



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΩΝ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ
ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΙ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



ΒΑΖΕΛΑΚΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια καθηγήτρια

Νοέμβριος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά την κα. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας και ειδικότερα για την συνολική καθοδήγηση, την αμέριστη βοήθεια με συμβουλές, κατευθυντήριες γραμμές και σημαντικές υποδείξεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την κα. Claudia Podolski, Διδάκτορα του Τομέα Σχεδιασμού και Κατασκευής Οδοστρωμάτων του Ερευνητικού Ινστιτούτου BAST της Γερμανίας, για την ειλικρινή βοήθειά της να βρω στοιχεία πεδίου και πληροφορίες απαραίτητες για την διπλωματική μου καθώς και την κα Δρ. Καλλιόπη Αναστασιάδου η οποία ενεργώντας ως συνδεδετικός κρίκος με έφερε σε επαφή και προώθησε το αίτημα μου στο συγκεκριμένο τμήμα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη συνολική της υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τους φίλους μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης ενός οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς του μέσω της αξιολόγησης της δομικής κατάστασής του. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί τα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) εκ των οποίων το επικρατέστερο εδώ και αρκετές δεκαετίες, είναι το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) για την στατική καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος υπό την επιβολή παλμικού φορτίου. Ωστόσο, τα τελευταία 10 χρόνια έχει αναπτυχθεί το Παραμορφωσίμετρο Ταχείας Κυκλοφορίας (Traffic Speed Deflectometer: TSD), το οποίο δίνει τη δυνατότητα συνεχών μετρήσεων των ελαστικών υποχωρήσεων σε συνήθη ταχύτητα κυκλοφορίας. Δεδομένων τούτων, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συγκριτική διερεύνηση των δύο συστημάτων (FWD και TSD) στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Η σύγκριση αυτή, πέραν των τεχνικών προδιαγραφών και των δυνατοτήτων των υπόψη συστημάτων, περιλαμβάνει την αξιολόγηση υφιστάμενων μεθόδων συσχέτισης των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων καταγραφής, καθώς και τη διαμόρφωση πίνακα κατάταξης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος, αξιοποιώντας διαθέσιμα στοιχεία ελαστικών υποχωρήσεων μετρημένων με το σύστημα TSD. Τα αποτελέσματα των σχετικών αναλύσεων οδήγησαν στη διαμόρφωση συστάσεων όσον αφορά στη μετάβαση από το σύστημα FWD στο σύστημα TSD.

Λέξεις κλειδιά: οδόστρωμα, φέρουσα ικανότητα, δομική κατάσταση, δείκτες, FWD, TSD, ταχύτητα παραμορφώσεων, αισθητήρες τεχνολογίας Doppler, ελαστικές υποχωρήσεις, μέθοδοι συσχέτισης

ABSTRACT

Within the framework of pavement maintenance management, the estimation of the bearing capacity of the pavement through the assessment of its structural condition is considered absolutely essential. To this end, Non-Destructive Testing Systems (NDT) have been developed, among which the most prevailing over several decades is the Falling Weight Deflectometer (FWD), a static device used for measuring pavement deflections under impulse loading. However, in the past decade another system known as Traffic Speed Deflectometer (TSD), which has the ability to carry out continuous measurements at normal traffic speed, has been developed. Therefore, the main objective of the present diploma thesis is the comparative investigation of FWD and TSD systems within the context of structural evaluation of flexible pavements. This comparison, apart from the technical specifications and capabilities of the widely-known systems, includes the evaluation of the existing correlation methods of the central measured deflections as well as the drawing of a pavement structural condition classification table by making good use of the available data derived from the TSD system. The results of the related analysis have led to recommendations regarding the transition from FWD to TSD systems.

Key words: pavement, bearing capacity, structural condition, indexes, FWD, TSD, deflection velocity, Doppler lasers, deflections, correlation methods

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο.....	1
1.2	Στόχος διπλωματικής	2
1.3	Δομή εργασίας	3
2.	ΠΑΡΑΡΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ (FWD).....	5
2.1	Γενικά στοιχεία.....	5
2.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας.....	8
2.2.1	Τρόπος λειτουργίας.....	8
2.2.2	Επιμέρους στοιχεία	10
2.2.3	Ανάπτυξη FWD ταχείας λειτουργίας.....	17
2.3	Στοιχεία καταγραφής	18
2.4	Δείκτες δομικής κατάστασης (FWD)	19
2.4.1	Γενικά	19
2.4.2	Δείκτης D_0 (FWD).....	20
2.4.3	Δείκτης SCI (FWD).....	23
2.4.4	Άλλοι δείκτες	23
2.4.5	Κριτήρια αξιολόγησης βάσει δεικτών	26
2.5	Αξιολόγηση δομικής επάρκειας οδοστρώματος.....	29
2.5.1	Μηχανική συμπεριφορά οδοστρώματος.....	29
2.5.2	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού	30
3.	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (TSD)	33
3.1	Γενικά στοιχεία.....	33
3.2	Χαρακτηριστικά λειτουργίας.....	35
3.2.1	Τρόπος λειτουργίας.....	35
3.2.2	Επιμέρους στοιχεία	38
3.3	Διαδικασία μετρήσεων	40
3.3.1	Βασική αρχή	40
3.3.2	Επεξεργασία μετρήσεων	41
3.4	Υπολογισμός ελαστικών υποχωρήσεων	44
3.4.1	Μέθοδος Rasmussen.....	44
3.4.2	Μέθοδος AUTC (Area Under the Curve)	46
3.4.3	Άλλοι μέθοδοι	47

3.5	Δείκτες δομικής κατάστασης (TSD).....	48
3.5.1	Δείκτης D_0 (TSD)	48
3.5.2	Δείκτης SCI (TSD)	51
3.5.3	Δείκτης DSI	55
3.6	Σχεδιασμός για την ενίσχυση (εύκαμπτου) οδοστρώματος.....	56
3.6.1	Δομική επάρκεια και απαιτούμενη επίστρωση	56
3.6.2	Προσδιορισμός δείκτη SN	57
3.6.3	Προσδιορισμός υφιστάμενου δείκτη SN_{eff}	58
3.6.4	Εντοπισμός δομικά ανεπαρκών τμημάτων.....	60
3.7	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού	61
3.7.1	Περιορισμοί.....	61
3.7.2	Μέθοδος ταχύτητας.....	61
3.7.3	Μέθοδος ελαστικών υποχωρήσεων	63
3.7.4	Ανάστροφος υπολογισμός με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου	64
4.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ TSD-FWD.....	67
4.1	Βασικά χαρακτηριστικά.....	67
4.2	Μέθοδοι συσχετισμού	68
4.3	Καθορισμός κριτηρίων αξιολόγησης	72
5.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	79
5.1	Γενικά	79
5.2	Διαχωρισμός οδικών τμημάτων.....	80
5.3	Υπολογισμοί D_0 (FWD)	85
5.3.1	Εφαρμογή μεθόδων υπολογισμού	85
5.3.2	Κατάταξη μεθόδων.....	89
6.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	92
6.1	Σύγκριση μεθόδων ανά δύο.....	92
6.1.1	Προσδιορισμός αποκλίσεων	92
6.1.2	Αξιολόγηση ως προς τα όρια κατάταξης.....	96
6.2	Σύγκριση μεθόδων με θεώρηση μέσων τιμών των αποτελεσμάτων	103
6.2.1	Προσδιορισμός ποσοσטיαίων αποκλίσεων	103
6.2.2	Επαναξιολόγηση αποτελεσμάτων	107
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	113
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Dynatest 8000 FWD.....	5
Εικόνα 2.2: Περιγραφή μέτρησης FWD.....	6
Εικόνα 2.3: Περιγραφή φόρτισης.....	6
Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση προκαλούμενων παραμορφώσεων του οδοστρώματος εξαιτίας της παλμικής φόρτισης του FWD συναρτήσει του χρόνου	7
Εικόνα 2.5: Αξονικά φορτία σχεδιασμού στην Ευρώπη	7
Εικόνα 2.6: Κυκλικός δίσκος FWD	9
Εικόνα 2.7: Αποστάσεις γεωφώνων FWD	9
Εικόνα 2.8: Ρυμουλκούμενο FWD.....	10
Εικόνα 2.9: Πλαίσιο ρυμούλκησης FWD	10
Εικόνα 2.10: FWD ενσωματωμένο σε όχημα.....	10
Εικόνα 2.11: Δύσκαμπτο υποπλαίσιο τοποθετημένο πάνω στο ρυμουλκούμενο	11
Εικόνα 2.12: Σύστημα οδηγών-σύνδεση υποπλασίου με το τρέιλερ	11
Εικόνα 2.13: Υδραυλικός κύλινδρος συνημμένος στην πλάκα κρούσης	12
Εικόνα 2.14: Σύστημα πίπτοντος βάρους	12
Εικόνα 2.15: Μάζα στο σύστημα πίπτοντος βάρους	13
Εικόνα 2.16: Σύνδεση πλάκας κρούσης με δυναμοκυψέλη και κυκλικό δίσκο	13
Εικόνα 2.17: Κάτω όψη Δυναμοκυψέλης	14
Εικόνα 2.18: Σύνδεση Δυναμοκυψέλης με Κυκλικό Δίσκο	14
Εικόνα 2.19: Συστατικά στοιχεία του geophone holder	15
Εικόνα 2.20: Διάταξη γεωφώνων (geophones).....	15
Εικόνα 2.21: Γεώφωνο (Geophone)	16
Εικόνα 2.22: Εξωτερική κάμερα σε FWD ενσωματωμένο σε όχημα	16
Εικόνα 2.23: Dynatest 8012 Fast FWD	17
Εικόνα 2.24: Μέτρηση θερμοκρασίας: (1) αέρα, (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) ασφαλτικών στρώσεων	18
Εικόνα 2.25: Υπολογισμός επιθυμητού μέτρου E_o^*	30
Εικόνα 2.26: Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)	31
Εικόνα 3.1: TSD system	33
Εικόνα 3.2: Δύσκαμπτη δοκός TSD.....	35
Εικόνα 3.3: Αισθητήρας λέιζερ τεχνολογίας Doppler ανάμεσα στο διπλό τροχό	36
Εικόνα 3.4: Σκαρίφημα του πρωτοτύπου TSD	36
Εικόνα 3.5: TSD 4 αισθητήρων τεχνολογίας Doppler (HSD)	37
Εικόνα 3.6: TSD MESAS του BAST (11 αισθητήρες Doppler και γεωραντάρ)	37
Εικόνα 3.7: Τυπική διαμόρφωση TSD (7 αισθητήρες τεχνολογίας Doppler).....	38
Εικόνα 3.8: Μετατόπιση Doppler	41
Εικόνα 3.9: Υπολογισμός κλίσης εκτροπής του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (slope of deflection bowl)	42
Εικόνα 3.10: Σχέση ταχυτήτων ελαστικών υποχωρήσεων-ελαστικών υποχωρήσεων-κλίσεως εκτροπής.....	43
Εικόνα 3.11: Σχέση μεταξύ ελαστικής υποχώρησης (deflection), κλίσης εκτροπής (deflection slope) και προφίλ ελαστικών υποχωρήσεων (deflection basin).....	43

Εικόνα 3.12: Μέθοδος AUTC.....	47
Εικόνα 3.13: Αξιολόγηση σχετικής φέρουσας ικανότητας	50
Εικόνα 3.14: Απώλεια δομικής επάρκειας συναρτήσει του χρόνου και της κυκλοφορίας....	57
Εικόνα 3.15: Διάταξη μεταφοράς φορτίου του TSD: (α) Ανομοιόμορφη πίεση επαφής ελαστικών, φορτίο = 5.565 lb / ελαστικό (b) Θέσεις αισθητήρων λείζερ του TSD στο μέσον του διπλού τροχού	62
Εικόνα 3.16: Ισοδύναμα ομοιόμορφα κυκλικά φορτία και θέσεις ελαστικών υποχωρήσεων (α) μονό κυκλικό φορτίο and (b) διπλό κυκλικό φορτίο	64
Εικόνα 3.17: Γενική μορφή τεχνητού νευρωνικού δικτύου ANN	65
Εικόνα 3.18: Μέθοδος ανάστροφου υπολογισμού με τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN)	66
Εικόνα 4.1: Σύγκριση μεθόδων NZTA.....	71
Εικόνα 4.2: Σύγκριση ορίων D_0 (TSD)	77
Εικόνα 5.1: Αυτοκινητόδρομος A81	79
Εικόνα 5.2: Διαχωρισμός Τμήματος 1 σε ομογενή-ως προς τη θερμοκρασία-υποτμήματα..	82
Εικόνα 5.3: Διαχωρισμός Τμήματος 2 σε ομογενή-ως προς τη θερμοκρασία-υποτμήματα..	83
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μέσου όρου SCI	85
Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 1Α) ($T=26,2^{\circ}\text{C}$)	87
Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 1Β) ($T=26,7^{\circ}\text{C}$)	87
Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 2Α, $T=25,7^{\circ}\text{C}$).....	88
Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 2Β, $T=24,3^{\circ}\text{C}$).....	89
Εικόνα 6.1: Αποτελέσματα RMSE των επιμέρους τμημάτων του T2A.....	99
Εικόνα 6.2: Απεικόνιση τιμών D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 1Α	104
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση τιμών D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 1Β.....	104
Εικόνα 6.4: Απεικόνιση τιμών D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 2Β.....	106
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση τιμών D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 2Α	106
Εικόνα 6.6: Απεικόνιση D_0 (TSD), D_0 (FWD) και ευθείας $y=x$, Τμήμα 2Α.....	108
Εικόνα 6.7: Απεικόνιση D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 1Α (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	109
Εικόνα 6.8: Απεικόνιση D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 1Β (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	109
Εικόνα 6.9: Απεικόνιση D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 2Β (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	111
Εικόνα 6.10: Απεικόνιση D_0 (TSD)- D_0 (FWD), Τμήμα 2Α (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	111

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συγκριτική απόδοση Dynatest 8021 FastFWD με Dynatest 8000 FWD.....	17
Πίνακας 2.2: Τιμές σταθερών.....	21
Πίνακας 2.3: Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας K_t	22
Πίνακας 2.4: Συνοπτική παρουσίαση δεικτών δομικής κατάστασης	25
Πίνακας 2.5: Κατάταξη δομικής κατάστασης οδοστρώματος κατά Horak & Emery	26
Πίνακας 2.6: Χαρακτηρισμός οδοστρώματος βάσει των συντελεστών D_0 και SCI (microns)	27
Πίνακας 2.7: Χαρακτηρισμός ολικής κατάστασης οδοστρώματος σύμφωνα με το δείκτη D_0 κατά Hakim & Brown.....	27
Πίνακας 2.8: Χαρακτηρισμός ασφαλικών στρώσεων σύμφωνα με το δείκτη SCI.....	28
Πίνακας 2.9: Χαρακτηρισμός Στρώσης Έδρασης σύμφωνα με το κριτήριο D9	28
Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη D_0	50
Πίνακας 3.2: Υπάρχουσα όρια D_0 (FWD) (40KN) κατά Manoharan (2018).....	51
Πίνακας 3.3: Παράμετροι μοντέλου SAM	53
Πίνακας 3.4: Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη SCI (μm)	55
Πίνακας 3.5: Χαρακτηρισμός κατάστασης οδοστρώματος σύμφωνα με το δείκτη DSI (μm)	56
Πίνακας 3.6: Χαρακτηρισμός υφιστάμενου οδοστρώματος σύμφωνα με το ποσοστό απώλειας του δείκτη SN.....	60
Πίνακας 4.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών των συστημάτων FWD και TSD	68
Πίνακας 4.2: Διαμόρφωση ορίων D_0 (TSD) κατά Austroads (2014).....	73
Πίνακας 4.3: Όρια D_0 (TSD) κατά Austroads (2014)	73
Πίνακας 4.4: Διαμόρφωση ορίων D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016).....	74
Πίνακας 4.5: Όρια D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016)	74
Πίνακας 4.6: Όρια D_0 (TSD) κατά Chai et al (2016)	75
Πίνακας 4.7: Όρια D_0 (TSD) κατά NZTA (2017).....	75
Πίνακας 4.8: Όρια D_0 (TSD) κατά Manoharan (2018)	76
Πίνακας 4.9: Σύγκριση ορίων D_0 (TSD)	76
Πίνακας 4.10: Όρια D_0 (TSD)	76
Πίνακας 5.1: Στοιχεία T1A	82
Πίνακας 5.2: Στοιχεία T1B	83
Πίνακας 5.3: Στοιχεία T2A	84
Πίνακας 5.4: Στοιχεία T2B	84
Πίνακας 5.5: Υπολογισμός SCI.....	85
Πίνακας 5.6: Χαρακτηρισμός οδοστρώματος υποτμήματος T2A.....	85
Πίνακας 5.7: Σχέσεις περιγραφής μεθόδων συσχέτισης των D_0 (FWD) (μm) και D_0 (TSD) (μm) για φορτίο εφαρμογής 50 kN.....	90
Πίνακας 5.8: Σημεία τομής.....	90
Πίνακας 5.9: Κατάταξη μεθόδων ως προς D_0 (FWD) (50kN)	91
Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα RMSE για το 1 ^ο τμήμα	92
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα RMSE για το Τμήμα 2B (T2B).....	93
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα RMSE για το Τμήμα 2A (T2A)	93
Πίνακας 6.4: Ερμηνεία αποτελεσμάτων για το Τμήμα 2	94

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικές τιμές για τα τμήματα 1 και 2.....	95
Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα RMSE για τα τμήματα 1 και 2.....	95
Πίνακας 6.7: Κατάταξη μεθόδων ως προς RMSE.....	96
Πίνακας 6.8: Αναλυτική κατάταξη σημείων υποτμήματος 2A (T2A).....	97
Πίνακας 6.9: Υπολογισμός του RMSE των μεθόδων για τα επιμέρους τμήματα του T2A	98
Πίνακας 6.10: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T1' στο T2'	100
Πίνακας 6.11: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T2' στο T3'	100
Πίνακας 6.12: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T3' στο T4'	100
Πίνακας 6.13: Κατάταξη μεθόδων για τα τμήματα T'	101
Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα RMSPE 1 ^{ου} τμήματος	105
Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα RMSPE 2 ^{ου} τμήματος	107
Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα RMSPE, Τμήμα1 (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	110
Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα RMSPE, Τμήμα 2 (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)	112

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Καθώς ο σχεδιασμός και η κατασκευή σημαντικού τμήματος του οδικού δικτύου της χώρας μας έχει ολοκληρωθεί, ιδιαίτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η συντήρηση των υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο διαχείρισης της συντήρησης ενός οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του και εν συνεχεία, η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς του (pavement bearing capacity). Ως φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος ορίζεται η ικανότητα του οδοστρώματος να φέρει τα προβλεπόμενα αναπτυσσόμενα φορτία κυκλοφορίας, κατ' ελάχιστον για την χρονική περίοδο για την οποία έχει σχεδιαστεί για τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδέεται με διάφορους παράγοντες όπως η κυκλοφορία, οι καιρικές συνθήκες και η γήρανση των υλικών. Στους παράγοντες αυτούς οφείλεται η μείωση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται σταδιακά το επίπεδο εξυπηρέτησης του. Για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι απαραίτητη η συλλογή διαφόρων στοιχείων του οδοστρώματος, όπως τα πάχη των επιμέρους στρώσεων και τα επιτόπου μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι η λήψη πυρήνων (coring) επιτόπου στο οδόστρωμα, στους οποίους ακολούθως πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος μειονεκτεί, καθώς πρόκειται για μια καταστρεπτική και χρονοβόρα μέθοδο, η οποία αφενός απαιτεί μεγάλο κόστος και αφετέρου, παρέχει σημειακή πληροφόρηση της κατάστασης του οδοστρώματος.

Στον αντίποδα των «παραδοσιακών» καταστρεπτικών μεθόδων αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να εξελίσσονται τα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT). Τα NDT συστήματα πλεονεκτούν καθώς απαιτούν λιγότερο χρόνο και κόστος μετρήσεων, ενώ παρέχουν ένα πλέον του επαρκούς στατιστικό δείγμα στοιχείων οδοστρώματος για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.

Από τα πρώτα NDT συστήματα που αναπτύχθηκαν για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων είναι η δοκός Benkelman, το Road Rater και το

Deflectograph. Η συνεχιζόμενη έρευνα όμως οδήγησε στην ανάπτυξη του πλέον εξελιγμένου και ευρέως χρησιμοποιούμενου συστήματος υποστήριξης της καταγραφής της φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος, του **Παραμορφωσίμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD)**, το οποίο προσομοιώνει συνθήκες δυναμικής καταπόνησης και καταγράφει ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020). Συγκεκριμένα, έρευνες (FEHRL, 1996) έχουν δείξει ότι το παλμικό φορτίο το οποίο προκαλείται από το FWD είναι παρόμοιο με αυτό που προκαλείται από κινούμενο τροχό ταχύτητας 60-80 km/h.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του FWD, συγκριτικά με τα υπόλοιπα NDT συστήματα που καταγράφουν ελαστικές υποχωρήσεις, είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης ελαστικών υποχωρήσεων και σε θέσεις μακριά από το φορτίο εφαρμογής. Χάρη σε αυτή τη δυνατότητα, το FWD δίνει πληροφορία για την συνολική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος που εξετάζεται. Ωστόσο, καθώς το FWD είναι σύστημα στατικών καταγραφών, απαιτούνται ειδικές κυκλοφοριακές ρυθμίσεις για τη λειτουργία του (National Roads Authority, 2000).

Η προσπάθεια για την αποφυγή των προαναφερόμενων κυκλοφοριακών ρυθμίσεων οδήγησαν στην ανάπτυξη του **Παραμορφωσίμετρου Ταχείας Κυκλοφορίας (Traffic Speed Deflectometer: TSD)**, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στη χρήση ειδικών αισθητήρων Doppler (Roguin, 2002) που καταγράφουν την ταχύτητα των παραμορφώσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος. Το βασικότερο πλεονέκτημα του TSD είναι η ικανότητα του να εκτελεί συνεχόμενες μετρήσεις σε ταχύτητα κυκλοφορίας, χωρίς επομένως να χρειάζεται αποκλεισμός λωρίδων, όπως συμβαίνει με τα συστήματα στατικών μετρήσεων (Chai, et al., 2016).

Ωστόσο, φαίνεται ότι υπάρχει έντονο ενδιαφέρον στη διεθνή βιβλιογραφία για τη σύγκριση των δύο συστημάτων FWD και TSD, όχι μόνο σε επίπεδο χαρακτηριστικών λειτουργίας, αλλά και σε επίπεδο μέγιστων καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι συσχέτισης των μέγιστων ελαστικών υποχωρήσεων που καταγράφονται από τα δύο αυτά συστήματα (Bodin, et al., 2019).

1.2 Στόχος διπλωματικής

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συγκριτική διερεύνηση των παραμορφωσίμετρων πίπτοντος βάρους (FWD) και ταχείας κυκλοφορίας (TSD) στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εύκαμπτων

οδοστρωμάτων. Η σύγκριση αυτή, πέραν των τεχνικών προδιαγραφών και των δυνατοτήτων των υπόψη συστημάτων, περιλαμβάνει την αξιολόγηση υφιστάμενων μεθόδων συσχέτισης των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων καταγραφής, καθώς και τη διαμόρφωση πίνακα κατάταξης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος, αξιοποιώντας διαθέσιμα στοιχεία ελαστικών υποχωρήσεων μετρημένων με το σύστημα TSD.

Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν διατιθέμενες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2019 από το ερευνητικό ινστιτούτο της Γερμανίας BAST (The Federal Highway Research Institute) με το σύστημα TSD στον αυτοκινητόδρομο A81 της Γερμανίας. Τα TSD στοιχεία χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση των υπό διερεύνηση μεθόδων και τον υπολογισμό αντίστοιχων FWD τιμών. Τα σχετικά αποτελέσματα και κατ'επέκταση οι ίδιες οι μέθοδοι αξιολογούνται ως προς τη σύγκλιση τους, ανάλογα με το εύρος και την τάξη μεγέθους των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D_0 που υπολογίζονται, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας.

Εν δυνάμει, απώτερος στόχος είναι η ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου για την ένταξη ενός συστήματος TSD στο πλαίσιο περιοδικής παρακολούθησης των οδοστρωμάτων οδών ή και αεροδρομίων, με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν προγενέστερα στοιχεία από μετρήσεις FWD. Με άλλα λόγια, η μετάβαση από το σύστημα FWD στο TSD προϋποθέτει τη σύνδεση των στοιχείων και την αξιοποίηση της εμπειρίας που έχει αποκομισθεί από την 30 και πλέον ετών χρήση του FWD για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος FWD, οι δείκτες αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για την κατάταξη της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, αλλά και η αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος με βάση τις μετρήσεις FWD.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος TSD, ο τρόπος υπολογισμού των ελαστικών υποχωρήσεων, οι δείκτες αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για την

κατάταξη της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, αλλά και η αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος με βάση τις μετρήσεις TSD.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι διαφορές λειτουργίας των δύο υπό διερεύνηση συστημάτων, οι διάφορες μέθοδοι που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και συσχετίζουν τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με τα δύο συστήματα και επιπλέον, καθορίζονται αριθμητικά κριτήρια κατάταξης των οδοστρωμάτων βάσει των μετρήσεων TSD.

Στο **κεφάλαιο 5** γίνεται ανάλυση των στοιχείων πεδίου και μια προκαταρκτική αξιολόγηση των μεθόδων συσχέτισης.

Στο **κεφάλαιο 6** γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των υπό διερεύνηση μεθόδων εστιάζοντας στις μεταξύ τους συγκλίσεις ή αποκλίσεις, με βάση τα στοιχεία πεδίου.

Στο **κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 8** παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

2. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ (FWD)

2.1 Γενικά στοιχεία

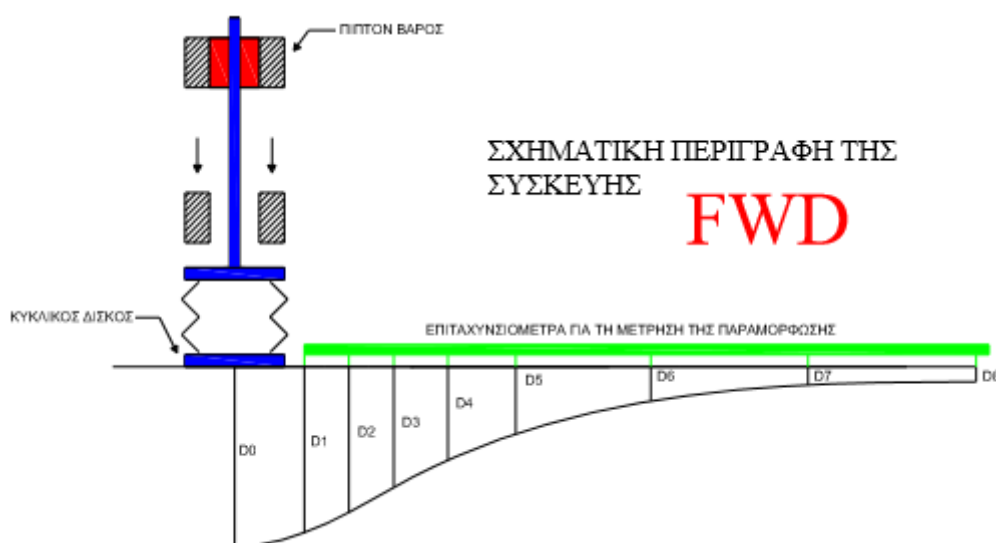
Το Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD (Falling Weight Deflectometer) επινοήθηκε από τον Bretonniere το 1963 με την ονομασία "déflectomètre à boulet" (Tonkin & Taylor Ltd, 1998) και αναπτύχθηκε περαιτέρω την δεκαετία του 1970. Τη δεκαετία του 1980 εδραιώνεται παγκοσμίως ως η επικρατούσα μέθοδος δομικής αξιολόγησης των οδοστρωμάτων (Chatti, et al., 2017), υπερτερώντας άλλων μη καταστρεπτικών μεθόδων αξιολόγησης, όπως είναι η δοκός Benklman και το Deflectograph (National Roads Authority, 2000). Από τις πιο γνωστές εταιρίες διάθεσης FWD είναι οι Grontmij Pavement Consultants, Dynatest, Foundation Mechanics (JILS™) και KUAB (Chatti, et al., 2017). Ανάμεσα τους ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα FWD είναι το Dynatest 8000 το οποίο ανήκει στη κατηγορία των ρυμουλκούμενων FWD (Εικόνα 2.1) (Smith, et al., 2017).



Εικόνα 2.1: Dynatest 8000 FWD
Πηγή: : (Dynatest, 2020)

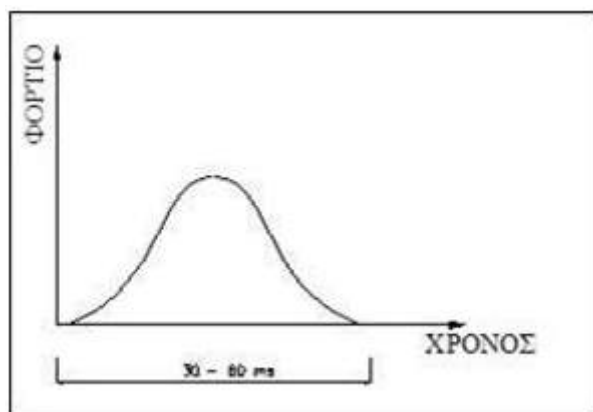
Η βασική λειτουργία ενός συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με τον τρόπο αυτό η συσκευή επιβάλλει στο

οδοστρώμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.2) (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020).

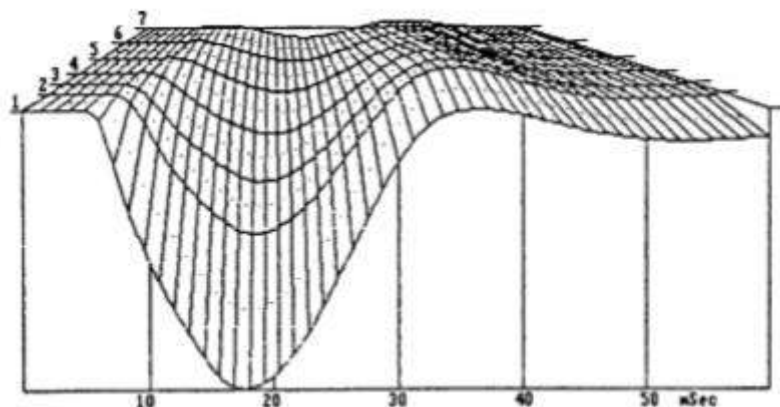


Εικόνα 2.2: Περιγραφή μέτρησης FWD
Πηγή: (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020)

Ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή της κρούσης έως ότου το παλμικό φορτίο να φτάσει τη μέγιστη τιμή του κυμαίνεται από 5 έως 30 milliseconds (National Roads Authority, 2000). Έτσι, η συνολική φόρτιση του οδοστρώματος διαρκεί συνήθως 25-30 ms ή 45-60 ms, ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό στο οποίο επιβάλλεται η φόρτιση. Ωστόσο, φαίνεται ότι ο συγκεκριμένος τρόπος φόρτισης παρουσιάζει μια ψευτοδυναμική μορφή και προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού (Εικόνα 2.3) (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020). Συγκεκριμένα, υποστηρίζεται ότι η παλμική φόρτιση που δημιουργείται κατά το σύστημα FWD είναι παρόμοια με αυτή που δημιουργεί ένας τροχός που κινείται με ταχύτητα 60-80 km/h (Εικόνα 2.4) (National Roads Authority, 2000).

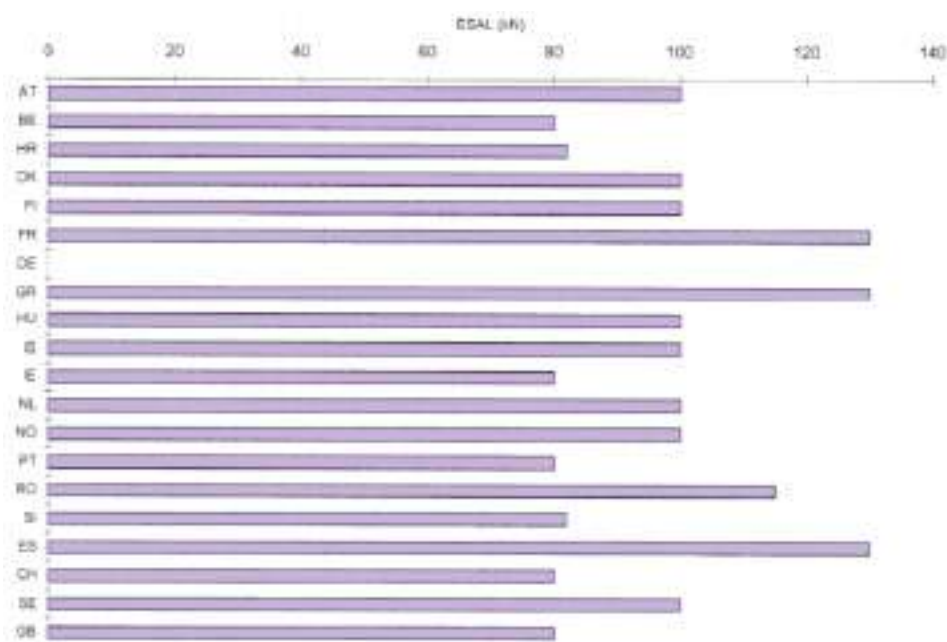


Εικόνα 2.3: Περιγραφή φόρτισης
Πηγή: (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020)



Εικόνα 2.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση προκαλούμενων παραμορφώσεων του οδοστρώματος εξαιτίας της παλμικής φόρτισης του FWD συναρτήσει του χρόνου
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

Γενικά, η τιμή του φορτίου που επιτυγχάνεται κυμαίνεται από 25 έως 120 kN. Ωστόσο, μερικά συστήματα FWD είναι ικανά να εφαρμόσουν ακόμη μεγαλύτερο φορτίο και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η πιο συνηθισμένη τιμή του παλμικού φορτίου είναι 40 ή 50 kN, τιμές δηλαδή που γενικά αντιστοιχούν στο φορτίο τροχού. Το φορτίο τροχού προκύπτει από τη τιμή του ισοδυνάμου αξονικού φορτίου ESAL (Equivalent Single Axle Load), η τιμή του οποίου διαφέρει ανάμεσα στις χώρες της Ευρώπης (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5: Αξονικά φορτία σχεδιασμού στην Ευρώπη
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του FWD είναι ότι οι υποχωρήσεις (deflections) του οδοστρώματος μετριούνται σε διάφορα σημεία γύρω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Χάρη σε αυτό το πλεονέκτημα παρέχονται χρήσιμες πληροφορίες για τη συνολική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος που εξετάζεται. Ωστόσο, πρόκειται για μια στατική μέθοδο μετρήσεων και επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα οδικής ασφαλείας κατά τη διάρκεια των ερευνών πεδίου (National Roads Authority, 2000).

Κάποια βασικά πλεονεκτήματα του FWD, μερικά από τα οποία οφείλονται στην παλμική φόρτιση που εφαρμόζει, είναι τα εξής (Smith, et al., 2017) (Dynatest, 2020):

- Ρεαλιστική προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης που προκαλεί ο τροχός
- Υψηλή παραγωγικότητα
- Δυνατότητα σχεδιασμού της καμπύλης προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (deflection bowl)
- Άριστη επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων
- Σταθερότητα κατά την διάρκεια των μετρήσεων
- Απαίτηση λειτουργίας από ένα μόνο άτομο (single person operation)
- Σχετικά αθόρυβη λειτουργία (quiet operation)

Ωστόσο, τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα του FWD είναι τα εξής (Smith, et al., 2017) :

- Υψηλό αρχικό κόστος αγοράς
- Απαίτηση για κυκλοφοριακές ρυθμίσεις ασφαλείας (traffic control)
- Χειρισμός ενός σχετικά πολύπλοκου μηχανολογικού συστήματος

2.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

2.2.1 Τρόπος λειτουργίας

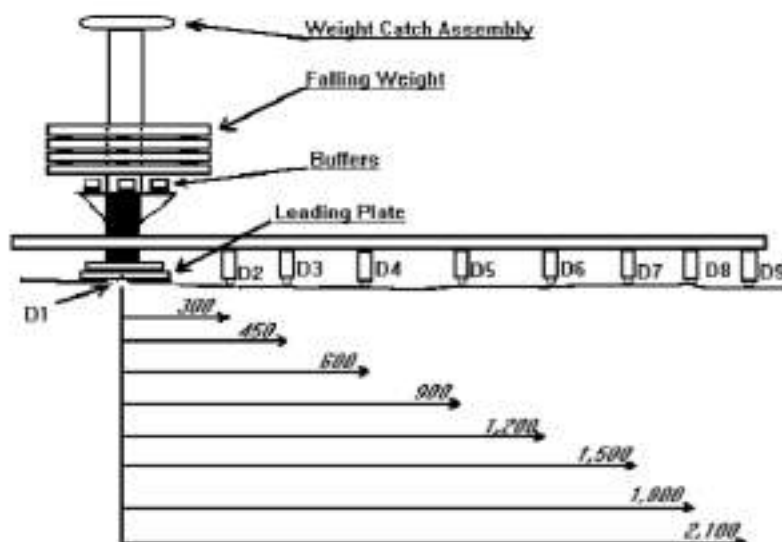
Όπως προαναφέρθηκε, η παλμική φόρτιση επιτυγχάνεται με την πτώση μιας σταθερής μάζας με ελαστικούς αποσβεστήρες από συγκεκριμένο ύψος πάνω σε μια πλάκα κρούσης. Στη συνέχεια, το φορτίο μεταφέρεται στο οδόστρωμα μέσω ενός κυκλικού δίσκου διαμέτρου 300 mm. Ένας ελαστικός τάπητας, συνήθως από καουτσούκ, ο οποίος βρίσκεται προσκολλημένος στην κάτω επιφάνεια του κυκλικού δίσκου, εξασφαλίζει την καλή επαφή ανάμεσα σε αυτόν και την επιφάνεια του

οδοστρώματος. Επιπλέον, μεταξύ της πλάκας κρούσης και του κυκλικού δίσκου είναι τοποθετημένη μια δυναμοκυψέλη (load cell) μέσω της οποίας μετρίεται το φορτίο αιχμής (peak load) (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Κυκλικός δίσκος FWD
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

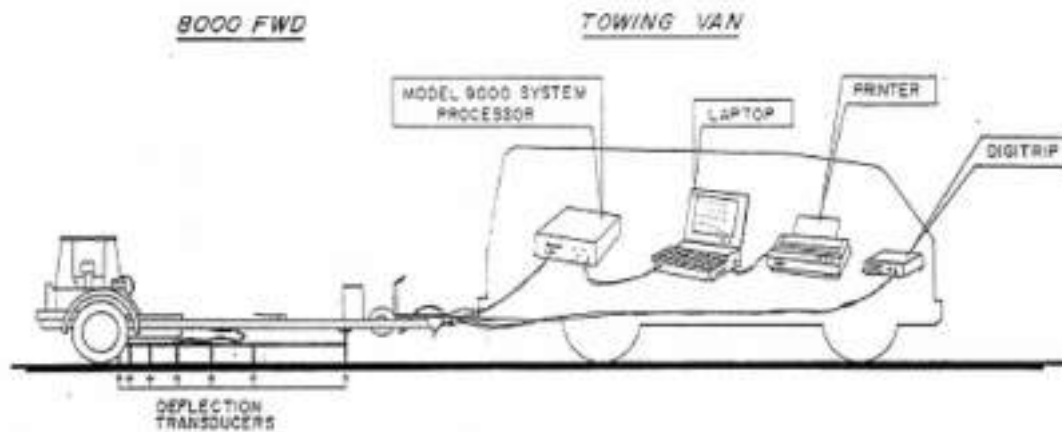
Οι υποχωρήσεις του οδοστρώματος που προκαλούνται, μετριοούνται από μια σειρά από γεωφώννα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε προκαθορισμένες αποστάσεις από το κέντρο του κυκλικού δίσκου (Εικόνα 2.7). Ένα από αυτά βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του κυκλικού δίσκου ώστε να μετρίεται η κεντρική εκτροπή του οδοστρώματος, η οποία συμβολίζεται με D_0 ή D_1 (National Roads Authority, 2000).



Εικόνα 2.7: Αποστάσεις γεωφώνων FWD
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

2.2.2 Επιμέρους στοιχεία

Τα περισσότερα συστήματα FWD είναι είτε ρυμουλκούμενα (όπως το μοντέλο Dynatest 8000) (Εικόνα 2.8) και (Εικόνα 2.9) είτε ενσωματωμένα σε όχημα (Εικόνα 2.10) (Chatti, et al., 2017).



Εικόνα 2.8: Ρυμουλκούμενο FWD
Πηγή: (Tonkin & Taylor Ltd, 1998)



Εικόνα 2.9: Πλαίσιο ρυμούλκησης FWD
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



Εικόνα 2.10: FWD ενσωματωμένο σε όχημα
Πηγή: (PaveTesting, 2019)

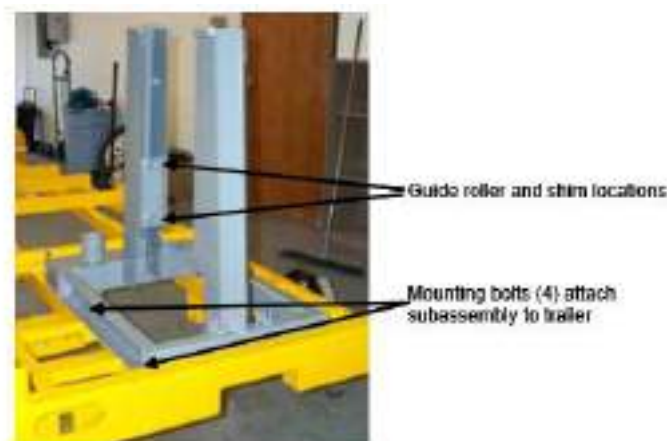
Αναλυτικά, τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα FWD είναι:

- Συσσκευή παλμικής φόρτισης (impulse-generating device) με σύστημα καθοδήγησης (guide system)

Σύμφωνα με την συσκευή παλμικής φόρτισης μεταβλητό βάρος αφήνεται από μεταβλητό ύψος (Alavi, et al., 2008). Η συσκευή αυτή βρίσκεται εντός ενός δύσκαμπτου υποπλαισίου το οποίο κοχλιώνεται καταλλήλως πάνω στο ρυμουλκούμενο (trailer) (Εικόνα 2.11 και Εικόνα 2.12).



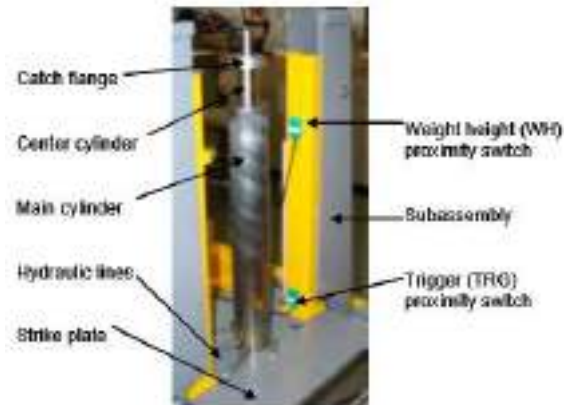
Εικόνα 2.11: Δύσκαμπτο υποπλαίσιο τοποθετημένο πάνω στο ρυμουλκούμενο
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



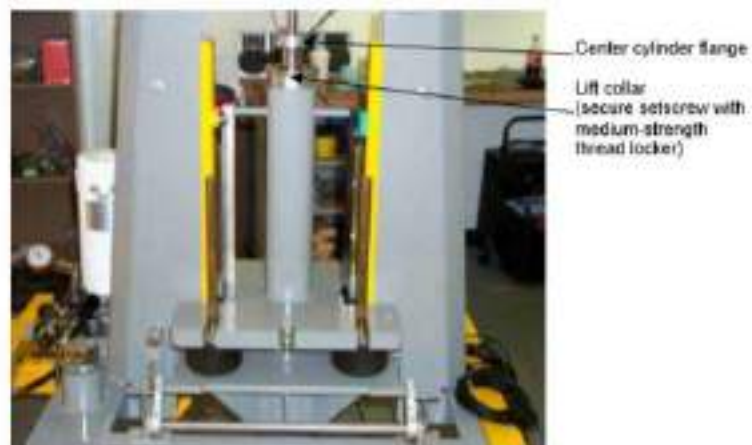
Εικόνα 2.12: Σύστημα οδηγών-σύνδεση υποπλαισίου με το τρέιλερ
Πηγή: (Belt, et al., 2006)

Επίσης, περιλαμβάνεται κατάλληλο υδραυλικό σύστημα με υδραυλικούς κυλίνδρους (Εικόνα 2.13), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την ανύψωση και την πτώση του φορτίου, καθώς και υδραυλική αντλία με βαλβίδα ρυθμιζόμενης πίεσης. Επιπλέον, ειδικά αμορτισέρ (buffer pads) μεσολαβούν μεταξύ του πύπτοντος βάρους και της πλάκας κρούσης (Belt, et al., 2006) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.14

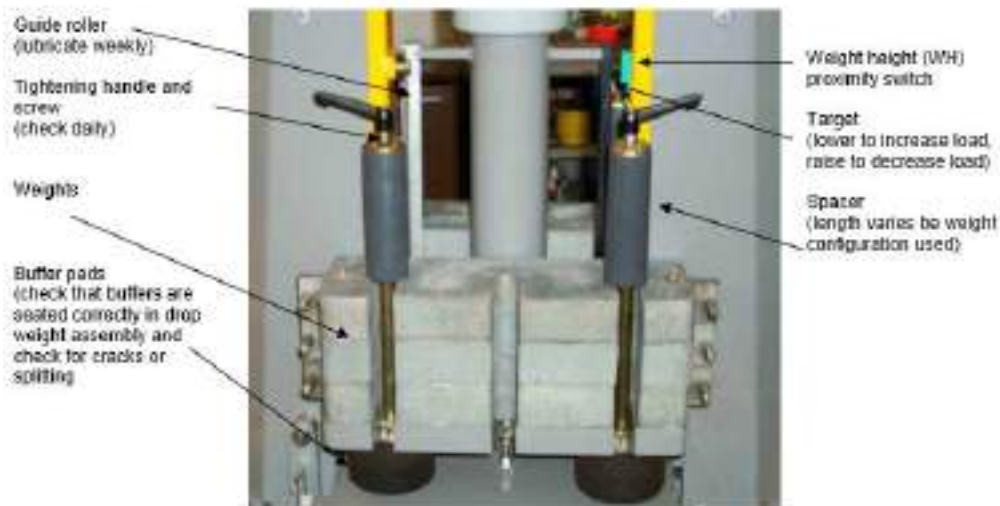
και στην Εικόνα 2.15. Το επιβαλλόμενο φορτίο μεταφέρεται από την πλάκα κρούσης στην πλάκα βάσης μέσω ενός συστήματος ελατηρίων (Hoffman, 1983).



Εικόνα 2.13: Υδραυλικός κύλινδρος συνημμένος στην πλάκα κρούσης
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



Εικόνα 2.14: Σύστημα πίπτοντος βάρους
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



Εικόνα 2.15: Μάζα στο σύστημα πέτοντος βάρους
Πηγή: (Belt, et al., 2006)

- **Κυκλικός δίσκος φόρτισης (loading plate)**

Μέσω του κυκλικού δίσκου φόρτισης μεταφέρεται το φορτίο από το μηχάνημα στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Alavi, et al., 2008). Η συνήθης διάμετρος που χρησιμοποιείται για τα οδοστρώματα οδών είναι 300 mm (Smith, et al., 2017). Στην επιφάνεια επαφής με το οδόστρωμα προσκολλάται ισχυρά ειδικός τάπητας από καουτσούκ (Belt, et al., 2006) (Εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.16: Σύνδεση πλάκας κρούσης με δυναμοκυψέλη και κυκλικό δίσκο
Πηγή: (Belt, et al., 2006)

- **Δυναμοκυψέλη (load cell)**

Η δυναμοκυψέλη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ακριβούς φορτίου εφαρμογής στο οδόστρωμα (Εικόνα 2.17 και Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.17: Κάτω όψη Δυναμοκυψέλης
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



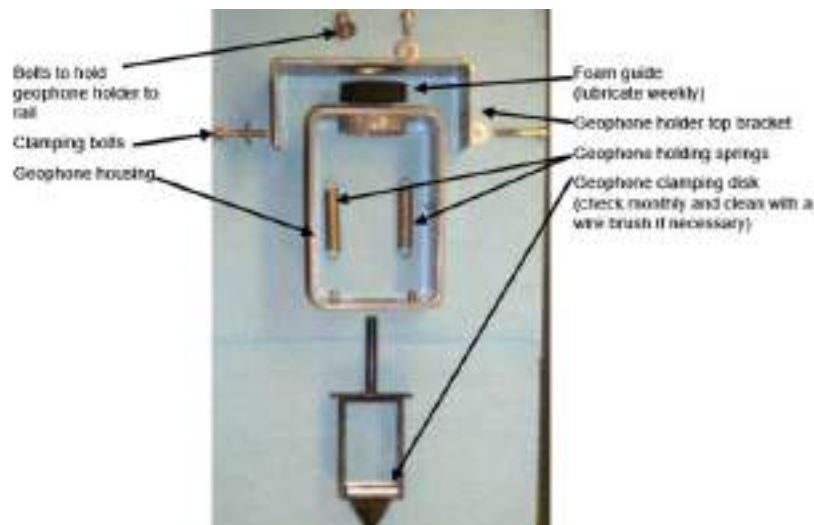
Εικόνα 2.18: Σύνδεση Δυναμοκυψέλης με Κυκλικό Δίσκο
Πηγή: (Belt, et al., 2006)

- **Αισθητήρες παραμόρφωσης-γεωφωνα (geophones)**

Απαιτούνται τουλάχιστον 7 γεωφωνα ώστε να καταγράφεται η συνολική επιρροή του παλμικού φορτίου στο οδόστρωμα και κατά συνέπεια να παραχθεί, με την απαραίτητη ακρίβεια, η καμπύλη παραμόρφωσης συναρτήσει της ακτινικής απόστασης μετρούμενη από το κέντρο του κυκλικού δίσκου (deflection bowl) (Alavi, et al., 2008). Ωστόσο, σε μερικά συστήματα FWD δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης μέχρι και 15 γεωφώνων (Dynatest, 2020). Οι αποστάσεις των γεωφώνων από το κέντρο της πλάκας φόρτισης συνήθως είναι: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400mm (National Roads Authority, 2000). Οι αποστάσεις αυτές καθορίζονται με βάση τη συνολική δυσκαμψία που προσφέρουν οι επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για ένα τυπικό οδόστρωμα αποτελούμενο από ασύνδετο αμμοχάλικο (typical unbound granular pavement) προτείνεται η καταγραφή των παραμορφώσεων με 7 γεωφωνα

σε αποστάσεις: 0, 300, 450, 600, 900, 1200 και 1500 mm από το κέντρο του επιβαλλόμενου φορτίου (Tonkin & Taylor Ltd, 1998).

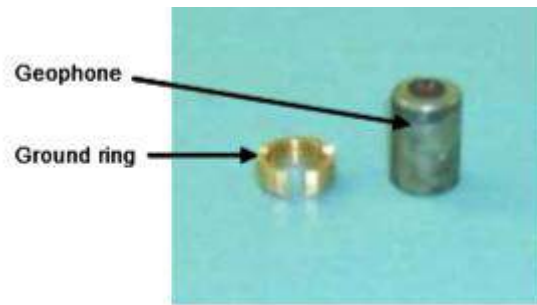
Τα γεώφωνα ρυθμίζονται στις θέσεις τους με τη βοήθεια ειδικά ειδικών συσκευών συγκράτησης που ονομάζονται 'geophones holders' (Εικόνα 2.19, Εικόνα 2.20 και Εικόνα 2.21) (Belt, et al., 2006). Επίσης, τα γεώφωνα θα πρέπει να λειτουργούν με τέτοια ακρίβεια ώστε να ανιχνεύουν υποχωρήσεις της τάξης του 1 μm ενώ παράλληλα θα πρέπει να αντέχουν στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες (National Roads Authority, 2000).



Εικόνα 2.19: Συστατικά στοιχεία του geophone holder
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



Εικόνα 2.20: Διάταξη γεώφωνων (geophones)
Πηγή: (Belt, et al., 2006)



Εικόνα 2.21: Γεώφωνο (Geophone)
Πηγή: (Belt, et al., 2006)

- Σύστημα συλλογής επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων που προκύπτουν από κάθε δοκιμή (Alavi, et al., 2008).

Ένας επεξεργαστής, ένας φορητός υπολογιστής (laptop), ένας εκτυπωτής και μια μονάδα προστασίας (Digitrip) βρίσκονται εντός του οχήματος. Συγκεκριμένα, λογισμικά (software) παρέχονται στα FWD ώστε να καταγράφονται τα δεδομένα του πεδίου και στη συνέχεια να εμφανίζονται στο χρήστη μέσω του ηλεκτρονικού φορητού υπολογιστή. Οι πιο συνηθισμένες πληροφορίες που συλλέγονται είναι η θέση, η θερμοκρασία, η χρονική εξέλιξη της φόρτισης και των παραμορφώσεων για κάθε δοκιμή, αν και συνήθως αποθηκεύονται μόνο οι μέγιστες τιμές (peak values) (Tonkin & Taylor Ltd, 1998). Επιπλέον, με τη χρήση του υπολογιστή είναι εφικτός ο έλεγχος όλων των λειτουργιών του FWD, όπως είναι η καθύψωση και η ανύψωση του δίσκου φόρτισης, ο έλεγχος των αισθητήρων παραμόρφωσης και η αλληλουχία των υψών πτώσης.

- Εξωτερικές κάμερες

Κάποια συστήματα FWD είναι εξοπλισμένα με εξωτερικές κάμερες, οι οποίες αποσκοπούν στην ακριβή ευθυγράμμιση των θέσεων δοκιμών (Smith, et al., 2017) (Εικόνα 2.22).



Εικόνα 2.22: Εξωτερική κάμερα σε FWD ενσωματωμένο σε όχημα
Πηγή: (Pennsylvania Department of Transportation, 2020)

2.2.3 Ανάπτυξη FWD ταχείας λειτουργίας

Όπως έχει αναφερθεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα FWD είναι το μοντέλο Dynatest 8000. Μετεξέλιξη αυτού αποτελεί το FastFWD Model 8012 system (the next generation model) της Dynatest (Εικόνα 2.23).



Εικόνα 2.23: Dynatest 8012 Fast FWD
Πηγή: (Dynatest, 2020)

Το εξελιγμένο αυτό μοντέλο διαθέτει τριφασικό κινητήρα υψηλής ροπής και άμεσης απόδοσης. Χάρη σε αυτό, αλλά και με τη συμβολή ενός συστήματος ένοσφαιρων κοχλίων (ball screw assembly) αντικαθίστανται το υδραυλικό σύστημα που υπάρχει στο μοντέλο Dynatest 8000 FWD. Το σημαντικό πλεονέκτημα του 8012 FastFWD είναι η γρήγορη ταχύτητα λειτουργίας που προσφέρει δυνατότητα μετρήσεων έως και 160 σημείων ανά ώρα, σε αντίθεση με τη δυνατότητα των 60 σημείων την ώρα που προσφέρει το 8000 FWD. Άλλα πλεονεκτήματα συγκριτικά με το 8000 FWD είναι τα λιγότερα κόστη συντήρησης, καθώς δεν διαθέτει υδραυλικό σύστημα, αλλά και μικρότερο αντίκτυπο στη κυκλοφορία καθώς ο χρόνος των μετρήσεων είναι σημαντικά μειωμένος. Η σύγκριση των δυνατοτήτων των δύο μοντέλων παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Συγκριτική απόδοση Dynatest 8012 FastFWD με Dynatest 8000 FWD
Πηγή: (Dynatest, 2020)

Feet between test point		50	250	500	1000
Typical four drop production	FastFWD total points per eight hours	1312	1032	904	660
	Current FWD total points per eight hours	730	640	554	456
	% Improvement	78%	91%	56%	39%
LTPP minimum drop test	FastFWD total points per eight hours	688	600	552	464
	Current FWD total points per eight hours	240	224	216	200
	% Improvement	187%	168%	156%	132%

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα αποτυπώνεται η βελτιωμένη απόδοση του 8012 FastFWD συγκριτικά με το παραδοσιακό μοντέλο 8000 FWD (Dynatest, 2020).

2.3 Στοιχεία καταγραφής

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο, καθώς και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Οι ψευδοελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων δοκιμών κλπ.) είναι δυνατό να δώσουν μια πλήρη πληροφόρηση για τη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.24, καταγράφονται η θερμοκρασία του αέρα (σημείο 1), η θερμοκρασία στην επιφάνεια του οδοστρώματος με χρήση υπέρυθρων (σημείο 2) καθώς και η θερμοκρασία στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων (σημείο 3) (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020).



Εικόνα 2.24: Μέτρηση θερμοκρασίας: (1) αέρα, (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) ασφαλτικών στρώσεων

Πηγή: (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020)

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων, αρχικά πραγματοποιείται ειδική οπή στο οδόστρωμα και στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή θερμομέτρου σε αυτήν. Ωστόσο, οι οπές αυτές θα πρέπει να γίνονται τουλάχιστον 10 λεπτά πριν την καταμέτρηση της θερμοκρασίας, ώστε η θερμότητα που παράγεται κατά την δημιουργία της οπής να μην επηρεάζει το αποτέλεσμα. Επιπλέον, συνιστάται η ρίψη μιας σταγόνας γλυκερόλης ή κάποιου παρόμοιου

ρευστού, ώστε να επιτευχθεί η καλή θερμική επαφή μεταξύ του θερμομέτρου και του ασφαλτικού υλικού. Η διαδικασία αυτή διαρκεί συνολικά 15 λεπτά και πρέπει να εκτελείται τουλάχιστον κάθε 4 ώρες κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Συνοψίζοντας για κάθε θέση που εξετάζεται μετρούνται τα παρακάτω (National Roads Authority, 2000):

- Τοποθεσία (χιλιομετρική θέση, λωρίδα, εγκάρσια θέση στη λωρίδα)
- Ώρα και Ημερομηνία
- Θερμοκρασία αέρα
- Θερμοκρασία οδοστρώματος (επιφάνεια και μέσον ασφαλτικών στρώσεων)
- Φορτίο αιχμής και μέγιστη ελαστική υποχώρηση για κάθε ρίψη του πίπτοντος βάρους
- Αριθμός ρίψεων του πίπτοντος βάρους

2.4 Δείκτες δομικής κατάστασης (FWD)

2.4.1 Γενικά

Η διατήρηση ενός αποδεκτού επιπέδου εξυπηρέτησης ενός εν λειτουργία οδοστρώματος βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση της δομικής κατάστασης του και εξαρτάται από τον έγκαιρο προγραμματισμό των απαιτούμενων εργασιών συντήρησης ή αποκατάστασης. Σύμφωνα με τα παραπάνω για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός ενός ή περισσότερων δεικτών της κατάστασης του οδοστρώματος (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους οι δείκτες κατάστασης του οδοστρώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δομική αξιολόγηση του οδοστρώματος. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι εξής (National Roads Authority, 2000) (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020):

1. Με βάση διατιθέμενες τιμές ορίων αποδοχής για τις τιμές των δεικτών μπορεί να γίνει κατάταξη του οδοστρώματος ως προς τη δομική κατάσταση του.
2. Η απεικόνιση όλων των δεικτών κατά μήκος μιας οδού ή οδικού δικτύου μπορεί να δώσει πληροφορία για τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος σε σχέση με τη δομική κατάσταση των επιμέρους στρώσεων.

3. Η παρακολούθηση της εξέλιξης των δεικτών στο χρόνο δίνει πληροφορία για την εξέλιξη της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.
4. Με την απεικόνιση του δείκτη κατά μήκος μιας οδού ή οδικού δικτύου μπορεί να γίνει η συγκριτική αξιολόγηση της δομική κατάστασης του οδοστρώματος διαφορετικών τμημάτων.
5. Με την χρήση των δεικτών μπορεί να γίνει η αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος με την διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Βάση των ανωτέρω, η επιλογή της χρήσης των δεικτών γίνεται ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο ανάλυσης. Οι χρήσεις 1,2,3 και 4 αναφέρονται στο 1^ο επίπεδο ανάλυσης ενώ η 5^η χρήση στο 2^ο επίπεδο ανάλυσης.

2.4.2 Δείκτης D_0 (FWD)

Από τους πιο γνωστούς δείκτες δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων είναι ο D_0 , ο οποίος αντιστοιχεί στη μέγιστη ελαστική υποχώρηση που καταγράφεται με το FWD. Η τιμή του δείκτη D_0 εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος και διαφέρει ανάλογα με το αν πρόκειται για εύκαμπτο, δύσκαμπτο ή ημιάκαμπτο οδόστρωμα, καθώς και από τη θερμοκρασία, με συνέπεια να παρουσιάζει αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους (εποχιακές διακυμάνσεις).

Ο δείκτης D_0 εκφράζει τη συνολική κατάσταση ενός οδοστρώματος από άποψη δομικής αντοχής. Μικρές τιμές του δείκτη D_0 υποδηλώνουν ισχυρό οδόστρωμα ενώ αντίθετα μεγάλες τιμές του δείκτη D_0 υποδηλώνουν ασθενές οδόστρωμα.

Αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων στο φορτίο αναφοράς P_{target}

Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται από το σύστημα FWD εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων.

$$D_0(P_{target}) = D_0(P) * \frac{P_{target}}{P} \quad (2.1)$$

Όπου:

$D_0(P)$: Μέτρηση D_0 σε φορτίο P

P : Φορτίο στο οποίο έχει γίνει η μέτρηση

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

Για παράδειγμα, για την περίπτωση που το φορτίο αναφοράς είναι 50kN η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$D_0(50kN) = D_0(P) * \frac{50}{P} \quad (2.2)$$

Αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεως στη θερμοκρασία αναφοράς

Επιπλέον, η θερμοκρασία στο σώμα των ασφαλικών στρώσεων επηρεάζει σημαντικά τις ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει το σύστημα FWD. Διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας παρατηρούνται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε ένα οδικό τμήμα, αλλά και όταν διακόπτονται οι μετρήσεις και συνεχίζονται άλλη μέρα. Κατά συνέπεια, για να είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγησή τους, πρέπει να γίνεται αναγωγή του δείκτη D_0 που προκύπτει από τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις σε μία θερμοκρασία αναφοράς.

Η αναγωγή του δείκτη D_0 στην επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς γίνεται με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών. Παρακάτω αναφέρεται ένας διεθνώς ευρύτατα χρησιμοποιούμενος συντελεστής διόρθωσης του δείκτη D_0 στην θερμοκρασία των 20°C (TNF: Temperature Normalization Factor), που προκύπτει από τη σχέση:

$$TNF = 1 + \left(a_1 + \frac{a_2}{h_1}\right) * (T_A - 20) + \left(a_3 + \frac{a_4}{h_1}\right) * (T_A - 20)^2 \quad (2.3)$$

Όπου:

TNF: συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

T_A : θερμοκρασία στο μέσο του πάχους των ασφαλικών στρώσεων (°C)

h_1 : πάχος ασφαλικών στρώσεων (mm)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: σταθερές που αναγράφονται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Τιμές σταθερών
Πηγή: (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020)

Ελαστική υποχώρηση	Σταθερές			
	α_1 (°C ⁻¹)	α_2 (mm/°C)	α_3 (°C ⁻¹)	α_4 (mm/°C)
d0	0,01661	-0,67095	0,00028612	-0,01408

Όπου:

d_0 : η μέγιστη ελαστική υποχώρηση

Τελικά η διορθωμένη τιμή της υποχώρησης είναι:

$$D_0(20^\circ\text{C}) = \frac{D_0(T)}{TNF} \quad (2.4)$$

Όπου:

$D_0(T)$: Μέτρηση D_0 σε θερμοκρασία T

T : θερμοκρασία αναφοράς 20°C

$D_0(20^\circ\text{C})$: Αναγωγή D_0 στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C

TNF: Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

Σημειώνεται ότι πραγματοποιείται πρώτα η αναγωγή του δείκτη D_0 ως προς το φορτίο και στη συνέχεια η νέα τιμή που προκύπτει διορθώνεται ως προς τη θερμοκρασία αναφοράς (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020).

Η θερμοκρασία αναφοράς που προαναφέρθηκε δεν είναι απαραίτητα σταθερή αλλά μεταβάλλεται από χώρα σε χώρα ανάλογα με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στην Εσθονία η τιμή της θερμοκρασίας αναφοράς είναι 10°C (Aavik & Talvik, 2008). Για την μετατροπή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων από το FWD στις υποχωρήσεις φορτίου αναφοράς 50 kN και θερμοκρασίας αναφοράς 10°C χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$d_{r\ 50kNT} = d_r * \left(\frac{F_{required}}{F_{measured}} \right) * K_t \quad (2.5)$$

Όπου:

$d_{r\ 50kNT}(\mu\text{m})$: ελαστική υποχώρηση που αντιστοιχεί σε φορτίο 50 kN και θερμοκρασία 10°C , σε απόσταση r (mm) από το κέντρο του κυκλικού δίσκου.

$d_r(\mu\text{m})$: μετρημένη ελαστική υποχώρηση που έχει προκληθεί από φορτίο $F_{measured}$ (kPa) σε απόσταση r (mm) από το κέντρο του κυκλικού δίσκου.

$F_{required}$ (kN): φορτίο αναφοράς, 50 kN

$F_{measured}$ (kN): φορτίο που μετρήθηκε κατά τη δοκιμή

K_t : συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας-στους 10°C - που λαμβάνεται από τον Πίνακα 2.3, ανάλογα με το υλικό της ασφαλτικής στρώσης. Επισημαίνεται ότι ο συμβολισμός T αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με το FWD.

Πίνακας 2.3: Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας K_t
Πηγή: (Aavik & Talvik, 2008)

Pavement layer type	Temperature correction factor (K_t) to the standard temperature $+10^\circ\text{C}$
Asphalt concrete	$K_t=0,000203\ T^2-0,014841\ T+1,127603$
Cold bituminous mix	$K_t=0,000205\ T^2-0,015198\ T+1,135192$

Γίνεται σαφές ότι η αναγωγή της ελαστικής υποχώρησης στο φορτίο και στην θερμοκρασία αναφοράς, δεν αφορά μόνο την κεντρική υποχώρηση D_0 αλλά και τις υπόλοιπες υποχωρήσεις που καταγράφονται από το FWD. Επιπλέον, οι υπόλοιποι δείκτες δομικής επάρκειας που εμφανίζονται παρακάτω υπολογίζονται με βάση τις διορθωμένες τιμές των υποχωρήσεων.

2.4.3 Δείκτης SCI (FWD)

Ένας άλλος δείκτης δομικής κατάστασης βάσει μετρήσεων FWD που χρησιμοποιείται συχνά είναι ο SCI (Surface Curvature Index). Ως SCI ορίζεται η διαφορά της μετρούμενης ελαστικής υποχώρησης που αντιστοιχεί στο κέντρο του κυκλικού δίσκου (d_0) και της μετρούμενης ελαστικής υποχώρησης σε απόσταση 300 mm από το κέντρο του κυκλικού δίσκου (d_{300}), όπως φαίνεται στη παρακάτω σχέση (Aavik & Talvik, 2008):

$$SCI = d_0 - d_{300} \quad (2.6)$$

Μέσω του συγκεκριμένου δείκτη εκφράζεται η δομική κατάσταση των ανωτέρων στρώσεων του οδοστρώματος (upper pavement layers), δηλαδή των ασφαλικών στρώσεων για τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Χαμηλές τιμές του δείκτη SCI υποδεικνύουν καλή ικανότητα κατανομής φορτίου στις συγκεκριμένες στρώσεις. Στην περίπτωση που το γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του SCI κατά μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος έχει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο γράφημα D_0 τότε συμπεραίνεται ότι οι ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος έχουν μεγάλη επιρροή στη συνολική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Μια τέτοια συμπεριφορά αναμένεται στα εύκαμπτα οδοστρώματα (National Roads Authority, 2000).

Σημειώνεται ωστόσο ότι ο δείκτης SCI γενικεύεται και για υποχωρήσεις που απέχουν αποστάσεις $r \in [450, 600]$ από το κέντρο του κυκλικού δίσκου δηλαδή (Aavik & Talvik, 2008):

$$SCI = d_0 - d_r \quad (2.7)$$

Όπου d_r : μετρούμενη ελαστική υποχώρηση σε απόσταση r (mm) από το κέντρο του κυκλικού δίσκου

2.4.4 Άλλοι δείκτες

Δείκτης RoC

Ο δείκτης RoC (Radius of Curvature) αναπτύχθηκε στην Νότια Αφρική και μέσω αυτού εκφράζεται η δομική κατάσταση της ασφαλικής στρώσης καθώς και της βάσης του οδοστρώματος. Η τιμή του δείκτη RoC δίνεται με βάση την σχέση:

$$RoC = \frac{L^2}{2 \cdot d_0 \cdot (1 - \frac{d_{200}}{d_0})} \quad (2.8)$$

Όπου:

$L = 200 \text{ mm}$ (8 inches).

d_{200} : ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 200 mm (8 inches) από το κέντρο του κυκλικού δίσκου (Pierce, et al., 2017)

Δείκτης BDI

Ένας ακόμη δείκτης δομικής κατάστασης είναι ο BDI (Base Damage Index). Ο δείκτης BDI ισούται με την διαφορά των καταγεγραμμένων μετρήσεων σε αποστάσεις 300 mm (d_{300}) και 600 mm (d_{600}) από το κέντρο του κυκλικού δίσκου. Μέσω του δείκτη BDI χαρακτηρίζεται η υφιστάμενη κατάσταση της στρώσης βάσης του οδοστρώματος. Ισχύει:

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (2.9)$$

Δείκτης BCI

Ο δείκτης BCI (Base Curvature Index) χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της δομικής κατάστασης της υπόβασης και της στρώσης έδρασης και ισούται με τη διαφορά των καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων που αντιστοιχούν σε αποστάσεις 1200 mm (d_{1200}) και 1500 mm (d_{1500}), δηλαδή ισχύει (Aavik & Talvik, 2008):

$$BCI = d_{1200} - d_{1500} \quad (2.10)$$

Δείκτης D9

Επίσης για τον χαρακτηρισμό της δομικής κατάστασης της στρώσης έδρασης, εκτός από τον δείκτη BCI, χρησιμοποιείται και ο δείκτης D9. Ο δείκτης δομικής κατάστασης D9 ισούται με την υποχώρηση που αντιστοιχεί στο 9ο γεώφωνο δηλαδή σε απόσταση 2100 mm από το κέντρο του κυκλικού δίσκου. Ο συγκεκριμένος δείκτης σχετίζεται με την δυσκαμψία της στρώσης έδρασης (subgrade). Χαμηλές τιμές του δείκτη D9 υποδηλώνουν μια δύσκαμπτη στρώση έδρασης. Στην περίπτωση που το γράφημα στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές του D9 κατά μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος έχει την ίδια μορφή με το αντίστοιχο γράφημα D_0 τότε συμπεραίνεται ότι η στρώση έδρασης έχει σημαντική

επιρροή στην συνολική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος (National Roads Authority, 2000).

Οι παραπάνω δείκτες δομικής κατάστασης συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4. Ως d_0 , d_{300} , d_{600} , d_{900} , d_{1200} , d_{1500} συμβολίζονται οι μετρούμενες ελαστικές υποχωρήσεις σε αποστάσεις 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 mm αντίστοιχα από το κέντρο του κυκλικού δίσκου.

Πίνακας 2.4: Συνοπτική παρουσίαση δεικτών δομικής κατάστασης
Πηγές: (Aavik & Talvik, 2008), (National Roads Authority, 2000), (Smith, et al., 2017)

Δείκτες δομικής κατάστασης	Εξίσωση	Περιγραφή
D_0 (μm, mm)	Κεντρική-Μέγιστη υποχώρηση	Δομική αξιολόγηση συνολικού οδοστρώματος
SCI (μm, mm)	$SCI = d_0 - d_{300}$ $SCI = d_0 - d_r$	Δομική αξιολόγηση της ασφαλτικής στρώσης
BDI (μm, mm)	$BDI = d_{300} - d_{600}$	Δομική αξιολόγηση της στρώσης βάσης
BCI (μm, mm)	$BCI = d_{600} - d_{900}$ (used in USA) $BCI = d_{900} - d_{1200}$ (used in Finland) $BCI = d_{1200} - d_{1500}$ (used in Estonia)	Δομική αξιολόγηση της στρώσης υπόβασης ή/και της στρώσης έδρασης
RoC (μm, mm)	$RoC = \frac{L^2}{2 * d_0 * (1 - \frac{d_{200}}{d_0})}$	Δομική αξιολόγηση της ασφαλτικής στρώσης και της βάσης
D9 (ή d9) (μm, mm)	Υποχώρηση που αντιστοιχεί σε 2100 mm από το κέντρο του κυκλικού δίσκου	Δομική αξιολόγηση της στρώσης έδρασης
Area (mm)	$AREA = 150 * \frac{d_0 + 2 * d_{300} + 2 * d_{600} + d_{900}}{d_0}$	Δομική αξιολόγηση συνολικού οδοστρώματος
Area Under Pavement Profile	$AUPP = \frac{5 * d_0 + 2 * d_{300} + 2 * d_{600} + d_{900}}{d_0}$	Δομική αξιολόγηση των ανωτέρων στρώσεων
Shape Factors	$F_1 = \frac{d_0 - d_{600}}{d_{300}}$ $F_2 = \frac{d_{300} - d_{900}}{d_{600}}$	Δομική αξιολόγηση της στρώσης του ισοδύναμου βάθους
Deflection Ratio	$DR = \frac{d_{600}}{d_0}$	Δομική αξιολόγηση της στρώσης του ισοδύναμου βάθους

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι δείκτες κατάστασης οδοστρώματος, ανάλογα με τη στρώση του οδοστρώματος που εξετάζεται.

2.4.5 Κριτήρια αξιολόγησης βάσει δεικτών

Χαρακτηρισμός συνολικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει δεικτών

Σύμφωνα με τους δείκτες που προαναφέρθηκαν, μπορεί να γίνει η κατάταξη διαφόρων οδικών τμημάτων ως προς το χαρακτηρισμό της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων τους. Ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η κατάταξη είναι χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 2.5. Σύμφωνα με αυτόν, η δομική κατάσταση του οδοστρώματος κρίνεται ως υγιής (sound), προειδοποιητική (warning) ή σοβαρή (severe). Τα όρια του κάθε δείκτη διαφέρουν ανάλογα με το υλικό με το οποίο είναι κατασκευασμένη η βάση του οδοστρώματος (βάση από κοκκώδες υλικό, βάση από τσιμέντο, ασφαλτική βάση). Επίσης, χρησιμοποιούνται οι δείκτες BLI (Base Layer Index), MLI (Middle Layer Index) και LLI (Lower Layer Index), οι οποίοι ταυτίζονται με τους SCI, BDI και BCI αντίστοιχα. Ο πίνακας εφαρμόζεται για ελαστικές υποχωρήσεις που αντιστοιχούν σε φορτίο αναφοράς 40 KN (Horak & Emery, 2009) .

Πίνακας 2.5: Κατάταξη δομικής κατάστασης οδοστρώματος κατά Horak & Emery
Πηγές: (Horak & Emery, 2009)

Pavement Section	Structural Condition Rating	D_0 (μm)	RoC (μm)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Granular base	Sound	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Warning	500–750	50–100	200–400	100–200	50–100
	Severe	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Cementitious base	Sound	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Warning	200–400	80–150	100–300	50–100	40–80
	Severe	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80
Bituminous base	Sound	< 400	> 250	< 200	< 100	< 50
	Severe	400–600	100–250	200–400	100–150	50–80
	Warning	> 600	< 100	> 400	> 150	> 80

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει ο χαρακτηρισμός της κατάστασης του οδοστρώματος, είναι με χρήση του Πίνακα 2.6. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι έχει προηγηθεί αναγωγή των καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων σε φορτίο αναφοράς 40 kN (National Roads Authority, 2000).

Πίνακας 2.6: Χαρακτηρισμός οδοστρωμάτων βάσει των συντελεστών D_0 και SCI (microns)
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

Κριτήριο D_0 (Microns)	Κριτήριο SCI (Microns)	Χαρακτηρισμός
<100	<40	Πολύ Ισχυρό Οδόστρωμα
100-200	40-80	Ισχυρό Οδόστρωμα
200-350	80-140	Μερικώς Ισχυρό, ίσως να απαιτείται επικάλυψη ανάλογα με τον όγκο κυκλοφορίας
350-500	140-200	Μέτριο Οδόστρωμα, ενδεχομένως να απαιτείται επικάλυψη ανάλογα με τον όγκο της κυκλοφορίας
500-700	200-300	Μέτριο προς Αδύναμο Οδόστρωμα, απαιτείται επικάλυψη (πιθανώς κοκκώδη στρώση)
>700	>300	Αδύναμο Οδόστρωμα (απαιτείται κοκκώδης στρώση ή ανακατασκευή)

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 2.7 ο οποίος διαμορφώθηκε από τους Hakim και Brown.

Πίνακας 2.7: Χαρακτηρισμός ολικής κατάστασης οδοστρώματος σύμφωνα με το δείκτη D_0 κατά Hakim & Brown
Πηγή: (Hakim & Brown, 2006)

FWD (40 kN)	
$D_0(\mu\text{m})$	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<100	εξαιρετική
100-150	πολύ καλή
150-200	καλή
200-250	μέτρια
250-300	κακή
>300	πολύ κακή

Οι τιμές του Πίνακα 2.7 ισχύουν για φορτίο εφαρμογής 40 kN (Hakim & Brown, 2006).

Αξιολόγηση δομικής κατάστασης επιμέρους στρώσεων

Ανάλογα με το δείκτη, είναι εφικτό να γίνει χαρακτηρισμός της δομικής κατάστασης των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος συμπεριλαμβανομένου και της στρώσης έδρασης. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η αξιολόγηση της κατάστασης της ασφαλικής στρώσης για φορτίο αναφοράς 40 kN. Το συγκεκριμένο κριτήριο έχει χρησιμοποιηθεί από τους Hakim & Brown (2006) στα πλαίσια αξιολόγησης εθνικών αυτοκινητοδρόμων με υψηλό όγκο κυκλοφορίας (Πίνακας 2.8).

Πίνακας 2.8: Χαρακτηρισμός ασφαλικών στρώσεων σύμφωνα με το δείκτη SCI
Πηγή: (Hakim & Brown, 2006)

Δείκτης SCI (microns)	Κατάσταση Ασφαλικών Στρώσεων
< 30	Εξαιρετική
30-45	Πολύ Καλή
45-80	Μέτρια
> 80	Κακή

Αντίστοιχα, με κατάλληλη αναγωγή σε φορτίο αναφοράς 40 kN, μπορεί να γίνει ο χαρακτηρισμός της στρώσης έδρασης (subgrade) με τη χρήση του δείκτη D9 (Πίνακας 2.9) (National Roads Authority, 2000).

Πίνακας 2.9: Χαρακτηρισμός Στρώσης Έδρασης σύμφωνα με το κριτήριο D9
Πηγή: (National Roads Authority, 2000)

Κριτήριο D9 (Microns)	Χαρακτηρισμός Στρώσης Έδρασης
<10	Πολύ Δύσκαμπτη
10-20	Δύσκαμπτη
20-30	Δύσκαμπτη προς Μέτρια
30-40	Μέτρια προς Αδύναμη
40-50	Αδύναμη
>50	Πολύ Αδύναμη

Ποιοτική αξιολόγηση κατάστασης οδοστρώματος βάσει της μορφής της καμπύλης παραμορφώσεων (deflection bowl)

Η μορφή της προκύπτουσας καμπύλης παραμορφώσεων (deflection bowl) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δομική ανάλυση του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, οι εξωτερικές ελαστικές υποχωρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της δυσκαμψίας της στρώσης έδρασης, ενώ μέσω των υποχωρήσεων που βρίσκονται κοντά στο κέντρο εφαρμογής του φορτίου γίνεται αξιολόγηση της δυσκαμψίας των στρώσεων πλησίον της επιφάνειας του οδοστρώματος. Έτσι, μια φαρδιά καμπύλη παραμορφώσεων-δηλαδή μια καμπύλη με μικρή καμπυλότητα-υποδηλώνει ότι το ανώτερο τμήμα του οδοστρώματος είναι αρκετά ισχυρό σε σχέση με τις κατώτερες στρώσεις. Αντίθετα, μια καμπύλη με την ίδια μέγιστη τιμή

μέγιστης παραμόρφωσης (d_0), αλλά με υψηλότερη καμπυλότητα γύρω από το δίσκο φόρτισης, δείχνει ότι τα ανώτερα στρώματα είναι πιο αδύναμα σε σχέση με την στρώση έδρασης (Tonkin & Taylor Ltd, 1998).

2.5 Αξιολόγηση δομικής επάρκειας οδοστρώματος

2.5.1 Μηχανική συμπεριφορά οδοστρώματος

Ένα άλλο δεδομένο το οποίο υπολογίζεται από τα στοιχεία καταγραφής του FWD κατά την διάρκεια των μετρήσεων, μέσω του ειδικού λογισμικού που χρησιμοποιείται, είναι το μέτρο ελαστικότητας Surface Modulus. Ως Surface Modulus ορίζεται το σταθμισμένο μέσο μέτρο ελαστικότητας (weighted mean modulus) ενός ισοδύναμου ομογενούς ημίχωρου και συμβολίζεται E_0 . Με αυτό το τρόπο γίνεται η παραδοχή μιας φαινομενικής συνολικής δυσκαμψίας (overall apparent stiffness) σε οποιοδήποτε σημείο.

Το μέτρο E_0 υπολογίζεται από τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις με την βοήθεια των σχέσεων του Boussinesq:

$$E_0(0) = \frac{2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{D(0)} \quad (2.11)$$

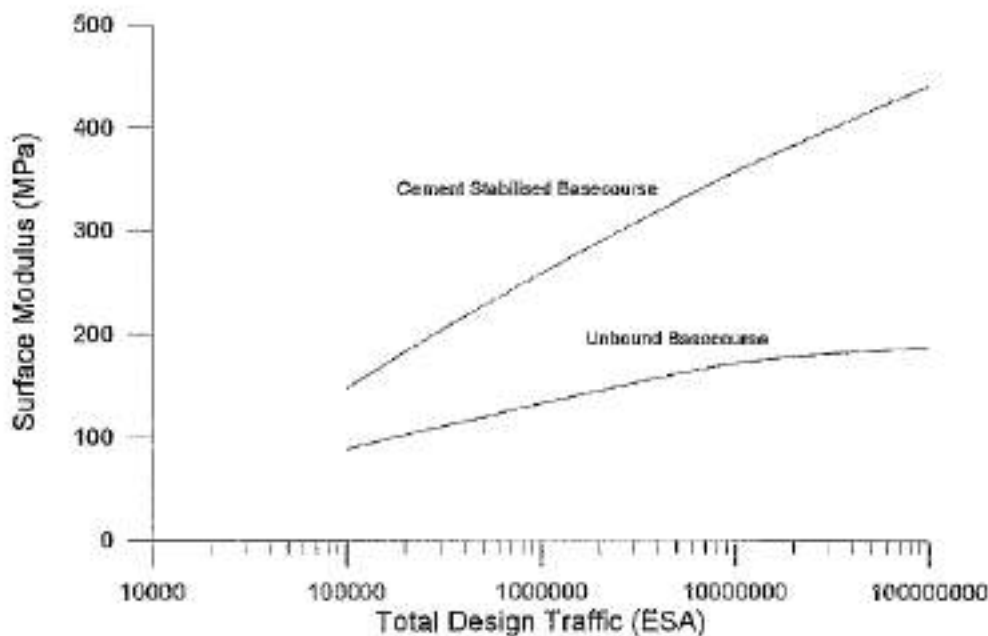
$$E_0(r) = \frac{(1 - \mu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a^2}{r \cdot D(r)} \quad (2.12)$$

Όπου:

- $E_0(r)$: το μέτρο E_0 σε απόσταση r από το κέντρο του κυκλικού δίσκου
- μ : ο λόγος Poisson (συνήθως παίρνει την τιμή 0,35)
- σ_0 : η πίεση επαφής κάτω από τον κυκλικό δίσκο
- a : η ακτίνα του κυκλικού δίσκου
- $D(r)$: η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση r από το κέντρο του κυκλικού δίσκου

Η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος μπορεί να γίνει σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.25. Το διάγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον είναι γνωστή η συνολική κυκλοφορία σχεδιασμού εκφρασμένη σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες ESA (Equivalent Standard Axles) και το είδος της βάσης του οδοστρώματος (βάση σταθεροποιημένη με τσιμέντο ή βάση από ασύνδετο υλικό) και δίνει την επιθυμητή τιμή E_0^* (MPa). Στη συνέχεια, η τιμή αυτή συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή E_0 που προέκυψε από τις

μετρήσεις FWD και έτσι προκύπτουν κατά προσέγγιση τα επίπεδα επέμβασης στα οποία θα απαιτηθεί επίστρωση.



Εικόνα 2.25: Υπολογισμός επιθυμητού μέτρου E_o^*
Πηγή: (Tonkin & Taylor Ltd, 1998)

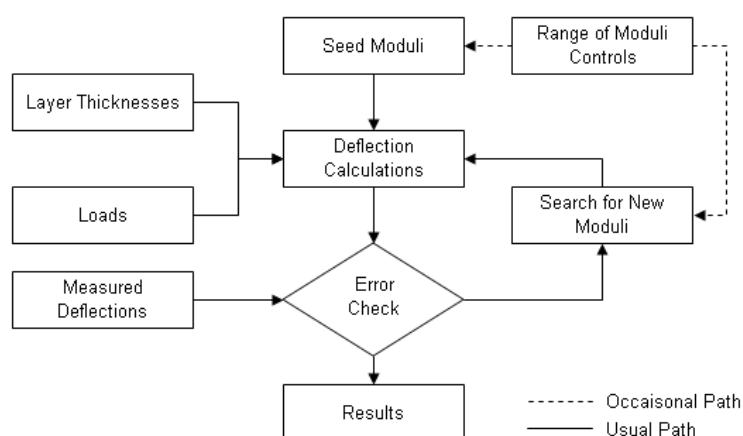
Καθώς το μέτρο E_o υπολογίζεται άμεσα από το λογισμικό πεδίου (χωρίς να απαιτούνται επαναλήψεις) διευκολύνεται η αξιολόγηση του οδοστρώματος σε επίπεδο δικτύου. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποιο δομικά ανεπαρκές σημείο κατά την διάρκεια των μετρήσεων, μπορεί να γίνει άμεσα η πύκνωση των σημείων δοκιμών, ώστε να προσδιοριστεί η ακριβής περιοχή όπου εντοπίζεται υποβαθμισμένο οδόστρωμα (Tonkin & Taylor Ltd, 1998).

2.5.2 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

Στις περιπτώσεις που οι προαναφερθέντες τρόποι δεν επαρκούν για τη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος ακολουθείται μία εξειδικευμένη και πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων που είναι γνωστή ως διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis) (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται, ώστε να προσδιοριστούν τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος έχοντας ως δεδομένο τη καμπύλη ελαστικών υποχωρήσεων (deflection bowl). Η διαδικασία περιλαμβάνει επαναλήψεις κατά τις οποίες γίνονται προσαρμογές των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων έως ότου οι υπολογισμένες ελαστικές υποχωρήσεις

να ταυτιστούν με τις αντίστοιχες μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις από το σύστημα FWD (Εικόνα 2.26). Στη συνέχεια, το αντιπροσωπευτικό μοντέλο ελαστικών στρώσεων που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό εργασιών αποκατάστασης του οδοστρώματος, όπως είναι η επίστρωση (overlay).

Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού πραγματοποιείται με ειδικά προγράμματα όπως είναι το CIRCLY, το BISAR, το MODULUS και το ELMOD. Τα πρώτα τρία (CIRCLY, BISAR, MODULUS) βασίζονται στη πολυστρωματική ελαστική θεωρία με αριθμητική ολοκλήρωση ή πεπερασμένα στοιχεία ενώ το τελευταίο (ELMOD) βασίζεται στην προσεγγιστική θεωρία μετασχηματισμού των Odermark-Boussinesq. Ωστόσο το τελευταίο πρόγραμμα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο κυρίως λόγω της υψηλής ταχύτητας επεξεργασίας δεδομένων που προσφέρει (Tonkin & Taylor Ltd, 1998).



Εικόνα 2.26: Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)
Πηγή: (Varela & Pacheco-Torres, 2019)

Τα βήματα της διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού συνοψίζονται ως εξής:

1. Καθορισμός των στοιχείων εισόδου του οδοστρώματος, όπως είναι το πάχος της κάθε στρώσης και ο λόγος Poisson.
2. Εκτίμηση των αρχικών μέτρων ελαστικότητας (Seed Moduli) που θα χρησιμοποιηθούν από το πρόγραμμα ως δεδομένα εισόδου. Αυτά τα μέτρα ελαστικότητας μπορούν να προσδιοριστούν είτε με βάση την εμπειρία του μηχανικού, είτε υιοθετώντας τυπικές τιμές. Οι τιμές αυτές ενδέχεται να διαφέρουν από πρόγραμμα σε πρόγραμμα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

3. Υπολογισμός των ελαστικών υποχωρήσεων στις αντίστοιχες θέσεις των γεωφώνων του FWD.
4. Σύγκριση των υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων με τις αντίστοιχες μετρημένες με το FWD. Αν η διαφορά μεταξύ τους είναι αποδεκτή τότε τα υποτιθέμενα μέτρα ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα πραγματικά. Αντίθετα, αν η διαφορά είναι μεγάλη θα πρέπει να ξαναεκτιμηθεί ένα αρχικό-υποτιθέμενο μέτρο ελαστικότητας και να επαναληφθεί η διαδικασία (Tutumluer, et al., 2009).

3. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟ ΤΑΧΕΙΑΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (TSD)

3.1 Γενικά στοιχεία

Ορισμός και χαρακτηριστικά συστήματος

Το Traffic Speed Deflectometer (TSD) είναι ένα Παραμορφωσίμετρο Κινούμενου Τροχού RWD (Rolling Wheel Deflectometer) που χρησιμοποιείται για την αποτύπωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος σε επίπεδο δικτύου (network level) (Εικόνα 3.1). Συγκεκριμένα, το TSD χρησιμοποιεί την τεχνολογία αισθητήρων Doppler (Roguin, 2002) προκειμένου να μετρήσει τις ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος (pavement deflections), ενώ κινείται με συνήθη ταχύτητα κυκλοφορίας (έως και 80 km/h ή 50mph).

Τα ανακτόμενα δεδομένα από το TSD παρέχουν το συνεχόμενο προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος, από το οποίο μπορούν να εξαχθούν οι δείκτες δομικής αξιολόγησης (bearing capacity indices), αλλά και να εκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Η φιλοσοφία ανάπτυξης του συστήματος εστιάζει στη γρήγορη και αποτελεσματική αναγνώριση περιοχών κατά μήκος ενός οδικού δικτύου, όπου το οδόστρωμα παρουσιάζει υποβαθμισμένη φέρουσα ικανότητα, με στόχο την βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης.

Το TSD μπορεί να συνδυαστεί και με άλλα υποσυστήματα, τα οποία ταυτόχρονα συλλέγουν λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, κατ' αντιστοιχία με τα προαναφερθέντα δομικά χαρακτηριστικά (Greenwood Engineering, n.d.).



Εικόνα 3.1: TSD system
Πηγή: (Greenwood Engineering, n.d.)

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του TSD είναι τα εξής (Greenwood Engineering, n.d.) (Greenwood Engineering, 2018):

- Δίνει συνεχόμενες μετρήσεις καθώς κινείται με συνήθη ταχύτητα κυκλοφορίας (traffic speed) χωρίς την απαίτηση κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, όπως ο αποκλεισμός των λωρίδων, ελαχιστοποιώντας έτσι το ενδεχόμενο πρόκλησης κυκλοφοριακής συμφόρησης
- Φορτίζει το οδόστρωμα με το αυθεντικό φορτίο του τροχού
- Διαθέτει υψηλή ικανότητα μέτρησης
- Είναι πιο οικονομικό ανά μετρούμενη απόσταση σε σχέση με τις άλλες υπάρχουσες μεθόδους
- Διαθέτει μεταβαλλόμενο φορτίο αντίστασης (ballast load), το οποίο επιτρέπει οι μετρήσεις να γίνονται σε διάφορα επίπεδα φόρτισης, παρέχοντας ακριβή, επαναλαμβανόμενα και αναπαραξίμα αποτελέσματα

Ιστορική εξέλιξη

Το πρώτο TSD παγκοσμίως αναπτύχθηκε από την Greenwood Engineering και παραδόθηκε το **2004** στον κυβερνητικό οργανισμό για οδούς της Δανίας (Danish Road Directorate: DRD), όπου και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα στα πλαίσια της αποτύπωσης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων του εθνικού οδικού δικτύου.

Ακολούθησαν διεθνώς πολλοί φορείς που χρησιμοποιούν ή/και αναπτύσσουν την τεχνολογία TSD για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Μεταξύ αυτών ο οργανισμός Highways Agencies στο Ηνωμένο Βασίλειο, η εταιρία ANAS στην Ιταλία, ο οργανισμός IBDiM στην Πολωνία, ο κυβερνητικός οργανισμός SANRAL (The South African National Roads Agency Limited) στη Νότια Αφρική, το Ίδρυμα Ερευνών RIOH (Research Institute of Highway) στην Κίνα, ο κυβερνητικός οργανισμός FHWA (Federal Highway Administration) στην Αμερική, ο Εθνικός Οργανισμός Έρευνας Μεταφορών ARRB (Australian Road Research Board) στην Αυστραλία, η εταιρία VNA στην Νότια Αφρική, η κοινότητα της Σανγκάης, καθώς και το Ερευνητικό Ινστιτούτο BAST της Γερμανίας (Greenwood Engineering, 2018).

3.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας

3.2.1 Τρόπος λειτουργίας

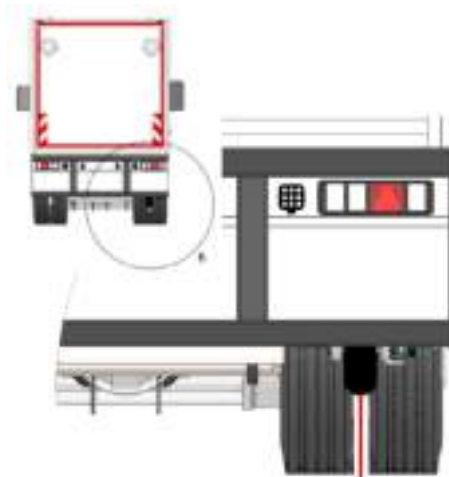
Το σύστημα TSD αποτελείται από ένα βαρέο αρθρωτό όχημα με ρυμουλκό και τροποποιημένο ημιρυμουλκούμενο τριών αξόνων. Το μονοαξονικό ημιρυμουλκούμενο περιέχει κατάλληλο σύστημα μέτρησης μέσω του οποίου μετριέται η αντίδραση στο οδοστρώματος στη φόρτιση που του επιβάλλεται. Το τυπικό αξονικό φορτίο είναι 10 ή 12 tn (Březina, et al., 2017). Ωστόσο το φορτίο αυτό μπορεί να ποικίλει από 58.7 έως 127.6 kN και ρυθμίζεται με τη χρήση ειδικών φορτίων μόλυβδου (Katicha, et al., 2017). Το φορτίο αυτό είναι εγκατεστημένο στο κάτω μέρος του κοντέινερ του ημιρυμουλκούμενου.

Το βασικό μέρος του συστήματος μέτρησης αποτελείται από μια δύσκαμπτη δοκό (Εικόνα 3.2) στην οποία συνήθως τοποθετούνται από 6 έως και 10 αισθητήρες λέιζερ τεχνολογίας Doppler οι οποίοι μετρούν την ταχύτητα των προκαλούμενων ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος στο ίχνος του δεξιού διπλού τροχού (Εικόνα 3.3) (Březina, et al., 2017).



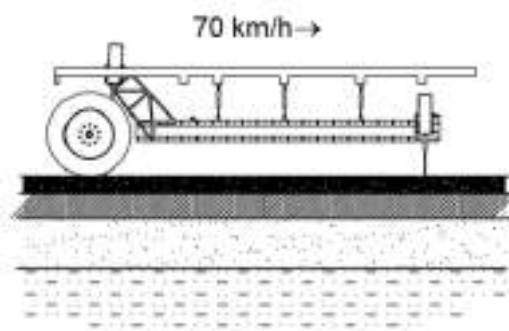
Εικόνα 3.2: Δύσκαμπτη δοκός TSD

Πηγή: (Březina, et al., 2017)

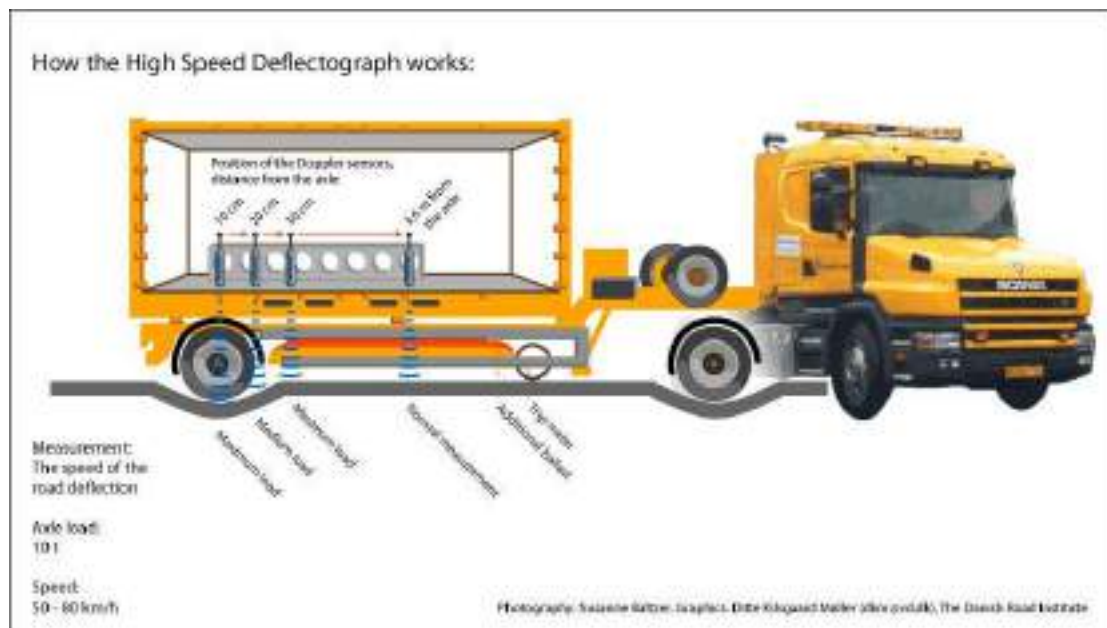


Εικόνα 3.3: Αισθητήρας λέιζερ τεχνολογίας Doppler ανάμεσα στο διπλό τροχό
Πηγή: (Greenwood Engineering, 2018)

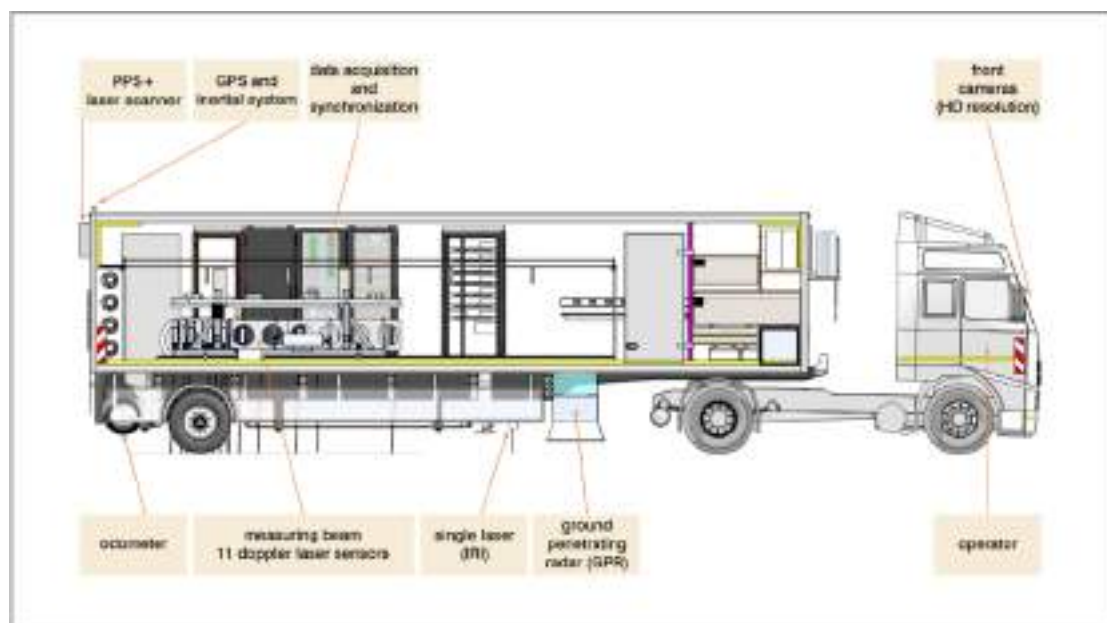
Η αρχική ιδέα ήταν το TSD να περιλαμβάνει 2 αισθητήρες (Εικόνα 3.4), έναν κοντά στο τροχό και έναν άλλον σε αρκετή απόσταση από αυτόν, με στόχο ο τελευταίος να λειτουργεί ως αισθητήρας αναφοράς (Hildebrand & Rasmussen, 2002). Τα πρώτα χρόνια εφαρμογής το TSD-γνωστό στη Δανία ως HSD (High Speed Deflectograph)-περιλάμβανε 4 αισθητήρες λέιζερ τεχνολογίας Doppler σε αποστάσεις 100 mm, 200 mm, 300 mm και 3600 mm μπροστά από τον οπίσθιο δεξί διπλό τροχό (Εικόνα 3.5) (Baltzer, et al., 2010). Ωστόσο, τα τελευταία μοντέλα TSD τείνουν να περιλαμβάνουν 10 ή ακόμη και περισσότερους αισθητήρες οι οποίοι τοποθετούνται εμπρός, αλλά και πίσω, από τον φορτιζόμενο άξονα (Εικόνα 3.6) (Greenwood Engineering, 2018).



Εικόνα 3.4: Σκαρίφημα του πρωτοτύπου TSD
Πηγή: (Hildebrand & Rasmussen, 2002)



Εικόνα 3.5: TSD 4 αισθητήρων τεχνολογίας Doppler (HSD)
Πηγή: (Baltzer, et al., 2010)



Εικόνα 3.6: TSD MESAS του BAST (11 αισθητήρες Doppler και γεωραντάρ)
Πηγή: (Jansen & Podolski, 2019)

Η πιο συνηθισμένη διαμόρφωση του TSD περιλαμβάνει 7 αισθητήρες λέιζερ τεχνολογίας Doppler (Εικόνα 3.7) (Greenwood Engineering, n.d.). Οι πρώτοι 6 καταγράφουν την ταχύτητα ελαστικής υποχώρησης (deflection velocity) σε αποστάσεις 100, 200, 300, 600, 900 και 1500 mm μπροστά από το φορτιζόμενο άξονα. Ο 7ος αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε απόσταση 3500 mm μπροστά από τον οπίσθιο άξονα, αρκετά μακριά από την περιοχή επιρροής του φορτίου προκειμένου να λειτουργεί ως αισθητήρας αναφοράς. Η δοκός στην οποία είναι

τοποθετημένοι οι αισθητήρες κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω αντίθετα με την κίνηση του τρέιλερ ώστε να διατηρούνται οι αισθητήρες σε σταθερό ύψος από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Για να αποφευχθεί η θερμική παραμόρφωση της μεταλλικής δύσκαμπτης δοκού, ειδικό σύστημα ελέγχου κλιματισμού διατηρεί τη θερμοκρασία του τρέιλερ σταθερή στους 20 °C. Η διαδικασία καταγραφής των δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι και ταχύτητα 96 km/h (60 mph) με ρυθμό 1000 Hz (Katicha, et al., 2017). Ωστόσο ανάλογα με την ταχύτητα του οχήματος, ο όγκος των δεδομένων κυμαίνεται περίπου 6 Mb ανά χιλιόμετρο. Αυτό σημαίνει ότι το TSD έχει την δυνατότητα να συλλέγει 1000 δεδομένα το δευτερόλεπτο σε κάθε αισθητήρα γεγονός που το καθιστά ικανό να καταγράφει στοιχεία κάθε 0,02 m (Krarup, et al., 2006).



Εικόνα 3.7: Τυπική διαμόρφωση TSD (7 αισθητήρες τεχνολογίας Doppler)
Πηγή: (Greenwood Engineering, n.d.)

Το υπόλοιπο μέρος του συστήματος περιλαμβάνει υπολογιστικά συστήματα, καθώς και συστήματα υποστήριξης.

Για τη λειτουργία του συστήματος TSD απαιτείται ο οδηγός του οχήματος και ένας χειριστής (operator), ο οποίος ελέγχει τις μετρήσεις και τα υπόλοιπα δεδομένα καταγραφής κατά την διάρκεια των μετρήσεων (Greenwood Engineering, n.d.).

3.2.2 Επιμέρους στοιχεία

Συνοψίζοντας την τεχνική περιγραφή, το TSD περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία (Greenwood Engineering, 2018) (Wix, et al., 2016) :

- **Ειδικούς αισθητήρες λέιζερ τεχνολογίας Doppler** που μετρούν την ταχύτητα των προκαλούμενων ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος στο ίχνος του δεξιού διπλού τροχού.
- **Ειδικά σχεδιασμένο τρέιλερ** και **πλήμνες τροχών** ώστε να γίνονται μετρήσεις κοντά στα ελαστικά των τροχών, μπροστά από τον φορτιζόμενο άξονα αλλά και πίσω από αυτόν.

- **Σερβοσυστήματα και αδρανειακές μονάδες** που συνεχώς παρακολουθούν και ρυθμίζουν τη θέση των αισθητήρων τεχνολογίας Doppler. Πρόκειται για δυναμικά συστήματα που ελέγχουν την κάθετη θέση των πλασίων μέσα στα οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες και επιβεβαιώνουν ότι παραμένουν μέσα στο επιτρεπτό λειτουργικό εύρος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Η θέση του πλαισίου καθορίζεται μέσω μετρήσεων που γίνονται από έναν ειδικό αισθητήρα λέιζερ ύψους που μετράει την απόσταση από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- **Μετρητές καταπόνησης.** Το TSD διαθέτει 4 μετρητές καταπόνησης τοποθετημένους στον οπίσθιο άξονα (έναν από πάνω και έναν από κάτω σε κάθε πλευρά) παρέχοντας μια ένδειξη του δυναμικού φορτίου. Οι μετρητές αυτοί πρέπει να ελέγχονται ώστε να επιβεβαιώνεται ότι είναι σωστά βαθμονομημένοι και ότι η απόκλιση μέσα στον αισθητήρα είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια.
- **Οδόμετρο (Odometer).** Πρόκειται για μια συσκευή μέτρησης υψηλής ανάλυσης με την οποία επιτυγχάνεται η μέτρηση της διανυθείσας απόστασης και της ταχύτητας του οχήματος με υψηλή ακρίβεια.
- **Ειδικό φορτίο σταθεροποίησης (special ballast load)** το οποίο είναι τοποθετημένο κάτω από το τρέιλερ. Το συγκεκριμένο φορτίο μπορεί να αφαιρεθεί ή να ανανεωθεί γεγονός που επιτρέπει στο TSD να μετράει τις αντιδράσεις του οδοστρώματος που προκαλούνται από διαφορετικά φορτία ανά περίπτωση.
- **Αισθητήρες θερμοκρασίας,** τοποθετημένοι εντός του τρέιλερ ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία της δοκού στην οποία είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες τεχνολογίας Doppler καθώς και η διακύμανση της θερμοκρασίας στο χώρο. Επιπλέον, τέτοιοι αισθητήρες τοποθετούνται και εκτός του τρέιλερ ώστε να μετριέται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα αλλά και του οδοστρώματος.

Επιπλέον, τα TSD περιλαμβάνουν συμπληρωματικά συστήματα συλλογής δεδομένων που σχετίζονται με την ανίχνευση της στρωματογραφίας (GPR) αλλά και με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, στα συστήματα αυτά συμπεριλαμβάνονται (Greenwood Engineering, 2018) (Jansen & Podolski, 2019) (Wix, et al., 2016):

- **Σύστημα Γεωραντάρ (GPR: Ground Penetrating Radar)**, που αποσκοπεί στην μη-καταστροφική ανίχνευση της στρωματογραφίας του οδοστρώματος, δηλαδή στο καθορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος καθώς και στον εντοπισμό τυχόν ανομοιογένειας είτε στο οδόστρωμα είτε στην στρώση έδρασης. Ένα τέτοιο σύστημα συνήθως περιλαμβάνεται στα TSD τελευταίας γενιάς, όπως το TSD MESAS του ερευνητικού ινστιτούτου BAST στην Γερμανία.
- **Σύστημα Laser Profiler**, μέσω του οποίου γίνεται η μέτρηση της τραχύτητας και της μακροϋφής του οδοστρώματος.
- **Σύστημα ψηφιακής απεικόνισης**, αποτελούμενο από 5 κάμερες μέσω των οποίων υπάρχει ζωντανή εικόνα της οδού μπροστά αλλά και πίσω από το TSD.
- **3D Σύστημα απεικόνισης του οδοστρώματος (3D pavement imaging system)**, για αυτόματη αναγνώριση ρωγμών και εγκάρσιο προφίλ μετρήσεων.

3.3 Διαδικασία μετρήσεων

3.3.1 Βασική αρχή

Όπως έχει προαναφερθεί, βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας του TSD αποτελεί η χρήση της τεχνολογίας Doppler. Η τεχνική αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Αυστριακό φυσικό Christian Johann Doppler (Roguin, 2002), ο οποίος απέδειξε ότι το μήκος κύματος του φωτός, του ήχου ή οποιαδήποτε άλλης ενεργειακής διασποράς που καταγράφεται από έναν κινούμενο παρατηρητή θα αλλάξει φάση με έναν συντελεστή v/c όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$F_{Doppler} = -F_{source} * \frac{v}{c} \quad (3.1)$$

Όπου

- v : σχετική ταχύτητα ανάμεσα σε πηγή και δέκτη
- c : η ταχύτητα διάδοσης του κύματος
- $F_{Doppler}$: μετατοπισμένη συχνότητα στον δέκτη
- F_{source} : εκπεμπόμενη συχνότητα

Η αλλαγή της συχνότητας οφείλεται στην μεταβολή του μήκος του εκπεμπόμενου κύματος. Συγκεκριμένα, το μήκος κύματος μειώνεται όταν το αντικείμενο πλησιάζει

ενώ αντίθετα αυξάνεται όταν το αντικείμενο απομακρύνεται (Εικόνα 3.8) (Hildebrand & Rasmussen, 2002).



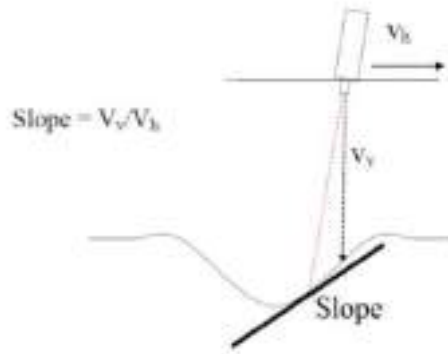
Εικόνα 3.8: Μετατόπιση Doppler
Πηγή: (Hildebrand & Rasmussen, 2002)

3.3.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Το επιβαλλόμενο φορτίο εφαρμόζεται στο οδόστρωμα μέσω των τροχών του TSD προκαλώντας την παραμόρφωση του οδοστρώματος (deflection bowl). Η ταχύτητα των ελαστικών υποχωρήσεων που προκαλούνται καταγράφεται με τη χρήση των αισθητήρων λέιζερ τεχνολογίας Doppler. Συγκεκριμένα, η εκπεμπόμενη ακτίνα λέιζερ αντανακλάται από το οδόστρωμα και ο αισθητήρας μετράει τη ταχύτητα της βραχυπρόθεσμης ελαστικής υποχώρησης του φορτισμένου οδοστρώματος στην διεύθυνση της ακτίνας λέιζερ (Březina, et al., 2017). Ουσιαστικά, οι αισθητήρες μετράνε την αλλαγή της συχνότητας της ακτίνας laser σύμφωνα με την ταχύτητα της παραμόρφωσης του οδοστρώματος (Krarup, et al., 2006).

Καθώς οι αισθητήρες δεν τοποθετούνται ακριβώς κάθετα στο οδόστρωμα, η ακτίνα λέιζερ προσκρούει στο οδόστρωμα υπό γωνία 2 μοιρών. Έτσι, οι αισθητήρες τεχνολογίας Doppler μετρούν πέρα από την ταχύτητα της κάθετης παραμόρφωσης του οδοστρώματος V_v και την οριζόντια ταχύτητα V_H , δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται το όχημα (vehicle speed). Σχετικά μικρές γωνίες επιτρέπουν την είσοδο της ταχύτητας του οχήματος στους υπολογισμούς ενώ η επίδραση τους στην κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας παραμόρφωσης είναι αμελητέα. Έτσι λοιπόν είναι εφικτό να υπολογιστεί η κλίση εκτροπής (deflection slope) εκφρασμένη σε $\mu\text{m}/\text{m}$, δηλαδή η εφαπτομένη κάθε σημείου της καμπύλης του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (deflection bowl) (Εικόνα 3.9). Συγκεκριμένα η κλίση εκτροπής (slope) υπολογίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας της κάθετης παραμόρφωσης V_v προς την οριζόντια ταχύτητα V_H (ταχύτητα του οχήματος) δηλαδή:

$$\text{Slope} = \frac{V_v}{V_H} \quad (3.2)$$



Εικόνα 3.9: Υπολογισμός κλίσης εκτροπής του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (slope of deflection bowl)

Πηγή: (Březina, et al., 2017)

Καθώς η κλίση εκτροπής (deflection slope) αποτελεί παράγουσα της ελαστικής υποχώρησης, είναι εφικτό μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης να υπολογιστούν οι τελευταίες (Březina, et al., 2017). Ισχύει δηλαδή η εξίσωση (Katicha, et al., 2017):

$$d(x) = \int_x^{\infty} s(y)dy \quad (3.3)$$

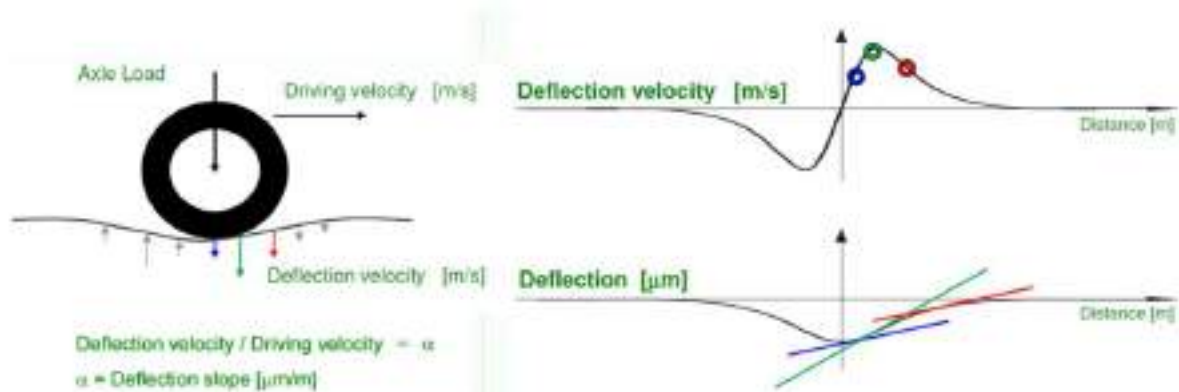
Όπου:

- $s(y)$: η κλίση σε απόσταση y από το εφαρμοσμένο φορτίο
- $d(x)$: η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση x από το εφαρμοσμένο φορτίο.

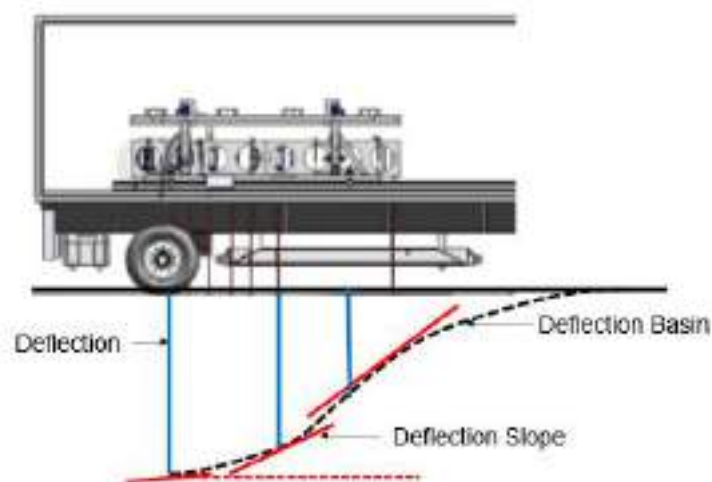
Έτσι λοιπόν υπολογίζονται η καμπύλη που απεικονίζει το προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων κάτω από το φορτίο καθώς και διάφορα χαρακτηριστικά της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος όπως είναι η κεντρική ελαστική υποχώρηση d_0 και ο δείκτης SCI_{300} (Structural Curvature Index). Για τον υπολογισμό του SCI χρησιμοποιείται ο παρακάτω μαθηματικός τύπος:

$$SCI_{300} = \int_0^{300} s(x)dx = d_{300} - d_0 \quad (3.4)$$

Όπου $s(x)$: η κλίση σε απόσταση x και $d(x)$: η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση x



Εικόνα 3.10: Σχέση ταχυτήτων ελαστικών υποχωρήσεων-ελαστικών υποχωρήσεων-κλίσεως εκτροπής
Πηγή: (Březina, et al., 2017)



Εικόνα 3.11: Σχέση μεταξύ ελαστικής υποχώρησης (deflection), κλίσης εκτροπής (deflection slope) και προφίλ ελαστικών υποχωρήσεων (deflection basin)
Πηγή: (Katicha, et al., 2017)

Το μικρότερο δυνατό βήμα στο οποίο μπορεί να γίνει εξαγωγή των μετρημένων στοιχείων από το TSD είναι τα 10 m. Η οριακή αυτή τιμή δόθηκε από λογισμικό της Greenwood Engineering A/S, που χρησιμοποιείται για περαιτέρω επεξεργασία των μετρημένων τιμών. Ωστόσο, είναι εφικτή η εκτίμηση των δεδομένων για απόσταση μικρότερη των 10 m, χωρίς όμως τις τιμές των υπολογισμένων υποχωρήσεων. Όταν υπολογίζονται υποχωρήσεις σε σταθερές αποστάσεις, η αντιπροσωπευτική τιμή της υποχώρησης για κάθε απόσταση υπολογίζεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στο χρησιμοποιούμενο λογισμικό (Březina, et al., 2017).

3.4 Υπολογισμός ελαστικών υποχωρήσεων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η εξαγωγή του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων (Deflection Basin) από τις μετρούμενες ταχύτητες των υποχωρήσεων. Οι πιο βασικές μέθοδοι παρουσιάζονται παρακάτω.

3.4.1 Μέθοδος Rasmussen

Προκειμένου να καθοριστούν οι τιμές των πραγματικών ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος, οι κλίσεις εκτροπής θα πρέπει να ολοκληρωθούν με την χρήση της λύσης ενός μηχανιστικού μοντέλου όπως είναι η ελαστική δοκός σε έδαφος κατά Winkler (Manoharan, et al., 2018). Σύμφωνα με τη μέθοδο Rasmussen, το οδόστρωμα συμπεριφέρεται ως μια ελαστική δοκός εδραζόμενη πάνω σε θεμέλιο το οποίο προσομοιώνεται με γραμμικά ελατήρια. Η διάταξη αυτή, εκφράζεται από την εξίσωση δοκού Euler-Bernoulli:

$$EI \frac{d^4}{dx^4} w(x) + kw(x) = -F\delta(x) \quad (3.5)$$

Όπου:

- F: σημειακή δύναμη
- E: μέτρο ελαστικότητας
- I: ροπή αδρανείας
- h: πάχος του οδοστρώματος
- k: σταθερά του ελατηρίου

Η επίλυση στην ανωτέρα διαφορική εξίσωση είναι ένα μοντέλο 2 παραμέτρων A και B, όπου $x \geq 0$, $A > 0$ και $B > 0$. (Rasmussen, et al., 2008).

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής (Kragur, 2012):

- $w(x) \rightarrow 0$ για $x \rightarrow \pm \infty$
- $(d/dx)w(0+) = 0$

Από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (3.5) προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού της ελαστικής υποχώρησης $d(x)$ (deflection), της κλίσης εκτροπής $d'(x)$ (deflection slope), της καμπυλότητας $d''(x)$ (curvature), του μέτρου ελαστικότητας E και του μέτρου δυσκαμψίας k:

$$d(x) = -\frac{A}{2B} * (\cos(Bx) + \sin(Bx)) * e^{-Bx} \quad (3.6)$$

$$d'(x) = A(\sin(Bx))e^{-Bx} \quad (3.7)$$

$$d''(x) = AB(\cos(Bx) - \sin(Bx))e^{-Bx} \quad (3.8)$$

$$E = \frac{F^2}{4A^2kI} = \frac{F}{4IAB^2} \quad (3.9)$$

$$k = 4B^2EI = \frac{FB^2}{A} \quad (3.10)$$

Επίσης, προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού κάποιων χαρακτηριστικών της φέρουσας ικανότητας όπως είναι η μέγιστη ελαστική υποχώρηση $d(0)$, ο δείκτης SCI_{300} (Structural Curvature Index 300), η μέγιστη κλίση $d'(\pi/(4B))$ και η καμπυλότητα κάτω από το τροχό $d''(0)$:

$$d(0) = -\frac{A}{2B} \quad (3.11)$$

$$SCI_{300} = d(0) - d(300) \quad (3.12)$$

$$d'\left(\frac{\pi}{4B}\right) = \frac{e^{-\pi/4}}{\sqrt{2}} A \quad (3.13)$$

$$d''(0) = AB \quad (3.14)$$

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί σε TSD διάταξης τεσσάρων αισθητήρων Doppler, οι τρεις από τους οποίους βρίσκονται σε αποστάσεις 100, 200 και 300 mm από το κέντρο φόρτισης ενώ ο τελευταίος βρίσκεται έξω από την ζώνη επιρροής του φορτίου και λειτουργεί ως αισθητήρας αναφοράς. Ως συνέπεια αυτού, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αξιόπιστα μόνο στην περιοχή κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Με 3 μετρημένες κλίσεις $d'(100)$, $d'(200)$, $d'(300)$ είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι σταθερές A και B με τη χρήση της εξίσωσης (3.7). Στη συνέχεια οι σταθερές αυτές χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (3.6) και έτσι προκύπτει η καμπύλη προφίλ των υποχωρήσεων (deflection basin), καθώς και τα υπόλοιπα μεγέθη που παρουσιάστηκαν.

Ωστόσο, η ακρίβεια του συγκεκριμένου μοντέλου είναι περιορισμένη καθώς περιέχει μόνο 2 παραμέτρους. Σε διατάξεις TSD αποτελούμενες από περισσότερους αισθητήρες, αυξάνεται η ακρίβεια του συστήματος καθώς και των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Επιπλέον, οι περισσότεροι αισθητήρες προσφέρουν τη δυνατότητα χρήσης μοντέλων με περισσότερους παραμέτρους ενώ η τοποθέτησή τους σε αποστάσεις μακριά από το φορτίο καθιστούν εφικτό τον καθορισμό των επιδράσεων των διαφορετικών στρώσεων του οδοστρώματος (Rasmussen, et al., 2008).

3.4.2 Μέθοδος AUTC (Area Under the Curve)

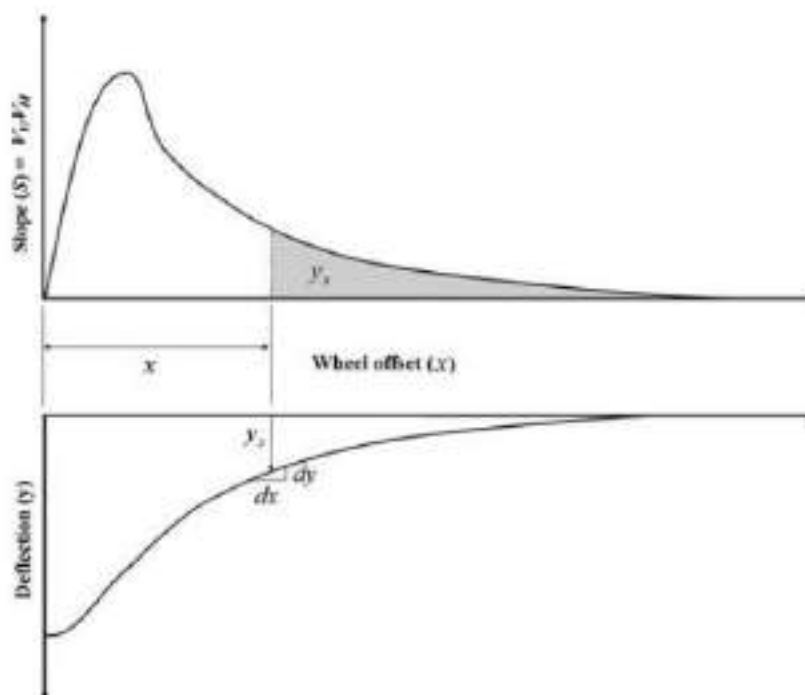
Η ανάλυση των εξαγόμενων στοιχείων του TSD ώστε να παραχθεί το επιθυμητό προφίλ των υποχωρήσεων μπορεί να γίνει και με μια άλλη προσέγγιση που είναι γνωστή ως μέθοδος AUTC (Area Under the Curve). Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε το 2010 μετά τις αρχικές δοκιμές του TSD στην Αυστραλία και χρησιμοποιεί την προσέγγιση αριθμητικής ολοκλήρωσης (Manoharan, et al., 2018).

Όπως είναι γνωστό, το TSD μετράει τις κάθετες ταχύτητες της επιφάνειας του οδοστρώματος σε καθορισμένες αποστάσεις από το κέντρο επιβολής του φορτίου, κατά μήκος του ίχνους του διπλού τροχού, καθορίζοντας έτσι το προφίλ των κάθετων ταχυτήτων του φορτισμένου οδοστρώματος. Η τιμή της ταχύτητας σε κάθε σημείο είναι μια συνάρτηση της αντοχής του οδοστρώματος, της απόστασης του κάθε αισθητήρα τεχνολογίας Doppler από το κέντρο της φόρτισης, καθώς και της οριζόντιας ταχύτητας του οχήματος (καθώς επηρεάζει την ταχύτητα της κάθετης φόρτισης). Στη συνέχεια υπολογίζεται η κλίση εκτροπής σε κάθε σημείο μέτρησης ως το πηλίκο της κάθετης προς την οριζόντια ταχύτητα (ταχύτητα οχήματος). Έτσι υπολογίζεται η πραγματική κλίση που εμφανίζει η επιφάνεια του οδοστρώματος όταν φορτίζεται από τους τροχούς του TSD. Αυτές οι τιμές αποτυπώνονται σε διάγραμμα συναρτήσεως της απόστασης από το κέντρο φόρτισης (Manoharan, et al., 2018). Μία καμπύλη προσαρμόζεται σε αυτά τα σημεία, με τις προϋποθέσεις ότι οι κλίσεις στο κέντρο της φόρτισης (σημείο 0) και σε απόσταση 3500 mm (θέση απομακρυσμένου αισθητήρα) ισούνται με 0 (Elbagalati, et al., 2018). Τελικά, αποδεικνύεται ότι η συνολική επιφάνεια κάτω από την προκύπτουσα καμπύλη, από το σημείο ενδιαφέροντος έως το πέρας της καμπύλης, ισούται με την υποχώρηση του οδοστρώματος του σημείου αυτού και έτσι είναι δυνατή η αποτύπωση του προφίλ των υποχωρήσεων (Deflection Basin) (Εικόνα 3.12). Ισχύει δηλαδή ότι:

$$y_x = \sum_x^{\infty} (V_v/V_h) dx = \sum_x^{\infty} Slope * dx \quad (3.15)$$

Όπου:

- y_x : η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση x ,
- V_v : κάθετη ταχύτητα επιφάνειας οδοστρώματος
- V_h : οριζόντια ταχύτητα (ταχύτητα οχήματος)



Εικόνα 3.12: Μέθοδος AUTC
Πηγή: (Muller & Roberts, 2013)

Επιπλέον, η διαφορά των ελαστικών υποχωρήσεων δύο σημείων, όπως για παράδειγμα η διαφορά D_0 - D_{200} , μπορεί να υπολογιστεί ως η περιοχή που ορίζεται κάτω από τη καμπύλη του διαγράμματος κλίσης S -Απόστασης x (Slope(S)-Wheel offset (X)) και βρίσκεται ανάμεσα στα δύο αυτά σημεία (Manoharan, et al., 2018).

3.4.3 Άλλοι μέθοδοι

Μέθοδος Graczyk

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου χρησιμοποιείται μια μοναδική αναλυτική λύση για τον υπολογισμό των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος που προσομοιάζεται από μια ενιαία στρώση. Συγκεκριμένα, το οδόστρωμα προσομοιάζεται ως δοκός τύπου Euler-Bernoulli εδραζόμενη σε ιξωδοελαστική βάση, ενώ το φορτίο προσομοιάζεται ως ένα σύνολο συγκεντρωμένων δυνάμεων κινούμενων με σταθερή ταχύτητα (Graczyk, et al., 2014).

Μέθοδος Zofka

Η μέθοδος Zofka (Zofka, et al., 2014) ερμηνεύει τα αποτελέσματα του TSD βασισμένη σε έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί προσέγγιση τύπου Euler, σε αντίθεση με την προσέγγιση τύπου Lagrange. Ο αλγόριθμος αυτός έχει τα εξής δύο διακριτά χαρακτηριστικά:

- επικεντρώνεται σε διακριτά σημεία κατά μήκος της διαδρομής του TSD, καθορίζοντας την ιστορία της παραμόρφωσης του κάθε σημείου ως συνάρτηση του χρόνου.
- χρησιμοποιεί ειδική συνάρτηση για τον υπολογισμό της κλίσης ως προς τη θέση των αισθητήρων για κάθε σημείο μέτρησης του TSD.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτρέπει τους ενεργούς χρήστες να προσαρμόσουν τα δεδομένα του TSD στις δικές τους ανάγκες και απαιτήσεις. Επιπλέον, η ιστορία των υποχωρήσεων του κάθε διακριτού σημείου (Eulerian), μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό της αποκατάστασης οδοστρώματος εφαρμόζοντας διαδικασίες ομαδοποίησης των σημείων εκείνων που παρουσιάζουν παρόμοια φέρουσα ικανότητα. Η μέθοδος Zofka παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και συνεπώς αναμένεται να αναπτυχθεί και να χρησιμοποιηθεί στο κοντινό μέλλον, όπου η ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων θα δεδομένων θα έχει αυξηθεί.

3.5 Δείκτες δομικής κατάστασης (TSD)

3.5.1 Δείκτης D_0 (TSD)

Ορισμός

Σε πλήρη αντιστοιχία με το FWD, ως D_0 ορίζεται η κεντρική ελαστική υποχώρηση, δηλαδή η υποχώρηση που εμφανίζεται ακριβώς κάτω από τον οπίσθιο άξονα, στο μέσον του διπλού τροχού.

Διόρθωση τιμής D_0 ως προς τη θερμοκρασία

Οι τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων, συμπεριλαμβανομένου του D_0 , που μετρούνται από το TSD διορθώνονται, όπως και οι αντίστοιχες του FWD, σε μια θερμοκρασία αναφοράς. Ως θερμοκρασία αναφοράς, χρησιμοποιείται συνήθως η τιμή 20°C. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Bell (3.16) υπολογίζεται η θερμοκρασία του οδοστρώματος στο μέσον της ασφατικής στρώσης (Elbagalati, et al., 2018).

$$T_f = 0,95 + 0,892 * IR + [\log(d) - 2,65] * [-0,448 * IR + 0,621 * (1day) + 1,83 * \sin(hr18 - 15)] + 0,042 * IR * \sin(hr18 - 13,5) \quad (3.16)$$

Όπου:

- T_f : θερμοκρασία του οδοστρώματος στο μέσον της ασφατικής στρώσης (°C)
- IR : θερμοκρασία επιφάνειας οδοστρώματος (°C)

- d: το μισό πάχος της ασφαλικής στρώσης (inches)
- 1 day: μέση θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα την προηγούμενη ημέρα της μέτρησης (°C)
- hr18: ώρες την ημέρα, σε 24ωρο σύστημα ρολογιού, αλλά υπολογισμένο με την χρήση 18ωρου-αύξησης και πτώσης θερμοκρασίας του ασφαλικού σκυροδέματος-κύκλου (Shrestha, et al., 2018)

Στην συνέχεια, οι ελαστικές υποχωρήσεις διορθώνονται με την χρήση του συντελεστή λ_w η τιμή του οποίου υπολογίζεται από την σχέση (3.17)

$$\lambda_w = \frac{w_{T0}}{w_T} \quad (3.17)$$

Όπου:

- w_{T0} : η ελαστική υποχώρηση διορθωμένη στη θερμοκρασία αναφοράς T_0
- w_T : η ελαστική υποχώρηση σε θερμοκρασία T
- λ_w : ο συντελεστής διόρθωσης ελαστικών υποχωρήσεων που υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση

$$\lambda_w = 10^{-C \cdot (H_{ac}) \cdot (T - T_0)} \quad (3.18)$$

Όπου:

- H_{ac} : το πάχος της στρώσης (inches) του ασφαλικού σκυροδέματος (asphalt concrete)
- C : σταθερά παλινδρόμησης, η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$C = -A \cdot r + C_0 \quad (3.19)$$

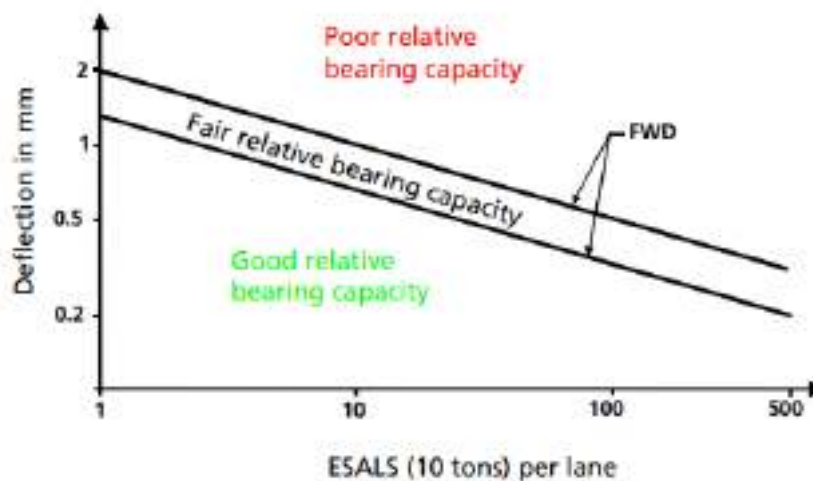
Όπου:

- r : αξονική απόσταση από το κέντρο εφαρμογής του φορτίου
- A : συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωγραφική θέση της οδού ($-5,26 \cdot 10^{-8}$ για Κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής)
- C_0 : συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωγραφική θέση της οδού ($5,80 \cdot 10^{-5}$ για Κεντρικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής) (Elbagalati, et al., 2018).

Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη D_0

Ένας τρόπος αξιολόγησης της δομικής κατάστασης με τη χρήση του δείκτη D_0 είναι μέσω του διαγράμματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.13. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στις μετρήσεις του TSD (ή HSD) σε mm (κατακόρυφος άξονας)

και στην κυκλοφορία ανά λωρίδα εκφρασμένη σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (οριζόντιος άξονας) και κατηγοριοποιεί τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος σε καλή (good), μέτρια (fair) και κακή (poor). Η κατηγοριοποίηση αυτή, χρησιμοποιείται μεταγενέστερα για την παρακολούθηση της εξέλιξης της κατάστασης του οδοστρώματος συναρτήσει του χρόνου και της κυκλοφορίας καθώς επίσης παίζει καθοριστικό ρόλο στον προγραμματισμό έργων συντήρησης και αποκατάστασης του οδοστρώματος. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τον εντοπισμό των τμημάτων του οδοστρώματος που χρειάζονται πιο λεπτομερής εξέταση με το FWD. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα εντοπισμού τμημάτων του οδικού άξονα με οξεία προβλήματα στα οποία χρήζουν εργασίες άμεσης επισκευής (Hildebrand & Rasmussen, 2002).



Εικόνα 3.13: Αξιολόγηση σχετικής φέρουσας ικανότητας
Πηγές: (Hildebrand & Rasmussen, 2002)

Εναλλακτικά, για εύκαμπτα οδοστρώματα λεπτής ασφαλτικής στρώσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 3.1 που προτείνει ο Manoharan.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη D_0
Πηγή: (Manoharan, et al., 2018)

Χαρακτηρισμός Δομικής Κατάστασης οδοστρώματος	D_0 (μm)
Πολύ καλή	$D_0 \leq 160$
Καλή	$160 < D_0 \leq 300$
Μέτρια	$300 < D_0 \leq 650$
Κακή	$650 < D_0 \leq 1535$
Πολύ κακή	$D_0 > 1535$

Παρατηρείται ότι οι τιμές των ορίων του Πίνακα 3.1 που προτείνει ο Manoharan είναι σχετικά υψηλά. Οι υψηλές αυτές τιμές των ορίων έχουν προκύψει από τα αντίστοιχα υψηλά όρια συστήματος FWD (Πίνακας 3.2)

Πίνακας 3.2: Υπάρχουσα όρια D_0 (FWD) (40KN) κατά Manoharan (2018)
Πηγή: (Manoharan, et al., 2018)

D_0 FWD (40KN) (μm)	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
≤ 200	πολύ καλή
$200 < D_0 \leq 340$	καλή
$340 < D_0 \leq 700$	μέτρια
$700 < D_0 \leq 1600$	κακή
$D_0 > 1600$	πολύ κακή

Τα υψηλά όρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 έχουν προκύψει από την εμπειρία των Manoharan, Chai και Chowdhury για οδοστρώματα λεπτής ασφαλικής στρώσης, καθώς αυτό είναι το συνηθισμένο είδος οδοστρωμάτων στην Αυστραλία, γι' αυτό και είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα προτεινόμενα των Hakim&Brown (Πίνακας 2.7).

3.5.2 Δείκτης SCI (TSD)

Ορισμός

Ο δείκτης Surface Curvature Index (SCI) είναι ένας από τους πιο γνωστούς δείκτες που προκύπτουν από την καμπύλη του προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων και έχει αποδειχθεί ότι σχετίζεται άμεσα με την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_t στο πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Όπως έχει προαναφερθεί, ο δείκτης SCI υπολογίζεται ως η διαφορά της ελαστικής υποχώρησης που παρουσιάζεται στο μέσον του διπλού τροχού και της υποχώρησης που εμφανίζεται σε 300 mm μπροστά από αυτό το σημείο και θεωρείται από τους πιο αξιόπιστους δείκτες για την εκτίμηση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης στο πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Αύξηση του δείκτη SCI με το πέρασμα των χρόνων υποδεικνύει μείωση της φέρουσας ικανότητας

Διόρθωση του SCI ως προς τη θερμοκρασία

Ένας τρόπος να γίνει η αναγωγή του δείκτη SCI στη θερμοκρασία αναφοράς είναι ακολουθώντας τη μεθοδολογία **SAM** (Stiffness Adjustment Model). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται σε ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο προσαρμόζει το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων. Τα βήματα της μεθοδολογίας SAM είναι τα εξής:

1. Υπολογισμός της εφελκυστικής παραμόρφωσης ε στο πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων μέσω του δείκτη SCI_{TSD} (μm) που προέκυψε από τις μετρήσεις του TSD.

$$\varepsilon = \alpha * (SCI_{300})^b \quad (3.20)$$

Όπου α και b παράμετροι του μοντέλου που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 και εξαρτώνται από το πάχος των ασφαλικών στρώσεων. Στην περίπτωση που το πάχος των ασφαλικών στρώσεων δεν είναι γνωστό, προτείνονται καθορισμένες τιμές για τις παραμέτρους ανάλογα με το αν πρόκειται για ένα λεπτό οδόστρωμα ή για ένα οδόστρωμα μέτριου πάχους ή για ένα παχύ οδόστρωμα.

2. Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων E_f (σε MPa) στην επικρατούσα θερμοκρασία κατά την διάρκεια των μετρήσεων

$$E_f = c * \varepsilon^d \quad (3.21)$$

Όπου c και d παράμετροι του μοντέλου, οι τιμές των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 3.3 και εξαρτώνται από το πάχος των ασφαλικών στρώσεων. Στην περίπτωση που το πάχος των ασφαλικών στρώσεων δεν είναι γνωστό, προτείνονται καθορισμένες τιμές για τις παραμέτρους ανάλογα με το τύπο του οδοστρώματος (λεπτό, μέτριο, παχύ).

3. Υπολογισμός συντελεστή προσαρμογής θερμοκρασίας T_c για το μέτρο ελαστικότητας.

$$T_c = \frac{e^{-0,43 * T_r}}{e^{-0,043 * T_f}} \quad (3.22)$$

Όπου T_r η θερμοκρασία αναφοράς και T_f η θερμοκρασία στο μέσον των ασφαλικών στρώσεων τη στιγμή των μετρήσεων.

4. Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων E_r (σε MPa) στην θερμοκρασία αναφοράς.

$$E_r = \frac{E_f}{T_c} \quad (3.23)$$

5. Υπολογισμός της παραμόρφωσης ε_r , στη θερμοκρασία αναφοράς τροποποιώντας την σχέση (3.21) ως εξής:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{E_f}{c} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (3.24)$$

6. Υπολογισμός του SCI_{TSD} (μm) προσαρμοσμένο στη θερμοκρασία αναφοράς χρησιμοποιώντας την αντίστροφη της σχέσης (3.20).

Πίνακας 3.3: Παράμετροι μοντέλου SAM
Πηγή: (Nasimifar, et al., 2018)

Πάχος Ασφαλτικών Στρώσεων	a	b	c	d
76-102 mm (3-4 inches)	2,335	0,962	3,64E+06	-1,27
102-127 mm (4-5 inches)	1,875	1,02	4,52E+06	-1,36
127-152 mm (5-6 inches)	1,957	1,024	4,98E+06	-1,44
152-178 mm (6-7 inches)	2,452	0,987	4,41E+06	-1,46
178-203 mm (7-8 inches)	2,876	0,952	3,42E+06	-1,46
203-229 mm (8-9 inches)	3,381	0,912	3,39E+06	-1,51
229-254 mm (9-10 inches)	3,786	0,882	2,54E+06	-1,49
254-279 mm (10-11 inches)	4,375	0,8373	2,27E+06	-1,51
279-305 mm (11-12 inches)	4,701	0,8103	1,99E+06	-1,52
305-330 mm (12-13 inches)	4,905	0,7895	1,72E+06	-1,53
330-356 mm (13-14 inches)	5,392	0,7479	1,59E+06	-1,55
356-381 mm (14-15 inches)	5,015	0,7594	1,11E+06	-1,49
381- 406 mm (15-16 inches)	5,248	0,7285	1,00E+06	-1,51
Λεπτή Ασφαλτική Στρώση 76-152 mm (3-6 inches)	2,883	0,927	9,65E+05	-1,072
Μεσαία Ασφαλτική Στρώση 152- 229 mm (6-9 inches)	3,071	0,935	1,37E+06	-1,264
Παχιά Ασφαλτική Στρώση 229-406 mm (9-16 inches)	4,115	0,8412	2,76E+05	-1,076

Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει αρκετούς περιορισμούς, ειδικά στην περίπτωση των οδοστρωμάτων μικρού πάχους, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Οι συντελεστές προσαρμογής που χρησιμοποιούνται είναι σχεδόν ανεπηρέαστοι από το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων, ενώ - όπως είναι γνωστό - το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων έχει σημαντική επίδραση στην τιμή του SCI_{TSD} και επομένως αναμενόταν ο συντελεστής προσαρμογής να είναι συνάρτηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων και της θερμοκρασίας.

- Η ελαστική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στη μέθοδο SAM δεν προσομοιώνει κατάλληλα ούτε τη δυναμική αντίδραση του οδοστρώματος στο φορτίο του τροχού, όπως η φόρτιση που επιβάλλει το TSD, ούτε τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλικών στρώσεων.
- Παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό φόρτο στα πλαίσια διαχείρισης του οδοστρώματος σε επίπεδο δικτύου.

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η αναγωγή του δείκτη SCI στη θερμοκρασία αναφοράς, είναι με τη χρήση του μοντέλου **VEA** (Viscoelastic analysis). Πρόκειται για ένα πρακτικό μοντέλο που βασίζεται στην προσομοίωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς πληθώρας οδοστρωμάτων υπό τις συνθήκες φόρτισης του TSD και αναπτύχθηκε με τη συμβολή του προγράμματος 3D-Move. Η συγκεκριμένη μέθοδος προτείνει συντελεστή προσαρμογής λ που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{SCI_{Ref}}{SCI_T} = \frac{10^{-0,0521 \cdot T_{Ref} + 0,0322 \cdot T_{Ref} \cdot \log(h_{AC})}}{10^{-0,0521 \cdot T + 0,0322 \cdot T \cdot \log(h_{AC})}} \quad (3.25)$$

Όπου:

- λ : συντελεστής προσαρμογής θερμοκρασίας
- SCI_{Ref} : προσαρμοσμένος συντελεστής SCI_{TSD} στη θερμοκρασία αναφοράς
- T_{Ref} : θερμοκρασία αναφοράς (°C)
- T : θερμοκρασία στο μέσον των ασφαλικών στρώσεων τη στιγμή της μέτρησης (°C). Για την εκτίμηση της, χρησιμοποιείται η εξίσωση Bell ([3.16](#)).
- h_{AC} : πάχος ασφαλικών στρώσεων (mm)
- Φ : γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας των μετρήσεων (από 30 έως 50 βαθμούς)

Συγκριτικά με την προηγούμενη μέθοδο, παρατηρείται ότι οι δείκτες προσαρμογής που προέρχονται από την μέθοδο SAM είναι παρόμοιοι σε διαφορετικά πάχη ασφαλικά στρώσεων, ενώ οι αντίστοιχοι δείκτες που έχουν προκύψει από τη μέθοδο VEA εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία αλλά και από το πάχος των ασφαλικών στρώσεων (Nasimifar, et al., 2018) .

Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη SCI

Στον [Πίνακα 3.4](#) παρουσιάζονται τα όρια του δείκτη SCI (μm) σύμφωνα με τα οποία γίνεται η ταξινόμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, ανάλογα με την κατηγορία του οδικού άξονα στον οποίο γίνονται οι μετρήσεις.

Πίνακας 3.4: Χαρακτηρισμός δομικής κατάστασης οδοστρώματος βάσει του δείκτη SCI (μm)
 Πηγή: (Shrestha, et al., 2018)

Κατηγορία οδού	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (inches)	Ετήσια κυκλοφορία (Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες *10 ⁶)	Χαρακτηρισμός οδοστρώματος	SCI (μm)
Εθνικές οδοί	>9	1,4	Καλό	<69
			Μέτριο	69≤SCI<94
			Κακό	≥94
Κύριες οδοί	6-9	0,2	Καλό	<124
			Μέτριο	124≤SCI<157
			Κακό	≥157
Δευτερεύουσες οδοί	3-6	0,07	Καλό	<185
			Μέτριο	185≤SCI<246
			Κακό	≥246

Για κάθε τύπο οδού αντιστοιχεί συγκεκριμένο εύρος πάχους ασφαλτικών στρώσεων και συγκεκριμένη ετήσια κυκλοφορία και ως συνέπεια τα όρια του δείκτη SCI διαφέρουν ανά κατηγορία (Shrestha, et al., 2018).

3.5.3 Δείκτης DSI

Η κατάταξη της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος μπορεί να γίνει και με τη χρήση του δείκτη DSI, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$DSI = d_{100} - d_{300} \quad (3.26)$$

Όπου:

d_{100} : η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 100 mm από το κέντρο του εφαρμοσμένου φορτίου

d_{300} : η ελαστική υποχώρηση σε απόσταση 300 mm από το κέντρο του εφαρμοσμένου φορτίου

Στη συνέχεια γίνεται η κατάταξη του οδοστρώματος σύμφωνα με την τιμή του δείκτη DSI (μm) που υπολογίστηκε και τη κατηγορία οδού στην οποία ανήκει ο άξονας που μελετάται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Χαρακτηρισμός κατάστασης οδοστρώματος σύμφωνα με το δείκτη DSI (μm)
 Πηγή: (Elseifi & Zihan, 2018)

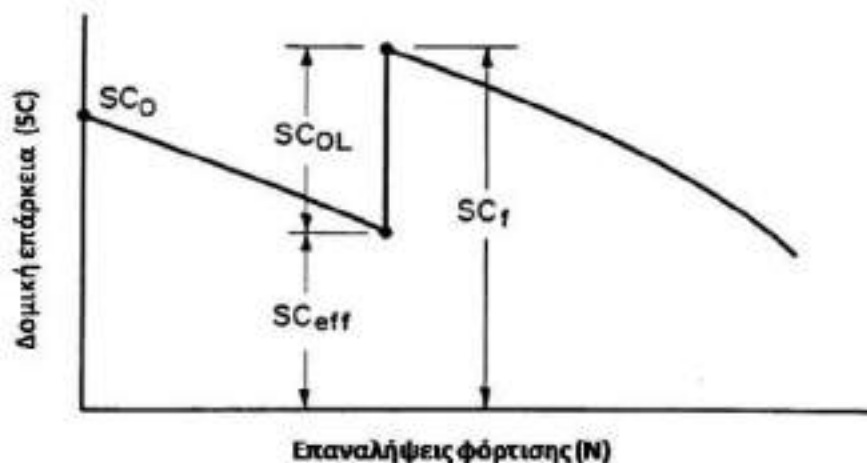
Κατηγορία οδού	Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (inches)	Ετήσια κυκλοφορία (Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες $\cdot 10^6$)	Χαρακτηρισμός οδοστρώματος	DCI (μm)
Εθνικές οδοί	>9	1,4	Καλό	<56
			Μέτριο	$56 \leq \text{DCI} < 76$
			Κακό	≥ 76
Κύριες οδοί	6-9	0,2	Καλό	<102
			Μέτριο	$102 \leq \text{DCI} < 132$
			Κακό	≥ 132
Δευτερεύουσες οδοί	3-6	0,07	Καλό	<147
			Μέτριο	$147 \leq \text{DCI} < 196$
			Κακό	≥ 196

Επισημαίνεται ότι έχει προηγηθεί η αναγωγή του δείκτη DSI στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C (70°F) (Elseifi & Zihan, 2018).

3.6 Σχεδιασμός για την ενίσχυση (εύκαμπτου) οδοστρώματος

3.6.1 Δομική επάρκεια και απαιτούμενη επίστρωση

Η ικανότητα ενός οδοστρώματος να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση μειώνεται κάτω από την επίδραση της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της ζωής του. Στην αρχή αυτή στηρίζεται η διαδικασία προσδιορισμού της απαιτούμενης επίστρωσης με τη μέθοδο AASHTO (AASHTO, 1993) που αποσκοπεί στη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος και την εξασφάλιση της δομικής επάρκειας του. Γενικά, η δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος SC (Structural Capacity) μειώνεται με το χρόνο και την επίδραση της κυκλοφορίας και επομένως, κατά τη χρονική στιγμή που πραγματοποιείται η διαδικασία υπολογισμού της απαιτούμενης επίστρωσης, έχει φτάσει την τιμή SC_{eff} (effective Structural Capacity).



Εικόνα 3.14: Απώλεια δομικής επάρκειας συναρτήσει του χρόνου και της κυκλοφορίας
Πηγή: (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020)

Σύμφωνα με την Εικόνα 3.14 εάν η απαιτούμενη δομική επάρκεια του οδοστρώματος κατά το τέλος της μελλοντικής περιόδου σχεδιασμού είναι SC_f (future Structural Capacity), τότε στο υφιστάμενο οδόστρωμα θα πρέπει να γίνει επίστρωση, η οποία θα του προσδώσει επιπλέον δομική επάρκεια SC_{OL} . Ισχύει ότι $SC_{OL} = SC_f - SC_{eff}$.

3.6.2 Προσδιορισμός δείκτη SN

Σύμφωνα με την μέθοδο AASHTO, η δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος εκφράζεται συνήθως συναρτήσει του δείκτη SN (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020). Ο προσδιορισμός του αρχικού δείκτη δομικής επάρκειας SN κατά την φάση της κατασκευής, μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη μέθοδο AASHTO (AASHTO, 1993):

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * m_2 * D_2 + a_3 * m_3 * D_3 \quad (3.27)$$

Όπου:

D_1, D_2, D_3 : πάχος ασφαλτικής στρώσης, βάσης και υπόβασης αντίστοιχα (inches)

a_1, a_2, a_3 : δομικοί συντελεστές ασφαλτικής στρώσης, βάσης και υπόβασης αντίστοιχα

m_2, m_3 : συντελεστές αποστράγγισης βάσης και υπόβασης αντίστοιχα

Η μέθοδος AASHTO προτείνει οι τιμές των δομικών συντελεστών για τον υπολογισμό της αρχικής δομικής επάρκειας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος να είναι: $a_1=0,44$ (ασφαλτική στρώση), $a_2=0,14$ (βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο), $a_3=0,11$ (υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο), ενώ οι τιμές των συντελεστών αποστράγγισης να είναι: $m_2=m_3=1$ (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020).

Εναλλακτικά, ο Τομέας Μεταφορών και Ανάπτυξης της Λουιζιάνα (Louisiana Department of Transportation and Development: LaDOTD) προτείνει αντίστοιχα: $\alpha_1=0,42$, $\alpha_2=0,28$ για επεξεργασμένη (σταθεροποιημένη με τσιμέντο) βάση ή $\alpha_2=0,07$ για ανεπεξέργαστη βάση και $\alpha_3=0,11$ για σταθεροποιημένη με τσιμέντο υπόβαση ή $\alpha_3=0,04$ για ανεπεξέργαστη υπόβαση, $m_2=m_3=1$ (Zihan, et al., 2018).

3.6.3 Προσδιορισμός υφιστάμενου δείκτη SN_{eff}

Μέθοδος Rohde

Ο δείκτης υφιστάμενης δομικής επάρκειας οδοστρώματος SN_{eff} μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της μεθόδου του Rohde (Rohde, 1994) ως εξής:

1. Προσδιορισμός του δομικού δείκτη SIP (Structural Index of Pavement) σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$SIP = D_0 - D_{1,5H_p} \quad (3.28)$$

Όπου,

D_0 : η ελαστική υποχώρηση στο σημείο εφαρμογής του φορτίου (στο μεσαίο σημείο ανάμεσα από τους διπλούς τροχούς) ανηγμένη σε θερμοκρασία αναφοράς 68° F (20°C)

$D_{1,5H_p}$: η ελαστική υποχώρηση στο σημείο που αντιστοιχεί σε πλευρική απόσταση 1,5 φορές το συνολικό πάχος του οδοστρώματος

H_p : το συνολικό πάχος του οδοστρώματος (mm) (το αθροιστικό πάχος όλων των στρώσεων πάνω από την στρώση έδρασης)

2. Καθορισμός του δείκτη SN_{eff} σύμφωνα με την σχέση:

$$SN_{eff} = k_1 * SIP^{k_2} * H_p^{k_3} \quad (3.29)$$

Όπου για ασφαλικά οδοστρώματα $k_1=0,4728$ $k_2=-0,4810$ και $k_3=0,7581$ και SIP: ο δομικός δείκτης που υπολογίστηκε από την σχέση (3.28) σε μm (Shrestha, et al., 2018).

Τροποποιημένη μέθοδος Rohde

Η μαθηματική έκφραση της μεθόδου του Rhode (3.29), αναπτύχθηκε για ελαστικές υποχωρήσεις που προκαλούνται από το FWD. Η αυτούσια χρήση της σχέσης (3.29) για ελαστικές υποχωρήσεις που έχουν προκληθεί από το σύστημα TSD είναι αμφισβητούμενη εξαιτίας των διαφορών των δύο συστημάτων στη διάταξη (κυκλικός δίσκος FWD έναντι διπλού τροχού TSD) και στο μηχανισμό της φόρτισης (παλμικό φορτίο FWD έναντι κινούμενο φορτίο TSD). Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε

σκόπιμο να γίνει η βαθμονόμηση της σχέσης (3.29), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το TSD.

Στα πλαίσια της ανάλυσης βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε (Nasimifar, et al., 2019) χρησιμοποιήθηκαν 426 οδοστρώματα για τα οποία έγινε τόσο ιξωδοελαστική ανάλυση (προσομοίωση φορτίου TSD) όσο και ανάλυση με χρήση γραμμικών ελαστικών μοντέλων για κυκλικό φορτίο 40 kN (φορτίο FWD). Για την προσομοίωση της φόρτισης του TSD χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D-Move και λήφθηκε υπόψιν τόσο το κινούμενο φορτίο όσο και τα ιξωδοελαστικά χαρακτηριστικά των ασφαλτικών στρώσεων. Η φόρτιση του TSD προσομοιώθηκε με ανομοιόμορφη πίεση διπλών ελαστικών ενώ θεωρήθηκε φορτίο 40 kN ανά διπλό τροχό. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε η τροποποιημένη σχέση:

$$SN_{eff} = C_1 * SIP^{C_2} * H_p^{C_3} \quad (3.30)$$

Όπου:

SIP: δομικός δείκτης του οδοστρώματος (μm) που προέκυψε από την σχέση (3.28)

H_p: συνολικό πάχος οδοστρώματος (mm)

C₁, C₂, C₃: συντελεστές βαθμονόμησης που παίρνουν τιμές 0,4369 -0,4768 και 0,8182 αντίστοιχα

Μέθοδος Louisiana

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίον μπορεί να προσδιοριστεί ο δείκτης SN_{eff} είναι με τη βοήθεια ενός μοντέλου μη-γραμμικής παλινδρόμησης. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε με χρήση κατάλληλου λογισμικού SAS-9.4 και αποσκοπεί στην πρόβλεψη του δείκτη SN οδοστρωμάτων που βρίσκονται σε λειτουργία, λαμβάνοντας υπόψη τις στατιστικά σημαντικές ελαστικές υποχωρήσεις που μετρήθηκαν από το TSD, την μέση ημερήσια κυκλοφορία και το συνολικό πάχος του οδοστρώματος. Για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από το TSD που πραγματοποιήθηκαν στις πολιτείες Louisiana και Idaho. Το προτεινόμενο μοντέλο περιγράφεται από την σχέση:

$$SN_{TSD} = 18,67 * e^{(-0,013 * D_0)} + 8,65 * (D_{48})^{0,11} + 0,18 * (T_{th}) + 0,31 * \ln(ADT) - 24,28 \quad (3.31)$$

Όπου,

SN_{TSD}: δείκτης SN βασισμένος στις μετρήσεις του TSD

D₀: η ελαστική υποχώρηση του οδοστρώματος κάτω από το φορτίο των ελαστικών ή η κεντρική ελαστική υποχώρηση (mils)

D_{48} : η ελαστική υποχώρηση σε 48 inches από την κεντρική υποχώρηση (mils)

T_{th} : συνολικό πάχος οδοστρώματος (inches)

ADT: Μέση ημερήσια κυκλοφορία (οχήματα/ημέρα)

Στη συνέχεια, έχοντας υπολογίσει τον δείκτη SN_{TSD} προκύπτει ο δείκτης SN_{TSDef} σύμφωνα με την σχέση:

$$SN_{TSDef} = 2,58 * \ln(SN_{TSD}) - 0,77 \quad (3.32)$$

3.6.4 Εντοπισμός δομικά ανεπαρκών τμημάτων

Ποσοστό απώλειας δείκτη SN

Εφόσον έχει προσδιοριστεί ο αρχικός δείκτης SN και ο αντίστοιχος υφιστάμενος SN_{eff} , μπορεί να καθοριστεί το ποσοστό απώλειας του δείκτη SN του εν λειτουργία οδοστρώματος, γνωστό ως "Loss in SN", για κάθε 0,1 mile απόσταση, σύμφωνα με την σχέση:

$$Loss \text{ in } SN(\%) = \frac{Design \text{ SN} - SN_{TSDef}}{Design \text{ SN}} * 100 \quad (3.33)$$

Έχοντας υπολογίσει το ποσοστό αυτό, είναι δυνατόν να αναγνωριστούν τα δομικά ανεπαρκή τμήματα του οδικού δικτύου σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6 (Zihan, et al., 2018).

Πίνακας 3.6: Χαρακτηρισμός υφιστάμενου οδοστρώματος σύμφωνα με το ποσοστό απώλειας του δείκτη SN

Πηγή: (Zihan, et al., 2018)

Loss in SN(%)	Χαρακτηρισμός οδοστρώματος
≥ 50	Δομικά ανεπαρκές
< 50	Δομικά επαρκές

Δείκτης SHI

Ένας άλλος δείκτης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της δομικής αξιολόγησης των οδοστρωμάτων είναι ο δείκτης δομικής υγείας του οδοστρώματος SHI (Structural Health Index). Ο δείκτης αυτός προέκυψε από πρόσφατη μελέτη και ο υπολογισμός του βασίστηκε στο μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος που προέκυψε κατά την διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού. Ο ορισμός του δείκτη SHI βασίστηκε στο ποσοστό απώλειας του δείκτη SN (Loss in SN) και παίρνει τιμές από το 0 έως το 100. Για τον συσχετισμό των 2 μεγεθών επιλέχτηκε η συνάρτηση σιγμοειδούς μορφής:

$$SHI = \frac{100}{1 + e^{0,15 * (SN \text{ loss } \% - 30)}} \quad (3.34)$$

Τμήματα του οδοστρώματος με ποσοστό απώλειας του δείκτη SN (Loss in SN) μεγαλύτερο του 50% έχουν δείκτη SHI κοντά στο 0, ενώ τμήματα που έχουν ποσοστό απώλειας μικρότερο του 50% έχουν δείκτη SHI κοντά στο 1. Με αυτό το τρόπο μπορούν να διακριθούν τα υπό-εξέταση τμήματα του οδοστρώματος σε οδοστρώματα κακής ή αντίστοιχα καλής δομικής κατάστασης (Elbagalati, et al., 2018).

3.7 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

3.7.1 Περιορισμοί

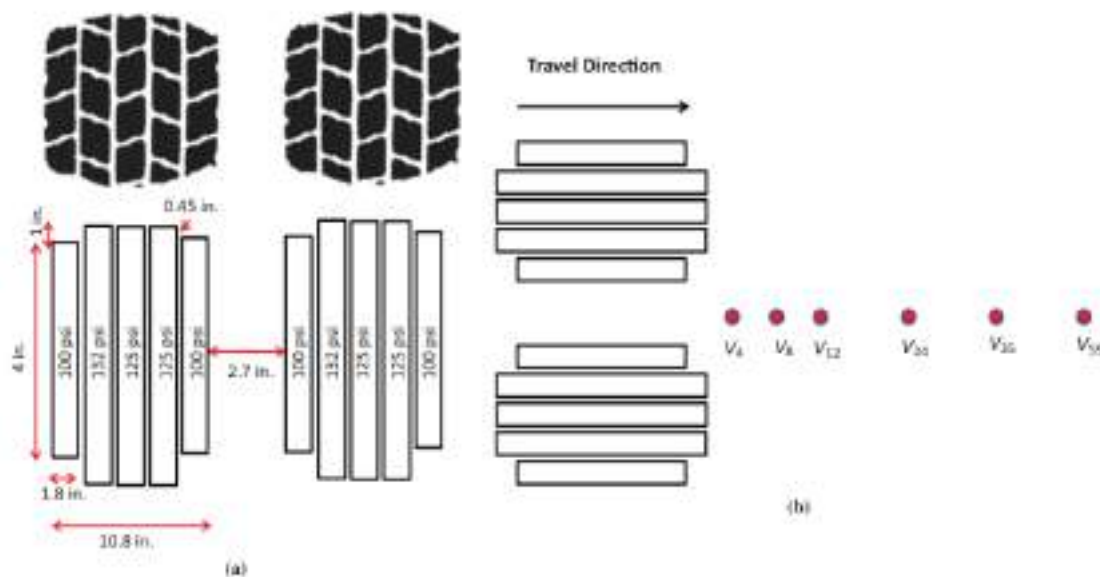
Πρωτεύουσα εφαρμογή του TSD αποτελεί ο εντοπισμός των δομικά ανεπαρκή οδοστρωμάτων κατά μήκος ενός οδικού δικτύου, τα οποία στη συνέχεια θα εξεταστούν με περισσότερη λεπτομέρεια σε επίπεδο έργου. Στα πλαίσια της αξιολόγησης των οδοστρωμάτων, αναπτύχθηκαν οι δείκτες που παρουσιάστηκαν παραπάνω και που βασίζονται στις τιμές των υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων από τις μετρήσεις του TSD. Ωστόσο, η καταλληλότητα του TSD για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας, δεν έχει διερευνηθεί.

Τα διαθέσιμα λογισμικά ανάστροφου υπολογισμού συνήθως χρησιμοποιούν γραμμική ελαστική ανάλυση (LEA: Linear Elastic Analysis) και είναι διαμορφωμένα ώστε να προσομοιάζουν τις συνθήκες φόρτισης του FWD. Η καταλληλότητα αυτών των λογισμικών για τη χρήση δεδομένων που προκύπτουν από TSD είναι αμφισβητούμενη, καθώς τα δύο συστήματα FWD και TSD παρουσιάζουν διαφορές ως προς το τρόπο φόρτισης του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, το FWD εφαρμόζει παλμικό φορτίο μέσω ενός κυκλικού δίσκου, ενώ το TSD αποτελεί ένα κινούμενο φορτίο διαφόρων ταχυτήτων και φορτίζει το οδόστρωμα μέσω της διαμόρφωσης διπλών τροχών. Ως συνέπεια των ανωτέρω, η αντίδραση του οδοστρώματος διαφέρει ανάλογα το χρησιμοποιούμενο σύστημα αξιολόγησης και γι' αυτό τα δεδομένα που έχουν προκύψει από το TSD δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη αξιοπιστία από τα υφιστάμενα λογισμικά ανάστροφου υπολογισμού.

3.7.2 Μέθοδος ταχύτητας

Μια μέθοδος με την οποία μπορεί να γίνει η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού είναι η μέθοδος της ταχύτητας (velocity method). Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάστηκε έτσι καθώς για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του οδοστρώματος χρησιμοποιεί κατευθείαν την κατακόρυφη ταχύτητα των ελαστικών

υποχωρήσεων που μετράει το TSD. Προκειμένου η μέθοδος ανάστροφου υπολογισμού να είναι αποτελεσματική, θα πρέπει να προσομοιάζει κατάλληλα τα δυναμικά χαρακτηριστικά της φόρτισης του TSD (κινούμενο φορτίο και ανομοιόμορφη πίεση ελαστικών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.15) και τα χαρακτηριστικά των στρώσεων του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων. Προκειμένου να ικανοποιούνται οι παραπάνω περιορισμοί αναπτύχθηκε, από το Πανεπιστήμιο της Νεβάδα στις ΗΠΑ, το πρόγραμμα 3D-Move το οποίο έχει την δυνατότητα να μοντελοποιεί κινούμενα φορτία και να υπολογίζει τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη σε ιξωδοελαστικά υλικά.



Εικόνα 3.15: Διάταξη μεταφοράς φορτίου του TSD: (α) Ανομοιόμορφη πίεση επαφής ελαστικών, φορτίο = 5.565 lb / ελαστικό (b) Θέσεις αισθητήρων λέιζερ του TSD στο μέσον του διπλού τροχού
Πηγή: (Nasimifar, et al., 2017)

Για την ακριβή προσομοίωση της φόρτισης που προκαλεί το TSD από το 3D-Move συγκρίνονται οι υπολογισμένες ταχύτητες παραμόρφωσης από το πρόγραμμα με τις αντίστοιχες ταχύτητες που μετράει το TSD στις προκαθορισμένες θέσεις των αισθητήρων. Η σύγκριση αυτή γίνεται με τη χρήση της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE (Root Mean Square Error, in./s) η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{i,TSD} - V_{i,3D-MOVE})^2}{n}} \quad (3.35)$$

Όπου:

$V_{i,TSD}$: η μετρούμενη ταχύτητα ελαστικής υποχώρησης από το TSD (inches/s)

$V_{i,3D-MOVE}$: η αντίστοιχη υπολογισμένη ταχύτητα από το 3D-MOVE (inches/s)

Έπειτα από αρκετές δοκιμές, το οδόστρωμα το οποίο τελικά επιλέγεται είναι αυτό στο οποίο αντιστοιχεί η χαμηλότερη τιμή RMSE.

Για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού απαιτείται και η γνώση άλλων δεδομένων, όπως είναι το πάχος και ο λόγος Poisson ν της κάθε στρώσης. Το TSD έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης γεωραντάρ GPR, με τη χρήση του οποίου μπορεί να ανιχνευθεί η στρωματογραφία του οδοστρώματος και να εκτιμηθούν τα αντίστοιχα πάχη. Επίσης, ο λόγος Poisson ενδεικτικά μπορεί να πάρει τις τιμές 0,3 , 0,35 και 0,4 για ασφαλικές στρώσεις, βάση και υπόβαση αντίστοιχα.

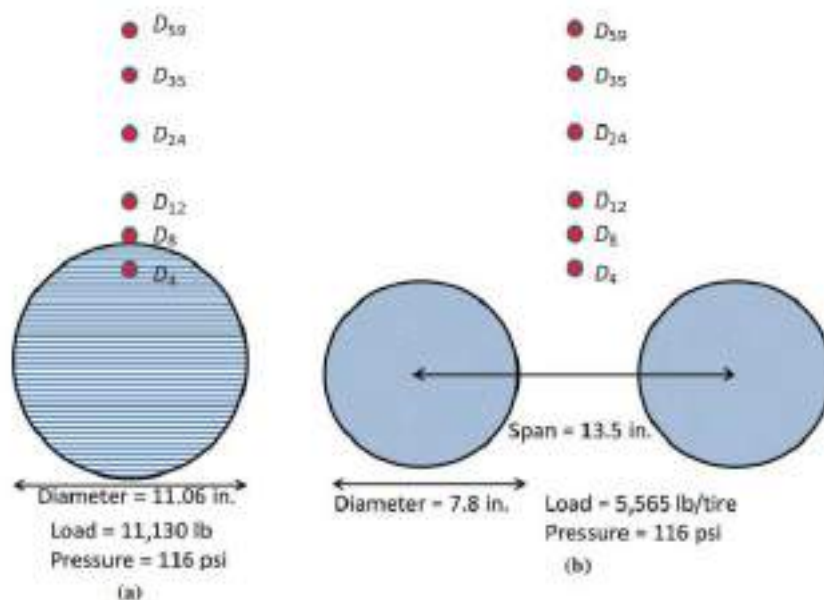
Καθώς η μέθοδος της ταχύτητας προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης και χρησιμοποιεί απευθείας τις ταχύτητες των ελαστικών υποχωρήσεων που προκύπτουν από το TSD, επιφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα. Το σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος που απαιτείται, ιδιαίτερα σε επίπεδο δικτύου, που οφείλεται στις δοκιμές που πρέπει να γίνουν ώστε να μειωθεί το σφάλμα RMSE. Μέχρις ότου να αυτοματοποιηθούν οι επαναλήψεις της συγκεκριμένης μεθόδου προτείνεται η χρήση της μεθόδου που ακολουθεί.

3.7.3 Μέθοδος ελαστικών υποχωρήσεων

Η μέθοδος των ελαστικών υποχωρήσεων (deflection method) βασίζεται στην γραμμική ελαστική ανάλυση (LEA: Linear Elastic Approach), ελαφρώς τροποποιημένη ώστε να λαμβάνει υπόψιν τη διάταξη της φόρτισης του TSD και εφαρμόζεται με τη χρήση των υπαρχουσών προγραμμάτων γραμμικής ελαστικής ανάλυσης ανάστροφου υπολογισμού για FWD, όπως το WESLEA. Η μέθοδος πήρε τη συγκεκριμένη ονομασία καθώς, σε αντίθεση με την μέθοδο της ταχύτητας, χρησιμοποιεί ως δεδομένο τις ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος οι οποίες έχουν προκύψει με εφαρμογή κατάλληλου αλγορίθμου από τις μετρούμενες-από το TSD-ταχύτητες υποχωρήσεων. Το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει από τη συγκεκριμένη μέθοδο ανάστροφου υπολογισμού, καθορίζεται με την ελαχιστοποίηση της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE μεταξύ των υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων και των υποχωρήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις του TSD.

Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα προτείνεται η προσομοίωση της διάταξης του διπλού τροχού, που χαρακτηρίζει το TSD, με σύστημα διπλού κυκλικού φορτίου (Εικόνα 3.16). Η χρήση προσομοιώματος ισοδύναμου μονού

κυκλικού φορτίου (Εικόνα 3.16) δεν αντικατοπτρίζει την διάταξη της φόρτισης του TSD και μπορεί να οδηγήσει σε πρόβλεψη πιο δύσκαμπτης ασφατικής στρώσης από την πραγματική.



Εικόνα 3.16: Ισοδύναμα ομοιόμορφα κυκλικά φορτία και θέσεις ελαστικών υποχωρήσεων (α) μόνο κυκλικό φορτίο and (b) διπλό κυκλικό φορτίο
Πηγή: (Nasimifar, et al., 2017)

Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί γραμμική ελαστική ανάλυση, δεν λαμβάνει υπόψιν της ούτε τη κίνηση του φορτίου ούτε τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφατικών στρώσεων. Ωστόσο, η χρήση ομοιόμορφων κυκλικών φορτίων αποτελεί μια απλοποιητική παραδοχή της ανομοιόμορφης πίεσης του διπλού τροχού και δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά της μεθόδου της ταχύτητας. Συνεπώς, λόγω του χαμηλού υπολογιστικού φόρτου, η μέθοδος των ελαστικών υποχωρήσεων μπορεί να χρησιμοποιείται ως μια αξιόπιστη μέθοδος σε επίπεδο δικτύου μέχρις ότου η αυτοματοποίηση του προγράμματος 3D-Move να αποτελέσει βιώσιμη εναλλακτική λύση (Nasimifar, et al., 2017).

3.7.4 Ανάστροφος υπολογισμός με χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού από μετρήσεις TSD είναι με τη χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN: Artificial Neural Network). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι μετρούμενες, από το TSD, ελαστικές υποχωρήσεις με τη χρήση μοντέλου τεχνητού νευρωνικού δικτύου μετατρέπονται σε αντίστοιχες ελαστικές υποχωρήσεις από FWD (TSD*). Στη συνέχεια, οι τιμές που προκύπτουν (TSD*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα διαθέσιμα λογισμικά ανάστροφου υπολογισμού για την

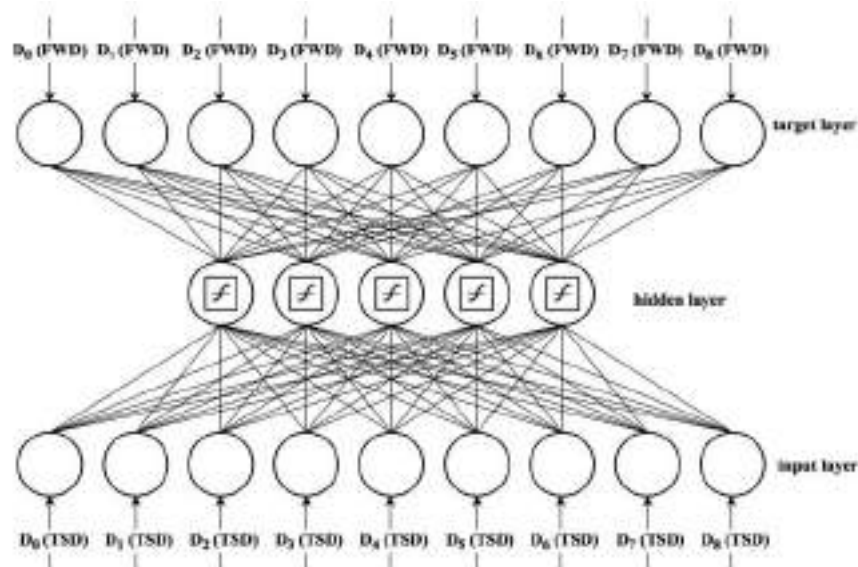
πρόβλεψη των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος (Elseifi & Zihan, 2018).

Το ANN που χρησιμοποιείται αποτελείται από 3 επίπεδα και χρησιμοποιεί αλγόριθμο σφάλματος οπισθοδιάδοσης (back-propagation error algorithm) με μια σιγμοειδής συνάρτηση εφαπτομένης. Τα επίπεδα από τα οποία αποτελείται είναι τα εξής:

- Επίπεδο εισόδου αποτελούμενο από 9 νευρώνες
- Κρυμμένο επίπεδο αποτελούμενο από 5 νευρώνες
- Επίπεδο στόχου αποτελούμενο από 9 νευρώνες

Το επίπεδο εισόδου τροφοδοτείται με τις μετρούμενες ελαστικές υποχωρήσεις από το TSD που πραγματοποιούνται στις προκαθορισμένες θέσεις των αισθητήρων ενώ το επίπεδο στόχου τροφοδοτείται με τις μετρήσεις από το FWD αναγόμενες στο φορτίο των 40 kN (9.000 lbs), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.17.

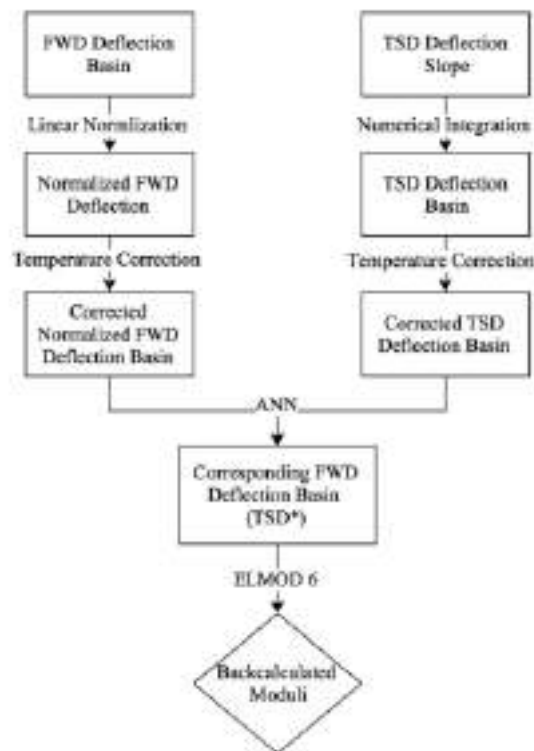
Για την ανάπτυξη του μοντέλου ANN απαιτείται πλήθος δεδομένων εκ των οποίων το 70% χρησιμοποιείται για την εκμάθηση του δικτύου, το 15% για επικύρωση και το 15% για δοκιμές.



Εικόνα 3.17: Γενική μορφή τεχνητού νευρωνικού δικτύου ANN
Πηγή: (Elbagalati, et al., 2018)

Εφόσον αναπτυχθεί το μοντέλο ANN και προκύψουν οι επιθυμητές τιμές TSD* ακολουθεί η ανάλυση του ανάστροφου υπολογισμού, με χρήση υφιστάμενων ειδικών λογισμικών που χρησιμοποιούνται για συστήματα FWD, όπως για

παράδειγμα το ELMOD6 (Dynatest, 2012). Η συνολική διαδικασία παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.18: Μέθοδος ανάστροφου υπολογισμού με τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN)
Πηγή: (Elbagalati, et al., 2018)

Στην περίπτωση που οι τιμές TSD* εισαχθούν τελικά στο λογισμικό ELMOD6, προτείνεται η χρήση της μεθόδου της καμπύλης προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων με εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας έως ότου να επιτευχθεί ποσοστιαία τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE%) μικρότερη ή ίση του 2% (Elbagalati, et al., 2018).

4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ TSD-FWD

4.1 Βασικά χαρακτηριστικά

Είναι εμφανές ότι τα συστήματα FWD και TSD παρουσιάζουν αρκετές διαφορές ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους. Ακόμη και στην περίπτωση που εφαρμόζεται φορτίο ίδιας έντασης, οι μετρούμενες ελαστικές υποχωρήσεις διαφέρουν μεταξύ τους, καθώς τα συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικό μηχανισμό φόρτισης. Από την μία, το FWD είναι μια στατική διάταξη που εφαρμόζει παλμικό φορτίο-μέσω ενός κυκλικού δίσκου-στην επιφάνεια του οδοστρώματος και μετράει τις ελαστικές υποχωρήσεις στο κέντρο εφαρμογής του φορτίου αλλά και σε διάφορες αποστάσεις από αυτό. Από την άλλη, το TSD λειτουργεί εν κινήσει με ταχύτητα που φτάνει τα 96 km/h (60mph) και φορτίζει το οδόστρωμα μέσω του οπίσθιου άξονα του.

Στο TSD, μπροστά από το δεξί διπλό τροχό, είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες laser τεχνολογίας Doppler ώστε να μετρούν την ταχύτητα των ελαστικών υποχωρήσεων στο μέσον της διάταξης του διπλού τροχού. Έτσι, ενώ το FWD εφαρμόζει κυκλικό φορτίο προκαλώντας ομοιόμορφη πίεση στο οδόστρωμα, το TSD εφαρμόζει φόρτιση ελλειπτικής μορφής καθώς χρησιμοποιεί συνηθισμένα ελαστικά με ανομοιόμορφη πίεση επαφής. Επιπλέον, οι μετρήσεις με το TSD επηρεάζονται άμεσα από τυχόν ανωμαλίες στην επιφάνεια του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα από την έντονη τραχύτητα του (Elseifi & Zihan, 2018).

Ένα από τα πλεονεκτήματα του TSD συγκριτικά με το FWD, είναι ότι κατά τη λειτουργία του δεν απαιτούνται κυκλοφοριακές ρυθμίσεις. Το TSD κινείται με ταχύτητα κυκλοφορίας και έτσι δεν απαιτούνται μέτρα προστασίας ή διακοπής της κυκλοφορίας. Αυτό το πλεονέκτημα είναι πολύ σημαντικό, καθώς έχει γνώμονα την οδική ασφάλεια. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα του TSD είναι ότι δίνει τη δυνατότητα συνεχόμενης καταγραφής παραμορφώσεων μεγάλου μήκους οδικού δικτύου σε μικρό χρονικό διάστημα. Κάτι τέτοιο καθιστά το TSD ιδανικό μηχανήμα για τη διάγνωση της φέρουσας ικανότητας των ασφαλικών οδοστρωμάτων σε επίπεδο δικτύου (Březina, et al., 2017). Φυσικά, το μεγαλύτερο μειονέκτημα του είναι το υπέρογκο κόστος αγοράς του.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ενδελεχής ανασκόπηση της διεθνούς εμπειρίας και πρακτικής όσον αφορά στο υπόψη θέμα, οδήγησε στην

διαμόρφωση του Πίνακα 4.1 στον οποίο παρουσιάζονται συγκριτικά τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών των συστημάτων FWD και TSD

FWD	TSD
Στατική μέθοδος μέτρησης-μηδενική ταχύτητα	Δυναμική μέθοδος μέτρησης-κινούμενο φορτίο με ταχύτητα κυκλοφορίας (80km/hr)
Απαιτούνται κυκλοφοριακές ρυθμίσεις	Δεν απαιτούνται κυκλοφοριακές ρυθμίσεις
Η φόρτιση του οδοστρώματος προκαλείται μέσω σταθερού κυκλικού δίσκου διαμέτρου 300 mm	Η φόρτιση του οδοστρώματος προκαλείται μέσω κινούμενου διπλού τροχού (πλάτος επιφάνειας επαφής κάθε ελαστικού 10,8 inches- δηλαδή 274,32 mm-με ενδιάμεσο κενό 2,7 inches, δηλαδή 68,58 mm)
Προσομοίωση δυναμικού φορτίου τροχού	Αυθεντικό φορτίο τροχού
Ομοιόμορφη πίεση	Ανομοιόμορφη πίεση
Φορτίο εφαρμογής 40 ή 50 kN	Φορτίο διπλού τροχού 50 kN (καθώς το τυπικό αξονικό φορτίο είναι 10 t~100 kN)
Μέτρηση ελαστικής υποχώρησης μέσω των γεωφώνων	Μέτρηση της ταχύτητας των ελαστικών υποχωρήσεων μέσω ειδικών αισθητήρων λέιζερ τεχνολογίας Doppler (οι ελαστικές υποχωρήσεις υπολογίζονται ακολουθώντας μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης)
Σημειακές μετρήσεις	Συνεχόμενες μετρήσεις (καταγραφή στοιχείων κάθε 0,02m)
Η λειτουργία του περιορίζεται στα πλαίσια της δομικής αξιολόγησης του οδοστρώματος	Δυνατότητας ανίχνευσης στρωματογραφίας με ενσωμάτωση γεωραντάρ (GPR) καθώς και λειτουργικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, όπως εντοπισμός ρωγμών στο οδόστρωμα, με την ενσωμάτωση κατάλληλων συμπληρωματικών συστημάτων (Laser Profiler, 3D pavement imaging system)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι διαφορές των δύο συστημάτων δεν αφορούν μόνο τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους, αλλά σχετίζονται και με τη χρήση του καθενός.

4.2 Μέθοδοι συσχέτισμού

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται στη σύγκριση των ελαστικών υποχωρήσεων που υπολογίζονται από το FWD και το TSD αντίστοιχα, σε κοινό οδικό τμήμα. Καθώς το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στη συσχέτιση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων D_0 , έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι συσχέτισης, οι βασικότερες από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

I. Γραμμική μέθοδος κατά Austroads (2014)

Η Austroads εξέτασε τη χρήση του TSD εστιάζοντας στις διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη και στην Αμερική. Για τη σύγκριση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων που προκύπτουν από το TSD και το FWD χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το ινστιτούτο Polish Road and Bridge Research Institute (IBDiM) της Πολωνίας. Σύμφωνα με τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε ανάμεσα στο TSD (απροσδιόριστου φορτίου) και FWD φορτίου 50 kN προέκυψε η παρακάτω γραμμική σχέση, με συντελεστή $R^2=0,62$ (Bodin, et al., 2019):

$$TSD = 1,36 * FWD - 0,05 \quad (4.1)$$

Όπου

TSD: η κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 που υπολογίζει το TSD (mm)

FWD: η κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 που καταγράφει το FWD (mm)

II. Γραμμική μέθοδος Lee & Conaghan (2016)

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος NACoE (National Asset Centre of Excellence) 2014-2016 αναδείχθηκε η γραμμική σχέση που συνδέει τις μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις των δύο συστημάτων, για φορτίο 50 kN, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,70$.

$$FWD(50 \text{ kN}) = 0,9 * TSD(50 \text{ kN}) + 0,138 \quad (4.2)$$

Όπου: FWD(50 kN) και TSD(50 kN) οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις D_0 του FWD και του TSD αντίστοιχα (mm) , για φορτίο εφαρμογής 50 kN (Bodin, et al., 2019)

III. Απλοποιημένη γραμμική μέθοδος κατά Chai, Manoharan, Golding, Kelly & Chowdhury (2016)

Στα πλαίσια μιας άλλης έρευνας-κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην πολιτεία Queensland της Αυστραλίας-έγινε η σύνδεση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων των δύο συστημάτων καθώς και η σύνδεση της κεντρικής ελαστικής υποχώρησης D_0 του FWD (και κατ' επέκταση η σύνδεση της υποχώρησης D_0 του TSD) με τις ελαστικές υποχωρήσεις D_{200} , D_{300} , D_{450} , D_{600} και D_{900} του FWD. Η σύνδεση των D_0 με τις υπόλοιπες ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει το FWD, έγινε λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό της μη γραμμικής συμπεριφοράς της στρώσης έδρασης. Η προκύπτουσα σχέση που συνδέει την κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 των δύο συστημάτων για φορτίο 50 kN, με συντελεστή $R^2=0,88$, είναι η (Chai, et al., 2016):

$$D_{0(FWD)} = 0,896 * D_{0(TSD)} + 110,65 \quad (4.3)$$

Όπου:

$D_{0(FWD)}$: η κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 που καταγράφει το FWD (μm)

$D_{0(TSD)}$: η κεντρική ελαστική υποχώρηση D_0 που υπολογίζει το TSD (μm)

IV. Μη γραμμική μέθοδος NZTA (2017)

Μία μη γραμμική μέθοδος που συνδέει τις ελαστικές υποχωρήσεις, αναπτύχθηκε το 2017, από δεδομένα που συλλέχθηκαν στην Νέα Ζηλανδία. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται από την σχέση (4.4) και προϋποθέτει την αναγωγή των μέγιστων ελαστικών υποχωρήσεων D_0 σε φορτίο 40 kN.

$$d_{0(FWD\ 40\ kN)} = \frac{d_{0(TSD\ 40\ kN)}}{0,0225 * \ln\left(\frac{149}{d_{0(TSD\ 40\ kN)}}\right) + 0,7780} \quad (4.4)$$

Όπου:

$d_{0(FWD\ 40\ kN)}$: προβλεπόμενη μέγιστη ελαστική υποχώρηση για το FWD (mm)

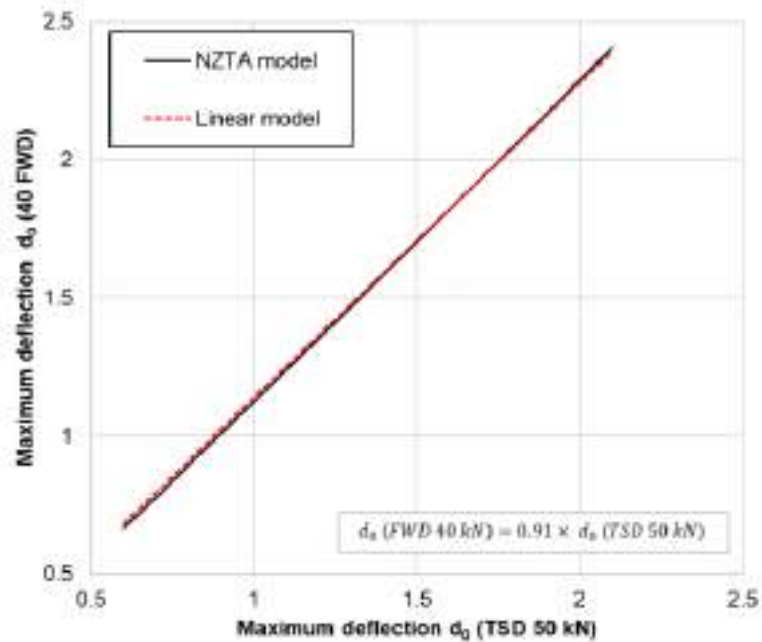
$d_{0(TSD\ 40\ kN)}$: μετρημένη μέγιστη ελαστική υποχώρηση από το TSD (mm) , αναγόμενη σε 40 kN

V. Απλοποιημένη γραμμική μέθοδος NZTA (2017)

Η μέθοδος που εκφράζεται μέσω της μη γραμμικής σχέσης (4.4), μπορεί προσεγγιστικά να εκφραστεί μέσω της απλοποιημένης γραμμικής σχέσης (4.5), για φορτίο TSD 50 kN και για φορτίο FWD 40 kN.

$$d_{0(FWD\ 40\ kN)} = 0,91 * d_{0(TSD\ 50\ kN)} \quad (4.5)$$

Η σύγκριση των δύο μεθόδων (μη γραμμικής και γραμμικής) γίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα 4.1). Η συνεχόμενη γραμμή απεικονίζει τη μη-γραμμική μέθοδο NZTA ενώ η διακεκομμένη την αντίστοιχη γραμμική που εκφράζεται μέσω της σχέσης (4.5).



Εικόνα 4.1: Σύγκριση μεθόδων NZTA
Πηγή: (Bodin, et al., 2019)

Όπως φαίνεται γραφικά, η ευθεία της γραμμικής μεθόδου προσεγγίζει ικανοποιητικά την καμπύλη της μη γραμμικής μεθόδου NZTA. Έτσι, για ελαστικές υποχωρήσεις της τάξεως 0,8 έως 2,4 mm, προτείνεται η χρήση της απλοποιημένης γραμμικής μεθόδου καθώς η διαφορά της προβλεπόμενης ελαστικής υποχώρησης του FWD (mm) από τη γραμμική μέθοδο με την αντίστοιχη προβλεπόμενη τιμή από το μη-γραμμική είναι μικρότερη των 0,02 mm (μικρότερη δηλαδή από 3%).

VI. Γραμμική μέθοδος κατά Manoharan, Chai & Chowdhury (2018)

Για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συστημάτων FWD (φορτίου 40 kN) και TSD (αξονικού φορτίου 10 tn, άρα φορτίου διπλού τροχού 50 kN) σε 6 τμήματα οδικών αξόνων-εύκαμπτου οδοστρώματος-της πολιτείας Queensland, μήκους 500-1000 m το καθένα. Από την ανάλυση παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις των δύο συστημάτων συνδέονται με την γραμμική σχέση (4.6) με συντελεστή προσδιορισμού $R^2=0,88$.

$$D_{0(TSD)} = 0,9845 * D_{0(FWD)} - 40,13 \quad (4.6)$$

Όπου:

$D_{0(TSD)}$: η μέγιστη (κεντρική) υποχώρηση μετρημένη από το TSD (μm)

$D_{0(FWD)}$: η μέγιστη (κεντρική) υποχώρηση μετρημένη από το FWD (μm)

Η σχέση (4.6) μετασχηματίζεται στην (4.7) ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως.

$$D_{0(TSD)} = k_1 * 0,9845 * D_{0(FWD)} - k_2 * 40,13 \quad (4.7)$$

Όπου:

$D_{0(TSD)}$: η μέγιστη (κεντρική) υποχώρηση μετρημένη από το TSD (μm)

$D_{0(FWD)}$: η μέγιστη (κεντρική) υποχώρηση μετρημένη από το FWD (μm)

k_1, k_2 : συντελεστές βαθμονόμησης (Manoharan, et al., 2018)

4.3 Καθορισμός κριτηρίων αξιολόγησης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, χρησιμοποιείται ο πίνακας κατάταξης κατά Hakim & Brown (Πίνακας 2.7) που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, προκειμένου να διαμορφωθεί ο αντίστοιχος πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης του οδοστρώματος για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις D_0 υπολογισμένες με το TSD για φορτίου διπλού τροχού 50 kN. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κριτήρια τα οποία προκύπτουν με την εφαρμογή των βασικών μεθόδων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Ι. Όρια $D_0(TSD)$ κατά Austroads (2014)

Καθώς η μαθηματική σχέση (4.1) χρησιμοποιείται για απροσδιόριστο φορτίο TSD γίνεται η παραδοχή ότι χρησιμοποιείται για αξονικό φορτίο 100 KN, δηλαδή για φορτίο διπλού τροχού 50 KN, που αποτελεί τη συνηθέστερη περίπτωση φόρτισης TSD.

Για την διαμόρφωση του πίνακα ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Γίνεται η αναγωγή των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων του Πίνακα 2.7 σε φορτίο 50 KN με χρήση της σχέσης:

$$D_0(50 \text{ kN}) = D_0(40 \text{ kN}) * \frac{P_{target}}{P} = D_0(40 \text{ kN}) * \frac{50}{40} \quad (4.8)$$

- Διαμορφώνεται η σχέση (4.1) στην (4.9), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για D_0 εκφρασμένα σε μm.

$$D_0(TSD) = [1,36 * (D_0(FWD)/1000) - 0,05] * 1000 \quad (4.9)$$

Τα βήματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Διαμόρφωση ορίων D_0 (TSD) κατά Austroads (2014)

D_0 (40 KN) (μm)	D_0 (50 KN) (μm)	D_0 (TSD) (μm)
100	125	120
150	187,5	205
200	250	290
250	312,5	375
300	375	460

Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 4.3, σύμφωνα με τον οποίον μπορεί να γίνει ο χαρακτηρισμός της κατάστασης του οδοστρώματος ανάλογα με το D_0 (μm) που προκύπτει από φόρτιση TSD, με φορτίο διπλού τροχού 50 KN.

Πίνακας 4.3: Όρια D_0 (TSD) κατά Austroads (2014)

TSD (50 KN)	
D_0 (μm)	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<120	Εξαιρετική
120-205	Πολύ καλή
205-290	Καλή
290-375	Μέτρια
375-460	Κακή
>460	Πολύ κακή

II. Όρια D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016)

Για την διαμόρφωση των ορίων D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016) ακολουθούνται τα ίδια βήματα που εφαρμόστηκαν για την διαμόρφωση των ορίων κατά Austroads (2014) και προκύπτει ο Πίνακας 4.4. Η μαθηματική σχέση (4.2) μετασχηματίζεται στην (4.10), ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για D_0 εκφρασμένα σε μm.

$$D_0(TSD) = \frac{\left(\frac{D_0(FWD)}{1000}\right)^{-0,138}}{0,9} * 1000 \quad (4.10)$$

Όπου D_0 (TSD) και D_0 (FWD) οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις μετρημένες από το TSD και το FWD αντίστοιχα, εκφρασμένες σε μm.

Πίνακας 4.4: Διαμόρφωση ορίων D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016)

D_0 (40 KN) (μm)	D_0 (50 KN) (μm)	D_0 (TSD) (μm)
100	125	-14
150	187,5	55
200	250	124
250	312,5	194
300	375	263

Παρατηρείται ότι η μέθοδος του Lee & Conaghan (2016) δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για D_0 (FWD) μικρότερα των 138 μm καθώς δίνει αρνητικά αποτελέσματα. Ο τελικός πίνακας διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 4.5: Όρια D_0 (TSD) κατά Lee & Conaghan (2016)

TSD (50 KN)	
D_0 (μm)	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<55	πολύ καλή
55-125	καλή
125-190	μέτρια
190-260	κακή
>260	πολύ κακή

Οι τιμές D_0 στρογγυλοποιήθηκαν στην αμέσως μικρότερη πεντάδα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3, μπορεί να γίνει η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος ανάλογα με το D_0 (μm) που προκύπτει από φόρτιση TSD, με φορτίο διπλού τροχού 50 KN.

III. Όρια D_0 (TSD) κατά Chai et al (2016)

Για την διαμόρφωση των ορίων D_0 , αρχικά επιλύεται η σχέση (4.3) ως προς D_0 (TSD).

$$D_0(TSD) = \frac{D_0(FWD) - 110,65}{0,896} \quad (4.11)$$

Η σχέση (4.11) χρησιμοποιείται για D_0 εκφρασμένα σε μm. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή της σχέσης (4.8) γίνεται η αναγωγή των ορίων Hakim & Brown σε φορτίο 50 KN και τέλος προκύπτουν τα επιθυμητά όρια με τη χρήση της σχέσης (4.11). Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.6: Όρια D_0 (TSD) κατά Chai et al (2016)

TSD (50 KN)	
D_0 (μm)	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<15	εξαιρετική
15-85	πολύ καλή
85-155	καλή
155-225	μέτρια
225-295	κακή
>295	πολύ κακή

Τα όρια D_0 (TSD) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 έχουν στρογγυλοποιηθεί στην αμέσως μικρότερη πεντάδα.

IV. Όρια D_0 (TSD) κατά NZTA (2017)

Για την διαμόρφωση των ορίων D_0 κατά την απλοποιημένη γραμμική μέθοδο NZTA (2017), επιλύεται η σχέση (4.5) ως προς D_0 (TSD) και προκύπτει:

$$D_0(TSD\ 50\ kN) = \frac{D_0(FWD\ 40\ kN)}{0,91} \quad (4.12)$$

Τα όρια που προκύπτουν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.7: Όρια D_0 (TSD) κατά NZTA (2017)

TSD (50 KN)	
D_0 (μm)	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<110	εξαιρετική
110-165	πολύ καλή
165-220	καλή
220-275	μέτρια
275-330	κακή
>330	πολύ κακή

Ωστόσο, η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται να μην είναι απόλυτα ορθή καθώς αποτελεί καλή προσομοίωση της μη γραμμικής μεθόδου NZTA για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις D_0 της τάξεως 800-2400 μm. Για τον λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα όρια δεν συμπεριλαμβάνονται στους συγκεντρωτικούς Πίνακες 4.9 και Πίνακες 4.10 και επομένως δε λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του μέσου όρου των ορίων.

V. Όρια D_0 (TSD) κατά Manoharan (2018)

Για τη διαμόρφωση των ορίων D_0 κατά Manoharan (2018), εφαρμόζεται η σχέση (4.6) για τιμές του Πίνακα 2.7 και έτσι προκύπτουν τα όρια του Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Όρια D_0 (TSD) κατά Manoharan (2018)

TSD (50 KN)		
$D_0(\mu\text{m})$	$D_0(\mu\text{m})$ με στρογγυλοποίηση	Συνολική κατάσταση οδοστρώματος
<58	<55	εξαιρετική
58-108	55-105	πολύ καλή
108-157	105-155	καλή
157-206	155-205	μέτρια
206-255	205-255	κακή
>255	>255	πολύ κακή

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8, μπορεί να γίνει η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος ανάλογα με το $D_0(\mu\text{m})$ που προκύπτει από φόρτιση TSD, με φορτίο διπλού τροχού 50 KN.

VI. Σύγκριση ορίων

Τα παραπάνω όρια εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.9, όπου υπολογίστηκε και ο μέσος όρος τους (M.O.). Η γραμμική μέθοδος NZTA δεν συμπεριλήφθηκε για τους προαναφερθέντες λόγους.

Πίνακας 4.9: Σύγκριση ορίων D_0 (TSD)

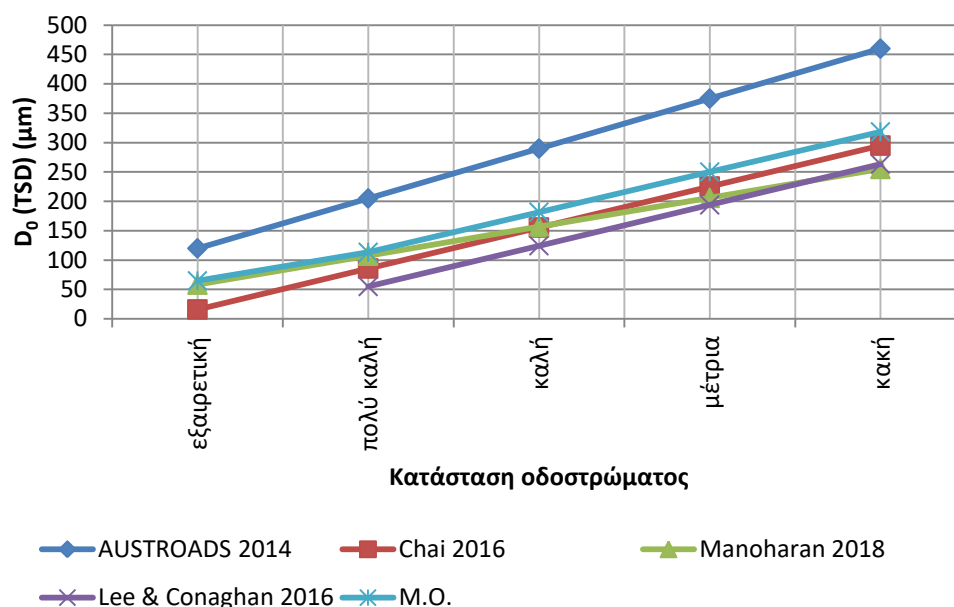
Κατάσταση οδοστρώματος	Όρια D_0 (TSD) (μm)				
	Austroads (2014)	Chai (2016)	Manoharan (2018)	Lee & Conaghan (2016)	M.O.
εξαιρετική	120	15	55		63
πολύ καλή	205	85	105	55	113
καλή	290	155	160	120	181
μέτρια	375	225	205	190	249
κακή	460	295	255	260	318

Στη συνέχεια, οι τιμές του Πίνακα 4.9 στρογγυλοποιήθηκαν στην αμέσως μικρότερη πεντάδα- ώστε τα όρια να διαμορφωθούν υπέρ της ασφαλείας- και προέκυψε ο τελικός Πίνακας 4.10 των ορίων D_0 (TSD).

Πίνακας 4.10: Όρια D_0 (TSD)

Κατάσταση οδοστρώματος	Στρογγυλοποιημένα Όρια D_0 (TSD) (μm)				
	Austroads (2014)	Chai (2016)	Manoharan (2018)	Lee & Conaghan (2016)	M.O.
εξαιρετική	<120	<15	<55		<60
πολύ καλή	120-205	15-85	55-105	<55	60-110
καλή	205-290	85-155	105-160	55-120	110-180
μέτρια	290-375	155-225	160-205	120-190	180-250
κακή	375-460	255-295	205-255	190-260	250-315
πολύ κακή	>460	>295	>255	>260	>315

Η σύγκριση των μεθόδων μπορεί να γίνει εποπτικά με τη βοήθεια του ακόλουθου διαγράμματος (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Σύγκριση ορίων $D_0(TSD)$

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.2, φαίνεται ότι η μέθοδος Austroads (2014) δίνει τα πιο λιγότερο αυστηρά όρια σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, στοιχείο το οποίο δημιουργεί ερωτηματικά για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των μεθόδων. Από την άλλη, οι μέθοδοι Chai (2016), Manoharan (2018) και Lee & Conaghan (2016) φαίνεται να δίνουν συναφή όρια, καθώς οι καμπύλες και των τριών μεθόδων βρίσκονται κάτω από τον M.O..

Οι μέθοδοι Lee & Conaghan (2016) και Manoharan (2018) φαίνεται να είναι πιο αυστηρές ως προς την κατάταξη του οδοστρώματος («πολύ κακή» ως και «κακή» κατάσταση) σε σχέση με τη μέθοδο Chai (2016). Ωστόσο, η μέθοδος Manoharan (2018) φαίνεται να δίνει λιγότερο αυστηρή κατάταξη του οδοστρώματος («πολύ καλή» και «εξαιρετική» κατάσταση) σε σχέση με τις μεθόδους Lee & Conaghan (2016) και Chai (2016). Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος Lee & Conaghan (2016) δεν έγινε εφικτό να αξιοποιηθεί πλήρως καθώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί για $D_0(FWD)$ μικρότερα των 138 μm .

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, φαίνεται ότι τα όρια που διαμορφώνονται με τη μέθοδο Lee & Conaghan (2016) είναι τα αυστηρότερα ως προς τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οδοστρώματος σε όλο το εύρος τιμών. Ωστόσο, αυστηρά όρια

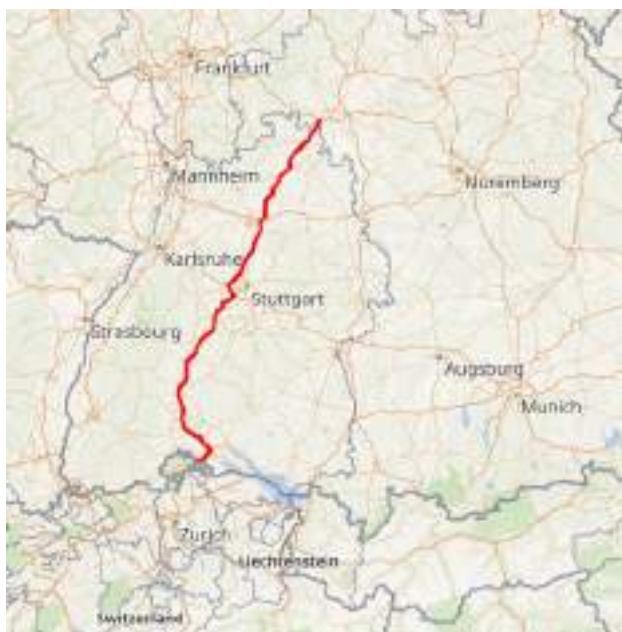
δίνει και η μέθοδος Manoharan (2018) για μεγάλες τιμές $D_0(\text{TSD})$ ($D_0(\text{TSD}) > 150 \mu\text{m}$).

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

5.1 Γενικά

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων συσχέτισης των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από μετρήσεις πεδίου. Τις μετρήσεις είχε πραγματοποιήσει το ερευνητικό ινστιτούτο της Γερμανίας BAST (The Federal Highway Research Institute) με το TSD14 κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου A81 της Γερμανίας.

Ο A81 είναι ένας αυτοκινητόδρομος συνολικού μήκους 283 km που διασχίζει τμήμα της Νότιας Γερμανίας. Συγκεκριμένα συνδέει τις εξής πόλεις (από βόρεια προς νότια): Würzburg (Βίρτσμπουργκ) – Heilbronn(Χαϊλμπρόν)– Stuttgart(Στουτγκάρδη)– Sindelfingen (Σίντελφινγκεν)– Villingen-Schwenningen–Singen(Hohentwiel)(Σίνγκεν)– Gottmadingen (Wikipedia, 2020) (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Αυτοκινητόδρομος A81
Πηγή: (Wikipedia, 2020)

Το ερευνητικό ινστιτούτο BAST είχε πραγματοποιήσει μετρήσεις για 17 km, από τις οποίες εξάγονται σημειακές πληροφορίες ανά 10m. Καθώς το TSD14 διαθέτει 11

αισθητήρες Doppler (Jansen & Podolski, 2019) (3 πίσω από τον διπλό τροχό και 8 μπροστά από το διπλό τροχό) η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με δύο τρόπους:

- Με τη **μέθοδο Pedersen** (Pedersen, et al., 2013), η οποία εκτός από τους αισθητήρες που βρίσκονται μπροστά από το διπλό τροχό, λαμβάνει υπόψη της και τους αισθητήρες που βρίσκονται στις θέσεις -450 mm, -300 mm, -200 mm (το – δηλώνει ότι οι αισθητήρες βρίσκονται πίσω από τον διπλό τροχό)
- Με τη **μέθοδο AUTC**, με την εφαρμογή της οποίας υπολογίζονται οι υποχωρήσεις μπροστά από το διπλό τροχό (στις θέσεις 200, 300, 450, 600, 750, 900, 1200 και 1500 mm).

Έτσι λοιπόν, η αρχική βάση δεδομένων περιλαμβάνει για κάθε σημείο την χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.), την επιτάχυνση και την ταχύτητα του οχήματος, τις κλίσεις και τις αντίστοιχες αναπτυσσόμενες ελαστικές υποχωρήσεις για κάθε αισθητήρα και για τις 2 μεθόδους καθώς και τους δείκτες SCI που προκύπτουν. Επιπλέον, σε κάθε θέση είχαν καταγραφεί η θερμοκρασία επιφάνειας οδοστρώματος, η θερμοκρασία αέρα, μετρήσεις πίεσης με μανόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, το υψόμετρο και σχόλια κατά την διάρκεια μετρήσεων (προσπέραση, γέφυρα κλπ.).

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, από το αρχείο των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις (D_0) (μm) που προέκυψαν με την μέθοδο AUTC, οι δείκτες SCI (μm) και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της επιφάνειας του οδοστρώματος (Surface Temperature). Επιπλέον, καθώς το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα εύκαμπτα οδοστρώματα επιλέχθηκαν προς εξέταση τα αντίστοιχα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου Έτσι, από τα 17 km θα εξεταστούν τα εξής τμήματα εύκαμπτου οδοστρώματος, τα οποία ήταν ομογενή ως προς τα πάχη των επιμέρους στρώσεων:

- Τμήμα 1: 0-0,66 km
- Τμήμα 2: 3,06-17,02 km

Επισημαίνεται ότι τα υπόψη στοιχεία διατέθηκαν για τους σκοπούς και μόνο της διπλωματικής εργασίας, κατόπιν σχετικής αλληλογραφίας από το BAST.

5.2 Διαχωρισμός οδικών τμημάτων

Μέθοδος Αθροιστικών Αποκλίσεων

Όπως είναι γνωστό, η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη δομική συμπεριφορά του οδοστρώματος και γι'

αυτό κρίθηκε σκόπιμο να ληφθεί υπόψη στη συγκριτική αξιολόγηση που θα ακολουθήσει. Στον οδικό άξονα που μελετάται, παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος παρουσίασε αυξομειώσεις, ιδίως στο 2^ο Τμήμα, και γι' αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει ο διαχωρισμός του κάθε τμήματος σε ομογενή υποτμήματα βάσει των τιμών της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο των Αθροιστικών Αποκλίσεων.

Η μέθοδος των Αθροιστικών Αποκλίσεων (Cumsum: Cumulative Sums) είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των τμημάτων του άξονα σε υποτμήματα με ομοιόμορφα χαρακτηριστικά (ομοιόμορφη θερμοκρασία στην συγκεκριμένη περίπτωση). Συνοπτικά, μπορεί να περιγραφεί ως εξής: για κάθε τμήμα υπολογίζεται ο μέσος όρος των θερμοκρασιών (X_m). Στη συνέχεια, οι τιμές των θερμοκρασιών αφαιρούνται από τον μέσο όρο και τα αποτελέσματα προστίθενται διαδοχικά, όπως φαίνεται ακολούθως.

$$S_1 = X_m - X_1 \quad (5.1)$$

$$S_2 = X_m - X_2 + S_1$$

$$S_i = X_m - X_i + S_{i-1}$$

$$S_n = X_m - X_n + S_{n-1} = 0$$

Όπου:

S: η αποκαλούμενη τιμή CumSum

X_i : οι τιμές της θερμοκρασίας

X_m : ο μέσος όρος των θερμοκρασιών

n: το πλήθος των τιμών

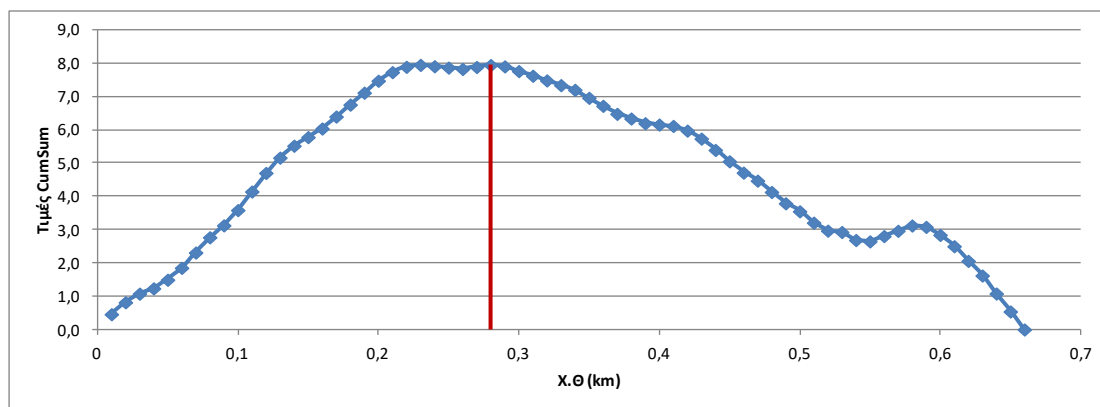
Οι τιμές αυτές τοποθετούνται σε ένα γράφημα και γίνεται οπτικά ο διαχωρισμός του τμήματος σε ομογενή υποτμήματα, με βάση την κλίση και τη μορφή του γραφήματος (Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020). Έτσι, τα τμήματα διαχωρίζονται στο σημείο με τη μέγιστη τιμή S στο οποίο παράλληλα εμφανίζεται αλλαγή της κλίσης του γραφήματος. Στη συνέχεια, ελέγχεται ότι για κάθε υποτμήμα ο συντελεστής μεταβλητότητας CV(%) είναι μικρότερος από 10%. Πρόκειται για ένα εμπειρικό όριο, με τον οποίο κρίνεται ένα τμήμα ως «αντιπροσωπευτικό» από άποψη ομοιογένειας. Υπενθυμίζεται ότι CV(%) δίνεται από τη σχέση:

$$CV(\%) = \frac{\text{Τυπική Απόκλιση (S)}}{\text{Μέσος Όρος}} * 100 \quad (5.2)$$

Παράλληλα για κάθε υποτμήμα υπολογίζονται τα ακόλουθα μεγέθη, καθώς χρησιμοποιούνται στη συνέχεια του κεφαλαίου: Μέσος όρος ελαστικών υποχωρήσεων (M.O. D0), τυπική απόκλιση ελαστικών υποχωρήσεων (S D0), συντελεστής διασποράς ελαστικών υποχωρήσεων (CV(%) D0), μέγιστη και ελάχιστη υποχώρηση (Max_D0 και Min_D0 αντίστοιχα).

Εφαρμογή της μεθόδου στο 1^ο τμήμα

Στο 1^ο τμήμα (0-0,66 km), ο διαχωρισμός έγινε στη Χ.Θ. 0,28 όπου το S ισούται με 8 (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Διαχωρισμός Τμήματος 1 σε ομογενή-ως προς τη θερμοκρασία-υποτμήματα

Ο οριζόντιος άξονας είναι ο άξονας των χιλιομετρικών θέσεων (Χ.Θ) και ο κατακόρυφος περιλαμβάνει τις Τιμές S που προέκυψαν από τη μέθοδο CumSum.

Το 1^ο υποτμήμα συμβολίζεται ως T1A και ισχύουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία T1A

T1A		Παρατηρήσεις
Χ.Θ. (km)	0-0,28	-
M.O. Tsurf(°C)	26,2	-
Τυπική Απόκλιση Tsurf(°C)	0,18	-
CV (%)	0,68%	<10%
N=	28	-
M.O. D0	53,79	-
S D0	19,92	-
CV(%) D0	37,03%	-
MAX_D0 (μm)	90,35	-
MIN_D0 (μm)	19,35	-

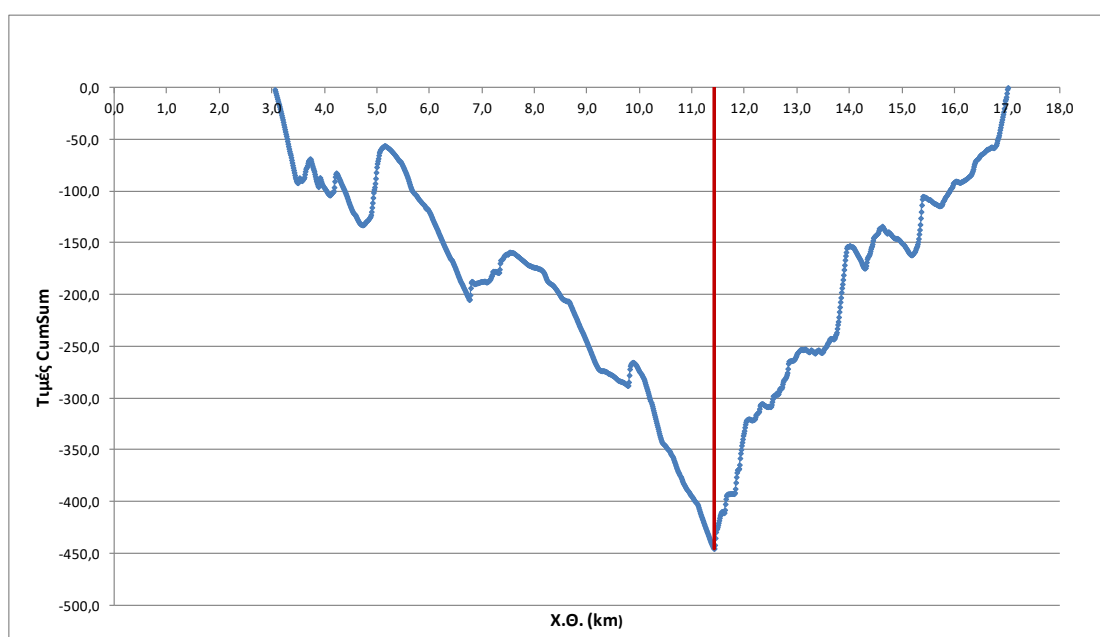
Παρατηρείται ότι το για το T1A, $CV(\%) = 0,68 < 10\%$ που σημαίνει ότι το T1A παρουσιάζει σημαντική ομοιογένεια ως προς τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος. Αντίστοιχα το 2^ο υποτμήμα συμβολίζεται ως T1B και ισχύουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Στοιχεία T1B		
T1B		Παρατηρήσεις
Χ.Θ.	0,29-0,66	-
M.O Tsurf(°C)	26,7	-
Τυπική Απόκλιση Tsurf(°C)	0,18	-
CV (%)	0,67%	<10%
N=	38	-
M.O. D0	54,92	-
S D0	19,00	-
CV(%) D0	34,60%	-
MAX_D0 (μm)	100,13	-
MIN_D0 (μm)	26,54	-

Παρατηρείται ότι το για το T1B, $CV(\%) = 0,67 < 10\%$ και επομένως το T1B παρουσιάζει μεγάλη ομοιογένεια ως προς τη θερμοκρασία της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Εφαρμογή της μεθόδου στο 2^ο τμήμα

Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για το 2^ο τμήμα. Στο 2^ο τμήμα (3,06-17,022 km), ο διαχωρισμός έγινε στη Χ.Θ. 11,42 όπου το S ισούται με -445,7 (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Διαχωρισμός Τμήματος 2 σε ομογενή-ως προς τη θερμοκρασία-υποτμήματα

Για το 1^ο υποτμήμα (T2A) ισχύουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Στοιχεία T2A

T2A		Παρατηρήσεις
Χ.Θ.	3,06-11,42	
M.O Tsurf(°C)	25,7	
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ Tsurf(°C)	1,26	
CV (%)	4,90%	<10%
N=	827	
M.O. D0	88,21	
S D0	62,88	
CV(%) D0	71,28%	
MAX D0 (μm)	361,02	
MIN D0 (μm)	13,46	

Αντίστοιχα, για το 2^ο υποτμήμα (T2B) ισχύουν τα στοιχεία του Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Στοιχεία T2B

T2B		Παρατηρήσεις
Χ.Θ.	11,43-17,022	
M.O Tsurf(°C)	24,3	
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ Tsurf(°C)	1,51	
CV (%)	6,19%	<10%
N=	558	
M.O. D0	73,71	
S D0	28,17	
CV(%) D0	38,22%	
MAX D0 (μm)	192,71	
MIN D0 (μm)	5,58	

Και στα 2 υποτμήματα ο CV(%) είναι μικρότερος από 10% οπότε μπορούν να χαρακτηριστούν ομογενή ως προς τη θερμοκρασία. Ωστόσο συγκριτικά με το τμήμα 1, ο CV(%) είναι σημαντικά αυξημένος. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στο γεγονός ότι το 2^ο τμήμα αποτελείται από 1385 τιμές σε αντίθεση με το 1^ο που αποτελείται από 66, δηλαδή σε δείγμα με πολλαπλάσιο πλήθος τιμών εμφανίζεται λιγότερη ομοιογένεια.

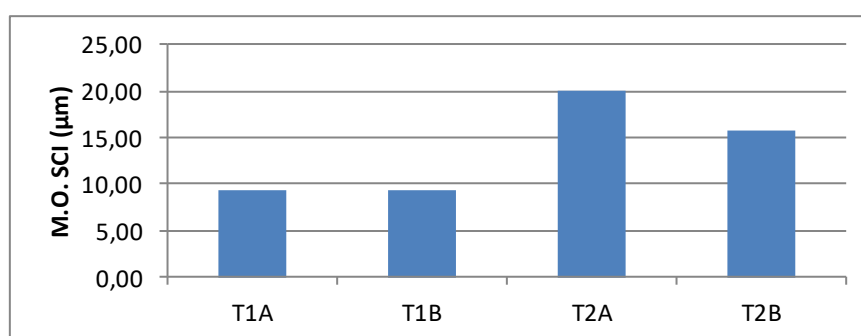
Χαρακτηρισμός οδοστρώματος

Χρησιμοποιώντας το δείκτη SCI και τα όρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 έγινε ο χαρακτηρισμός της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, για κάθε υποτμήμα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των SCI (M.O. SCI), η τυπική

απόκλιση (S SCI), ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV(%) SCI) και η μέγιστη τιμή SCI (MAX SCI). Τα αποτελέσματα φαίνονται ακολούθως (Πίνακας 5.5, Εικόνα 5.4).

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός SCI

	T1A	T1B	T2A	T2B
M.O. SCI (μm)	9,27	9,31	20,06	15,85
S SCI (μm)	3,40	2,64	19,90	6,60
CV (%) SCI	36,69%	28,36%	99,20%	41,67%
MAX SCI (μm)	17,75	14,77	119,07	45,01



Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μέσου όρου SCI

Προκύπτει ότι ο μέσος όρος για κάθε υποτμήμα είναι μικρότερος από 69 μm και επομένως σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4 για την κατηγορία «εθνικές οδοί», το οδόστρωμα χαρακτηρίζεται «καλό». Ωστόσο, στο υποτμήμα T2A παρουσιάζεται μεγάλος συντελεστής μεταβλητότητας και μέγιστος δείκτης SCI 119,07 μm , τιμή που αντιστοιχεί σε «κακό» οδόστρωμα. Για τον λόγο αυτό το υποτμήμα T2B εξετάστηκε εκτενέστερα και προέκυψε ο Πίνακας 5.6.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηρισμός οδοστρώματος υποτμήματος T2A

Χαρακτηρισμός οδοστρώματος	N (Πλήθος σημείων)	% (Ποσοστό)
Καλό	789	95,41%
Μέτριο	27	3,26%
Κακό	11	1,33%

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6 διαπιστώνεται ότι το υποτμήμα T2A στο μεγαλύτερο τμήμα του χαρακτηρίζεται από «καλό» οδόστρωμα με εξαίρεση ένα μικρό τμήμα που αντιστοιχεί στο 4,5% το οποίο χαρακτηρίζεται ως μέτριο ή/και κακό.

5.3 Υπολογισμοί D_0 (FWD)

5.3.1 Εφαρμογή μεθόδων υπολογισμού

Περιγραφή διαδικασίας

Εφόσον έγινε ο απαραίτητος διαχωρισμός των τμημάτων ως προς την θερμοκρασία, εφαρμόστηκαν για κάθε υποτμήμα οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 προκειμένου να προκύψουν οι αντίστοιχες τιμές $D_0(FWD)$ φορτίου εφαρμογής 50 kN. Διευκρινίζεται ότι για το TSD14 θεωρήθηκε φορτίο διπλού τροχού 50 kN, καθώς σύμφωνα με τη βιβλιογραφία το αντίστοιχο αξονικό είναι 10 tn (Jansen & Podolski, 2019).

Συγκεκριμένα, για να προκύψουν οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(FWD)$ με τη μέθοδο Austroads (2014) χρειάστηκε η επίλυση της (4.1) ως προς $D_0(FWD)$:

$$D_0(FWD) = \frac{D_0(TSD)+0,05}{1,36} \quad (5.3)$$

Τονίζεται ότι και οι δύο σχέσεις χρησιμοποιούνται για ελαστικές υποχωρήσεις εκφρασμένες σε mm και ότι έγινε η παραδοχή ότι η (4.1) χρησιμοποιείται για $D_0(TSD)$ φορτίου 50 kN.

Προκειμένου να προκύψουν οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(FWD)$ με εφαρμογή των μεθόδων Lee & Conaghan 2016 και Chai 2016 εφαρμόστηκαν οι σχέσεις (4.2) και (4.3) αντίστοιχα, προσέχοντας ότι η (4.2) εφαρμόζεται για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις εκφρασμένες σε mm.

Προκειμένου να προκύψουν οι κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(FWD)$ από την μέθοδο NZTA 2017 ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα: πρώτα έγινε η αναγωγή των μετρήσεων του TSD σε 40 kN, στη συνέχεια εφαρμόστηκε η σχέση (4.4) και τέλος έγινε η αναγωγή των $D_0(FWD)$ σε φορτίο 50 kN. Επισημαίνεται ότι η (4.4) χρησιμοποιείται για ελαστικές υποχωρήσεις εκφρασμένες σε mm.

Τέλος, στην περίπτωση της Manoharan 2018 η (4.6) επιλύθηκε ως προς FWD και προέκυψε η εξής:

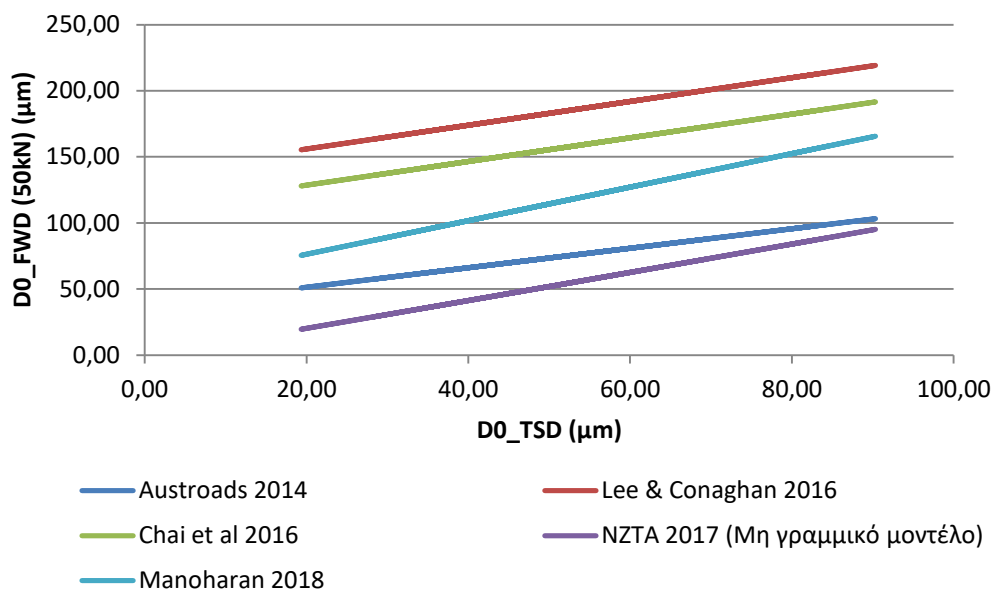
$$D_0(FWD) = \frac{D_0(TSD)+40,13}{0,9845} \quad (5.4)$$

Στη συνέχεια, έγινε η αναγωγή σε φορτίο 50 kN.

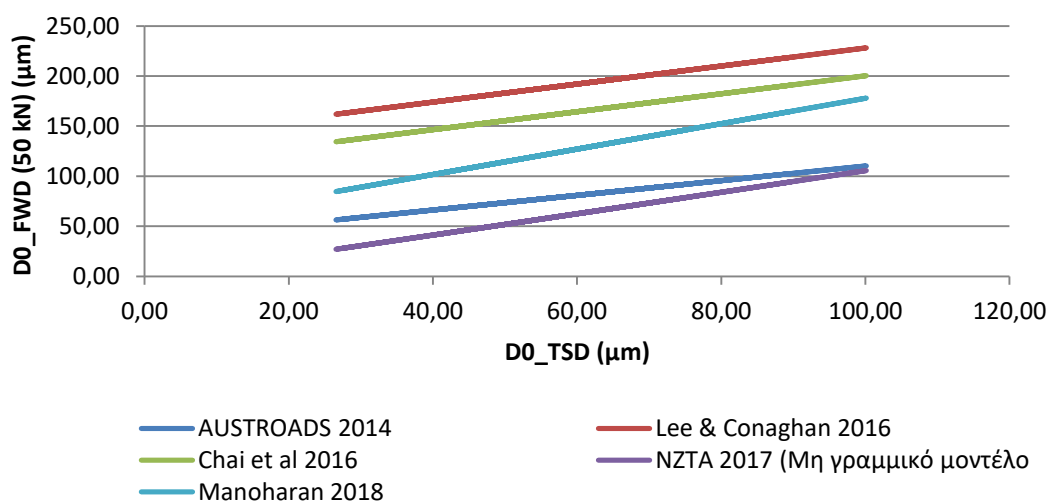
Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα.

Γραφήματα 1^{ου} τμήματος

Για το 1^ο τμήμα προκύπτουν τα εξής γραφήματα (Εικόνα 5.5, Εικόνα 5.6) :



Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 1Α) (T=26,2°C)



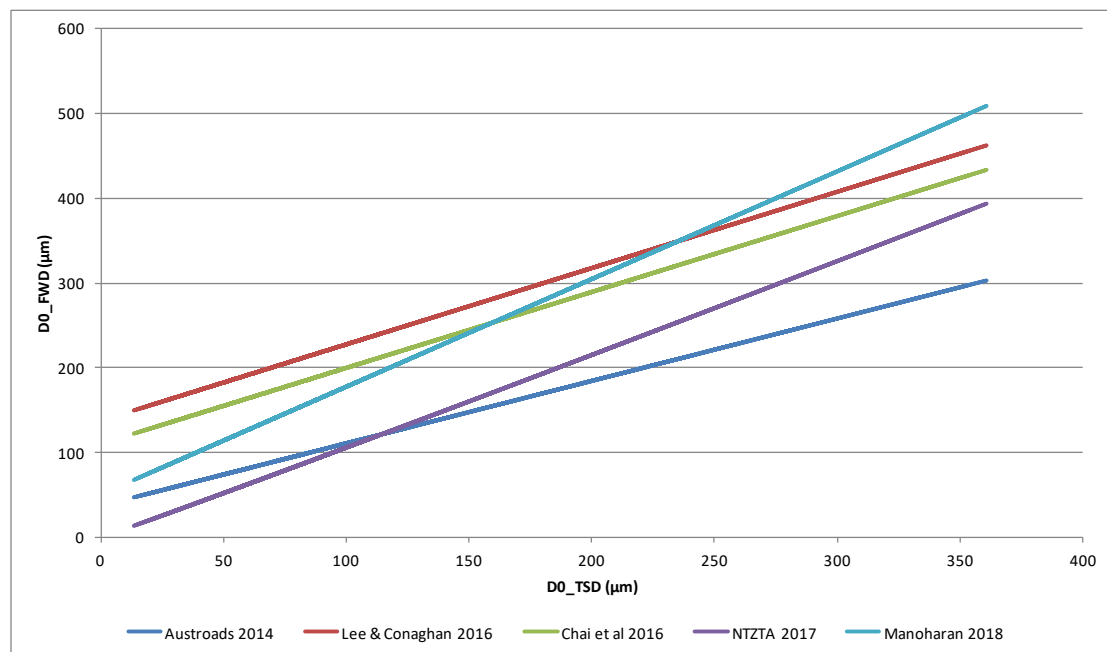
Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα D_0 (FWD) (ΤΜΗΜΑ 1Β) (T=26,7°C)

Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι για μικρή αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζεται μικρή αύξηση στις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις D_0 (TSD). Η μέθοδος Lee & Conaghan (2016) δίνει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα ενώ η NZTA (2017) δίνει τις μικρότερες τιμές D_0 (FWD). Ωστόσο, για D_0 (TSD) κοντά στα 100 μm οι μέθοδοι NZTA και Austroads τείνουν να δώσουν ίδια αποτελέσματα. Επίσης, φαίνεται ότι οι ευθείες Lee & Conaghan (2016) και Chai (2016) είναι μεταξύ τους παράλληλες και δίνουν αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους. Αντίθετα, η Manoharan έχει την πιο έντονη κλίση με αποτέλεσμα για μικρά D_0 (TSD) (~30 μm) να δίνει τιμές κοντά στη μέση τιμή των υπόλοιπων μεθόδων ενώ για πιο μεγάλα

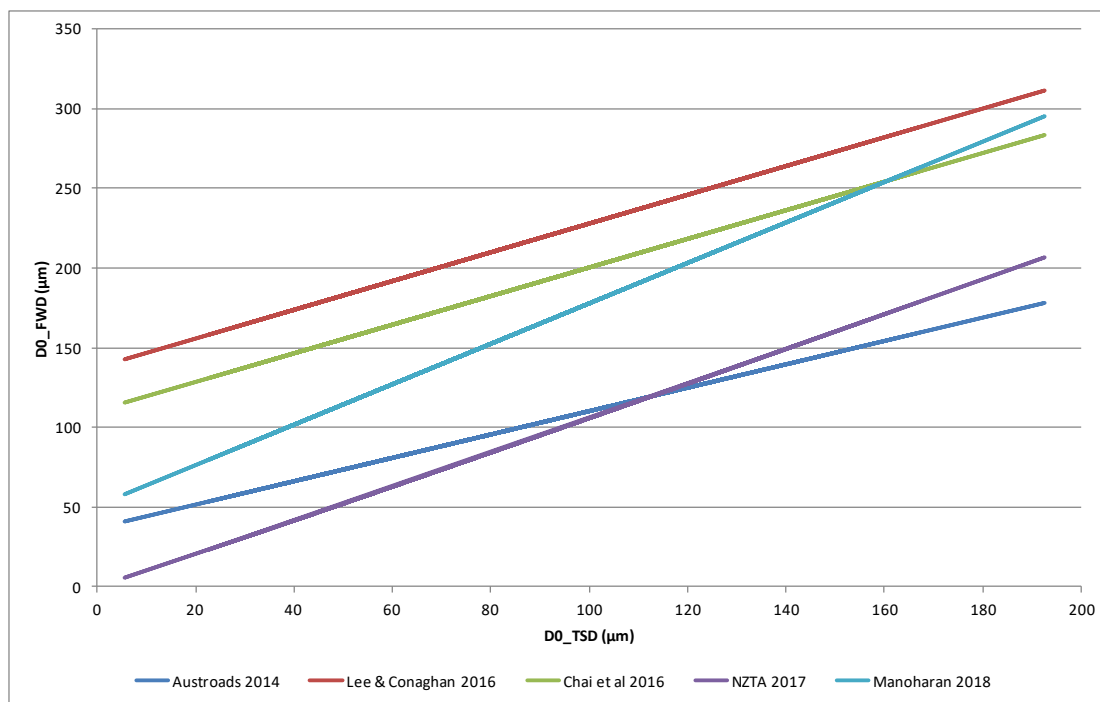
$D_0(\text{TSD})$ (~100 μm) να δίνει τιμές κοντά σε αυτές των Lee & Conaghan και Chai. Επισημαίνεται ότι όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις, ισχύουν για το τμήμα 1 στο οποίο παρουσιάζονται σχετικά μικρές κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(\text{TSD})$ (έως 100 μm).

Γραφήματα 2^{ου} τμήματος

Αντίστοιχα για το 2^ο τμήμα προκύπτουν τα παρακάτω γραφήματα (Εικόνα 5.7, Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα $D_0(\text{FWD})$ (ΤΜΗΜΑ 2Α, $T=25,7^\circ\text{C}$)



Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα $D_0(FWD)$ (ΤΜΗΜΑ 2B, $T=24,3^{\circ}C$)

Από τα γραφήματα του 2^{ου} τμήματος (Εικόνα 5.7 και Εικόνα 5.8), φαίνεται ότι για μεγαλύτερο εύρος τιμών ελαστικών υποχωρήσεων αρκετές από τις διαπιστώσεις που προέκυψαν από το 1^ο τμήμα δεν μπορούν να γενικευτούν. Φυσικά και σε αυτή την περίπτωση αναδεικνύεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας σηματοδοτεί αύξηση των ελαστικών υποχωρήσεων. Επίσης, ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό του 1^{ου} και του 2^{ου} τμήματος είναι ότι οι Lee & Conaghan και Chai φαίνεται να είναι παράλληλες και να δίνουν αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους.

Από το διάγραμμα του T2B φαίνεται ότι με αύξηση των $D_0(TSD)$ οι μέθοδοι Lee & Conaghan, Manoharan και Chai τείνουν να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο, στο διάγραμμα T2A φαίνεται ότι για μεγαλύτερες τιμές ($D_0(TSD) \sim 300 \mu m$) η Manoharan ξεπερνάει τις Lee & Conaghan και Chai, δίνοντας έτσι τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Μια άλλη διαπίστωση είναι ότι η NZTA φαίνεται ότι για $D_0(TSD) > 120 \mu m$ δίνει μεγαλύτερες τιμές $D_0(FWD)$ από την Austroads και όσο αυξάνεται το $D_0(TSD)$ η NZTA απομακρύνεται από την Austroads και τείνει να προσεγγίσει τις Chai και Lee & Conaghan. Αντίθετα, για μεγάλα $D_0(TSD)$ ($\sim 350 \mu m$) η Austroads φαίνεται να δίνει αρκετά μικρότερες τιμές $D_0(FWD)$ από τις υπόλοιπες, γεγονός που θα εξεταστεί περαιτέρω στη συνέχεια.

5.3.2 Κατάταξη μεθόδων

Η πολυπλοκότητα που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 5.7 στάθηκε αφορμή για να εξεταστούν αναλυτικά οι τιμές που δίνει κάθε μέθοδος στην περίπτωση που στο

εξεταζόμενο οδικό τμήμα παρουσιάζεται μεγάλο εύρος τιμών $D_0(\text{TSD})$ (από 20 έως 350 μm). Όπως φάνηκε στην περίπτωση του T2A, η κατάταξη των μεθόδων ως προς το μέγεθος των τιμών $D_0(\text{FWD})$ δεν είναι συγκεκριμένη αλλά εξαρτάται από τη τάξη μεγέθους των $D_0(\text{TSD})$. Για τον λόγο αυτό, σε πρώτο στάδιο διαμορφώθηκαν οι σχέσεις περιγραφής των μεθόδων συσχέτισης των $D_0(\text{TSD})$ και $D_0(\text{FWD})$ για φορτίο 50 kN εκφρασμένες σε μm (Πίνακας 5.7) και στη συνέχεια ακολούθησε αναλυτική επίλυση ώστε να βρεθούν τα σημεία τομής. Έτσι, θα είναι εύκολο να γίνει η κατάταξη των μεθόδων ως προς το μέγεθος των $D_0(\text{FWD})$ ανάλογα με το εύρος τιμών $D_0(\text{TSD})$ που συναντάται σε ένα οδικό τμήμα και τελικά να επιλεγεί ο ιδανικότερος αλγόριθμος ανά περίπτωση.

Πίνακας 5.7: Σχέσεις περιγραφής μεθόδων συσχέτισης των $D_0(\text{FWD})$ (μm) και $D_0(\text{TSD})$ (μm) για φορτίο εφαρμογής 50 kN

$x=\text{TSD}(50\text{kN})$ (μm) $\rightarrow$ $y=\text{FWD}(50\text{kN})$ (μm)		
ΜΕΘΟΔΟΙ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΚΦΡΑΣΗ	ΣΧΟΛΙΑ
AUSTROADS 2014	$y = 0,7353x + 36,765$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ $x > 0$
Lee & Conaghan 2016	$y = 0,9x + 138$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ $x > 0$
Chai et al 2016	$y = 0,896x + 110,65$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ $x > 0$
NZTA 2017 (Γραμμικό, $R^2 = 0,99$)	$y = 1,0882x - 2,6911$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ $x \geq 2,49$
NZTA 2017 (Μη-Γραμμικό)	$y = 0,9467x^{1,0236}$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ $x > 0$
Manoharan 2018	$y = 1,2697x + 50,952$	ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ $x > 0$

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι υφιστάμενες μέθοδοι συσχέτισης των $D_0(\text{FWD})$ και $D_0(\text{TSD})$ εκφρασμένες σε μm , για φορτίο εφαρμογής 50 kN. Οι σχέσεις των μεθόδων NZTA (2017) προέκυψαν για ελαστικές υποχωρήσεις εύρους 13 έως και 361 μm .

Από την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων προέκυψαν οι τετμημένες ($D_0(\text{TSD})$) που φαίνονται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Σημεία τομής

Συνδυασμοί	$D_0(\text{TSD})$ (μm) Σημείου Τομής
NZTA*-Austroads	111,81
Chai - Manoharan	159,75
Lee & Conaghan - Manoharan	235,46

Για την εύρεση της τετμημένης του σημείου τομής των καμπύλων NZTA και Austroads χρησιμοποιήθηκε η σχέση περιγραφής της γραμμικής μεθόδου NZTA που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.7, καθώς περιγράφει την αντίστοιχη μη-γραμμική αρκετά ικανοποιητικά ($R^2=0,99$). Τα παραπάνω όρια στρογγυλοποιήθηκαν στην πλησιέστερη πεντάδα και έτσι προέκυψε ο Πίνακας 5.9.

Πίνακας 5.9: Κατάταξη μεθόδων ως προς D_0 (FWD) (50kN)

	$D_0(TSD) < 110$	$110 \leq D_0(TSD) < 160$	$160 \leq D_0(TSD) < 235$	$D_0(TSD)^{**} \geq 235$
MAX D_0_FWD (50 kN)	Lee & Conaghan 2016	Lee & Conaghan 2016	Lee & Conaghan 2016	Manoharan 2018
↓	Chai et al 2016	Chai et al 2016	Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016
	Manoharan 2018	Manoharan 2018	Chai et al 2016	Chai et al 2016
	Austroads 2014	NZTA 2017	NZTA 2017	NZTA 2017
MIN D_0_FWD (50 kN)	NZTA 2017	Austroads 2014	Austroads 2014	Austroads 2014

Ο Πίνακας 5.9 προέκυψε για $D_0(TSD)$ εύρους 10 έως 360 μm , οπότε συστήνεται να χρησιμοποιείται για τιμές εντός αυτών των ορίων. Για πολύ μεγάλα D_0 (~650 μm) τα αποτελέσματα της NZTA μπορεί να ξεπεράσουν τα αντίστοιχα της μεθόδου Chai και επομένως σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύει η κατάταξη της τελευταίας στήλης του Πίνακα 5.9. Είναι προφανές ότι για $D_0(TSD) < 235$ μm η μέθοδος Lee & Conaghan δίνει τις μεγαλύτερες ελαστικές υποχωρήσεις FWD, ενώ για $D_0(TSD)$ 235-360 μm η μέθοδος Manoharan δίνει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα.

Σημειώνεται, ότι η συντριπτική πλειοψηφία των σημείων του υποτμήματος T2A που σύμφωνα με τη τιμή SCI αντιστοιχούν σε κακό ή μέτριο οδόστρωμα (Πίνακας 5.6) εντοπίζονται στις περιοχές όπου ο $D_0(TSD)$ εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες από 235 μm .

6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

6.1 Σύγκριση μεθόδων ανά δύο

6.1.1 Προσδιορισμός αποκλίσεων

Προκειμένου να διερευνηθούν οι μέθοδοι ως προς την απόκλιση των αποτελεσμάτων τους, αλλά και να επιβεβαιωθούν ή να απορριφθούν οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη υποενότητα, χρησιμοποιήθηκε η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE). Το στατιστικό αυτό εργαλείο δίνεται από την σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_1 - z_2)^2}{N}} \quad (6.1)$$

Όπου:

N: το πλήθος των μετρήσεων για το υποτμήμα που μελετάται

z_1, z_2 : οι τιμές των D_0 (FWD) που προέκυψαν από τις συγκρινόμενες μεθόδους

Με χρήση της σχέσης αυτής υπολογίστηκε για κάθε υποτμήμα το RMSE για όλους τους συνδυασμούς των μεθόδων.

Τμήμα 1

Η σχέση (6.1) εφαρμόστηκε για τα υποτμήματα T1A και T1B και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Η κατάταξη έγινε κατά αύξουσα σειρά.

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα RMSE για το 1^ο τμήμα

ΤΜΗΜΑ 1 (D0<100)	RMSE T1A	RMSE T1B	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ	ΣΧΟΛΙΑ
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	130,41	130,23	-0,14%	~0
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	110,14	110,38	0,22%	
Chai et al 2016 - NZTA 2017	102,86	102,67	-0,18%	
Austroads 2014 - Chai et al 2016	82,59	82,77	0,21%	
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan	67,55	67,11	-0,66%	
NZTA 2017 - Manoharan 2018	63,33	63,56	0,36%	
Austroads 2014 - Manoharan 2018	44,19	44,67	1,10%	Μικρή Αύξηση (+)
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	40,27	39,80	-1,16%	Μικρή Μείωση (-)
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	27,57	27,57	0,02%	~0
Austroads 2014 - NZTA 2017	21,28	20,86	-1,95%	Μικρή Μείωση (-)

Παρατηρείται ότι για τα δύο υποτμήματα προκύπτει η ίδια κατάταξη μεθόδων ως προς το RMSE, με τον συνδυασμό Lee&Conaghan-NZTA να εμφανίζει το μεγαλύτερο RMSE ενώ ο συνδυασμός Austroads-NZTA το μικρότερο. Επίσης, εστιάζοντας στην στήλη της ποσοστιαίας μεταβολής των RMSE φαίνεται ότι για μικρή αύξηση της θερμοκρασίας οι διαφορές των RMSE είναι αρκετά μικρές.

Ωστόσο, με την αύξηση της θερμοκρασίας και των D_0 (TSD) το RMSE των μεθόδων Austroads και NZTA μειώνεται περίπου κατά 2%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας και των ελαστικών υποχωρήσεων, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων έχουν την τάση να συγκλίνουν, γεγονός που επιβεβαιώνει αντίστοιχη εποπτική παρατήρηση της προηγούμενης υποενότητας (5.3). Επιπλέον, η μέθοδος Manoharan φαίνεται να έχει την τάση να αποκλίνει από την Austroads και να συγκλίνει με την Chai, γεγονός που επίσης επιβεβαιώνει την προκαταρκτική αξιολόγηση της υποενότητας (5.3).

Τμήμα 2

Αντίστοιχα, η σχέση (6.1) εφαρμόστηκε για τα υποτμήματα T2A και T2B και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες (Πίνακας 6.2, Πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα RMSE για το Τμήμα 2B (T2B)

ΤΜΗΜΑ 2B (T=24,3°C) (D0<193)	RMSE
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	127,06
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	113,47
Chai et al 2016 - NZTA 2017	99,45
Austroads 2014 - Chai et al 2016	85,85
NZTA 2017 - Manoharan 2018	67,39
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	60,70
Austroads 2014 - Manoharan 2018	55,65
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	33,83
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	27,65
Austroads 2014 - NZTA 2017	16,62

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα RMSE για το Τμήμα 2A (T2A)

ΤΜΗΜΑ 2A (T=25,7°C) (D0<361)	RMSE	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMSE T2B (T=24,3°C) → T2A (T=25,7°C)
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	124,65	-1,89%
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	116,23	2,43%
Chai et al 2016 - NZTA 2017	97,14	-2,32%
Austroads 2014 - Chai et al 2016	88,64	3,25%
NZTA 2017 - Manoharan 2018	70,58	4,74%
Austroads 2014 - Manoharan 2018	69,92	25,64%
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	59,19	-2,49%
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	35,58	5,19%
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	27,70	0,21%
Austroads 2014 - NZTA 2017	23,70	42,59%

Παρατηρείται ότι και στα δύο υποτμήματα το μεγαλύτερο RMSE εμφανίζεται στον συνδυασμό Lee & Conaghan-NZTA ενώ το μικρότερο στον συνδυασμό Austroads-NZTA, σε αντιστοιχία με το 1^ο τμήμα. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι αυξομειώσεις από υποτμήμα σε υποτμήμα είναι πιο έντονες και διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο. Για την καλύτερη ερμηνεία της επίδρασης της θερμοκρασίας διαμορφώθηκε ο Πίνακας 6.4 στον οποίο κατατάσσεται η ποσοστιαία (%) μεταβολή κατά αύξουσα σειρά.

Πίνακας 6.4: Ερμηνεία αποτελεσμάτων για το Τμήμα 2

ΤΜΗΜΑ 2Α (T=25,7°C)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMSE T2B (T=24,3°C) (D2B<192)→T2A (T=25,7°C) (D2A<361)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Austroads 2014 - NZTA 2017	42,59%	↑ RMSE
Austroads 2014 - Manoharan 2018	25,64%	
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	5,19%	
NZTA 2017 - Manoharan 2018	4,74%	
Austroads 2014 - Chai et al 2016	3,25%	
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	2,43%	
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	0,21%	~0
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	-1,89%	↓ RMSE
Chai et al 2016 - NZTA 2017	-2,32%	
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	-2,49%	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.4, φαίνεται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας και των τιμών D_0 (TSD), το RMSE που αντιστοιχεί στον συνδυασμό Austroads-NZTA παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, παρόλο που ο συνδυασμός βρίσκεται στη τελευταία θέση των Πίνακα 6.2 και Πίνακα 6.3, οι ευθείες των Austroads και NZTA αποκλίνουν σημαντικά για μεγάλα D_0 (TSD), διαπίστωση που προέκυψε και από την Εικόνα 5.7 της προηγούμενης υποενότητας (5.3).

Επιπλέον, σημαντική αύξηση του RMSE εμφανίζεται και στην περίπτωση του συνδυασμού Austroads-Manoharan. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται καθώς η ευθεία της μεθόδου Manoharan εμφανίζει την πιο έντονη κλίση. Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα (5.3), η ευθεία Manoharan για μικρά D_0 φαίνεται να δίνει αποτελέσματα παρόμοια με αυτά του μέσου όρου και επομένως αποτελέσματα κοντά σε αυτά των μεθόδων Austroads και NZTA ενώ για μεγάλα D_0 δίνει αποτελέσματα παρόμοια με αυτά των Lee&Conaghan και Chai.

Μικρότερη, αλλά εμφανή αύξηση RMSE παρουσιάζει η μέθοδος Manoharan με αυτές των Chai και NZTA, γεγονός που εποπτικά δικαιολογείται, καθώς η ευθεία Manoharan απομακρύνεται από αυτές των Chai και NZTA και προσεγγίζει τις τιμές της μεθόδου Lee & Conaghan (Εικόνα 5.7).

Αμέσως μετά, ακολουθούν οι συνδυασμοί της μεθόδου Austroads με τις Chai και Lee & Conaghan. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι η μέθοδος Austroads για μεγάλα D_0 αποκλίνει αρκετά από τα αποτελέσματα των προηγούμενων μεθόδων, γεγονός που διαπιστώθηκε και από την προκαταρκτική αξιολόγηση της υποενότητας (5.3) (Εικόνα 5.7) και γι' αυτό θα εξετασθεί στη συνέχεια.

Η μέθοδος Lee & Conaghan με Chai δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή, αντίστοιχα με το τμήμα 1. Αυτό πρακτικά επιβεβαιώνει την παραλληλία των ευθειών των δύο μεθόδων που διαπιστώθηκε εποπτικά (Εικόνα 5.7) και καθιστά την μεταξύ τους σύγκλιση ανεξάρτητη από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Τέλος, μείωση RMSE εμφανίζεται στη περίπτωση της μεθόδου NZTA με τις Lee & Conaghan και Chai, γεγονός που σηματοδοτεί τη σύγκλιση της NZTA μαζί τους, κάτι που επιβεβαιώνεται και οπτικά. Ωστόσο, ελαφρώς μεγαλύτερη μείωση εμφανίζει ο συνδυασμός Lee&Conaghan-Manoharan επιβεβαιώνοντας έτσι ότι σε μεγάλα $D_0(TSD)$ η μέθοδος Manoharan τείνει να δώσει παρόμοια αποτελέσματα με την Lee & Conaghan.

Συγκεντρωτικά

Τα αποτελέσματα των δύο τμημάτων φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.5 και στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικές τιμές για τα τμήματα 1 και 2

ΜΕΓΕΘΗ	T1A	T1B	T2B	T2A
M.O D0 (μm)	53,79	54,92	73,71	88,21
MAX D0 (μm)	90,35	100,13	192,71	361,02
MIN D0 (μm)	19,35	26,54	5,58	13,46

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα RMSE για τα τμήματα 1 και 2

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ	RMSE T1A(T=26,2°C) (D1A= 53,79 μm)	RMSE T1B (T=26,7°C) (D1B=54,92 μm)	RMSE T2B (T=24,3°C) (D2B=73,71 μm)	RMSE T2A (T=25,7°C) (D2A= 88,21 μm)
Austroads 2014 - Lee & Conaghan	110,14	110,38	113,47	116,23
Austroads 2014 - Chai et al 2016	82,59	82,77	85,85	88,64
Austroads 2014 - NZTA 2017	21,28	20,86	16,62	23,70
Austroads 2014 - Manoharan 2018	44,19	44,67	55,65	69,92
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al	27,57	27,57	27,65	27,70
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	130,41	130,23	127,06	124,65
Lee & Conaghan 2016 -	67,55	67,11	60,70	59,19
Chai et al 2016 - NZTA 2017	102,86	102,67	99,45	97,14
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	40,27	39,80	33,83	35,58
NZTA 2017 - Manoharan 2018	63,33	63,56	67,39	70,58

Από τον Πίνακα 6.6 φαίνεται ότι συνολικά κατά τη σύγκριση της μεθόδου Austroads με την NZTA εμφανίζεται το μικρότερο RMSE, ενώ το μεγαλύτερο εμφανίζεται στο συνδυασμό Lee & Conaghan-NZTA. Η αναλυτική κατάταξη κατά αύξουσα σειρά και ο τρόπος με τον οποίο αυτή διαμορφώνεται με την αύξηση του εύρους των $D_0(TSD)$ εμφανίζεται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Κατάταξη μεθόδων ως προς RMSE

ΚΑΤΑΤΑΞΗ RMSE	T1A (T=26,2°C) (D<90)	T1B (T=26,7°C) (D<100)	T2B (T=24,3°C) (D<193)	T2A (T=25,7°C) (D<361)	ΣΧΟΛΙΑ
MAX RMSE	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Κοινά
↓	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	
	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Chai et al 2016 - NZTA 2017	
	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Με την ↑ D φαίνεται να υπάρχει η τάση για ↑ RMSE του συνδυασμού NZTA 2017- Manoharan 2018 & Austrroads - Manoharan ενώ υπάρχει τάση για ↓ Lee&Conaghan - Manoharan 2018
	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	NZTA 2017 - Manoharan 2018	NZTA 2017 - Manoharan 2018	
	NZTA 2017 - Manoharan 2018	NZTA 2017 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	
	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	
	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Κοινά
	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	
MIN RMSE	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - NZTA 2017	

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.7 παρατηρείται ότι με την αύξηση του εύρους των ελαστικών υποχωρήσεων που εμφανίζεται σε τμήμα οδικού άξονα το RMSE των μεθόδων Manoharan-Lee&Conaghan έχει την τάση να λάβει χαμηλότερη θέση στην συνολική κατάταξη ενώ αντίθετα το RMSE της μεθόδου Manoharan με Austrroads και NZTA αυξάνεται. Αυτή η παρατήρηση ουσιαστικά επιβεβαιώνει την έντονη κλίση της ευθείας Manoharan, εξαιτίας της οποίας σε μεγάλα $D_0(TSD)$ η Manoharan απομακρύνεται από τις NZTA και Austrroads και δίνει αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους με την Lee & Conaghan.

Επιπλέον, ο συνδυασμός των μεθόδων Lee&Conaghan-Chai φαίνεται στην προτελευταία θέση, ανεξαρτήτως εύρους ελαστικών υποχωρήσεων, γεγονός που αποτυπώνεται και στον Πίνακα 6.6 ($RMSE \sim 27 \mu m$).

6.1.2 Αξιολόγηση ως προς τα όρια κατάταξης

Προβληματισμός

Η ανάλυση που προηγήθηκε δίνει μια καλή εικόνα για την συμπεριφορά των μεθόδων μεταξύ τους σύμφωνα με την θερμοκρασία και το εύρος των ελαστικών υποχωρήσεων που εμφανίζονται. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το 1^ο τμήμα, όπου οι τιμές είναι μικρότερες των 110 μm , φαίνεται να μπορούν να γενικευτούν για οδοστρώματα με πολύ καλή δομική κατάσταση. Ωστόσο, σε πιο σύνθετες περιπτώσεις, όπως αυτή του T2A, όπου το εύρος των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων είναι αρκετά μεγαλύτερο, είναι δύσκολο να προκύψουν γενικά συμπεράσματα για το ποια μέθοδος συγκλίνει ή αποκλίνει περισσότερο από κάποια άλλη, καθώς το πλήθος και η κατανομή των μετρήσεων καθορίζουν τελικά το RMSE. Στην περίπτωση του T2A, το 83% των μετρήσεων δεν ξεπερνά τα 110 μm και το υπόλοιπο 17% παίρνει τιμές από 110 έως 361 μm . Η ανάλυση που προηγείται

έδειξε ότι τα αποτελέσματα των Austroads-NZTA συγκλίνουν περισσότερο ενώ αυτά των Lee&Conaghan και NZTA αποκλίνουν περισσότερο. Ωστόσο, σε μια άλλη περίπτωση που η κατανομή των τιμών είναι διαφορετική (πχ 20% κάτω από 110 και το 80% πάνω από 110) ενδέχεται τα αποτελέσματα των RMSE να είναι διαφορετικά.

Ανάπτυξη δεδομένων

Για τη διερεύνηση του συγκριμένου ζητήματος, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εξετάστηκαν περαιτέρω οι μετρήσεις του υποτμήματος T2A ανάλογα με τη κατηγορία του Πίνακα 5.9 στην οποία εντάσσονται. Επισημαίνεται ότι για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα αναλυτικά όρια που βρέθηκαν από την επίλυση των εξισώσεων του Πίνακα 5.7, τα οποία παρουσιάζουν μια μικρή διαφοροποίηση από τα στρογγυλοποιημένα του Πίνακα 5.9.

Σε πρώτη φάση, έγινε η αναλυτική κατάταξη των σημείων του υποτμήματος T2A ανάλογα με τα όρια $D_0(TSD)(\mu m)$ και ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών για κάθε κατηγορία (Πίνακας 6.8).

Πίνακας 6.8: Αναλυτική κατάταξη σημείων υποτμήματος 2A (T2A)

	ΤΜΗΜΑ 2A			
	$D_0(TSD) < 110$	$110 \leq D_0(TSD) < 160$	$160 \leq D_0(TSD) < 235$	$D_0(TSD) \geq 235$
Χ.Θ.	3,06-11,42	3,45-10,89	7,48-9,74	8,68-9,66
M.O. T'surf(°C)	25,6	25,5	25,7	26,14
S T'surf(°C)	1,35	0,84	0,43	0,36
CV (%) T'surf(°C)	5,28%	3,29%	1,68%	1,38%
M.O. D0 (μm)	63,68	132,68	195,99	282,79
S D0 (μm)	22,58	13,83	21,19	39,19
CV(%) D0	35,47%	10,42%	10,81%	13,86%
MAX D0 (μm)	113,61	159,25	234,7	361,02
MIN D0 (μm)	13,46	113,7	161,46	236,52
N	683	38	64	42
ΠΟΣΟΣΤΟ %	82,59%	4,59%	7,74%	5,08%

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι: ο μέσος όρος των θερμοκρασιών της επιφάνειας του οδοστρώματος (M.O. T'(surf)) και των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων (M.O. D0), η τυπική απόκλιση των θερμοκρασιών επιφάνειας οδοστρώματος (S T'(surf)) και των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων (S D0), ο συντελεστής διασποράς των θερμοκρασιών της επιφάνειας του οδοστρώματος (CV(%) T'(surf)) και των ελαστικών υποχωρήσεων (CV(%) D0), η μέγιστη και η ελάχιστη κεντρική ελαστική υποχώρηση (Max_D0 και Min_D0 αντίστοιχα), το πλήθος των σημείων που ανήκουν στην κάθε κατηγορία (N) και το αντίστοιχο ποσοστό που αποτελούν (ΠΟΣΟΣΤΟ %).

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής μεταβλητότητας της θερμοκρασίας της επιφάνειας του οδοστρώματος (CV(%) T'(surf)) είναι μικρότερος

του 10%, επομένως τα τμήματα μπορούν να θεωρηθούν ομογενή ως προς τη θερμοκρασία. Όσον αφορά τις τιμές των θερμοκρασιών ($M.O._T'(surf)$) στις πρώτες 3 περιπτώσεις είναι σχεδόν ίσες. Ωστόσο, η διαπίστωση ότι με αύξηση θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση ελαστικών υποχωρήσεων φαίνεται να μην ισχύει απόλυτα από τη 1^η στη 2^η περίπτωση όμως ισχύει για τις υπόλοιπες. Ίσως αυτό να σημαίνει ότι η θερμοκρασία διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο σε σχετικά μεγάλες υποχωρήσεις.

Αντίθετα, με το συντελεστή μεταβλητότητας των θερμοκρασιών, ο συντελεστής μεταβλητότητας των ελαστικών υποχωρήσεων ($CV(\%) D_0$) ξεπερνά το 10% σε όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, προσεγγιστικά μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι τα τμήματα της 2^{ης} και της 3^{ης} στήλης είναι ομογενή ως προς το $D_0(TSD)$. Αυτό σημαίνει ότι ο μέσος όρος ($M.O._{D_0}$) των $D_0(TSD)$ εκφράζει ικανοποιητικά τα τμήματα της 2^{ης} και 3^{ης} στήλης, κάτι που δε ισχύει για τη 1^η και 4^η στήλη.

Σε δεύτερη φάση ακολούθησε ο υπολογισμός του RMSE για κάθε επιμέρους τμήμα (Πίνακας 6.9).

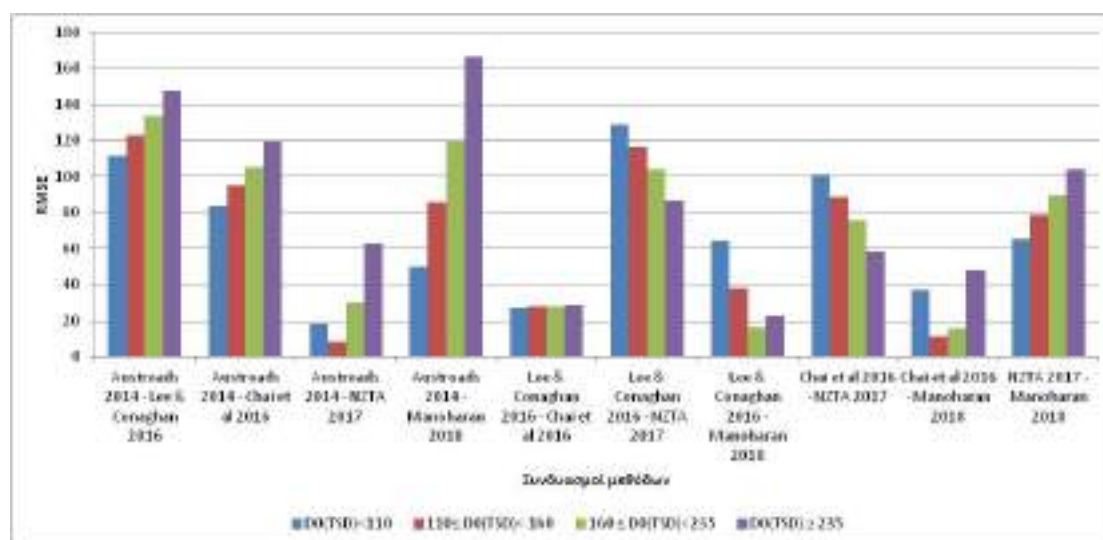
Πίνακας 6.9: Υπολογισμός του RMSE των μεθόδων για τα επιμέρους τμήματα του T2A

Τμήμα 2Α	RMSE			
Συνδυασμοί Μεθόδων	$D_0(TSD) < 110$	$110 \leq D_0(TSD) < 160$	$160 \leq D_0(TSD) < 235$	$D_0(TSD) \geq 235$
Austroroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	111,78	123,11	133,56	147,95
Austroroads 2014 - Chai et al 2016	84,20	95,23	105,44	119,49
Austroroads 2014 - NZTA 2017	18,57	8,24	30,36	63,10
Austroroads 2014 - Manoharan 2018	49,70	85,40	119,45	166,60
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	27,60	27,88	28,13	28,48
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	128,76	116,43	104,22	86,78
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	64,05	38,33	16,53	22,60
Chai et al 2016 - NZTA 2017	101,18	88,56	76,12	58,50
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	36,88	11,33	15,65	48,20
NZTA 2017 - Manoharan 2018	65,36	78,44	89,61	104,08

Για υποχωρήσεις μικρότερες των 110 μm φαίνεται ότι καλύτερη σύγκλιση εμφανίζουν οι μέθοδοι Austroroads-NZTA ενώ την χειρότερη οι μέθοδοι Lee&Conaghan-NZTA, συμπεράσματα αντίστοιχα με αυτά που είχαν προκύψει για το τμήμα 1. Για υποχωρήσεις μεγαλύτερες των 110 μm και μικρότερες των 160 μm φαίνεται ότι τα αποτελέσματα που αποκλίνουν περισσότερο είναι αυτά των Austroroads και Lee & Conaghan, ενώ οι μέθοδοι Austroroads και NZTA δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Για υποχωρήσεις μεγαλύτερες των 160 μm και μικρότερες των 235 μm οι μέθοδοι Austroroads και Lee & Conaghan εξακολουθούν να εμφανίζουν την μεγαλύτερη απόκλιση ενώ τη μικρότερη απόκλιση εμφανίζουν τα αποτελέσματα των μεθόδων Manoharan και Chai. Τέλος, για υποχωρήσεις μεγαλύτερες των 235 μm παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα των μεθόδων

Manoharan και Austroads παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση, ενώ την μικρότερη παρουσιάζουν η Manoharan με την Lee & Conaghan. Ωστόσο, η Austroads εμφανίζει υψηλές τιμές RMSE και με τις μεθόδους Chai και Manoharan. Το RMSE της Austroads με την NZTA μπορεί να είναι το μικρότερο κατ' απόλυτη τιμή από το αντίστοιχο της Austroads με τις άλλες μεθόδους, όμως είναι σχεδόν το διπλάσιο από το RMSE της Austroads-NZTA της 3^{ης} περίπτωσης.

Οι αυξομειώσεις των συνδυασμών των μεθόδων φαίνονται και στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1: Αποτελέσματα RMSE των επιμέρους τμημάτων του T2A

Παρατηρώντας την Εικόνα 6.1 διαπιστώνεται ότι με αύξηση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων $D_0(TSD)$, το RMSE των συνδυασμών Austroads-Lee&Conaghan, Austroads-Chai, Austroads-Manoharan και NZTA-Manoharan αυξάνεται, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων μεθόδων έχουν την τάση να αποκλίνουν. Μάλιστα, το RMSE στην περίπτωση του συνδυασμού Austroads-Manoharan για την περίπτωση $D_0 \geq 235$ αποτελεί την μέγιστη τιμή του διαγράμματος.

Επίσης, φαίνεται ότι με αύξηση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων $D_0(TSD)$, το RMSE των συνδυασμών Lee&Conaghan-NZTA και Chai-NZTA ελαττώνεται, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η μέθοδος NZTA έχει την τάση να συγκλίνει με τις μεθόδους Lee&Conaghan και Chai.

Στις περιπτώσεις των συνδυασμών Austroads-NZTA, Lee&Conaghan-Manoharan και Chai-Manoharan, το RMSE παρουσιάζει αυξομειώσεις.

Τέλος, φαίνεται ότι οι μέθοδοι Lee&Conaghan και Chai δίνουν παρόμοια αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι μεταβολές αυτές παρουσιάζονται και στους Πίνακες 6.10, 6.11 και 6.12. Ως T1', T2', T3' και T4' χαρακτηρίζονται τα τμήματα των μετρήσεων για τα οποία ισχύουν $D_0(TSD) < 110$, $110 \leq D_0(TSD) < 160$, $160 \leq D_0(TSD) < 235$ και $D_0(TSD) \geq 235$ αντίστοιχα.

Πίνακας 6.10: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T1' στο T2'

Συνδυασμοί	% RMSE T1' → T2'	Σχόλια
Austroads 2014 - Manoharan 2018	71,84%	↑ RMSE
NZTA 2017 - Manoharan 2018	20,03%	
Austroads 2014 - Chai et al 2016	13,11%	
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	10,13%	
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	1,00%	Μικρή Αύξηση
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	-9,58%	↓ RMSE
Chai et al 2016 - NZTA 2017	-12,47%	
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	-40,16%	
Austroads 2014 - NZTA 2017	-55,62%	
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	-69,28%	

Πίνακας 6.11: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T2' στο T3'

Συνδυασμοί	% RMSE T2' → T3'	Σχόλια
Austroads 2014 - NZTA 2017	268,35%	↑ RMSE
Austroads 2014 - Manoharan 2018	39,87%	
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	38,17%	
NZTA 2017 - Manoharan 2018	14,24%	
Austroads 2014 - Chai et al 2016	10,71%	
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	8,49%	
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	0,91%	Μικρή Αύξηση
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	-10,49%	↓ RMSE
Chai et al 2016 - NZTA 2017	-14,05%	
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	-56,87%	

Πίνακας 6.12: Ποσοστιαία μεταβολή RMSE από το T3' στο T4'

Συνδυασμοί	% RMSE T3' → T4'	Σχόλια
Chai et al 2016 - Manoharan 2018	207,91%	↑ RMSE
Austroads 2014 - NZTA 2017	107,85%	
Austroads 2014 - Manoharan 2018	39,47%	
Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	36,71%	
NZTA 2017 - Manoharan 2018	16,14%	
Austroads 2014 - Chai et al 2016	13,33%	
Austroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	10,77%	
Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	1,24%	Μικρή Αύξηση
Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	-16,73%	↓ RMSE
Chai et al 2016 - NZTA 2017	-23,14%	

Η κατάταξη των μεθόδων κατά αύξουσα σειρά για κάθε τμήμα T', φαίνεται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13: Κατάταξη μεθόδων για τα τμήματα Τ'

	RMSE ΤΜΗΜΑ 2Α			
	$D_0(TSD) < 110$	$110 \leq D_0(TSD) < 160$	$160 \leq D_0(TSD) < 235$	$D_0(TSD) \geq 235$
MAX RMSE	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Austrroads 2014 - Manoharan 2018
↓	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - Lee & Conaghan 2016
	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Austrroads 2014 - Chai et al 2016
	Austrroads 2014 - Chai et al 2016	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017	NZTA 2017 - Manoharan 2018
	NZTA 2017 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	NZTA 2017 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - NZTA 2017
	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	NZTA 2017 - Manoharan 2018	Chai et al 2016 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - NZTA 2017
	Austrroads 2014 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Chai et al 2016 - NZTA 2017
	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Chai et al 2016 - Manoharan 2018
	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Chai et al 2016
MIN RMSE	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Austrroads 2014 - NZTA 2017	Chai et al 2016 - Manoharan 2018	Lee & Conaghan 2016 - Manoharan 2018

Στον Πίνακα 6.13, παρουσιάζονται ποιοτικά, για κάθε εύρος τιμών $D_0(TSD)$, οι συνδυασμοί των οποίων τα αποτελέσματα συγκλίνουν περισσότερο και οι συνδυασμοί των οποίων τα αποτελέσματα αποκλίνουν περισσότερο. Επίσης, φαίνεται η εξέλιξη της σύγκλισης του κάθε συνδυασμού με την αύξηση των $D_0(TSD)$.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων σύγκρισης

Οι πιο βασικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από το Πίνακα 6.13, λαμβάνοντας υπόψιν και τους προηγούμενους, είναι οι εξής:

1. Η μέθοδος Austrroads με την Lee&Conaghan και την Chai αποκλίνει σημαντικά για όλο το εύρος τιμών που μελετήθηκε.
2. Η μέθοδος Austrroads συγκλίνει με τη NZTA για μικρά $D_0(TSD)$ ενώ για $D_0(TSD)$ μεγαλύτερα των 160 μm φαίνεται να αποκλίνει.
3. Οι μέθοδοι Austrroads και Manoharan δίνουν συγκλίνοντα αποτελέσματα για μικρές υποχωρήσεις (για $D_0(TSD) < 110 \mu m$), ενώ όσο αυξάνεται η τάξη μεγέθους των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων αποκλίνουν σημαντικά. Μάλιστα για μεγάλες υποχωρήσεις ($D_0(TSD) > 235$) οι δύο αυτές μέθοδοι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση.
4. Οι μέθοδοι Lee & Conaghan και Chai δίνουν παρόμοια αποτελέσματα ανεξαρτήτως του μεγέθους των ελαστικών υποχωρήσεων. Η συνολική

αύξηση του RMSE από πολύ μικρές σε μεγάλες υποχωρήσεις αγγίζει το 3%, ποσοστό που κρίνεται αρκετά χαμηλό.

5. Οι μέθοδοι Lee & Conaghan και NZTA δίνουν ανόμοια αποτελέσματα για το μεγαλύτερο εύρος υποχωρήσεων. Ωστόσο, με την αύξηση των τιμών των υποχωρήσεων, η απόκλιση των δύο μεθόδων μειώνεται σημαντικά.
6. Οι μέθοδοι Lee & Conaghan και Manoharan για μικρές υποχωρήσεις δίνουν ανόμοια αποτελέσματα, ωστόσο με την αύξηση των ελαστικών υποχωρήσεων φαίνεται να συγκλίνουν. Πάντως για τιμές μεγαλύτερες των 235 μm παρουσιάζεται μια αύξηση στο RMSE που σημαίνει ότι η σύγκλιση τους είναι τοπική και ότι σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες των 235 μm θα αποκλίνουν και πάλι.
7. Οι μέθοδοι Chai και NZTA ενώ για μικρές τιμές υποχωρήσεων δίνουν ανόμοια αποτελέσματα, με την αύξηση των ελαστικών υποχωρήσεων φαίνεται να συγκλίνουν.
8. Οι μέθοδοι Chai και Manoharan για μικρές αλλά και για μεγάλες ελαστικές υποχωρήσεις δίνουν ανόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο για τιμές μεταξύ 110-235 μm δίνουν κοντινά αποτελέσματα.
9. Οι μέθοδοι NZTA με Manoharan δίνουν ανόμοια αποτελέσματα. Με την αύξηση των ελαστικών υποχωρήσεων προκύπτει αύξηση της μεταξύ τους απόκλισης.

Σύγκριση με τα αποτελέσματα της υπο ενότητας 6.1.1

Συγκρίνοντας την κατάταξη του τμήματος 2A (Πίνακας 6.7 στήλη T2A) με τον Πίνακα 6.13, προκύπτει ότι παρόλο που στο εύρος των $D_0(\text{TSD})$ περιλαμβάνονται και μεγάλες τιμές, η κατάταξη του τμήματος 2A μοιάζει με αυτή της πρώτης στήλης του Πίνακα 6.13 ($D_0(\text{TSD}) < 110 \mu\text{m}$). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγάλες τιμές που εμφανίζονται στο τμήμα 2A αποτελούν μικρό ποσοστό των συνολικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και στη τελευταία γραμμή του Πίνακα 6.8, σχεδόν το 83% των τιμών είναι μικρότερο από 110 μm ενώ μόλις το 5% πάνω από 235 μm .

6.2 Σύγκριση μεθόδων με θεώρηση μέσων τιμών των αποτελεσμάτων

6.2.1 Προσδιορισμός ποσοστιαίων αποκλίσεων

Με δεδομένο ότι δεν υπήρχαν στοιχεία από μετρήσεις FWD, ένας άλλος τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τις θεωρητικές τιμές που δίνει ο μέσος όρος των επιμέρους τιμών υπολογισμού των μεθόδων. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό εργαλείο της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος (Root Mean Square Percentage Error, RMSPE) που δίνεται από την σχέση:

$$RMSPE = 100 * \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{a_i} \right|^2} \quad (6.2)$$

Όπου n: το πλήθος

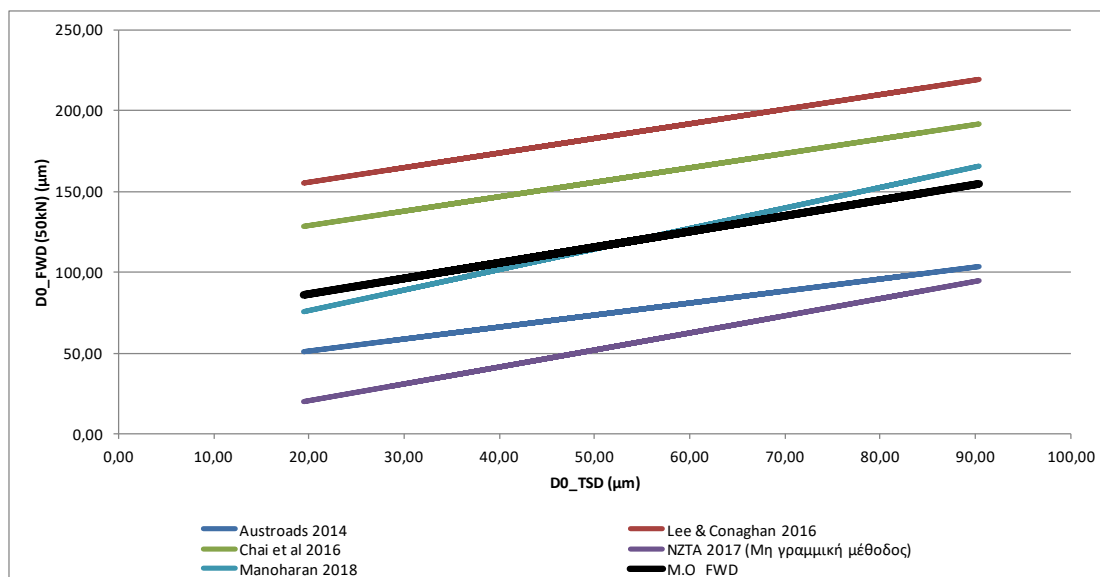
και e_i η διαφορά της προβλεπόμενης και της πραγματικής τιμής, δηλαδή $e_i = r_i - a_i$ όπου r_i : προβλεπόμενη τιμή και a_i : πραγματική τιμή.

Στην παρούσα διπλωματική, θεωρήθηκε ως r_i : η τιμή που προβλέπει κάθε μέθοδος και ως a_i : η τιμή που αντιστοιχεί στη μέση τιμή των μεθόδων.

Τμήμα 1

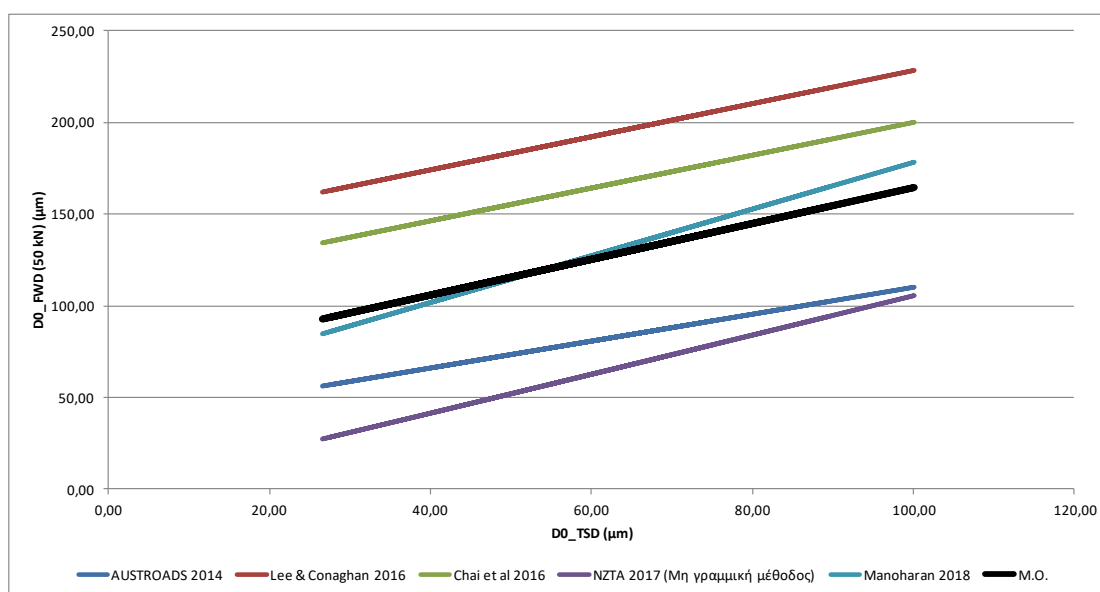
Σε πρώτη φάση, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των πέντε μεθόδων και αναπτύχθηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης $D_0(TSD)$ με $D_0(FWD)$ για κάθε υποτμήμα (T1A, T1B) (Εικόνα 6.2 και Εικόνα 6.3). Η ευθεία που αντιστοιχεί στη μέση τιμή απεικονίζεται με μαύρο χρώμα. Για το υποτμήμα T1A η ευθεία περιγράφεται από την σχέση $y = 0,9733 * x + 67,021$ ενώ για το υποτμήμα T2A από την σχέση $y = 0,9735 * x + 67,004$ (x, y : οι τιμές των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων TSD και FWD αντίστοιχα, εκφρασμένες σε μm). Φαίνεται ότι η διαφοροποίηση των δύο μαθηματικών σχέσεων είναι ελάχιστη και επομένως οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο σχέσεων κρίνονται αμελητέες.

Τα αποτελέσματα $D_0(FWD)$ που δίνει η κάθε μέθοδος, φαίνονται γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικόνα 6.2 και Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση τιμών D0(TSD)-D0(FWD), Τμήμα 1Α

Από την Εικόνα 6.2 φαίνεται ότι οι μέθοδοι Lee&Conaghan και NZTA απέχουν περισσότερο από την ευθεία του μέσου όρου ενώ η μέθοδος Manoharan την προσεγγίζει ικανοποιητικά.



Εικόνα 6.3: Απεικόνιση τιμών D0(TSD)-D0(FWD), Τμήμα 1Β

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των Τμημάτων 1Α και 1Β (Εικόνα 6.2 και Εικόνα 6.3 αντίστοιχα) φαίνεται ότι για μικρή αύξηση της θερμοκρασίας δε παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση. Ωστόσο, για τιμές D₀(TSD) κοντά στα 100 μm (Εικόνα 6.3), η μέθοδος Manoharan φαίνεται να έχει μια μικρή τάση να αποκλίνει από την καμπύλη του M.O. παραμένοντας ωστόσο η μέθοδος που δίνει τα πιο κοντινά αποτελέσματα σε αυτή.

Σε δεύτερη φάση, προκειμένου να αξιολογηθούν καλύτερα οι μέθοδοι και να διαψευστούν ή επιβεβαιωθούν οι παρατηρήσεις που προέκυψαν οπτικά, υπολογίστηκε για κάθε μέθοδο το RMSPE σύμφωνα με την σχέση (6.2). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.14.

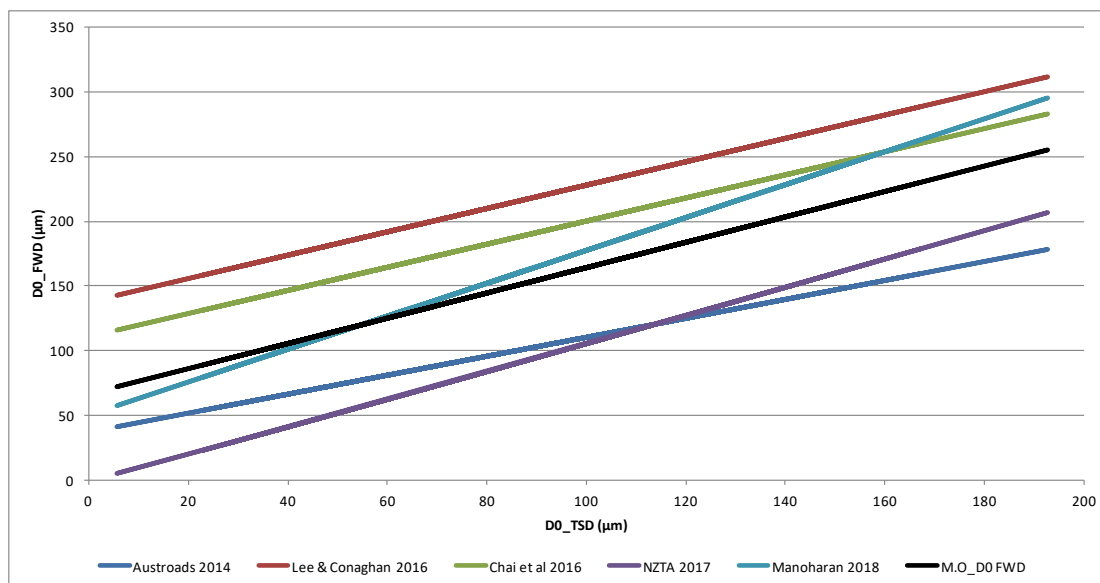
Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα RMSPE 1^{ου} τμήματος

	Μέθοδος	RMSPE T1A	RMSPE T1B	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMSPE T1A(T=26,2°C) → T1B (T=26,7°C)
MAX RMSPE	Lee & Conaghan 2016	58,64%	57,72%	-1,58%
↓	NZTA 2017	55,52%	54,62%	-1,62%
	Austroroads 2014	36,41%	36,25%	-0,42%
	Chai et al	34,72%	34,11%	-1,73%
MIN RMSPE	Manoharan 2018	4,96%	4,47%	-9,93%

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.14, η μέθοδος Lee & Conaghan αποκλίνει περισσότερο από την καμπύλη του Μ.Ο., ενώ εξίσου μεγάλη απόκλιση εμφανίζει και η μέθοδος NZTA. Αντίθετα, η μέθοδος Manoharan συγκλίνει με την καμπύλη του Μ.Ο. και έτσι επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις που διαπιστώθηκαν από τα διαγράμματα απεικόνισης τιμών του Τμήματος T1A και T1B (Εικόνα 6.2 και Εικόνα 6.3 αντίστοιχα). Με μικρή αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται μια μικρή μείωση του RMSPE, που σηματοδοτεί μια τάση για αποτελέσματα πιο κοντά σε αυτά της καμπύλης του Μ.Ο..

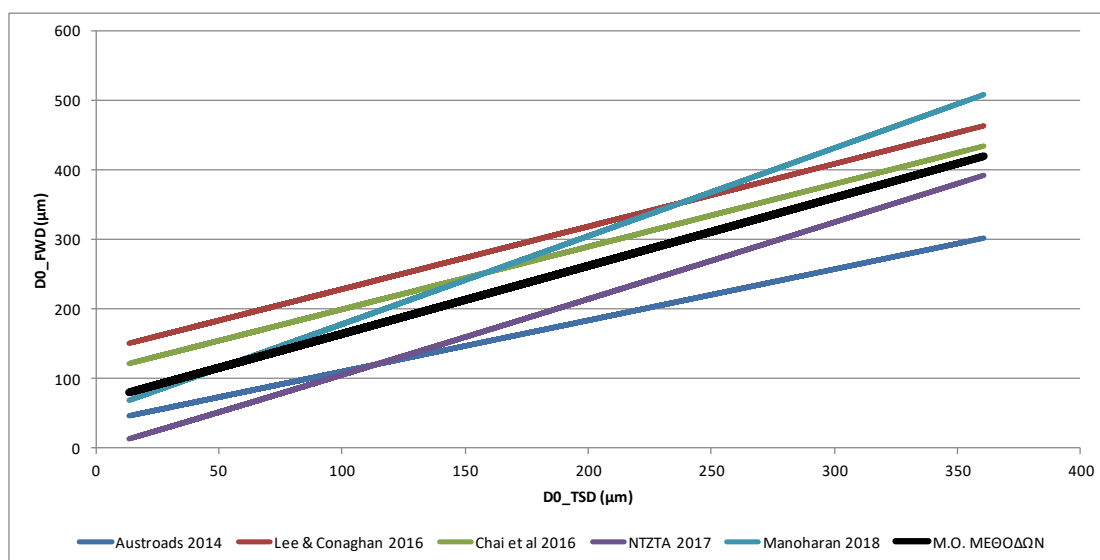
Τμήμα 2

Αντίστοιχη πορεία ακολουθήθηκε και για το 2^ο τμήμα. Στο τμήμα 2Α η γραμμή του Μ.Ο. περιγράφεται από την εξίσωση: $Y=0,9778 \cdot X+66,735$ ενώ του τμήματος 2Β από την: $Y=0,9752 \cdot X+66,898$ (x,y: οι τιμές των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων TSD και FWD αντίστοιχα, εκφρασμένες σε μm). Φαίνεται ότι η διαφοροποίηση των δύο μαθηματικών σχέσεων είναι μικρή και επομένως οι διαφορές είναι αμελητέες. Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά στα ακόλουθα διαγράμματα (Εικόνα 6.4 και Εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.4: Απεικόνιση τιμών $D_0(TSD)-D_0(FWD)$, Τμήμα 2B

Από το διάγραμμα του Τμήματος 2B (Εικόνα 6.4) φαίνεται ότι οι μέθοδοι Manoharan και Austroads με την αύξηση των τιμών του $D_0(TSD)$ έχουν την τάση να αποκλίνουν με την καμπύλη του Μ.Ο. ενώ οι υπόλοιπες εμφανίζουν την τάση να συγκλίνουν.



Εικόνα 6.5: Απεικόνιση τιμών $D_0(TSD)-D_0(FWD)$, Τμήμα 2A

Από την Εικόνα 6.5 φαίνεται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση με την αύξηση των τιμών των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων η μέθοδος Manoharan και η μέθοδος Austroads παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις με την καμπύλη του Μ.Ο..

Αντίστοιχα με το τμήμα 1, προκειμένου να αξιολογηθούν καλύτερα οι μέθοδοι και να διαψευστούν ή επιβεβαιωθούν οι παρατηρήσεις που προέκυψαν οπτικά, υπολογίστηκε για κάθε μέθοδο ο RMSPE σύμφωνα με την σχέση (6.2). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στον Πίνακα 6.15.

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα RMSPE 2^{ου} τμήματος

	Μέθοδος	RMSPE T2B	RMSPE T2A	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMPSE T2A ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΜΕ T2B (T=24,3°C)
MAX RMSPE	Lee & Conaghan 2016	50,38%	50,24%	-0,28%
↓	NZTA 2017	47,41%	47,30%	-0,23%
	Austroads 2014	34,87%	34,69%	-0,52%
	Chai et al	29,42%	29,42%	-0,01%
MIN RMSPE	Manoharan 2018	5,97%	8,25%	38,26%

Την μεγαλύτερη απόκλιση με την καμπύλη του Μ.Ο. εμφανίζουν οι μέθοδοι Lee & Conaghan και NZTA με ποσοστά 50% και 47% αντίστοιχα ενώ η Manoharan παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις. Με την αύξηση της θερμοκρασίας οι μέθοδοι παρουσιάζουν μια αρκετά μικρή μείωση του RMSPE δηλαδή έχουν μια μικρή τάση για σύγκλιση με την καμπύλη Μ.Ο.. Εξαίρεση αποτελεί η μέθοδος Manoharan η οποία παρουσιάζει σημαντική αύξηση της τάξεως του 38%. Αυτό υποδηλώνει ότι για μικρές ελαστικές υποχωρήσεις η Manoharan δίνει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της καμπύλης του Μ.Ο. ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας και των τιμών των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις.

Το οξύμωρο γεγονός ότι οι μέθοδοι Lee & Conaghan, NZTA, Austroads, Chai παρουσιάζουν πολύ μικρή μεταβολή RMSPE (ενώ οπτικά φαίνεται σημαντική σύγκλιση με την καμπύλη του Μ.Ο.) και ότι η Manoharan παρά την αλλαγή της συμπεριφοράς της κατά μήκος του οριζόντιου άξονα x συνεχίζει να εμφανίζει το μικρότερο RMSPE, πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η πλειοψηφία των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων που εμφανίζονται είναι σχετικά μικρές.

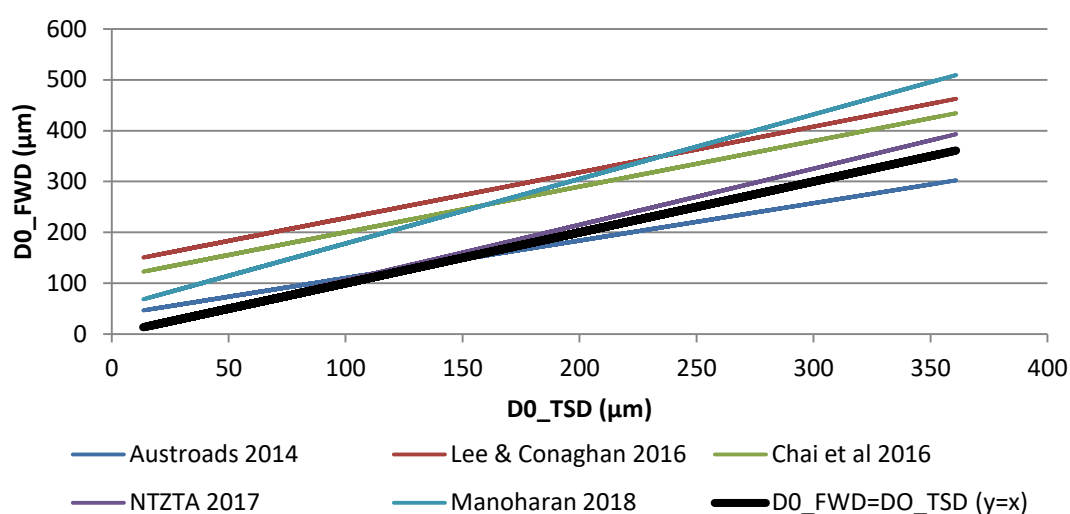
6.2.2 Επαναξιολόγηση αποτελεσμάτων

Οι περιορισμοί της μεθόδου Austroads

Από τις αναλύσεις που προηγήθηκαν στις υποενότητες 6.1 και 6.2.2 παρατηρήθηκε ότι ενώ η Austroads για μικρές κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις D_0 (TSD) (περίπτωση του τμήματος 1) δίνει αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά των άλλων

μεθόδων, για μεγάλες $D_0(\text{TSD})$ δίνει αποτελέσματα που αποκλίνουν πολύ από αυτά των υπόλοιπων μεθόδων. Μάλιστα, από τα διαγράμματα $D_0 \text{ TSD-FWD}$ του τμήματος 2Α (Εικόνα 5.7 και Εικόνα 6.5) φαίνεται ότι για μεγάλα $D_0(\text{TSD})$ η μέθοδος Austroads δίνει μικρότερα αποτελέσματα από αυτά των υπολοίπων.

Για τους προαναφερθέντες λόγους, η μέθοδος Austroads μελετήθηκε εκτενέστερα και συγκρίθηκε με τις μετρήσεις που δίνει το TSD. Έτσι σχεδιάστηκε η ευθεία $y=x$ η οποία αναπαριστά τις μετρήσεις του TSD (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Απεικόνιση D_0 (TSD), $D_0(\text{FWD})$ και ευθείας $y=x$, Τμήμα 2Α

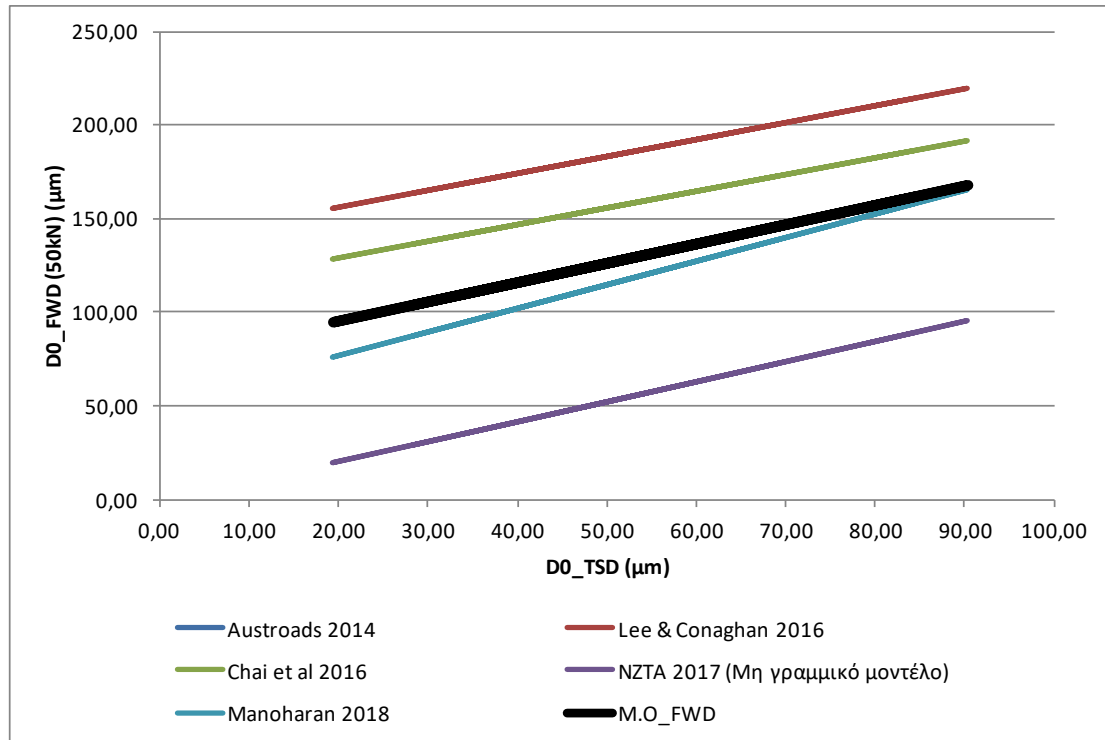
Η μαύρη-παχιά-γραμμή απεικονίζει τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις του TSD. Παρατηρείται ότι για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις μεγαλύτερες από 200 μm η μέθοδος Austroads δίνει αποτελέσματα $D_0(\text{FWD})$ μικρότερα από τα αντίστοιχα $D_0(\text{TSD})$, κάτι το οποίο είναι αμφισβητούμενο αφού κατά κανόνα για το ίδιο φορτίο εφαρμογής το FWD παραμορφώνει εντονότερα το οδόστρωμα.

Καθώς η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων $y=x$ με την $y=0,7353 \cdot x + 36,756$ (εξίσωση Austroads από Πίνακα 5.7) δίνει λύση $x=138,86$, συστήνεται η μέθοδος Austroads να μη χρησιμοποιείται για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(\text{TSD})$ μεγαλύτερες των 140 μm.

Έτσι, η χρήση της μεθόδου Austroads στο τμήμα 2Α κρίνεται αμφισβητούμενη και γ' αυτό το τμήμα 2 εξετάστηκε ξανά, χωρίς αυτή τη φορά την μέθοδο Austroads. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας, εξετάστηκε και το τμήμα 1.

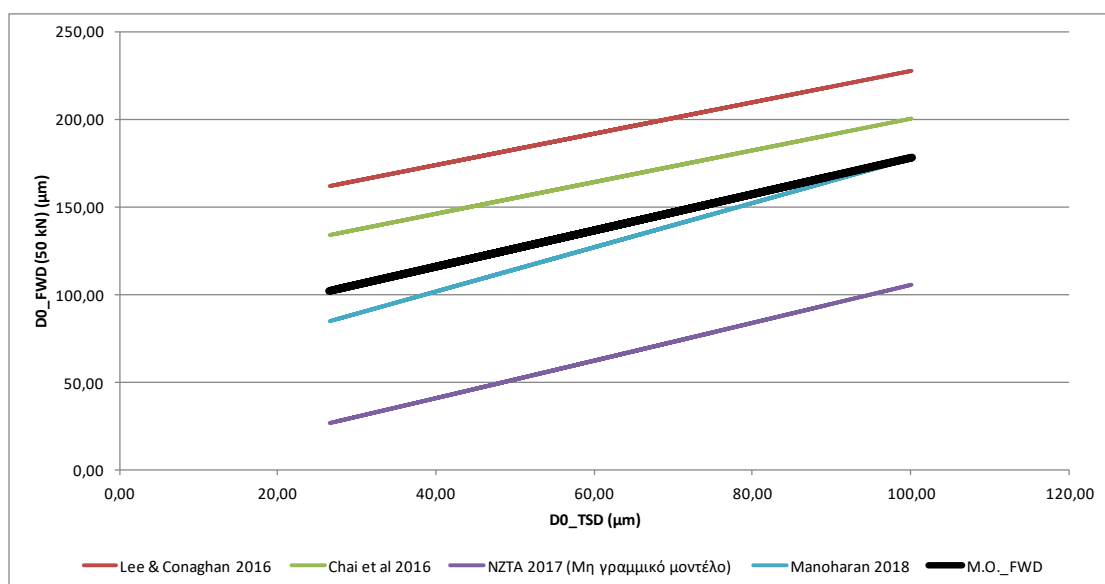
Τμήμα 1

Σε πρώτη φάση, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των τεσσάρων μεθόδων και αποτυπώθηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης $D_0(\text{TSD})$ με $D_0(\text{FWD})$ για κάθε υπομήμα (Τ1Α,Τ1Β) (Εικόνα 6.7 και Εικόνα 6.8). Η ευθεία που αντιστοιχεί στη μέση τιμή απεικονίζεται με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 6.7: Απεικόνιση $D_0(\text{TSD})$ - $D_0(\text{FWD})$, Τμήμα 1Α (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

Από την Εικόνα 6.7 διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου NZTA είναι αυτά που αποκλίνουν περισσότερο από τα αποτελέσματα της γραμμής του Μ.Ο, ενώ της μεθόδου Manoharan αυτά που συγκλίνουν περισσότερο.



Εικόνα 6.8: Απεικόνιση $D_0(\text{TSD})$ - $D_0(\text{FWD})$, Τμήμα 1Β (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των Τμημάτων 1Α και 1Β (Εικόνα 6.7 και Εικόνα 6.8 αντίστοιχα) φαίνεται ότι για μικρή αύξηση της θερμοκρασίας δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Ίσως, στο τμήμα 1Β, η μέθοδος Manoharan να εμφανίζει ακόμη μεγαλύτερη σύγκλιση με τα αποτελέσματα του Μ.Ο..

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα RMSPE των μεθόδων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.16.

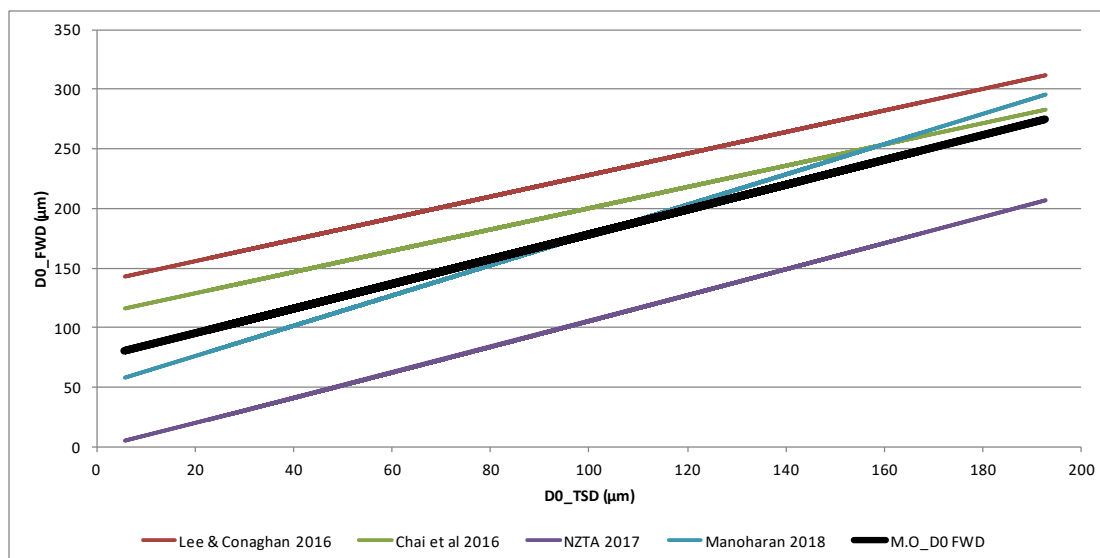
Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα RMSPE, Τμήμα1 (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

	Μέθοδος	RMSPE T1A	RMSPE T1B	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMSPE T1A (T=26,2°C) → T1B (T=26,7°C)
MAX RMSPE	NZTA 2017	59,10%	58,28%	-1,39%
↓	Lee & Conaghan 2016	45,41%	44,62%	-1,75%
	Chai et al 2016	23,54%	23,03%	-2,18%
MIN RMSPE	Manoharan 2018	10,33%	9,79%	-5,18%

Από τον Πίνακα 6.16 επιβεβαιώνεται ότι η μέθοδος NZTA αποκλίνει σημαντικά από την καμπύλη του μέσου όρου ενώ η Manoharan εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με αυτή. Επίσης, με μικρή αύξηση θερμοκρασίας παρατηρείται μείωση του RMSPE, που σημαίνει ότι οι μέθοδοι έχουν την τάση να συγκλίνουν περισσότερο στην καμπύλη του Μ.Ο..

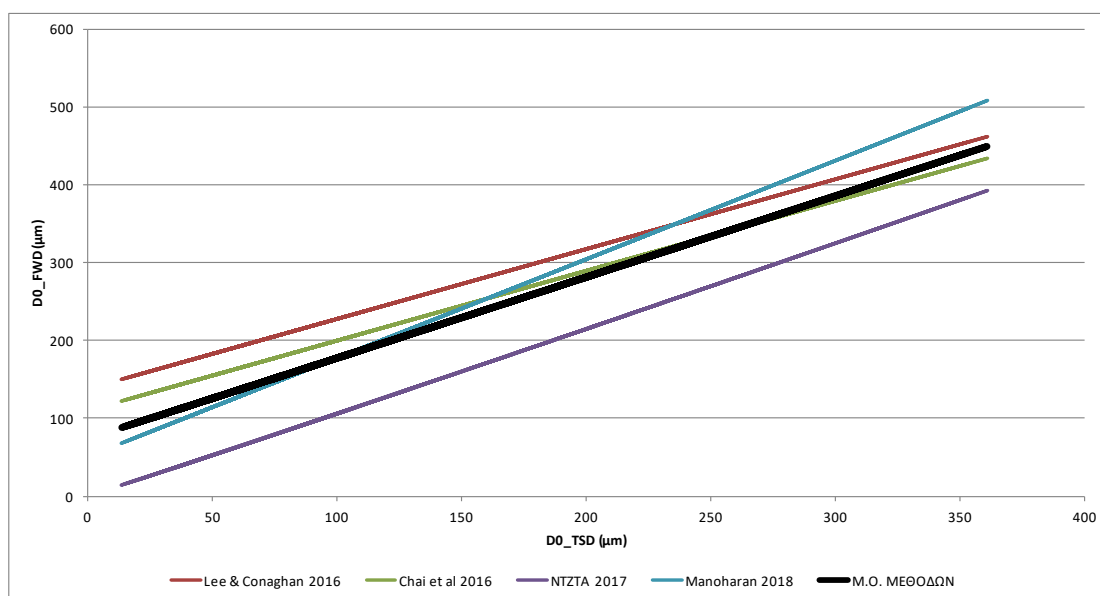
Τμήμα 2

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των τεσσάρων μεθόδων και αποτυπώθηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης $D_0(TSD)$ με $D_0(FWD)$ για κάθε υποτμήμα (T2A,T2B) (Εικόνα 6.9 και Εικόνα 6.10). Η ευθεία που αντιστοιχεί στη μέση τιμή απεικονίζεται με μαύρο χρώμα. Στο τμήμα 2Β (Εικόνα 6.9) η γραμμή του Μ.Ο. περιγράφεται από την εξίσωση: $y = 1,0352x + 74,432$ ενώ του τμήματος 2Α (Εικόνα 6.10) από την: $y = 1,0385x + 74,228$ (x,y: οι τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων TSD και FWD αντίστοιχα, εκφρασμένες σε μm). Φαίνεται ότι η διαφοροποίηση των δύο μαθηματικών σχέσεων είναι μικρή και επομένως οι διαφορές στα αποτελέσματα που δίνουν θεωρούνται αμελητέες. Τα διαγράμματα που προέκυψαν για τα T2B και T2A είναι τα ακόλουθα.



Εικόνα 6.9: Απεικόνιση $D_0(TSD)-D_0(FWD)$, Τμήμα 2B (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

Από την Εικόνα 6.9 διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της Manoharan είναι παρόμοια με αυτά της καμπύλης Μ.Ο._ $D_0(FWD)$. Ωστόσο, με την αύξηση των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων φαίνεται ότι η Chai συγκλίνει και αυτή με την καμπύλη του Μ.Ο.. Τα μικρότερα αποτελέσματα εμφανίζονται στην περίπτωση της NZTA, τα οποία φαίνεται να απέχουν αρκετά από τα αντίστοιχα της καμπύλης του Μ.Ο..



Εικόνα 6.10: Απεικόνιση $D_0(TSD)-D_0(FWD)$, Τμήμα 2A (περίπτωση Μ.Ο. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

Από την Εικόνα 6.10, φαίνεται ότι για μεγάλες τιμές $D_0(TSD)$ τα αποτελέσματα των μεθόδων Lee & Conaghan και Chai συγκλίνουν με αυτά της καμπύλης Μ.Ο.. Επίσης, η μέθοδος NZTA φαίνεται και αυτή να έχει μια τάση σύγκλισης στη καμπύλη Μ.Ο..

χωρίς ωστόσο να δίνει τόσο κοντινά αποτελέσματα, όσο οι προηγούμενες. Τέλος, η μέθοδος Manoharan αν και για $D_0(TSD)$ μικρότερα των 200 μm εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με την μέθοδο M.O., για μεγαλύτερες κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις φαίνεται να έχει την τάση να απομακρύνεται από αυτή.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το RMSPE για κάθε μέθοδο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 6.17.

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα RMSPE, Τμήμα 2 (περίπτωση M.O. χωρίς τη μέθοδο Austroads)

	Μέθοδος	RMSPE T2B (T=24,3°C)	RMSPE T2A (T=25,7°C)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ RMPSE	ΣΧΟΛΙΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
MAX RMPSE	NZTA 2017	51,46%	51,14%	-0,61%	~0
↓	Lee & Conaghan 2016	38,37%	38,37%	0,02%	~0
	Chai et al 2016	19,18%	19,40%	1,18%	μικρή αύξηση
MIN RMPSE	Manoharan 2018	7,15%	8,55%	19,71%	αύξηση

Από τον Πίνακα 6.17, φαίνεται ότι η μέθοδος που εμφανίζει την μεγαλύτερη απόκλιση από τα αποτελέσματα της καμπύλης του M.O. είναι η NZTA ενώ η μέθοδος που εμφανίζει την μεγαλύτερη σύγκλιση είναι η Manoharan. Με αύξηση της θερμοκρασίας, δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στις μεθόδους NZTA και Lee & Conaghan ενώ όσον αφορά την μέθοδο Chai εμφανίζει μικρή αύξηση RMSPE. Την πιο σημαντική μεταβολή εμφανίζει η μέθοδος Manoharan με αύξηση της RMSPE τάξεως 20%. Κάτι τέτοιο φαίνεται λογικό, αν ληφθεί υπόψη ότι η ευθεία Manoharan για πολύ μεγάλες κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις (μεγαλύτερες των 200 μm) έχει την τάση να αποκλίνει από την καμπύλη των M.O..

Συγκριτικά με το τμήμα 1, το τμήμα 2 παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερες τιμές RMSPE σε όλες τις μεθόδους. Βάσει αυτού συμπεραίνεται ότι για $D_0(TSD)$ μεγαλύτερα των 100 μm (και μικρότερα των 360 μm) οι μέθοδοι προσεγγίζουν καλύτερα την καμπύλη του M.O. διαμορφώνοντας την άποψη ότι μειώνονται οι μεταξύ τους αποκλίσεις και παράγουν συγκλίνοντα αποτελέσματα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η συγκριτική διερεύνηση των παραμορφωσίμετρων πίπτοντος βάρους FWD και ταχείας κυκλοφορίας TSD, στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για το FWD και εντοπίστηκαν τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του, τα στοιχεία καταγραφής του και οι τρόποι με τους οποίους το FWD συμβάλει στη δομική κατάταξη εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω δεικτών αλλά και στην αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του. Αντίστοιχα, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, περιγράφεται το σύστημα TSD και ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και οι διαδικασίες αναπαραγωγής των καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων. Επίσης, κατά αντιστοιχία με το FWD, εντοπίστηκαν οι χρησιμοποιούμενοι δείκτες δομικής κατάταξης και αναδείχθηκε η συμβολή του TSD στην αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και στον σχεδιασμό της ενίσχυσής τους.

Στη συνέχεια, έγινε η συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των δύο συστημάτων και η ανασκόπηση των σημαντικότερων υφιστάμενων μεθόδων συσχέτισης των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων που καταγράφουν τα δύο συστήματα, όπως αυτές εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Επίσης, αναπτύχθηκε πίνακας ορίων για τη δομική κατάταξη των οδοστρωμάτων για τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις που προκύπτουν από το TSD.

Τέλος, αξιοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου που είχε πραγματοποιήσει το ερευνητικό ινστιτούτο BAST με το σύστημα TSD14 σε αυτοκινητόδρομο της Γερμανίας. Συγκεκριμένα οι υπόψη μετρήσεις διατέθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκειμένου να γίνει η συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων συσχέτισης κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων των δύο συστημάτων. Σε πρώτο στάδιο, έγινε η ανάλυση των δεδομένων και μια προκαταρκτική σύγκριση των μεθόδων από τα διαγράμματα απεικόνισης των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων που προέκυψαν. Σε δεύτερο στάδιο, έγινε συγκριτική αξιολόγηση των υφιστάμενων μεθόδων με δύο τρόπους. Κατά τον πρώτο τρόπο, η σύγκριση έγινε ανά δύο με τη βοήθεια του στατιστικού δείκτη RMSE, ενώ κατά το δεύτερο τρόπο πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές που δίνει ο μέσος όρος των επιμέρους τιμών υπολογισμού των μεθόδων, με τη βοήθεια του στατιστικού δείκτη RMSPE.

Από την **ποιοτική σύγκριση** των δύο συστημάτων, προέκυψε ότι οι κυριότερες διαφορές εστιάζονται στο τρόπο εφαρμογής του φορτίου και στο τρόπο καταγραφής των προκαλούμενων ελαστικών υποχωρήσεων. Στην περίπτωση του FWD γίνεται μια προσομοίωση του τροχού μέσω παλμικού φορτίου (στατική μέθοδος), ενώ στην περίπτωση του TSD το φορτίο είναι ο κινούμενος διπλός τροχός. Επίσης, στην περίπτωση του FWD η μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων γίνεται με γεώφωνα, ενώ στην περίπτωση του TSD ειδικοί αισθητήρες τεχνολογίας Doppler με τη χρήση λέιζερ καταγράφουν τις ταχύτητες των ελαστικών υποχωρήσεων από τις οποίες, συνυπολογίζοντας την ταχύτητα του οχήματος, προκύπτουν οι τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων.

Το FWD πραγματοποιεί στατικές σημειακές μετρήσεις και κατά την λειτουργία του είναι απαραίτητη η λήψη κυκλοφοριακών μέτρων, όπως ο αποκλεισμός λωρίδων κυκλοφορίας. Αντίθετα, το TSD φαίνεται να πλεονεκτεί συγκριτικά με το FWD, καθώς παρέχει την δυνατότητα συνεχόμενων μετρήσεων σε συνήθη ταχύτητα κυκλοφορίας με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται κυκλοφοριακές ρυθμίσεις. Με άλλα λόγια δίνει μια συνολική εικόνα της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα καθιστώντας τη χρήση του ιδανική σε επίπεδο οδικού δικτύου. Επιπλέον, τα περισσότερα TSD είναι εξοπλισμένα με συμπληρωματικά συστήματα συλλογής δεδομένων που σχετίζονται με την ανίχνευση της στρωματογραφίας (GPR) αλλά και με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Έτσι, ο περιφερειακός εξοπλισμός του TSD μπορεί να δώσει τη ίδια χρονική στιγμή στοιχεία που αφορούν όχι μόνο τη δομική, αλλά και την λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος. Ωστόσο, το σημαντικότερο μειονέκτημα του TSD είναι το υπέρογκο κόστος αγοράς του.

Από τα όρια των κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων του TSD που αναπτύχθηκαν με την χρήση των υφιστάμενων μεθόδων συσχέτισης, στα πλαίσια διαμόρφωσης πίνακα δομικής κατάστασης οδοστρώματος, προκύπτει ότι οι μέθοδοι Manoharan (2018) και Lee & Conahan (2016) δίνουν τα πιο αυστηρά όρια, ενώ η Austroads (2014) τα πιο ανεκτικά. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση τα όρια που αφορούν τις κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις του TSD είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα του FWD. Το στοιχείο αυτό συνδέεται με το γεγονός ότι το TSD δίνει μικρότερες τιμές ελαστικών υποχωρήσεων απ' ό,τι το FWD.

Από την **κατάταξη των μεθόδων** και τη χρήση της **τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)** ως δείκτη αξιολόγησης προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Για δομικά ισχυρά οδοστρώματα, δηλαδή για οδοστρώματα στα οποία εμφανίζονται κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις μικρότερες των 100 μm , φαίνεται ότι η μέθοδος Lee & Conaghan δίνει τις μεγαλύτερες κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(\text{FWD})$. Ακολουθούν, κατά αύξουσα σειρά, οι μέθοδοι: Chai, Manoharan, Austroads και NZTA. Οι μέθοδοι των οποίων τα αποτελέσματα αποκλίνουν περισσότερο είναι η Lee & Conaghan και NZTA ενώ τα αποτελέσματα των μεθόδων Austroads και NZTA συγκλίνουν περισσότερο. Με μικρή αύξηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση μικρή αύξηση των ελαστικών υποχωρήσεων $D_0(\text{TSD})$ φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των μεθόδων Austroads και NZTA συγκλίνουν ακόμη περισσότερο, όπως και τα αντίστοιχα των μεθόδων Manoharan και Chai. Οι διαφορές στα αποτελέσματα των μεθόδων Lee Conaghan-Chai φαίνεται ότι είναι μικρές και ανεπηρέαστες από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση των οδοστρωμάτων που εμφανίζουν μεγαλύτερο εύρος κεντρικών ελαστικών υποχωρήσεων (μέχρι 360 μm) η κατάταξη και η σύγκλιση των μεθόδων είναι κάπως πιο πολύπλοκη. Παρατηρείται ότι για εύρος 150-250 μm οι μέθοδοι Lee&Conaghan – Chai – Manoharan δίνουν παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ τους. Ωστόσο, για μεγαλύτερες κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις ($D_0(\text{TSD}) > 300 \mu\text{m}$) η μέθοδος Manoharan έχει την τάση να αποκλίνει από τις υπόλοιπες μεθόδους και να δίνει τα μεγαλύτερα αποτελέσματα. Για αύξηση της θερμοκρασίας η μέθοδος NZTA έχει την τάση να συγκλίνει με τις Chai και Lee & Conaghan. Αντίθετα, με την αύξηση της θερμοκρασίας και των ελαστικών υποχωρήσεων τα αποτελέσματα της μεθόδου Austroads αποκλίνουν από αυτά των υπολοίπων. Καθώς η απόκλιση αυτή κρίθηκε σημαντική η μέθοδος Austroads εξετάστηκε αναλυτικότερα και διαπιστώθηκε ότι για τιμές μεγαλύτερες από 140 μm δίνει αποτελέσματα μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του FWD, στοιχείο το οποίο είναι αμφισβητούμενο. Σύμφωνα με αυτή την παρατήρηση, η Austroads προτείνεται να χρησιμοποιείται για $D_0(\text{TSD})$ μικρότερες των 140 μm . Τέλος, σημειώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση οι μέθοδοι Lee & Conaghan – Chai δίνουν παρόμοια αποτελέσματα σε όλο το εύρος των ελαστικών υποχωρήσεων.

Από τη σύγκριση των υφιστάμενων μεθόδων συσχέτισης (πλην της Austroads) ως προς τη γραμμή που αντιστοιχεί στις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων (γραμμή

Μ.Ο.), με τη χρήση της **τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος (RMSPE)** ως δείκτη αξιολόγησης, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Για δομικά ισχυρά οδοστρώματα ($D_0(\text{TSD}) < 100 \mu\text{m}$) φαίνεται ότι η μέθοδος Manoharan συγκλίνει περισσότερο, ενώ ακολουθούν οι Chai, Lee & Conaghan και NZTA (η τελευταία συγκλίνει λιγότερο). Με μικρή αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται ότι η RMSPE εμφανίζει μικρή μείωση κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι μέθοδοι έχουν την τάση να συγκλίνουν ως προς τη γραμμή Μ.Ο. και άρα και μεταξύ τους.

Για οδοστρώματα στα οποία εμφανίζεται μεγαλύτερο εύρος τιμών (μέχρι $360 \mu\text{m}$) διαπιστώνεται οπτικά ότι οι μέθοδοι Lee & Conaghan, Chai και NZTA εξακολουθούν να συγκλίνουν ως προς τη γραμμή Μ.Ο. και άρα και μεταξύ τους. Αντίθετα, η Manoharan για κεντρικές ελαστικές υποχωρήσεις $D_0(\text{TSD})$ μεγαλύτερες των $200 \mu\text{m}$ φαίνεται να έχει την τάση να αποκλίνει από τον Μ.Ο. και τις υπόλοιπες μεθόδους, διαπίστωση που επιβεβαιώνεται και με την αύξηση της RMSPE.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, σε μια προσπάθεια μετάβασης από το σύστημα FWD στο σύστημα TSD, κρίνεται ότι η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από το εύρος τιμών $D_0(\text{TSD})$ που καταγράφονται στο εκάστοτε οδόστρωμα. Έτσι, για δομικά σχετικά ισχυρά ή μέτρια οδοστρώματα ($D_0(\text{TSD})$ έως $150\text{-}200 \mu\text{m}$) προτείνεται η μέθοδος Chai, καθώς τα $D_0(\text{FWD})$ που δίνει συγκλίνουν με αυτά της καμπύλης του Μ.Ο. και παράλληλα είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά. Ωστόσο, σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων όπου εμφανίζεται μεγαλύτερο εύρος τιμών $D_0(\text{TSD})$ (έως $400 \mu\text{m}$) ή που εμφανίζονται μόνο μεγαλύτερες τιμές $D_0(\text{TSD})$ (από 200 έως $400 \mu\text{m}$) συστήνεται η χρήση της μεθόδου Lee & Conaghan, καθώς για μεγάλα $D_0(\text{TSD})$ τα αποτελέσματα της φαίνεται να συγκλίνουν με αυτά της καμπύλης Μ.Ο. παραμένοντας ωστόσο μεγαλύτερα.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η σύγκριση και ο συσχετισμός των υφιστάμενων μεθόδων υπολογισμού SN_{eff} , που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 3.6.3, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκριμένα, από τη συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων Rohde (Rohde, 1994) και Louisiana (Zihan, et al., 2018) θα μπορούσε να αναδειχθεί ποια από τις δύο μεθόδους είναι καταλληλότερη προκειμένου να αξιολογηθεί η δομική επάρκεια του οδοστρώματος, αλλά και να προσδιοριστεί η τυχόν απαιτούμενη επίστρωση.

Επιπλέον, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων παραγωγής ελαστικών υποχωρήσεων του TSD, όπως για παράδειγμα η μέθοδος AUTC με τη μέθοδο Pedersen (Pedersen, et al.,

2013) η οποία συνυπολογίζει και τις μετρήσεις των αισθητήρων τεχνολογίας Doppler που βρίσκονται πίσω από το κινούμενο διπλό τροχό.

Τέλος, στην περίπτωση διαθέσιμων μετρήσεων πεδίου από συστήματα FWD και TSD στον ίδιο οδικό άξονα, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι συσχέτισης των κεντρικών αλλά και άλλων ελαστικών υποχωρήσεων, όπως για παράδειγμα είναι οι D_{900} . Έτσι, θα μπορούσε να διαμορφωθεί κατάλληλος πίνακας δομικής κατάταξης της στρώσης έδρασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σύμφωνα με τον αντίστοιχο του FWD (Πίνακας 2.9).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO, 1993. *The Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aavik, A. & Talvik, O., 2008. *Use of Falling Weight Deflectometer (FWD) measurement data for pavement structural evaluation and repair design*. Lithuania, The 7th international conference Environmental Engineering.
- Alavi, S., LeCates, J. F. & Tavares, M. P., 2008. *Falling Weight Deflectometer Usage*. Washington: Transportation Research Board.
- Baltzer, S. et al., 2010. *Continuous bearing capacity profile of 18,000 km Australian road network in 5 months*. Melbourne, ARRB Group.
- Belt, R., Morrison, T. & Weave, E., 2006. *Long-Term Pavement Performance Program*, McLean: Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Bodin, D., Zhalehjoo, N. & Garton, D., 2019. *Improved Methods of Using Pavement Deflection Data in the Design of Rehabilitation Treatments*, Sydney: Austroads.
- Březina, I., Stryk, J. & Grošek, J., 2017. *Using traffic speed deflectometer to measure deflections and evaluate bearing capacity of asphalt road pavements at network level*. Brno, IOP Publishing.
- Chai, G. et al., 2016. Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model. *Transportation Research Procedia*, Volume 14, pp. 3031-3039.
- Chatti, K. et al., 2017. *Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic*, McLean: Federal Highway Administration.
- Dynatest, 2012. *Dynatest*. [Online]
Available at: <https://00b47f99-cdb8-41b0-aecc-91e9a59dba4c.filesusr.com/ugd/bc00d57992db52c644dd92610b5ecc16810a.pdf>
[Accessed 16 10 2020].
- Dynatest, 2020. *Dynatest*. [Online]
Available at: http://files.eltronic.dk/dynatest/Website/8012FastFWD_EU.pdf
[Accessed 27 4 2020].
- Dynatest, 2020. *Dynatest*. [Online]
Available at: http://files.eltronic.dk/dynatest/Website/8000FWD_US.pdf
[Accessed 27 4 2020].
- Elbaglati, O., Mousa, M. R., Elseifi, M. A. & Gaspard, K., 2018. Development of a Methodology to Backcalculate Pavement Layer Moduli Using the Traffic Speed Deflectometer. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(5), pp. 377-385.

- Elseifi, M. A. & Zihan, Z. U. A., 2018. *Assessment of the Traffic Speed Deflectometer in Louisiana for Pavement Structural Evaluation*, Baton Rouge: Louisiana Transportation Research Center.
- FEHRL, 1996. *Harmonisation of the Use of the Falling Weight Deflectometer on Pavements (Part 1)*, Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- Graczyk, M., Zofka, A., Sudyka, J. & Rafa, J., 2014. *Analytical solution of pavement deflections and its application to the TSD measurements*. Sydney, ARRB Group Ltd.
- Greenwood Engineering, 2018. *Greenwood Engineering*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://q9n2g8h4.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2020/05/Brochure-TSD-2018-01.pdf>
[Πρόσβαση 23 5 2020].
- Greenwood Engineering, n.d. *Greenwood Engineering*. [Online]
Available at: <https://greenwood.dk/tsd.php>
[Accessed 23 3 2020].
- Greenwood Engineering, n.d. *Greenwood Engineering*. [Online]
Available at: <https://greenwood.dk/road/tsd/references/>
[Accessed 23 5 2020].
- Hakim, B. & Brown, S., 2006. *Pavement Analysis Using the FWD: Practical Difficulties and Proposed Simplifications*. Quebec, Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements.
- Hildebrand, G. & Rasmussen, S., 2002. *Development of a High Speed Deflectograph*, Roskilde: Road Directorate, Danish Road Institute.
- Hoffman, M. S., 1983. Loading Mode Effects on Pavement Deflections. *Transportation Engineering*, Volume 109, pp. 651-668.
- Horak, E. & Emery, S., 2009. *Evaluation of airport pavements with FWD deflection bowl parameter benchmarking methodology*. Amsterdam, 2nd European Airport Pavement Workshop.
- Jansen, D. & Podolski, C., 2019. *Multifunctional assessment tool for the structural evaluation and the design of pavements*, Bergisch Gladbach: Federal Highway Research Institute (BAST).
- Katicha, S., Flintsch, G., Shrestha, S. & Thyagaraja, S., 2017. *Demonstration of Network Level Pavement Structural Evaluation with Traffic Speed Deflectometer in Georgia*, Virginia: Virginia Tech Transportation Institute .
- Krarup, J., 2012. *FWD USER'S GROUP*. Sacramento, Greenwood Engineering.
- Krarup, J., Rasmussen, S., Aagaard, L. & Hjorth, P. G., 2006. *Output from the Greenwood traffic speed deflectometer*. Canberra, ARRB.

- Manoharan, S., Chai, G. & Chowdhury, S., 2018. A Study of the Structural Performance of Flexible Pavements Using Traffic Speed Deflectometer. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(3), pp. 1280-1289.
- Muller, W. B. & Roberts, J., 2013. Revised approach to assessing traffic speed deflectometer data and field validation of deflection bowl predictions. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(4), pp. 388-402.
- Nasimifar, M., Chaudhari, S., Thyagarajan, S. & Sivaneswaran, N., 2018. Temperature adjustment of Surface Curvature Index from Traffic Speed Deflectometer measurements. *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-11.
- Nasimifar, M., Thyagarajan, S., Chaudhari, S. & Sivaneswaran, N., 2019. Pavement Structural Capacity from Traffic Speed Deflectometer for Network Level Pavement Management System Application. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(2), pp. 456-465.
- Nasimifar, M., Thyagarajan, S. & Sivaneswaran, N., 2017. Backcalculation of Flexible Pavement Layer Moduli from Traffic Speed Deflectometer Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2641(1), pp. 66-74.
- National Roads Authority, 2000. *Guidelines for the use of the Falling Weight Deflectometer in Ireland*, Dublin : Transport Infrastructure Ireland (TII).
- PaveTesting, 2019. *PaveTesting*. [Online]
Available at: <https://pavetesting.com/pavefwdvehicle/>
[Accessed 13 10 2020].
- Pedersen, L., Hjorth, P. G. & Knudsen, K., 2013. *Viscoelastic Modelling of Road Deflections for use with the Traffic Speed Deflectometer*, Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark.
- Pennsylvania Department of Transportation, 2020. *PENNDOT*. [Online]
Available at:
<https://www.penndot.gov/ProjectAndPrograms/ResearchandTesting/RoadwayManagementandTesting/Documents/Falling%20Weight%20Deflectometer.pdf>
[Accessed 14 10 2020].
- Pierce, L. M. et al., 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for*, McLean: Federal Highway Administration.
- Rasmussen, S., Aagaard, L., Baltzer, S. & Krarup, J., 2008. *A comparison of two years of network level measurements with the Traffic Speed Deflectometer*. Ljubljana , Transport Research Arena (TRA).
- Roguin, A., 2002. Christian Johann Doppler: the man behind the effect. *The British Journal of Radiology*, 75(895), pp. 615-619.

- Rohde, G. T., 1994. Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Issue 1448, pp. 61-68.
- Shrestha, S., Katicha, S. W., Flintsch, G. W. & Thyagarajan, S., 2018. Application of Traffic Speed Deflectometer for Network-Level Pavement Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(40), pp. 348-359.
- Smith, K. D. et al., 2017. *Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report*, McLean: Federal Highway Administration.
- Tonkin & Taylor Ltd, 1998. *Pavement Deflection measurement & interpretation for the design of rehabilitation treatments*, Auckland: Transit New Zealand .
- Tutumluer, E., Pekcan, O. & Ghaboussi, J., 2009. *Nondestructive Pavement Evaluation Using Finite Element Analysis Based Soft Computing Models* , West Lafayette: NEXTRANS center.
- Varela, F. & Pacheco-Torres, R., 2019. *Asset management innovation for rigid pavements*. Petaling Jaya, IOP Publishing .
- Wikipedia, 2020. *Wikipedia*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Bundesautobahn_81
[Accessed 2 10 2020].
- Wikipedia, 2020. *Wikipedia*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_autobahns_in_Germany#A_80_to_A_89
[Accessed 2 10 2020].
- Wix, R., Murnane, C. & Moffatt, M., 2016. Experience Gained Investigating, Acquiring and Operating the First Traffic Speed Deflectometer in Australia. *Transportation Research Procedia*, Volume 14, pp. 3060-3069.
- Zihan, Z. U. A., Elseifi, M. A., Gaspard, K. & Zhang, Z., 2018. Development of a Structural Capacity Prediction Model Based on Traffic Speed Deflectometer Measurements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(40), pp. 315-325.
- Zofka, A. et al., 2014. Alternative Approach for Interpreting Traffic Speed Deflectometer Results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2457(1), pp. 12-18.
- Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή, 2020. *Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων*. Αθήνα: ΕΜΠ.