
Εικόνα Π.11 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m δεξιό ίχνος



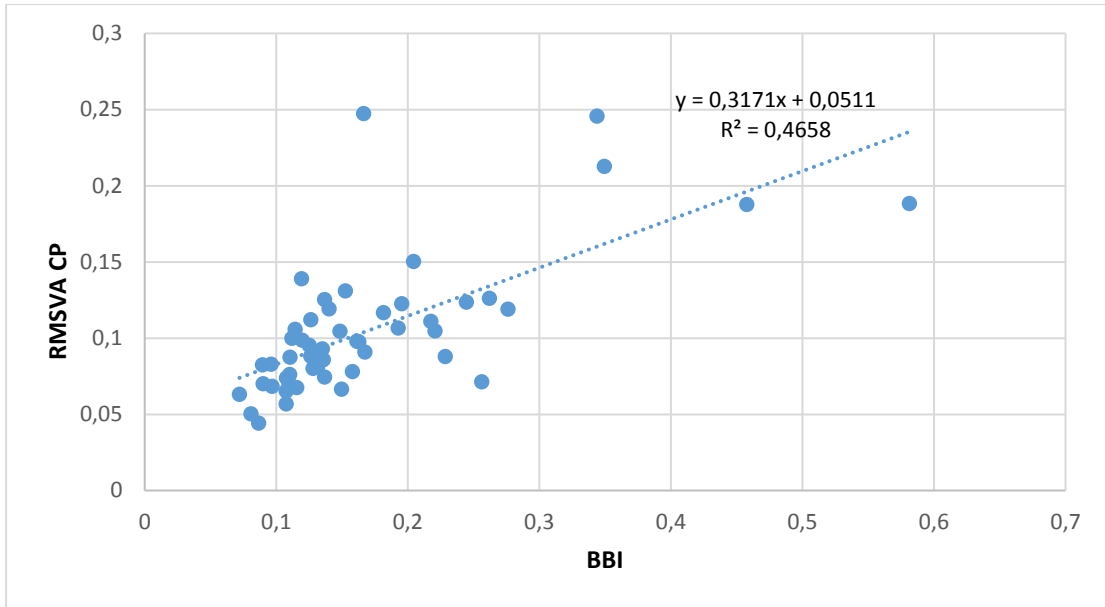
Εικόνα Π.12 Γραμμική συσχέτιση IRI SE-3m όλα τα ίχνη



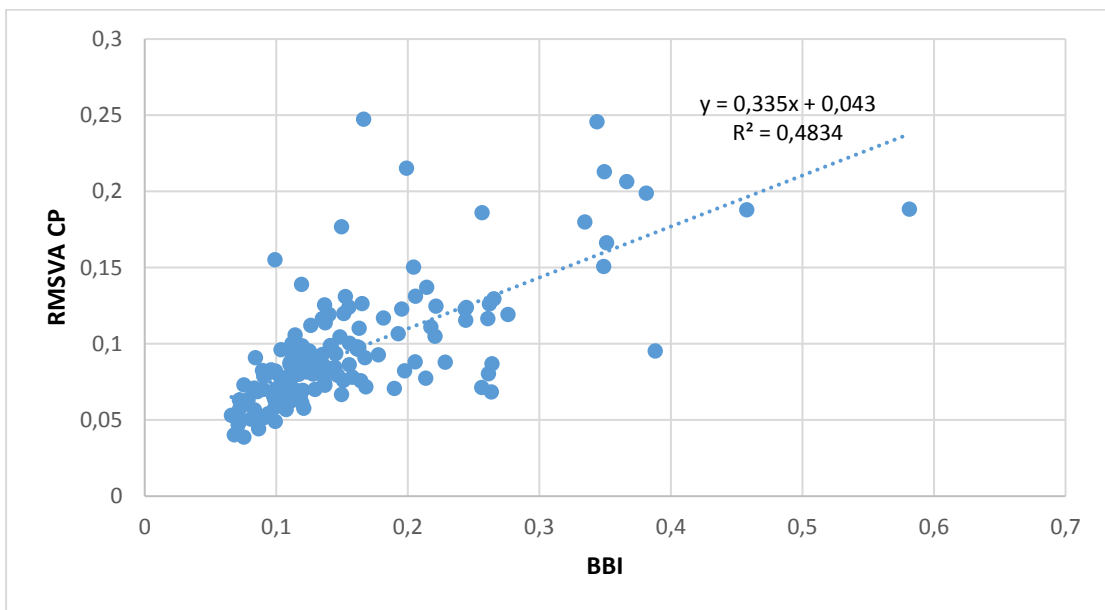
Εικόνα Π.13 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI αριστερό ίχνος



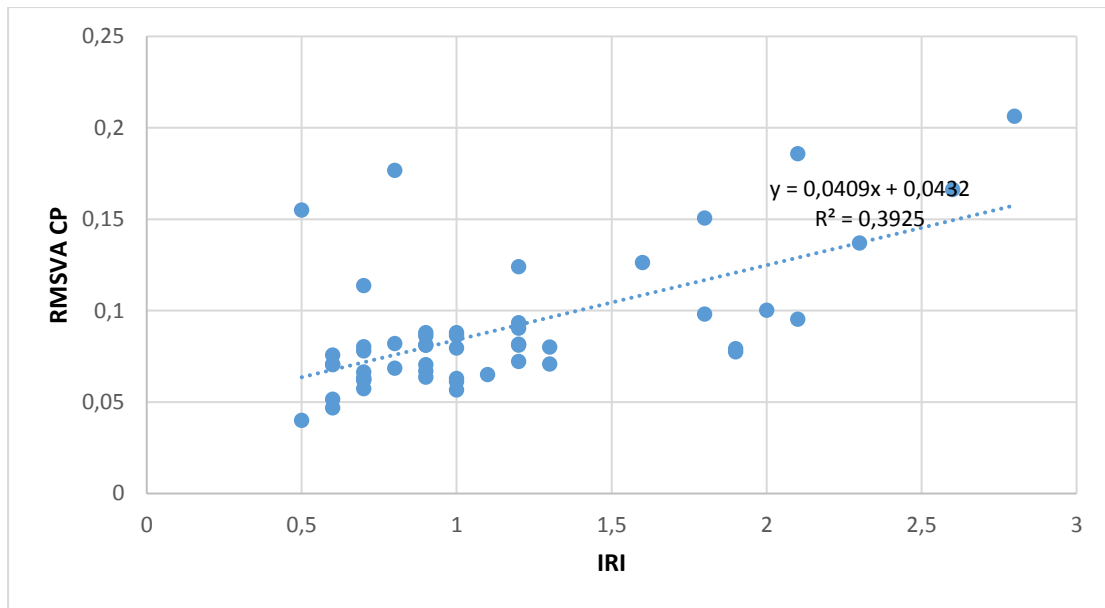
Εικόνα Π.14 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI κεντρικό ίχνος



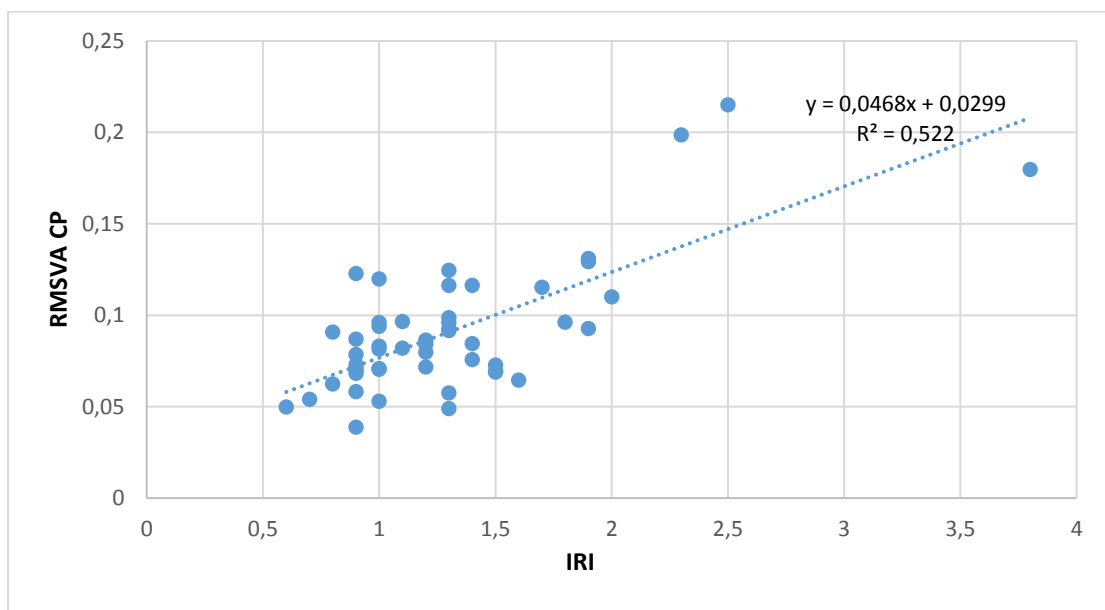
Εικόνα Π.15 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI δεξιό ίχνος



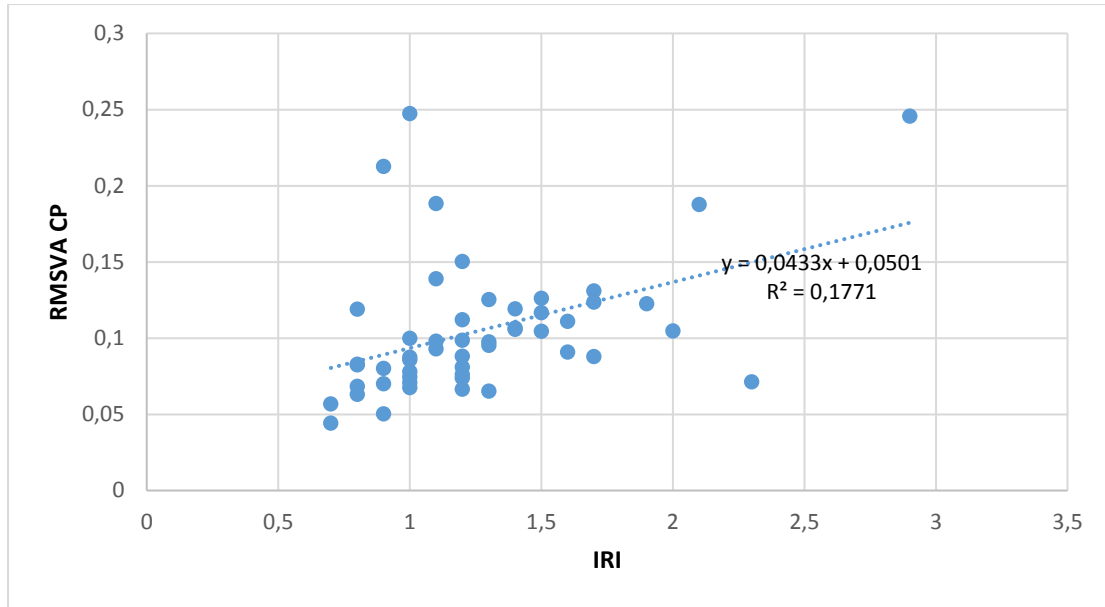
Εικόνα Π.16 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP BBI όλα τα ίχνη



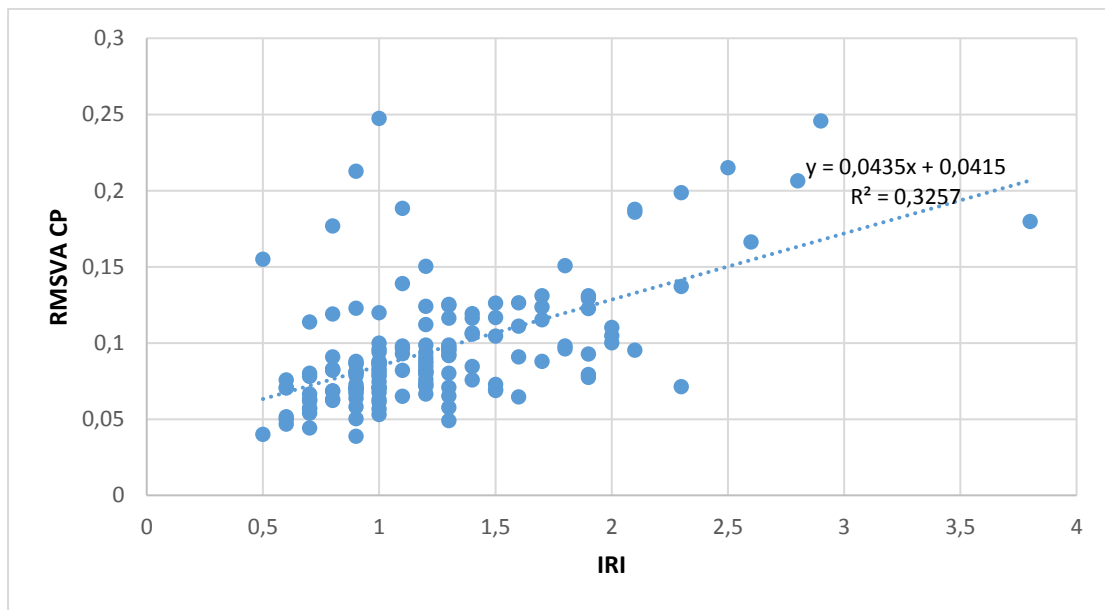
Εικόνα Π.17 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI αριστερό ίχνος



Εικόνα Π.18 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI κεντρικό ίχνος



Εικόνα Π.19 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI δεξιό ίχνος



Εικόνα Π.20 Γραμμική συσχέτιση RMSVA CP IRI όλα τα ίχνη