



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥΣ



ΚΥΡΙΑΚΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΑ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Χ. Πλατή, Αν. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κυρία Χριστίνα Πλατή, επιβλέπουσα καθηγήτρια της παρούσας εργασίας για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της εργασίας, αλλά και για την οργάνωση, καθοδήγηση και συνολική επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Αγγελική Αρμένη, επιστημονική συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας για την πολύτιμη βοήθειά της, τις συμβουλές της και το γενικότερο ενδιαφέρον της για την πορεία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για τη στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών.

Κυριακού Χαραλαμπία,

Αθήνα, 01/11/2021,

ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συγκριτική διερεύνηση δύο μεθόδων σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, της μεθόδου “AASHTO93” και της μεθόδου MnPCC-ME. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μελέτη των βασικών αρχών και παραδοχών που ακολουθούν οι δύο μέθοδοι και των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν τη διαδικασία υπολογισμού του πάχους της πλάκας σκυροδέματος ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος. Στη συνέχεια, εντοπίστηκαν οι ομοιότητες και οι διαφορές, όσον αφορά στις βασικές αρχές, τις θεωρήσεις και τις παραμέτρους εισόδου σχεδιασμού, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκριτική αξιολόγησή τους. Επίσης, διενεργήθηκε διαστασιολόγηση διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος με τη χρήση και των δύο μεθόδων, ώστε να σχολιαστούν τα συγκριτικά αποτελέσματα. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εν λόγω διερευνητική προσέγγιση.

Λέξεις κλειδιά: Δύσκαμπτα οδοστρώματα, Διαστασιολόγηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, Μέθοδος “AASHTO93”, Μέθοδος MnPCC-ME

ABSTRACT

In the present diploma thesis, a comparative research is conducted about two different methods for thickness design of rigid pavements, “AASHTO93” and MnPCC-ME. For this purpose, the basic principles and the admissions have been detected and investigated, and also the parameters that have a significant impact on the calculation procedure of concrete slab thickness in rigid pavements. A detection of the similarities and disparities followed, concerning the basic principles, the admissions and the design inputs of these two methods, in order to carry out the comparative evaluation. In addition to this, a rigid pavement design has been implemented using both methods, in order to comment the comparative results. This diploma thesis was completed with the results and the conclusions drawn from the above investigative approach.

Key words: Rigid pavements, Rigid thickness design, “AASHTO93”, MnPCC-ME

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Αντικείμενο.....	13
1.2 Στόχος – Μεθοδολογία.....	13
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας	14
2.ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	15
2.1 Γενικά	15
2.2 Χρήση και κατηγορίες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	16
2.3 Στρώσεις δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	20
2.3.1 Πλάκα σκυροδέματος	21
2.3.2 Στρώση Βάσης/Υπόβασης.....	24
2.3.3 Υπέδαφος	26
2.3.4 Κατασκευαστικά στοιχεία δύσκαμπτου οδοστρώματος	27
2.4 Καταπόνηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	29
2.4.1 Ανάπτυξη τάσεων.....	29
2.4.2 Μορφές φθοράς/αστοχίας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	34
2.5 Σχεδιασμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	38
2.5.1 Ιστορική εξέλιξη.....	38
2.5.2 Μέθοδοι διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	39
3.ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ AASHTO93.....	41
3.1 Γενικά	41
3.2 Οδικό Πείραμα AASHO	42
3.2.1 Χαρακτηριστικά	42
3.2.2 Πληροφορίες οδικού πειράματος AASHO.....	44
3.2.3 Περιορισμοί και υποθέσεις οδικού πειράματος AASHO.....	48
3.3 Παράμετροι σχεδιασμού	49
3.3.1 Περίοδος σχεδιασμού οδοστρώματος	50
3.3.2 Κυκλοφοριακός φόρτος – Ισοδύναμοι τυπικοί άξονες W_{18}	50
3.3.3 Αξιοπιστία R.....	51
3.3.4 Απώλεια εξυπηρετικότητας οδοστρώματος.....	52

3.3.5 Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος E_c	54
3.3.6 Μέτρο θραύσης σκυροδέματος Sc	54
3.3.7 Ενεργό μέτρο αντίδρασης εδάφους k	54
3.3.8 Συντελεστής μεταφοράς φορτίου J	57
3.3.9 Συντελεστής αποστράγγισης C_d	58
3.4 Διαδικασία διαστασιολόγησης.....	59
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ MnPCC-ME	63
4.1 Γενικά	63
4.2 Ανάπτυξη της μεθόδου MnPCC-ME.....	64
4.2.1 Ιστορικά στοιχεία	64
4.2.2 Χρήση μεθόδου MEPDG.....	66
4.2.3 Κλιματικές παράμετροι και ωριαία κλιματολογικά δεδομένα.....	73
4.2.4 Κυκλοφοριακές παράμετροι και προσαρμογή δεδομένων κυκλοφορίας...76	
4.2.5 Τρόπος ανάπτυξης βάσης δεδομένων.....	81
4.3 Επιλογή ειδικών παραμέτρων.....	83
4.3.1 Ανάλυση αξιοπιστίας	83
4.3.2 Υπολογισμός εγκάρσιας ρηγμάτωσης και φθοράς	85
4.3.3 Κριτήρια αποδοτικότητας	86
4.4 Λογισμικό MnPAVE Rigid	87
4.4.1 Ανάπτυξη και μεταβολές λογισμικού.....	87
4.4.2 Δεδομένα εισόδου	89
5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	92
5.1 Γενικά	92
5.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών μεθόδων	92
5.3 Πειραματικές αναλύσεις.....	95
5.3.1 Περιγραφή δεδομένων.....	95
5.3.2 Υπολογισμός διατομής με τη μέθοδο “AASHTO93”	96
5.3.3 Υπολογισμός διατομής με τη μέθοδο MnPCC-ME	101
5.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	104
6. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	108

EYPETHPIO EIKONON

Εικόνα 2.1 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος.....	15
Εικόνα 2.2 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε δάπεδα διοδίων.....	16
Εικόνα 2.3 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε δάπεδα στάθμευσης αεροδρομίων.....	17
Εικόνα 2.4 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε αυτοκινητόδρομο.....	17
Εικόνα 2.5 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε λιμενικά έργα.....	17
Εικόνα 2.6 Διατομή οδοστρώματος από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς χωρίς βλήτρα	19
Εικόνα 2.7 Διατομή οδοστρώματος από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς ενισχυμένους με βλήτρα.....	19
Εικόνα 2.8 Διατομή οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς	19
Εικόνα 2.9 Διατομή οδοστρώματος από σκυρόδεμα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό	19
Εικόνα 2.10 Διατομή οδοστρώματος από προεντεταμένο σκυρόδεμα	19
Εικόνα 2.11 Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (JPCP).....	20
Εικόνα 2.12 Στρώσεις δύσκαμπτου οδοστρώματος	21
Εικόνα 2.13 Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος (c: θλίψη, t: εφελκυσμός).....	21
Εικόνα 2.14 Συστολή σκυροδέματος	24
Εικόνα 2.15 Τυπικό παράδειγμα αποστράγγισης δύσκαμπτου οδοστρώματος	26
Εικόνα 2.16 Τυπικά είδη αρμών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	27
Εικόνα 2.17 Παραδείγματα αρμών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	28
Εικόνα 2.18 Βλήτρα σε δύσκαμπα οδοστρώματα	28
Εικόνα 2.19 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων σε δύσκαμπτο οδόστρωμα	29
Εικόνα 2.20 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard.....	31
Εικόνα 2.21 Επίδραση του λόγου E_1/E_2 στις κατακόρυφες τάσεις σ_z σε σύστημα δύο ελαστικών επάλληλων στρώσεων (Burmister)	32
Εικόνα 2.22 Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους πλάκας σκυροδέματος	33
Εικόνα 2.23 Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας	33
Εικόνα 2.24 Μηχανισμός ανισοσταθμίας πλακών οδοστρώματος.....	34
Εικόνα 2.25 Παράδειγμα ανισοσταθμίας πλακών σε δύσκαμπτο οδόστρωμα	34
Εικόνα 2.26 Μηχανισμός εγκάρσιας ρηγμάτωσης οδοστρώματος	35
Εικόνα 2.27 Παράδειγμα εγκάρσιας ρηγμάτωσης σε δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	36
Εικόνα 2.28 Μηχανισμός ρηγμάτωσης άκρου οδοστρώματος	36
Εικόνα 2.29 Ρηγμάτωση άκρου σε δύσκαμπτο οδόστρωμα	36

Εικόνα 2.30 Μηχανισμός οριζόντιας ρηγμάτωσης οδοστρώματος	37
Εικόνα 2.31 Οριζόντια ρηγμάτωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	37
Εικόνα 2.32 Παράδειγμα αποφλοώσης σκυροδέματος σε δύσκαμπτο οδόστρωμα .37	
Εικόνα 3.1 Οδικό πείραμα AASHO, Illinois	42
Εικόνα 3.2 Διαμόρφωση βρόχων 5 και 6 πειράματος AASHTO [Highway Research Board, 1961].....	43
Εικόνα 3.3 Χάρτης πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1962]	43
Εικόνα 3.4 Φορτία και κατανομή αξόνων κυκλοφορίας του πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1961].....	44
Εικόνα 3.5 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1962].....	44
Εικόνα 3.6 Καμπύλη συμπεριφοράς οδοστρώματος [Λοΐζος & Πλατή, 2020]	45
Εικόνα 3.7 Βαθμολογία παρούσας εξυπηρευτικότητας PSR (“Present Serviceability Rating”).....	46
Εικόνα 3.8 Υπολογισμός SV (“Slope Variance”).....	46
Εικόνα 3.9 Επιφάνειες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που εμφανίζουν ρηγματώσεις-Παράγοντας C του δείκτη PSI	47
Εικόνα 3.10 Τοπικές επισκευές (μπαλώματα)-Παράγοντας P του δείκτη PSI	47
Εικόνα 3.11 Επισκευή πλήρους βάθους-Παράγοντας P του δείκτη PSI	47
Εικόνα 3.12 Χρήση Δείκτη Παρούσας Λειτουργικότητας για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων [Hveem & Carmany, 1948]	48
Εικόνα 3.13 Απώλεια εξυπηρευτικότητας οδοστρώματος σε συνάρτηση με χρόνο κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	53
Εικόνα 3.14 Υπολογισμός σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{∞} σε περίπτωση που υφίσταται στρώση υπόβασης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	55
Εικόνα 3.15 Υπολογισμός διορθωμένου μέτρου αντίδρασης εδάφους k , λόγω ύπαρξης βράχου σε απόσταση μικρότερη από 10ft. κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	55
Εικόνα 3.16 Διόρθωση μέτρου αντίδρασης εδάφους k λόγω απώλειας στήριξης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	57
Εικόνα 3.17 Προσδιορισμός απόδοσης μεταφοράς φορτίου με βάση τη παραμόρφωση [NHI, 2001].....	58
Εικόνα 3.18α Διάγραμμα προσδιορισμού πάχους πλάκας σκυροδέματος D (συνέχεια στο 3.18β).....	61
Εικόνα 3.18β Διάγραμμα προσδιορισμού πάχους πλάκας σκυροδέματος D (συνέχεια από 3.18α).....	62
Εικόνα 4.1 Τυπικές σχεδιαστικές τιμές MnDOT για στρώση βάσης και υπόβασης [Velasquez & Hoegh, 2009].....	71

Εικόνα 4.2 Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO.....	72
Εικόνα 4.3 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων σκυροδέματος λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009].....	72
Εικόνα 4.4 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων διατομής οδοστρώματος λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009].....	73
Εικόνα 4.5 Οθόνη εισαγωγής κλιματικών δεδομένων λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009]	74
Εικόνα 4.6 Κατανομή κλιματικών περιοχών Μινεσότας	75
Εικόνα 4.7 Σύστημα μέτρησης κυκλοφορίας WIM σε δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	76
Εικόνα 4.8 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων κυκλοφορίας λογισμικού MEPDG [Velasquez, 2009].....	78
Εικόνα 4.9 Μηνιαίοι και ωριαίοι συντελεστές προσαρμογής φόρτου κυκλοφορίας λογισμικού MEPDG [Velasquez, 2009].....	79
Εικόνα 4.10 Προσαρμογή φόρτου κυκλοφορίας με βάση την κατηγορία οχήματος λογισμικού MEPDG [Velasquez, 2009].....	79
Εικόνα 4.11 Χάρτης σταθμών WIM της Μινεσότα και μετρήσεις οχημάτων σταθμού WIM 26 [Tompkins & Khazanovich, 2014]	80
Εικόνα 4.12 Παράδειγμα αναφοράς κυκλοφορίας του MnDOT	81
Εικόνα 4.13 Παραγοντικό μεταβλητών παραμέτρων εισόδου JPCP έργων.....	82
Εικόνα 4.14 Απόσπασμα βάσης δεδομένων έργων JPCP της διαδικασίας MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]	83
Εικόνα 4.15 Αλλαγές παραμέτρων εισόδου βάσης δεδομένων διαδικασίας MnPCC-ME στο λογισμικό MEPDG [Tompkins, 2018].....	87
Εικόνα 4.16 Αλλαγές κριτηρίων αποδοτικότητας με βάση την τοποθεσία και τον κυκλοφοριακό φόρτο [Tompkins, 2018]	88
Εικόνα 4.17 Νέα κριτήρια αξιοπιστίας για περιοχές Metro και non-Metro [Tompkins, 2018].....	88
Εικόνα 4.18 Περιβάλλον λογισμικού MnPAVE Rigid Version 3.0.....	89
Εικόνα 5.1 Υπολογισμός σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{∞}	97
Εικόνα 5.2 Υπολογισμός διορθωμένου μέτρου αντίδρασης εδάφους k' λόγω απώλειας στήριξης LS.....	97
Εικόνα 5.3α Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος με τη μέθοδο AASHTO93 (συνέχεια στο 5.3β).....	99
Εικόνα 5.3β Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος με τη μέθοδο AASHTO93 (συνέχεια από 5.3α).....	100
Εικόνα 5.4 Διατομή σχεδιασμού οδοστρώματος με τη μέθοδο AASHTO93.....	100

Εικόνα 5.5 Κατανομή κυκλοφορίας οχημάτων “MnDOT Average” λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0.....	101
Εικόνα 5.6 Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος οδοστρώματος σταθμού διοδίων με τη χρήση του λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0	102
Εικόνα 5.7 Σύνοψη δεδομένων και αποτελεσμάτων σχεδιασμού του λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0.....	103
Εικόνα 5.8 Διατομή σχεδιασμού οδοστρώματος με τη μέθοδο MnPCC-ME	103
Εικόνα 5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα διατομών σχεδιασμού των δύο μεθόδων διαστασιολόγησης	104

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες σκυροδέματος [ΚΤΣ,1997]	22
Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές μέτρου αντίδρασης υπεδάφους k [Yoder & Witczak,1975]	26
Πίνακας 3.1 Καιρικές συνθήκες πειράματος AASHO [Highway Research Board,1961]	42
Πίνακας 3.2 Περίοδοι σχεδιασμού ανά κατηγορία οδού κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	50
Πίνακας 3.3 Ποσοστό κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης με βάση τον αριθμό λωρίδων κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	51
Πίνακας 3.4 Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας για διάφορες κατηγορίες οδών κατά AASHTO93 [AASHTO,1993].....	52
Πίνακας 3.5 Ενδεικτικές τιμές συντελεστή LS για διάφορους τύπους υλικού κατά AASHTO93 [AASHTO,1993].....	56
Πίνακας 3.6 Ποιότητα αποστράγγισης σε συνάρτηση με τον χρόνο απομάκρυνσης νερού κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	59
Πίνακας 3.7 Προτεινόμενες τιμές συντελεστών αποστράγγισης Cd σχετικές με την ποιότητα αποστράγγισης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993].....	59
Πίνακας 4.1 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	69
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά στρώσης σκυροδέματος MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	69
Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά στρώσης βάσης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	69
Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά στρώσης υπόβασης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	70
Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά στρώσης έδρασης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	70
Πίνακας 4.6 Διάμετρος βλήτρων σύμφωνα με το MnDOT [Tompkins & Khazanovich, 2014].....	70
Πίνακας 4.7 Περιοχές κλιματικών αρχείων Μινεσότας [Tompkins & Khazanovich, 2014]	75
Πίνακας 4.8 Κατηγορίες βαρέων οχημάτων σύμφωνα με το MnDOT.....	79
Πίνακας 4.9 Προσδιορισμός τιμών παραγοντικού συνολικού αριθμού έργων JPCP βάσης δεδομένων μεθόδου MnPCC-ME [Velasquez & Huegh, 2009].....	82

Πίνακας 4.10 Σύνοψη στατιστικής ανάλυσης σε δοκιμές παχών πλάκας σκυροδέματος για την εύρεση του COV πάχους πλάκας [Tomprkins & Khazanovich, 2014]	85
Πίνακας 4.11 Σύνοψη στατιστικής ανάλυσης σε δοκιμές θραύσης δοκών για την εύρεση του COV μέτρου θραύσης [Tomprkins & Khazanovich, 2014].....	85
Πίνακας 4.12 Κριτήρια αποδοτικότητας μεθόδου MnPCC-ME με βάση τα συνολικά οχήματα και την τοποθεσία του έργου [Tomprkins & Khazanovich, 2014].....	86
Πίνακας 4.13 Κυκλοφοριακός συντελεστής λωρίδας σχεδιασμού [Tomprkins, 2018].	88
Πίνακας 5.1 Σύγκριση βασικών αρχών-παραδοχών μεθόδων	94
Πίνακας 5.2 Κατηγορίες και ποσοστά βαρέων οχημάτων εφαρμογής μεθόδων.....	96
Πίνακας 5.3 Διαδικασία υπολογισμού ισοδύναμων τυπικών αξόνων 1 ^{ου} έτους.....	98

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Για τη δημιουργία μίας οδού, καθίσταται απαραίτητη η κατασκευή οδοστρώματος, καθώς το φυσικό έδαφος δεν είναι ικανό να φέρει τα φορτία της κυκλοφορίας χωρίς να παραμορφωθεί σημαντικά. Το οδόστρωμα αποτελείται από μία ή περισσότερες επάλληλες στρώσεις, υλικού ανώτερης ποιότητας, οι οποίες έχουν ως κύριο σκοπό να μεταβιβάσουν στο έδαφος αρκετά μειωμένες τις τάσεις που προκαλούνται από τα οχήματα, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν προστασία από τις καιρικές συνθήκες (βροχή, παγετός κλπ.).

Γενικά, οι τύποι των οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται είναι τρεις: εύκαμπτα, δύσκαμπτα και ημιάκαμπτα ή ημιεύκαμπτα. Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων συνίσταται στον καθορισμό των παχών και των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και αποτελεί ένα σύνθετο μηχανικό πρόβλημα. Τα οδοστρώματα υπόκεινται σε ένα μεγάλο φάσμα φορτίσεων και κλιματικών συνθηκών, γεγονός που καθιστά απαραίτητο το συσχετισμό όλων αυτών των μεταβλητών που επιδρούν στο σχεδιασμό. Αυτή η διαδικασία δεν είναι τόσο εύκολη, λόγω της δυσκολίας της ποσοτικοποίησης αυτών των μεταβλητών, οι οποίες συνήθως είναι το μέγεθος και το είδος των φορτίων, η κυκλοφορία τους, η συγκέντρωση της κυκλοφορίας σε μεμονωμένες περιοχές, οι συνθήκες του περιβάλλοντος και η αντοχή και η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη δομή του οδοστρώματος. Με δεδομένο ότι δεν υπήρχε ακριβής λύση για τις απαιτήσεις σχεδιασμού, ιστορικά, οι μηχανικοί οδοστρωμάτων οδηγήθηκαν, είτε σε αναλυτικές μεθόδους σχετικά με τη μετάδοση των φορτίων στο οδόστρωμα και στα εδάφη, είτε σε ημιεμπειρικές και εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε αναλύσεις πειραματικών δοκιμών και σε μελέτες συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

1.2 Στόχος – Μεθοδολογία

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται σημαντική ανάπτυξη μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Μία τέτοια μέθοδος είναι η MnPCC-ME [Tompkins et al, 2015]. Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της υπόψη μεθόδου σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο “AASHTO93” [AASHTO, 1993], προκειμένου να προκύψουν συμπεράσματα για την αποδοτικότητα και την ευχρηστία των δύο μεθόδων συγκριτικά. Η μεθοδολογία, η οποία ακολουθείται διαμορφώνεται από τρία στάδια:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των δύο μεθόδων σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.
2. Θεωρητική σύγκριση των ομοιοτήτων και διαφορών των χαρακτηριστικών τους.
3. Πειραματική ανάλυση διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος και με τις δύο μεθόδους.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Σε συνέχεια του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου, η διπλωματική εργασία διαμορφώνεται ως εξής:

- Στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία γενική περιγραφή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Αναφέρονται, κυρίως, οι εφαρμογές τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, οι τύποι δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, οι στρώσεις από τις οποίες αποτελούνται, οι μορφές αστοχίας, ορισμένα κατασκευαστικά στοιχεία τους και τέλος, οι μέθοδοι σχεδιασμού που εφαρμόζονται για τη διαστασιολόγησή τους.
- Στο 3^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών αρχών της εμπειρικής μεθόδου “AASHTO93” για τον σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και αναφέρεται η διαδικασία εφαρμογής της.
- Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών αρχών της μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου MnPCC-ME για τον σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και περιγράφεται το λογισμικό της, MnPAVE Rigid.
- Στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων σχεδιασμού, κατά την οποία επισημαίνονται οι ομοιότητες και οι διαφορές τους και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των παχών πλάκας σκυροδέματος που προκύπτουν από την εφαρμογή τους.
- Στο 6^ο κεφάλαιο διατυπώνονται συγκεντρωτικά τα σχόλια και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση και τη σύγκριση των αρχών και των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων σχεδιασμού.

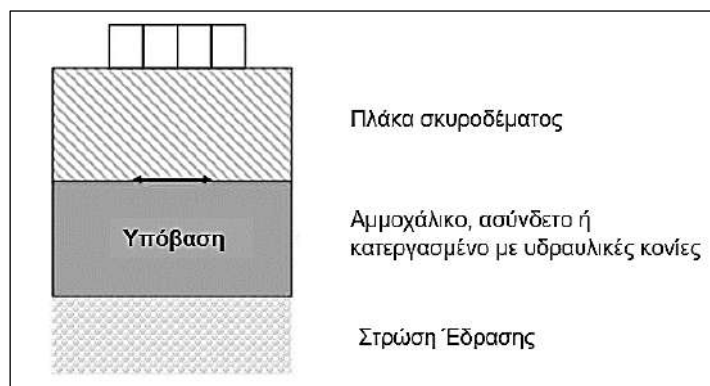
2. ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.1 Γενικά

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα κατασκευάζονται από σκυρόδεμα σιμέντου Portland (“Portland Cement Concrete”, PCC), γι’ αυτό συχνά ονομάζονται οδοστρώματα από σκυρόδεμα. Συνήθως, περιλαμβάνουν μία στρώση υπόβασης ανάμεσα στη πλάκα σκυροδέματος και στο υπέδαφος.

Καθώς η δυσκαμψία της πλάκας σκυροδέματος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του υλικού θεμελίωσης, το εφαρμοζόμενο φορτίο τείνει να κατανέμεται σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή του εδάφους, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της φέρουσας ικανότητας να παρέχεται από την ίδια τη πλάκα και να μην υπάρχει ανάγκη μεγάλου αριθμού στρώσεων. Έτσι, ο κυριότερος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η αντοχή του σκυροδέματος, ενώ μικρές μεταβολές στην αντοχή του υπεδάφους ή της υπόβασης δεν επιδρούν σημαντικά στη φέρουσα αντοχή του οδοστρώματος [Yoder & Witczak, 1975].

Οι στρώσεις υπόβασης κατασκευάζονται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή συνηθέστερα κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο, με σκοπό κυρίως την ομοιόμορφη έδραση της πλάκας, αλλά και τη μείωση των υποχωρήσεων που αναπτύσσονται σε αυτή. Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται μία τυπική διατομή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος.



Εικόνα 2.1 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος

Η βασική λειτουργία των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η μείωση και η κατανομή του κυκλοφοριακού φόρτου, προκειμένου να μην καταστρέφεται το υπέδαφος.

Για να γίνει αυτό, απαιτούνται ορισμένες βασικές προϋποθέσεις. Για παράδειγμα, θα πρέπει το πάχος του οδοστρώματος να είναι τόσο, ώστε τα φορτία της κυκλοφορίας

να μεταβιβάζονται μειωμένα στο υπέδαφος και να εξασφαλίζεται προστασία από την επίδραση του παγετού. Επιπρόσθετα, θα πρέπει το οδόστρωμα να είναι επαρκώς ικανό να φέρει την επιβαλλόμενη φόρτιση που οφείλεται στον κυκλοφοριακό φόρτο, αλλά και το υλικό του να είναι αδιαπέρατο, όσον αφορά στην εισχώρηση του νερού της επιφάνειας, το οποίο έχει την ικανότητα να αποδυναμώσει το υπέδαφος και συνεπώς το οδόστρωμα [Jain, 2016].

2.2 Χρήση και κατηγορίες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα είναι μία σύγχρονη λύση κατασκευής υψηλής αντοχής. Για αυτόν τον λόγο, η χρήση τους επιλέγεται σε περιπτώσεις, κατά τις οποίες τα επιβαλλόμενα φορτία είναι στατικά και οι καταπονήσεις είναι σημαντικά μεγάλες. Οι υποδομές, οι οποίες απαιτούν τη χρήση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι συνήθως οι σταθμοί διοδίων, τα αεροδρόμια, τα λιμενικά έργα και τα έργα οδοποιίας. Στη περίπτωση των έργων οδοποιίας, η εφαρμογή τους ενδείκνυται σε οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο, τα οποία εδράζονται σε ευπαθή εδάφη και παρουσιάζουν συχνά φαινόμενα καθιζήσεων και παραμορφώσεων.

Στην Ελλάδα δεν είναι τόσο διαδεδομένη η χρήση τους και περιορίζεται κυρίως στους σταθμούς διοδίων και στα αεροδρόμια. Συγκεκριμένα, στα αεροδρόμια γίνεται χρήση τέτοιων οδοστρωμάτων σε δάπεδα στάθμευσης αεροσκαφών, σε δάπεδα αναμονής αεροσκαφών στα άκρα των διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης και σε δάπεδα παράλληλων και ακραίων συνδετήριων τροχοδρόμων. Στις Εικόνες 2.2-2.5 παρουσιάζονται παραδείγματα χρήσης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.



Εικόνα 2.2 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε δάπεδα διοδίων



Εικόνα 2.3 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε δάπεδα στάθμευσης αεροδρομίων



Εικόνα 2.4 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε αυτοκινητόδρομο



Εικόνα 2.5 Δύσκαμπα οδοστρώματα σε λιμενικά έργα

Η χρήση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με άλλα είδη οδοστρωμάτων, όπως είναι τα εύκαμπτα και τα ημι-άκαμπτα ή ημιεύκαμπτα οδοστρώματα.

Ορισμένα πλεονεκτήματα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα είναι τα εξής [Jain, 2016 – Tinni, 2013]:

- μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 30 έτη),
- μειωμένο κόστος κύκλου ζωής και συντήρησης,
- ομαλή και μη ολισθηρή επιφάνεια με μεγάλη συνάφεια,

- καλύτερη ορατότητα τις βραδινές ώρες,
- μειωμένη επίδραση των καιρικών συνθηκών,
- χρήση αποβλήτων (προϊόντων καύσεων), όπως σκωρία υψικαμίνου, ιπτάμενη τέφρα κ.α.
- χαμηλότερη κατανάλωση πρώτης ύλης,
- υψηλή απόδοση όσον αφορά στην λειτουργικότητα,
- μείωση περιβαλλοντικών εκπομπών και μόλυνσης του αέρα,
- κατασκευή σε μικρής αντοχής εδάφη,
- μεγαλύτερη αντοχή στην τριβή λόγω της κυκλοφορίας και
- δυνατότητα ανακύκλωσης.

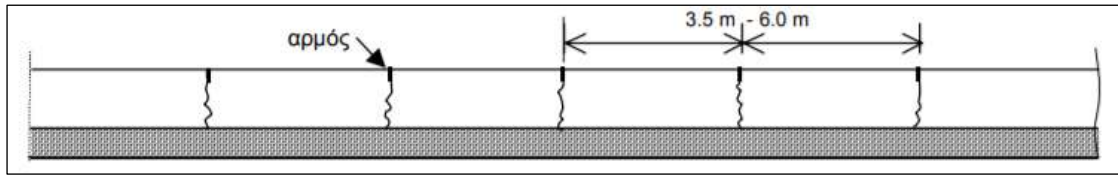
Ορισμένα μειονεκτήματα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα είναι τα παρακάτω [Tinni, 2013]:

- ρηγματώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και κακής ποιότητας εδάφους,
- ύπαρξη αρμών και διακοπή κυκλοφορίας κατά την επισκευή τους,
- απαίτηση επίστρωσης ασφάλτου λόγω του θορύβου που προκαλεί η διέλευση των βαρέων-εμπορικών οχημάτων,
- αυξημένο κόστος κατασκευής λόγω της απαίτησης εγκιβωτισμού,
- αναμονή για την ανάπτυξη απαραίτητης αντοχής του σκυροδέματος και
- αυξημένος χρόνος επισκευών.

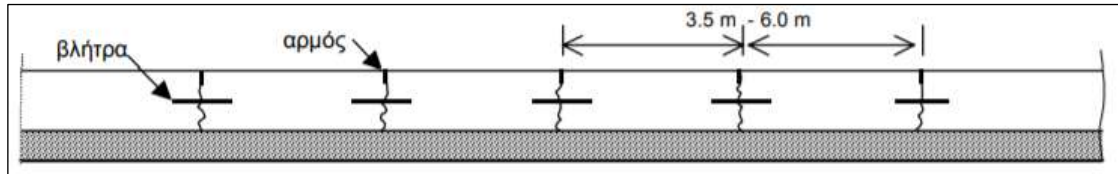
Οι βασικές κατηγορίες οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω [Λοΐζος & Πλατή, 2020]:

- οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς χωρίς βλήτρα (JPCP: “Jointed Plain Concrete Pavement”),
- οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς ενισχυμένους με βλήτρα (JPCP: “Jointed Plain Concrete Pavement”),
- οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς (JRCP: “Jointed Reinforced Concrete Pavement”),
- οδοστρώματα από σκυρόδεμα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό (CRCP: “Continuously Reinforced Concrete Pavement”),
- οδοστρώματα από προεντεταμένο σκυρόδεμα (PCP: “Prestressed Concrete Pavement”) και
- οδοστρώματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (η συμπύκνωση γίνεται με οδοστρωτήρες αντί της συμπύκνωσης με δονητές μάζας).

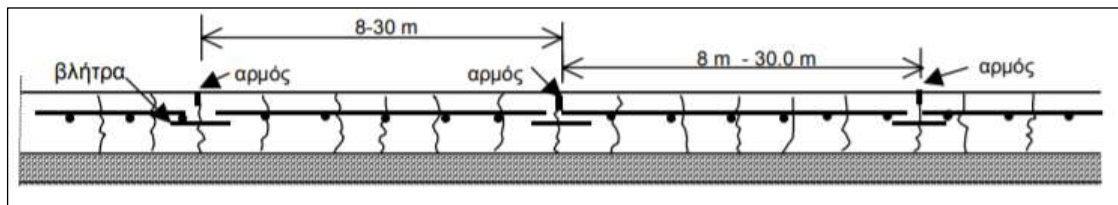
Στις Εικόνες 2.6-2.10 παρουσιάζονται οι παραπάνω τύποι δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.



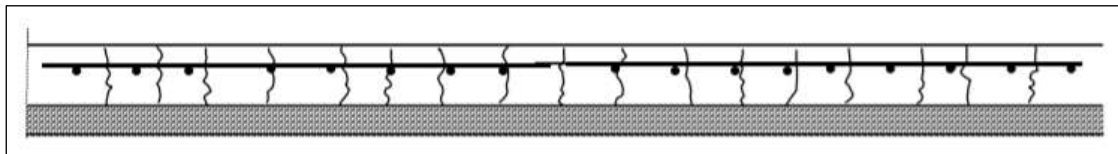
Εικόνα 2.6 Διατομή οδοστρώματος από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς χωρίς βλήτρα



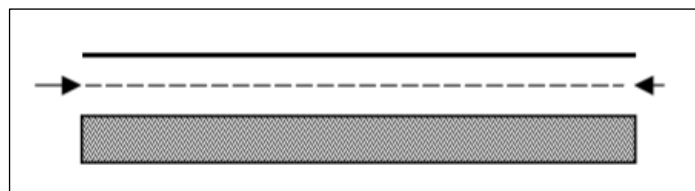
Εικόνα 2.7 Διατομή οδοστρώματος από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς ενισχυμένους με βλήτρα



Εικόνα 2.8 Διατομή οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς



Εικόνα 2.9 Διατομή οδοστρώματος από σκυρόδεμα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό



Εικόνα 2.10 Διατομή οδοστρώματος από προεντεταμένο σκυρόδεμα

Ο τύπος οδοστρώματος από σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ευρέως και είναι περισσότερο διαδεδομένος ανά τον κόσμο είναι τα οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς με ή χωρίς βλήτρα (“JPCP”) (βλ. Εικόνα 2.11), καθώς η χρήση τους χαρακτηρίζεται από χαμηλό αρχικό κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Επιπρόσθετα, οι αρχές υπολογισμού τους εφαρμόζονται, εκτός από κάποιες ελάχιστες περιπτώσεις, και σε άλλα είδη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στη συνέχεια της εργασίας αυτής, θα πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση του συγκεκριμένου τύπου οδοστρώματος, γι' αυτό το λόγο αξίζει να σημειωθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του. Αποτελείται από τετραγωνικές πλάκες σκυροδέματος που συνδέονται μεταξύ τους, είτε μόνο με αρμούς, είτε περιλαμβάνονται και βλήτρα, με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας ρηγματώσεων. Έτσι, η λεπτομέρεια στη διάταξη των αρμών είναι σημαντική για το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του οδοστρώματος.



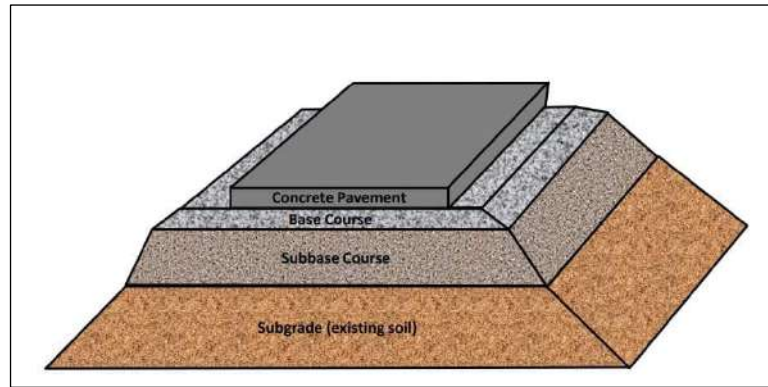
Εικόνα 2.11 Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (JPCP)

Η καλή λειτουργία των οδοστρωμάτων “JPCP” εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή και την αντοχή κάμψης του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται, ώστε να αποτρέπεται η ρηγματώση και να υπάρχει στήριξη έναντι των επιβαλλόμενων φορτίων. Η απόσταση των αρμών αυξάνεται, όσο αυξάνεται το πάχος της πλάκας και αντίστροφα, ενώ συνήθως προτιμάται η δημιουργία, όσο το δυνατόν τετράγωνων πλακών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Επιπλέον, συνίσταται η χρήση βλήτρων, καθώς σε αντίθετη περίπτωση περιορίζεται η ικανότητα των αρμών να πραγματοποιούν μετακινήσεις, με αποτέλεσμα να πρέπει να γίνει περαιτέρω αύξηση στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος, άρα και αύξηση του κόστους κατασκευής.

2.3 Στρώσεις δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Ένα οδόστρωμα είναι σημαντικό να αποτελείται από στρώσεις, οι οποίες να έχουν διαφορετική φέρουσα ικανότητα, αυξανόμενη από το έδαφος προς τα πάνω, ώστε να επιτυγχάνεται η απαραίτητη αντοχή με την οικονομικότερη λύση.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.12, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από μία πλάκα σκυροδέματος (“concrete slab”), συνήθως μπορούν να περιλαμβάνουν ή όχι μία στρώση βάσης (“base course”), μία στρώση υπόβασης (“subbase course”) και κατασκευάζονται πάνω από το υπέδαφος (“subgrade”).



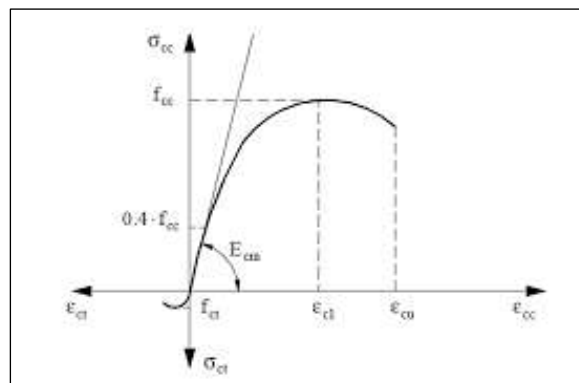
Εικόνα 2.12 Στρώσεις δύσκαμπτου οδοστρώματος

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι στρώσεις ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος και ορισμένα κατασκευαστικά στοιχεία που απαιτούνται για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του.

2.3.1 Πλάκα σκυροδέματος

Κύριο υλικό του δύσκαμπτου οδοστρώματος είναι το σκυρόδεμα, από το οποίο αποτελείται η πρώτη (άνω) στρώση, γεγονός που καθιστά σημαντική την αναφορά ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών του στοιχείων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρόκειται για ένα υλικό με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο αποτελείται από τσιμέντο, αδρανή υλικά, νερό και σε κάποιες περιπτώσεις χημικά ή φυσικά πρόσθετα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι του σκυροδέματος, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson, χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του στην φόρτιση που του επιβάλλεται [Κόλιας, 1998].

Είναι σημαντικό, λοιπόν, να γνωρίζουμε το διάγραμμα των αναπτυσσόμενων τάσεων-παραμορφώσεων κατά την επιβολή της φόρτισης, από το οποίο συμπεραίνεται πως το σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με την αντίστοιχη εφελκυστική του (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13 Τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος (c: θλίψη, t: εφελκυσμός)

Κατά την εφαρμογή του φορτίου, ο λόγος μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι κατά προσέγγιση γραμμικός στην αρχή, ενώ το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται σχεδόν ως ελαστικό υλικό, δηλαδή όταν αφαιρείται το φορτίο, αναιρείται και το σύνολο της παραμόρφωσης. Στο τέλος, η καμπύλη δεν είναι πλέον γραμμική και το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται όλο και περισσότερο ως πλαστικό υλικό. Σε περίπτωση που αφαιρεθεί το φορτίο εντός της πλαστικής περιοχής, η αναίρεση της παραμόρφωσης δεν θα είναι πλέον πλήρης και θα παραμείνει μία μόνιμη παραμόρφωση. Το ακριβές σχήμα της καμπύλης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια φόρτισης [Mosley et al., 2012].

Η αντοχή του σκυροδέματος, γενικά, αυξάνεται με την ηλικία του, γεγονός που εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται. Στις κατασκευές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων γίνεται χρήση τσιμέντου Portland. Υπολογίζεται με τη μέτρηση της αντοχής σε σύνθλιψη κύβων ή κυλίνδρων σκυροδέματος από συγκεκριμένο μίγμα. Τα δοκίμια αυτά αφήνονται να σκληρύνουν και ελέγχονται μετά από 28 ημέρες, σύμφωνα με τις καθιερωμένες διαδικασίες. Σκυρόδεμα δεδομένης αντοχής χαρακτηρίζεται από την κατηγορία του· για παράδειγμα, σκυρόδεμα κατηγορίας 25/30 έχει χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου 25N/mm² και χαρακτηριστική αντοχή κύβου 30N/mm². Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες σκυροδέματος, σύμφωνα με τον ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ).

Πίνακας 2.1 Κατηγορίες σκυροδέματος [ΚΤΣ,1997]

Κατηγορία αντοχής σε θλίψη	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου $f_{ck,cyl}$ N/mm ² (MPa)	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ N/mm ² (MPa)
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Η απαιτούμενη αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη σύμφωνα με τον ελληνικό ΚΤΣ, 1997 υπολογίζεται από τη σχέση 2.1:

$$f_a = f_{ck} + ks \quad (2.1)$$

όπου:

- f_a : απαιτούμενη αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη.
- f_{ck} : χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη. Θεωρείται αυτή η τιμή αντοχής, κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή ενός τυχαίου δοκιμίου.
- k : συντελεστής που συνδέεται με το ποσοστό των αστοχιών (σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς: $k = 0.25$).
- s : τυπική απόκλιση συμβατικών αντοχών ενός αριθμού δοκιμίων.

Επίσης, η αντοχή σκυροδέματος σε εφελκυσμό υπολογίζεται από τη σχέση 2.2:

$$f_{ctm} = 0.30f_{ck}^{2/3} \quad (2.2)$$

όπου:

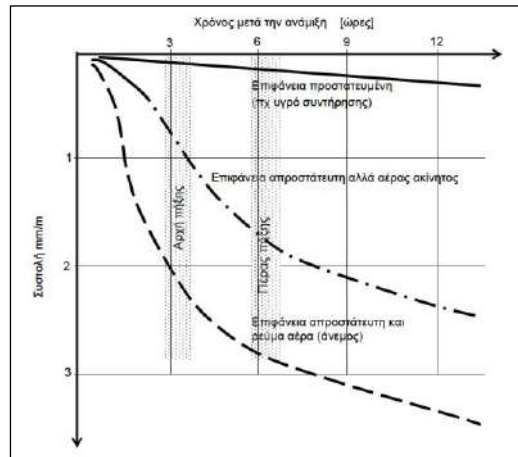
- f_{ctm} : αντοχή σκυροδέματος σε εφελκυσμό.
- f_{ck} : χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος.

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος είναι ίσο με την κλίση της ευθείας του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων (Εικόνα 2.13) που οδηγεί στο 40% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Έτσι, μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και συνήθως κυμαίνεται από 26,000MPa έως 37,000MPa. Επίσης, για τον λόγο Poisson επιλέγεται συνήθως η τιμή 0.20 (περιοχή ελαστικών παραμορφώσεων) [Τάσιος, 2005].

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό είναι οι θερμοκρασιακές μεταβολές, οι οποίες σχετίζονται με το περιβάλλον και τη θερμότητα ενυδάτωσης και προκαλούν συστολές και διαστολές της πλάκας, γεγονός που λόγω της τριβής οδηγεί σε επιπόνηση του σκυροδέματος. Συστολές του σκυροδέματος μπορούν, ακόμα, να προκληθούν από την εξάτμιση του νερού της επιφάνειάς του, σε περίπτωση που αυτό δεν έχει προστατευθεί με τον κατάλληλο εξοπλισμό.

Στην Εικόνα 2.14 φαίνεται πως, η συστολή του σκυροδέματος είναι μικρή, όταν η επιφάνειά του έχει καλυφθεί με υγρό συντηρήσεως, μεγαλύτερη, όταν είναι

απροστάτευτη χωρίς ρεύμα αέρος και σημαντικά μεγαλύτερη, όταν είναι απροστάτευτη και υπάρχει ρεύμα αέρος.



Εικόνα 2.14 Συστολή σκυροδέματος [Λοΐζος & Πλατή, 2020]

Σε ορισμένες μεθόδους σχεδιασμού οδοστρωμάτων από σκυροδέμα υπάρχουν και άλλοι παράγοντες σκυροδέματος που πρέπει να περιλαμβάνονται στη διαδικασία διαστασιολόγησης, όπως είναι το ίδιο βάρος του σκυροδέματος, το μέτρο θραύσης, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, η αναλογία νερού προς τσιμέντο, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, τα αδρανή υλικά κ.α. Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους υπολογίζονται μέσω δοκιμών, ενώ άλλες εκτιμώνται από τον σχεδιαστή-μηχανικό, γεγονός που καθιστά σημαντική την εμπειρία του στην επιλογή κατάλληλων τιμών σχεδιασμού.

Σύμφωνα με την μέθοδο “AASHTO 93” το πάχος της πλάκας σκυροδέματος κυμαίνεται από 13cm έως 36cm, ενώ το πιο συνηθισμένο εύρος τιμών πάχους γενικότερα είναι από 18cm έως 30cm. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του πάχους εξαρτάται και από τη μέθοδο που χρησιμοποιεί ο μηχανικός, καθώς ορισμένες μέθοδοι είναι περισσότερο συντηρητικές από κάποιες άλλες.

2.3.2 Στρώση Βάσης/Υπόβασης

Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης είναι προαιρετικές στο σχεδιασμό, παρ' όλα αυτά στις περισσότερες σύγχρονες κατασκευές οδοστρωμάτων (κυρίως οδών) περιλαμβάνεται μία στρώση υπόβασης. Η επιλογή για το αν θα κατασκευαστούν στρώσεις βάσης και υπόβασης εξαρτάται από τη μέθοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος, καθώς επίσης και από τις απαιτήσεις και τις συνθήκες της τοποθεσίας του έργου.

Η στρώση βάσης, συνήθως, παραλείπεται στο σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, όμως περιλαμβάνεται σε ορισμένες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης. Κατά κανόνα, η στρώση βάσης κατασκευάζεται από σταθεροποιημένα/ασύνδετα υλικά (θραυστό αμμοχάλικο από ποτάμια, χείμαρρους κλπ. ή θραυστό υλικό από

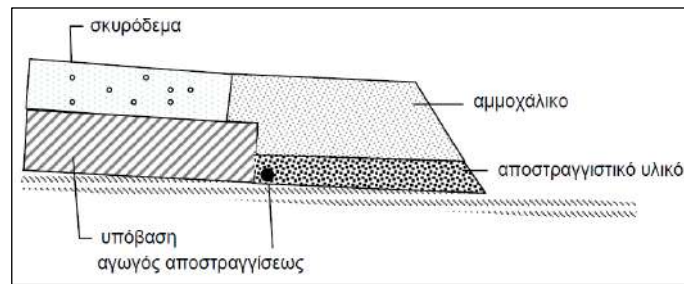
κατάλληλους λίθους κάθε φύσης που έχει σταθεροποιηθεί με άργιλο ή τσιμέντο) και θα πρέπει να έχουν την απαιτούμενη κοκκομετρική διαβάθμιση. Κάποιες από τις λειτουργίες της, είναι να παραλαμβάνει και να κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις, να μειώνει τις κάθετες θλιπτικές τάσεις για την εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος και την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων, αλλά και να παρέχει στο οδόστρωμα δυσκαμψία και αντοχή στην κόπωση [Νικολαΐδης, 1996].

Η στρώση υπόβασης αποτελείται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή συνήθως κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο (διάστρωση με περαιωτήρα – finisher και συμπύκνωση με οδοστρωτήρες), είτε από ισχνό σκυρόδεμα (διάστρωση με περαιωτήρα – finisher και συμπύκνωση με δονητές μάζας). Το πάχος κυμαίνεται από 15cm έως 25cm και καθορίζεται, κυρίως, με κριτήρια αντοχής της στρώσης στην κυκλοφορία των αυτοκινήτων κατασκευής. Χρησιμοποιούνται, επίσης, με επιτυχία και στρώσεις ασφαλτομίγματος πάχους 4cm έως 6cm. Το μέτρο ελαστικότητας των κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες αμμοχάλικων είναι από 10,000MPa έως 20,000MPa, ενώ των μη κατεργασμένων θραυστών αμμοχάλικων από 100MPa έως 800MPa [Λοΐζος & Πλατή, 2020]. Συνεπώς, οι υποβάσεις από κατεργασμένο αμμοχάλικο χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα, η οποία συμβάλλει στη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων, των υποχωρήσεων και της διαβρωσιμότητας της στρώσης. Ο λόγος Poisson, συνήθως, κυμαίνεται από 0.3 έως 0.4.

Η στρώση της υπόβασης κατασκευάζεται για τους ακόλουθους λόγους:

- διευκόλυνση της κατασκευής (εξομάλυνση του εδάφους),
- αύξηση της αντοχής του οδοστρώματος (δηλ. της πλάκας του σκυροδέματος),
- αποφυγή καθιζήσεων του εδάφους,
- παροχή προστασίας από τον παγετό και
- αποφυγή της ανόδου του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό της στρώσης της υπόβασης είναι η αποστράγγιση, η οποία μπορεί να τοποθετηθεί μεταξύ του πυθμένα της πλάκας και της επιφάνειας της υπόβασης. Στην Εικόνα 2.15 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα αποστράγγισης [Λοΐζος & Πλατή, 2020].



Εικόνα 2.15 Τυπικό παράδειγμα αποστράγγισης δύσκαμπτου οδοστρώματος

2.3.3 Υπέδαφος

Ως υπέδαφος χαρακτηρίζεται το υπάρχον φυσικό έδαφος, το οποίο αποτελεί την στρώση έδρασης του οδοστρώματος. Η καλή λειτουργία του οδοστρώματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, γι' αυτό και ενδιαφέρει ιδιαίτερως η αντοχή του. Πρέπει να ακολουθούνται πάντα ορισμένες βασικές αρχές, όπως είναι η σωστή συμπίκνωση του υπεδάφους, οι επαρκείς εγκαταστάσεις αποστράγγισης και ο επαρκής εργοταξιακός έλεγχος. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων βασίζονται στα αποτελέσματα μίας ολοκληρωμένης μελέτης των σχέσεων υγρασίας-πυκνότητας-αντοχής του υπεδάφους [Yoder & Witczak, 1975].

Δύο βασικές παράμετροι του υπεδάφους, οι οποίες απαιτούνται στο σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το μέτρο αντίδρασης του εδάφους k ("Effective Modulus of Subgrade Reaction", "k-value") και το μέτρο ελαστικότητας M_R . Η τιμή του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους μπορεί να μετρηθεί απευθείας στο φυσικό έδαφος με τα κατάλληλα όργανα μετρήσεων ή να υπολογιστεί έμμεσα από άλλες μετρήσεις και ελέγχους πεδίου και εκφράζεται σε $\text{pci} = \text{lb/in}^3$. Ο πιο συνηθισμένος έμμεσος τρόπος υπολογισμού του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους k είναι με τη δοκιμή Καλιφορνιακού Δείκτη CBR ("California Bearing Ratio"), κατά την οποία εκφράζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους. Ορισμένες τυπικές τιμές του k για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων οδών φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές μέτρου αντίδρασης υπεδάφους k [Yoder & Witczak, 1975]

Τύπος Εδάφους	k (pci)
Πλαστικές άργιλοι	50-100
Ιλύες και ιλυώδεις άργιλοι	100-200
Άμμοι, αργιλώδεις χάλικες	200-300
Χαλίκια	300+

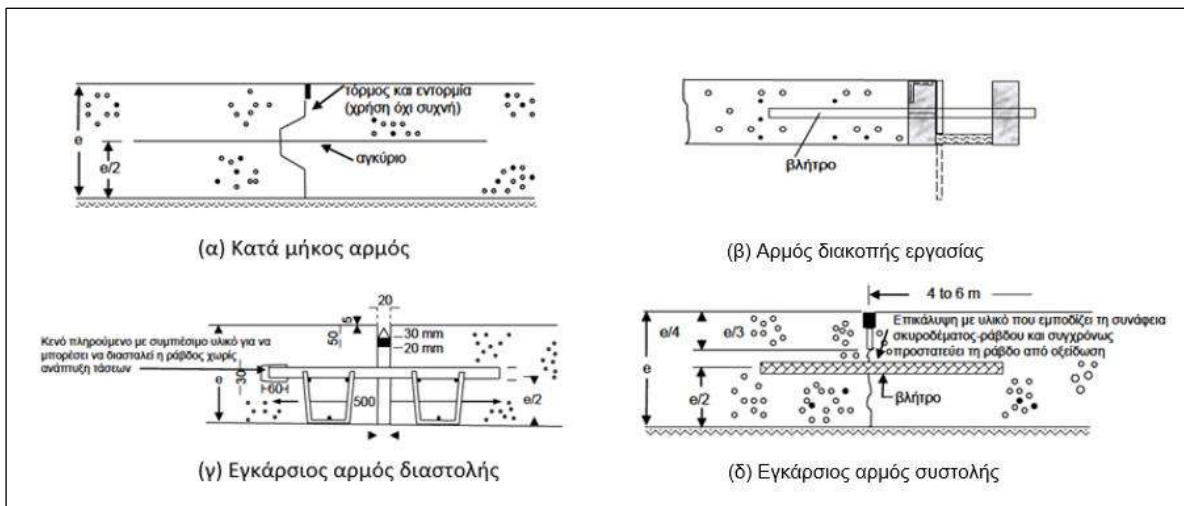
Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης M_R υπολογίζει την παραμόρφωση του εδάφους υπό επαναλαμβανόμενη κυκλοφοριακή φόρτιση, λαμβάνοντας υπόψιν τις

εποχιακές μεταβολές των συνθηκών υγρασίας. Μπορεί να προσδιοριστεί, είτε με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών, όπως είναι η διεξαγωγή δοκιμών τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου σε μη διαταραγμένα κυλινδρικά δοκίμια, είτε από εξισώσεις συσχέτισης που λαμβάνουν υπόψη την κατάσταση καταπόνησης και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

2.3.4 Κατασκευαστικά στοιχεία δύσκαμπτου οδοστρώματος

Κύριο κατασκευαστικό στοιχείο των δύσκαμπτων οδοστρώματων είναι οι αρμοί (“joints”). Παρακάτω, περιγράφονται οι τύποι αρμών που χρησιμοποιούνται [Λοΐζος & Πλατή, 2020]:

- κατά μήκος αρμοί, που κατασκευάζονται παράλληλα προς τον άξονα της οδού σε περιπτώσεις που το πλάτος του οδοστρώματος υπερβαίνει τα 4.5m έως 5.5m (Εικόνα 2.16α),
- αρμοί διακοπής εργασίας, που κατασκευάζονται σε περιπτώσεις διάστρωσης λωρίδων σε διαφορετικό χρόνο και διακοπής εργασίας (Εικόνα 2.16β),
- εγκάρσιοι αρμοί (συστολής ή διαστολής), που κατασκευάζονται κάθετα ή με ελαφριά κλίση (1:6) προς τον άξονα της οδού, ανά αποστάσεις συνήθως 3.5m έως 6m στα οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα και ανά 8m έως 30m στα οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι αρμοί διαστολής κατασκευάζονται μόνο πριν από τεχνικά έργα (γέφυρες) ή άλλα εμπόδια (Εικόνα 2.16γ, Εικόνα 2.16δ).



Εικόνα 2.16 Τυπικά είδη αρμών δύσκαμπτων οδοστρώματων



Εικόνα 2.17 Παραδείγματα αρμών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Η διάταξη των κατά μήκος αρμών συνήθως καθορίζεται έτσι, ώστε οι αρμοί να συμπίπτουν με την διαγράμμιση των λωρίδων κυκλοφορίας (3.75m ή 4.20m). Στους αυτοκινητόδρομους τα τελευταία χρόνια γίνεται περαιτέρω αύξηση τους πλάτους κατά 25cm-50cm, ώστε οι τροχοί των οχημάτων να διέρχονται μακριά από την ακμή του οδοστρώματος, ώστε να επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων.

Οι εγκάρσιοι αρμοί διατάσσονται ανά αποστάσεις, οι οποίες δεν υπερβαίνουν το 25πλάσιο του πάχους της πλάκας. Σήμερα, συνήθως, προβλέπονται αρμοί 4m έως 5m, καθώς οι μεγαλύτερες αποστάσεις δημιουργούν αύξηση των θερμοκρασιακών τάσεων και των μετακινήσεων των άκρων των πλακών, με αποτέλεσμα να ανοίγουν περισσότερο οι αρμοί, να μειώνεται η συνεργασία μεταξύ τους και να καταστρέφεται νωρίτερα το υλικό σφραγίσεως των αρμών.

Ένα άλλο σημαντικό κατασκευαστικό στοιχείο που συμπεριλαμβάνεται σε περιπτώσεις κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων, δυσμενούς κλίματος και διαβρώσιμης υπόβασης είναι τα βλήτρα (“dowel bars”) (βλ. Εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18 Βλήτρα σε δύσκαμπτα οδοστρώματα

Τοποθετούνται στους εγκάρσιους αρμούς και συμβάλλουν στην ομαλή μεταβίβαση του φορτίου των ελαστικών από την μία πλάκα στην άλλη. Είναι λείες ράβδοι και έχουν συνήθως διάμετρο 25mm (Φ25) και μήκος 500mm, ανά αποστάσεις 0.3m έως 0.6m [Λοΐζος & Πλατή, 2020].

2.4 Καταπόνηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

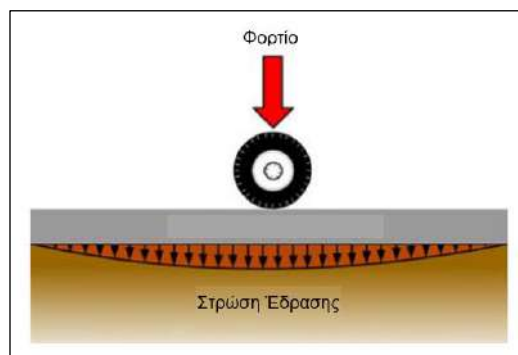
2.4.1 Ανάπτυξη τάσεων

Ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων αποτελεί καταλυτικό στάδιο για τη διαδικασία σχεδιασμού των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες. Οι τάσεις αυτές οφείλονται σε διάφορες αιτίες, όπως είναι τα φορτία των τροχών, οι περιοδικές μεταβολές της θερμοκρασίας και οι ογκομετρικές μεταβολές του υπεδάφους ή της στρώσης βάσης/υπόβασης, οι οποίες τείνουν να παραμορφώνουν την πλάκα σκυροδέματος [Yoder & Witczak, 1975].

Οι κυριότεροι παράγοντες που προκαλούν τις τάσεις μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: 1) επιβαλλόμενη φόρτιση και 2) θερμοκρασιακές μεταβολές.

1) Επιβαλλόμενη φόρτιση

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων στα οδοστρώματα από σκυρόδεμα απεικονίζεται στην Εικόνα 2.19 και οφείλεται στην επίδραση των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Καθώς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των υποκείμενων στρώσεων και οι τάσεις που μεταβιβάζονται σε αυτές είναι αρκετά μικρότερες, ως κρίσιμη θέση αστοχίας λαμβάνεται το σημείο της διεπιφάνειας της πλάκας σκυροδέματος και της υποκείμενης στρώσης.



Εικόνα 2.19 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων σε δύσκαμπτο οδόστρωμα
Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή των θεωριών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων από επιβαλλόμενα φορτία στη πάροδο του χρόνου.

Η ανάλυση των εντατικών μεγεθών σε ιδεατές μάζες βασίζεται στη θεωρία του Boussinesq, η οποία είναι γνωστή από την εδαφομηχανική και αναπτύχθηκε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα (1875). Αρχικά αφορούσε ένα ομογενές, ισότροπο και ελαστικό μέσο, με ένα φορτίο στην επιφάνειά του συγκεντρωμένο σε ένα σημείο [Yoder & Witczak, 1975].

Σύμφωνα με τον τύπο του Boussinesq, η κατακόρυφη τάση σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης, που οφείλεται σε ένα συγκεντρωμένο φορτίο στην επιφάνεια υπολογίζεται από τη σχέση 2.1 [Yoder & Witczak, 1975]:

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2} \quad (2.1)$$

όπου:

$$k = \frac{3}{2\pi} \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (2.2)$$

Αρκετά χρόνια μετά την ανάπτυξη της θεωρίας του Boussinesq, ο Westergaard ανέπτυξε τη δική του θεωρία για τον υπολογισμό των τάσεων σε συστήματα δύο στρώσεων, στην οποία βασιζόταν για πολλά χρόνια ο σχεδιασμός των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς η πρώτη στρώση ήταν κατασκευασμένη από σκυρόδεμα [Νικολαΐδης, 2011].

Το 1926, ο Westergaard παρουσίασε τις πρώτες εξισώσεις υπολογισμού τάσεων για τρεις περιπτώσεις φόρτισης στη γωνία, στην ακμή και στο μέσο. Οι εξισώσεις αυτές βελτιώθηκαν από τους Teller και Sutherland κατά τη περίοδο 1936-1943 σύμφωνα με αποτελέσματα μετρήσεων από πειράματα σε πλάκες κατασκευασμένες στο έδαφος και χρησιμοποιήθηκαν σε αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού πάχους πλάκας [Λοΐζος & Πλατή, 2020]. Οι εξισώσεις του Westergaard παρουσιάζονται στις σχέσεις 2.3-2-8:

- Τάση στο μέσο:

$$\sigma_\mu = \left(\frac{0.275Q}{h^2}(1 + \nu)\right) \times \left(\log \frac{Eh^3}{kb^4} - 0.436\right) \text{ N/mm}^2 \quad (2.3)$$

- Τάση στην ακμή:

$$\sigma_\alpha = \frac{0.529Q}{h^2} \times (1 + 0.54\nu) \left(\log \frac{Eh^3}{kb^4} + \log \frac{b}{1-\nu^2} - 2.484\right) \quad (2.4)$$

- Τάση στη γωνία:

$$\sigma_\gamma = \frac{3Q}{h^2} \left(1 - \left(\frac{12(1-\nu^2)k}{Eh^3}\right)^{0.15} (a\sqrt{2})^{0.6}\right) \quad (2.5)$$

Οι υποχωρήσεις της πλάκας στον άξονα του φορτίου για τις παραπάνω περιπτώσεις φορτίσεων σύμφωνα με τον Westergaard:

- Φόρτιση στο μέσο με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο:

$$Y = \frac{Q}{8kl^2} \left(1 + \left(0.3655 \log \left(\frac{a}{l} \right) - 0.2174 \right) \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right) \text{ mm} \quad (2.6)$$

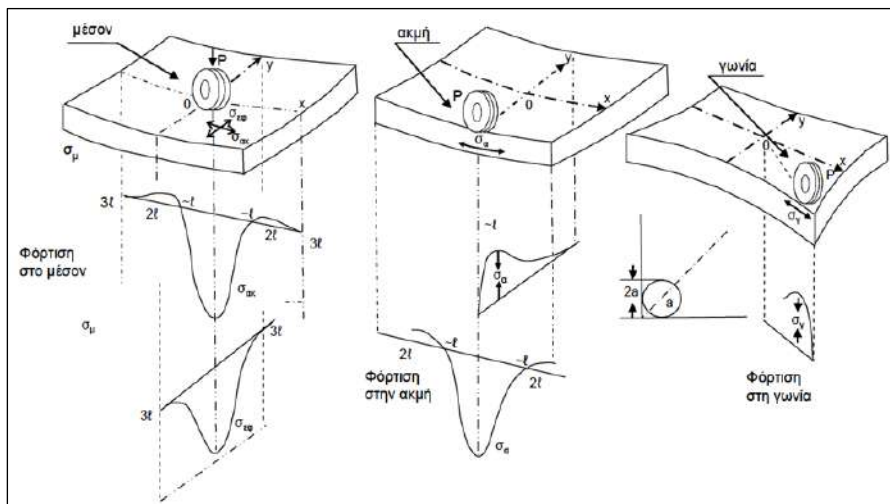
- Φόρτιση στην ακμή με συγκεντρωμένο φορτίο:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{6}} (1 + 0.4\nu) \frac{Q}{kl^2} \quad (2.7)$$

όπου:

- Q: φορτίο τροχού σε N,
- ν: λόγος Poisson σκυροδέματος,
- E: μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος σε MPa ή N/mm²,
- k: μέτρο αντίδρασης υπεδάφους σε N/mm³,
- a: ακτίνα επαφής τροχού σε mm που λαμβάνεται ίση με $a = (Q/p \cdot \pi)^{1/2}$,
- b: διορθωμένη ακτίνα επαφής φορτίου με τιμή: $b=a$ όταν $a > 1.724h$ και $b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h$ όταν $a < 1.724h$ (mm), όπου h το πάχος του οδοστρώματος,
- l: ακτίνα σχετικής ακαμψίας (ή ελαστικό μήκος)

$$l = \left(\frac{Eh^3}{12k(1 - \nu^2)} \right)^{1/4} \quad (2.8)$$



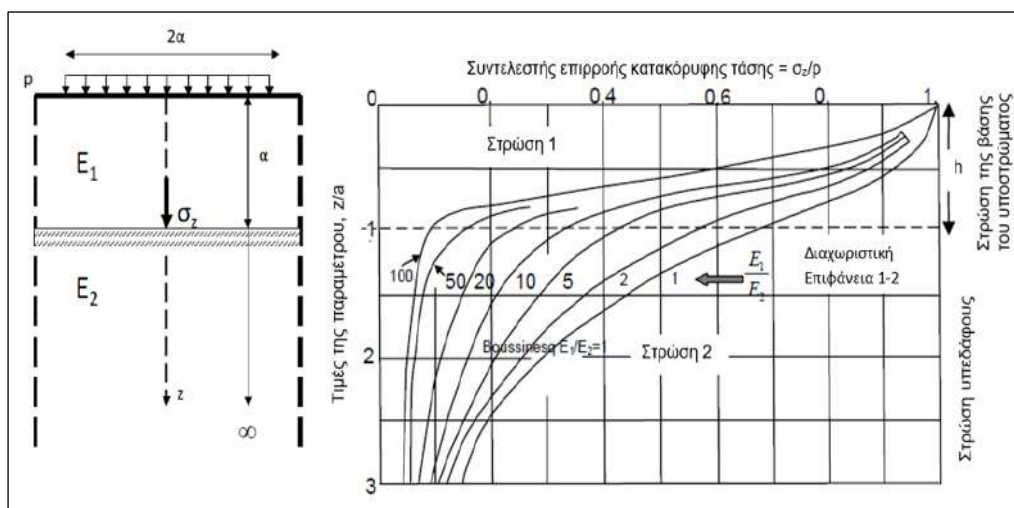
Εικόνα 2.20 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard

Ένας άλλος ερευνητής που ανέπτυξε τη θεωρία του συστήματος επάλληλων στρώσεων για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στα

οδοστρώματα ήταν ο Burmister. Οι αναγκαίες παραδοχές της θεωρίας του ήταν οι ακόλουθες [Yoder & Witczak, 1975]:

- Τα υλικά των στρώσεων είναι ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά.
- Η επιφανειακή στρώση εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο, ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο.
- Η υποκείμενη στρώση εκτείνεται μέχρι το άπειρο, πλευρικά και κατακόρυφα.
- Οι στρώσεις είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση δεν υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός της περιοχής φόρτισης.
- Η τιμή της κατακόρυφης τάσης εξαρτάται από το λόγο αντοχής των στρώσεων, E_1/E_2 , όπου E_1 και E_2 είναι οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας της ανώτερης και της κατώτερης στρώσης, αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 2.21 απεικονίζεται η επίδραση του λόγου E_1/E_2 στις κατακόρυφες τάσεις κατά Burmister.



Εικόνα 2.21 Επίδραση του λόγου E_1/E_2 στις κατακόρυφες τάσεις σ_z σε σύστημα δύο ελαστικών επάλληλων στρώσεων (Burmister)

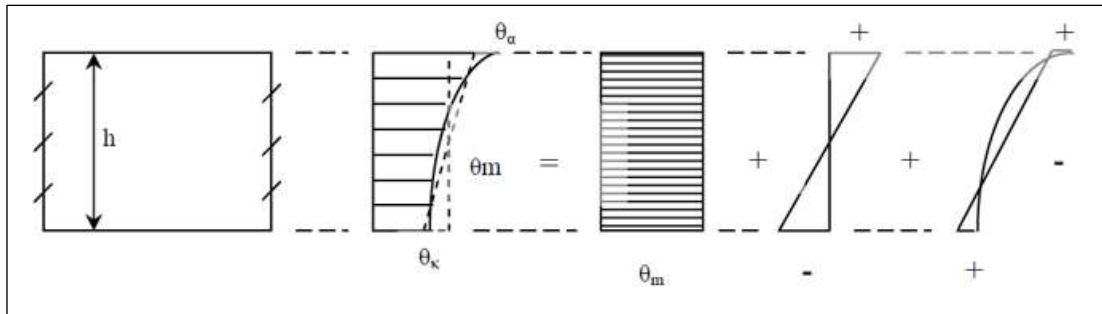
Αργότερα, αναπτύχθηκαν διάφορα διαγράμματα και πίνακες για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων [Huang, 1969 – Peattie, 1962 – Jones, 1962]. Ωστόσο, η αύξηση των στρώσεων του οδοστρώματος δημιούργησε δυσκολίες στην ανάπτυξη αντίστοιχων πινάκων που να καλύπτουν τις ανάγκες του σχεδιασμού.

Σήμερα με την ανάπτυξη εξελιγμένων επεξεργαστών Η/Υ, οι υπολογισμοί των τάσεων και των παραμορφώσεων μπορούν να γίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια, σε λιγότερο χρόνο και με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων που στηρίζονται στην αρχή των πεπερασμένων στοιχείων (“Finite Element Method”, FEM). Αυτή βασίζεται στην

εξιδανίκευση του οδοστρώματος του Westergaard και παρουσιάστηκε πρώτα από τους Tabatabaie και Barenberg, το 1977 (“ILLISLAB”) και ύστερα από τους Tayabji και Colley, το 1981 (J-Slab). Οι τροποποιήσεις τους χρησιμοποιούνται έως σήμερα και, μάλιστα, μία βελτιωμένη έκδοση του ILLISLAB εντάχθηκε στην μηχανιστική-εμπειρική διαδικασία της AASHTO (MEPDG) [Transportation Research Board, 2007].

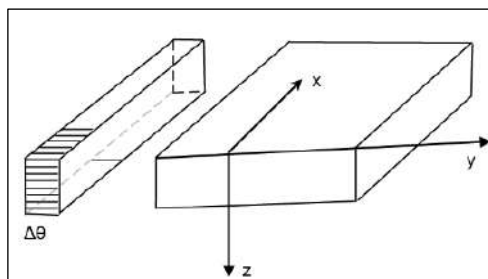
2) Θερμοκρασιακές μεταβολές

Αν μία πλάκα σκυροδέματος υποβληθεί σε θερμοκρασιακή διαφορά κατά το βάθος της, η επιφάνειά της τείνει να κυρτωθεί [Yoder & Witczak, 1975]. Για να υπολογιστούν οι τάσεις που αναπτύσσονται πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε «ομοιόμορφη», «τριγωνική» και «καμπυλόγραμμη» (Εικόνα 2.22). Η καμπυλόγραμμη κατανομή της θερμοκρασίας είναι η μοναδική που προκαλεί ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων.



Εικόνα 2.22 Κατανομή θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους πλάκας σκυροδέματος

Στη πράξη, συνήθως, η επιπόνηση από θερμοκρασιακές τάσεις υπολογίζονται από ευθύγραμμη κατανομή θερμοκρασίας. Αν η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας και παρεμποδίζεται η μετακίνηση κατά τους άξονες «Χ» και «Υ», ενώ δεν παρεμποδίζεται η μετακίνηση κατά «Ζ» (Εικόνα 2.23), οι αναπτυσσόμενες τάσεις βρίσκονται από τη σχέση: $\sigma_x = \sigma_y = (-1/1-\mu)E\alpha\Delta\theta$, όπου α ο συντελεστής διαστολής του υλικού.



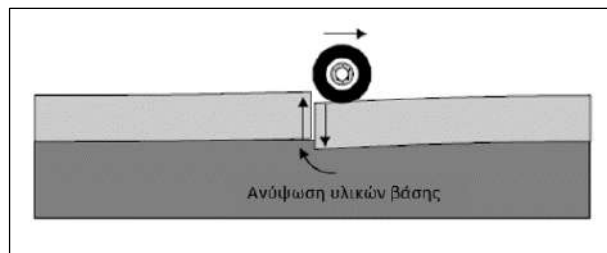
Εικόνα 2.23 Ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας

2.4.2 Μορφές φθοράς/αστοχίας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Προκειμένου να αναπτυχθούν αποτελεσματικές μέθοδοι σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι αναγκαία η κατανόηση των μηχανισμών που προκαλούν φθορές σε αυτά. Οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τις πιο κοινές μορφές φθοράς στα δύσκαμπτα οδοστρώματα παρουσιάζονται ακολούθως:

1. Ανισοσταθμία μεταξύ γειτονικών πλακών (“faulting”)

Η ανισοσταθμία αντιπροσωπεύει τη διαφορά ύψους μεταξύ των επιφανειών δύο γειτονικών πλακών. Η διαφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της ανύψωσης των υλικών που βρίσκονται κάτω από την πλάκα που μετακινείται προς τα πάνω και συχνά της απώλειας υλικών κάτω από την πλάκα που μετακινείται προς τα κάτω (Εικόνα 2.24).



Εικόνα 2.24 Μηχανισμός ανισοσταθμίας πλακών οδοστρώματος

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται, κυρίως, στο συνδυασμό βαρέων φορτίων αξόνων, των υλικών των υποκείμενων στρώσεων που μπορούν να διογκωθούν κάτω από την πλάκα σκυροδέματος και της ύπαρξης υγρασίας κάτω από το οδόστρωμα. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου απαιτείται καλή λειτουργία μεταβίβασης φορτίου μεταξύ των πλακών, χρήση μη διαβρώσιμων υλικών που δεν μεταφέρονται και εξάλειψη του νερού που υπάρχει στα υποκείμενα στρώματα της πλάκας [Harvey & Roesler, 2000].



Εικόνα 2.25 Παράδειγμα ανισοσταθμίας πλακών σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

2. Εγκάρσια ρηγμάτωση (“Transverse fatigue cracking”)

Η εγκάρσια ρηγμάτωση, γενικά, τέμνει την πλάκα σε μία κατεύθυνση κάθετη στο άκρο της και προς την κυκλοφορία και βρίσκεται συνήθως στο εγκάρσιο μέσο της πλάκας (Εικόνα 2.26).



Εικόνα 2.26 Μηχανισμός εγκάρσιας ρηγμάτωσης οδοστρώματος

Η εγκάρσια ρηγμάτωση που εμφανίζεται αμέσως μετά την κατασκευή, συνήθως, προκαλείται από επίπεδα φόρτισης μεγαλύτερα από το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος. Αποτελεί αποτέλεσμα της ανάπτυξης δυνάμεων λόγω συστολής ή θερμοκρασιακών μεταβολών, της θερμικής στρέβλωσης (“thermal curling”), της στρέβλωσης λόγω υγρασίας (“moisture warping”) και/ή της καταπόνησης προτού το σκυρόδεμα αναπτύξει το απαραίτητο μέτρο θραύσης. Οι περιπτώσεις αυτές μπορούν να αποφευχθούν με την έγκαιρη κοπή των κατασκευαστικών αρμών, τον κατάλληλο σχεδιασμό του μήκους των πλακών, τις πρακτικές κατασκευής που να λαμβάνουν υπόψη τις στρεβλώσεις λόγω θερμοκρασίας και υγρασίας κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του σκυροδέματος και τον έλεγχο της κυκλοφορίας για την ανάπτυξη απαραίτητης αντοχής του σκυροδέματος πριν την φόρτιση του.

Η εγκάρσια ρηγμάτωση που παρουσιάζεται μετά από αρκετό καιρό στο οδόστρωμα οφείλεται στην κόπωση του σκυροδέματος λόγω πολλών συνεχόμενων βαρέων φορτίων και θερμοκρασιακών στρεβλώσεων σε επίπεδα τάσεων εφελκυσμού λιγότερα από το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος. Εάν το σκυρόδεμα έχει μικρό μέτρο θραύσης, οι τάσεις που προκαλούνται από θερμοκρασιακές μεταβολές ή η επανάληψη χαμηλού μεγέθους φόρτισης μπορούν να οδηγήσουν σε εγκάρσια ρηγμάτωση. Επομένως, η ρηγμάτωση από κόπωση εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: τις εφελκυστικές τάσεις και το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος. Οι τάσεις του σκυροδέματος προσδιορίζονται από το αξονικό φορτίο του οχήματος, τη θερμοκρασία, το πάχος και το μήκος της πλάκας, την στήριξη της πλάκας από το υπέδαφος και τις μεθόδους μεταβίβασης φορτίου (βλήτρα, ερείσματα, επιπλάτυνση λωρίδας). Το μέτρο θραύσης εξαρτάται από τα υλικά και το μείγμα σκυροδέματος, τη διαδικασία ενυδάτωσης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [Harvey & Roesler, 2000].



Εικόνα 2.27 Παράδειγμα εγκάρσιας ρηγμάτωσης σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

3. Ρηγμάτωση άκρου πλάκας σκυροδέματος (“Corner cracking”)

Η ρηγμάτωση του άκρου είναι μία ρωγμή, η οποία διασχίζει τον εγκάρσιο αρμό και το άκρο του οδοστρώματος σε απόσταση περίπου 2m ή λιγότερο της κάθε πλευράς από την άκρη της πλάκας (Εικόνα 2.28).



Εικόνα 2.28 Μηχανισμός ρηγμάτωσης άκρου οδοστρώματος

Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στην απώλεια στήριξης κάτω από το άκρο της πλάκας και της φόρτισης λόγω βαρέων αξόνων, θερμικών στρεβλώσεων, στρεβλώσεων λόγω υγρασίας και υψηλών παραμορφώσεων. Η μείωση αυτού του φαινομένου πραγματοποιείται με μετρήσεις που αποτρέπουν την απώλεια στήριξης, χρήση μη διαβρώσιμων υλικών, καλή αποστράγγιση κ.α. [Harvey & Roesler, 2000].

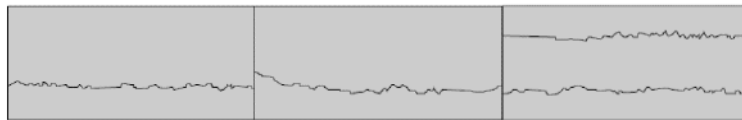


Εικόνα 2.29 Ρηγμάτωση άκρου σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

4. Οριζόντια ρηγμάτωση (“Longitudinal Cracking”)

Η οριζόντια ρηγμάτωση, συνήθως, διασχίζει παράλληλα το άκρο της πλάκας στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας (Εικόνα 2.30). Μπορεί να προκληθεί από τη μη έγκαιρη

κοπή των οριζόντιων αρμών, τη στρέβλωση της πλάκας ή την απώλεια στήριξης της πλάκας λόγω μετακινήσεων των υλικών των υποκείμενων στρώσεων. Επίσης, ένας λόγος που οδηγεί σε αυτό το φαινόμενο είναι η ανομοιόμορφη συσσώρευση ασύνδετων λεπτόκοκκων υλικών στους εγκάρσιους αρμούς, το οποίο μπορεί να προκαλέσει υψηλές τάσεις εφελκυσμού, όταν η πλάκα διαστέλλεται λόγω αυξημένης θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.30 Μηχανισμός οριζόντιας ρηγμάτωσης οδοστρώματος

Η αποφυγή της οριζόντιας ρηγμάτωσης επιτυγχάνεται με την έγκαιρη και κατάλληλη κοπή των οριζόντιων αρμών, την καλή στήριξη της πλάκας και την εξάλειψη των ασυμπίεστων λεπτόκοκκων υλικών από τους εγκάρσιους αρμούς [Harvey & Roesler, 2000].



Εικόνα 2.31 Οριζόντια ρηγμάτωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

5. Αποφλοίωση σκυροδέματος (“spalling”)

Η αποφλοίωση του σκυροδέματος περιγράφεται ως η ρηγμάτωση, η θραύση ή ο θρυμματισμός των άκρων της πλάκας ή των αρμών (Εικόνα 2.32).



Εικόνα 2.32 Παράδειγμα αποφλοίωσης σκυροδέματος σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

Πιθανές αιτίες αυτού του φαινομένου μπορεί να είναι οι μεγάλες τάσεις στους αρμούς ή τις ρωγμές που δημιουργούνται λόγω διείδυσης ασυμπίεστων υλικών και επακόλουθων διαστολών, η αποσάθρωση του σκυροδέματος, η μικρή αντοχή σκυροδέματος λόγω ανεπαρκούς καθίζησης κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η έλλειψη ευθυγράμμισης ή διάβρωση των βλήτρων και η επιβολή μεγάλων φορτίων κυκλοφορίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να διορθωθεί με μερικές τοπικές επισκευές (μπαλώματα) ή επισκευές πλήρους-βάθους [AASHTO, 1993].

2.5 Σχεδιασμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

2.5.1 Ιστορική εξέλιξη

Το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland εφευρέθηκε το 1824. Το πρώτο οδόστρωμα από σκυρόδεμα κατασκευάστηκε στο Bellefontaine του Οχάιο το 1891 από τον George W. Bartholomew. Ο Bartholomew, ο οποίος είχε μάθει για την παραγωγή σκυροδέματος στη Γερμανία και στο Τέξας, βρήκε τις απαραίτητες πρώτες ύλες (ασβεστόλιθος και άργιλος) στο κεντρικό Οχάιο για την κατασκευή του πρώτου οδοστρώματος από σκυρόδεμα. Πάνω από 100 χρόνια αργότερα, μέρος του οδοστρώματος αυτού είναι σε χρήση [Delatte, 2008]. Στη συνέχεια, διαστρώθηκαν και άλλοι γνωστοί δρόμοι (Court Avenue και Opera Street το 1893 / Columbus Street και Main Street το 1894). Η αύξηση της κυκλοφορίας οχημάτων οδήγησε σε μεγαλύτερη ζήτηση οδοστρωσίας των δρόμων, με αποτέλεσμα μέχρι το τέλος του 1914 να έχουν κατασκευαστεί 3,778km οδοστρωμάτων στις ΗΠΑ [ACPA, 2013].

Οι πλάκες σκυροδέματος των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων κατασκευάζονταν απευθείας πάνω στο υπέδαφος, χωρίς να εξετάζεται ο τύπος του υπεδάφους και οι συνθήκες αποστράγγισης. Το πάχος της πλάκας κυμαινόταν από 15 έως 17cm. Καθώς αυξήθηκε η κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων, ιδιαίτερα πριν από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, έγινε αντιληπτό πως το υπέδαφος παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, πολλές πολιτείες της Αμερικής ενέκριναν την κατασκευή οδών με διόδια, για την αντιμετώπιση επιτακτικών αναγκών για πρόσθετες οδούς ταχείας κυκλοφορίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε πάχος πλάκας 25cm για αυτοκινητοδρόμους. Στις βόρειες πολιτείες, όπου η επίδραση του παγετού αποτελούσε πρόβλημα, κατασκευάζονταν βάσης μεγάλου σχετικά πάχους με τη χρήση αποθεμάτων αδρανών, που προήλθαν από παγετώνες.

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαφόρων αξονικών φορτίων και διαμορφώσεων, κατασκευάστηκε η δοκιμαστική οδός της πολιτείας Maryland το 1949.

Από το ερευνητικό πρόγραμμα του Διεθνούς Συμβουλίου Οδικών Μεταφορών προέκυψε το συμπέρασμα, ότι η αύξηση της ρηγμάτωσης σχετιζόταν με την εμφάνιση της ανάβλυσης, η οποία εντοπιζόταν κυρίως σε πλαστικά αργιλώδη εδάφη και όχι σε κοκκώδη με μικρά ποσοστά ιλύος και αργίλου και πως οι τάσεις επηρεάζονταν σημαντικά από τη θερμοκρασία και τη κύρτωση της πλάκας σκυροδέματος. Το υπέδαφος στην περιοχή της οδικής δοκιμής και ο σχεδιασμός του οδοστρώματος μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά πολλών μιλίων οδοστρώματος των ΗΠΑ και επομένως τα αποτελέσματα μπορούν να εφαρμοστούν σε πάρα πολλές περιοχές [Yoder & Witczak, 1975].

Ένα, επίσης, σημαντικό πείραμα για τον καθορισμό της επίδρασης της κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων αποτέλεσε το οδικό πείραμα AASHO (“American Association of State Highway Officials”) που πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του 1950. Σε αυτό βασίστηκε η ανάπτυξη της μεθόδου “AASHTO guide for design of pavement structures” [AASHTO, 1993] μετά από αρκετές τροποποιήσεις, η οποία περιγράφεται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

Έτσι, με την πάροδο του χρόνου έγιναν όλο και περισσότερες παρατηρήσεις και μελέτες σε σχέση με το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων και την επίδραση των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτά. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός προσαρμόστηκε στις πιο σύγχρονες ανάγκες και απαιτήσεις, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, ιδιαίτερα του κυκλοφοριακού φόρτου και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών μεθόδων διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, ορισμένες από τις οποίες αναφέρονται στο ακόλουθο μέρος αυτού του κεφαλαίου.

2.5.2 Μέθοδοι διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Οι επικρατέστερες μέθοδοι σχεδιασμού και διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι: εμπειρικές (“empirical”), μηχανιστικές ή αναλυτικές (“mechanistic”) και συνδυασμός εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων (“mechanistic-empirical”).

Μία εμπειρική μέθοδος, που αν και αρκετά παλιά, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα είναι η “AASHTO93”. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις συνθήκες στις οποίες διεξήχθη το πείραμα AASHO [AASHTO, 1993]. Ωστόσο, έχουν γίνει ορισμένες προσαρμογές, με

σκοπό να υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής σε έργα οδοστρωμάτων με διαφορετικές συνθήκες.

Μία αναλυτική μέθοδος με ευρεία εφαρμογή διεθνώς είναι η “PCA Design Method”, η οποία χρησιμοποιεί ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και μπορεί να εφαρμοστεί μέσω του λογισμικού Street Pave 12 της “American Concrete Pavement Association” [ACPA, 2014]. Επίσης, αναφέρεται και η “French Rational Design Method for Roads and Highways”, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό των ελαστικών τάσεων και των παραμορφώσεων με το κλασικό ελαστικό πολύστρωτο γραμμικό μοντέλο και μπορεί να εφαρμοστεί μέσω του λογισμικού Alize-LCPC software [IFSTTAR, 2016].

Οι μέθοδοι που συνδυάζουν εμπειρικές και αναλυτικές αρχές περιλαμβάνουν τον αναλυτικό υπολογισμό της ανταπόκρισης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων στα φορτία, τα αποτελέσματα του οποίου διορθώνονται μέσω μιας εκτεταμένης βάσης εμπειρικών δεδομένων από μετρήσεις υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Χαρακτηριστική μέθοδος που συνδυάζει αναλυτικούς υπολογισμούς και εμπειρία είναι η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος της AASHTO: “Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide”, MEPDG [AASHTO, 2008]. Για την πιο απλή εφαρμογή της μεθόδου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό AASHTOWare-ME [AASHTO, 2015], αλλά και το λογισμικό MnPAVE Rigid 3.0, που δημιουργήθηκε με βάση τη μέθοδο MnPCC-ME [MnDOT, 2014], η οποία βασίζεται στη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο της AASHTO.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού “AASHTO93” και της μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού MnPCC-ME, η οποία βασίζεται στην μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο της AASHTO, με σκοπό την μετέπειτα συγκριτική αξιολόγησή τους.

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΑΣΗΤΟ93

3.1 Γενικά

Η μέθοδος της ΑΑΣΗΤΟ (“American Association of State Highway and Transportation Officials”) αποτελεί μία εμπειρική μέθοδο σχεδιασμού και μελέτης οδοστρωμάτων, η οποία βασίζεται στα αποτελέσματα της ανάλυσης πειραματικών οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος ΑΑΣΗΤΟ (“AASHTO Road Test”). Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους σχεδιασμού οδοστρωμάτων, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο, καθώς είναι αρκετά φιλική προς τον μελετητή-χρήστη. Η πρώτη έκδοση του οδηγού διαστασιολόγησης έγινε το 1961. Στη συνέχεια, ακολούθησαν περισσότερες αναλύσεις με βάση την εμπειρία, οι οποίες έφεραν αναθεωρήσεις το 1972 (“Evaluation of AASHTO Guide of Design of Pavement Structures”, NCHRP Report 128), το 1986 και τελικά το 1993, όπου πήρε την τελική της βελτιωμένη μορφή (ΑΑΣΗΤΟ “Guide for Design of Pavement Structures”) και συνοπτικά αποκαλείται “ΑΑΣΗΤΟ93”. Αντίθετα με όλες τις άλλες νεότερες μεθοδολογίες οδοστρωμάτων, η εμπειρική μέθοδος της ΑΑΣΗΤΟ δε χρησιμοποιεί την παραμόρφωση και την κόπωση (ρηγμάτωση) ως σχεδιαστικά κριτήρια για την αστοχία του οδοστρώματος. Η αστοχία συνδυάζεται με τη λειτουργικότητα του οδοστρώματος και ειδικότερα με το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχει το οδόστρωμα στο χρήστη τη συγκεκριμένη στιγμή και εκφράζεται με το δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Index: PSI).

Η μέθοδος “ΑΑΣΗΤΟ93” έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του απαιτούμενου πάχους της πλάκας σκυροδέματος, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων με κυριότερες το μέτρο αντίδρασης υπεδάφους, το μέτρο θραύσης σκυροδέματος και τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες.

Σκοπός της μεθόδου είναι να παρέχει μία σαφή και περιεκτική διαδικασία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την αποκατάσταση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα στον χρήστη να αποφασίσει ο ίδιος για ορισμένες παραμέτρους, όπως είναι οι τιμές των συντελεστών αποστράγγισης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η εξυπηρετικότητα κ.α., στα οποία θα γίνει πιο εκτενής περιγραφή στη συνέχεια του κεφαλαίου.

3.2 Οδικό Πείραμα AASHO

3.2.1 Χαρακτηριστικά

Το οδικό πείραμα AASHO (“American Association of State Highway Officials”), μία επένδυση 27 εκατομμυρίων δολαρίων και το μεγαλύτερο πείραμα της εποχής του, χορηγήθηκε από τον Αμερικανικό Κρατικό Σύνδεσμο Οδοποιίας (“AASHO”), ως μία μελέτη για την απόδοση των κατασκευών οδοστρωμάτων γνωστού πάχους υπό την επίδραση κινούμενων φορτίων γνωστού μεγέθους και συχνότητας [Highway Research Board, 1961]. Οι πληροφορίες που λήφθηκαν από αυτό το πείραμα ήταν σημαντικές για την πρόοδο στη γνώση του δομικού σχεδιασμού και της απόδοσης του οδοστρώματος, των ισοδύναμων φορτίων, των επιδράσεων του περιβάλλοντος κ.α. Οι πληροφορίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τις εξισώσεις και τα νομογραφήματα που περιλαμβάνονται στη μέθοδο της AASHTO.

Η εγκατάσταση του πειράματος (Εικόνα 3.1) κατασκευάστηκε κοντά στην πόλη Ottawa της πολιτείας Illinois των ΗΠΑ, από τον Αύγουστο του 1956 έως τον Σεπτέμβριο του 1958. Από τον Οκτώβριο του 1958 έως τον Νοέμβριο του 1960 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κυκλοφορίας και, αργότερα, το 1961 έγιναν ειδικές μελέτες με βάση τα στοιχεία των δοκιμών. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος χαρακτηρίζονταν από βόρεια κλίματα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

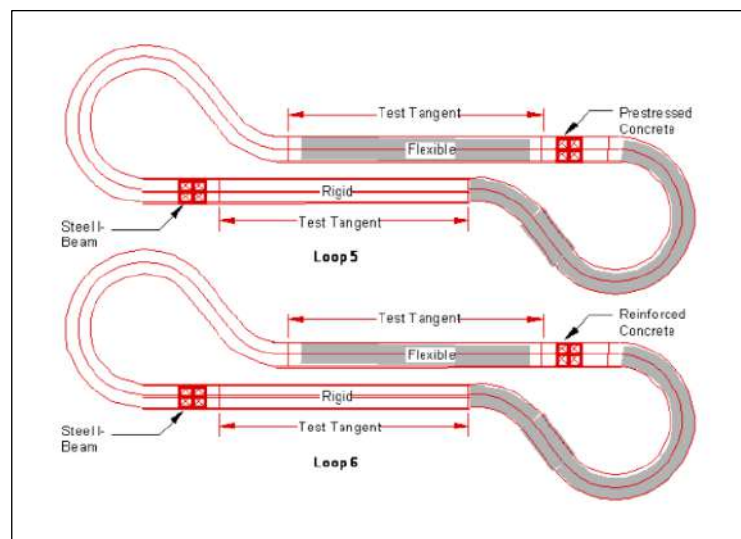
Πίνακας 3.1 Καιρικές συνθήκες πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1961]

Μέση θερμοκρασία (Ιούλιος)	24.5°C (76°F)
Μέση θερμοκρασία (Ιανουάριος)	-2.8°C (27°F)
Μέση ετήσια βροχόπτωση	837mm (34inches)
Μέσο βάθος παγετού (για λεπτόκοκκο έδαφος)	711mm (28inches)

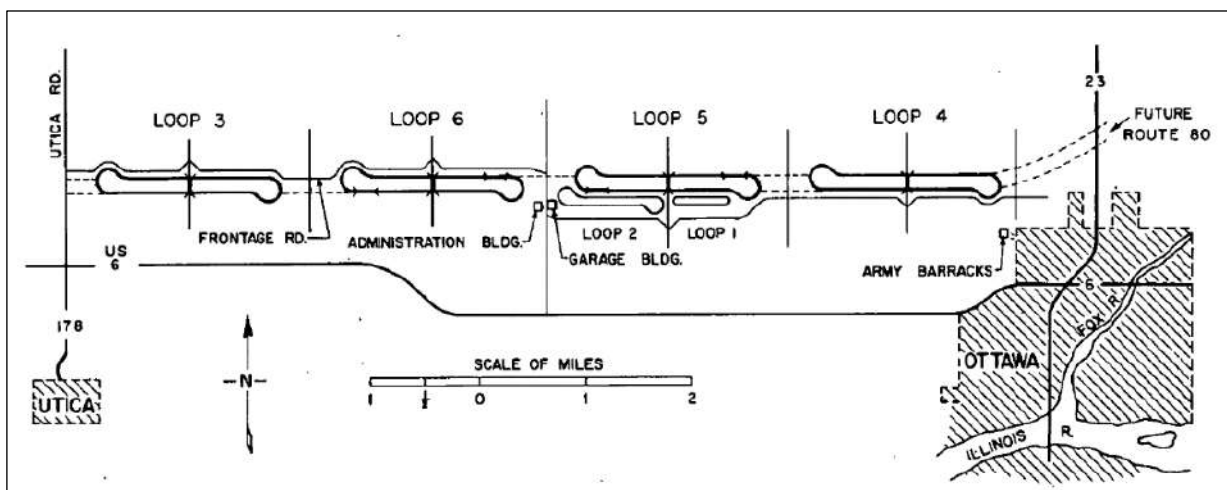


Εικόνα 3.1 Οδικό πείραμα AASHO, Illinois

Στο πλαίσιο του πειράματος κατασκευάστηκαν έξι πειραματικά τμήματα-βρόχοι ("loops") (μήκους περίπου 37 έως 73m) 2 λωρίδων από εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία απεικονίζονται στις Εικόνες 3.2-3.3. Ο βρόχος 1 ("loop 1") δεν υποβλήθηκε σε κυκλοφοριακή φόρτιση, ούτως ώστε να μελετηθεί αποκλειστικά η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών της περιοχής στο οδόστρωμα. Οι βρόχοι 2 έως 6 ("loops 2-6") υποβλήθηκαν σε φόρτιση (1.1 εκατομμύρια εφαρμογές φόρτισης σε κάθε λωρίδα), η οποία περιγράφεται στην Εικόνα 3.4, με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων βάσει τόσο του επιβαλλόμενου φορτίου, όσο και των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων.



Εικόνα 3.2 Διαμόρφωση βρόχων 5 και 6 πειράματος AASHTO [Highway Research Board, 1961]

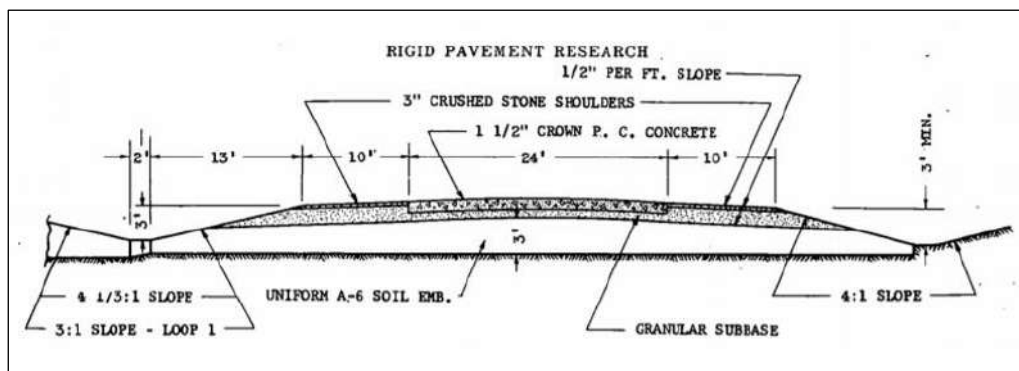


Εικόνα 3.3 Χάρτης πειράματος AASHTO [Highway Research Board, 1962]

Loop	Lane	Weight in Kips		
		Front Axle	Load Axle	Gross Weight
①	①	2	2	4
	②	2	6	8
③	①	4	12	28
	②	6	24	54
④	①	6	18	42
	②	9	32	73
⑤	①	6	22.4	50.8
	②	9	40	89
⑥	①	9	30	69
	②	12	48	108

Εικόνα 3.4 Φορτία και κατανομή αξόνων κυκλοφορίας του πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1961]

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται μία τυπική διατομή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος (από τσιμέντο Portland) του πειράματος AASHO.



Εικόνα 3.5 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος πειράματος AASHO [Highway Research Board, 1962]

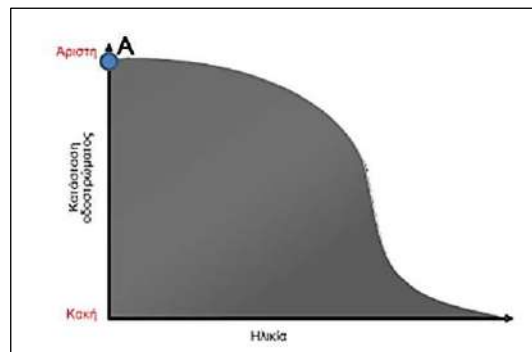
3.2.2 Πληροφορίες οδικού πειράματος AASHO

Το αποτέλεσμα του πειράματος AASHO ήταν η συλλογή των ακόλουθων μετρήσεων:

- ομαλότητα και οπτικές φθορές (και για τα δύο είδη οδοστρώματων),
- παραμορφώσεις, ανωμαλίες κ.α.,
- δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας (“Present Serviceability Index”, PSI).

Ως λειτουργικότητα ή εξυπηρετικότητα εννοείται η ικανότητα του οδοστρώματος να εξυπηρετεί με ασφάλεια, άνεση και οικονομία το χρήστη μίας οδού. Η μεταβολή της λειτουργικότητας με το χρόνο ή με τον αριθμό των φορτίων που κυκλοφορούν συνιστά τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Με τη πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση

της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών το οδόστρωμα χάνει την αρχική του κατάσταση στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην περίπτωση που δεν γίνει κάποια επέμβαση για τη συντήρησή του, να υποβαθμιστεί το επίπεδο εξυπηρετικότητάς του [Λοΐζος & Πλατή, 2020]. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.6, όπου παριστάνεται η καμπύλη συμπεριφοράς του οδοστρώματος με το σημείο Α να είναι το επιθυμητό επίπεδο λειτουργικότητας, το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό.



Εικόνα 3.6 Καμπύλη συμπεριφοράς οδοστρώματος [Λοΐζος & Πλατή, 2020]

Η λειτουργικότητα συσχετίζεται με την ποιότητα της κύλισης, την ταχύτητα των οχημάτων, την ασφάλεια της κυκλοφορίας, το λειτουργικό κόστος του οχήματος, τους χρόνους μετακίνησης και γενικότερα το κόστος επιβάρυνσης των χρηστών της οδού [Λοΐζος & Πλατή, 2020].

Ο δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας PSI βασίζεται στη Βαθμολογία Παρούσας Εξυπηρετικότητας (“Present Serviceability Rating”, PSR) του πειράματος AASHO. Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της λειτουργικής κατάστασης των πειραματικών οδοστρωμάτων, δηλαδή της αποτίμησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, τα οποία συντελούν στην καλή ή κακή λειτουργία του οδοστρώματος, συγκεντρώθηκε μία ομάδα χρηστών-παρατηρητών (συνήθως 5-10). Η ομάδα αυτή οδήγησε πάνω σε επιλεγμένα οδοστρώματα (Illinois, Minnesota, Indiana, 1958-1960) και βαθμολόγησε σε κλίμακα από 0 έως 5 (Εικόνα 3.7) την ποιότητα κύλισης, λαμβάνοντας υπόψη τις επιφανειακές ανωμαλίες, τις ρηγματώσεις και τις φθορές του οδοστρώματος. Ο μέσος όρος των βαθμολογιών δημιούργησε τον όρο PSR και συσχετίστηκε με το οδικό πείραμα AASHO με μετρήσεις τραχύτητας, ρηγματώσεων και μπαλωμάτων [Yoder & Witczak, 1975].

Αποδεκτό;		5	Πολύ καλό
Ναι	<input type="checkbox"/>	4	Καλό
Όχι	<input type="checkbox"/>	3	Μέτριο
Δεν εκφέρω γνώμη	<input type="checkbox"/>	2	Κακό
		1	Πολύ κακό
		0	

Τμήμα οδού προς αξιολόγηση:
 Κριτής: _____ Ημερομηνία: _____ Χρόνος: _____ Όχημα: _____


Εικόνα 3.7 Βαθμολογία παρούσας εξυπηρετικότητας PSR (“Present Serviceability Rating”)

Συμφωνά, λοιπόν, με τα παραπάνω και με αντικειμενικές μετρήσεις στα ίδια οδοστρώματα συγκεκριμένων φυσικών παραγόντων της επιφάνειάς τους, όπως οι διακυμάνσεις της εγκάρσιας κλίσης, οι ρηγματώσεις και το ποσοστό της επιφάνειας που έχει επισκευαστεί με μπαλώματα, προέκυψε ο δείκτης PSI, ο οποίος υπολογίζεται για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με βάση την εξίσωση της σχέσης 3.1 [Carey & Irick, 1960]:

$$PSI = 5.41 - 1.8 \log(1 + SV) - 0.09(C + P)^{0.5} \quad (3.1)$$

όπου:

- SV (“Slope Variance”): μέση μεταβολή της κλίσης κατά μήκος των δύο ιχνών τροχού, η οποία υπολογίζεται στην Εικόνα 3.8.
- C (“Cracking”): μήκος ρηγματώσεων (ft.) ανά 1.000ft² επιφάνειας.
- P (“Patching”): επιφάνεια επισκευών (μπαλωμάτων) (ft²) ανά 1.000ft².



$$SV = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)$$

x: μέτρηση γωνίας α
 n: αριθμός μετρήσεων

Εικόνα 3.8 Υπολογισμός SV (“Slope Variance”)

Στις Εικόνες 3.9-3.11 παρουσιάζονται οι επιφανειακές φθορές, οι οποίες παρατηρούνται στα δύσκαμπτα οδοστρώματα και απαιτείται να προσδιοριστούν για τον υπολογισμό του δείκτη PSI.



Εικόνα 3.9 Επιφάνειες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων που εμφανίζουν ρηγματώσεις-Παράγοντας C του δείκτη PSI

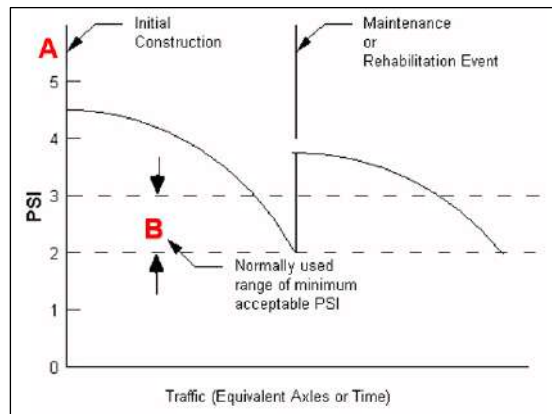


Εικόνα 3.10 Τοπικές επισκευές (μπαλώματα)-Παράγοντας P του δείκτη PSI



Εικόνα 3.11 Επισκευή πλήρους βάθους-Παράγοντας P του δείκτη PSI

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο δείκτης PSI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του χρόνου επέμβασης για τη συντήρηση των οδοστρωμάτων και κατά επέκταση στην αξιολόγηση της λειτουργικής τους κατάστασης. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.12 απεικονίζεται η μεταβολή της τιμής του PSI από την αρχική κατασκευή του οδοστρώματος (σημείο A) σε συνάρτηση με την κυκλοφορία και η τιμή που θεωρείται η μικρότερη αποδεκτή (σημείο B), όπου και πρέπει να γίνουν ενέργειες συντήρησης και αποκατάστασης.



Εικόνα 3.12 Χρήση Δείκτη Παρούσας Λειτουργικότητας για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων [Hveem & Carmany, 1948]

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται, ότι η τιμή 2.5 αποτελεί ένα σημείο προειδοποίησης για τη συντήρηση ή την αποκατάσταση του οδοστρώματος στο μέλλον, ενώ σε περίπτωση που ο δείκτης PSI πάρει τιμές μικρότερες του 2.0 (σημείο B), απαιτείται άμεση αποκατάσταση του οδοστρώματος για την επαναφορά της κατάστασής του σε ένα νέο αποδεκτό επίπεδο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι ο λόγος για τον οποίο η αρχική τιμή του δείκτη δεν λαμβάνεται ίση με 5 είναι, γιατί πρακτικά είναι αδύνατο να υπάρξει ιδανική κατασκευή οδοστρώματος.

3.2.3 Περιορισμοί και υποθέσεις οδικού πειράματος AASHO

Από το οδικό πείραμα AASHO αναπτύχθηκαν εξισώσεις, οι οποίες συνδέονταν με την απώλεια εξυπηρευτικότητας, τη κυκλοφορία και το πάχος του οδοστρώματος. Αυτές οι εξισώσεις δημιουργήθηκαν για τις συνθήκες που επικρατούσαν στο πείραμα και για αυτό περιλαμβάνουν κάποιους περιορισμούς [AASHTO, 1993]:

- Οι εξισώσεις που προέκυψαν από το πείραμα βασίστηκαν στα συγκεκριμένα υλικά των οδοστρωμάτων και της στρώσης έδρασης που χρησιμοποιήθηκε.
- Οι εξισώσεις αναπτύχθηκαν αποκλειστικά για τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.
- Οι εξισώσεις βασίζονται σε δοκιμαστική περίοδο 2 χρόνων και όχι για περισσότερο, ενώ η τυπική περίοδος ζωής σχεδιασμού ενός οδοστρώματος

είναι 20 έτη και παραπάνω. Ωστόσο, οι παράγοντες του περιβάλλοντος ήταν δύσκολο έως και αδύνατο να προβλεφθούν για μεγαλύτερη περίοδο.

- Τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των εξισώσεων ήταν οχήματα χειρισμού με ίδια φορτία και διατάξεις αξόνων, το οποίο αντιτίθεται στη μεικτή κυκλοφορία.
- Για τα έργα “JPCP” και “JRCP”, όλοι οι εγκάρσιοι αρμοί είχαν τις ίδιες αποστάσεις: 4.6m (15ft.) και 12.2m (40ft.), αντίστοιχα. Επίσης, σε όλους τους εγκάρσιους αρμούς χρησιμοποιήθηκαν βλήτρα.
- Όλα τα σκυροδέματα είχαν τα ίδια χαρακτηριστικά μείγματος, αδρανή υλικά και τύπο τσιμέντου.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την εφαρμογή των εξισώσεων αυτών, χρειάζεται η γνώση ορισμένων βασικών υποθέσεων, προκειμένου να γίνει σωστή χρήση των εμπειρικών εξισώσεων με βάση τις συγκεκριμένες συνθήκες και τα υλικά του έργου που είναι προς σχεδιασμό. Οι υποθέσεις αυτές συνοψίζονται ακολούθως [AASHTO, 1993]:

- Η στήριξη από τη στρώση έδρασης μπορεί να εκτιμηθεί για διάφορα εδάφη ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται.
- Η φόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί σε μεικτή κυκλοφορία με τη χρήση των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (κεφ.3.3.2).
- Οι δοκιμές των οδοστρωμάτων του πειράματος AASHO (2 έτη περίοδος σχεδιασμού) μπορούν να επεκταθούν σε μία μεγαλύτερη περίοδο ζωής σχεδιασμού.

3.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες, σημαντικότεροι από τους οποίους είναι η περιοχή του έργου και οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος “AASHTO93” δεν είναι εφικτό να περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν κάθε διαφορετική περιοχή του κόσμου. Για τον λόγο αυτό, η χρήση της μεθόδου προϋποθέτει πάντα να υπάρχει εμπειρία από το μελετητή, ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε περίπτωση οδοστρώματος και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες [AASHTO, 1993].

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων εκείνων που αποτελούν τις αρχές σχεδιασμού της μεθόδου, όπως αναφέρονται ακολούθως.

3.3.1 Περίοδος σχεδιασμού οδοστρώματος

Καθοριστικό στοιχείο της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της περιόδου σχεδιασμού (“Design Life”). Ως περίοδος σχεδιασμού ή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος ορίζεται η ολική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, κατά την οποία γίνεται η προγραμματισμένη συντήρηση και μία ή περισσότερες αποκαταστάσεις του οδοστρώματος. Έτσι, ανάλογα με την κατηγορία της οδού που μελετάται, καθορίζεται και η περίοδος σχεδιασμού. Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται οι προτεινόμενες περίοδοι σχεδιασμού της μεθόδου.

Πίνακας 3.2 Περίοδοι σχεδιασμού ανά κατηγορία οδού κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Κατηγορία Οδού	Περίοδος σχεδιασμού (έτη)
Αστικοί δρόμοι με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	30-50
Υπεραστικοί δρόμοι με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο	20-50
Ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι με χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	15-25
Μη ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι με χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο	10-20

3.3.2 Κυκλοφοριακός φόρτος – Ισοδύναμοι τυπικοί άξονες W_{18}

Όσον αφορά στην κυκλοφορία, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη αθροιστικά την προβλεπόμενη κυκλοφορία για την περίοδο σχεδιασμού εκφρασμένη σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες, οι οποίοι βασίζονται σε αποτελέσματα του πειράματος AASHO (18kip = 8.16t = 80kN, φορτίο μονού άξονα, “single axle load”). Για παράδειγμα, ένα φορτίο μονού άξονα των 30kip θα προκαλέσει περίπου 16 φορές τη φθορά που θα προκαλούσε αυτό των 18kip. Έτσι, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής ισοδυναμίας, ο οποίος εκφράζει την καταστρεπτική επίδραση των αξονικών φορτίων με μικρότερο ή μεγαλύτερο φορτίο από αυτό ενός τυπικού άξονα. Συνεπώς, για τον άξονα αυτόν θεωρήθηκε ότι, μία διέλευσή του επιφέρει καταστροφή στο οδόστρωμα ίση με τη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο, η μεικτή κυκλοφορία μετατρέπεται σε ισοδύναμη κυκλοφορία.

Για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη το ποσοστό των διερχόμενων αξόνων ανά κατεύθυνση και ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Στις περιπτώσεις, στις οποίες ένα οδικό τμήμα αποτελείται από περισσότερες από μία λωρίδες ανά κατεύθυνση, το ποσοστό των ΙΤΑ που θεωρείται ότι χρησιμοποιεί τη λωρίδα μελέτης λαμβάνεται από τον Πίνακα 3.3 [Λοΐζος & Πλατή, 2020].

Πίνακας 3.3 Ποσοστό κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης με βάση τον αριθμό λωρίδων κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση	Ποσοστό % ΙΤΑ στη λωρίδα μελέτης
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση 3.2 [AASHTO, 1993]:

$$W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18} \quad (3.2)$$

όπου:

- W_{18} (“Estimated total 18-kip equivalent single axle load applications”, ESALs): Ισοδύναμοι τυπικοί άξονες, ΙΤΑ.
- D_D (“Directional Distribution Factor”): Κατανομή κυκλοφορίας (ΙΤΑ) ανά κατεύθυνση οδού. Γενικά, επιλέγεται η τιμή 0.5 (50%) για τους περισσότερους οδικούς άξονες, εκτός αν υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες κυκλοφορίας.
- D_L (“Lane Distribution Factor”): Κατανομή κυκλοφορίας ανά λωρίδα, όταν υπάρχουν 2 ή περισσότερες λωρίδες ανά κατεύθυνση (Πίνακας 3.3).
- w_{18} : Προβλεπόμενη κυκλοφορία για την περίοδο σχεδιασμού και για τις 2 κατευθύνσεις ενός οδικού τμήματος εκφρασμένη σε ΙΤΑ.

3.3.3 Αξιοπιστία R

Αξιοπιστία (“Reliability”) της διαδικασίας σχεδιασμού ενός οδοστρώματος ορίζεται η πιθανότητα το οδόστρωμα που σχεδιάζεται να συμπεριφερθεί ικανοποιητικά κάτω από τις κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες για την περίοδο σχεδιασμού [AASHTO, 1993]. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να υπάρχει κάποια διασφάλιση, ότι το οδόστρωμα θα αποδώσει όπως έχει προβλεφθεί, δεδομένων των μεταβολών στην κατασκευή, στις κλιματικές συνθήκες και στα υλικά.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί την ιδέα της αξιοπιστίας για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες που υπάρχουν στο σχεδιασμό. Ουσιαστικά, κατά την εφαρμογή της μεθόδου γίνεται χρήση των τιμών που θεωρούνται οι πιο κατάλληλες και δεν λαμβάνονται οι μικρότερες ή οι πιο συντηρητικές. Η αξιοπιστία χαρακτηρίζεται από δύο μεταβλητές:

- Z_R : Τυπική κανονική απόκλιση (“standard normal deviate”). Η τιμή του Z_R αντιστοιχεί σε μία επιθυμητή πιθανότητα επιπέδου υπέρβασης. Για παράδειγμα, ο μελετητής μπορεί να θεωρήσει ότι πρέπει να υπάρχει μόνο 5% πιθανότητα, ότι ο σχεδιασμός δεν θα επαρκέσει για τη περίοδο σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει, ότι το οδόστρωμα έχει 95% πιθανότητα να κρατήσει για αυτήν την περίοδο. Επομένως, η αξιοπιστία είναι 95% (100%-5%) και η τιμή του Z_R είναι -1.645 [Πίνακας 4.1, σελ. I-62, AASHTO, 1993].
- S_o : Τυπική απόκλιση (“combined standard error of the traffic prediction and performance prediction”). Με την εισαγωγή της έννοιας της τυπικής απόκλισης στη διαδικασία σχεδιασμού ενός οδοστρώματος, λαμβάνονται υπόψη ενδεχόμενα σφάλματα που σχετίζονται με σχεδιαστικά και κατασκευαστικά δεδομένα υπολογισμών (π.χ. εκτίμηση κυκλοφορίας, χαρακτηριστικά υλικών, κλπ.) [Λοΐζος & Πλατή, 2020]. Για παράδειγμα, η κυκλοφορία εκτιμήθηκε στα 2,000,000 ESALs για περίοδο σχεδιασμού 20 έτη. Ωστόσο, τελικά η πραγματική κυκλοφορία έφτασε τα 2,500,000 ESALs λόγω μη προβλεπόμενης αύξησης του πληθυσμού. Έτσι, η πρόβλεψη ορισμένων παραμέτρων μπορεί να μην είναι ακριβής και όσο περισσότερο απέχει από την πραγματική, τόσο υψηλότερη θα είναι και η τυπική απόκλιση. Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, η μέθοδος προτείνει η τυπική απόκλιση να κυμαίνεται από 0.30 έως 0.40.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας με βάση τον τύπο της οδού και την περιοχή του έργου.

Πίνακας 3.4 Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας για διάφορες κατηγορίες οδών κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Κατηγορία Οδού	Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας	
	Αστικές περιοχές	Υπεραστικές περιοχές
Αυτοκινητόδρομοι	85-99.9%	80-99.9%
Κύριες Αρτηρίες	80-99%	75-95%
Δευτερεύουσες Αρτηρίες	80-95%	75-95%
Τοπικές οδοί	50-80%	50-80%

3.3.4 Απώλεια εξυπηρευτικότητας οδοστρώματος

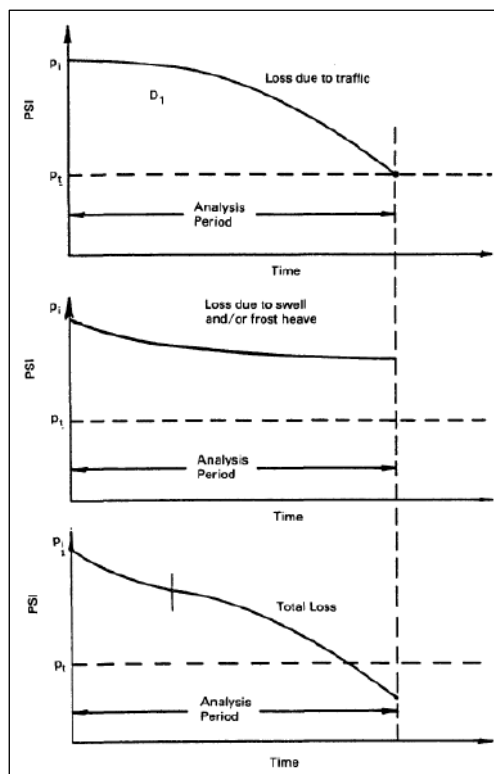
Η απώλεια εξυπηρευτικότητας (“Serviceability Loss”, ΔPSI) εξαρτάται από την αρχική τιμή του PSI, p_i , η οποία λαμβάνεται από τον χρήστη του οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του και από την τελική τιμή του PSI, p_t (“terminal serviceability”), η οποία αντιστοιχεί στο ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο πριν κριθεί απαραίτητη η αποκατάσταση ή ανακατασκευή του οδοστρώματος. Η αρχική τιμή εξυπηρευτικότητας

εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα κατασκευής και την ομαλότητα, ενώ η τελική τιμή επηρεάζεται από την χρήση της οδού.

Κατά συνέπεια, η απώλεια εξυπηρετικότητας υπολογίζεται από τη σχέση (3.3):

$$\Delta PSI = p_i - p_t \quad (3.3)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τιμές εξυπηρετικότητας προέκυψαν από το οδικό πείραμα AASHO από μετρήσεις ομαλότητας και φθορών του οδοστρώματος (π.χ. ρηγματώσεις, μπαλώματα) σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος. Η μέθοδος AASHTO προτείνει για τα δύσκαμπα οδοστρώματα ως αρχική τιμή p_i τη τιμή 4.5 και ως τελική τιμή p_t τη τιμή 2.5 για τις περιπτώσεις των αυτοκινητοδρόμων και 2 για τις οδούς που δέχονται χαμηλότερους κυκλοφοριακούς φόρτους. Στην Εικόνα 3.13, παρουσιάζεται η απώλεια εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στο πρώτο διάγραμμα, φαίνεται η απώλεια εξυπηρετικότητας λόγω της κυκλοφορίας, στο δεύτερο διάγραμμα λόγω παγετού ή διόγκωσης και στο τελευταίο η συνολική απώλεια λόγω αυτών των δύο παραγόντων. Στη μέθοδο της AASHTO σημειώνεται, ότι δεν συνιστάται η αύξηση του πάχους του οδοστρώματος για την αποφυγή της μείωσης της εξυπηρετικότητας λόγω της διόγκωσης του εδάφους, αλλά η σταθεροποίηση αυτών των υλικών ή η χρήση μη διογκούμενων υλικών εδάφους [AASHTO, 1993].



Εικόνα 3.13 Απώλεια εξυπηρετικότητας οδοστρώματος σε συνάρτηση με το χρόνο κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

3.3.5 Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος E_c

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (“Elastic modulus”) μπορεί να εκτιμηθεί, είτε από εργαστηριακές δοκιμές, είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων, με βάση την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, μία σχέση που έχει αναπτυχθεί από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (“American Concrete Institute”) για τυπικό βάρος σκυροδέματος είναι η σχέση 3.4 [AASHTO, 1993]:

$$E_c = 57,000 (f'_c)^{0.5} \quad (3.4)$$

όπου:

- E_c : Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος (σε psi).
- f'_c : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (σε psi), είτε από AASHTO T 22, T 140, ή ASTM C 469.

3.3.6 Μέτρο θραύσης σκυροδέματος S_c

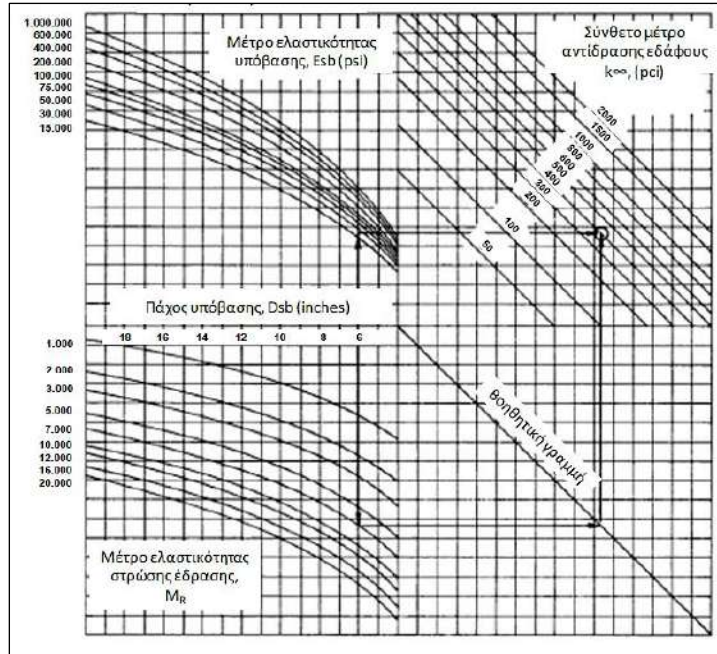
Το μέτρο θραύσης σκυροδέματος (“modulus of rupture” ή “flexural strength”) αποτελεί ένδειξη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος και μπορεί να εκτιμηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Λαμβάνει το μέσο όρο αντοχής σε τριαξονική φόρτιση κύβων ή κυλίνδρων σκυροδέματος μετά από 28 ημέρες (AASHTO T 97, ASTM C 98) [AASHTO, 1993].

3.3.7 Ενεργό μέτρο αντίδρασης εδάφους k

Το ενεργό μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους (“Effective Modulus of Subgrade Reaction”, “k-value”) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της «στήριξης» της πλάκας σκυροδέματος από τις υποκείμενες στρώσεις και εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες [AASHTO, 1993]:

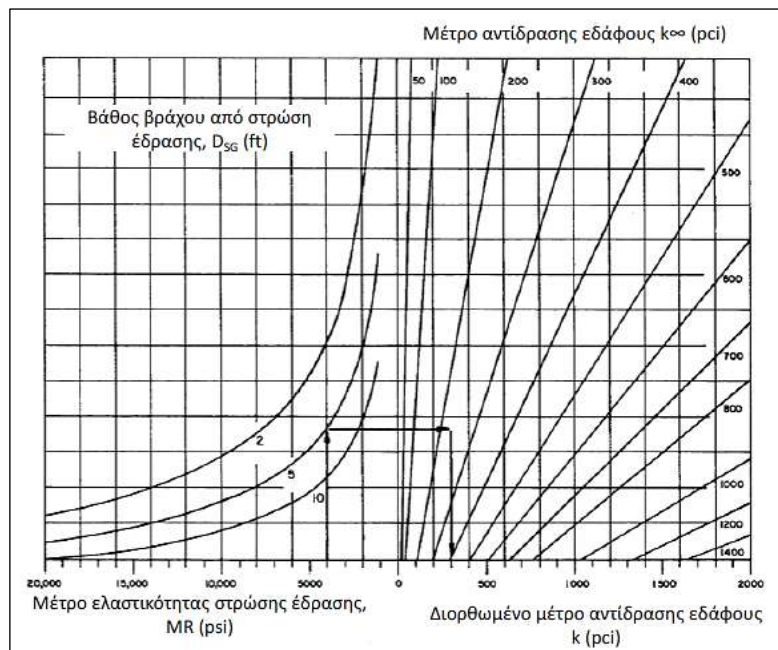
1. το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος της υπόβασης,
2. την ύπαρξη βράχου κοντά στη στρώση έδρασης,
3. την απώλεια στήριξης και
4. το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης (M_R).

Ο υπολογισμός του σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{∞} (k_{eff}) σε περίπτωση ύπαρξης στρώσης υπόβασης εκτιμάται από το νομογράφημα της Εικόνας 3.14, στο οποίο φαίνεται πως είναι απαραίτητη η γνώση του μέτρου ελαστικότητας E_{sb} (psi) της υπόβασης, το πάχος D_{sb} (inches) της υπόβασης και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης M_R (psi).



Εικόνα 3.14 Υπολογισμός σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{eq} σε περίπτωση που υφίσταται στρώση υπόβασης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Δεδομένου ότι, το ενεργό μέτρο αντίδρασης εδάφους k επηρεάζεται από την ύπαρξη βράχου κοντά στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (σε απόσταση έως και 10 ft.), στην περίπτωση αυτή συνήθως γίνεται διόρθωσή του, με τη χρήση του νομογραφήματος της Εικόνας 3.15, για την οποία είναι απαραίτητη η εισαγωγή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης M_R και το βάθος του βράχου από αυτήν D_{SG} (ft.).

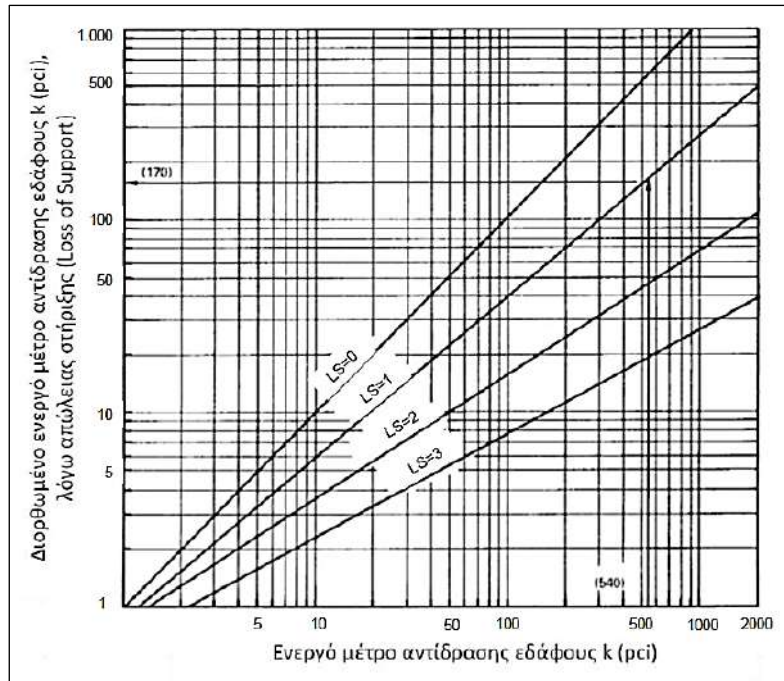


Εικόνα 3.15 Υπολογισμός διορθωμένου μέτρου αντίδρασης εδάφους k , λόγω ύπαρξης βράχου σε απόσταση μικρότερη από 10ft. κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Σημαντικό ρόλο, επίσης, παίζει η πιθανή απώλεια στήριξης (“Loss of Support”, LS) της πλάκας σκυροδέματος, η οποία μπορεί να προκληθεί από διάβρωση της υποκείμενης στρώσης ή από κάθετες μετακινήσεις των υλικών της υποκείμενης στρώσης. Ο συντελεστής LS εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών και κυρίως από το μέτρο ελαστικότητάς τους. Σε περίπτωση που δεν υφίστανται διαβρώσιμα υλικά, αλλά δημιουργούνται κενά λόγω διόγκωσης της αργίλου ή σημαντικής ύπαρξης πάγου, ο συντελεστής LS λαμβάνει τιμές από 2.0 έως 3.0. Ενδεικτικές τιμές ανάλογα με το υλικό παρατίθενται στον Πίνακα 3.5. Αφού επιλεγθεί η κατάλληλη τιμή του LS, πραγματοποιείται διόρθωση του μέτρου αντίδρασης k με τη χρήση του νομογραφήματος της Εικόνας 3.16.

Πίνακας 3.5 Ενδεικτικές τιμές συντελεστή LS για διάφορους τύπους υλικού κατά AASHTO93 [AASHTO,1993]

Τύπος Υλικού	Απώλεια Στήριξης LS
Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο αμμοχάλικο (E=1,000,000 έως 2,000,000 psi)	0.0 έως 1.0
Στρώση από ισχνό σκυρόδεμα (E=500,000 έως 1,000,000 psi)	0.0 έως 1.0
Στρώση σταθεροποιημένη με άσφαλτο (E=350,000 έως 1,000,000 psi)	0.0 έως 1.0
Εδαφικό υλικό σταθεροποιημένο με άσφαλτο (E=40,000 έως 300,000 psi)	0.0 έως 1.0
Στρώση σταθεροποιημένη με άσβεστο (E=20,000 έως 70,000 psi)	1.0 έως 3.0
Στρώση από ασύνδετα αμμοχάλικα (E=15,000 έως 45,000psi)	1.0 έως 3.0
Φυσικό υπέδαφος (E=3,000 έως 40,000 psi)	2.0 έως 3.0



Εικόνα 3.16 Διόρθωση μέτρου αντίδρασης εδάφους k λόγω απώλειας στήριξης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Στην περίπτωση, κατά την οποία η πλάκα σκυροδέματος εδράζεται απευθείας στο έδαφος, ο υπολογισμός του ενεργού μέτρου αντίδρασης εδάφους k μπορεί να γίνει από τη θεωρητική σχέση 3.5, η οποία προκύπτει από δοκιμές φορτιζόμενης πλάκας:

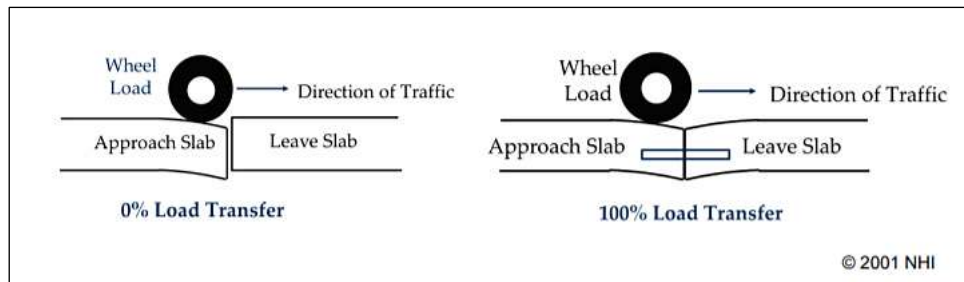
$$k = M_R / 19.4 \quad (3.5)$$

όπου:

- k : Ενεργό μέτρο αντίδρασης εδάφους (pci).
- M_R : Μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (psi).

3.3.8 Συντελεστής μεταφοράς φορτίου J

Ο όρος μεταφορά φορτίου (“load transfer”) χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ικανότητας της πλάκας σκυροδέματος να μεταφέρει ή να κατανέμει τα φορτία διαμέσου των ασυνεχειών που υπάρχουν στο οδόστρωμα, όπως είναι οι αρμοί και οι ρηγματώσεις [AASHTO, 1993]. Ο συντελεστής μεταφοράς φορτίου (“Load Transfer Coefficient”, “J Factor”) συνδέεται με την έννοια της απόδοσης μεταφοράς φορτίου (“Load Transfer Efficiency”, LTE) (βλ. Εικόνα 3.17), η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία, την απόσταση των αρμών, τον αριθμό και το μέγεθος των εφαρμογών φόρτισης, τη στήριξη της θεμελίωσης, το σχήμα των κόκκων των αδρανών και την παρουσία μηχανισμών μεταβίβασης φορτίου.



Εικόνα 3.17 Προσδιορισμός απόδοσης μεταφοράς φορτίου με βάση τη παραμόρφωση [NHI, 2001]

Επομένως, η ύπαρξη μηχανισμών μεταβίβασης φορτίου (βλήτρα) και οι ιδιότητες του ερείσματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην τιμή του συντελεστή J . Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής, τόσο καλύτερη είναι η μεταφορά του φορτίου. Από το πείραμα AASHO, ο συντελεστής αυτός υπολογίστηκε στη τιμή 3.2 και λαμβάνεται τόσο στην περίπτωση που έχουν τοποθετηθεί βλήτρα και δεν υπάρχει σύνδεση του ερείσματος με τη πλάκα σκυροδέματος για την αντιμετώπιση της ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων λόγω της μετακίνησης του υλικού του υπεδάφους. Για την περίπτωση των οδοστρωμάτων με αρμούς χωρίς βλήτρα ο συγκεκριμένος συντελεστής, συνήθως, λαμβάνει τιμές από 3.8 έως 4.4 [AASHTO, 1993].

3.3.9 Συντελεστής αποστράγγισης C_d

Η αποστραγγιστική ικανότητα ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος εκφράζεται μέσω του συντελεστή αποστράγγισης C_d ("Drainage Coefficient"). Ο συντελεστής C_d αντιπροσωπεύει τη σχετική απώλεια αντοχής λόγω των χαρακτηριστικών αποστράγγισης και του συνολικού χρόνου που το οδόστρωμα είναι εκτεθειμένο σε συνθήκες υγρασίας που προσεγγίζουν την κατάσταση κορεσμού. Γενικά, οι στρώσεις που αποστραγγίζονται γρήγορα και δεν φτάνουν σχεδόν ποτέ την κατάσταση κορεσμού μπορούν να έχουν υψηλό συντελεστή αποστράγγισης, όπως την τιμή 1.2, ενώ σε αντίθετη περίπτωση την τιμή 0.8. Αν υποθεθεί ότι η υπόγεια ικανότητα αποστράγγισης θα δημιουργήσει προβλήματα, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες μετρήσεις. Γενικότερα, η χρήση του συντελεστή C_d για την επίλυση του προβλήματος κακής αποστραγγιστικής ικανότητας δεν συνιστάται, καθώς το μεγαλύτερο πάχος πλάκας δεν οδηγεί πάντα στην επίλυση προβλημάτων σχετικών με την ύπαρξη νερού. Για αυτόν τον λόγο παίρνει, συνήθως, την τιμή 1.0, η οποία αντιστοιχεί στις συνθήκες του πειράματος AASHO (κακή αποστραγγιστική ικανότητα) [AASHTO, 1993]. Στον Πίνακα 3.6 καθορίζεται η ποιότητα αποστράγγισης ανάλογα με τον χρόνο απομάκρυνσης του νερού και στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες τιμές του συντελεστή αποστράγγισης C_d .

Πίνακας 3.6 Ποιότητα αποστράγγισης σε συνάρτηση με τον χρόνο απομάκρυνσης νερού κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Ποιότητα αποστράγγισης	Χρόνος απομάκρυνσης νερού
Άριστη	2 ώρες
Καλή	1 μέρα
Μέτρια	1 εβδομάδα
Κακή	1 μήνα
Πολύ κακή	Μη αποστράγγιση νερού

Πίνακας 3.7 Προτεινόμενες τιμές συντελεστών αποστράγγισης Cd σχετικές με την ποιότητα αποστράγγισης κατά AASHTO93 [AASHTO, 1993]

Ποιότητα αποστράγγισης	Ποσοστό χρόνου που το οδόστρωμα εκτίθεται σε ποσοστά υγρασίας που προσεγγίζουν την κατάσταση κορεσμού			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Άριστη	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Καλή	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Μέτρια	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Κακή	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Πολύ κακή	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

3.4 Διαδικασία διαστασιολόγησης

Η μέθοδος “AASHTO93” περιλαμβάνει διαδικασίες διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων οδών (“PCC pavements”) διαφόρων τύπων, οι οποίοι έχουν ήδη αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο, έμφαση δίνεται στη διαδικασία σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (“Jointed Plain Concrete Pavement”, JPCP), τα οποία και χρησιμοποιούνται ευρέως. Γενικά, η διαδικασία σχεδιασμού ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος περιλαμβάνει τον καθορισμό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος με τη χρήση των στοιχείων της κατασκευής και της τοποθεσίας του έργου.

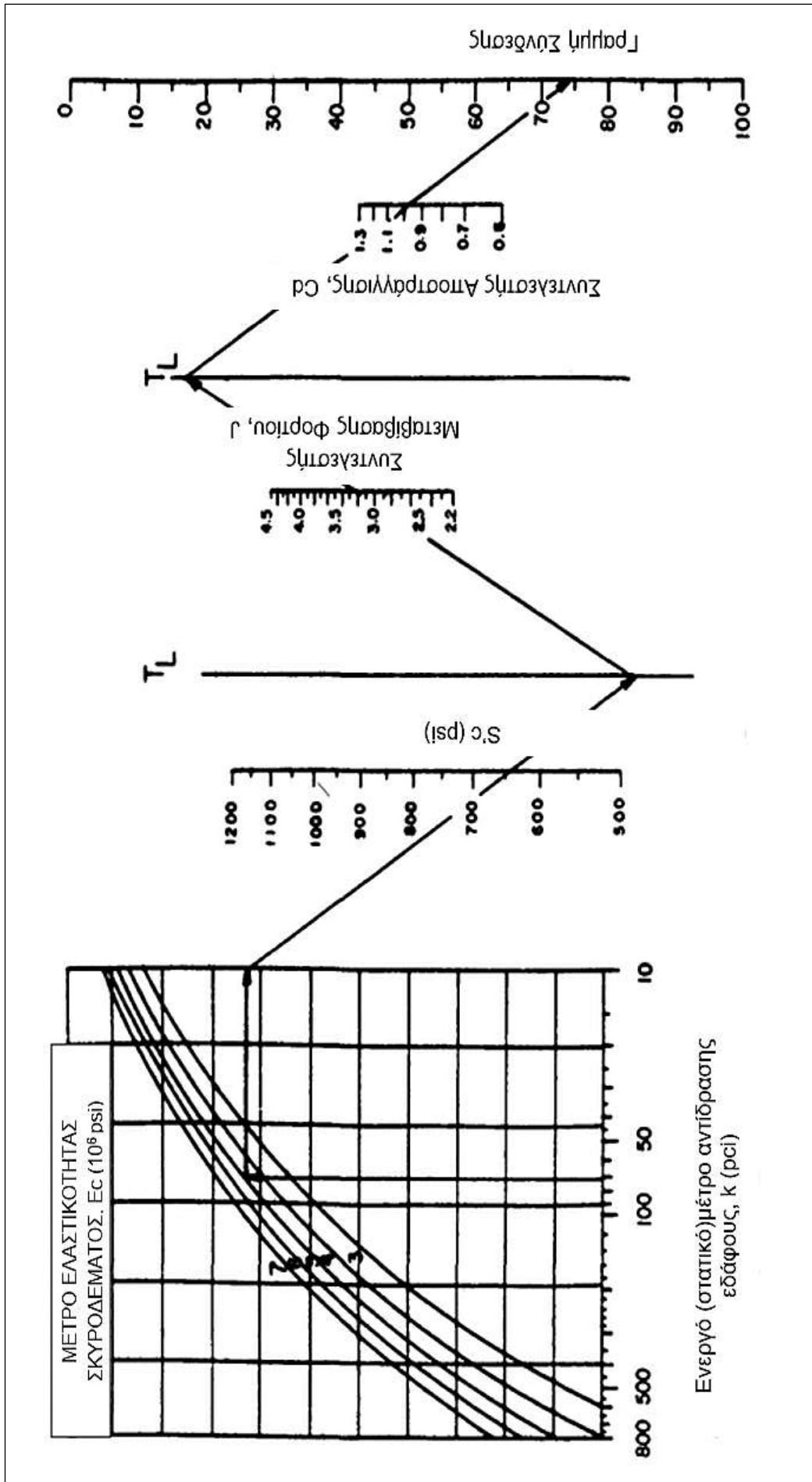
Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης πειραματικών οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του οδικού πειράματος AASHO, προέκυψε η εξίσωση της σχέσης 3.6, σύμφωνα με την οποία μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του πάχους της πλάκας σκυροδέματος ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^{-7}}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_7) \times \log_{10} \left[\frac{(S_e)(C_d)(D^{0.75} - 1.132)}{215.63(f) \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_r}{k}\right)^{0.25}} \right)} \right] \quad (3.6)$$

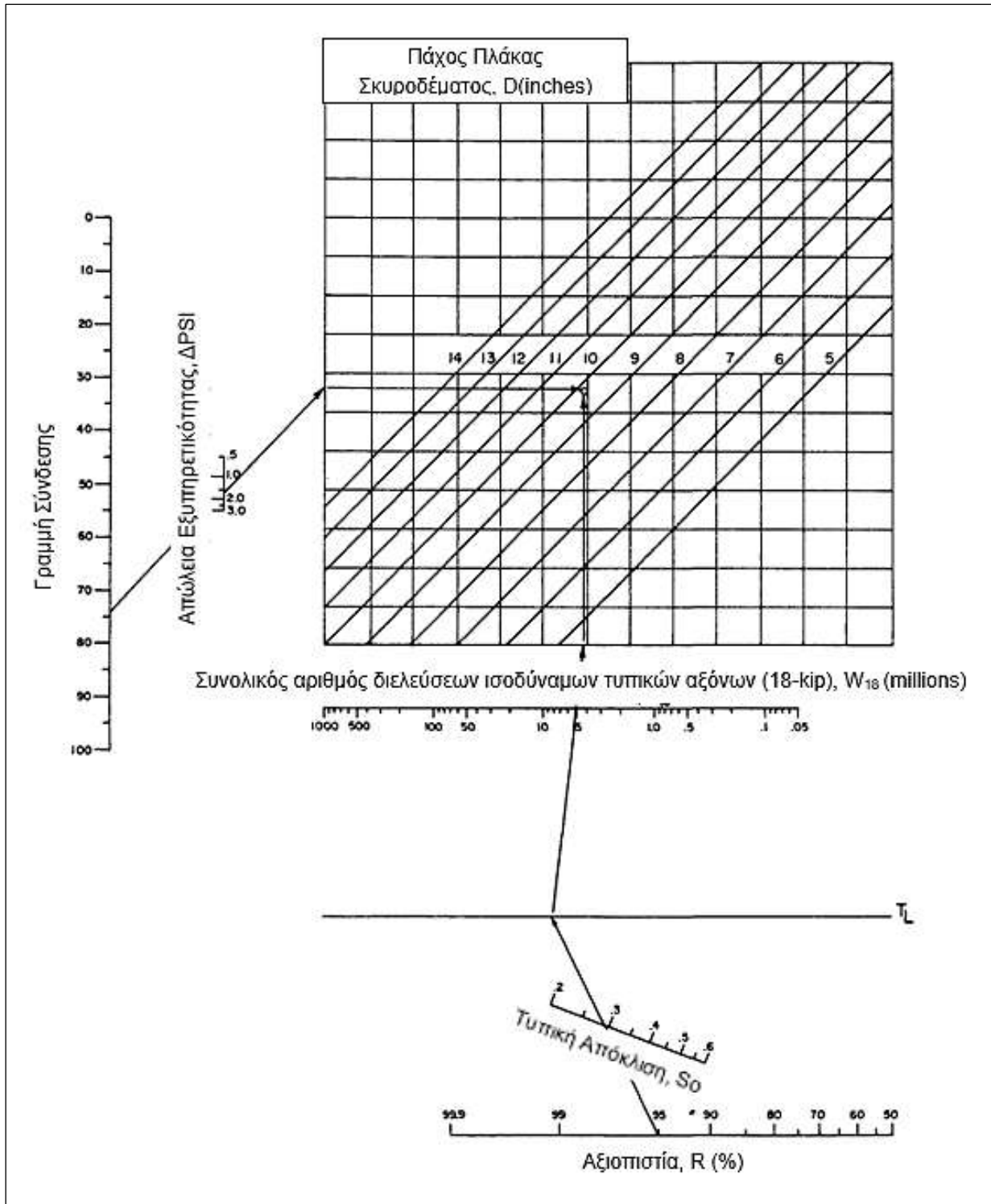
Καθώς η παραπάνω εξίσωση αποτελεί αποτέλεσμα εμπειρικών πειραμάτων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, περιλαμβάνεται ένα επίπεδο αξιοπιστίας σε περίπτωση που ο πραγματικός φόρτος ή οποιοδήποτε άλλο στοιχείο έχει υποτιμηθεί ή υπερεκτιμηθεί. Για τον υπολογισμό του πάχους σκυροδέματος μέσω της παραπάνω εξίσωσης, απαιτείται η χρήση πολλαπλών δοκιμών και υποθέσεων. Αυτό σημαίνει, ότι μετά τον καθορισμό των βασικών παραγόντων σχεδιασμού, πρέπει να γίνει υπόθεση του πάχους της πλάκας (όπως φαίνεται στην εξίσωση, πάχος D), να προσδιοριστεί ο φόρτος κυκλοφορίας σε ESALs για τη περίοδο σχεδιασμού με βάση τη πρόβλεψη της κυκλοφορίας και στη συνέχεια αυτός να συγκριθεί με τον φόρτο που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση με βάση το υποτιθέμενο πάχος. Σε περίπτωση, που οι δύο τιμές κυκλοφοριακού φόρτου δεν είναι σχετικά ίδιες (με απόκλιση περίπου 5%), απαιτείται εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας από την αρχή.

Για την αποφυγή των πολλαπλών δοκιμών και την απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού με τη μέθοδο “AASHTO93”, αναπτύχθηκαν τα νομογραφήματα των Εικόνων 3.18α και 3.18β. Αυτά τα νομογραφήματα, ουσιαστικά, επιλύουν την εξίσωση της σχέσης 3.6 και υπολογίζουν απευθείας το πάχος της πλάκας σκυροδέματος χωρίς την απαίτηση δοκιμών. Έτσι, με την εισαγωγή των κατάλληλων τιμών σχεδιασμού που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.3 και απαιτούνται κατά τη χρήση των νομογραφημάτων, υπολογίζεται το πάχος της πλάκας σκυροδέματος D του οδοστρώματος.

Στο 5^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιείται παράδειγμα διαστασιολόγησης δύσκαμπτου οδοστρώματος σταθμού διοδίων με τη μέθοδο “AASHTO93”, στο πλαίσιο της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της με αυτών της μεθόδου MnPCC-ME.



Εικόνα 3.18α Διάγραμμα προσδιορισμού πάχους πλάκας σκυροδέματος D (συνέχεια στο 3.18β)



Εικόνα 3.18β Διάγραμμα προσδιορισμού πάχους πλάκας σκυροδέματος D (συνέχεια από 3.18α)

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ MnPCC-ME

4.1 Γενικά

Η μέθοδος MnPCC-ME (Minnesota PCC-Mechanistic-Empirical) [Tompkins et al., 2015] είναι μία μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η οποία βασίζεται στη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο της AASHTO: “Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”, MEPDG. Σκοπός της ανάπτυξης της μεθόδου MnPCC-ME, ήταν η αναβάθμιση και η απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων της Μινεσότα, χρησιμοποιώντας τις βαθμονομήσεις της μεθόδου MEPDG. Στα πλαίσια της ανάπτυξης αυτής της μεθόδου και της προσαρμογής της στις τοπικές συνθήκες της Μινεσότα, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες ενέργειες:

- Χρήση τοπικών κλιματικών δεδομένων και δεδομένων κυκλοφορίας “Weigh-In-Motion” της Μινεσότα.
- Ενσωμάτωση προηγούμενων βαθμονομήσεων (“calibrations”) που είχαν εκτελεστεί κατά την ανάπτυξη του λογισμικού MEPDG για τις περιοχές της Μινεσότα.
- Συμπερίληψη προηγμένων χαρακτηριστικών ανάλυσης που υπάρχουν ήδη στο λογισμικό σχεδιασμού του Υπουργείου Μεταφορών της Μινεσότα για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, “MnPAVE Flexible”.

Για την εφαρμογή της μεθόδου MnPCC-ME αναπτύχθηκε το λογισμικό MnPAVE Rigid, το οποίο δημιουργήθηκε για τις τοπικές συνθήκες της Μινεσότα. Ωστόσο, η προσέγγιση που αναπτύχθηκε στη μελέτη της μεθόδου μπορεί να υιοθετηθεί από οδικούς φορείς σε άλλες περιοχές και υπό άλλες συνθήκες, με την προϋπόθεση να συμπίπτουν, όσο το δυνατόν, τα κλιματικά δεδομένα με αυτά των περιοχών της Μινεσότα, ώστε να προκύψει ένα εύλογο αποτέλεσμα πάχους πλάκας σκυροδέματος.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την ανάπτυξη αυτού του λογισμικού δημιουργήθηκε λόγω της ανάγκης του Υπουργείου Μεταφορών της Μινεσότα (“Minnesota Department of Transportation”, MnDOT) για ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε σχέση με τις πολύπλοκες και μη φιλικές προς τον χρήστη διαδικασίες που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς.

Στο πλαίσιο, γενικά, της έρευνας αυτής ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα [Tompkins & Khazanovich, 2014]:

- καθορισμός του μηχανιστικού-εμπειρικού λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της διαδικασίας MnPCC-ME,
- προσδιορισμός των σχεδιαστικών παραμέτρων εισόδου, που απαιτούνται για την εκτέλεσή του μηχανιστικού-εμπειρικού λογισμικού,
- υπολογισμός των παραμέτρων εξόδου των εκτελέσεων αυτών,
- ανάπτυξη βάσης δεδομένων με τη χρήση των παραμέτρων εξόδου και
- δημιουργία ενός απλούστερου συνόλου παραμέτρων εισόδου και εξισώσεων για την ενσωμάτωσή του στο τελικό εργαλείο σχεδιασμού.

Το MnDOT ακολούθησε τέσσερις βασικούς στόχους για την ανάπτυξη της νέας μεθόδου σχεδιασμού για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα [Tomprkins et al., 2015]:

- Μηχανιστικός – Εμπειρικός Σχεδιασμός: Η αντικαταστάτρια διαδικασία πρέπει να βασίζεται στο λογισμικό της μεθόδου MEPDG Version 1.1 της AASHTO.
- Περιορισμένες σχεδιαστικές παράμετροι: Οι παράμετροι εισόδου θα πρέπει να περιοριστούν σε αυτές που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το σχεδιασμό.
- Τοπική προσαρμογή (“Localization”): Πρέπει να εκμεταλλεύεται κλιματικά και κυκλοφοριακά αρχεία δεδομένων της Μινεσότα.
- Προσβάσιμο λογισμικό: Η αναπτυσσόμενη διαδικασία πρέπει να είναι εύκολη στη χρήση και το λογισμικό της να διανέμεται και να συντηρείται εύκολα από το MnDOT.

Εκτός από τα παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος MnPCC-ME περιλαμβάνει ανάλυση αξιοπιστίας, η οποία σχετίζεται με τη μεταβολή του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και τον συντελεστή θραύσης σκυροδέματος. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την ανάλυση αξιοπιστίας αναφέρονται στο κεφάλαιο 4.3.1.

4.2 Ανάπτυξη της μεθόδου MnPCC-ME

4.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το Υπουργείο Μεταφορών της Μινεσότα έχει χρησιμοποιήσει στο παρελθόν το λογισμικό RigidPave για το σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (“Jointed Plain Concrete Pavements”, JPCP) για έργα οδοστρωμάτων στη Μινεσότα. Αυτό το λογισμικό χρησιμοποίησε μία σχεδιαστική διαδικασία βασισμένη στη μέθοδο “AASHTO93” [AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993].

Η μέθοδος “AASHTO93” χρησιμοποιήθηκε στο ερευνητικό έργο “Minnesota Road Research Project” (Mn/ROAD), στο οποίο παρατηρήθηκε με βάση την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και την σύγκρισή της με άλλες μεθόδους,

ότι αποτελεί μία συντηρητική και αναχρονιστική διαδικασία σχεδιασμού. Πληροφοριακά, οι εγκαταστάσεις των δοκιμών του Mn/ROAD βρίσκονται 40 μίλια περίπου βορειοδυτικά της Minneapolis, δόθηκαν στη κυκλοφορία το 1994 και αποτελούνται από 40 εξοπλισμένα τμήματα δοκιμών οδοστρωμάτων των 150m το καθένα, τα οποία χωρίζονται σε 2 ομάδες με διαφορετική κυκλοφοριακή φόρτιση και 3 ομάδες με διαφορετικές περιόδους σχεδιασμού [Burnham & Pirkl, 1997 – Darter & Khazanovich, 2001]. Έτσι, το MnDOT αποφάσισε να αντικαταστήσει το λογισμικό RigidPave με ένα λογισμικό, το οποίο θα είναι βασισμένο σε μία διαδικασία σχεδιασμού που θα συνδυάζει ταυτόχρονα μηχανιστικές και εμπειρικές αρχές σχεδιασμού και δεν θα εξάγει συντηρητικά αποτελέσματα τιμών πάχους πλάκας σκυροδέματος.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι το λογισμικό RigidPave δεν ακολουθούσε πλήρως την διαδικασία της “AASHTO93”, αλλά πραγματοποιήθηκαν ορισμένες προσαρμογές, ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες του MnDOT. Οι προσαρμογές αυτές αφορούσαν την ενσωμάτωση τοπικών χαρακτηριστικών στη διαδικασία με τη χρήση διαθέσιμων κλιματικών αρχείων της Μινεσότα και αρχείων κυκλοφορίας που συγκεντρώθηκαν από την Υπηρεσία Κυκλοφορίας του Υπουργείου Μεταφορών.

Για την αντικατάσταση του λογισμικού RigidPave και την ανάπτυξη του νέου λογισμικού, MnPAVE Rigid, αποφασίστηκε να επιλεγεί μία από τις μηχανιστικές-εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού της AASHTO, οι οποίες ήταν αποτέλεσμα του ερευνητικού έργου NCHRP 1-37A [“National Cooperative Highway Research Program”: NCHRP, 2003]. Το πρώτο λογισμικό σχεδιασμού που προέκυψε από το ερευνητικό έργο NCHRP 1-37A ήταν το “Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedure”, MEPDG [AASHTO, 2009]. Αργότερα, με βάση τα μοντέλα σχεδιασμού, στα οποία βασίστηκε το λογισμικό της MEPDG, αναπτύχθηκαν νέες εκδόσεις της μηχανιστικής-εμπειρικής διαδικασίας της AASHTO. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του λογισμικού MEPDG, όπως η MEPDG 0.91, η MEPDG 1.003 και η προαναφερθείσα MEPDG 1.1.

Μία διαφορετική εναλλακτική για τη βάση του νέου λογισμικού ήταν η χρήση του προγράμματος DARWin-ME [AASHTO, 2011], κατά την οποία παρουσιάστηκαν ορισμένες δυσκολίες σε σχέση με τη γνώση και την εμπειρία πάνω στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, γεγονός που οδήγησε στο να μην χρησιμοποιηθεί. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί, ότι άλλο ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το “Pavement-ME”, το οποίο όμως δεν είχε αναπτυχθεί στις

αρχές της έρευνας της μεθόδου MnPCC-ME, με αποτέλεσμα να μην συμπεριληφθεί ως μία πιθανή βάση του νέου λογισμικού.

Έτσι, λοιπόν, το Υπουργείο Μεταφορών της Μινεσότα ανέπτυξε το 2014 το λογισμικό “MnPAVE Rigid 1.0” για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα, το οποίο βασίστηκε στο λογισμικό της MEPDG Version 1.1. Αργότερα, το 2018 αναβαθμίστηκε στο “MnPAVE Rigid 2.0”, το οποίο έδινε τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει κατηγοριοποιημένα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου, να έχει περισσότερες επιλογές, όσον αφορά στον τύπο και το πάχος της βάσης και το πάχος της υπόβασης και να εξάγει ένα έγγραφο, το οποίο να περιλαμβάνει τις παραμέτρους εισόδου και το πάχος που υπολογίστηκε με βάση αυτές. Ωστόσο, τον Μάιο του 2019 δημοσιεύτηκε η 3^η έκδοση του λογισμικού, “MnPAVE Rigid 3.0”, η οποία είναι ακόμα πιο απλή στη χρήση της, περιορίζοντας τον χρήστη αναφορικά με την επιλογή της κατανομής φορτίου στους άξονες και δημιουργώντας περισσότερες προεπιλεγμένες τιμές, οι οποίες δεν θα μπορούν πλέον να επεξεργαστούν από εξουσιοδοτημένους χρήστες, όπως γινόταν στην 2^η έκδοση. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα πραγματοποιηθεί χρήση της τελευταίας έκδοσης του λογισμικού της διαδικασίας MnPCC-ME, με σκοπό την διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο “AASHTO93”.

4.2.2 Χρήση μεθόδου MEPDG

Για την κατανόηση της μεθόδου MnPCC-ME, είναι σημαντική η ανασκόπηση της μεθόδου MEPDG και του λογισμικού της. Σκοπός της μεθόδου “Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)” είναι η παροχή ενός εργαλείου για τον σχεδιασμό και την ανάλυση νέων και ήδη κατασκευασμένων έργων οδοστρωμάτων, βασισμένο σε μηχανιστικές-εμπειρικές αρχές σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει ότι, η διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης υπολογίζει τις αποκρίσεις του οδοστρώματος (τάσεις, πιέσεις και παραμορφώσεις) και τις χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό της σταδιακής φθοράς του στη διάρκεια του χρόνου. Ουσιαστικά, η διαδικασία συνδέει εμπειρικά την συνολική φθορά με τις παρατηρηθείσες πραγματικές παραμορφώσεις του οδοστρώματος [AASHTO, 2008].

Ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων με τη χρήση του λογισμικού της MEPDG είναι μία επαναληπτική διαδικασία, καθώς αν τα αποτελέσματα δεν πληρούν ορισμένα κριτήρια αποδοτικότητας, η διαδικασία επαναλαμβάνεται και αξιολογείται ξανά, ούτως ώστε οι παράμετροι εισόδου να ακολουθούν τα κριτήρια αυτά και τις αρχές αξιοπιστίας. Οι σχεδιαστικές παράμετροι εισόδου περιλαμβάνουν, κυρίως, το κλίμα (κεφ. 4.2.3), τη κυκλοφορία (κατανομές πλήρους φορτίου για άξονες: “single”, “tandem”, “tridem”)

(κεφ. 4.2.4), τα κριτήρια αποδοτικότητας (κεφ. 4.3.3), τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, τα υλικά, την αποστράγγιση της υπόβασης, τις λεπτομέρειες των αρμών κ.α. [Darter & Khazanovich, 2001]. Οι παράμετροι εισόδου του λογισμικού MEPDG είναι οι μορφές φθοράς (“distresses”) και ο δείκτης ομαλότητας IRI (“International Roughness Index”) του οδοστρώματος και όχι τα πάχη των στρώσεων. Επιπρόσθετα, ο σχεδιαστής παίζει σημαντικό ρόλο και θα πρέπει να εξετάζει την ορθότητα των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών και των υλικών για την ικανοποίηση των κριτηρίων σχεδιασμού για τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν [AASHTO, 2008].

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου σχεδιασμού είναι η κατηγοριοποίηση των παραμέτρων εισόδου [Darter & Khazanovich, 2001] σε:

- Επίπεδο 1 (“Level 1”): απαίτηση από τον μηχανικό για εξασφάλιση των πιο κατάλληλων παραμέτρων εισόδου (π.χ. απευθείας δοκιμές υλικών, επί τόπου δεδομένα WIM και δεδομένα AVC: “automatic vehicle classification” κ.α.).
- Επίπεδο 2 (“Level 2”): απαίτηση δοκιμών, αλλά με την δυνατότητα εκτιμήσεων (π.χ. μέτρο αντίδρασης στρώσης έδρασης / “k-value”, μέτρο θραύσης, μέτρο ελαστικότητας κ.α.).
- Επίπεδο 3 (“Level 3”): χρήση εκτιμώμενων-προεπιλεγμένων (“default”) τιμών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, όσον αφορά στις παραμέτρους του επιπέδου 1 παρουσιάζονται λιγότερα σφάλματα, καθώς οι παράμετροι εισόδου αντιπροσωπεύουν καλύτερα το έργο λόγω των επί τόπου μετρήσεων, ενώ στα άλλα δύο παρουσιάζονται περισσότερα, καθώς οι τιμές στηρίζονται, κυρίως, σε εκτιμήσεις [Darter & Khazanovich, 2001].

Με βάση τη μέθοδο MEPDG, η αποδοτικότητα των οδοστρωμάτων από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς εξαρτάται από τρεις παράγοντες: την ανισοσταθμία μεταξύ γειτονικών πλακών (“faulting”), την εγκάρσια ρηγμάτωση (“transverse cracking”) και την ομαλότητα (μέσω του δείκτη IRI). Καθώς σε όλα τα πρόσφατα κατασκευασμένα έργα “JPCP” της Μινεσότα χρησιμοποιήθηκαν βλήτρα, δεν υπήρχε ανάγκη να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας της ανισοσταθμίας στο νέο λογισμικό σχεδιασμού. Με δεδομένο, επίσης, ότι η ομαλότητα εξαρτάται σημαντικά από την ανισοσταθμία, καθιερώθηκε η εγκάρσια ρηγμάτωση ως το κύριο κριτήριο αποδοτικότητας, το οποίο εξαρτάται από τη τοποθεσία του έργου και τον προβλεπόμενο κυκλοφοριακό φόρτο. [Tomprkins et al., 2015]. Τα κριτήρια αποδοτικότητας του νέου λογισμικού περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.3.3.

Η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος MEPDG χρειάζεται εκατοντάδες παραμέτρους, γεγονός που δυσκολεύει την επιλογή κατάλληλων μεταβλητών για τη δημιουργία της

βάσης δεδομένων. Δεδομένο αυτού, εκτελέστηκαν τρεις κύκλοι αναλύσεων ευαισθησίας, οι οποίοι περιλάμβαναν πάνω από 20,000 εκτελέσεις του λογισμικού της MEPDG, με σκοπό την επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων, οι οποίες κρίθηκαν σημαντικές για τους μηχανικούς της Μινεσότα και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα μηχανιστικά-εμπειρικά μοντέλα.

Οι κυριότερες παράμετροι σχεδιασμού που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο MEPDG είναι οι ακόλουθες [Tompkins & Khazanovich, 2014]:

- περίοδος σχεδιασμού (“design life”): οποιαδήποτε τιμή σε έτη,
- κλίμα: διαφέρει ανάλογα με την περιοχή (“district”) του MnDOT,
- κυκλοφορία: διαφέρει ανάλογα με τον φόρτο, εκφρασμένο σε μέσο ημερήσιο αριθμό βαρέων, εμπορικών οχημάτων κατά τη διάρκεια ενός έτους (EMHK – HCADT), με τον γραμμικό ετήσιο ρυθμό αύξησης και με την κατανομή του φορτίου του οχήματος μέσω των αξόνων του (“axle load spectra”),
- πάχος πλάκας σκυροδέματος (“concrete thickness”): βάση δεδομένων κατασκευασμένη από την εκτέλεση έργων για τιμές από 6 έως 12 inches (15-31 cm),
- μέτρο θραύσης σκυροδέματος (“flexural strength”): βάση δεδομένων κατασκευασμένη από την εκτέλεση έργων με τιμές μέτρου θραύσης σκυροδέματος: 340, 465, 590, 715 ή 840 psi (2.4MPa-5.8MPa).
- απόσταση αρμών (“joint spacing”): 12ft. ή 15ft.,
- πλάτος εξωτερικής λωρίδας (“outer lane width”): 12ft. ή 13ft.,
- απόδοση μεταφοράς φορτίου ερείσματος (“Load Transfer Efficiency”, LTE): 10% ασύνδετο ή AC έρεισμα (“unbound or AC shoulder”) και 40% ασφαλτοστρωμένο έρεισμα (“paved shoulder”).

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν σχεδιαστικές και υπολογιστικές παραδοχές στην επιλογή αυτών των παραμέτρων και των σχετικών τιμών. Για παράδειγμα, η απόσταση των αρμών θα μπορούσε να περιλαμβάνει και τις ενδιάμεσες τιμές των 13ft. και 14ft. Ωστόσο, σκοπός ήταν να απλοποιηθεί η διαδικασία σχεδιασμού, επιλέγοντας βασικές, με μεγάλη επίδραση, παραμέτρους. Άλλες τιμές, οι οποίες ήταν δύσκολο να εκτιμηθούν, όπως η ενεργή μεταφορά φορτίου στο άκρο του ερείσματος για ένα ασφαλτοστρωμένο ή μη έρεισμα, εκτιμήθηκαν από το MnDOT με βάση των συστάσεων της ερευνητικής ομάδας. Επίσης, αφού δεν προσδιορίζεται ο συντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος, η τιμή της παραμέτρου αυτής είναι προεπιλεγμένη [Tompkins et al, 2015]. Οι σχεδιαστικές παράμετροι εισόδου που

χρησιμοποιήθηκαν για όλα τα έργα οδοστρωμάτων (JPCP) στο λογισμικό της MEPDG στο πλαίσιο της ανάπτυξης της μεθόδου MnPCC-ME συνοψίζονται στους Πίνακες 4.1-4.5 [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Πίνακας 4.1 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά MEPDG						
Ισχύουσα διαφορά θερμοκρασίας στρέβλωσης (“curl-warp”)	Τύπος στράγγισης	Σχεδιασμός Αρμών		Ιδιότητες Βάσης		
		Διάμετρος βλήτρου	Απόσταση βλήτρων	Δείκτης διάβρωσης	Διεπιφάνεια με PCC ⁽²⁾	Απώλεια τριβής (“Loss of Friction”)
-10 °F ⁽¹⁾	Υγρός	1, 1.25 ή 1.5 in. (Προδιαγραφές MnDOT)	12in. (31cm)	Ανθεκτικότητα στη διάβρωση (3)	Πλήρης επαφή τριβής	360

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά στρώσης σκυροδέματος MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Χαρακτηριστικά στρώσης σκυροδέματος MEPDG (Layer 1)							
Γενικά		Θερμικά χαρακτηριστικά			Μείγμα PCC		
Ίδιο βάρος	Λόγος Poisson	Συντελεστής θερμικής διαστολής	Θερμική Αγωγιμότητα	Θερμοχωρητικότητα	Περιεκτικότητα σε τσιμέντο	Αναλογία νερού-τσιμέντου	Αδρανές υλικό
150 (lb./ft ³)	0.2	5	1.25 (Btu/ft*h*°F)	0.28 (Btu/lb.*°F)	500 (lb./yd ³)	0.40	Ασβεστό-λιθος

Πίνακας 4.3 Χαρακτηριστικά στρώσης βάσης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Χαρακτηριστικά στρώσης βάσης ^a MEPDG (Layer 2)				
Υλικό	Πάχος	Ιδιότητες υλικού (Level 3)		
		Λόγος Poisson	Ko	Μέτρο ελαστικότητας
A-1-a	4in. (10cm)	0.35	0.5	35,640psi (246MPa)

(1): καθιερώθηκε ως η βέλτιστη για τη μείωση της ρηγμάτωσης κατά τη διάρκεια των κρατικών βαθμονομήσεων [AASHTO, 2008].

(2): προέκυψε από αποτελέσματα εκατοντάδων δοκιμών έργων JPCP για όλους τους τύπους βάσης [AASHTO, 2008].

Πίνακας 4.4 Χαρακτηριστικά στρώσης υπόβασης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Χαρακτηριστικά στρώσης υπόβασης ^β MEPDG (Layer 3)				
Υλικό	Πάχος	Ιδιότητες υλικού (Level 3)		
		Λόγος Poisson	Κο	Μέτρο ελαστικότητας
A-3	12in. (31cm)	0.35	0.5	18,350psi (127Mpa)

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά στρώσης έδρασης MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Χαρακτηριστικά στρώσης έδρασης MEPDG (Layer 4)				
Υλικό	Πάχος	Ιδιότητες αντοχής (Level 3)		
		Λόγος Poisson	Κο	Μέτρο ελαστικότητας
A-6	ημι-άπειρο	0.35	0.5	14,000psi (97MPa)

α: Class 5: κατηγορία υλικού που προκύπτει από πειραματικά τεστ (προδιαγραφές MnDOT).

β: Granular (κοκκώδες): προκύπτει από πειραματικά τεστ (προδιαγραφές MnDOT).

Εκτός από τα παραπάνω, επιλέχθηκαν, συγκεκριμένα, οι ακόλουθοι παράμετροι:

- Περίοδος σχεδιασμού
Επιλέχθηκαν τα 20 έτη.
- Κυκλοφοριακός φόρτος
Επιλέχθηκαν τα 2,000 μέσα ετήσια ημερήσια οχήματα, χωρίς ρυθμό ανάπτυξης κυκλοφορίας.
- Διάμετρος βλήτρων
Προσδιορίζεται ανάλογα με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές του MnDOT που φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 Διάμετρος βλήτρων σύμφωνα με το MnDOT [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Πάχος Πλάκας JPCP (in.)	Διάμετρος βλήτρων (in.)
6-7.5	1
8-10	1.25
10+	1.5

- Ιδιότητες σκυροδέματος

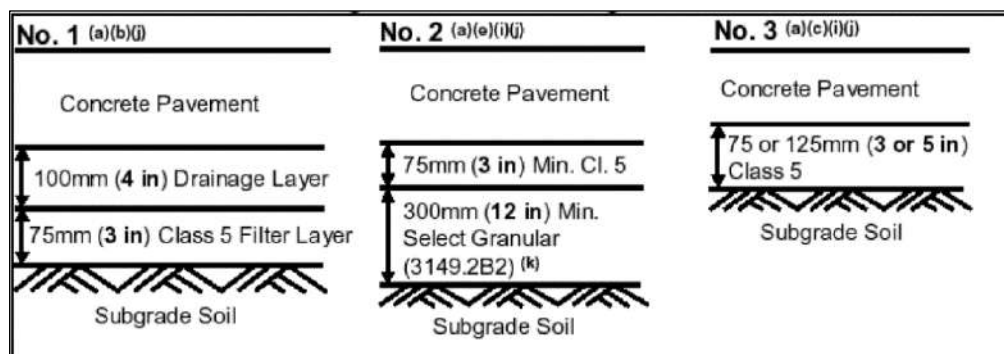
Όλες οι τιμές της στρώσης του σκυροδέματος (“Layer 1”) είναι οι προεπιλεγμένες τιμές (“Level 3”) του λογισμικού της μεθόδου MEPDG [AASHTO,2008].

- Ιδιότητες στρώσης βάσης

Επιλέχθηκε ελάχιστο πάχος βάσης 4inches (10cm), τόσο με βάση το Γεωτεχνικό Εγχειρίδιο του MnDOT (“Geotechnical Manual”) (βλ. Εικόνα 4.1) [Velasquez & Hoegh, 2009], όσο και με το γεγονός ότι στη Μινεσότα έχουν κατασκευαστεί βάσεις μεγάλου πάχους. Επίσης, δεδομένης της μικρής επίδρασης του πάχους της βάσης στο μηχανιστικό μοντέλο κρίθηκε σκόπιμο να μην μεταβάλλεται αυτή η τιμή. Οι ιδιότητες του υλικού της στρώσης συμπίπτουν με τις προτεινόμενες ιδιότητες των υλικών του MnDOT της κατηγορίας Class 5, η οποία χρησιμοποιείται συνηθέστερα. Οι τιμές του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας επιλέχθηκαν, επίσης, με τις προδιαγραφές του MnDOT [Xiao & Tutumluer, 2012] και με βάση την κατηγοριοποίηση της AASHTO (“AASHTO Soil Classification”) (βλ. Εικόνα 4.2), η οποία πραγματοποιείται με βάση τη κοκκομετρική διαβάθμιση, το δείκτη πλαστικότητας και το όριο υδαρότητας του υλικού [AASHTO, 2008].

- Ιδιότητες στρώσης υπόβασης

Η διαδικασία ήταν παρόμοια με αυτή της βάσης. Επιλέχθηκε πάχος υπόβασης σταθερό στις 12inches (31cm) (Εικόνα 4.1) και ιδιότητες υλικού “Granular” με βάση τις προδιαγραφές του MnDOT [Xiao & Tutumluer, 2012]. Ομοίως, προσδιορίστηκαν η κατηγορία υλικού της AASHTO: A-3, ο λόγος Poisson και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης υπόβασης.



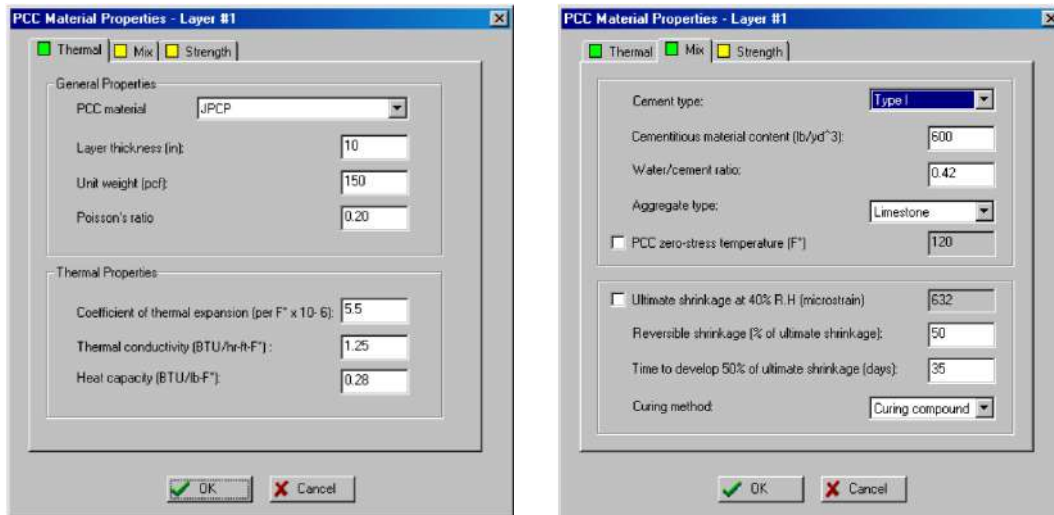
Εικόνα 4.1 Τυπικές σχεδιαστικές τιμές MnDOT για στρώση βάσης και υπόβασης [Velasquez & Hoegh, 2009]

General classification	Granular materials (35% or less passing US No. 200 sieve)			Silt-clay materials (More than 35% passing US No. 200 sieve)							
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Group classification	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Sieve analysis											
Percent passing											
US No. 10 (2 mm)	50 max		51 max								
US No. 40 (420 μ)	30 max	50 max									
US No. 200 (75 μ)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Characteristics of fraction passing US No. 40 (420 μ)											
Liquid limit			Non-plastic	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	6 max			10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Group index	0		0	0		4 max		8 max	12 max	16 max	20 max
Usual types of significant constituent materials	Stone fragments gravel and sand		Fine Sand	Silty or clayey gravel and sand				Silty soils		Clayey soils	
General rating as subgrade	Excellent to good						Fair to poor				

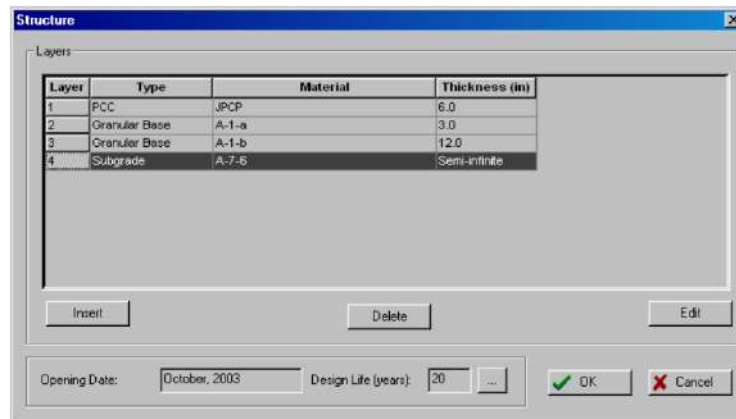
Note: A-8 is identified by visual classification, and is not shown in the Table.
 Classification procedure: Proceeding from left to right in the chart, the correct group will be found by the process of elimination. The first group from the left consistent with the test data is the correct classification. A-7 group is subdivided into A-7-5 or A-7-6 depending on the plastic limit. For $w_p < 30$, the classification is A-7-5; for $w_p \geq 30$, it is A-7-6.

Εικόνα 4.2 Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO

Στις Εικόνες 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται οι οθόνες επεξεργασίας των παραμέτρων εισόδου του σκυροδέματος και της διατομής του οδοστρώματος στο λογισμικό της MEPDG.



Εικόνα 4.3 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων σκυροδέματος λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009]



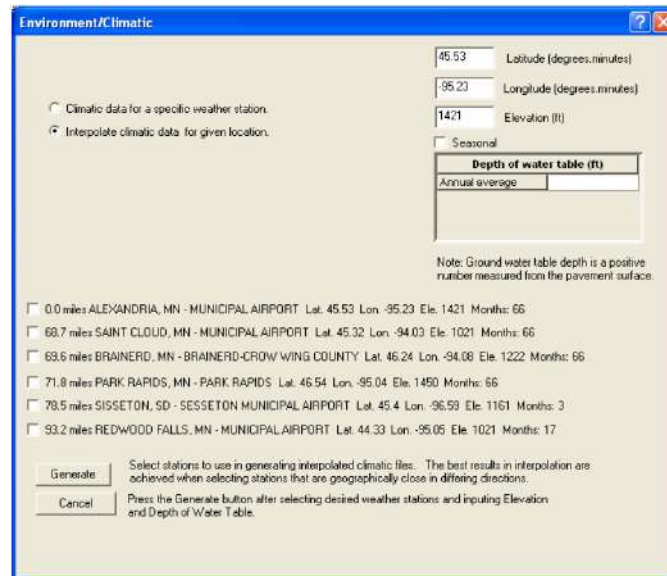
Εικόνα 4.4 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων διατομής οδοστρώματος λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009]

4.2.3 Κλιματικές παράμετροι και ωριαία κλιματολογικά δεδομένα

Μετά από αρκετούς κύκλους αναλύσεων ευαισθησίας καθορίστηκε, ότι η διαδικασία σχεδιασμού θα πρέπει να αντιπροσωπεύει κάθε περιοχή της Μινεσότα που περιλαμβάνει κλιματικό σταθμό ξεχωριστά, με σκοπό την καλύτερη αναπαράσταση των περιβαλλοντικών συνθηκών του εκάστοτε έργου από τους χρήστες. Το MnDOT παρέιχε κλιματικά αρχεία για τοποθεσίες της Μινεσότα στη μορφή σχετικών ωριαίων κλιματικών αρχείων δεδομένων (“Hourly Climate Data”, HCD) [Tompkins & Khazanovich, 2014]. Αυτά τα αρχεία περιλαμβάνουν την ωριαία θερμοκρασία του αέρα, τη βροχόπτωση, τη ταχύτητα του αέρα, τη σχετική υγρασία και τη συννεφοκάλυψη [AASHTO, 2008].

Γενικά, το λογισμικό της MEPDG λαμβάνει κλιματικά δεδομένα από 800 κλιματικούς σταθμούς που έχουν τοποθετηθεί σε αεροδρόμια των Ηνωμένων Πολιτειών [AASHTO, 2008], 15 από τους οποίους βρίσκονται στη Μινεσότα. Το λογισμικό της MEPDG προσομοιώνει τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, χρησιμοποιώντας το βελτιωμένο ενσωματωμένο κλιματικό μοντέλο EICM (“Enhanced Integrated Climatic Model”). Για μία συγκεκριμένη τοποθεσία, το μοντέλο αυτό μπορεί να δημιουργήσει έναν εικονικό κλιματικό σταθμό, εισάγοντας κλιματικά δεδομένα από γειτονικούς σταθμούς [Xiao & Tutumluer, 2012]. Ο χρήστης αρκεί να εισάγει το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και το υψόμετρο της τοποθεσίας του έργου και στη συνέχεια το λογισμικό επιλέγει δεδομένα από 6 κοντινούς σταθμούς της συγκεκριμένης τοποθεσίας του έργου. Σε περίπτωση που υπάρχουν χαμένα δεδομένα κλιματικών αρχείων από τους πραγματικούς σταθμούς, προτείνεται ο συνδυασμός όσο περισσότερων σταθμών γίνεται για την εξομάλυνση των δεδομένων και την εξασφάλιση επαρκών πληροφοριών [NCHRP, 2004]. Ο χρήστης, επίσης, μπορεί να

δει το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το υψόμετρο και τον αριθμό των μηνών των διαθέσιμων αρχείων, επιλέγοντας κλιματικούς σταθμούς του λογισμικού για τη δημιουργία ενός εικονικού σταθμού στη τοποθεσία του έργου για την πρόβλεψη των φθορών [AASHTO, 2008]. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ο πίνακας επεξεργασίας του κλίματος του λογισμικού MEPDG.



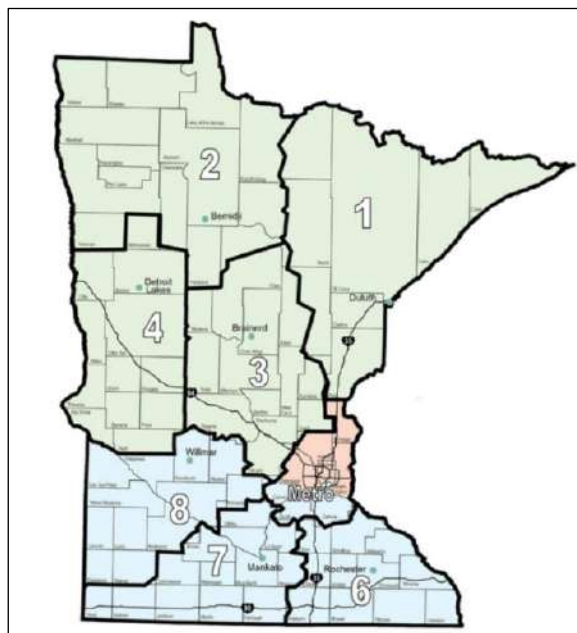
Εικόνα 4.5 Οθόνη εισαγωγής κλιματικών δεδομένων λογισμικού MEPDG [Velasquez & Hoegh, 2009]

Μία δυσκολία στη διαδικασία ενσωμάτωσης των αρχείων αυτών στο μηχανιστικό μοντέλο, ήταν το γεγονός ότι ορισμένα αρχεία παρουσίασαν σφάλματα στην εκτέλεση τους στο λογισμικό της MEPDG και έτσι κατέστη απαραίτητη η σάρωση και αναδιαμόρφωση αυτών των αρχείων, αντικαθιστώντας τις ελλειπείς τιμές με δεδομένα παρεμβολής. Τα ολοκληρωμένα αρχεία HCD χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αρχείων EICM για κάθε περιοχή της Μινεσότα, η οποία χωρίστηκε σε 8 περιοχές (“Districts”) [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Κάθε μία από τις περιοχές της Μινεσότα σχετίζεται με ένα μοναδικό αρχείο ICM, εκτός από την περιοχή 7 (“District 7”), η οποία λαμβάνει τα δεδομένα από το κλιματικό αρχείο του Redwood Falls της περιοχής 8 (“District 8”). Στο Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες χωρίζεται η Μινεσότα και λαμβάνονται τα αρχεία αυτά [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Πίνακας 4.7 Περιοχές κλιματικών αρχείων Μινεσότας [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Περιοχή ("District")	Αρχείο τοποθεσίας και κλίματος
1	Hibbing, Minn.
2	Grand Forks, N. Dak.
3	Brainerd, Minn.
4	Alexandria, Minn.
Metro	Minneapolis–Saint Paul International Airport
6	Rochester, Minn.
7	Redwood Falls, Minn.
8	Redwood Falls, Minn.



Εικόνα 4.6 Κατανομή κλιματικών περιοχών Μινεσότας

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι περιοχές σχετίστηκαν με τα καλύτερα διαθέσιμα κλιματικά αρχεία. Επίσης, επειδή δεν γινόταν να βρεθούν ποιοτικά ωριαία κλιματικά αρχεία δεδομένων για να αντιπροσωπεύσουν τη περιοχή 2 ("District 2"), το MnDOT αποφάσισε ότι, η χρήση δεδομένων από ένα κλιματικό σταθμό κοντά στο Grand Forks ήταν μία αποδεκτή αντικατάσταση.

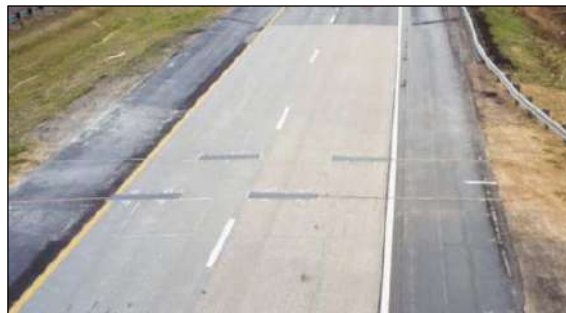
Το συμπέρασμα που βγήκε από όλες τις αναλύσεις ευαισθησίας σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες ήταν, πως τα έργα που τοποθετήθηκαν στη περιοχή "Metro", τα οποία χρησιμοποίησαν τα αρχεία της τοποθεσίας "Minneapolis–St. Paul", εκτελέστηκαν αξιοσημείωτα καλύτερα σε σχέση με πανομοιότυπα έργα σε άλλες περιοχές, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στις συνθήκες "island effect". Για αυτό τον λόγο, ενημερώθηκε το Υπουργείο Μεταφορών, με σκοπό να λάβει υπόψη αυτή τη

παρατήρηση στην ανάπτυξη της νέας μεθόδου, με αποτέλεσμα τα κριτήρια αποδοτικότητας της μεθόδου να διαφοροποιούνται ανάλογα με την τοποθεσία του έργου (“metro” και “non metro”) [Tompkins et al., 2015]. Τα κριτήρια αποδοτικότητας που σχετίζονται με τη τοποθεσία περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.3.3.

4.2.4 Κυκλοφοριακές παράμετροι και προσαρμογή δεδομένων κυκλοφορίας

Η κυκλοφορία της νέας μεθόδου χαρακτηρίζεται από δύο βασικές παραμέτρους, το φόρτο της μέσης ημερήσιας κυκλοφορίας βαρέων, εμπορικών οχημάτων (“heavy commercial average daily truck traffic”, HCADTT) και το γραμμικό ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της κυκλοφορίας (“linear growth rate”) [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Προτού, όμως, γίνει αναφορά στη διαδικασία που ακολούθησε η ερευνητική ομάδα για τη δημιουργία παραμέτρων εισόδου κυκλοφορίας στο λογισμικό της MEPDG για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου MnPCC-ME, αξίζει να γίνει αναφορά στη μέθοδο μέτρησης αξονικών φορτίων WIM και τα δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του λογισμικού της MEPDG. Τα συστήματα της μεθόδου αυτής τοποθετούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν το φορτίο του κάθε άξονα και το συνολικό φορτίο ενός οχήματος καθώς αυτό κινείται (βλ. Εικόνα 4.7), χωρίς να εμποδίζεται η κυκλοφορία, ώστε να μειώνονται οι καθυστερήσεις και να ικανοποιούνται σημαντικά οι χρήστες της οδού [Λοΐζος & Πλατή, 2017].



Εικόνα 4.7 Σύστημα μέτρησης κυκλοφορίας WIM σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

Τα δεδομένα που παρέχονται από τα συστήματα WIM είναι τα ακόλουθα [AASHTO, 2008]:

- Κατανομές αξονικών φορτίων (“Axle-Load Distributions”): single, tandem, tridem, quads.
- Κανονικοποιημένη κατανομή φόρτου βαρέου οχήματος (“Normalized Truck-Volume Distribution”): απαιτείται στην περίπτωση περιορισμένων δεδομένων WIM και αντιπροσωπεύει το ποσοστό κάθε κατηγορίας βαρέου οχήματος στα πλαίσια της διανομής της κυκλοφορίας.

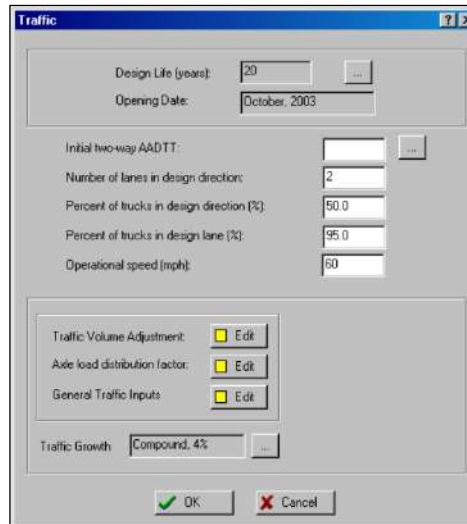
- Διαμορφώσεις αξόνων (“Axle-Load Configuration”): αποστάσεις αξόνων και μεταξονίου (“wheelbase”).
- Μηνιαίοι συντελεστές κατανομής (“Monthly Distribution Factors”): χρησιμοποιούνται για την κατανομή της κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων σε κάθε κατηγορία κατά τη διάρκεια του έτους.
- Ωριαίοι συντελεστές κατανομής (“Hourly Distribution Factors”): χρησιμοποιούνται για την κατανομή της συνολικής κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

Με αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, μπορεί να γίνει συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και ο προσδιορισμός των παραμέτρων εισόδου κυκλοφορίας οχημάτων στο λογισμικό της MEPDG. Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος της AASHTO δεν χρησιμοποιεί τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας, όπως γίνεται στα εμπειρικά μοντέλα σχεδιασμού. Αντιθέτως, το μοντέλο πρόβλεψης της απόδοσης του οδοστρώματος του λογισμικού της MEPDG απαιτεί την εισαγωγή παραμέτρων εισόδου «axle load spectra», που εκτιμώνται για το οδόστρωμα κάθε μήνα στη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού [Yut & Husein, 2007]. Κατά τη προσέγγιση του «load-spectra», τα φορτία χαρακτηρίζονται απευθείας με βάση τον αριθμό των αξόνων, της διαμόρφωσής τους και του βάρους τους και δεν περιλαμβάνονται μετατροπές σε ισοδύναμους άξονες. Γενικότερα, η χρήση αυτής της προσέγγισης είναι περισσότερο περίπλοκη σε σχέση με αυτή των ESALs, όμως και οι δύο χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο και ποιότητα δεδομένων με τη διαφορά ότι η πρώτη μπορεί να είναι πιο ακριβής σε σχέση με τη δεύτερη.

Οι παράμετροι εισόδου κυκλοφορίας που χρειάζονται για το λογισμικό της MEPDG περιγράφονται ακολούθως (βλ. Εικόνες 4.8-4.10) [AASHTO, 2008 - Tompkins & Khazanovich, 2014]:

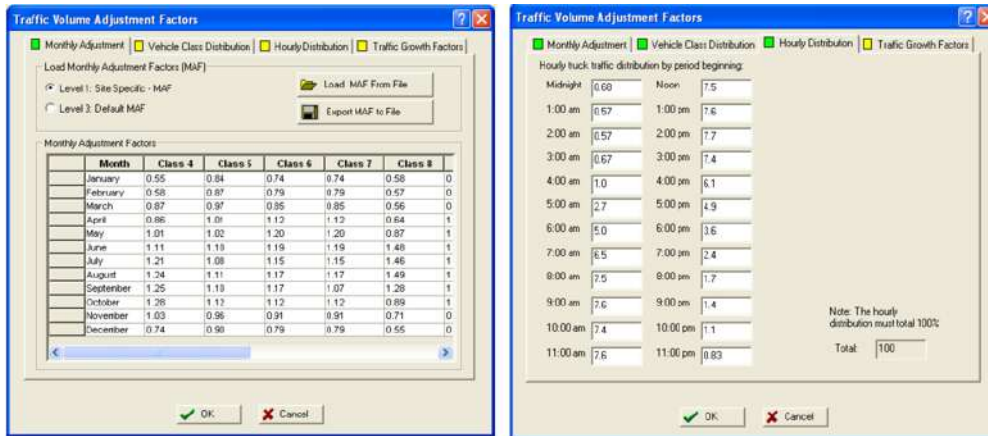
- Φόρτος Κυκλοφορίας (βλ. Εικόνα 4.8)
 - Περίοδος σχεδιασμού: 20 έτη.
 - Ημερομηνία έναρξης (“Opening Date”): από δεδομένα WIM.
 - Αρχική μέση ημερήσια ετήσια κυκλοφορία οχημάτων-φορτηγών 2 κατευθύνσεων AADTT (“Initial Two-way Average Annual Daily Truck Traffic”) : επιλέχθηκε αυθαίρετα $AADTT = 2,000$ και για τις δύο κατευθύνσεις και όλες τις λωρίδες.
 - Αριθμός λωρίδων στη κατεύθυνση σχεδιασμού.
 - Ποσοστό οχημάτων-φορτηγών στη λωρίδα σχεδιασμού: επιλέχθηκε ότι το 100% των οχημάτων βρίσκεται στη λωρίδα σχεδιασμού.

- Ποσοστό οχημάτων-φορηγών στη κατεύθυνση σχεδιασμού: επιλέχθηκε 50%.
- Ταχύτητα Λειτουργίας (“Operational speed”): προεπιλεγμένη τιμή του λογισμικού 60mph.
- Ρυθμός ανάπτυξης κυκλοφορίας: χωρίς ρυθμό ανάπτυξης.



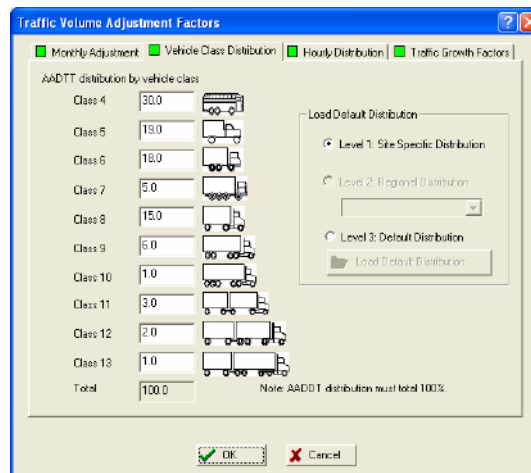
Εικόνα 4.8 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων κυκλοφορίας λογισμικού MEPDG [Velasquez & Huegh, 2009]

- Συντελεστές προσαρμογής φόρτου κυκλοφορίας (“Traffic Volume Adjustment Factors”) (βλ. Εικόνα 4.10-4.11):
 - Μηνιαία προσαρμογή (“Monthly Adjustment”)
 - Διαμόρφωση κατηγορίας οχήματος (“Vehicle Class Distribution”)
 - Ωριαία διαμόρφωση (“Hourly Distribution”)
- Συντελεστές διαμόρφωσης κατανομής άξονα (“Axle Load Distribution Factor”)
- Γενικές παράμετροι εισόδου κυκλοφορίας (“General Traffic Inputs”)
 - Αριθμός αξόνων/φορηγό (“Number Axles/Truck”)
 - Διαμόρφωση άξονα (“Axle Configuration”)
 - Μεταξόνιο (“Wheelbase”)



Εικόνα 4.9 Μηνιαίοι και ωριαίοι συντελεστές προσαρμογής φόρτου κυκλοφορίας λογισμικού MEPDG [Velasque & Huegh, 2009]

Οι συντελεστές της Εικόνας 4.10 λαμβάνονται από τα δεδομένα WIM που παρέχονται από το MnDOT.



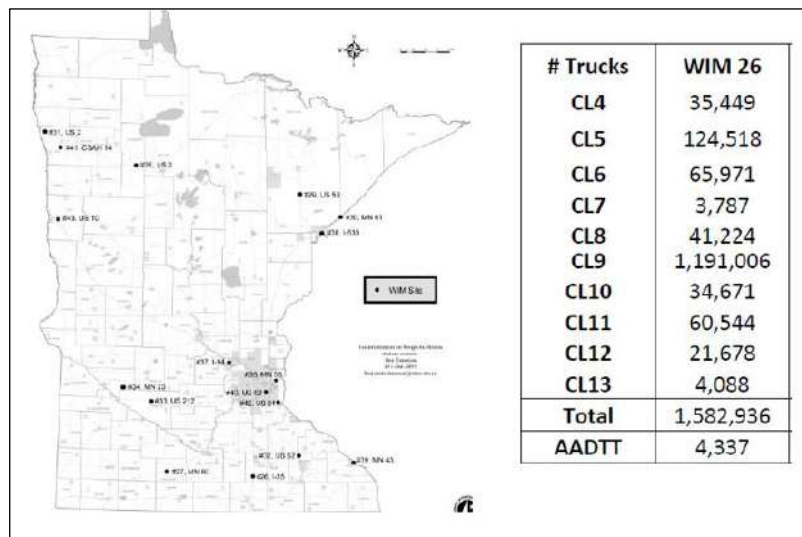
Εικόνα 4.10 Προσαρμογή φόρτου κυκλοφορίας με βάση την κατηγορία οχήματος λογισμικού MEPDG [Velasquez & Huegh, 2009]

Οι κατηγορίες οχημάτων σύμφωνα με το MnDOT, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν και συμπίπτουν με το λογισμικό της MEPDG παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Κατηγορίες βαρέων οχημάτων σύμφωνα με το MnDOT

Κατηγορία ("Class") MnDOT	Περιγραφή
4	2AX 6TIRE
5	3AX SINGLE
6	3AX SEMI
7	4AX SEMI
8	5AX SEMI
9	6AX SEMI
10	TRAILERS, BUSES
11,12,13	TWIN TRAILERS

Το Υπουργείο Μεταφορών της Μινεσότα παρείχε δεδομένα κυκλοφορίας WIM στην ερευνητική ομάδα για την ανάπτυξη των δεδομένων εισόδου κατανομής φορτίου στον άξονα (“axle load spectra”) στο λογισμικό της MEPDG. Στη διάθεση της είχε αρχεία από 11 σταθμούς WIM. Επιλέχθηκε ένα ημερολογιακό έτος (Ιανουάριος έως Δεκέμβριος) για κάθε ένα από τα διαθέσιμα αρχεία WIM. Αυτά τα αρχεία περιλάμβαναν δεδομένα κατανομής φορτίου για τους τρεις τύπους αξόνων “single”, “tandem” και “tridem”, οι οποίοι μετριοούνται ανά κατηγορία οχήματος (“vehicle class”, Πίνακας 4.4). Στην Εικόνα 4.11, παρουσιάζεται ο χάρτης των σταθμών WIM της Μινεσότα, καθώς και ένα παράδειγμα μετρήσεων κυκλοφορίας του σταθμού WIM26.



Εικόνα 4.11 Χάρτης σταθμών WIM της Μινεσότα και μετρήσεις οχημάτων σταθμού WIM 26 [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν τρεις κατανομές φορτίου, οι οποίες περιγράφονται ακολούθως:

1. Προεπιλεγμένη κατανομή φορτίου στον άξονα του λογισμικού της MEPDG (“Default Axle Load Spectra MEPDG”), η οποία λαμβάνει υπόψη τα προεπιλεγμένα αρχεία κατανομής της MEPDG για τους τρεις τύπους αξόνων.
2. Κατανομή φορτίου στον άξονα: “Heavy”. Αναπτύχθηκε με τη χρήση ενός μηνιαίου μέσου όρου δεδομένων WIM για 2 σταθμούς στη Μινεσότα (WIM 33 και WIM 41). Οι σταθμοί αυτοί χαρακτηρίζονταν από την κυκλοφορία των μεγαλύτερων φορτίων αξόνων (βαρέων οχημάτων).
3. Κατανομή φορτίου στον άξονα: “Average” (MnDOT Average). Αναπτύχθηκε με τη χρήση ενός μηνιαίου μέσου όρου δεδομένων WIM για 9 σταθμούς στη Μινεσότα (υπόλοιποι σταθμοί).

Παρ' όλο που υπάρχουν αυτές οι τρεις επιλογές κατανομής, η ερευνητική ομάδα προτείνει τη χρήση της κατανομής "Minnesota Average" ή "MnDOT Average" για όλα τα έργα οδοστρωμάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός δεδομένων κυκλοφορίας WIM για τη συγκεκριμένη κατανομή, με αποτέλεσμα να κριθεί πως όλα τα έργα υπηρετούνται καλύτερα από αυτήν. Στην Εικόνα 4.12, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αναφοράς κυκλοφορίας από Υπουργείο Μεταφορών της Μινεσότα.

BASE YEAR PROPORTIONS		BASE YR. VOLUME	% TREND	FORECAST %	FUTURE VOL.
2AX-6TIRE SU	1.9%	795	1	1.9%	1301
3AX+ SU	0.9%	367	1	0.9%	601
3AX TST	0.1%	25	1	0.1%	41
4AX TST	0.2%	71	1	0.2%	116
5AX+ TST	4.5%	1946	1	4.5%	3184
(5AX+ TST MAX)	0	0	1	0.0%	0
(5AX+ TST OTH)	0	0	1	0.0%	0
TR TR, BUSES	0.4%	172	1	0.4%	282
TWIN TRAILERS	0.1%	34	1	0.1%	55
SUMMARIES:		AADT	HCADT	HCADT %	20 YR DESIGN
0	COUNT:	0	0	#DIV/0!	LANE CUMULATIVE ESAL
2014	FORECAST:	42800	3410	8.0%	
2034	FORECAST:	70100	5580	8.0%	*****
DESIGN LANE FACTOR:		0.45			FLEXIBLE RIGID
					14,591,000 22,739,000

Εικόνα 4.12 Παράδειγμα αναφοράς κυκλοφορίας του MnDOT

Στην πρώτη στήλη της Εικόνας 4.12 ("Base Year Proportions") φαίνονται οι κατηγορίες βαρέων οχημάτων και τα ποσοστά των οχημάτων της κάθε κατηγορίας (HCADT%) του έτους βάσης σε σχέση με τη συνολική κυκλοφορία ("AADT"). Στη δεύτερη στήλη υπολογίζεται ο κυκλοφοριακός φόρτος της κάθε κατηγορίας του έτους βάσης και στη συνέχεια υπολογίζονται τα ESALs στη λωρίδα σχεδιασμού για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα για περίοδο σχεδιασμού 20 έτη. Αυτά τα στοιχεία δίνονται σε μηχανικούς, οι οποίοι δεν είναι σίγουροι για τη χρήση των προεπιλογών του λογισμικού και επιθυμούν να πάρουν μία πλήρως ενημερωμένη απόφαση για την επιλογή της κατανομής φορτίου στον άξονα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η διαστασιολόγηση οδοστρώματος θα πραγματοποιηθεί με την χρήση της προτεινόμενης κατανομής φορτίου ("MnDOT Average") και των προτεινόμενων ποσοστών βαρέων οχημάτων. Γι' αυτό το λόγο, δεν παρατίθεται περαιτέρω ανάλυση, όσον αφορά στην ανάπτυξη και την επιλογή των κατανομών.

4.2.5 Τρόπος ανάπτυξης βάσης δεδομένων

Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου σχεδιασμού για το λογισμικό της MEPDG, η ερευνητική ομάδα μπορούσε να παράγει χιλιάδες έργα οδοστρωμάτων

“JPCP”, των οποίων τα χαρακτηριστικά και η απόδοση θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση των οδοστρωμάτων της Μινεσότα με το μηχανιστικό-εμπειρικό λογισμικό.

Δημιουργήθηκε ένα παραγοντικό από 10,920 έργα οδοστρωμάτων της Μινεσότα στο λογισμικό της MEPDG. Ο συνολικός αριθμός των έργων προσδιορίστηκε από το παραγοντικό των μεταβλητών που φαίνονται στην Εικόνα 4.13.

7	×	3	×	2	×	13	×	5	×	2	×	2	= 10,920
κλίμα		κατανομή φορτίου στον άξονα		πλάτος εξωτερικής λωρίδας		πάχος πλάκας PCC		μέτρο θραύσης PCC		απόσταση αρμών		απόδοση μεταφοράς φορτίου ερείσματος	Συνολικά έργα

Εικόνα 4.13 Παραγοντικό μεταβλητών παραμέτρων εισόδου JPCP έργων

Πίνακας 4.9 Προσδιορισμός τιμών παραγοντικού συνολικού αριθμού έργων JPCP βάσης δεδομένων μεθόδου MnPCC-ME [Velasquez & Huegh, 2009]

Παράμετρος	Περιπτώσεις	Περιγραφή
Τοποθεσία (κλίμα)	7	<ul style="list-style-type: none"> Hibbing, Minn. Grand Forks, N. Dak. Brainerd, Minn. Alexandria, Minn. Minneapolis Rochester, Minn. Redwood Falls, Minn.
Κατανομή φορτίου στον άξονα	3	<ul style="list-style-type: none"> Προεπιλογή MEPDG “Average” “Heavy”
Πλάτος εξωτερικής λωρίδας	2	12ft. ή 13ft.
Πάχος πλάκας σκυροδέματος	13	6-12inches ανά 0.5in. (15-31cm)
Μέτρο θραύσης σκυροδέματος	5	340-840psi ανά 125psi (2.4MPa-5.8MPa)
Απόσταση αρμών	2	12ft. ή 15ft.
Απόδοση μεταφοράς φορτίου ερείσματος	2	10% ή 40%

Οι μεταβλητές και οι σταθερές παράμετροι εισόδου συνολικά σχημάτισαν τη βάση όλων των έργων που εκτελέστηκαν στο λογισμικό της MEPDG. Για να διευκολυνθεί η εκτέλεση πολλών έργων, η ομάδα έρευνας ανέπτυξε μία οπτική μακροεντολή για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, καθώς το λογισμικό της MEPDG επιτρέπει μόνο τη δημιουργία αρχείων “Design Guide Project”, DGP μέσα από το γραφικό περιβάλλον του χρήστη. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης επικυρώθηκαν για να διασφαλιστεί η ακεραιότητά τους [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Δεδομένου ότι η εγκάρσια ρηγμάτωση είναι η κύρια μορφή φθοράς, συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα της “top-down” και “bottom-up” ρηγμάτωσης, που εξήλθαν από το λογισμικό της MEPDG με μία οπτική μακροεντολή για κάθε έργο της βάσης δεδομένων. Αυτά τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν σε ένα αρχείο CSV, το οποίο περιλαμβάνει και όλες τις παραμέτρους που έχουν αναφερθεί προηγουμένως για κάθε ένα από τα 10,920 έργα. Απόσπασμα της βάσης δεδομένων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14.

C1L1H01F1J1E1,MEDEF,HI B,12,1,12,10,6,340,157.2895,2.7085
C1L1H01F1J1E2,MEDEF,HI B,12,1,12,40,6,340,98.0372,1.6004
C1L1H01F1J2E1,MEDEF,HI B,15,1,12,10,6,340,185.0852,2.8841
C1L1H01F1J2E2,MEDEF,HI B,15,1,12,40,6,340,117.6173,1.7415
C1L1H01F2J1E1,MEDEF,HI B,12,1,12,10,6,465,44.4402,0.8277

Εικόνα 4.14 Απόσπασμα βάσης δεδομένων έργων JPCP της διαδικασίας MnPCC-ME [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Αναφέρονται με τη σειρά: Όνομα έργου, κατανομή άξονα, κλίμα, απόσταση αρμών, πλάτος λωρίδας, πλάτος εξωτερικής λωρίδας, απόδοση ερείσματος, πάχος πλάκας, μέτρο θραύσης σκυροδέματος, bottom-up φθορά και top-down φθορά.

4.3 Επιλογή ειδικών παραμέτρων

4.3.1 Ανάλυση αξιοπιστίας

Ένας σημαντικός παράγοντας της μηχανιστικής-εμπειρικής διαδικασίας σχεδιασμού που πρέπει να αναφερθεί είναι η αξιοπιστία R (“Reliability”), η οποία έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό της MEPDG με ένα ομοιόμορφο τρόπο διαμόρφωσης για όλους τους τύπους οδοστρωμάτων. Ο σχεδιαστής μπορεί να προσδιορίζει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας για κάθε μορφή φθοράς και ομαλότητας. Το επίπεδο αξιοπιστίας σχεδιασμού βασίζεται στο γεγονός ότι, το οδόστρωμα μπορεί να φτάσει στην ακραία του κατάσταση νωρίτερα από τη ζωή σχεδιασμού. Έτσι, η αξιοπιστία R αποτελεί την πιθανότητα P, κατά την οποία η προβλεπόμενη φθορά θα είναι λιγότερη από το κρίσιμο επίπεδο μέχρι τη ζωή σχεδιασμού [AASHTO, 2008].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη διαδικασία καθιερώθηκε μόνο η εγκάρσια ρηγμάτωση ως η κύρια μορφή φθοράς (και όχι η ανισοσταθμία και ο δείκτης IRI), πράγμα που σημαίνει, ότι τα επίπεδα αξιοπιστίας καθορίζονται από το επίπεδο ρηγμάτωσης. Η αξιοπιστία σχεδιασμού καθορίζεται για την εγκάρσια ρηγμάτωση ως εξής: $R = P$ (ποσοστό ρηγμάτωσης πλάκας < κρίσιμο ποσοστό ρηγμάτωσης) [AASHTO, 2008].

Υπήρχαν δύο επιλογές για την ανάλυση αξιοπιστίας της διαδικασίας. Η πρώτη ήταν η ανάλυση αξιοπιστίας της MEPDG και η δεύτερη η ανάλυση αξιοπιστίας βασισμένη στη προσομοίωση Monte-Carlo, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό MnPAVE Flexible και εφαρμόζεται με μεταβολές στα πάχη και τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων. Η προσομοίωση Monte-Carlo περιλαμβάνει την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων, στις οποίες μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι, ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή τους σε κάποιο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση της έρευνας αυτής, το αποτέλεσμα είναι η προβλεπόμενη εγκάρσια ρηγμάτωση και οι τιμές που μεταβάλλονται είναι το πάχος της πλάκας και το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος. Δεδομένου, λοιπόν, ενός επιπέδου αξιοπιστίας, το λογισμικό χρησιμοποιεί την κατανομή της εγκάρσιας ρηγμάτωσης για να εξάγει τη τιμή του πάχους σχεδιασμού που συνάδει με αυτό το επίπεδο [Tompkins & Khazanovich, 2014].

Το μέτρο θραύσης σκυροδέματος αποτέλεσε παράγοντα που απασχόλησε αρκετά τα μέλη της ερευνητικής ομάδας, καθώς είναι μία παράμετρος που επηρεάζει αρκετά το σχεδιασμό οδοστρωμάτων της μηχανιστικής-εμπειρικής διαδικασίας, αλλά και επειδή υπάρχουν πολλά εμπειρικά δεδομένα που αποδεικνύουν τη σημασία του σε σχέση με την αντοχή και γενικότερα την απόδοση του οδοστρώματος. Η τιμή του μέτρου θραύσης μετά από πολλές αναλύσεις σε δοκιμές αντοχής δοκών και σύμφωνα με την ανάλυση αξιοπιστίας της προσομοίωσης Monte-Carlo, επιλέχθηκε να έχει σταθερή τιμή στο λογισμικό σχεδιασμού ίσο με 4.48MPa (650psi). Αυτή η τιμή επιλέχθηκε, καθώς είναι κοντά στο μέσο όρο που προέκυψε από στατιστικές αναλύσεις του MnDOT.

Ωστόσο, αναπτύχθηκαν συντελεστές μεταβλητότητας COV ("Coefficient of Variation") για την ενσωμάτωση της επίδρασης της μεταβολής του μέτρου θραύσης και της πλάκας σκυροδέματος στη διαδικασία. Για την ανάπτυξή τους, η ερευνητική ομάδα απέκτησε ορισμένα δεδομένα δοκιμών πάχους και αντοχής δοκών από την Υπηρεσία Σχεδιασμού Σκυροδέματος ("Concrete Design Office") του MnDOT. Έτσι, η ανάλυση αξιοπιστίας της προσομοίωσης Monte-Carlo υπέθεσε τιμές βασισμένες στα δεδομένα αυτών των δοκιμών: COV μέτρου θραύσης: 8.61% και COV πάχους πλάκας: 4.43%.

Στους Πίνακες 4.10 και Πίνακας 4.11 συνοψίζονται οι στατιστικές αναλύσεις που διεξήχθησαν πάνω σε αυτά τα δεδομένα.

Πίνακας 4.10 Σύνοψη στατιστικής ανάλυσης σε δοκιμές παχών πλάκας σκυροδέματος για την εύρεση του COV πάχους πλάκας [Tompkins & Khazanovich, 2014]

Πάχος PCC (in.)	Αριθμός Έργων	Πλήθος κορμών	COV (%)
6 έως 7.5	9	448	7.34
8 έως 10	35	2,507	4.58
10.5+	18	1,430	2.67
Σύνολο	62	4,385	4.43

Πίνακας 4.11 Σύνοψη στατιστικής ανάλυσης σε δοκιμές θραύσης δοκών για την εύρεση του COV μέτρου θραύσης [Tompkins & Khazanovich, 2014]

	Αριθμός Έργων	Πλήθος δοκών	COV (%)
Σύνολο	42	7,592	8.61

Οι συντελεστές μεταβλητότητας, αρχικά, ήταν δυνατό να μεταβληθούν στο λογισμικό MnPAVE Rigid 1.0 από εξουσιοδοτημένους χρήστες [Tompkins et al., 2015].

4.3.2 Υπολογισμός εγκάρσιας ρηγμάτωσης και φθοράς

Δεδομένου ότι, το λογισμικό σχεδιασμού υπολογίζει τη ρηγμάτωση κατευθείαν από τις διαθέσιμες πληροφορίες φθοράς της βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού της MEPDG, είναι ικανό να προσαρμόζει την τιμή των συντελεστών εγκάρσιας ρηγμάτωσης. Το μοντέλο εγκάρσιας ρηγμάτωσης εκφράζεται στη μέθοδο MEPDG [AASHTO, 2008] από τη σχέση 4.1:

$$CRK = \frac{1}{C4 + FD^{C5}} \quad (4.1)$$

όπου:

- C4: σταθερά βαθμονόμησης από AASHTO, τιμή = 1.0.
- C5: σταθερά βαθμονόμησης από AASHTO, τιμή = -1.98.
- CRK: ποσοστό ρωγμών πλάκας από “top-down” και “bottom-up” εγκάρσια ρηγμάτωση.
- FD: φθορά από κόπωση πλάκας (“fatigue damage”) “top-down” και “bottom-up”, υπολογίζεται από τις σχέσεις (4.2) και (4.3):

$$FD = \sum \frac{N_{i,j,k,l,m,n}}{N_{i,j,k,l,m,n}} \quad (4.2)$$

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \cdot \left(\frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2} \quad (4.3)$$

όπου:

- $N_{i,j,k,l,m,n}$: επιτρεπόμενος αριθμός εφαρμογών φόρτισης δεδομένων των συνθηκών i, j, k, l, m, n .
- $n_{i,j,k,l,m,n}$: αριθμός εφαρμογών φόρτισης στις συνθήκες i, j, k, l, m, n .
- MR $_i$: μέτρο θραύσης σκυροδέματος PCC στην ηλικία i (psi).
- $\sigma_{i,j,k,l,m,n}$: κρίσιμη ένταση στις συνθήκες i, j, k, l, m, n .
- C $_1$: σταθερά βαθμονόμησης, τιμή = 2.0 (AASHTO).
- C $_2$: σταθερά βαθμονόμησης, τιμή = 1.22 (AASHTO).
- i : ηλικία, j : μήνας, k : τύπος άξονα (“single”, “tandem” ή “tridem”), l : επίπεδο φόρτισης, m : διαφορά θερμοκρασίας, n : δρόμος κυκλοφορίας.

Ένας από τους λόγους για τους οποίους το MnDOT βασίστηκε στη μέθοδο MEPDG για τη βάση δεδομένων του, ήταν πως οι συντελεστές ρηγμάτωσης που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενες βαθμονομήσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα έργα της βάσης δεδομένων για τη Μινεσότα. Κατά συνέπεια, οι συντελεστές βαθμονόμησης C $_4$ και C $_5$ για έργα στη Μινεσότα λαμβάνουν τις τιμές 0.9 και -2.64, αντίστοιχα [Velasquez & Hoegh, 2009].

4.3.3 Κριτήρια αποδοτικότητας

Τα κριτήρια αποδοτικότητας (“Performance Criteria”) χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί, ότι ο σχεδιασμός του οδοστρώματος θα αποδώσει ικανοποιητικά μέχρι τη περίοδο σχεδιασμού του [AASHTO, 2008]. Ως κριτήρια αποδοτικότητας επιλέχθηκαν η εγκάρσια ρηγμάτωση και τα επίπεδα αξιοπιστίας, απόφαση που προήλθε από προτάσεις της AASHTO και τους δημιουργούς του λογισμικού της MEPDG, τα οποία εξαρτώνται από τον φόρτο κυκλοφορίας και την τοποθεσία του έργου. Επίσης, έγινε διαχωρισμός ανάμεσα σε περιοχές “Metro” και “Non-metro”. Κρίθηκε ότι, οι αυτοκινητόδρομοι με μεγαλύτερο φόρτο θα πρέπει να υποβάλλονται σε πιο αυστηρά σχεδιαστικά κριτήρια. Στον Πίνακα 4.12 περιγράφονται τα παραπάνω κριτήρια αποδοτικότητας. Τα συνολικά οχήματα μέχρι τη περίοδο ζωής σχεδιασμού υπολογίστηκαν από το λογισμικό σχεδιασμού με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο, τη γραμμική ανάπτυξή του και τη διάρκεια ζωής [Tomprkins & Khazanovich, 2014].

Πίνακας 4.12 Κριτήρια αποδοτικότητας μεθόδου MnPCC-ME με βάση τα συνολικά οχήματα και την τοποθεσία του έργου [Tomprkins & Khazanovich, 2014]

	Περιοχή			
	Metro		Non-metro	
Συνολικός αριθμός οχημάτων	Αξιοπιστία (%)	Ρηγμάτωση (%)	Αξιοπιστία (%)	Ρηγμάτωση (%)
≤6.5 εκατ.	75	6.5	50	15
6.5 έως 13 εκατ.	90	6.5	75	15
≥13 εκατ.	97.5	6.5	90	15

4.4 Λογισμικό MnPAVE Rigid

4.4.1 Ανάπτυξη και μεταβολές λογισμικού

Το Υπουργείο Μεταφορών της Μινεσότα ανέπτυξε το 2014 το λογισμικό MnPAVE-Rigid 1.0 για το σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, το οποίο αναβαθμίστηκε, τον Μάιο του 2018, στο MnPAVE Rigid 2.0. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε επέκταση στη βάση δεδομένων, η οποία είχε αναπτυχθεί με την M-E μέθοδο σχεδιασμού (MEPDG). Οι βασικές αλλαγές από το ένα λογισμικό στο άλλο, που είναι αποτέλεσμα 21,168 προσομοιώσεων έργων και πολλών αναλύσεων ευαισθησίας, παρουσιάζονται ακολούθως [Tomprkins, 2018]:

- Δυνατότητα επιλογής 3 τύπων βάσης (βλ. Εικόνα 4.15):
 - Class 5
 - Class 5Q
 - Open-graded Aggregate
- Δυνατότητα επιλογής πάχους βάσης: 4inches ή 12inches (για την επίλυση προβλημάτων στο κλιματικό μοντέλο) (βλ. Εικόνα 4.15).
- Δυνατότητα επιλογής πάχους υποβάσης: 12inches ή 4inches (αλλάζει ανάλογα με το πάχος της βάσης) (βλ. Εικόνα 4.15).

MEPDG Structure - Layer 1 - JPCP							
PCC General		PCC Thermal			PCC Mix		
Unit Weight	Poisson's Ratio	COTE	Thermal Conductivity	Heat Capacity	Cement content	W/C Ratio	Aggregate
150	0.2	5	1.25	0.28	500	0.40	Limestone

MEPDG Structure - Layer 2 - Base					
Material	Thickness	Strength Properties - Level 3			Notes
		Poisson's	CoLP, Ko	Modulus	
Class 5	4 or 12	0.35	0.5	35640	MnDOT gradation; modulus from MnDOT lab
Class 5 Quality	4 or 12	0.35	0.5	45000	MnDOT gradation; MnDOT est. modulus
Open-Graded Agg	4 or 12	0.35	0.5	45000	MnDOT gradation; MnDOT est. modulus

MEPDG Structure - Layer 3 - Subbase					
Material	Thickness	Strength Properties - Level 3			Notes
		Poisson's	CoLP, Ko	Modulus	
A-3	12 or 4	0.35	0.5	18350	Values est Select Granular; modulus from MnDOT lab; composite base thickness: 16 in. avoids EICM issues

MEPDG Structure - Layer 4 - Subgrade					
Material	Thickness	Strength Properties - Level 3			
		Poisson's	CoLP, Ko	Modulus	
A-6	Semi-Infinite	0.35	0.5	14000	

Εικόνα 4.15 Αλλαγές παραμέτρων εισόδου βάσης δεδομένων διαδικασίας MnPCC-ME στο λογισμικό MEPDG [Tomprkins, 2018]

- Προεπιλογή κατάλληλης κατανομής φορτίου στον άξονα ("axle load spectra") ανάλογα με τις παραμέτρους κυκλοφορίας που εισάγει ο χρήστης.
- Δυνατότητα επιλογής αριθμού λωρίδων και ανάπτυξη ενός συντελεστή λωρίδας σχεδιασμού D_f (Πίνακας 4.13), ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τα συνολικά βάρη εμπορικά οχήματα έως την περίοδο σχεδιασμού T_f . Ο φόρτος

κυκλοφορίας που χρησιμοποιείται στα κριτήρια αξιοπιστίας και αποδοτικότητας και στους υπολογισμούς φθοράς ονομάζεται T_r και ισούται με $T_r = D_f \cdot T_t$.

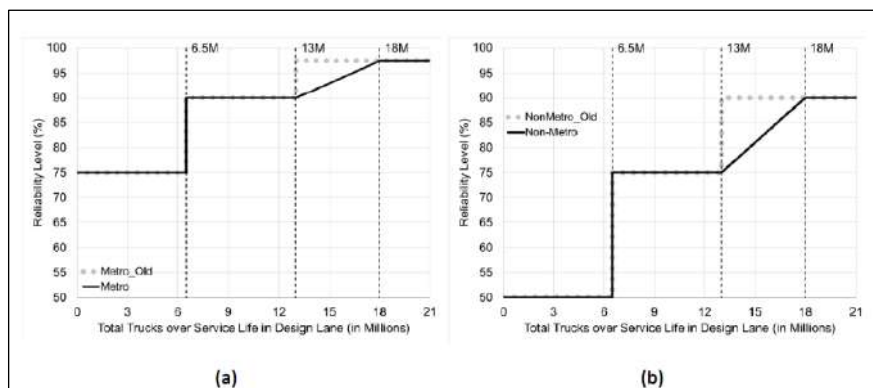
Πίνακας 4.13 Κυκλοφοριακός συντελεστής λωρίδας σχεδιασμού [Tompkins, 2018]

Αριθμός λωρίδων	2	4	6	8+
D_f	1.0	0.9	0.7	0.6

- Διαφοροποίηση κριτηρίων αποδοτικότητας (βλ. Εικόνα 4.16) για την αντιμετώπιση της ύπαρξης “άλματος” (βλ. Εικόνα 4.17), όσον αφορά στο πάχος σχεδιασμού σε περίπτωση που τα οχήματα ξεπερνούν τα 13 εκατομμύρια.

Total heavy commercial trucks over service life (T_r)	Metro		All other districts	
	Reliability	Cracking	Reliability	Cracking
6.5M or less	75%	6.5%	50%	15%
6.5M to 13M	90%	6.5%	75%	15%
13M to 18M	$1.5(T_r - 13) + 90$	6.5%	$3(T_r - 13) + 75$	15%
18M or more	97.5%	6.5%	90%	15%

Εικόνα 4.16 Αλλαγές κριτηρίων αποδοτικότητας με βάση την τοποθεσία και τον κυκλοφοριακό φόρτο [Tompkins, 2018]



Εικόνα 4.17 Νέα κριτήρια αξιοπιστίας για περιοχές Metro και non-Metro [Tompkins, 2018]

Τον Μάιο του 2019, δημοσιεύτηκε η 3^η έκδοση του λογισμικού, το MnPAVE Rigid 3.0: rigid (PCC) pavement design, το οποίο διαφοροποιείται μερικώς από την 2^η έκδοση. Η κύρια διαφορά είναι, ότι στην επιλογή του “Axle Loads” υπάρχει μόνο η δυνατότητα

επιλογής της κατανομής “MnDOT Average” και πως δεν υπάρχει η δυνατότητα για την εξουσιοδοτημένη αλλαγή των προεπιλεγμένων τιμών της μεθόδου σχεδιασμού. Επίσης, στο “Axle Loads” MnDOT Average αλλάζει το ποσοστό της κατηγορίας οχημάτων 11 (“Class 11”, “Twin Trailers”) από 0.1% σε 0.8%. Άλλη μία διαφορά είναι, πως η τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας του πάχους πλάκας σκυροδέματος είναι: $COV = 3.0\%$ και όχι 4.43% . Ωστόσο, δεν υπάρχουν διαθέσιμες περαιτέρω λεπτομέρειες για τις αλλαγές ανάμεσα στα δύο λογισμικά από το MnDOT, καθώς η τελευταία έκδοση του λογισμικού είναι αρκετά πρόσφατη. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος με την τελευταία έκδοση του λογισμικού, η οποία είναι διαθέσιμη από το MnDOT.

4.4.2 Δεδομένα εισόδου

Η διαδικασία σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MnPAVE Rigid Version 3.0, απαιτεί τον καθορισμό και την εισαγωγή διάφορων δεδομένων (βλ. Εικόνα 4.18) [MnDOT, 2019].

The screenshot displays the MnPAVE Rigid 3.0 software interface. The window title is "MnPAVE Rigid 3.0". The menu bar includes "File", "Edit", "Options", and "Help". The toolbar contains icons for file operations and help. The main interface is divided into several sections:

- Project Information:** Includes a dropdown for "Rigid (Concrete)", "Design Life" set to 20 years, "Project Number" set to 1, "Letting Date" set to 6/10/2021, "Route" field, "Reference Post (RP)" field, "District" set to Metro, "Designer" set to Kyriakou Charalampia, "Soils Engineer" field, and a "Notes" button.
- Traffic:** Includes "HCADT" set to 2000, "Growth Rate" set to 2.0%, "Number of Lanes (two-way)" set to 2, "Axle Loads" set to MnDOT Average, "Joint Spacing" set to 15 ft., and checkboxes for "Widened Outer Lane" and "Tied PCC Shoulder".
- Structure:** Includes a table for material thicknesses:

Material	Thickness in.
PCC	8.9
Class 5	4.0
Select Granular	12.0
Subgrade	

The status bar at the bottom left shows "Ready". The MnPAVE logo and version information (Version 3.0, May 2019, © 2001-2019, Department of Transportation) are visible on the right side.

Εικόνα 4.18 Περιβάλλον λογισμικού MnPAVE Rigid Version 3.0

Συγκεκριμένα, η διαδικασία χρήσης του λογισμικού περιγράφεται λεπτομερώς με τα ακόλουθα βήματα:

- Εισαγωγή αριθμού έργου στο κελί “Project Number”.
- Εισαγωγή ημερομηνίας στο κελί “Letting Date”.

- Εισαγωγή ονόματος οδού στο κελί “Route”.
- Εισαγωγή σχεδιαστή στο κελί “Designer”.
- Εισαγωγή γεωτεχνικού μηχανικού στο κελί “Soils Engineer”.
- Εισαγωγή οποιασδήποτε σημείωσης, πατώντας το κελί “Notes”.
- Εισαγωγή περιόδου σχεδιασμού στο κελί “Design Life”: προτείνονται 20 ή 35 έτη.
- Επιλογή περιοχής έργου από την λίστα “District”.
- Εισαγωγή στο κελί “HCADT” (“Heavy Commercial Average Daily Traffic”) Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας Βαρέων, Εμπορικών Οχημάτων (ΕΜΗΚ), που λαμβάνεται από τις προβλέψεις κυκλοφορίας του έργου. Αν στη πρόβλεψη κυκλοφορίας υπάρχει μόνο μία κατεύθυνση, τότε διπλασιάζεται η συγκεκριμένη τιμή.
- Εισαγωγή του ρυθμού ανάπτυξης της κυκλοφορίας στο κελί “Growth Rate”. Η τιμή αυτή είναι ο ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης για τη πρόβλεψη της κυκλοφορίας του έργου.
- Επιλογή συνολικού αριθμού λωρίδων στο κελί “Number of Lanes” και των δύο κατευθύνσεων. Αν υπάρχει μόνο μία λωρίδα επιλέγω τον αριθμό 2.
- Προεπιλογή κατανομής φορτίου στον άξονα “MnDOT Average” στο κελί “Axle Loads”, το οποίο μπορεί επεξεργαστεί σε περίπτωση που η πρόβλεψη κυκλοφορίας περιλαμβάνει την κατανομή, γεγονός που δεν προτείνεται από τη μέθοδο, παρά μόνο σε πολύ ειδικές περιπτώσεις.
- Επιλογή τύπου βάσης: “Class5”, “Class 5Q”, “Open Graded” και πάχους βάσης: 4 ή 12 inches, αναλόγως τι αντιπροσωπεύει καλύτερα τον προτεινόμενο σχεδιασμό (σε περίπτωση επικάλυψης της πλάκας συνίστανται οι 12 inches).
- Επιλογή πάχους υπόβασης: 12 ή 4 inches (αλλάζει αντίστροφα με την επιλογή του πάχους της βάσης).
- Επιλογή “Widened Outer Lane” σε περίπτωση, που ισχύει ένα από τα παρακάτω:
 - Η εξωτερική λωρίδα θα διαστρωθεί τουλάχιστον 1 ft. πέρα από την μαρκαρισμένη άκρη.
 - Η εξωτερική λωρίδα θα διαστρωθεί τον ίδιο χρόνο με το έρεισμα και οι αρμοί θα περιλαμβάνουν βλήτρα.
 - Η εξωτερική λωρίδα θα περιλαμβάνει κράσπεδο και υδρορροή.

- Επιλογή “Tied PCC Shoulder” σε περίπτωση, που η εξωτερική λωρίδα σκυροδέματος θα στρωθεί ξεχωριστά από το έρεισμα σκυροδέματος ή το κράσπεδο ή την υδρορροή και θα περιλαμβάνονται βλήτρα.
- Εισαγωγή απόστασης αρμών στο κελί “Joint Spacing”: 12 ή 15ft. Η απόσταση αρμών θα πρέπει να συνάδει με τις απαιτήσεις του οδηγού σχεδιασμού οδοστρωμάτων του MnDOT, ανάλογα με το πάχος σχεδιασμού που υπολογίστηκε.

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

5.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της συγκριτικής αξιολόγησης των δύο μεθόδων, θα γίνει αναφορά των ομοιοτήτων και των διαφορών των βασικών αρχών και παραδοχών τους, καθώς επίσης και των παραμέτρων εισόδου σχεδιασμού που απαιτούνται για τον καθορισμό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, θα πραγματοποιηθεί διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος δαπέδου σταθμού διοδίων και με τις δύο μεθόδους σχεδιασμού, με σκοπό να διαπιστωθεί στην πράξη η επίδραση των διαφορετικών θεωρήσεων στα αποτελέσματα. Τα δεδομένα σχεδιασμού επιλέγονται, όσο το δυνατό, ίδια για τις δύο μεθόδους, ώστε να είναι εύλογη η σύγκρισή τους στη συνέχεια.

5.2 Σύγκριση χαρακτηριστικών μεθόδων

Γενικά, πολλοί μελετητές, όπως ο Carvalho et al. [2006] έχουν εκφράσει τη δυσκολία σύγκρισης μεταξύ των εμπειρικών και μηχανιστικών μοντέλων σχεδιασμού λόγω της ανισότητας του αριθμού των παραμέτρων εισόδου και των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών που χρειάζονται οι δύο μέθοδοι [Kam et al., 2019]. Ακολουθως, αναφέρονται ορισμένες βασικές διαφοροποιήσεις που μπορούν να εντοπιστούν στις δύο αυτές μεθόδους.

Μία από τις βασικότερες διαφοροποιήσεις των δύο μεθόδων είναι το γεγονός ότι η μέθοδος "AASHTO93" βασίζεται στις αναλύσεις αποτελεσμάτων του οδικού πειράματος AASHTO, ενώ η μέθοδος MnPCC-ME βασίζεται σε μηχανιστικά-εμπειρικά εργαλεία σχεδιασμού της AASHTO (MEPDG). Αυτό σημαίνει, ότι η πρώτη μέθοδος είναι περισσότερο εμπειρική, ενώ η δεύτερη στηρίζεται περισσότερο σε θεωρητικές αναλύσεις.

Μία, επίσης, καίρια διαφορά της εμπειρικής και της μηχανιστικής-εμπειρικής διαδικασίας είναι ότι, η πρώτη δεν υπολογίζει την προβλεπόμενη φθορά για τον καθορισμό της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών πάνω στην οποία βασίζεται το μηχανιστικό μοντέλο [AASHTO, 2008].

Όσον αφορά στην ανάλυση αξιοπιστίας, η μέθοδος "AASHTO93" δίνει κυρίως βάση στη μεταβολή της προβλεπόμενης κυκλοφορίας με τη λογική ότι, όσο μεγαλύτερος είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το επίπεδο

αξιοπιστίας. Επομένως, η τιμή του εξαρτάται από την κατηγορία της οδού. Η ανάλυση αξιοπιστίας του MnPCC-ME ακολουθεί τη προσομοίωση Monte-Carlo, σύμφωνα με την οποία οι παράγοντες που επιδρούν περισσότερο στο σχεδιασμό είναι το πάχος της πλάκας και το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος, με βάση τα οποία υπολογίζεται η εγκάρσια ρηγμάτωση. Πρέπει να σημειωθεί, πως ο χρήστης της νέας μεθόδου δεν έχει τη δυνατότητα να επιλέξει επίπεδο αξιοπιστίας, καθώς αυτό αποτελεί προεπιλεγμένη τιμή και έχει ληφθεί υπόψη κατά την ανάπτυξη του λογισμικού, σε αντίθεση με την “AASHTO93” στην οποία επιλέγεται από γνωστό πίνακα.

Για τις κλιματικές παραμέτρους, η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος χρησιμοποιεί πραγματικά κλιματικά δεδομένα από κλιματικούς σταθμούς που υπάρχουν στη Μινεσότα, ενώ η εμπειρική μέθοδος σχετίζει την επίδραση του περιβάλλοντος με τους συντελεστές αποστράγγισης, την απώλεια εξυπηρετικότητας και το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους M_R [Kam et al., 2019].

Αναφορικά με την πρόβλεψη κυκλοφορίας, με τη μέθοδο “AASHTO93” προσδιορίζεται αθροιστικά για τη περίοδο σχεδιασμού, εκφρασμένη σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες, σε αντίθεση με τη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί την κατανομή του φορτίου στους άξονες (“axle load spectra”), κατά την οποία δεν γίνεται μετατροπή των φορτίων σε έναν μονό άξονα, αλλά λαμβάνονται τα φορτία του κάθε άξονα ξεχωριστά. Η διαφορά στον προσδιορισμό του τελικού αριθμού οχημάτων με τις δύο μεθόδους δεν είναι σημαντική, όμως η χρήση του “axle load spectra” δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα και είναι περισσότερο θεωρητική προσέγγιση, γι’ αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται λόγω των πιθανών μελλοντικών διαφοροποιήσεων στα φορτία και στις διαμορφώσεις των αξόνων [Roesler et al., 2000].

Σημαντική κατασκευαστική διαφορά είναι, πως τα οδοστρώματα που κατασκευάζονται με τη μέθοδο “AASHTO93”, συνήθως, αποτελούνται από την πλάκα σκυροδέματος και τη στρώση υπόβασης, ενώ στη μέθοδο MnPCC-ME προστίθεται και μία στρώση βάσης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος “AASHTO93” δεν λαμβάνει υπόψη απευθείας τις απαιτήσεις των κατασκευαστικών ιδιαιτεροτήτων, παρά μόνο έμμεσα με τον συντελεστή μεταβίβασης φορτίου, σε αντίθεση με τη μέθοδο MnPCC-ME, στην οποία επιλέγεται η απόσταση των αρμών και η κατασκευή της εξωτερικής λωρίδας και του ερείσματος.

Σε ότι αφορά τις παραμέτρους εισόδου σχεδιασμού, η διαδικασία της μεθόδου “AASHTO93” απαιτεί την εισαγωγή περιορισμένου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με τη μηχανιστική διαδικασία MEDPG, η οποία χρειάζεται περισσότερες από 100 παραμέτρους εισόδου. Ωστόσο, με την απλοποίηση που έγινε στα πλαίσια της

δημιουργίας της νέας διαδικασίας MnPCC-ME του MnDOT και του λογισμικού MnPAVE Rigid, η διαδικασία είναι περισσότερο τυποποιημένη και ο χρήστης δεν χρειάζεται να εισάγει μεγάλο αριθμό παραμέτρων.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συγκριτικά οι βασικές αρχές-παραδοχές που αντιπροσωπεύουν την κάθε μέθοδο.

Πίνακας 5.1 Σύγκριση βασικών αρχών-παραδοχών μεθόδων

Βασικές Αρχές-Παραδοχές Μεθόδων		
	“AASHTO93”	MnPCC-ME
Γενικά	Εμπειρική	Μηχανιστική-Εμπειρική
Βασίζεται σε	Πείραμα AASHTO, Illinois	Βαθμονομήσεις MEPDG Οδοστρώματα Minnesota
Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	Μέσω του συντελεστή μεταβίβασης φορτίου J	Επιλογή χαρακτηριστικών εξωτερικής λωρίδας και ερείσματος
Ανάλυση αξιοπιστίας	Κυκλοφοριακός φόρτος, Κατηγορία οδού, Περιοχή Έργου	Διακύμανση πάχους και μέτρου θραύσης σκυροδέματος (προσομοίωση Monte-Carlo)
Κριτήρια Αποδοτικότητας	Εξυπηρετικότητα, Απώλεια Στήριξης	Αξιοπιστία, Εγκάρσια ρηγμάτωση, Κυκλοφοριακός φόρτος, Περιοχή έργου
Κυκλοφορία	ESALs	“Axle Load Spectra”/MnDOT Average
Επίδραση κλίματος	C _d , ΔPSI, M _R	Κλιματικά δεδομένα Minnesota
Υπολογισμός φθοράς	Μέσω του ΔPSI	Μέσω της εγκάρσιας ρηγμάτωσης
Ύπαρξη στρώσης βάσης	Όχι	Ναι
Μέτρο Θραύσης Σκυροδέματος	Εκτίμηση	Προεπιλεγμένη τιμή (650psi)
Αποκλίσεις	Τυπική απόκλιση S _o	Συντελεστές διακύμανσης πάχους και μέτρου θραύσης σκυροδέματος
Υλικά και πάχη στρώσεων	Δυνατότητα επιλογής	Επιλογή προεπιλεγμένων τιμών

Αξίζει να σημειωθεί, ότι με βάση τις αναλύσεις και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων σχεδιασμού οδοστρωμάτων με την εμπειρική μέθοδο “AASHTO93” και την μέθοδο MEPDG από διάφορους μελετητές, όπως οι Ahammed et al. [2011] και Li et al. [2010], προέκυψε το συμπέρασμα, ότι τα περισσότερα αποτελέσματα πάχους της μεθόδου “AASHTO93” ήταν πιο συντηρητικά [Kam et al., 2019].

5.3 Πειραματικές αναλύσεις

5.3.1 Περιγραφή δεδομένων

Για την ανάδειξη των διαφορών των αποτελεσμάτων των δύο υπό διερεύνηση μεθόδων, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται πειραματική ανάλυση για τη διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος δαπέδου σταθμού διοδίων.

Το οδόστρωμα του δαπέδου του σταθμού διοδίων που θα διαστασιολογηθεί, περιλαμβάνει πλάκες σκυροδέματος με αρμούς, οι οποίοι διαθέτουν μηχανισμό μεταβίβασης φορτίου (βλήτρα) κατά μήκος των ασυνεχειών (έργο JPCP). Η απόσταση των αρμών επιλέχθηκε 4.6m και δεν υπάρχει μηχανισμός σύνδεσης του ερείσματος με τη πλάκα σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι κατηγορίας C40/50, το οποίο έχει χαρακτηριστική αντοχή θλίψης κυλινδρικού δοκιμίου $f_{ck} = 40\text{MPa}$ (Πίνακας 2.1). Επομένως, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίζεται από τη σχέση 3.4 με βάση το συγκεκριμένο f_{ck} και ισούται με $E_c = 29,670\text{MPa}$. Το μέτρο θραύσης του σκυροδέματος εκτιμήθηκε ίσο με $S_c = 4.48\text{MPa}$ μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του υπεδάφους πάνω στο οποίο θα κατασκευαστεί το συγκεκριμένο οδόστρωμα, πρόκειται για αργιλικό έδαφος, για το οποίο εκτιμήθηκε το μέτρο αντίδρασης εδάφους ίσο με $k = 196\text{MN/m}^3$.

Το οδόστρωμα θα σχεδιαστεί για αυτοκινητόδρομο που βρίσκεται σε υπεραστική περιοχή (Υπεραστική οδός I-394, Minneapolis-St.Paul) με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο. Για αυτόν τον λόγο, απαιτείται η επιλογή υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας κατά την διαδικασία διαστασιολόγησής του.

Για την κυκλοφορία, επιλέχθηκαν ως περίοδος σχεδιασμού οδοστρώματος τα 20 έτη, τα οποία αποτελούν μία ρεαλιστική τιμή για ένα νέο οδόστρωμα και προτείνονται συνηθέστερα από τις δύο μεθόδους, ΕΜΗΚ (ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία) βαρέων-εμπορικών οχημάτων τα 1,000 οχήματα στη λωρίδα σχεδιασμού και ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας 2%, τιμή εύλογη σχετικά με την κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού και την οικονομική ανάπτυξη της περιβάλλουσας περιοχής. Οι κατηγορίες των

βαρέων-εμπορικών οχημάτων, καθώς και το ποσοστό των οχημάτων κάθε μίας από αυτές τις κατηγορίες σε σχέση με τη συνολική κυκλοφορία οχημάτων του αυτοκινητοδρόμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Κατηγορίες και ποσοστά βαρέων οχημάτων εφαρμογής μεθόδων

Κατηγορίες βαρέων οχημάτων	Περιγραφή	Ποσοστό βαρέων
4	Φορτηγό 2-αξόνων	1.90%
5	Φορτηγό 3-αξόνων	0.90%
6	Ρυμουλκό ημιρυμουλκούμενο 3-αξόνων	0.10%
7	Ρυμουλκό ημιρυμουλκούμενο 4-αξόνων	0.20%
8	Ρυμουλκό ημιρυμουλκούμενο 5-αξόνων	4.50%
10	Λεωφορείο, ημιφορτηγό	0.40%
11	Δίδυμο ρυμουλκούμενο	0.80%

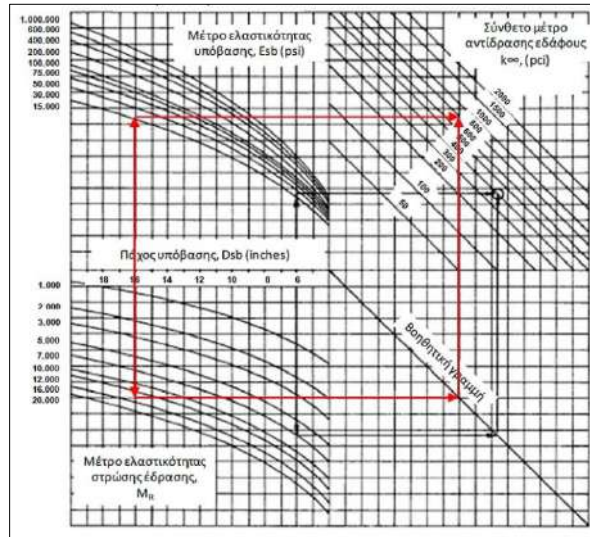
5.3.2 Υπολογισμός διατομής με τη μέθοδο “AASHTO93”

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος από σκυρόδεμα του σταθμού διοδίων με τη μέθοδο “AASHTO93” θα πραγματοποιηθεί με βάση τα δεδομένα σχεδιασμού που περιεγράφηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Εκτός αυτού, για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος με αυτή τη μέθοδο, απαιτείται η γνώση του υλικού και του πάχους της υπόβασης. Η πλάκα σκυροδέματος εδράζεται σε υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο (“unbound granular”) με μέτρο ελαστικότητας $E_{sub} = 127\text{MPa}$ και πάχος $h_{sub} = 41\text{cm}$.

Η επιλογή των παραμέτρων εισόδου των νομογραφημάτων της μεθόδου “AASHTO93” θα γίνει σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στοιχεία σχεδιασμού. Σημειώνεται ότι τα νομογραφήματα χρησιμοποιούν το Αγγλοσαξονικό Σύστημα Μονάδων, επομένως απαιτούνται ορισμένες μετατροπές. Ακολουθως, επισημαίνονται οι παράμετροι σχεδιασμού:

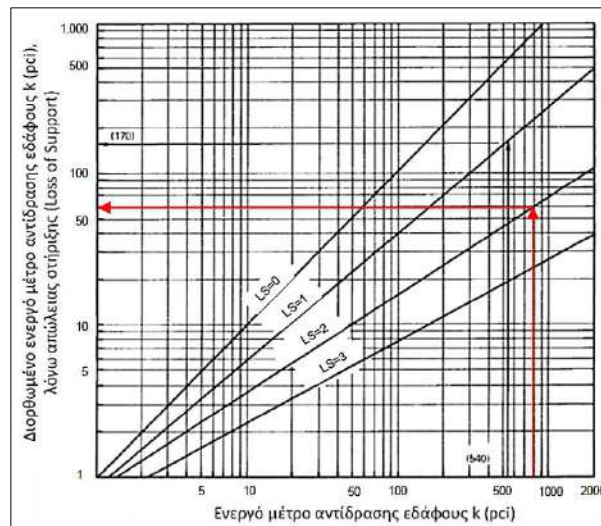
- ❖ Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος είναι $E_c = 29,670\text{MPa} = 4.3 \cdot 10^6\text{psi}$.
- ❖ Με δεδομένο το μέτρο αντίδρασης εδάφους $k = 196\text{MN/m}^3 = 722\text{psi}$ και τη χρήση της σχέσης 3.5 υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ίσο με $M_R = 14,000\text{psi}$. Γνωρίζοντας το M_R , το πάχος της υπόβασης $h_{sub} = 41\text{cm} = 16\text{in}$ και το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης $E_{sub} = 127\text{MPa} = 18,350\text{psi}$, υπολογίζεται το

σύνθετο μέτρο αντίδρασης υπεδάφους $k_{\infty} = 800 \text{ pci}$ με τη χρήση του νομογραφήματος της Εικόνας 5.1.



Εικόνα 5.1 Υπολογισμός σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{∞}

Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει διόρθωση του σύνθετου μέτρου αντίδρασης εδάφους k_{∞} λόγω της απώλειας στήριξης της πλάκας σκυροδέματος. Από τον Πίνακα 3.5, επιλέγεται $LS = 2$ για στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο. Για $LS = 2$ και $k_{\infty} = 800 \text{ pci}$, υπολογίζεται το διορθωμένο μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους $k' = 60 \text{ pci}$ με τη χρήση του νομογραφήματος της Εικόνας 5.2.



Εικόνα 5.2 Υπολογισμός διορθωμένου μέτρου αντίδρασης εδάφους k' λόγω απώλειας στήριξης LS

- ❖ Το μέτρο θραύσης σκυροδέματος λαμβάνεται ίσο με $Sc = 4.48 \text{ MPa} = 650 \text{ psi}$.
- ❖ Ο συντελεστής μεταβίβασης φορτίου λόγω τοποθέτησης βλήτρων για έργα “JPCP” επιλέγεται $J = 3.2$ (κεφ. 3.3.8).

- ❖ Ο συντελεστής αποστράγγισης επιλέγεται $C_d = 1.0$ με βάση τον Πίνακα 3.7 για κακή αποστραγγιστική ικανότητα, τιμή η οποία προτείνεται από την μέθοδο “AASHTO93”, αλλά επιλέγεται και λόγω των υλικών της υπόβασης και της στρώσης έδρασης, τα οποία είναι κυρίως αμμώδη και αργιλικά και χαρακτηρίζονται από μικρή διαπερατότητα.
- ❖ Η απώλεια εξυπηρετικότητας υπολογίζεται από τη σχέση 3.3. Η μέθοδος προτείνει για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα τη τιμή 4.5 ως αρχική τιμή p_i και τη τιμή 2.5 για τις περιπτώσεις των αυτοκινητοδρόμων: $\Delta PSI = 4.5 - 2.5 = 2.0$.
- ❖ Το επίπεδο αξιοπιστίας για αυτοκινητόδρομο υπεραστικής περιοχής και υψηλού κυκλοφοριακού φόρτου επιλέγεται 90% με βάση τον Πίνακα 3.4.
- ❖ Η μέθοδος προτείνει η τυπική απόκλιση να κυμαίνεται από 0.30 έως 0.40 για δύσκαμπτο οδόστρωμα, επομένως επιλέγεται η τιμή $S_o = 0.35$.
- ❖ Για την εύρεση των ισοδύναμων τυπικών αξόνων χρησιμοποιούνται τα ποσοστά βαρέων-εμπορικών οχημάτων του Πίνακα 5.1 και η ΕΜΗΚ βαρέων οχημάτων = 1,000. Αρχικά, υπολογίζεται ο συνολικός φόρτος οχημάτων στα 11,364 οχήματα, διαιρώντας την ΕΜΗΚ των βαρέων οχημάτων με το συνολικό ποσοστό τους (1,000/8.80%) του 1^{ου} έτους και στη συνέχεια ο φόρτος κυκλοφορίας της κάθε κατηγορίας, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή ισοδυναμίας. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζονται τα ΙΤΑ του 1^{ου} έτους. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 5.3 Διαδικασία υπολογισμού ισοδύναμων τυπικών αξόνων 1^{ου} έτους

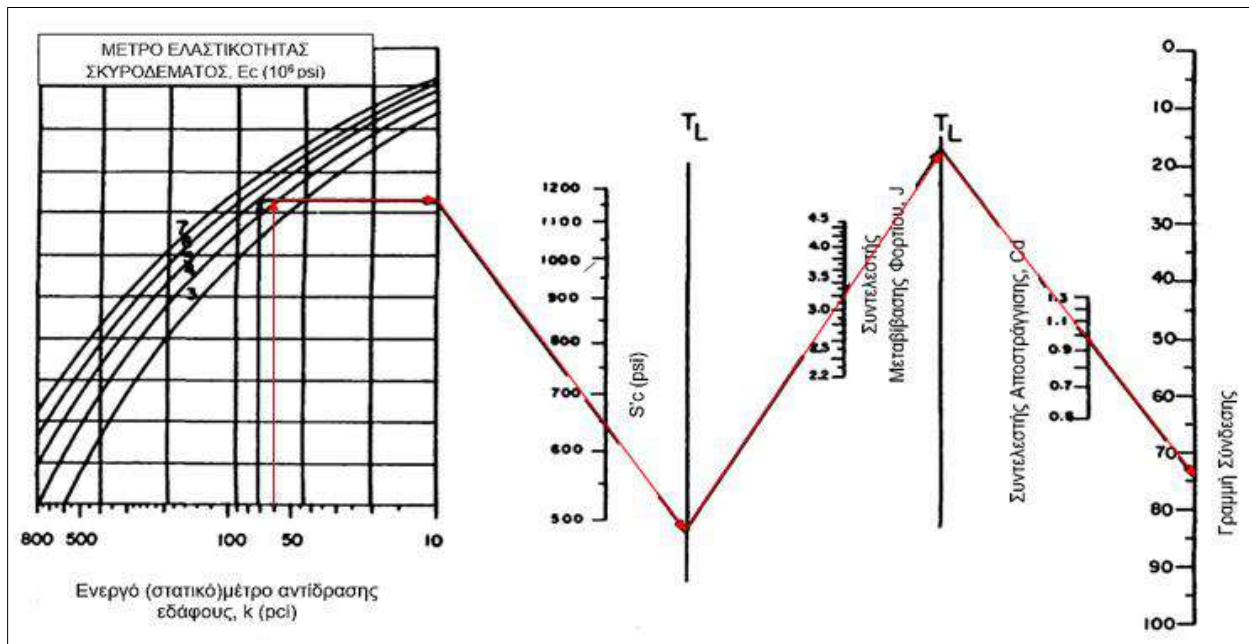
Κατηγορίες βαρέων οχημάτων	Ποσοστό βαρέων οχημάτων 1 ^{ου} έτους	Φόρτος κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων 1 ^{ου} έτους	Συντελεστής Ισοδυναμίας ⁽¹⁾	ΙΤΑ ημερήσια	ΙΤΑ 1 ^{ου} έτους
4	1.90%	216	0.24	52	18,914
5	0.90%	102	0.85	87	31,730
6	0.10%	11	0.37	4	1,535
7	0.20%	23	0.53	12	4,397
8	4.50%	511	1.89	966	352,764
10	0.40%	45	0.74	34	12,277
11	0.80%	91	2.33	212	77,314
Σύνολο	8.80%	1,000			498,930 = N₁

(1): Οι συντελεστές ισοδυναμίας λήφθηκαν από τον οδηγό πρόβλεψης κυκλοφορίας του MnDOT (“Mn/DOT Procedure Manual for Forecasting Traffic on Minnesota’s Highway Systems”) [Mn/DOT Office of Transportation Data and Analysis, 2012].

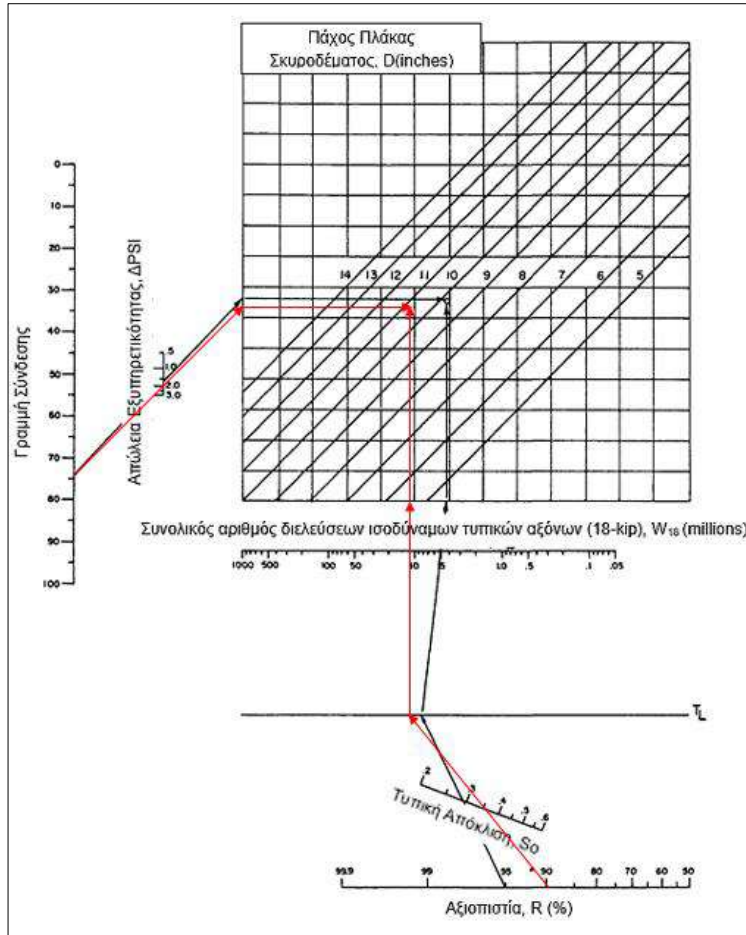
Από τον παραπάνω πίνακα υπολογίζεται ο φόρτος κυκλοφορίας του 1^{ου} έτους $N_1 = 498,930$ ΙΤΑ. Ο συνολικός φόρτος κυκλοφορίας υπολογίζεται από τον τύπο: $N_{total} = N_1[1+(1+PA)^2+\dots+(1+PA)^{1\alpha}]$, όπου PA: ρυθμός ανάπτυξης. Για περίοδο σχεδιασμού 20 ετών: $S_{20} = \alpha_1 * (\lambda^{20}-1)/(\lambda-1) = 1 * [(1+0.02)^{20}-1]/[(1+0.02)-1] = 24.2973$

Τελικά: $N_{total} = S_{20} * N_1 = 12,122,689 \rightarrow W_{18} = 12.1 * 10^6$ ΙΤΑ

Ο υπολογισμός του πάχους της πλάκας σκυροδέματος πραγματοποιείται με την εισαγωγή των παραπάνω παραμέτρων σχεδιασμού που επιλέχθηκαν και υπολογίστηκαν στα νομογραφήματα των Εικόνων 5.3α και 5.3β που διαθέτει η μέθοδος “AASHTO93”. Έτσι, για $E_c = 4.3 * 10^6$ psi, $k' = 60$ pci, $S_c = 650$ psi, $J = 3.2$, $C_d = 1.0$, $\Delta PSI = 2.0$, $R = 90\%$, $S_o = 0.35$, $W_{18} = 12.1 * 10^6$ ΙΤΑ $\rightarrow D = 10.8$ inches ≈ 28 cm.

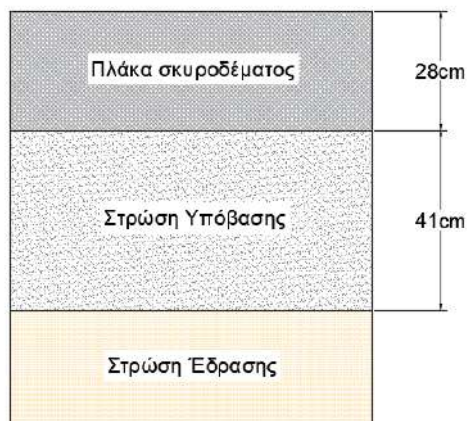


Εικόνα 5.3α Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος με τη μέθοδο AASHTO93 (συνέχεια στο 5.3β)



Εικόνα 5.3B Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος με τη μέθοδο AASHTO93 (συνέχεια από 5.3α)

Η τελική διατομή του οδοστρώματος από σκυρόδεμα του σταθμού διοδίων με τη χρήση της μεθόδου “AASHTO93” παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Διατομή σχεδιασμού οδοστρώματος με τη μέθοδο AASHTO93

5.3.3 Υπολογισμός διατομής με τη μέθοδο MnPCC-ME

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος από σκυρόδεμα του σταθμού διοδίων με τη μέθοδο MnPCC-ME θα πραγματοποιηθεί με βάση τα δεδομένα σχεδιασμού που περιεγράφηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου, η διατομή του οδοστρώματος περιλαμβάνει, εκτός από στρώση υπόβασης, και μία στρώση βάσης, τα χαρακτηριστικά της οποίας περιγράφονται στη συνέχεια.

Η επιλογή των παραμέτρων εισόδου της μεθόδου MnPCC-ME θα γίνει σύμφωνα με τα στοιχεία του εισαγωγικού κεφαλαίου, οι οποίες επισημαίνονται ακολούθως:

- ❖ Για την περίοδο σχεδιασμού οδοστρώματος (“Design Life”) επιλέγονται τα 20 έτη, τα οποία προτείνονται από τη συγκεκριμένη μέθοδο για τη κατασκευή ενός νέου δύσκαμπτου οδοστρώματος. Για αυτή τη τιμή περιόδου σχεδιασμού απαιτείται ελάχιστο πάχος πλάκας σκυροδέματος 6in. (15cm).
- ❖ Ως περιοχή σχεδιασμού επιλέγεται η τοποθεσία (“District”) “Metro”, καθώς το έργο τοποθετείται στη περιοχή Minneapolis-St.Paul (Πίνακας 4.7).
- ❖ Για την κυκλοφορία επιλέγεται ως “HCADT”, δηλαδή η ΕΜΗΚ βαρέων-εμπορικών οχημάτων, τα 1,000 οχήματα ανά κατεύθυνση. Επειδή η μέθοδος λαμβάνει την κυκλοφορία και των δύο κατευθύνσεων, η τιμή αυτή θα διπλασιαστεί. Επομένως, HCADT = 2,000.
- ❖ Επιλέγεται μία λωρίδα ανά κατεύθυνση. Επομένως, ο αριθμός των λωρίδων και των δύο κατευθύνσεων (“Number of Lanes-two way”) λαμβάνει τη τιμή 2.
- ❖ Όσον αφορά στη κατανομή των φορτίων στους άξονες (“Axle Loads”), επιλέγεται η προτεινόμενη και προεπιλεγμένη κατανομή “MnDOT Average”, σύμφωνα με την οποία τα ποσοστά των οχημάτων κυκλοφορίας λαμβάνουν τις τιμές που φαίνονται στην Εικόνα 5.5 και συμπίπτουν με τα δεδομένα κυκλοφορίας του κεφαλαίου 5.1

Vehicle Classes		
Class	Description	Percent
1-3	Autos, Light Trucks	91.20
4	2 Axle 6 Tire	1.90
5	3+ Axle Single	0.90
6	3 Axle Semi	0.10
7	4 Axle Semi	0.20
8	5+ Axle Semi	4.50
9	(5+ Axle Max)	0.00
	(5+ Axle Other)	0.00
10	Trailers & Buses	0.40
11	Twin Trailer	0.80
Percent Heavy Vehicles		8.80
Selected Axle Load Spectrum: MnDOT Average		

Εικόνα 5.5 Κατανομή κυκλοφορίας οχημάτων “MnDOT Average” λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0

- ❖ Ο ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας (“Growth Rate”) επιλέγεται 2%, όπως έχει καθοριστεί στα δεδομένα του κεφαλαίου 5.1.
- ❖ Η απόσταση αρμών (“Joint Spacing”) λαμβάνει την τιμή 15ft. (4.6m), όπως έχει καθοριστεί στα δεδομένα του κεφαλαίου 5.1.
- ❖ Δεν γίνεται επιλογή των “Widened Outer Lane” και “Tied PCC Shoulder”, καθώς δεν πραγματοποιείται επιπλάτυνση της εξωτερικής λωρίδας και δεν υπάρχει μηχανισμός σύνδεσης (“Tie bar”) ανάμεσα στη πλάκα σκυροδέματος και το έρεισμα.
- ❖ Όσον αφορά στη στρώση βάσης, το υλικό επιλέγεται “Class 5” (υλικό A-1-a με βάση την κατάταξη της AASHTO και μέτρο ελαστικότητας $E_{base} = 246\text{MPa}$ $35,640\text{psi}$), που αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή υλικού σύμφωνα με τη μέθοδο και το πάχος λαμβάνει την προτεινόμενη επιλογή των 4in. (10cm).
- ❖ Όσον αφορά στη στρώση υπόβασης, το υλικό παίρνει την προεπιλεγμένη επιλογή “Granular” (υλικό A-3 με βάση την κατάταξη της AASHTO και μέτρο ελαστικότητας $E_{sub} = 127\text{MPa} = 18,350\text{psi}$) και το πάχος λαμβάνει την προτεινόμενη επιλογή των 12in. (31cm).

Ο υπολογισμός του πάχους της πλάκας σκυροδέματος πραγματοποιείται με την εισαγωγή των παραπάνω παραμέτρων σχεδιασμού που επιλέχθηκαν στο λογισμικό MnPAVE Rigid 3.0. Στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του πάχους της πλάκας σκυροδέματος (“PCC”) με τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού. Το αποτέλεσμα που δίνεται είναι: **D = 8.9inches \approx 23cm.**

The screenshot shows the MnPAVE Rigid 3.0 software interface. The 'Project Information' section includes:

- Project Type: Rigid (Concrete)
- Design Life: 20 years
- Project Number: 1
- Letting Date: 6/10/2021
- Route: (empty)
- Reference Post (RP): (empty)
- District: Metro
- Designer: Kyriakou Charalampia
- Soils Engineer: (empty)
- Notes: (empty)

 The 'Traffic' section includes:

- HCADT: 2000
- Growth Rate: 2.0 %
- Number of Lanes (two-way): 2
- Axle Loads: MnDOT Average
- Joint Spacing: 15 ft.
- Widened Outer Lane:
- Tied PCC Shoulder:


 The 'Structure' section shows a table of material layers with their thicknesses in inches:

Material	Thickness (in.)
PCC	8.9
Class 5	4.0
Select Granular	12.0
Subgrade	(not specified)

 The software logo 'mpave' and 'MnDOT Rigid Pavement Design Version 3.0, May 2019 © 2001-2019 Department of Transportation' are visible on the right side of the interface.

Εικόνα 5.6 Υπολογισμός πάχους πλάκας σκυροδέματος οδοστρώματος σταθμού διοδίων με τη χρήση του λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0

Στην Εικόνα 5.7 παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα σχεδιασμού που εξάγονται από το λογισμικό MnPAVE Rigid 3.0 σε μορφή αρχείου .pdf. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στο συγκεκριμένο αρχείο επισημαίνονται και οι προεπιλεγμένες τιμές που χρησιμοποιεί η μέθοδος, όπως είναι το μέτρο θραύσης σκυροδέματος ($4.48\text{MPa} = 650\text{psi}$), οι συντελεστές διακύμανσης του μέτρου θραύσης (8.6%) και του πάχους (3.0%) σκυροδέματος, η ανάλυση αξιοπιστίας (Monte-Carlo), οι συντελεστές βαθμονόμησης του MEPDG (0.90-2.64), το επιτρεπτό επίπεδο ρηγμάτωσης (6.5%) και το επίπεδο αξιοπιστίας (90%). Επίσης, πρέπει να αναφερθεί, πως οι δύο τελευταίες τιμές εξαρτώνται από τη τοποθεσία και τη κυκλοφορία σχεδιασμού που εισάγονται στο λογισμικό.

 DEPARTMENT OF TRANSPORTATION	
MnPAVE Rigid 3.0 Design Summary Created 6/10/2021 12:33 AM	
MnPAVE Rigid File:	
Calculated thickness: 8.9 in.	
Main Inputs	
Design life: 20 years	Climate (MnDOT district): Metro
Initial 2-way traffic: 2000 HCADT	Linear traffic growth: 2.0
Axle load spectra: MnDOT Average	Number of lanes (2-way): 2
Base material: Class 5 Aggregate	Base thickness: 4.0 in.
Subbase material: Select Granular	Subbase thickness: 12.0 in.
Joint spacing: 15 ft.	Widened lane? No
Shoulder type: HMA, Untied PCC, or Aggregate	
Defaults	
Reliability analysis: Monte Carlo (MnPAVE Flexible)	
Allowable cracked slabs: 6.5%	Reliability level: 90%
Flexural strength: 650 psi	
COV, PCC thickness: 3.0%	COV, Flexural strength: 8.6%
MEPDG coefficient 1: 0.90	MEPDG coefficient 2: -2.64
Calculated total trucks over service life: 8,747,053	
Designer: Kyriakou Charalampia	
Notes:	

Εικόνα 5.7 Σύνοψη δεδομένων και αποτελεσμάτων σχεδιασμού του λογισμικού MnPAVE Rigid 3.0

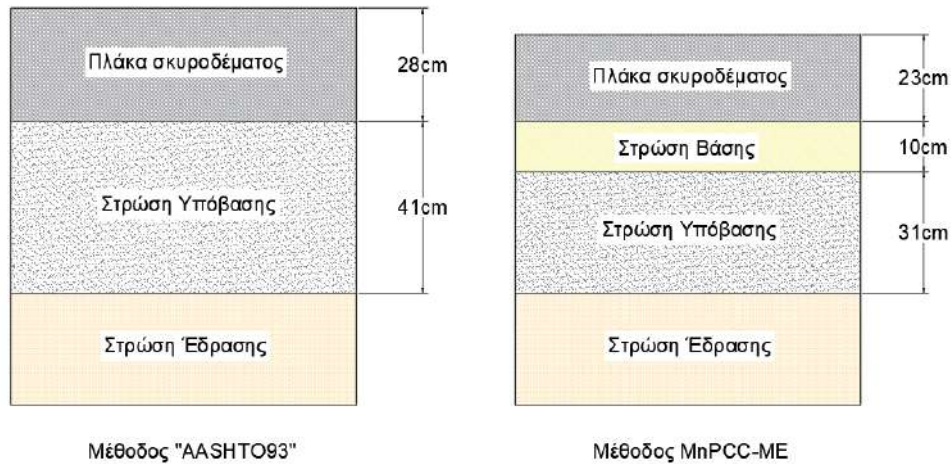
Η τελική διατομή του οδοστρώματος από σκυρόδεμα του σταθμού διοδίων με τη χρήση της μεθόδου MnPCC-ME παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 Διατομή σχεδιασμού οδοστρώματος με τη μέθοδο MnPCC-ME

5.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Με βάση τις δύο διαδικασίες διαστασιολόγησης του δύσκαμπτου οδοστρώματος του σταθμού διοδίων που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκριτικά οι διατομές που προέκυψαν με τη χρήση των δύο μεθόδων σχεδιασμού.



Εικόνα 5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα διατομών σχεδιασμού των δύο μεθόδων διαστασιολόγησης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων διαστασιολόγησης, διαπιστώνεται πως η διαφορά στα πάχη των πλακών σκυροδέματος κυμαίνεται στην κλίμακα των 5cm. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά θεωρητικά υπόβαθρα των δύο μεθόδων και τις διαφορές στη διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθεί η κάθε μία. Επίσης, από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η μέθοδος "AASHTO93" δίνει μεγαλύτερο πάχος πλάκας σε σχέση με την μέθοδο MnPCC-ME, γεγονός που επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις ερευνών που τη θεωρούν μία αρκετά συντηρητική μέθοδο. Εκτός αυτού, συμπεραίνεται, πως το μειωμένο πάχος πλάκας που προκύπτει από την μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο σε σχέση με αυτό της "AASHTO93", οδηγεί σε βελτιστοποίηση της διατομής του δύσκαμπτου οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη νέων μεθόδων σχεδιασμού, οι οποίες δεν βασίζονται αποκλειστικά σε πειράματα, αλλά και σε μηχανιστικές διαδικασίες.

Τέλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9, αλλά και όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, η διατομή σχεδιασμού του οδοστρώματος στην μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο MnPCC-ME διαφοροποιείται, όσον αφορά στις υποκείμενες στρώσεις της πλάκας σκυροδέματος, καθώς περιλαμβάνεται, επιπλέον, μία στρώση βάσης.

6. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα τελευταία χρόνια, τόσο στην Ελλάδα, όσο και παγκοσμίως, παρατηρείται μεγάλο ενδιαφέρον όσον αφορά στο σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Γι' αυτό τον λόγο, υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης νέων μεθόδων σχεδιασμού, οι οποίες βασίζονται περισσότερο σε αναλυτικές θεωρήσεις με σκοπό την επίτευξη της μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Υπό την κατεύθυνση αυτή, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των αρχών και θεωρήσεων της εμπειρικής μεθόδου "AASHTO93", που αποτελεί μία παλιά διαδικασία διαστασιολόγησης, και της μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου MnPCC-ME, η οποία βασίζεται στη μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο της AASHTO, MEPDG. Στο πλαίσιο της διερεύνησης αυτής, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των βασικών αρχών των δύο μεθόδων. Από την συγκριτική αξιολόγησή τους, προέκυψε ότι παρουσιάζουν ορισμένες ομοιότητες και διαφορές ως προς τις αρχές αυτές, τις παραδοχές, αλλά και τη διαδικασία σχεδιασμού. Τέλος, διενεργήθηκε πειραματική ανάλυση με τη διαστασιολόγηση δαπέδου δύσκαμπτου οδοστρώματος σταθμού διοδίων, χρησιμοποιώντας την ενδεικτική προβλεπόμενη κυκλοφορία βαρέων οχημάτων και τα υλικά που προτείνονται από την μέθοδο MnPCC-ME.

Από τη διερεύνηση της μεθόδου "AASHTO93" συμπεραίνεται ότι οι βασικές της αρχές που λαμβάνει υπόψη είναι κυρίως οι Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες (ITA), οι οποίοι εξαρτώνται από την προβλεπόμενη κυκλοφορία για την περίοδο σχεδιασμού και την κατανομή της ανά λωρίδα και κατεύθυνση, το επίπεδο αξιοπιστία, που εξαρτάται από τη κατηγορία της οδού και τη περιοχή του έργου, η απώλεια εξυπηρευτικότητας ΔPSI, που εξαρτάται από την κατάσταση και τη φθορά του οδοστρώματος και η τυπική απόκλιση, με την οποία περιλαμβάνονται στη διαδικασία πιθανά σφάλματα σε σχεδιαστικά και κατασκευαστικά δεδομένα σχεδιασμού.

Από τη διερεύνηση της μεθόδου MnPCC-ME προκύπτει ότι οι κύριες αρχές σχεδιασμού που λαμβάνονται υπόψη είναι η περίοδος σχεδιασμού του οδοστρώματος, η περιοχή του έργου από την οποία λαμβάνονται κλιματικά δεδομένα, η κυκλοφορία, η οποία εξαρτάται από τον φόρτο, τον ρυθμό αύξησης και της κατανομή του φορτίου στον άξονα ("Axle Load Spectra") για τρεις τύπους αξόνων ("single", "tandem" και "tridem"), το επίπεδο αξιοπιστίας και εγκάρσιας ρηγμάτωσης, που εξαρτώνται από τον κυκλοφοριακό φόρτο και την περιοχή του έργου, το μέτρο θραύσης σκυροδέματος και η διακύμανση της τιμής του (COV μέτρου θραύσης σκυροδέματος), που λαμβάνεται βασισμένο στην ανάλυση αξιοπιστίας Monte-Carlo και σε δοκιμές

θραύσης δοκών του MnDOT και η διακύμανση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος (COV πάχους πλάκας σκυροδέματος), που επίσης λαμβάνεται από δοκιμές πάχους του MnDOT.

Σε γενικές γραμμές, οι δύο μέθοδοι φαίνεται να έχουν αρκετές ομοιότητες, όσον αφορά στις αρχές και τους παράγοντες που λαμβάνουν υπόψη στη διαδικασία σχεδιασμού ενός οδοστρώματος. Και οι δύο μέθοδοι συμπεριλαμβάνουν στη διαδικασία τους, τη περίοδο σχεδιασμού, τον κυκλοφοριακό φόρτο, τη περιοχή του έργου, την ανάλυση αξιοπιστίας, τις αποκλίσεις μεγεθών, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες των υλικών και τις φθορές του οδοστρώματος. Ωστόσο, η κάθε μέθοδος ενσωματώνει διαφορετικά όλες αυτές τις παραμέτρους στο σχεδιασμό.

Από τη διερεύνηση των μεθόδων συμπεραίνεται ότι η μέθοδος “AASHTO93” είναι μία εμπειρική μέθοδος που βασίζεται σε οδικά πειράματα, σε αντίθεση με τη μέθοδο “MnPCC-ME”, η οποία συνδυάζει τα μηχανιστικά μοντέλα σχεδιασμού της AASHTO και τα ήδη κατασκευασμένα οδοστρώματα της Μινεσότα. Από τις πιο σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ο τρόπος έκφρασης της πρόβλεψης της κυκλοφορίας, με τη μέθοδο “AASHTO93” να υπολογίζει τον φόρτο μέσω των ESALs, και τη μέθοδο MnPCC-ME με την εισαγωγή της κατανομής του φορτίου στους άξονες (“axle load spectra”), η οποία είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό MEPDG που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων της μεθόδου. Άλλη μία διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων είναι στην ενσωμάτωση της φθοράς του οδοστρώματος, όπου η εμπειρική μέθοδος εισάγει την έννοια της απώλειας εξυπηρευτικότητας, ενώ η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος την υπολογίζει με βάση το μοντέλο της εγκάρσιας ρηγμάτωσης. Επιπλέον, όσον αφορά στην ανάλυση αξιοπιστίας, το επίπεδο αξιοπιστίας της μεθόδου “AASHTO93” εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο και επιλέγεται με βάση την κατηγορία της οδού και τη περιοχή του έργου, ενώ της άλλης μεθόδου σχετίζεται με τη διακύμανση του πάχους και μέτρου θραύσης σκυροδέματος και επιλέγεται με βάση τον κυκλοφοριακό φόρτο και την περιοχή του έργου. Εκτός αυτού, πρέπει να σημειωθεί ότι στη μέθοδο MnPCC-ME χρησιμοποιείται μία σταθερή τιμή του μέτρου θραύσης σκυροδέματος S_c (4.48MPa), στην οποία εισάγεται ο συντελεστής διακύμανσης που αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ στη μέθοδο “AASHTO93” υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης του S_c . Τέλος, η διατομή του οδοστρώματος με τη μέθοδο “AASHTO93” περιλαμβάνει μία στρώση υπόβασης, σε αντίθεση με την μέθοδο MnPCC-ME, κατά την οποία προστίθεται μία στρώση βάσης.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τελική σύγκριση των δύο μεθόδων και η ανάδειξη της επίδρασης των διαφοροποιήσεων τους στο τελικό σχεδιασμό, διενεργήθηκε

διαστασιολόγηση δαπέδου δύσκαμπτου οδοστρώματος σταθμού διοδίων με ενδεικτική προβλεπόμενη κυκλοφορία βαρέων οχημάτων και υλικά που προτείνονται από την μέθοδο MnPCC-ME. Για την εν λόγω διαδικασία, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι σχεδιασμού και στις δύο μεθόδους. Ωστόσο, υπήρχαν περιπτώσεις στις οποίες έπρεπε να γίνουν ορισμένες παραδοχές (λόγω ύπαρξης στρώσης βάσης στη διαδικασία MnPCC-ME), ώστε να προκύψει ένα ορθό αποτέλεσμα σύγκρισης. Από αυτή τη διαδικασία, προέκυψαν διατομές με διαφορά πάχους 5cm, γεγονός που καταδεικνύει πως οι διαφορές των δύο μεθόδων αντικατοπτρίζονται στα αποτελέσματα του σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, το πάχος της πλάκας σκυροδέματος με τη μέθοδο "AASHTO93" προέκυψε 28cm, ενώ με τη μέθοδο MnPCC-ME προέκυψε 23cm, πράγμα που δείχνει ότι η πρώτη μέθοδος είναι περισσότερο συντηρητική σε σχέση με τη δεύτερη. Αυτό υποδεικνύει το γεγονός, ότι ο σχεδιασμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με την μηχανιστική-εμπειρική μέθοδο οδηγεί στη βελτιστοποίηση της διατομής σε σχέση με την εμπειρική. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη νέων μεθόδων, οι οποίες δεν βασίζονται αποκλειστικά σε πειράματα, αλλά ταυτόχρονα και σε αναλυτικές θεωρήσεις, είναι ιδιαίτερως σημαντική για τον κλάδο της κατασκευής δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Αναλύσεις ευαισθησίας, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τον τρόπο επίδρασης των διαφορετικών τοποθεσιών της μεθόδου MnPCC-ME στο αποτέλεσμα του πάχους του σκυροδέματος.
- Αναλύσεις ευαισθησίας, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση των υλικών και των παχών της βάσης και της υπόβασης του οδοστρώματος στο αποτέλεσμα του πάχους του σκυροδέματος.
- Αναλύσεις ευαισθησίας, σχετικά με την επιρροή των κατασκευαστικών στοιχείων του οδοστρώματος, δηλαδή της απόστασης των αρμών και της κατασκευής της εξωτερικής λωρίδας και του ερείσματος στο αποτέλεσμα του πάχους του σκυροδέματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO (1993). "AASHTO guide for design of pavement structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (1998). "Supplement to the AASHTO Guide for Design of pavement structure: Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (2008). "Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (2009). "Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide, Version 1.1 (software)". American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACPA (2013). "100 Years of Innovation". American Concrete Pavement Association. Retrieved from «http://metiebar.acpa.org/Concrete_Pavement/About_Concrete/100_Years_of_Innovation/index.asp».

ACPA (2014). "StreetPave 12 Structural Design Software for Street and Road Concrete Pavements". American Concrete Pavement Association. Retrieved from «<https://www.acpa.org/streepave/>»

Ahammed, M.A., Kass, S., Hilderman, S., and Tang, W.K.S. (2011). "MEDPG Implementation: Manitoba Experience". 2011 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.

Burnham T. R., and Pirkl W. M. (1997). "Application of Empirical and Mechanistic-Empirical Pavement Design Procedures to MnROAD Concrete Pavement Test Sections". Report MN-RC-1997-12, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, 106p.

Carvalho, R., and Schwartz, C. (2006). "Comparisons of Flexible Pavement Designs: AASHTO Empirical Versus NCHRP Project 1-37A Mechanistic-Empirical". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1947, pp. 167-174.

Cary W. N., and Irick P. E. (1960). "The Pavement Serviceability - Performance Concept". Highway Research Board, 17p.

Delatte N. J. (2008). "Concrete Pavement Design, Construction, and Performance". New York, 372p.

Harvey J., Roesler J., Farver, J., and Liang, L. (2000). "Preliminary Evaluation of Proposed LLPRS Rigid Pavement Structures and Design Inputs". UC Davis: University of California Pavement Research Center. Retrieved from «<https://escholarship.org/uc/item/933855pc>».

Highway Research Board (1961). "The AASHO Road Test: Report 1, History and Description of the Project". Special Report 61A., National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Highway Research Board (1961). "The AASHO Road Test: Report 5, Pavement Research". Special Report 61E, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Highway Research Board (1962). "The AASHO Road Test: Report 6, Special Studies". Special Report 61E, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Huang Y. H. (1969). "Computation of Equivalent Single-Wheel Loads Using Layered Theory". Proceedings, Highway Research Board.

Hveem F. N., and Carmany R. M. (1948). "The Factors Underlying a Rational Design of Pavements Proceedings". Proceedings of the Twenty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C., Vol 28, pp 101-136.

IFSTTAR (2016). "Alize-LCPC Software for pavement structures analysis and design". User Manual Version 1.5, Retrieved from «<https://www.alize-lcpc.com/documents/ALIZE-LCPC-MU-v1.5-EN.pdf>».

Jain R. (2016). "Rigid Pavement". M. Tech. Assignment Report, Civil Engineering Department N.I.T Hamirpur. Retrieved from «<https://www.slideshare.net/pjainrahul/rigid-pavement-68226961>».

Jones A. (1962). "Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems". Highway Research Board Bulletin 342.

Kam Ng, Ksaibati K., and Brhanemeskel M. (2019). "Enhancement of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Roadway Design, and Construction in the State of Wyoming". Department of Civil & Architectural Engineering University of Wyoming, Report MPC-19-380, North Dakota.

Li, J., Uhlmeyer, J.S., Mahoney, J.P., and Muench, S.T. (2010). "Use of the AASHTO 1993 Guide, MEPDG and Historical Performance to Update the WSDOT Pavement Design Catalog". Transportation Research Record, No. 2776, pp. 15.

MnDOT (2012). "Mn/DOT Procedure Manual for Forecasting Traffic on Minnesota's Highway Systems". Mn/DOT Office of Transportation Data and Analysis, Traffic Forecasts and Analysis Section. Retrieved from: «https://www.dot.state.mn.us/traffic/data/reports/forecast/Forecast_Manual_2012.pdf».

MnDOT (2013). "2013 Geotechnical Engineering Manual, Geotechnical Engineering Section". Minnesota Department of Transportation. Retrieved from: «<http://www.dot.state.mn.us/materials/manuals/geotechnical/geotechnicalmanual2013.pdf>».

MnDOT (2019). "MnPAVE Rigid 3.0: rigid (PCC) pavement design (software)". Minnesota Department of Transportation. Retrieved from: «<https://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtdesign/software.html>».

MnDOT (2019). "MnDOT Pavement Design Manual Chapter 5: PCC (Portland Cement Concrete)". Minnesota Department of Transportation. Retrieved from: «<https://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtdesign/docs/index.html>».

Mosley B., Bungey J., and Hulse R. (2012). "Μελέτη κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα". Σύγγραμμα, 7^η Αγγλική έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος ΕΠΕ.

Peattie K. R. (1962). "Stress and Strain Factors for Three-Layer Elastic Systems". Highway Research Board Bulletin 342.

Tinni A. (2013). "Introduction to Concrete Pavements". 9p.

Tompkins D. (2018). "MnPAVE Rigid 2.0". Research Project Final Report, Minnesota Department of Transportation, 2018.

Tompkins D., and Khazanovich L. (2014). "Simplified Design Table For Minnesota Concrete Pavements". Minnesota Department of Transportation Research Services & Library. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy: «<https://hdl.handle.net/11299/166797>».

Tompkins D., Johanneck L., and Khazanovich L. (2015). "State Design Procedure for Rigid Pavements Based on the AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement

Design Guide”. Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2524, Issue 1, pp. 23-32.

Transportation Research Board (2007). “Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System”. Transportation Research Circular Number E-C118, Pavement Management Section. Retrieved from: «<http://www.trb.org/Publications/Blurbs/158980.aspx>».

Yut I., Husein S., Turgeon C., and Khazanovich L. (2008). “Adaptation of the 2002 Guide for the Design of Minnesota Low-Volume Portland Cement Concrete Pavements”. Report 2007-23, Minnesota Department of Transportation, Saint Paul, MN, Vol. 2087, Issue 1, pp. 57-67.

Velasquez V., Hoegh K., Yut I., Funk N., Cochran G., Marasteanu M., and Khazanovich L. (2009). “Implementation of the MEPDG for New and Rehabilitated Pavement Structures for Design of Concrete and Asphalt Pavements in Minnesota”. Report 2009-06, Minnesota Department of Transportation. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy: «<https://hdl.handle.net/11299/150992>».

Yoder E. J., and Witczak M. W. (1975). “Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων”. Σύγγραμμα, Εκδόσεις Γκιούρδας Μ., Αθήνα.

Κόλιας Σ. (1998). “Σκυρόδεμα (Υπενθύμιση βασικών αρχών τεχνολογίας σκυροδέματος)”. ΕΜΠ, Αθήνα.

ΚΤΣ (1997). “Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος”.

Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2017). “Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων”. ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2020). “Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων”. ΕΜΠ, Αθήνα.

Νικολαΐδης Α. Φ. (1996). “Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά - Έλεγχος Ποιότητας”. 1^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη.

Νικολαΐδης Α. Φ. (2011). “Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά – Έλεγχος Ποιότητας”. 3^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη.

Τάσιος Π., Γιαννόπουλος Π., Τρέζος Κ, Τσουκαντάς Σ. (2005). “Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, με βάση τον νέο ελληνικό κανονισμό σκυροδέματος”. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.