



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΙ  
ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



**ΤΣΟΥΡΑΠΑ ΜΑΡΙΑ-ΖΩΗ**

**Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια**

**Ιούλιος 2022**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ Κ. Χριστίνα Πλατή, η οποία με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο θέμα στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της.*

*Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γκυρτή Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε η έρευνα του όσον αφορά το θέμα της παρούσας διπλωματικής.*

*Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υπομονή τους και την συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών και ιδιαίτερα την μητέρα μου για την στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο ευρύτερο φάσμα της διερεύνησης διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων οι μηχανικοί και οι φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών επιθυμούν την βέλτιστη χρήση μηχανημάτων και εργαλείων ανάλυσης με στόχο την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων με τους λιγότερους διαθέσιμους πόρους. Συνήθως οι εργασίες συντήρησης προγραμματίζονται με βάση την επιφανειακή κατάσταση των οδοστρωμάτων. Ωστόσο και τα δομικά χαρακτηριστικά έχουν ιδιαίτερη σημασία, τα οποία προκύπτουν κατόπιν ελέγχου συνήθως από χρονοβόρες δοκιμές. Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος πραγματοποιείται με την χρήση καταστρεπτικών ή μη δοκιμών (NDT). Συνεπώς ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η διερεύνηση αλληλεπίδρασης των δεικτών επιφανειακής και δομικής κατάστασης. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής διερευνήθηκε αυτή η αλληλεπίδραση αξιοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν από τα πειραματικά οδοστρώματα με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους FWD και το προφιλόμετρο RSP. Αρχικά παρατίθενται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για την ομαλότητα και τα μηχανικά συστήματα καταγραφής της. Ύστερα παρουσιάζεται το παραμόρφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά καθώς και η διαδικασία υπολογισμού των δομικών δεικτών που προκύπτουν από την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος. Εν συνεχεία διερευνάται η αλληλεπίδραση δομικών και επιφανειακών δεικτών καθώς και η ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης των δομικών δεικτών. Τα αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στο τεύχος της εργασίας.

**Λέξεις -κλειδιά:** οδόστρωμα, ομαλότητα, δομική κατάσταση, δείκτες, IRI, FWD, συσχέτιση



## **Abstract**

The use of cost-effective methods and analysis tools to evaluate pavement maintenance and/or rehabilitation needs under limited budget and time restrictions is of primary importance nowadays. Quite often, maintenance is triggered by reduced pavement serviceability (e.g., roughness, texture loss, etc.). However, pavement structural issues are important too. Structural evaluation takes place with time consuming methods. For this purpose, the use of nondestructive methods dominates. As a result, various studies have been conducted in order to correlate pavement condition based on the surface performance indicators and structural deflection indexes. The main purpose of this thesis is to investigate the type of correlations between the individual condition indexes based on field data that was retrieved from the database of the Pavement Engineering Laboratory of NTUA. This data referred to structural information collected with a Falling Weight Deflectometer (FWD) and roughness data collected with a Road Surface Profiler (RSP). At first, a literature review is given about roughness issues, the FWD principles and the process needed to obtain deflection indicators. Thereafter, the main investigations of correlations between the indicators as well as the model developed for the prediction of structural indicators are followed. The analysis results and the conclusions are presented within this thesis.

**Key words:** pavement, roughness, structure, indices, IRI, FWD, deflections, correlations

# Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων .....	10
Ευρετήριο Πινάκων .....	12
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Αντικείμενο.....	13
1.2 Στόχος και μεθοδολογία της διπλωματικής .....	14
1.3 Δομή εργασίας.....	15
2. Ομαλότητα οδοστρώματος.....	17
2.1 Γενικά .....	17
2.2 Σημασία καταγραφής της ομαλότητας.....	20
2.3 Συστήματα καταγραφής ομαλότητας.....	21
2.3.1 Γενικά.....	21
2.3.2 Προφίλογράφοι.....	22
2.3.3 Υψηλής ταχύτητας Προφιλόμετρα.....	25
2.3.4 Συστήματα μηχανικής απόκρισης.....	27
2.3.5 Μικρού βάρους (ή ελαφριά) προφιλόμετρα.....	30
2.3.6 Χειροκίνητες μέθοδοι.....	31
2.4 Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας .....	33
3. Καταγραφή ελαστικών υποχωρήσεων .....	39
3.1 Γενικά στοιχεία παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD).....	39
3.2 Ανάλυση και επεξεργασία στοιχείων FWD .....	41
3.2.1 Στοιχεία καταγραφής .....	43
3.2.2 Θερμοκρασίας οδοστρώματος .....	44
3.3 Δείκτες δομικής κατάστασης.....	46
3.3.1 Γενικά.....	46
3.3.2 Μέγιστη ελαστική υποχώρηση $D_0$ .....	47
3.3.3 Ακτίνα καμπυλότητας (ROC).....	49
3.3.4 Δείκτης SCI .....	50
3.3.5 Δείκτης BDI.....	51
3.3.6 Δείκτης BCI.....	51

3.3.7	Δείκτης $D_9$ .....	52
3.3.8	Δείκτης περιοχής επιρροής της φόρτισης (Area).....	52
3.3.9	Δείκτης περιοχής κάτω από το προφίλ (AUPP) .....	52
3.4	Κριτήρια αξιολόγησης των οδοστρωμάτων .....	55
4.	Διερεύνηση συσχέτισης δεικτών και πειραματική διαδικασία .....	62
4.1	Διατύπωση προβλήματος .....	62
4.2	Πειραματικά οδοστρώματα .....	63
4.3	Στοιχεία ομαλότητας.....	65
4.4	Στοιχεία δομικής κατάστασης .....	67
5.	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	70
5.1	Γενικά .....	70
5.2	Περιγραφή κατά μήκος ομαλότητας .....	70
5.3	Διαχωρισμός τμημάτων .....	77
5.4	Εκτίμηση χαρακτηριστικών τιμών ομαλότητας.....	80
5.5	Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης.....	92
5.6	Συσχέτιση IRI και δεικτών δομικής κατάστασης .....	106
5.7	Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης δεικτών δομικής κατάστασης .....	114
5.8	Αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης.....	116
6.	Συμπεράσματα και Προτάσεις .....	120
7.	Βιβλιογραφία .....	123



# Ευρετήριο Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 2.1 ΚΑΤΑΤΟΜΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ΜΥΒΑΡΑΚΙ, 2016).....	17
ΕΙΚΟΝΑ 2.2 ΓΩΝΙΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΡΟΧΟΥ (ΛΟΪΖΟΣ & ΠΛΑΤΗ, 2020) .....	21
ΕΙΚΟΝΑ 2.3 ΠΡΟΦΙΛΟΓΡΑΦΟΣ (SYSTEMS, 2022) .....	23
ΕΙΚΟΝΑ 2.4 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ CALIFORNIA (SYSTEMS, 2022) .....	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.5 CALIFORNIA ΚΑΙ RAINHART ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ (MTAG, 2007).....	24
ΕΙΚΟΝΑ 2.6 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΑ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΝΕΠΑΦΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ (MTAG, 2007).....	25
ΕΙΚΟΝΑ 2.7 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΩΝ (MTAG, 2007).....	26
ΕΙΚΟΝΑ 2.8 BUREAU OF PUBLIC ROADS (BPR) ROUGHOMETER (PERERA & ΚΟΗΝ, 2002) .....	27
ΕΙΚΟΝΑ 2.9 MAYS METER (NCHRP, 1980).....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.10 PCA ROAD METER (BROKAW, 1967) .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2.11 ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΑ (FHWA, 1989).....	30
ΕΙΚΟΝΑ 2.12 ΕΛΑΦΡΥ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ(LIZA) (PERERA & ΚΟΗΝ, 2002) .	31
ΕΙΚΟΝΑ 2.13 K.J.LAW T6450 ΕΛΑΦΡΙΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ (PERERA & ΚΟΗΝ, 2002) .....	31
ΕΙΚΟΝΑ 2.14 DIPSTICKS (PAVEMENT INTERACTIVE).....	32
ΕΙΚΟΝΑ 2.15 WALKING PROFILERS (ARRBSYSTEMS, 2020).....	33
ΕΙΚΟΝΑ 2.16 ΚΛΙΜΑΚΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΞΥΠΗΡΕΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (HIGHWAY RESEARCH BOARD, 1972) .....	34
ΕΙΚΟΝΑ 2.17 «QUARTER-CAR» (SAYERS & Μ.ΚΑΡΑΜΙΗΑΣ, 1998) .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 2.18 ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΤΡΗΣΗ IRI (SAYERS & Μ.ΚΑΡΑΜΙΗΑΣ, 1998) .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 3.1 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ FWD (ΛΟΪΖΟΣ & ΠΛΑΤΗ, 2020) .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 3.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ (AUSTROROADS, 2008) .....	40
ΕΙΚΟΝΑ 3.3 ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ FWD (AUTHORITY, 2000).....	42
ΕΙΚΟΝΑ 3.4 ΓΕΩΦΩΝΟ (L.HEDERSON, 2006) .....	43
ΕΙΚΟΝΑ 3.5 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΦΩΝΩΝ (L.HEDERSON, 2006) .....	43
ΕΙΚΟΝΑ 3.6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Α)ΑΕΡΑ Β)ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Γ)ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ (ΛΟΪΖΟΣ & ΠΛΑΤΗ, 2020) .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.7 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (WIKIPEDIA).....	45
ΕΙΚΟΝΑ 3.8 FWD ΔΟΚΙΜΗ (CHATTI, ET AL., 2017) .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 3.9 ΖΩΝΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΠΡΟΦΙΛ ΤΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ(DEFLECTION BOWL) (HORAK, HEFER, EMERY, & ΜΑΙΝΑ, 2015) .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 3.10 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΕΙΚΤΗ SCI (AUTHORITY, 2000) .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 3.11 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9 (AUTHORITY, 2000).....	52
ΕΙΚΟΝΑ 3.12 ΖΩΝΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ .....	60
ΕΙΚΟΝΑ 3.13 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΘΥΜΗΤΟΥ $E_0$ .....	61
ΕΙΚΟΝΑ 4.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α .....	64
ΕΙΚΟΝΑ 4.2 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1 .....	65
ΕΙΚΟΝΑ 4.3 ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2 .....	65
ΕΙΚΟΝΑ 4.4 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ RSP ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΔΟΠΟΙΑΣ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.....	66
ΕΙΚΟΝΑ 4.5 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 5.1 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ -ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	72
ΕΙΚΟΝΑ 5.2 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α- 2012 ΚΑΙ 2021 .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 5.3 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ- Β1 .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 5.4 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1- 2012 ΚΑΙ 2021 .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 5.5 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2.....	74

ΕΙΚΟΝΑ 5.6 ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2- 2012 ΚΑΙ 2021 .....	74
ΕΙΚΟΝΑ 5.7 ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΙΜΩΝ IRI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 5.8 ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΙΜΩΝ IRI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1.....	76
ΕΙΚΟΝΑ 5.9 ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΙΜΩΝ IRI- ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2 .....	76
ΕΙΚΟΝΑ 5.10 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α-2012.....	77
ΕΙΚΟΝΑ 5.11 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α-2021.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 5.12 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1-2012.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 5.13 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1-2021.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 5.14 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2-2012.....	79
ΕΙΚΟΝΑ 5.15 ΥΠΟΤΜΗΜΑΤΑ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2-2021.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 5.16 ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΤΙΜΩΝ IRI Μ/ΚΜ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 17 <sup>ΟΥ</sup> ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	85
ΕΙΚΟΝΑ 5.17 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α-2012 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER .....	89
ΕΙΚΟΝΑ 5.18 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α-2021 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER .....	89
ΕΙΚΟΝΑ 5.19 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1-2012 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.20 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1-2021 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER.....	90
ΕΙΚΟΝΑ 5.21 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2-2012 ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 5.22 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΦΙΛ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2-2021 ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ IRI MEDIAN-UPPER.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 5.23 ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	96
ΕΙΚΟΝΑ 5.24 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ SCI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.25 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ BDI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	97
ΕΙΚΟΝΑ 5.26 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ BCI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.27 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	98
ΕΙΚΟΝΑ 5.28 ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.29 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ SCI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1.....	99
ΕΙΚΟΝΑ 5.30 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ BDI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.31 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ BCI-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	100
ΕΙΚΟΝΑ 5.32 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	101
ΕΙΚΟΝΑ 5.33 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ D0(T)-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.34 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ SCI-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	102
ΕΙΚΟΝΑ 5.35 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	103
ΕΙΚΟΝΑ 5.36 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ D0(T)-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1.....	103
ΕΙΚΟΝΑ 5.37 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ SCI- IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1.....	104
ΕΙΚΟΝΑ 5.38 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9- IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	104
ΕΙΚΟΝΑ 5.39 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ D0(T)-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2.....	105
ΕΙΚΟΝΑ 5.40 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ SCI-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2 .....	105
ΕΙΚΟΝΑ 5.41 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ D9-IRI MEDIAN-UPPER-ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2.....	106
ΕΙΚΟΝΑ 5.42 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ D0(T)-IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2021 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α.....	111
ΕΙΚΟΝΑ 5.43 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΕΙΚΤΗ D9 -IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2021 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α.....	111
ΕΙΚΟΝΑ 5.44 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ D0-IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2018 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1.....	112
ΕΙΚΟΝΑ 5.45 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ D9 -IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2018 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1 .....	112
ΕΙΚΟΝΑ 5.46 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ D0-IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2016 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 5.47 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ D9-IRI UPPER ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2016 ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 5.48 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	116
ΕΙΚΟΝΑ 5.49 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	117
ΕΙΚΟΝΑ 5.50 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2 .....	118

## Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΑΣΕΙ IRI (AUTHORITY, 2000) .....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΑΝΑΓΩΓΗ D0 ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΑΝΑΓΩΓΗ SCI ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΙΚΤΩΝ .....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ (HORAK, 2007).....	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ D0 ΚΑΙ SCI (AUTHORITY, 2000) .	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΗ D9 (AUTHORITY, 2000).....	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ D0 (HAKIM & BROWN, 2006).....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ (HAKIM & BROWN, 2006) .....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9 ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ AREA ΚΑΙ D <sub>0</sub> (PIERCE, ET AL., 2017).....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΟΜΑΛΟΤΗΤΑΣ .....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ CV% ΓΙΑ ΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ CV% ΓΙΑ ΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1.....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ CV% ΓΙΑ ΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2.....	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΔΕΙΚΤΗ IRI Μ/ΚΜ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β2.....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 IRI MEDIAN (Μ/ΚΜ) ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 IRI UPPER(Μ/ΚΜ) ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Α .....	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 IRI MEDIAN(Μ/ΚΜ) ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1.....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8 IRI UPPER (Μ/ΚΜ) ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Β1 .....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9 ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΝΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10 ΑΝΑΓΩΓΗ SCI ΣΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11 ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI MEDIAN-ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI UPPER -ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α .....	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI MEDIAN-ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1.....	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI UPPER-ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β1 .....	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI MEDIAN-ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2.....	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ IRI UPPER-ΔΕΙΚΤΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Β2 .....	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ .....	115
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ R <sup>2</sup> ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ Α.....	115
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ RMSPE.....	118

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Προϋπόθεση μίας ορθολογικής διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων είναι η αξιολόγηση της κατάστασής τους, τόσο δομικά όσο και λειτουργικά. Ο χρόνος επέμβασης και το κόστος των συναφών εργασιών είναι παράγοντες που μπορούν να βελτιστοποιηθούν όταν η αξιολόγηση οδοστρωμάτων πραγματοποιηθεί με κατάλληλα συστήματα και εργαλεία ανάλυσης. Πληθώρα ερευνών έχουν προσπαθήσει να αναπτύξουν ικανοποιητικά μοντέλα συσχέτισης μεταξύ των στοιχείων συλλογής από επιμέρους συστήματα που αφορούν στην δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων και στους δείκτες που περιγράφουν την επιφανειακή τους κατάσταση. Οι προσεγγίσεις αυτές δεν έχουν πάντα επαρκή αποτελεσματικότητα και ακρίβεια.

Η κατάσταση ενός οδοστρώματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι τα φορτία κυκλοφορίας, τα υλικά κατασκευής, οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν και η ποιότητα της κατασκευής. Οι παράγοντες αυτοί εισάγουν καταπόνηση στο οδόστρωμα με διάφορους τρόπους, πράγμα που ενίοτε επηρεάζει και την επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος, μέσω εμφάνισης φθορών (πχ ρωγμές, ζητήματα υφής, κ.α.) ή άλλων τοπικών ανωμαλιών που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της επιφάνειας κύλισης ή και να οδηγήσουν σε περαιτέρω επιδείνωση της δομικής επάρκειας (Fakhi & Reza Shahni Dezfoulia, 2019).

Η δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος παρέχει πληροφορίες στον μηχανικό για τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος και την εναπομένουσα διάρκεια ζωής του, δηλαδή το πλήθος των φορτίων που μπορεί να δεχθεί ένα υφιστάμενο οδόστρωμα προτού αποφασιστούν ενέργειες συντήρησης ή αποκατάστασης. Για τη δομική αξιολόγηση οδοστρωμάτων, είναι δημοφιλής η χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing, NDT), με πλέον αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το παραμόρφωσιμέτρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD). Το

FWD είναι το πιο διαδεδομένο σύστημα δοκιμών παγκοσμίως σε σχέση με άλλες μη καταστρεπτικές δοκιμές, διότι παρέχει πληροφορία για τη συνολική δομή του οδοστρώματος και τις επιμέρους στρώσεις καταγράφοντας σε συγκεκριμένες θέσεις τις ελαστικές υποχωρήσεις σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο επιβολής της φόρτισης του οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή, 2020).

Ωστόσο, η επιφανειακή κατάσταση του οδοστρώματος, η οποία εκφράζεται από το επίπεδο ομαλότητας, τροχοαυλάκωσης, υψής και αντιστοιχιστικής ικανότητας, είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει το πώς αντιλαμβάνονται οι χρήστες το οδόστρωμα και είναι αυτός που συχνά κινητοποιεί τους φορείς διαχείρισης οδοστρωμάτων για ενέργειες συντήρησης. Μεταξύ των δεικτών της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος, η ομαλότητα είναι ο πλέον δημοφιλής που εντάσσεται σχεδόν σε κάθε σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων. Έτσι, η ποσοτικοποίηση της ομαλότητας έχει διαχρονικά αποδειχθεί ως μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί οδοστρωμάτων. Η καταγραφή της είναι συνήθως συνεχής μέσω υψηλής ταχύτητας προφίλομέτρων (laser profilers). Παράλληλα, η ομαλότητα που συνδέεται ουσιαστικά με την επιφάνεια κύλισης (ride quality) ενίοτε αλληλοεπιδρά με τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος, δεδομένου ότι είναι πιθανό τυχόν τοπικές ανωμαλίες στην επιφάνεια μιας οδού να οφείλονται σε μειωμένη δομική συμπεριφορά μίας ή περισσότερων στρώσεων.

Συνεπώς, καταγράφεται διαχρονικά στην διεθνή βιβλιογραφία, στο πλαίσιο διαχείρισης μεγάλων οδικών δικτύων, έντονο ενδιαφέρον συσχέτισης των δεικτών της δομικής και επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος με στόχο την αξιολόγηση οδοστρωμάτων.

## **1.2 Στόχος και μεθοδολογία της διπλωματικής**

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση αλληλεπίδρασης μεταξύ της δομικής και της επιφανειακής κατάστασης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Για την επίτευξη του στόχου της συγκεκριμένης διπλωματικής ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Αρχικά, διερευνάται ο συσχετισμός της δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων με την ομαλότητα τους σε οδούς όπου εμφανίζονται έντονοι κυματισμοί και τοπικές ανωμαλίες.
- Εν συνεχεία, διερευνάται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλου πρόβλεψης ενός ή περισσότερων δεικτών δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων χρησιμοποιώντας ως δεδομένο εισόδου καταγραφές ομαλότητας, αποσκοπώντας στην επιτάχυνση των διαδικασιών αξιολόγησης των οδοστρωμάτων.

Για την υλοποίηση των ανωτέρω, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα αναφορικά με την ομαλότητα και τους δείκτες δοκιμής κατάστασης οδοστρωμάτων. Σε δεύτερη φάση αναλύονται τα στοιχεία συλλογής με μη καταστρεπτικά συστήματα που αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, τα οποία αφορούσαν σε τμήματα εύκαμπτων οδοστρωμάτων από δύο αυτοκινητοδρόμους, στο πλαίσιο περιοδικής παρακολούθησης της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς τους.

### 1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, από επτά κεφάλαια που παρουσιάζονται παρακάτω:

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο, αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ομαλότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, τα συστήματα καταγραφής της και οι δείκτες που την περιγράφουν σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο, περιγράφεται το δημοφιλές σύστημα αξιολόγησης της δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων, δηλαδή το FWD, οι δείκτες υποχωρήσεων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και η ποιοτική κατάταξη της φέρουσας ικανότητας με βάση τις μετρήσεις FWD σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο γίνεται η διατύπωση του προβλήματος που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική καθώς και περιγράφεται η πειραματική διερεύνηση και τα στάδια της.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των στοιχείων συλλογής από τα πειραματικά οδοστρώματα.

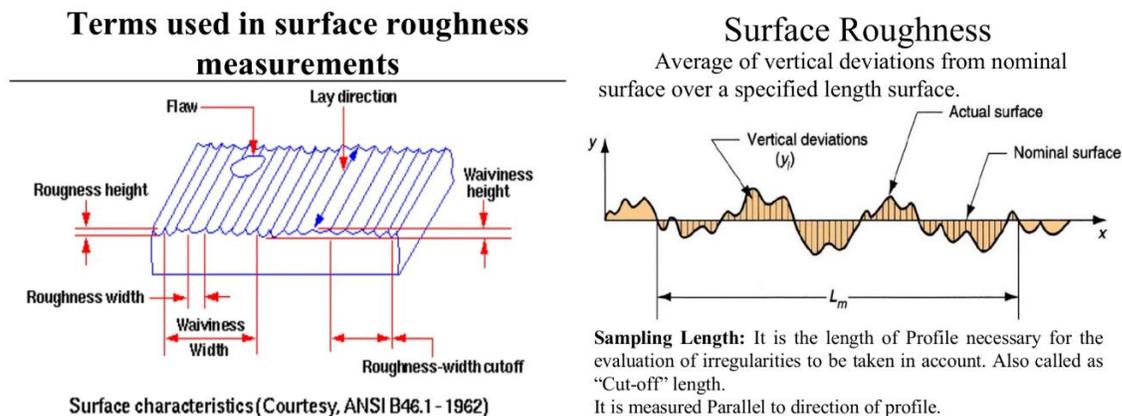
Στο **έκτο** κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διερεύνηση και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Και στο **τέλος** παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

## 2. Ομαλότητα οδοστρώματος

### 2.1 Γενικά

Η ομαλότητα ενός οδοστρώματος είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης. Ως ομαλότητα ορίζονται οι αποκλίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος από την θεωρητικά επίπεδη επιφάνεια. Λόγω της σύνδεσής της με την επιφάνεια κύλισης, τυχόν ζητήματα ομαλότητας γίνονται εύκολα αντιληπτά από τους χρήστες της οδού και συνδέονται άμεσα με την λειτουργικότητα μίας οδού (Εικ.2.1) (Mubaraki, 2016).



Εικόνα 2.1 Κατατομή επιφάνειας (Mubaraki, 2016)

Η πρώτη προσπάθεια έκφρασης της ομαλότητας έγινε από τον Gillispie (Gillespie, 1992). Η επίτευξη μιας απολύτως ομαλής επιφάνειας αν και είναι επιθυμητή, δεν είναι ούτε εφικτή ούτε οικονομική. Για παράδειγμα, σε οδούς με μικρό κυκλοφοριακό φόρτο δεν είναι αναγκαία η ύπαρξη μίας απολύτως ομαλής ή ευθειογενούς επιφάνειας, αλλά θα ήταν αποδεκτή μια

προσεγγιστικά ομαλή επιφάνεια, δηλαδή μία επιφάνεια στην οποία τυχόν τοπικές ανωμαλίες ή ανυψώσεις του διαμήκους προφίλ κυμαίνονται μέσα σε αποδεκτά όρια.

Κατά συνέπεια, η μέτρηση της ομαλότητας χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει αν η ύπαρξη ατελειών υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια με αποτέλεσμα να προκαλεί προβλήματα στην κίνηση των οχημάτων.

Ενίοτε χρησιμοποιείται ως συντελεστής συσχέτισης με την κατάσταση του οδοστρώματος συνολικά ή των επιμέρους στρώσεων υποδηλώνοντας έτσι τυχόν ζητήματα δομικής φύσης μιας ή και περισσότερων υποκείμενων στρώσεων.

Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την αξιολόγηση της επιφάνειας κύλισης των οδοστρωμάτων είναι η παρουσία διαμηκών κυματισμών δηλαδή «ατελειών/ανωμαλιών» με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης που μπορούν να προκαλέσουν κραδασμούς στα οχήματα τα οποία κινούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Όμοια προβλήματα προκαλούν και οι εγκάρσιοι κυματισμοί.

Η ομαλότητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με το «προφίλ» της επιφάνειας της οδοστρώματος (ή αλλιώς την κατατομή της επιφάνειας. Πρόκειται ουσιαστικά για μια τομή κατά μήκος μιας νοητής γραμμής, η οποία περιγράφεται από κυματισμούς μήκους 0.5-50m (PIARC, 2002). Για την αξιολόγηση του οδοστρώματος σε σχέση με την ομαλότητα γίνεται δηλαδή χρήση της διαμήκους διεύθυνσης.

Αίτια πρόκλησης προβλημάτων στην ομαλότητά μιας οδού είναι η ύπαρξη μεγάλων αποκλίσεων μεταξύ μιας θεωρητικά επίπεδης επιφάνειας και της πραγματικής επιφάνειας ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Η ύπαρξη ζητημάτων ομαλότητας είναι η συσσώρευση τέτοιων αποκλίσεων και επηρεάζουν (AAHSTO, 1962):

- Τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων
- Την αύξηση της δυναμικής φόρτισης του οδοστρώματος
- Την ποιότητα της κύλισης
- Την κατανάλωση καυσίμων (Laura E., et al., 2019).
- Τη φθορά των ελαστικών

- Το κόστος συντήρησης του οδοστρώματος. Έχει για παράδειγμα αναφερθεί ότι η διατήρησης μιας ομαλής επιφάνειας κύλισης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους συντήρησης σε ένα διάστημα 10 χρόνων (M.S.Janoff, 1990).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ύπαρξη ενός απόλυτα επίπεδου οδοστρώματος είναι ανέφικτη. Ατέλειες στην επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να σχηματιστούν τόσο στο στάδιο κατασκευής όσο και της λειτουργίας της οδού. Ειδικότερα κατά την κατασκευή νέων οδοστρωμάτων λάθη στο στάδιο της ασφαλτόστρωσης, αλλά και η ανισοτροπία των υλικών μπορεί να οδηγήσουν σε διαταράξεις της ομαλότητας. Ακόμη μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές επηρεάζουν καθοριστικά την συμπεριφορά του οδοστρώματος προκαλώντας παραμορφώσεις εξαιτίας των συστολών-διαστολών και διαταράσσοντας συνεπώς την ομαλότητα.

Επιπλέον η ομαλότητα της επιφανειακής στρώσης επηρεάζεται άμεσα από τις ατέλειες στην υφή που παρουσιάζονται στην βάση/υπόβαση. Σύμφωνα με σχετική έρευνα (Liu, 2016) αποδείχθηκε ότι υπάρχει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ της ομαλότητας της βάσης/υπόβασης και της επιφάνειας του οδοστρώματος, διαπιστώνεται πως όταν ο λόγος ατελειών υπόβασης προς ατέλειες επιφανειακής στρώσης είναι αρκετά μικρός, οι ατέλειες της βάσης/υπόβασης δεν μεταφέρονται στην επιφάνεια. Αυτές οι ατέλειες οφείλονται στην ανομοιομορφη συμπύκνωση των στρώσεων και της βάσης/υπόβασης (Perera & Kohn, 2002).

Περαιτέρω υποβάθμιση της ομαλότητας προκαλούν τα φορτία κυκλοφορίας που καταπονούν το οδόστρωμα. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση από τα φορτία κυκλοφορίας φθείρει το οδόστρωμα δημιουργώντας ρηγματώσεις κι άλλες επιφανειακές φθορές (πχ αυλακώσεις) που επηρεάζουν τελικά και την ομαλότητα.

Τέλος, ο σχηματισμός κυματισμών μήκους που ξεπερνά τα 10m υποδηλώνει αστοχία στις υποκείμενες στρώσεις, ενώ κυματισμοί μήκους μέχρι και 3 m υποδηλώνουν ατέλειες στις επιφανειακές στρώσεις (Λοΐζος & Πλατή, 2020).

Λαμβάνοντας υπόψη όσα παρατέθηκαν παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η ομαλότητα αποτελεί βασικό παράγοντά για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας των οδών και συνεπώς η καταγραφή της κρίνεται αναγκαία. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι στην ελληνική ορολογία οι

ατέλειες του οδοστρώματος περιγράφονται με τον όρο «ομαλότητα», ενώ στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία με τις ορολογίες «roughness/unevenness». Η ακριβής απόδοση αυτών είναι η τραχύτητα/ανωμαλία, έννοιες που σπανίως χρησιμοποιούνται στη ελληνική βιβλιογραφία λόγω της επικράτησης του όρου «ομαλότητα».

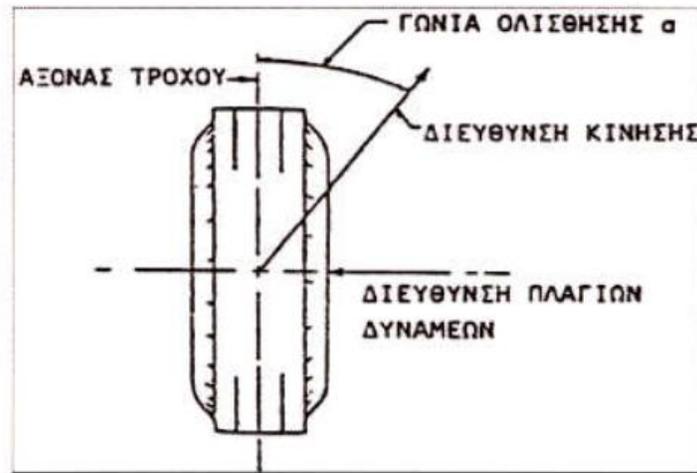
## **2.2 Σημασία καταγραφής της ομαλότητας**

Η ύπαρξη ζητημάτων ομαλότητας σε μια οδό είναι κρίσιμης σημασίας για τους χρήστες, όχι μόνον σε θέματα άνεσης αλλά και ασφάλειας. Η υποβάθμιση της ομαλότητας μειώνει την ικανότητα ελέγχου του οχήματος γεγονός που είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την αύξηση του εύρους των κατακόρυφων μεταβολών των αντίστοιχων δυνάμεων.

Αναφορικά με το όχημα, η επιρροή της ομαλότητας γίνεται πρακτικά αντιληπτή με την αναπήδηση των ελαστικών στο οδόστρωμα. Ένας από τους καθοριστικότερους παράγοντες που επιδρά στην συμπεριφορά των τροχών κατά την κύλιση τους στο οδόστρωμα είναι η συχνότητα που εμφανίζονται οι ατέλειες στην επιφάνεια κύλισης. Πολύ πυκνές ατέλειες μπορεί να παραπλανήσουν τον οδηγό για την πραγματική κατάσταση της οδού δίνοντας έτσι την εντύπωση ότι κινείται σε ομαλό οδόστρωμα. Αυτό συμβαίνει διότι η συχνότητα των «ανωμαλιών» εμφανίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε ισορροπία με το όχημα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα ύστερα από επαναλαμβανόμενες αυξανόμενες φορτίσεις, τα ελαστικά του οχήματος να χάσουν στιγμιαία την επαφή τους με την επιφάνεια κίνησης και το όχημα να κινείται πρακτικά στον αέρα. Συνεπώς η παρουσίαση τέτοιων φαινομένων μεγιστοποιούν τους κινδύνους σε καταστάσεις πέδησης ή κίνησης σε καμπύλες (Burns & J.C, 1981).

Σύμφωνα με συναφή έρευνα (Burns & J.C, 1981), το φαινόμενο αερομεταφοράς των τροχών συναντάται συχνότερα στα φορτηγά χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται ότι τα επιβατικά οχήματα δεν πλήττονται από αυτό. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η έλλειψη καλής ποιότητας ομαλότητας επιδρά άμεσα στην ταχύτητα των οχημάτων και στο λειτουργικό τους κόστος που αφορά στην κατανάλωση καυσίμων και στη φθορά των ελαστικών. Κατά την κίνηση του οχήματος ο συνδυασμός των ελιγμών και των εναλλαγών της ταχύτητας ευνοούν την ανάπτυξη

πλευρικών δυνάμεων ανάμεσα στο οδόστρωμα και στο ελαστικό. Οι πλευρικές αυτές δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα η κίνηση του οχήματος να παρουσιάζει γωνία σε σχέση με τον άξονα του τροχού, που ονομάζεται γωνία ολίσθησης (Εικ.2.2). Σε μία τέτοια περίπτωση αυξάνεται η δυναμική καταπόνηση του οδοστρώματος λόγω των τρισδιάστατων εντατικών συνθηκών που επικρατούν στην επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος και η συνεπαγόμενη φθορά του.



Εικόνα 2.2 Γωνία Ολίσθησης Τροχού (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

Συνοψίζοντας είναι προφανές ότι η καταγραφή της ομαλότητας της επιφάνειας ενός οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητη εφόσον επηρεάζει τόσο την άνεση των χρηστών της οδού όσο και την εξέλιξη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

## 2.3 Συστήματα καταγραφής ομαλότητας

### 2.3.1 Γενικά

Πληθώρα εξοπλισμών έχουν κατασκευαστεί με το πέρασμα των χρόνων με στόχο την καταγραφή και αξιολόγηση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Τα συστήματα καταγραφής της ομαλότητας χωρίζονται στις εξής κατηγορίες εκείνα που καταγράφουν το κατά μήκος προφίλ

απευθείας και αυτά που υπολογίζουν την απόκριση του οχήματος σε σχέση με το κατά μήκος προφίλ. Οι μετρήσεις που προκύπτουν από αυτά κρίνονται ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ποιότητας κύλισης και κυρίως για την παρακολούθηση της κατάστασης του οδοστρώματος, οι οποίες εν συνεχεία χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο ενός συστήματος διαχείρισης των οδοστρωμάτων (Pavement Management System, PMS). Η συλλογή δεδομένων σε υπό εξέταση οδικά τμήματα ακολουθείται από ανάλυση και λήψη αποφάσεων σχετικά με την πιθανή ανάγκη καθορισμού των κατάλληλων επιδιορθώσεων και ενεργειών συντήρησης (NCHRP, 2002).

Τυπικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ομαλότητας είναι τα εξής:

1. Προφίλογράφοι(Profilers)
2. Υψηλής ταχύτητας προφίλογράφοι/προφιλόμετρα
3. Συστήματα καταγραφής μηχανικής απόκρισης
4. Ελαφριά προφιλόμετρα
5. χειροκίνητες συσκευές

### **2.3.2 Προφίλογράφοι**

Οι Προφίλογράφοι (Profilographs) χρησιμοποιήθηκαν από το 1900 για τη μέτρηση της ομαλότητας ενός οδοστρώματος. Ένας Προφίλογράφος (Εικ.2.3) αποτελείται συνήθως από μια δοκό (άκαμπτη) ή ένα πλαίσιο στερεωμένο σε τρεις τροχούς, δύο στα άκρα και έναν στο μέσο. Οι τροχοί στα άκρα του Προφίλογράφου διαμορφώνουν μια επίπεδη βάση αναφοράς με την οποία υπολογίζονται οι αποκλίσεις του κεντρικού τροχού (NCHRP, 2002). Ο κεντρικός τροχός είναι άμεσα συνδεδεμένος με έναν υπολογιστή που καταγράφει την κίνηση του που γίνεται με ταχύτητα 3,2 έως 4,8km/h.



*Εικόνα 2.3 Προφίλογράφος (Systems, 2022)*

Η καταγραφή της ομαλότητας με τον Προφίλογράφο γίνεται σε λωρίδες. Η επεξεργασία των δεδομένων αυτών μπορεί να γίνει είτε ηλεκτρονικά είτε χειροκίνητα. Στην ηλεκτρονική μέθοδο τα δεδομένα που συλλέγονται σκανάρονται από υπολογιστή, επεξεργάζονται από ένα πρόγραμμα κι αυτό ύστερα παρέχει τα αποτελέσματα. Αντίθετα, στη χειροκίνητη μέθοδο ο μηχανικός-χειριστής αναλύει τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και εντοπίζει τα ακριβή σημεία εμφάνισης ατελειών. Καθοριστική ήταν η εφεύρεση ενός Προφίλογράφου από τον James Cox ο οποίος κατέγραφε τα δεδομένα σε υπολογιστή, εντόπιζε αυτόματα τα υψηλότερα σημεία κατά μήκος της κατατομής και παρήγαγε τον δείκτη του προφίλ οδοστρώματος (Profile Index, PI) (NCHRP, 2002). Η εφεύρεση αυτή είχε ως άμεσο αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του χρόνου της διαδικασίας καταγραφής της ομαλότητας, εφόσον δεν απαιτούν ειδική ερμηνεία ενώ μειώθηκε ακόμη η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων.

Οι πιο διαδεδομένοι Προφίλογράφοι είναι οι California profilers (Εικ.2.4) και οι Rainhart profilers (Εικ.2.5). Οι California profilers βρίσκονται σε χρήση πάνω από μισό αιώνα, με τον πρώτο να κάνει την εμφάνισή του το 1940. Η παραγωγή τους γίνεται σε ποικίλα μήκη από 4 m μέχρι και 9,9 m. Ο συγκεκριμένος προφίλογράφος μπορεί να στηρίζεται σε ένα σύστημα το οποίο μπορεί να αποτελείται από 4 έως και 16 τροχούς. Ο πιο κοινότυπος είναι εκείνος με το σύστημα των 12 τροχών (1961). Η συναρμολόγηση ενός τέτοιου μηχανήματος διαρκεί περίπου 10 λεπτά (MTAG, 2007).

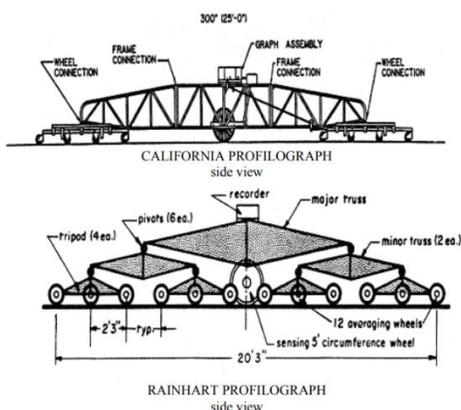


**Εικόνα 2.4 Προφιλόμετρο California** (Systems, 2022)

Σύμφωνα με το σχήμα που απεικονίζεται παραπάνω (Εικ.2.4), το σύστημα αποτελείται από μια δοκό 7,6 m ενώ το συνολικό μήκος είναι 9,9 m. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν δύο συστήματα στήριξης δεξιά και αριστερά με τέσσερις και δύο τροχούς αντίστοιχα. Τα ίχνη του προφίλ καταγράφονται σε μια οριζόντια κλίμακα 1:300 και κατακόρυφη 1:1.

MTAG Volume II - Rigid Pavement Preservation 2nd Edition  
CHAPTER 2—SURFACE CHARACTERISTICS

Caltrans Division of Maintenance  
October 30, 2007



**Εικόνα 2.5 California και Rainhart Προφιλόμετρο** (MTAG, 2007)

Οι Rainhart (Εικ.2.5) κατασκευάστηκαν στο Τέξας το 1967. Το συνολικό τους μήκος ανέρχεται στα 7,6 m και αποτελούνται από ένα σύστημα 12 τροχών. Ωστόσο οι τροχοί τοποθετούνται σε ομάδες των τριών σε αντίθεση με τους προφιλογράφους California (MTAG, 2007).

### 2.3.3 Υψηλής ταχύτητας Προφιλόμετρα

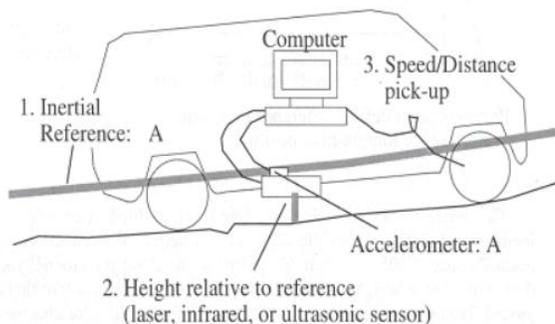
Τα Προφιλόμετρα υψηλής ταχύτητας (High speed profilers) (Εικ.2.6, 2.7) απεικονίζουν την πραγματική κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος σε υψηλές ταχύτητες και αναπτύχθηκαν από τους Elson Sprangler και William Kelley. Αρχικά υπολόγιζαν το ύψος του οχήματος σε σχέση με το έδαφος χρησιμοποιώντας ένα τροχό (τροφοδοτούμενο με όργανα μέτρησης) που κινούνταν κατά μήκος της οδού. Παρ' όλα αυτά οι τροχοί ήταν αρκετά ευαίσθητοι και απαιτούσαν δοκιμές σε χαμηλότερες ταχύτητες για να αποφεύγονται τα φαινόμενα αναπήδησης, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή αισθητήρων (έναντι τροχών) ενσωματωμένων στο όχημα, οι οποίοι δεν έρχονται σε επαφή με το έδαφος.



*Εικόνα 2.6 Προφιλόμετρα υψηλής ταχύτητας με ανέπαφο αισθητήρα (MTAG, 2007)*



Photo of road roughness profiler van



Schematic of road roughness profiler van

*Εικόνα 2.7 Εξοπλισμός προφίλομέτρων (MTAG, 2007)*

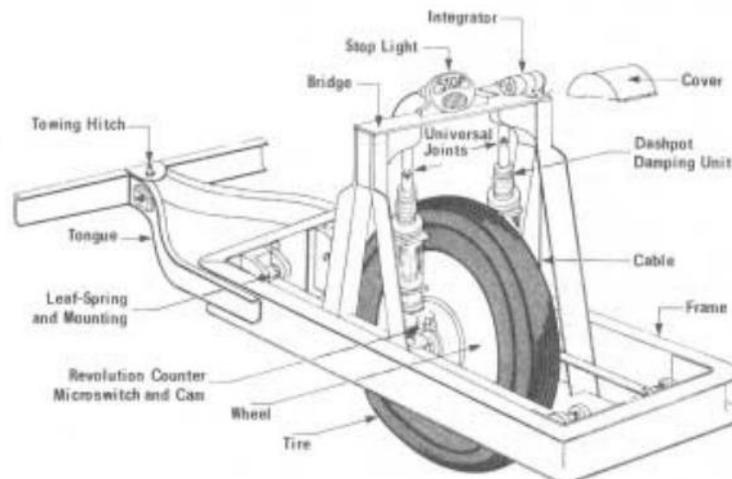
Το προφίλομετρο υψηλής ταχύτητας απαρτίζεται από ένα επιταχυνσιόμετρο , αισθητήρες μέτρησης ύψους, ένα σύστημα υπολογισμού αποστάσεων, τον εξοπλισμό του υπολογιστή και το αντίστοιχο λογισμικό του. Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται πάνω από τους αισθητήρες και καταγράφουν την κατακόρυφη επιτάχυνση του οχήματος. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα επιταχυνσιόμετρα καθορίζουν το ύψος του οχήματος σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς. Οι αισθητήρες καταγράφουν την απόσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος από το όχημα ενώ οι αποστάσεις μετρώνται με βάση ένα αρχικό σημείο αναφοράς. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω δεδομένα το πρόγραμμα υπολογίζει το προφίλ της επιφάνειας (Εικ.2.7).

Όπως παρατηρείται στην (Εικ.2.7) στα προφίλομετρα υψηλής ταχύτητας ενσωματώνονται δύο είδη φωτοκύτταρων οριζόντια και κατακόρυφα που συλλέγουν αυτόματα πληροφορίες. Τα κατακόρυφα φωτοκύτταρα ξεκινούν να καταγράφουν μόλις εντοπίσουν τη λευκή ταινία που τοποθετείται στη μέση του οδοστρώματος ενώ το οριζόντια μόλις εντοπίσουν τον ανακλαστικό κώνο ο οποίος έχει τοποθετηθεί στο σημείο που επιθυμούμε να ξεκινήσει η καταγραφή (MTAG, 2007).

### 2.3.4 Συστήματα μηχανικής απόκρισης

Τα συστήματα μηχανικής απόκρισης (Response Type Road Roughness Measuring Systems - RTRRMS) υπολογίζουν την απόκριση του οχήματος σε σχέση με το κατά μήκος προφίλ. Τα πιο γνωστά συστήματα καταγραφής μηχανικής απόκρισης είναι το BPR roughmeter, το Mayer meter και το PCA meter (NCHRP, 1980).

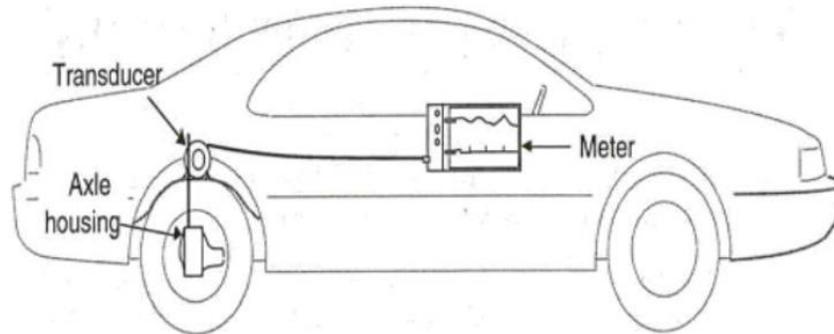
Το BPR (Bureau of Public Roads)(Εικ.2.8) roughmeter είναι ένα σύστημα όπου αποτελείται από ένα ρυμουλκόμενο μονό τροχό πάνω στον οποίο γίνεται η μέτρηση της απόκλισης της θέσης του τροχού σε σχέση με τον άξονα του ρυμουλκόμενου οχήματος. Τα BPR έχουν αναγνωριστεί ως οι καλύτερες συσκευές υψηλής ταχύτητας για την καταγραφή ομαλότητας στην σημερινή αγορά. Οι πληροφορίες που συλλέγονται εκφράζονται σε ίντσες/μίλια και η ταχύτητα δοκιμής της συσκευής είναι 32km/h. Οι μετρήσεις ωστόσο δεν είναι ανεπηρέαστες από την θερμοκρασία, τον τρόπο λειτουργίας του εξοπλισμού αλλά και την κατάσταση του ρουλεμάν του τροχού. Περαιτέρω πρέπει να αναφερθεί ότι η συσκευή έχει συσχετιστεί με τη συχνή απόδοση λαθεμένων αποτελεσμάτων (NCHRP, 2002).



*Εικόνα 2.8 Bureau of Public Roads (BPR) Roughometer (Perera & Kohn, 2002)*

Τα Mays meter (Εικ.2.9) ήταν ευρέως διαδεδομένα μεταξύ των δεκαετιών 1960 και 1980. Εγκαθίστανται σε ένα συμβατικό επιβατικό όχημα ή σε ένα ελαφρύ φορτηγό και καθορίζει την

ομαλότητα από τον υπολογισμό της απόκλισης μεταξύ του οπίσθιου άξονα με το σκελετό του αυτοκινούμενου οχήματος (NCHRPR, 1980).



Εικόνα 2.9 Mays Meter (NCHRPR, 1980)

Τα Portland Cement Association-PCA meters (Εικ.2.10) έχουν δομή παρόμοια με αυτήν των Mays meter. Αντίθετα τα αποτελέσματα που εξάγουν προκύπτουν από τη μέτρηση του αριθμού και του πλάτους των κατακόρυφων παρεκκλίσεων μεταξύ του σώματος του οχήματος και του κέντρου του οπίσθιου άξονα του τροχού. Η συσκευή είναι κατασκευασμένη για τη συλλογή πληροφοριών σε ταχύτητα 80km/h (Brokaw, 1967).

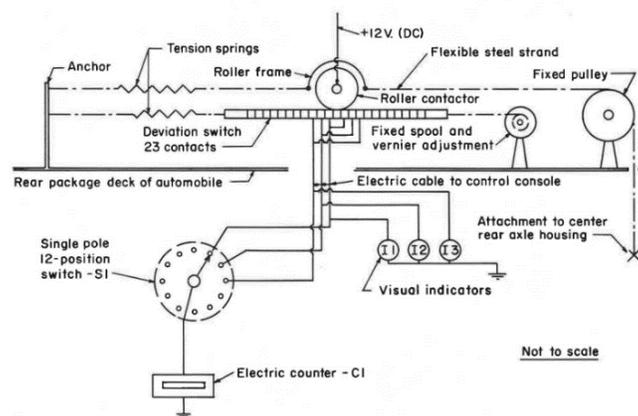


Figure 2. Diagram of mechanical and electrical features of the PCA Road Meter.

Εικόνα 2.10 PCA Road Meter (Brokaw, 1967)

Οι συσκευές μηχανικής απόκρισης παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά οι συσκευές αυτές είναι άμεσα εξαρτημένες από το μηχανικό εξοπλισμό των συστημάτων μέτρησης. Η κατάσταση των ελαστικών και η πίεση τους, καθώς και το βάρος των οχημάτων επηρεάζουν επιπρόσθετα τις μετρήσεις (NCHRP, 1980). Εάν το όχημα για παράδειγμα έχει υποστεί αλλαγές σε θέματα εξοπλισμού οι μετρήσεις θα αλλάξουν, γεγονός που προκαλεί αμφιβολίες για την ακρίβεια των συστημάτων RTRRMS αφού οι μετρήσεις μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο. Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση με προηγούμενες μετρήσεις.

Επιπλέον τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παράγονται έχουν χαμηλή επαναληψιμότητα (repeatability), δηλαδή σπανίως οι μετρήσεις αυτές μπορούν να αναπαραχθούν από άλλες συσκευές. Με άλλα λόγια, τα εξαγόμενα αποτελέσματα από ένα σύστημα μηχανικής απόκρισης θα διαφέρουν αν το ίδιο σύστημα μηχανικής απόκρισης τοποθετηθεί σε άλλα όχημα (NCHRP, 1980).

Η ταχύτητα επηρεάζει επίσης στην απόκριση του συστήματος. Το ίδιο εξεταζόμενο τμήμα εάν ελεγχθεί σε δυο διαφορετικές ταχύτητες θα εξάγει διαφορετικά αποτελέσματα. Ως αποτέλεσμα των αποκλίσεων αυτών χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες ταχύτητες για τις μετρήσεις. Ωστόσο, αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό εξαιτίας των συνθηκών κυκλοφορίας που επικρατούν στην εκάστοτε εξεταζόμενη οδό.

Το μέγιστο μειονέκτημα από τη χρήση δεδομένων που αποκτήθηκαν από συστήματα μηχανικής απόκρισης είναι η έλλειψη μιας προκαθορισμένης κλίμακας. Αν οι προδιαγραφές του οχήματος δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε σχέση με το προηγούμενο έτος μπορούν να γίνονται συγκρίσεις, αλλιώς η σύγκριση δεν είναι εφικτή.

Τέλος, δεν έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν τα ακριβή σημεία που προκαλούν τους κραδασμούς.

### 2.3.5 Μικρού βάρους (ή ελαφριά) προφιλόμετρα

Οι συγκεκριμένοι τύποι προφιλόμετρων (Lightweight Profilers) (Εικ.2.11) λειτουργούν χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ίδιες με αυτές των προφιλόμετρων υψηλών ταχυτήτων, αλλά σε ένα μικρότερου μεγέθους και βάρους όχημα, καθιστώντας τα έτσι ιδανικά για δοκιμές σε νέα οδοστρώματα (και ειδικότερα σε νέα δύσκαμπτα οδοστρώματα που δεν έχουν ακόμη δεχτεί τα φορτία κυκλοφορίας). Το προφίλ που καταγράφεται ενδείκνυται για τον υπολογισμό του διεθνή δείκτη ομαλότητας (International Roughness Index ,IRI) ή του δείκτη προφίλ (PI) (Kurt, Smith, Pam, & Prashant, 2016).



*Εικόνα 2.11 Μικρού Βάρους προφιλόμετρα (FHWA, 1989)*

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω τα ελαφριά προφιλόμετρα LISA (Lightweight Inertial Surface Analyzer) (Εικ.2.12) και τα προφιλόμετρα T6400 (Εικ.2.13).



*Εικόνα 2.12 Ελαφρύ προφιλόμετρο ανάλυσης επιφανειακής κατάστασης(LIZA) (Perera & Kohn, 2002)*



*Εικόνα 2.13 K.J.Law T6450 Ελαφριού θάρους προφιλόμετρο (Perera & Kohn, 2002)*

Στα προφιλόμετρα LISA ο εξοπλισμός βρίσκεται εγκατεστημένος σε ένα τετράτροχο όχημα βάρους 364kg (Kurt, Smith, Pam, & Prashant, 2016). Τα συστήματα λειτουργούν σε ταχύτητες 8 έως 24km/h και καταγράφεται το προφίλ ανά διαστήματα 75mm (3 inches).

### **2.3.6 Χειροκίνητες μέθοδοι**

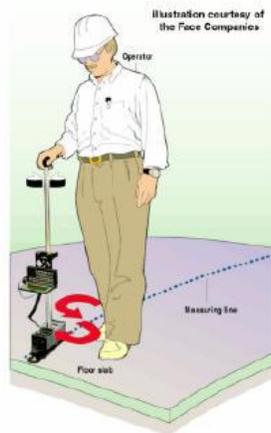
Οι χειροκίνητες συσκευές που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ομαλότητας ενός οδοστρώματος είναι:

- Road level method

- Dipstick profilers και
- Walking profilers

Η μέθοδος του Road and Level είναι μια τοπογραφική μέθοδος που μετράει την ομαλότητα σε ένα διάμηκες προφίλ καταγράφοντας πολλαπλά σημεία αποτύπωσης. Εάν το πλήθος των σημείων αυτών είναι ικανοποιητικό, προφανώς επιτυγχάνεται μια πολύ καλή καταγραφή της ομαλότητας. Ωστόσο, χρησιμοποιείται κυρίως συμπληρωματικά με άλλους εξοπλισμούς καταγραφής για να συγκρίνονται τα αποτελέσματα και να ελέγχονται για την ακρίβεια τους.

Τα Dipstick profilers (Εικ.2.14) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή της ποιότητας της επιφάνειας μιας οδού για ένα μικρό οδικό τμήμα (NCHRP, 2002). Τα dipstick profilers αποτελούνται από ένα κλισίμετρο (τοπογραφικό όργανο) στηριζόμενο σε δυο λεγόμενα «πόδια» απόστασης 12inches (305mm). Ενδείξεις εμφανίζονται και στα δυο «πόδια». Ο χειριστής κινείται κατά μήκος της οδού περιστρέφοντας εναλλάξ το όργανο. Η συσκευή καταγράφει 10-15 μετρήσεις/λεπτό και η ανάλυση λογισμικού παρέχει μια ακρίβεια της τάξεως  $\pm 0,127\text{mm}$  (0.005inches). (FHWA, 1989)



*Εικόνα 2.14 Dipsticks (Pavement Interactive)*



*Εικόνα 2.15 Walking profilers (Arrbsystems, 2020)*

Τα Walking profilers (Εικ.2.15) είναι όργανα υψηλής ακρίβειας καταγραφής της ομαλότητας. Είναι κατάλληλα για την καταγραφή ομαλότητας στις περισσότερες επιφάνειες, συλλέγοντας δεδομένα σε ταχύτητες μέχρι και 5km/h (Arrbsystems, 2020) χωρίς να έχουν την δυνατότητα ωστόσο να καλύπτουν μεγάλες περιοχές όπως τα ενσωματωμένα προφιλόμετρα.

## **2.4 Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας**

Για να μπορέσει να αξιολογηθεί ένα οδοστρώμα όσον αφορά την ομαλότητα είναι απαραίτητη η έκφρασή της με ένα δείκτη. Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες έκφρασης της ομαλότητας είναι:

- Ο δείκτης προφίλ (Profile Index, PI)
- Ο δείκτης έκφρασης της ποιότητας οδήγησης (Ride Number, RN)
- Ο διεθνής δείκτης ομαλότητας (International Roughness Index, IRI)

Ο δημοφιλέστερος δείκτης είναι ο διεθνής δείκτης ομαλότητας IRI, ο οποίος εκφράζει την ύπαρξη ανωμαλιών- ατελειών στην επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος, οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στην ποιότητα οδήγησης και συνεπακόλουθα στο χρήστη. Αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα αξιολόγησης του οδοστρώματος, διότι συνδέεται με την ποιότητα κύλισης αλλά και το λειτουργικό κόστος των οχημάτων που περιλαμβάνει την κατανάλωση καυσίμων και το κόστος συντήρησής τους. Εναλλακτικά, η ομαλότητα ποσοτικοποιείται είτε υπολογίζοντας τη βαθμολογία παρούσας εξυπηρετικότητας ( Present serviceability Rating PSR), ή με άλλους δείκτες όπως ή οι Mean Ride Index και Half car ride (Kurt, Smith, Pam, & Prashant, 2016).

Στο τέλος της δεκαετίας του 1950 συντάχθηκε από την AASHO (American Association of State Highway Officials) μια έρευνα με δοκιμές σε ένα μεγάλης έκτασης οδόστρωμα το οποίο βαθμολογήθηκε σε μία κλίμακα της τάξεως από το 0 έως 5 (Εικ.2.16) με το μηδέν να υποδηλώνει πολύ κακής ποιότητας οδόστρωμα και το 5 να υποδηλώνει πολύ καλής ποιότητας οδόστρωμα όσον αφορά την ποιότητα οδήγησης. Ο δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Index) που υπολογίζονται με την ίδια κλίμακα αναπτύχθηκε μέσω στατιστικών αναλύσεων για να προβλέπει τον PSR.

Acceptable?

Yes

No

Undecided

5 — Very Good

4 — Good

3 — Fair

2 — Poor

1 — Very Poor

0

Section Identification \_\_\_\_\_ Rating \_\_\_\_\_

Rater \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_ Time \_\_\_\_\_ Vehicle \_\_\_\_\_

*Εικόνα 2.16 Κλίμακα αξιολόγησης του δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας (Highway Research Board, 1972)*

Ο διεθνής δείκτης ομαλότητας καθιερώθηκε ως ο τυπικός τρόπος μέτρησης της ομαλότητας ύστερα από τη δημιουργία του την δεκαετία του 1980 από την Παγκόσμια Τράπεζα. Ο υπολογισμός του υπόκειται σε τυποποίηση σύμφωνα με τα πρωτόκολλα AASHTO R 43M/R 43-07 και ASTM E1926. Ο διεθνής δείκτης ομαλότητας ορίζεται πλήρως ως εξής (Sayers & M.Karamihas, 1998):

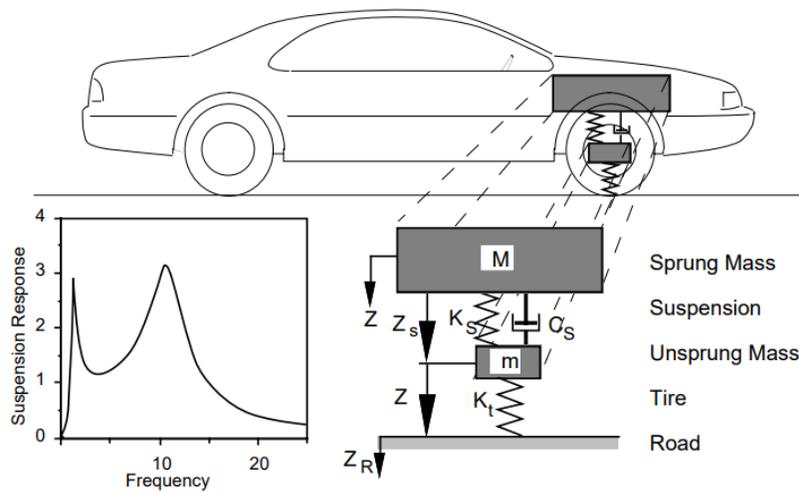
- Ορίζεται για ένα μοναδικό προφίλ και το διάστημα του δείγματος πρέπει να είναι μικρότερο από 300mm για αποτελέσματα ακριβείας. Μια καλή ανάλυση ακριβείας είναι τα 0,50 mm.

- Γίνεται αυθαίρετη θεώρηση ότι το προφίλ (ή η κατατομή της επιφάνειας) έχει σταθερή κλίση μεταξύ των υψομετρικών σημείων του δείγματος.
- Το προφίλ ομαλοποιείται με ένα κινούμενο μέσο όρο της τάξεως των 250mm για το μήκος αναφοράς.
- Το ομαλοποιημένο προφίλ φιλτράρεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο τύπου Quarter car (Golden Car) με ταχύτητα 80km/h (Εικ.2.17)
- Μετριέται το πλήθος  $m$  αθροιστικών ανωμαλιών ανά km της οδού.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του διεθνή δείκτη ομαλότητας σύμφωνα με (Sayers & Michael W., 1995) είναι τα εξής:

1. Αποτελεί γενική έκφραση της επίδρασης της ομαλότητας στη συμπεριφορά του οχήματος αλλά και στο πώς αντιλαμβάνονται το οδόστρωμα οι χρήστες.
2. Είναι ανεξάρτητος του μήκους του προφίλ που εξετάζεται.
3. Ο δείκτης είναι σταθερός με το χρόνο.
4. Είναι συμβατός με αρκετούς εξοπλισμούς καταγραφής προφίλ.
5. Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει καλή συσχέτιση με άλλους τρόπους καταγραφής ομαλότητας.

Για τον υπολογισμό του IRI χρησιμοποιείται το «προσομοίωμα του μοντέλου τέταρτου αυτοκινήτου» (Εικ.2.17) το οποίο εκφράζει τον τρόπο που το σύστημα ενός τροχού επηρεάζεται από την κατατομή του οδοστρώματος. Το μοντέλο αποτελείται (Sun, 2003):



Εικόνα 2.17 «Quarter-car» (Sayers & M.Karamihas, 1998)

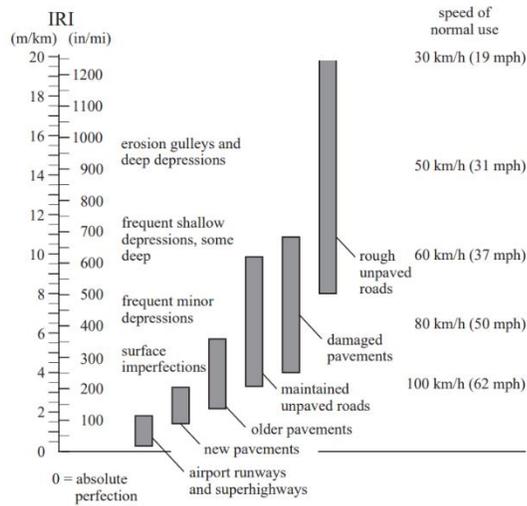
- Την μάζα κορμού του οχήματος (spring mass), η οποία είναι η μάζα που επιβαρύνει την ανάρτηση και είναι το σύνολο του βάρους των εκάστοτε τμημάτων της επιμέρους ανάρτησης.
- Τη μάζα του άξονα, η οποία δεν επιβαρύνει την ανάρτηση και στηρίζεται στον τροχό.
- Τον αποσβετήρα ταλαντώσεων  $C_s$
- Το ελατήριο της ανάρτησης με σταθερά  $K_s$

Το βήμα καταγραφής των ανωμαλιών της επιφάνειας προφανώς επηρεάζει τα αποτελέσματα για αυτό το λόγο αναπτυχθήκαν εξισώσεις απαλλαγμένες από αυτό.

Όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση του δείκτη IRI, εκφράζεται σε μονάδες κλίσης (πχ m/km) και λαμβάνει τιμές από 0 έως 20, όπου 0 είναι η βέλτιστη δυνατή κατάσταση ενός οδοστρώματος, εκεί δηλαδή που η επιφάνεια είναι τελείως επίπεδη (Εικ.2.18). Στην πραγματικότητα η μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει ο δείκτης είναι περίπου 6m/km (Πιν.2.1) καθώς για μεγαλύτερες τιμές του δείκτη, η κατάσταση του οδοστρώματος αναμένεται να είναι σε πολύ φτωχό επίπεδο και πρακτικά απαιτείται η ανακατασκευή του. Στην Εικ.2.18 φαίνεται το εύρος διακύμανσης των τιμών του οδοστρώματος ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος και την

ταχύτητα κυκλοφορίας. Επίσης, στον πίνακα 2.1 δίνεται μια ενδεικτική ταξινόμηση οδοστρωμάτων με βάση ένα τυπικό εύρος τιμών IRI

**Εικόνα 2.18 Κλίμακα μέτρηση IRI (Sayers & M.Karamihas, 1998)**



Πίνακας 2.1 Αξιολόγηση κατάστασης οδοστρώματος βάσει IRI (Authority, 2000)

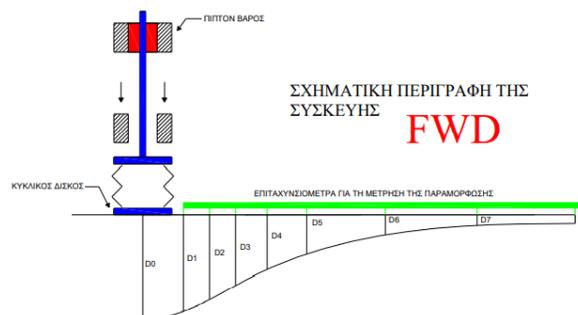
Κατάσταση οδοστρώματος	Χαρακτηριστικά (άνεση οδήγησης και αντίκτυπο ομαλότητας)	Διεθνής Δείκτης Ομαλότητας m/km
Πολύ καλή	Ομαλό οδόστρωμα, καλές οδικές συνθήκες, όρια ταχύτητας τείνουν να ξεπεραστούν	$\leq 1,39$
Καλή	Γενικά ομαλή επιφάνεια, λίγες και μεμονωμένες ανωμαλίες που δεν επηρεάζουν την οδηγτική άνεση, εύκολα υπερβαίνονται τα όρια ταχύτητας	<b>1,4-2,69</b>
Μέτρια	Ανομοιόμορφο σχετικά οδόστρωμα, λίγες μικρές προσκρούσεις, ταχύτητα οδήγησης κοντά στα όρια, προσοχή στην επιφάνεια του δρόμου κατά την οδήγηση	<b>2,7-4,19</b>
Κακή	Ανομοιόμορφο οδόστρωμα, αρκετές μικρές προσκρούσεις, ταχύτητα οδήγησης ποικίλει, απαραίτητη η συγκέντρωση κατά την οδήγηση	<b>4,2-5,59</b>
Πολύ κακή	Πολύ ανομοιόμορφο οδόστρωμα, αρκετές μικρές και μεγάλες προσκρούσεις, ταχύτητα κάτω από τα όρια, άβολη οδήγηση, φθορές και ανωμαλίες του οδοστρώματος πρέπει να αποφευχθούν, απαραίτητα συγκέντρωση κατά την οδήγηση	$\geq 5,6$

# 3. Καταγραφή ελαστικών υποχωρήσεων

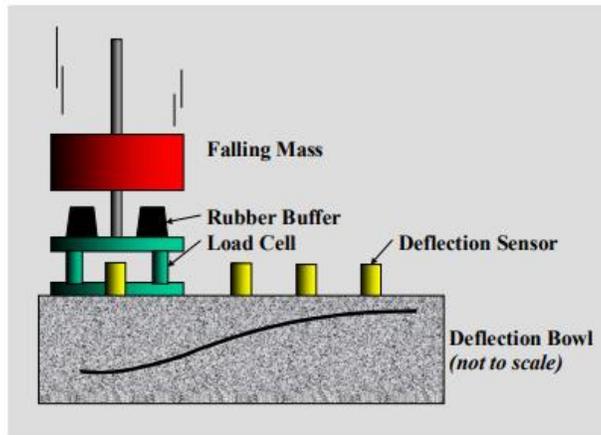
## 3.1 Γενικά στοιχεία παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD)

Το παραμόρφωσιμέτρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer-FWD) (Εικ.3.1) θεωρείται παγκοσμίως το πιο ακριβές εργαλείο για τη μέτρηση της υποχώρησης ενός οδοστρώματος ως αποτέλεσμα επιβολής φορτίου. Αναπτύχθηκε πρώτη φορά το 1963 από τον Bretornier (Tonkin & Taylor Ltd, 1998) στα πλαίσια του προγράμματος LTPP(Long-Term Pavement Performance Program).

Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους είναι μια συσκευή που εφαρμόζει ένα κάθετο παλμικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφει την υποχώρηση που αυτό προκαλεί (Nega, Hamid Nikraz, & Imad L. Al Qadi, 2016)(Εικ.3.2). Το μέγεθος του φορτίου, η διάρκεια φόρτισης και η περιοχή που εφαρμόζεται προσαρμόζονται αναλόγως έτσι ώστε να προσομοιώνει ένα τυπικό φορτηγό (S.Sharma & A. Das, 2008). Το εφαρμοζόμενο φορτίο αποτελείται από μια μάζα η οποία αφήνεται υπό την επίδραση του ίδιου βάρους της να προσκρούσει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια που στηρίζεται με ένα σύστημα ελατηρίων σε ένα κυκλικό δίσκο ο οποίος είναι σε άμεση επαφή με το οδόστρωμα (Nega, Hamid Nikraz, & Imad L. Al Qadi, 2016). Η διάρκεια της παλμικής φόρτισης διαρκεί 25-30 milliseconds, ενώ η τιμή του φορτίου μπορεί να φτάσει μέχρι και το μέγιστο φορτίο 120KN.



Εικόνα 3.1 Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD (Λοΐζος & Πλατή, 2020)



Εικόνα 3.2 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Austroroads, 2008)

Ωστόσο για τα εύκαμπτα οδοστρώματα εφαρμόζεται συνήθως ένα τυπικό φορτίο μεταξύ 40 έως 50 KN. Το τελικό φορτίο που εφαρμόζονται στο οδόστρωμα μπορεί να διαφέρει εξαιτίας διαφόρων παραμέτρων, γι' αυτό οι υποχωρήσεις που υπολογίζονται κανονικοποιούνται στο πραγματικό φορτίο αναφοράς.

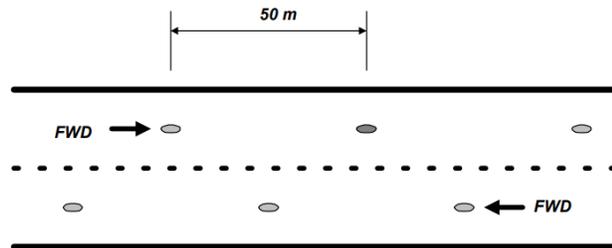
### 3.2 Ανάλυση και επεξεργασία στοιχείων FWD

Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους μεταδίδει ένα δυναμικό φορτίο στο οδόστρωμα παρόμοιο σε μέγεθος και διάρκεια με το φορτίο που μεταφέρει ο τροχός καθώς κινείται κατά μήκος της οδού, παρέχοντας έτσι μια αντιπροσωπευτική κατάσταση των υποχωρήσεων του οδοστρώματος (Smith, et al., 2017). Αφού τα στοιχεία συλλεχθούν, ακολουθεί η ανάλυσή τους με δύο κυρίαρχες προσεγγίσεις, οι οποίες έχουν στόχο την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Η πρώτη από αυτές είναι η άμεση ανάλυση που στηρίζεται κυρίως στις τιμές των δεικτών υποχωρήσεων και αφορά σε μία μακροσκοπική κατάταξη των οδοστρωμάτων, ιδίως χρήσιμη για ανάλυση σε επίπεδο δικτύου (network level). Η δεύτερη ανάλυση είναι πιο σύνθετη και στηρίζεται στην εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος με μια διαδικασία που ονομάζεται ανάστροφος υπολογισμός «back-calculation». Με τη διαδικασία αυτή γίνεται μια αξιόπιστη εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων (όπως για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας  $E$  ή το ενεργό μέτρο ελαστικότητας  $M_R$  ή το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου ή το μέτρο αντίδρασης του εδάφους  $k$ ). Ως δεδομένα εισόδου χρειάζονται οι υποχωρήσεις καθώς και στοιχεία στρωματογραφίας (πάχη) που μπορεί να συλλεχθούν με το σύστημα του γεωρανταρ (Ground Penetrating Radar ,GPR). Η σύνθετη ανάλυση είναι χρήσιμη όταν πρόκειται να αξιολογηθούν οι ανάγκες επανασχεδιασμού ενός οδοστρώματος.

Κλείνοντας, και για τα δύο είδη ανάλυσης, τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου FWD είναι τα εξής (Smith, et al., 2017):

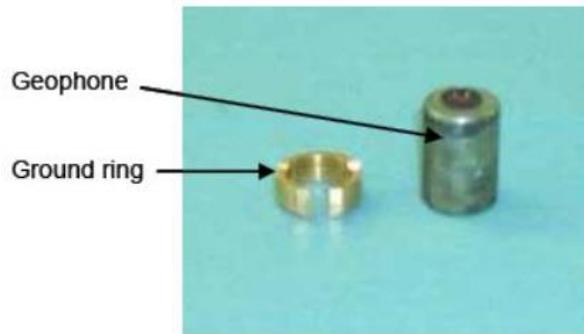
- Μικρή διάρκεια δοκιμής
- Ευκολία στη διαδικασία δοκιμής
- Χαμηλό κόστος διαδικασίας-διαχείρισης
- Χαμηλές απαιτήσεις σε εργατικό δυναμικό (συνήθως ο ένας μόνος χειριστής)
- Λιγότερο επεμβατική διαδικασία σε σχέση με άλλες μεθόδους

- Αυξημένος αριθμός σημείων δοκιμής με ρυθμό που εξαρτάται από τα διαστήματα των σημείων μέτρησης (από 100 έως 500 m) (Εικ.3.3).

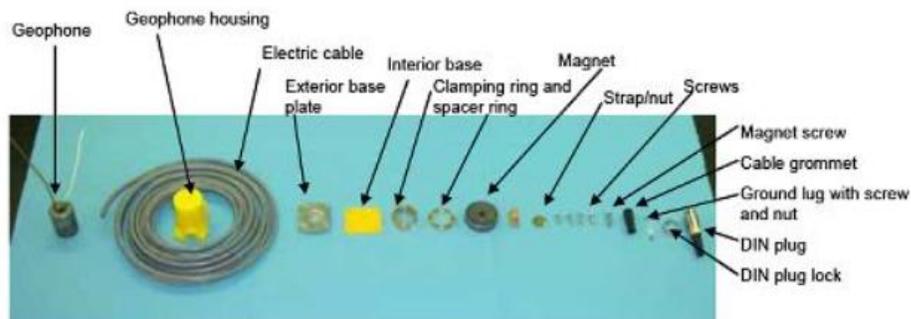


Εικόνα 3.3 Διαστήματα δοκιμών FWD (Authority, 2000)

Ένα τυπικό παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους αποτελείται από έναν ρυθμιστή (buffer), ένα κουτί ελέγχου (control box), μια δυναμοκυψέλη (load cell), ένα κυκλικό δίσκο (load plate), την πλάκα κρούσης (strike plate), τον επεξεργαστή σήματος (signal processor), μια μπάρα αισθητήρων και τα γεώφωνα. Τα γεώφωνα είναι συσκευές μετρήσεις εκτροπών και έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 50mm. Οι υποχωρήσεις καταγράφονται από ειδικούς αισθητήρες που ονομάζονται γεώφωνα. Είναι κυλινδρικά συστήματα με διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 50mm. Τοποθετούνται συνήθως σε αποστάσεις από την πλάκα φόρτισης 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1500 (Austroroads, 2008). Οι αντίστοιχες υποχωρήσεις που προκύπτουν αναφέρονται ως  $D_0$ ,  $D_{200}$ ,  $D_{300}$ ,  $D_{450}$ ,  $D_{600}$ ,  $D_{900}$ ,  $D_{1200}$  και  $D_{1500}$  αντίστοιχα. Τα παραμόρφωσιμετρα πίπτοντος βάρους μπορούν να καταγράψουν υποχωρήσεις μέχρι και 2400m. Ένα τυπικό παραμορφωσίμετρο μπορεί να έχει από 7 γεώφωνα μέχρι και 15. (Εικ.3.4 και 3.5).



Εικόνα 3.4 Γεώφωνο (L.Hederson, 2006)



Εικόνα 3.5 Εξαρτήματα γεωφώνων (L.Hederson, 2006)

### 3.2.1 Στοιχεία καταγραφής

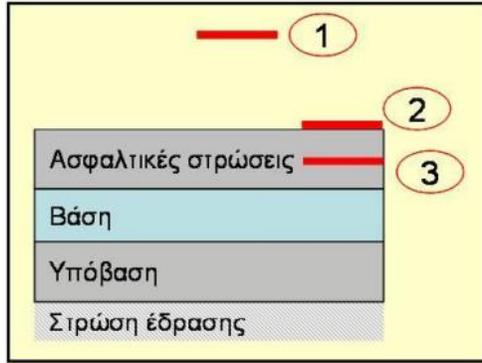
Για κάθε σημείο δοκιμής πρέπει να καταγράφεται:

- Η τοποθεσία, δηλαδή λωρίδα μέτρησης και εγκάρσια απόσταση από το άκρο της λωρίδας
- Η ημερομηνία και ώρα δοκιμής
- Η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- Η θερμοκρασία στην επιφάνεια οδοστρώματος
- Ο αριθμός ρίψεων τους βάρους στις εκάστοτε θέσεις
- Σχετικοί σχολιασμοί αναφορικά με την οπτική κατάσταση του οδοστρώματος που μπορεί να βοηθήσουν στην ερμηνεία των καταγραφών

Παράλληλα, με τις θερμοκρασιακές καταγραφές του αέρα και της επιφάνειας του οδοστρώματος, πραγματοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασίας εντός του σώματος του οδοστρώματος, λόγω της συμβολής της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων.

### **3.2.2 Θερμοκρασίας οδοστρώματος**

Εκτός από τις ψευδοελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το FWD γίνονται όπως προαναφέρθηκε και συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίες οι οποίες είναι οι εξής: α) μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα β) μέτρηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος και γ) μέτρησή της θερμοκρασίας στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων και συγκεκριμένα της ασφαλτικής βάσης (Εικ.3.6). Οι δοκιμές με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους FWD μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες θερμοκρασίες, ωστόσο η απόκριση του οδοστρώματος μπορεί να διαφοροποιηθεί. Μια θερμοκρασία της τάξεως μεταξύ 10°C έως 25°C είναι ιδανική για τις δοκιμές σε εύκαμπτα οδοστρώματα. Ωστόσο, όταν η υποδομή απαρτίζεται από μεγάλα πάχη ασφαλτικών στρώσεων η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του οδοστρώματος αφού η άσφαλτος έχει ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Ιδανικά λοιπόν η θερμοκρασία της δοκιμής θα πρέπει να πλησιάζει μία μέση θερμοκρασία αναφοράς. Η θερμοκρασία των ασφαλτικών μετριέται με τη διάνοιξη μιας οπής στην ασφαλτική στρώση και ύστερα εισάγεται μέσα ένα θερμόμετρο για την καταγραφή – σημείο 3 (Εικ.3.7). Η διάνοιξη των οπών γίνεται τουλάχιστον 10 λεπτά πριν τη μέτρηση της θερμοκρασίας έτσι ώστε να απαλλαχθεί η δοκιμή από λαθεμένες μετρήσεις που μπορεί να αναδείξουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες λόγω της εκσκαφής.



Εικόνα 3.6 Μετρήσεις θερμοκρασίας α)Αέρα β)Επιφάνειας Οδοστρώματος γ)Ασφαλτικών Στρώσεων (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

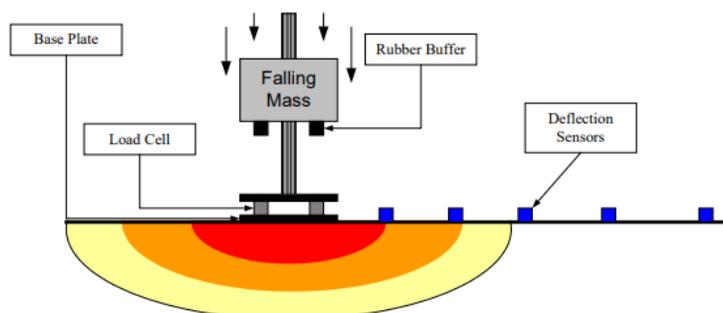


Εικόνα 3.7 Αισθητήρας θερμοκρασίας (Wikipedia)

### 3.3 Δείκτες δομικής κατάστασης

#### 3.3.1 Γενικά

Οι υποχωρήσεις (Εικ.3.8) υπολογίζονται συνήθως από το φορτίο των 40kN που εκπροσωπεί το ήμισυ του φορτίου του τυπικού άξονα 80kN. Οι υποχωρήσεις υπολογίζονται σε ποικίλες αποστάσεις από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και εκφράζουν το ήμισυ των συνολικών υποχωρήσεων λόγω της συμμετρίας κατά μήκος του προφίλ του οδοστρώματος (Horak, Hefer, Emery, & Maina, 2015).

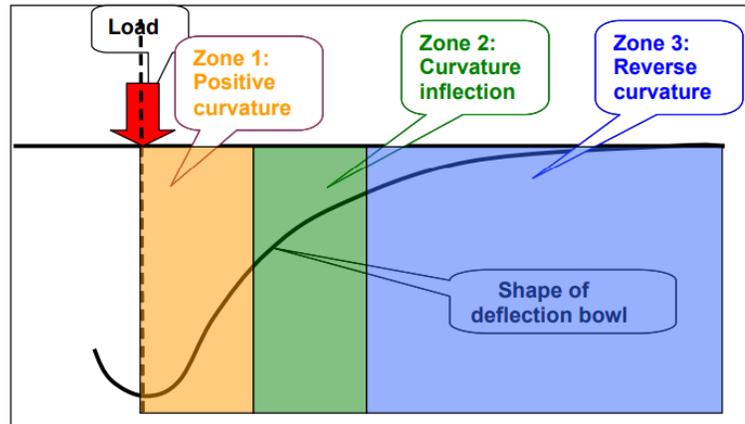


Εικόνα 3.8 FWD δοκιμή (Chatti, et al., 2017)

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις χωρίζονται σε 3 ζώνες (Εικ.33):

1. Η πρώτη ζώνη απαρτίζεται από τις υποχωρήσεις που σχηματίζουν ένα κυρτό σχήμα και ονομάζεται «positive curvature zone». Βρίσκεται αρκετά κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου δηλαδή σε απόσταση περίπου μέχρι και 300 mm.
2. Η δεύτερη ζώνη ξεκινάει στα 300 mm και φτάνει περίπου μέχρι απόσταση 600m από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Αποτελείται από το μεταβατικό σημείο που αλλάζει η κλίση του σχήματος της καμπύλης προφίλ των υποχωρήσεων.

3. Η τρίτη και τελευταία ζώνη βρίσκεται σε απόσταση που κυμαίνεται από τον κυκλικό δίσκο φόρτισης από 600mm μέχρι και 2m ανάλογα με τον αριθμό των γεωφώνων που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή. (Horak, 2007).



Εικόνα 3.9 Ζώνες της καμπύλης προφίλ των υποχωρήσεων(deflection bowl) (Horak, Hefer, Emery, & Maina, 2015)

Κατόπιν της εφεύρεσης και της χρήσης μη καταστρεπτικών δοκιμών NDT έχουν αναπτυχθεί αρκετές παράμετροι που περιγράφουν τις ελαστικές υποχωρήσεις με στόχο την εκτίμηση της κατάστασης ολόκληρου ή μέρους του οδοστρώματος. Η καμπύλη του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων εκφράζεται με τους εξής δείκτες (Talvik & Aavik, 2009) (Horak, 2007):

- Μέγιστη ελαστική υποχώρηση ή κεντρική ελαστική υποχώρηση  $D_0$
- Ακτίνα καμπυλότητας ROC ( Radius of Curvature )
- Δείκτης SCI (Surface Curvature Index )
- Δείκτης BDI (Base Damage Index))
- Δείκτης BCI (Base Curvature Index)
- Δείκτης  $D_9$
- Δείκτης περιοχής Area
- Δείκτης περιοχής κάτω από το προφίλ Area Under Pavement Profile (AUPP)

### 3.3.2 Μέγιστη ελαστική υποχώρηση $D_0$

Ο δείκτης  $D_0$  εκφράζει τη συνολική δομική κατάσταση του οδοστρώματος και εξαρτάται: 1) από τον τύπο το οδοστρώματος εάν είναι δηλαδή εύκαμπτο, ημιάκαμπτο ή δύσκαμπτο και 2) από τη θερμοκρασία. Χαμηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν ισχυρό οδόστρωμα ενώ υψηλές ασθενές οδόστρωμα.

- **Αναγωγή των ελαστικών υποχωρήσεων στο φορτίο αναφοράς**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το φορτίο που τελικά προκαλείται κάτω από το οδόστρωμα έχει μικρή απόκλιση από το φορτίο αναφοράς της δοκιμής. Συνεπώς τα αποτελέσματα ανάγονται στο φορτίο αναφοράς  $P_{target}$ .

$$D_0(P_{target}) = D_0(P) * \frac{P_{target}}{P} \quad (3.1)$$

$D_0(P_{target})$ : Μέτρηση  $D_0$  σε φορτίο  $P$

$P$ : Φορτίο Αναφοράς

$D_0(P_{target})$ : Αναγωγή  $D_0$  στο φορτίο αναφοράς  $P_{target}$

Π.χ για φορτίο αναφοράς 50KN  $D_0(50KN) = \frac{D_0 * 50}{P}$

- **Αναγωγή των ελαστικών υποχωρήσεων στη θερμοκρασία αναφοράς**

Η θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων με την μέθοδο FWD. Οι μετρήσεις μπορεί να διαρκέσουν αρκετό χρόνο και συνεπώς υποβάλλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές, αλλά ακόμη μεταβολές στις θερμοκρασίες παρατηρούνται και σε ημερήσια ή και ωριαία βάση κατά μήκος του οδικού τμήματος που γίνονται οι δοκιμές. Η αναγωγή στη θερμοκρασία αναφοράς γίνεται υιοθετώντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης. Ο πιο διαδεδομένος συντελεστής διόρθωσης είναι ένας παράγοντας μετατόπισης των υποχωρήσεων στη θερμοκρασία των 20°C ( TNF: Temperature Normalization Factor)

$$TNF=1+ (\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{h_1}) * (T_A-20) + (\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{h_1}) * (T_A-20)^3 \quad (3.2)$$

Πίνακας 3.1 Αναγωγή D<sub>0</sub> στην θερμοκρασία αναφοράς

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
TNF	0.01661	-0.67095	0.00028612	-0.01408

Η διορθωμένη τιμή προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$D_0(20^\circ\text{C}) = \frac{D_0(T)}{TNF} \quad (3.3)$$

TNF: Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

D<sub>0</sub>: Μέτρηση σε θερμοκρασία T

T: Θερμοκρασία αναφοράς 20°C

D<sub>0</sub>(20°C): Αναγωγή D<sub>0</sub> στην θερμοκρασία αναφοράς των 20°C

### 3.3.3 Ακτίνα καμπυλότητας (RoC)

Ο δείκτης RoC (Radius of Curvature) αναπτύχθηκε από τον (Horak, 1987) και έχει αποδειχθεί η καλή του συσχέτιση με την πρώτη ζώνη της καμπύλης του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (Horak, 2007). Ο δείκτης εκφράζει την δομική κατάσταση της ασφαλτικής στρώσης και της βάσης (Pierce, et al., 2017). Η εξίσωση που περιγράφει τον δείκτη είναι η εξής:

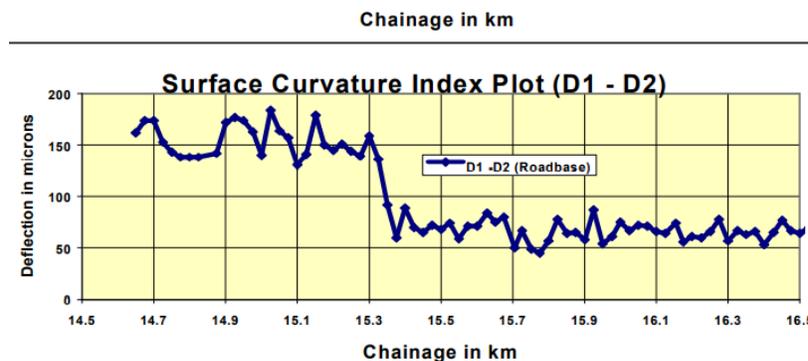
$$RoC = \frac{L^2}{2 * D_0 * (1 - \frac{D_{200}}{D_0})} \quad (3.4)$$

L=200mm για δοκιμές FWD

### 3.3.4 Δείκτης SCI

Ο δείκτης SCI (Surface Curvature Index) έχει καλύτερη συσχέτιση με την πρώτη ζώνη της καμπύλης του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων σε σχέση με τον δείκτη RoC. Υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ των υποχωρήσεων ακριβώς κάτω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και αυτής σε απόσταση 300mm από τον κυκλικό δίσκο φόρτισης. Χρησιμοποιείται κυρίως για να εκφράσει την κατάσταση των άνω στρώσεων των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι ανώτερες στρώσεις επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη συνολική υποχώρηση του οδοστρώματος γεγονός που γίνεται εύκολα κατανοητό από την παρόμοια τάση μεταβολής των δεικτών SCI και  $D_0$ . Χαμηλές τιμές της διαφοράς  $D_0 - D_{300}$  υποδηλώνουν το οδόστρωμα μεταφέρει αρκετά καλά το φορτίο στις υποκείμενες στρώσεις (δεξί τμήμα στην Εικ.3.10). Η εξίσωση υπολογισμού είναι η εξής:

$$SCI = d_0 - d_{300} \text{ ή } d_0 - d_r \text{ με το } r \in (450, 600) \quad (3.5)$$



Εικόνα 3.10 Παράδειγμα μεταβολής δείκτη SCI (Authority, 2000)

Επιπροσθέτως πραγματοποιείται αναγωγή στην θερμοκρασία αναφοράς  $T=20^{\circ}\text{C}$  και του δείκτη SCI με την παρακάτω εξίσωση:

$$TNF = 1 + \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{h_1}\right) * (T_A - 20) + \left(\alpha_3 + \frac{\alpha_4}{h_1}\right) * (T_A - 20)^2 * (1 - SR_t) \quad (3.6)$$

$$SCI(20^{\circ}C) = \frac{SCI}{TNF} \quad (3.7)$$

Όπου

TNF: Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

SCI : Μέτρηση σε θερμοκρασία T

T: Θερμοκρασία αναφοράς 20°C

SCI (20°C): Αναγωγή SCI στην θερμοκρασία αναφοράς των 20°C

SR<sub>t</sub>: ποσοστό της περιοχής που έχει ρηγματωθεί/100

Πίνακας 3.2 Αναγωγή SCI στην θερμοκρασία αναφοράς

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	SR <sub>t</sub>
TNF	0.05398	-2.6130	1.28439	-0.07493	1

### 3.3.5 Δείκτης BDI

Ο δείκτης BDI (Base Damage Index) χρησιμοποιείται για να εκφράσει την δομική κατάσταση της βάσης και παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τη δεύτερη ζώνη της καμπύλης του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων. Υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ των υποχωρήσεων σε αποστάσεις 300 m και 600 m (Horak, 2007). Η σχέση υπολογισμού είναι οι εξής (Pierce, et al., 2017):

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (3.8)$$

### 3.3.6 Δείκτης BCI

Ο δείκτης BCI (Base Curvature Index) χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη γενική κατάσταση της υπόβασης και προκύπτει από τη διαφορά των υποχωρήσεων σε απόσταση 600 mm και 900 mm από τον κυκλικό δίσκο φόρτισης. Οι εξισώσεις υπολογισμού του είναι (Pierce, et al., 2017):

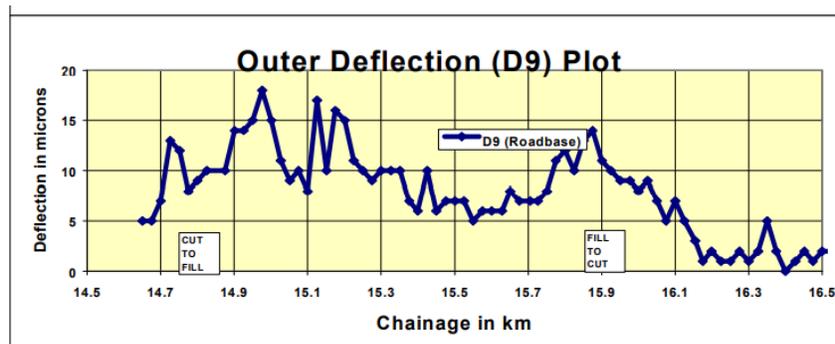
$$BCI = d_{600} - d_{900} (H.Π.A) \quad (3.9)$$

$$BCI = d_{900} - d_{1200} (\Phi ι λ α ν δ ί α) \quad (3.10)$$

$$BCI = d_{1200} - d_{1500} (\text{Εσθονία}) \quad (3.11)$$

### 3.3.7 Δείκτης D<sub>9</sub>

Ο δείκτης D<sub>9</sub> εκφράζει την ελαστική υποχώρηση που υπολογίζεται κάτω από τη θέση του ένατου γεωφώνου σε απόσταση 2100mm από το σημείο ρίψεως του φορτίου (Authority, 2000). Ο συγκεκριμένος δείκτης σχετίζεται με την κατάσταση της στρώσης έδρασης. Χαμηλές τιμές υποχώρησης στο συγκεκριμένο σημείο υποδηλώνουν πολύ καλή συμπεριφορά της στρώσης. Εάν το διάγραμμα που περιγράφει τον δείκτη πλησιάζει σε μορφή το διάγραμμα του δείκτη μέγιστης κεντρικής υποχώρησης τότε η στρώση έδρασης επηρεάζει άμεσα τον τρόπο συμπεριφοράς του οδοστρώματος τους και συνεπώς την δομική του κατάσταση (Εικ.3.11).



Εικόνα 3.11 Παράδειγμα μεταβολής του Δείκτη D<sub>9</sub> (Authority, 2000)

### 3.3.8 Δείκτης περιοχής επιρροής της φόρτισης (Area)

Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι από τους βασικότερους διότι εκφράζει τη συνολική δομική κατάσταση του οδοστρώματος και προκύπτει από την εξίσωση που παρατίθεται παρακάτω (Talvik & Aavik, 2009):

$$AREA = 150 * \frac{(d_0 + 2*d_{300} + 2*d_{600} + d_{900})}{d_0} \quad (3.12)$$

### 3.3.9 Δείκτης περιοχής κάτω από το προφίλ (AUPP)

Ο δείκτης Area Under Pavement Profile (AUPP) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την δομική κατάσταση των ανώτερων στρώσεων και προκύπτει από την εξίσωση:

$$AUPP = \frac{5*d_0 + 2*d_{300} + 2*d_{600} + d_{900}}{d_0} \quad (3.13)$$

Ο συγκεντρωτικός πίνακας των δεικτών παρουσιάζεται παρακάτω(Πιν. 3.3)

Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικός πίνακας δεικτών

Δείκτες Δομικής Κατάστασης	Εξίσωση	Μονάδες Μέτρησης	Σκοπός των δεικτών	Συσχέτιση με Ζώνη της καμπύλης του προφίλ
$D_0$	Επιτόπου μέτρηση στο σημείο	μm,mm	Δομική αξιολόγηση του συνολικού οδοστρώματος	1,2,3
Radius of Curvature	$\frac{2 * L^2}{2 * D_0 * (1 - \frac{D_{200}}{D_0})}$	μm,mm	Δομική αξιολόγηση ασφαλτικής στρώσης και βάσης	1
Surface Curvature Index	$d_0 - d_{300}$ ή $d_0 - d_r \quad r \in (450,600)$	μm,mm	Δομική αξιολόγηση των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος	1
Base Damage Index	$d_{300} - d_{600}$	μm,mm	Δομική αξιολόγηση της βάσης του οδοστρώματος	2
Base Curvature Index	$d_{600} - d_{900}$ $d_{900} - d_{1200}$ $d_{1200} - d_{1500}$	μm,mm	Δομική αξιολόγηση της υπόβασης	3
$D_9$	Επιτόπου μέτρηση στο σημείο	μm,mm	Δομική αξιολόγηση της στρώσης έδρασης	3
AREA	$150 * \frac{(d_0 + 2 * d_{300} + 2 * d_{600} + d_{900})}{d_0}$	mm	Δομική αξιολόγηση του συνολικού οδοστρώματος	1,2,3
AUPP	$\frac{5 * d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900}}{d_0}$	mm	Δομική αξιολόγηση των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος	1

### 3.4 Κριτήρια αξιολόγησης των οδοστρωμάτων

Αρχικά η περιγραφή της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος έγινε χρησιμοποιώντας τη μέγιστη ελαστική/κεντρική υποχώρηση από τον (Freeme, 1983). Ωστόσο αργότερα εισάχθηκαν και άλλοι δείκτες (Horak, 1988) για να μπορεί να εκφραστεί ολόκληρη η καμπύλη του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (deflection bowl). Στον πίνακα 8 που παρουσιάζεται παρακάτω παρατίθενται τα κριτήρια αξιολόγησης συνολικά του οδοστρώματος που προκύπτουν από τον συνδυασμό των δεικτών  $D_0$ , RoC, SCI, BDI, BCI. Η δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων κατατάσσεται με βάση τα αποτελέσματα που συλλέγονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία που αποδεικνύει υγιή κατάσταση του οδοστρώματος (sound) με χρώμα πράσινο, μέτρια (warning) με κίτρινο χρώμα και σοβαρή (severe) με κόκκινο χρώμα.

Ένας επιπλέον τρόπος αξιολόγησης της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος γίνεται με τους Πιν.3.4-3.8 οι τιμές των οποίων συγκρίνονται με τις υπολογισμένες τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων μετά την αναγωγή τους στο τυπικό φορτίο των 40KN (Authority, 2000). Τέλος παρουσιάζεται στον Πιν.3.9 ένα συνδυαστικό ποιοτικό κριτήριο αξιολόγησης μεταξύ του δείκτη μέγιστης ελαστικής υποχώρησης  $D_0$  και του δείκτη AREA.

Πίνακας 3.4 Κριτήρια αξιολόγησης της συνολικής κατάστασης του οδοστρώματος (Horak, 2007)

	Δομική κατάσταση Οδοστρώματος	Δείκτες Δομική Κατάστασης				
		D <sub>0</sub>	RoC	SCI	BDI	BCI
Granular Base	Sound	<500	>100	<200	<100	<50
	Warning	500-750	50-100	200-400	100-200	50-100
	Severe	>750	<50	>400	>200	>100
Cementious Base	Sound	<200	>150	<100	<50	<40
	Warning	200-400	80-150	100-300	50-100	40-80
	Severe	>400	<80	>300	>100	>80
Bituminous Base	Sound	<400	>250	<150	<100	<50
	Warning	400-600	100-250	150-300	100-150	50-80
	Severe	>600	<100	>300	>150	>80

Πίνακας 3.5 Κριτήριο αξιολόγησης οδοστρώματος με βάση τους δείκτες Do και SCI (Authority, 2000)

Κριτήριο Do mm	Κριτήριο SCI μm	Δομική Αξιολόγηση Οδοστρώματος
<100	<40	Εξαιρετικό Οδόστρωμα
100-200	40-80	Πολύ καλό Οδόστρωμα
200-350	80-140	Αρκετά καλό Οδόστρωμα (Ισως χρειαστεί επικάλυψη ανάλογα με τα φορτία κυκλοφορίας )
350-500	140-200	Μέτριο Οδόστρωμα( Θα χρειαστεί επικάλυψη λόγω των φορτίων κυκλοφορίας)
500-700	200-300	Μέτριο προς ασθενές Οδόστρωμα (Απαιτείται επικάλυψη συνήθως κοκκώδης βάση)
>700	>300	Ασθενές Οδόστρωμα (Ανακατασκευή ή κοκκώδης βάσης )

Πίνακας 3.6 Κριτήριο αξιολόγησης της στρώσης έδρασης με βάση τον δείκτη D9 (Authority, 2000)

D <sub>9</sub>	Αξιολόγηση Στρώσης Έδρασης
<10	Εξαιρετικά Δύσκαμπτη
10-20	Δύσκαμπτη
20-30	Δύσκαμπτη προς Μέτρια
30-40	Μέτρια προς Ασθενής
40-50	Ασθενής
>50	Πολύ Ασθενής

Πίνακας 3.7 Κριτήριο αξιολόγησης του συνολικού οδοστρώματος με βάση την μέγιστη ελαστική υποχώρηση  $D_0$  (Hakim & Brown, 2006)

$D_0$	Δομική Κατάσταση του συνολικού Οδοστρώματος
<100	Εξαιρετική
100-150	Πολύ καλή
150-200	Καλή
200-250	Μέτρια
250-300	Κακή
>300	Πολύ κακή

Πίνακας 3.8 Κριτήριο αξιολόγησης ασφαλτικών στρώσεων (Hakim & Brown, 2006)

SCI	Δομική Κατάσταση Ασφαλτικών Στρώσεων
<30	Εξαιρετική
30-45	Πολύ καλή
45-80	Μέτρια
>80	Κακή

Πίνακας 3.9 Γενίκευση των αποτελεσμάτων με χρήση των δεικτών AREA και  $D_0$  (Pierce, et al., 2017)

AREA	$D_0$	Γενίκευση Αποτελεσμάτων
Low	Low	Ασθενής δομική κατάσταση, καλή στρώση έδρασης
Low	High	Ασθενής δομική κατάσταση, ασθενής στρώση έδρασης
High	Low	Καλή δομική κατάσταση, καλή στρώση έδρασης
High	High	Καλή δομική κατάσταση, ασθενής στρώση έδρασης

#### ❖ Παράγοντες επιρροής των ελαστικών υποχωρήσεων:

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τις ελαστικές υποχωρήσεις που προκύπτουν από τη φόρτιση του οδοστρώματος γεγονός που καθιστά τα αποτελέσματα δύσκολα στον υπολογισμό τους. Για αυτό το λόγο είναι συνετό να λαμβάνονται υπόψη στις μετρήσεις (Smith, et al., 2017). Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι εξής :

1. Η δομή του οδοστρώματος

- Τύπος (εύκαμπτο/δύσκαμπτο/ημιάκαμπτο /ημιεύκαμπτο )

2. Η φόρτιση του οδοστρώματος (αργή στατική φόρτιση /γρήγορη δυναμική φόρτιση)

3. Κλιματολογικές συνθήκες

- Θερμοκρασία
- Εποχιακές επιρροές

#### ❖ Δομική αξιολόγηση με βάση το Surface Modulus

Το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα από το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους μεταφέρεται στις υποκείμενες στρώσεις περίπου υπό γωνία 45° σχηματίζοντας μια κωνική επιφάνεια που φαίνεται στην (Εικ.3.12) (Horak, 2007). Η στρώση έδρασης συνεισφέρει περίπου στο 60-80% της κεντρικής υποχώρησης. Ακριβώς για αυτό το λόγο πρέπει να αξιολογείται η κατάστασή της. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus . Το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus είναι το σταθμισμένο μέσο μέτρο ελαστικότητας του ισοδύναμου ομοιογενούς ημίχωρου, συμβολίζεται ως  $E_0$  και υπολογίζεται από τις εξισώσεις Boussineq (Horak, 1987) (Pierce, et al., 2017):

$$E_0 = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_r} \quad (3.14)$$

$$E_r = \frac{(1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{d_r \cdot r} \quad (3.15)$$

$E_0$ : Surface Modulus στο κέντρο του κυκλικού δίσκου φόρτισης (MPa)

$E_r$ : Surface Modulus σε απόσταση  $r$  από το κέντρο του κυκλικού δίσκου φόρτισης (MPa)

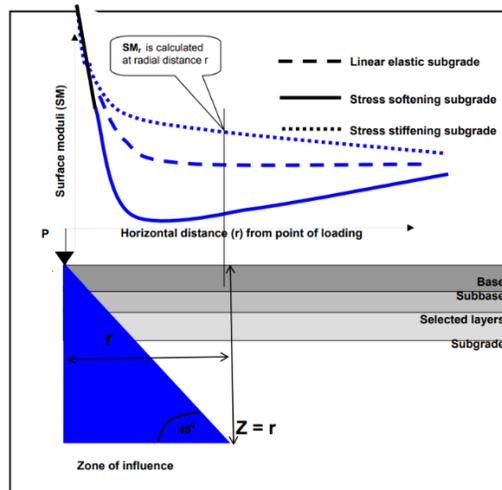
$\nu$ : Λόγος Poisson

$\sigma_0$ : Πίεση επαφής στο κέντρο του κυκλικού δίσκου φόρτισης (MPa)

$a$ : Ακτίνα κυκλικού δίσκου φόρτισης (mm, inches)

$r$ : Απόσταση από το κέντρο του κυκλικού δίσκου φόρτισης (mm, inches)

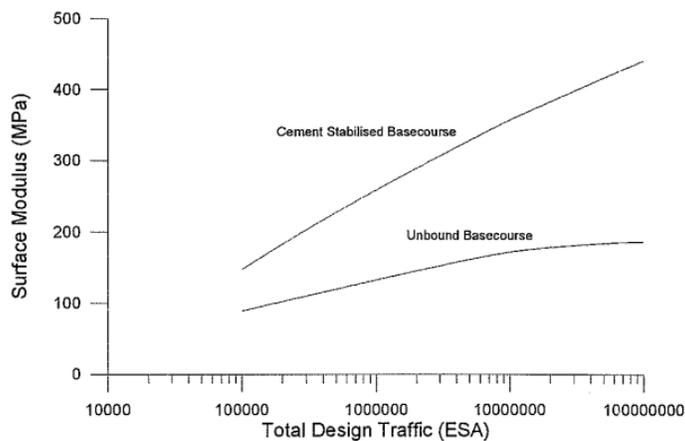
$d_r$ : Ελαστική υποχώρηση σε απόσταση  $r$  (mm, inches)



Εικόνα 3.12 Ζώνη επιρροής

(Horak, 2007)

Επειδή το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από το λογισμικό που υποστηρίζει τις μετρήσεις, η παράμετρος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκολύνει την αξιολόγηση του δικτύου συνολικά. Η δομική αξιολόγηση γίνεται κάνοντας χρήση της (Εικ.3.13). Εισάγοντας ως δεδομένο τον κυκλοφοριακό φόρτο εκφρασμένο σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες ΙΤΑ (ESA: Equivalent Standard Axle load) και με βάση τις καμπύλες και το είδος της βάσης της διατομής (ασύνδετο υλικό ή σταθεροποιημένο) υπολογίζεται το επιθυμητό  $E_0$ , το οποίο συγκρίνεται με το  $E_0$  που υπολογίζεται από τις δοκιμές FWD. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που προκύπτει από την γνώση της δομικής επάρκειας είναι σε περιπτώσεις όπου οι δοκιμές γίνονται ανά 100 ή 200 m. Έτσι όταν εντοπίζονται δομικά ασθενή σημεία από το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus  $E_0$ , η δοκιμή μπορεί να αναπροσαρμοστεί σε νέες πυκνότερες αποστάσεις, ώστε να προσδιοριστεί όσο καλύτερα γίνεται το αδύναμο τμήμα του οδοστρώματος (Tonkin & Taylor Ltd, 1998).



**Εικόνα 3.13 Υπολογισμός επιθυμητού  $E_0$**

(Tonkin & Taylor Ltd, 1998)

# 4. Διερεύνηση συσχέτισης δεικτών και πειραματική διαδικασία

## 4.1 Διατύπωση προβλήματος

Οι φθορές ενός οδοστρώματος κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες: τις λειτουργικές και τις δομικές. Η λειτουργική ικανότητα ενός οδοστρώματος αφορά στην ικανότητα του να παρέχει άνεση και ασφάλεια στους χρήστες της οδού, ενώ η δομική ικανότητα αφορά στην επάρκεια του οδοστρώματος να παραλαμβάνει με ασφάλεια τα φορτία που το καταπονούν.

Οι περισσότερες έρευνες δίνουν έμφαση στην επίτευξη συσχέτισης μεταξύ του δείκτη ομαλότητας (IRI) και του δείκτη συνολικής κατάστασης οδοστρώματος PCI (Pavement Condition Index), ο οποίος προκύπτει κυρίως με βάση τις επιφανειακές φθορές. Η σχέση που επιτεύχθηκε είχε αρχικά υιοθετηθεί κυρίως από τα πρότυπα ASTM για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Αργότερα, η χρήση του επεκτάθηκε και σε οδοστρώματα οδών.

Γενικότερα η δομική κατάσταση του οδοστρώματος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εκτίμηση της υγείας του αλλά και επηρεάζει τον τρόπο διαχείρισης του σε επίπεδο δικτύου και έργου. Όμως, ο δείκτης PCI δεν λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικά από τη μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος. Γι' αυτό και είναι αναγκαία η χρήση εξειδικευμένων συστημάτων όπως του FWD.

Από την άλλη πλευρά, παράγοντες όπως το κόστος συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, η ανάγκη ρυθμιστικών μέτρων για τον έλεγχο της κυκλοφορίας λόγω της ανάγκης για ολιγόλεπτη στάση του μηχανήματος στις θέσεις ελέγχου και τυχόν προβλήματα ασφάλειας του προσωπικού που συμμετέχει στις μετρήσεις, δυσχεραίνουν την διενέργεια συστηματικών μετρήσεων δομικού χαρακτήρα.

Με γνώμονα αυτούς τους παράγοντες, η επιστημονική κοινότητα στράφηκε στην εναλλακτική αξιολόγηση των οδοστρωμάτων με δείκτες που προκύπτουν μεν από μη καταστρεπτικές δοκιμές, αλλά γίνονται με μικρότερο κόστος και σε υψηλότερες ταχύτητες από αυτές των FWD,

χωρίς ως εκ τούτου να προκαλείται όχληση της κυκλοφορίας. Σε αυτό το επίπεδο λοιπόν, έχει εξεταστεί διαχρονικά η συσχέτιση του δείκτη κατάστασης εκφρασμένης μέσω του δομικού αριθμού SN (Structural Number), ή του δείκτη παρούσας εξυπηρευτικότητας PSR ( Pavement Serviceability Rating), με τον δείκτη ομαλότητας IRI και τον δείκτη ποιότητας κύλισης RQI (Ride Quality Index) (Mansour & Shahni, 2019) .

Συναφής έρευνα από τον (Wu, Zhang, & Abadie, 2013) κατέληξε στην δημιουργία μιας γραμμικής εξίσωσης για την πρόβλεψη του δομικού συντελεστή των ασφαλτικών στρώσεων με βάση την ομαλότητα, το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων και των υποχωρήσεων της επιφάνειας κατά μήκος των τροχοαυλακώσεων. Αν και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, δεν ήταν επαρκή για την γενίκευση της σχέσης για την αξιολόγηση των στρώσεων βάσης, υπόβασης και έδρασης. Ακόμη θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο πρόβλεψης εγκάρσιες, διαμήκεις και αλιγατορικές ρωγμές. Επομένως, η επέκταση της αναπτυχθείσας σχέσης για περιοχές με πληθώρα επιφανειακών φθορών κρίνεται αμφισβητήσιμη.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ η σύνδεση μεταξύ των κυματισμών της επιφάνειας και της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος μοιάζει αμφίδρομη, διαπιστώνεται ότι η δημιουργία ενός ποσοτικού μοντέλου σύνδεσης δύο ειδών δεικτών είναι εν γένει δύσκολη. Υπό το πρίσμα αυτό, διαμορφώθηκε και ο άξονας διερεύνησης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## **4.2 Πειραματικά οδοστρώματα**

Με δεδομένα τα όσα αναφέρθηκαν στα ανωτέρω, για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκαν δυο πειραματικά εύκαμπτα οδοστρώματα υπεραστικών οδών και αντλήθηκαν συναφή στοιχεία από την βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Τα στοιχεία αφορούσαν στο πειραματικό οδόστρωμα Α που μελετήθηκε στην μια κατεύθυνση σε μήκος έκτασης 6km για 4 έτη( 2012,2015,2018,2021) ως προς την ομαλότητα και τη δομική κατάσταση και στο πειραματικό οδόστρωμα Β που μελετήθηκε και στις 2 κατευθύνσεις Β1 και Β2 σε εξεταζόμενο μήκος 2km για 8 έτη (2012,2014-2016,2018-2021). Στις παρακάτω εικόνες

παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διατομές αναφοράς των οδοστρωμάτων που διερευνήθηκαν (Εικ.4.1-4.3).



**Εικόνα 4.1 Διατομή πειραματικού οδοστρώματος Α**



*Εικόνα 4.2 Διατομή πειραματικού οδοστρώματος B1*



*Εικόνα 4.3 Διατομή πειραματικού οδοστρώματος B2*

Σημειώνεται ότι τα εικονιζόμενα πάχη είναι οι μέσοι όροι των παχών που προέκυψαν από τις μετρήσεις στρωματογραφίας με το σύστημα γεωραντάρ GPR του ΕΜΠ.

### 4.3 Στοιχεία ομαλότητας

Για την παρούσα διπλωματικής εργασία αξιοποιήθηκαν δεδομένα ομαλότητας από την τράπεζα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις ομαλότητας έγιναν με το σύστημα του Road Surface Profilometer του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (Εικ.4.4). Τα προφιλόμετρα RSP (Dynatest, 2010) λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και είναι ιδανικά για την καταγραφή των κυματισμών της επιφάνειας μεγάλου μήκους οδικών τμημάτων. Αποτελούνται από μια δοκό μήκους 3,2m στην οποία είναι ενσωματωμένοι επτά αισθητήρες λέιζερ σε απόσταση περίπου 30cm από την επιφάνεια του οδοστρώματος, ένα οδόμετρο και ένα επιταχυνσιόμετρο.



*Εικόνα 4.4 Προφιλόμετρο RSP του εργαστηρίου οδοποιίας του Ε.Μ.Π*

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις είναι τα εξής:

- Η κατακόρυφη επιτάχυνση της δοκού (με το υπόψη σύστημα)
- Η κατακόρυφη μετατόπιση του οχήματος
- Ο χρόνος και η απόσταση που καταγράφονται οι δυο προαναφερόμενες παράμετροι

Γενικά, τα προφιλόμετρα RSP είναι ιδανικά για την απεικόνιση του πραγματικού προφίλ της επιφάνειας. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται και για τα δύο ίχνη των τροχών κατά μήκος της εξεταζόμενης λωρίδας κυκλοφορίας. Οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες παρέχουν την κατακόρυφη κίνηση της δοκού, η οποία προκύπτει από την επαφή με τις ατέλειες στην επιφάνεια του οδοστρώματος αλλά και παρέχουν μια αποτύπωση της κατατομής της επιφάνειας.

Γνωρίζοντας την κατακόρυφη επιτάχυνση σε κάθε σημείο του προφίλ υπολογίζεται η εκάστοτε κατακόρυφη θέση. Έχοντας την κατακόρυφη θέση και μετατόπιση της δοκού κατασκευάζεται η κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος. Τα δεδομένα συλλέγονται και αποθηκεύονται σε ένα ειδικό Η/Υ που βρίσκεται εσωτερικά του οχήματος. Στον Πιν.4.1 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις και αφορούν στο δεξί ίχνος τροχού (Right wheel path, RWP).

**Πίνακας 4.1 Απόσπασμα μετρήσεων ομαλότητας**

chainage	2012/RWP	2015/RWP	2018/RWP	2021/RWP
15	0,64	0,58	1,39	0,91
14,99	0,85	0,7	0,87	0,57
14,98	0,88	0,92	0,73	1,29
14,97	0,72	0,74	1,26	1
14,96	0,69	0,91	0,68	0,86
14,95	0,82	1,08	0,56	1,32
14,94	1,09	1,02	1,11	0,76
14,93	1,36	1,34	0,86	1,11
14,92	0,88	0,85	1,36	1,49
14,91	0,73	0,83	1,58	0,72
14,9	1,12	1	0,81	1,59
14,89	0,46	0,59	1	0,74
14,88	0,96	0,86	0,98	0,63
14,87	0,95	1,33	0,39	1,19
14,86	0,91	0,92	1,03	0,74
14,85	0,75	0,72	0,84	1,03
14,84	0,94	1,14	1,06	0,73
14,83	1,08	1,21	0,73	0,96
14,82	1,04	0,9	1,07	1,01
14,81	0,82	0,94	1,03	0,85

#### **4.4 Στοιχεία δομικής κατάστασης**

Για την δομική αξιολόγηση των πειραματικών οδοστρωμάτων έγινε χρήση του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD) του Εργαστηρίου Οδοποιΐας του Ε.Μ.Π (Εικ.4.5). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο δεξί ίχνος της δεξιάς λωρίδας (βαρέα οχήματα) ανά 200m.

Το παραμορφωσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 9 γεώφωνα. Η φόρτιση του οδοστρώματος που προκύπτει από την πρόσκρουση του παλμικού φορτίου, προκαλεί υποχωρήσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος που προσομοιάζουν τις υποχωρήσεις που προκύπτουν από τη διέλευση των τροχών κατά την κίνηση του οχήματος, οι οποίες καταγράφονται από τους εννέα αισθητήρες. Για κάθε σημείο δοκιμής καταγράφονται επιπλέον

το μέγεθος του φορτίου κρούσης που διαφέρει ελάχιστα από το φορτίο αναφοράς. Ακόμη καταγράφονται οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον αέρα και στην επιφάνεια του. Στον Πιν.4.2 παρατίθενται ένα απόσπασμα των μετρήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το FWD.



*Εικόνα 4.5 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους του Ε.Μ.Π*

Παράλληλα με τα ως άνω στοιχεία, αντλήθηκαν επιπλέον τα πάχη των στρώσεων από στοιχεία συλλογής με το GPR και θερμοκρασιακές καταγραφές που έγιναν από το εσωτερικό του οδοστρώματος και συγκεκριμένα στο μέσον της ασφαλτικής βάσης μέσω της διάνοιξης οπών στο σώμα του οδοστρώματος.

**Πίνακας 4.2 Απόσπασμα μετρήσεων ελαστικών υποχωρήσεων οδοστρώματος**

year	chainage	Stress	Force	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Temp	AC (mm)	BASE (mm)
2021	15	709,00	50,14	42,70	30,65	26,30	19,85	14,20	8,20	5,25	3,75	3,55	15,1	220	247
2021	14,8	706,00	49,87	47,70	37,70	31,90	24,40	18,90	11,70	7,60	5,80	4,60	15,1	215	258
2021	14,6	709,00	50,10	49,60	39,80	33,30	25,50	19,80	12,00	7,80	5,80	4,70	15,1	242	264
2021	14,4	709,00	50,11	49,35	38,40	32,10	24,45	18,65	11,20	7,40	5,40	4,45	15,1	235	276
2021	14,2	709,00	50,12	49,10	37,00	30,90	23,40	17,50	10,40	7,00	5,00	4,20	15,1	227	288
2021	14	706,00	49,89	42,40	32,40	27,20	19,90	14,00	7,30	3,90	2,60	1,80	15,2	210	272
2021	13,8	707,00	49,94	53,50	41,20	34,50	25,70	19,80	11,10	6,50	4,40	3,50	15,2	231	274
2021	13,6	707,00	49,97	53,30	40,20	33,00	25,90	19,70	11,40	7,20	4,60	4,50	15,2	205	265
2021	13,4	709,00	50,10	45,40	34,40	29,10	21,80	16,00	8,80	5,80	4,40	3,90	15,2	223	261
2021	13,2	709,00	50,14	54,30	43,80	37,40	28,50	21,60	12,20	6,80	4,50	3,20	15,2	225	264
2021	13	710,00	50,19	44,50	36,20	30,20	23,20	18,20	11,00	8,10	6,40	4,40	15,2	237	279
2021	12,8	710,00	50,21	35,80	28,20	23,00	17,20	12,90	7,80	6,10	3,60	3,40	15,2	240	263
2021	12,6	709,00	50,12	54,30	42,10	34,70	25,60	18,60	9,40	4,80	3,00	2,20	15,2	213	245
2021	12,4	706,00	49,89	62,20	52,60	45,50	36,50	28,80	17,80	11,50	7,90	6,00	15,2	227	279
2021	12,2	709,00	50,14	55,40	45,50	38,60	29,20	21,90	12,30	7,30	5,10	3,90	15,2	236	277
2021	12	711,00	50,26	38,00	29,40	24,00	17,40	12,40	6,80	4,40	3,60	3,20	15,2	189	267
2021	10,4	709,00	50,10	55,60	44,50	37,50	28,80	22,20	13,40	8,80	6,90	5,80	15,2	208	253
2021	10,2	708,00	50,07	58,50	47,50	41,10	32,70	25,70	16,40	10,90	8,10	6,20	15,2	216	262
2021	10	707,00	50,02	54,30	42,17	35,50	27,83	21,50	14,00	10,77	7,77	6,07	15,2	211	253
2021	9,8	706,00	49,87	62,20	49,70	41,70	31,60	23,10	13,90	9,40	7,70	5,40	15,2	201	266
2021	9,6	709,00	50,08	60,00	48,50	41,10	31,50	24,40	14,20	8,50	5,80	4,50	15,3	189	243
2021	9,4	710,50	50,20	48,90	39,50	34,50	27,75	19,15	13,75	10,00	6,60	4,95	15,3	198	252
2021	9,2	712,00	50,31	52,60	42,50	36,70	29,00	20,90	13,90	9,50	7,40	5,40	15,3	206	261
2021	9	707,00	49,96	60,50	47,90	40,60	31,10	25,00	15,50	10,40	7,40	5,10	15,3	238	255
2021	8,8	709,00	50,10	59,50	47,50	39,20	28,30	20,80	11,70	6,60	7,30	3,70	15,3	214	267
2021	8,6	706,00	49,89	43,60	32,10	26,10	18,50	12,70	6,50	3,70	2,80	2,50	15,3	217	258

# 5. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

## 5.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ερευνήθηκαν δύο πειραματικά εύκαμπτα οδοστρώματα υπεραστικών οδών. Σε πρώτο στάδιο μελετήθηκε το οδόστρωμα Α ως προς την ομαλότητα και τη δομική κατάσταση και ύστερα τα οδοστρώματα Β1 και Β2. Αρχικά από τις δυο λωρίδες κυκλοφορίας επιλέχθηκε το δεξί ίχνος της δεξιάς λωρίδα και χωρίστηκαν οι μετρήσεις ανά έτος. Εν συνεχεία επιλέχθηκε μια χαρακτηριστική τιμή ομαλότητας για το εκάστοτε σημείο όπου έγινε έλεγχος με το FWD και διαχωρίστηκαν οι μετρήσεις σε υποτμήματα για κάθε έτος. Για το σύνολο των σημείων ελέγχθηκε η συσχέτιση της ομαλότητας με τους δείκτες δομικής κατάστασης στα αντίστοιχα υποτμήματα.

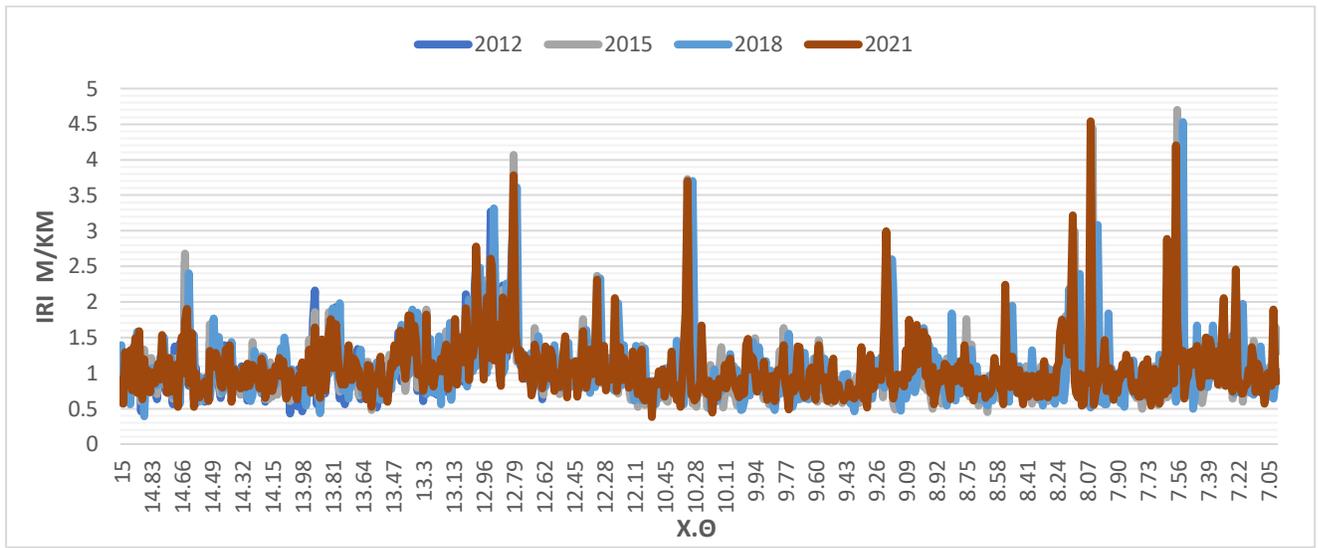
Η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων έγινε με την εξής διαδικασία:

- Εύρεση χαρακτηριστικών τιμών IRI και υπολογισμός δεικτών ελαστικών υποχωρήσεων,
- Συσχέτιση δεικτών και υπολογισμός του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ ,
- Ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης δεικτών δομικής κατάστασης,
- Έλεγχος ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης,
- Καταγραφή σχολίων και συμπερασμάτων που απορρέουν από την ερευνητική ανάλυση.

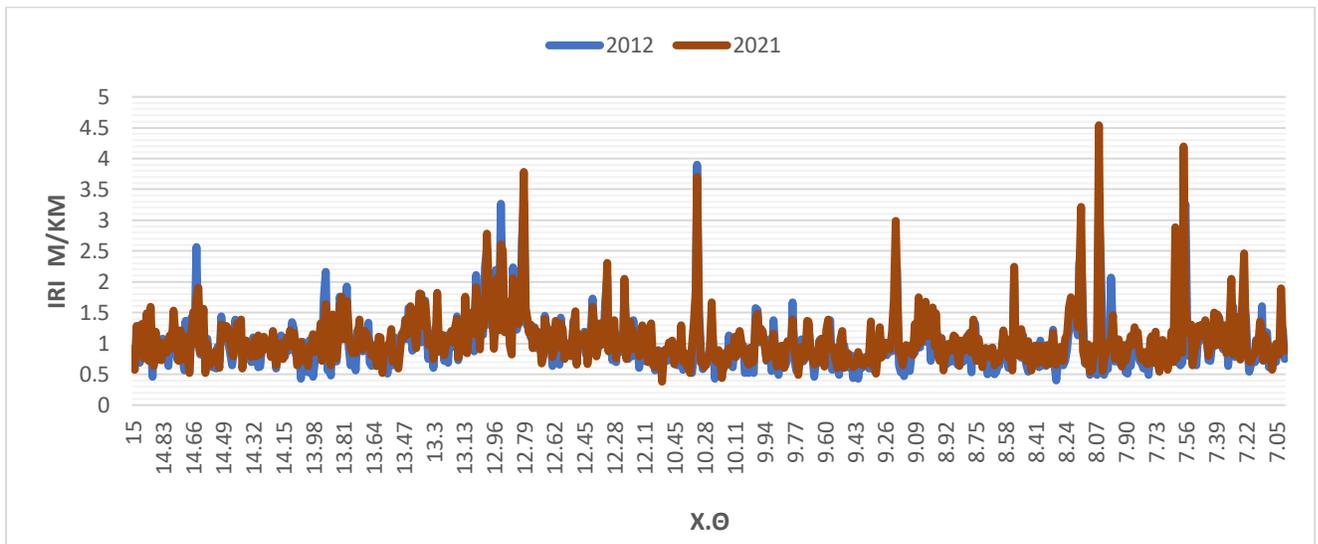
## 5.2 Περιγραφή κατά μήκος ομαλότητας

Αρχικά με στόχο την αποτύπωση της ομαλότητας κατά μήκος της κατατομής της επιφάνειας κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις τιμές του δείκτη IRI όπως καταγράφηκαν από το προφιλόμετρο RSP συναρτήσεως του εξεταζόμενου μήκους. Στις Εικ.5.1,

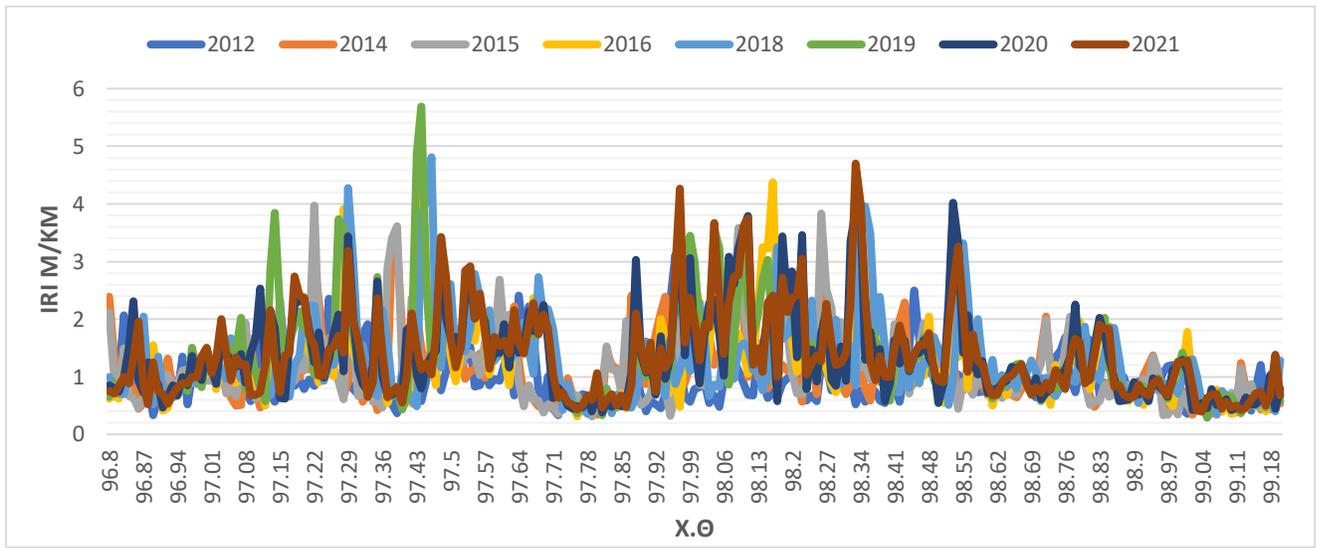
5.3 και 5.5 παρουσιάζεται το προφίλ για όλα τα έτη όλων των πειραματικών οδοστρωμάτων (A,B1,B2), ενώ στις Εικ.5.2, 5.4 και 5.6 για τα έτη 2012&2021. Συγκεκριμένα η αύξηση των τιμών του δείκτη IRI στις Εικ.5.3-5.4 ,σε ορισμένες περιοχές υποδηλώνει την επιδείνωση του οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου, αναφορικά με το επίπεδο ομαλότητας.



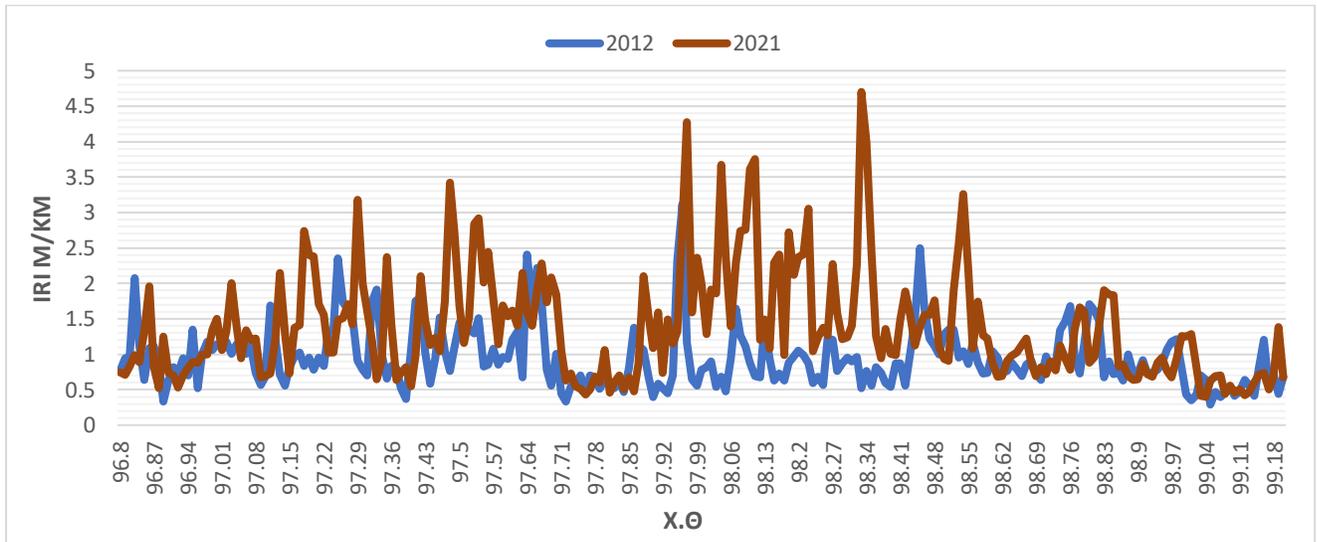
*Εικόνα 5.1 Κατά μήκος ομαλότητα -οδόςτρωμα Α*



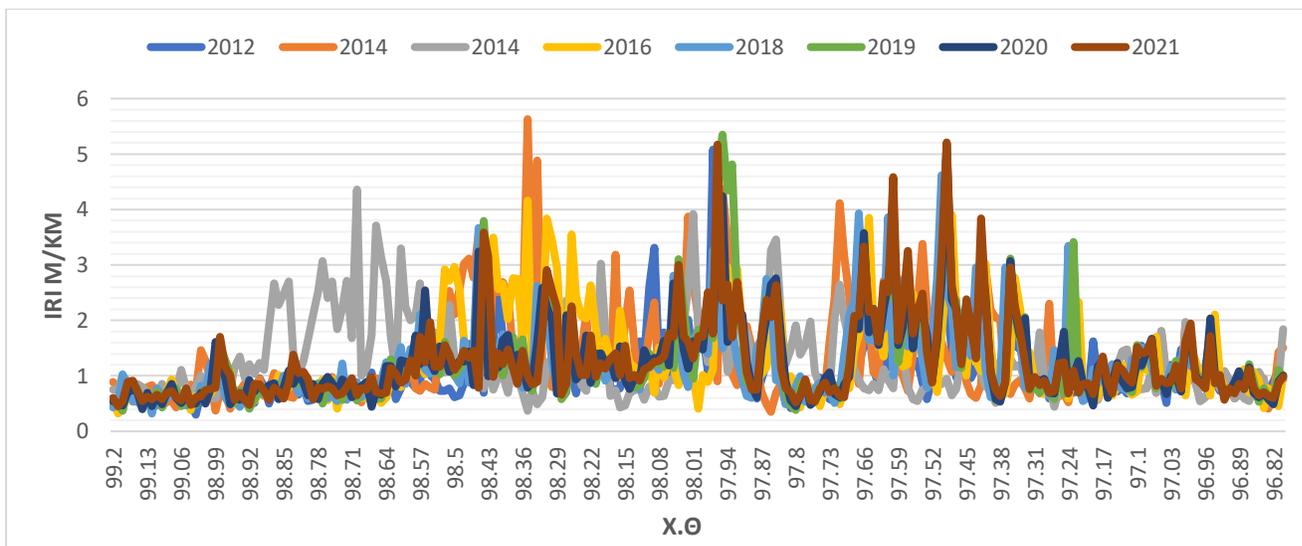
*Εικόνα 5.2 Κατά μήκος ομαλότητα-οδόςτρωμα Α- 2012 και 2021*



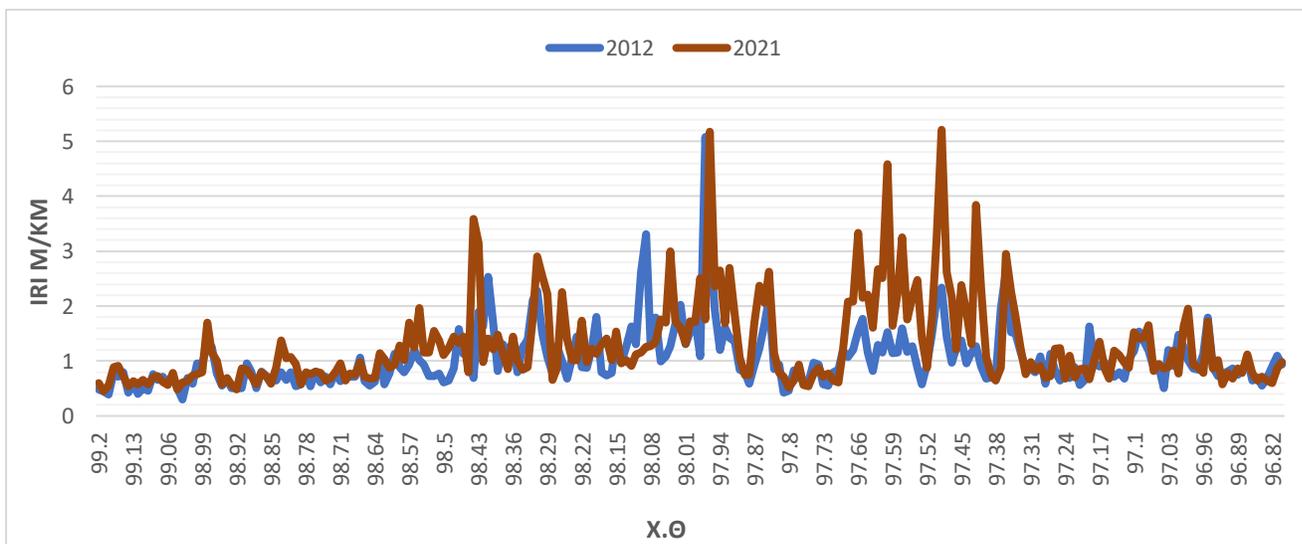
**Εικόνα 5.3 Κατά μήκος ομαλότητα-οδόστρωμα- Β1**



**Εικόνα 5.4 Κατά μήκος ομαλότητα-οδόστρωμα Β1- 2012 και 2021**



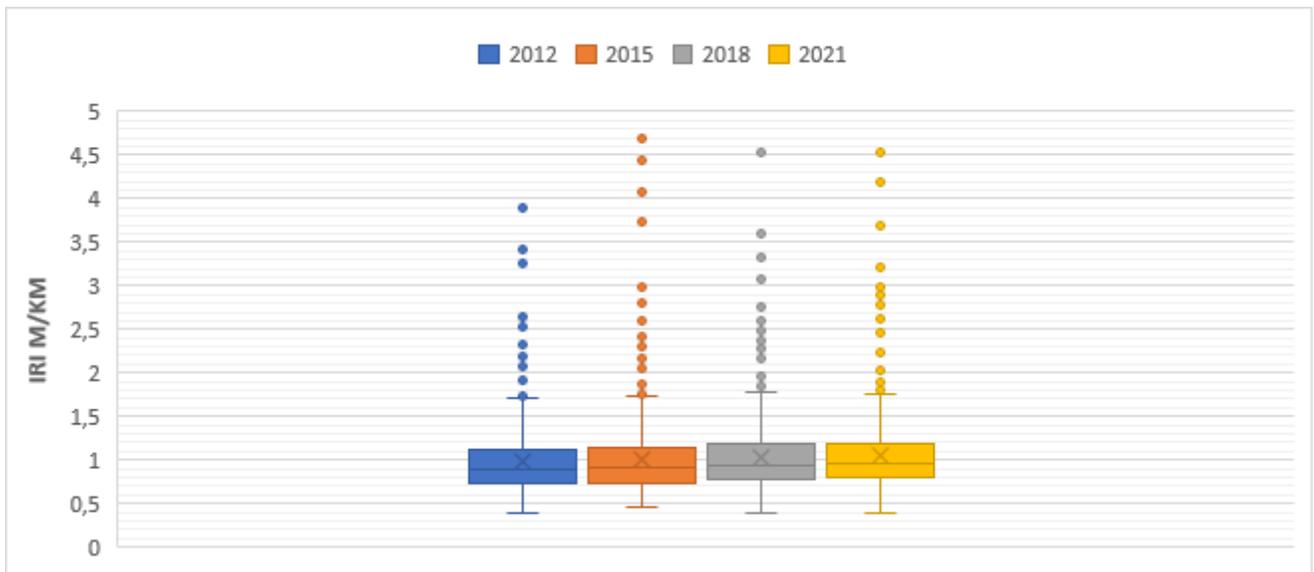
**Εικόνα 5.5 Κατά μήκος ομαλότητα-οδόστρωμα Β2**



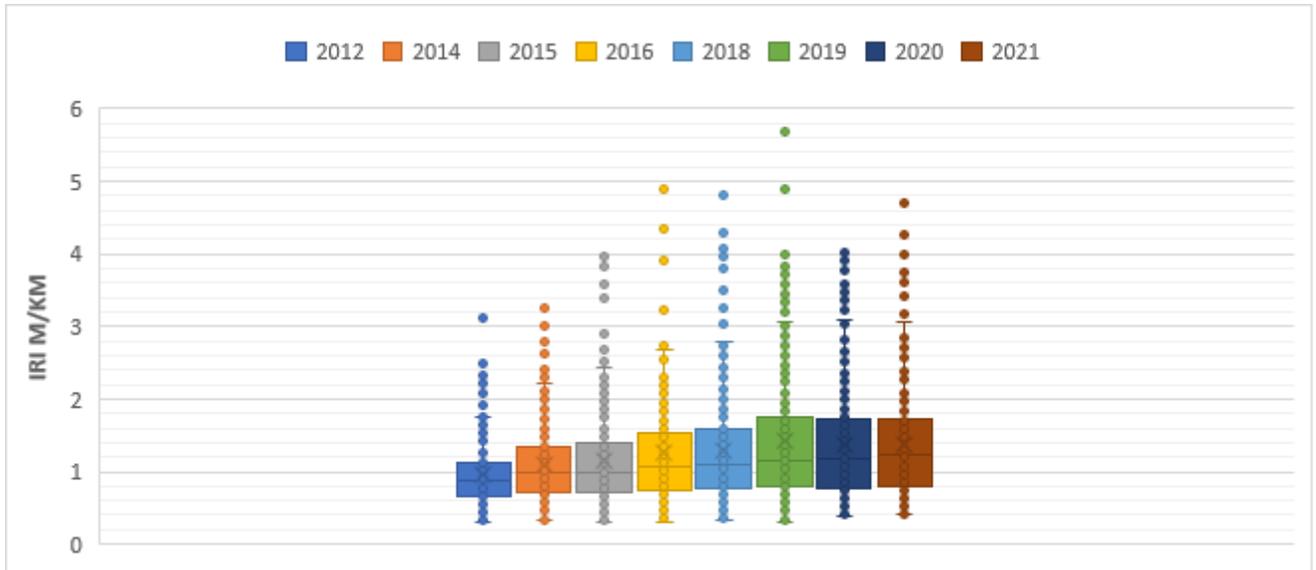
**Εικόνα 5.6 Κατά μήκος ομαλότητα-οδόστρωμα Β2- 2012 και 2021**

Για την καλύτερη ανάλυση των στοιχείων αλλά και με στόχο την απόκτηση μιας γενικής εικόνας για την ομοιογένεια των μετρήσεων, οι τιμές των δεικτών που υπολογίστηκαν μέσω του ειδικού λογισμικού τοποθετούνται για κάθε έτος σε θηκογράμματα (boxplots). Τα θηκογράμματα είναι ένας τρόπος γραφικής απεικόνισης πέντε αριθμητικών δεδομένων μίας σειράς παρατηρήσεων Q: της μικρότερης τιμής (min), του πρώτου τεταρτημόριου (Q1), της διαμέσου (median), του τρίτου τεταρτημόριου (Q3), και της μέγιστης τιμής (max). Οι αποστάσεις μεταξύ των διαφορών των τμημάτων των θηκογραμμάτων υποδεικνύουν το μέγεθος της διασποράς των δειγμάτων και την ασυμμετρία της κατανομής που ακολουθούν τα δεδομένα.

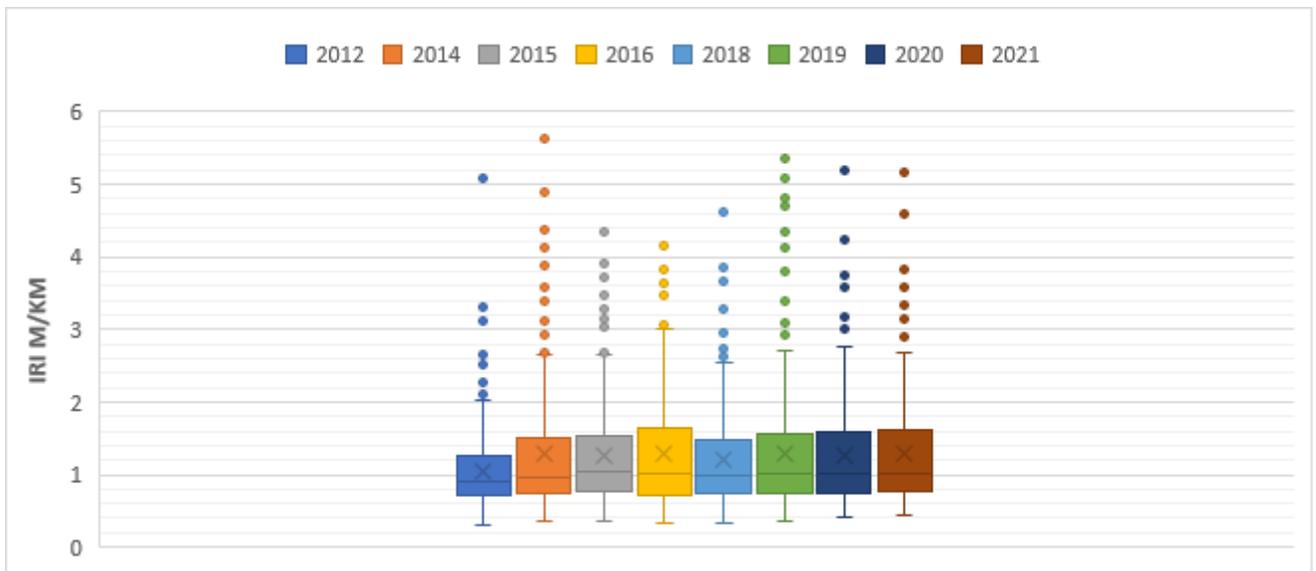
Στην Εικ.5.7 κατασκευάζοντας το θηκογράμμα για το οδόστρωμα Α παρατηρείται μια καλή ομοιογένεια στο σύνολό του για όλα τα εξεταζόμενα έτη. Επιπλέον είναι ευδιάκριτο ότι και τα δύο δείγματα έχουν αρκετές ακραίες τιμές για όλα τα έτη οπότε τα δύο οριζόντια άκρα των διαγραμμάτων (whiskers) ορίζονται από τιμές  $Q \pm 1.5IQR$  όπου  $IQR=Q3-Q1$ . Ωστόσο, στις Εικ.5.8-5.9 απεικονίζονται τα θηκογράμματα των οδοστρωμάτων Β1 και Β2 αντίστοιχα και για τα 8 έτη με τα οποία καθίσταται εμφανές ότι και τα δυο δείγματα παρουσιάζουν σημαντική ετερογένεια.



Εικόνα 5.7 Θηκογράμμα τιμών IRI-Οδοστρώματος Α



Εικόνα 5.8 Θηκόγραμμα τιμών IRI-Οδοστρώματος Β1



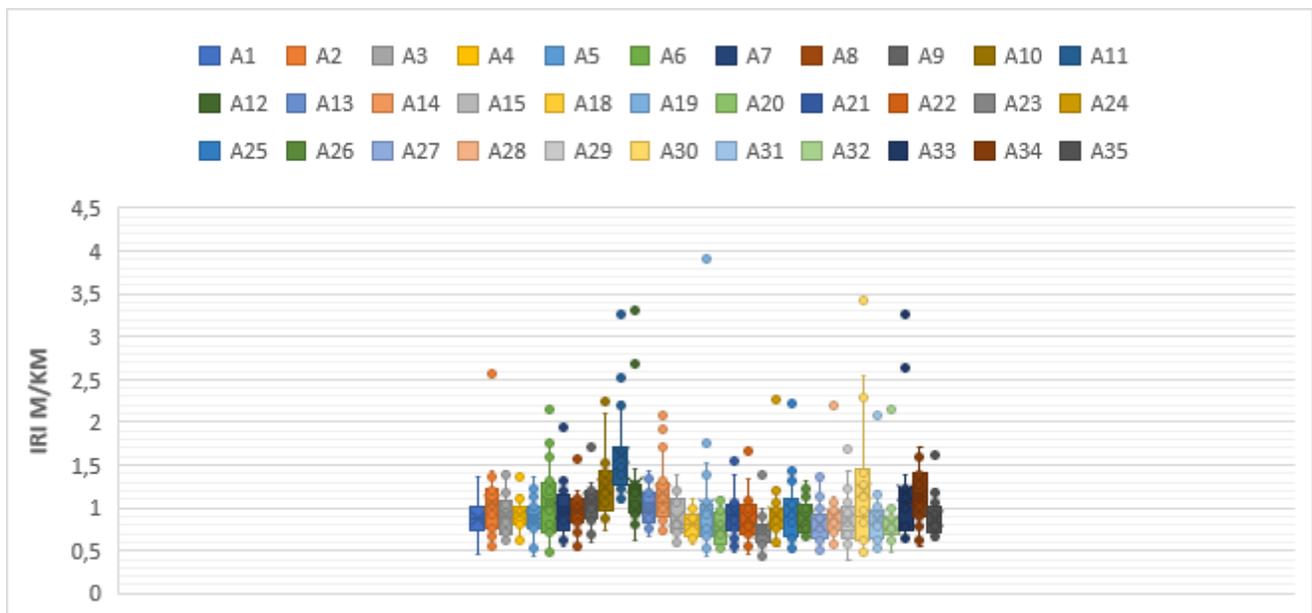
Εικόνα 5.9 Θηκόγραμμα τιμών IRI- Οδοστρώματος Β2

Με την πάροδο των ετών παρουσιάζεται μια επιδείνωση της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα στην Εικ.5.8 παρατηρούνται μεγαλύτερα μήκη θηκογραμμάτων άρα υπάρχει μεγαλύτερη μεταβλητότητα στο δείγμα. Ακόμη παρατηρείται στην Εικ.5.9 του

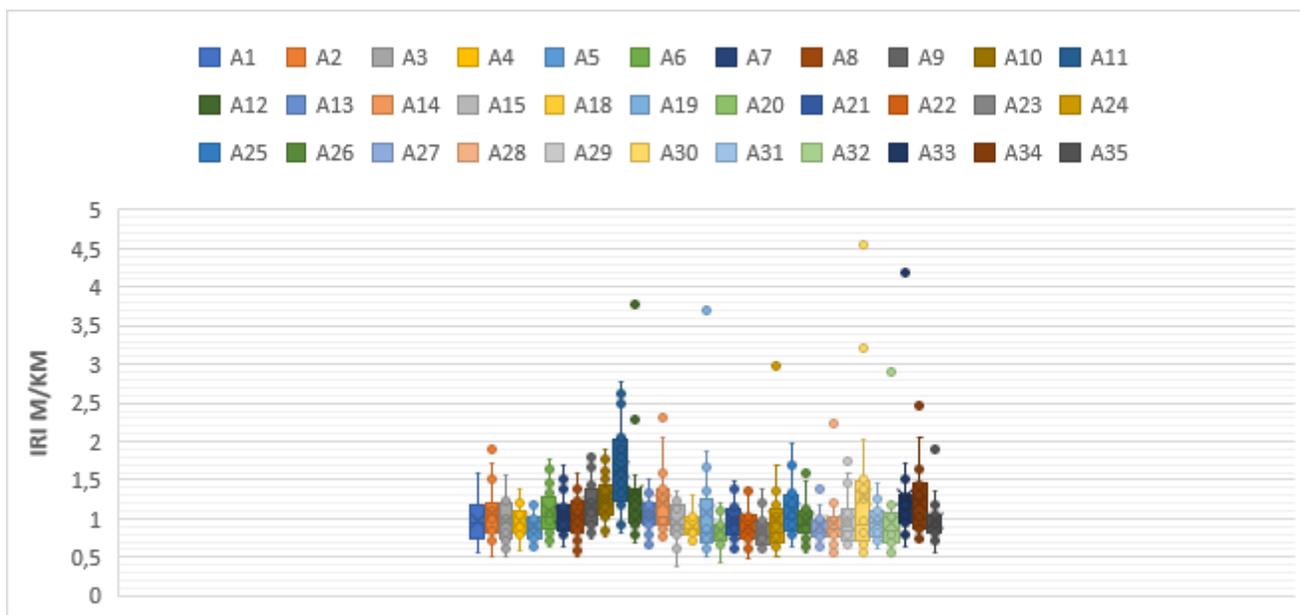
οδοστρώματος B2, μείωση των τιμών τα έτη 2015,2018,2020 φαινόμενο που δύναται να οφείλεται σε τυχόν ενδιάμεσες επεμβάσεις συντήρησης στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

### 5.3 Διαχωρισμός τμημάτων

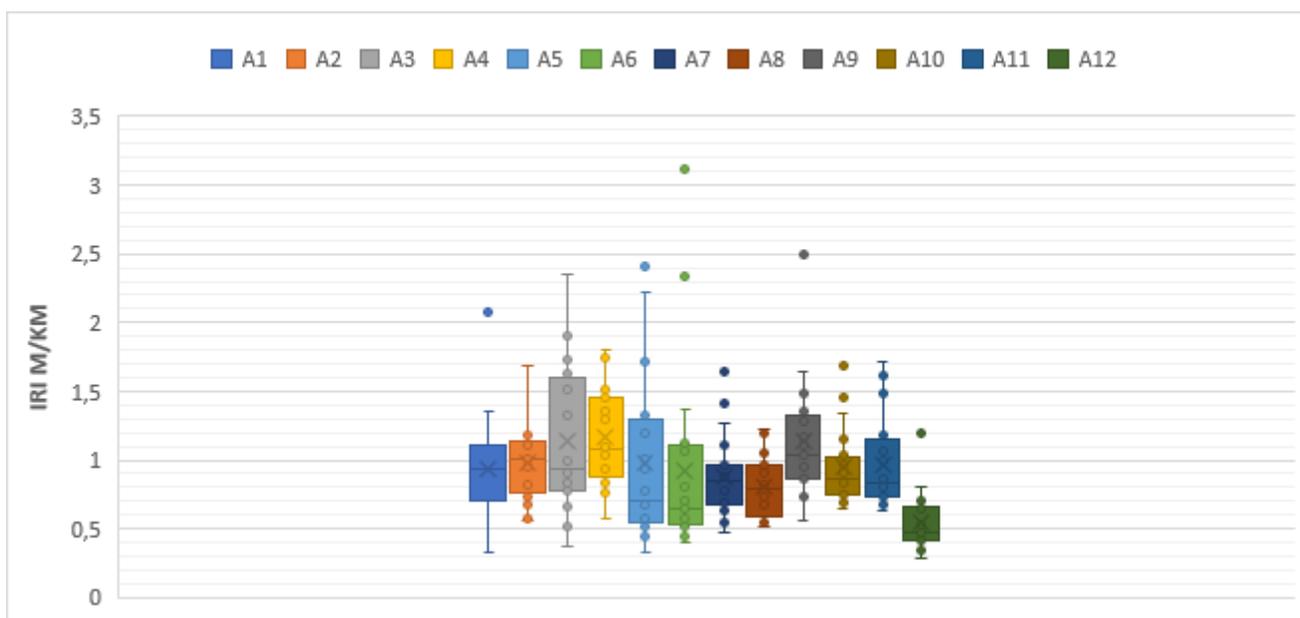
Έχοντας ως γνώμονα την διερεύνηση αλληλεπίδρασης μεταξύ των δεικτών IRI και των ελαστικών υποχωρήσεων των οδοστρωμάτων επιχειρήθηκε ο διαχωρισμός του μήκους του οδοστρώματος σε υπότμήματα. Τα υπότμήματα χωρίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να ομαδοποιούνται οι τιμές του δείκτη ανά 200 m και να υπολογίζεται μια χαρακτηριστική τιμή του δείκτη IRI η οποία αντιπροσωπεύει την θέση των δοκιμών FWD. Προφανώς δεν είναι εφικτό να παράγουμε μετρήσεις ανά 10m για τις ελαστικές υποχωρήσεις ώστε να συμπίπτουν με τις θέσεις των μετρήσεων ομαλότητας του δείκτη IRI. Ακολούθως δημιουργήθηκαν 35 τμήματα όπως απεικονίζεται ενδεικτικά στις Εικ.5.10.-5.11 για τα έτη 2012&2021 για το πειραματικό οδόστρωμα A και 12 για τις δύο κατευθύνσεις B1 και B2 του οδοστρώματος B, όπως φαίνεται στις Εικ.5.12-5.15. Παρατηρείται με το διαχωρισμό αυτό ότι σε ορισμένα υποτμήματα (π.χ A11) αυξάνεται η διασπορά από το έτος 2012 στο 2021, γεγονός που μπορεί να δείξει μεταβαλλόμενο ρυθμό επιδείνωσης της ομαλότητας μεταξύ των επί μέρους υποτμημάτων.



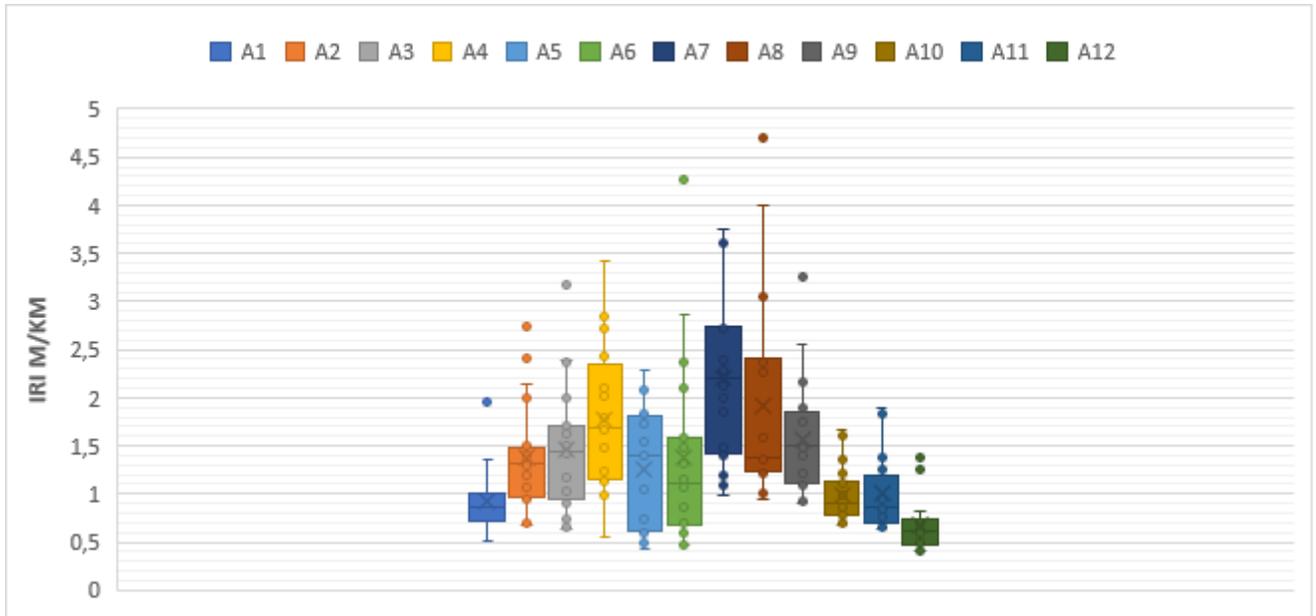
Εικόνα 5.10 Υποτμήματα-Οδοστρώματος A-2012



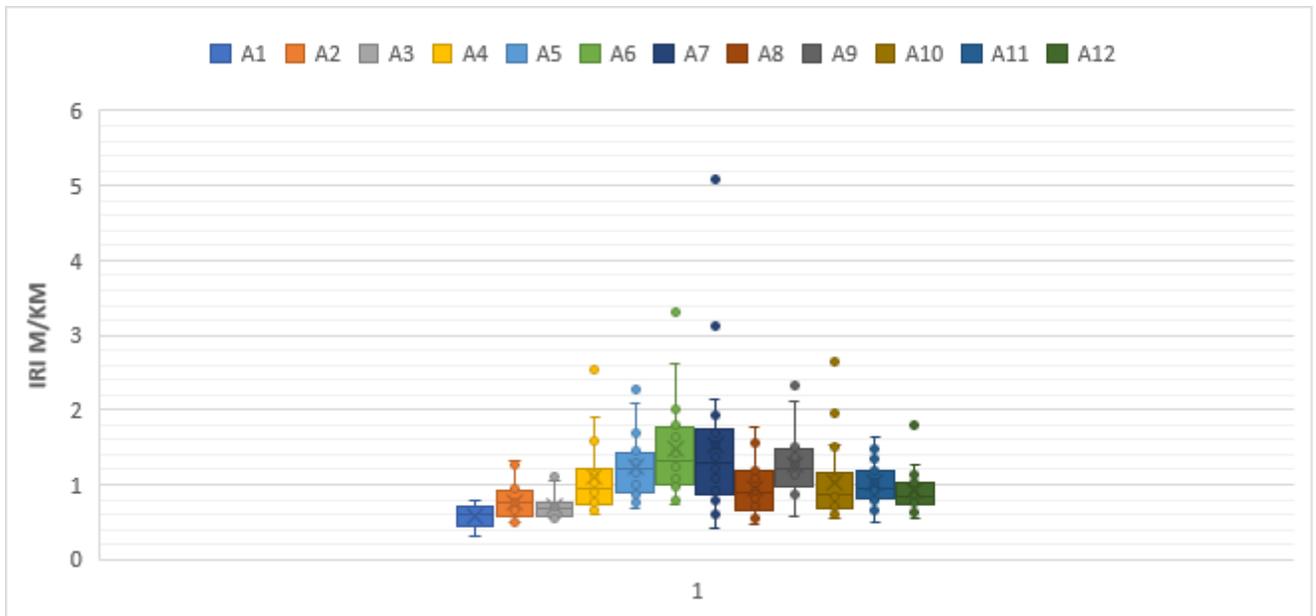
Εικόνα 5.11 Υποτμήματα-Οδοστρώματος Α-2021



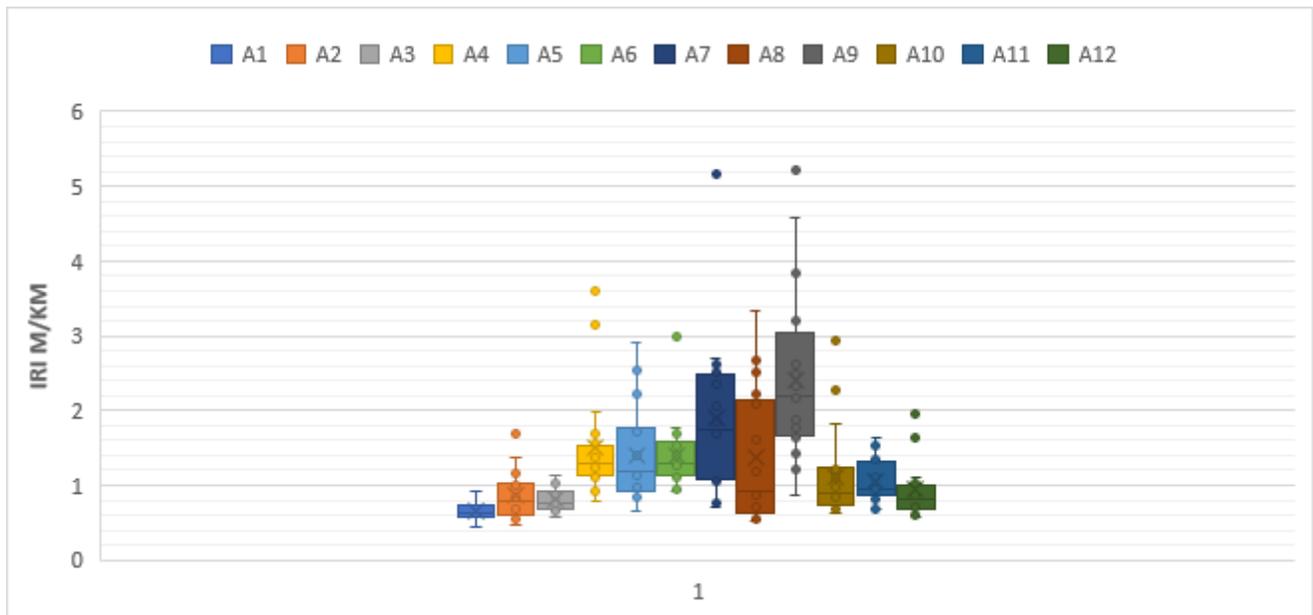
Εικόνα 5.12 Υποτμήματα-Οδοστρώματος Β1-2012



Εικόνα 5.13 Υποτιμήματα-Οδοστρώματος Β1-2021



Εικόνα 5.14 Υποτιμήματα-Οδοστρώματος Β2-2012



Εικόνα 5.15 Υποτμήματα-Οδοστρώματος B2-2021

#### 5.4 Εκτίμηση χαρακτηριστικών τιμών ομαλότητας

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το οδόστρωμα A αλλά και τα οδοστρώματα B1 και B2 εμφανίζουν ανομοιογένεια. Ακολούθως για την εκτίμηση μιας χαρακτηριστικής τιμής ομαλότητας κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή μεταβλητότητας. Ο συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation- CV) είναι ένας δείκτης διασποράς, ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ομοιογένεια των τιμών μιας ποσοτικής μεταβλητής. Πρόκειται για έναν «καθαρό» αριθμό, ο οποίος όσο μεγαλύτερες τιμές καταλαμβάνει τόσο αυξάνεται η μη κανονικότητα των δεδομένων.

Ύστερα και από τον διαχωρισμό των τμημάτων γίνεται ακόμη πιο εμφανής η ανομοιογένεια που παρουσιάζουν οι μετρήσεις, όχι μόνο κατά την πάροδο του χρόνου, αλλά και κατά μήκος της των υπό εξέταση οδοστρωμάτων. Κατασκευάστηκαν οι Πίν.(5.1-5.3), οι οποίοι περιέχουν τον συντελεστή μεταβλητότητας και των δύο οδοστρωμάτων. Τα δεδομένα ακολουθούν μη κανονική κατανομή εφόσον ο συντελεστής μεταβλητότητας ξεπερνάει αρκετά την ενδεικτική τιμή 10% που εκφράζει μια κανονική κατανομή. Όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν τέτοια ανομοιογένεια ο αριθμητικός μέσος όρος δεν είναι μια καλή τιμή για να περιγράψει τα

δεδομένα. Συνεπώς θα πρέπει να γίνουν κατάλληλες παραδοχές για την εκτίμηση αντιπροσωπευτικών επιπέδων ομαλότητας.

*Πίνακας 5.1 Συντελεστής μεταβλητότητας CV% για το οδόστρωμα Α*

ΥΠΟΤΜΗΜΑ/ΕΤΟΣ	2012	2015	2018	2021		2012	2015	2018	Υ2021
<b>A1</b>	23	23	30	29					
<b>A2</b>	42	42	37	33	<b>A19</b>	76	73	63	67
<b>A3</b>	28	31	35	29	<b>A20</b>	26	30	27	22
<b>A4</b>	20	22	22	19	<b>A21</b>	32	27	30	24
<b>A5</b>	27	22	24	20	<b>A22</b>	32	30	30	28
<b>A6</b>	43	36	35	29	<b>A23</b>	29	31	21	27
<b>A7</b>	33	26	30	25	<b>A24</b>	39	32	26	54
<b>A8</b>	29	27	28	28	<b>A25</b>	42	41	48	32
<b>A9</b>	27	32	28	29	<b>A26</b>	23	29	33	26
<b>A10</b>	31	23	30	24	<b>A27</b>	31	35	26	21
<b>A11</b>	34	32	35	33	<b>A28</b>	39	19	33	38
<b>A12</b>	48	53	48	50	<b>A29</b>	37	35	25	33
<b>A13</b>	26	23	19	24	<b>A30</b>	68	73	55	77
<b>A14</b>	33	32	35	35	<b>A31</b>	39	21	35	22
<b>A15</b>	28	27	35	28	<b>A32</b>	40	54	20	52
<b>A16</b>	0	0	0	0	<b>A33</b>	57	76	75	58
<b>A17</b>	0	0	0	0	<b>A34</b>	29	26	24	39
<b>A18</b>	21	24	13	20	<b>A35</b>	28	30	32	30

*Πίνακας 5.2 Συντελεστής μεταβλητότητας CV% για το οδόστρωμα Β1*

ΥΠΟΤΜΗΜΑ/ΕΤΟΣ	2012	2014	2015	2016	2018	2019	2020	2021
A1	28	43	25	31	20	28	19	30
A2	39	38	48	46	48	42	43	44
A3	54	53	53	52	46	61	65	60
A4	40	42	50	49	56	50	43	43
A5	40	51	52	45	40	41	40	48
A6	61	47	36	54	34	58	61	61
A7	64	50	41	41	52	41	46	35
A8	34	55	75	63	66	77	34	40
A9	24	32	37	35	41	43	39	39
A10	19	23	22	28	29	27	27	27
A11	30	40	44	30	22	40	42	41
A12	32	30	33	45	48	28	30	28

*Πίνακας 5.3 Συντελεστής μεταβλητότητας CV% για το οδόστρωμα Β2*

ΥΠΟΤΜΗΜΑ/ΕΤΟΣ	2012	2014	2015	2016	2018	2019	2020	2021
A1	26	36	17	22	26	23	20	19
A2	30	22	47	32	30	32	30	35
A3	23	25	38	22	34	25	25	18
A4	44	48	36	45	44	46	45	47
A5	35	65	45	39	35	41	39	45
A6	43	45	78	26	37	40	33	33
A7	68	72	38	57	51	67	50	54
A8	36	62	45	71	68	61	64	64
A9	32	50	35	44	45	46	43	46
A10	50	55	33	53	63	67	54	53
A11	30	32	32	33	26	30	31	27
A12	29	41	44	41	31	32	40	40

Ως αποτέλεσμα του υψηλού συντελεστή μεταβλητότητας σε όλα τα έτη και τμήματα έγινε μια προσπάθεια να αποτυπωθεί το προφίλ με δύο τιμές του δείκτη ομαλότητας. Για κάθε τμήμα ξεχωριστά υπολογίστηκε η μέση τιμή, η επικρατούσα τιμή, η διάμεσος και η μέγιστη τιμή όπως φαίνεται ενδεικτικά στον Πιν.5.4. Η πρώτη τιμή που επιλέχθηκε για να περιγράψει το προφίλ είναι η διάμεσος η οποία δεν επηρεάζεται από τις ακραίες τιμές, ενώ η δεύτερη τιμή προκύπτει ως  $\max\{\text{IRI } 80^{\text{th}} \text{ percentile}; \text{IRI στο σημείο που έγινε η μέτρηση FWD}\}$ . Η τιμή του δείκτη 80<sup>th</sup> percentile ουσιαστικά μας επιτρέπει να εντοπίσουμε την τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 80% των μετρήσεων και θεωρείται ότι εκφράζει τα ανώτερα επίπεδα ομαλότητας σε κάθε υπότμημα. Η θεώρηση της μέγιστη τιμής του δείκτη IRI σε κάθε υποτμήμα θα αντιπροσώπευε σε μία υπερβολικά συντηρητική παραδοχή ανάλυσης.

Πίνακας 5.4 Στατιστικά δείκτη IRI m/km του οδοστρώματος Β2

		Υ2012	Υ2014	Υ2015	Υ2016	Υ2018	Υ2019	Υ2020	Υ2021
A1	ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ	0,94	0,98	#Δ/Υ	0,62	0,84	0,75	0,85	0,83
	M.T.	0,94	1,03	0,98	0,99	0,96	0,95	0,99	0,93
	ΔΙΑΜΕΣΟΣ	0,94	0,98	0,93	0,95	0,86	0,86	0,90	0,86
	MAX	2,07	2,39	2,11	1,96	2,05	2,15	2,31	1,96
A2	E.T.	1,14	#Δ/Υ	0,93	#Δ/Υ	1,36	1,45	1,39	1,22
	M.T.	0,98	1,02	1,07	1,09	1,16	1,58	1,48	1,37
	DIAM	1,01	1,09	1,04	1,12	1,10	1,45	1,41	1,31
	MAX	1,69	1,66	1,93	2,08	2,33	3,84	2,53	2,74
A3	E.T.	0,78	#Δ/Υ	#Δ/Υ	#Δ/Υ	2,23	#Δ/Υ	#Δ/Υ	1,71
	M.T.	0,37	0,42	0,47	0,54	0,66	0,68	0,66	0,64
	DIAM	0,93	1,09	1,25	1,21	1,46	1,24	1,22	1,45
	MAX	2,35	3,35	3,97	3,91	4,28	3,73	3,44	3,18
A4	E.T.	1,45	1,76	1,85	#Δ/Υ	1,45	1,31	#Δ/Υ	#Δ/Υ
	M.T.	1,16	1,41	1,51	1,79	1,99	2,15	1,71	1,78
	DIAM	1,08	1,48	1,41	1,53	1,74	1,87	1,69	1,68
	MAX	1,80	2,09	2,36	4,88	4,81	5,69	3,40	3,42
A5	E.T.	0,67	0,66	0,40	#Δ/Υ	#Δ/Υ	#Δ/Υ	1,41	1,40
	M.T.	0,98	0,88	0,85	1,14	1,27	1,20	1,21	1,26
	DIAM	0,70	0,60	0,57	1,11	1,33	1,34	1,29	1,40
	MAX	2,41	2,22	2,68	2,36	2,73	2,23	2,24	2,28
A6	E.T.	0,61	1,20	1,13	0,48	1,17	#Δ/Υ	0,58	1,59
	M.T.	0,92	1,20	1,13	0,98	0,90	1,32	1,34	1,37
	DIAM	0,65	1,14	0,98	0,78	0,83	1,06	1,07	1,12
	MAX	3,12	2,41	2,44	2,29	1,65	3,45	3,35	4,27
A7	E.T.	0,93	1,00	0,83	2,64	#Δ/Υ	#Δ/Υ	#Δ/Υ	2,29
	M.T.	0,88	1,48	1,64	2,11	1,52	2,23	2,12	2,20
	DIAM	0,85	1,33	1,58	1,91	1,50	2,17	1,99	2,21
	MAX	1,64	2,79	3,58	4,38	3,25	3,57	3,79	3,75
A8	E.T.	0,87	1,06	1,12	1,97	#Δ/Υ	#Δ/Υ	#Δ/Υ	1,24
	M.T.	0,81	1,17	1,39	1,69	1,97	1,83	1,81	1,92
	DIAM	0,79	0,98	1,16	1,67	1,81	1,60	1,48	1,39
	MAX	1,22	2,63	3,83	4,35	3,96	3,85	3,90	4,70
A9	E.T.	0,87	0,86	#Δ/Υ	1,34	1,22	#Δ/Υ	0,89	1,55
	M.T.	1,13	1,18	1,20	1,31	1,38	1,52	1,58	1,57
	DIAM	1,04	0,91	1,16	1,20	1,25	1,36	1,36	1,51
	MAX	2,50	2,29	1,92	2,32	3,32	3,99	4,02	3,26
A10	E.T.	0,73	0,69	0,90	0,99	0,74	0,82	0,72	0,87
	M.T.	0,95	1,08	1,08	0,93	0,97	1,00	1,02	0,99
	DIAM	0,87	0,94	0,95	0,88	0,95	0,90	0,96	0,91
	MAX	1,68	2,05	2,05	1,96	1,42	1,89	2,26	1,66
A11	E.T.	0,73	0,91	0,88	1,88	0,94	#Δ/Υ	#Δ/Υ	0,88
	M.T.	0,96	0,77	0,71	0,95	1,02	0,99	1,00	1,01
	DIAM	0,84	0,77	0,68	0,81	0,88	0,89	0,94	0,87
	MAX	1,71	1,37	1,35	1,88	1,87	2,02	2,02	1,90
A12	E.T.	0,64	0,43	0,71	0,45	0,52	0,65	0,42	0,50
	M.T.	0,54	0,58	0,61	0,64	0,65	0,68	0,62	0,68
	DIAM	0,48	0,55	0,58	0,51	0,54	0,64	0,52	0,62
	MAX	1,20	1,24	1,15	1,78	1,30	1,42	1,29	1,38

Για τον υπολογισμό της τιμής 80<sup>th</sup> percentile αρχικά κατατάχθηκαν οι τιμές του δείκτη IRI για κάθε τμήμα ξεχωριστά για κάθε έτος από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη και επακόλουθα επιλέχθηκε το 17<sup>ο</sup> στοιχείο από τα 20 που αποτελούν το κάθε υποτμήμα. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη τιμή γνωρίζουμε ότι το 80% των μετρήσεων που ανήκουν στο εκάστοτε υποτμήμα έχουν τιμή μικρότερη από αυτήν του 17<sup>ου</sup> στοιχείου( Εικ.5.16)

MB '12 - IRI R[Λ1]	MB '14 - IRI R[Λ1]	MB '15 - IRI R[Λ1]	MB '16 - IRI R[Λ1]	'18 - IRI R[Λ1]	'19 - IRI R[Λ1]	'20 - IRI R[Λ1]	'21 - IRI R[Λ1]
0,33	0,44	0,45	0,41	0,52	0,59	0,46	0,52
0,52	0,54	0,63	0,46	0,64	0,65	0,66	0,53
0,63	0,64	0,66	0,62	0,68	0,66	0,68	0,7
0,64	0,73	0,68	0,62	0,69	0,75	0,72	0,7
0,7	0,8	0,74	0,66	0,7	0,75	0,74	0,71
0,73	0,82	0,75	0,67	0,71	0,8	0,8	0,74
0,76	0,84	0,82	0,79	0,75	0,82	0,85	0,75
0,82	0,9	0,83	0,91	0,82	0,83	0,85	0,81
0,87	0,95	0,85	0,92	0,84	0,83	0,85	0,83
0,94	0,98	0,89	0,93	0,84	0,85	0,86	0,83
0,94	0,98	0,97	0,96	0,87	0,86	0,93	0,88
0,96	1	0,98	0,97	0,94	0,89	0,94	0,89
1,01	1,05	1,01	1,01	0,94	0,92	1	0,89
1,06	1,13	1,03	1,05	1	0,93	1	0,99
1,09	1,16	1,11	1,14	1,03	0,99	1,01	1
1,11	1,17	1,13	1,33	1,06	1	1,09	1
1,14	1,32	1,23	1,4	1,34	1,05	1,25	1,25
1,18	1,33	1,29	1,47	1,35	1,1	1,36	1,32
1,35	1,35	1,49	1,55	1,35	1,5	1,51	1,35
2,07	2,39	2,11	1,96	2,05	2,15	2,31	1,96

*Εικόνα 5.16 Υπόδειγμα κατάταξης τιμών IRI m/km και εντοπισμός 17<sup>ου</sup> στοιχείου*

Εν συνεχεία υπολογίστηκε ο δείκτης Upper IRI(όπως ορίστηκε παραπάνω) και σχηματίστηκαν οι πίνακες που παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά για τα πειραματικά οδοστρώματα Α και Β1, οι οποίοι θα αξιοποιηθούν και αργότερα για την εξέταση ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των δεικτών επιφανειακής και δομικής κατάστασης (Πιν.5.5-5.8)

Πίνακας 5.5 IRI median (m/km) οδόστρωμα Α

Χ.Θ/Υ	2012	2015	2018	2021
15	0,88	0,92	0,99	0,94
14,8	1,03	0,97	1,02	1,05
14,6	0,90	0,84	0,89	0,94
14,4	0,94	0,92	0,91	0,93
14,2	0,88	0,77	0,91	0,86
14	1,01	0,98	1,01	1,03
13,8	0,95	0,91	0,98	1,02
13,6	0,97	0,97	0,91	1,04
13,4	1,08	0,99	1,12	1,05
13,2	1,16	1,26	1,13	1,26
13	1,46	1,66	1,48	1,61
12,8	1,15	1,17	1,19	1,20
12,6	0,94	1,06	1,01	1,02
12,4	1,06	0,99	1,10	1,04
12,2	0,79	0,89	0,89	0,95
12	0,71	0,68	0,63	0,81
10,4	0,80	0,84	0,87	0,86
10,2	0,78	0,805	0,9	0,825
10	0,75	0,73	0,88	0,80
9,8	0,91	0,90	0,89	0,97
9,6	0,78	0,84	0,91	0,85
9,4	0,75	0,67	0,85	0,77
9,2	0,86	0,89	0,78	0,83
9	0,90	1,01	0,97	1,00
8,8	0,78	0,82	1,05	0,92
8,6	0,73	0,78	0,85	0,85
8,4	0,82	0,91	0,89	0,90
8,2	0,80	0,77	0,82	0,84
8	0,90	0,89	1,31	0,93
7,8	0,80	0,89	0,87	0,96
7,6	0,74	0,76	0,86	0,86
7,4	1,05	1,03	0,90	1,12
7,2	1,12	1,01	1,08	0,99
7	0,80	0,90	0,88	0,90

Πίνακας 5.6 IRI υπερ(μ/κμ) οδοστρώματος Α

Χ.Θ/Υ	2012	2015	2018	2021
15	1,08	1,14	1,39	1,29
14,8	1,28	1,20	1,42	1,51
14,6	1,17	1,26	1,27	1,56
14,4	1,37	1,08	1,06	1,15
14,2	1,08	0,99	1,23	1,09
14	1,59	1,47	1,39	1,47
13,8	1,32	1,22	1,48	1,50
13,6	1,11	1,27	1,19	1,31
13,4	1,25	1,53	1,48	1,67
13,2	1,45	1,48	1,43	1,50
13	2,53	2,62	2,26	2,78
12,8	2,68	1,83	1,52	2,29
12,6	1,25	1,17	1,20	1,33
12,4	1,73	1,76	1,34	1,59
12,2	1,14	1,15	1,98	1,24
12	0,71	0,68	0,63	0,81
10,4	1,00	1,10	1,06	1,05
10,2	1,38	1,01	1,45	1,42
10	0,96	1,11	1,05	1,00
9,8	1,07	1,31	1,18	1,20
9,6	1,07	1,19	1,21	1,08
9,4	0,81	0,92	0,99	1,06
9,2	2,26	1,91	1,05	2,99
9	1,31	1,31	1,34	1,33
8,8	1,07	1,11	1,31	1,10
8,6	0,98	0,93	1,10	1,00
8,4	1,04	1,03	1,09	1,05
8,2	1,69	1,77	1,04	1,46
8	2,28	1,80	2,32	1,62
7,8	1,02	1,06	1,11	1,12
7,6	0,97	1,07	1,06	1,12
7,4	1,39	1,26	1,45	1,50
7,2	1,46	1,38	1,36	1,53
7	1,18	1,29	1,16	1,13

*Πίνακας 5.7 IRI median(m/km) οδοστρώματος Β1*

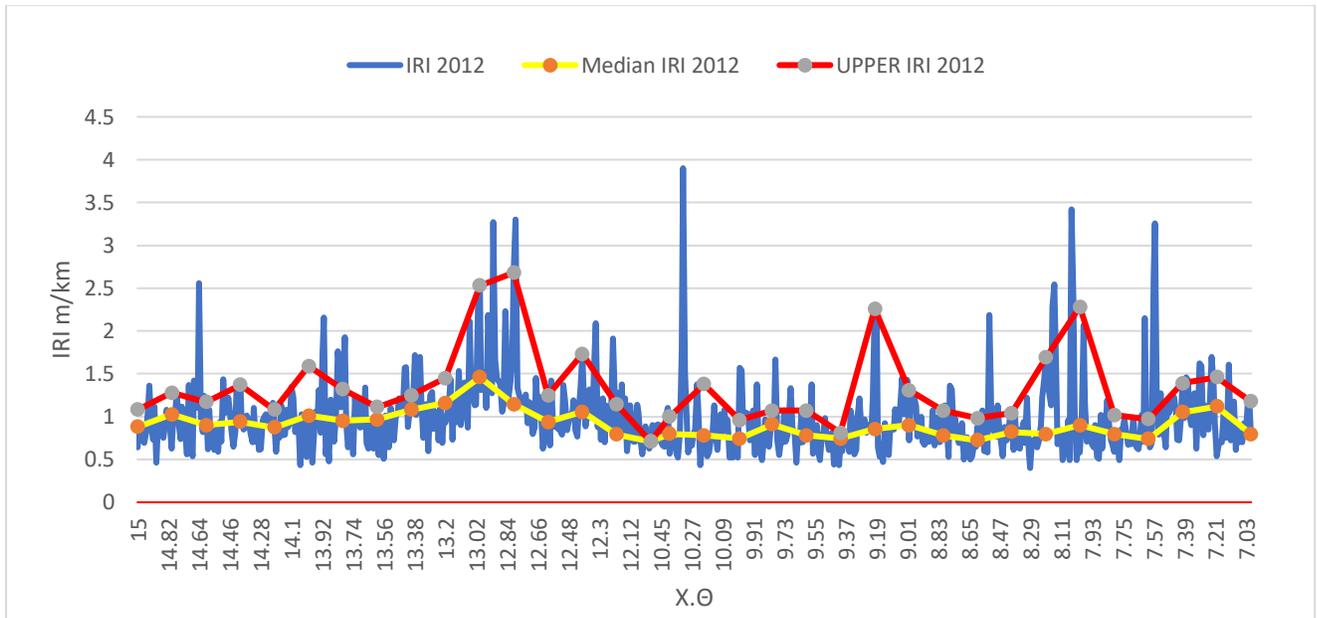
Χ.Θ/Υ	2012	2014	2015	2016	2018	2019	2020	2021
96,8	0,94	0,98	0,93	0,95	0,86	0,86	0,90	0,86
97	1,01	1,09	1,04	1,12	1,10	1,45	1,41	1,31
97,2	0,93	1,09	1,25	1,21	1,46	1,24	1,22	1,45
97,4	1,08	1,48	1,41	1,53	1,74	1,87	1,69	1,68
97,6	0,70	0,60	0,57	1,11	1,33	1,34	1,29	1,40
97,8	0,65	1,14	0,98	0,78	0,83	1,06	1,07	1,12
98	0,85	1,33	1,58	1,91	1,50	2,17	1,99	2,21
98,2	0,79	0,98	1,16	1,67	1,81	1,60	1,48	1,39
98,4	1,04	0,91	1,16	1,20	1,25	1,36	1,36	1,51
98,6	0,87	0,94	0,95	0,88	0,95	0,90	0,96	0,91
98,8	0,84	0,77	0,68	0,81	0,88	0,89	0,94	0,87
99	0,48	0,55	0,58	0,51	0,54	0,64	0,52	0,62
99,2	0,68	0,53	0,56	0,73	1,28	0,57	0,78	0,67

*Πίνακας 5.8 IRI upper (m/km) οδοστρώματος Β1*

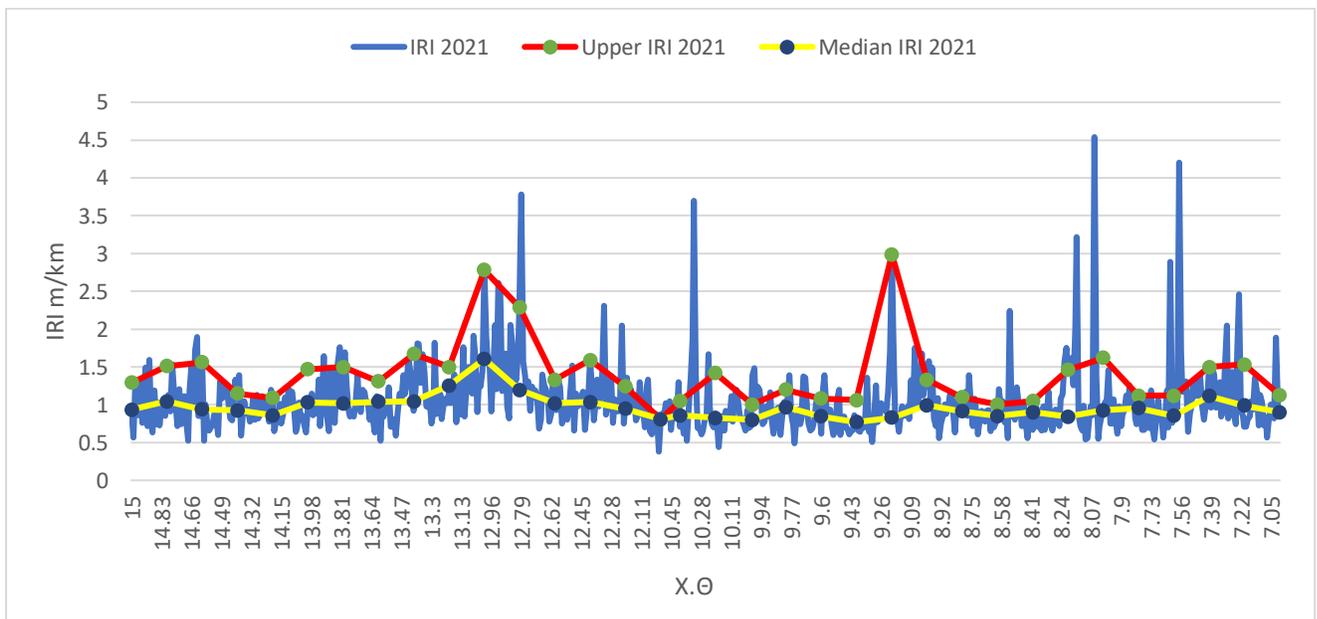
Χ.Θ/Υ	2012	2014	2015	2016	2018	2019	2020	2021
96,8	1,14	1,32	1,23	1,40	1,34	1,28	1,25	1,25
97	1,14	1,87	3,06	1,27	1,36	2,13	2,12	2,00
97,2	1,73	2,72	2,89	1,78	2,23	1,89	2,08	1,99
97,4	1,51	1,76	2,27	2,61	2,78	2,73	2,19	2,72
97,6	1,71	1,49	1,79	1,77	1,94	1,88	1,91	1,90
97,8	1,17	1,74	1,92	1,63	1,17	2,25	2,63	2,10
98	1,39	2,00	2,19	2,77	2,14	3,05	3,23	2,76
98,2	0,99	1,64	1,95	2,00	2,39	2,89	3,35	2,42
98,4	1,35	1,52	1,55	1,60	2,00	1,84	2,07	1,90
98,6	1,15	1,45	1,50	1,21	1,33	1,23	1,26	1,22
98,8	1,21	1,02	0,89	1,21	1,42	1,15	1,31	1,38
99	0,86	0,87	0,71	2,11	0,94	1,26	1,18	0,99
99,2	0,68	0,53	0,56	0,73	1,28	0,57	0,78	0,67

Αξιοποιώντας του παραπάνω πίνακες σε συνδυασμό με τις συνεχείς μετρήσεις κατά μήκος του προφίλ προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία εκτιμάται πως περιγράφουν

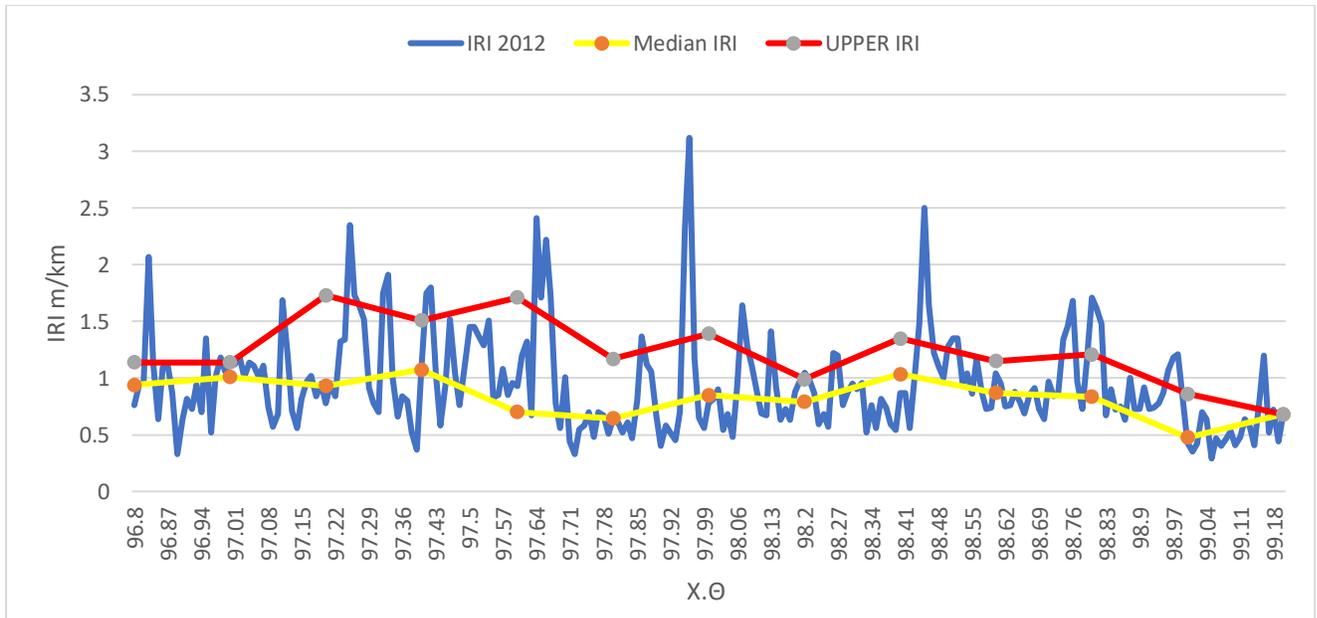
ικανοποιητικά το συνολικό προφίλ. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα έτη 2012 & 2021 για τα πειραματικά οδοστρώματα A ,B1 και B2.(Εικ.5.17-5.22)



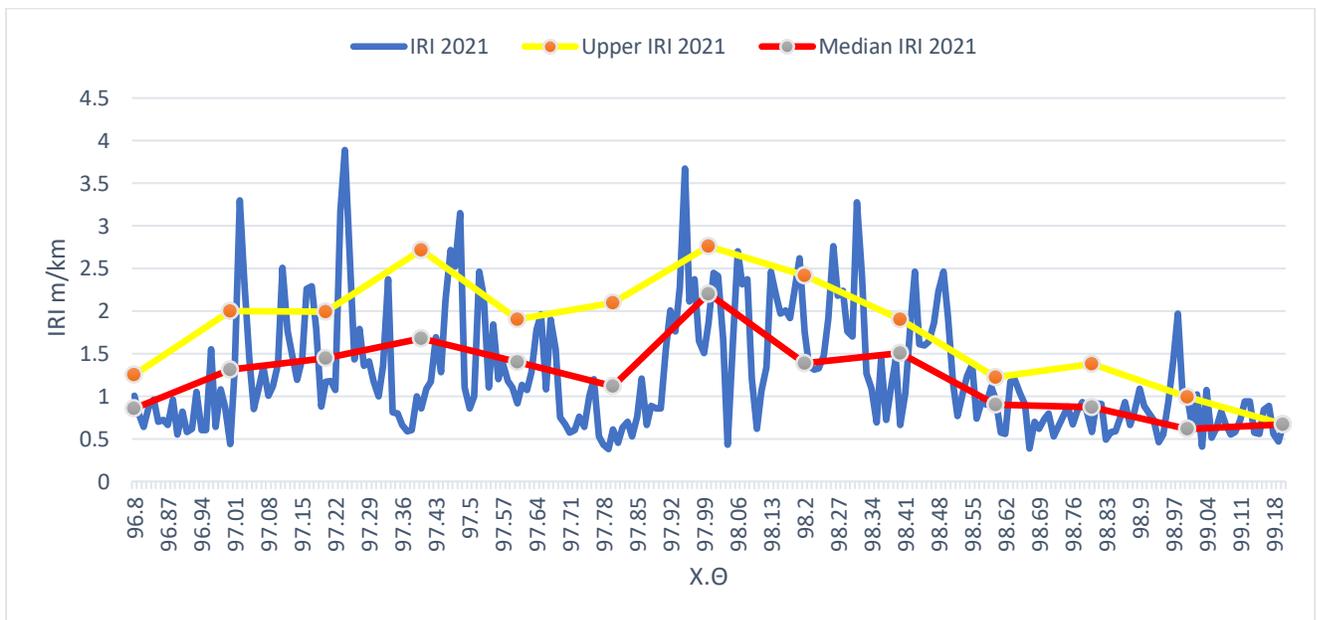
**Εικόνα 5.17 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα A-2012 με βάση τους δείκτες IRI median-upper**



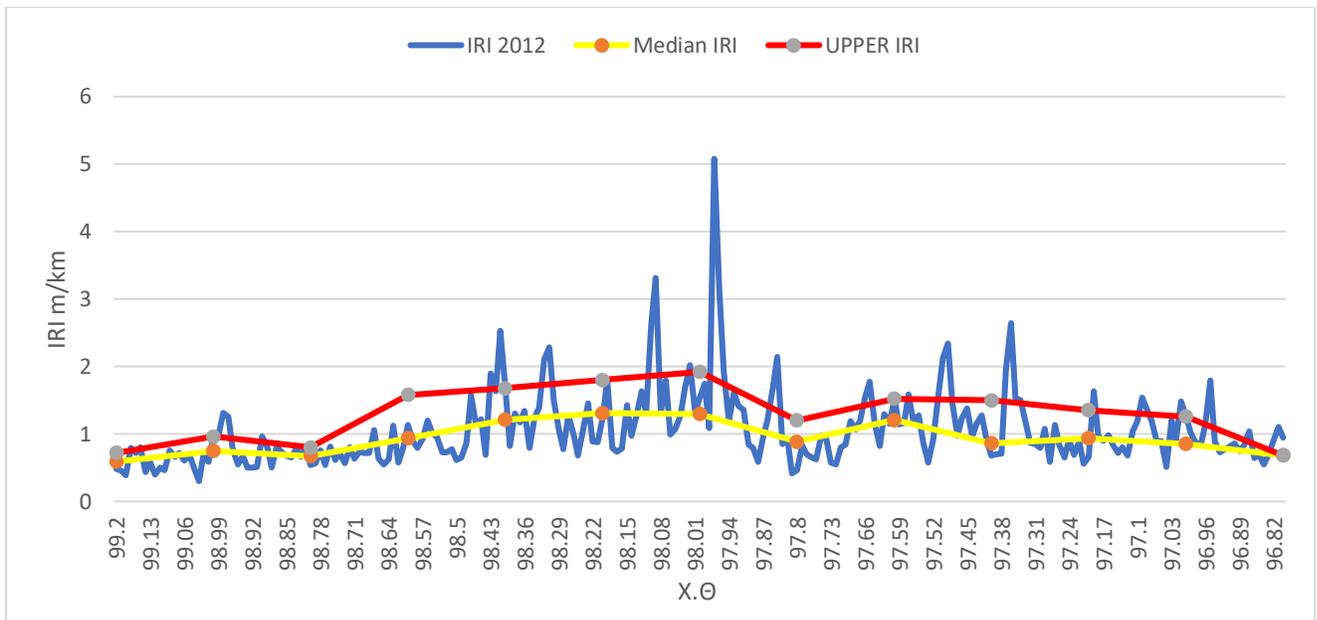
**Εικόνα 5.18 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα A-2021 με βάση τους δείκτες IRI median-upper**



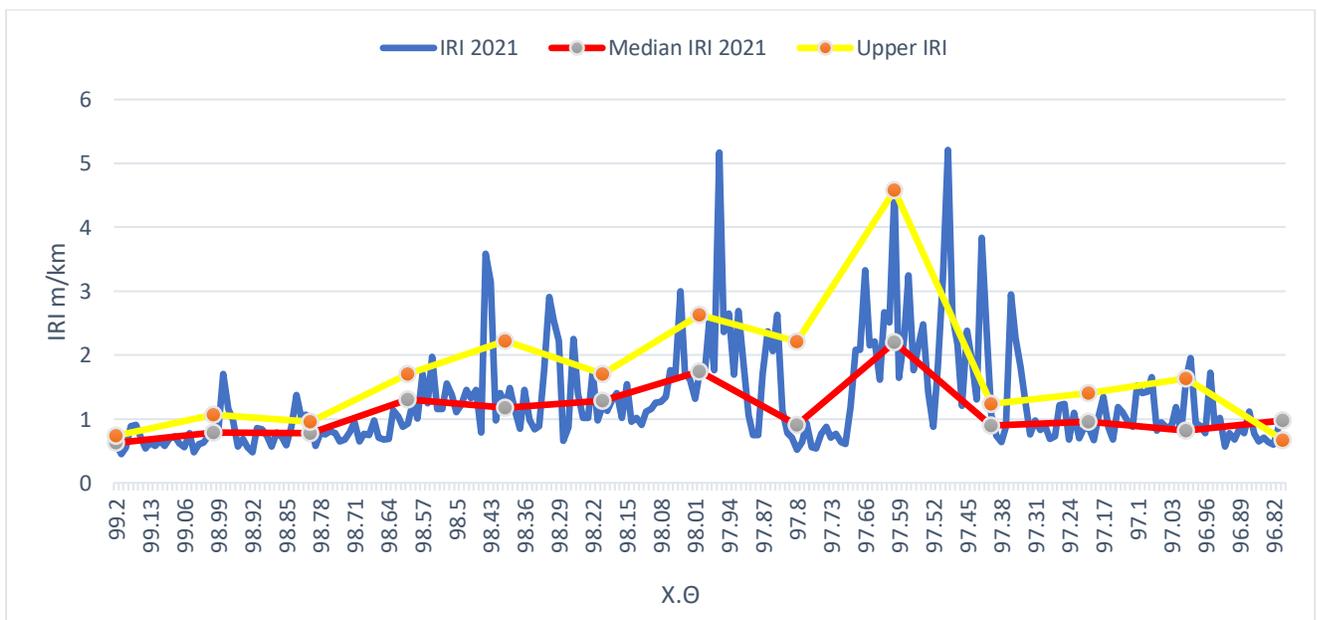
Εικόνα 5.19 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα Β1-2012 με βάση τους δείκτες IRI median-upper



Εικόνα 5.20 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα Β1-2021 με βάση τους δείκτες IRI median-upper



Εικόνα 5.21 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα B2-2012 με τους δείκτες IRI median-upper



Εικόνα 5.22 Περιγραφή προφίλ-Οδόστρωμα B2-2021 με βάση τους δείκτες IRI median-upper

## 5.5 Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης

Όσον αφορά στους δείκτες δομικής κατάστασης είναι απαραίτητο να γίνει η αναγωγή των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων (D0) στο φορτίο αναφοράς των 50KN και στην θερμοκρασία αναφοράς  $T=20^{\circ}\text{C}$  σύμφωνα με τις (εξ.3.1-3.3), αλλά και του δείκτη SCI στην θερμοκρασία αναφοράς λόγω της εξάρτησης των ασφαλικών στρώσεων από την θερμοκρασία(εξ.3.5-3.7). Ακολούθως υπολογίστηκαν με βάση τις (εξ.3.8-3.13) οι υπόλοιποι δείκτες που προκύπτουν από τις επιμέρους υποχωρήσεις των διαφόρων στρώσεων του οδοστρώματος (Πιν.5.9-5.10).

*Πίνακας 5.9 Απόσπασμα υπολογισμού αναγωγής των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων στην θερμοκρασία και το φορτίο αναφοράς*

D0(P) μm	TNF	D0(T)μm
42,58	1,03	41,33
47,82	1,03	46,41
49,50	1,03	48,11
49,24	1,03	47,84
48,98	1,03	47,57
42,49	1,03	41,22
53,56	1,03	52,03
53,33	1,03	51,72
45,31	1,03	43,99
54,15	1,03	52,58
44,33	1,03	43,08
35,65	1,03	34,65
54,17	1,03	52,57
62,34	1,03	60,54
55,25	1,03	53,68
37,80	1,03	36,62
55,49	1,03	53,83
58,42	1,03	56,70
54,27	1,03	52,66
62,36	1,03	60,48
59,90	1,03	58,04
48,71	1,03	47,23
52,28	1,03	50,71
60,55	1,03	58,85
59,38	1,03	57,64
43,70	1,03	42,42
38,98	1,03	37,85
53,67	1,03	52,14

Πίνακας 5.10 Αναγωγή SCI στην θερμοκρασία αναφοράς

SCI μm	TNF SCI	SCI(T)μm
10,68	2,39	4,47
8,71	2,39	3,65
8,31	2,38	3,48
9,44	2,38	3,96
10,57	2,39	4,43
8,82	2,39	3,69
10,83	2,39	4,54
11,52	2,39	4,82
9,59	2,39	4,02
8,78	2,39	3,68
6,88	2,38	2,88
6,45	2,38	2,70
10,47	2,39	4,38
7,94	2,39	3,33
8,18	2,38	3,43
7,22	2,40	3,02
9,33	2,39	3,90
9,20	2,39	3,85
10,50	2,39	4,39
10,78	2,39	4,51
9,54	2,39	3,98
7,73	2,39	3,23
8,21	2,39	3,44
10,95	2,38	4,59
10,14	2,39	4,24
10,32	2,39	4,32
9,45	2,39	3,96
9,24	2,38	3,87

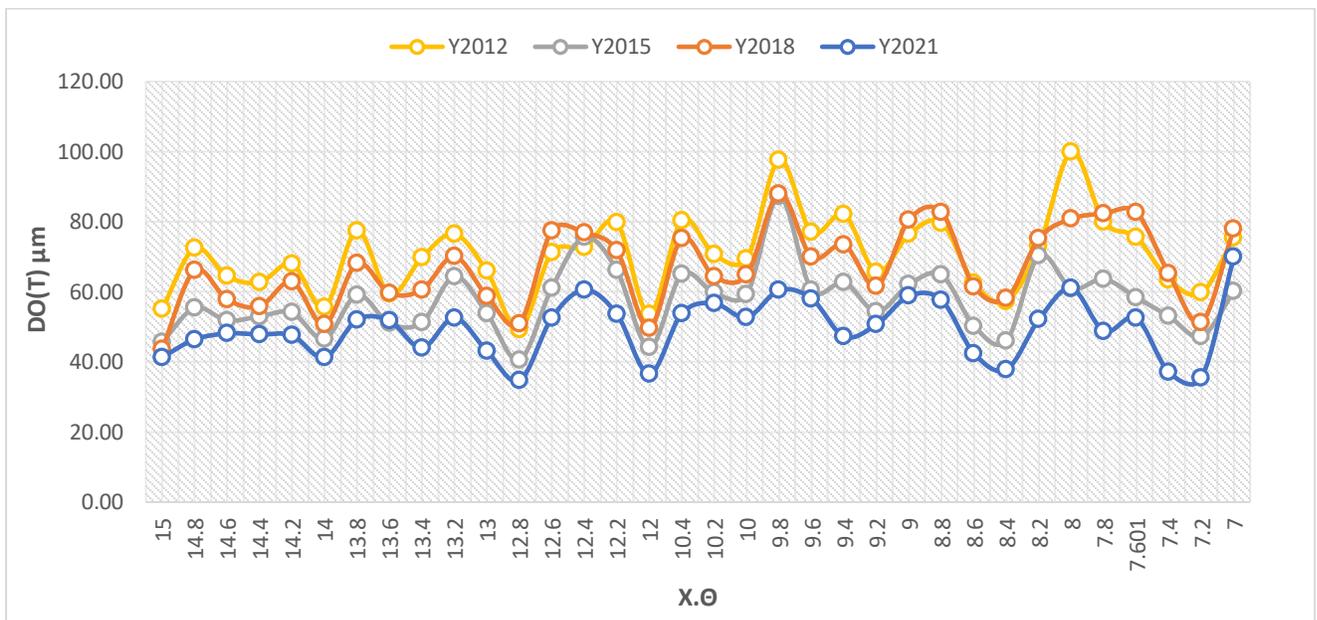
Πίνακας 5.11 Απόσπασμα υπολογισμών δεικτών δομικής κατάστασης

Μονάδες μέτρησεις		Mm				
year	Station	D0(T)	SCI(T)	BDI	BCI	D9
2021	15	41,33	4,47	10,80	5,65	3,55
2021	14,8	46,41	3,65	13,30	5,50	4,60
2021	14,6	48,11	3,48	14,30	5,70	4,70
2021	14,4	47,84	3,96	13,95	5,80	4,45
2021	14,2	47,57	4,43	13,60	5,90	4,20
2021	14	41,22	3,69	12,50	5,90	1,80
2021	13,8	52,03	4,54	15,50	5,90	3,50
2021	13,6	51,72	4,82	14,30	6,20	4,50
2021	13,4	43,99	4,02	12,60	5,80	3,90
2021	13,2	52,58	3,68	15,30	6,90	3,20
2021	13	43,08	2,88	13,00	5,00	4,40
2021	12,8	34,65	2,70	11,00	4,30	3,40
2021	12,6	52,57	4,38	16,50	7,00	2,20
2021	12,4	60,54	3,33	16,10	7,70	6,00
2021	12,2	53,68	3,43	16,30	7,30	3,90
2021	12	36,62	3,02	12,00	5,00	3,20
2021	10,4	53,83	3,90	15,70	6,60	5,80
2021	10,2	56,70	3,85	14,80	7,00	6,20
2021	10	52,66	4,39	14,33	6,33	6,07
2021	9,8	60,48	4,51	18,10	8,50	5,40
2021	9,6	58,04	3,98	17,00	7,10	4,50
2021	9,4	47,23	3,23	11,75	8,60	4,95
2021	9,2	50,71	3,44	13,50	8,10	5,40
2021	9	58,85	4,59	16,80	6,10	5,10
2021	8,8	57,64	4,24	19,20	7,50	3,70
2021	8,6	42,42	4,32	13,60	5,80	2,50
2021	8,4	37,85	3,96	12,60	4,40	4,90

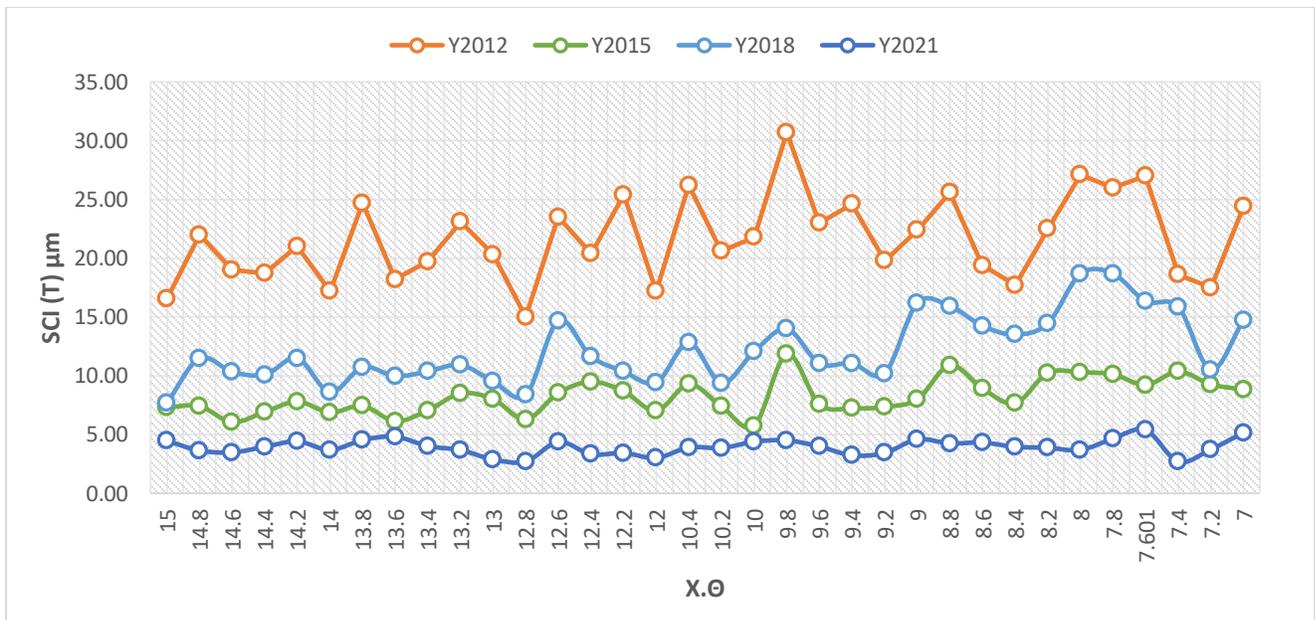
Ακολούθως με στόχο την μελέτη της εξέλιξης των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος με το πέρασμα των ετών κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα. Εξετάζοντας το διάγραμμα της Εικ.5.23 για το οδόστρωμα Α, καταγράφεται μια μείωση των υποχωρήσεων μεταξύ των ετών 2012-2015. Ενδεχομένως, η μείωση αυτή να ισοδυναμεί με την γήρανση του οδοστρώματος που εκφράζεται με μικρότερες υποχωρήσεις λόγω της σκλήρυνσης των ασφαλικών υλικών. Ακόμη οι θερμοκρασιακές μεταβολές μεταξύ των δοκιμών ενδέχεται να

επηρεάζουν την Εικ.5.23 μέσω του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την κανονικοποίηση στην θερμοκρασία αναφοράς. Ωστόσο το 2018 παρουσιάζει επιδείνωση ξανά ιδιαίτερα στις ασφαλικές στρώσεις (Εικ.5.24) η οποία αποτυπώνεται και στο διάγραμμα των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι από τις Εικ.5.23-5.24 προκύπτει παρόμοια τάση μεταβολής των δεικτών D0-SCI.

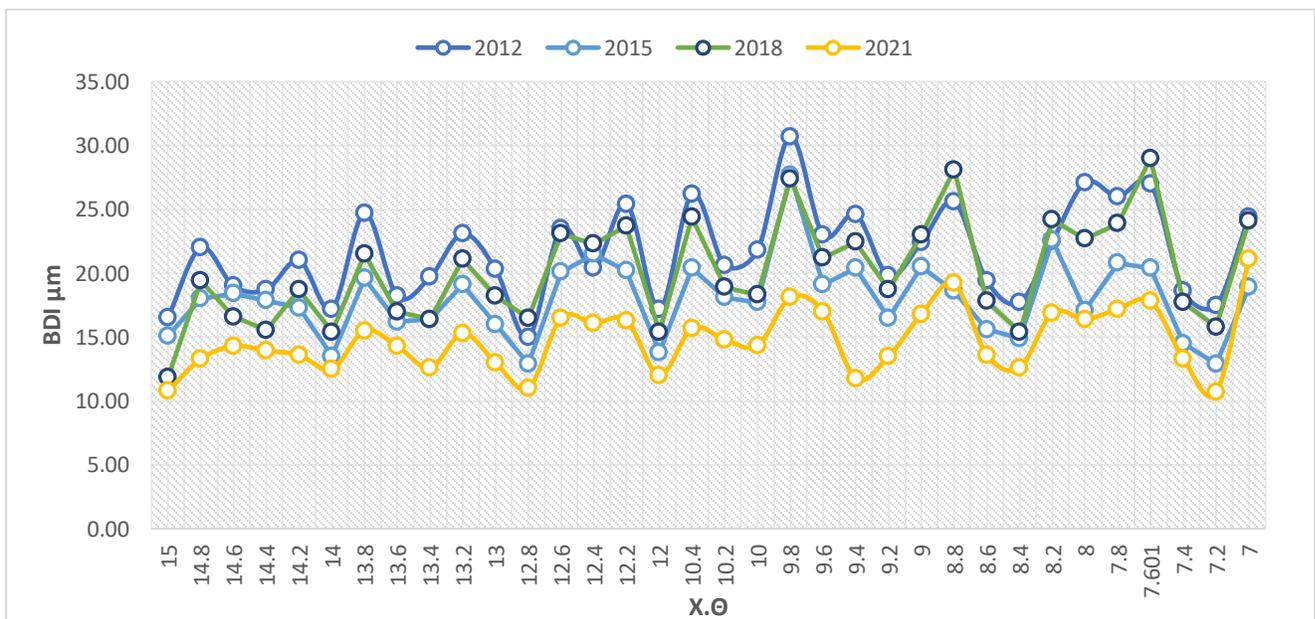
Αντιθέτως στο πειραματικό οδόστρωμα Β1 από τις Εικ.5.28-5.32 παρατηρήθηκε από τα διαγράμματα ότι η εξέλιξη των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων αντικατοπτρίζει στους δείκτες που εκφράζουν την υποχώρηση, τις ανώτερες στρώσεις και την βάση. Επιπλέον, διαφαίνεται ότι στις περιοχές όπου ο δείκτης BCI και D9 παρουσιάζουν μέγιστο αυτό αντανακλάται και στην συνολική εικόνα του οδοστρώματος.



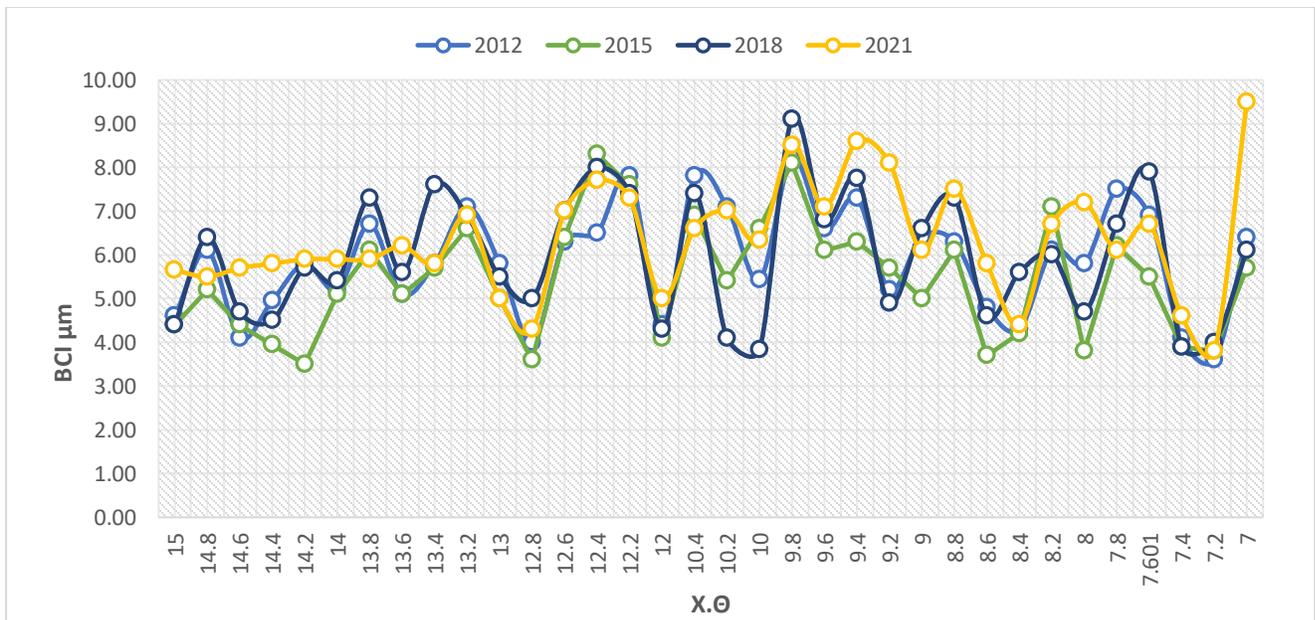
Εικόνα 5.23 Εξέλιξη κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων-Οδόστρωμα Α



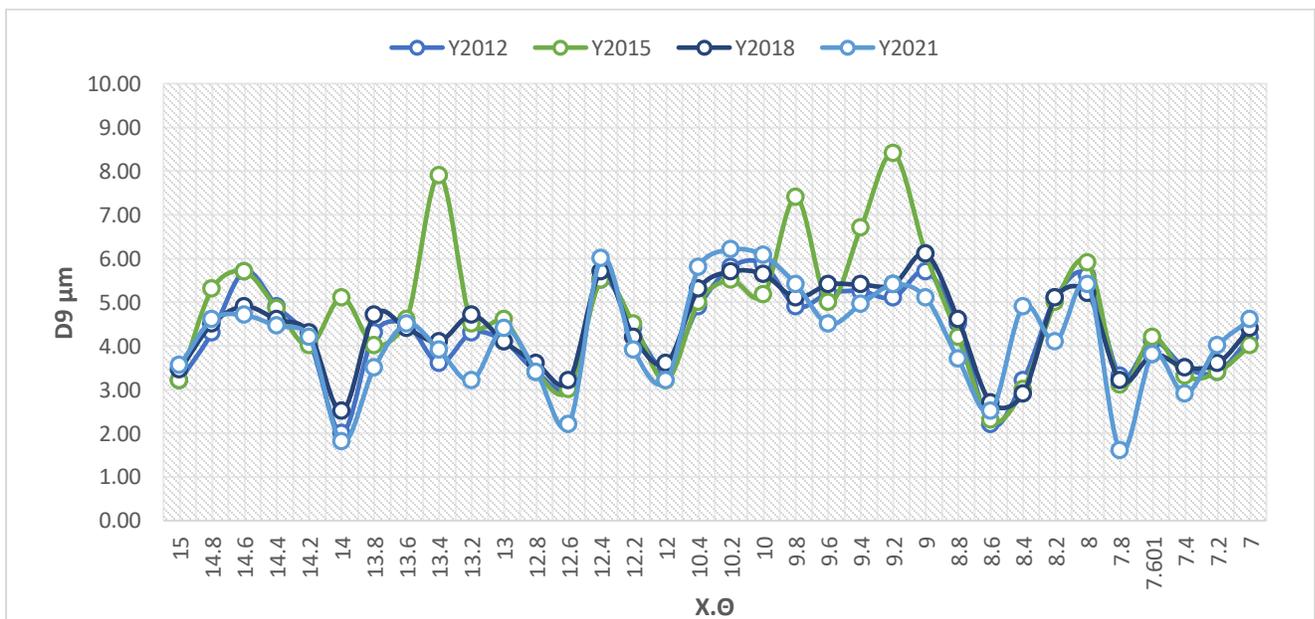
Εικόνα 5.24 Εξέλιξη του δείκτη SCI-Οδόστρωμα Α



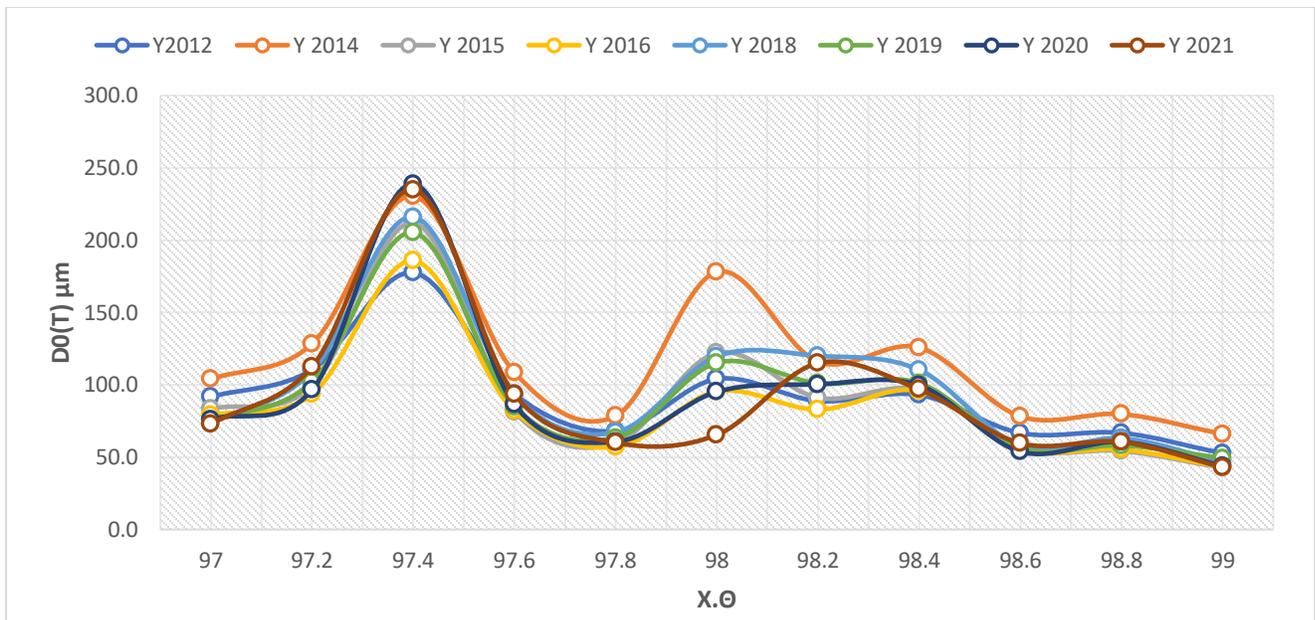
Εικόνα 5.25 Εξέλιξη του δείκτη BDI-Οδόστρωμα Α



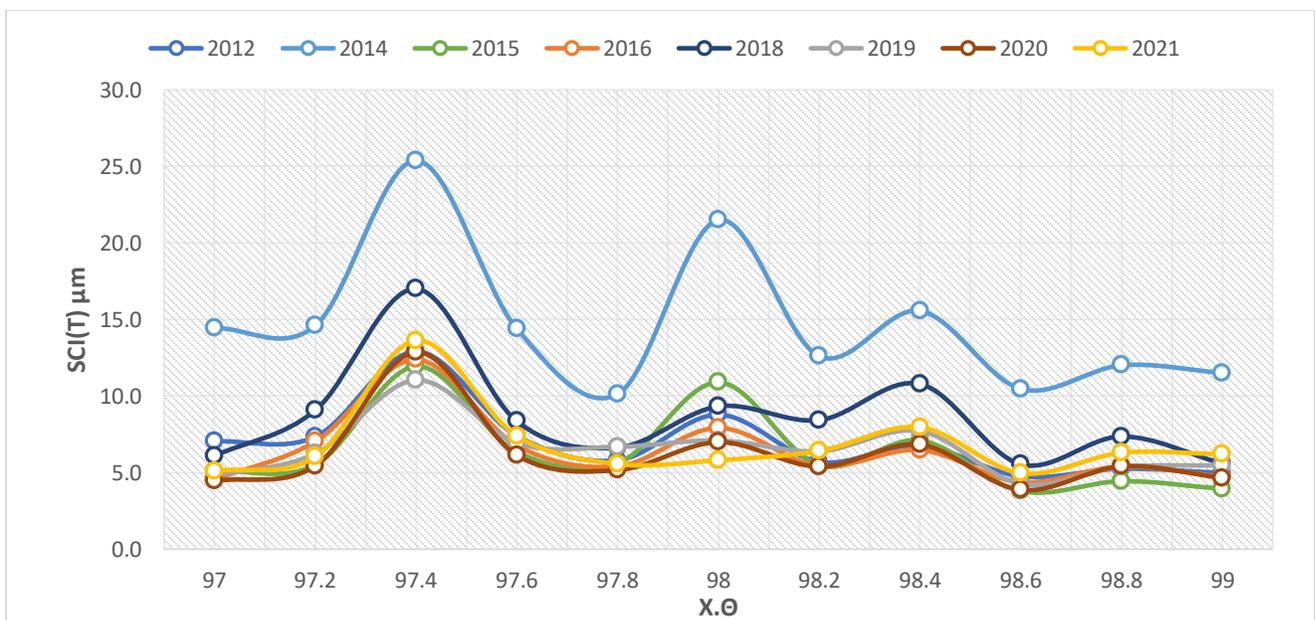
Εικόνα 5.26 Εξέλιξη του δείκτη BCI-Οδόστρωμα Α



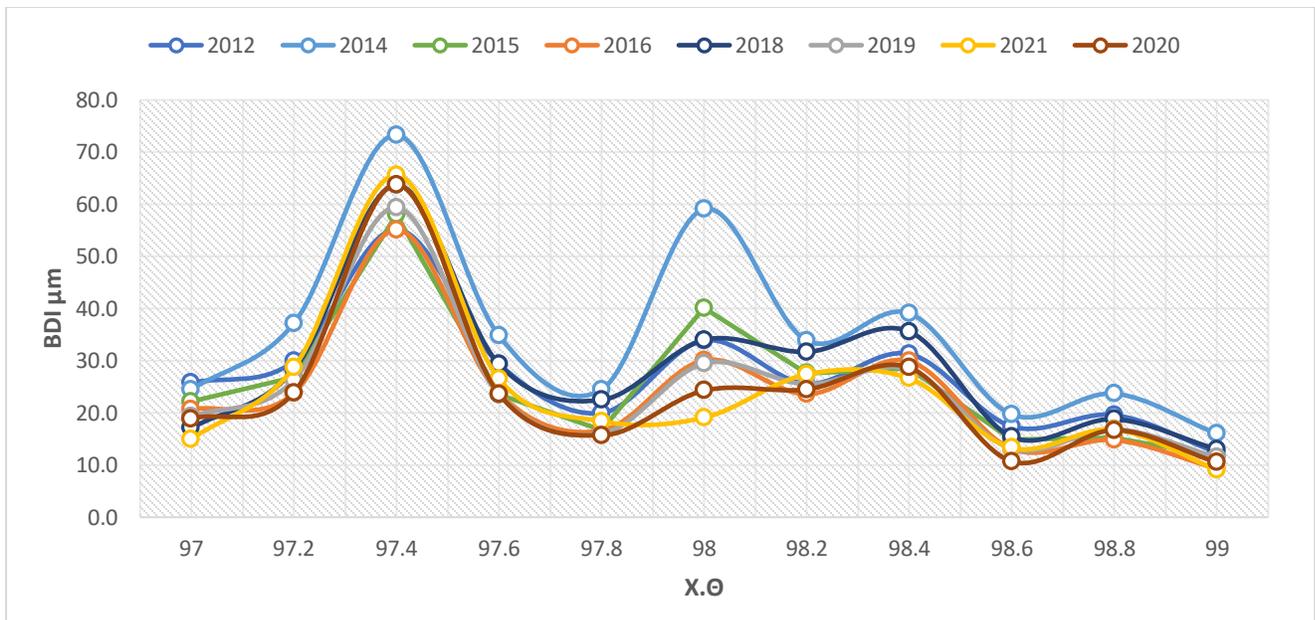
Εικόνα 5.27 Εξέλιξη του δείκτη D9-Οδόστρωμα Α



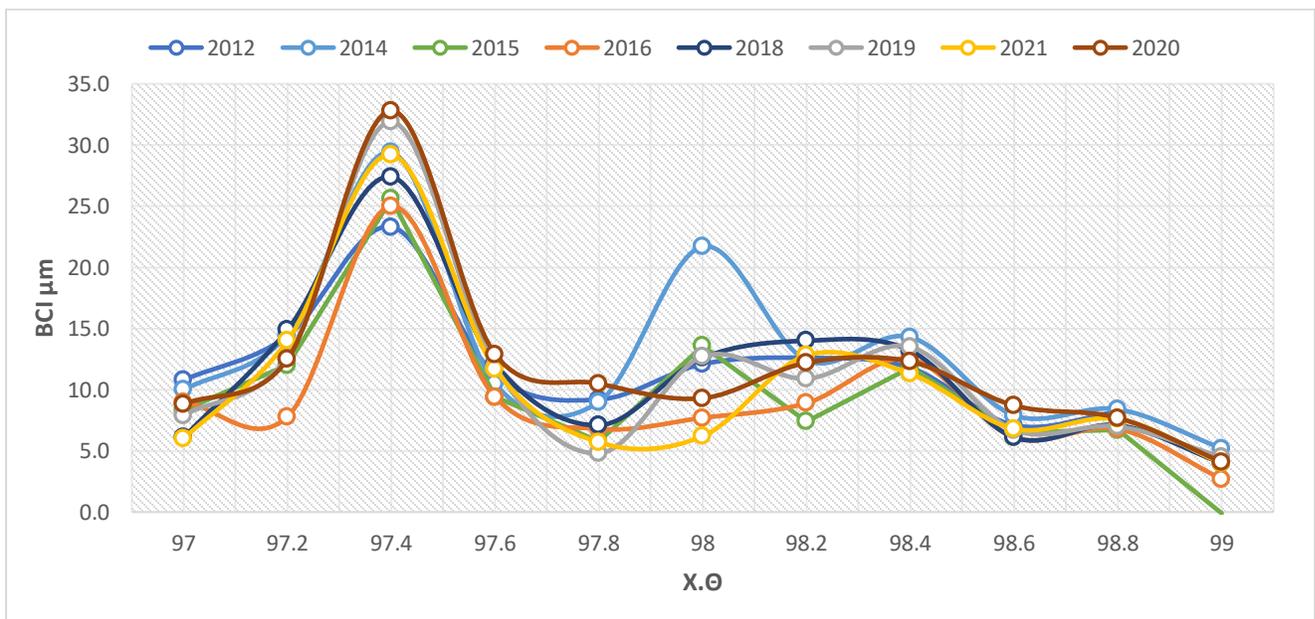
Εικόνα 5.28 Εξέλιξη κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων-Οδόστρωμα Β1



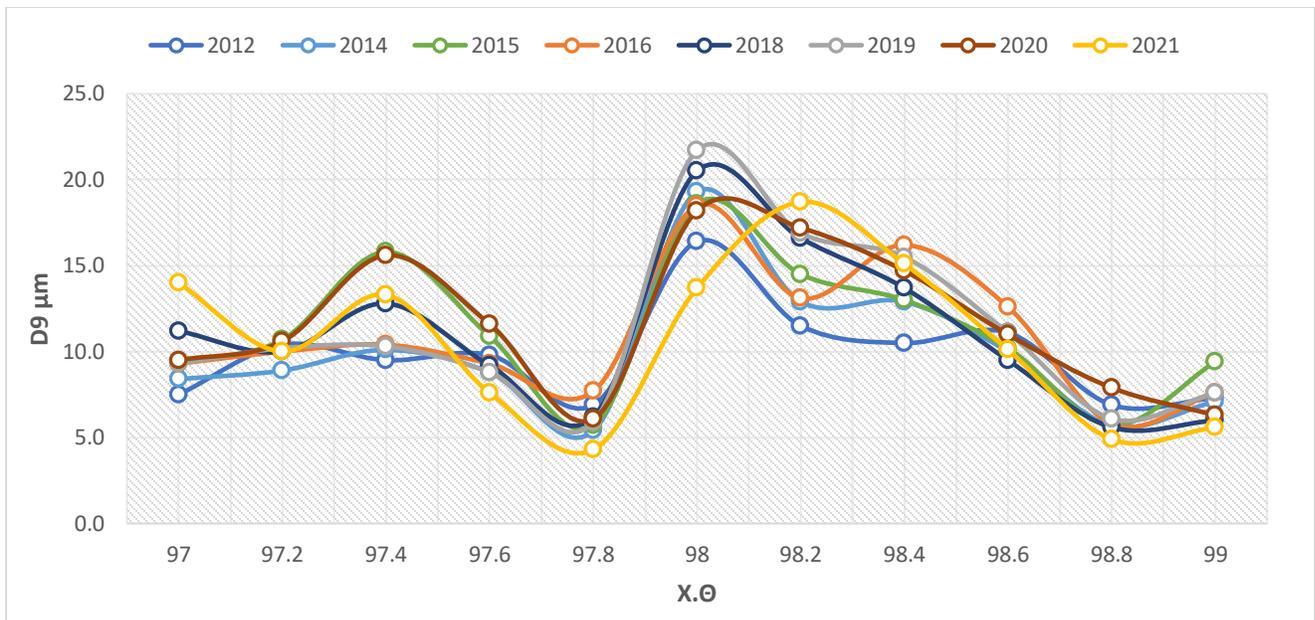
Εικόνα 5.29 Εξέλιξη των δεικτών SCI-Οδόστρωμα Β1



Εικόνα 5.30 Εξέλιξη του δείκτη BDI-Οδόστρωμα Β1

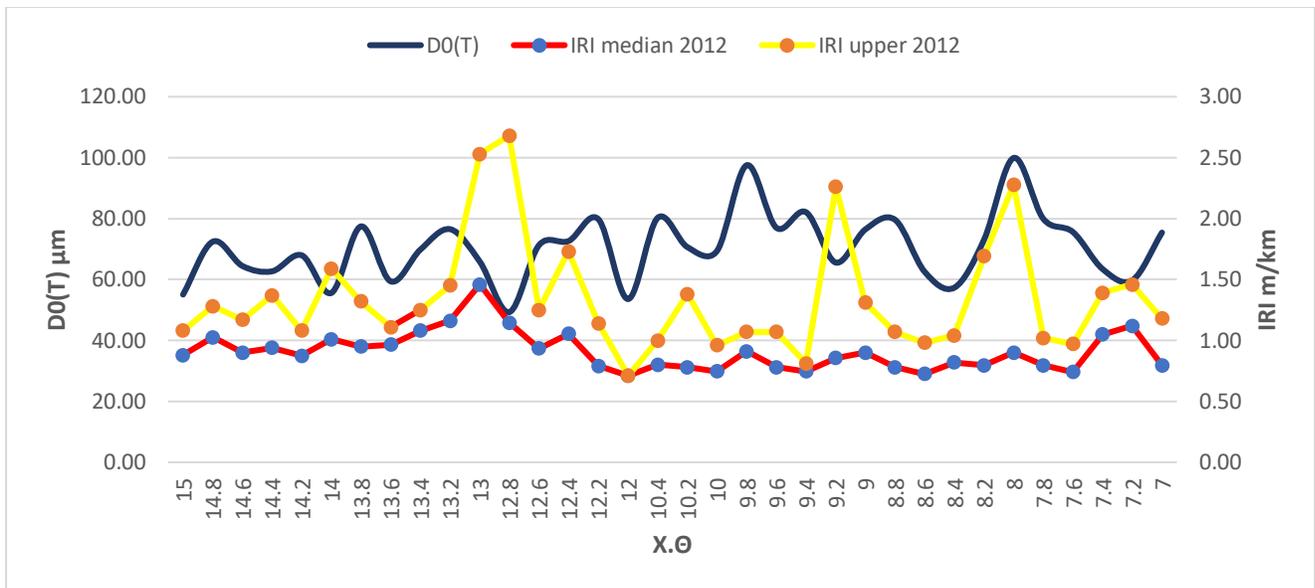


Εικόνα 5.31 Εξέλιξη του δείκτη BCI-Οδόστρωμα Β1

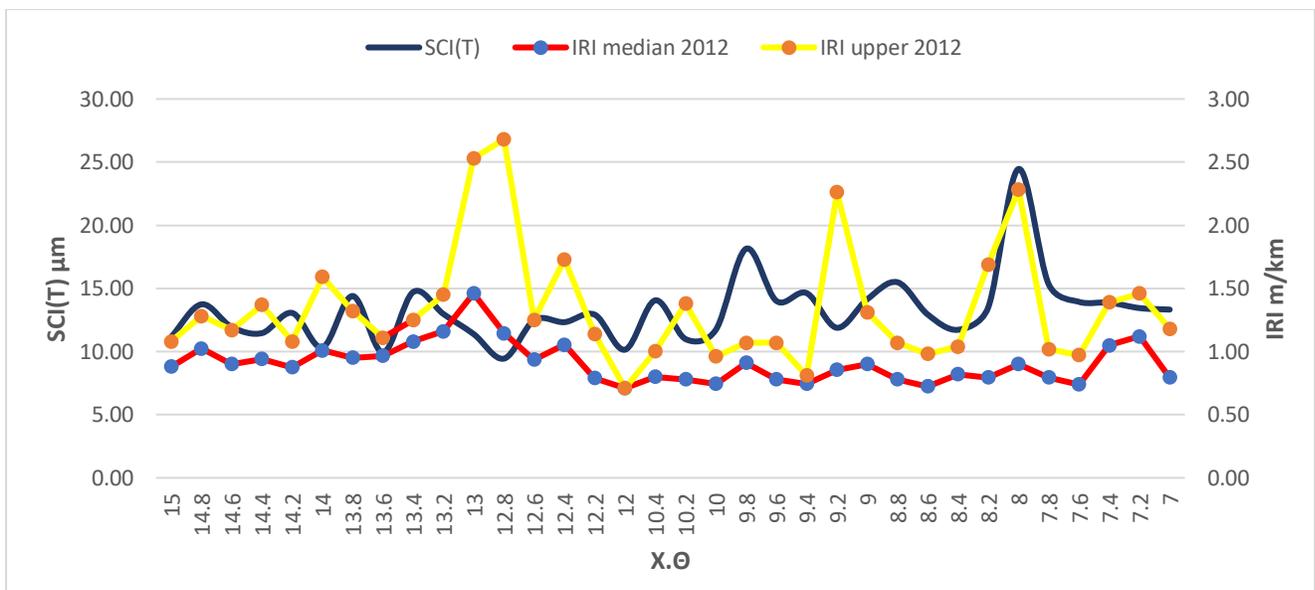


Εικόνα 5.32 Εξέλιξη του δείκτη D9-Οδόστρωμα Β1

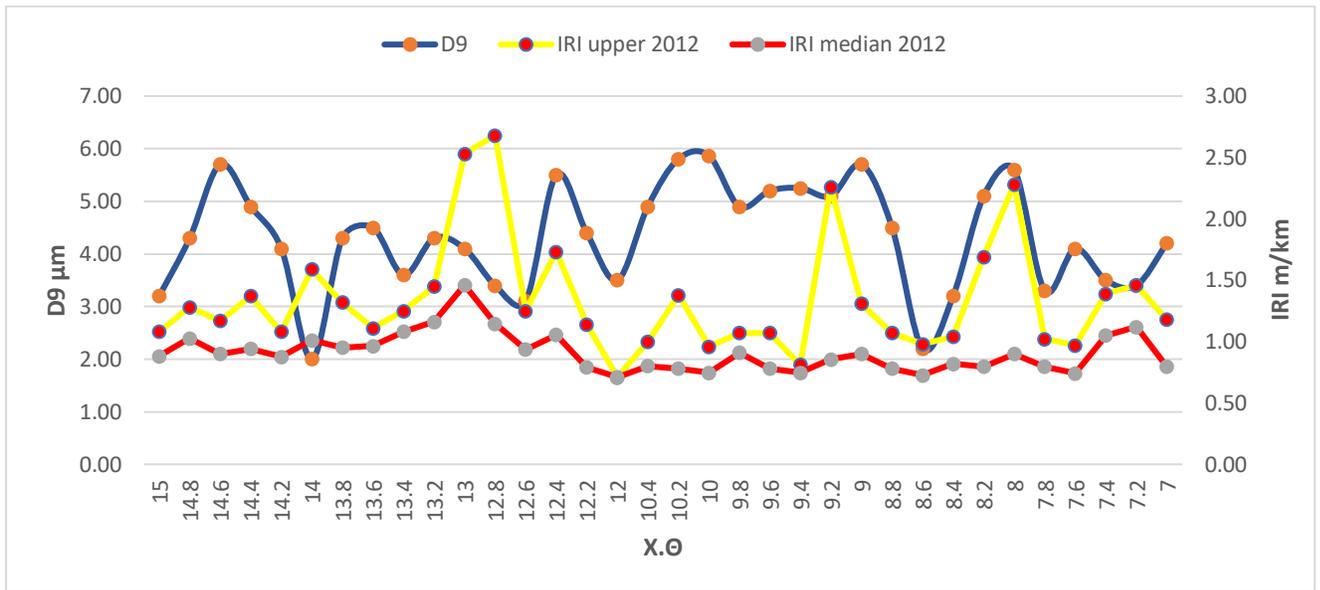
Τέλος, με στόχο τη σύγκριση της εξέλιξης τόσο των ελαστικών υποχωρήσεων όσο και της ομαλότητας παρουσιάζονται τα συνδυασμένα διαγράμματα που καταγράφουν την πορεία που ακολουθούν οι υποχωρήσεις και παράλληλα ο δείκτης ομαλότητας κατά μήκος της κατατομής της επιφάνειας εκφρασμένος μέσω της προσέγγισης που προαναφέρθηκε για την διάμεσο και μια ανώτατη τιμή. Ενδεικτικά παρατίθενται οι Εικ.5.33-5.41 που απεικονίζουν τους δείκτες  $D_0$  SCI και D9 για το έτος 2012 των πειραματικών οδοστρωμάτων Α και Β1,Β2 συγκριτικά με το επίπεδο ομαλότητας



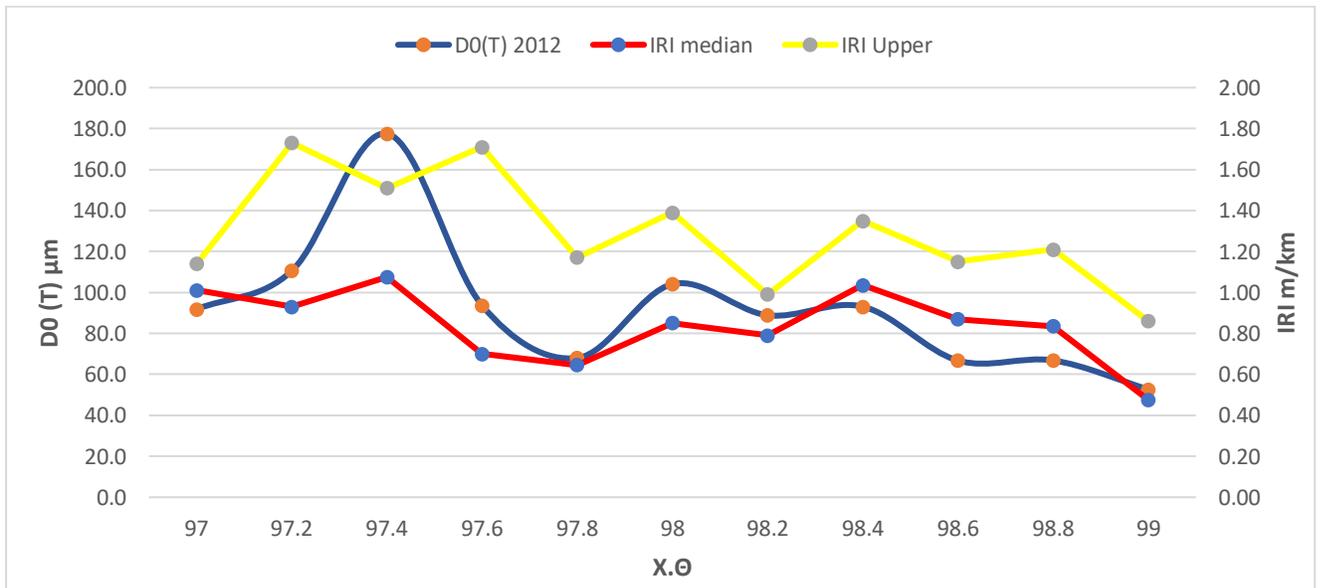
Εικόνα 5.33 Εξέλιξη του δείκτη κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων  $D_0(T)$ -IRI median-upper-Οδόςτρωμα Α



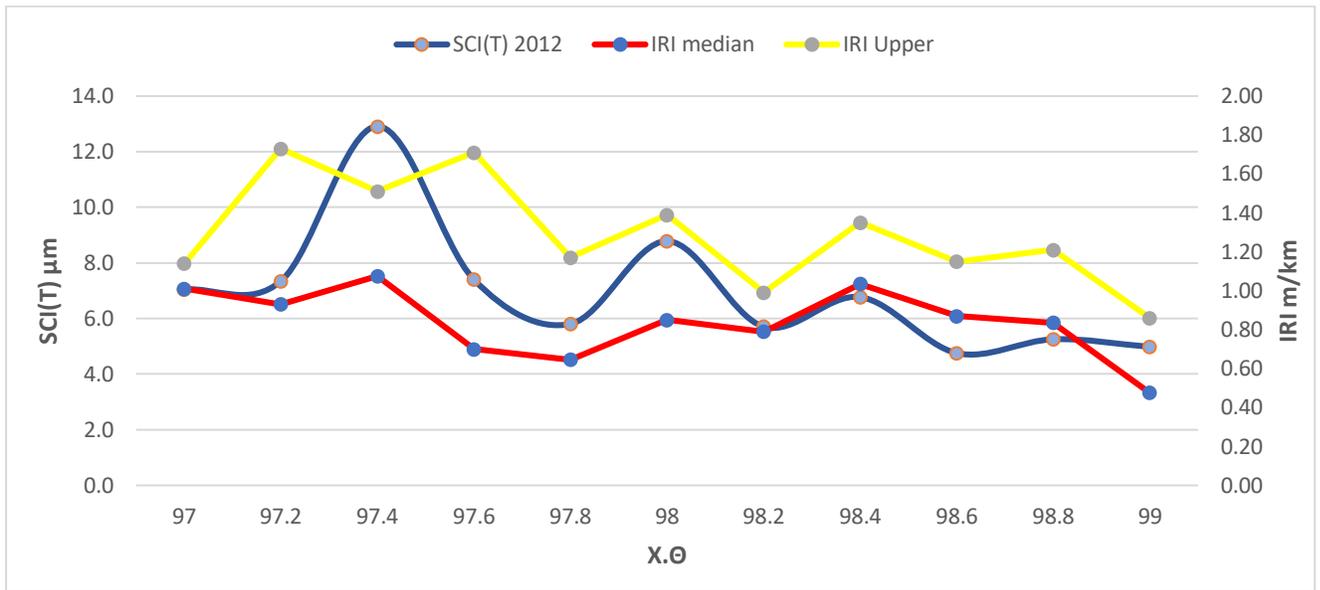
Εικόνα 5.34 Εξέλιξη του δείκτη  $SCI$ -IRI median-upper-Οδόςτρωμα Α



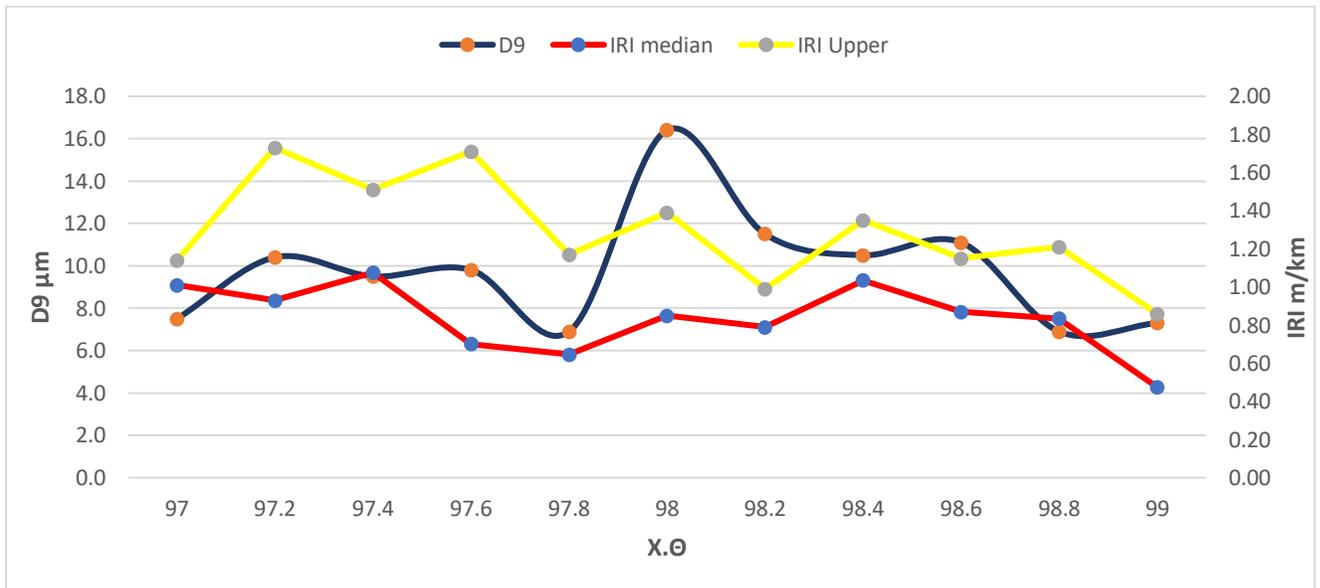
Εικόνα 5.35 Εξέλιξη του δείκτη D9-IRI median-upper-Οδόστρωμα Α



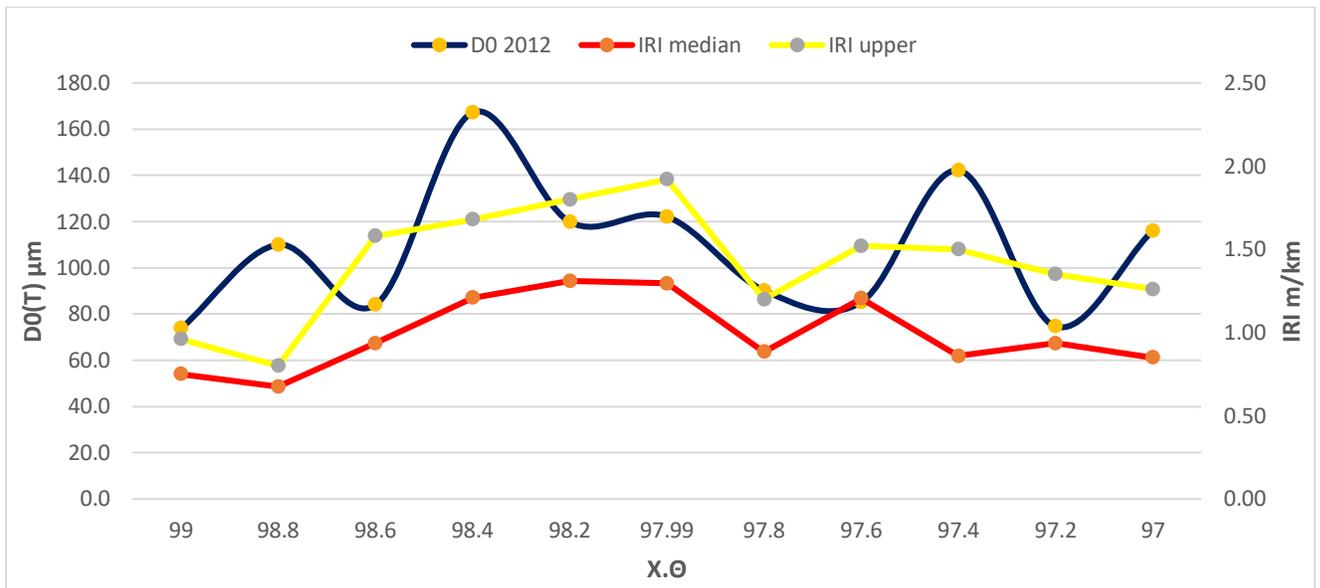
Εικόνα 5.36 Εξέλιξη του δείκτη κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D0(T)-IRI median-upper-Οδόστρωμα Β1



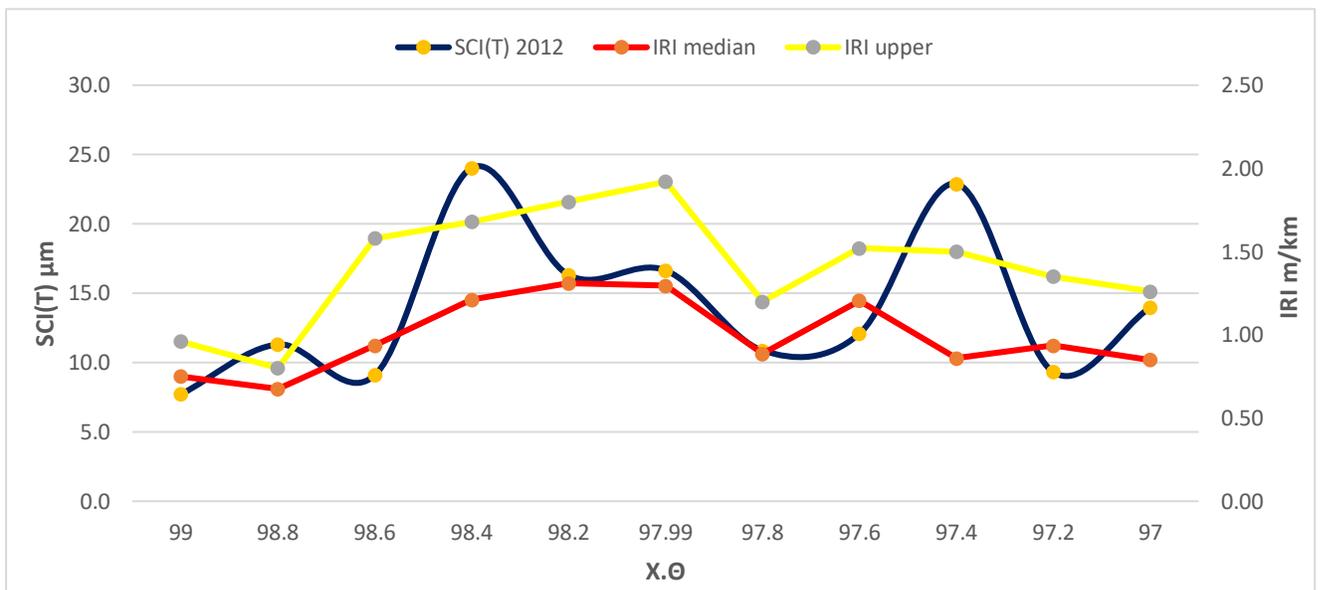
Εικόνα 5.37 Εξέλιξη του δείκτη SCI- IRI median-upper-Οδόστρωμα Β1



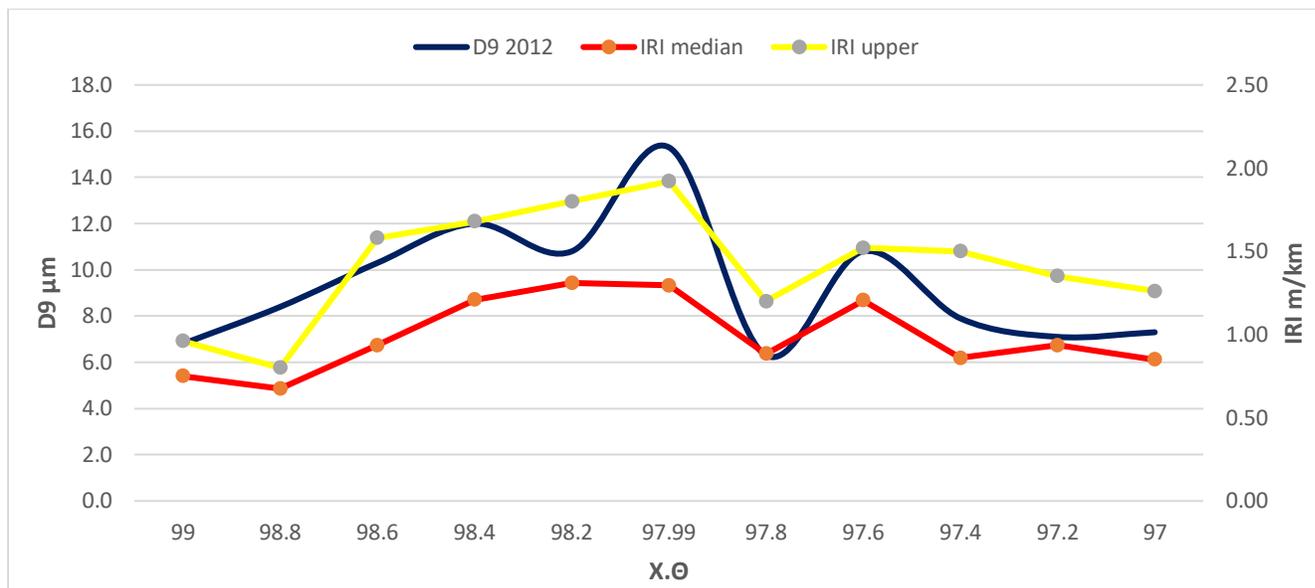
Εικόνα 5.38 Εξέλιξη του δείκτη D9- IRI median-upper-Οδόστρωμα Β1



Εικόνα 5.39 Εξέλιξη του δείκτη κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D0(T)-IRI median-upper-Οδόστρωμα B2



Εικόνα 5.40 Εξέλιξη του δείκτη SCI-IRI median-upper-Οδόστρωμα B2



Εικόνα 5.41 Εξέλιξη του δείκτη D9-IRI median-upper-Οδόστρωμα B2

## 5.6 Συσχέτιση IRI και δεικτών δομικής κατάστασης

Η ποσοτική αξιολόγηση των συσχετίσεων μεταξύ του IRI και των δεικτών δομικής κατάστασης έγινε μέσω του συντελεστή προσδιορισμού (coefficient of determination)  $R^2$ . Θεωρώντας τους δείκτες δομικής κατάστασης ως εξαρτημένες μεταβλητές και τις τιμές ομαλότητας ως ανεξάρτητες ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.1)$$

- ✚ όπου  $n$  είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων,  $y_i$  είναι οι πραγματικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$ ,  $\bar{y}$  είναι η μέση τιμή της μεταβλητής  $Y$  και  $\hat{y}$  είναι οι εκτιμημένες τιμές της  $Y$ .
- ✚ Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  κυμαίνονται από το 0 ως το 1 και όσο η τιμή πλησιάζει προς το 1 τόσο καλύτερη η συσχέτιση.

Με στόχο την διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών ομαλότητας και δομικής αξιολόγησης υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ . Στους Πιν.5.12-5.15

παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  για όλα τα έτη του οδοστρώματος A μεταξύ των δεικτών IRI median και upper IRI με τις αντίστοιχες ελαστικές υποχωρήσεις. Αναλυτικότερα, αφού επιλεγθεί η χαρακτηριστική τιμή του δείκτη upper IRI και ο υπολογισμός των IRI median των εκάστοτε τμημάτων για κάθε έτος ξεχωριστά, γίνεται η αντιστοίχιση τους στις θέσεις των δοκιμών του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους. Ύστερα, με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (excel) υπολογίζεται ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  για κάθε δείκτη δομικής κατάστασης και των δεικτών IRI upper και median. Από τα αποτελέσματα της μελέτης στο οδόστρωμα A δεν εμφανίζεται χρήσιμη συσχέτιση (π.χ. Εικ.5.42-5.43). Εν αντιθέσει με το οδόστρωμα A, το οδόστρωμα B1, η δομική κατάσταση παρουσιάζει μέτρια προς καλή συσχέτιση με την ομαλότητα (π.χ. Εικ.5.44) που έρχεται σε αντίθεση με το B2 όπου παρουσιάζει μια φτωχή συσχέτιση με τον δείκτη ομαλότητας. Ακόμη στα οδοστρώματα B1 και B2 καταγράφεται μια καλή συσχέτιση του δείκτη ομαλότητας median και upper με τον δείκτη D9 της στρώσης έδρασης, κάτι που δεν παρατηρείται στο οδόστρωμα στο A. Ενδεικτικά παραδείγματα παρουσιάζονται στις Εικ.5.42-5.47.

*Πίνακας 5.12 Συσχέτιση IRI median-δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Α*

	Υ 2012	Υ 2015	Υ 2018	Υ 2021
<b>D0-IRI MEDIAN</b>	0,05	0,01	0,00	0,05
<b>SCI-IRI MEDIAN</b>	0,02	0,00	0,00	0,13
<b>BDI-IRI MEDIAN</b>	0,10	0,04	0,00	0,03
<b>BCI-IRI MEDIAN</b>	0,07	0,00	0,00	0,12
<b>D9-IRI MEDIAN</b>	0,02	0,00	0,00	0,05

*Πίνακας 5.13 Συσχέτιση IRI upper -δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Α*

$\bar{T}$	15,2°C	34,3°C	28,2°C	34,1°C
$R^2$	Υ 2012	Υ2015	Υ2018	Υ2021
<b>D0-IRI upper</b>	0,01	0,00	0,00	0,03
<b>SCI-IRI upper</b>	0,00	0,01	0,00	0,22
<b>BDI-IRI upper</b>	0,05	0,00	0,00	0,07
<b>BCI-IRI upper</b>	0,06	0,01	0,00	0,01
<b>D9-IRI upper</b>	0,01	0,10	0,00	0,01

*Πίνακας 5.14 Συσχέτιση IRI median-δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Β1*

	Υ 2012	Υ 2014	Υ 2015	Υ 2016	Υ 2018	Υ 2019	Υ 2020	Υ 2021
<b>DO-IRI MEDIAN</b>	0,45	0,58	0,51	0,40	0,69	0,57	0,38	0,20
<b>SCI-IRI MEDIAN</b>	0,31	0,47	0,53	0,31	0,48	0,36	0,31	0,11
<b>BDI-IRI MEDIAN</b>	0,45	0,54	0,58	0,46	0,59	0,51	0,37	0,23
<b>BCI-IRI MEDIAN</b>	0,44	0,64	0,49	0,23	0,68	0,42	0,26	0,16
<b>D9-IRI MEDIAN</b>	0,06	0,17	0,54	0,53	0,58	0,53	0,71	0,36

*Πίνακας 5.15 Συσχέτιση IRI upper-δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Β1*

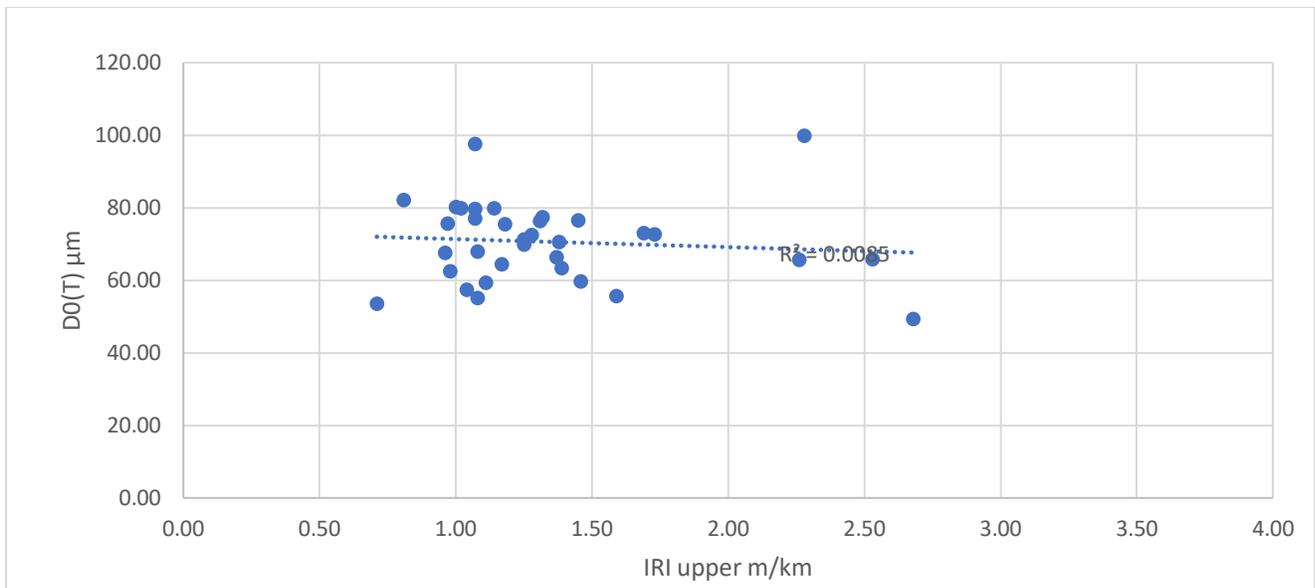
<b><math>\bar{T}</math></b>	<b>19,8°C</b>	<b>31,4°C</b>	<b>14,8°C</b>	<b>15,8°C</b>	<b>23,3°C</b>	<b>16,5°C</b>	<b>14,2°C</b>	<b>18,5°C</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Υ 2012</b>	<b>Υ 2014</b>	<b>Υ 2015</b>	<b>Υ 2016</b>	<b>Υ 2018</b>	<b>Υ 2019</b>	<b>Υ 2020</b>	<b>Υ 2021</b>
<b>DO-IRI upper</b>	0,35	0,21	0,22	0,35	0,83	0,44	0,08	0,36
<b>SCI-IRI upper</b>	0,32	0,12	0,12	0,50	0,70	0,33	0,05	0,19
<b>BDI-IRI upper</b>	0,37	0,18	0,20	0,38	0,76	0,37	0,08	0,39
<b>BCI-IRI upper</b>	0,33	0,21	0,24	0,17	0,86	0,26	0,05	0,29
<b>D9-IRI upper</b>	0,08	0,10	0,09	0,19	0,45	0,40	0,42	0,35

Πίνακας 5.16 Συσχέτιση IRI median-δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Β2

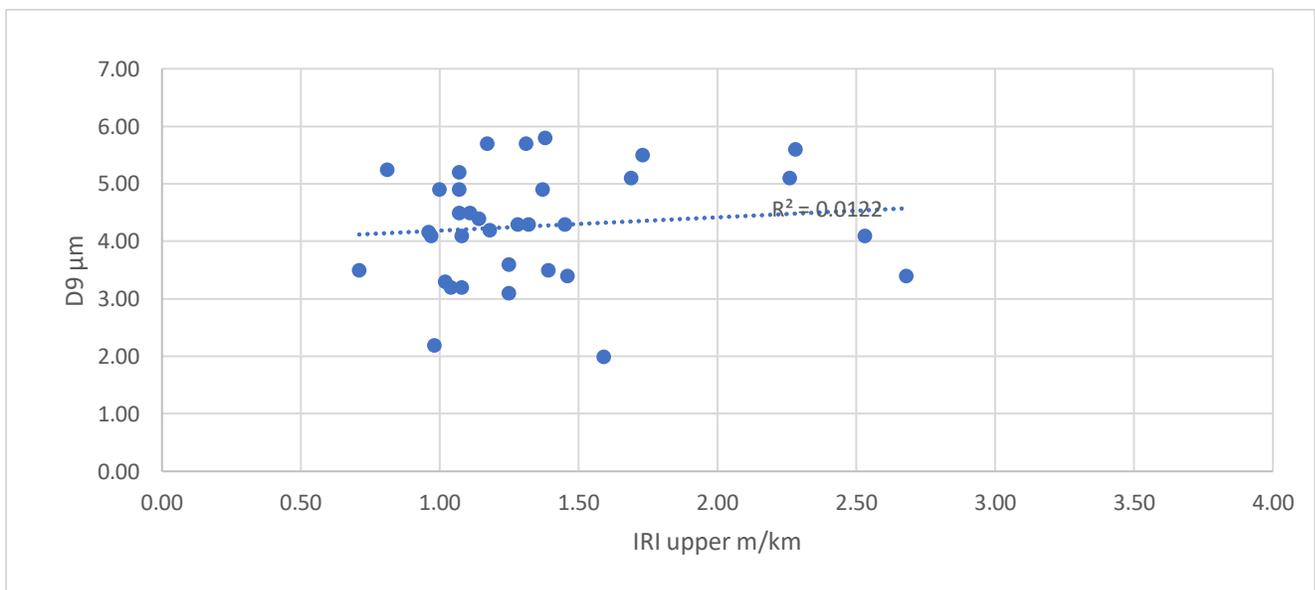
	Υ 2012	Υ 2014	Υ 2015	Υ 2016	Υ 2018	Υ 2019	Υ 2020	Υ 2021
D0-IRI MEDIAN	0,12	0,01	0,00	0,36	0,14	0,12	0,15	0,11
SCI-IRI MEDIAN	0,20	0,00	0,00	0,05	0,05	0,04	0,10	0,06
BDI-IRI MEDIAN	0,20	0,00	0,00	0,26	0,19	0,08	0,10	0,06
BCI-IRI MEDIAN	0,12	0,01	0,02	0,38	0,30	0,07	0,06	0,06
D9-IRI MEDIAN	0,65	0,40	0,00	0,47	0,38	0,37	0,49	0,31

Πίνακας 5.17 Συσχέτιση IRI upper-δεικτών δομικής κατάστασης στο οδόστρωμα Β2

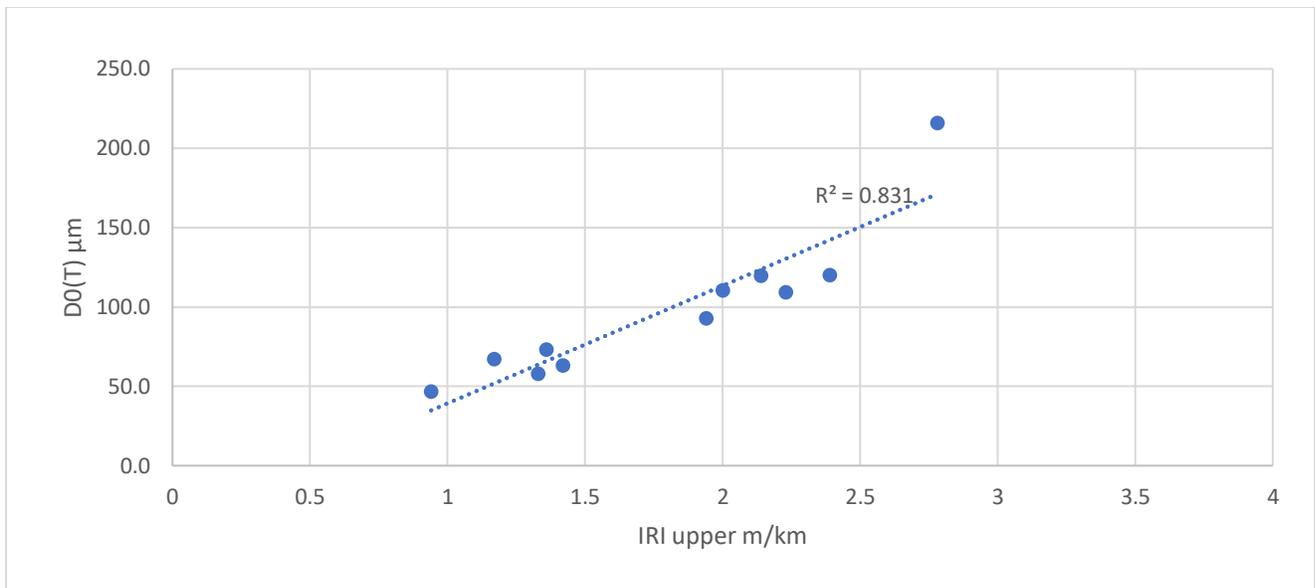
$\bar{T}$	21,8°C	15,5°C	14,2°C	11,4°C	15,2°C	13,9°C	14,8°C	18,7°C
	Υ 2012	Υ 2014	Υ 2015	Υ 2016	Υ 2018	Υ 2019	Υ 2020	Υ 2021
D0-IRI upper	0,18	0,01	0,01	0,36	0,18	0,23	0,12	0,04
SCI-IRI upper	0,29	0,21	0,01	0,13	0,15	0,16	0,10	0,02
BDI-IRI upper	0,29	0,21	0,01	0,32	0,03	0,23	0,10	0,02
BCI-IRI upper	0,18	0,28	0,02	0,37	0,06	0,22	0,09	0,01
D9-IRI upper	0,60	0,30	0,01	0,59	0,06	0,16	0,19	0,10



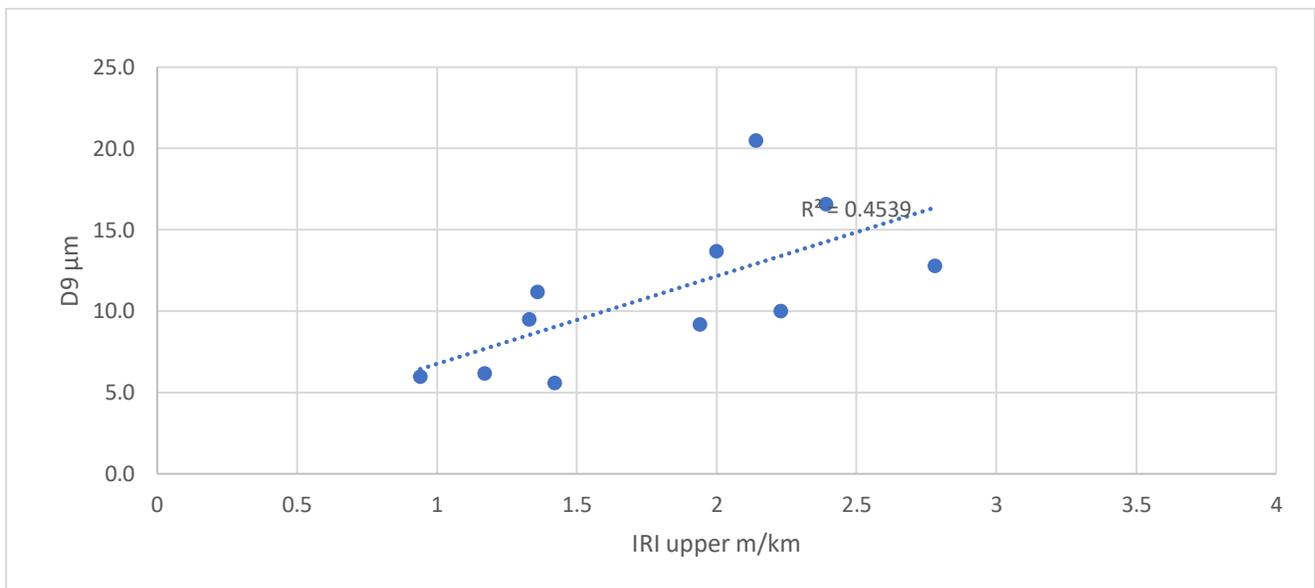
**Εικόνα 5.42** Συσχέτιση D0(T)-IRI upper για το έτος 2021 του οδοστρώματος A



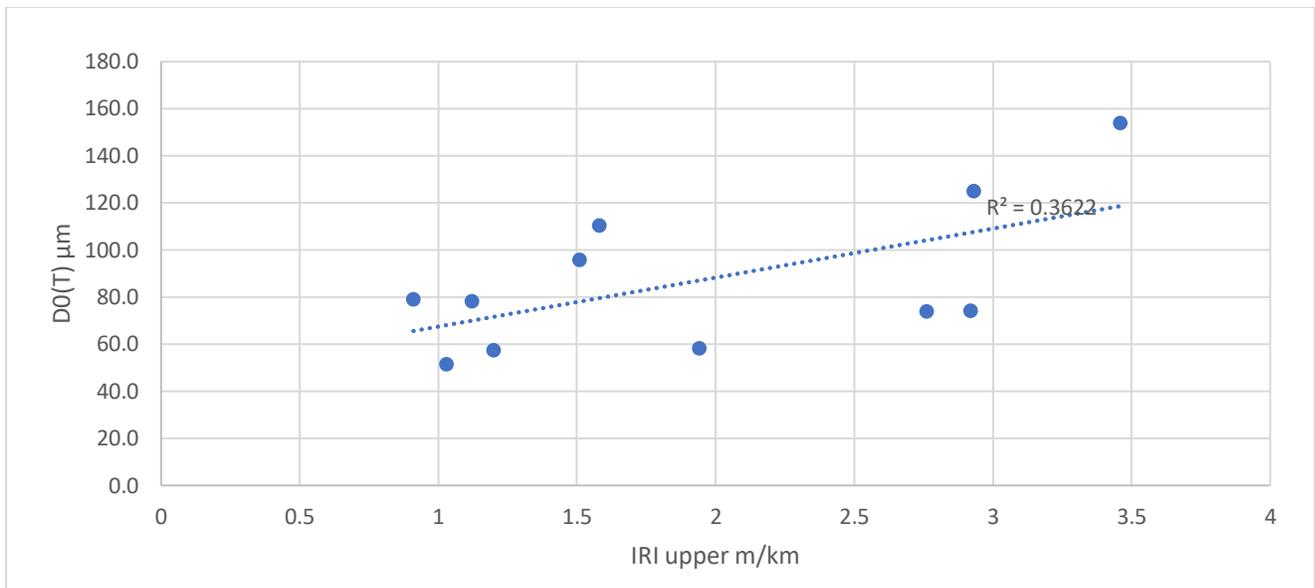
**Εικόνα 5.43** Συσχέτιση δείκτη D9 -IRI upper για το έτος 2021 του οδοστρώματος A



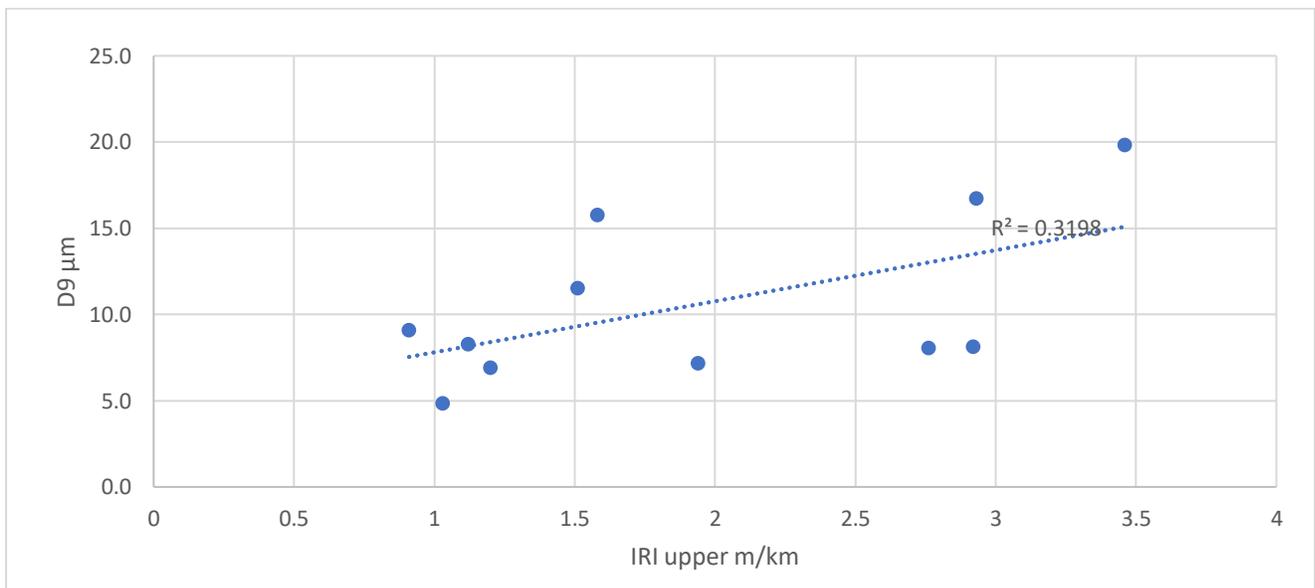
**Εικόνα 5.44** Συσχέτιση των δεικτών D0-IRI upper για το έτος 2018 του οδοστρώματος B1



**Εικόνα 5.45** Συσχέτιση των δεικτών D9-IRI upper για το έτος 2018 του οδοστρώματος B1



**Εικόνα 5.46** Συσχέτιση των δεικτών D0-IRI upper για το έτος 2016 του οδοστρώματος B2



**Εικόνα 5.47** Συσχέτιση των δεικτών D9-IRI upper για το έτος 2016 του οδοστρώματος B2

## 5.7 Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης δεικτών δομικής κατάστασης

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την διάρκεια των δοκιμών, η θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων, τα πάχη των στρώσεων, οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν καθώς και τα φορτία που καταπονούν το οδόστρωμα αποτελούν μερικούς από τους παράγοντες που συμβάλλουν στην συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και συνεπώς επηρεάζουν και τους αντίστοιχους δείκτες δομικής κατάστασης. Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές και από τις προσεγγίσεις που γίνονται με στόχο την καλύτερη δυνατή απεικόνιση της καμπύλης του προφίλ των υποχωρήσεων(π.χ. αναγωγή στην θερμοκρασία και στο φορτίο αναφοράς), ώστε να επιτρέπεται συγκριτική αξιολόγηση σε βάθος χρόνου.

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά κάποιων από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τους υπό εξέταση δείκτες εξετάστηκε η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης των δομικών δεικτών με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

Η γενική μορφή θεωρητικού μοντέλου παλινδρόμησης είναι:

$$Y = f(X_1, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (5.2)$$

$$E(\varepsilon) = 0,$$

- ✚ Η απλούστερη μορφή του (και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη) είναι η γραμμική (η  $f$  να είναι γραμμική συνάρτηση)
- ✚ Όταν  $k=1$ , το μοντέλο ονομάζεται απλό (περιέχει μία μεταβλητή)
- ✚ Όταν  $k>1$ , το μοντέλο ονομάζεται πολλαπλό ή πολυμεταβλητό

Κατόπιν μελέτης και αξιοποίησης του θεωρητικού υπόβαθρου, των στοιχείων και αναλύσεων στο πειραματικό οδόστρωμα Α δημιουργήθηκε το μοντέλο πρόβλεψης του δείκτη δομικής κατάστασης των ανώτερων στρώσεων με αφορμή την παρόμοια τάση του δείκτη αυτού με τον δείκτη συνολικής κατάστασης του οδοστρώματος Α. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την δημιουργία του μοντέλου ήταν η θερμοκρασία, τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων και ο δείκτης ομαλότητας upper IRI. Να σημειωθεί πως η επιλογή των παραμέτρων δεν ήταν τυχαία. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία η θερμοκρασία των

ασφαλικών στρώσεων καθώς και τα πάχη επηρεάζουν τις υποχωρήσεις του οδοστρώματος. Επιπροσθέτως η επιλογή του IRI upper τεκμηριώνεται από την Εικ.5.34 που παρουσιάστηκε παραπάνω, όπου οι δείκτες SCI και upper IRI ακολουθούν παρόμοια πορεία εξέλιξης με την πάροδο του χρόνου. Το μοντέλο πρόβλεψης που δημιουργήθηκαν ήταν το εξής:

$$SCI = \alpha_1 * T + \alpha_2 * IRI\ upper + \alpha_3 * h_1 + \alpha_4 \quad (5.3)$$

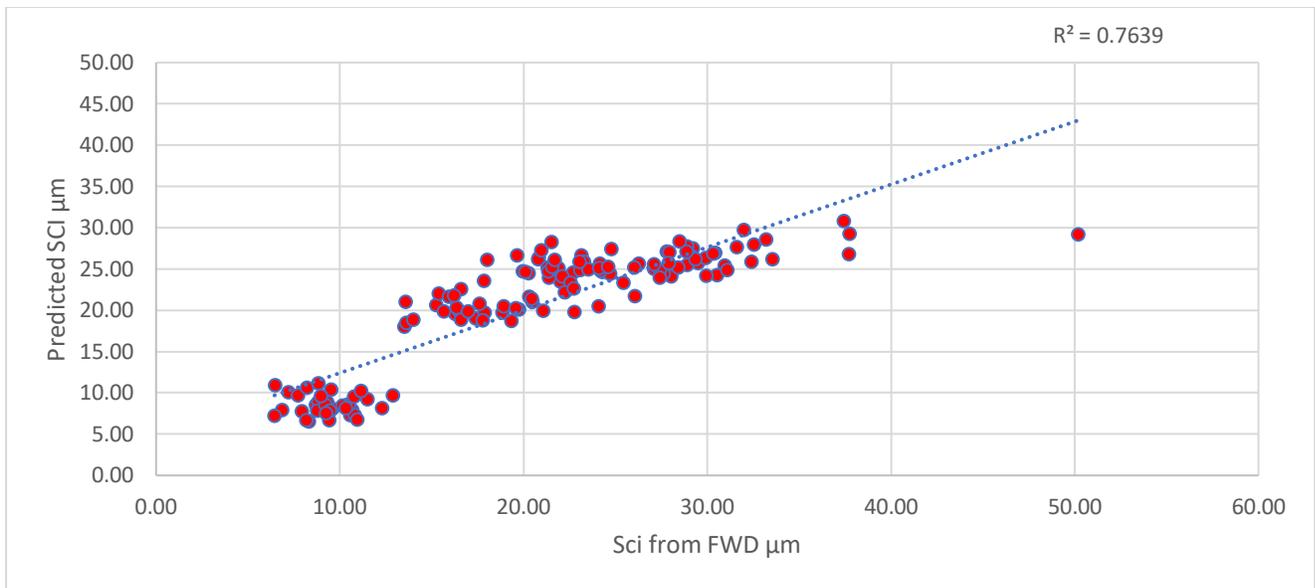
Λόγω της ανάπτυξης μοντέλου, θα ληφθούν υπόψη οι αρχικές τιμές του δείκτη δομικής κατάστασης SCI προτού γίνει η αναγωγή στην θερμοκρασία, ώστε να μην εισαχθούν στο μοντέλο επιπλέον αβεβαιότητες που προκύπτουν από την χρήση αλγόριθμων κανονικοποίησης. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε χρησιμοποιώντας ειδικό υπολογιστικό λογισμικό (excel). Κριτήριο ελέγχου αποτέλεσε η καλή προσαρμογή του μοντέλου στα στοιχεία, ώστε να μεγιστοποιείται η τιμή του R<sup>2</sup>. Τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στους Πιν.5.18-5.19 και στην Εικ.5.48

*Πίνακας 5.18 Συντελεστές παλινδρόμησης του μοντέλου πρόβλεψης*

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
0.9187	0.8259	0.078	10.1768

*Πίνακας 5.19 Υπολογισμός του δείκτη συσχέτισης R<sup>2</sup> στο πειραματικό οδόστρωμα A*

R <sup>2</sup>	Πειραματικό Οδόστρωμα A
SCI- Temperature -h-IRI upper	0,756



Εικόνα 5.48 Διάγραμμα παλινδρόμησης στο πειραματικό οδόστρωμα Α

### 5.8 Αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης

Για την δημιουργία ενός μοντέλου δεν αρκεί μόνο η ανάπτυξη του και ο προσδιορισμός του δείκτη συσχέτισης. Κατόπιν της ανάπτυξης του μοντέλου, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου. Για τον προσδιορισμό των αποκλίσεων των τιμών που προκύπτουν από το προτεινόμενο μοντέλο και τις τιμές που καταγράφηκαν από τις μετρήσεις με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, υπολογίστηκε για τα εξεταζόμενα τμήματα B1 και B2 το ποσοστό σφάλματος Root Mean Square Percentage Error (RMSPE) σύμφωνα με το οποίο καταγράφεται το σφάλμα εκτίμησης του δείκτη. Η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

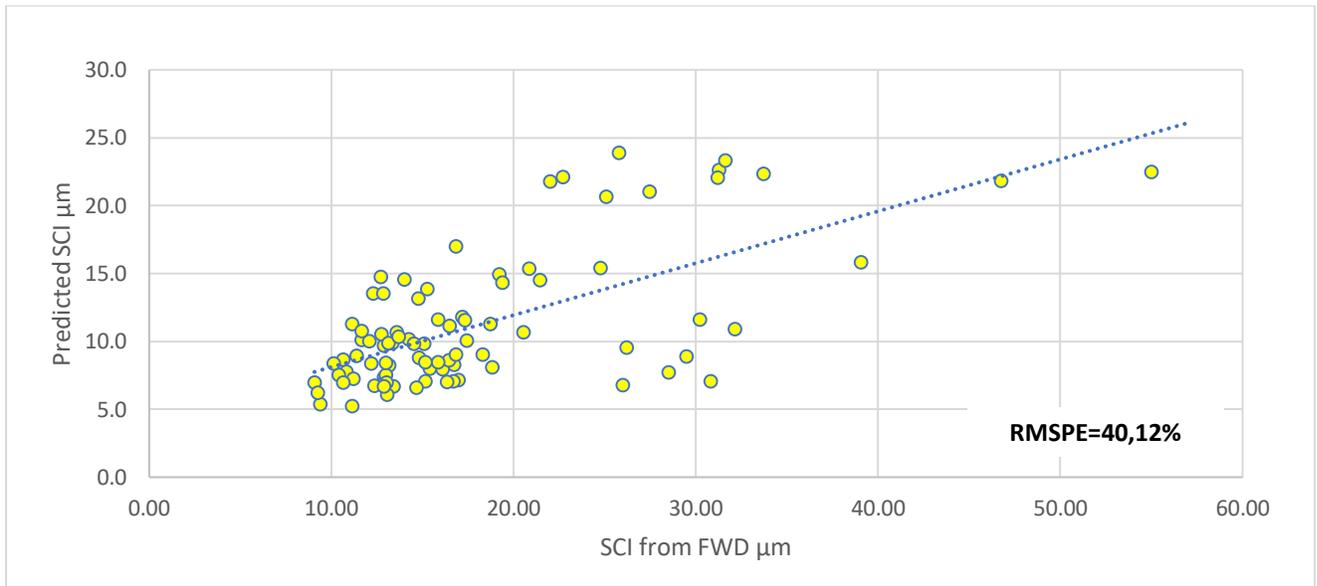
$$RMSPE = 100 * \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{|d|}{D_{(FWD)}}} \quad (5.4)$$

Όπου

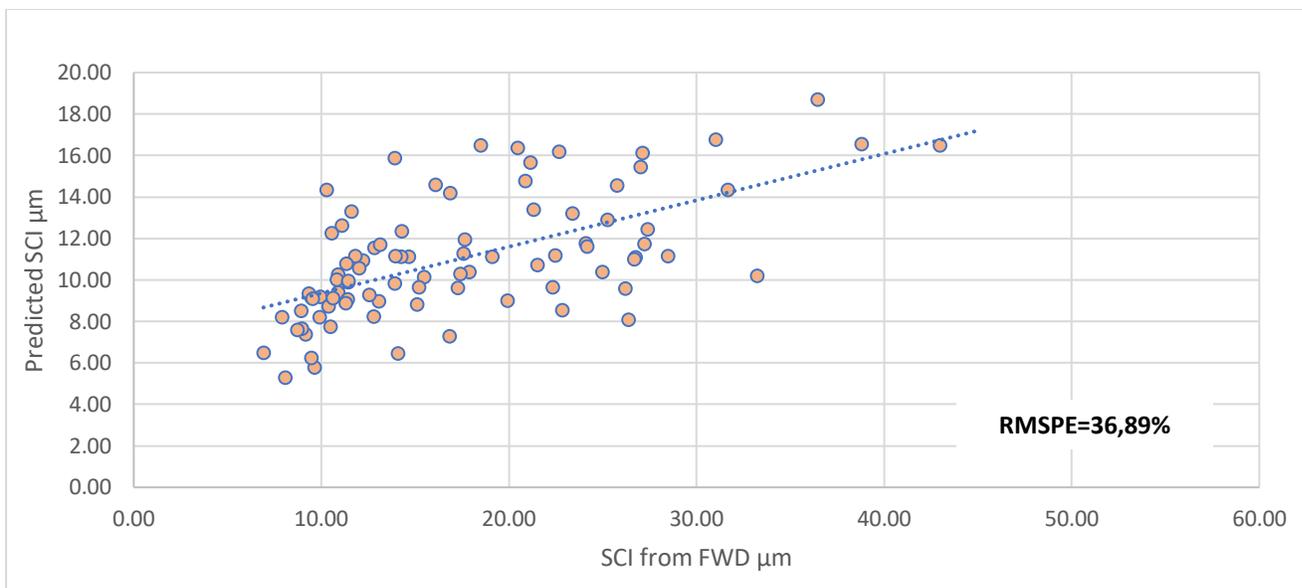
d : η διαφορά της τιμής που εκτιμήθηκε και της πραγματικής τιμής (μετρημένης)

D : η πραγματική ελαστική υποχώρηση που μετρήθηκε από το FWD (ή ο δείκτης SCI)

Με γνώμονα το μοντέλο εκτίμησης που δημιουργήθηκε στο πειραματικό οδόστρωμα Α πραγματοποιήθηκε έλεγχος ακρίβειας με την εφαρμογή του στα πειραματικά οδοστρώματα Β1 & Β2 με τον υπολογισμό του RMSPE. Γενικά μικρές τιμές του RMSPE υποδηλώνουν ικανοποιητική ακρίβεια του μοντέλου. Παρατηρείται πως οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι ιδιαίτερα υψηλές γεγονός που υποδηλώνει πως το μοντέλο εμφάνισε μειωμένη ακρίβεια στα πειραματικά οδοστρώματα Β1 και Β2 (Εικ.5.49-5.50 και Πιν.5.20).



*Εικόνα 5.49 Εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης στο πειραματικό οδόστρωμα Β1*



*Εικόνα 5.50 Εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης στο πειραματικό οδόστρωμα B2*

*Πίνακας 5.20 Κριτήριο ελέγχου ακρίβειας RMSPE*

	Πειραματικό Οδόστρωμα B1	Πειραματικό Οδόστρωμα B2
RMSPE	40,12%	36,89%

## Σχολιασμός

Ύστερα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, την μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων από την τράπεζα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ παρατηρήθηκε πως η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δεικτών επιφανειακής και δομικής κατάστασης είναι ιδιαίτερα απαιτητική. Από την επεξεργασία των στοιχείων γίνεται αντιληπτό πως κάθε οδόστρωμα συμπεριφέρεται διαφορετικά. Εξαιτίας των ποικίλων παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός οδοστρώματος προκύπτει η ανάγκη εντοπισμού συσχετίσεων της ομαλότητας με περισσότερους δείκτες οι οποίοι ενδεχομένως περιγράφουν αναλυτικότερα την υποδομή. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε είχε διαφορετική συμπεριφορά στα οδοστρώματα B1 και B2, γεγονός που υποδεικνύει ότι κάθε οδόστρωμα χρειάζεται διαφορετικό χειρισμό λόγω

της διαφορετικής συμβολής που έχουν οι επιμέρους στρώσεις στην συνολική συμπεριφορά του οδοστρώματος.

## 6. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση αλληλεπίδρασης μεταξύ των δεικτών δομικής αξιολόγησης ενός οδοστρώματος και των δεικτών αξιολόγησης της επιφανειακής κατάστασης που εκφράζεται μεταξύ άλλων από την ομαλότητα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον διεθνή δείκτη ομαλότητας και το παραμόρφωσιμέτρο πίπτοντος βάρους και τους συναφείς δείκτες δομικής κατάστασης. Εν συνεχεία, για την επίτευξη του στόχου αυτής της διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις των δεδομένων που αντλήθηκαν από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις αναλύθηκαν με σκοπό τη διερεύνηση συσχέτισης της επιφανειακής κατάστασης των υπό εξέταση οδοστρωμάτων και των αντίστοιχων καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων. Για την δημιουργία ζευγών μεταξύ του δείκτη ομαλότητας και των δεικτών δομικής κατάστασης πραγματοποιήθηκαν αρκετές παραδοχές με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του συνολικού υπό διερεύνηση μήκους σε επιμέρους υποτμημάτα. Επειδή οι μετρήσεις για την καταγραφή της ομαλότητας είναι συνεχείς, ενώ οι μετρήσεις με το FWD διακριτές, επιλέχθηκε η διάμεσος και μια επιπλέον χαρακτηριστική άνω τιμή του IRI (οριζόμενη ως  $IRI_{upper} = \max\{80^{th} \text{ percentile}, IRI_{στο \text{ σημείο μέτρησης με το FWD}}\}$ ) για κάθε υποτμήμα, ώστε να εκφραστούν καλύτερα οι περιοχές που εμφανίζουν ζητήματα ομαλότητας. Ύστερα, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αλλά και τα διαγράμματα εξέλιξης των δεικτών δομικής και επιφανειακής κατάστασης εξετάστηκε η δυνατότητα δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης των δεικτών δομικής κατάστασης, με βάση τις καταγραφές ομαλότητας αξιοποιώντας στοιχεία από το πειραματικό οδόστρωμα Α. Τέλος πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του μοντέλου στα οδοστρώματα Β1 και Β2 όπου έγινε έλεγχος ακρίβειας των αποτελεσμάτων με τον στατιστικό δείκτη RMSPE προκειμένου να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητά του. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο των αναλύσεων είναι τα εξής:

- Αναφορικά με την θερμοκρασία που καταγράφεται στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων κατά την διενέργεια μετρήσεων δομικού χαρακτήρα, παρατηρήθηκε

πως για περιόδους μετρήσεων με θερμοκρασίες της τάξεως των 15°C και 30°C οι επιμέρους δείκτες εμφάνισαν χαμηλή συσχέτιση εν αντιθέσει με τις μετρήσεις που έγιναν κοντά στην θερμοκρασία αναφοράς των 20°C. Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές τόσο στο οδόστρωμα A, όπου οι τιμές απέκλειαν αρκετά από τη θερμοκρασία αναφοράς με αποτέλεσμα οι συσχετίσεις που παρατηρήθηκαν να είναι αρκετά χαμηλές, όσο και στο B1 όπου γίνεται κατανοητό πως όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή της θερμοκρασίας στην θερμοκρασία αναφοράς τόσο καλύτερη γίνεται και η συσχέτιση.

- Ακόμη, αξιολογώντας τις τιμές που προέκυψαν από τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  αναδείχθηκε ότι ο τρόπος συσχέτισης των υπό εξέταση δεικτών δομικής και επιφανειακής κατάστασης δεν είναι μονοσήμαντος, στα υπό διερεύνηση οδοστρώματα. Στο οδόστρωμα A, ο δείκτης SCI συσχετίσθηκε με τον δείκτη IRI upper ενώ στα B1 και B2 με τον δείκτη D9. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην διαφορετική συνεισφορά των επιμέρους στρώσεων στην συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.
- Βάσει αυτών των παρατηρήσεων, επιλέχθηκε ο δείκτης αξιολόγησης των ανώτερων στρώσεων (SCI), για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης, ο οποίος εμφάνισε καλή συσχέτιση με τον δείκτη upper IRI στο οδόστρωμα A. Η ανάπτυξη του μοντέλου έγινε λαμβάνοντας υπόψη ως δεδομένα εισόδου το επίπεδο ομαλότητας, το πάχος και την θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων, και η προσαρμογή του μοντέλου στα διαθέσιμα στοιχεία ήταν ικανοποιητική ( $R^2 = 0.76$ ). Ωστόσο, η μειωμένη ακρίβεια που παρατηρήθηκε ύστερα από την εφαρμογή του για την πρόβλεψη της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων B1 και B2 ανέδειξε πως η δημιουργία ενός μοντέλου με καθολική εφαρμογή δεν είναι εφικτή. Αναλυτικότερα, από την εφαρμογή του μοντέλου στα οδοστρώματα B1 και B2 γίνεται κατανοητό πως η χρήση του συνδέεται με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της διατομής του οδοστρώματος και των συνθηκών που επικρατούν σε αυτό. Ενδεχομένως να είχε νόημα η ανάπτυξη και βαθμονόμηση μοντέλου με τοπική εφαρμογή (π.χ. σε ένα μόνο οδόστρωμα) ύστερα από

περιοδικές μετρήσεις με στόχο την πρόβλεψη της δομικής συμπεριφοράς του εκάστοτε οδοστρώματος σε βάθος χρόνου στο πλαίσιο της παρακολούθησής του με στόχο τη βελτιστοποίηση στη διαχείριση της συντήρησής του.

- Τέλος, συμβαδίζοντας με την βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται ότι υπάρχει μια έστω μέτρια συσχέτιση μεταξύ των δεικτών δομικής και επιφανειακής κατάστασης, η οποία όμως είναι ανεπαρκής να καταστήσει εφικτή την εκτίμηση των δεικτών δομικής κατάστασης καθολικά με βάση τα στοιχεία της επιφανειακής κατάστασης (ομαλότητας). Η μειωμένη ακρίβεια προσαρμογής του μοντέλου πρόβλεψης ( $RMSPE=40.12\%$  &  $36.89\%$ ) σε οδοστρώματα διαφορετικά από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξή του ανέδειξε την πολυπλοκότητα της διαδικασίας μοντελοποίησης.

Ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας όσον αφορά στην αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης των δεικτών δομικής και επιφανειακής κατάστασης διαμορφώνονται οι εξής προτάσεις:

- Διερεύνηση δημιουργίας εναλλακτικών μοντέλων πρόβλεψης (π.χ. λογαριθμικών, εκθετικών) για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και τη μεγιστοποίηση του συντελεστή συσχέτισης.
- Έλεγχος του μοντέλου με αξιοποίηση περισσότερων δεδομένων αλλά και εφαρμογή σε διαφορετικές κατηγορίες οδών ώστε να διερευνηθεί εάν επαρκεί για μεγαλύτερο εύρος κατηγοριών οδοστρωμάτων.
- Τέλος, προτείνεται η διερεύνηση κατασκευής ενός μοντέλου εκτίμησης της κατάστασης ενός οδοστρώματος λαμβάνοντας συνδυαστικά ως παραμέτρους όχι μόνο τον δείκτη ομαλότητας και τυχόν άλλα είδη φθορών που εμφανίζονται στο εκάστοτε οδόστρωμα.

## 7. Βιβλιογραφία

- AAHSTO. (1962). The AASHTO Road Test , Report 5, Pavement Research. In *Highway Research Board Report 61E*.
- Arrbsystems. (2020). *Arrbsystems*. Retrieved from Arrbsystems: <https://bcluae.com>
- Austroroads. (2008). *Guide to Asset Management Part 5D :Strength*. Austroroads.
- Authority, N. R. (2000). *Guidelines for the Use of the of the Falling Weight Deflectometer in Ireland*. TII Publications.
- Brokaw, M. (1967). Development of the PCA Road Meter: A Rapid Method for Measuring Slope Variance. pp. 137-149.
- Burns, & J.C. (1981). Roughness and Roadway Safety. pp. 8-14.
- Chatti, K., Kutay, M. E., Lajnef, N., Zaabar, I., Varma, S., & Lee, H. S. (2017). *Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers*. FHWA.
- Dynatest. (2010). *Road Surface Profiler 5051, Mark III*.
- Fakhi, M., & Reza Shahni Dezfoulian. (2019). Construction and Building Materials. In *Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model* (pp. 768-780, Volume 20).
- FHWA. (1989). *Automated Pavement Condition Data Collection Equipment. Resource Paper contained within the FHWA Pavement Notebook*.
- Freeme. (1983). *Evaluation of pavement behavior for major rehabilitation of roads*. Pretoria: NITRR Technical Report.
- Gillespie. (1992). *Everything you Always Wanted to know about IRI but were afraid to ask*. Nebraska.
- Hakim, & Brown. (2006). Pavement Analysis Using the FWD: Practical Difficulties and Proposed Simplifications. (pp. 12-17). Canada: 10th International Conference on Asphalt Pavements.
- Highway Research Board. (1972). *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 14: Skid Resistance*. Washington. Ανάκτηση από Pavement Interactive.
- Horak. (1987). The use of surface deflection basin measurements in the mechanistic analysis of flexible pavements Volume I. Michigan: 6th International conference.
- Horak. (1988). The use of Surface deflection basin parameters in mechanistic analysis of flexible pavements. Pretoria: 6th International Conference.
- Horak. (2007). Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as a benchmarking tool. 26th Southern African Transport Conference (SATC 2007).
- Horak, Hefer, Emery, & Maina. (2015). *Flexible road pavement structural condition benchmark methodology*. Journal of Civil Engineering and Construction.

- Kurt, Smith, Pam, & Prashant. (2016). *Measuring and Specifying Pavement Smoothness*. Federal Highway Administration.
- L.Hederson, G. (2006). *Long-Term Pavement Performance Program Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements*. Federal Highway Administration.
- Laura E., Ghosh, Lu Li-qun, Ozer Hasan, Ouyang, Yan-feng, & Imad L. AL-Qadi. (2019, April). Effects of pavement surface roughness and congestion on expected freeway traffic energy consumption . *Sage Journal*, pp. 10-19.
- Liu, H.-h.-x.-g. (2016, May). Research and verification of transfer model for roughness conditions of pavement construction. *Science Direct*, pp. 222-227,Volume 9.
- M.S.Janoff. (1990). The effect of incised initial pavement smoothness on long term pavement performance and annual pavement maintenance cost. *Napal Annual Meeting*. Honolulu.
- Mansour, F., & Shahni, D. R. (2019). Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. In F. Mansour, & D. R. Shahni, *Construction and Building Materials* (pp. 768-780,Volume 204).
- MTAG. (2007). Surface Characteristics. In *Rigid Pavement Preservation* (pp. 3-7). Caltrans Division of Maintenance.
- Mubarak, M. (2016, September). Highway subsurface assessment using pavement surface distress and roughness data. *Science Direct*, pp. 393-402,Volume 9.
- NCHRP. (2002). *Issues in Pavement Smoothness: A Summary report*. National Cooperative Highway Research Board,National Research.
- NCHRP. (1980). *Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems Report 228*. National Cooperative Highway Research Program .
- Nega, A., Hamid Nikraz, & Imad L. Al Qadi. (2016). Dynamic analysis of falling weight deflectometer. pp. 427-437,Volume 3,Issue 5.
- Pavement Interactive. (χ.χ.). *Pavement Interactive*. Ανάκτηση από [www.pavementinteractive.org](http://www.pavementinteractive.org)
- Perera, & Kohn. (2002). *Issues in Pavement Smoothness: A Summary Report*. Retrieved from NCHRP.
- PIARC. (2002). International experiment to harmonize longitudinal and transverse profile measurement and reporting procedure. *PIARC Technical Committie on Surface Characteristics (C1), World Road Assosiation*. France.
- Pierce, L. M., Bruinsma, J. E., Smith, K. D., Wade, M. J., Chatti, K., & Vandenbossche, J. M. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III:Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation*. FHWA.
- S.Sharma, & A. Das. (2008). Backcalculation of pavement layer moduli from falling weight deflectometer data using an artificial networj. *Canadian Journal of Civil Engineering*, pp. 57-66.
- Sayers, & Michael W. (1995). *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile ,No.1501*. Transportation Research Board.

- Sayers, M. W., & M.Karamihas, S. (1998). The Little Book of Profiling. In *Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profils* (pp. 45-52).
- Smith, K. D., Bruinsma, J. E., Wade, M. J., Chatti, K., Vandenbossche, J. M., & Yu, H. T. (2017). *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic -Empirical design and Analysis ,Volume I: Final Report*. U.S Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Sun, L. (2003). Simulation of pavement roughness and IRI based on power spectral density. In *Mathematics and Computer Simulation* (pp. 77-88).
- Systems, S. (2022). *Surface Systems & Instruments*.
- Talvik, O., & Aavik, A. (2009). Use of FWD deflection basin parameters (SCI,BCI,BCI). *The baltic journal of road and bridge engineerin*, pp. 196-202.
- Tonkin, & Taylor Ltd. (1998). *Pavement Deflection Measurement & Interpretation for the design of Rehabilitation Treatments Reasearch Report 115*. Auckland,New Zealand.
- Wu, Zhang, & Abadie. (2013). Determining structural strength of existing asphalt layer using condition survey data. *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 603-611.
- Λοΐζος, & Πλατή. (2020). *Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων*. Ε.Μ.Π.
- Λοΐζος, Α., & Πλατή. (2020). *Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων*. ΕΜΠ.