



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ
ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, Επίκουρο Καθηγήτρια του ΕΜΠ για την ανάθεση της εργασίας, τη συνεχή καθοδήγησή της σε όλα τα στάδια εκπόνησής της, καθώς και για την υποστήριξή της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Κωνσταντίνο Γκυρτή, Υποψήφιο Διδάκτορα, για την πολύτιμη βοήθεια, κατά τη συγγραφή και διόρθωση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για τη στήριξή τους, αλλά κυρίως την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου για όσα μου προσφέρουν καθημερινά.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία βασικός στόχος είναι η διερεύνηση, η ανάδειξη και η ανάλυση δεικτών για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Μέσα από αυτή τη διερεύνηση, τίθεται ως επιπρόσθετος στόχος, η ανάδειξη της εφαρμοσιμότητας των υπόψη δεικτών. Μεθοδολογικά, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ως προς τη γενική διερεύνηση της δομικής αξιολόγησης και ειδικότερα τις μεθόδους και τα συστήματα καταγραφής των ελαστικών υποχωρήσεων. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση θα καθοριστούν και οι δείκτες αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Εν συνεχεία, θα αξιοποιηθούν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), για τη διερεύνηση και ανάλυση των υπόψη δεικτών. Τα δεδομένα αφορούν μετρήσεις ελαστικών υποχωρήσεων σε πειραματικό οδόστρωμα κατά μήκος τμήματος αυτοκινητοδρόμου, οι οποίες διενεργήθηκαν επί σειρά έξι ετών.

ABSTRACT

The main objective of the present diploma thesis is to investigate and analyze indexes for the assessment of flexible pavement's structural condition. The ultimate goal is to prove or disprove the applicability of these indexes. Methodologically, a bibliographical review is undertaken to take into account all the previous scientific knowledge of the pavement structural evaluation, including methods and systems developed to assess the deflections of flexible pavements. The bibliographical review supports the identification of deflection based indexes that used internationally to assess the structural condition of flexible pavements. Getting deflection data from the database of the Laboratory of Pavement Engineering of National Technical University of Athens (NTUA) the identified structural indexes are evaluated and analyzed. It is worthwhile mentioning that the deflection measurements were undertaken annually on an experimental pavement of a highway section in a six-year period.

.

Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	1
1.1.	Αντικείμενο	1
1.2.	Στόχος και μεθοδολογία	2
1.3.	Δομή εργασίας.....	2
2.	Δομική αξιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος	4
2.1.	Γενικά.....	4
2.2.	Αρχές δομικής αξιολόγησης.....	8
2.3.	Δομική αξιολόγηση στο εργαστήριο.....	8
2.4.	Δομική αξιολόγηση με επιτόπου δοκιμές	11
3.	Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)	15
4.	Δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρώματος	18
4.1.	Γενικά.....	18
4.2.	Χαρακτηριστικοί δείκτες.....	19
4.2.1.	Επισκόπηση	19
4.2.2.	Δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος D_0	21
4.2.3.	Δείκτης AREA	22
4.2.4.	Δείκτης SCI.....	22
4.2.5.	Δείκτες BDI, BCI.....	23
4.2.6.	Άλλοι δείκτες	24
4.3.	Συντελεστές διόρθωσης δεικτών δομικής κατάστασης	24
4.3.1.	Παράγοντες επίδρασης	24
4.3.2.	Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς.....	25
4.3.3.	Αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς.....	25
4.4.	Κατάταξη δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων βάσει δεικτών	29
5.	Πειραματική διαδικασία	32
5.1.	Περιγραφή δεδομένων και μεθοδολογία.....	32
5.1.1.	Ανάκτηση δεδομένων	32
5.1.2.	Καθορισμός διατομής	33
5.1.3.	Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς.....	35
5.1.4.	Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης	36
5.1.5.	Ενεργή ακτίνα D_{eff}	36

5.1.6.	Αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς.....	36
5.1.7.	Στατιστική επεξεργασία των δεικτών	37
5.1.8.	Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών	37
5.2.	Περιγραφική και στατιστική ανάλυση	38
5.2.1.	Θηκογράμματα.....	38
5.2.2.	Συντελεστής διακύμανσης	39
5.2.3.	Έλεγχοι T-Tests	39
6.	Αξιολόγηση γενικής κατάστασης οδοστρώματος	41
6.1.	Δείκτης D_0	41
6.2.	Δείκτης AREA	44
6.3.	Δείκτης AUPP	46
6.4.	Συγκριτική ανάλυση δεικτών	49
6.4.1.	AUPP- D_0	49
6.4.2.	AREA- D_0	51
6.4.3.	AREA-AUPP	51
7.	Αξιολόγηση ασφαλικών στρώσεων	53
7.1.	Δείκτης SCI_{300}	53
7.2.	Δείκτης SCI_{200}	55
7.3.	Δείκτης AI_1	58
7.4.	Συγκριτική ανάλυση δεικτών	60
7.4.1.	SCI_{200} - SCI_{300}	60
7.4.2.	Συγκριτική ανάλυση με τον δείκτη D_0	62
8.	Αξιολόγηση στρώσης βάσης/υπόβασης και στρώσης έδρασης	64
8.1.	Δείκτης SCI_{600}	64
8.2.	Δείκτης BDI	66
8.3.	Δείκτης F_1	68
8.4.	Δείκτης BCI.....	70
8.5.	Δείκτης F_2	72
8.6.	Συγκριτική ανάλυση δεικτών	75
8.6.1.	SCI_{600} - SCI_{300}	75
8.6.2.	SCI_{600} -BDI	76
8.6.3.	BDI-BCI.....	78
8.6.4.	F_1 - F_2	79

8.6.5.	Συγκριτική ανάλυση με τον δείκτη D_0	80
8.7.	Δείκτης D_{1800}	84
9.	Συμπεράσματα- προτάσεις	88
10.	Βιβλιογραφία	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τυπική Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (European Asphalt Pavement Association, 2018)	4
Εικόνα 2.2: Εξέλιξη κατάστασης οδοστρώματος στο χρόνο.....	6
Εικόνα 2.3: Επίπεδο εξυπηρετικότητας και παρεμβάσεις κατά τη διάρκεια ζωής του έργου	7
Εικόνα 2.4: Λήψη πυρήνων και πυρήνες ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο	9
Εικόνα 2.5: Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης (Καββαδάς, 2009).....	10
Εικόνα 2.6: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Καββαδάς, 2009)	10
Εικόνα 2.7: Απομάκρυνση ασφαλικού δείγματος.....	11
Εικόνα 2.8: Δοκός Benkelman.....	12
Εικόνα 2.9: Συστήματα επιβολής στατικού φορτίου, deflectograph	13
Εικόνα 2.10: Road Rater	13
Εικόνα 2.11: Συστήματα επιβολής δυναμικού φορτίου, FWD.....	14
Εικόνα 3.1: Παραμορφωσίμετρο προσπίπτοντος Βάρους	15
Εικόνα 3.2: Μέτρηση με το σύστημα FWD	16
Εικόνα 3.3: Περιγραφή φόρτισης	16
Εικόνα 3.4: Διάταξη αισθητήρων (Transport Infrastructure Ireland, 2000).....	17
Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της ζώνης πίεσης εσωτερικά του οδοστρώματος, υπό το βάρος του FWD (AASHTO, 1993)	18
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση βασικών παραμέτρων υποχώρησης.....	23
Εικόνα 4.3: Μέτρηση Θερμοκρασίας: (1) αέρα (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) ασφαλικών στρώσεων	26
Εικόνα 5.1: Γράφημα τύπου box plot για τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος	34
Εικόνα 5.2: Διατομή οδοστρώματος.....	35
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη D_0	41
Εικόνα 6.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη D_0	43
Εικόνα 6.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AREA	44
Εικόνα 6.4: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη AREA	45
Εικόνα 6.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AUPP.....	47

Εικόνα 6.6: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη AUPP	48
Εικόνα 6.7: Συσχέτιση του δείκτη AUPP με το δείκτη D_0	49
Εικόνα 6.8: Συσχέτιση του δείκτη AUPP με το δείκτη D_0 , αφαιρώντας από τις μετρήσεις το τρίτο έτος.....	50
Εικόνα 6.9: Συσχέτιση του δείκτη AREA με το δείκτη D_0	51
Εικόνα 6.10: Συσχέτιση του δείκτη AREA με το δείκτη AUPP	52
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{300}	53
Εικόνα 7.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI_{300}	54
Εικόνα 7.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{200}	56
Εικόνα 7.4: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI_{200}	57
Εικόνα 7.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AI_1	58
Εικόνα 7.6: Διάγραμμα τύπου box plot του δείκτη AI_1	59
Εικόνα 7.7: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{200} με το δείκτη SCI_{300}	60
Εικόνα 7.8: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{200} με το δείκτη D_0	62
Εικόνα 7.9: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{300} με το δείκτη D_0	63
Εικόνα 7.10: Συσχέτιση του δείκτη AI_1 με το δείκτη D_0	63
Εικόνα 8.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{600}	64
Εικόνα 8.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI_{600}	65
Εικόνα 8.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη BDI	66
Εικόνα 8.4: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη BDI	67
Εικόνα 8.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη F_1	68
Εικόνα 8.6: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη F_1	69
Εικόνα 8.7: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη BCI	70
Εικόνα 8.8: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη BCI.....	71
Εικόνα 8.9: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη F_2	73
Εικόνα 8.10: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη F_2	74
Εικόνα 8.11: Συσχέτιση δείκτη SCI_{600} με το δείκτη SCI_{300}	75
Εικόνα 8.12: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{600} με το δείκτη SCI_{300} , αφαιρώντας από τις μετρήσεις το 3ο έτος.....	76
Εικόνα 8.13: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη SCI_{600}	77
Εικόνα 8.14: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη BCI.....	78
Εικόνα 8.15: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη F_2	79

Εικόνα 8.16: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη F_2 , αφαιρώντας από τις μετρήσεις το 3ο έτος	80
Εικόνα 8.17: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{600} με το δείκτη D_0	81
Εικόνα 8.18: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη D_0	82
Εικόνα 8.19: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη D_0	82
Εικόνα 8.20: Συσχέτιση του δείκτη F_2 με το δείκτη D_0	83
Εικόνα 8.21: Συσχέτιση του δείκτη BCI με το δείκτη D_0	84
Εικόνα 8.22: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη D_{1800}	85
Εικόνα 8.23: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη D_{1800}	86
Εικόνα 8.24: Συσχέτιση του δείκτη D_{1800} με το δείκτη D_0	87

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Συνοπτική παρουσίαση των δεικτών δομικής αξιολόγησης	20
Πίνακας 4.2: Κατηγοριοποίηση βάσει μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 40kN (Hakim & Brown, 2017)	29
Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση βάσει μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 50 kN.....	30
Πίνακας 4.4: Συνοπτική αναφορά των FWD δεδομένων υπό φορτίο 40 kN	30
Πίνακας 4.5: Τιμές για την αξιολόγηση των παραμέτρων BLI, MLI,LLI (Transport Infrastructure Ireland, 2000)	31
Πίνακας 5.1: Στατιστικά στοιχεία για τα πάχη του οδοστρώματος.....	33
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη D_0	43
Πίνακας 6.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AREA	46
Πίνακας 6.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AUPP.....	48
Πίνακας 6.4: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος.....	50
Πίνακας 7.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI_{300}	55
Πίνακας 7.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI_{200}	57
Πίνακας 7.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AI_1	59
Πίνακας 7.4: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος.....	61
Πίνακας 7.5: Αντιστοιχία χαρακτηριστικών τιμών του δείκτη SCI_{200}	61
Πίνακας 8.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI_{600}	65
Πίνακας 8.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη BDI.....	68
Πίνακας 8.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη F_1	70
Πίνακας 8.4: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη BCI	72
Πίνακας 8.5: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη F_2	74
Πίνακας 8.6: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος.....	75
Πίνακας 8.7: Συντελεστής συσχέτισης R^2 για κάθε έτος.....	77
Πίνακας 8.8: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος.....	78
Πίνακας 8.9: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος.....	79
Πίνακας 8.10: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη D_{1800}	86

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο

Το οδόστρωμα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πάγια περιουσιακά στοιχεία για τους φορείς διαχείρισης του εθνικού οδικού δικτύου μιας χώρας. Εννοιολογικά, ορίζεται ως το σύνολο των επάλληλων στρώσεων, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από το φυσικό έδαφος για τη διαμόρφωση της δομής μιας οδού ή ενός αυτοκινητοδρόμου. Πέραν της κατασκευής, η λειτουργική κατάσταση μιας οδού συνδέεται με την εξυπηρετικότητα του οδοστρώματος, η οποία εκφράζει την ικανότητα του οδοστρώματος να φέρει τα φορτία κυκλοφορίας, παρέχοντας ταυτόχρονα ένα υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης, άνεσης και ασφάλειας προς τους χρήστες του.

Εκτός από τη λειτουργική κατάσταση, η αξιολόγηση ενός οδοστρώματος συνδέεται και με τη δομική κατάσταση του. Η δομική κατάσταση ενός οδοστρώματος εκφράζεται από τη φέρουσα ικανότητά του σε κάθε στάδιο λειτουργίας του. Η ικανότητα αυτή σχετίζεται αφενός με τα δομικά χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος και αφετέρου, με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων των επιμέρους στρώσεων του. Βασικές απαιτήσεις είναι η διατήρηση της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος και ταυτόχρονα, η εξασφάλιση ενός επιθυμητού επιπέδου λειτουργικής κατάστασής του καθ' όλη τη διάρκειά του. Η σύνδεση και η εξασφάλιση αυτών των δύο απαιτήσεων ορίζει την ευρύτερη έννοια της «επιτελεστικότητας» ενός οδοστρώματος (Λοΐζος, 2012).

Στο πλαίσιο του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος, η υποβάθμιση της αρχικής δομικής κατάστασής του με την πάροδο του χρόνου, οφείλεται κυρίως στην επίδραση της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών. Η διατήρησή του σε κατάσταση παρόμοια με αυτή που είχε κατά το χρόνο κατασκευής του είναι πρακτικά αδύνατη. Έτσι, προκειμένου να διατηρηθεί η "επιτελεστικότητα" του οδοστρώματος σε υψηλά επίπεδα, απαιτούνται περιοδικοί έλεγχοι και μετρήσεις των χαρακτηριστικών του, με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργικής και δομικής κατάστασής του. Με βάση τα αποτελέσματα αξιολόγησης, η έγκαιρη εφαρμογή κατάλληλων επεμβάσεων διασφαλίζει τη διατήρηση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος σε επιθυμητά επίπεδα. Οι περιοδικοί έλεγχοι και οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος είναι επί το πλείστον μη καταστρεπτικού χαρακτήρα (Non Destructive Testing NDT). Μέσω αυτών προσδιορίζονται μεταξύ άλλων δείκτες, οι οποίοι εκφράζουν τη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

1.2. Στόχος και μεθοδολογία

Δεδομένων των ανωτέρω, βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση, η ανάδειξη και η ανάλυση δεικτών για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Μέσα από αυτή τη διερεύνηση, τίθεται ως επιπρόσθετος στόχος, η ανάδειξη της εφαρμοσιμότητας των υπόψη δεικτών.

Μεθοδολογικά, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ως προς τη γενική διερεύνηση της δομικής αξιολόγησης και ειδικότερα τις μεθόδους και τα συστήματα καταγραφής των ελαστικών υποχωρήσεων. Μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση θα καθοριστούν και οι δείκτες αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Εν συνεχεία, θα αξιοποιηθούν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), για τη διερεύνηση και ανάλυση των υπόψη δεικτών. Τα δεδομένα αφορούν μετρήσεις ελαστικών υποχωρήσεων σε πειραματικό οδόστρωμα κατά μήκος τμήματος αυτοκινητοδρόμου, οι οποίες διενεργήθηκαν επί σειρά έξι ετών.

1.3. Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία συμπεριλαμβανομένου του παρόντος περιλαμβάνει 10 κεφάλαια. Συγκεκριμένα:

Το 2ο κεφάλαιο αφορά στις αρχές της δομικής αξιολόγησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και στις μεθόδους που αυτή υλοποιείται.

Το 3ο κεφάλαιο περιγράφει το σύστημα καταγραφής Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer FWD).

Το 4ο κεφάλαιο περιλαμβάνει βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά στους δείκτες δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων.

Το 5ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Το 6ο κεφάλαιο αφορά στην αξιολόγηση της γενικής κατάστασης του πειραματικού οδοστρώματος.

Το 7ο κεφάλαιο αφορά στην αξιολόγηση της ασφαλικής στρώσης του πειραματικού οδοστρώματος.

Το 8ο κεφάλαιο αφορά στην αξιολόγηση της στρώσης βάσης/υπόβασης από ασύνδετα υλικά και της στρώσης έδρασης.

Το 9ο κεφάλαιο της εργασίας περιλαμβάνει συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

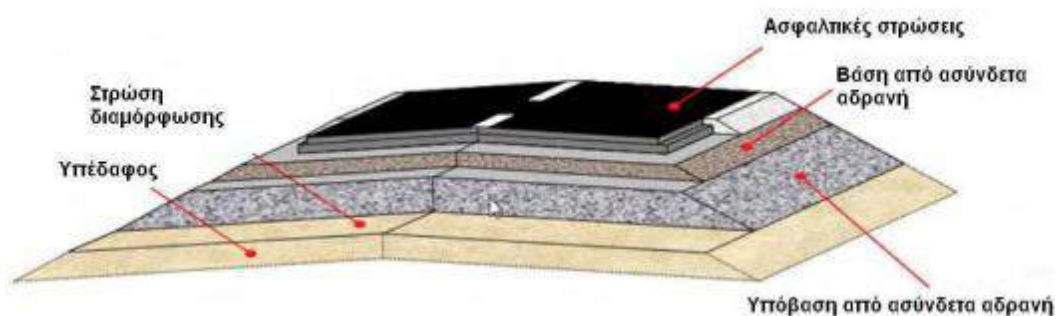
Το 10ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη Βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ακολουθεί το Παράρτημα, με όλους τους πίνακες και τους υπολογισμούς που έγιναν.

2. Δομική αξιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος

2.1. Γενικά

Ο σκοπός του οδοστρώματος είναι να παραλάβει τα φορτία κυκλοφορίας και να τα κατανείμει στο υπέδαφος. Γενικά τα οδοστρώματα διακρίνονται σε (α) εύκαμπτα, τα οποία αποτελούνται από στρώση ασφαλτομίγματος (σε μία στρώση ή και περισσότερες) και βάση-υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (Εικόνα 2.1), (β) σε ημιάκαμπτα, που αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, βάση από κατεργασμένο υλικό και στραγγιστική στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο και τέλος (γ) σε δύσκαμπτα, που αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος, εδραζόμενη σε υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο ή αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες.



Εικόνα 2.1: Τυπική Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (European Asphalt Pavement Association, 2018)

Το οδόστρωμα που θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία είναι εύκαμπτου τύπου. Κατώτερη στρώση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελεί η στρώση έδρασης, η οποία διαμορφώνει το φυσικό έδαφος, όπου εδράζεται το οδόστρωμα. Ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες και το υλικό, καθορίζεται το πάχος της.

Στη συνέχεια ακολουθεί η υπόβαση, η οποία είναι η στρώση ανάμεσα στη βάση και στο υπέδαφος και αποτελείται από συλλεκτά ή θραυστά υλικά ικανοποιητικής αντοχής. Με τη σειρά της, η στρώση της βάσης κατασκευάζεται ακριβώς κάτω από την επιφανειακή στρώση ενός οδοστρώματος. Η στρώση της βάσης κατασκευάζεται από θραυστά αμμοχάλικα κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης και υψηλότερων απαιτήσεων ποιότητας (Yoder & Witczak, 1975). Η στρώση βάσης/υπόβασης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη δομική συμπεριφορά του εύκαμπτου οδοστρώματος, καθώς οι ασφαλτικές στρώσεις έχουν συνήθως μικρό πάχος. Έτσι, τα ασύνδετα υλικά

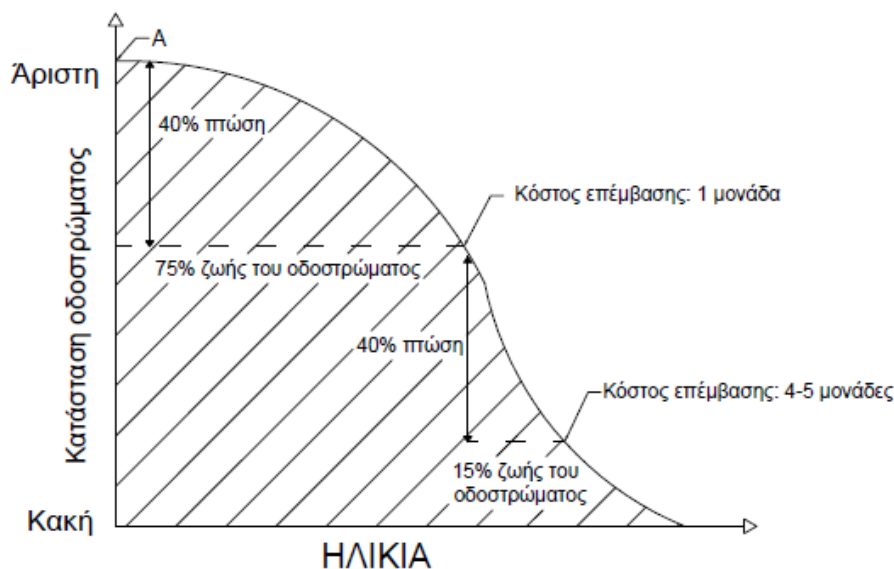
συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Ο τρόπος κατασκευής είναι τέτοιος, ώστε να αντέχουν σε μεγάλες καταπονήσεις, να διανέμουν αποτελεσματικά και να μεταβιβάζουν τα κυκλοφοριακά και περιβαλλοντικά φορτία, προκειμένου οι υποκείμενες στρώσεις να μην εκτίθενται σε υπερβολικές καταπονήσεις. Το πάχος της υπόβασης και της βάσης διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία του οδοστρώματος.

Η ανώτερη στρώση του εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από ασφαλτόμιγμα και το πάχος της κυμαίνεται, ανάλογα με την κυκλοφορία. Σε συνήθεις περιπτώσεις η ασφατική στρώση δεν είναι ενιαία, αλλά επιμερίζεται σε επιμέρους στρώσεις με διαφορετική λειτουργία. Ακόμη ενδέχεται να διαφοροποιείται και η σύσταση των ασφαλτομιγμάτων των επιμέρους στρώσεων και κατ' επέκταση τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, η ασφατική βάση έχει περισσότερο δομικό ρόλο συμβάλλοντας στην ουσιαστική απομείωση των εντατικών μεγεθών που προκαλεί ο κυκλοφοριακός φόρτος. Κατά συνέπεια συνεισφέρει σημαντικά στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Η επιφανειακή ασφατική στρώση αποτελεί το ανώτερο τμήμα του οδοστρώματος και σκοπός της είναι να παρέχει μία αδρή ποιότητα κύλισης και ασφαλή επιφάνεια κυκλοφορίας. Επίσης, συνεισφέρει και στη λειτουργική συμπεριφορά του οδοστρώματος, καθώς η επιφάνειά της πρέπει να είναι αντιολισθητική. Πρέπει ακόμη, να παρουσιάζει αντοχή σε ρηγματώσεις λόγω φορτίου ή άλλης αιτίας. Η ασφατική στρώση πρέπει να ικανοποιεί πολλές λειτουργικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις. (Yoder & Witczak, 1975).

Αφού αναλύθηκε η γενικότερη έννοια του οδοστρώματος και των επιμέρους στρώσεών του, ωφέλιμο είναι να αναφερθεί τότε θεωρείται ένα οδόστρωμα αποδεκτό, το οποίο ίσως αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα ερωτήματα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός οδοστρωμάτων. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό τις προηγούμενες δεκαετίες συνήθως ήταν ποιοτική και βασιζόταν στη γνώμη του ατόμου που αξιολογεί και την αντίστοιχη εμπειρία. Ωστόσο, με το πέρασμα των δεκαετιών και την εξέλιξη της γνώσης από τη συμπεριφορά των υλικών, ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση των οδοστρωμάτων απέκτησε περισσότερο μηχανιστικό χαρακτήρα. Ακόμη, πέρα από το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων, ιδιαίτερη σημασία για τον μηχανικό οδοστρωμάτων έχει η αξιολόγηση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Είναι ανάγκη ο μηχανικός να γνωρίζει την κατάσταση των οδοστρωμάτων, για να μπορεί να αναθεωρήσει ή να εμπλουτίσει τις μεθόδους σχεδιασμού, και να διαμορφώσει πρόγραμμα παρακολούθησης και συντήρησης οδοστρωμάτων. Η κατάσταση των οδοστρωμάτων διερευνάται μέσω της δομικής και της λειτουργικής αξιολόγησης. (Yoder & Witczak, 1975).

Συγκεκριμένα, η δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος είναι το σύνολο εργασιών που παρέχει πληροφορίες ως προς τη συμπεριφορά των επιμέρους στρώσεών του υπό την επίδραση της κυκλοφορίας (αξονικά φορτία) και των κλιματολογικών συνθηκών. Τα χαρακτηριστικά που διερευνώνται και εξετάζονται σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, τις μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους στρώσεών του, τα πάχη οδοστρώσεως και τις ιδιότητες των υλικών της κατασκευής.

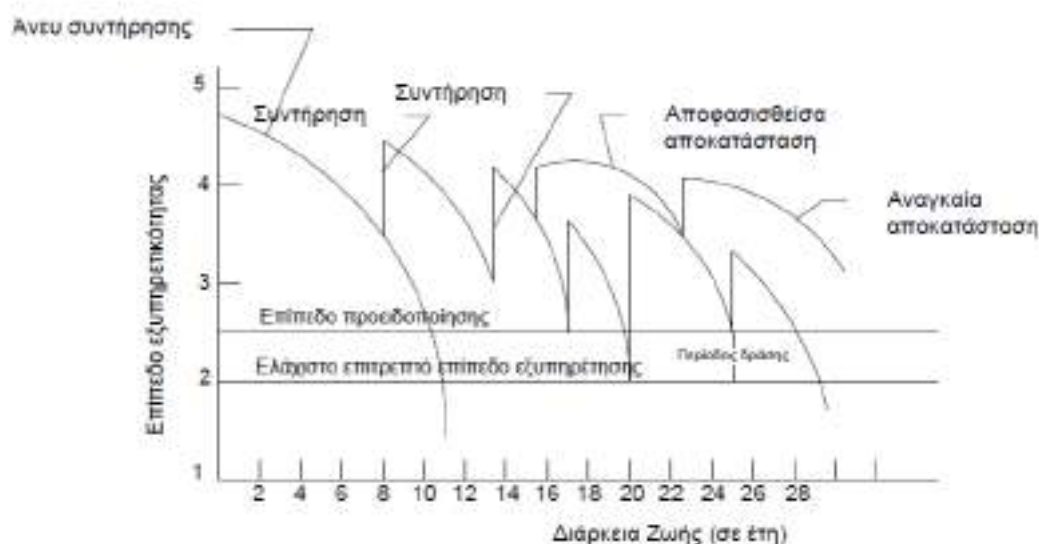
Κάθε οδόστρωμα σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό ετών, ή ακόμα καλύτερα για να παραλάβει ένα συγκεκριμένο αριθμό αξονικών φορτίων μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Η κατάσταση του οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου φθίνει, όπως δείχνει και η Εικόνα 2.2, αφού παράγοντες όπως η κυκλοφορία, οι καιρικές συνθήκες, η γήρανση των υλικών μειώνουν σταδιακά την ποιότητα και την αντοχή του οδοστρώματος. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να πραγματοποιηθεί επέμβαση στο οδόστρωμα, ώστε να παρέχεται ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Για να συμβεί συνίσταται να πραγματοποιείται περιοδική αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος και στη συνέχεια προγραμματισμός ενεργειών επέμβασης και αποκατάστασης. Η προληπτική δομική αξιολόγηση σε ένα ήδη κατασκευασμένο ασφαλτικό οδόστρωμα γίνεται, καταρχήν, για τον προσδιορισμό του χρονικού σημείου μηδέν, το οποίο είναι ιδιαίτερος χρήσιμο στο πλαίσιο διαχείρισης του. Κατά συνέπεια μέσω της συνεχούς παρακολούθησης του οδοστρώματος μπορεί να εκτιμηθεί η δομική κατάσταση, έτσι ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσει και η εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης αυτού. Αν η επέμβαση συντήρησης εφαρμοστεί σε ένα αρχικό στάδιο, πριν από τη ραγδαία επιδείνωση της κατάστασης του οδοστρώματος μπορεί να αποφευχθεί ενδεχομένως και πάνω από το 50% του κόστους αποκατάστασης.



Εικόνα 2.2: Εξέλιξη κατάστασης οδοστρώματος στο χρόνο

Η έναρξη της συντήρησης και η συχνότητα αυτής διασφαλίζει την επίτευξη του αρχικού στόχου, δηλαδή το οδόστρωμα να μπορεί να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης, καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού του. Κατά κανόνα η χρονική διάρκεια της καλής λειτουργίας του οδοστρώματος, άνευ συντήρησης, είναι πάντοτε μικρότερη από αυτή της συστηματικής συντήρησης. Σύμφωνα με την Εικόνα 2.3, μετά την αποκατάσταση, η καινούργια διάρκεια ζωής του οδοστρώματος είναι

μεγαλύτερη. Εάν η αποκατάσταση γίνει νωρίτερα από τη χρονική στιγμή κατά την οποία το οδόστρωμα λαμβάνει την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή επιπέδου εξυπηρέτησης τότε, με μικρότερο κόστος αποκατάστασης, το οδόστρωμα θα παρέχει τις υπηρεσίες του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Συνεπώς, η έγκαιρη και συστηματική παρακολούθηση του οδοστρώματος είναι αναγκαία, ώστε η συντήρηση αυτού να γίνεται πριν το επίπεδο εξυπηρέτησης λάβει την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή.



Εικόνα 2.3: Επίπεδο εξυπηρευτικότητας και παρεμβάσεις κατά τη διάρκεια ζωής του έργου

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ο σκοπός της αξιολόγησης του οδοστρώματος είναι κυρίως να προσδιοριστεί η υφιστάμενη κατάστασή του, έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν, εάν απαιτούνται, οι κατάλληλες λύσεις για συντήρηση ή αποκατάσταση (Queensland Government, 2012). Στη περίπτωση αποκατάστασης οδοστρωμάτων, οι μετρήσεις της δομικής αξιολόγησης αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την αποκατάσταση βλαβών ή την ενίσχυση του οδοστρώματος (Ευαγγελίδης, 2004).

Διεθνώς, τα τελευταία χρόνια, το κόστος που σχετίζεται με τα οδικά έργα αφορά κυρίως τη συντήρηση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων που παύουν να είναι δομικά ή λειτουργικά άρτια και ή πρέπει να αποκατασταθούν πλήρως ή να ανακατασκευαστούν. Εν γένει στην πραγματικότητα μια τέτοια διαδικασία δεν είναι ρεαλιστική, καθώς τα οδοστρώματα ενός οδικού άξονα συνεχίζουν να λειτουργούν ως αναπόσπαστο κομμάτι του συγκοινωνιακού ιστού διαρκώς, γι' αυτό και έχει προκύψει η έννοια των οδοστρωμάτων μεγάλης διάρκειας που αναφέρονται στην Ευρώπη με τον όρο Long Life Pavements (LLP) ή στις ΗΠΑ με τον όρο Perpetual Pavements. Στόχος λοιπόν είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής που προβλέπεται στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος (pavement design). Η άποψη αυτή

θα πρέπει να αποτελεί βασική αρχή λειτουργίας όλων των οδοστρωμάτων. Έτσι, τα σύγχρονα οδοστρώματα πρέπει να παρακολουθούνται και να αξιολογούνται διαρκώς, ώστε να μην επιτρέπονται αστοχίες στις υποκείμενες των ασφαλικών στρώσεις και κυρίως στη στρώση έδρασης και κατ' επέκταση στη γεωτεχνική υποδομή. Οι τυχόν αστοχίες θα πρέπει να περιορίζονται, όσο αυτό είναι δυνατό, στην στρώση κυκλοφορίας (Λοίζος, 2012).

Για τη συστηματική παρακολούθηση και αξιολόγηση των οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται το σύστημα Falling Weight Deflectometer (FWD), για την μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων, το οποίο θα περιγραφεί στη συνέχεια.

2.2. Αρχές δομικής αξιολόγησης

Η δομική αξιολόγηση επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας (Φ.Ι) (pavement bearing capacity) του. Ως φέρουσα ικανότητα ορίζεται η ικανότητα του οδοστρώματος να φέρει τα προβλεπόμενα αναπτυσσόμενα φορτία κυκλοφορίας, για τη χρονική περίοδο που έχει σχεδιαστεί, αλλά και πέραν της περιόδου σχεδιασμού.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος απαιτείται η συνεκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του οδοστρώματος, όπως είναι τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, τα υλικά, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, δηλαδή το μέτρο Ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν) (Λοίζος & Πλατή, 2016).

Η αξιολόγηση της αντοχής του οδοστρώματος και ο επανασχεδιασμός του εξαρτάται από την ικανότητα του μηχανικού να αξιολογήσει την αντοχή των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Η εκτίμηση της δομικής αντοχής ενός οδοστρώματος πραγματοποιείται είτε (α) μέσω λήψης πυρήνων (πυρηνοληψία), οι οποίοι ελέγχονται και επεξεργάζονται στο εργαστήριο, είτε με (β) μη καταστρεπτικές μεθόδους, οι οποίες πραγματοποιούνται επί τόπου στο οδόστρωμα.

2.3. Δομική αξιολόγηση στο εργαστήριο

Κατά την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος είναι ανάγκη να διεξαχθούν εργαστηριακές δοκιμές για την ποιότητα των στρώσεων. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν κατανομή μεγέθους κόκκων, πυκνότητας, περιεκτικότητας υγρασίας κ.ά. Επιπλέον μπορούν να εξαχθούν αδιατάρακτα δείγματα οδοστρώματος και να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών του οδοστρώματος με χρήση προηγμένων εργαστηριακών δοκιμών (Yoder & Witczak, 1975).

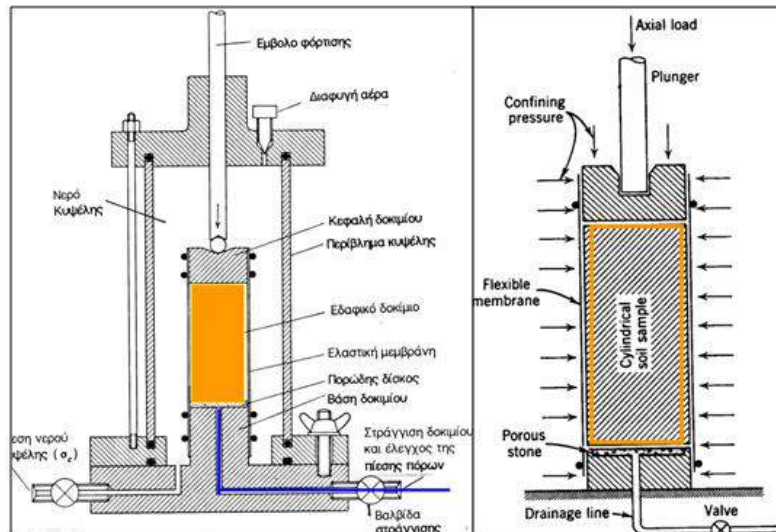
Κύριες μορφές δειγματοληπτικών ελέγχων, που πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των στρώσεων μιας οδού είναι η λήψη πυρήνων και η διενέργεια τομών. Κατά τη λήψη πυρήνων προσδιορίζεται η σύσταση του ασφαλτομίγματος και των μηχανικών ιδιοτήτων των στρώσεων. Με τη διάνοιξη τομών στο οδόστρωμα ως το επίπεδο του υπεδάφους, προσδιορίζεται η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

Η μέθοδος της λήψης πυρήνων, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4, είναι καταστρεπτική μέθοδος και αποτελεί παραδοσιακή και χρονοβόρα μέθοδο συλλογής στοιχείων. Για την μέθοδο αυτή, λαμβάνονται επιτόπου πυρήνες ("καρότα") στο οδόστρωμα και στη συνέχεια προσδιορίζονται με εργαστηριακές δοκιμές η σύσταση του ασφαλτομίγματος, τα πάχη, οι μηχανικές (μέτρο δυσκαμψίας), φυσικές και χημικές ιδιότητες των στρώσεων. Το μέσο που χρησιμοποιείται για τη λήψη των δειγμάτων είναι οι ράβδοι Shelby, (Stacks, 2018). Κατά την εξαγωγή πυρήνα, ο ειδικός εξοπλισμός τοποθετείται στην επιθυμητή θέση και τίθεται σε λειτουργία. Η κάννη αρχίζει να περιστρέφεται και σταδιακά να κατεβαίνει στα κατώτερα πάχη των ασφαλικών στρώσεων, έως ότου ληφθεί δείγμα με επαρκές βάθος ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί καταρχήν το πάχος της στρώσης. Στη συνέχεια ο πυρήνας αφαιρείται με τη βοήθεια ειδικών ράβδων συγκόλλησης ή με τη βοήθεια βρόγχων από λεπτό σύρμα. Η διάμετρος του καθενός κυμαίνεται μεταξύ 10-15 εκατοστών (Yoder & Witczak, 1975).



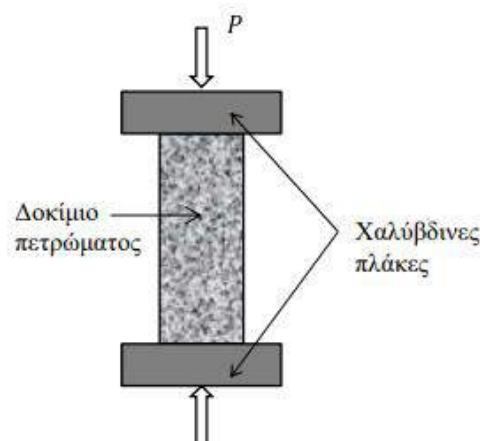
Εικόνα 2.4: Λήψη πυρήνων και πυρήνες ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο

Ανάλογα με το υλικό που εξετάζεται στο εργαστήριο διαφοροποιούνται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιούνται. Για παράδειγμα για τα εδαφικά ή ασύνδετα υλικά εφαρμόζεται η δοκιμή τριαξονικής κυψέλης/φόρτισης (Εικόνα 2.5), κατά την οποία το δοκίμιο υποβάλλεται σε κύκλους φόρτισης μικρής διάρκειας και έντασης ίσης με αυτής που δέχεται το οδόστρωμα από τη διερχόμενη κυκλοφορία.



Εικόνα 2.5: Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης (Καββαδάς, 2009)

Από την άλλη, σε δοκίμια ασφαλτομιγμάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Εικόνα 2.6) ή δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης δεδομένου του ιξωδοελαστικού χαρακτήρα των ασφαλτομιγμάτων. Η φόρτιση που επιβάλλεται είναι δυναμική (παλμική ή ημιτονοειδής μορφή) ώστε να προσομοιωθεί ο δυναμικός χαρακτήρας της φόρτισης του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.6: Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Καββαδάς, 2009)

Όσον αφορά στη διενέργεια τομών στο οδόστρωμα, γίνεται συλλογή ολόκληρου δείγματος, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 2.7, κατά την οποία γίνεται απομάκρυνση των ασφαλτικών στρώσεων. Το μέγεθος του μοτίβου, το οποίο αφαιρείται κάθε φορά είναι 1x4m και λαμβάνονται κάθε φορά κατάλληλα μέτρα, έτσι ώστε να μην σπάσει κατά την απομάκρυνση του. Μετά το πέρας των εργασιών αφαίρεσης διενεργούνται οι απαραίτητες δειγματοληψίες στα κατώτερα στρώματα και μεταφέρονται στο εργαστήριο, όπου και εξετάζονται περαιτέρω.



Εικόνα 2.7: Απομάκρυνση ασφαλτικού δείγματος

Γενικά, οι πληροφορίες που λαμβάνονται με τη λήψη πυρήνων/δειγμάτων για τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος είναι σημειακές και ενδεχομένως μη επαρκείς.

2.4. Δομική αξιολόγηση με επιτόπου δοκιμές

Οι επιτόπου μη καταστρεπτικές μέθοδοι (Non Destructive Testing NDT) εφαρμόζονται σε υφιστάμενα οδοστρώματα για τη συλλογή στοιχείων χωρίς να έχουν καταστρεπτική επίδραση σε αυτά. Ουσιαστικά μετρείται μέσω καταλλήλων οργάνων η βύθιση του οδοστρώματος ως απόκριση στο επιβαλλόμενο φορτίο. Το μέγεθος της βύθισης αποτελεί ένδειξη της ικανότητας του οδοστρώματος να φέρει φορτία (Yoder & Witczak, 1975). Η συνολική εκτίμηση της δομικής κατάστασής του οδοστρώματος απαιτεί την ύπαρξη επαρκών κατασκευαστικών στοιχείων και δεδομένων, όπως πάχη στρώσεων, υλικά κατασκευής, ισοδύναμες διελεύσεις, καθώς και αξιόπιστων προσομοιωτών πρόβλεψης των κυκλοφοριακών φόρτων. Επίσης, συνίσταται να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών (πχ. θερμοκρασία,

βροχοπτώσεις, υγρασία), καθώς ο χρόνος των μετρήσεων ενδέχεται να έχει σημαντική επίδραση στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.

Η χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών επιτρέπει την ταχεία και αξιόπιστη συλλογή πλήθους στοιχείων, χωρίς την καταστροφή του οδοστρώματος. Τέτοια είναι η δοκός Benkelman (Εικόνα 2.8), το Dephlectograph (Εικόνα 2.9), το Road Rater (Εικόνα 2.10) και το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflection FWD).

Η Εικόνα 2.8, παριστάνει τη δοκό που επινοήθηκε από τον A.C. Benkelman. Κατά τη μέθοδο αυτή το βέλος κάμψης στην επιφάνεια του οδοστρώματος μετράται με τη βοήθεια ενός μετρητή τοποθετημένου στο ένα άκρο της δοκού. Κατά τη λειτουργία της δοκού Benkelman, η ακίδα τοποθετείται ανάμεσα στους διπλούς τροχούς ενός συστήματος διπλών τροχών. Η αρχή της δοκού Benkelman έχει μηχανοποιηθεί έτσι ώστε ένας μεγάλος αριθμός αναγνώσεων μπορεί να γίνει με τη συνεχή καταγραφή του βέλους κάμψης κάτω από έναν φορτωμένο άξονα.



Εικόνα 2.8: Δοκός Benkelman

Το Deflectograph, στην Εικόνα 2.9, είναι ένα σύστημα επιβολής στατικού φορτίου, με συνήθεις ταχύτητες κυκλοφορίας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Καθώς ο τροχός του οχήματος, που φέρει το στατικό φορτίο, περνά πάνω από το οδόστρωμα, το οδόστρωμα αποκλίνει και το μέγεθος της υποχώρησής του σχετίζεται με την αντοχή των στρώσεων και της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.9: Συστήματα επιβολής στατικού φορτίου, deflectograph

Από την άλλη, το Road Rater (Εικόνα 2.10) είναι μία δυναμική συσκευή, που μετράει και αυτή υποχωρήσεις, και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, μία μεγάλη μάζα κατεβαίνει στο οδόστρωμα και ταλαντεύεται για να παράγει μία δύναμη φόρτισης. Η υποχώρηση που προκύπτει μετράται από τέσσερις αισθητήρες ταχύτητας. Από αυτούς, ο ένας είναι τοποθετημένος απευθείας κάτω από τον εμβολέα και οι άλλοι τρεις τοποθετούνται σε ένα καθένα από τα πόδια του εμβόλου.



Εικόνα 2.10: Road Rater

Όμως, το πλέον εξελιγμένο σύστημα που επιβάλλει δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφει την υποχώρηση που επέρχεται στο οδόστρωμα είναι το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflection FWD) και φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Με κατάλληλους αισθητήρες, που τοποθετούνται επί του οδοστρώματος, σε καθορισμένες αποστάσεις από την πλάκα φόρτισης, τα λεγόμενα γεώφωνα, καταγράφεται η ταχύτητα σε καθένα από αυτά,

κατά τη διάρκεια της παλμικής φόρτισης. Στη συνέχεια, με μαθηματική ολοκλήρωση των ταχυτήτων, προκύπτουν οι αντίστοιχες υποχωρήσεις (ελαστικές μετατοπίσεις) ανά θέση, η επεξεργασία και η ανάλυση των οποίων θα δώσει αργότερα πολύτιμες πληροφορίες (Molenaar, 2006).



Εικόνα 2.11: Συστήματα επιβολής δυναμικού φορτίου, FWD

Οι υποχωρήσεις, που υπολογίζονται από τις μετρήσεις, ανά θέση, αποτελούν και τον οδηγό για τον υπολογισμό της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος και στη συνέχεια για την δομική αξιολόγηση (Ευαγγελίδης, 2004). Βάσει των υποχωρήσεων αυτών, δύο είναι οι τρόποι που μπορεί να πραγματοποιηθεί η δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Ο πρώτος τρόπος είναι η "άμεση ανάλυση" ή "direct analysis" / "first level analysis" και ο δεύτερος είναι η "διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού" ή "back analysis"/"second level analysis". Στην άμεση διαδικασία, οι μετρήσεις των υποχωρήσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος αποτελούν το κύριο μέσο αξιολόγησης μιας κατασκευής οδοστρώματος. Αν και μπορούν να γίνουν και άλλες μετρήσεις που αντανάκλουν τη δομική κατάσταση, η υποχώρηση της επιφάνειας είναι μία σημαντική μέθοδος αξιολόγησης του οδοστρώματος. Πολλοί οργανισμοί χρησιμοποιούν τις υποχωρήσεις, ως βασική μέθοδο, για μία γενική ένδειξη της δομικής ικανότητας του οδοστρώματος, ειδικότερα σε επίπεδο δικτύου.

Στις περιπτώσεις που η άμεση διαδικασία δεν επαρκεί για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος, ειδικότερα σε επίπεδο έργου, ακολουθείται μια εξειδικευμένη και πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης δομικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το σύστημα FWD, αλλά και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίζονται ή μετρούνται επί τόπου (πάχη, θερμοκρασίες κλπ) ενεργοποιείται η διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών με τη χρήση ειδικών λογισμικών. Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα και σύνθετη και απαιτεί σχετική εξειδίκευση, ώστε να αποτελεί αντικείμενο ειδικής μελέτης (Λοίζος & Πλατή, 2016).

3. Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)

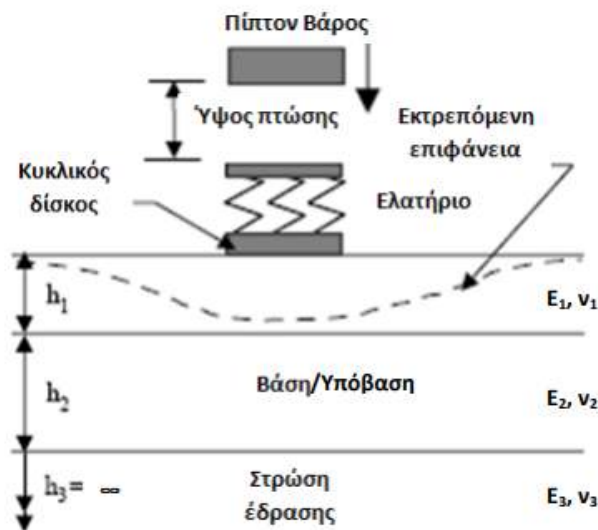
Η δοκιμή με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους ή Falling Weight Deflectometer (FWD), που φαίνεται στην Εικόνα 3.1 είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για επιτόπου μη καταστρεπτική αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων του οδοστρώματος. Το σύστημα FWD αποτελεί ένα από τα πιο εξελιγμένα συστήματα εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος. Χρησιμοποιείται για την καταγραφή στοιχείων του οδοστρώματος με σκοπό στην εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη μέθοδος υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων, ευρείας μάλιστα χρήσης, λόγω του δυναμικού χαρακτήρα της φόρτισης, που προσομοιάζει επαρκώς την πραγματικότητα. Συγκριτικά με άλλες δοκιμές, ο βαθμός αξιοπιστίας είναι αρκετά μεγάλος. Τα αποτελέσματα εμπεριέχουν σημαντικές λεπτομέρειες για όλες τις επιμέρους στρώσεις, καθιστώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο ανταποδοτική (Molenaar, 2006).



Εικόνα 3.1: Παραμορφωσίμετρο προσπίπτοντος Βάρους

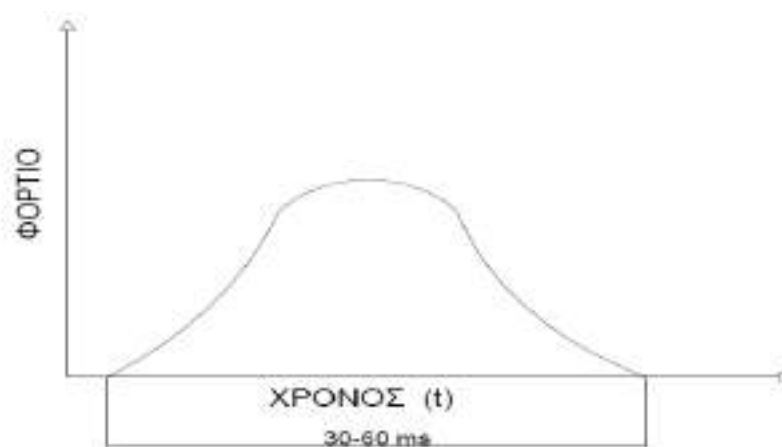
Το FWD μπορεί, είτε να τοποθετηθεί σε όχημα, είτε σε ρυμουλκούμενο και να είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες βάρους και αρκετούς αισθητήρες ταχύτητας. Για να εκτελεστεί μια δοκιμή, το όχημα σταματάει και η πλάκα φόρτισης (βάρος) τοποθετείται πάνω από την επιθυμητή θέση. Οι αισθητήρες στη συνέχεια πλησιάζουν την επιφάνεια του οδοστρώματος και το βάρος πέφτει κάθετα. Πολλές δοκιμές μπορούν να εκτελεστούν στην ίδια θέση χρησιμοποιώντας διαφορετικά ύψη πτώσης, προκειμένου να αναπροσαρμοστεί το επιβαλλόμενο φορτίο βάρους (Pavement Interactive, 2018).

Το φορτίο αυτό, πέφτοντας, προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Η φόρτιση μεταβιβάζεται σε έναν κυκλικό δίσκο που βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα.



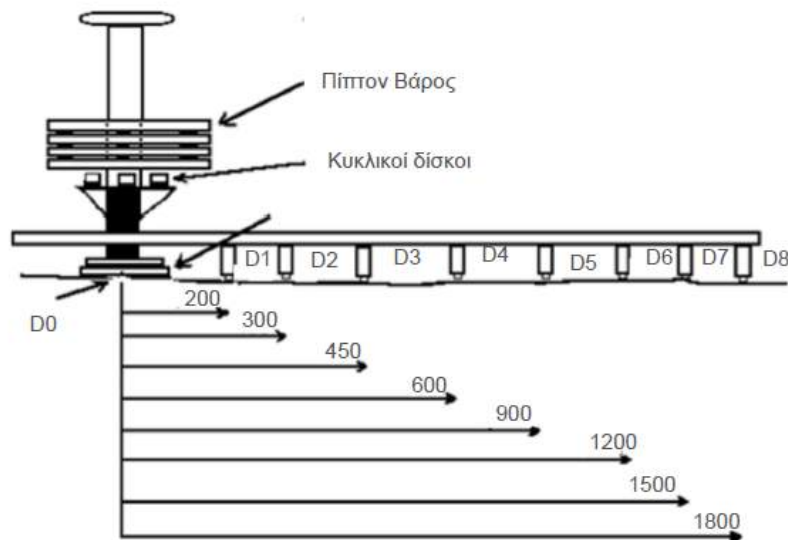
Εικόνα 3.2: Μέτρηση με το σύστημα FWD

Η διάρκεια της φόρτισης (Εικόνα 3.3) εξαρτάται από το σύστημα μέτρησης και το υλικό στο οποίο ασκείται η φόρτιση και είναι συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec, ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται. Το σύστημα αυτό παρομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση του τροχού. Για παράδειγμα η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 msec (Λοίζος & Πλατή, 2016).



Εικόνα 3.3: Περιγραφή φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε, η φόρτιση που επιβάλλει το FWD είναι δυναμική. Αυτό σημαίνει πως κάθε φορά σε οποιοδήποτε σημείο, μόνο ένα μέρος του υλικού επηρεάζεται από τη φόρτιση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι ελαστικές υποχωρήσεις (D_i) κάτω από το φορτίο και σε αποστάσεις από 0mm έως και 1800mm, οι οποίες διακρίνονται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Διάταξη αισθητήρων (Transport Infrastructure Ireland, 2000)

Το FWD διαθέτει ενσωματωμένο θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος, αισθητήρα υπέρυθρης ακτινοβολίας, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος, αλλά και ειδικό θερμόμετρο, με το οποίο μετράται η θερμοκρασία στο μέσο της ασφαλτικής στρώσης, μέσω μιας οπής μικρής διαμέτρου που διανοίγεται στο οδόστρωμα. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας συνίσταται να γίνονται περιοδικά καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης μετρήσεων με το FWD.

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων, ευρείας μάλιστα χρήσης, όπως η δοκός Benkelman (Benkelman Beam), λόγω του δυναμικού χαρακτήρα της φόρτισης, που προσομοιάζει επαρκώς την πραγματικότητα. Επίσης έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τον εκτροπέα και τον curviameter, με μέγιστο σφάλμα μέτρησης 50μm και καλύτερη επαναληψιμότητα. Τέλος προσφέρει και τη δυνατότητα αλλαγής της στάθμης του φορτίου και της μέτρησης σε ακριβείς θέσεις (π.χ. κοντά σε ρωγμές) (Simonin, et al., 2015).

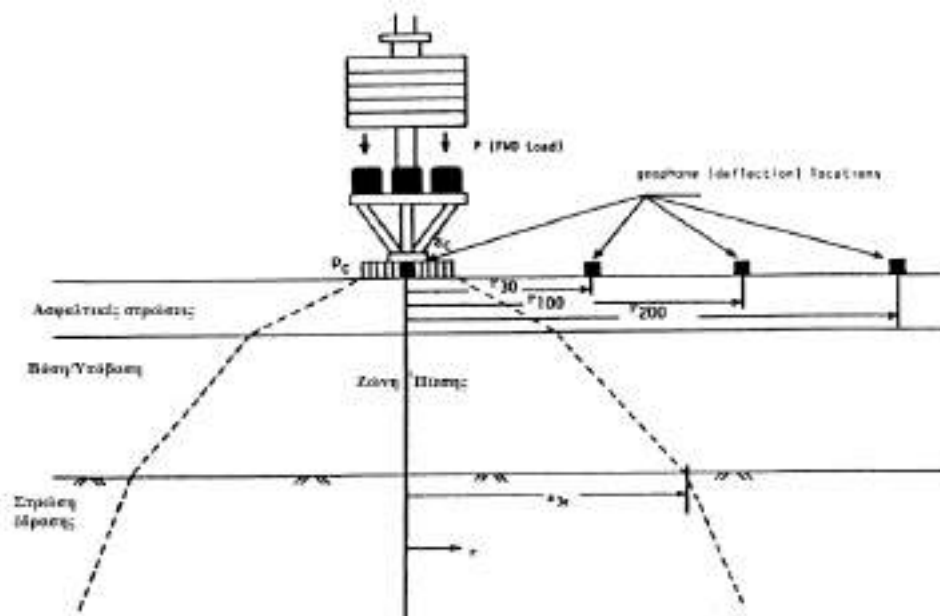
4. Δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρώματος

4.1. Γενικά

Διαχρονικά, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Υπηρεσίες αυτοκινητοδρόμων χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για την ανάπτυξη δομικών δεικτών αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Δομικοί δείκτες αναπτύχθηκαν από οργανισμούς στις Ηνωμένες Πολιτείες και το εξωτερικό για να αξιολογήσουν τα οδοστρώματά τους σε επίπεδο δικτύου.

Το μέγεθος και το σχήμα της υποχώρησης του οδοστρώματος είναι συνάρτηση της κυκλοφορίας (τύπος και όγκος), των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος, της θερμοκρασίας και της υγρασίας, που επηρεάζουν τη δομή του οδοστρώματος. Οι παράμετροι που εξάγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση δομικών αλλαγών στο οδόστρωμα.

Η Εικόνα 4.1 αποτελεί ένα σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής δομής οδοστρώματος, που υποβάλλεται στη φόρτιση με το σύστημα του FWD. Το φορτίο κατανέμεται μέσω της περιοχής που ορίζει ποιοτικά η κωνική ζώνη της εικόνας. Η κλίση των πλευρών αυτής της ζώνης, η οποία ποικίλλει από στρώση σε στρώση, σχετίζεται με τη σχετική δυσκαμψία ή με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε κάθε στρώση. Όταν αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας των υλικών, η τάση κατανέμεται σε μεγαλύτερη περιοχή (AASHTO, 1993).



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της ζώνης πίεσης εσωτερικά του οδοστρώματος, υπό το βάρος του FWD (AASHTO, 1993)

Τα δεδομένα που πρέπει να συλλέγονται και να καταγράφονται, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας με FWD, για την αξιολόγηση οδοστρώματος, είναι η θέση του σημείου δοκιμής, το επίπεδο του φορτίου στους επιμέρους κύκλους φόρτισης, οι υποχωρήσεις του οδοστρώματος, σε καθέναν από τους αισθητήρες και τέλος η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της επιφάνειας του οδοστρώματος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Kavussi, et al., 2017), (Choummanivong & Martin, 2010).

4.2. Χαρακτηριστικοί δείκτες

4.2.1. Επισκόπηση

Η υποχώρηση της επιφάνειας αντιστοιχεί στην κατακόρυφη απόκλιση της επιφάνειας του οδοστρώματος ως αποτέλεσμα ενός εφαρμοσμένου (στατικού ή δυναμικού) φορτίου. Οι πιο προηγμένες συσκευές μέτρησης καταγράφουν αυτή την κατακόρυφη υποχώρηση σε πολλαπλές τοποθεσίες, γεγονός που παρέχει πληρέστερο χαρακτηρισμό της κατάστασης του οδοστρώματος. Η περιοχή της υποχώρησης του οδοστρώματος κάτω από και κοντά στην εφαρμογή φορτίου είναι γνωστή ως "προφίλ υποχώρησης" (Pavement interactive, 2018).

Διαχρονικά, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για την ανάλυση δεδομένων υποχωρήσεων. Μια συνοπτική παρουσίαση των δεικτών υποχώρησης (Deflection Basin Parameters), καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των δεικτών για την ανάλυση δεδομένων FWD, αναφέρονται στον Πίνακα 4.1 (Kavussi, et al., 2017), (Aavik & Talvik, 2008).

Πίνακας 4.1: Συνοπτική παρουσίαση των δεικτών δομικής αξιολόγησης

Δείκτης	Εξίσωση	Περιγραφή
D_0 ή $D_{\max}$	Κεντρική-μέγιστη υποχώρηση	Δομική αξιολόγηση συνολικής κατάστασης οδοστρώματος
AREA	$150 \left(\frac{D_0 + 2D_{300} + 2D_{600} + D_{900}}{D_0} \right)$	Δομική αξιολόγηση του συνολικού οδοστρώματος και της στρώσης έδρασης
AUPP (Area Under Pavement Profile)	$\frac{5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900}}{2}$	Χαρακτηρίζει τις συνθήκες του οδοστρώματος, γενικά, ανάλογα και με το πάχος των στρώσεων
Surface Curvature Index 300mm (SCI ₃₀₀)	$D_0 - D_{300}$	Δομική αξιολόγηση, συνήθως, της ασφαλικής στρώσης
AI ₁	$\frac{D_0 + D_{300}}{2D_0}$	Προσδιορισμός της κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων
Surface Curvature Index 600mm (SCI ₆₀₀)	$D_0 - D_{600}$	Δομική αξιολόγηση, συνήθως, της στρώσης βάσης/υπόβασης
Base Damage Index (BDI)	$D_{300} - D_{600}$	Δομική αξιολόγηση της βάσης
F ₁	$\frac{D_0 - D_{600}}{D_{300}}$	Προσδιορισμός της κατάστασης της στρώσης από αμμοχάλικα
F ₂	$\frac{D_{300} - D_{900}}{D_{600}}$	Προσδιορισμός της κατάστασης της υπόβασης και συνήθως της στρώσης έδρασης
Base Curvature Index (BCI)	$D_{600} - D_{900}$ used in USA	Δομική αξιολόγηση της υπόβασης και συνήθως και της στρώσης έδρασης
	$D_{900} - D_{1200}$ used in Finland	
	$D_{1200} - D_{1500}$ used in Estonia	
D_{1800}	Η υποχώρηση στα 1800mm	Χαρακτηρίζει τις συνθήκες της στρώσης έδρασης και του υπεδάφους

Σε κάθε περίπτωση D_i είναι η υποχώρηση σε απόσταση i (mm) από το κέντρο φόρτισης FWD.

Συνοψίζοντας η συνολική κατάσταση της δομής του οδοστρώματος εκφράζεται με τους συντελεστές D_0 , AREA και AUPP. Οι δείκτες SCI_{300} και AI_1 μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με αλλαγές στην αντοχή των στρώσεων κοντά στην επιφάνεια (συνήθως ασφατικές στρώσεις). Οι δείκτες SCI_{600} , BDI, BCI, F_1 και F_2 σχετίζονται με τη στρώση από ασύνδετα υλικά του οδοστρώματος και ορισμένοι ίσως και με τη στρώση έδρασης και τέλος ο D_{1800} με τη δομική κατάσταση της στρώσης έδρασης (Gopalakrishnan, et al., 2010). Γενικά όμως, οι δείκτες διαμορφώνονται και χαρακτηρίζουν τη δομική κατάσταση των στρώσεων, ανάλογα και με το πάχος τους. Από όλους τους παραπάνω δείκτες, οι πιο συνηθισμένοι και ευρέως αποδεκτοί για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος είναι ο D_0 και ο SCI_{300} .

4.2.2. Δείκτης δομικής κατάστασης οδοστρώματος D_0

Η μεγαλύτερη υποχώρηση παρατηρείται στο κέντρο φόρτισης. Όσον αφορά τη γενική κατάσταση του οδοστρώματος, μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων που παρουσιάζονται είναι η κεντρική υποχώρηση (D_0), η οποία είναι η πιο σημαντική και πιο συνηθισμένη παράμετρος που χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση του συνόλου του οδοστρώματος, τόσο σε επίπεδο δικτύου, όσο και σε επίπεδο έργου. Ο δείκτης D_0 εκφράζει τη συνολική κατάσταση ενός οδοστρώματος από άποψη δομικής αντοχής.

Η τιμή του δείκτη αυτού εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος και διαφέρει ανάλογα με το αν είναι εύκαμπτο, δύσκαμπτο ή ημι-άκαμπτο, καθώς και από τη θερμοκρασία, με συνέπεια να παρουσιάζει αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους (εποχιακές διακυμάνσεις). Μικρές τιμές του δείκτη αυτού υποδηλώνουν γενικά ότι το οδόστρωμα είναι ισχυρό. Όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει ο δείκτης αυτός, που μεταφράζεται σε μικρή υποχώρηση, άρα μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και συνεπώς μεγάλη μηχανική αντοχή, τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση του οδοστρώματος. Αντίστοιχα, μεγάλες τιμές του D_0 υποδηλώνουν ασθενές οδόστρωμα (Λοίζος & Πλατή, 2016), (Zhang, et al., 2011).

Όμως, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων, με διακυμάνσεις στο πάχος των ασφατικών στρώσεων, στη σύσταση του ασφατικού μίγματος, αλλά και στο υλικό της βάσης, τα οποία μαζί με την θερμοκρασία και το φορτίο επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επομένως, η αξιολόγηση με βάση την τάξη μεγέθους του δείκτη δομικής κατάστασης, δεν είναι απόλυτα αξιόπιστη. Η ερμηνεία του δείκτη αυτού έχει περισσότερο την έννοια της σύγκρισης, μεταξύ των μετρημένων υποχωρήσεων κατά μήκος του οδοστρώματος, και ιδίως με βάση το χρόνο από την κατασκευή. Εκτιμάται δηλαδή η μεταβολή του δείκτη δομικής κατάστασης ανά χιλιομετρική θέση, καθώς και η διακύμανση αυτού με την πάροδο

του χρόνου, αξιολογώντας την πορεία της κατάστασης του εκάστοτε οδοστρώματος (Molenaar, 2006), (Λοίζος & Πλατή, 2016).

4.2.3. Δείκτης AREA

Η παράμετρος AREA καθορίζει τη σχετική δομική κατάσταση του οδοστρώματος και της στρώσης έδρασης. Η παράμετρος AREA είναι ένας αριθμός, ο οποίος αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη επιφάνεια μιας κάθετης λωρίδας που έχει ληφθεί από ένα προφίλ υποχώρησης μεταξύ του κέντρου και 36 ίντσες ή 915 mm μακριά από το φορτίο και εκφράζει την κατάσταση του οδοστρώματος στο σύνολο της δομής του. Υψηλότερες τιμές του δείκτη AREA σημαίνουν υψηλότερη δυσκαμψία στο οδόστρωμα (Gopalakrishnan, et al., 2010).

Η μέγιστη τιμή AREA είναι 36 ίντσες (915 mm) και θα συμβεί όταν και οι τέσσερις μετρήσεις υποχώρησης είναι ίσες, πράγμα που δεν είναι πιθανό να συμβεί. Για να είναι σχεδόν ίσες οι τέσσερις μετρήσεις υποχώρησης, το οδόστρωμα θα πρέπει να είναι εξαιρετικής κατάστασης. Η εξίσωση για τη μέγιστη τιμή AREA έχει ως εξής:

Εάν $D_0=D_1=D_2=D_3$, τότε $\max AREA = 6(1+2+2+1)=36 \text{ inches ή } 914,4 \text{ mm}$

Αντίθετα, η ελάχιστη τιμή του δείκτη AREA δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 11,1 ίντσες (280 mm) και θα εμφανιστεί όταν όλες οι στρώσεις του οδοστρώματος έχουν το ίδιο μέτρο ελαστικότητας ή η δομή του οδοστρώματος δεν συμβάλλει με καμία πρόσθετη δυσκαμψία στο υποκείμενο υπόστρωμα. Αυτό είναι εξαιρετικά απίθανο για τις πραγματικές κατασκευές οδοστρώματος (Pavement interactive, 2018).

4.2.4. Δείκτης SCI

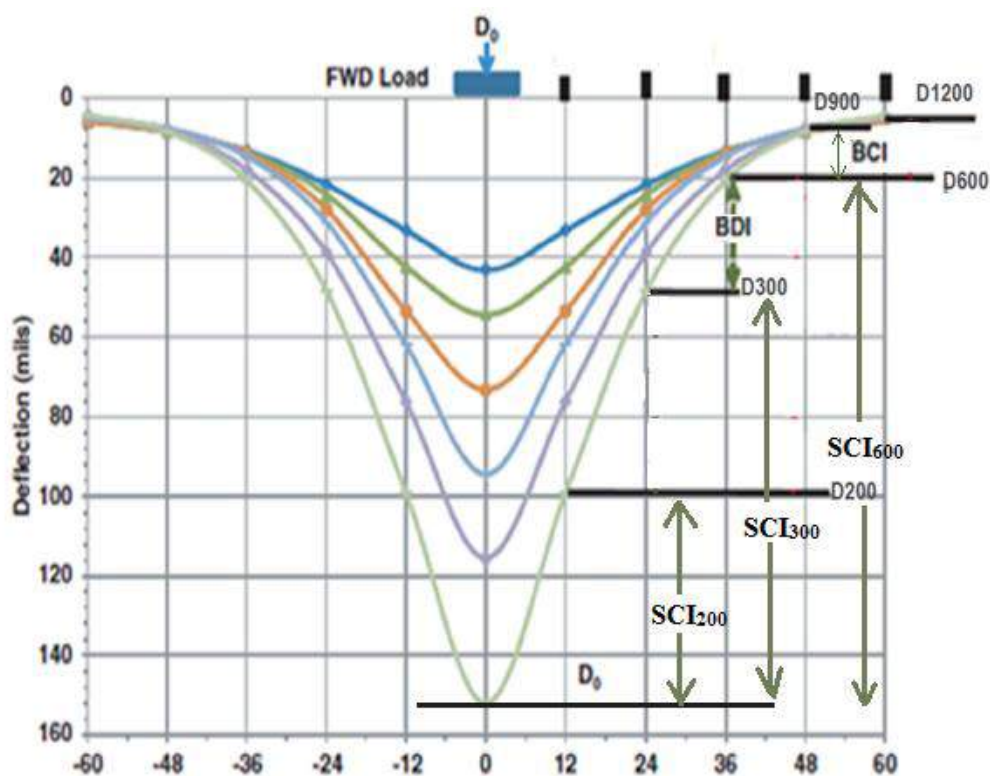
Μία άλλη παράμετρος, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία, είναι ο δείκτης καμπυλότητας επιφάνειας SCI (Surface Curvature Index). Ο δείκτης SCI είναι η διαφορά της υποχώρησης στο κέντρο του φορτίου στην πλάκα (D_0) και της υποχώρησης σε απόσταση i (D_i). Όσο αυξάνεται η απόσταση της μετρημένης υποχώρησης D_i από το κέντρο φόρτισης, αυξάνεται το βάθος για το οποίο μπορεί να προκύψει σχετική πληροφορία. Επί παραδείγματι, ο δείκτης SCI_{600} δίνει πληροφορία για μεγαλύτερο βάθος συγκριτικά με το δείκτη SCI_{300} . Γενικότερα χαμηλές τιμές του δείκτη SCI υποδεικνύουν καλή ικανότητα διασποράς του φορτίου στο οδόστρωμα, δηλαδή υψηλή δυσκαμψία. Ο δείκτης SCI_{300} , όπως και ο δείκτης D_0 , θεωρείται πολύ συνηθισμένος για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος

4.2.5. Δείκτες BDI, BCI

Εν συνεχεία, ο δείκτης φθοράς (Base Damage Index BDI) ή Middle Layer Index (MLI) δίνει μια ένδειξη της δομικής κατάστασης της στρώσης βάσης. Ο δείκτης αυτός ισούται με τη διαφορά της υποχώρησης σε απόσταση 300mm από το κέντρο (D_{300}) και της υποχώρησης σε απόσταση 600mm από το κέντρο (D_{600}).

Ο δείκτης καμπυλότητας (Base Curvature Index BCI ή Lower Layer Index LLI) ισούται με την αντίστοιχη διαφορά της υποχώρησης σε απόσταση 600mm (D_{600}) και της υποχώρησης σε απόσταση 900mm (D_{900}) και δίνει μια εικόνα για τα κατώτερα δομικά στρώματα, δηλαδή την υπόβαση και την στρώση έδρασης. Είναι μία παράμετρος που είναι ευαίσθητη στην αντοχή και στην ακαμψία της στρώσης της υπόβασης των αδρανών.

Ο BCI μπορεί να δώσει πληροφορία για ένα μεγαλύτερο βάθος από το BDI, επειδή για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται υποχωρήσεις αισθητήρων μακρύτερα από το φορτίο πρόσκρουσης. Συνεπώς, τα BDI και BCI μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί για να εκτιμηθεί η σχετική φθορά μεταξύ των στρώσεων του οδοστρώματος (Donovan & Tutumluer, 2009). Οι χαμηλότερες τιμές των BCI και BDI σημαίνουν υψηλότερες δυσκαμψίες στο οδόστρωμα. Το φυσικό νόημα των δεικτών BCI και BDI απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση βασικών παραμέτρων υποχώρησης

4.2.6. Άλλοι δείκτες

Η παράμετρος AUPP χαρακτηρίζει τις συνθήκες του συνολικού οδοστρώματος, ανάλογα όμως και με το πάχος των στρώσεων, αφού οι υποχωρήσεις D_{600} και D_{900} αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερα βάθη. Οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη αυτού δείχνουν υψηλότερη δυσκαμψία του οδοστρώματος.

Ο δείκτης AI_1 αναφέρεται στην κατάσταση των ανωτέρων στρώσεων του οδοστρώματος, δηλαδή των ασφαλικών στρώσεων. Ο δείκτης αυτός εφαρμόζεται σε αναλύσεις συγκριτικής αξιολόγησης (Horak, et al., 2015).

Ο συντελεστής F_1 αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα του προφίλ υποχώρησης κοντά στο φορτίο επιβολής και είναι αντιστρόφως ανάλογος του λόγου δυσκαμψίας του οδοστρώματος προς τη δυσκαμψία της στρώσης έδρασης (Pierce, et al., 2017). Ίσως και ο δείκτης αυτός επηρεάζεται από πιο βαθιά στρώση. Αντιθέτως, ο συντελεστής F_2 αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα του προφίλ υποχώρησης πιο μακριά από το φορτίο επιβολής και είναι ανεξάρτητος από τα μεγέθη και τα πάχη των ανωτέρων στρώσεων (Kavussi, et al., 2017), (Schnoor & Horak, 2012), (Xu, et al., 2002).

4.3. Συντελεστές διόρθωσης δεικτών δομικής κατάστασης

4.3.1. Παράγοντες επίδρασης

Οι ελαστικές υποχωρήσεις εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και από τη θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει κυρίως τη συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων. Όσον αφορά στη διαδικασία της μέτρησης, υπάρχουν κάποιες λεπτομέρειες που πρέπει να συνυπολογιστούν στην εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, έπειτα από επεξεργασία και ανάλυση των αρχικών μετρήσεων. Παράγοντες όπως το επιβαλλόμενο φορτίο και η θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλικών στρώσεων, τη στιγμή της μέτρησης, καθορίζουν τα αριθμητικά δεδομένα. Συνεπώς λόγω της μεγάλης αυτής επιρροής στη συμπεριφορά του οδοστρώματος, είναι απαραίτητο οι μετρήσεις να αναχθούν σε κοινές συνθήκες μέτρησης με κατάλληλους τύπους, και συγκεκριμένα σε φορτίο και θερμοκρασία αναφοράς, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμες (Molenaar, 2006).

4.3.2. Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς

Όπως αναφέρθηκε, ένας από τους πιο προφανείς παράγοντες που επηρεάζουν τις υποχωρήσεις του οδοστρώματος είναι το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου. Οι περισσότεροι σύγχρονοι μηχανισμοί μέτρησης υποχώρησης μπορούν να επιβάλουν επίπεδα φορτίου από 13 kN (3000 lbf) έως και 245 kN (55.000 lbf). Ο τύπος φόρτισης μπορεί επίσης να επηρεάσει την υποχώρηση του οδοστρώματος. Μια αργή κατάσταση φόρτισης παράγει διαφορετική υποχώρηση από μια ταχεία κατάσταση φόρτισης. Γενικά, όσο ταχύτερη είναι η φόρτιση, τόσο μικρότερη είναι η παλμική φόρτιση και τόσο μικρότερη είναι η υποχώρηση (Pierce, et al., 2017).

Το φορτίο ρυθμίζεται συνήθως μεταξύ 35 και 50 kN. Η αποτελεσματική πρόσκρουση μπορεί να μεταβληθεί με τη μεταβολή του ύψους πτώσης, που καθορίζεται από ένα σετ αισθητήρων προσέγγισης που τοποθετούνται χειροκίνητα δίπλα στον μηχανισμό οδηγού πτώσης βάρους (Tonkin & Taylor, 2012).

Όλες, ανεξαιρέτως, οι υποχωρήσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία των μετρήσεων, ανάγονται σε φορτίο αναφοράς. Το φορτίο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται ως φορτίο αναφοράς P_{target} . Κατά την εκτέλεση όμως των δοκιμών παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στο επιβαλλόμενο φορτίο, οι οποίες καταγράφονται και πραγματοποιείται αναγωγή των αποτελεσμάτων στο φορτίο αναφοράς, με τη βοήθεια της σχέσης :

$$D_i(P_{target}) = \frac{D_i(P) \times P_{target}}{P} \quad (4.1)$$

όπου:

- $D_i(P)$: η υποχώρηση σε απόσταση i , υπό φορτίο P ,
- P : το φορτίο στο οποίο έχει γίνει η φόρτιση και
- $D_i(P_{target})$: η αναγωγή υποχώρησης στο φορτίο αναφοράς P_{target}

4.3.3. Αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς

Η θερμοκρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να καθορίζεται κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Στα οδοστρώματα, η ακαμψία του ασφαλομίγματος μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να καταγράφονται μεγαλύτερες υποχωρήσεις. Επομένως, η διόρθωση των μετρούμενων υποχωρήσεων σε μία ενιαία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 20°C ή 70°F) απαιτείται για την ορθή ανάλυση των δεδομένων. Ακόμη και οι εποχικές μεταβολές των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας επηρεάζουν την απόκλιση των υποχωρήσεων του οδοστρώματος. Σε γενικές γραμμές, οι υποχωρήσεις είναι μεγαλύτερες την άνοιξη

λόγω των κορεσμένων συνθηκών και της μειωμένης στήριξης οδοστρώματος και είναι χαμηλότερες το χειμώνα, όταν τα υποκείμενα στρώματα και η υπόβαση είναι παγωμένα (Pierce, et al., 2017).

Συνεπώς, απαραίτητη είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος και της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων (βλ. Εικόνα 4.3) (Λοίζος & Πλατή, 2016). Μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται και σε ενδιάμεσα βάθη. Το σύστημα FWD καταγράφει τη θερμοκρασία του αέρα (σημείο 1) και της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος (σημείο 2) με χρήση υπερύθρων, ενώ στο σημείο 3 η θερμοκρασία μετράται με θερμόμετρο μέσω μικρής οπής που διανοίγεται στο οδόστρωμα.



Εικόνα 4.3: Μέτρηση Θερμοκρασίας: (1) αέρα (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) ασφαλτικών στρώσεων

Οι μετρήσεις υποχώρησης πρέπει να διορθώνονται σε ένα συγκεκριμένο τύπο συστήματος φόρτισης και σε μία προκαθορισμένη περιβαλλοντική κατάσταση. Για ένα δεδομένο βάθος, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας ακολουθούν ένα ομαλό πρότυπο και επηρεάζονται κυρίως από τη θερμοκρασία της επιφάνειας, η οποία, με τη σειρά της, επηρεάστηκε από τέτοιους παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, η ώρα της ημέρας, οι καιρικές συνθήκες, ο βαθμός ηλιοφάνειας, η ποσότητα βροχής, το χιόνι και ο άνεμος, τη θερμοκρασία της επιφάνειας, καθώς και της υπόβασης (Southgate, 1968).

Σχετικά με την αναγωγή των μετρήσεων σε θερμοκρασία αναφοράς, υφίστανται κάποιες διαφοροποιήσεις. Λόγω της μη επιρροής της θερμοκρασίας, πέραν της απόστασης των, κατά προσέγγιση, 200 χιλιοστών από το σημείο φόρτισης, κάποιοι δείκτες δεν μετατρέπονται σε θερμοκρασία αναφοράς. Για ακριβέστερη διόρθωση της θερμοκρασίας των επιφανειακών παραμορφώσεων εκτιμάται η ενεργή ακτινική απόσταση D_{eff} . Η D_{eff} ορίζεται ως η ενεργή ακτίνα επιρροής της θερμοκρασίας από

τον δίσκο φόρτισης, εντός της οποίας η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει τις υποχωρήσεις του FWD (Park & Kim, 2002).

Ο τύπος, με τον οποίο υπολογίζεται η ενεργή ακτίνα είναι :

$$D_{eff} = 5.5 H_{ac} - 22.2 \text{ (inches)} \quad (4.2)$$

όπου H_{ac} : το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων σε inches

Ο τύπος αυτός μετατρέπεται, έτσι ώστε να μας δίνει την ενεργή ακτίνα σε mm και το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων να δίνεται και πάλι σε mm:

$$D_{eff} = 5.5 H_{ac} - 563,88 \text{ (mm)} \quad (4.3)$$

Λόγω της εξάρτησης της δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων από τη θερμοκρασία στο σώμα τους, οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει το σύστημα FWD στις ίδιες αποστάσεις διαφοροποιούνται ως αποτέλεσμα των μεταβολών θερμοκρασίας. Διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε ένα οδικό τμήμα, αλλά και όταν οι μετρήσεις διακόπτονται και συνεχίζονται άλλη μέρα (Aavik & Talvik, 2008). Κατά συνέπεια, για να είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγησή τους, πρέπει να γίνει αναγωγή των δεικτών D_0 και SCI, που προκύπτουν από τις ελαστικές υποχωρήσεις στη θερμοκρασία αναφοράς και για απόσταση μέχρι και την ενεργή ακτίνα D_{eff} . Οι δείκτες μπορούν να αναχθούν σε μία επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς με χρήση κατάλληλων συντελεστών.

Ένας διεθνώς γνωστός συντελεστής, ο οποίος χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα, είναι ο συντελεστής διόρθωσης TNF (Temperature Normalization Factor) σε θερμοκρασία 20°C. Ο συντελεστής αυτός εκφράζεται από την εξίσωση :

$$TNF = 1 + [\alpha_1 + (\alpha_2/h_1)] \times (T_A - 20) + [\alpha_3 + (\alpha_4/h_1)] \times (T_A - 20)^2 \quad (4.4)$$

όπου:

- TNF: ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας
- T_A : η θερμοκρασία στο μέσο του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων (°C)
- h_1 : το πάχος ασφαλτικών στρώσεων (mm)
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: σταθερές που αναγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί

Πίνακας 5.1: Σταθερές για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας (Molenaar, 2006)

Variable	α_1 (°C ⁻¹)	α_2 (mm/ °C)	α_3 (0.001 °C ⁻¹)	α_4 (mm/ °C)
D_0	0.01661	-0.67095	0.28612	-0.01408
SCI₂₂₅	0.05955	-2.73223	1.48011	-0.08171
SCI₃₀₀	0.05398	-2.61130	1.28439	-0.07493
SCI₄₅₀	0.04720	-2.39175	1.0522	-0.06371
SCI₆₀₀	0.04190	-2.15168	0.87228	-0.05301

Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας και δεδομένου ότι έχει προηγηθεί αναγωγή στο εκάστοτε φορτίο αναφοράς, πραγματοποιείται η αναγωγή των αντίστοιχων υποχωρήσεων και σε θερμοκρασία αναφοράς 20 °C. Η σχέση, στην οποία βασίζεται η αναγωγή αυτή, είναι :

$$D_o(20^{\circ}\text{C}) = \frac{D_o(T)}{TNF} \quad (4.5) \quad , \quad \text{και} \quad SCI(20^{\circ}\text{C}) = \frac{SCI(T)}{TNF} \quad (4.6)$$

όπου:

- $D_o(T)$: η μέτρηση D_o σε θερμοκρασία T ,
- T : η θερμοκρασία αναφοράς στους 20°C,
- $D_o(20^{\circ}\text{C})$: η αναγωγή του D_o σε θερμοκρασία αναφοράς των 20°C,
- TNF : ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας

Η διορθωμένη τιμή της υποχώρησης προκύπτει διαιρώντας την τιμή της υποχώρησης που μετρήθηκε με τον συντελεστή TNF . Πρώτα πραγματοποιείται διόρθωση του D_o ως προς το φορτίο και η νέα τιμή που προκύπτει διορθώνεται στη συνέχεια ως προς τη θερμοκρασία αναφοράς (Λοίζος & Πλατή, 2016).

Για την ανάλυση των ελαστικών υποχωρήσεων η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει και άλλους τύπους διόρθωσης της θερμοκρασίας:

1.

$$d_{15} = (d_T) / (1 + K \frac{T-15}{15}) \quad (4.7)$$

όπου d_T είναι η υποχώρηση σε θερμοκρασία T , και T η θερμοκρασία στην επιφάνεια του οδοστρώματος, δηλ. λαμβάνει υπόψη τον τύπο της δομής του οδοστρώματος και d_{15} είναι η υποχώρηση σε θερμοκρασία 15°C

2.

$$d_{20} = \frac{200dT}{3T+140} \quad (4.8)$$

3.

$$d_{20} = k(T)d_T, \quad k(T) = 0.00026008T^2 - 0.2589279T + 1.4111835 \quad (4.9)$$

όπου d_{20} είναι η υποχώρηση σε θερμοκρασία 20°C, k συντελεστής εξαρτώμενος από την δομή του οδοστρώματος, με $K=0,2$ για λεπτό ασφαλτικό οδόστρωμα και T η θερμοκρασία στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Ο πρώτος τύπος βασίζεται σε θερμοκρασία αναφοράς 15°C, ενώ οι άλλοι δύο βασίζονται σε θερμοκρασία αναφοράς 20 °C (Simonin, et al., 2015).

4.4. Κατάταξη δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων βάσει δεικτών

Μείζον κριτήριο για την αξιολόγηση του οδοστρώματος ως συνέχεια των προηγούμενων, είναι η κατάταξη δομικής κατάστασης, βάσει των δεικτών. Η προσέγγιση που γίνεται, δεν απαιτεί back-analysis και γίνεται για να προσδιοριστεί η δομική κατάσταση του εξεταζόμενου οδοστρώματος (από εξαιρετική έως και πολύ κακή ποιότητα). Ένα παράδειγμα των επιπέδων υποχώρησης κάτω από το φορτίο FWD 40 kN, για μεγάλους εθνικούς οδικούς άξονες μεγάλου όγκου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Κατηγοριοποίηση βάσει μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 40kN (Hakim & Brown, 2006)

Γενική Κατάσταση οδοστρώματος D_0	Κατάσταση ασφαλτικών στρώσεων SCI_{300}	Κατάσταση του Υπεδάφους - (D_{1800}) Οδοστρώματος
<100μm- εξαιρετική	<30 μm- εξαιρετική	<5μm- εξαιρετική
100-150 μm- πολύ καλή	30-45 μm- πολύ καλή	5-15 μm- πολύ καλή
150-200 μm- καλή	45-80 μm- μέτρια	15-20 μm -καλή
200-250μm - μέτρια	>80 μm- κακή	20-30μm μέτρια
250-300 μm- κακή		30-40μm - κακή
>300 - πολύ κακή		40-50μm- πολύ κακή
		>50μm- κάκιστη

Τα όρια αφορούν την κεντρική υποχώρηση (D_0), το δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας (SCI_{300}), και την πιο απομακρυσμένη υποχώρηση (D_{1800}). Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 50kN, λαμβάνονται προσεγγιστικά, με γραμμική παρεμβολή αναλογίας φορτίου (Πίνακας 4.3). Κατά συνέπεια με μία αύξηση των τιμών κατά 25%, πραγματοποιείται προσαρμογή των ορίων στην τιμή του φορτίου αναφοράς των 50 kN (Hakim & Brown, 2006).

Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση βάσει μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 50 kN

Γενική Κατάσταση οδοστρώματος D ₀	Κατάσταση ασφαλτικών στρώσεων SCI ₃₀₀	Κατάσταση του Υπεδάφους -(D ₁₈₀₀) Οδοστρώματος
<125μm- εξαιρετική	<37 μm- εξαιρετική	<6μm- εξαιρετική
125-185 μm- πολύ καλή	37-55 μm- πολύ καλή	6-20 μm- πολύ καλή
185-250 μm- καλή	55-100 μm- μέτρια	20-25 μm - καλή
250-315μm - μέτρια	>100 μm- κακή	25-37μm μέτρια
315-375 μm- κακή		37-50 μm - κακή
>375 - πολύ κακή		50-60 μm- πολύ κακή
		>60 μm- κάκιστη

Λόγω των διαφορετικών κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών συνθηκών, τα όρια για την κατηγοριοποίηση των οδοστρωμάτων με δεδομένα του FWD ενδέχεται να διαφοροποιούνται ακόμη και για το ίδιο φορτίο (πχ 40kN). Επιπλέον ενδεικτικά όρια για τους δείκτες D₀, SCI₃₀₀ και D₁₈₀₀ αναφέρονται στον Πίνακας 4.4 και για τους δείκτες BLI, MLI, LLI αντίστοιχα στον Πίνακας 4.5 (Transport Infrastructure Ireland, 2000).

Πίνακας 4.4: Συνοπτική αναφορά των FWD δεδομένων υπό φορτίο 40 kN

D ₀	SCI ₃₀₀	Κατάσταση οδοστρώματος	D ₁₈₀₀	Κατάσταση υπόβασης
<100	<40	πολύ ισχυρό οδόστρωμα	<10	Πολύ δύσκαμπτη υπόβαση
100-200	40-80	ισχυρό οδόστρωμα	10-20	Δύσκαμπτη υπόβαση
200-350	80-140	Μερικώς ισχυρό-πιθανώς να χρειάζεται επικάλυψη, ανάλογα με τον όγκο κυκλοφορίας	20-30	Δύσκαμπτη προς μέτρια υπόβαση
350-500	140-200	Μέτριο οδόστρωμα-χρειάζεται επικάλυψη ανάλογα με τον όγκο κυκλοφορίας	30-40	Μέτρια προς αδύναμη υπόβαση

500-700	200-300	Μέτριο προς αδύναμο οδόστρωμα, απαιτείται επικάλυψη (πιθανώς κοκκώδη στρώση)	40-50	Αδύναμη υπόβαση
>700	>300	Αδύναμο οδόστρωμα (κοκκώδης στρώση ή ανακατασκευή)	>50	Πολύ αδύναμη υπόβαση

Πίνακας 4.5: Τιμές για την αξιολόγηση των παραμέτρων BLI, MLI,LLI (Transport Infrastructure Ireland, 2000)

Είδος οδοστρώματος	Αξιολόγηση δομικής κατάστασης	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Κοκκώδης βάση	Άριστη	<200	<100	<50
	Μέτρια	200-400	100-200	50-100
	Κακή	>400	>200	>100
Τσιμεντοειδής βάση	Άριστη	<100	<50	<40
	Μέτρια	100-300	50-100	40-80
	Κακή	>300	>100	>80
Ασφαλτώδης βάση	Άριστη	<200	<100	<50
	Μέτρια	200-400	100-150	50-80
	Κακή	>400	>150	>80

5. Πειραματική διαδικασία

5.1. Περιγραφή δεδομένων και μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, τα οποία προέρχονται από μετρήσεις σε ένα σύγχρονο αυτοκινητόδρομο. Τα δεδομένα αφορούν ένα χρονικό διάστημα περίπου έξι ετών και τμήμα του αυτοκινητόδρομου συνολικού μήκους 5 χιλιομέτρων. Οι μετρήσεις των υποχωρήσεων πραγματοποιήθηκαν ανά 200 μέτρα.

Για την διερεύνηση της εξέλιξης των δεικτών δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, αρχικά, ανακτώνται όλα τα στοιχεία που δίνονται από το Εργαστήριο Οδοποιίας. Εν συνεχεία, λόγω των μεταβολών του πάχους των στρώσεων διερευνάται ο ορισμός μια ενιαίας διατομής με συγκεκριμένα πάχη στρώσεων και υπολογίζονται όλοι οι δείκτες, που έχουν αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ως επόμενο βήμα, λαμβάνεται από τα δεδομένα η τιμή του φορτίου του προσπίπτοντος βάρους. Για τις μετρήσεις διεξήχθησαν σε κάθε χιλιομετρική θέση τρεις ρίψεις του φορτίου, από τις οποίες η τιμή της τελευταίας λαμβάνεται υπόψη. Για την σύγκριση και ανάλυση, όλες οι υποχωρήσεις ανάγονται στο φορτίο αναφοράς. Ακολουθεί ο υπολογισμός των δεικτών και η αναγωγή ορισμένων από αυτών και σε θερμοκρασία αναφοράς. Έστερα, ολοκληρώνεται η στατιστική επεξεργασία και η συγκριτική αξιολόγησή τους.

5.1.1. Ανάκτηση δεδομένων

Για την καταγραφή των στοιχείων του οδοστρώματος αυτού χρησιμοποιήθηκε το FWD. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα, καταγράφηκε σε κάθε θέση το πίπτον φορτίο, με ονομαστικό φορτίο τα 50kN, και οι ελαστικές υποχωρήσεις σε απόσταση έως και 1800mm από το κέντρο φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, οι υποχωρήσεις που μετρήθηκαν και παρέχονται είναι οι: D₀, D₂₀₀, D₃₀₀, D₄₅₀, D₆₀₀, D₉₀₀, D₁₂₀₀, D₁₅₀₀ και D₁₈₀₀. Άλλα στοιχεία, που αξιοποιήθηκαν, αφορούν την περίοδο των μετρήσεων και τις καταγραφές θερμοκρασίας στον αέρα, στην επιφάνεια οδοστρώματος, καθώς και σε βάθος 2-3 και 7-8 εκατοστά στην ασφαλτική στρώση. Όλα αυτά είναι απαραίτητα για τον καθορισμό και την ανάλυση των δεικτών και στη συνέχεια για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης του τμήματος του αυτοκινητοδρόμου.

5.1.2. Καθορισμός διατομής

Το τμήμα αυτό του οδοστρώματος αποτελείται από ασφαλτική στρώση, με πάχος από 15,2 έως και 19,4 εκατοστά και από στρώση από ασύνδετα υλικά με αντίστοιχο πάχος από 15,2 έως 27,7 εκατοστά και μέση τιμή 21,8 εκατοστά. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στον Πίνακα 5.1 παρατηρούνται διαφορές στις τιμές του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων, αλλά και της βάσης/υπόβασης, ανά χιλιομετρική θέση. Οι διαδοχικές μετρήσεις, για την μέτρηση του πάχους, διεξήχθησαν ανά ένα μέτρο με το σύστημα του Γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) και επομένως γίνεται σαφές πως υπάρχει μια πλήρης εικόνα της μεταβολής της στρωματογραφίας του οδοστρώματος.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά στοιχεία για τα πάχη του οδοστρώματος

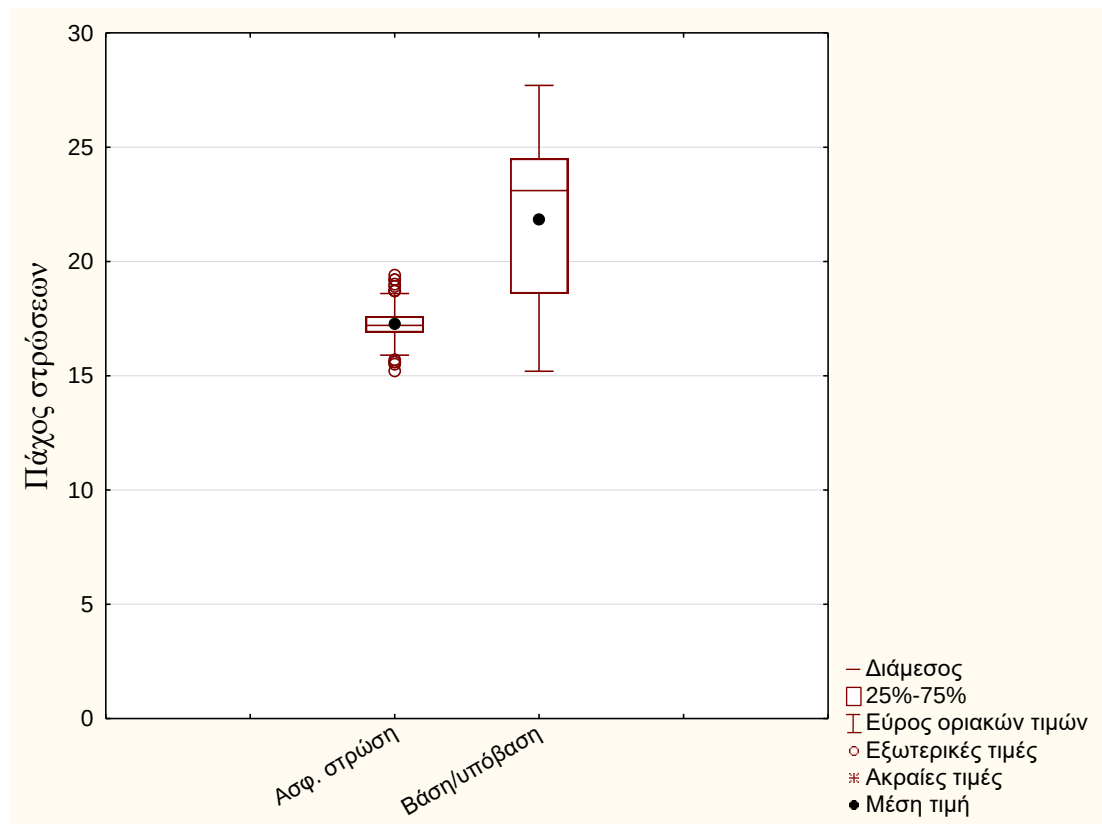
	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων H ₁ (cm)	Πάχος βάσης/υπόβασης H ₂ (cm)
Μέση τιμή	17,27	21,84
Ελάχιστη τιμή	15,20	15,20
Μέγιστη τιμή	19,40	27,70
Τυπική απόκλιση	0,58	3,06
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	3,34%	14,01%

Το μέσο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων ανέρχεται στα 17,3 εκατοστά, με συντελεστή διακύμανσης 3%, ο οποίος είναι αρκετά χαμηλός, γεγονός που σημαίνει ότι η πραγματική τιμή του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων διαφέρει ελάχιστα από τη μέση τιμή, κατά μήκος του οδοστρώματος. Αντίστοιχα, το ίδιο συμβαίνει και στη στρώση από ασύνδετα υλικά, της οποίας τα πάχη έχουν, να μεν μεγαλύτερο συντελεστή μεταβλητότητας, ο οποίος φτάνει το 14%, όμως διαφαίνεται ότι υπάρχει γενική ομοιομορφία και άρα η μέση τιμή θεωρείται αντιπροσωπευτική για το δείγμα.

Όλα αυτά φαίνονται και καλύτερα στο παρακάτω σχετικό στατιστικό διάγραμμα. Σύμφωνα με την Εικόνα 5.1, και για τις δύο στρώσεις φαίνεται πως το 75% των μετρήσεων δεν ξεπερνά κατά πολύ την μέση τιμή, ούτε τη διάμεσο. Κυρίως στις ασφαλτικές στρώσεις η μέση τιμή και η τιμή της διαμέσου σχεδόν συμπίπτουν, με αυτή της διαμέσου να είναι 17,2 cm και την μέση τιμή 17,27 cm. Το εύρος των οριακών τιμών (25%-75%) είναι από 15,9cm έως 18,6 cm και με εξωτερικές τιμές, οι οποίες φτάνουν οι ελάχιστες τα 15,2cm και οι μέγιστες τα 19,4cm.

Η μέση τιμή και η διάμεσος της στρώσης από ασύνδετα υλικά έχουν μία διαφορά 0,74 cm, με την τιμή της διαμέσου να είναι μεγαλύτερη. Αυτό δικαιολογείται, λόγω της μεγαλύτερης διακύμανσης των τιμών, οι οποίες επηρεάζουν περισσότερο την μέση

τιμή. Το εύρος των τιμών περιορίζεται από 15,2 έως 27,7 cm, που είναι και η ελάχιστη και μέγιστη τιμή, αντίστοιχα, χωρίς να υπάρχουν εξωτερικές και ακραίες τιμές.



Εικόνα 5.1: Γράφημα τύπου box plot για τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος

Συνολικά λοιπόν, το οδόστρωμα είχε μικρής τάξεως μεταβολή, κατά μήκος του οδοστρώματος, δηλαδή μικρότερη του 20%, που σημαίνει ότι το δείγμα μας είναι ομοιογενές. Συνεπώς, προκύπτει η δυνατότητα καθορισμού μιας αντιπροσωπευτικής διατομής οδοστρώματος με τα πάχη των στρώσεων να είναι ίσα με τη μέση τιμή της κάθε στρώσης, καταλήγοντας στη διατομή που φαίνεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Διατομή οδοστρώματος

Η τελική διατομή αποτελείται από τις ασφαλτικές στρώσεις με πάχος 17cm, στρώση βάσης/υπόβασης από ασύνδετα υλικά, με πάχος 22cm, και τέλος από την στρώση έδρασης.

5.1.3. Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς

Προτού υπολογιστούν οι δείκτες δομικής αξιολόγησης, όλες ανεξαιρέτως, οι υποχωρήσεις, ανάγονται σε φορτίο αναφοράς. Το φορτίο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται ως φορτίο αναφοράς P_{target} και στην προκειμένη περίπτωση το φορτίο είναι 50 kN. Κατά την εκτέλεση, όμως, των δοκιμών παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις και έτσι, είναι απαραίτητη η αναγωγή των αποτελεσμάτων στο φορτίο αναφοράς, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$D_i(50\text{kN}) = \frac{D_i(P) \times 50\text{kN}}{P} \quad (5.1)$$

όπου

- $D_i(P)$: η μέτρηση κάθε υποχώρησης σε φορτίο P
- P : το φορτίο στο οποίο έχει γίνει η φόρτιση και

- D_i (50kN): η αναγωγή της υποχώρησης στο φορτίο αναφοράς 50kN

Οι πίνακες με την αναγωγή στο φορτίο αναφοράς, για κάθε υποχώρηση και για κάθε έτος, παρατίθενται στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

5.1.4. Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης

Για κάθε έτος και για κάθε χιλιομετρική θέση ξεχωριστά, υπολογίζονται όλοι οι δείκτες δομικής κατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη πλέον τις υποχωρήσεις, που έχουν αναχθεί σε φορτίο 50kN. Σύμφωνα και με τον Πίνακα 4.1 του προηγούμενου κεφαλαίου, υπολογίζονται οι δείκτες D_0 , AREA και AUPP για τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Οι δείκτες SCI_{300} , SCI_{200} και AI_1 , υπολογίζονται με τους αντίστοιχους τύπους, κυρίως για τη δομική κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων και οι δείκτες SCI_{600} , BDI, F_1 , BCI και F_2 για τη στρώση βάσης/υπόβασης και ίσως για τη στρώση έδρασης. Τέλος ο δείκτης D_{1800} , υποδεικνύει την κατάσταση του υπεδάφους. Στο παράρτημα, στο τέλος της διπλωματικής εργασίας, φαίνονται οι τιμές αυτές, σε πίνακες, για κάθε χρονιά ξεχωριστά, όπως υπολογίστηκαν.

5.1.5. Ενεργή ακτίνα D_{eff}

Προτού γίνει η αναγωγή και σε θερμοκρασία αναφοράς, απαραίτητο είναι να υπολογιστεί, μέχρι ποιο βάθος επηρεάζει η θερμοκρασία, τις μετρήσεις. Για την ακριβέστερη διόρθωση της θερμοκρασίας, υπολογίστηκε η ενεργή ακτινική απόσταση D_{eff} . Σύμφωνα με τον τύπο υπολογισμού σε mm, που αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, η D_{eff} ισούται με $5.5H_{ac}-563,88$. Ως πάχος ασφαλτικών στρώσεων θεωρούνται τα 17 εκατοστά ή 170 χιλιοστά, σύμφωνα με τον καθορισμό διατομής που έγινε. Έτσι η ενεργή ακτίνα υπολογίζεται στα 370 χιλιοστά. Συνεπώς πέρα από τα 370mm δεν πραγματοποιείται καμία διόρθωση σε θερμοκρασία.

Όμως σε μερικά σημεία το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων φτάνει τα 15 και σε άλλα τα 19 εκατοστά. Για τις τιμές αυτές, η ενεργή ακτίνα υπολογίζεται 270 χιλιοστά και 500 χιλιοστά, αντίστοιχα.

5.1.6. Αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς

Προτού γίνει η σύγκριση των δεικτών, πρέπει να γίνει αναγωγή των δεικτών D_0 και SCI , που προκύπτουν από τις ελαστικές υποχωρήσεις στη θερμοκρασία αναφοράς, σε απόσταση μέχρι και την ενεργή ακτίνα D_{eff} , δηλαδή μέχρι και τα 300mm. Ο

συντελεστής διόρθωσης TNF, για τους δείκτες D_0 , SCI_{200} και SCI_{300} υπολογίζεται, για κάθε χιλιομετρική θέση και για κάθε έτος, από την εξίσωση: $TNF = 1 + [a_1 + (a_2/h_1)] \times (T_A - 20) + [a_3 + (a_4/h_1)] \times (T_A - 20)^2$. Οι συντελεστές της εξίσωσης αναφέρονται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διορθωμένη τιμή της υποχώρησης προκύπτει διαιρώντας την τιμή της υποχώρησης και του δείκτη που μετρήθηκε με τον συντελεστή TNF. Μία μικρή παραδοχή, έγινε στον υπολογισμό με την τιμή της υποχώρησης D_{225} να αντικαθίστανται από την τιμή D_{200} , λόγω της απόστασης του γεωφώνου της συσκευής του FWD, η οποία ήταν 200 χιλιοστά, και όχι 225, από την πλάκα φόρτισης. Εκτιμάται πως δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στο αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες στο παράρτημα.

5.1.7. Στατιστική επεξεργασία των δεικτών

Για την στατιστική επεξεργασία των δεικτών ακολουθήθηκε μία συγκεκριμένη πορεία για κάθε δείκτη, κατά την οποία έγιναν τα εξής:

- 1) Κατά μήκος διαγράμματα του κάθε δείκτη, ανά χιλιομετρική θέση, για το πρώτο έτος και το τελευταίο. Σκοπός αυτού είναι η σύγκριση της εξέλιξης των τιμών με την πάροδο του χρόνου.
- 2) Θηκογράμματα ή Box plots, τα οποία παρέχουν αναλυτικές πληροφορίες για κάθε έτος, αλλά και σχετικά με το εύρος τιμών και την πορεία του δείκτη στο πέρασμα του χρόνου.
- 3) Υπολογισμός διαμέσου, τυπικής απόκλισης και συντελεστή μεταβλητότητας και παρουσίαση αυτών σε πίνακα μαζί με την ελάχιστη και μέγιστη τιμή για κάθε έτος. Με αυτόν το τρόπο θα δοθούν πληροφορίες σχετικά με την διακύμανση των τιμών.
- 4) T-tests, ώστε να γίνει σαφές αν οι διαφοροποιήσεις, που υφίσταται ο δείκτης μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους, είναι σημαντικές.

5.1.8. Συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών

Στο τέλος, αφού προηγηθούν τα παραπάνω, αξιολογούνται συγκριτικά οι δείκτες της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Στην συγκριτική αυτή αξιολόγηση προστίθεται και η γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των δεικτών, ώστε να διαπιστωθούν οι συσχετίσεις μεταξύ τους.

Όταν υπάρχουν παρατηρήσεις δύο τυχαίων μεταβλητών μπορεί να εκτιμηθεί η συσχέτιση τους ποιοτικά από το διάγραμμα διασποράς (scatter diagram), που είναι η απεικόνιση των σημείων (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, 26$, σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Για να εκφραστεί η συσχέτιση δύο τυχαίων μεταβλητών, χρησιμοποιείται η ποσότητα

R^2 , που λέγεται και συντελεστής συσχέτισης. Η σύγκριση γίνεται με βάση τη διαφορά των τιμών των μετρημένων υποχωρήσεων ανά χιλιομετρική θέση, στην ίδια φάση μέτρησης.

Για καθέναν από τους δείκτες αξιολόγησης της γενικής κατάστασης, αλλά και των επιμέρους στρώσεων γίνεται γραμμική παλινδρόμηση με το δείκτη D_0 , ο οποίος είναι ο πιο ευρέως αποδεκτός και συνηθισμένος δείκτης για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος.

5.2. Περιγραφική και στατιστική ανάλυση

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση, αναλύονται στη συνέχεια, οι στατιστικές μέθοδοι, που χρησιμοποιήθηκαν.

5.2.1. Θηκογράμματα

Για την παρουσίαση των κυριότερων χαρακτηριστικών των δεικτών, γίνονται περιγραφικά στατιστικά γραφήματα "Box plots" ή "Θηκογράμματα", που αποτελούν μια μέθοδο για την απεικόνιση ομάδων αριθμητικών δεδομένων μέσω των τεταρτημορίων τους. Για την κατασκευή τους, αρχικά, επισημαίνονται για τα δεδομένα που έχουμε, η πρώτη και η τρίτη τεταρτημόμο $x_{1/4}$, $x_{3/4}$, η διάμεσος και η μέση τιμή. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα ορθογώνιο με κάτω βάση το $x_{1/4}$ και άνω βάση το $x_{3/4}$. Το μήκος των βάσεων του ορθογωνίου λαμβάνεται αυθαίρετα. Η διάμεσος παριστάνεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα μέσα στο ορθογώνιο, παράλληλο με τις βάσεις και η μέση τιμή με το σύμβολο " • ". Από τα μέσα των βάσεων του ορθογωνίου μέχρι τις οριακές τιμές εκτείνονται ευθείες γραμμές, οι οποίες προκύπτουν ως εξής: Η άνω τιμή ορίζεται σαν η μεγαλύτερη παρατήρηση, η οποία είναι μικρότερη ή ίση από το $x_{3/4} + 1.5(x_{3/4} - x_{1/4})$, ενώ η κάτω τιμή ορίζεται σαν η μικρότερη παρατήρηση, η οποία είναι μεγαλύτερη ή ίση από το $x_{1/4} - 1.5(x_{3/4} - x_{1/4})$. Εάν υπάρχουν ακόμη παρατηρήσεις που βρίσκονται έξω από το εύρος των δύο οριακών τιμών, τότε αυτές καλούνται εξωτερικές ή υπερβολικές τιμές (outliers), οι οποίες θεωρούνται ως μεμονωμένα σημεία και παριστάνονται με το σύμβολο " ° " και οι ακραίες τιμές παριστάνονται με το σύμβολο " * ". Το box plot μας δίνει το κεντρικό διάστημα με το 50% των παρατηρήσεων. Οι ευθείες γραμμές και η θέση της διαμέσου δίνουν μια εικόνα για την συμμετρικότητα της κατανομής των μεταβλητών. Οι αποστάσεις μεταξύ των διαφόρων τμημάτων των "κουτιών" υποδηλώνουν το βαθμό διασποράς και την ασυμμετρία των δεδομένων.

5.2.2. Συντελεστής διακύμανσης

Για την επεξεργασία και την ανάλυση των τελικών μεγεθών, συντάσσονται επίσης πίνακες, οι οποίοι περιέχουν χρήσιμα στατιστικά δεδομένα για καθένα έτος από το πρώτο έως και το τελευταίο, όπως την μέγιστη και ελάχιστη τιμή, τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή μεταβλητότητας (cv), για τον προσδιορισμό αντιπροσωπευτικών τμημάτων. Εάν ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μικρότερος του 30%, το προτεινόμενο τμήμα μπορεί να θεωρηθεί σχετικά ομοιογενές και αντιπροσωπευτικό (Queensland Government, 2012).

5.2.3. Έλεγχοι T-Tests

Λόγω των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται, για την καλύτερη κατανόηση και σύγκριση διεξάγεται η t-δοκιμασία για παρατηρήσεις κατά ζεύγη για το πρώτο και για το τελευταίο έτος. Το t-test χρησιμοποιείται για την σύγκριση των μέσων όρων δυο συνόλων τιμών που διαφέρουν. Η διατύπωση των υποθέσεων, γενικά, έχει την εξής μορφή:

Μηδενική υπόθεση (H_0): οι μέσοι όροι των δυο ομάδων δεν διαφέρουν μεταξύ τους
Εναλλακτική υπόθεση (H_1): οι μέσοι όροι διαφέρουν μεταξύ τους.

Τα δείγματά είναι εξαρτημένα (x_i και y_i) και θεωρούνται τυχαία δείγματα, ακολουθώντας και τα δύο την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma)$. Σε τέτοιες περιπτώσεις θεωρείται ότι το δείγμα ακολουθεί μία καινούργια κανονική κατανομή $N(\mu_1 - \mu_2, \sigma_1^2 - \sigma_2^2)$, η οποία αποτελείται από τη διαφορά των μετρήσεων του πρώτου από του τελευταίου έτους ($d_i = x_i - y_i$) (d: ο κάθε δείκτης, για τον οποίο γίνεται το t test). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με μία δοκιμασία t που είναι γνωστή και ως κατά ζεύγη δοκιμασία t (paired t-test).

Η τιμή t_{exp} παρέχεται από τη σχέση:

$$t_{exp} = d / S_d * (\sqrt{n}) \quad (5.2)$$

όπου:

- μέση τιμή: $d = \frac{\sum d_i}{n}$
- διασπορά της διαφοράς των τιμών: $S_d^2 = \frac{\sum (d_i - d)^2}{n - 1}$
- τυπική απόκλιση της διαφοράς των τιμών: $S_d = \sqrt{S_d^2}$
- ο αριθμός του δείγματος: n

Η τιμή t_{exp} συγκρίνεται, με τη θεωρητική τιμή t_{theor} , η οποία αντιστοιχεί σε $v=N-1$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Εάν είναι μεγαλύτερο ή ίσο, τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται στη δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης. Σε αντίθετη περίπτωση, οι όποιες διαφορές θεωρούνται απλώς τυχαίες.

Το t_{theor} , το οποίο προκύπτει από στατιστικούς πίνακες, είναι 1,708. Έτσι συγκρίνουμε το t_{exp} με το t_{theor} , και αν

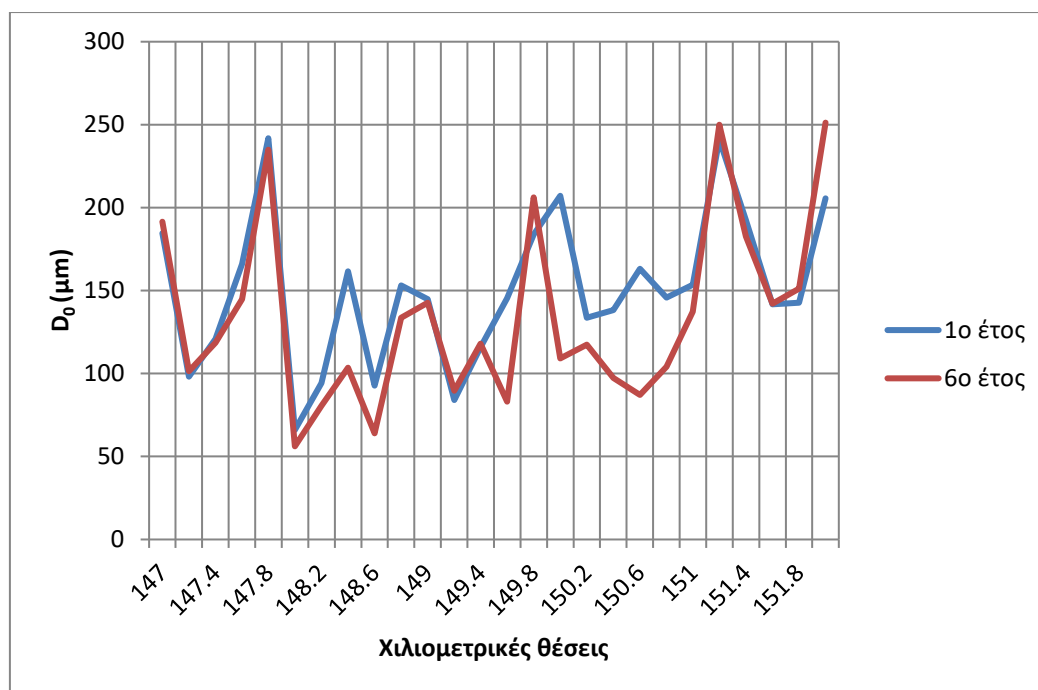
- a. $t_{\text{exp}} > t_{\text{theor}}$: δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο ετών και άρα υπάρχει διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη μεταξύ του πρώτου έτους και του τελευταίου.
- b. $t_{\text{exp}} < t_{\text{theor}}$: ισχύει η μηδενική υπόθεση πως υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο ετών και άρα δεν υπάρχει διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη μεταξύ του πρώτου έτους και του τελευταίου.

6. Αξιολόγηση γενικής κατάστασης οδοστρώματος

6.1. Δείκτης D_0

Σε πρώτη φάση κρίνεται απαραίτητη αξιολόγηση της γενικής κατάστασης του οδοστρώματος, και στη συνέχεια πραγματοποιείται αξιολόγηση για καθεμία στρώση ξεχωριστά. Γενικά, μικρές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι πρόκειται για ένα ισχυρό οδόστρωμα, ενώ αντίστοιχα, μεγάλες τιμές υποδηλώνουν ένα ασθενές οδόστρωμα. Μικρή τιμή του D_0 μεταφράζεται σε μικρή υποχώρηση, άρα μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και μηχανική αντοχή.

Ως μία πρώτη ένδειξη, γίνεται ένα διάγραμμα του δείκτη D_0 ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία. Έτσι, σύμφωνα με την Εικόνα 6.1, φαίνεται πως ο δείκτης δομικής κατάστασης παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση στο μεγαλύτερο μέρος του οδοστρώματος.



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη D_0

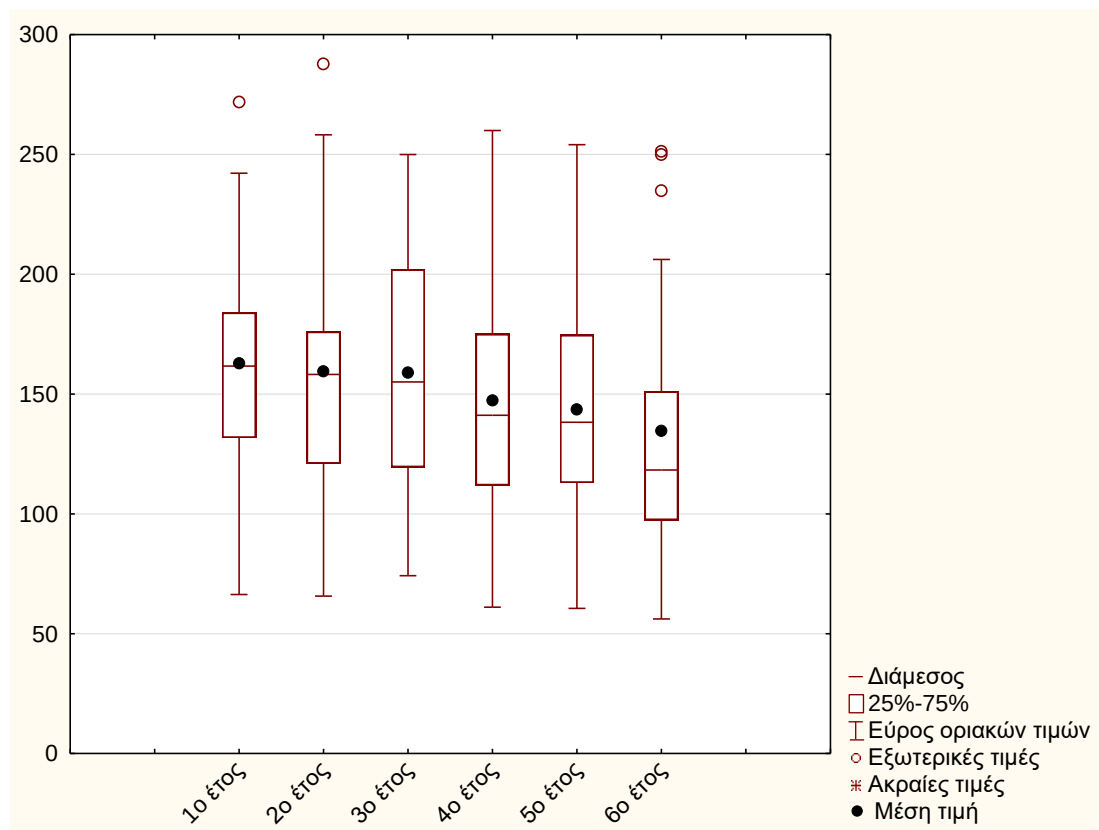
Ακολουθεί το t-test για παρατηρήσεις κατά ζεύγη. Από το t-test, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει ότι το t_{theor} είναι 1,708 και το t_{exp} έχει την τιμή 2,615, με μέση τιμή 16,12 και τυπική απόκλιση

31,42, δηλαδή $t_{\text{exp}} > t_{\text{theor}}$. Έτσι επισημαίνεται κάποια διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη D_0 , μεταξύ πρώτου και έκτου έτους.

Για την περαιτέρω διερεύνηση ανά έτος και ανά χιλιομετρική θέση, γίνεται το αντίστοιχο γράφημα (box plot)(Εικόνα 6.2), το οποίο δείχνει το εύρος τιμών του δείκτη και την πορεία του στο πέρασμα του χρόνου. Το εν λόγω διάγραμμα μετατοπίζεται εξ' ολοκλήρου προς τα κάτω. Από το γράφημα παρατηρείται η αύξηση της διαφοράς της μέσης τιμής των μετρήσεων από τη διάμεσο, η οποία αυξάνεται. Η διαφορά της μέσης τιμής από την διάμεσο εκφράζει ίσως μια ανομοιογένεια, που φαίνεται πως αυξάνει με το πέρασμα του χρόνου, το οποίο μπορεί να οφείλεται και στη γήρανση των υλικών. Η ύπαρξη της προκύπτει εξαιτίας των ακραίων τιμών που εμφανίζονται μετά την πρώτη χρονιά, γεγονός που μεγαλώνει την τιμή της μέσης τιμή, ενώ ταυτόχρονα η διάμεσος δεν τις λαμβάνει υπόψη της.

Τις περισσότερες χρονιές, σε μερικά σημεία ο δείκτης D_0 κυμαίνεται κάτω των 125 μm και σε άλλα βρίσκεται στο διάστημα 250-315 μm , κανένα σημείο όμως δεν ξεπερνά τα 315 μm . Ακριβέστερα, το πρώτο έτος, με βάση και το γράφημα, το 75% του πλήθους των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης D_0 δεν ξεπερνά την τιμή 185 μm . Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 185 και 242 μm , με εξαίρεση μία μεμονωμένη τιμή η οποία είναι και η μέγιστη, περίπου 270 μm .

Ενδεικτικά το έκτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη D_0 , δεν ξεπερνά την τιμή 150. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 150 και 210 μm , με τρεις τιμές να είναι εκτός των οριακών τιμών και να φτάνει η μέγιστη τα 251 μm .



Εικόνα 6.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη D₀

Για την καλύτερη και πιο εμπειριστατωμένη αξιολόγηση, θα αξιοποιηθούν τα δεδομένα, προς στατιστική επεξεργασία. Έτσι παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1 κάποια χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για το δείκτη D₀. Ένα από τα στοιχεία αυτά είναι ο συντελεστής διακύμανσης, ο οποίος κάθε χρονιά κυμαίνεται από 30% έως 40%. Ακόμη παρατηρείται ότι ο συντελεστής διακύμανσης, εκτός από το τρίτο έτος που υπάρχει μια μικρή μείωση, αυξάνεται και φτάνει κοντά στο 41% στο τέλος.

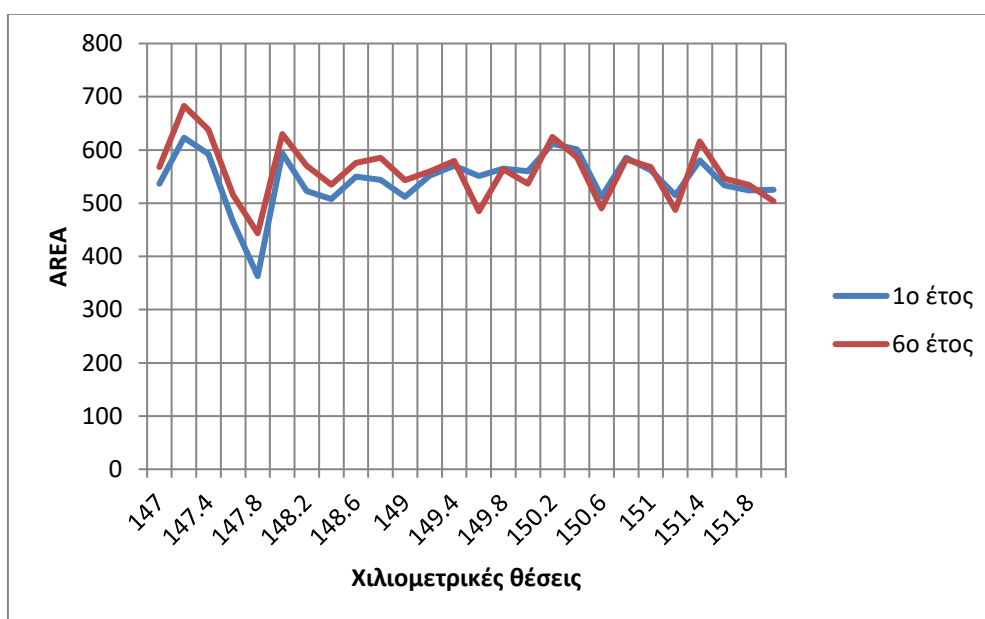
Πίνακας 6.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη D₀

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	66,37	65,70	74,20	61,07	60,58	56,15
Μέγιστη τιμή	271,86	287,70	249,94	259,98	254,08	251,22
Μέση τιμή	162,82	159,47	158,89	147,27	143,62	134,55
Διάμεσος	161,72	158,20	155,08	141,15	138,24	118,34
Τυπική απόκλιση	50,86	52,94	48,75	52,92	51,16	54,78
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	31,2%	33,2%	30,7%	35,9%	35,6%	40,7%

Συνοψίζοντας, παρά την αύξηση που υφίσταται ο συντελεστής μεταβλητότητας, σε γενικές γραμμές ο δείκτης D_0 δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφοροποίηση ή ανομοιογένεια.

6.2. Δείκτης AREA

Ένας άλλος δείκτης, ο οποίος δείχνει και αυτός μία γενική εικόνα για την κατάσταση του οδοστρώματος και της στρώσης έδρασης, είναι ο δείκτης AREA. Ο δείκτης AREA είναι κανονικοποιημένος ως προς το D_0 και υψηλές τιμές του δείχνουν υψηλή δυσκαμψία στο οδόστρωμα. Ως μία πρώτη ένδειξη, γίνεται το διάγραμμα του δείκτη AREA, ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία. Έτσι, σύμφωνα με την Εικόνα 6.3, φαίνεται πως το έκτο έτος ο δείκτης δομικής κατάστασης αυξάνεται εμφανώς στα πρώτα 2,5 χιλιόμετρα του τμήματος του οδοστρώματος, που μελετάται, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα δεν παρουσιάζει σαφή μεταβολή.

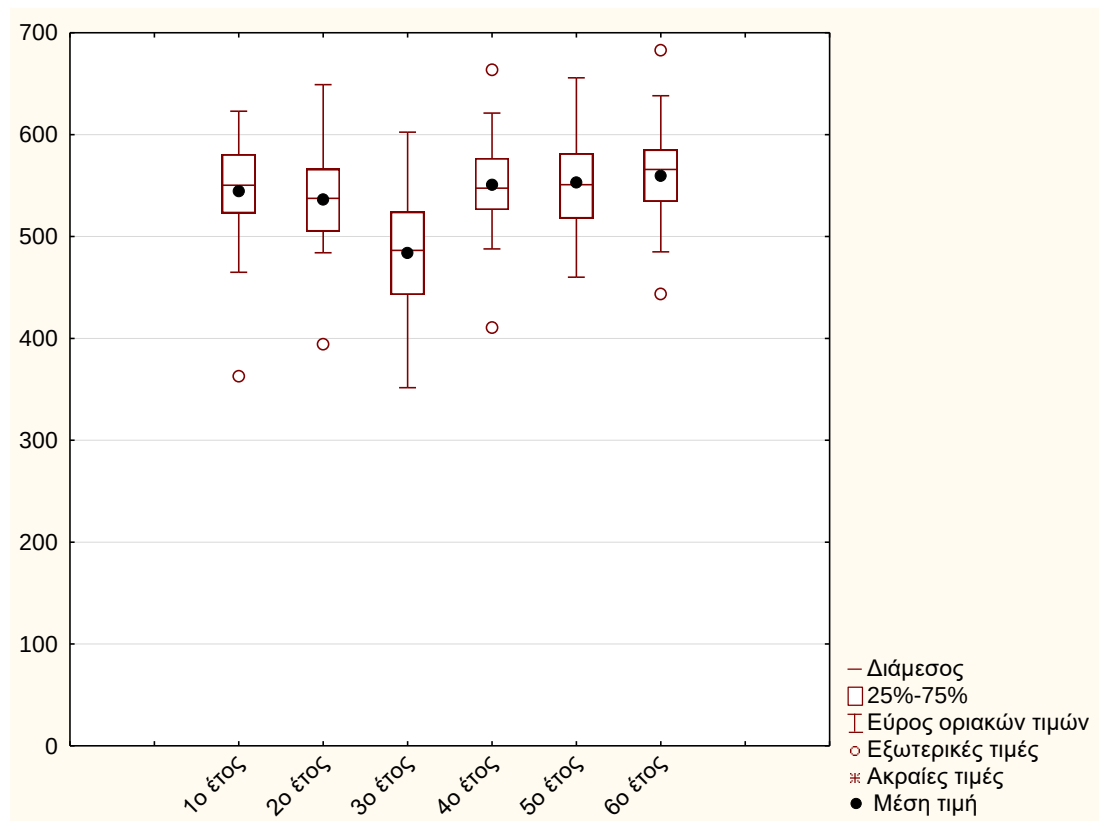


Εικόνα 6.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AREA

Στη συνέχεια, διεξάγεται η t-δοκιμασία για παρατηρήσεις κατά ζεύγη. Από το t-test, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει ότι το t_{theor} είναι 1,708 και το t_{exp} έχει την τιμή 2,364, με μέση τιμή 14,99 και τυπική απόκλιση 32,33, δηλαδή $t_{\text{exp}} > t_{25,0.05}$ και άρα δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση, δηλαδή υπάρχει διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη AREA μεταξύ πρώτου και του έκτου έτους. Για περαιτέρω διερεύνηση της διαφοροποίησης αυτής

ανά έτος και ανά χιλιομετρική θέση γίνεται το αντίστοιχο γράφημα (box plot) (Εικόνα 6.4), το οποίο δείχνει το εύρος τιμών του δείκτη και την πορεία του στο πέρασμα του χρόνου.

Το εν λόγω διάγραμμα κυμαίνεται περίπου στις ίδιες τιμές για κάθε χρονιά, με εξαίρεση να αποτελεί η τρίτη κατά σειρά χρονιά, όπου φαίνεται να υπάρχει μία μείωση των τιμών, και ταυτόχρονα μία αύξηση του εύρους των τιμών. Αναλυτικότερα, το πρώτο έτος, το 75% των μετρήσεων, κυμαίνεται από 460 έως 580, ενώ το υπόλοιπο 25% φτάνει μέχρι και τα 623, η οποία είναι και η μέγιστη τιμή. Το τελευταίο έτος, το 75% των μετρήσεων πλησιάζει τα 590, και το υπόλοιπο 25% φτάνει έως και 640. Εκτός του εύρους των τιμών βρίσκεται μόνο μία μεμονωμένη τιμή, η οποία είναι περίπου στα 683. Συγκριτικά λοιπόν ο δείκτης αυτός φαίνεται να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα, με εξαίρεση να αποτελεί το τρίτο έτος, όπου παρατηρείται μία γενική μείωση των τιμών.



Εικόνα 6.4: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη AREA

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται κάποια χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για το δείκτη AREA. Ένα από τα στοιχεία αυτά είναι ο συντελεστής διακύμανσης, ο οποίος κάθε χρονιά κυμαίνεται από 8% έως 12%. Οι συντελεστές διακύμανσης είναι πολύ μικροί, το οποίο δείχνει ότι ο δείκτης παρουσιάζει ομοιομορφία στις τιμές του από το πρώτο μέχρι το τελευταίο έτος.

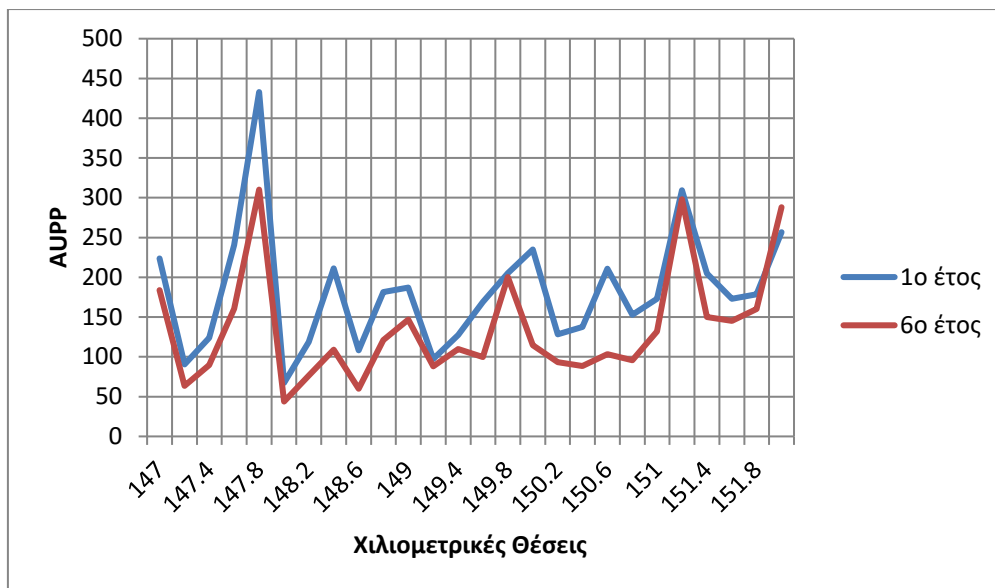
Πίνακας 6.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AREA

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	362,92	394,04	351,65	410,39	460,04	443,41
Μέγιστη τιμή	622,99	649,15	602,43	663,64	655,85	682,73
Μέση τιμή	544,56	536,26	483,81	550,66	552,83	559,55
Διάμεσος	550,34	537,49	486,42	547,48	550,91	565,76
Τυπική απόκλιση	52,30	50,69	59,12	50,71	47,12	53,98
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	9,6%	9,5%	12,2%	9,2%	8,5%	9,6%

Συνοψίζοντας, για το δείκτη AREA παρατηρείται μία μείωση των τιμών το 3ο έτος, το οποίο υποδηλώνει ότι το οδόστρωμα παρουσίασε μία μείωση της δυσκαμψίας. Στο σύνολο, ο δείκτης AREA δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση, με το πέρασμα του χρόνου.

6.3. Δείκτης AUPP

Ένας άλλος δείκτης, που χαρακτηρίζει την κατάσταση του συνολικού οδοστρώματος είναι ο AUPP. Χαμηλότερες τιμές του δείκτη δείχνουν ότι το οδόστρωμα έχει υψηλότερη δυσκαμψία. Αρχικά γίνεται ένα διάγραμμα, κατά μήκος, ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία (Εικόνα 6.5). Στο δείκτη αυτό, φαίνεται, πως κατά κύριο λόγο οι τιμές το έκτο έτος των μετρήσεων έχουν μεταβληθεί, συγκριτικά με το πρώτο.

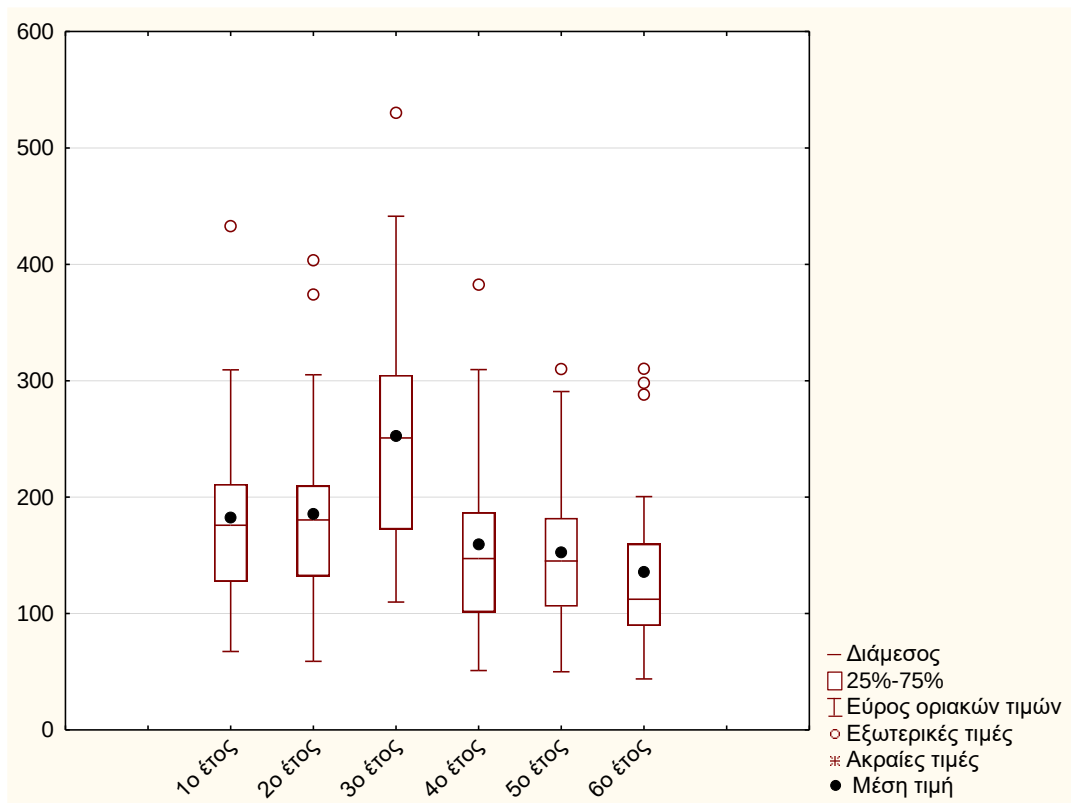


Εικόνα 6.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AUPP

Στη συνέχεια γίνεται η δοκιμασία t για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Από τους τύπους προκύπτει ότι το t_{theor} είναι 1,708 και το t_{exp} έχει την τιμή 6,472, με μέση τιμή 46,62 και τυπική απόκλιση 36,73, δηλαδή $t_{\text{exp}} > t_{\text{theor}}$ και άρα δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση.

Για αναλυτικότερη προσέγγιση γίνεται και το γράφημα box plot (Εικόνα 6.6). Ο δείκτης αυτός παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στην πάροδο του χρόνου, με εξαίρεση την τρίτη, κατά σειρά χρονιά, όπου παρατηρείται μία αύξηση των τιμών. Ακριβέστερα, το πρώτο έτος, βάσει του γραφήματος, το 75% του πλήθους των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης δεν ξεπερνά τα 210 μm , ενώ το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 210 και 310 μm με εξαίρεση μία μεμονωμένη τιμή η οποία είναι και η μέγιστη, 433 μm . Το έκτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών του AUPP πλησιάζουν τα 170 μm και το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 170 και 200 με τρεις μόνο τιμές να το ξεπερνούν και να φτάνει η μέγιστη το 310 μm .

Συνολικά, από το γράφημα παρατηρείται, τόσο μείωση της διακύμανσης των τιμών, όσο και αύξηση της διαφοράς της μέσης τιμής των μετρήσεων από τη διάμεσο. Η αύξηση της διαφοράς αυτής προκύπτει από την ύπαρξη των ακραίων τιμών που εμφανίζονται, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η τιμή της μέσης τιμής, ενώ ταυτόχρονα η διάμεσος δεν τις λαμβάνει υπόψη. Το τρίτο έτος παρατηρείται αύξηση των τιμών, αλλά και αύξηση του εύρους τιμών.



Εικόνα 6.6: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη AUPP

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται κάποια χρήσιμα στατιστικά στοιχεία, με τους συντελεστές μεταβλητότητας να ξεπερνούν το 40%. Μία αύξηση στο 10% παρατηρείται την τελευταία χρονιά, με την τιμή να φτάνει το 52%, ενώ την πρώτη η αντίστοιχη τιμή ήταν 42%.

Πίνακας 6.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AUPP

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	67,38	58,88	109,89	51,03	50,00	43,84
Μέγιστη τιμή	432,89	403,61	530,35	382,55	310,08	310,26
Μέση τιμή	182,51	185,46	252,72	159,38	152,49	135,89
Διάμεσος	175,90	180,41	250,90	147,26	145,16	112,25
Τυπική απόκλιση	76,42	81,57	109,26	77,14	69,01	70,85
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	41,9%	44,0%	43,2%	48,4%	45,3%	52,1%

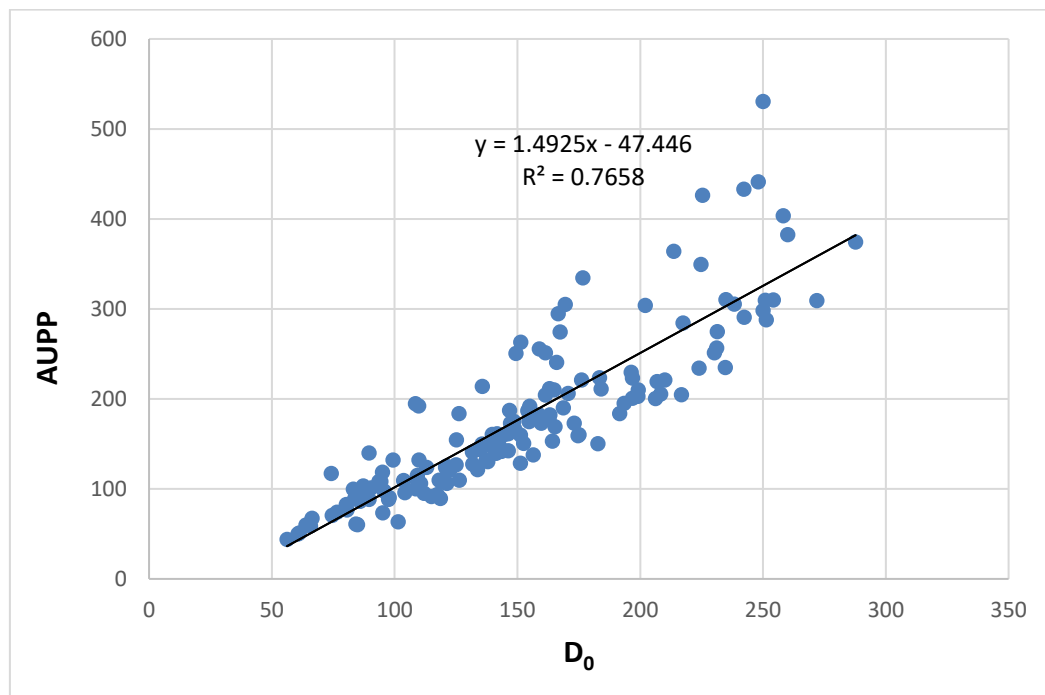
Στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με τον προηγούμενο δείκτη, το τρίτο έτος παρατηρείται μία μεγάλη αύξηση της μέσης τιμής, ενώ τις υπόλοιπες χρονιές

κυμαίνεται στις ίδιες τιμές. Και οι δύο όμως δείκτες δείχνουν το ίδιο στοιχείο, δηλαδή τη μείωση της δυσκαμψίας το τρίτο έτος. Τέλος, ο δείκτης αυτός, συνολικά, δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφοροποίηση, στο σύνολό του.

6.4. Συγκριτική ανάλυση δεικτών

6.4.1. AUPP-D₀

Στην παρούσα φάση διερευνάται η συσχέτιση του δείκτη AUPP και του ευρέως αποδεκτού δείκτη D₀. Η σύγκριση, λοιπόν, γίνεται ανά χιλιομετρική θέση, στην ίδια φάση μέτρησης και μεταξύ των δεικτών AUPP και D₀, οι οποίοι εκτιμούν και οι δύο τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Σε κάθε χρονιά ξεχωριστά, αλλά και συνολικά υπάρχει καλή συσχέτιση του δείκτη AUPP και D₀. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.7, η συσχέτιση R² συνολικά ανέρχεται σε 0,77, που θεωρείται ικανοποιητική τιμή.



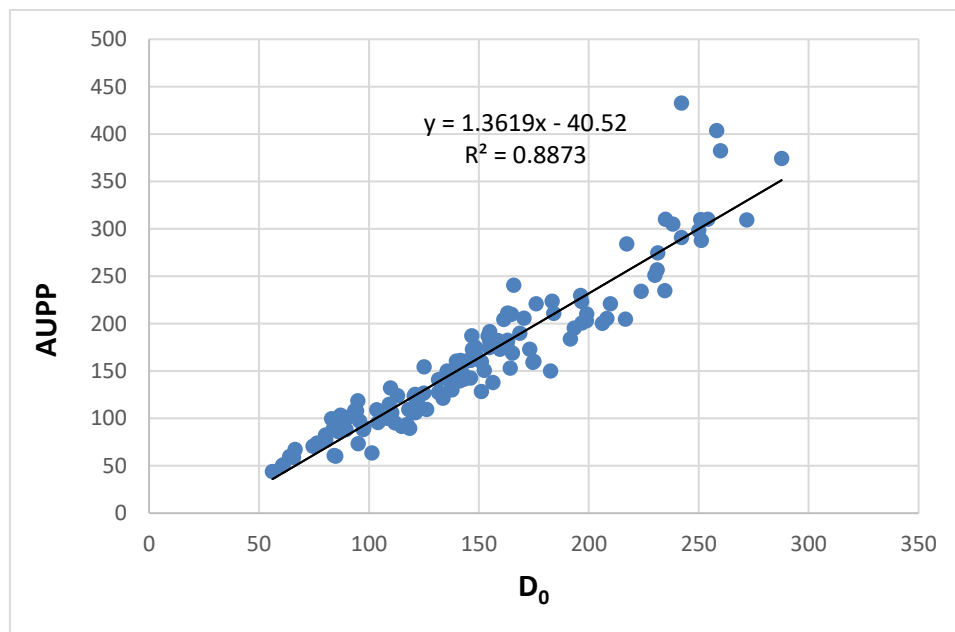
Εικόνα 6.7: Συσχέτιση του δείκτη AUPP με το δείκτη D₀

Η διαφοροποίηση των δύο δεικτών που δείχνουν τη γενική κατάσταση οδοστρώματος διαπιστώνεται πιο αναλυτικά και στον Πίνακα 6.4, ο οποίος δείχνει το συντελεστή συσχέτισης για κάθε χρονιά ξεχωριστά.

Πίνακας 6.4: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος

AUPP - D ₀	
	R^2
1ο έτος	0,74
2ο έτος	0,9253
3ο έτος	0,8159
4ο έτος	0,9304
5ο έτος	0,9433
6ο έτος	0,9152

Τα περισσότερα έτη, οι τιμές του R^2 είναι υψηλές, οπότε κρίθηκε άξιο διερεύνησης η αφαίρεση των μετρήσεων του τρίτου έτους, όπου παρατηρήθηκαν κάποιες διαφοροποιήσεις συγκριτικά με άλλες χρονιές.

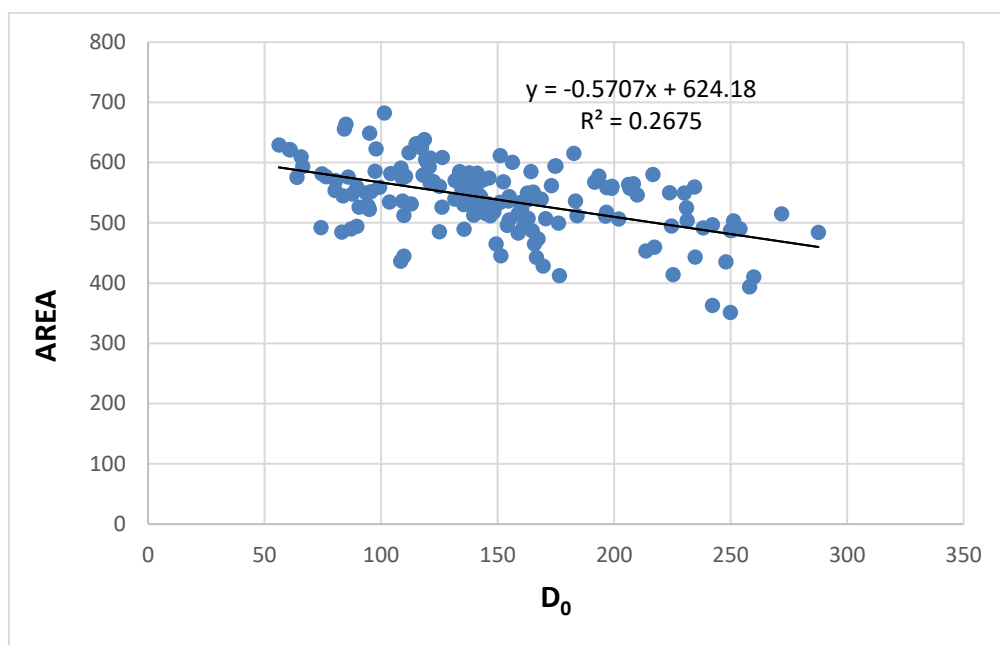


Εικόνα 6.8: Συσχέτιση του δείκτη AUPP με το δείκτη D_0 , αφαιρώντας από τις μετρήσεις το τρίτο έτος

Αφού αφαιρέθηκε από τις μετρήσεις το τρίτο έτος, η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη AUPP και του D_0 , έδωσε R^2 ίσο με 0,89 (Εικόνα 6.8). Η τιμή της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών, αν αφαιρεθούν οι μετρήσεις του τρίτου έτους, είναι υψηλότερη.

6.4.2. AREA-D₀

Ακόμη κρίνεται απαραίτητη η γραμμική παλινδρόμηση του δείκτη AREA και του συνηθισμένου σε χρήση δείκτη D₀. Η συσχέτισή τους φαίνεται στην Εικόνα 6.9.

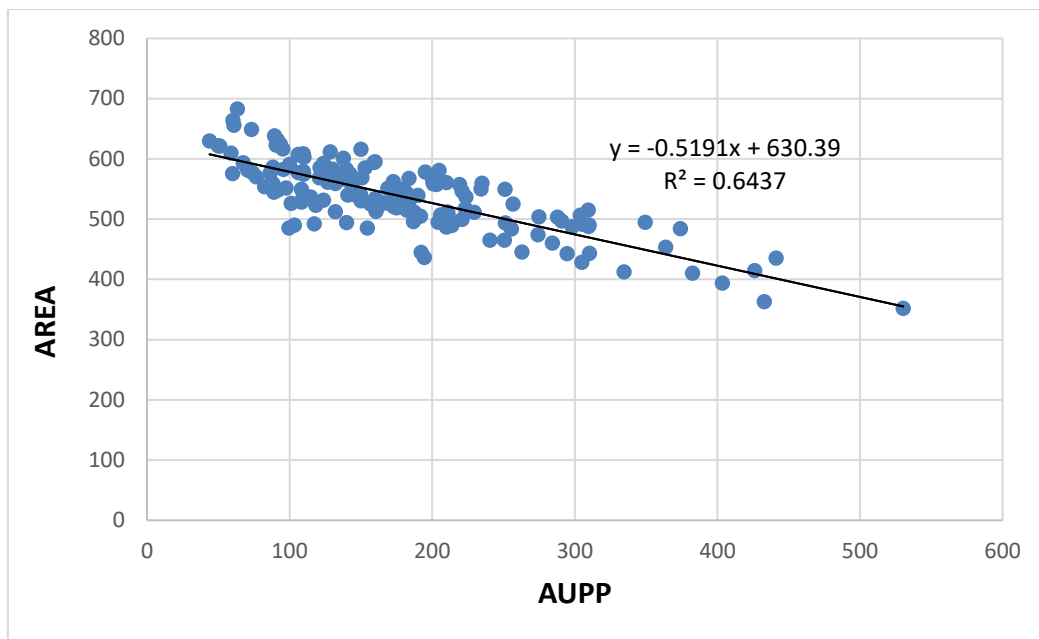


Εικόνα 6.9: Συσχέτιση του δείκτη AREA με το δείκτη D₀

Οι δύο δείκτες φαίνεται ότι δεν συσχετίζονται καλά μεταξύ τους, αφού το R² ισούται με 0,27. Αυτό είναι, όμως και αναμενόμενο, αφού ο δείκτης AREA είναι αδιάστατος και κανονικοποιημένος ως προς το D₀.

6.4.3. AREA-AUPP

Τέλος εξετάζεται και η συσχέτιση του δείκτη AREA με το δείκτη AUPP, οι οποίοι και οι δύο δείχνουν τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Έτσι πραγματοποιείται γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ τους, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6.10.



Εικόνα 6.10: Συσχέτιση του δείκτη AREA με το δείκτη AUPP

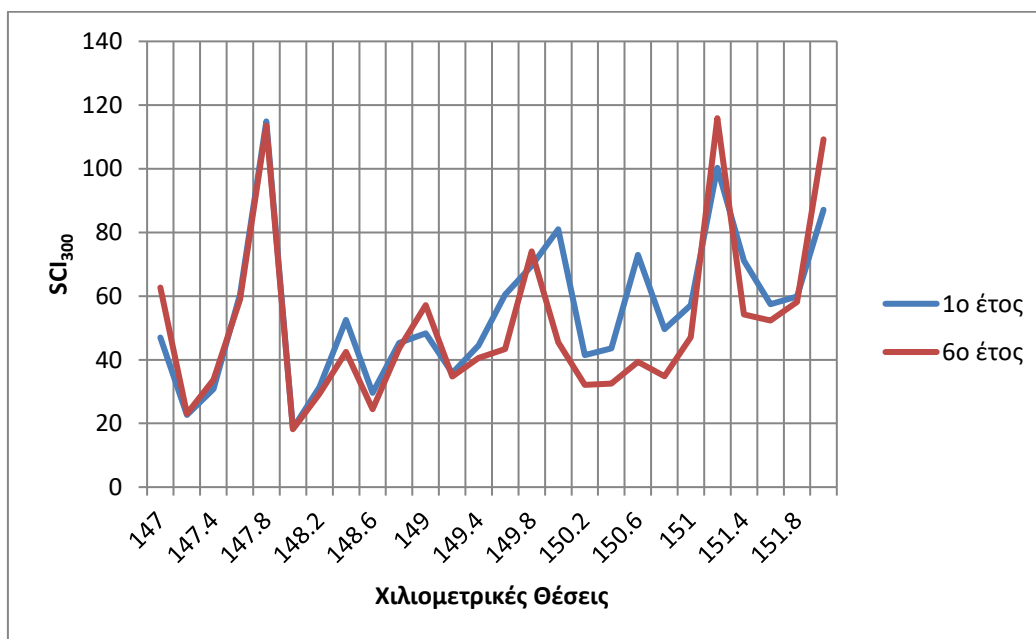
Η συσχέτιση R^2 που παρουσιάζουν οι δύο δείκτες ισούται με 0,65, η οποία θεωρείται ικανοποιητική τιμή.

7. Αξιολόγηση ασφαλικών στρώσεων

Στο επόμενο στάδιο διερευνάται η κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων, που επηρεάζονται άμεσα από τις κλιματολογικές συνθήκες και τον κυκλοφοριακό φόρτο. Αυτό σημαίνει ότι, ενδεχομένως μπορεί να παρουσιαστούν μεγαλύτερες μεταβολές στην πάροδο του χρόνου.

7.1. Δείκτης SCI_{300}

Για την αξιολόγηση των ασφαλικών στρώσεων, ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας (SCI_{300}) εμφανίζει μεγάλη συσχέτιση, συνήθως, με την κατάσταση των ανώτερων στρώσεων, αφού αντιπροσωπεύει την κατάσταση του οδοστρώματος σε μικρά βάθη. Ως μία πρώτη ένδειξη, γίνεται το διάγραμμα (Εικόνα 7.1) του δείκτη SCI_{300} ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία.

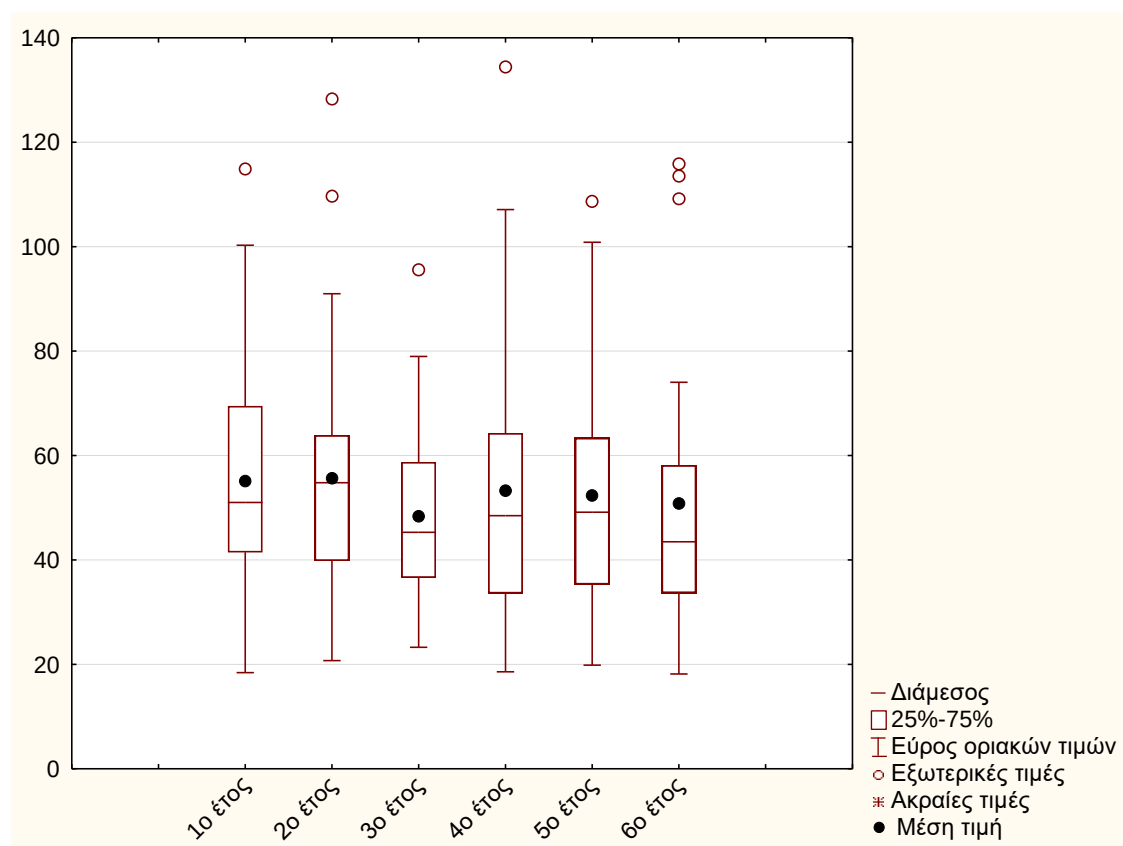


Εικόνα 7.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{300}

Για καλύτερη κατανόηση και σύγκριση, διεξάγεται η t-δοκιμασία για παρατηρήσεις κατά ζεύγη. Από το t-test, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει ότι, το t_{theor} είναι 1,708 και το t_{exp} έχει την τιμή 1,649, με μέση τιμή 4,31 και τυπική απόκλιση 13,07, δηλαδή $t_{exp} < t_{theor}$ και άρα

ισχύει η μηδενική υπόθεση, δηλαδή δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη SCI_{300} μεταξύ πρώτου και του έκτου έτους. Για ακριβέστερη εκτίμηση της πορείας του SCI_{300} , γίνεται ένα γράφημα (box plot)(Εικόνα 7.2) από όλα τα δεδομένα, ανά χιλιομετρική θέση, για κάθε χρονιά ξεχωριστά.

Τις περισσότερες χρονιές, σε μερικά σημεία ο SCI_{300} κυμαίνεται κάτω των 37 μm και σε άλλα βρίσκεται άνω των 100 μm . Την τρίτη χρονιά, όπου παρατηρείται μία μείωση των τιμών, αλλά και του εύρους των τιμών, ο δείκτης κυμαίνεται από 23 μm (<37 μm) έως και 96 μm (<100 μm και >50 μm). Ακριβέστερα, το πρώτο έτος, με βάση και το γράφημα, το 75% του πλήθους των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης SCI_{300} δεν ξεπερνά τα 70 μm . Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 70 και 100 μm με εξαίρεση μία μεμονωμένη τιμή, η οποία είναι και η μέγιστη (115 μm). Στο έκτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη SCI_{300} , δεν ξεπερνά την τιμή 60 μm . Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 60 και 75 μm με τρεις μόνο τιμές να το ξεπερνούν και να φτάνει η μέγιστη το 116 μm .



Εικόνα 7.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI_{300}

Η διαφορά της μέσης τιμής από την διάμεσο, που εκφράζει κάποια ανομοιογένεια, φαίνεται πως αυξάνει με το πέρασμα του χρόνου. Η αύξηση της διαφοράς αυτής

προκύπτει ενδεχομένως, λόγω της ύπαρξης των ακραίων τιμών που εμφανίζονται μετά το πρώτο έτος, γεγονός που μεγαλώνει την τιμή της μέσης τιμή, ενώ ταυτόχρονα η διάμεσος δεν τις λαμβάνει υπόψη.

Στη συνέχεια εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, για τους οποίους παρατηρείται αύξηση, με την τιμή να φτάνει το τελευταίο έτος το 52%, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1, ενώ το πρώτο έτος η αντίστοιχη τιμή ήταν 42%.

Πίνακας 7.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI₃₀₀

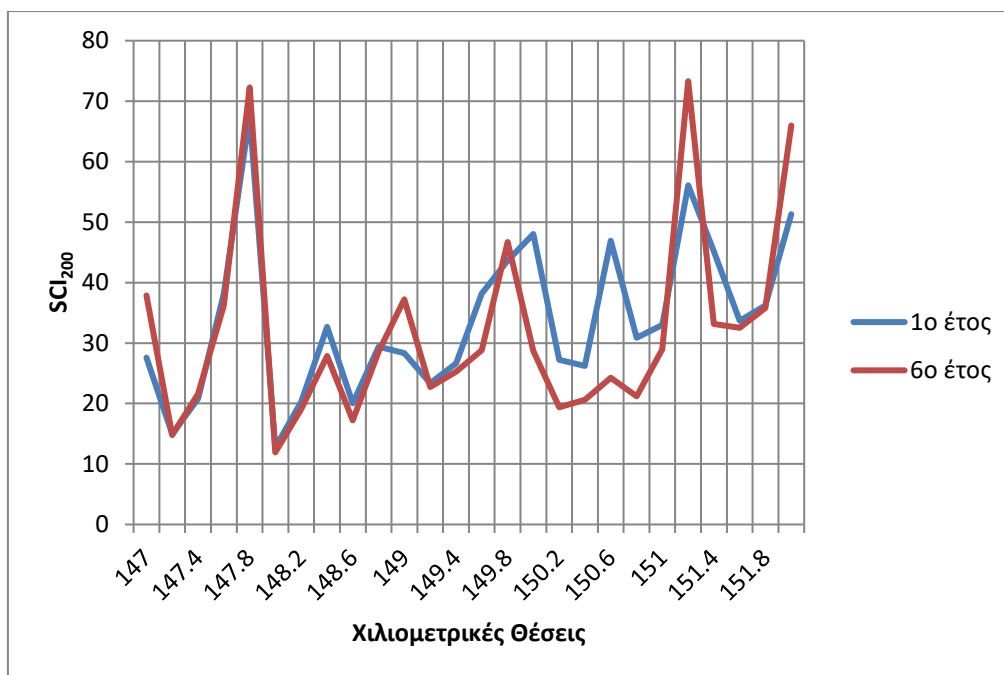
	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	18,44	20,72	23,28	18,59	19,85	18,18
Μέγιστη τιμή	114,87	128,33	95,58	134,43	108,72	115,87
Μέση τιμή	55,12	55,71	48,40	53,30	52,37	50,81
Διάμεσος	51,03	54,81	45,30	48,50	49,14	43,48
Τυπική απόκλιση	23,17	24,46	17,47	26,73	23,49	26,36
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	42,0%	43,9%	36,1%	50,2%	44,9%	51,9%

Συνοψίζοντας, παρατηρείται μία μείωση του εύρους τιμών το τρίτο έτος και μία αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας κατά 10% την έκτη χρονιά. Οι διακυμάνσεις θεωρούνται αναμενόμενες, καθώς οι ασφαλικές στρώσεις, εκτός του ότι καταπονούνται περισσότερο από όλες τις στρώσεις, δέχονται και τις επιδράσεις των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών, λόγω της άμεσης επαφής με τα οχήματα.

7.2. Δείκτης SCI₂₀₀

Το πάχος της ασφαλικής στρώσης, όπως αναφέρθηκε κυμαίνεται από 15 έως 19 εκατοστά, με μέση τιμή τα 17 εκατοστά. Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης SCI₃₀₀, ναι μεν εκφράζει την κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων, αλλά αντιπροσωπεύει και την κατάσταση ενός μέρους της στρώσης από ασύνδετα υλικά. Δηλαδή, σε ορισμένα σημεία, που η ασφαλική στρώση είναι 15 εκατοστά, ο δείκτης SCI₃₀₀ πιθανόν να αντανakλά την κατάσταση του οδοστρώματος και κάτω από την ασφαλική στρώση. Για αυτό τον λόγο διερευνάται ο δείκτης SCI₂₀₀, ο οποίος ενδέχεται να θεωρείται εξίσου αντιπροσωπευτικός, για το συγκεκριμένο πάχος των ασφαλικών στρώσεων και ισούται με D₀- D₂₀₀.

Για μία πρώτη εκτίμηση της πορείας του SCI₂₀₀, γίνεται ένα διάγραμμα ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία (Εικόνα 7.3).

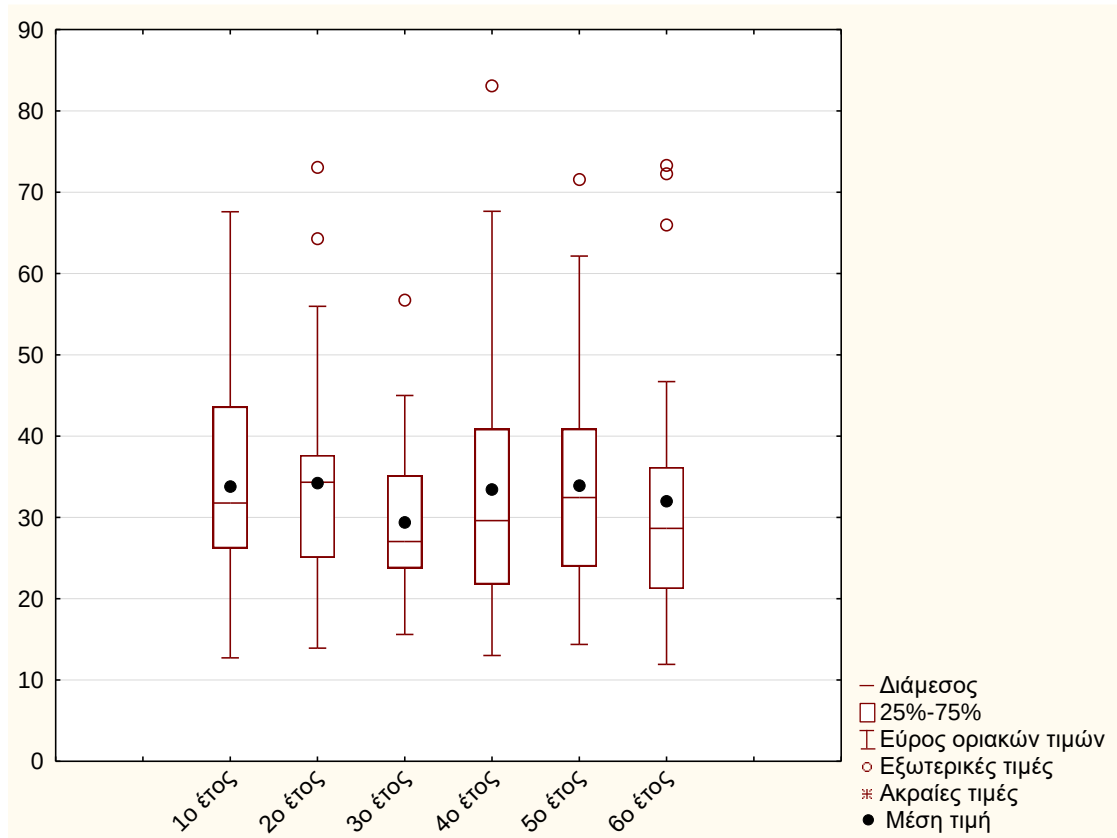


Εικόνα 7.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI₂₀₀

Στη συνέχεια γίνεται η δοκιμασία t για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$), από την οποία προκύπτει ότι, το t_{theor} έχει την τιμή 1,708 και το t_{exp} 1,031, με μέση τιμή 1,81 και τυπική απόκλιση 8,96, δηλαδή $t_{\text{exp}} < t_{\text{theor}}$. Άρα ισχύει η μηδενική υπόθεση, πως δεν υπάρχει στατιστική διαφορά των μέσων όρων των δύο ετών.

Ακολουθώντας, πραγματοποιείται και περαιτέρω διερεύνηση της εξέλιξης της πορείας του δείκτη SCI₂₀₀, ανά έτος και ανά χιλιομετρική θέση με το αντίστοιχο γράφημα (box plot)(Εικόνα 7.4), το οποίο δείχνει το εύρος τιμών του δείκτη και την πορεία του στο πέρασμα των χρόνων. Από το γράφημα παρατηρούνται εναλλαγές στη διακύμανση των τιμών, στη διαφορά της μέσης τιμής των μετρήσεων από τη διάμεσο. Όλες τις χρονιές, εκτός από την τρίτη, ο δείκτης SCI₂₀₀ κυμαίνεται άλλοτε κάτω των 23μm και άλλοτε άνω των 60μm. Την τρίτη χρονιά φαίνεται πως ο δείκτης κυμαίνεται από 15 (<23μm) έως και 57μm (<60μm και >34μm). Ακριβέστερα, το πρώτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης SCI₂₀₀ δεν ξεπερνά τα 42μm. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 42 και 69μm.

Το έκτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη SCI₂₀₀, δεν ξεπερνά την τιμή 37μm. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 37 και 58μm, με τρεις μόνο τιμές να το ξεπερνούν και να φτάνει η μέγιστη τα 73,31μm.



Εικόνα 7.4: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI₂₀₀

Στη συνέχεια εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, όπου παρατηρείται μια αύξηση το έκτο έτος (51%), σύμφωνα με τον Πίνακα 7.2. Πάλι παρατηρείται μία μείωση του συντελεστή διακύμανσης το τρίτο έτος (32,2%), καθώς και μία μείωση του εύρους των τιμών, το οποίο φαίνεται και από το γεγονός ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι σχετικά μικρός.

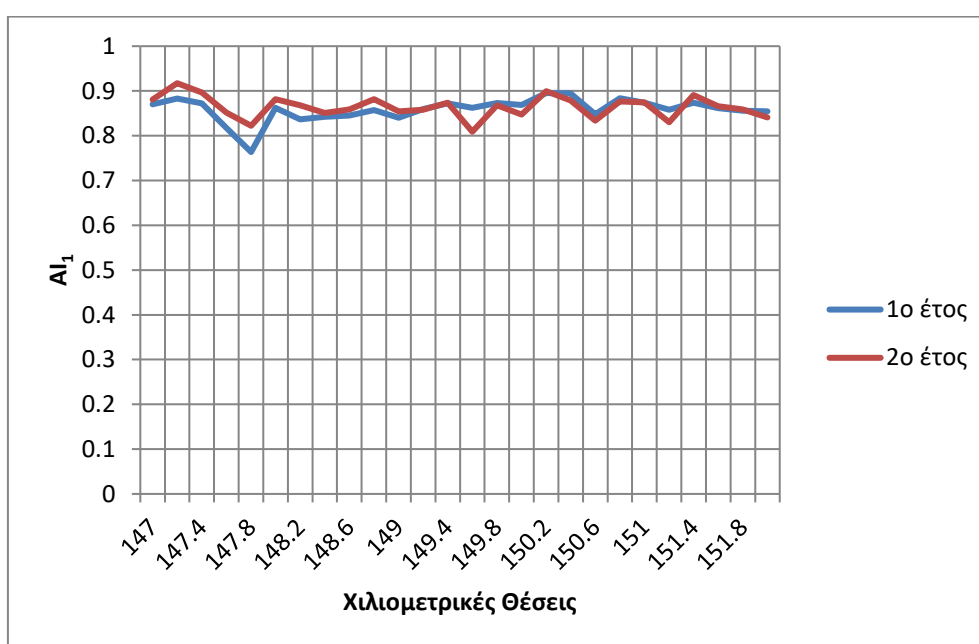
Πίνακας 7.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI₂₀₀

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	12,73	13,92	15,61	13,02	14,38	11,92
Μέγιστη τιμή	67,60	73,05	56,76	83,09	71,55	73,31
Μέση τιμή	33,81	34,23	29,40	33,45	33,90	32,00
Διάμεσος	31,77	34,34	27,05	29,62	32,45	28,65
Τυπική απόκλιση	13,10	13,60	9,47	16,31	14,10	16,30
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	38,7%	39,7%	32,2%	48,8%	41,6%	50,9%

Σε γενικές γραμμές δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στο δείκτη SCI_{200} στο πέρασμα του χρόνου.

7.3. Δείκτης AI_1

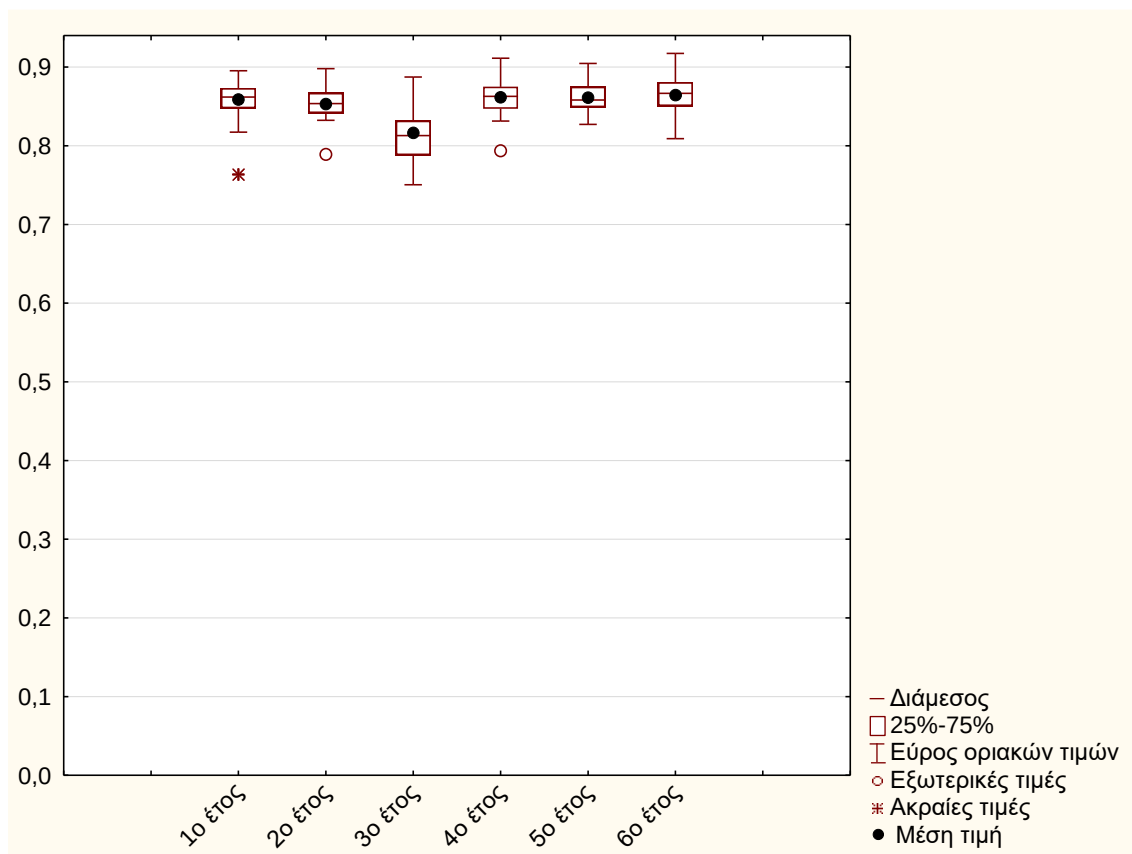
Ο δείκτης AI_1 εκφράζει και αυτός τις συνθήκες των ανωτέρων στρώσεων. Η πρώτη εκτίμησή του γίνεται με την Εικόνα 7.5, σύμφωνα με την οποία δεν είναι εμφανές αν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση το έκτο έτος.



Εικόνα 7.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη AI_1

Στη συνέχεια γίνεται το t-test, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$). Το t_{theor} ισούται με 1,708 και το t_{exp} με 1,238, με μέση τιμή 0,005573 και τυπική απόκλιση 0,022953, δηλαδή $t_{exp} < t_{theor}$ και άρα ισχύει η μηδενική υπόθεση, πως δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη AI_1 μεταξύ των ετών.

Ακολουθεί το γράφημα box plot (Εικόνα 7.6), σύμφωνα με το οποίο το 75% των μετρήσεων του πρώτου έτους δεν ξεπερνά το 0,88 και το υπόλοιπο 25% φτάνει το 0,9, που είναι και η μέγιστη τιμή του έτους. Το τελευταίο έτος, το 75% του συγκεκριμένου δείκτη φτάνει και πάλι το 0,88, ενώ η μέση τιμή παραμένει σχεδόν ίδια. Εντύπωση προκαλεί το τρίτο έτος, στο οποίο παρατηρείται μία μείωση του δείκτη αυτού, το οποίο ερμηνεύεται ως αύξηση της δυσκαμψίας του οδοστρώματος.



Εικόνα 7.6: Διάγραμμα τύπου box plot του δείκτη AI₁

Τέλος παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3 τα στατιστικά στοιχεία του δείκτη AI₁.

Πίνακας 7.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη AI₁

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	0,764	0,789	0,750	0,794	0,827	0,809
Μέγιστη τιμή	0,895	0,898	0,887	0,911	0,905	0,917
Μέση τιμή	0,859	0,853	0,816	0,861	0,861	0,864
Διάμεσος	0,862	0,854	0,811	0,863	0,858	0,867
Τυπική απόκλιση	0,026	0,021	0,035	0,023	0,020	0,025
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	3,07%	2,5%	4,3%	2,7%	2,4%	2,9%

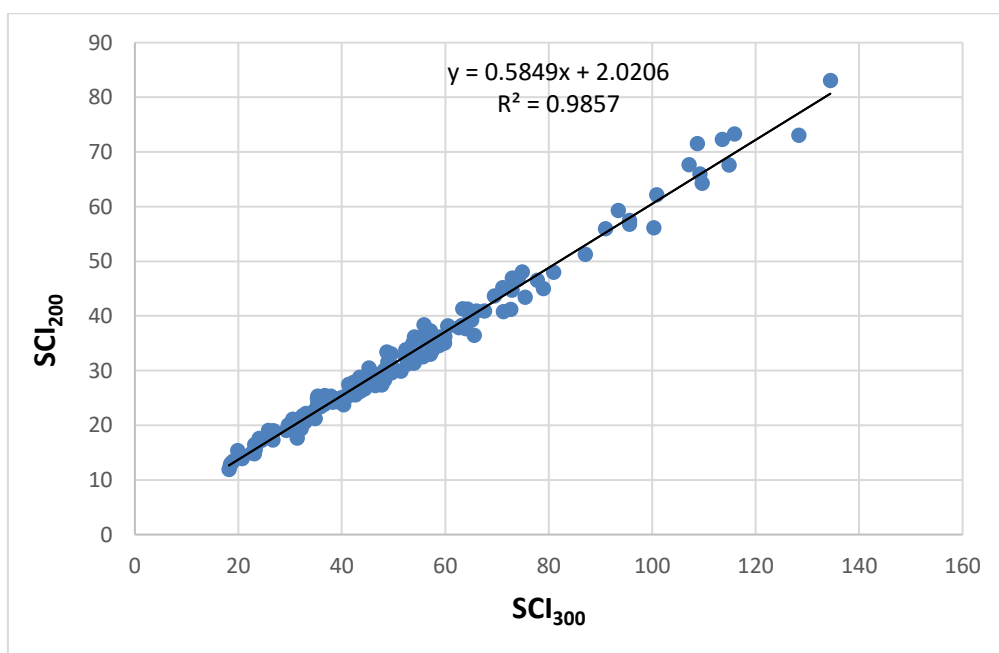
Οι συντελεστές μεταβλητότητας δεν ξεπερνούν το 5%, το οποίο δείχνει ομοιογενές δείγμα. Έτσι ο δείκτης αυτός, συνολικά δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση με το πέρασμα του χρόνου.

7.4. Συγκριτική ανάλυση δεικτών

Η σύγκριση γίνεται με βάση τη διαφορά των τιμών των μετρημένων υποχωρήσεων ανά χιλιομετρική θέση, στην ίδια φάση μέτρησης.

7.4.1. SCI_{200} - SCI_{300}

Σε κάθε χρονιά συνολικά υπάρχει μία πολύ καλή συσχέτιση του δείκτη SCI_{200} με το δείκτη SCI_{300} , όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.7. Η συσχέτιση (R^2) αυτή συνολικά ανέρχεται στα 0,9857, δηλαδή πολύ κοντά στην μονάδα, που είναι και η μέγιστη τιμή, και περιγράφεται από τη σχέση $SCI_{200} = (0.5849 * SCI_{300}) + 2,0206$.



Εικόνα 7.7: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{200} με το δείκτη SCI_{300}

Η διαφοροποίηση των δύο δεικτών που δείχνουν τη κατάσταση της ασφατικής στρώσης του οδοστρώματος διαπιστώνεται πιο αναλυτικά και στον Πίνακα 7.4, ο οποίος δείχνει το συντελεστή συσχέτισης για κάθε χρονιά ξεχωριστά.

Πίνακας 7.4: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος

SCI₂₀₀-SCI₃₀₀	
	R^2
1ο έτος	0,9884
2ο έτος	0,9906
3ο έτος	0,9849
4ο έτος	0,9922
5ο έτος	0,9838
6ο έτος	0,9963

Όλα τα έτη, οι τιμές του R^2 κυμαίνονται σε πολύ υψηλές τιμές που πλησιάζουν κατά πολύ την μονάδα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια σχεδόν απόλυτα γραμμική σχέση μεταξύ των δύο δεικτών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορά των θέσεων που καταγράφουν την υποχώρηση, η οποία είναι 10cm.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα αντιστοιχίας των χαρακτηριστικών τιμών του δείκτη SCI₃₀₀ με το δείκτη SCI₂₀₀ και παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Αντιστοιχία χαρακτηριστικών τιμών του δείκτη SCI₂₀₀

Κατάσταση ασφαλικών στρώσεων	SCI₃₀₀	SCI₂₀₀
εξαιρετική	<37	<23
πολλή καλή	37-55	23-34
μέτρια	55-100	34-60
κακή	>100	>60

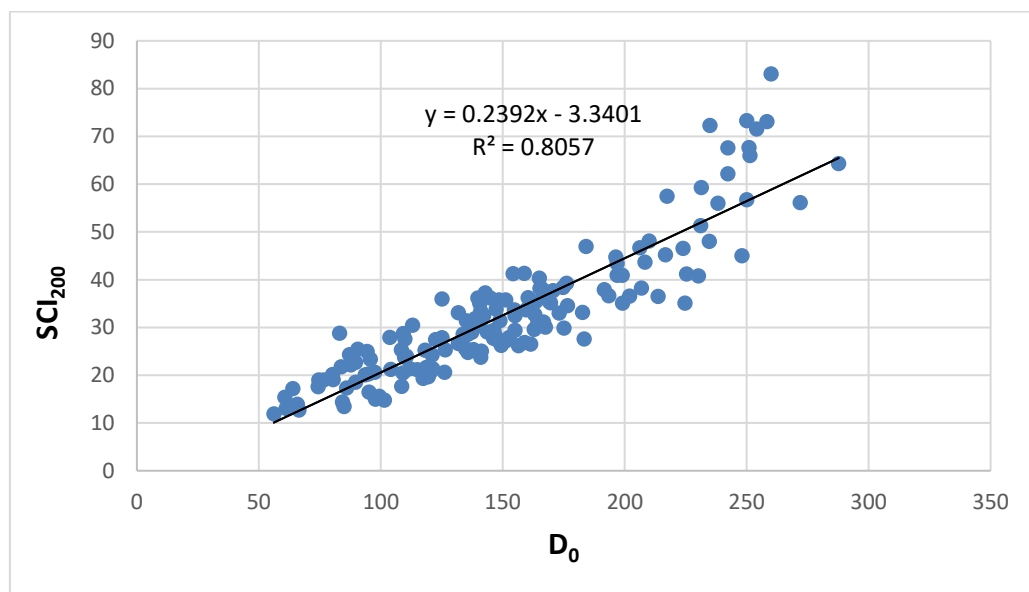
Η δυνατότητα αυτή προέκυψε από το συνδυασμό της συσχέτισης που έχουν οι δύο δείκτες και της σχέσης που υπολογίστηκε. Με τις τιμές αυτές, που υπολογίστηκαν, γίνεται εφικτή, μία επιπλέον κατηγοριοποίηση της στρώσης των ασφαλικών στρώσεων.

7.4.2. Συγκριτική ανάλυση με τον δείκτη D_0

Ο κάθε δείκτης των ασφαλικών στρώσεων συγκρίνεται με τον πιο χρησιμοποιούμενο δείκτη δομικής αξιολόγησης της γενικής κατάστασης του οδοστρώματος D_0 .

7.4.2.1. $SCI_{200}-D_0$

Ο δείκτης D_0 αρχικά μπαίνει σε διαδικασία σύγκρισης με το δείκτη SCI_{200} . Η γραμμική παλινδρόμηση και η μεταξύ τους συσχέτιση φαίνεται στην Εικόνα 7.8.

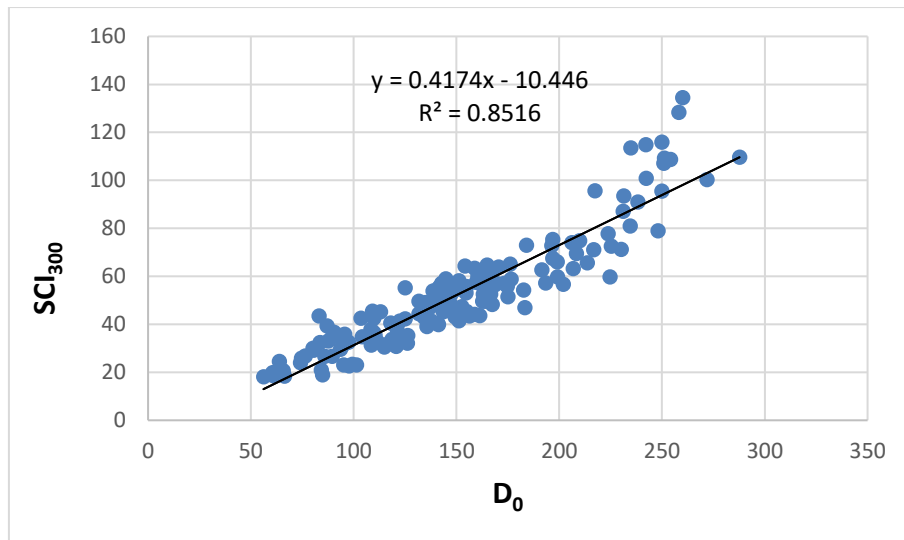


Εικόνα 7.8: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{200} με το δείκτη D_0

Οι δύο δείκτες φαίνεται πως παρουσιάζουν μεταξύ τους μία καλή συσχέτιση, γύρω στο 0,80.

7.4.2.2. $SCI_{300}-D_0$

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι δείκτες D_0 και SCI_{300} . Και οι δύο αυτοί δείκτες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Παρ' όλα αυτά εξετάζεται η μεταξύ τους συσχέτιση, η οποία διακρίνεται στην Εικόνα 7.9.

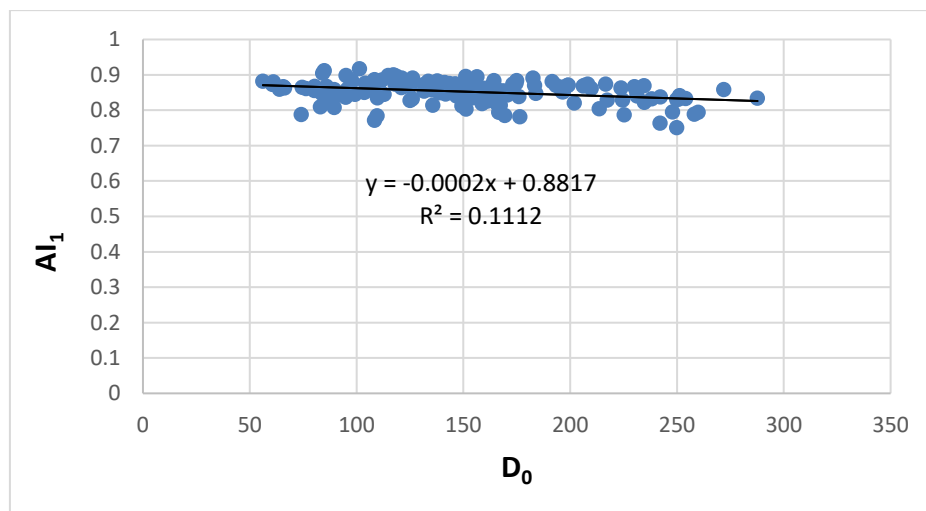


Εικόνα 7.9: Συσχέτιση του δείκτη SCI_{300} με το δείκτη D_0

Οι δύο αυτοί βασικοί δείκτες παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ τους. Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταξύ τους σχέση είναι: $SCI_{300} = 0,4174D_0 - 10,446$.

7.4.2.3. AI_1 - D_0

Σύμφωνα με Εικόνα 7.10, οι δύο δείκτες δεν παρουσιάζουν καμία συσχέτιση μεταξύ τους, αφού το R^2 ισούται με 0,11%.



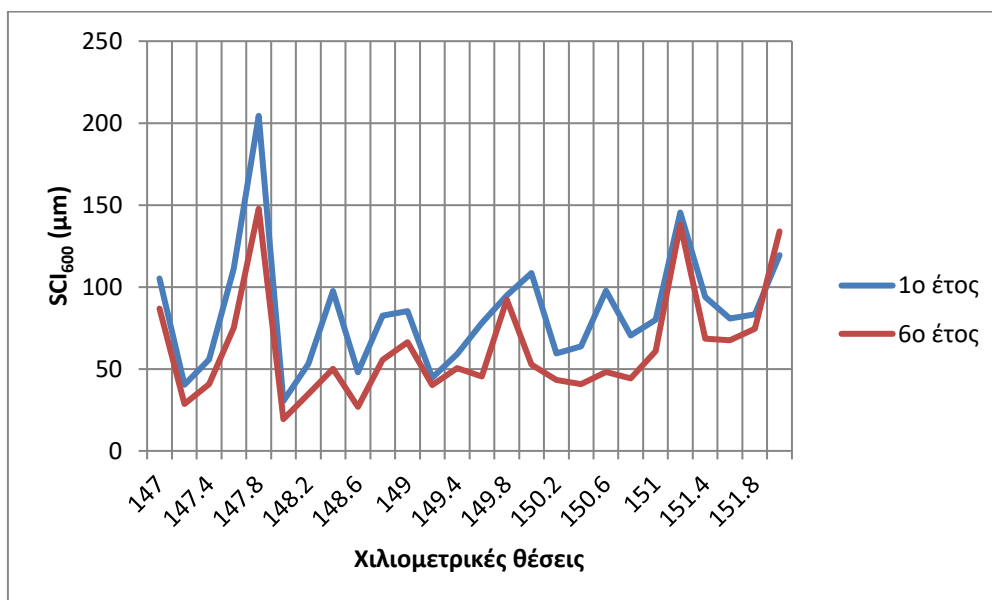
Εικόνα 7.10: Συσχέτιση του δείκτη AI_1 με το δείκτη D_0

Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, αφού ο υπολογισμός του δείκτη AI_1 είναι κανονικοποιημένος, εφόσον για τον υπολογισμό του διαίρεται με την υποχώρηση D_0 .

8. Αξιολόγηση στρώσης βάσης/υπόβασης και στρώσης έδρασης

8.1. Δείκτης SCI_{600}

Ο δείκτης SCI_{600} αντιπροσωπεύει την κατάσταση του οδοστρώματος σε μεγαλύτερα βάθη, που περιλαμβάνουν τη στρώση της βάσης και της υπόβασης. Ως πρώτη εκτίμηση των στρώσεων αυτών, παρουσιάζεται η πορεία του δείκτη ανά χιλιομετρική θέση, για το πρώτο έτος και για το έκτο. Παρατηρείται από την Εικόνα 8.1, ότι σε γενικές γραμμές οι τιμές του δείκτη είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του πρώτου έτους.

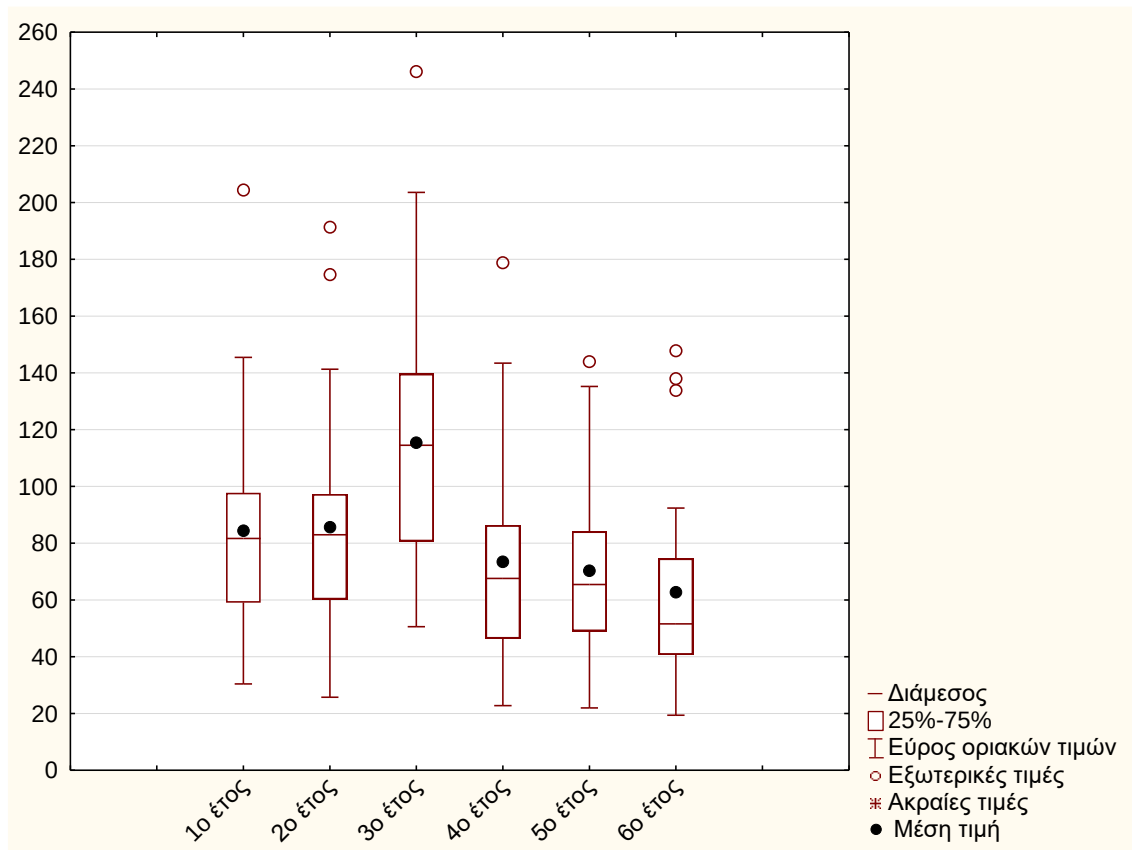


Εικόνα 8.1: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{600}

Για την καλύτερη κατανόηση και σύγκριση διεξάγεται η t-δοκιμασία για παρατηρήσεις κατά ζεύγη. Το t_{exp} υπολογίστηκε 6,507, με μέση τιμή 21,54 και τυπική απόκλιση 16,88. Αντίθετα το t_{theor} είναι 1,708, δηλαδή $t_{exp} > t_{theor}$ και άρα δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση, δηλαδή υπάρχει διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη SCI_{600} μεταξύ των ετών.

Για περαιτέρω διερεύνηση της διαφοροποίησης αυτής ανά έτος και ανά χιλιομετρική θέση γίνεται το αντίστοιχο γράφημα (box plot) (Εικόνα 8.2). Το 75% των τιμών του πρώτου έτους που λαμβάνει ο δείκτης SCI_{600} δεν ξεπερνά τα 98μm. Το υπόλοιπο

25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 98 και 145μm με εξαίρεση μία μεμονωμένη τιμή, τη μέγιστη. Την τελευταία χρονιά φαίνεται ότι, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη SCI₆₀₀, δεν ξεπερνά την τιμή 75μm. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 75 και 92μm, με τρεις τιμές εκτός του εύρους των οριακών τιμών, με τη μέγιστη να είναι η 147μm.



Εικόνα 8.2: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη SCI₆₀₀

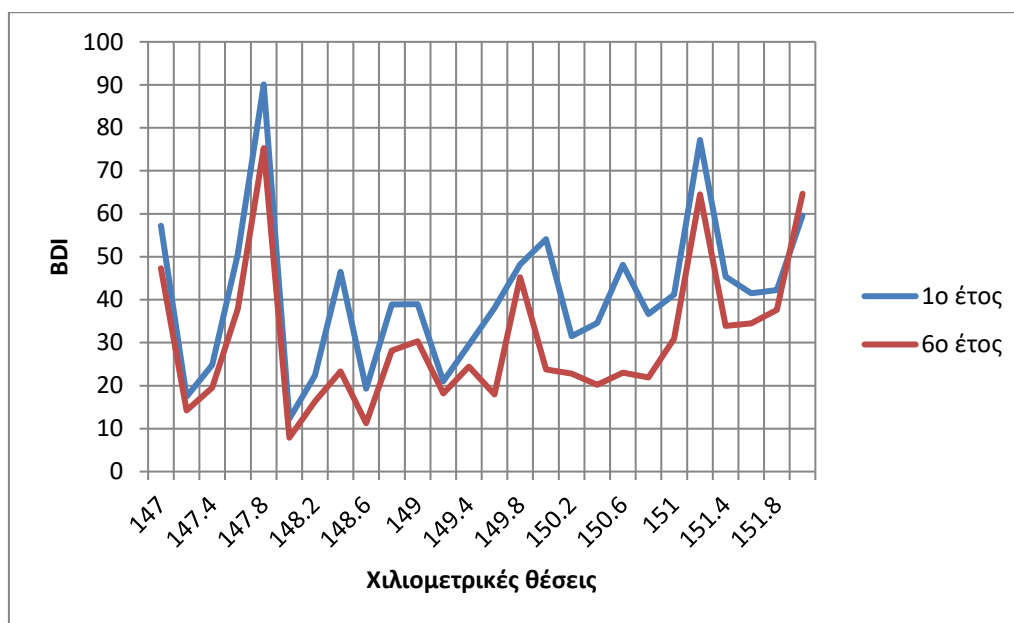
Πίνακας 8.1: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη SCI₆₀₀

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	30,44	25,75	50,58	22,78	21,98	19,37
Μέγιστη τιμή	204,45	191,39	246,23	178,84	144,02	147,77
Μέση τιμή	84,36	85,67	115,50	73,54	70,25	62,82
Διάμεσος	81,65	82,94	114,48	67,59	65,43	51,57
Τυπική απόκλιση	36,43	38,79	51,11	36,18	32,52	33,50
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	43,18%	45,28%	44,25%	49,20%	46,29%	53,33%

Μία διαφορά παρατηρείται το τελευταίο έτος στη μέση τιμή και στη τιμή της διαμέσου, η οποία υπολογίζεται στα 11,25μm, ενώ το πρώτο έτος ήταν 2,71μm. Στη συνέχεια εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, για τους οποίους παρατηρείται και πάλι μία αύξηση, με την τιμή να φτάνει το 53%. Συνεπώς παρουσιάζεται ανομοιογένεια στο δείκτη αυτό και άρα στη στρώση των ασύνδετων υλικών.

8.2. Δείκτης BDI

Ο δείκτης BDI αντιπροσωπεύει την κατάσταση του οδοστρώματος στην στρώση της βάσης/υπόβασης. Για μία πρώτη εκτίμηση της πορείας του BDI, γίνεται το διάγραμμα μεταβολής, ανά χιλιομετρική θέση για την πρώτη χρονιά και για την τελευταία (Εικόνα 8.3).

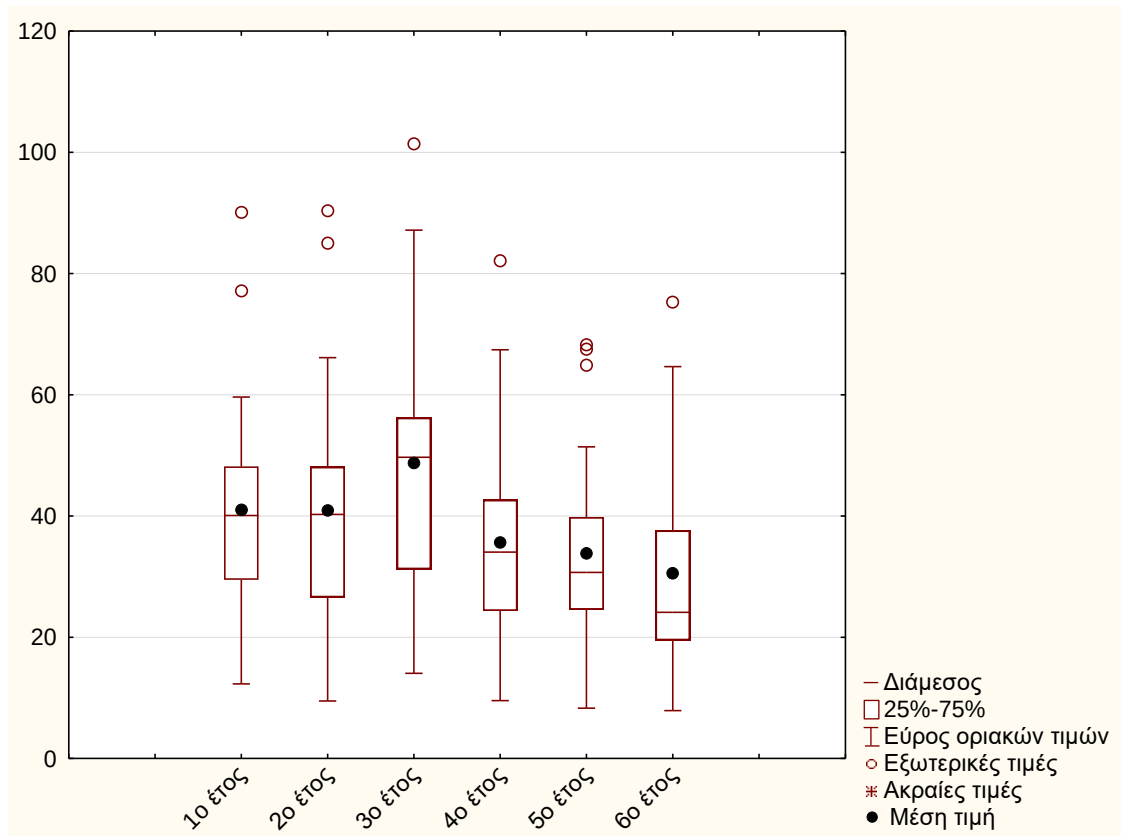


Εικόνα 8.3: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη BDI

Στη συνέχεια γίνεται η δοκιμασία t για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει ότι το t_{theor} έχει την τιμή 1,708 και το t_{exp} έχει την τιμή 6,882, με μέση τιμή 10,46, τυπική απόκλιση 7,75, δηλαδή $t_{exp} > t_{theor}$ και άρα δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση.

Οι τιμές του δείκτη BDI για τη συγκεκριμένη ανάλυση, παρουσιάζονται στο σχετικό γράφημα (Εικόνα 8.4), το οποίο παρέχει την δυνατότητα σύγκρισης και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με το box plot, εκτός του τρίτου έτους, όπου

παρατηρείται μία αύξηση των τιμών και του εύρους, υπάρχει σχετικά μία σταθερότητα. Όσον αφορά το πρώτο έτος, το 75% των μετρήσεων, κυμαίνεται από 12 έως περίπου 48 μ m, ενώ το υπόλοιπο 25% φτάνει μέχρι και τα 60 μ m, με εξαίρεση δύο τιμές, με την μέγιστη να είναι 90 μ m. Το έκτο έτος, το 75% των μετρήσεων αγγίζει τα 38 μ m, και το υπόλοιπο 25% φτάνει έως και 66 μ m. Εξαίρεση αποτελεί και πάλι μία μεμονωμένη τιμή, η οποία είναι περίπου 75 μ m. Το τρίτο έτος οι τιμές είναι λίγο πιο αυξημένες, με το 75% των μετρήσεων να φτάνει την τιμή 56 μ m και μαζί με το υπόλοιπο 25% να φτάνουν τα 87 μ m.



Εικόνα 8.4:Γράφημα τύπου box plot του δείκτη BDI

Στη συνέχεια εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, για τους οποίους παρατηρείται μια αισθητή αύξηση, με την τιμή να φτάνει την τελευταία χρονιά το 55%, ενώ η αντίστοιχη τιμή στην αρχή ήταν 43%. Και στην προκειμένη το τελευταίο έτος, διαφέρει η μέση τιμή από τη τιμή της διαμέσου

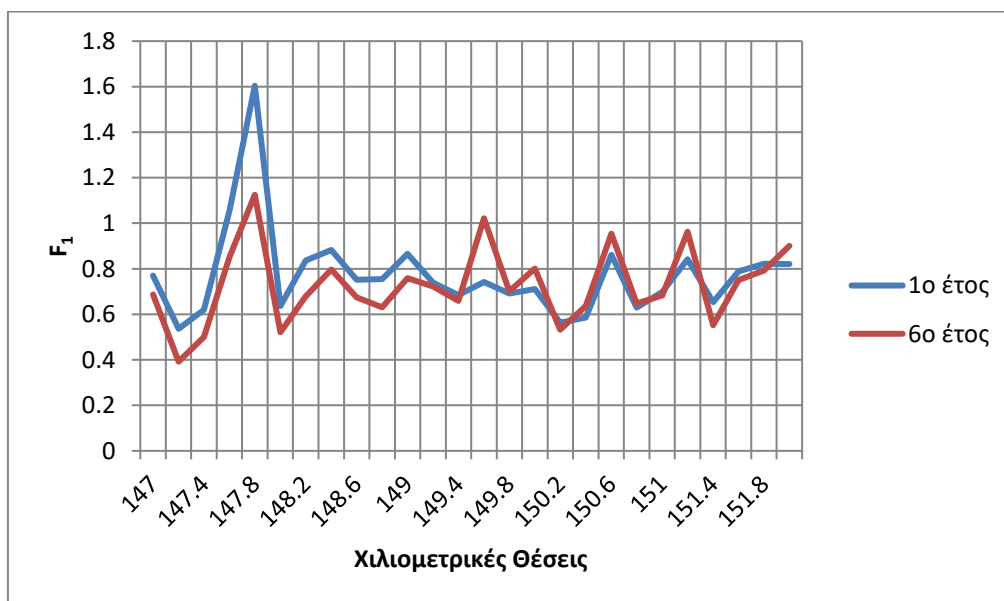
Πίνακας 8.2: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη BDI

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	12,30	9,48	14,04	9,55	8,29	7,89
Μέγιστη τιμή	90,11	90,38	101,41	82,13	68,25	75,28
Μέση τιμή	41,04	40,94	48,74	35,63	33,85	30,58
Διάμεσος	40,08	40,27	40,69	34,04	30,70	24,11
Τυπική απόκλιση	17,78	19,11	22,09	17,25	16,30	16,93
Συντελεστής μεταβλητότητας εν	43,32%	46,67%	45,33%	48,40%	48,16%	55,38%

Συνεπώς παρουσιάζεται ανομοιογένεια και σημαντική διαφοροποίηση και σε αυτόν το δείκτη, ο οποίος καθορίζει τη στρώση των ασύνδετων υλικών.

8.3. Δείκτης F_1

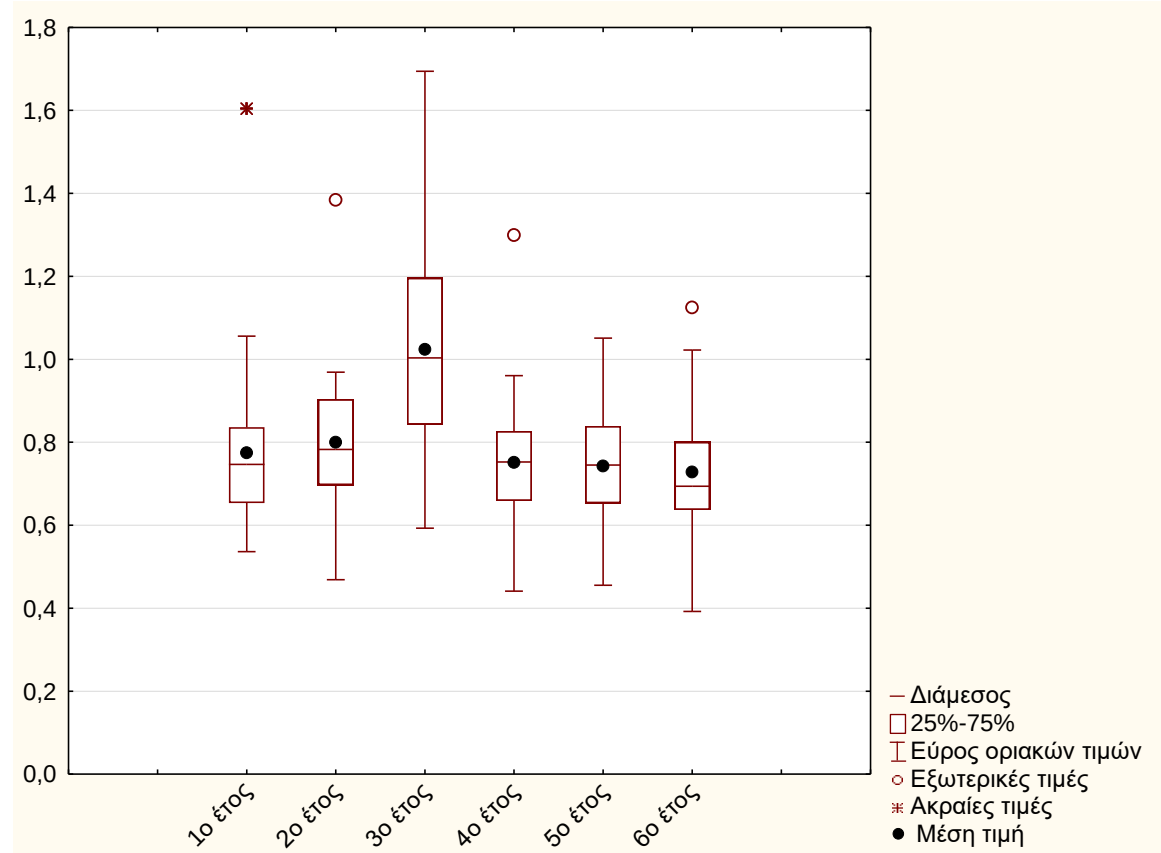
Η παράμετρος F_1 αντανακλά τη σχετική ακαμψία της στρώσης της βάσης, ανάλογα και με το πάχος των στρώσεων. Στη συνέχεια παριστάνεται το διάγραμμα, που δείχνει την εξέλιξη της πορείας του δείκτη για το πρώτο και το τελευταίο έτος των μετρήσεων. Από την Εικόνα 8.5 φαίνεται, πως στο πρώτο τμήμα του οδοστρώματος οι τιμές το τελευταίο έτος είναι σχετικά μικρότερες από το πρώτο.



Εικόνα 8.5: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη F_1

Κατόπιν γίνεται η δοκιμασία t για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$), από όπου προκύπτει ότι το t_{theor} ισούται με 1,708. Επίσης, από τους τύπους προκύπτει ότι, το t_{exp} έχει την τιμή 1,729, με μέση τιμή 0,046 και τυπική απόκλιση 0,137. Άρα $t_{\text{exp}} > t_{\text{theor}}$, δηλαδή οριακά δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση.

Ακολουθεί το box plot (Εικόνα 8.6), σύμφωνα με το οποίο, στις περισσότερες χρονιές, το 75% των τιμών δεν ξεπερνά το 0,9, ενώ το υπόλοιπο 25%, εκτός από μία μεμονωμένη τιμή, φτάνει το 1,1. Διαφοροποίηση παρατηρείται μόνο την τρίτη χρονιά, όπου το 75% του δείγματος, κυμαίνεται μέχρι το 1,2 και το υπόλοιπο ανέρχεται στο 1,7.



Εικόνα 8.6: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη F_1

Για καλύτερη αξιολόγηση, αξιοποιούνται τα δεδομένα από τη στατιστική επεξεργασία. Ο Πίνακας 8.3 παρουσιάζει τα στατιστικά στοιχεία του δείκτη F_1 .

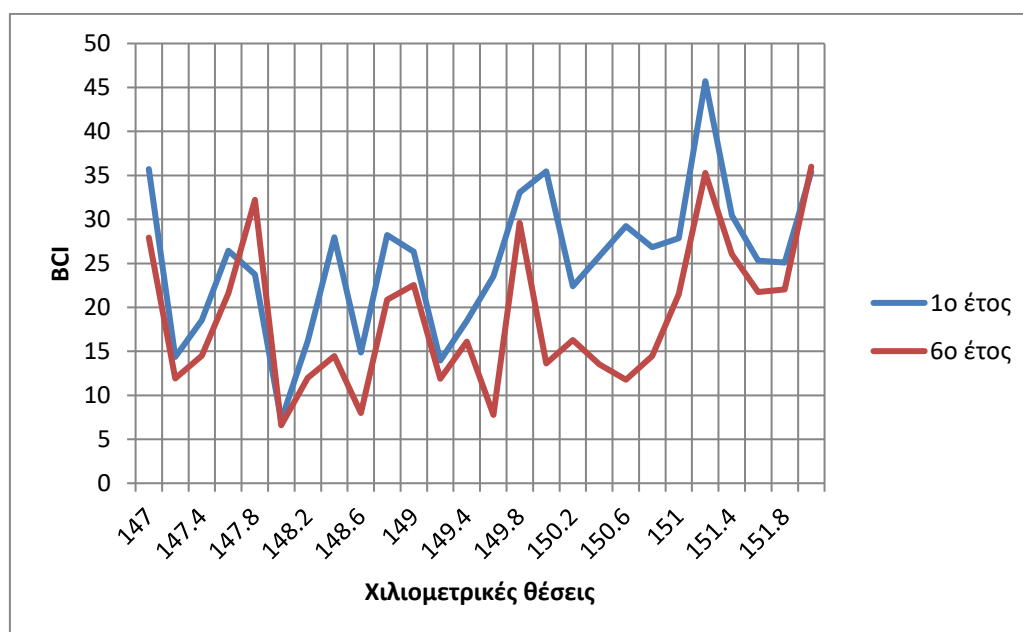
Πίνακας 8.3: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη F₁

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	0,536	0,469	0,593	0,441	0,455	0,392
Μέγιστη τιμή	1,604	1,384	1,694	1,299	1,051	1,125
Μέση τιμή	0,775	0,800	1,024	0,751	0,743	0,728
Διάμεσος	0,750	0,783	1,000	0,753	0,745	0,694
Τυπική απόκλιση	0,205	0,176	0,251	0,168	0,146	0,171
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	26,5%	22,0%	24,6%	22,3%	19,6%	23,4%

Συνοψίζοντας, ο δείκτης αυτός δεν παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση στο πέρασμα του χρόνου και σημαντική ανομοιογένεια, αλλά παρατηρήθηκε μία αύξηση των τιμών του, το τρίτο έτος.

8.4. Δείκτης BCI

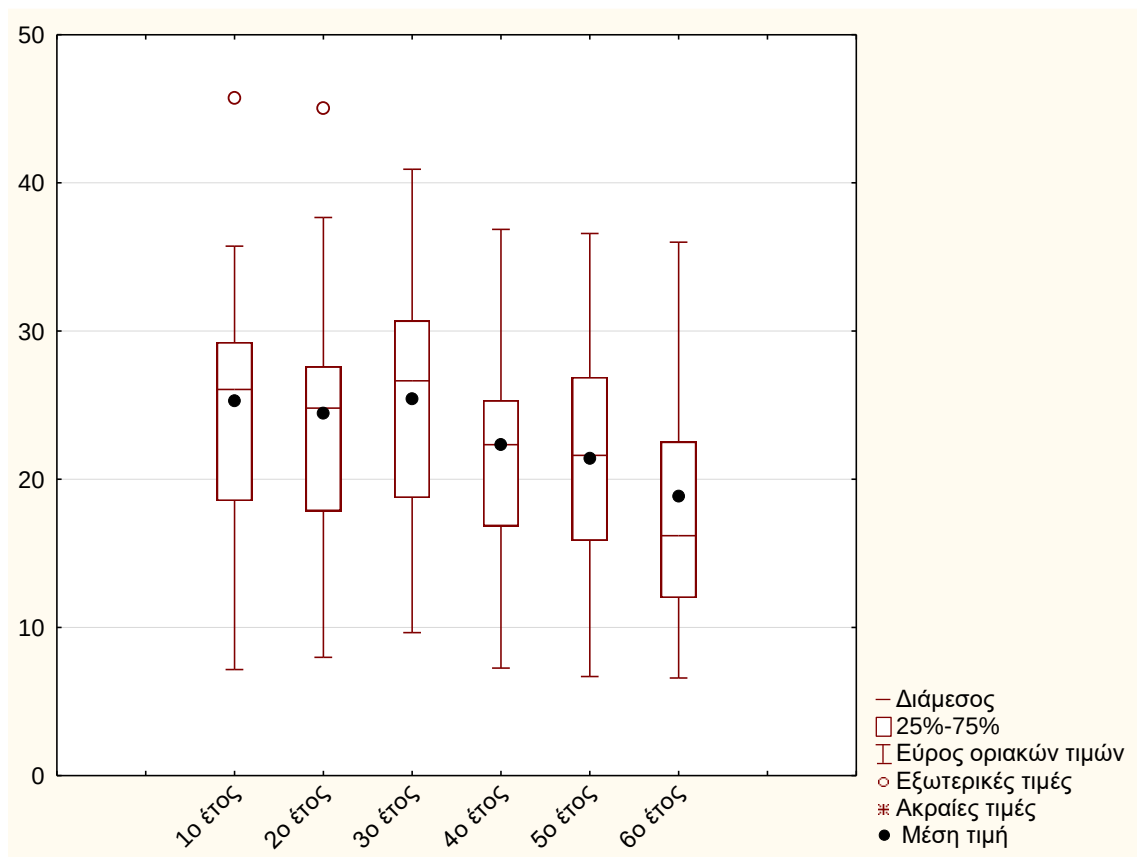
Ο BCI είναι ένας δείκτης, ο οποίος υπολογίζει την κατάσταση της στρώσης από ασύνδετα υλικά, δηλαδή της βάσης/υπόβασης. Η Εικόνα 8.7 παρουσιάζει το διάγραμμα μεταβολής κατά μήκος του δείκτη αυτού. Φαίνεται πως, από τη χλιομετρική θέση 148 και έπειτα, οι μετρήσεις του πρώτου έτους είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του έκτου έτους.



Εικόνα 8.7: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη BCI

Εν συνεχεία, από το t-test για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει το t_{theor} είναι 1,708. Επίσης προκύπτει ότι το t_{exp} έχει την τιμή 5,218, με μέση τιμή 6,46 και τυπική απόκλιση 6,31. Συνεπώς το t_{exp} είναι μεγαλύτερο από το t_{theor} , δηλαδή υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη BCI μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους.

Η Εικόνα 8.8 παρουσιάζει το box plot, από το οποίο παρατηρείται μία τάση πτώσης των τιμών. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο έτος, το 75% των μετρήσεων, κυμαίνεται από 7 έως περίπου 29 μm , ενώ το υπόλοιπο 25% φτάνει μέχρι και τα 35 μm , με εξαίρεση μία τιμή, τα 46 μm . Το τελευταίο έτος, το 75% των μετρήσεων αγγίζει τα 23 μm , και το υπόλοιπο 25% φτάνει έως και 36 μm .



Εικόνα 8.8: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη BCI

Τέλος, εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, οι οποίοι φαίνονται στον Πίνακα 8.4 και για τους οποίους παρατηρείται μια αισθητή αύξηση 12%, με την τιμή να φτάνει την τελευταία χρονιά το 45%, ενώ την πρώτη η αντίστοιχη τιμή ήταν 33%.

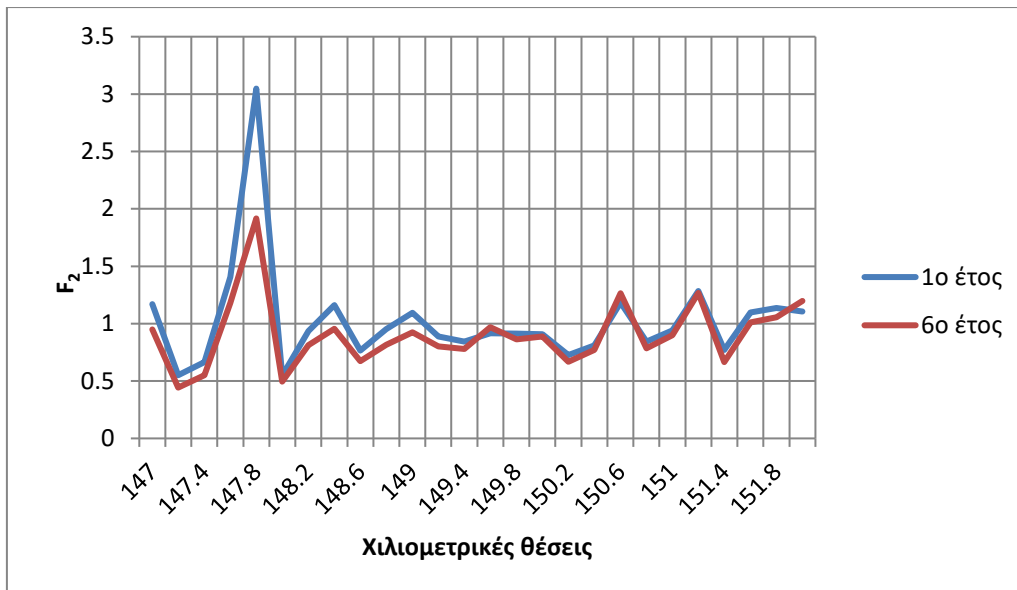
Πίνακας 8.4: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη BCI

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	7,16	7,98	9,66	7,26	6,69	6,59
Μέγιστη τιμή	45,72	45,04	40,92	36,86	36,58	36,00
Μέση τιμή	25,31	24,46	25,42	22,32	21,42	18,85
Διάμεσος	26,05	24,77	26,65	22,32	21,62	16,20
Τυπική απόκλιση	8,34	8,42	7,73	8,22	8,19	8,38
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	32,9%	34,4%	30,4%	36,8%	38,3%	44,5%

Και στο δείκτη αυτό την τελευταία χρονιά, υπάρχει μία αισθητή διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής και της τιμής της διαμέσου. Συνολικά, λοιπόν, παρουσιάζεται μία ανομοιογένεια και σε αυτό το δείκτη που καθορίζει τη στρώση των ασύνδετων υλικών.

8.5. Δείκτης F₂

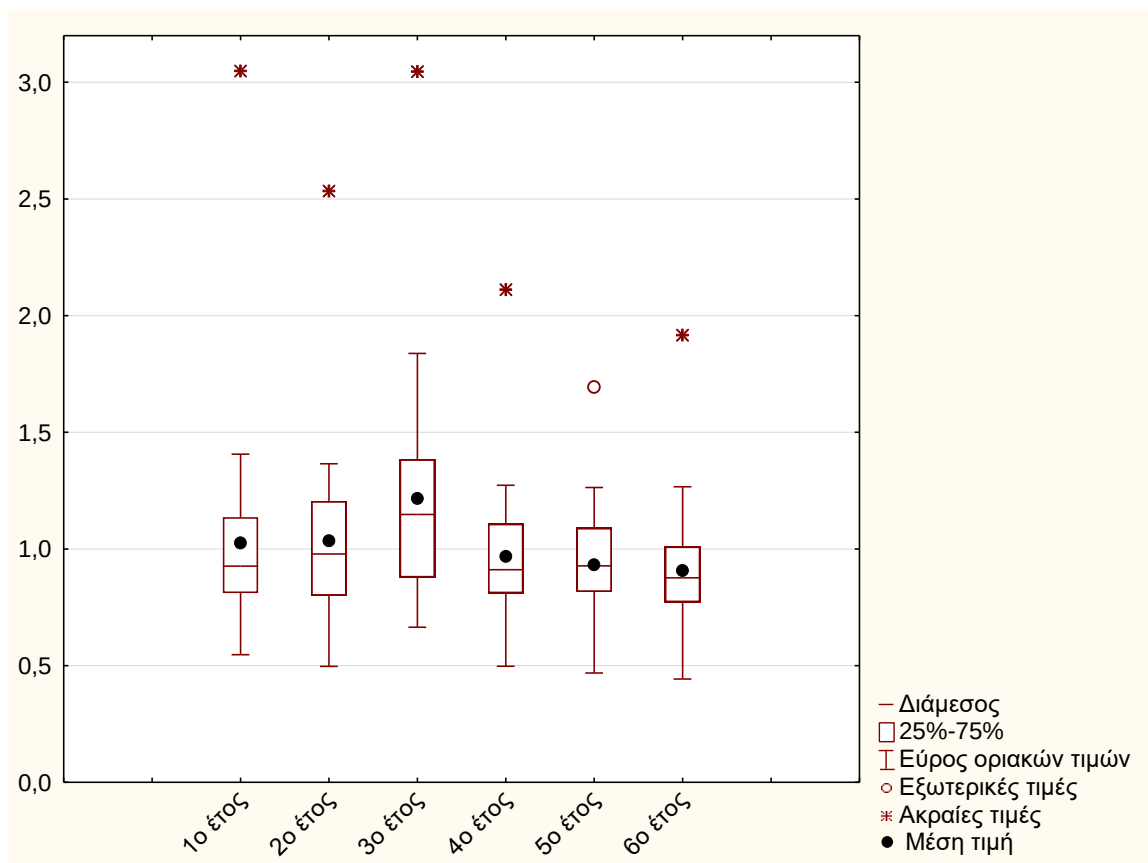
Ο συγκεκριμένος δείκτης αντικατοπτρίζει την κατάσταση της στρώσης της βάσης και της υπόβασης του οδοστρώματος. Όπως και προηγουμένως, γίνεται το διάγραμμα μεταβολής του δείκτη για το πρώτο και το έκτο έτος (Εικόνα 8.9), από το οποίο φαίνεται ότι προς το τελευταίο τμήμα του οδοστρώματος οι τιμές σχεδόν ταυτίζονται τις δύο χρονιές.



Εικόνα 8.9: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη F_2

Εν συνέχεια, από το t-test για παρατηρήσεις κατά ζεύγη, για $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει το t_{theor} ίσο με 1,708 και το t_{exp} ίσο με 2,710, με μέση τιμή 0,117 και τυπική απόκλιση 0,222. Δηλαδή $t_{\text{exp}} > t_{\text{theor}}$, που σημαίνει ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη F_2 , μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους.

Ακολουθεί το διάγραμμα τύπου box plot, με σκοπό να αναδειχθεί η εξέλιξη του δείκτη αυτού στην πάροδο του χρόνου. Έτσι, με βάση την Εικόνα 8.10 διακρίνονται οι τιμές που παίρνει ο δείκτης αυτός ανά έτος. Συγκεκριμένα, για το 1ο έτος, το 75% των μετρήσεων, κυμαίνεται από 0,55 έως 1,15, ενώ το υπόλοιπο 25% φτάνει μέχρι και 1,4, με εξαίρεση μία μόνο τιμή, η οποία είναι και η μέγιστη, η 3,05. Το 75% των μετρήσεων του έκτου έτους αγγίζει την μονάδα, και το υπόλοιπο 25% φτάνει έως και 1,3, με μία μεμονωμένη εξωτερική τιμή, το 1,92. Συγκριτικά λοιπόν ο δείκτης αυτός φαίνεται πως παρουσιάζει μία σταθερότητα στην πάροδο του χρόνου, με εξαίρεση να αποτελεί η τρίτη, κατά σειρά, χρονιά, όπου φαίνεται πως το εύρος των τιμών και οι τιμές που παίρνει ο δείκτης είναι μεγαλύτερες. Η μέση τιμή κι η διάμεσος φαίνεται να παρουσιάζουν και μια μικρή διαφορά, το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού το εύρος οριακών τιμών είναι μεγαλύτερο.



Εικόνα 8.10: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη F₂

Πίνακας 8.5: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη F₂

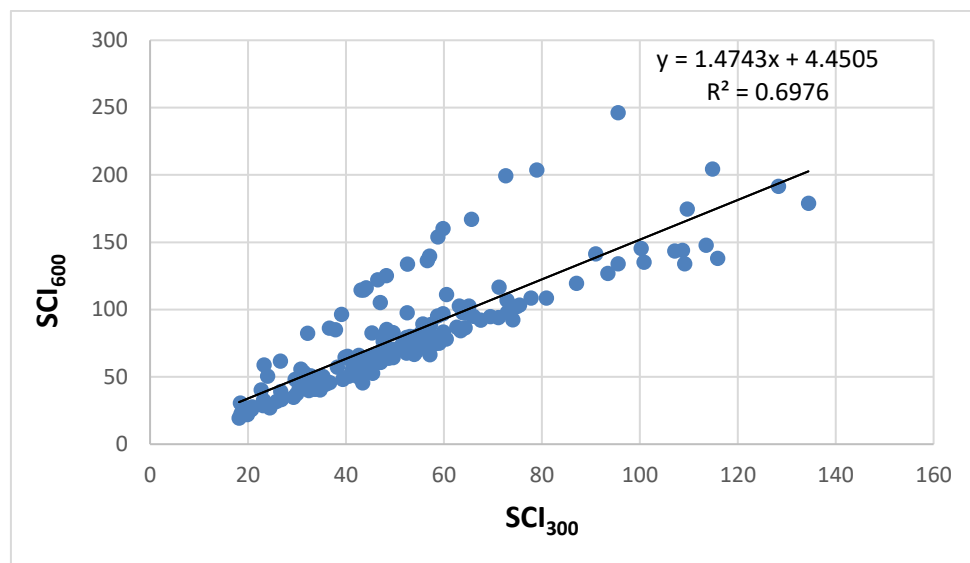
	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	0,547	0,497	0,665	0,498	0,469	0,443
Μέγιστη τιμή	3,048	2,533	3,046	2,111	1,694	1,917
Μέση τιμή	1,026	1,035	1,216	0,968	0,933	0,908
Διάμεσος	0,927	0,978	1,148	0,911	0,928	0,876
Τυπική απόκλιση	0,464	0,384	0,490	0,319	0,268	0,299
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	45,3%	37,1%	40,3%	32,9%	28,7%	33,0%

Στη συνέχεια εξετάζονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας, για τους οποίους παρατηρείται μείωση. Η τιμή στο τέλος αγγίζει το 33%, ενώ την πρώτη χρονιά η αντίστοιχη τιμή ήταν γύρω στο 45%.

8.6. Συγκριτική ανάλυση δεικτών

8.6.1. SCI_{600} - SCI_{300}

Στο σύνολο των παρατηρήσεων, ο δείκτης SCI_{600} και ο δείκτης SCI_{300} , όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.11, παρουσιάζουν μία συσχέτιση κοντά στο 0,7, η οποία θεωρείται καλή. Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ τους είναι $SCI_{600} = (1,4743 * SCI_{300}) + 4,4505$.



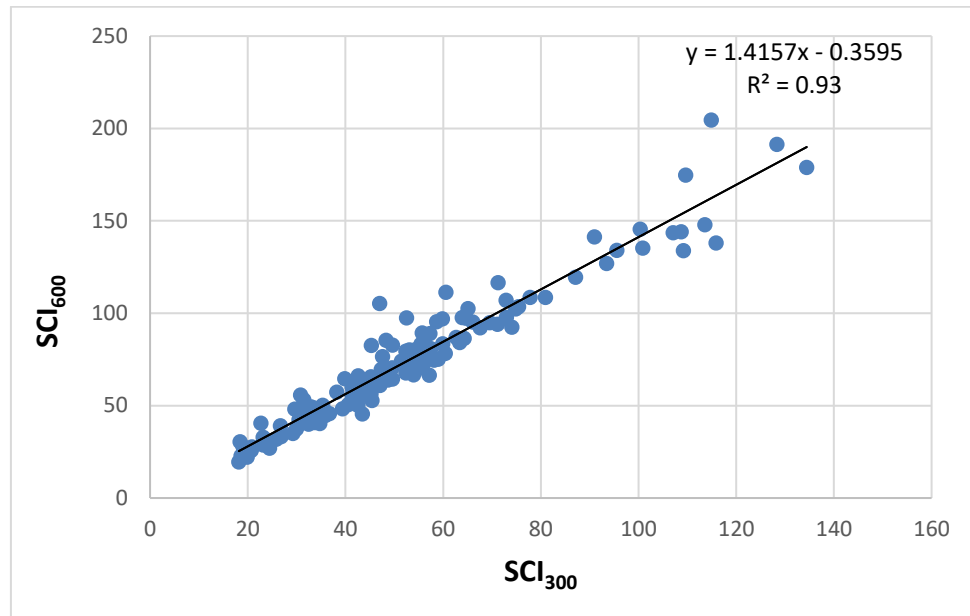
Εικόνα 8.11: Συσχέτιση δείκτη SCI_{600} με το δείκτη SCI_{300}

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί, είναι ότι κάθε χρονιά ξεχωριστά, ο συντελεστής συσχέτισης φτάνει ακόμα και το 0,99, εκτός από το πρώτο και το τρίτο έτος, όπου ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται στο 0,87, όπου και πάλι υποδηλώνεται μία πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών. Οι τιμές για κάθε έτος παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.6.

Πίνακας 8.6: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος

SCI_{600} - SCI_{300}	
	R^2
1ο έτος	0,8612
2ο έτος	0,9906
3ο έτος	0,8881
4ο έτος	0,9887
5ο έτος	0,9902
6ο έτος	0,9879

Μεμονωμένα κάθε έτος παρουσιάζονται πολύ υψηλές συσχετίσεις, σε αντίθεση με τη συνολική. Έτσι διερευνάται και πάλι η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών, αφαιρώντας τις μετρήσεις του τρίτου έτους, οι οποίες απομειώνουν τη συσχέτιση.

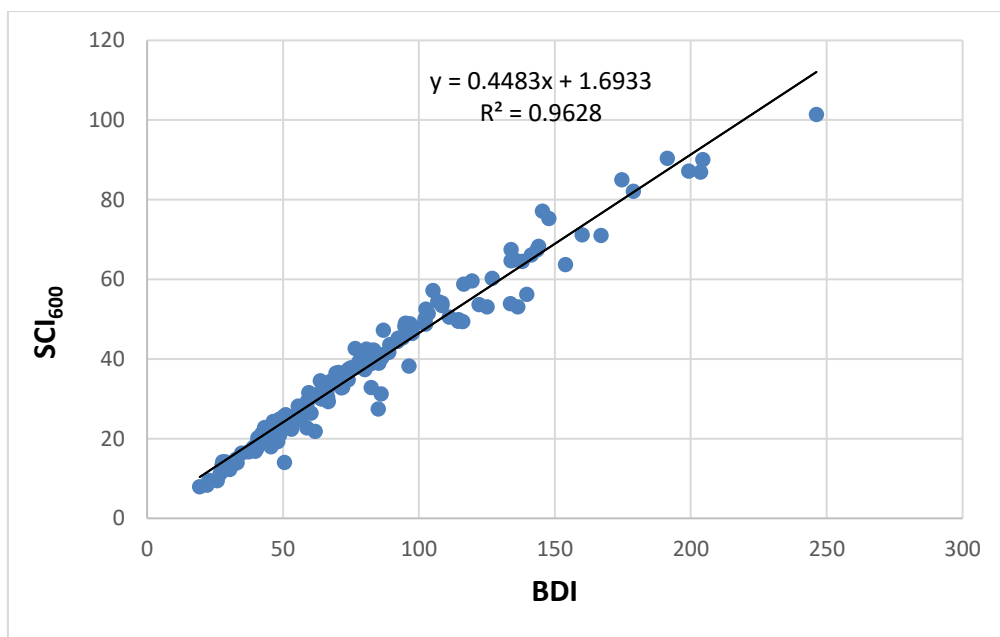


Εικόνα 8.12: Συσχέτιση του δείκτη SCI₆₀₀ με το δείκτη SCI₃₀₀, αφαιρώντας από τις μετρήσεις το 3ο έτος

Αφού αφαιρέθηκε από τις μετρήσεις το τρίτο έτος, η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη SCI₆₀₀ και του SCI₃₀₀ έδωσε R², ίσο με 0,93, τιμή, η οποία δείχνει ότι οι δείκτες έχουν υψηλή συσχέτιση μεταξύ τους.

8.6.2. SCI₆₀₀-BDI

Μεγάλη επίσης συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ του δείκτη SCI₆₀₀ και του δείκτη BDI, το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται η υποχώρηση D₆₀₀. Η συσχέτιση (R²) συνολικά ανέρχεται στο 0,9628, η οποία θεωρείται εξαιρετική και σύμφωνα με την Εικόνα 8.13, η εξίσωση που μπορεί να περιγράψει τη μεταξύ τους σχέση είναι $BDI = (0.4483 * SCI_{600}) + 1,6933$.



Εικόνα 8.13: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη SCI₆₀₀

Η διαφοροποίηση των δύο δεικτών, που δείχνουν τη κατάσταση της στρώσης από ασύνδετα υλικά του οδοστρώματος, διαπιστώνεται πιο αναλυτικά και στον Πίνακα 8.7, ο οποίος δείχνει το συντελεστή συσχέτισης για κάθε χρονιά ξεχωριστά.

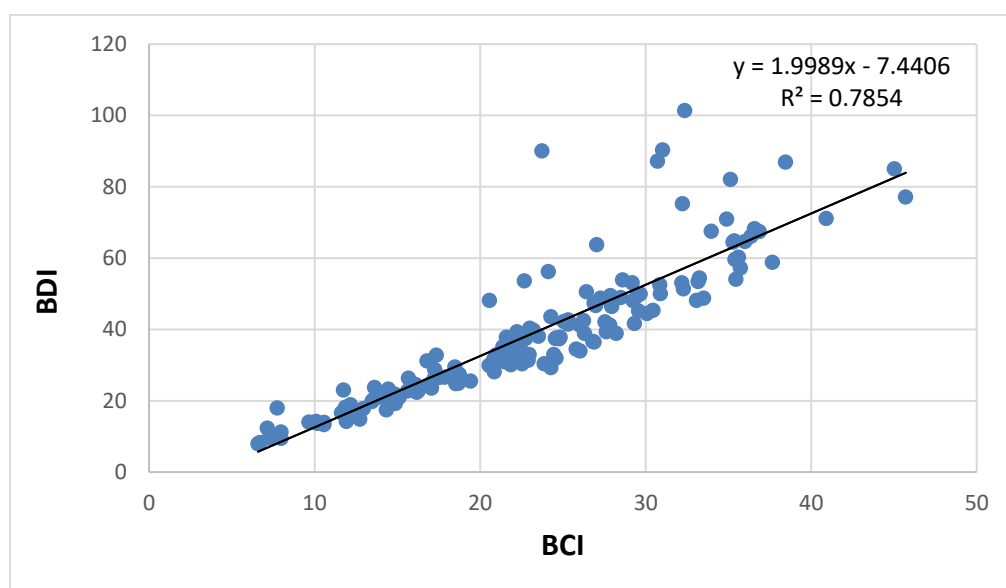
Πίνακας 8.7: Συντελεστής συσχέτισης R^2 για κάθε έτος

SCI ₆₀₀ -BDI	
	R^2
1ο έτος	0,965
2ο έτος	0,9941
3ο έτος	0,9612
4ο έτος	0,9861
5ο έτος	0,9898
6ο έτος	0,9883

Όλα τα έτη, ο δείκτης R^2 κυμαίνεται σε τιμές που πλησιάζουν κατά πολύ την μονάδα, με την μικρότερη τιμή να είναι 0,96.

8.6.3. BDI-BCI

Αποδείχτηκε επίσης ότι ο δείκτης BDI συσχετίζεται καλά με το δείκτη BCI και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για να ενισχύσει την ανάλυση της ζώνης βάσης και της υπόβασης. Υπάρχει ένα ορισμένο ποσοστό αλληλοεπικάλυψης, κατά τη χρήση των BDI και BCI. Η εξίσωση που συνδέει τους δύο δείκτες είναι $BDI = 1.9989 \cdot BCI - 7.4406$, με συντελεστή συσχέτισης R^2 ίσο με 0,79.



Εικόνα 8.14: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη BCI

Για κάθε έτος, ξεχωριστά οι συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών φαίνονται στον Πίνακα 8.8.

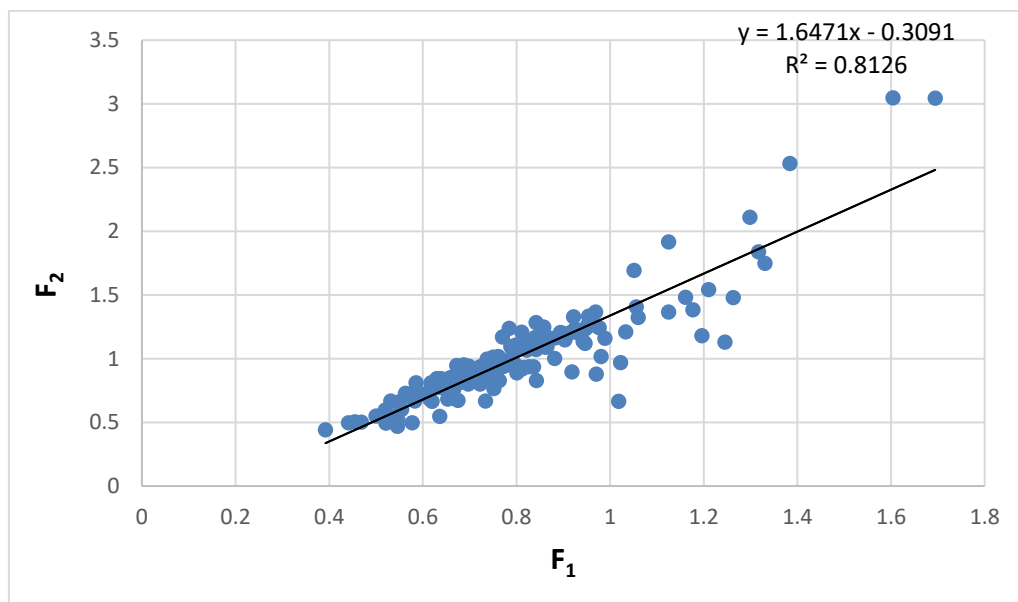
Πίνακας 8.8: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος

BDI-BCI	
	R^2
1ο έτος	0,6079
2ο έτος	0,7799
3ο έτος	0,7286
4ο έτος	0,895
5ο έτος	0,9244
6ο έτος	0,8894

Οι δείκτες BDI και BCI παρουσιάζουν μεταξύ τους καλή συσχέτιση στο σύνολο, όμως προς τα τελευταία έτη παρατηρείται ότι η συσχέτιση αυτή γίνεται καλύτερη.

8.6.4. F_1 - F_2

Οι δείκτες F_1 και F_2 δείχνουν τη κατάσταση της βάσης/υπόβασης. Ο δείκτης F_2 δείχνει και την κατάσταση σε πιο χαμηλό βάθος, παρ' όλα αυτά αναμένεται ενδεχομένως καλύτερη συσχέτιση μεταξύ αυτών των δεικτών (σε αντίθεση με άλλους), αφού και οι δύο είναι κανονικοποιημένοι. Σύμφωνα με την Εικόνα 8.15, οι δύο δείκτες έχουν καλή συσχέτιση και η εξίσωση που περιγράφει τη μεταξύ τους σχέση είναι: $F_2 = 1.6471 \cdot F_1 - 0,3091$.



Εικόνα 8.15: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη F_2

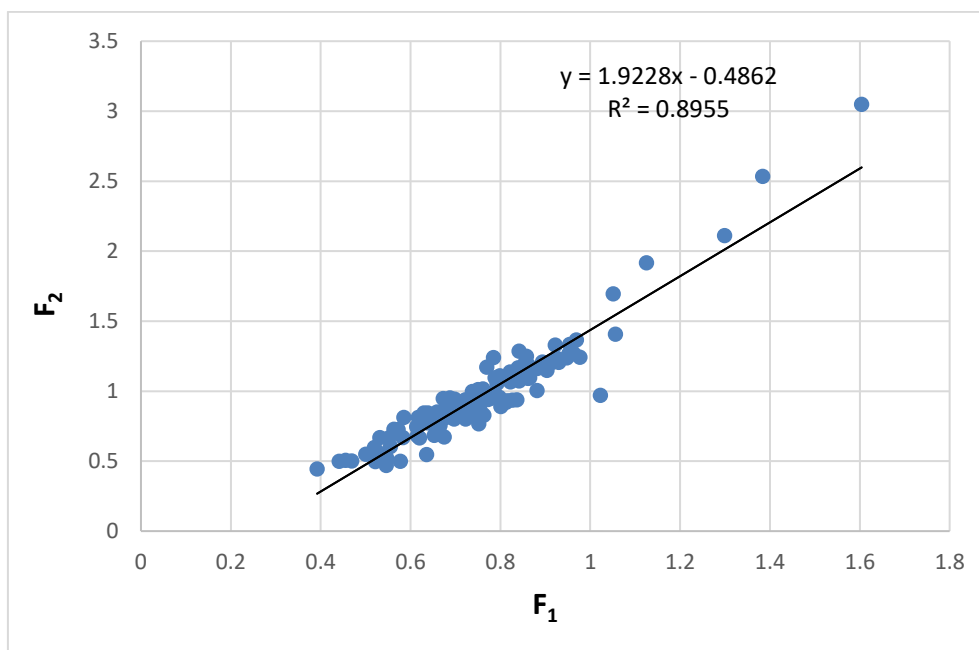
Ο Πίνακας 8.9 δείχνει τη συσχέτιση που έχουν οι δύο δείκτες μεταξύ τους, για κάθε έτος, ξεχωριστά.

Πίνακας 8.9: Συσχέτιση R^2 για κάθε έτος

F_1 - F_2	
	R^2
1ο έτος	0,9267
2ο έτος	0,9351

3ο έτος	0,7364
4ο έτος	0,9196
5ο έτος	0,8967
6ο έτος	0,8148

Μεμονωμένα μερικά έτη παρουσιάζουν υψηλές συσχετίσεις. Έτσι υπολογίζεται και πάλι η συσχέτιση μεταξύ των δεικτών, αφαιρώντας τις μετρήσεις του τρίτου έτους, σύμφωνα με τα όσα έχουν προαναφερθεί (Εικόνα 8.16).



Εικόνα 8.16: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη F_2 , αφαιρώντας από τις μετρήσεις το 3ο έτος

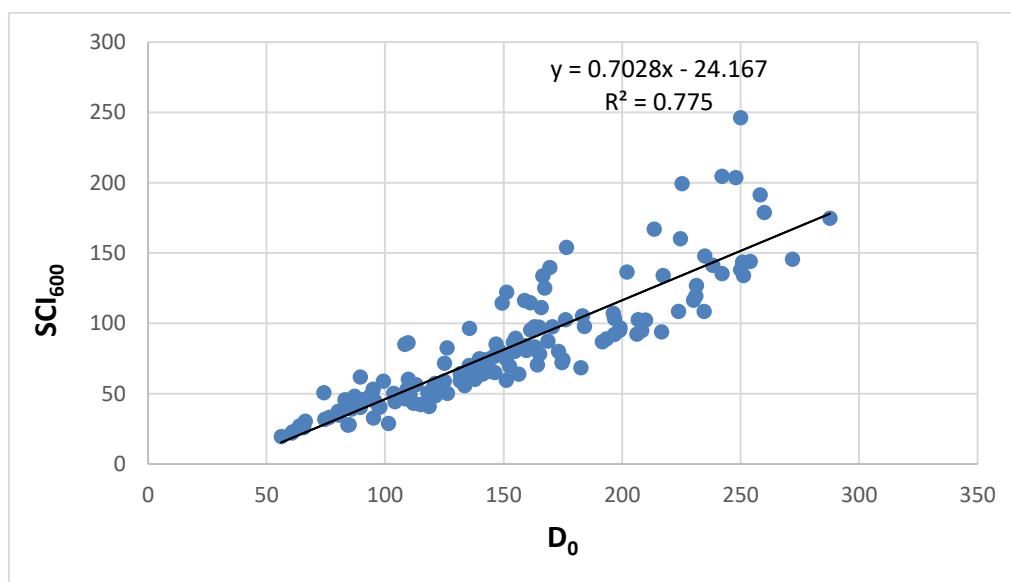
Αν από τις μετρήσεις, τελικά, αφαιρεθεί το τρίτο, κατά σειρά, έτος, όπου παρατηρείται μία αύξηση των δεικτών, προκύπτει μία συσχέτιση μεγαλύτερη, η οποία φτάνει το 0,90.

8.6.5. Συγκριτική ανάλυση με τον δείκτη D_0

Ο κάθε δείκτης που αντικατοπτρίζει την κατάσταση της βάσης/υπόβασης συγκρίνεται με τον ευρέως αποδεκτό δείκτη δομικής αξιολόγησης της γενικής κατάστασης του οδοστρώματος D_0 .

8.6.5.1. SCI₆₀₀-D₀

Αρχικά, ο δείκτης SCI₆₀₀ συγκρίνεται με το δείκτη D₀, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπάρχει στατιστική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών. Στην Εικόνα 8.17 απεικονίζεται η γραμμική αυτή παλινδρόμηση.

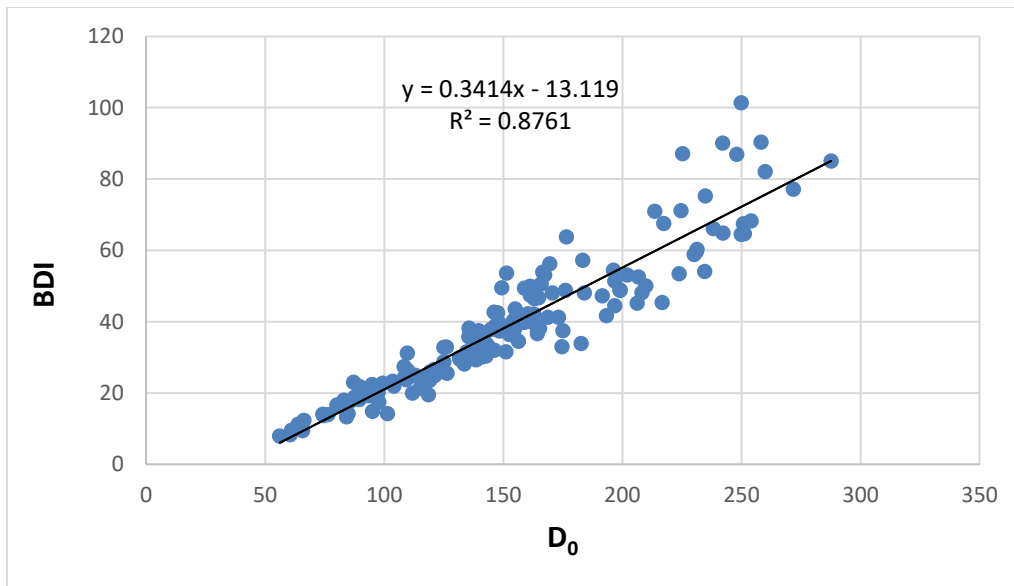


Εικόνα 8.17: Συσχέτιση του δείκτη SCI₆₀₀ με το δείκτη D₀

Οι δείκτες SCI₆₀₀ και D₀ παρουσιάζουν μεταξύ τους μία ικανοποιητική συσχέτιση ($R^2=0,78$).

8.6.5.2. BDI-D₀

Ο επόμενος δείκτης, για τον οποίο εξετάζεται η συσχέτιση που προκύπτει με το συνήθη δείκτη D₀ είναι ο BDI. Η μεταξύ τους συσχέτιση προκύπτει από τη γραμμική παλινδρόμηση στην Εικόνα 8.18.

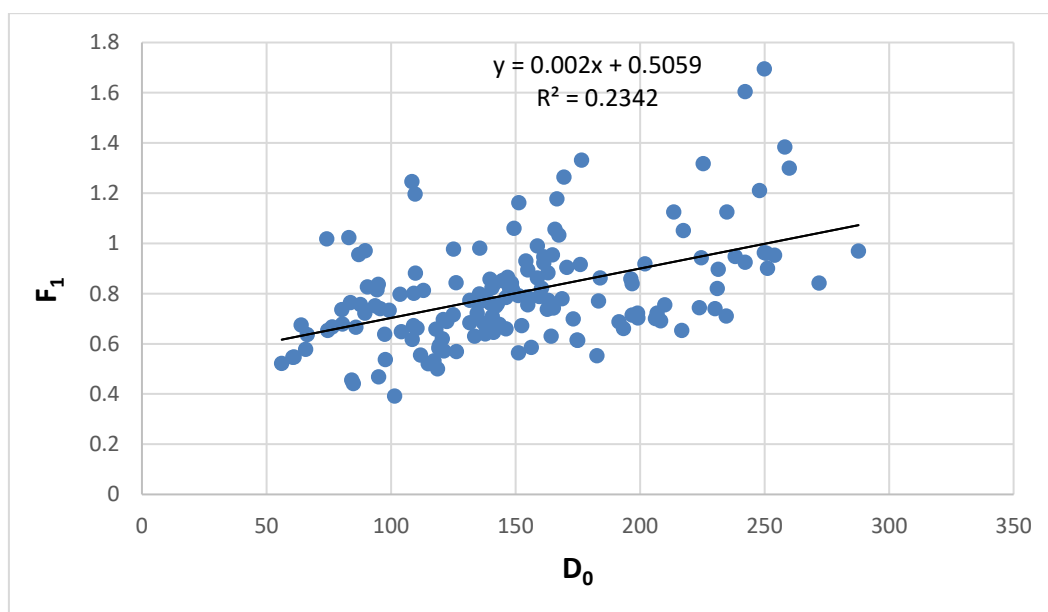


Εικόνα 8.18: Συσχέτιση του δείκτη BDI με το δείκτη D_0

Ο συγκεκριμένος δείκτης της στρώσης της βάσης/υπόβασης παρουσιάζει μία πολύ καλή συσχέτιση με το γενικό δείκτη δομικής κατάστασης, η οποία ανέρχεται σε 0,88.

8.6.5.3. F_1 - D_0

Για το δείκτη F_1 , όπως και σε προηγούμενους δείκτες με παρόμοιο υπολογισμό δεν αναμένεται κάποια καλή συσχέτιση με το δείκτη D_0 . Εντούτοις γίνεται η γραμμική παλινδρόμηση (Εικόνα 8.19), ώστε να διαπιστωθεί.

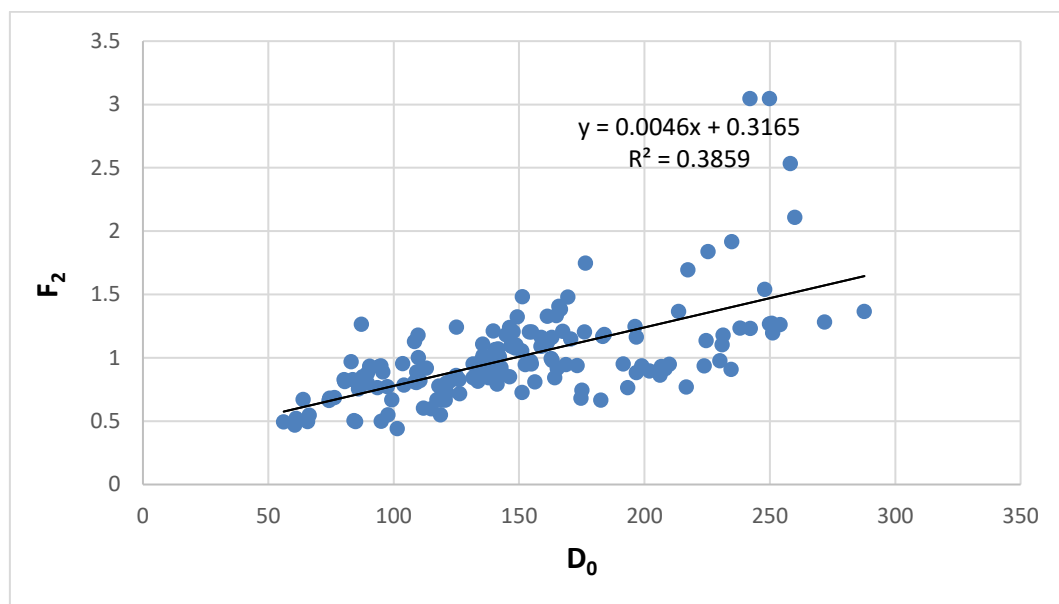


Εικόνα 8.19: Συσχέτιση του δείκτη F_1 με το δείκτη D_0

Πράγματι προκύπτει μία συσχέτιση κοντά στο 0,23, η οποία δεν είναι καθόλου ικανοποιητική.

8.6.5.4. F_2-D_0

Όπως και για τον προηγούμενο δείκτη, έτσι και αυτός, ο οποίος υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο, δεν αναμένεται καθόλου καλή συσχέτιση του δείκτη F_2 με το δείκτη γενικής κατάστασης D_0 . Η γραμμική παλινδρόμηση αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 8.20.

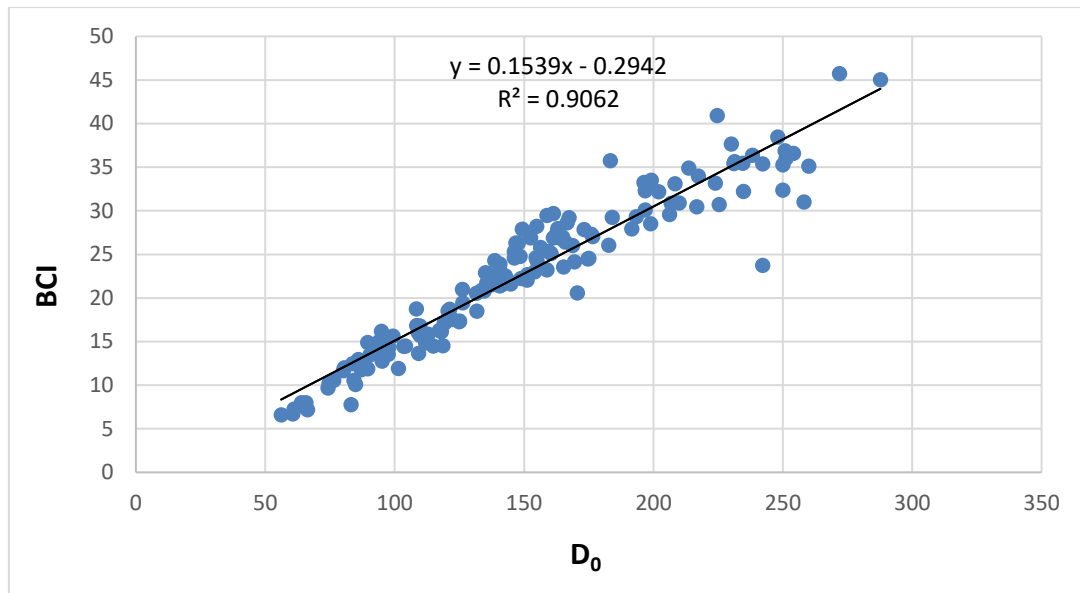


Εικόνα 8.20: Συσχέτιση του δείκτη F_2 με το δείκτη D_0

Ο δείκτης της στρώσης από αμμοχάλικα δεν παρουσίασε, όπως και αναμενόταν, ικανοποιητική συσχέτιση με το δείκτη D_0 , αφού το R^2 ισούται με 0,39.

8.6.5.5. $BCI-D_0$

Ο τελευταίος δείκτης βάσης/ υπόβασης είναι ο δείκτης BCI, ο οποίος και αυτός με τη σειρά του μπαίνει σε διαδικασία σύγκρισης με τον ευρέως αποδεκτό δείκτη D_0 . Στην Εικόνα 8.21 φαίνεται η γραμμική παλινδρόμηση των δύο δεικτών.



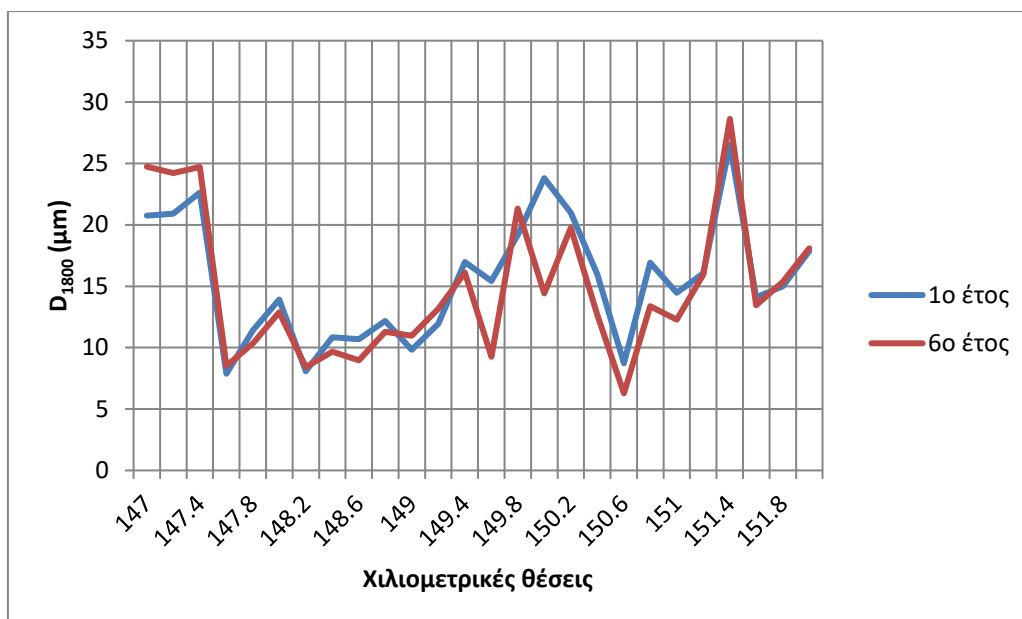
Εικόνα 8.21: Συσχέτιση του δείκτη BCI με το δείκτη D_0

Οι δύο δείκτες παρουσιάζουν μία πάρα πολύ καλή συσχέτιση, που σε προηγούμενους δείκτες δεν εντοπίστηκε κάτι αντίστοιχο. Η συσχέτιση R^2 που παρουσιάστηκε ισούται με 0,90, δηλαδή πολύ κοντά στη μονάδα.

8.7. Δείκτης D_{1800}

Στην τελευταία φάση ελέγχεται και το υπέδαφος του οδοστρώματος, το οποίο αποτελεί δύσκολο κομμάτι αποκατάστασης. Σε περίπτωση που η στρώση έδρασης είναι ανεπαρκής, δηλαδή έχουμε ένα σαθρό υπέδαφος, θα πρέπει να γίνει αφαίρεση ολόκληρου του οδοστρώματος και ανακατασκευή. Ο δείκτης που δείχνει την κατάσταση του υπεδάφους, όπως αναφέρθηκε, είναι ο D_{1800} , και συνίσταται να γίνεται αξιολόγησή του συμπληρωματικά με την αξιολόγηση των υπερκείμενων στρώσεων.

Μία πρώτη εικόνα από την εξέλιξη του δείκτη στην πάροδο του χρόνου φαίνεται στην Εικόνα 8.22. Ο δείκτης D_{1800} εμφανίζεται στο μεγαλύτερο τμήμα του οδοστρώματος μειωμένος το τελευταίο έτος.

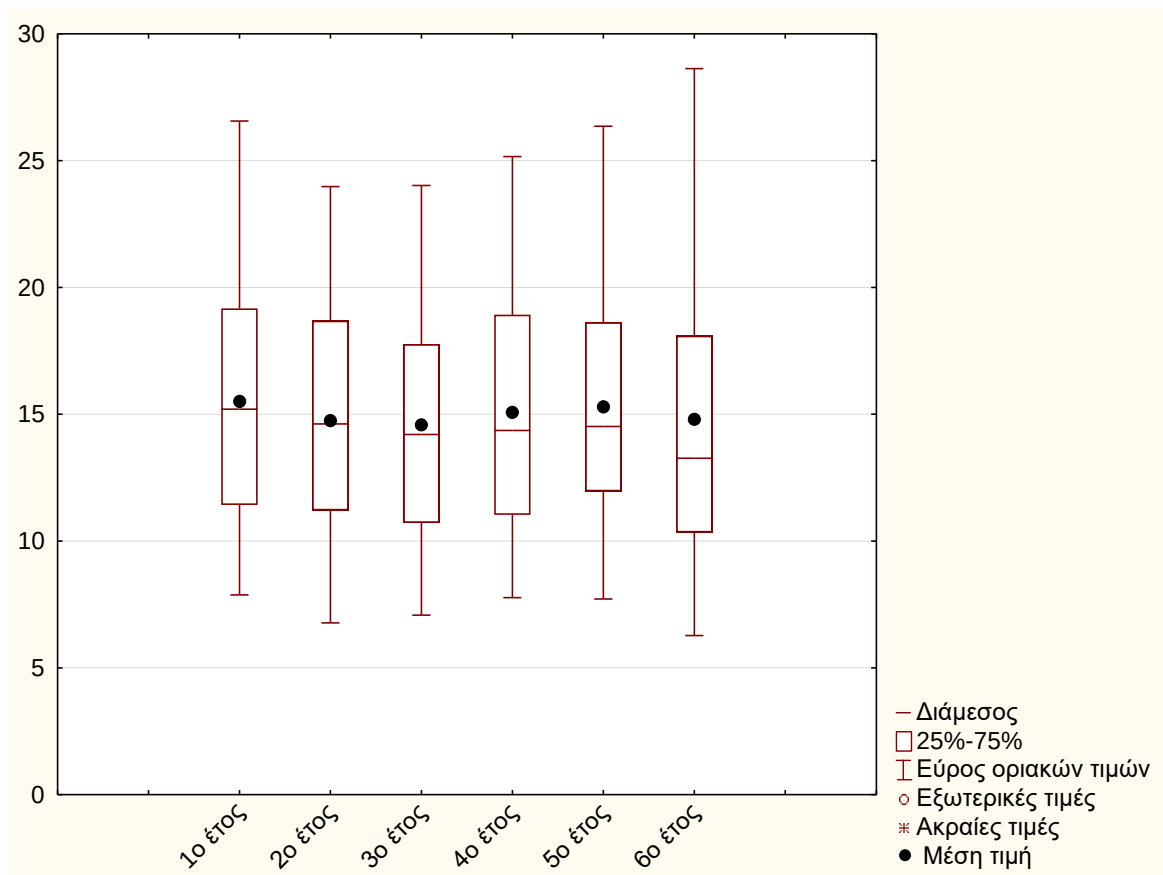


Εικόνα 8.22: Διάγραμμα μεταβολής του δείκτη D_{1800}

Για την καλύτερη κατανόηση και σύγκριση διεξάγεται η t-δοκιμασία για παρατηρήσεις κατά ζεύγη. Με $N=25(26-1)$ βαθμούς ελευθερίας και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ($\alpha=0.05$) προκύπτει το t_{theor} ίσο με 1,708 και t_{exp} ίσο με 1,263, με μέση τιμή 0,703 και τυπική απόκλιση 2,838. Αφού η τιμή του t_{exp} από τη τιμή του t_{theor} , δεν υπάρχει διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη D_{1800} μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους. Για περαιτέρω διερεύνηση της διαφοροποίησης αυτής ανά έτος και ανά χιλιομετρική θέση γίνεται το αντίστοιχο γράφημα (box plot) (Εικόνα 8.23).

Από το box plot παρατηρείται μία αύξηση του εύρους των τιμών και της διαφοράς της μέσης τιμής των μετρήσεων από τη διάμεσο. Σύμφωνα με το γράφημα, και τα δεδομένα αξιολόγησης του δείκτη D_{1800} λαμβάνουμε τα εξής συμπεράσματα:

Τις περισσότερες χρονιές σε μερικά σημεία το D_{1800} κυμαίνεται πάνω από $6\mu\text{m}$ και σε άλλα βρίσκεται στο διάστημα $25\text{-}37\mu\text{m}$. Την τρίτη χρονιά, κατά σειρά, ο δείκτης κυμαίνεται από $7,08\mu\text{m}$ ($<20\mu\text{m}$ και $>6\mu\text{m}$) έως και $24,02$ ($<25\mu\text{m}$ και $>20\mu\text{m}$). Την πρώτη χρονιά, 75% των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης D_{1800} δεν ξεπερνά τα $19\mu\text{m}$. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 19 και $27\mu\text{m}$, που είναι και το μέγιστο. Το έκτο έτος, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη D_{1800} , δεν ξεπερνά την τιμή $18\mu\text{m}$. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 18 και $28\mu\text{m}$.



Εικόνα 8.23: Γράφημα τύπου box plot του δείκτη D_{1800}

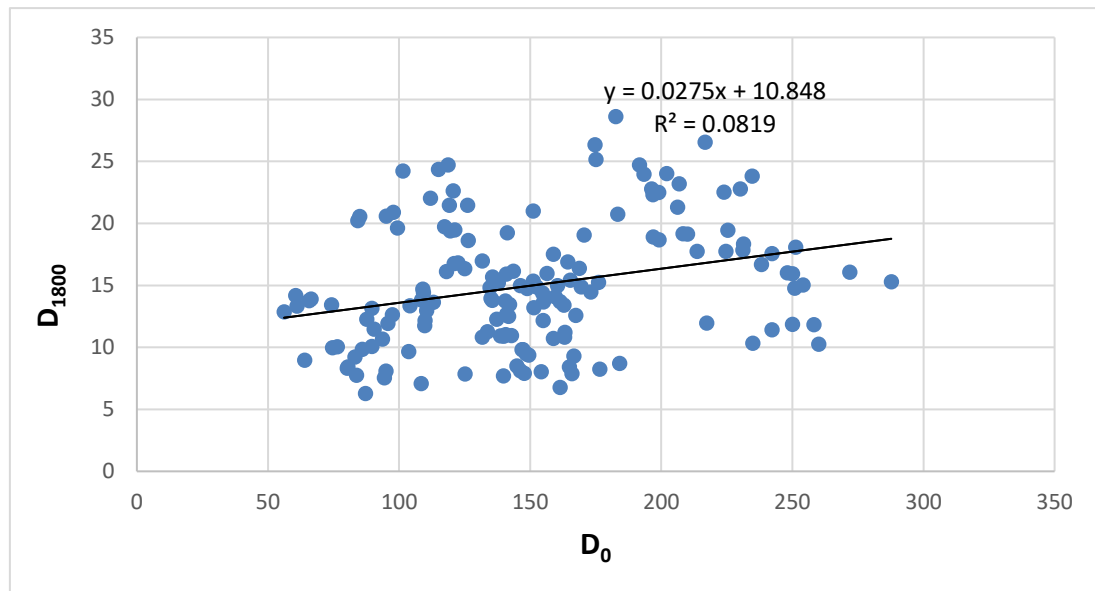
Στον Πίνακα 8.10 παρουσιάζονται χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για το δείκτη D_{1800} . Ένα από τα στοιχεία αυτά είναι ο συντελεστής διακύμανσης, ο οποίος δεν παρουσιάζει σημαντική αύξηση και κάθε χρονιά κυμαίνεται από 32% έως 40%.

Πίνακας 8.10: Στατιστικά στοιχεία του δείκτη D_{1800}

	1ο έτος	2ο έτος	3ο έτος	4ο έτος	5ο έτος	6ο έτος
Ελάχιστη τιμή	7,88	6,77	7,08	7,77	7,72	6,28
Μέγιστη τιμή	26,56	23,98	24,02	25,16	26,36	28,63
Μέση τιμή	15,50	14,75	14,58	15,08	15,30	14,80
Διάμεσος	15,20	14,62	14,20	14,36	14,52	13,26
Τυπική απόκλιση	5,04	4,72	4,74	4,92	5,04	5,90
Συντελεστής μεταβλητότητας cv	32,5%	32,0%	32,5%	32,6%	33,0%	39,9%

Συνοψίζοντας, ο δείκτης D_{1800} , που δείχνει την κατάσταση του υπεδάφους, παρουσιάζει σταθερή πορεία και ομοιογένεια κατά την πάροδο του χρόνου.

Τέλος, και ο δείκτης της στρώσης έδρασης συγκρίνεται με το γενικό δείκτη δομικής κατάστασης. Στην Εικόνα 8.24 φαίνεται η γραμμική παλινδρόμηση που έγινε μεταξύ των δεικτών.



Εικόνα 8.24: Συσχέτιση του δείκτη D_{1800} με το δείκτη D_0

Οι δύο αυτοί δείκτες δεν παρουσιάζουν μεταξύ τους καθόλου καλή σχέση, αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ισούται με 0,08.

9. Συμπεράσματα- προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη διερεύνηση των δεικτών δομικής κατάστασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων, οι οποίοι αναδείχθηκαν μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Με δεδομένο ότι οι υπόψη δείκτες βασίζονται στις ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος που καταγράφονται με το σύστημα FWD, η βιβλιογραφία κατέδειξε ότι οι πιο συνηθισμένοι δείκτες είναι ο D_0 , ο οποίος δείχνει τη γενική κατάσταση του οδοστρώματος και ο δείκτης SCI_{300} , ο οποίος εκφράζει τη δομική κατάσταση της ασφαλικής στρώσης.

Προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω όλοι οι δείκτες δομικής κατάστασης που καθορίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, για τον υπολογισμό των υπόψη δεικτών. Από την ανάλυση των δεικτών, μεμονωμένα αλλά και συγκριτικά προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Όσον αφορά στους δείκτες, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τη γενική κατάσταση οδοστρώματος, τη κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης παρατηρήθηκε για το συγκεκριμένο πειραματικό οδόστρωμα, ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των τιμών τους στο πέρασμα του χρόνου. Αντίθετα, όσον αφορά στη δομική αξιολόγηση της στρώσης βάσης/υπόβασης, προέκυψε ότι οι αντίστοιχοι δείκτες μεταβάλλονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Η διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει ότι η παρακολούθηση της εξέλιξης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος πρέπει να γίνεται με αξιοποίηση όλων των καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων.
- Από τη συγκριτική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι ορισμένοι δείκτες συσχετίζονται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα υψηλή συσχέτιση έχουν οι δείκτες SCI_{200} - SCI_{300} ($R^2=0,99$) και SCI_{600} -BDI ($R^2=0,96$), ενώ καλή συσχέτιση παρουσιάζουν οι δείκτες BCI-BDI ($R^2=0,79$) και F_1 - F_2 ($R^2=0,82$).
- Για όλους τους υπό διερεύνηση δείκτες, έγινε και συγκριτική ανάλυση με τον ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη δομικής αξιολόγησης D_0 . Από την ανάλυση αυτή, προέκυψε ότι ο δείκτης D_0 παρουσιάζει πολύ καλές συσχετίσεις, τόσο με τους δείκτες των ασφαλικών στρώσεων, δηλαδή με τους δείκτες SCI_{200} ($R^2=0,80$) και SCI_{300} ($R^2=0,85$), όσο και με τους δείκτες της βάσης/υπόβασης, δηλαδή με τους δείκτες SCI_{600} ($R^2=0,78$), BDI ($R^2=0,88$), BDI ($R^2=0,90$). Αντίθετα, ο δείκτης D_0 δεν συσχετίζεται με τον δείκτη D_{1800} ($R^2=0,08$), στοιχείο που υποδεικνύει ότι ο υπόψη δείκτης δεν δίνει πληροφορίες για τη στρώση έδρασης, τουλάχιστον στη περίπτωση όπου το συνολικό πάχος οδοστρώματος είναι μεγαλύτερο από περίπου 35 εκατοστά. Με άλλα λόγια, ο

δείκτης δομικής κατάστασης του οδοστρώματος D_0 αναμένεται ότι δεν θα δώσει κάποια ένδειξη σε περίπτωση αστοχίας της στρώσης έδρασης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι δεν αρκεί να διερευνούνται μόνο οι δείκτες D_0 και SCI_{300} , οι οποίοι εμφανίζονται να είναι οι πιο συνηθισμένοι δείκτες για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Θα πρέπει να αξιολογούνται και άλλοι δείκτες, οι οποίοι εμπεριέχουν στον υπολογισμό τους και άλλες ελαστικές υποχωρήσεις, προκειμένου να απεικονίζεται η συνολική κατάσταση του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης και της στρώσης έδρασης.

Κατόπιν τούτων, διαμορφώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα όσον αφορά στους δείκτες δομικής αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα:

- Τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης, τα οποία προέκυψαν από ένα πρώτο επίπεδο ανάλυσης (first level analysis) προτείνεται να συνδυαστούν με τα αποτελέσματα από ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης (second level analysis), τα οποία θα αφορούν στον ανάστροφο υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων με βάση τις ελαστικές υποχωρήσεις.
- Επιπλέον προτείνεται η επέκταση της παρούσας διερεύνησης σε άλλα οδικά τμήματα, με διαφορετικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία) ή διατομές ή διαφορετικό τύπο οδοστρώματος.

10. Βιβλιογραφία

- AASHTO, 1993. *Guide for Design for Pavement Structures*. American Association of the State Highway and Transportation Officials: Washington, DC..
- Aavik, A. & Talvik, O., 2008. *Use of FWD Measurement Data for Pavement structural evaluation and repair design*. Vilnis, Lithuania, Proceeding in the: 7th International Conference Environmental Engineering.
- Choummanivong, L. & Martin, T., 2010. *Predicting Structural Deterioration of Pavements at a Network Level – Interim Models*, Sydney, Australia: Austroads Publication No. AP-T159/10.
- Donovan, P. & Tutumluer, E., 2009. Falling Weight Deflectometer Testing to Determine Relative Damage in Asphalt Pavement Unbound Aggregate Layers. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2104, Issue:1, p. 12–23.
- European Asphalt Pavement Association, 2018. Available at: <https://eapa.org/what-is-asphalt/>.
- Gopalakrishnan, K., Sunghwan, K. & Halil, C., 2010. Non-destructive evaluation of in-place rehabilitated concrete pavements. *Journal of Civil Engineering and Management* , Vol. 16, Issue: 4, pp. 552-560.
- Hakim, B. & Brown, S. F., 2006. *Pavement Analysis Using the FWD: Practical Difficulties and Proposed Simplifications*. Quebec City, Canada, Proceeding in the: 10th International Conference on Asphalt Pavements.
- Horak, E., Emery, S. & Maina, J., 2015. *Review of Falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields*. Suncity South Africa, Proceeding in the: Asphalt Pavements Southern African (CAPSA).
- Kavussi, A., Abbasghorbani, M., Nejad, F. M. & Ziksari, A. B., 2017. A new method to determine maintenance and repair activitiew at networklevel Pavement Management ussing Falling Weight Deflectometer. *Journal of Pavement of Civil Engineering and Management*, Vol.: 23, Issue: 3, pp. 338-346.
- Molenaar, A., 2006. Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys. *Structural Design of Pavements*, CT 4860 (Part IV).
- Park, H. & Kim, R. Y., 2002. *Use of FWD multi-load data for pavement strength estimation*, North Carolina State University Raleigh, NC: Department of Civil Engineering.

- Pavement interactive, 2018.
Available at: <https://beta.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/fwd-area-parameter/>
- Pavement Interactive, 2018.
Available at: <http://www.pavementinteractive.org/deflection/>.
- Pierce, L. M., Bruinsma, J. E., Smith, J. K. D. & Wade, M. J., 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis and Interpretation*, Georgetown Pike, USA: U.S. Department of Transportation.
- Queensland Government, 2012. Pavement Rehabilitation Manual. *Transport and Main Roads*.
- Schnoor, H. & Horak, E., 2012. *Possible method of determining structural number for flexible pavements with the FWD*. Pretoria, South Africa, Proceeding in the: 31st Southern African Transport.
- Simonin, J.-M., Geffard, J.-L. & Horny, P., 2015. *Performance of Deflection Measurement Equipment and Data Interpretation in France*. Berlin, Germany, Proceeding in the: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015).
- Southgate, H. F., 1968. An Evaluation of Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and Its Relationship to Pavement Deflection. *Kentucky Transportation Center Research*.
- Stacks, D. L., 2018. *Pavement Manual*. Texas: Texas Department of Transportation.
- Tonkin & Taylor, 2012. Collection and Interpretation of Pavement Structural Parameters Using Deflection Testing. *Part I: Network Asset Management*.
- Transport Infrastructure Ireland, 2000. *Guidelines for the use of the Falling Weight Deflectometer in Ireland*. Ireland: National Roads Authority.
- Xu, B., Ranjithan, S. R. & Kim, Y. R., 2002. New Relationships Between Falling Weight Deflectometer Deflections and Asphalt Pavement Layer Condition Indicators. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1806, Issue: 1, pp. 48-56.
- Yoder & Witczak, 1975. *Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων*. Δεύτερη Έκδοση: Μόσχος Γκιούρδας.
- Zhang, Z., Murphy, M. R. & Peddibhotla, S., 2011. *Implementation Study of a Structural Index at the Network level*. Santiago, Chile, Proceeding in the: 8th International Conference on Managing Pavement Assets.

- Ευαγγελίδης, Δ., 2004. *Οδηγίες Συντήρησης Αυτοκινητοδρόμων*. Κύρια Συντήρηση Αυτοκινητοδρόμων, Εγνατία οδός Α.Ε.
- Καββαδάς, Μ. Ι., 2009. *Στοιχεία εδαφομηχανικής*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- Λοίζος, Α., 2012. *Η προστασία των Οδοστρωμάτων ως σύγχρονη Αντίληψη στην Οδοποιία*, Πανελλήνιο συνέδριο οδοποιίας: Βιβλιοθήκη Τ.Ε.Ε.
- Λοίζος, Α. & Πλατή, Χ., 2016. *Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων, Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων, Σημειώσεις μαθήματος*, Τόμος:Β, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1: Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών Ιου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	50,1	171	20,55	184,63	156,39	136,63	105,59	79,44	43,71	28,04	21,96	20,76
147,2	50,22	178	20,25	98,07	82,94	75,17	65,71	57,75	43,41	32,86	25,89	20,91
147,4	50,17	175	20,1	120,79	99,86	89,89	76,94	65,08	46,54	34,98	28,20	22,62
147,6	50,14	173	20,03	165,94	127,74	105,31	75,89	54,75	28,32	15,86	9,17	7,88
147,8	50,33	164	19,88	241,80	174,55	127,46	70,83	37,35	13,61	12,12	12,32	11,42
148	49,61	173	19,58	66,01	53,52	47,87	40,92	35,58	28,42	20,96	14,51	13,91
148,2	50,08	176	19,43	94,25	74,48	63,50	51,22	41,13	24,96	14,88	9,98	8,09
148,4	50,26	175	19,28	161,56	129,92	110,53	83,37	64,07	36,11	19,00	12,83	10,84
148,6	50,07	164	19,21	92,67	73,30	63,91	53,82	44,64	29,76	19,87	14,08	10,69
148,8	50,5	176	19,06	153,07	124,85	109,41	88,32	70,50	42,28	26,24	16,73	12,18
149	50,35	175	18,91	144,79	117,78	98,51	77,66	59,58	33,27	18,97	12,51	9,83
149,2	50,21	171	8,039	83,95	69,41	60,35	48,30	39,33	25,39	18,22	14,64	11,95
149,4	50,05	164	8,153	115,88	99,10	86,31	70,53	56,84	38,36	27,27	21,08	16,98
149,6	49,93	172	8,324	145,30	121,37	105,25	84,12	67,19	43,66	28,64	20,23	15,42
149,8	50,33	169	8,609	183,79	156,07	137,19	110,97	89,01	55,93	36,16	25,53	19,17
150	50,19	168	8,666	207,11	176,53	152,72	123,73	98,63	63,16	41,84	32,48	23,81
150,2	50,24	169	8,84	133,66	116,24	105,69	88,87	74,14	51,75	36,52	26,97	21,00
150,4	49,8	178	8,95	138,15	121,49	108,94	90,46	74,40	48,59	32,23	22,29	15,96
150,6	50,42	165	9,008	163,13	132,78	113,45	86,97	65,35	36,10	20,43	12,20	8,73
150,8	49,96	166	9,12	145,72	125,70	111,89	92,07	75,26	48,44	32,03	22,42	16,91
151	50,46	171	9,18	153,49	132,18	114,65	91,66	73,42	45,58	28,74	19,22	14,47
151,2	50,42	173	9,29	241,17	204,88	172,85	129,51	95,70	49,98	28,96	20,43	16,07
151,4	50,07	171	9,35	192,43	163,07	143,80	118,73	98,46	68,00	47,63	34,95	26,56
151,6	50,36	177	9,46	141,68	119,84	102,46	79,23	60,96	35,64	22,93	17,18	14,10
151,8	50,05	171	9,52	142,66	118,98	101,50	77,42	59,24	34,17	23,28	17,68	14,99
152	50,14	175	9,63	205,52	172,02	145,69	112,88	86,06	50,66	31,51	22,74	17,85

Πίνακας Π2: Δείκτες δομικής κατάστασης, διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 1ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
1,007	183,34	536,59	223,65	1,024	27,57	1,022	46,99	0,870	105,19	57,19	0,770	35,73	1,170	20,758
1,003	97,75	622,99	90,55	1,011	14,97	1,010	22,68	0,883	40,32	17,42	0,536	14,34	0,550	20,908
1,001	120,63	592,70	123,73	1,004	20,84	1,004	30,77	0,872	55,71	24,82	0,620	18,54	0,666	22,623
1,000	165,87	464,96	240,63	1,001	38,14	1,001	60,56	0,817	111,19	50,56	1,056	26,43	1,406	7,878
0,999	242,17	362,92	432,89	0,995	67,60	0,995	114,87	0,764	204,45	90,11	1,604	23,74	3,048	11,425
0,995	66,37	593,82	67,38	0,982	12,73	0,984	18,44	0,863	30,44	12,30	0,636	7,16	0,547	13,908
0,993	94,94	522,78	118,51	0,975	20,27	0,978	31,44	0,837	53,12	22,36	0,836	16,17	0,937	8,087
0,991	163,04	507,73	211,25	0,969	32,65	0,972	52,49	0,842	97,49	46,46	0,882	27,95	1,161	10,844
0,990	93,58	549,57	108,25	0,967	20,04	0,970	29,64	0,845	48,03	19,27	0,752	14,88	0,765	10,685
0,988	154,90	544,02	181,63	0,960	29,41	0,964	45,30	0,857	82,57	38,91	0,755	28,22	0,952	12,178
0,986	146,79	512,04	187,24	0,953	28,33	0,958	48,28	0,840	85,20	38,93	0,865	26,32	1,095	9,831
0,877	95,68	551,60	97,49	0,622	23,37	0,658	35,86	0,859	44,61	21,01	0,739	13,94	0,889	11,950
0,880	131,72	570,26	127,37	0,630	26,65	0,665	44,45	0,872	59,04	29,47	0,684	18,48	0,844	16,983
0,879	165,22	551,10	168,99	0,627	38,16	0,663	60,44	0,862	78,11	38,05	0,742	23,53	0,917	15,422
0,882	208,30	564,89	205,30	0,635	43,64	0,670	69,52	0,873	94,77	48,18	0,691	33,08	0,913	19,173
0,883	234,56	559,81	234,86	0,637	48,01	0,672	80,94	0,869	108,49	54,09	0,710	35,47	0,908	23,810
0,884	151,16	611,73	128,43	0,640	27,21	0,675	41,45	0,895	59,51	31,55	0,563	22,39	0,728	20,999
0,883	156,39	600,87	137,75	0,636	26,19	0,671	43,54	0,894	63,76	34,54	0,585	25,80	0,811	15,964
0,886	184,04	512,01	210,98	0,646	46,94	0,681	72,96	0,848	97,78	48,10	0,862	29,25	1,184	8,727
0,887	164,26	585,16	152,92	0,648	30,88	0,682	49,57	0,884	70,46	36,63	0,630	26,82	0,843	16,914
0,887	173,12	562,14	172,86	0,646	32,98	0,680	57,10	0,873	80,06	41,22	0,698	27,84	0,941	14,467
0,887	271,86	515,13	309,40	0,647	56,10	0,681	100,31	0,858	145,48	77,15	0,842	45,72	1,284	16,065
0,888	216,70	580,70	204,81	0,650	45,19	0,684	71,13	0,874	93,97	45,34	0,653	30,46	0,770	26,563
0,888	159,58	533,78	172,95	0,648	33,70	0,682	57,49	0,862	80,72	41,50	0,788	25,32	1,096	14,098
0,889	160,39	523,95	178,82	0,653	36,23	0,687	59,89	0,856	83,42	42,26	0,822	25,07	1,137	14,985
0,890	231,02	525,25	256,73	0,653	51,29	0,687	87,09	0,854	119,47	59,63	0,820	35,40	1,104	17,850

Πίνακας Π3 :Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών 2ου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	50,1	171	13,100	157,285	129,142	107,884	80,639	59,780	39,222	28,643	21,856	19,062
147,2	50,24	178	13,280	87,779	75,438	69,865	62,600	55,036	42,297	32,245	26,971	20,601
147,4	50,08	175	13,360	110,124	94,449	84,465	72,384	60,903	43,830	32,648	25,759	21,466
147,6	49,85	173	13,440	152,558	122,066	102,006	76,128	55,266	28,285	16,048	11,033	8,425
147,8	50,29	164	13,483	239,312	183,635	138,298	83,416	47,922	16,902	12,229	12,428	11,831
148	50,1	173	13,564	60,878	50,299	44,611	38,423	35,130	27,146	20,060	16,667	13,772
148,2	50,31	176	13,645	87,458	68,475	59,730	47,903	38,760	23,653	14,808	9,640	7,553
148,4	50,05	175	13,686	137,662	110,390	95,005	73,427	57,642	32,867	19,281	12,687	9,491
148,6	50,19	164	13,767	79,896	66,547	58,677	49,113	40,845	27,894	19,526	13,549	9,863
148,8	49,96	176	13,807	151,521	124,500	107,686	86,169	68,355	40,733	24,319	15,312	11,209
149	50,33	175	13,888	136,797	110,769	95,271	74,508	57,421	32,585	18,776	12,219	9,835
149,2	50,05	171	13,929	102,198	80,919	68,332	53,546	41,958	26,274	17,982	14,086	12,188
149,4	50,4	164	14,010	112,798	93,948	82,143	67,956	55,556	37,698	26,984	20,833	16,766
149,6	50,35	172	14,051	144,091	117,974	101,688	80,933	64,052	39,424	25,621	18,471	14,399
149,8	50,29	169	14,132	185,723	158,381	137,701	111,354	88,884	55,379	35,395	24,359	18,692
150	50,05	168	14,335	215,185	183,117	157,542	125,375	98,701	61,039	40,260	29,570	22,777
150,2	50,68	169	14,380	132,103	112,372	99,842	82,676	67,680	46,172	32,459	24,270	19,238
150,4	50,21	178	14,457	125,871	105,756	91,416	74,089	59,849	39,036	26,588	19,418	14,838
150,6	50,21	165	14,538	151,265	123,581	103,366	76,379	55,965	29,078	15,435	9,560	6,772
150,8	50,35	166	14,578	158,193	129,891	112,115	89,275	70,904	44,886	29,394	21,152	16,385
151	50,29	171	14,659	152,714	129,151	112,150	89,083	69,994	42,454	25,949	17,697	13,422
151,2	50,29	173	14,699	269,934	218,731	180,255	132,631	95,248	50,209	28,534	19,288	15,311
151,4	50,46	171	14,871	181,827	152,398	134,661	112,069	92,945	63,615	43,500	31,510	23,979
151,6	50,46	177	14,822	145,561	119,600	99,881	76,001	56,282	32,006	20,809	16,052	13,674
151,8	50,21	171	14,903	165,604	134,037	111,930	83,748	63,135	35,849	23,999	18,522	15,236
152	50,05	175	14,984	224,176	179,121	149,051	111,788	82,917	46,553	28,771	20,579	16,683

Πίνακας Π4: Δείκτες δομικής κατάστασης, διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 2ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
0,922	170,56	507,20	205,94	0,747	37,67	0,773	63,89	0,843	97,50	48,10	0,904	20,56	1,149	19,062
0,923	95,10	649,15	73,40	0,749	16,47	0,775	23,12	0,898	32,74	14,83	0,469	12,74	0,501	20,601
0,924	119,15	605,71	108,03	0,753	20,82	0,778	32,96	0,883	49,22	23,56	0,583	17,07	0,667	21,466
0,925	164,88	487,08	209,98	0,756	40,32	0,782	64,68	0,834	97,29	46,74	0,954	26,98	1,334	8,425
0,927	258,18	394,04	403,61	0,762	73,05	0,787	128,33	0,789	191,39	90,38	1,384	31,02	2,533	11,831
0,927	65,70	609,84	58,88	0,760	13,92	0,785	20,72	0,866	25,75	9,48	0,577	7,98	0,497	13,772
0,927	94,35	528,41	108,33	0,761	24,94	0,786	35,28	0,841	48,70	20,97	0,815	15,11	0,931	7,553
0,928	148,42	518,47	175,07	0,763	35,75	0,788	54,17	0,845	80,02	37,36	0,842	24,78	1,078	9,491
0,930	85,93	576,06	86,27	0,771	17,32	0,795	26,69	0,867	39,05	17,83	0,666	12,95	0,754	9,863
0,929	163,16	538,87	182,40	0,766	35,26	0,791	55,45	0,855	83,17	39,33	0,772	27,62	0,980	11,209
0,930	147,16	520,59	173,01	0,769	33,83	0,793	52,35	0,848	79,38	37,85	0,833	24,84	1,092	9,835
0,930	109,83	512,32	132,07	0,772	27,55	0,796	42,54	0,834	60,24	26,37	0,882	15,68	1,002	12,188
0,932	121,00	566,36	125,45	0,778	24,22	0,802	38,24	0,864	57,24	26,59	0,697	17,86	0,800	16,766
0,932	154,67	536,11	174,78	0,776	33,66	0,799	53,06	0,853	80,04	37,64	0,787	24,63	0,972	14,399
0,933	199,10	560,73	210,03	0,780	35,06	0,803	59,81	0,871	96,84	48,82	0,703	33,51	0,926	18,692
0,935	230,14	549,79	251,20	0,787	40,76	0,809	71,24	0,866	116,48	58,84	0,739	37,66	0,978	22,777
0,935	141,23	582,86	139,65	0,788	25,05	0,810	39,83	0,878	64,42	32,16	0,645	21,51	0,793	19,238
0,935	134,60	557,04	143,90	0,786	25,58	0,809	42,61	0,863	66,02	31,57	0,722	20,81	0,875	14,838
0,937	161,35	494,83	204,29	0,795	34,84	0,816	58,67	0,842	95,30	47,40	0,922	26,89	1,327	6,772
0,938	168,69	539,64	190,02	0,795	35,58	0,817	56,39	0,854	87,29	41,21	0,779	26,02	0,948	16,385
0,938	162,80	549,51	178,42	0,796	29,61	0,817	49,63	0,867	82,72	42,16	0,738	27,54	0,996	13,422
0,938	287,70	484,09	374,23	0,796	64,30	0,818	109,66	0,834	174,69	85,01	0,969	45,04	1,365	15,311
0,940	193,37	578,01	195,15	0,803	36,65	0,824	57,26	0,870	88,88	41,72	0,660	29,33	0,764	23,979
0,939	154,99	504,83	191,74	0,799	32,50	0,820	55,71	0,843	89,28	43,60	0,894	24,28	1,206	13,674
0,941	176,06	499,61	221,02	0,804	39,27	0,825	65,09	0,838	102,47	48,80	0,915	27,29	1,205	15,236
0,941	238,21	491,58	305,19	0,805	55,96	0,826	90,99	0,832	141,26	66,13	0,948	36,36	1,236	16,683

Πίνακας Π5: Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών 3ου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	50,14	171	31,265	263,363	196,749	151,276	99,521	64,120	33,406	24,531	21,739	19,446
147,2	49,93	178	31,200	116,163	90,827	80,112	67,995	57,380	41,758	30,943	22,732	19,627
147,4	50,07	175	31,135	147,294	114,040	97,763	79,888	64,909	43,938	32,455	25,764	21,470
147,6	50,28	173	31,069	205,847	150,259	115,652	79,057	51,909	24,861	14,419	10,541	8,254
147,8	49,75	164	30,938	290,151	200,101	145,327	84,020	43,920	11,558	11,256	12,362	11,859
148	50,22	173	30,840	86,221	58,244	49,681	42,214	35,643	25,986	20,211	16,726	13,441
148,2	50,15	176	30,775	125,922	85,643	68,295	52,243	40,877	22,134	12,463	9,172	7,079
148,4	49,97	175	30,710	193,316	143,886	113,568	81,649	59,636	31,019	17,511	11,707	9,306
148,6	50,1	164	30,677	103,593	74,551	63,673	51,896	41,816	26,946	17,665	12,575	10,080
148,8	50,38	176	30,611	184,101	141,624	117,408	89,917	67,983	38,507	22,330	14,391	10,719
149	50,03	175	30,546	172,896	131,521	107,935	80,552	58,465	30,582	15,591	10,394	9,394
149,2	50,61	171	30,480	126,754	89,508	71,923	54,041	40,703	23,908	16,696	13,238	11,757
149,4	49,75	164	30,415	156,281	117,789	98,191	77,487	60,000	37,186	24,925	19,196	15,678
149,6	50,01	172	30,350	193,061	146,171	121,076	90,382	67,986	38,792	24,195	17,397	12,597
149,8	50,1	169	30,317	258,782	204,291	169,860	131,437	98,703	57,784	34,331	23,553	17,764
150	49,59	168	13,720	192,075	162,734	142,065	112,724	89,534	58,681	40,432	29,643	23,190
150,2	50,01	169	13,760	110,978	95,881	85,983	72,486	59,988	42,791	31,994	24,395	19,396
150,4	49,96	178	13,840	101,281	85,568	75,360	61,249	50,641	34,628	24,720	18,715	14,712
150,6	49,9	165	13,960	137,575	116,333	99,399	75,752	56,914	30,661	17,234	10,721	7,916
150,8	50,28	166	14,040	131,364	112,868	99,045	81,643	66,030	43,059	29,037	20,684	15,911
151	50,38	171	30,186	185,590	144,601	120,981	93,886	71,060	41,385	25,407	17,666	13,696
151,2	49,93	173	30,056	284,899	215,502	168,236	117,264	81,314	42,860	25,936	18,726	16,022
151,4	50,17	171	29,960	231,613	175,603	148,395	119,095	95,276	63,086	43,552	31,294	24,018
151,6	50,7	177	29,890	173,570	131,755	105,128	73,077	51,479	28,797	19,428	15,286	13,215
151,8	50,35	171	29,830	193,942	140,318	110,526	76,961	54,320	30,189	21,748	18,073	14,896
152	50,43	175	29,760	244,398	188,777	148,424	103,312	77,434	42,534	26,472	20,920	17,747

Πίνακας Π6: Δείκτες δομικής κατάστασης, διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 3ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
1,169	225,33	414,39	426,31	1,618	41,17	1,543	72,62	0,787	199,24	87,16	1,317	30,71	1,838	19,446
1,170	99,30	559,01	132,03	1,623	15,61	1,549	23,28	0,845	58,78	22,73	0,734	15,62	0,668	19,627
1,168	126,13	526,07	183,59	1,615	20,59	1,541	32,14	0,832	82,38	32,85	0,843	20,97	0,829	21,470
1,166	176,54	412,32	334,63	1,608	34,57	1,535	58,77	0,781	153,94	63,74	1,331	27,05	1,749	8,254
1,161	249,94	351,65	530,35	1,587	56,76	1,515	95,58	0,750	246,23	101,41	1,694	32,36	3,046	11,859
1,162	74,20	492,09	117,23	1,593	17,57	1,522	24,01	0,788	50,58	14,04	1,018	9,66	0,665	13,441
1,162	108,38	436,46	194,57	1,592	25,30	1,521	37,88	0,771	85,04	27,42	1,245	18,74	1,129	7,079
1,160	166,59	442,86	294,58	1,587	31,15	1,517	52,59	0,794	133,68	53,93	1,177	28,62	1,384	9,306
1,156	89,57	494,51	140,02	1,570	18,50	1,501	26,60	0,807	61,78	21,86	0,970	14,87	0,878	10,080
1,159	158,84	483,48	255,61	1,582	26,86	1,512	44,11	0,819	116,12	49,42	0,989	29,48	1,161	10,719
1,158	149,36	465,26	250,55	1,576	26,25	1,507	43,10	0,812	114,43	49,47	1,060	27,88	1,323	9,394
1,155	109,71	444,86	192,30	1,567	23,77	1,499	36,59	0,784	86,05	31,22	1,196	16,80	1,180	11,757
1,152	135,65	489,36	213,92	1,553	24,78	1,486	39,09	0,814	96,28	38,19	0,981	22,81	1,017	15,678
1,153	167,38	473,93	274,20	1,560	30,07	1,492	48,23	0,814	125,07	53,09	1,033	29,19	1,210	12,597
1,152	224,64	494,83	349,50	1,554	35,07	1,487	59,80	0,828	160,08	71,16	0,942	40,92	1,135	17,764
0,929	206,81	557,56	219,25	0,767	38,24	0,792	63,17	0,870	102,54	52,53	0,722	30,85	0,931	23,190
0,929	119,46	602,43	110,08	0,768	19,66	0,792	31,55	0,887	50,99	25,99	0,593	17,20	0,720	19,396
0,929	109,05	574,51	109,89	0,766	20,50	0,791	32,79	0,872	50,64	24,72	0,672	16,01	0,804	14,712
0,932	147,68	524,29	172,29	0,776	27,36	0,800	47,73	0,861	80,66	42,48	0,811	26,25	1,208	7,916
0,932	140,91	576,15	141,81	0,778	23,77	0,802	40,32	0,877	65,33	33,02	0,660	22,97	0,848	15,911
1,150	161,33	493,88	251,24	1,548	26,48	1,482	43,59	0,826	114,53	49,92	0,947	29,67	1,120	13,696
1,149	248,01	435,34	441,27	1,542	45,01	1,477	78,98	0,795	203,59	86,92	1,210	38,45	1,542	16,022
1,147	202,00	506,48	303,82	1,533	36,53	1,469	56,63	0,820	136,34	53,12	0,919	32,19	0,895	24,018
1,147	151,33	445,57	262,92	1,536	27,22	1,472	46,49	0,803	122,09	53,65	1,161	22,68	1,483	13,215
1,144	169,47	428,34	304,92	1,525	35,16	1,462	57,05	0,785	139,62	56,21	1,263	24,13	1,479	14,896
1,144	213,58	453,35	363,87	1,525	36,47	1,463	65,61	0,804	166,96	70,99	1,125	34,90	1,367	17,747

Πίνακας Π7: Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών 4ου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	49,78	171	11,028	177,180	146,344	124,648	90,800	70,209	36,963	26,617	27,119	22,800
147,2	50,08	178	10,970	76,478	67,292	62,899	54,613	48,722	38,638	30,651	25,859	20,567
147,4	49,89	175	10,920	100,822	86,190	77,671	67,048	57,727	42,894	32,973	26,458	22,049
147,6	49,76	173	10,860	138,867	110,631	92,846	69,735	52,552	29,542	16,278	9,948	8,039
147,8	49,68	164	10,780	234,400	177,234	137,681	87,057	55,556	20,431	11,171	8,857	10,266
148	50,26	173	10,690	54,914	46,060	41,683	36,610	32,133	24,871	19,399	16,017	13,331
148,2	50,21	176	10,640	75,184	60,446	52,181	43,218	35,352	22,904	14,539	8,365	7,767
148,4	49,94	175	10,580	125,551	105,026	91,009	71,786	56,268	33,841	20,324	13,516	10,913
148,6	50,17	164	10,555	68,766	55,810	49,631	41,957	35,679	25,115	17,640	13,155	10,066
148,8	49,83	176	10,500	126,129	104,857	91,611	74,152	61,208	37,327	25,085	15,854	11,038
149	50,36	175	10,470	127,085	102,760	87,867	68,010	53,118	30,977	20,155	10,921	12,510
149,2	50,14	171	10,417	81,173	64,021	55,245	43,478	35,501	22,038	18,149	11,667	11,468
149,4	50,12	164	10,361	112,231	93,376	82,203	66,540	53,472	36,213	25,539	19,852	16,361
149,6	49,78	172	10,330	121,033	99,940	86,481	66,392	55,143	32,242	23,704	18,883	13,961
149,8	50,19	169	10,278	176,430	148,934	128,811	102,909	84,379	54,294	35,664	25,304	18,928
150	50,35	168	10,344	200,794	169,414	145,780	115,194	92,354	59,186	40,218	28,500	22,542
150,2	50,29	169	10,380	108,769	94,353	85,007	70,392	60,151	41,460	30,722	23,265	19,487
150,4	49,9	178	10,408	97,194	85,371	75,150	61,423	50,802	33,968	24,749	18,637	13,828
150,6	49,94	165	10,460	131,358	112,535	97,517	72,787	54,866	29,535	16,720	10,112	8,110
150,8	49,8	166	10,520	129,016	109,237	96,787	78,414	63,454	41,365	28,213	20,281	16,165
151	50,01	171	10,550	131,374	111,478	98,480	81,184	66,487	41,892	27,594	18,796	14,997
151,2	50,05	173	10,604	225,375	179,520	149,351	110,689	81,918	45,055	26,973	18,681	14,785
151,4	49,68	171	10,660	157,407	137,077	120,773	99,436	83,333	58,776	41,868	31,401	25,161
151,6	49,96	177	10,710	121,797	102,482	87,570	67,154	51,841	30,124	20,817	15,612	13,811
151,8	50,14	171	10,770	133,925	112,485	95,333	73,195	55,943	33,706	23,135	18,149	14,759
152	50,12	175	10,800	208,200	167,797	141,560	105,646	81,305	45,690	29,729	17,857	18,356

Πίνακας Π8: Δείκτες δομικής κατάστασης, διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 4ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
0,903	196,30	511,22	229,61	0,690	44,71	0,721	72,88	0,852	106,97	54,44	0,858	33,25	1,249	22,800
0,901	84,89	663,64	60,25	0,684	13,43	0,715	18,98	0,911	27,76	14,18	0,441	10,08	0,498	20,567
0,901	111,91	616,70	95,21	0,685	21,37	0,716	32,34	0,885	43,09	19,94	0,555	14,83	0,602	22,049
0,901	154,17	496,02	187,00	0,684	41,26	0,716	64,30	0,834	86,31	40,29	0,930	23,01	1,205	8,039
0,902	259,98	410,39	382,55	0,688	83,09	0,719	134,43	0,794	178,84	82,13	1,299	35,12	2,111	10,266
0,899	61,07	621,20	51,03	0,680	13,02	0,712	18,59	0,880	22,78	9,55	0,547	7,26	0,523	13,331
0,898	83,70	544,97	88,98	0,677	21,77	0,709	32,45	0,847	39,83	16,83	0,763	12,45	0,828	7,767
0,898	139,83	542,34	149,68	0,676	30,36	0,708	48,78	0,862	69,28	34,74	0,761	22,43	1,016	10,913
0,900	76,44	576,96	74,05	0,682	18,98	0,714	26,79	0,861	33,09	13,95	0,667	10,56	0,687	10,066
0,897	140,61	557,88	143,84	0,673	31,59	0,706	48,92	0,863	64,92	30,40	0,709	23,88	0,887	11,038
0,897	141,69	519,38	161,24	0,673	36,13	0,706	55,59	0,846	73,97	34,75	0,842	22,14	1,071	12,510
0,897	90,48	526,11	101,17	0,674	25,43	0,707	36,68	0,840	45,67	19,74	0,827	13,46	0,935	11,468
0,898	124,99	561,07	126,80	0,678	27,82	0,710	42,29	0,866	58,76	28,73	0,715	17,26	0,860	16,361
0,896	135,05	541,00	144,84	0,672	31,40	0,704	49,07	0,857	65,89	31,34	0,762	22,90	0,984	13,961
0,896	196,85	558,67	200,74	0,672	40,89	0,705	67,55	0,865	92,05	44,43	0,715	30,09	0,883	18,928
0,897	223,84	550,00	234,26	0,675	46,51	0,707	77,81	0,863	108,44	53,43	0,744	33,17	0,938	22,542
0,897	121,24	607,54	106,03	0,675	21,36	0,707	33,60	0,891	48,62	24,86	0,572	18,69	0,724	19,487
0,896	108,49	591,19	100,05	0,670	17,65	0,702	31,38	0,887	46,39	24,35	0,617	16,83	0,811	13,828
0,899	146,18	531,75	161,24	0,680	27,70	0,712	47,56	0,871	76,49	42,65	0,784	25,33	1,239	8,110
0,899	143,52	570,70	141,62	0,680	29,07	0,712	45,25	0,875	65,56	33,33	0,677	22,09	0,873	16,165
0,898	146,25	574,54	142,52	0,678	29,36	0,710	46,34	0,875	64,89	31,99	0,659	24,60	0,851	14,997
0,898	250,85	487,83	309,64	0,678	67,65	0,710	107,11	0,831	143,46	67,43	0,961	36,86	1,273	14,785
0,899	175,04	595,01	160,02	0,680	29,88	0,712	51,43	0,884	74,07	37,44	0,613	24,56	0,744	25,161
0,899	135,52	530,48	150,02	0,678	28,49	0,710	48,21	0,859	69,96	35,73	0,799	21,72	1,108	13,811
0,900	148,76	526,62	166,68	0,683	31,38	0,715	53,99	0,856	77,98	39,39	0,818	22,24	1,102	14,759
0,900	231,37	504,05	274,79	0,682	59,28	0,713	93,45	0,840	126,90	60,26	0,896	35,61	1,179	18,356

Πίνακας Π9: Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών 5ου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	49,71	171	9,630	175,216	146,751	123,215	92,336	71,817	39,529	28,063	23,537	22,330
147,2	49,68	178	9,609	74,879	65,519	60,588	52,536	47,303	36,735	31,904	24,155	20,229
147,4	49,69	175	9,600	102,234	88,448	81,304	69,531	59,972	45,482	35,420	29,684	24,351
147,6	49,9	173	9,614	124,349	100,701	87,174	65,631	49,699	26,954	15,431	9,719	7,715
147,8	49,32	164	9,649	193,836	155,819	127,433	88,301	59,915	25,953	15,815	13,179	11,963
148	50,05	173	9,684	53,946	43,856	40,260	35,664	31,968	25,275	20,180	15,085	14,186
148,2	49,82	176	9,809	71,457	58,210	50,783	41,951	34,123	22,481	14,653	10,438	8,330
148,4	49,89	175	9,823	117,358	95,610	83,083	66,346	53,117	32,572	20,245	13,931	10,824
148,6	50,15	164	9,837	66,600	53,938	48,554	41,276	34,895	24,726	17,448	12,861	9,970
148,8	49,62	176	9,844	125,655	103,688	91,999	75,574	61,870	40,004	25,393	17,029	12,696
149	49,83	175	9,858	123,620	102,649	86,293	67,730	56,994	32,711	19,767	7,425	10,937
149,2	50,1	171	9,879	78,244	63,573	55,289	44,611	36,427	24,251	17,365	14,072	12,275
149,4	49,96	164	9,886	109,388	91,073	80,464	65,352	53,943	36,429	26,321	20,616	16,813
149,6	49,83	172	9,900	100,843	80,674	69,436	55,388	44,451	28,597	21,573	16,155	13,646
149,8	49,85	169	9,907	187,462	155,567	135,306	107,523	85,256	54,363	35,507	24,273	19,157
150	50,01	168	9,928	177,764	150,570	131,674	104,479	82,683	54,189	37,592	28,394	22,496
150,2	49,93	169	9,948	112,858	96,034	88,224	72,001	62,688	43,261	33,247	23,233	18,626
150,4	49,68	178	9,963	98,531	82,729	74,074	59,883	49,517	33,414	23,450	17,512	12,983
150,6	50,15	165	9,977	111,864	87,836	73,180	54,038	40,379	23,031	15,454	11,067	7,876
150,8	49,89	166	9,984	123,271	106,334	94,307	77,070	63,039	41,191	27,861	19,142	15,234
151	49,82	171	9,998	136,291	117,724	103,272	80,891	66,841	39,944	27,298	18,466	14,853
151,2	49,89	173	10,030	226,999	179,495	151,233	110,844	82,983	46,402	29,665	16,536	15,033
151,4	50,08	171	10,060	156,150	130,591	117,113	98,942	84,165	59,704	45,028	34,545	26,358
151,6	49,8	177	10,074	125,502	102,309	88,153	67,470	53,012	31,627	19,679	15,161	13,755
151,8	49,97	171	10,081	141,985	114,469	97,659	75,645	57,835	34,621	23,314	17,511	17,511
152	49,78	175	10,095	216,452	175,171	146,143	107,674	81,258	45,902	28,927	20,591	17,577

Πίνακας Π10: Δείκτες δομικής κατάστασης, διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 5ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
0,890	196,79	517,77	223,24	0,656	43,40	0,690	75,41	0,852	103,40	51,40	0,839	32,29	1,165	22,330
0,889	84,24	655,85	60,94	0,651	14,38	0,685	20,87	0,905	27,58	13,29	0,455	10,57	0,504	20,229
0,889	114,95	631,30	91,57	0,653	21,12	0,686	30,49	0,898	42,26	21,33	0,520	14,49	0,597	24,351
0,890	139,74	512,73	160,52	0,654	36,14	0,688	54,04	0,851	74,65	37,47	0,856	22,75	1,212	7,715
0,892	217,34	460,04	284,27	0,661	57,49	0,695	95,58	0,829	133,92	67,52	1,051	33,96	1,694	11,963
0,890	60,58	621,94	50,00	0,656	15,38	0,689	19,85	0,873	21,98	8,29	0,546	6,69	0,469	14,186
0,891	80,20	553,65	82,50	0,657	20,17	0,690	29,95	0,855	37,33	16,66	0,735	11,64	0,829	8,330
0,891	131,67	539,80	140,91	0,658	33,06	0,691	49,59	0,854	64,24	29,97	0,773	20,55	0,951	10,824
0,893	74,54	581,59	70,69	0,666	19,03	0,699	25,83	0,865	31,70	13,66	0,653	10,17	0,683	9,970
0,891	140,98	565,12	140,27	0,658	33,40	0,691	48,70	0,866	63,78	30,13	0,693	21,87	0,840	12,696
0,892	138,65	537,42	149,41	0,659	31,84	0,692	53,95	0,849	66,63	29,30	0,772	24,28	0,940	10,937
0,892	87,67	548,15	91,77	0,662	22,17	0,695	33,03	0,853	41,82	18,86	0,756	12,18	0,852	12,275
0,894	122,38	568,57	120,85	0,667	27,47	0,700	41,33	0,868	55,44	26,52	0,689	17,51	0,816	16,813
0,892	112,99	531,34	123,92	0,662	30,49	0,695	45,21	0,844	56,39	24,98	0,812	15,85	0,919	13,646
0,893	209,90	546,47	220,91	0,664	48,06	0,697	74,85	0,861	102,21	50,05	0,755	30,89	0,949	19,157
0,893	198,96	557,48	202,96	0,665	40,90	0,698	66,04	0,870	95,08	48,99	0,722	28,49	0,937	22,496
0,893	126,32	608,65	109,60	0,665	25,31	0,698	35,31	0,891	50,17	25,54	0,569	19,43	0,717	18,626
0,892	110,46	577,17	106,03	0,659	23,97	0,692	35,32	0,876	49,01	24,56	0,662	16,10	0,821	12,983
0,894	125,07	485,43	154,59	0,668	35,97	0,701	55,18	0,827	71,49	32,80	0,977	17,35	1,242	7,876
0,894	137,84	583,05	130,24	0,668	25,37	0,700	41,35	0,883	60,23	31,27	0,639	21,85	0,843	15,234
0,893	152,54	568,41	150,64	0,664	27,94	0,697	47,34	0,879	69,45	36,43	0,672	26,90	0,947	14,853
0,893	254,08	490,20	310,08	0,664	71,55	0,697	108,72	0,833	144,02	68,25	0,952	36,58	1,263	15,033
0,894	174,66	594,05	159,25	0,666	38,38	0,699	55,86	0,875	71,98	32,95	0,615	24,46	0,682	26,358
0,893	140,52	525,24	156,78	0,662	35,01	0,695	53,70	0,851	72,49	35,14	0,822	21,39	1,066	13,755
0,894	158,78	515,12	182,16	0,666	41,29	0,699	63,39	0,844	84,15	39,82	0,862	23,21	1,090	17,511
0,894	242,22	496,98	290,78	0,664	62,15	0,697	100,86	0,838	135,19	64,89	0,925	35,36	1,234	17,577

Πίνακας Π11: Δεδομένα μετρήσεων και υπολογισμός δεικτών δου έτους (διορθωμένα σε φορτίο αναφοράς 50kN)

Station (Χ.Θ)	Force	H	T	D ₀ (μm)	D ₂₀₀ (μm)	D ₃₀₀ (μm)	D ₄₅₀ (μm)	D ₆₀₀ (μm)	D ₉₀₀ (μm)	D ₁₂₀₀ (μm)	D ₁₅₀₀ (μm)	D ₁₈₀₀ (μm)
147	50,14	171	6,529	165,935	143,398	126,346	100,618	79,079	51,157	35,201	29,418	24,731
147,2	50,35	178	6,552	87,686	78,947	73,188	65,740	58,987	47,071	37,934	28,302	24,230
147,4	49,97	175	6,561	102,662	89,854	81,449	71,143	61,937	47,428	37,022	30,018	24,715
147,6	50,47	173	6,570	125,421	103,923	88,171	66,079	50,327	28,730	17,040	11,294	8,520
147,8	50,28	164	6,584	203,858	160,402	131,364	86,913	56,086	23,866	13,027	11,834	10,342
148	50,07	173	6,602	48,632	41,542	37,148	33,054	29,259	22,668	17,775	15,578	12,882
148,2	50,46	176	6,611	69,659	58,363	51,229	42,509	34,879	22,889	15,161	10,801	8,423
148,4	50,17	175	6,616	89,695	73,151	62,886	49,831	39,565	25,115	16,743	12,358	9,667
148,6	50,19	164	6,625	55,489	45,129	39,849	33,772	28,591	20,622	14,844	11,257	8,966
148,8	50,08	176	6,644	115,715	98,742	88,259	73,283	60,104	39,237	26,058	17,372	11,282
149	50,58	175	6,671	123,665	101,522	87,584	70,285	57,236	34,698	20,957	13,246	10,973
149,2	50,15	171	6,675	77,667	64,108	55,633	45,464	37,488	25,623	18,544	14,855	13,161
149,4	50,26	164	6,685	102,567	87,346	76,602	62,575	52,129	36,013	26,263	19,897	16,116
149,6	50,31	172	6,694	72,053	54,860	44,524	33,592	26,535	18,784	14,808	11,429	9,243
149,8	50,19	169	6,703	178,920	150,926	131,799	107,392	86,571	56,983	38,155	27,595	21,319
150	49,9	168	6,712	94,790	77,555	65,832	52,104	42,084	28,457	21,844	17,735	14,429
150,2	50,38	169	6,722	101,826	90,214	81,382	68,777	58,555	42,279	30,965	24,514	19,750
150,4	50,24	178	6,740	84,395	72,154	63,893	52,647	43,690	30,155	21,497	16,023	12,639
150,6	50,19	165	6,749	75,712	61,068	50,508	37,657	27,496	15,740	10,062	7,870	6,276
150,8	50,47	166	6,754	90,450	77,670	68,159	56,073	46,265	31,801	23,083	17,139	13,374
151	50,46	171	6,763	119,104	101,764	89,180	72,632	58,264	36,762	23,781	16,350	12,287
151,2	50,46	173	6,768	216,805	173,008	143,282	105,034	78,775	43,500	27,051	19,520	15,953
151,4	50,12	171	6,777	158,520	138,667	124,002	105,148	90,084	64,046	47,885	36,612	28,631
151,6	50,17	177	6,786	123,181	103,847	90,094	71,357	55,611	33,885	22,723	16,743	13,454
151,8	50,12	171	6,800	131,185	109,737	94,174	73,224	56,564	34,517	23,543	18,356	15,363
152	50,28	175	6,813	217,880	178,500	148,667	112,967	84,029	48,031	30,430	22,176	18,099

Πίνακας Π12: Δείκτες και παράμετροι δομικής κατάστασης διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C, το 6ο έτος

TNF- D ₀	D ₀	AREA	AUPP	TNF- SCI ₂₀₀	SCI ₂₀₀	TNF- SCI ₃₀₀	SCI ₃₀₀	AI ₁	SCI ₆₀₀	BDI	F ₁	BCI	F ₂	D ₁₈₀₀
0,866	191,59	567,64	183,84	0,595	37,88	0,632	62,63	0,881	86,86	47,27	0,687	27,92	0,951	24,731
0,865	101,40	682,73	63,51	0,590	14,81	0,628	23,10	0,917	28,70	14,20	0,392	11,92	0,443	24,230
0,865	118,62	638,30	89,55	0,593	21,62	0,630	33,69	0,897	40,72	19,51	0,500	14,51	0,549	24,715
0,866	144,84	515,64	160,69	0,594	36,18	0,631	59,00	0,852	75,09	37,84	0,852	21,60	1,181	8,520
0,868	234,83	443,41	310,26	0,601	72,27	0,638	113,56	0,822	147,77	75,28	1,125	32,22	1,917	10,342
0,866	56,15	629,57	43,84	0,595	11,92	0,632	18,18	0,882	19,37	7,89	0,522	6,59	0,495	12,882
0,866	80,47	570,13	76,60	0,593	19,06	0,630	29,26	0,868	34,78	16,35	0,679	11,99	0,813	8,423
0,866	103,59	534,67	109,23	0,593	27,88	0,631	42,51	0,851	50,13	23,32	0,797	14,45	0,955	9,667
0,868	63,90	575,76	59,97	0,602	17,21	0,639	24,48	0,859	26,90	11,26	0,675	7,97	0,672	8,966
0,866	133,64	585,50	121,31	0,593	28,61	0,630	43,56	0,881	55,61	28,15	0,630	20,87	0,816	11,282
0,866	142,76	543,41	146,99	0,594	37,25	0,632	57,14	0,854	66,43	30,35	0,758	22,54	0,924	10,973
0,867	89,57	559,18	88,24	0,597	22,70	0,634	34,73	0,858	40,18	18,15	0,722	11,86	0,801	13,161
0,869	118,05	579,19	109,68	0,603	25,24	0,640	40,57	0,873	50,44	24,47	0,658	16,12	0,779	16,116
0,867	83,10	484,97	99,68	0,597	28,80	0,634	43,42	0,809	45,52	17,99	1,022	7,75	0,970	9,243
0,868	206,18	563,92	200,44	0,599	46,71	0,636	74,04	0,868	92,35	45,23	0,701	29,59	0,864	21,319
0,868	109,19	536,58	114,83	0,600	28,71	0,637	45,44	0,847	52,71	23,75	0,801	13,63	0,888	14,429
0,868	117,32	624,56	93,49	0,600	19,36	0,637	32,11	0,900	43,27	22,83	0,532	16,28	0,668	19,750
0,866	97,44	586,03	88,33	0,593	20,63	0,631	32,51	0,879	40,70	20,20	0,637	13,54	0,772	12,639
0,869	87,12	490,26	103,41	0,603	24,28	0,640	39,37	0,834	48,22	23,01	0,955	11,76	1,264	6,276
0,869	104,10	582,26	95,80	0,603	21,21	0,640	34,86	0,877	44,18	21,89	0,648	14,46	0,786	13,374
0,868	137,25	567,68	131,94	0,599	28,96	0,636	47,06	0,874	60,84	30,92	0,682	21,50	0,900	12,287
0,867	249,95	487,36	298,21	0,597	73,31	0,635	115,87	0,830	138,03	64,51	0,963	35,28	1,267	15,953
0,868	182,65	615,76	150,19	0,599	33,14	0,636	54,26	0,891	68,44	33,92	0,552	26,04	0,666	28,631
0,867	142,13	546,12	145,31	0,595	32,50	0,632	52,35	0,866	67,57	34,48	0,750	21,73	1,011	13,454
0,868	151,13	534,18	159,97	0,599	35,78	0,636	58,15	0,859	74,62	37,61	0,792	22,05	1,055	15,363
0,867	251,22	503,47	287,99	0,597	65,99	0,634	109,20	0,841	133,85	64,64	0,900	36,00	1,198	18,099