



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ
ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ
ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΜΑΛΕΒΙΖΙΑΝ ΣΑΡΚΙΣ – ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ιούλιος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της διπλωματικής μου άσκησης, αισθάνομαι έντονα την ανάγκη να ευχαριστήσω εγκάρδια όλους όσους συντέλεσαν άμεσα ή έμμεσα καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την εμπιστοσύνη που έδειξε, την ανάθεση και την επίβλεψη της Εργασίας καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία.

Παράλληλα επιθυμώ να ευχαριστήσω την κα. Κωνσταντίνα Γεωργούλη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για την καθοδήγηση, την άμεση ανταπόκριση και την πολύτιμη βοήθειά της σε οποιοδήποτε προβληματισμό.

Τέλος είναι πολύ σημαντικό να ευχαριστήσω τα κοντινά μου πρόσωπα, τις φίλες και τους φίλους μου για την ανιδιοτελή τους στήριξη, κυρίως όμως την οικογένειά μου για τις θυσίες που έχουν καταβάλλει αλλά και για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση στην προσπάθειά μου.

ΣΥΝΟΨΗ

Ο συντελεστής ισοδυναμίας (LEF = Load Equivalency Factor ή Equivalency Factor συνήθως) είναι μια έννοια που δημιουργήθηκε θεωρητικά και εμπειρικά κατά τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων μετά από αρκετά πειράματα στο πεδίο (AASHO Road Test). Η προσέγγιση της επεξεργασίας των διαφορετικών φορτίων κυκλοφορίας με τη χρήση ενός συντελεστή ισοδυναμίας, ήταν μια ανάγκη που προέκυψε ως προς τη μελέτη συμπεριφοράς και σχεδιασμού ενός οδοστρώματος. Συγκεκριμένα έγινε αντιληπτό ότι ένα οδόστρωμα κυρίως επηρεάζεται από την κυκλοφορία που υφίσταται, όμως ο υπολογισμός της πραγματικής κυκλοφορίας και η πρόβλεψη της κατάστασης ενός οδοστρώματος βάσει εκείνης, μπορεί ενίοτε να αποτελεί μια σύνθετη, επίπονη και μερικές φορές χρονοβόρα διαδικασία. Κατά συνέπεια, ήταν απαραίτητο να απλουστευτεί η ανάλυση και να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η φθορά ενός οδοστρώματος μέσα από κάποιες εκτιμώμενες ισοδύναμες διελεύσεις ενός συμβατικού τυπικού άξονα τροχών. Η έκφραση ενός συντελεστή ισοδυναμίας θα απέδιδε αυτή τη μετατροπή. Έκτοτε, πολλά ερευνητικά κέντρα και οργανισμοί σε διάφορες χώρες, βασιζόμενοι στα πρώτα αποτελέσματα, επιχείρησαν να δώσουν τη δική τους θεωρία και γνώση, μέσω μεθόδων για την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας και κατά συνέπεια την εκτίμηση μιας νέας ισοδύναμης κυκλοφορίας αποτελούμενης από τον τυπικό άξονα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, σε πρώτο στάδιο, εστιάζει στο να εντοπισθούν και να παρουσιαστούν αυτές οι μέθοδοι έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας που υπάρχουν στον κόσμο, με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητές τους. Εν συνεχεία, αποσκοπεί στη συγκριτική ανάλυση των θεωρήσεων ισοδύναμης κυκλοφορίας από τις διάφορες μεθόδους, στο πλαίσιο διερεύνησης της επίδρασής τους σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση πραγματοποιείται ούτως ώστε να διερευνηθεί το αν, υπό ποιες συνθήκες και γιατί αυτές παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους στη φθορά του οδοστρώματος εξαιτίας φαινομένων κόπωσης της ασφαλικής στρώσης (fatigue cracking). Απώτερος σκοπός είναι τα αποτελέσματά της ανάλυσης να συνθέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο, αφενός για την καλύτερη κατανόηση στη χρήση των θεωρήσεων συντελεστών ισοδυναμίας και αφετέρου, για μια ορθότερη αποτύπωση της κυκλοφορίας που έχει καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

Λέξεις κλειδιά: συντελεστής ισοδυναμίας, οδικό πείραμα Aasho, πραγματική κυκλοφορία, ισοδύναμη κυκλοφορία, φθορά οδοστρώματος, τυπικός άξονας τροχών, κόπωση ασφαλικής στρώσης.

ABSTRACT

The load equivalency factor is a notion created empirically and estimated theoretically by the time of conduction of the AASHO Road Test. The concept of approaching the processing of different traffic loads using an equivalency factor, was a need arose in the study of treatment and pavement design. In particular, it was realized a pavement is mainly affected by the traffic it undergoes, but the calculation of the actual traffic and the prediction on a pavement's withstanding state, might actually be a complex, laborious and sometimes time – consuming process. In consequence, it was necessary for the analysis to be simplified and the pavement damage to be able to be quantified, through some estimated equivalent passes of a conventional standard axle. Expressing an equivalency factor would yield this conversion. Ever since, many research centers and organizations in different countries, based on the first results, attempted to show their own perspective and insight, through methods for expressing the equivalency factor and consequently the new equivalent traffic estimation consisting of the standard axle.

This current thesis, on the first stage, focuses on identifying and presenting these equivalency factor expression methods in the world existing, with their characteristics and peculiarities. Subsequently, it aims at the comparative analysis of equivalent traffic considerations from the various methods, in terms of investigating their effect on a flexible pavement. More specifically, the analysis is carried out in order to investigate whether, under which conditions and why these show discrepancies from each other in the pavement damage due to fatigue cracking phenomena. The ultimate goal is for the analysis results to compose a useful tool on one hand, for a better understanding of the use of the equivalency factor considerations and on the other hand, for a more accurate traffic depiction that has a substantial role in pavement design.

Key words: load equivalency factor, Aasho Road Test, actual traffic, equivalent traffic, pavement damage, standard axle wheel, fatigue cracking.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο έρευνας.....	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομή εργασίας.....	2
2. ΠΕΡΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	4
2.1 Εμπειρικός σχεδιασμός οδοστρωμάτων	4
2.1.1 Μέθοδος CBR	4
2.1.2 Η μέθοδος Group Index.....	6
2.1.3 Καλιφορνιακή μέθοδος τιμής αντίστασης	8
2.1.4 Μέθοδος McLeod.....	10
2.1.5 Η εμπειρική μέθοδος AASHTO	12
2.1.5.1 Το οδικό πείραμα AASHO	12
2.1.5.2 Μεθοδολογία σχεδιασμού AASHTO.....	15
2.2 Η αναλυτική προσέγγιση σχεδιασμού οδοστρωμάτων	20
2.2.1 Μονοστρωματικά συστήματα (Θεωρία Boussinesq).....	20
2.2.2 Θεωρία επάλληλων στρώσεων Burmister	21
2.2.3 Θεωρία ισοδύναμων στρώσεων Odemark	24
2.2.4 Η άνθιση του μηχανιστικού – εμπειρικού σχεδιασμού	26
3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	30
3.1 Γενικά	30
3.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης ισοδύναμης κυκλοφορίας	31
3.2.1 Μέθοδος AASHTO	31
3.2.2 Μέθοδος γενικού συντελεστή άξονα GAF	37
3.2.3 Καναδική μέθοδος TAC	41
3.2.4 Γαλλική μέθοδος	45
3.2.5 Μέθοδος COST Action 334	47
3.2.6 Μέθοδοι Austroads και Νεοζηλανδική TNZ.....	52
3.2.7 Ινδική μέθοδος IRC.....	62
3.2.8 Γερμανική μέθοδος	64
3.2.9 Σουηδική μέθοδος.....	67
3.2.10 Νοτιοαφρικανική μέθοδος SANRAL	69
3.2.11 Άλλες μέθοδοι στον κόσμο	73
3.3 Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων	76

4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	79
4.1 Βασικά στοιχεία ανάλυσης.....	79
4.1.1 Γενικά.....	79
4.1.2 Διατομή οδοστρώματος και χαρ/κα στρώσεων.....	80
4.1.3 Νόμος κόπωσης ασφατικής στρώσης	81
4.1.4 Δεδομένα κυκλοφορίας	83
4.1.5 Μετατροπή σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες.....	85
4.2 Αποτελέσματα συγκριτικής ανάλυσης.....	86
4.2.1 Μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης. 86	
4.2.2 Μέγιστες οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_r	87
4.2.3 Φθορά από κόπωση ασφατικής στρώσης.....	88
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	111

Εικόνα 2.1: Εκτίμηση πάχους οδοστρώματος με βάση τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης 5	
Εικόνα 2.2: Εκτίμηση πάχους ανάλογα του δείκτη CBR βασισμένη στα Ινδικά Πρότυπα Σχεδιασμού.....	6
Εικόνα 2.3: Νομογράφημα σχεδιασμού πάχους οδοστρώματος με βάση το δείκτη GI και των συνθηκών κυκλοφορίας.....	8
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα συσχέτισης της διαμέτρου πλάκας με τη σταθερά βάσης K	11
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα προσδιορισμού του λόγου τάσεων (υποστήριξης στρώσης έδρασης / τάσης διαρροής).....	12
Εικόνα 2.6: Δοκιμαστικοί θρόχοι (πέμπτος και έκτος) στο οδικό πείραμα AASHO	13
Εικόνα 2.7: Τυπικά δοκιμαστικά φορτία αξόνων οχημάτων στο πείραμα AASHO.....	14
Εικόνα 2.8: Δείκτες δομικής επάρκειας SN_1 , SN_2 και SN_3	18
Εικόνα 2.9: Νομογράφημα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων.....	19
Εικόνα 2.10: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq από υποβολή φορτίου κυκλικής κατανομής	20
Εικόνα 2.11: Επιρροή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας των δυό στρώσεων ως προς την προκύπτουσα κατακόρυφη τάση ύστερα από κυκλική φόρτιση p ακτίνας a	22
Εικόνα 2.12: Έκφραση Burmister κατακόρυφων τάσεων για μονοστρωματικό και διστρωματικό σύστημα με τη χρήση ισοστατικών καμπυλών	23
Εικόνα 2.13: Νομογράφημα υπολογισμού της υποχώρησης F_2	24
Εικόνα 2.14: Μετατροπή σε ισοδύναμο πάχος κατά Odemark.....	25
Εικόνα 2.15: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας	27
Εικόνα 3.1: Αποτύπωμα επαφής ελαστικών (μονών & συζευγμένων) στο οδόστρωμα.....	33
Εικόνα 3.2: Συντελεστής ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO μονών, διπλών και τριπλών αξόνων.....	35
Εικόνα 3.3: Αριθμητική απόκλιση του συντελεστή ισοδυναμίας από GAF και AASHTO για μονό άξονα	38
Εικόνα 3.4: Σύγκριση συντελεστή ισοδυναμίας διαφόρων θεωρήσεων για μονό άξονα.....	39
Εικόνα 3.5: Σύγκριση συντελεστή ισοδυναμίας διαφόρων θεωρήσεων για διπλό άξονα.....	39
Εικόνα 3.6: Επιρροή των αποστάσεων στη διπλή διάταξη αξόνων στον συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου GAF και AASHTO.....	40
Εικόνα 3.7: Επιρροή των αποστάσεων στην τριπλή διάταξη αξόνων στον συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου GAF και AASHTO.....	41
Εικόνα 3.8: Συντελεστής ισοδυναμίας από την Καναδική μελέτη βάρους και διαστάσεων οχημάτων.....	42
Εικόνα 3.9: Σύγκριση τριών μεθόδων (TAC, FPI και AASHTO με $SN = 5$ και $p_t = 2.5$) επί του συντελεστή ισοδυναμίας για μονό άξονα μονών ελαστικών	43
Εικόνα 3.10: Συντελεστής ισοδυναμίας σε μονούς άξονες μονών ελαστικών για συμβατικά και πλατύπελμα ελαστικά	44
Εικόνα 3.11: Διαστάσεις των διπλών ελαστικών κατά το ήμισυ του τυπικού άξονα της Γαλλικής μεθόδου	46

Εικόνα 3.12: Τυπικά φορτία αξόνων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες	48
Εικόνα 3.13: Σύγκριση μεγέθους των πρώτων συμβατικών πλατύπελμων μονών ελαστικών με τα νέας γενιάς πλατύπελμων μονών ελαστικών.....	50
Εικόνα 3.14: Σύγκριση μεγέθους μεταξύ ενός ελαστικού από τη σύνθεση διπλών ελαστικών και της νέας γενιάς μονών πλατύπελμων ελαστικών	50
Εικόνα 3.15: Διαστάσεις των διπλών ελαστικών κατά το ήμισυ του τυπικού άξονα της μεθόδου Austroads	54
Εικόνα 3.16: Διαγράμματα συντελεστών ισοδυναμίας (EDA & ESA) με βάση το φορτίο για μονούς άξονες μονών και διπλών ελαστικών.....	60
Εικόνα 3.17: Διαγράμματα συντελεστών ισοδυναμίας (EDA & ESA) με βάση το φορτίο για διπλούς και τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών.....	61
Εικόνα 3.18: Τυπικός άξονας κατά IRC	62
Εικόνα 3.19: Τυπική διάταξη άξονα Γερμανικής μεθόδου	64
Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή ισοδυναμίας βάσει του αξονικού φορτίου	65
Εικόνα 3.21: Τυπική διάταξη Σουηδικού άξονα.....	67
Εικόνα 3.22: Συντελεστής ισοδυναμίας ανάλογος του φορτίου για διάφορες αξονικές διατάξεις για εύκαμπτο οδόστρωμα.....	71
Εικόνα 3.23: Τυπικός άξονας φόρτιου σύμφωνα με τους Ιταλικούς κανονισμούς.....	75
Εικόνα 4.1: Διατομή οδοστρώματος.....	80
Εικόνα 4.2: Καταμερισμός των συνολικών αξόνων	84
Εικόνα 4.3: Μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης	86
Εικόνα 4.4: Μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας	87
Εικόνα 4.5: Ποσοστά φθοράς μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας.....	88
Εικόνα 4.6: Ποσοστιαίες διαφορές φθοράς μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας με κανόνα 4 ^{ης} δύναμης.....	89

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός κυκλοφορίας με βάση την ημερήσια κυκλοφορία οχημάτων...	7
Πίνακας 2.2: Εκτίμηση EWL με βάση τον αριθμό αξόνων των οχημάτων.....	9
Πίνακας 2.3: Εύρος τιμών της συνοχής C για βασικούς τύπους υλικών	10
Πίνακας 3.1: Εκθέτες φθοράς για τον κανόνα της δύναμης	32
Πίνακας 3.2: Προτεινόμενα τυπικά ισοδύναμα φορτία για μονούς, διπλούς τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών	32
Πίνακας 3.3: Ποσοστό αξόνων L στη λωρίδα σχεδιασμού	37
Πίνακας 3.4: Συντελεστής ισοδυναμίας από FPIInnovations για μονά ελαστικά συμβατικής και πλατύπελμης μορφής.....	44
Πίνακας 3.5: Τιμές των παραμέτρων α τύπου οδοστρώματος και K διάταξης αξόνων κατά LCPC.....	46
Πίνακας 3.6: Σχέση υπολογισμού του TCF.....	51
Πίνακας 3.7: Τυπικά φορτία για αξονικές διατάξεις μονών και πολλαπλών αξόνων μονών ή και περισσότερων ελαστικών εκατέρωθεν (σε τόνους ανά άξονα)	53
Πίνακας 3.8: Εκθέτες φθοράς m στην έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας με βάση τη μορφή φθοράς του οδοστρώματος κατά Austroads.....	56
Πίνακας 3.9: Τυπικό φορτίο για αξονικές διατάξεις διπλών ελαστικών.....	56
Πίνακας 3.10: Τυπικό φορτίο για αξονικές διατάξεις μονών ελαστικών	56
Πίνακας 3.11: Ο συντελεστής βαρέων οχημάτων με βάση τον τύπο της οδού	68
Πίνακας 3.12: Προτεινόμενες τιμές για τον εκθέτη φθοράς n.....	70
Πίνακας 3.13: Μέση τιμή E80 με βάση τη φόρτωση των βαρέων οχημάτων ή τον τύπο της οδού.....	71
Πίνακας 3.14: Εύρος και μέση τιμή των E80 ανά όχημα για διάφορες περιπτώσεις οχημάτων	72
Πίνακας 3.15: Σύγκριση των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας.....	76
Πίνακας 4.1: Δεδομένα κυκλοφορίας για την περίοδο σχεδιασμού 20 ετών	83
Πίνακας 4.2: Πλήθος διαφόρων διατάξεων άξονα βαρέων οχημάτων.....	84
Πίνακας 4.3: Μετατροπή αξόνων από τα βαρέα οχήματα σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες	85
Πίνακας Π – 1: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2$	111
Πίνακας Π – 2: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2$	112
Πίνακας Π – 3: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2$	113
Πίνακας Π – 4: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2.5$	114
Πίνακας Π – 5: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2.5$	115
Πίνακας Π – 6: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2.5$	116

Πίνακας Π – 7: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 3$	117
Πίνακας Π – 8: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 3$	118
Πίνακας Π – 9: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρωμάτων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 3$	119
Πίνακας Π – 10: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου Austroads εύκαμπτων οδοστρωμάτων για μονούς άξονες μονών ελαστικών (SAST), μονούς άξονες διπλών ελαστικών (SADT), διπλούς άξονες μονών ελαστικών (TAST), διπλούς άξονες διπλών ελαστικών (TADT), τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών (TRDT)	120

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο έρευνας

Το εύκαμπτο οδόστρωμα είναι ένα πολυστρωματικό σύστημα, αποτελούμενο από την ασφαλτική στρώση στην επιφάνεια, η οποία συντίθεται από τρεις ασφαλτικές στρώσεις (αντιολισθηρή ασφαλτική στρώση, συνδετική ασφαλτική στρώση και ασφαλτική βάση) και τις υποκείμενες στρώσεις ασύνδετων υλικών (βάση και υπόβαση) οι οποίες εδράζονται πάνω σε μια στρώση γνωστή με το όνομα στρώση έδρασης της οποίας το πάχος είναι το μόνο απειρομήκης. Θεωρείται ο πιο συνήθης στη χρήση τύπος οδοστρώματος σε όλο τον κόσμο και οι εφαρμογές του είναι αμέτρητες.

Προκειμένου να κατασκευαστεί ένα τέτοιου τύπου οδόστρωμα, είναι απαραίτητο να έχει διαστασιολογηθεί μέσω του σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος επιβάλλει τον καθορισμό των παχών της κάθε στρώσης με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε όταν κατασκευαστεί να μπορεί να εξυπηρετήσει τους χρήστες του κατά την περίοδο σχεδιασμού του. Εντός αυτής της περιόδου, αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος και μειώνεται η αντοχή του εξ' αιτίας κάποιων επιδραστικών παραγόντων, όπως οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και η κυκλοφορία των οχημάτων.

Όσον αφορά την κυκλοφορία των οχημάτων, συνίσταται από τα επιβατηγά οχήματα (Ι.Χ) και τα βαρέα οχήματα (φορτηγά, λεωφορεία, ρυμουλκά με ρυμουλκούμενα γνωστές και ως νταλίκες). Έχει διαπιστωθεί πως τα βαρέα οχήματα είναι εκείνα που μετέχουν ως επί το πλείστον στην καταπόνηση ενός οδοστρώματος σε σχέση με τα επιβατηγά. Αυτό για δύο βασικούς λόγους, πρώτον ότι έχουν περισσότερο βάρος και δεύτερον κινούνται με μικρότερες ταχύτητες, κάνοντας τη φόρτιση να διαρκεί περισσότερο χρόνο στο οδόστρωμα. Επομένως είναι εκείνα τα οποία πρέπει να εκτιμηθούν για την φθορά που δημιουργούν στο οδόστρωμα. Η κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων ωστόσο δεν λαμβάνεται κατά αυτή τη μορφή. Σε κάθε βαρέο όχημα καλείται να διαμοιραστεί το βάρος του στις αξονικές διατάξεις που το αποτελούν. Λόγω της ποικιλομορφίας των βαρέων οχημάτων, αποτελούμενα από μονούς, διπλούς, τριπλούς άξονες μονών ή διπλών ελαστικών, είναι αναγκαία αυτή η διαδικασία, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερος και πιο ακριβής προσδιορισμός του κυκλοφοριακού παράγοντα. Η καταστρεπτικότητα της κυκλοφορίας στο οδόστρωμα συνεπώς, εξετάζεται με βάση τις διελεύσεις των αξονικών διατάξεων διαφόρων φορτίων, προερχόμενες από τον αριθμό κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων, εντός της περιόδου για την οποία μελετάται να σχεδιαστεί το οδόστρωμα.

Η θεώρηση και κατανομή της κυκλοφορίας σε άξονες, δυσκόλευε τον προσδιορισμό της φθοράς από την αρκετά μεγάλη πληθώρα αξόνων διαφόρων φορτίων των βαρέων οχημάτων. Ήταν απαραίτητο να δημιουργηθεί ένας πλασματικός άξονας συγκεκριμένου φορτίου, του οποίου οι διελεύσεις θα ισοδυναμούν με τις διελεύσεις όλων αυτών των αξόνων ως προς τη φθορά που επιφέρουν στο οδόστρωμα. Τη μετατροπή κατάφερε να αποδώσει ο αποκαλούμενος συντελεστής ισοδυναμίας. Πρωτεργάτης της έκφρασης της έννοιας του συντελεστή ισοδυναμίας αποτέλεσε η εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού

οδοστρωμάτων AASHTO, ύστερα από την επιτέλεση του οδικού πειράματος AASHO. Έκτοτε ο συντελεστής ισοδυναμίας εκτιμήθηκε από διάφορες μεθόδους που αναπτύχθηκαν από οργανισμούς στα πλαίσια σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Οι μέθοδοι αυτοί αναδεικνύουν το πόσο σημαντική είναι η παράμετρος της κυκλοφορίας για τον ακριβή σχεδιασμό ενός οδοστρώματος, καταδεικνύοντας τρόπους για την απλοποίηση του υπολογισμού της.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση ισοδύναμων διελεύσεων τυπικού άξονα, προερχόμενες από διαφορετικές μεθόδους έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας, αναφορικά με την επίδρασή τους σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα. Η επίδραση των υπόψη μεθόδων εξετάζεται με κριτήριο τη φθορά του οδοστρώματος που σχετίζεται με την κόπωση της ασφαλικής στρώσης.

Για την επίτευξη του στόχου, αρχικά διεξάγεται βιβλιογραφική έρευνα, για την ενδελεχή διερεύνηση του συντελεστή ισοδυναμίας. Εστιάζοντας στην ισοδύναμη κυκλοφορία και σε σχέση με τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων, διερευνώνται εκτενώς οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που επιφέρουν οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας, η οποία απαιτείται για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση. Κριτήριο αξιολόγησης αποτελούν οι οριζόντιες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο πυθμένα της ασφαλικής στρώσης και οι συσχετιζόμενες με αυτές φθορές λόγω κόπωσης. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει επίσης τον καθορισμό μιας μεθόδου αναφοράς καθώς και των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο λογισμικό ανάλυσης.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνίσταται από έξι βασικά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου και του τρέχοντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Το **Κεφάλαιο 2** αναφέρεται στην εξέλιξη του σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων μέσα στην πορεία του χρόνου, καταγράφοντας μεθόδους βασισμένες σε αρχές, είτε αμιγώς συνδεδεμένες με την εμπειρία που προσφέρει η παρατήρηση συμπεριφορών οδοστρώματος εντός των πειραμάτων στο πεδίο (εμπειρικός σχεδιασμός), είτε με την πραγματοποίηση πειραμάτων στο εργαστήριο και την ανάλυση και διεξαγωγή αποτελεσμάτων (αναλυτικός σχεδιασμός).

Στο **Κεφάλαιο 3**, αναλύεται η ανάγκη για τη σύνθεση της έννοιας του συντελεστή ισοδυναμίας στο πλαίσιο σχεδιασμού των οδοστρωμάτων. Κατόπιν ενδελεχούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης, εντοπίζονται διάφορες μέθοδοι έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας ή αλλιώς ονομαστικά μέθοδοι εκτίμησης ισοδύναμης κυκλοφορίας που αναπτύχθηκαν με την πάροδο του χρόνου από διάφορα ερευνητικά κέντρα και οργανισμούς, με έμφαση σε εκείνες που αναφέρονται στα εύκαμπτα οδοστρώματα.

Στο **Κεφάλαιο 4**, επιλέγονται και αναφέρονται οι μέθοδοι έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας, οι οποίες κρίνονται οι καταλληλότερες για την διεξαγωγή μιας συγκριτικής

ανάλυσης με κριτήριο την φθορά ενός εύκαμπτου οδοστρώματος λόγω κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης. Περιγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση (κυκλοφοριακά δεδομένα, χαρακτηριστικά οδοστρώματος, κατάσταση υπεδάφους) και πραγματοποιείται η σχετική ανάλυση. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σχετίζονται με τις αναπτυσσόμενες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις κάτω στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης όπως επίσης και τα συσχετιζόμενα ποσοστά φθοράς στο οδόστρωμα.

Στο **Κεφάλαιο 5**, σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας. Επίσης, περιλαμβάνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα επί του αντικειμένου.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση και συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Στο **Παράρτημα** εμφανίζονται συγκεντρωτικοί πίνακες συντελεστών ισοδυναμίας, από διάφορες μεθόδους

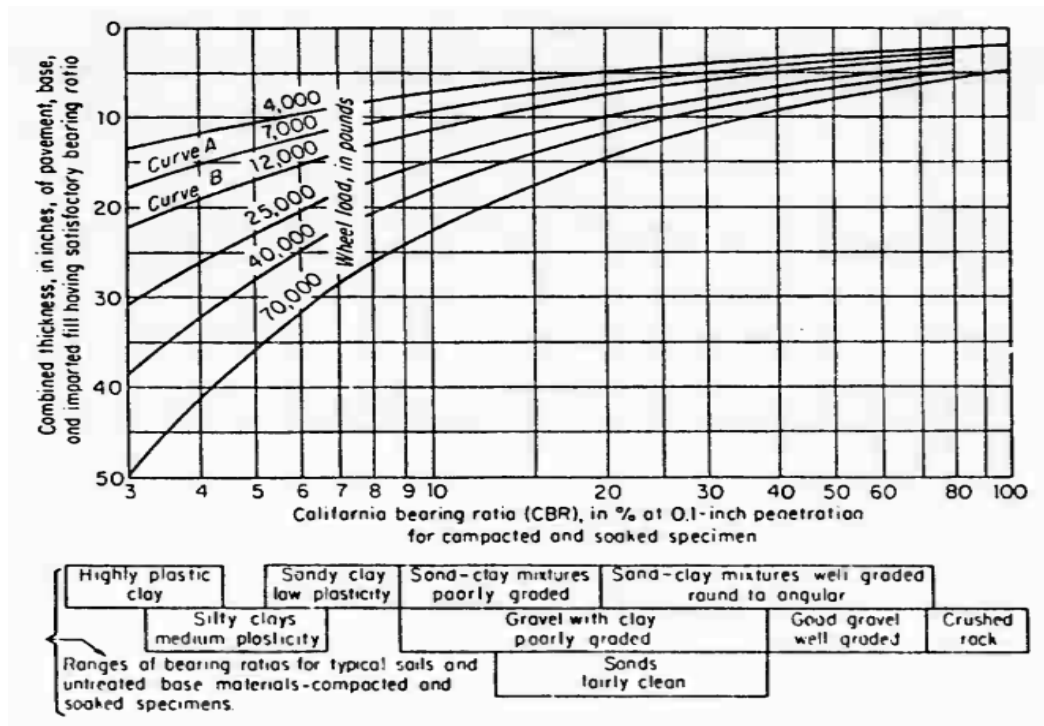
2. ΠΕΡΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Εμπειρικός σχεδιασμός οδοστρωμάτων

2.1.1 Μέθοδος CBR

Οι πρώτες προσπάθειες για το σχεδιασμό δομών οδοστρωμάτων ξεκινούν περίπου στις αρχές του 20^{ου} αιώνα (1920 – 1930), καθώς εξ' αιτίας της οικονομικής ανάπτυξης τότε γεννήθηκε η ανάγκη κατασκευής καλύτερης ποιότητας οδών. Βασισμένες από πειράματα στο πεδίο, οι μεθοδολογίες σχεδιασμού αυτές ονομάζονται εμπειρικές. Μια από τις αρχικές εμπειρικές μεθοδολογίες σχεδιασμού ήταν η μέθοδος CBR (California Bearing Ratio) το 1929 από το Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια (California Division of Highways). Παράλληλα εκείνη την εποχή ο οργανισμός AASHO (American Association of State Highway Officials) ανέπτυξε ένα σύστημα κατάταξης των εδαφών αποκλειστικά για έργα οδοποιίας, βασισμένο στο σύστημα κατάταξης του Hogentogler και Terzaghi γύρω στα μέσα του 1920. Έτσι η προαναφερθείσα μέθοδος βασίστηκε αρκετά στις αρχές της εδαφομηχανικής (Λοΐζος, και συν., 2021) (Braja, 2010) (Carvalho, 2006) (Wikipedia).

Η ανάπτυξη της μεθόδου CBR, αφενός ήταν να αξιολογηθεί η αντοχή των εδαφικών υλικών της στρώσης έδρασης, αφετέρου να μελετηθούν, ταξινομηθούν και συγκριθούν αυτά τα υλικά για την καταλληλότητα της χρήσης τους στη βάση και την υπόβαση του οδοστρώματος. Συνέδεσε την κατάσταση της στρώσης έδρασης μέσα από τον καλιφορνιακό δείκτη CBR, προερχόμενος από την εργαστηριακή δοκιμή CBR (CBR Test), με ένα απαιτούμενο συνολικό πάχος για το οδόστρωμα, βασισμένο στην υπόθεση του ελαστικού ημιχώρου που επικρατούσε τότε (θεωρία Boussinesq, 1885), εως προς την αποφυγή της διατμητικής αστοχίας (Carvalho, 2006). Σαν δείκτης CBR ορίζεται η αντίσταση στη διείσδυση των εδαφικών και ασύνδετων υλικών (φέρουσα ικανότητα) όταν αυτά συμπυκνωθούν στη βέλτιστη υγρασία και στην επιθυμητή πυκνότητα σε σχέση με την συμπεριφορά ενός πρότυπου τυποποιημένου υλικού. Η μεθοδολογία βελτιώθηκε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου από το Στρατιωτικό Σώμα Μηχανικών των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Army Corps of Engineers – USACE). Οι καμπύλες των 7000 lbs και των 12000 lbs ήταν οι πρώτες που σχεδιάστηκαν από το Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1** (Destafney, 1985), υποδηλώνοντας αντίστοιχα την ήπια (καμπύλη Α) και την βαριά κυκλοφορία κυκλοφορία (καμπύλη Β) (Wooltorton, 1958) (Kumar, et al., 2016) (Destafney, 1985).



Εικόνα 2.1: Εκτίμηση πάχους οδοστρώματος με βάση τον δείκτη CBR της στρώσης έδρασης (Destafney, 1985)

Η USACE στη συνέχεια επέκτεινε την έρευνα για φορτία πάνω από τα 12000 lbs δημιουργώντας περισσότερες καμπύλες. Επί τούτοις χρησιμοποιήθηκαν δύο αριθμητικές σχέσεις (Khanna, et al., 2011) (Civil Concept):

Οι σχέσεις αυτές έχουν εφαρμογή μόνο αν ο καλιφορνιακός δείκτης (CBR) του εδαφικού στοιχείου της στρώσης έδρασης είναι κάτω από 12%

$$t = \sqrt{P} \times \left(\frac{1.75}{CBR} - \frac{1}{p \times \pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

&

$$t = \left(\frac{1.75 \times P}{CBR} - \frac{A}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Όπου:

t = πάχος οδοστρώματος (cm)

P = φορτίο τροχού (kg)

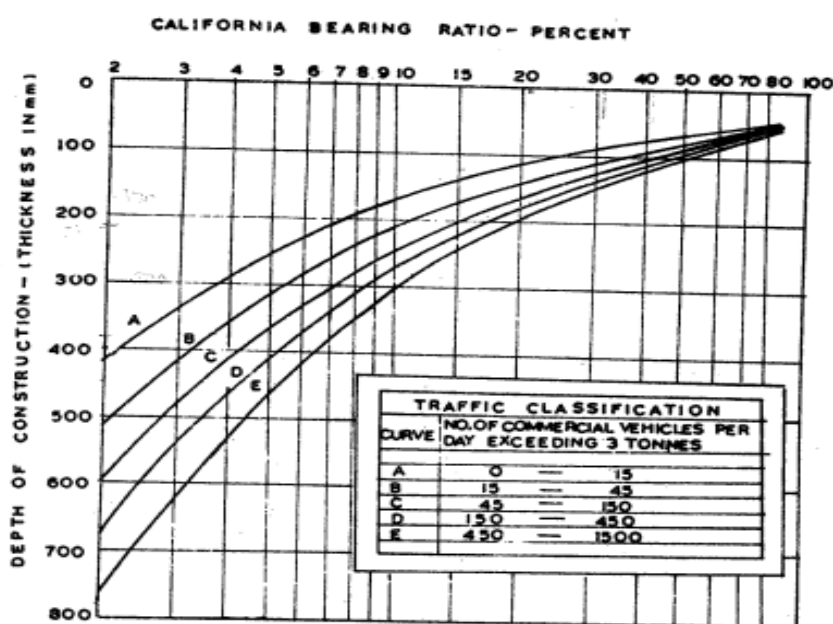
CBR = ποσοστό καλιφορνιακού δείκτη (%)

A = επιφάνεια επαφής (cm²)

p = πίεση ελαστικού (kg/cm²)

Μέσω του διαγράμματος της **Εικόνας 2.1**, για τον υπολογισμό του συνολικού πάχους που θα πρέπει να έχει το οδόστρωμα, έπρεπε να αξιολογηθεί και να γίνει γνωστή η τιμή CBR του εμποτισμένου σε νερό εδαφικού υλικού στη στρώση έδρασης. Στη συνέχεια εισάγεται στο διάγραμμα, όπου με βάση την κυκλοφορία και την επιλογή κατ' επέκταση της σωστής καμπύλης, προκύπτει το απαιτούμενο πάχος που θα προστατέψει τη στρώση έδρασης. Η πολυστρωματική θεωρία δεν είχε αναπτυχθεί ακόμα εκείνη την περίοδο, ως συνέπεια ο υπολογισμός ολοκληρωνόταν σε αυτό το στάδιο. Ωστόσο ο υπολογισμός πάχους άλλων στρώσεων όπως της βάσης και της ασφαλτικής, μπορούσε να διεκπεραιωθεί με την εκτίμηση τιμών CBR των υλικών της στρώσης της υπόβασης που βρισκόταν κάτω από εκείνες, ενώ με το CBR της βάσης, ήταν εφικτό να ληφθεί το πάχος της ασφαλτικής στρώσης. Έτσι λοιπόν αν τα CBR των στρώσεων πάνω από τη στρώση έδρασης είναι δεδομένα, τότε προκύπτουν και τα απαιτούμενα πάχη για την κάθε στρώση (Khanna, et al., 2011).

Η μέθοδος γνώρισε μεγάλη αναγνωρισιμότητα, καθώς επίσης αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη άλλων πιο σύγχρονων, για παράδειγμα από το Ινδικό Οδικό Συνέδριο το 1984 και έπειτα σε επόμενες εξελικτικές παραλλαγές της όπως δίνεται στην **Εικόνα 2.2** (IRC - Indian Roads Congress, 1995) και την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (Federal Aviation Administration – FAA) το 1995 (Λοΐζος, και συν., 2021).



Εικόνα 2.2: Εκτίμηση πάχους ανάλογα του δείκτη CBR βασισμένη στα Ινδικά Πρότυπα Σχεδιασμού (IRC - Indian Roads Congress, 1995)

2.1.2 Η μέθοδος Group Index

Η ανάπτυξη της εδαφομηχανικής και η κατάταξη των εδαφών μαζί με την θεωρία των δύο στρώσεων του Burmister το 1943, οδήγησε σε μια ακόμη γνωστή μέθοδο από το 1947, την μέθοδο Group Index (GI method). Πρόκειται για μια άλλη εμπειρική μέθοδο βασισμένη στις φυσικές ιδιότητες της στρώσης έδρασης του εδάφους. Αναφέροντας φυσικές ιδιότητες, δημιουργήθηκε ένας δείκτης GI για τον προσδιορισμό της εδαφικής ποιότητας ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του υλικού καθώς επίσης από τα όρια Atterberg (υδαρότητας και πλαστιμότητας). Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0 έως 20. Όσο

μεγαλύτερος είναι αυτός ο δείκτης τόσο πτωχότερη είναι η ποιότητα της στρώσης έδρασης και αντίθετα όσο μικρότερος, τόσο καλύτερο το στοιχείο (Anuroju) (Khanna, et al., 2011) .

$$GI = 0.2 \times a + 0.005 \times a \times c + 0.01 \times b \times d \quad (2.3)$$

Όπου:

a = ποσοστό εδάφους που διέρχεται από το κόσκινο #200 (0.074 mm) μεταξύ

35% – 75% (0 – 40)

b = ποσοστό εδάφους που διέρχεται από το κόσκινο #200 (0.074 mm) μεταξύ

15% – 55% (0 – 40)

c = όριο υδαρότητας LL σε ποσοστό άνω του 40% και μικρότερο του 60% (0 – 20)

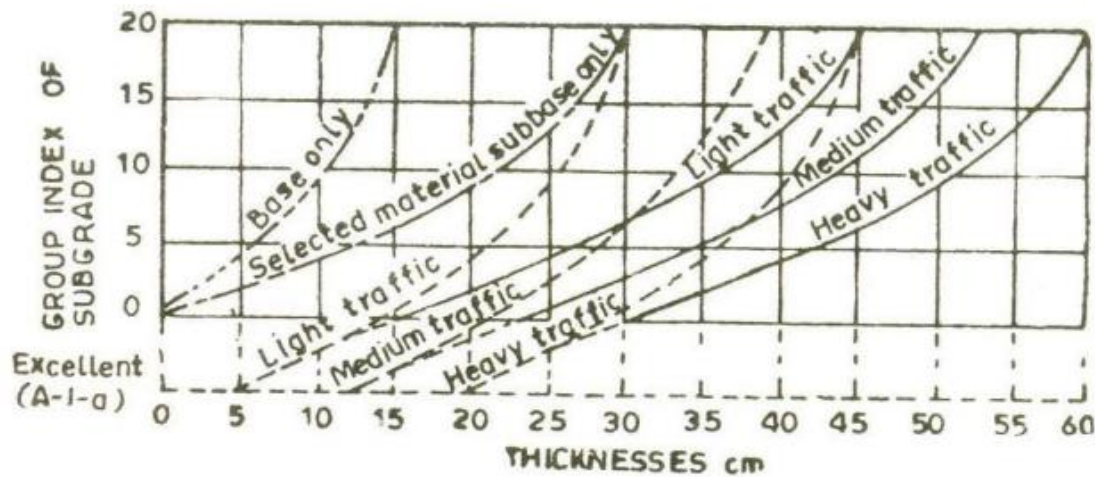
d = δείκτης πλαστικότητας PI άνω του 10% και μικρότερος του 30% (0 – 20)

Οι τιμές στις παρενθέσεις συνιστούν το εύρος τιμών που λαμβάνουν τα μεγέθη a, b, c και d. Για να εισαχθεί μια τιμή στη **Σχέση 2.3**, φερειπείν του c με γνωστό όριο υδαρότητας 50%, τότε αφαιρείται το κάτω όριο από την τιμή, και το μέγεθος c θα λάβει τιμή 10 ($c = 50 - 40 = 10$). Αν κάποιος εκ των προαναφερθέντων συντελεστών ξεπεράσει το άνω όριο τιμής, τότε λαμβάνεται στη σχέση το ανώτερο όριο. Εκτός αυτού, στη σχέση λαμβάνεται το μέγεθος της κυκλοφορίας βάσει του παρακάτω **Πίνακα 2.1** (Khanna, et al., 2011):

Πίνακας 2.1: Χαρακτηρισμός κυκλοφορίας με βάση την ημερήσια κυκλοφορία οχημάτων

Κατάσταση κυκλοφορίας οχημάτων	Αριθμός οχημάτων ανά ημέρα
Ήπια	<50
Μέτρια	50 - 300
Έντονη	>300

Στη συνέχεια βάσει του νομογραφήματος της **Εικόνας 2.3** (Reddy, 2020), προκύπτουν τα πάχη για τις στρώσεις που ο μελετητής συμπεριλαμβάνει. Στο διάγραμμα η συνεχής γραμμή εκφράζει το πάχος της επιφάνειας, της βάσης και της υπόβασης ενώ η διακεκομμένη το πάχος της επιφάνειας και της βάσης. Εφόσον γίνει γνωστή η ποιότητα του εδάφους στην έδραση, εισάγεται στο διάγραμμα για την εύρεση του συνολικού πάχους T του οδοστρώματος. Μετέπειτα με την επιλογή των λοιπών καμπυλών και με σωστές πράξεις αφαίρεσης, γνωστοποιούνται το πάχος υπόβασης t_{sb} , το πάχος της βάσης T_b και το πάχος της επιφάνειας t_s . Μπορεί να γίνει δεκτό σαν αρχική υπόθεση ότι το πάχος της επιφάνειας καταλαμβάνει 5 cm (Anuroju) (Aslam, 2019) .



Εικόνα 2.3: Νομογράφημα σχεδιασμού πάχους οδοστρώματος με βάση το δείκτη GI και των συνθηκών κυκλοφορίας (Reddy, 2020)

Η παραπάνω μέθοδος όπως διαπιστώνεται δεν περιλαμβάνει πουθενά την αντοχή της στρώσης έδρασης παρά μόνο τις ιδιότητές της. Το ερώτημα που τέθηκε ήταν το πόσο αξιόπιστη μπορεί να είναι. Η εξελικτική διαδικασία του σχεδιασμού έκανε μεσοπρόθεσμα αυτή τη μέθοδο να θεωρείται ξεπερασμένη (Ανυροζυ).

2.1.3 Καλιφορνιακή μέθοδος τιμής αντίστασης

Οι F. M. Hveem και R. M. Carmany το 1948 από το Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια (California Division of Highways) ανέπτυξαν μια άλλη μέθοδο σχεδιασμού βασισμένη σε ένα μέγεθος R που εκφράζει την αντίσταση ενός υλικού έναντι παραμόρφωσης και μιας τιμής C που υποδηλώνει συνεκτικότητα του εδάφους. Μετά από δοκιμές απόδοσης, διαπιστώθηκε πως το πάχος του οδοστρώματος εξαρτάται από αυτά τα μεγέθη καθώς επίσης και από τις επαναλήψεις φορτίου (Khanna, et al., 2011) (Jain, et al., 2013). Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$T = \frac{K \times TI \times (90 - R)}{C^{1/5}} \quad (2.4)$$

Με:

T = συνολικό πάχος οδοστρώματος σε cm

K = αριθμητική σταθερά = 0.166

TI = δείκτης κυκλοφορίας (traffic index) = $1.35 \times EWL^{0.11}$

R = τιμή αντίστασης σταθερόμετρου

C = τιμή συνοχής

Το EWL είναι ένα μέγεθος που ονομάζεται φορτίο ισοδύναμου τροχού (equivalent wheel load). Το EWL παίρνει τιμή ανάλογη των αξόνων που κάθε όχημα διαθέτει κατά την κυκλοφορία του στο οδόστρωμα όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.2**, τα αποτελέσματα του οποίου προέρχονται από έρευνα στην Καλιφόρνια το 1955 – 1956 (Jain, et al., 2013). Το άθροισμα του κάθε γινομένου του αριθμού των οχημάτων, αποτελούμενα από ένα συγκεκριμένο αριθμό αξόνων με τον αντίστοιχο EWL, συγκροτεί μια ετήσια εκτίμηση ισοδύναμων διελεύσεων φορτίου τροχού, οι οποίοι μετά προσαυξάνονται με το ποσοστό θεωρητικής αύξησης για μια χρονική περίοδο. Συνηθίζεται να λαμβάνεται μια μέση ετήσια αύξηση, δηλαδή μεταξύ της μηδενικής και της θεωρητικής. Το αποτέλεσμα συμμετέχει στον προσδιορισμό του δείκτη κυκλοφορίας TI (Khanna, et al., 2011). Σε αυτό το σημείο γεννά πολύ μεγάλο ενδιαφέρον αυτή η πρώτη προσπάθεια να θεωρηθεί από τότε μια ισοδύναμη κυκλοφορία για την ανάγκη σχεδιασμού ενός οδοστρώματος.

Πίνακας 2.2: Εκτίμηση EWL με βάση τον αριθμό αξόνων των οχημάτων

Αριθμός αξόνων	EWL (σε ετήσια βάση)
2	330
3	1070
4	2460
5	4620
6	3040

Η τιμή R επί της ουσίας, είναι η ικανότητα ενός υλικού ή ενός στοιχείου να αντιστέκεται στην πλευρική μετατόπισή του, λόγω εφαρμοσμένης κατακόρυφης πίεσης φορτίου. Η τιμή R προκύπτει από το σταθερόμετρο. Η δοκιμή σταθερομέτρου (stabilometer test) εμφανίστηκε από τους Hveem και Carmany μέσα στη δεκαετία του 1940 με βασικό μέλημα τη βελτίωση στη δοκιμή CBR. Το εύρος τιμής της κυμαίνεται από 0 έως 100, με τιμή 0 να εκπροσωπεί το νερό και τη μηδενική διατμητική άντοχη του ενώ η τιμή 100 αφορά ένα δείγμα με πλήρη ακαμψία χωρίς να υφίσταται παραμόρφωση όπως ένα πάρα πολύ σκληρό μέταλλο (Yousif, και συν., 2019 - 2020) (Yoder, et al., 1975) (Gierhart, 2017).

Η τιμή συνοχής C των υλικών των στρώσεων οδοστρώματος, προέρχεται από τη δοκιμή συνοχής (cohesiometer test). Η τιμή συνοχής της κάθε στρώσης υλικού μπορεί να βρεθεί από ξεχωριστές δοκιμές. Αντιθέτως, μια απ' ευθείας εκτίμηση συνοχής δεν είναι εφικτή. Αν όμως θεωρηθεί μια ισοδύναμη διατομή αποτελούμενη μόνο από ένα υλικό τότε θα μπορούσε να ληφθεί μια θεωρητική συνοχή για το συνολικό οδόστρωμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας σχέσης ισοδυναμίας μεταξύ της συνοχής των στρώσεων και των αντίστοιχων παχών (**Σχέση 2.5**).

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{1/5} \quad (2.5)$$

Η διαδικασία προσδιορισμού έχει ως εξής, κατά αρχάς πρέπει να είναι γνωστά τα υλικά που αποτελούν το οδόστρωμα, το πάχος τους και η συνοχή τους. Έτσι μέσω του παραπάνω τύπου, εκτιμώνται τα ισοδύναμα πάχη t_1 των στρώσεων πάχους t_2 και συνοχής C_2 με σταθερά

συνήθως την κατώτερη στρώση υλικού του οδοστρώματος συνοχής C_1 . Προκύπτει λοιπόν το ισοδύναμο πάχος του οδοστρώματος μιας και υφίσταται πλέον ομοιογένεια στο υλικό, φυσικά με γνωστά τα χαρακτηριστικά συνοχής του, δηλαδή εκείνα της κατώτερης στρώσης. Πλέον συγκρίνεται για μια τελευταία φορά με το πραγματικό πάχος του οδοστρώματος με την επιζητούμενη θεωρητική συνοχή (Khanna, et al., 2011). Παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Πίνακα 2.3** διαστήματα τιμών συνοχής C για κάποια υλικά στρώσεων στο οδόστρωμα (Reddy, 2020):

Πίνακας 2.3: Εύρος τιμών της συνοχής C για βασικούς τύπους υλικών

Ποιότητα υλικών	Τιμή C
Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο και εδαφικά υλικά	120 - 230
Ασφαλτόμιγμα	60 - 62
Ασφαλτόμιγμα ανοικτής σύνθεσης	22 - 30
Κοκκώδη υλικά για τη βάση (π.χ χαλίκι)	15

2.1.4 Μέθοδος McLeod

Αυτή η εμπειρική μέθοδος που αποσκοπούσε στον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων (αεροδρομίων και αυτοκινητόδρομων), προήλθε όταν το 1953 ο Norman W. McLeod από το Καναδικό Τμήμα Μεταφορών (Canadian Department of Transport) διεξήγαγε επαναλαμβανόμενες δοκιμές φέρουσας κυκλικών πλακών διαφόρων μεγεθών (plate bearing test / plate loading test). Τα αποτελέσματα οδήγησαν στη μόρφωση της παρακάτω σχέσης (Khanna, et al., 2011):

$$T = K \times \log\left(\frac{P}{S}\right) \quad (2.6)$$

Στην οποία:

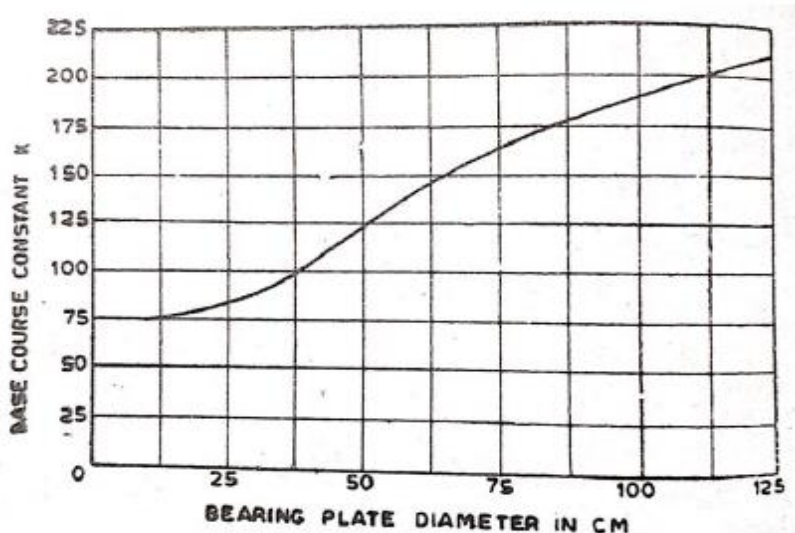
T = απαιτούμενο πάχος κοκκώδους υλικού βάσης σε cm

K = μια σταθερά για τη βάση

P = μεικτό φορτίο τροχού σε kg

S = συνολική υποστήριξη της στρώσης έδρασης για ίδια περιοχή επαφής, υποχώρηση και αριθμό επαναλήψεων φορτίου P σε kg

Η μελέτη οδήγησε στη δημιουργία εξάρτησης της σταθεράς βάσης K με την περιοχή κατάληψης του επιβαλλόμενου φορτίου που απεικονίζεται μέσω της **Εικόνας 2.4** (Nair, 2019). Η πλάκα στο πείραμα, αναλαμβάνει το ρόλο του εξεταζόμενου φορτίου που καλείται να φέρει το οδόστρωμα.



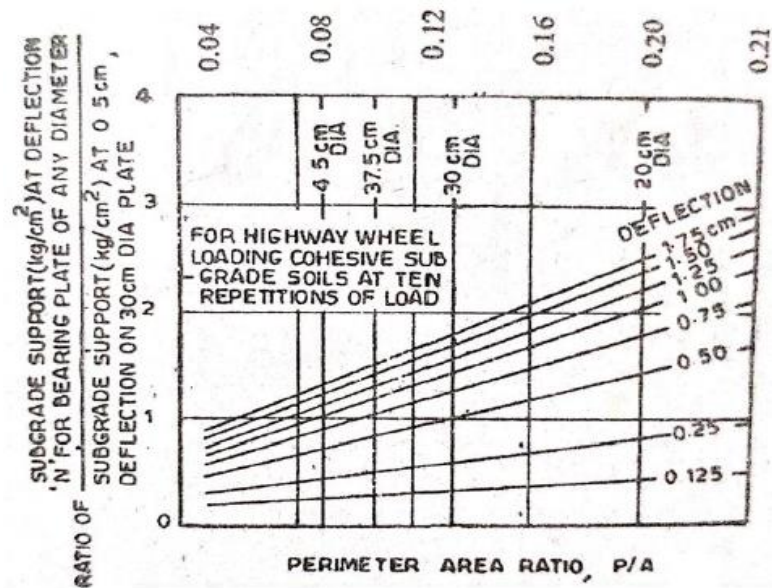
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα συσχέτισης της διαμέτρου πλάκας με τη σταθερά βάσης K (Nair, 2019)

Για αυτό τον σκοπό, πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί η ακτίνα α του αποτυπώματος του τροχού σε cm με βάση την πίεση του ελαστικού p σε kg/cm^2 και το φορτίο του P σε kg σύμφωνα με τη **Σχέση 2.7**. Επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί ο λόγος περιμέτρου προς την επιφάνεια όπως απεικονίζεται στην ακόλουθη **Σχέση 2.8**.

$$\alpha = \sqrt{\frac{P}{p \times \pi}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\text{Perimetre}}{\text{Area}} = \frac{2 \times \pi \times \alpha}{\pi \times \alpha^2} = \frac{2}{\alpha} \quad (2.8)$$

Ο λόγος αυτός, εισάγεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 2.5** που ακολουθεί (Nair, 2019) ή εναλλακτικά μπορεί να εισαχθεί ως η διάμετρος του φορτίου του τροχού. Ταυτόχρονα, πρέπει να είναι γνωστά στοιχεία πειραματικής δοκιμής, δηλαδή να προκύπτει πως μια πλάκα δεδομένης διαμέτρου, ύστερα από κάποιες επαναλήψεις φορτίου δημιουργεί μια μετρήσιμη υποχώρηση στη στρώση έδρασης κατά την εκπόνηση της δοκιμής φόρτωσης πλάκας. Το παρακάτω διάγραμμα στην **Εικόνα 2.5**, αφορά τη φόρτιση σε οδοστρώματα αυτοκινητόδρομων. Αντίστοιχο διάγραμμα έχει υλοποιηθεί για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα προσδιορισμού του λόγου τάσεων (υποστήριξης στρώσης έδρασης / τάσης διαρροής) (Nair, 2019)

Το διάγραμμα της **Εικόνας 2.5** παρουσιάζει τη συσχέτιση του λόγου Perimetre/Area με τον λόγο των τάσεων, όπως απεικονίζεται στα αριστερά του. Εφόσον ευρεθεί ο λόγος τάσης s από το φορτίο τροχού που εξετάζεται προς την τάση από τα πειραματικά δεδομένα, προκύπτει κατά ακολουθία η τάση s σε kg/cm^2 . Η τάση s ονομάζεται αλλιώς μονάδα υποστήριξης στρώσης έδρασης, η οποία στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την επιφάνεια του τροχού για να δώσει το φορτίο που υποστηρίζει η στρώση έδρασης, συμβολιζόμενο με S σε kg στη **Σχέση 2.9**. Το d είναι η διάμετρος του τροχού και εισάγεται σε cm .

$$S = s \times \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (2.9)$$

Με τη συλλογή αυτών των στοιχείων, είναι πλέον εφικτό να υπολογιστεί το πάχος T του οδοστρώματος σύμφωνα με την πρώτη **Σχέση 2.6**. Επιπλέον, μπορεί να παραχωρηθεί από το πάχος T , μια θεωρητική εκτίμηση του πάχους ασφαλτικής στρώσης της τάξης των 5 cm (Khanna, et al., 2011) (Farooqi).

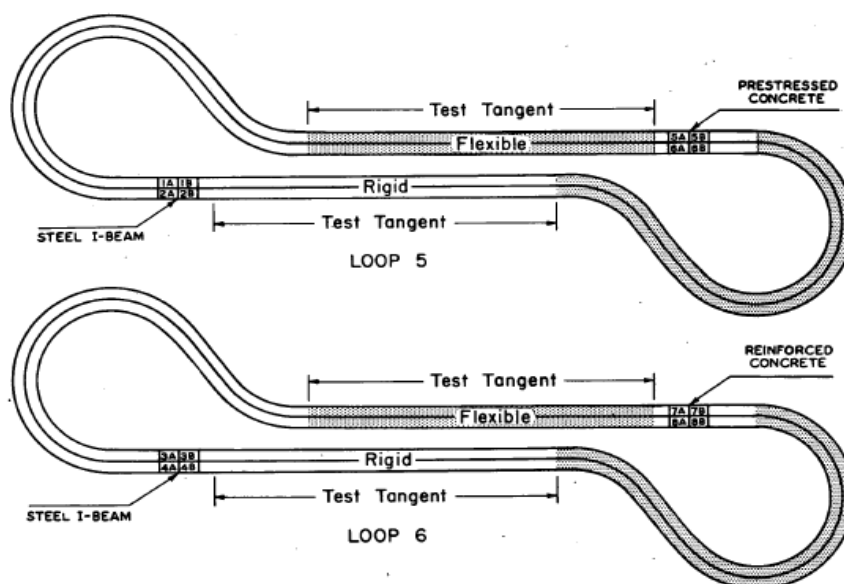
2.1.5 Η εμπειρική μέθοδος AASHTO

2.1.5.1 Το οδικό πείραμα AASHTO

Μετά τη διεκπεραίωση μιας σειράς επιτυχημένων δοκιμών, Maryland (Maryland Road Test, 1950 – 1951), που μελέτησε στα δύσκαμπτα την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων και των επιπτώσεων φορτίων τροχών κάτω από κάποιες διατάξεις άξονα και WASHO (the WASHO Road Test, 1952 – 1954), που εξέτασε αντίστοιχα στα εύκαμπτα την επιδραστικότητα της βαριάς κυκλοφορίας, τη σκυτάλη επωμίσθηκε το οδικό πείραμα AASHTO (Finney, 1951) (Humer).

Η ονομασία προέρχεται από τον χρηματοδότη της, την Αμερικανική Ένωση Υπαλλήλων Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων γνωστή τότε και ως AASHO (American Association of State Highway Officials) ή AASHTO όπως ονομάστηκε στη συνέχεια (American Association of State Highway and Transportation Officials). Η AASHO έγινε ο ανάδοχος του νέου αυτού δοκιμαστικού έργου το 1954 και το Ερευνητικό Συμβούλιο Αυτοκινητοδρόμων (Highway Research Board – HRB) ενέκρινε την κατασκευή εκείνου το 1955. Η εγκατάσταση ήταν διαθέσιμη για την δοκιμαστική κυκλοφορία από το 1958 και λειτούργησε μέχρι το Νοέμβριο του 1960 στην Ottawa του Illinois, νοτιοδυτικά του Chicago. Βασικό μέλημα του πειράματος AASHO ήταν να δημιουργηθούν συσχετισμοί μεταξύ της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων και των αξόνων διαφόρων μεγεθών φορτίου και διαφόρων διατάξεων άξονα που κατά βάση το καταπονούν. Εκτός αυτού, να βρεθούν τα βασικά αίτια που επηρεάζουν την αντοχή και το πάχος σε ένα οδόστρωμα (Carvalho, 2006) (Guclu, 2005).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος AASHO (1958 – 1960), έξι βρόχοι δημιουργήθηκαν ως προς τη μελέτη εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αλλά και για τη παρακολούθηση γεφυρών μικρών ανοιγμάτων. Καθένας από τους βρόχους ήταν διαιρεμένος σε τέσσερις λωρίδες με δύο ανά κατεύθυνση στους οποίους τα παράλληλα οδικά τμήματα ενώνονταν με ημικυκλικούς κόμβους. Καθώς φαίνεται στην **Εικόνα 2.6** (HRB - Highway Research Board, 1962), το βόρειο κομμάτι και ο κόμβος στα ανατολικά αποτελούνταν από τμήματα ασφάλτου σε αντιπαραβολή με το νότιο μέρος του βρόχου και του δυτικού κόμβου όπου κατασκευάστηκε δύσκαμπτο οδόστρωμα με την επίστρωση πλάκας σκυροδέματος. Μάλιστα οι τελευταίοι δύο βρόχοι (πέμπτος και έκτος) εμπεριείχαν και δοκιμαστικές εγκαταστάσεις γεφυρών (HRB - Highway Research Board, 1962).



Εικόνα 2.6: Δοκιμαστικοί βρόχοι (πέμπτος και έκτος) στο οδικό πείραμα AASHO (HRB - Highway Research Board, 1962)

Εντούτοις, εξυπηρετούσαν διαφορετικές λειτουργίες. Ο πρώτος βρόχος δεν υποβλήθηκε σε πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες σε σύγκριση με τους υπόλοιπους, διότι χρησιμοποιήθηκε αφενός για την εξέταση στατικών φορτίων και φορτίων ταχυτήτων

ερπυσμού, αφετέρου για την συμπεριφορά των οδοστρωμάτων εξ' αιτίας καιρικών φαινομένων και της επίδρασης του χρόνου. Ο δεύτερος βρόχος δοκιμάστηκε κάτω από συνθήκες κυκλοφορίας ελαφριών φορτηγών ενώ οι άλλοι τέσσερεις που ήταν και οι πιο μεγάλοι, χρησιμοποιήθηκαν για ελέγχους κυκλοφορίας οχημάτων συστήματος τράκτορα – ημιρυμουλκούμενου. Συνολικά λοιπόν, η διάταξη των βρόχων παρείχε δέκα λωρίδες δοκιμαστικής κυκλοφορίας κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετούσε οχήματα με την ίδια διάταξη αξόνων και συνδυασμών φορτίων άξονα όπως παρατηρείται στην επόμενη **Εικόνα 2,7** (HRB - Highway Research Board, 1962).

Loop	Lane	Weight in kips		
		Front Axle	Load Axle	Gross Weight
②	①	LOAD	LOAD	4
	②	FRONT	LOAD	8
③	①	FRONT	LOAD	28
	②			54
④	①			42
	②			73
⑤	①			51
	②			89
⑥	①			69
	②			108

Εικόνα 2.7: Τυπικά δοκιμαστικά φορτία αξόνων οχημάτων στο πείραμα AASHO (HRB - Highway Research Board, 1962)

Συμπεριλαμβανομένου και του πρώτου βρόχου, 836 δοκιμαστικές ενότητες (468 εύκαμπτου & 368 δύσκαμπτου) κατασκευάστηκαν εκ των οποίων οι 716 υποβλήθηκαν σε ελεγχόμενη κυκλοφοριακή φόρτιση. Η αποδοτικότητα των οδικών τμημάτων παρακολουθήθηκε τα επόμενα δύο χρόνια. Εντός του πειράματος επιλέχθηκε σαν τυπικός άξονας αναφοράς ο μονός άξονας διπλών ελαστικών με φορτίο τα 18 kips καθώς εκείνη τη χρονική περίοδο φερόταν να αποτελεί το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο σε πολλές πολιτείες της Αμερικής (HRB - Highway Research Board, 1962).

Βασικές του αδυναμίες αποτέλεσαν το ότι οι σχέσεις σχεδιασμού οδοστρωμάτων έχουν προέλθει από μια δοκιμή που διήρκεσε δύο χρόνια αντί μιας αναμενόμενης διάρκειας λειτουργίας ενός οδοστρώματος. Παράλληλα, δοκιμάστηκαν οδοστρώματα συγκεκριμένων υλικών της δεκαετίας του 1950 όπως και οι αξονικές διατάξεις και κατανομές από την

κυκλοφορία των οχημάτων δεν είναι αντιπροσωπευτικές στη σημερινή πραγματικότητα, ενώ δεν μελετήθηκαν περισσότερες κλιματικές συνθήκες εκτός από μια. Το πείραμα έκλεισε οριστικά το 1962. Ωστόσο σε αυτή τη χρονική στιγμή είχαν συλλεχθεί τα πρώτα πορίσματα που κυκλοφόρησαν σε μορφή τεχνικής έκθεσης (AASHTO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements) από το HRB το 1961 και 1962 τόσο για εύκαμπτα όσο και για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα (HRB - Highway Research Board, 1962) (Maadani, 2015) (Timm, et al., 2014).

Το οδικό πείραμα AASHTO, θεωρείται το μεγαλύτερο και πιο γνωστό πείραμα στα πλαίσια μελέτης των οδοστρωμάτων, καθότι τα αποτελέσματα του έχουν σημαντική αξία στο σχεδιασμό μέχρι και σήμερα και αποτέλεσαν τον ακρογωνιαίο λίθο για περαιτέρω μελέτη που αναπτύχθηκε. Μάλιστα, τα δεδομένα της δοκιμής χρησιμοποιούνται συχνά από ερευνητές με εντελώς διαφορετικούς τρόπους από εκείνους του AASHTO. Μέσω του πειράματος, καθιερώθηκαν πρακτικές για μια ακριβέστερη ανάλυση μέσα στον εμπειρικό σχεδιασμό, είτε αυτές αφορούν τον ίδιο τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων, είτε τα επόμενα στάδια του, την κατασκευή και την αξιολόγησή τους. Τα αποτελέσματα του πειράματος AASHTO στα ακολουθούμενα χρόνια συγκρότησαν μια εμπειρική μέθοδο σχεδιασμού οδοστρωμάτων, τη μέθοδο AASHTO, μια από τις επικρατέστερες μεθόδους σχεδιασμού, ευρέως αναγνωρισμένη και εφαρμόσιμη ακόμη και σήμερα, ούσα φιλική προς τον μελετητή. (International Society for Concrete Pavements). Η μέθοδος αυτή περιγράφεται συνοπτικά στην επόμενη υποενότητα.

2.1.5.2 Μεθοδολογία σχεδιασμού AASHTO

Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου πειράματος έφεραν στο προσκήνιο τη δημιουργία μιας νέας μεθοδολογίας σχεδιασμού οδοστρωμάτων, τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Μετά από το οδικό πείραμα AASHTO, συντάχθηκε ο πρώτος οδηγός AASHTO (AASHTO Interim Guide for Design of Flexible Pavement Structures) το 1961 στον οποίο αναπτύχθηκε η πρώτη σχέση σχεδιασμού (**Σχέση 2.10**) (DOT - U.S Department of Transportation) (Schwarz, et al., 2007):

$$\log(W_{18}) = 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{(4.2 - p_t)}{(4.2 - 1.5)} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} \quad (2.10)$$

Σαν αρχικές παράμετροι ορίστηκαν:

W_{18} = ο αριθμός διελεύσεων των ισοδύναμων τυπικών αξόνων 18 kip σε ESALs

SN = ο δείκτης δομικής επάρκειας εύκαμπτου οδοστρώματος

p_t = ο δείκτης εξυπηρετικότητας στο τέλος ζωής σχεδιασμού του έργου

Σημαντική παράμετρος για το οδόστρωμα είναι η κυκλοφορία W_{18} . Πριν χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο σχεδιασμού, καλείται να ποσοτικοποιηθεί σε ένα θεωρητικό μέγεθος που έχει δημιουργηθεί, τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες. Ως προς τη διευκόλυνση του μελετητή, η μέθοδος ανάγει όλο τον κυκλοφοριακό φόρτο μέσω ενός συντελεστή ισοδυναμίας, όπως θα

αναλυθεί παρακάτω, σε διελεύσεις τυπικών αξόνων με τυπικό φορτίο 18 kips (80 kN). Άπαξ και είναι γνωστός ο αριθμός των τυπικών αξόνων w_{18} για την περίοδο σχεδιασμού του έργου, απομειώνεται με ένα ποσοστό κυκλοφορίας διεύθυνσης D , που αφορά την κυκλοφορία προς τη μια κατεύθυνση εκ των δύο που εξετάζεται, και το ποσοστό λωρίδας L για τη διερχόμενη κυκλοφορία στη λωρίδα σχεδιασμού.

$$W_{18} = w_{18} \times D \times L \quad (2.11)$$

Η δομική επάρκεια SN είναι ένα πλασματικό μέγεθος που δημιουργήθηκε για να εκφράσει εξ' ορισμού την απαιτούμενη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Εξαρτάται από την επάρκεια των τριών στρώσεων του εύκαμπτου οδοστρώματος αναφερόμενα με h_1, h_2, h_3 για τα πάχη ασφατικής στρώσης, βάσης και υπόβασης με τη σειρά, με την προσαρμογή δομικών συντελεστών $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ για τις στρώσεις αυτές. Για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά βάση στην κατασκευή των οδοστρωμάτων, προσδιορίστηκαν τυπικές τιμές δομικών συντελεστών 0.44, 0.14 και 0.11 αντίστοιχα.

$$SN = \alpha_1 \times h_1 + \alpha_2 \times h_2 + \alpha_3 \times h_3 \quad (2.12)$$

Στην παραπάνω έκφραση σχεδιασμού (**Σχέση 2.10**), ωστόσο, κρύβεται η έννοια της εξυπηρετικότητας (serviceability). Η κλίμακα της εξυπηρετικότητας ή της λειτουργικότητας ενός οδοστρώματος κυμαίνεται από 0 έως 5 με 5 την άριστη ποιότητα που προσφέρει ένα οδόστρωμα. Με την πάροδο του χρόνου στην οποία καθημερινά επιδρούν σε ένα οδόστρωμα περιβαλλοντικοί και κυκλοφοριακοί παράγοντες, εκείνη σταδιακά πτωχαίνει και μειώνεται. Το μέγεθος ΔPSI , είναι εκείνο που εκφράζει τη διαφορά της εξυπηρετικότητας, από την αρχική τιμή p_i με την οποία ένα οδόστρωμα κατασκευάζεται μέχρι και την τελευταία p_t , προτού κριθεί απαιτητή άμεση παρέμβαση για την αποκατάστασή του. Η μεθοδολογία συνιστά για p_i μια τιμή στα 4.2 στο εύκαμπτο οδόστρωμα. Η τελική τιμή εξυπηρετικότητας γενικά δεν πρέπει να πέφτει κάτω από το 2.5 με 2 (AASHTO, 1993).

Η πρώτη προσπάθεια για την εξέλιξη της μεθοδολογίας ήρθε από τη μέθοδο AASHTO μέσω ενός Ενδιάμεσου Οδηγού το 1972 (1972 AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures). Με την επέκταση, νέο φάσμα υλικών συμπεριλήφθηκε σε αυτά που είχαν ήδη χρησιμοποιηθεί στο πείραμα AASHO. Εκ παραλλήλου, έγινε έκδηλη η ευαισθησία των οδοστρωμάτων και σε λοιπούς παράγοντες όπως η ικανότητα της στρώσης έδρασης και περιβαλλοντικών συνθηκών. Επί τούτου, η εξίσωση σχεδιασμού (**Σχέση 2.10**) αναδιαμορφώθηκε με την εισαγωγή κάποιων μεγεθών στη **Σχέση 2.13**.

$$\begin{aligned} \log(W_{18}) = & 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left[\frac{(4.2 - p_t)}{(4.2 - 1.5)}\right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + \log\left(\frac{1}{R}\right) \\ & + 0.372 \times (S_i - 3) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Συγκεκριμένα, συμπεριλήφθηκε ο περιφερειακός παράγοντας R , ο οποίος εκφράζει τη διόρθωση του δείκτη SN με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής. Οι τιμές του R προέκυπταν από τα ποσοστά απώλειας εξυπηρετικότητας στα οδοστρώματα του πειράματος AASHO. Το εγχειρίδιο της μεθόδου AASHTO ενημέρωνε ότι ο συντελεστής R μπορεί να μην προσαρμοζόταν σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Εκ των προτέρων, έπρεπε να ασκείται σωστά η κρίση του μελετητή για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και εν συνεχεία για τη σωστή επιλογή του συντελεστή. Επιπλέον μια εμπειρική κλίμακα στήριξης εδάφους S_i αναπτύχθηκε για να προβάλλει τις συνθήκες του εδάφους θεμελίωσης. Η κλίμακα λάμβανε τιμές από 1 έως 10 με τη μονάδα να αντιπροσωπεύει μαλακές αργίλους ενώ το 10 αφορούσε πετρώδη εδαφικά υλικά. Αναφορικά, στο πείραμα AASHO η στρώση έδρασης αποτελούταν από εδαφικό υλικό κατηγορίας A – 6 που ορίστηκε βάσει κλίμακας με τιμή 3 στην συνέχεια. Ο Ενδιάμεσος Οδηγός ταυτόχρονα εξέδωσε κάποια εύρη τιμών για τους δομικούς συντελεστές για διαφορετικά υλικά από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά στο πείραμα AASHO. Αυτά προσδιορίστηκαν κατόπιν έρευνας, με τη χρήση του αρχικού οδηγού AASHO Interim Guide το 1961 (Schwarz, et al., 2007) (DOT - U.S Department of Transportation).

Μετέπειτα ο Οδηγός της μεθόδου AASHTO το 1986 διατήρησε όλες τις προσεγγίσεις των προηγούμενων οδηγών συμπληρώνοντας νέα στοιχεία. Εισήγαγε την έννοια της αξιοπιστίας για το οδόστρωμα στο σχεδιασμό με συνεκτίμηση της ικανότητας αποστράγγισης. Επιπλέον, έγινε ακριβέστερη εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων αλλά κυρίως καλύτερος χαρακτηρισμός της στρώσης έδρασης και των ασύνδετων υλικών. Συνεπώς καθορίστηκαν επιπλέον δομικοί συντελεστές για διαφορετικά υλικά που μελετήθηκαν στο εργαστήριο (SHRP - Strategic Highway Research Program, et al., 1994). Για πρώτη φορά σε αυτόν τον οδηγό η στρώση έδρασης χαρακτηρίστηκε από το μέτρο ελαστικότητας M_R για τον προσδιορισμό της στήριξης του εδάφους στο οποίο κατασκευάζεται το οδόστρωμα. Η σχέση σχεδιασμού έλαβε την τελική της μορφή (**Σχέση 2.14**) ενώ επικαιροποιήθηκε και συμπεριλήφθηκε χωρίς να τροποποιηθεί στον τελικό εμπειρικό Οδηγό της μεθόδου AASHTO το 1993 (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993). Το 1993 η AASHTO εξέδωσε την τελική μορφή του Οδηγού Σχεδιασμού με καμία ουσιαστική αλλαγή γύρω από τις σχέσεις και τα στοιχεία που απαιτούνται. Μοναδικές προσθήκες παρουσιάστηκαν στο πλαίσιο της συντήρησης των οδοστρωμάτων και στο κομμάτι της αξιολόγησης πάνω στη χρήση των μη καταστρεπτικών μεθόδων (Non Destructive Testing – NDT), που έμμεσα μπορούν να συμβάλλουν στον λογισμό ακριβέστερων δομικών συντελεστών για το εξεταζόμενο οδόστρωμα (Schwarz, et al., 2007) (DOT - U.S Department of Transportation).

Η οριστική σχέση σχεδιασμού καθώς και τα βασικά στοιχεία που την πλαισιώνουν, περιγράφονται παρακάτω (**Σχέσεις 2.14 & 2.15**).

$$\log(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log(M_R) - 8.07 \quad (2.14)$$

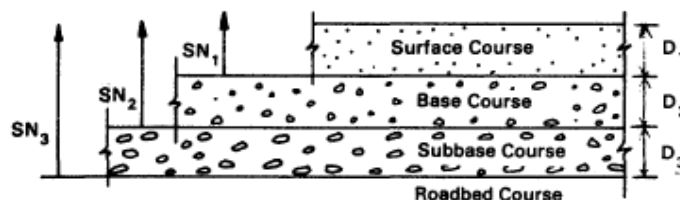
Στην αναθεωρημένη σχέση απαιτούμενης δομικής επάρκειας SN (**Σχέση 2.15**), οι συντελεστές m_2 και m_3 συμβολίζουν την αποστραγγιστική ικανότητα των στρώσεων αποτελούμενων από

ασύνδετα υλικά για τη βάση και την υπόβαση αντιστοίχως. Οι τιμές εκείνων εξαρτώνται αμιγώς από το ποσοστό του χρόνου που η ανάλογη στρώση εκτίθεται σε φαινόμενα υγρασίας σε κατάσταση κορεσμού. Σαφώς όσο μικρότερο αυτό το διάστημα επηρροής, τόσο καλύτερη προκύπτει αυτή η ικανότητα.

$$SN = \alpha_1 \times h_1 + \alpha_2 \times h_2 \times m_2 + \alpha_3 \times h_3 \times m_3 \quad (2.15)$$

Όπως διαπιστώνεται η δομική επάρκεια SN συνδέεται αμιγώς με το πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος. Στη **Σχέση 2.14**, αν αντί για το μέτρο ελαστικότητας της έδρασης M_R , εισαχθεί το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης ή της βάσης, κατ' επέκταση η σχέση θα δώσει αντίστοιχα SN_2 και SN_1 , όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.8** (AASHTO, 1993). Το SN_3 προκύπτει από τη στρώση έδρασης και στην ουσία είναι η συνολική απαιτούμενη δομική επάρκεια SN η οποία δίνει το συνολικό απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος. Τα επιμέρους SN_2 και SN_1 συνδέονται με το απαιτούμενο πάχος των στρώσεων κάτω από τη στρώση που εισήχθη στην εξίσωση σχεδιασμού. Με κατάλληλες πράξεις προκύπτει το απαιτούμενο πάχος που καλείται να διαθέτει ξεχωριστά η κάθε στρώση.

$$SN_1 = \alpha_1 \times h_1 \quad \& \quad SN_2 = \alpha_1 \times h_1 + \alpha_2 \times m_2 \times h_2 \quad (2.16)$$

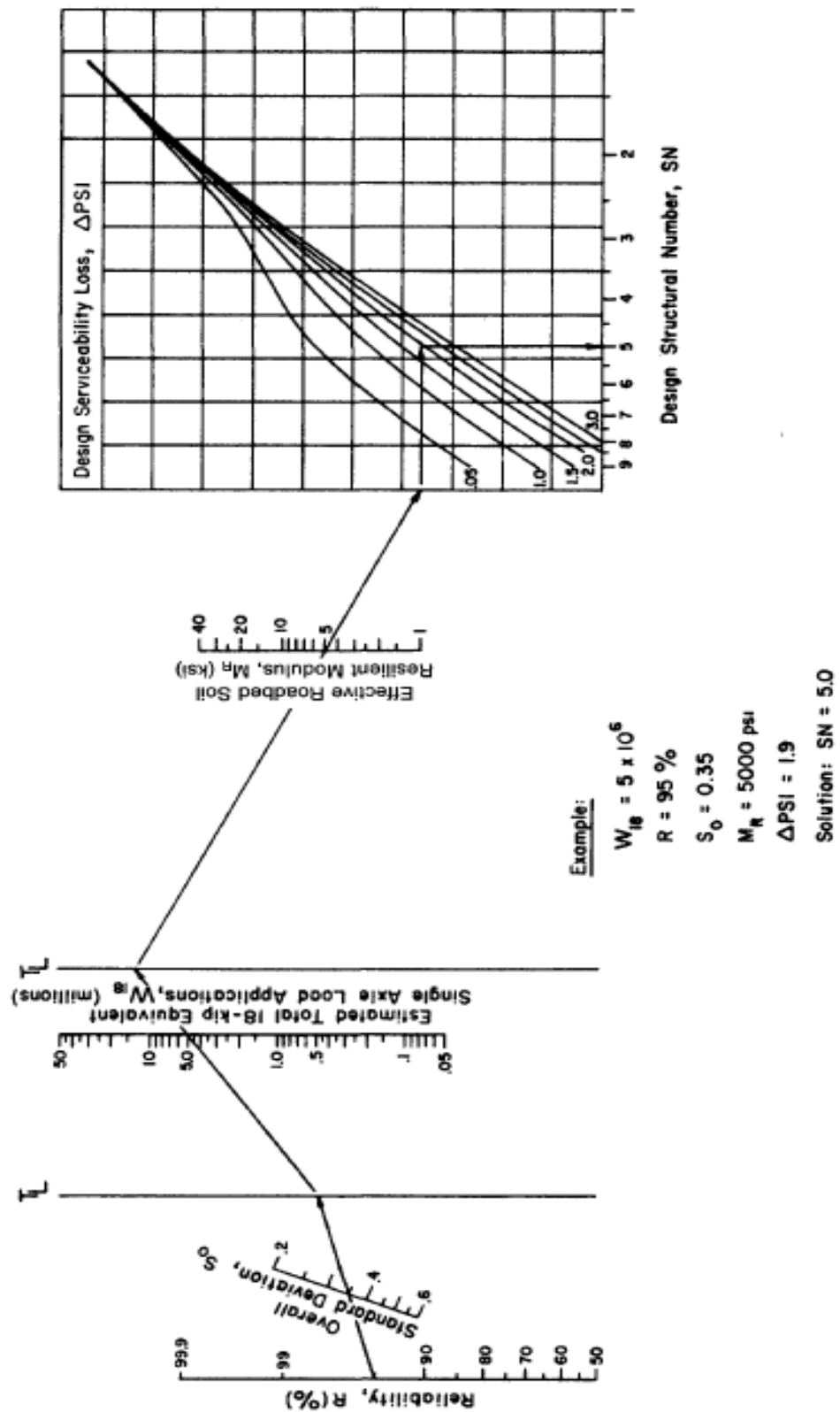


Εικόνα 2.8: Δείκτες δομικής επάρκειας SN_1 , SN_2 και SN_3 (AASHTO, 1993)

Το μέγεθος S_o χαρακτηρίζει μια τυπική απόκλιση από τη πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων εξ' αιτίας διάφορων σφαλμάτων, είτε κατασκευαστικών είτε σχεδιαστικών είτε οποιασδήποτε άλλης φύσης. Συνηθίζεται να λαμβάνεται μια τιμή εντός του εύρους 0.40 – 0.50 για τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Αναφορικά με την αξιοπιστία R (%), ορίζεται ως η πιθανότητα στο οδόστρωμα να λειτουργεί κανονικά χωρίς να επέλθει αστοχία από κυκλοφοριακούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες κατά την περίοδο στην οποία σχεδιάζεται (AASHTO, 1993). Το μέγεθος Z_R αντιπροσωπεύει το μέγεθος της ποσοστιαίας αξιοπιστίας R σε δεκαδική μορφή στη **Σχέση 2.14**. Έχει αναπτυχθεί από τη μέθοδο σχετικός πίνακας αντιστοίχισης του ποσοστού R με τη μεταβλητή Z_R (Huang, 2004) (Schwarz, et al., 2007).

Εκτός των βασικών αυτών σχέσεων, έχει αναπτυχθεί και νομογράφημα από τη μέθοδο AASHTO (**Εικόνα 2.9**) (AASHTO, 1993). Θα χρειαστεί να εισαχθεί η ίδια πληροφορία δεδομένων που αναφέρθηκε και η επίλυση σε αυτό, πραγματοποιείται με χάραξη ως προς

την άγνωστη συνθήκη. Αντίστοιχες σχέσεις και νομογραφήματα έχουν δημιουργηθεί και για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

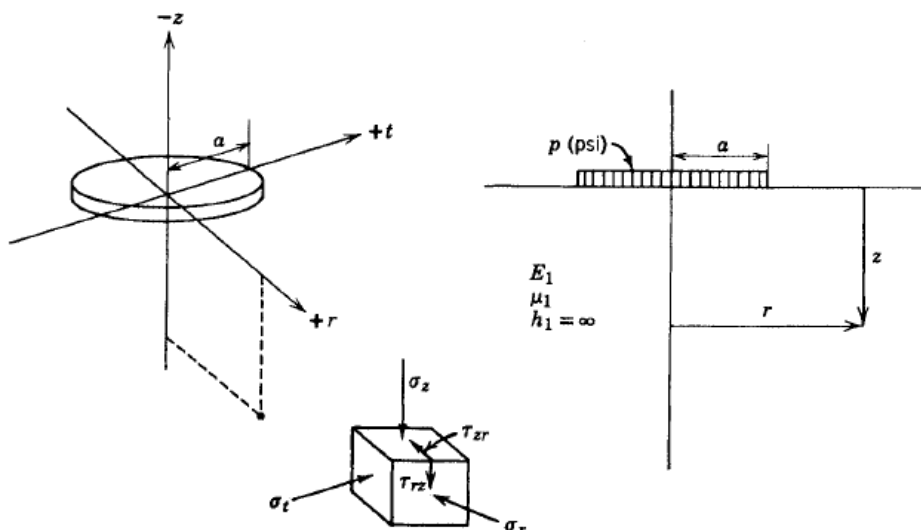


Εικόνα 2.9: Νομογράφημα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων (AASHTO, 1993)

2.2 Η αναλυτική προσέγγιση σχεδιασμού οδοστρωμάτων

2.2.1 Μονοστρωματικά συστήματα (Θεωρία Boussinesq)

Ο αναλυτικός σχεδιασμός οδοστρωμάτων εδραιώνει τις βάσεις του στις θεωρίες σχετικά με την κατανομή των τάσεων στο έδαφος από τον Boussinesq στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και τον Burmister στα μέσα του 20^{ου}. Αρχικά ο Boussinesq ήταν εκείνος που ανέπτυξε κάποιες εξισώσεις συσχέτισης ενός σημειακού επιβαλλόμενου φορτίου στο έδαφος με τις προκληθείσες τάσεις και παραμορφώσεις σε οποιοδήποτε σημείο σε αυτό. Σύμφωνα με τον Boussinesq, οι σχέσεις είχανε εφαρμογή θεωρώντας μια μονοστρωματική στρώση ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου υλικού, η μάζα του οποίου επεκτείνεται στο άπειρο και στις δύο διευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη). Η θεωρία του Boussinesq, επεκτάθηκε στην συνέχεια από τον ίδιο και σε εξισώσεις για την επιβολή φορτίου κατανεμημένου ομοιόμορφα σε κυκλικό εμβαδόν όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.10** (Yoder, et al., 1975), εκφράζοντας καλύτερα την συνηθέστερη μορφή προσέγγισης φόρτισης από τα ελαστικά στο οδόστρωμα (Λοΐζος, και συν., 2021) (Huang, 2004).



Εικόνα 2.10: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq από υποβολή φορτίου κυκλικής κατανομής (Yoder, et al., 1975)

Έτσι για οποιοδήποτε σημείο στο έδαφος με κατακόρυφο άξονα δια του κέντρου του κυκλικού φορτίου:

$$\sigma_z = p \times \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (2.17)$$

$$\sigma_r = \sigma_t = p \times \left\{ \frac{1 + 2 \times \nu}{2} - \frac{1 + \nu}{\left[1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right]^{1/2}} + \frac{1}{2 \times \left[1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_z = \frac{p \times (1 + \nu)}{E} \times \left\{ \frac{\frac{z}{a}}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{3/2}} - (1 - 2 \times \nu) \times \left\{ \frac{\frac{z}{a}}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2}} - 1 \right\} \right\} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{1}{E} \times \left[\frac{1 - \nu}{2 \times \nu} \times (\sigma_z - E \times \varepsilon_z) - \nu \times \sigma_z \right] \quad (2.20)$$

$$w_z = \frac{(1 + \nu) \times p \times a}{E} \times \left\{ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2}} + (1 - 2 \times \nu) \times \left\{ \left[1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2} - \frac{z}{a} \right\} \right\} \quad (2.21)$$

Όπου:

σ_z = η κατακόρυφη τάση

σ_r = η ακτινική οριζόντια τάση

σ_t = η εφαπτομενική οριζόντια τάση

ε_z = η κατακόρυφη παραμόρφωση

ε_r = η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση

ε_t = η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση

w_z = η βύθιση

ν = ο λόγος του Poisson

E = το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους

a = η ακτίνα της κυκλικής κατανομής

p = το ομοιόμορφα κατανεμημένο επιβαλλόμενο φορτίο

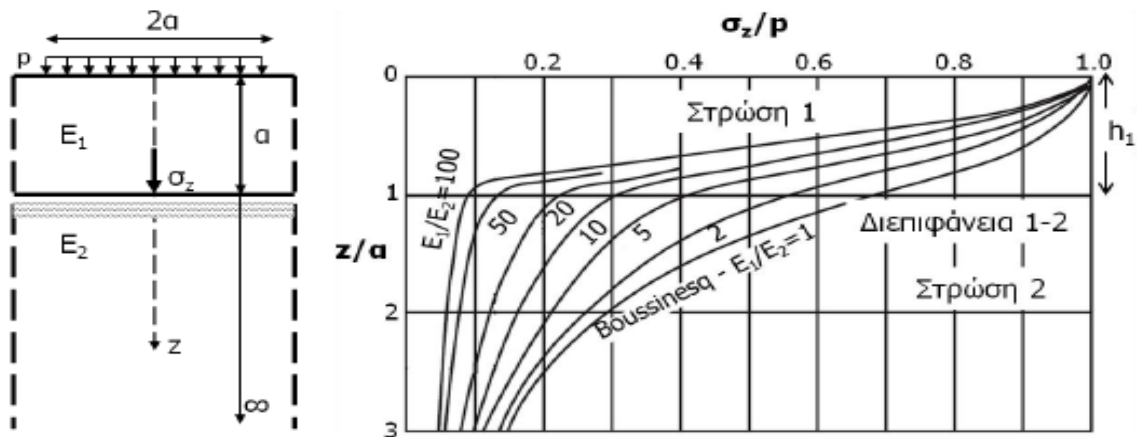
z = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

Η θεωρία αυτή δεν εφαρμόζεται ως προς το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων σήμερα, παρ' όλα αυτά αποτελεί την γενέτειρα ανάπτυξης ακριβέστερων και πιο εξελιγμένων θεωριών υπολογισμού τάσεων. Η χρησιμότητα της για την εδαφομηχανική είναι σπουδαία μέχρι και σήμερα.

2.2.2 Θεωρία επάλληλων στρώσεων Burmister

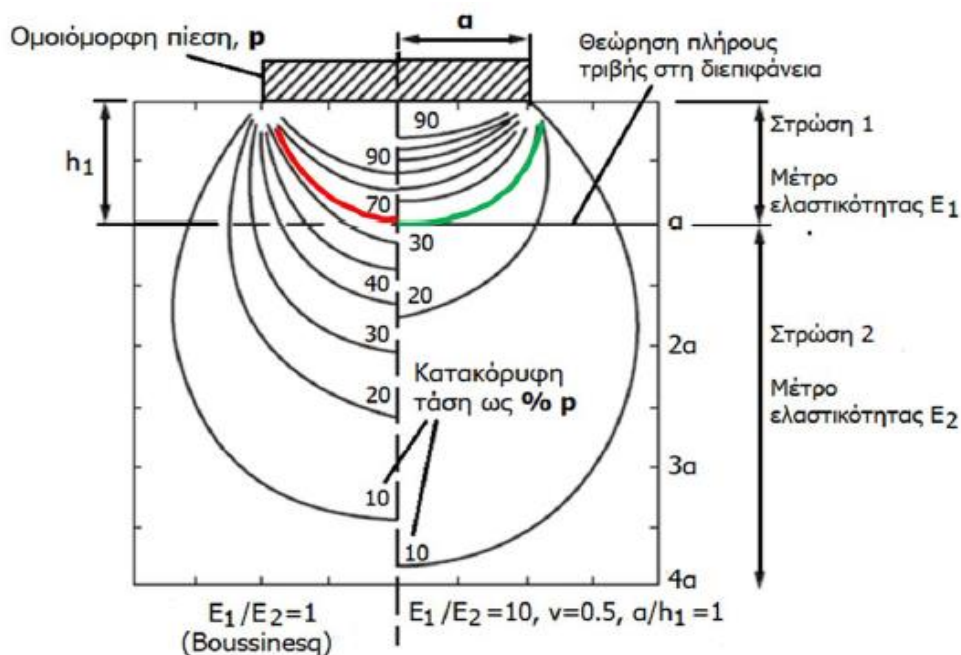
Η βασική θέση της θεωρίας του D. M. Burmister που αναπτύχθηκε το 1943, προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική πολυστρωματική φύση ενός οδοστρώματος ακόμα και σήμερα.

Επί της ουσίας, η θεώρηση των επάλληλων στρώσεων για το οδόστρωμα συνέθεσε όχι μόνο τη βάση για την διαιώνιση της θεωρίας του πολυστρώματος και τη δημιουργία μεταγενέστερων αναλυτικών μεθόδων στη συνέχεια από διάφορους μελετητές (Peattie, Jones, Monismith, Huang, Nijboer, Lytton κλπ), αλλά και την προετοιμασία για την νέα πραγματικότητα στο σχεδιασμό (Humer). Αρχικά ο Burmister ήταν αυτός που ανέπτυξε τη θεωρία του για οδοστρώματα δύο στρώσεων και στην συνέχεια την επέκτεινε και για συστήματα τριών στρώσεων. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και του προγραμματισμού, η εφαρμογή της θεωρίας Burmister επιτεύχθηκε και για οδόστρωμα με οποιοδήποτε αριθμό στρώσεων (πολύστρωμα) (Huang, 2004). Η θεωρία βασίστηκε σε υπάρχουσες παραδοχές, όπως της περίπτωσης της θεωρίας του Boussinesq. Τα εξεταζόμενα υλικά των στρώσεων χαρακτηρίζονται ως ομογενή, ισότροπα και ελαστικά, με τις συναποτελούμενες στρώσεις να διαθέτουν πεπερασμένο πάχος ενώ το βάθος της κατώτερης στρώσης να εκτείνεται εις το άπειρο. Κατά τον Burmister, οι τιμές της κατακόρυφης τάσης κάτω από το κέντρο μιας κυκλικής φόρτισης είναι σχετικές με το πάχος h_1 της επιφανειακής στρώσης, με την ακτίνα a της επιφάνειας φόρτισης και κυρίως με την αναλογία των μέτρων ελαστικότητας των εξεταζόμενων στρώσεων E_1/E_2 . Αυτό παρατηρείται στην **Εικόνα 2.11** (Λοΐζος, και συν., 2021):



Εικόνα 2.11: Επιρροή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας των δυό στρώσεων ως προς την προκύπτουσα κατακόρυφη τάση ύστερα από κυκλική φόρτιση p ακτίνας a (Λοΐζος, και συν., 2021)

Παρατηρείται τόσο από την **Εικόνα 2.11** όσο και από την **Εικόνα 2.12** που ακολουθεί (Λοΐζος, και συν., 2021), το πόσο σημαντικά η επιφανειακή στρώση επηρεάζει την τελική απομειωμένη τιμή της τάσης που θα παραλάβουν οι λοιπές υποκείμενες στρώσεις. Στην ουσία, η θεωρία Burmister έδωσε πρακτικά τον λόγο και το βασικό νόημα στην κατασκευή στρώσεων με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά ως προς το τελικό προϊόν, το οδόστρωμα (Λοΐζος, και συν., 2021).



Εικόνα 2.12: Έκφραση Burmister κατακόρυφων τάσεων για μονοστρωματικό και διστρωματικό σύστημα με τη χρήση ισοτασικών καμπυλών (Λοΐζος, και συν., 2021)

Αναφορικά με τον υπολογισμό της ελαστικής υποχώρησης w_o , έχει δημιουργηθεί μια σχέση (Σχέση 2.22) κατά τη θεωρία Burmister, που την εκφράζει:

$$w_o = \left(\frac{1.5 \times p \times a}{E_2} \right) \times F_2 \quad (2.22)$$

Με:

w_o = μέγιστη υποχώρηση της επιφάνειας

p = ασκούμενη πίεση

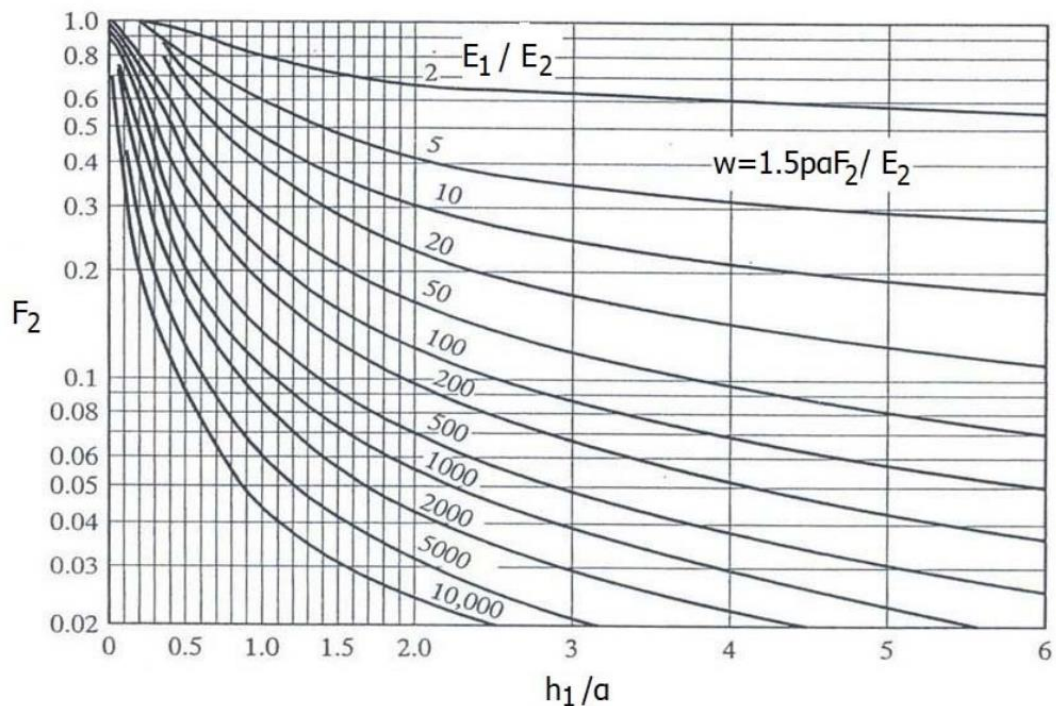
a = ακτίνας της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης

E_2 = μέτρο ελαστικότητας της δεύτερης στρώσης

F_2 = συντελεστής υποχώρησης

Στην περίπτωση που η ανώτερη στρώση είναι άκαμπτη πλάκα η σχέση πολλαπλασιάζεται με 1.18 αντί για 1.5 (Ανυροју).

Προκειμένου να υπολογιστεί η υποχώρηση, απαιτείται ο συντελεστής υποχώρησης F , η τιμή του οποίου εξαρτάται από τα μέτρα ελαστικότητας των δύο στρώσεων σε ένα οδόστρωμα, το πάχος της πρώτης στρώσης αλλά και από το εμβαδόν της επιφάνειας φόρτισης, σύμφωνα με το νομογράφημα της **Εικόνας 2.13** (Λοΐζος, και συν., 2021).



Εικόνα 2.13: Νομογράφημα υπολογισμού της υποχώρησης F_2 (Λοΐζος, και συν., 2021)

2.2.3 Θεωρία ισοδύναμων στρώσεων Odemark

Για την ανάλυση δύο και περισσότερων στρώσεων σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, εκτός από την θεωρία του Burmister, συνηθίζεται για την απλούστευση της διαδικασίας να χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τον Odemark το 1949. Εκείνη αποσκοπεί στην ισοδυναμία των στρώσεων με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά ώστε να είναι εφικτή η ελαστική θεωρία μιας ενοποιημένης βάσης. Η θεωρία Odemark, τοποθετείται στο ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις υποκείμενες μιας στρώσης, εξαρτώνται μόνο από την δυσκαμψία της στρώσης αυτής (Λοΐζος, και συν., 2021) (El - Badawy, et al., 2011). Η ακαμψία ποσοτικοποιείται:

$$\frac{h^3 \times E}{1 - \nu^2} \quad (2.23)$$

Με:

h = το πάχος της στρώσης

E = το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης

ν = ο λόγος του Poisson

Ως εκ τούτου, η μετατροπή της μιας στρώσης στην ποιότητα της δεύτερης ούτως ώστε να αποκτηθεί μια ενοποιημένη ελαστική ομογενής ισότροπη συνολική στρώση σαν εκείνη της **Εικόνας 2.14** (El - Badawy, et al., 2011), πρέπει να βασίζεται στον κανόνα της ίδιας ακαμψίας των στρώσεων (**Σχέση 2.24**).



Εικόνα 2.14: Μετατροπή σε ισοδύναμο πάχος κατά Odemark (El - Badawy, et al., 2011)

$$\frac{h_1^3 \times E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{h_e^3 \times E_2}{1 - \nu_2^2} \quad (2.24)$$

Η θεωρία ισοδυναμίας Odemark μπορεί να βρει εφαρμογή και στη μετατροπή περισσότερων στρώσεων. Στην περίπτωση τριών στρώσεων με ανόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά, συνίσταται η μετατροπή της πρώτης στρώσης στην επιφάνεια σε ισοδύναμη με ίδια χαρακτηριστικά με αυτά της τρίτης στρώσης (υπέδαφος). Αντιστοίχως μετατρέπεται και η δεύτερη (ενδιάμεση) στρώση σε ισοδύναμη με χαρακτηριστικά της τρίτης. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διαμόρφωση μιας ενιαίας στρώσης με κοινό μέτρο ελαστικότητας και λόγο Poisson, ίδια με αυτά της κατώτερης πριν τις μετατροπές.

Η σχέση παρουσιάζει καλύτερη ακρίβεια με την εισαγωγή ενός διορθωτικού συντελεστή f του οποίου οι τιμές εξαρτώνται από τον αριθμό των υφιστάμενων στρώσεων. Αν αναφέρεται σε δύο στρώσεις, τότε λαμβάνει τιμή 0.9 ενώ σε περισσότερες στρώσεις 0.8. Ειδικά για την περίπτωση της πρώτης διαχωριστικής επιφάνειας, ο συντελεστής ισούται με 1 (Λοΐζος, και συν., 2021) (El - Badawy, et al., 2011). Με τον λόγο Poisson σταθερό σε όλες τις στρώσεις που απαρτίζουν το οδόστρωμα η σχέση έκφρασης για ένα οδόστρωμα, συναποτελούμενο από δύο στρώσεις εκφράζεται:

$$h_e = f \times h_1 \times \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (2.25)$$

Ενώ για περισσότερες :

$$h_{en} = f \times \sum_{i=1}^n \left(h_i \times \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right) \quad (2.26)$$

Με:

h_{en} = ισοδύναμο πάχος της εξεταζόμενης στρώσης

f = διορθωτικός συντελεστής

h_1 = το πάχος της κατώτερης στρώσης

E_i = μέτρο ελαστικότητας της κατώτερης στρώσης

E_n = μέτρο ελαστικότητας εξεταζόμενης στρώσης

2.2.4 Η άνθιση του μηχανιστικού – εμπειρικού σχεδιασμού

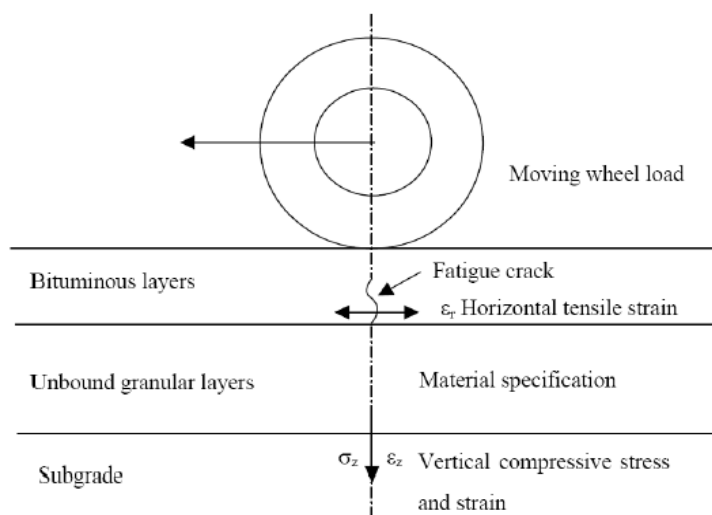
Με τον όρο μηχανιστικός ή αλλιώς αναλυτικός σχεδιασμός, εννοείται μια μεθοδολογία σχεδιασμού οδοστρώματος η οποία αποσκοπεί στον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός οδοστρώματος. Για την επίτευξή του, απαιτούνται η εκτιμώμενη κυκλοφορία για την οποία σχεδιάζεται το οδόστρωμα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και τα υλικά οδοστρωσίας που εμπρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για τη διατομή οδοστρώματος που εξετάζεται. Αφού υπολογιστούν αυτά τα εντατικά μεγέθη, ποσοτικοποιούνται σε φθορά στο οδόστρωμα με κάποιες σχέσεις συσχέτισής τους, ονόματι νόμοι αστοχίας του υλικού.

Το 1945 ο M. A. Miner δημοσίευσε έναν προϋπάρχοντα κανόνα που είχε αναπτυχθεί πρώτα από τον A. Palmgren το 1924. Ο κανόνας φέρει την ονομασία Αρχή Miner (Miner's Rule) ή εναλλακτικά ονομάζεται υπόθεση γραμμικής φθοράς Miner. Ο κανόνας μορφοποιεί την σχετική φθορά D που υφίσταται ένα οδόστρωμα μέσω ενός αθροίσματος κλασμάτων των υφιστάμενων διελεύσεων άξονα n_i φορτίων i ως προς τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων N_i αξονικών φορτίων i που οριακά το οδόστρωμα μπορεί να υποστηρίξει. Η υπέρβαση του μεγέθους N_i από κάποιο n_i , θα οδηγήσει το οδόστρωμα σε κάποια από τις μορφές αστοχίας του. Η τιμή του D προφανώς δε μπορεί να υπερβαίνει τη μονάδα, αυτό θα σήμαινε πως το οδόστρωμα έχει αστοχήσει (Inoma, et al., 2019).

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2.27)$$

Προκειμένου να μπορούν να αναγνωριστούν οι επιτρεπόμενες διελεύσεις για κάποια μορφή αστοχίας, όπως η κόπωση της ασφαλικής στρώσης (fatigue cracking) ή παραμενουσών παραμορφώσεων στη στρώση έδρασης (permanent deformation ή pavement rutting) και κατά συνέπεια η θεωρητική αυτή έκφραση της φθοράς να αποκτήσει πρακτική εφαρμογή, ήταν απαραίτητη η διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων. Μέσω αυτών, δημιουργήθηκαν σχέσεις σύνδεσης των επιτρεπόμενων διελεύσεων με μέγιστες ανηγμένες παραμορφώσεις που εκδηλώνονται με διαφορετική ποιότητα για τον εκάστοτε μηχανισμό αστοχίας από την επιβολή φόρτισης. Στις σχέσεις αυτές που κοινώς ονομάζονται νόμοι αστοχίας του υλικού μετείχαν εκτός των ιδιοτήτων του υλικού και περιβαλλοντικοί παράγοντες. Η κατακόρυφη εντατική κατάσταση στη στρώση έδρασης καταλήγει στο φαινόμενο της παραμένουσας παραμόρφωσης όπως διατύπωσαν οι Kerkhoven και Dormon το 1953, ενώ για τις οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις προέκυψε ότι οδηγούν σε φαινόμενα κόπωσης της ασφάλτου όπως συμπέραναν οι Saal και Pell το 1960 (Pereira, et al., 2017).

Η **Εικόνα 2.15** εμφανίζει τις μέγιστες ανηγμένες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε αυτά τα σενάρια αστοχίας, τόσο για την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης όσο και για την κόπωση της ασφαλικής στρώσης (Muhammet, et al., 2010). Η συμπεριφορά του νόμου αστοχίας λόγω της κόπωσης της ασφαλικής στρώσης συνήθως διαφέρει αρκετά από τον νόμο της παραμένουσας παραμόρφωσης στη στρώση έδρασης, τόσο στο πως επηρεάζονται και από τι εξαρτώνται, όσο και από τις κατάλληλες ανηγμένες παραμορφώσεις που χρησιμοποιούνται στους νόμους.



Εικόνα 2.15: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας (Muhammet, et al., 2010)

Επιστρέφοντας ξανά στην έκφραση της φθοράς σε ένα οδόστρωμα, εξ' αιτίας του μεγάλου όγκου κυκλοφορίας που υφίσταται το οδόστρωμα σε πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες και των πολλών αξόνων ποικίλων φορτίων i που θα προκύψουν από εκείνον, εκ του αποτελέσματος θα χρειαζόταν να υπολογιστούν φθορές αξόνων για το εκάστοτε φορτίο i . Αυτό διότι ο νόμος οποιασδήποτε αστοχίας του υλικού, είτε απευθύνεται σε κόπωση είτε σε παραμένονσα παραμόρφωση, μεταβάλλεται με την επιβολή διαφορετικού φορτίου. Εν κατακλείδι, θα χρειαστεί να υπολογιστούν επιτρεπόμενες διελεύσεις μέσω του νόμου εκ νέου για κάθε πλήθος αξόνων ξεχωριστού φορτίου i που διέσχισε το οδόστρωμα. Κάθε κλάσμα φορτίου i αποτελεί μια μικρή φθορά για το οδόστρωμα που αθροίζοντάς τη με τις λοιπές φθορές διελεύσεων άξονα άλλων φορτίων, θα δώσει την συνολική φθορά D ως προς την εξεταζόμενη μορφή αστοχίας. Αυτή την εκτεταμένη και επίμοχθη διαδικασία άλλωστε είναι εκεί για να την απλουστεύσει η σύνθεση της έννοιας του συντελεστή ισοδυναμίας, όπως θα εξηγηθεί στο **Κεφάλαιο 3**. Με το να μετατραπούν οι άξονες στον τυπικό άξονα με σταθερό φορτίο, στην ουσία δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν αρκετοί νόμοι αστοχίας υλικού παρά μόνο ένας, για τον τυπικό ισοδύναμο (Λοΐζος, και συν., 2021).

Η αναφερθείσα σχέση φθοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα δομικά υλικά εκτός του συνόλου σχετικά με τα οδοστρώματα, όπως στο χάλυβα και γενικότερα στα μέταλλα και σε έργα από σκυρόδεμα (Λοΐζος, και συν., 2021). Ο ορισμός της φθοράς Miner και οι νόμοι αστοχίας του υλικού κατέστησαν τις απαρχές της αναλυτικής προσέγγισης σχεδιασμού καθώς επίσης την διάνθιση μεταγενέστερων αναλυτικών – εμπειρικών μεθοδολογιών βασισμένες σε αυτές. Πρωτεργάτες σε αυτή την προσέγγιση ήταν οι Dormon και Metcalf (1965) οι οποίοι στηρίχτηκαν στις βασικές έρευνες που είχαν δημιουργηθεί για τις εκτιμήσεις της εντατικής κατάστασης στις μορφές αστοχίας (Pereira, et al., 2017).

Ξεκίνησαν επακολούθως, να αναπτύσσονται αναλυτικές – εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού βασιζόμενες σε αυτά τα φαινόμενα αστοχίας με κύριους αντιπρόσωπους τον Claussen στη μέθοδο Shell το 1977 και τον Shook της μεθόδου σχεδιασμού του Ινστιτούτου Ασφάλτου (Asphalt Institute Method) από το 1982 (Pereira, et al., 2017) (Schwarz, et al., 2007). Ο λόγος που ονομάζονται αναλυτικές – εμπειρικές είναι επειδή υπολογίζουν την εντατική κατάσταση των οδοστρωμάτων και συνεπώς της φθοράς στα πλαίσια του αναλυτικού σχεδιασμού. Ωστόσο η διεξαγωγή πειραμάτων, τους δίνει τη δυνατότητα, μέσω της

εμπειρίας, να ποσοτικοποιήσουν τη φθορά της ανάλυσης με την παρατηρούμενη φθορά στο οδόστρωμα.

Εντός των μεθόδων αυτών, προτάθηκαν ανάλογες σχέσεις νόμων αστοχίας. Παρατίθενται οι αναπτυγμένες σχέσεις του νόμου αστοχίας που οφείλονται στην κόπωση της ασφαλικής στρώσης του οδοστρώματος, από την Shell (**Σχέση 2.28**) και το Ινστιτούτο Ασφάλτου (**Σχέσεις 2.29, 2.30 και 2.31**) αντίστοιχα. Η **Σχέση 2.31** προκύπτει με τη θεώρηση στον νόμο κόπωσης του Ινστιτούτου Ασφάλτου (**Σχέση 2.29**), $V_a = 5 \%$ και $V_{be} = 11 \%$ (Hesham, et al., 1998) (Almeida, 2014):

$$N_f = (0.856 \times V_{be} + 1.08)^5 \times (10^6 \times E)^{-1.8} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)^5 \quad (2.28)$$

$$N_f = 18.4 \times 10^M \times 0.00432 \times \varepsilon_r^{-3.291} \times E^{-0.854} \quad (2.29)$$

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right) \quad (2.30)$$

$$N_f = 0.0796 \times \varepsilon_r^{-3.291} \times E^{-0.854} \quad (2.31)$$

Με:

ε_r = η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης σε m

E = το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης ή ακριβέστερα το μέτρο δυσκαμψίας της σε MPa στην Shell και psi στου Ινστιτούτου Ασφάλτου

V_a = ποσοστό όγκου κενών αέρα

V_{be} = ενεργό ποσοστό όγκου ασφάλτου ή το ποσοστό όγκου ασφάλτου το οποίο δεν έχει δεσμευτεί από τα αδρανή

C, M = ογκομετρικοί διορθωτικοί παράγοντες

Σε αυτό το σημείο απαπτύχθηκαν ακόμη περισσότερες αναλυτικές – εμπειρικές μέθοδοι. Το Κεντρικό Εργαστήριο για Γέφυρες και Δρόμους ανέπτυξε τη Γαλλική μέθοδο σχεδιασμού το 1981 (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – LCPC). Η Βρετανική μέθοδος έκανε την εμφάνισή της το 1984. Σημαντικές να αναφερθούν ως προς την αναλυτική – εμπειρική προσέγγιση και οι προσπάθειες εκτός της Ευρώπης, όπως η Νοτιοαφρικάνικη μέθοδος σχεδιασμού (South African Mechanistic Design Method – SAMDM) που πρωτοεμφανίστηκε από τις αρχές του 1970, το Νεοζηλανδέζικο και το Αυστραλιανό ερευνητικό πρόγραμμα με το τελευταίο κάτω από την επίβλεψη και διεύθυνση της Εθνικής Ένωσης Κρατικών Οδικών Αρχών της Αυστραλίας (National Association of Australian State Road Authorities – NASRA), η αποκαλούμενη σήμερα Austroads (Choubane, et al., 2019).

Επιστέγασμα του αναλυτικού σχεδιασμού αποτελεί η αναλυτική – εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων MEPDG (Mechanistic – Empirical Pavement Design Method). Η μέθοδος αναπτύχθηκε από την AASHTO σε συνεργασία με το Εθνικό Συναιτεριστικό Πρόγραμμα Αυτοκινητοδρόμων (NCHRP – National Cooperative Highway Research Program) και την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητόδρομων (FHWA – Federal Highway Administration). Η μέθοδος αναπτύχθηκε στο πλαίσιο των ερευνητικών έργων NCHRP 1 – 37A και NCHRP 1 – 40D, η τεχνική αναφορά των οποίων κυκλοφόρησε το 2004 και το 2009 αντίστοιχα (AASHTO, 2008).

Η μέθοδος MEPDG βασίζεται σε όλες τις αρχές του αναλυτικού σχεδιασμού που αναφέρθηκαν. Μάλιστα οι νόμοι αστοχίας που χρησιμοποιεί στην ανάλυση για τον τελικό υπολογισμό της φθοράς για τις μορφές αστοχίας του οδοστρώματος, είναι βασισμένοι στους νόμους της ανάλυσης της μεθόδου του Ινστιτούτου Ασφάλτου. Η μέθοδος στη συνέχεια χρησιμοποιεί τη γνώση και την εμπειρία από τα συμπεράσματα του οδικού πειράματος AASHO για να συνδέσει την υπολογισμένη φθορά με το τι πραγματικά έχει συμβεί στο οδόστρωμα. Η αιτία που χρησιμοποιείται μια τέτοια εμπειρική παρέμβαση είναι για να διευκολύνει το σχεδιασμό, να εξηγήσει ρεαλιστικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, να βοηθήσει περισσότερο στην κατανόηση της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος μέσα από την απλή παρατήρηση και εν δυνάμει να συμβάλλει σε μια πιο έγκαιρη λήψη αποφάσεων στην αποτακατάσταση ενός οδοστρώματος. Η μέθοδος επομένως επικαλείται όσα περισσότερα στοιχεία μπορεί από αυτές τις δύο προσεγγίσεις σχεδιασμού, με σκοπό να επιτυχεί τον ορθό και ενδεδειγμένο σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της μεθόδου, καθώς και το πλήθος των δεδομένων που απαιτούνται, δυσχεραίνουν τη χρήση της (Λοΐζος, και συν., 2021).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

3.1 Γενικά

Ο συντελεστής ισοδυναμίας (Σ.Ι ή equivalency factor ή load equivalency factor ή LEF) είναι μια θεώρηση που καθορίστηκε πρώτη φορά ύστερα από τη διεξαγωγή πειραμάτων στο πέδιο (The AASHO Road Test, 1958 – 1961) από την Αμερικανική Ένωση Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων και Μεταφορών (American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO) όσον αφορά στη θεώρηση των διαφορετικών φορτίων κυκλοφορίας κατά το σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Εκείνη την χρονική περίοδο, παρατηρήθηκε πως σημαντικό αντίκτυπο για το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος αποτελεί η κυκλοφορία πάνω στο οδόστρωμα. Χρησιμοποιώντας τη λέξη αυτή, συνεπάγεται ο προσδιορισμός του αριθμού και του βάρους του κάθε οχήματος. Το ερώτημα που προέκυψε τότε, ήταν το πόσο εφικτό και απλό είναι να υπολογιστεί η φθορά που προκαλεί κάθε όχημα ξεχωριστά στη δομή του οδοστρώματος. Εξ' αιτίας του μεγάλου προβληματισμού που προκαλούσε το ερώτημα, κρίθηκε αναγκαίο να αναπτυχθεί μια ισοδύναμη κυκλοφορία ενός συγκεκριμένου επιβαλλόμενου φορτίου στο οδόστρωμα που θα προσομοιάζει την πραγματική συνθήκη φθοράς από τα πολλά και διαφορετικά οχήματα και εν συνεχεία θα απλουστεύει την μελέτη σημαντικά. Η γεφύρωση μεταξύ αυτών των δύο εννοιών, ισοδύναμης κυκλοφορίας και πραγματικής, ενσαρκώθηκε μέσω του αποκαλούμενου συντελεστή ισοδυναμίας.

Για τη σωστή διατύπωση του συντελεστή, αρχικά ήταν αναγκαίο να μεταφραστεί η υφιστάμενη κυκλοφορία των οχημάτων σε διερχόμενους άξονες, καθένας από αυτούς φέροντας ένα μέρος του φορτίου από το συνολικό βάρος του κάθε οχήματος το οποίο αποτελούν. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής ισοδυναμίας εκφράστηκε μέσα από ένα κλάσμα του αριθμού διελεύσεων αξόνων μεταξύ διαφορετικών φορτίων. Δηλαδή των ισοδύναμων διελεύσεων ενός τυπικού άξονα συγκεκριμένου φορτίου ή αλλιώς ονομαστικά των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (equivalent single axle loads – ESALs), με εκείνων των διελεύσεων άξονα με τιμή φορτίου προερχόμενη από την πραγματική κυκλοφορία των οχημάτων. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής είναι μια σύγκριση ή ακριβέστερα, η απόδοση του αριθμού των αξόνων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική (Huang, 2004).

$$LEF = \frac{W_t}{W_x} \quad (3.1)$$

Όπου:

W_x = ο αριθμός διελεύσεων του επιβαλλόμενου άξονα

W_t = ο αριθμός ισοδύναμων διελεύσεων του τυπικού άξονα (ESALs)

Η έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας εμπεριείχε εντός της, την ανάγκη ποσοτικοποίησης και απλούστευσης της φθοράς. Για την ακρίβεια, εφόσον ήταν γνωστός πλέον ο αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων, βάσει της υπόθεσης φθοράς Miner, υπολογίζονταν οι επιτρεπόμενες διελεύσεις με τη βοήθεια νόμου αστοχίας υλικού μόνο για αυτή την αξονική διάταξη, γλιτώνοντας έτσι τους αλόγιστα πολλούς νόμους αστοχίας που θα έπρεπε να δημιουργηθούν για να εκφράσουν την επιμέρους φθορά αμέτρητων διατάξεων αξόνων. Στην επόμενη υποενότητα παρουσιάζονται διάφορες μεθοδολογίες στον κόσμο που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του συντελεστή ισοδυναμίας και κατ' επέκταση των ισοδύναμων διελεύσεων του τυπικού άξονα (Λοΐζος, και συν., 2021).

3.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης ισοδύναμης κυκλοφορίας

3.2.1 Μέθοδος AASHTO

Το οδικό πείραμα AASHO αποτέλεσε τη γενέτειρα σύνθεσης αυτής της έννοιας που ονομάζεται συντελεστής ισοδυναμίας. Εντός του πειράματος, είχαν εφαρμοστεί διαφορετικές διατάξεις αξόνων μαζί με διαφορετικά μεγέθη φερόμενων φορτίων μέσα από τις διελεύσεις μιας μεγάλης κατηγορίας οχημάτων. Έτσι ήταν εφικτό να μπορεί να προκύψει για πρώτη φορά εμπειρικά ο συντελεστής ισοδυναμίας από μια πληθώρα συνθηκών φόρτισης. Ταυτόχρονα άλλοι παράγοντες (πχ δομική επάρκεια, εξυπηρετικότητα, αξιοπιστία) που λήφθηκαν κατά νου, συνετέλεσαν ως προς την τελική διαμόρφωσή του.

Εκτός της εμπειρικής προσέγγισης, αναπτύχθηκε και μια θεωρητική σχέση προσδιορισμού του συντελεστή ισοδυναμίας, ο κανόνας της 4^{ης} δύναμης. Πρόκειται για μια προσεγγιστική θεώρηση των εμπειρικών σχέσεων ισοδυναμίας, που συνδέει τον λόγο των διελεύσεων μεταξύ του τυπικού και του επιβαλλόμενου άξονα με τον λόγο των φορτίων που επιβάλλουν, υψωμένο στην 4^η δύναμη, εξού και το όνομά της. Το L_t αναφέρεται στο φορτίο του τυπικού άξονα ενώ L_x στο φορτίο του άξονα που επιβάλλεται (Kaewdee, et al., 2011). Αν και από τα αποτελέσματα του πειράματος βρέθηκε πως η τιμή του εκθέτη διακυμαίνεται μεταξύ του 3.6 με 4.6 με μια μέση προτεινόμενη τιμή του προσεγγιστικά στο 4.2, έχει καθιερωθεί ο αριθμός 4 απλουστευτικά (Kemp, et al., 2018) (Odongo, 2018) (COST - European Co-operation, et al., 2001). Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό, ο κανόνας της 4^{ης} δύναμης δεν αποτελεί μια ακριβή εκτίμηση ισοδύναμης κυκλοφορίας, εν δυνάμει όμως αποτελεί μια αρκετά καλή πρόβλεψη για εκείνη.

$$LEF = \frac{W_{18}}{W_x} = \left(\frac{L_x}{L_{18}} \right)^4 \quad (3.2)$$

Πολλοί μελετητές σε διάφορες έρευνες στη συνέχεια προσπάθησαν να την αποδώσουν με καλύτερη ακρίβεια εξετάζοντας τις μορφές αστοχίας και τον τύπο του οδοστρώματος (π.χ Atkinson et al το 2006, Dawson το 2008). Με την πάροδο των χρόνων ολοένα και περισσότερα ερευνητικά κέντρα σε όλο τον κόσμο ανέπτυξαν μεθόδους έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας και εκτίμησης της ισοδύναμης κυκλοφορίας βασισμένα σε δικές τους αναλύσεις. Έτσι ο κανόνας της 4^{ης} δύναμης εμπλουτίστηκε και τροποποιήθηκε ανά την μελέτη και αποτελεί σημαντικό εργαλείο υπολογισμού των διαφόρων μορφών φθοράς στο οδόστρωμα σε διάφορες χώρες (Uz, et al., 2016). Ο **Πίνακας 3.1** περιγράφει το πώς η δύναμη στον εκθέτη μεταβάλλεται στον παραπάνω κανόνα δύναμης με βάση τη μορφή φθοράς στο

οδόστρωμα σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Atkinson (Arnold, et al., 2017) (Uz, et al., 2016), ενώ στη συνέχεια ο **Πίνακας 3.2** παρουσιάζει προτεινόμενες ισοδύναμες τυπικές τιμές φορτίου από διάφορους οργανισμούς και ερευνητές για μονό, διπλό και τριπλό άξονα διπλών ελαστικών (Kawa, et al., 1998) (Kaewdee, et al., 2011) (Jove, et al., 2020) (Kruse, et al., 2022) (Alaska Dept. of Transportation & Public Facilities, 2020) (Al - Yagout, et al., 2005) (El - Hamrawy, et al., 2012).

Πίνακας 3.1: Εκθέτες φθοράς για τον κανόνα της δύναμης

Μορφή φθοράς	Εύρος εκθέτη φθοράς
Εύκαμπτα οδοστρώματα	
Μη - δομική παραμένουσα παραμόρφωση (ασφαλτική στρώση)	1.0 - 1.5
Ρηγματώσεις	1.3 - 3.1
Απώλεια εξυπηρετικότητας	4.4
Παραμένουσα παραμόρφωση (στρώση έδρασης)	4.0 - 9.6
Κόπωση ασφαλτικής στρώσης	4.0 - 5.0
Δύσκαμπτα οδοστρώματα	
Ραγίσματα στο άκαμπτο οδόστρωμα	5.5 - 18.0
Σφάλματα στους αρμούς διαστολής	0.7
Στρώση έδρασης	
Παραμόρφωση	4.0 - 7.4

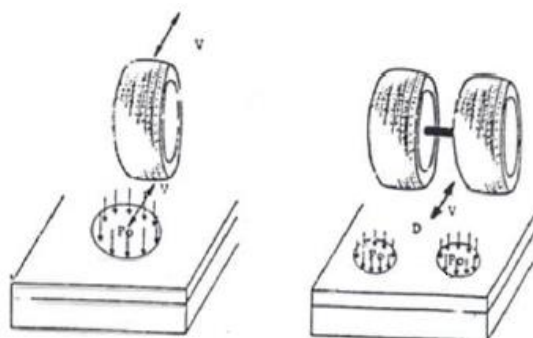
Πίνακας 3.2: Προτεινόμενα τυπικά ισοδύναμα φορτία για μονούς, διπλούς τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών

		Τυπικά φορτία (kN)		
		Μονός άξονας	Διπλός άξονας	Τριπλός άξονας
Εύκαμπτα οδοστρώματα	AASHTO	80	147.9	211.7
	Christinson	80	133.5	186.9
	Hutchinson	80	142.4	169
	Huang	80	159.8	240.3
	Queensland Transport	80	135.3	181.4
	DOH	107.9	196.1	250.1
	DOT&PF	80	142.4	213.6
	IRC	80	148	224
Δύσκαμπτα οδοστρώματα	AASHTO	80	129	173.5
	Tayabji	80	129	160.2

Στον **Πίνακα 3.2** παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις στα τυπικά φορτία κυρίως στις πιο σύνθετες διατάξεις (διπλοί & τριπλοί άξονες). Ο Hajek μάλιστα στην ανάλυσή του για τα δεδομένα του Christinson, επισήμανε πως η μέθοδος AASHTO υποτιμά την επιδραστικότητα των διπλών και τριπλών αξόνων κατά 15% με 20% (Kawa, et al., 1998). Μια εξήγηση είναι πως δεν μπορεί να υπάρχει περισσότερη ακρίβεια και καλύτερη βεβαιότητα στην ανάλυση αυτών των σύνθετων αξόνων. Μολαταύτα, πολλοί είναι οι ενδεχόμενοι λόγοι στη διαφοροποίηση

των φορτίων αυτών από κάθε μελετητή. Αμιγώς εξαρτάται από την ίδια την μελέτη αυτή καθ' αυτή, καθώς επίσης και από τις συνθήκες που την πλαισιώνουν. Παραδείγματος χάρη, η DOH (Thailand Department of Highways) ανέπτυξε συντελεστή ισοδυναμίας σημαντικά μικρότερο από τους περισσότερους, διότι σαν τυπικό αξονικό φορτίο θεωρούσε ένα πολύ μεγαλύτερο από τις σταθερές άλλων μεθόδων (Kaewdee, et al., 2011).

Στο κομμάτι του εμπειρικού σχεδιασμού, ο τυπικός άξονας που ορίστηκε από τη μέθοδο AASHTO, είναι ένας μονός άξονας φορτίου 80 kN (18 kips), καθότι συνιστούσε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο τότε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, με διπλά ελαστικά πίεσης των 577 kPa και ακτίνας 105 mm (Kawa, et al., 1998). Τα ελαστικά θεωρούνται πως εκδηλώνουν φορτίο κυκλικής επιφάνειας στο οδόστρωμα, όπως προσδιορίζει η **Εικόνα 3.1** (Λοΐζος, και συν., 2021) και απέχουν μεταξύ τους απόσταση 315 mm.



Εικόνα 3.1: Αποτύπωμα επαφής ελαστικών (μονών & συζευγμένων) στο οδόστρωμα (Λοΐζος, και συν., 2021)

Η εμπειρική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας έχει βασιστεί σε δεδομένα παρμένα από τη διεξαγωγή του πειράματος AASHO και επικαιροποιήθηκε στον οδηγό σχεδιασμού της μεθόδου AASHTO το 1993, έχοντας την μορφή της **Σχέσης 3.3** για τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Να αναφερθεί πως η σχέση του συντελεστή ισοδυναμίας, μετά τα αποτελέσματα του πειράματος AASHO, αφορούσε στην αρχή μόνο τις διευλεύσεις μονών και διπλών αξόνων (Smith, et al., 2009). Τα αποτελέσματα του πειράματος επεκτάθηκαν και καθιερώθηκαν από τη μέθοδο AASHTO το 1986 και για συνθετότερες διατάξεις άξονα (π.χ τριπλή διάταξη άξονα) (Pavement Interactive).

$$\log\left(\frac{W_x}{W_{18}}\right) = 4.79 \times \log(18 + 1) - 4.79 \times \log(L_x + L_2) + 4.33 \times \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (3.3)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right) \quad (3.3a)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081 \times (L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \times L_2^{3.23}} \quad (3.3b)$$

Όπου:

L_x = το φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα (kips)

L_2 = αριθμός ανάλογα τη διάταξη των αξόνων (1 για μονούς άξονες, 2 για διπλούς άξονες, 3 για τριπλούς άξονες & 4 για τετραπλούς άξονες)

β_{18} = τιμή του β_x όταν $L_x = 18$ και $L_2 = 1$

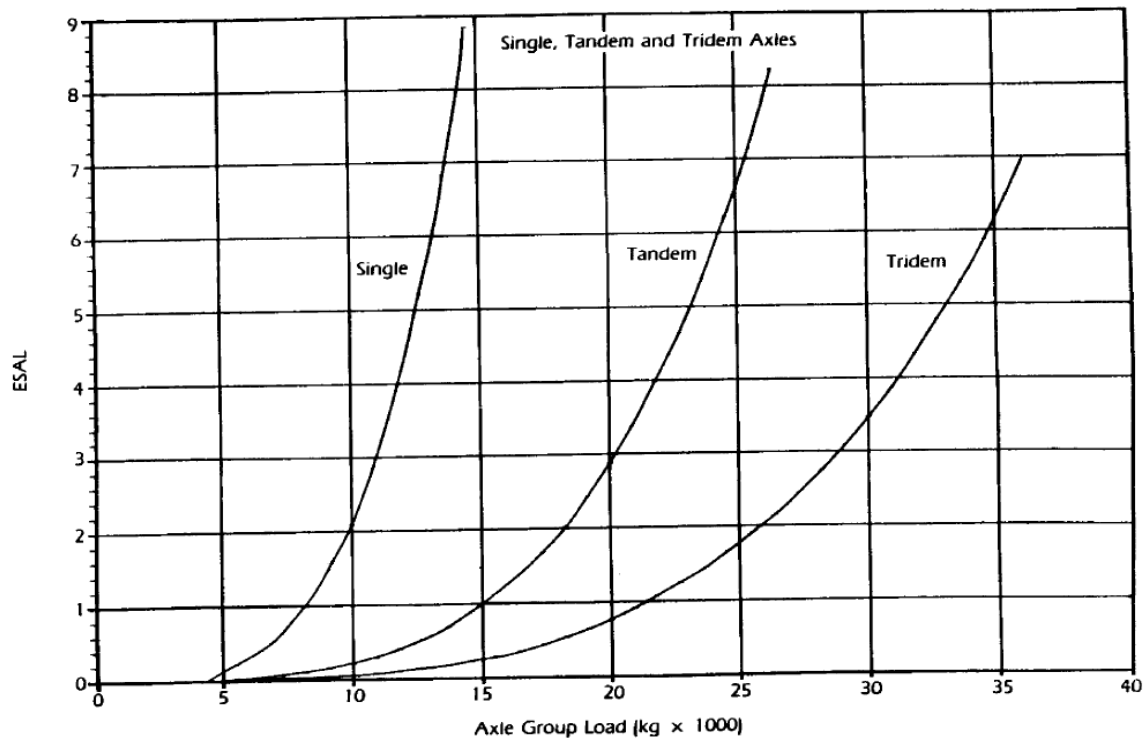
p_t = η τελική εξυπηρετικότητα του οδοστρώματος

SN = ο δείκτης δομικής επάρκειας του εύκαμπτου οδοστρώματος

Στον οδηγό της μεθόδου σχεδιασμού AASHTO, έχουν αναπτυχθεί και απλοποιητικοί πίνακες έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας, για κάθε πιθανή τελική εξυπηρετικότητα p_t και κάθε ενδεχόμενη δομική επάρκεια SN. Συγκεντρώνονται στους **Πίνακες Π – 1** ως **Π – 9** στο **Παράρτημα** στο τέλος του αρχείου (AASHTO, 1993).

Στη μέθοδο AASHTO, όταν οι άξονες απέχουν περισσότερο από 1 m αλλά λιγότερο από 2.4 m τότε αποκαλούνται ως διπλή διάταξη αξόνων (tandem axles). Κατά το πείραμα AASHO οι διπλές διατάξεις αξόνων είχαν προσαρμοστεί στην απόσταση μεταξύ αξόνων στα 1.2 m. Όταν εκείνοι απέχουν περισσότερη απόσταση των 2.4 μέτρων τότε καταλογίζονται σαν δύο ξεχωριστοί μονοί άξονες, ενώ στην περίπτωση που απέχουν λιγότερο από 1 m θεωρείται ένας άξονας με φορτίο το άθροισμα των επιμέρους. Για την τριπλή αξονική διάταξη καθώς και για πιο σύνθετες αξονικές διατάξεις, η AASHTO δεν είχε ακριβή πορίσματα για τις αποστάσεις μεταξύ τους και η βασική αιτία πίσω από αυτό ήταν πως στο πείραμα AASHO είχαν εφαρμοστεί μονές και διπλές διατάξεις αξόνων. Ακόμα και έτσι, ο σχεδιασμός μπορούσε να θεωρήσει πως η απόσταση που μπορεί να συναχθεί στις τριπλές διατάξεις άξονα, βασιζόμενες ουσιαστικά στις διπλές, είναι τα 1.2 m (Gillmann, 1999). Σε νεότερη έκδοση της (AASHTO 2001), γνωστοποιήθηκε πως η τριπλή διάταξη υφίσταται όταν ο πρώτος και ο τελευταίος άξονας δεν απέχουν περισσότερο από 3.66 m (12 πόδια), όσο για την τετραπλή διάταξη η απόσταση των ακραίων αξόνων πρέπει να είναι μικρότερη από 4.88 m (16 πόδια) (Smith, et al., 2009).

Η **Εικόνα 3.2** απεικονίζει τον συντελεστή ισοδυναμίας γραφικά για μονούς διπλούς και τριπλούς άξονες για SN = 5 και $P_t = 2.5$ (Parsons, et al., 1989). Στον κατακόρυφο άξονα του διαγράμματος της εικόνας όμως, αναγράφεται ο όρος ESALs αντί για εκείνον του συντελεστή ισοδυναμίας. Αυτό γίνεται διότι ο συντελεστής ισοδυναμίας μετατρέπει το φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες, γνωστοί και ως ESALs όπως έχει αναφερθεί. Ωστόσο, ο όρος των ESALs θα χρησιμοποιηθεί με μια ελαφρώς διαφορετική έννοια όπως ορίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 3.2: Συντελεστής ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO μονών, διπλών και τριπλών αξόνων (Parsons, et al., 1989)

Εφόσον έχει γίνει γνωστή η μετατροπή ενός επιβαλλόμενου άξονα στο οδόστρωμα σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες μέσω του συντελεστή ισοδυναμίας, είναι σημαντικό να μεταβληθεί όλη η εκτιμώμενη κυκλοφορία σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες κατά την περίοδο σχεδιασμού του έργου. Αυτοί οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες είναι εκείνοι οι οποίοι θα ληφθούν υπ' όψη για το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Επομένως, για διευκρινιστικούς λόγους εξηγείται, πως ο όρος ESALs αναφέρεται στους συνολικούς ισοδύναμους τυπικούς άξονες για την περίοδο που το έργο σχεδιάζεται.

Ο υπολογισμός των ESALs από τη μέθοδο AASHTO, προϋποθέτει να είναι γνωστά κάποια βασικά στοιχεία όπως η εκτιμώμενη κυκλοφορία που διέρχεται από την οδό, το πως επιμερίζονται στην κάθε κατεύθυνση, από το πόσες λωρίδες κυκλοφορίας αποτελείται αυτή η κατεύθυνση κίνησης, το πως διαμοιράζεται στις λωρίδες η κυκλοφορία ή έστω στη λωρίδα σχεδιασμού που εξετάζεται, το πόσα χρόνια εκτιμάται ο χρόνος λειτουργίας και άλλες βασικές συνθήκες που αναφέρονται στη συνέχεια. Το πιο βασικό στοιχείο όλων αυτών είναι ένα μέγεθος το οποίο ονομάζεται Μέση Ετήσια Ημερήσια Κυκλοφορία γνωστή και ως ΕΜΗΚ ενώ στην ξενή βιβλιογραφία συναντάται σαν AADE (Annual Average Daily Traffic). Η κυκλοφορία αυτή προκύπτει από κυκλοφοριακά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί για την οδό. Συνήθως αναφέρεται στην κυκλοφορία όλων των οχημάτων και για τις δύο κατευθύνσεις της οδού ενώ μετατρέπεται σε ΕΜΗΚ όταν η ετήσια κυκλοφορία διαιρεθεί με τις 365 μέρες του έτους (Texas Department of Transportation, 2005) (Ojha, 2019) (Huang, 2004).

$$ESALS = 365 \times AADT \times T \times T_f \times G \times D \times L \times Y \quad (3.4)$$

Στην οποία:

AADT = μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία

T = το ποσοστό των βαρέων οχημάτων από τη συνολική κυκλοφορία

G = ο συντελεστής αύξησης της κυκλοφορίας (growth factor)

D = συντελεστής ή ποσοστό κατανομής τυπικών αξόνων στην κατεύθυνση σχεδιασμού

L = συντελεστής ή ποσοστό κατανομής τυπικών αξόνων στη λωρίδα σχεδιασμού

Y = η σχεδιαστική περίοδος που εκτιμάται πως το έργο θα λειτουργήσει σε έτη

T_f = ο συντελεστής βαρέων οχημάτων ή αλλιώς γνωστός και truck factor

Ο συντελεστής βαρέων οχημάτων (truck factor) αποτελεί την αναγκαία συνθήκη μετατροπής της επιζήμιας κυκλοφορίας για το οδόστρωμα (βαριά κυκλοφορία) σε τυπικούς ισοδύναμους άξονες όπως ορίζει η μέθοδος AASHTO. Είναι ένα μέγεθος το οποίο εμπεριέχει την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας. Συγκεκριμένα είναι ο λόγος του αριθμού των ισοδύναμων τυπικών αξόνων προς τα βαρέα οχήματα που κυκλοφορούν στη λωρίδα σχεδιασμού κατά την περίοδο σχεδιασμού.

$$T_f = \left(\sum_{i=1}^m p_i \times F_i \right) \times A \quad (3.5)$$

Περιλαμβάνοντας:

p_i = συνολικό ποσοστό επαναλήψεων μιας αξονικής διάταξης φορτίου i

F_i = συντελεστής ισοδυναμίας για την αξονική διάταξη φορτίου i

A = μέσος αριθμός αξόνων ανά βαρέο όχημα

m = ο αριθμός διελεύσεων των αξονικών διατάξεων

Όσο για τον συντελεστή αύξησης της κυκλοφορίας G, είναι εκείνος που με βάση ένα ετήσιο εκτιμώμενο ρυθμό αύξησης g της κυκλοφορίας μέσα στην περίοδο των ετών n που εξετάζεται η αύξηση, την προσαυξάνει μέχρι το πέρας της περιόδου στην οποία εντοπίζεται το φαινόμενο αυτό. Φυσικά ενδέχεται αυτός ο συντελεστής να μην εμφανίζει αύξηση αν ο ετήσιος ρυθμός αύξησης λαμβάνει μηδενική τιμή. Το g εισάγεται στη **Σχέση 3.6** σε δεκαδική μορφή.

$$\begin{cases} G = \frac{(1 + g)^n - 1}{g} & \text{για } g > 0 \\ G = 1 & \text{για } g = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Η κατανομή της κυκλοφορίας μέσα από τους τυπικούς ισοδύναμους άξονες επιτυγχάνεται τόσο για την κατεύθυνση όσο και για τη λωρίδα σχεδιασμού με τους συντελεστές D και L

αντιστοίχως. Σχετικά με τον D, συνήθως λαμβάνει τιμή 0.5 θεωρώντας το 50% των τυπικών αξόνων διερχόμενο από τη μια κατεύθυνση. Βέβαια υπάρχουν διάφορες συνθήκες που μπορούν να μεταβάλλουν δραματικά αυτό το ποσοστό, εξ' αιτίας περισσότερων βαρέων οχημάτων ή πιο φορτωμένων από την έτερη κατεύθυνση, εν συνεχεία περισσότερων τυπικών αξόνων. Η προς το παρόν εμπειρία έχει αποδείξει πως ο συντελεστής αποκτά τιμές στο εύρος 0.3 – 0.7. Επίσης, στον **Πίνακα 3.3** περιλαμβάνονται τιμές για τον συντελεστή L, ο οποίος εκφράζει το πως οι συνολικοί ισοδύναμοι τυπικοί άξονες της κατεύθυνσης, με βάση το πόσες λωρίδες τη συνιστούν, θα κατανεμηθούν στη λωρίδα σχεδιασμού (AASHTO, 1993) (Ojha, 2019).

Πίνακας 3.3: Ποσοστό αξόνων L στη λωρίδα σχεδιασμού

Αριθμός λωρίδων ανα κατεύθυνση	Ποσοστό L τυπικών αξόνων στη λωρίδα σχεδιασμού (%)
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

3.2.2 Μέθοδος γενικού συντελεστή άξονα GAF

Ο γενικός συντελεστής άξονα GAF (General Axle Factor) ή αλλιώς όπως συνηθίζεται επίσης να αποκαλείται εξίσωση AASHTO (AASHTO equation), φέρεται να έχει την ίδια επίδραση με τους συντελεστές της μεθόδου AASHTO. Δημιουργήθηκε το 1993 από τη μέθοδο AASHTO με στόχο τη σύγκριση με τους υπάρχοντες συντελεστές ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO αλλά και την ευρύτερη χρήση του για όλους τους τύπους οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένου και του ημιάκαμπτου. Η ιδιαιτερότητα αυτής της μεθόδου υπολογισμού ισοδύναμης κυκλοφορίας, έγκειται στο ότι ο συντελεστής είναι όχι μόνο ανεπηρέαστος από τον τύπο του οδοστρώματος και άλλων μεταβλητών του, με τον ίδιο τρόπο που είναι και η Μέση Ετήσια Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ), αλλά επίσης ανεξάρτητος από τη διάταξη αξόνων και τη γεωμετρία αυτών. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της εφαρμογής αποτελεί η απλούστευση της διαδικασίας πάνω στην έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας. Μάλιστα θεωρείται με βάση την ανάλυση λαθών πάνω στην πρόβλεψη ισοδύναμων αξόνων, πως οι μεγαλύτερες αβεβαιότητες εντοπίζονται εγγενώς στον όγκο κυκλοφοριακής κίνησης και στα φορτία των αξόνων παρά στα λάθη σχετιζόμενα με τον συντελεστή ισοδυναμίας (Hajek, 1995). Ο συντελεστής ισοδυναμίας GAF δίνεται από τις **Σχέσεις 3.7α και 3.7b** με την εισαγωγή φορτίου σε kN ή σε lbs αντίστοιχα.

$$GAF = (0.01169 \times L + 0.064)^{\left(4 + \frac{8.9}{L}\right)} \quad (3.7a)$$

ή

$$GAF = (0.052 \times L + 0.064)^{\left(4 + \frac{2}{L}\right)} \quad (3.7b)$$

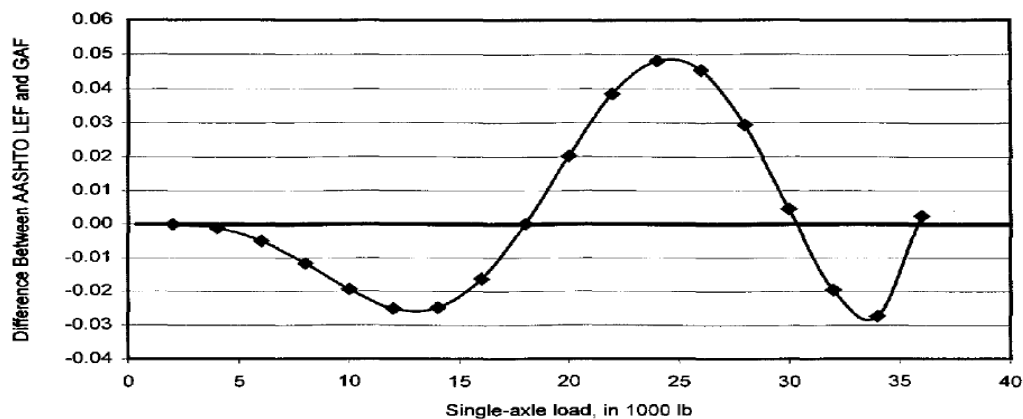
όπου L = το αξονικό φορτίο οποιασδήποτε διάταξης άξονα και διάταξης τροχών σε kN στη σχέση (3.7a) και σε lbs στη σχέση (3.7b)

Ο γενικός συντελεστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και υπό αυτή του τη μορφή.

$$GAF = \left(\frac{L}{18000} \right)^{3.8} \quad (3.8)$$

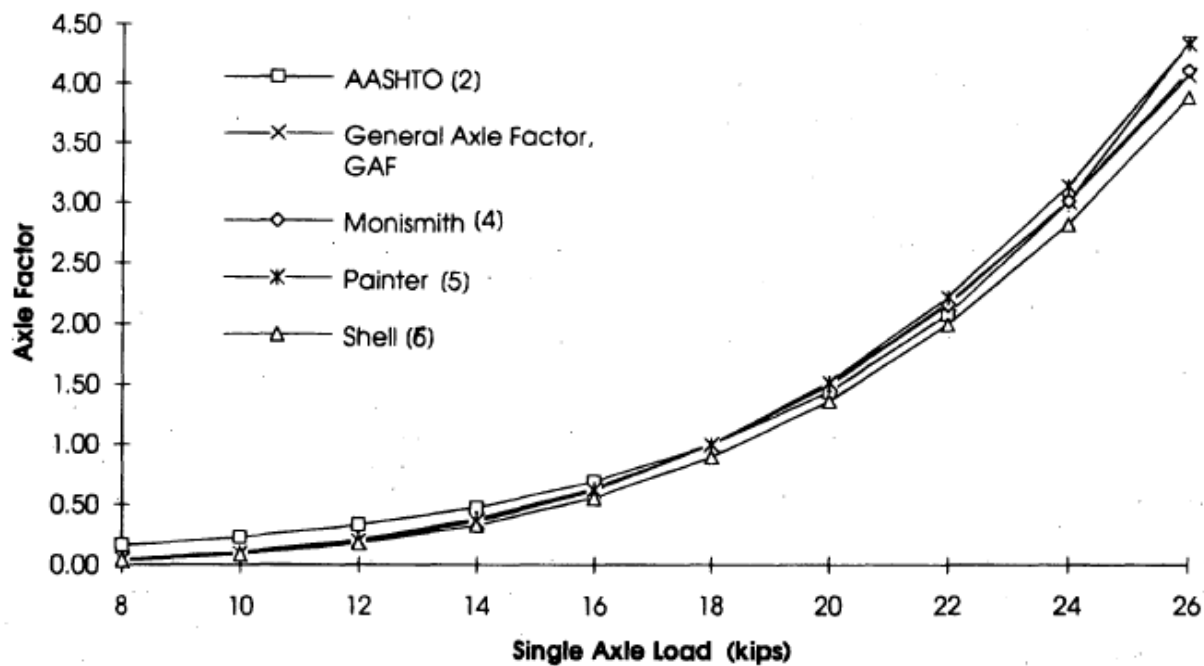
όπου L = το αξονικό φορτίο οποιασδήποτε διάταξης άξονα και διάταξης τροχών σε lbs

Ο συντελεστής ισοδυναμίας GAF έχει πανομοιωτυπία με τον συντελεστή ισοδυναμίας από τη μέθοδο AASHTO με $SN = 5$ και $p_t = 2.5$. Ωστόσο εμφανίζουν αποκλίσεις όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.3** (Hajek, et al., 2000):

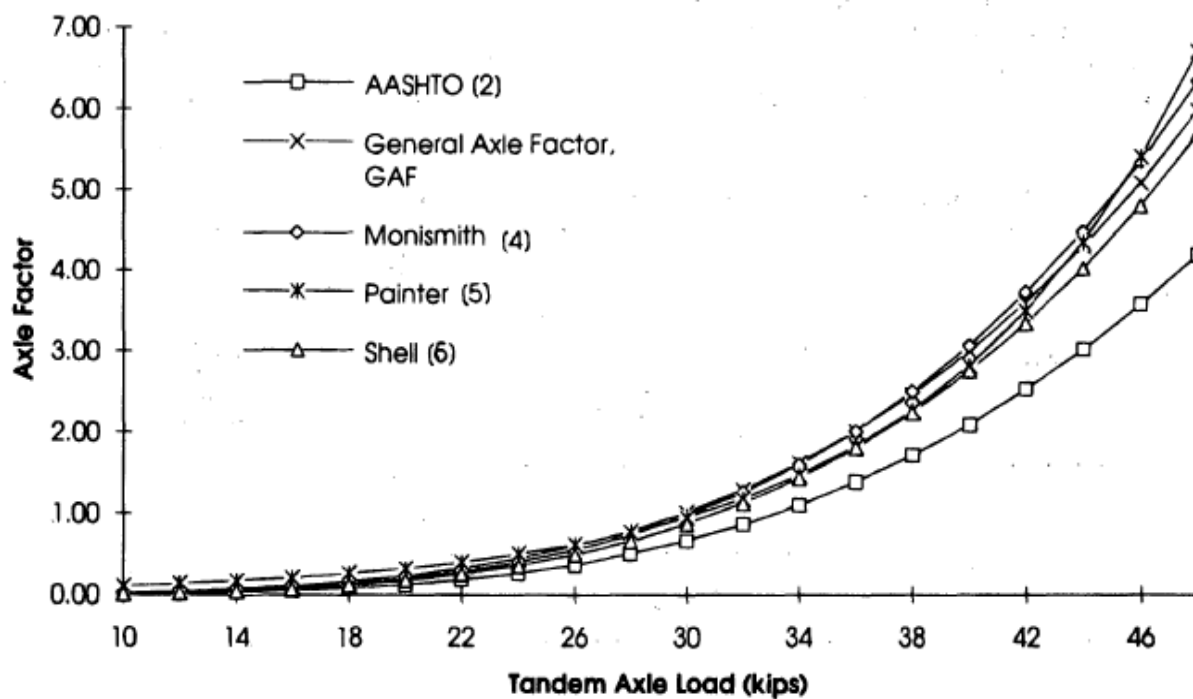


Εικόνα 3.3: Αριθμητική απόκλιση του συντελεστή ισοδυναμίας από GAF και $AASHTO$ για μονό άξονα (Hajek, et al., 2000)

Οι **Εικόνες 3.4 και 3.5** απεικονίζουν διαγράμματα σύγκρισης διατάξεων μονών και διπλών αξόνων με τις τιμές του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO από τα πρώτα πειράματα πεδίου για $SN = 5$ και $p_t = 2.5$, της μεθόδου GAF και άλλων ερευνών από μελετητές όπως του Monismith, Painter κλπ (Hajek, 1995).



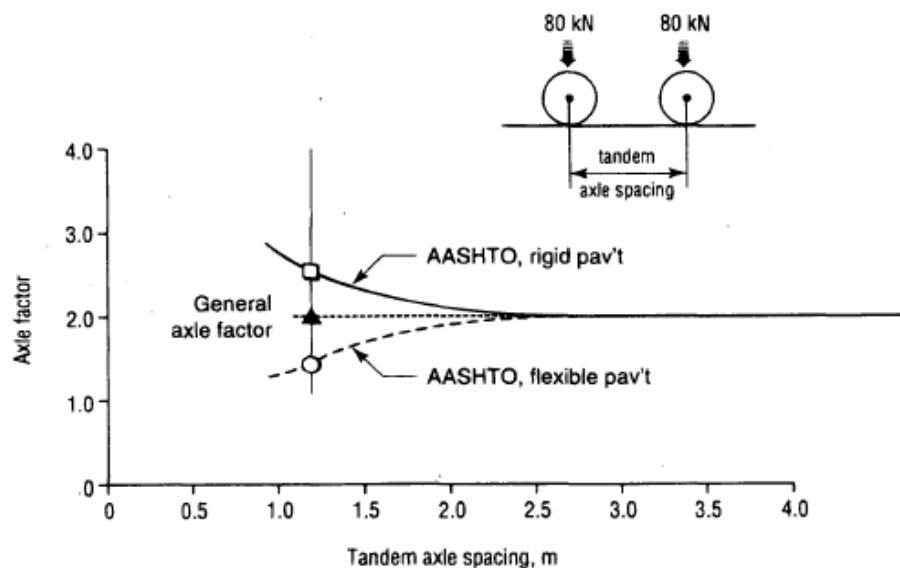
Εικόνα 3.4: Σύγκριση συντελεστή ισοδυναμίας διαφόρων θεωρήσεων για μονό άξονα (Hajek, 1995)



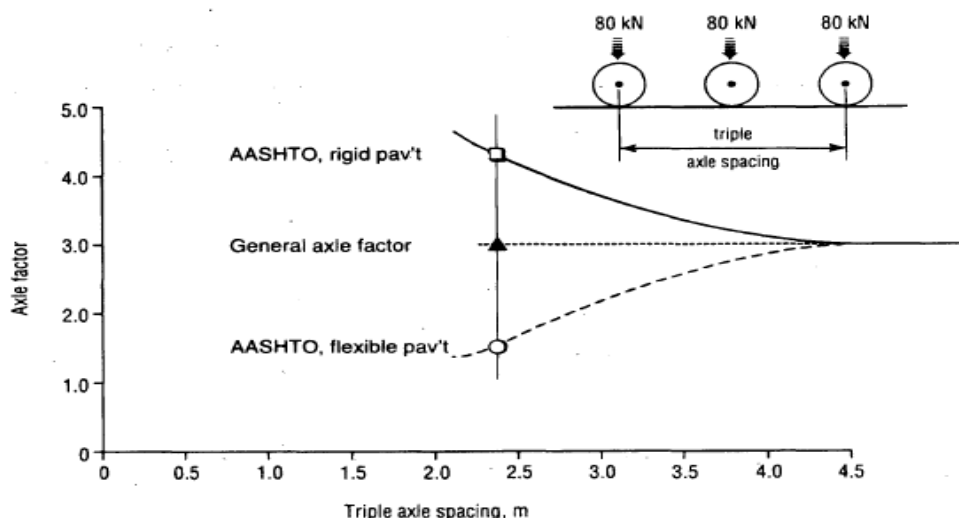
Εικόνα 3.5: Σύγκριση συντελεστή ισοδυναμίας διαφόρων θεωρήσεων για διπλό άξονα (Hajek, 1995)

Η ανεξαρτησία του συντελεστή GAF από την απόσταση των αξόνων και εν συνεχεία από τη διάταξή τους, μπορεί να αποτελέσει επαρκές εργαλείο για τον υπολογισμό οποιασδήποτε διάταξης άξονα, συμπεριλαμβανομένων και πιο περίπλοκων (τετραπλός άξονας κ.ο.κ). Στην περίπτωση πιο σύνθετων διατάξεων άξονα, υπολογίζεται ο GAF με τις εξισώσεις που παρατέθηκαν για τον μονό και στη συνέχεια πολλαπλαάζεται ο συντελεστής με τον αριθμό των αξόνων που απαρτίζουν τη διάταξη. Δηλαδή με τον αριθμό 2 για τον διπλό άξονα, με τον αριθμό 3 για την τριπλή αξονική διάταξη και ούτω καθεξής. Με άλλα λόγια, η ανεξαρτησία του συντελεστή ισοδυναμίας είναι τέτοια έτσι ώστε είτε εκτιμηθεί το αποτέλεσμα από μια διπλή διάταξη τροχών για παράδειγμα είτε από δύο εντελώς απομακρυσμένους μονούς άξονες, θα προκύψει εντελώς παρόμοιο.

Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνες 3.6 και 3.7**) εντοπίζονται οι διαφορές με τον συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO, στον οποίο παρατηρείται το πως με τον επιλεγμένο τύπο του οδοστρώματος (εύκαμπτο, δύσκαμπτο) αλλά και τη διάταξη των αξόνων (διπλός άξονας, τριπλός άξονας), οι τιμές του μεταβάλλονται. Αντίθετα, ο συντελεστής GAF διατηρεί σταθερές τιμές, συγκεκριμένα τους αριθμούς 2 και 3 για διπλούς και τριπλούς άξονες αντίστοιχα, στην περίπτωση φυσικά που εφαρμόζεται το τυπικό φορτίο των 80 kN ανά άξονα (Hajek, 1995).



Εικόνα 3.6: Επιρροή των αποστάσεων στη διπλή διάταξη αξόνων στον συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου GAF και AASHTO (Hajek, 1995)



Εικόνα 3.7: Επιρροή των αποστάσεων στην τριπλή διάταξη αξόνων στον συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου GAF και AASHTO (Hajek, 1995)

Ο υπολογισμός της συνολικής κυκλοφορίας σε ESALs εμφανίζει παρόμοιους μηχανισμούς με τον υπολογισμό των ESALs σύμφωνα με τη μέθοδο AASHTO. Όπως είναι απαραίτητη η σύνθεση του μεγέθους συντελεστή βαρέων οχημάτων στη μέθοδο AASHTO, έτσι και στη μέθοδο του συντελεστή GAF, ο υπολογισμός διευκολύνεται μέσω ενός συντελεστή GTF (general truck factor). Εκείνος στην ουσία συνιστά το άθροισμα των ισοδύναμων τυπικών αξόνων που προκύπτουν από τους άξονες σε ένα βαρέο όχημα. Συνεκτιμώντας στη συνέχεια και τους λοιπούς παράγοντες (π.χ ποσοστό κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων από την μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία, ποσοστό βαρέων στην λωρίδα σχεδιασμού, ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας στην περίοδο σχεδιασμού κλπ), με βάση την εξίσωση υπολογισμού των αθροιστικών ισοδύναμων αξόνων της μεθόδου AASHTO που αναφέρθηκε πρωτύτερα (**Σχέση 3.3**), καθορίζεται παρομοίως το τελικό αποτέλεσμα των συνολικών ESALs στη ζωή του έργου (GESALS) (Hajek, 1995).

3.2.3 Καναδική μέθοδος TAC

Ανταγωνιστικό ρόλο στη διαδικασία της προαναφερθείσας μεθοδολογίας GAF αποτέλεσε η μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας TAC (Transportation Association of Canada). Το 1986 η έρευνα στράφηκε στην σύνθεση του συντελεστή ισοδυναμίας με βάση τις μέσες συνθήκες των αυτοκινητόδρομων. Ειδικευμένα, ο Σύλλογος Οδών και Μεταφορών του Καναδά (RTAC – Roads and Transportation Association of Canada) διέθεσε 14 σημεία δοκιμών στη Μελέτη Βαρών και Διαστάσεων Οχημάτων (Heavy Vehicle Weights and Dimensions Study) του ερευνητικού προγράμματος RTAC – 86 για την εξέταση της συμπεριφοράς αντιπροσωπευτικών οδοστρωμάτων σε καταπονήσεις, κάτω από κυκλοφορία φορτίων ποικίλων διαμορφώσεων αξόνων (Bradley, et al., 2020). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν η σύνθεση σχέσεων προσδιορισμού της συμπεριφοράς διαφόρων διατάξεων αξόνων, όσον αφορά την καταστρεπτικότητα που επιφέρουν.

Έτσι η μέθοδος TAC, πρώην RTAC, το 1991 ανέπτυξε 4 σχέσεις για τον συντελεστή ισοδυναμίας που καλύπτουν 4 διαφορετικές διατάξεις αξόνων, σε διαφορά με την σχέση του

γενικού άξονα GAF. Χάρη σε αυτό, υποστηρίζεται πως είναι πιο ακριβής μέθοδος σε σχέση με τη μέθοδο GAF. Με την εισαγωγή του φορτίου L σε τόνους για την διάταξη που εξετάζεται, συντίθεται ο συντελεστής ισοδυναμίας. Για την επιλογή της σωστής σχέσης, αναφέρεται πως οι επιβαλλόμενοι άξονες θεωρούνται μονοί όταν δύο άξονες απέχουν πάνω από 2 μέτρα ενώ οι τρείς, πάνω από 2.5 μέτρα μεταξύ τους (Hajek, et al., 1990).

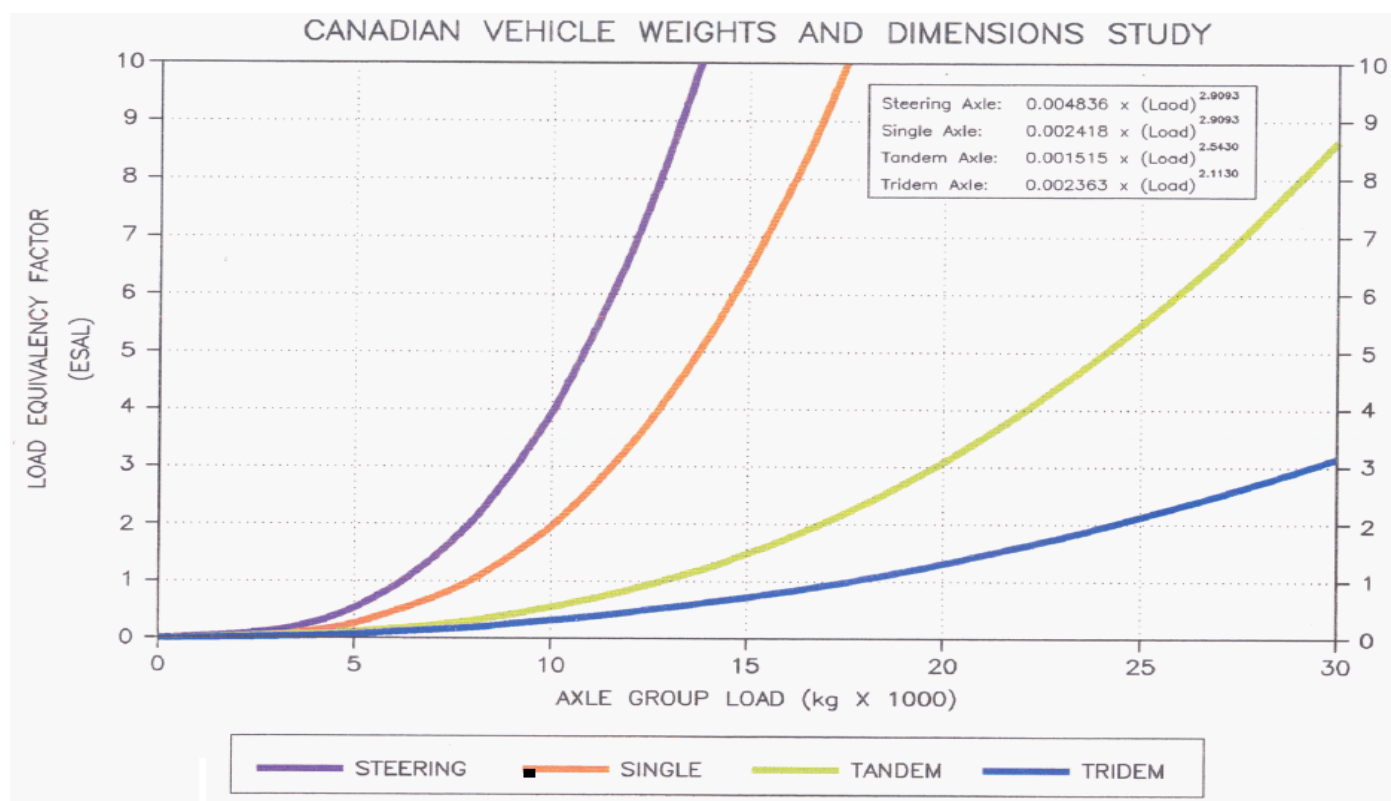
Οι συντελεστές ισοδυναμίας των **Σχέσεων 3.9, 3.10, 3.11 και 3.12** αφορούν το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων και ορίζονται με σταθερά, ένα τυπικό άξονα με φορτίο 8 tons (περίπου 80 kN) διπλών ελαστικών τύπου 11R22.5, πίεσης 690 kPa, ακτίνας 96 mm και απόστασης μεταξύ τους 350 mm (Hajek, et al., 1990). Οι σχέσεις αυτές αναπαρίστανται γραφικά επίσης στην **Εικόνα 3.8**. (Ministry of Transportation and Highways, 1995).

$$LEF = 0.004836 \times L^{2.9093} \quad \text{για μονούς άξονες με μονά ελαστικά} \quad (3.9)$$

$$LEF = 0.002418 \times L^{2.9093} \quad \text{για μονούς άξονες με διπλά ελαστικά} \quad (3.10)$$

$$LEF = 0.001515 \times L^{2.5430} \quad \text{για διπλούς άξονες με διπλά ελαστικά} \quad (3.11)$$

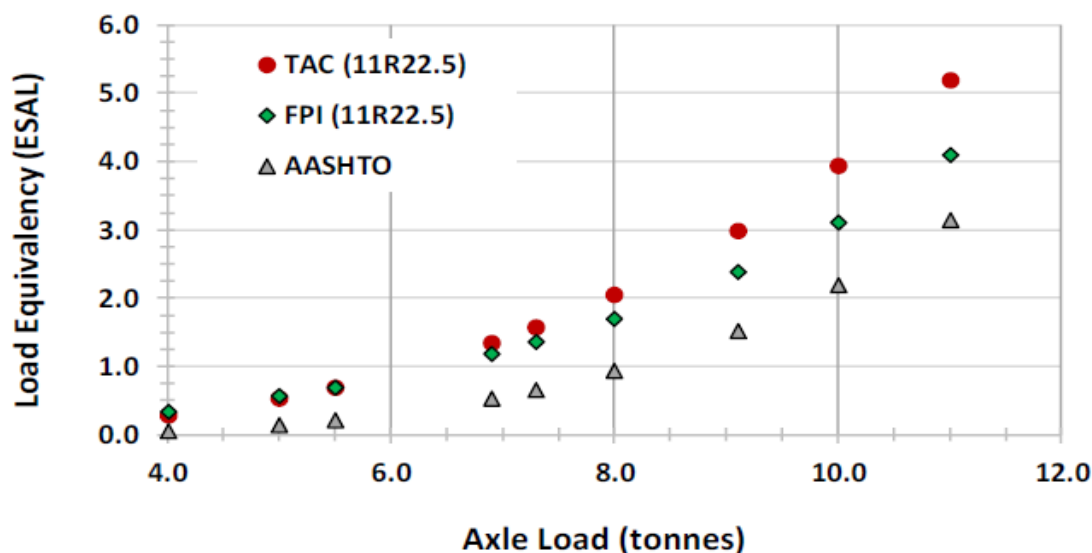
$$LEF = 0.002363 \times L^{2.1130} \quad \text{για τριπλούς άξονες με διπλά ελαστικά} \quad (3.12)$$



Εικόνα 3.8: Συντελεστής ισοδυναμίας από την Καναδική μελέτη βάρους και διαστάσεων οχημάτων (Ministry of Transportation and Highways, 1995)

Ωστόσο, αυτές οι εξισώσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τα μεγέθη των ελαστικών που κυκλοφορούν στο οδόστρωμα. Συνεπαγωγικά, για τις περιπτώσεις πλατύπελμων ελαστικών που χρησιμοποιούνται σε μονούς κατευθυντήριους άξονες (steering axles), η μέθοδος

υπερεκτιμά την επίδραση τους. Η αιτία βρίσκεται στο ότι στην έρευνα RTAC – 86, κατά τη μελέτη των οδοστρωμάτων, χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένος τύπος συμβατικού ελαστικού (11R22.5). Οπότε για μεγαλύτερα φορτία, ως απόρροια ενδεχόμενων φαρδύτερων ελαστικών, κατά πάσα πιθανότητα θα προκληθεί υπερτίμηση στον συντελεστή ισοδυναμίας (*Εικόνα 3.9*).



Εικόνα 3.9: Σύγκριση τριών μεθόδων (TAC, FPI και AASHTO με $SN = 5$ και $p_t = 2.5$) επί του συντελεστή ισοδυναμίας για μονό άξονα μονών ελαστικών (Bradley, et al., 2020)

Το 2020 η FPIinnovations ανέπτυξε μια μεθοδολογία για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή ισοδυναμίας με την θεώρηση περισσότερων ελαστικών (των δημοφιλέστερων στη χρήση τους στον Καναδά) συμπεριλαμβανομένων και πλατύπελμων ελαστικών. Μέσω μιας ανάλυσης πολλαπλής παλινδρόμησης προς τα πίσω, δημιουργήθηκε η σχέση προσδιορισμού του συντελεστή ισοδυναμίας για μονούς κατευθυντήριους άξονες μονών ελαστικών διάφορων τύπων κατασκευής (*Σχέση 3.13*). Το Load αναφέρεται στο φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα.

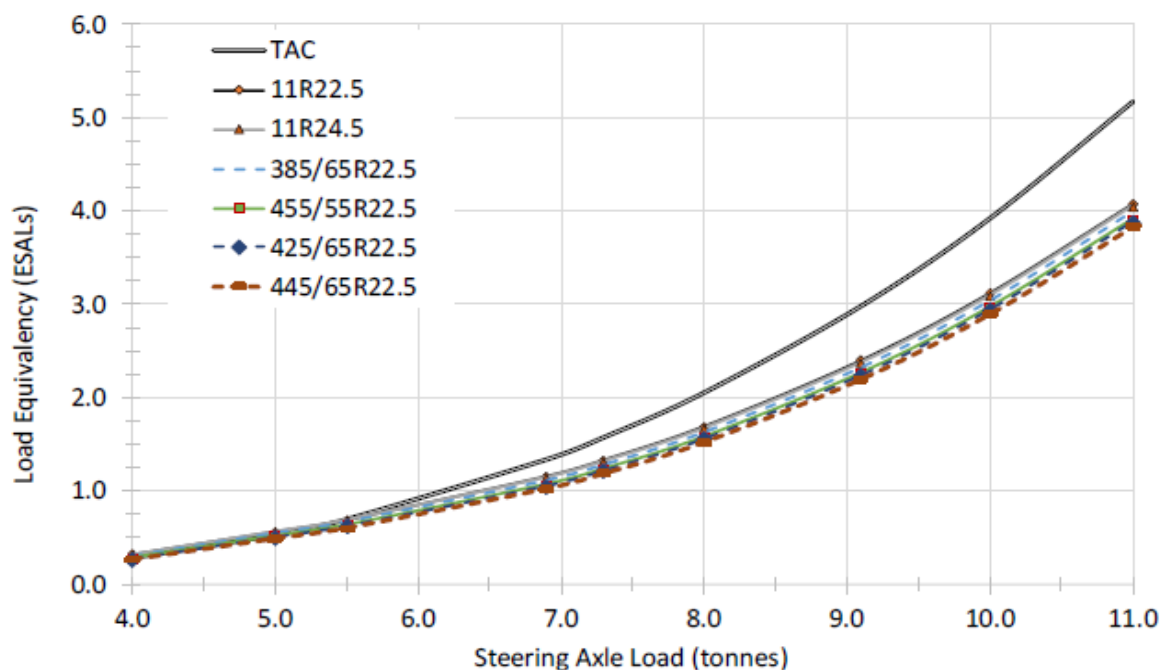
$$LEF = a + b \times (Load) + c \times (Load)^2 + d \times \left(\frac{1}{Load} \right) \quad (3.13)$$

Οι συντελεστές a , b , c , d παράγονται από την ανάλυση, πλήρως εξαρτώμενοι από τον τύπο του ελαστικού όπως παρατηρείται στον **Πίνακα 3.4** που ακολουθεί (Bradley, et al., 2020).

Πίνακας 3.4: Συντελεστής ισοδυναμίας από FPIinnovations για μονά ελαστικά συμβατικής και πλατύπελμης μορφής

Μέγεθος ελαστικού	Μονός άξονας μονών ελαστικών
Συμβατικά μεγέθη ελαστικών	
295/60R22.5	$LEF = 4.05 - 0.82 * L + 0.081 * L^2 - 6.76 / L$
11R22.5	$LEF = 5.31 - 1.03 * L + 0.091 * L^2 - 9.23 / L$
11R24.5	$LEF = 5.77 - 1.10 * L + 0.094 * L^2 - 10.16 / L$
315/80R22.5	$LEF = 4.24 - 0.86 * L + 0.082 * L^2 - 7.08 / L$
Μεγέθη πλατύπελμων ελαστικών	
385/65R22.5	$LEF = 6.03 - 1.15 * L + 0.096 * L^2 - 10.66 / L$
455/55R22.5	$LEF = 5.81 - 1.12 * L + 0.094 * L^2 - 10.20 / L$
425/65R22.5	$LEF = 5.98 - 1.15 * L + 0.095 * L^2 - 10.57 / L$
445/65R22.5	$LEF = 5.88 - 1.14 * L + 0.094 * L^2 - 10.30 / L$

Στην **Εικόνα 3.9** και στην ακόλουθη **Εικόνα 3.10** (Bradley, et al., 2020) περιγράφεται πως ο συντελεστής ισοδυναμίας εκτιμάται στους μονούς άξονες για δεδομένο τύπο ελαστικών (11R22.5) αλλά και το ότι η παρεμβατική ενέργεια της FPIinnovations έφερε στο φως καλύτερα και ακριβέστερα αποτελέσματα για άλλους τύπους ελαστικών. Επιπροσθέτως, διαπιστώνεται πως τα ελαστικά που έφερε στο προσκήνιο για τον συντελεστή ισοδυναμίας η FPI, εμφανίζουν αρκετά παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους, εν αντιθέσει με την πρώιμη μέθοδο της TAC. Μάλιστα, τα πλατύπελμα ελαστικά εξ' αιτίας του μεγάλου πέλματος που διαθέτουν, προκαλούν μικρότερη καταπόνηση στο οδόστρωμα και κατά συνέπεια αποφέρουν πιο επίπεδες καμπύλες και πιο μικρό συντελεστή ισοδυναμίας (Bradley, et al., 2020).



Εικόνα 3.10: Συντελεστής ισοδυναμίας σε μονούς άξονες μονών ελαστικών για συμβατικά και πλατύπελμα ελαστικά (Bradley, et al., 2020)

Σχεδιάζοντας για μια συγκεκριμένη περίοδο λειτουργίας, η μέθοδος TAC για να εκτιμήσει την κυκλοφορία μέσα στον κύκλο ζωής του έργου, δανείζεται στοιχεία από το Ινστιτούτο Ασφάλτου (Asphalt Institute). Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη σχέση της μεθοδολογίας υπολογισμού των ESALs του Ινστιτούτου Ασφάλτου (**Σχέση 3.14**).

$$ESALs = AADT \times HVP \times HVDF \times NALV \times TDY \times 50\% \quad (3.14)$$

Με:

ESALs = ισοδύναμοι άξονες στη λωρίδα σχεδιασμού στο πρώτο έτος λειτουργίας

AADT = η μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία οχημάτων στην οδό

HVP = ποσοστό βαρέων οχημάτων από την κυκλοφορία

HVDF = ποσοστό κατανομής των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού

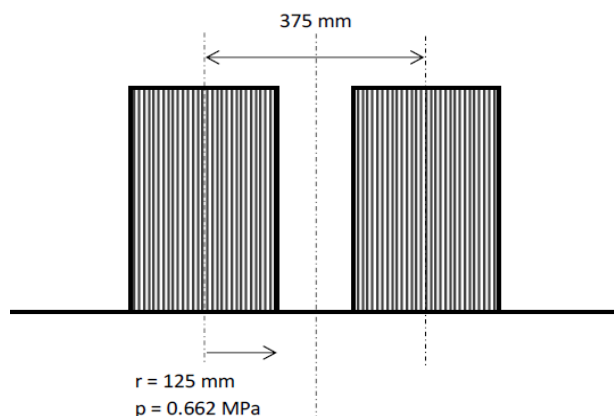
NALV = ο αριθμός των ισοδύναμων αξόνων ανά βαρέο όχημα ή κοινώς ο συντελεστής φορτηγών

TDY = ημέρες κυκλοφορίας το έτος (συνήθως 365)

Συνήθως λαμβάνεται 50% για την κυκλοφορία επί της οδού στη μια κατεύθυνση. Για την εκτίμηση των ESALs στα επόμενα χρόνια, χρειάζεται να γίνει μετέπειτα αναγωγή μέσα στην περίοδο λειτουργίας με ένα συντελεστή ρυθμού αύξησης της κυκλοφορίας (traffic growth rate factor) (Ministry of Transportation and Highways, 1995) (Ministry of Transportation , 2013) .

3.2.4 Γαλλική μέθοδος

Η μέθοδος αυτή έχει αναπτυχθεί από ένα δημόσιο επιστημονικό και ερευνητικό ίδρυμα στη Γαλλία, το Κεντρικό Εργαστήριο Ερευνών Γεφυρών και Οδών (LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Περιγράφηκε πρώτα στο Γαλλικό εγχειρίδιο σχεδιασμού των οδών του LCPC το 1994. Ωστόσο δεν εξέλειπε ούτε από εκείνη ο βασικός προβληματισμός γύρω από τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες. Ως τυπικός άξονας θεωρείται ένας μονός άξονας με διπλά ελαστικά, πίεσης 662 kPa και ακτίνας ίσης με 125 mm, τα οποία απέχουν μεταξύ τους 375 mm, όπως γίνεται εμφανές στην **Εικόνα 3.11** (Petho, 2014). Στη Γαλλική μέθοδο το φορτίο του τυπικού αυτού άξονα είναι τα 130 kN.



Εικόνα 3.11: Διαστάσεις των διπλών ελαστικών κατά το ήμισυ του τυπικού άξονα της Γαλλικής μεθόδου (Petho, 2014)

Η ανάπτυξη του συντελεστή ισοδυναμίας της Γαλλικής μεθόδου στη **Σχέση 3.15**, απευθύνεται σε όλους τους τύπους οδοστρώματος. Μολαταύτα, δεν λαμβάνεται η τυπική τιμή 4 στον εκθέτη όπως στον κανόνα 4^{ης} δύναμης αλλά εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος στον οποίο αναφέρεται. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα μάλιστα η σχέση υψώνεται στην 5^η δύναμη ενώ επίσης περιλαμβάνεται και μια ακόμη παράμετρος (K) η οποία συνυπολογίζει τη διάταξη άξονα που μελετάται (μονός άξονας, διπλός άξονας κλπ). Οι τιμές του K αναγράφονται στον **Πίνακα 3.5** (LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, et al., 1997). Τα L_x και L_t συμβολίζουν το φορτίο του επιβαλλόμενου και τυπικού άξονα αντίστοιχα. Η βασική διάκριση ενός μονού άξονα από ένα διπλό ή τριπλό είναι ότι θα πρέπει να απέχει πάνω από 2 m από γειτνιάζοντα άξονα. Από την άλλη, η **Σχέση 3.15** στερείται στοιχεία που θα την βοηθούσαν σε ένα ακόμη καλύτερο ορισμό του συντελεστή, όπως ο τύπος των ελαστικών, η απόσταση μεταξύ των αξόνων και η μορφή και τα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων (πάχος, μηχανικά χαρακτηριστικά στρώσεων) (Pereira, et al., 2017).

$$LEF = K \times \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^a \quad (3.15)$$

Πίνακας 3.5: Τιμές των παραμέτρων α τύπου οδοστρώματος και K διάταξης αξόνων κατά LCPC

	α	K		
		μονός άξονας	διπλός άξονας	τριπλός άξονας
Εύκαμπτα Οδοστρώματα	5	1	0.75	1.1
Ημιάκαμπτα οδοστρώματα	12	1	12	113
Δύσκαμπτα οδοστρώματα				
1)Πλάκες	12	1	12	113
2)Συνεχές οπλισμένο σκυρόδεμα	12	1	?	?

Για τον υπολογισμό των συνολικών ESALS, όπως και στη μέθοδο AASHTO, επινοήθηκε ο συντελεστής βαρέων οχημάτων. Στο Γαλλικό εγχειρίδιο σχεδιασμού βρίσκεται με την συντομογραφία CAM (coefficient of mean aggressiveness). Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των βαρέων οχημάτων στη **Σχέση 3.16** για να δώσει τους ισοδύναμους άξονες εκείνων. Αν και έχουν δοθεί σχετικοί πίνακες προσδιορισμού του CAM από το LCPC με πιθανολογική και στατιστική προσέγγιση για διάφορες οδούς χρήσης και υλικών σύνθεσής τους, μπορεί εξίσου να υπολογιστεί με τη διαίρεση των ισοδύναμων αξόνων με τα οχήματα που διασχίζουν την οδό. Αυτό φυσικά εφόσον είναι γνωστά από κυκλοφοριακά δεδομένα, το πόσα βαρέα οχήματα απαρτίζουν την εξεταζόμενη κυκλοφορία, το πόσοι άξονες, ποιας διάταξης (μονοί, διπλοί, τριπλοί) αποτελούν τον πληθυσμό των οχημάτων αυτών και ποια τιμή φορτίου παραλαμβάνουν. Με λίγα λόγια επιζητείται μια διαδικασία κατανομής του κυκλοφοριακού φόρτου σε άξονες που τον συνιστούν (TLD – traffic load distribution) (LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, et al., 1997). Βασισμένη στο CAM προκύπτει η ακόλουθη σχέση υπολογισμού των ESALS:

$$ESALS = CAM \times N_{pl} \quad (3.16)$$

$$N_{pl} = 365 \times AADT \times C \quad (3.17)$$

$$C = \frac{(1 + \tau)^n - 1}{\tau} \quad (3.18)$$

Με:

CAM = ο συντελεστής βαρέων οχημάτων

AADT = ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία σχετιζόμενη με τα βαρέα οχήματα

N_{pl} = ο αριθμός των βαρέων οχημάτων στην περίοδο σχεδιασμού

C = συντελεστής αύξησης της κυκλοφορίας στην περίοδο σχεδιασμού

n = περίοδος σχεδιασμού σε έτη

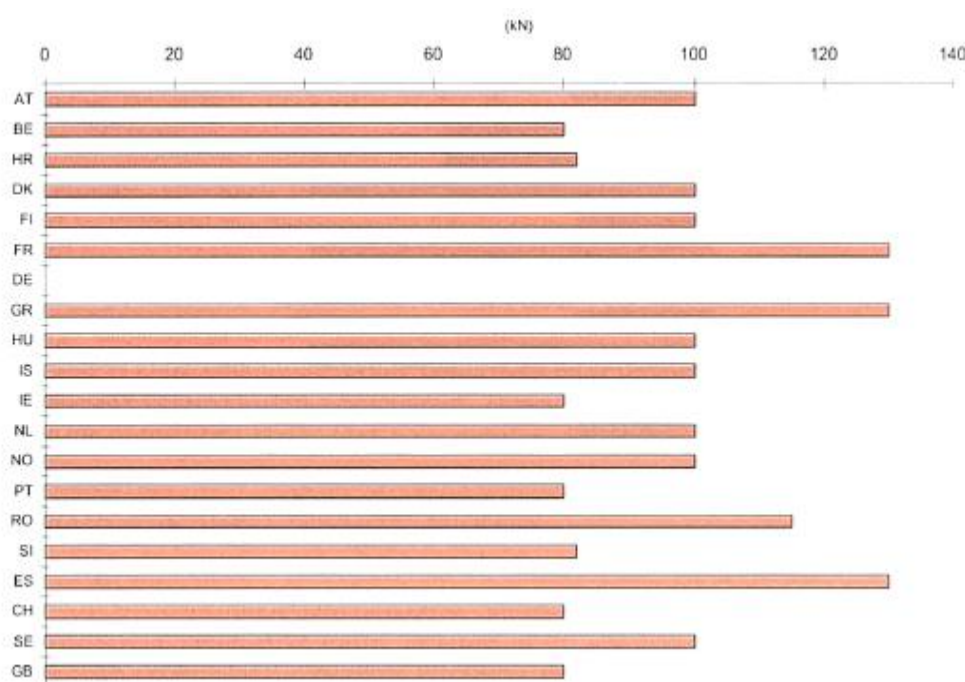
τ = ετήσιος ρυθμός αύξησης κυκλοφορίας σε δεκαδική μορφή

3.2.5 Μέθοδος COST Action 334

Η ονομαστική σύντηξη COST (COoperation in Science and Technology) αναφέρεται σε μια μοναδική πλατφόρμα στην Ευρώπη που έχει δημιουργηθεί από ερευνητές για την ανάπτυξη ιδέων γύρω από διάφορους επιστημονικούς κλάδους, την γρήγορη επικοινωνία και την από κοινού μελέτη σε διάφορα επιστημονικά πεδία. Η μεταξύ τους συνεργασία, μέσω της διευρωπαϊκής δικτύωσης, συμβάλλει στη γρηγορότερη και πιο οργανωμένη μελέτη στα σχετιζόμενα επιστημονικά αντικείμενα, όπως επίσης αποσκοπεί σε μια γενικότερη σύνθεση διεπιστημονικότητας πάνω στην έρευνα. Με άλλα λόγια η COST αποτελεί ένα επιστημονικό δίκτυο και το γόνιμο περιβάλλον συνεργασίας, σύγκρισης και ανάλυσης των διάφορων κρατικοχρηματοδοτούμενων ερευνητικών εγχειρημάτων που αναπτύσσονται στην Ευρώπη.

Οι ενέργειες της COST αναφέρονται στην βιβλιογραφία και σαν Δράσεις COST (COST Actions). Στο πλαίσιο δημιουργίας μιας τέτοιας δράσης, είναι απαραίτητες δραστηριότητες που θα βοηθήσουν στην επίτευξη εκείνης. Αυτές συνήθως αποτελούν συναντήσεις, συνέδρια, σεμινάρια και επιστημονικές αποστολές (STSM – Short Term Scientific Missions). Επί του παρόντος, πάνω από 39 χώρες χαρακτηρίζονται σαν COST χώρες και οι δραστηριότητες είναι ανοικτές για τον όποιο ερευνητικό οργανισμό εντός των COST χωρών (COST - European Co-operation, 2019).

Αναφερόμενες στο οδόστρωμα αποτελούν οι δράσεις COST 323, 324, 333, 334, 336, 337 & 343, ειδικότερα όμως για τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων κάτω από την κυκλοφορία αξόνων, σχετίζονται περισσότερο οι 333 και 334. Η δράση COST 333 το 1999 είχε στόχο να δημιουργηθεί μια νέα, βελτιωμένη, οικονομικά αποδοτική μέθοδος σχεδιασμού που θα λαμβάνει υπόψη της τη χρήση νέων υλικών, κλιματικών συνθηκών και φυσικά των δεδομένων κυκλοφορίας από τα βαρέα οχήματα που κυκλοφορούν στην Ευρώπη. Γι' αυτό τον σκοπό, συγκέντρωσε και εξέτασε όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιούν οι Ευρωπαϊκές χώρες για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Δεν εξέλειπε από αυτή την έρευνα φυσικά το κομμάτι του συντελεστή ισοδυναμίας και του τυπικού φορτίου άξονα που θεωρεί η κάθε Ευρωπαϊκή χώρα (**Εικόνα 3.12**), όπως και οι διάφορες παράμετροι που αυτές κρίνουν σημαντικές για τον υπολογισμό του συνόλου των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (COST - European Co-operation, et al., 1999).



Εικόνα 3.12: Τυπικά φορτία αξόνων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες (COST - European Co-operation, et al., 1999)

Στο κομμάτι της κυκλοφορίας, η COST χρησιμοποιεί την έννοια του συντελεστή ισοδυναμίας για την αναγωγή του πραγματικού κυκλοφοριακού φόρτου. Ο συντελεστής ισοδυναμίας για εύκαμπτο οδόστρωμα, περιγράφεται στην COST Action 334 το 2001 με την τροποποιημένη έκδοχή του κανόνα της $n^{\text{ης}}$ δύναμης στη **Σχέση 3.19**. Ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές αναλόγως τις διάφορες μορφές αστοχίας που συναντώνται στο οδόστρωμα. Στην παρακάτω σχέση τα

W και L αναφέρονται στις διελεύσεις και στα φορτία των αξόνων αντίστοιχα. Ο συμβολισμός x απευθύνεται στον άξονα που επιβάλλεται ενώ ο t σχετίζεται με τον τυπικό άξονα. Η COST 334 αποφάσισε να χρησιμοποιήσει για τυπικό φορτίο τα 10 tons (100 kN προσεγγιστικά) στον άξονα αποτελούμενος από διπλά ελαστικά αναφοράς 295/80R22.5 με πίεση ελαστικών στα 650 kPa (750 kPa σε συνθήκες κυκλοφορίας) (COST - European Co-operation, et al., 2001).

$$LEF = \frac{W_t}{W_x} = \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^n \quad (3.19)$$

- ❖ $n = 1 - 2$ στο ενδεχόμενο παραμένουσας παραμόρφωσης στην ασφαλικτή στρώση
- ❖ $n = 3 - 4$ στο ενδεχόμενο παραμένουσας παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης
- ❖ $n = 4 - 7$ στο ενδεχόμενο της κόπωσης της ασφαλικτής στρώσης

Οι τιμές του εκθέτη φυσικά εξαρτώνται και από λοιπούς παράγοντες, όπως η διαφοροποίηση εξαιτίας των υλικών σύνθεσης και άλλων. Άρα, δε μπορούν να δοθούν ακριβείς τιμές για εκείνους. Αντ' αυτού, παρουσιάζονται με κάποια εύρη τιμών και πρέπει να ερμηνεύονται με την ίδια φιλοσοφία με την οποία έχουν δημιουργηθεί, δηλαδή εξετάζοντάς τους σαν τις καλύτερες εκτιμήσεις γύρω από τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Αυτό το εύρος τιμών στον εκθέτη (από 2 έως 6 κυριότερα), βρέθηκε πως είναι ικανό να υπολογίσει περίπου στον ίδιο αριθμό, ισοδύναμους τυπικούς άξονες για ένα σύνηθες εύρος πραγματικών φορτίων αξόνων που διέρχονται από το οδόστρωμα. Η αιτιολόγηση πίσω από το πόρισμα αυτό, είναι πως οι μικρές δυνάμεις στον εκθέτη στη σχέση έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας κάνουν το πλήθος των μικρών φορτίων να συνεισφέρει σημαντικά στη δημιουργία των ισοδύναμων αξόνων, ενώ οι μεγάλες δυνάμεις κάνουν το πλήθος αξόνων με μεγάλα φορτία να παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ισοδύναμων αξόνων. Συνήχθη λοιπόν το συμπέρασμα πως προσεγγιστικά ο αριθμός των ισοδύναμων αξόνων που θα παραχθεί, παραμένει σχετικά ίδιος. Έτσι, η μέση τιμή του εκθέτη στο 4 αποτελεί ικανοποιητική για τον γενικό υπολογισμό ισοδύναμων αξόνων (COST - European Co-operation, et al., 2001) (Hjort, et al., 2008). Ωστόσο, η COST αναφέρει ότι τα συμπεράσματα αυτά γύρω από την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας είναι αμφισβητήσιμα σε περιπτώσεις αλόγιστα μεγάλων κυκλοφοριακών φόρτων, ακραίων καιρικών συνθηκών και γενικότερα καταστάσεων στις οποίες αναπτύσσονται τάσεις και παραμορφώσεις που προσεγγίζουν τα όρια αντοχής του οδοστρώματος (Kharrazi, et al., 2015).

Γενικότερο μέλημα της COST Action 334 ήταν η εξέταση της επίδρασης των ελαστικών που είχαν εμφανιστεί γύρω στο 2000 (Mikulik, et al., 2005). Από τις αρχές του 1980 είχαν αρχίσει να εισέρχονται στην αγορά νέοι τύποι αξόνων με μονά πλατύπελμα ελαστικά (385/65R22.5 & 425/60R22.5). Ενώ αυτά είχαν αναγνωριστεί ότι προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους στη βιομηχανία οδικών εμπορευματικών μεταφορών, εξ' αιτίας του μειωμένου απόβαρου, της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου και της μικρότερης φθοράς των ελαστικών, σύντομα διαπιστώθηκε πως συχνά δημιουργούν μεγαλύτερες φθορές στο οδόστρωμα λόγω της μικρότερης επιφάνειας επαφής τους με εκείνα των διπλών ελαστικών κάτω από το ίδιο φορτίο. Η χρήση τους περιορίστηκε ώστε να εξασφαλιστεί ότι δε θα υπήρχαν δυσμενείς

συνέπειες για τις οδικές υποδομές που θα επέφεραν με τη σειρά τους οικονομική ζημία στους διαχειριστές των οδών. Η ανάγκη να βελτιωθούν οι συγκεκριμένοι τύποι των ελαστικών αφενός, στο να αποφέρουν οικονομικά ωφέλη στον κλάδο των μεταφορών και αφετέρου, να μην ζημιώνουν την συντήρηση των οδών, κυρίως από τη χρήση τους σε βαρέα οχήματα, εξακολουθούσε να αποτελεί καίριο ζήτημα.

Η ανάπτυξη καινούργιων πλατύπελμων ελαστικών (445/50R22.5 & 455/55R22.5) ήλθε στο προσκήνιο εξυπηρετώντας αυτές τις ανάγκες. Τα καινούργια αυτά ελαστικά παρουσίαζαν καλύτερες συμπεριφορές επί του οδοστρώματος με σχετικά μικρότερη καταπόνηση για αυτό. Αυτό οφειλόταν στο μεγαλύτερο φάρδος των πελμάτων των ελαστικών (15% με 18% μεγαλύτερο πέλμα από το συμβατικό), στην μικρότερη πίεση για να φουσκώσουν και στην βελτιωμένη δομή σχεδιασμού τους, βάσει των οποίων προσφέρουν μικρότερες τάσεις αλλά και καλύτερη και πιο ομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος (Al - Qadi, et al., 2009). Η COST 334 ήταν εκείνη που εξέτασε την επίδραση 8 τύπων διπλών ελαστικών και 9 μονών πλατύπελμων ελαστικών και τις επιπτώσεις τους σχετικά με τη φθορά στο οδόστρωμα, την ασφάλεια, την άνεση του οχήματος, το κόστος λειτουργίας του και το περιβάλλον (προστασία από τον θόρυβο, μείωση εκπομπών αερίων κλπ) (Bradley, et al., 2020). Οι επόμενες **Εικόνες 3.13 και 3.14** απεικονίζουν συγκριτικά την νέα τεχνολογία των πλατύπελμων ελαστικών, τόσο με τα προγενέστερα όσο και με τα απλά ελαστικά που χρησιμοποιούνται σε ομάδες των δύο συνήθως (Al - Qadi, et al., 2009).



Εικόνα 3.13: Σύγκριση μεγέθους των πρώτων συμβατικών πλατύπελμων μονών ελαστικών με τα νέας γενιάς πλατύπελμων μονών ελαστικών (Al - Qadi, et al., 2009)



Εικόνα 3.14: Σύγκριση μεγέθους μεταξύ ενός ελαστικού από τη σύνθεση διπλών ελαστικών και της νέας γενιάς μονών πλατύπελμων ελαστικών (Al - Qadi, et al., 2009)

Μάλιστα για την ποσοτικοποίηση της φθοράς η COST ανέπτυξε την ιδέα του συντελεστή διαμόρφωσης ελαστικών (TCF – tyre configuration factor). Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή ισοδυναμίας στη **Σχέση 3.20** ούτως ώστε να υπολογιστεί η σχετική φθορά του οδοστρώματος, μεταξύ του υφιστάμενου στο οδόστρωμα άξονα με συγκεκριμένα ελαστικά και του τυπικού άξονα με τα επιλεγμένα ελαστικά αναφοράς, για δεδομένο πάχος οδοστρώματος και μορφή αστοχίας που εξετάζονται.

$$AWF = TCF \times LEF \quad (3.20)$$

Βασικές προϋποθέσεις για τη σωστή εκτίμηση του TCF, είναι να δοθούν τα στοιχεία των ελαστικών με βάση τον τύπο τους και να επιλεγεί η κατάλληλη σχέση (**Πίνακας 3.6**) (COST - European Co-operation, et al., 2001). Επιζητείται δηλαδή η διάμετρος και το πλάτος πέλματος ενώ παράλληλα πρέπει να είναι γνωστή και η τιμή της απαιτούμενης πίεσής τους. Φυσικά, είναι δυνατό μέσω του πίνακα να επιλεχθούν οι τιμές άμεσα χωρίς την εισαγωγή των χαρακτηριστικών, μόνο από τον τύπο του ελαστικού και τον μηχανισμό φθοράς. Όσο μεγαλύτερος αυτός ο συντελεστής TCF, τόσο και μεγαλύτερη η φθορά στο οδόστρωμα που προκαλούν τα ελαστικά εν συγκρίσει με εκείνα του τυπικού άξονα. Αυτή η φθορά συναντάται με την ονομασία AWF (axle wear factor) και είναι ένας αδιάστατος αριθμός. Η βασική και ενδιαφέρουσα διαφορά του AWF από τον συντελεστή ισοδυναμίας, είναι ότι καταφέρνει να λάβει κατά νου την καταστρεπτικότητα του επιβαλλόμενου άξονα στο οδόστρωμα με γνώμονα τον τυπικό άξονα, όχι μόνο εξ' αιτίας του διαφορετικού του φορτίου αλλά επίσης της γεωμετρίας των ελαστικών σε εκείνον (COST - European Co-operation, et al., 2001).

Πίνακας 3.6: Σχέση υπολογισμού του TCF

		TCF		
Πάχος οδοστρώματος	Προδιαγραφές ελαστικών	Διπλά ελαστικά	Μονά πλατύπελμα ελαστικά	Μονά απλά ελαστικά
Μηχανισμός μη δομικής παραμένουσας παραμόρφωσης (ασφαλτική στρώση)				
Μέτριου πάχους	$(\text{πλάτος}/470)^{-1.68} * (\text{μήκος}/198)^{-0.85} * (\text{αναλογία πίεσης})^{0.81}$ ή $(\text{πλάτος}/470)^{-1.65} * (\text{διάμετρος}/1059)^{-1.12} * (\text{αναλογία πίεσης})^{1.42}$	1.01	0.97	1.00
Μεγάλου πάχους	$(\text{πλάτος}/470)^{-1.68} * (\text{μήκος}/198)^{-0.85} * (\text{αναλογία πίεσης})^{0.81}$ ή $(\text{πλάτος}/470)^{-1.65} * (\text{διάμετρος}/1059)^{-1.12} * (\text{αναλογία πίεσης})^{1.42}$	1.01	0.99	1.00
Μηχανισμός παραμένουσας παραμόρφωσης (στρώση έδρασης)				
Λεπού πάχους	$(\text{ολικό πλάτος}/570)^{2.57} * (\text{αναλογία πίεσης})^{1.58}$	0.97	0.97	1.00
Μέτριου πάχους	$(\text{ολικό πλάτος}/570)^{2.57} * (\text{αναλογία πίεσης})^{1.59}$	0.98	0.97	1.00
Μεγάλου πάχους	-	1.00	1.00	1.00
Μηχανισμός κόπωσης				
Λεπού πάχους	$(\text{ολικό πλάτος}/570)^{-2.88} * (\text{μήκος}/198)^{-3.13}$ ή $(\text{ολικό πλάτος}/570)^{-2.44} * (\text{διάμετρος}/1059)^{-2.47}$	0.94	0.97	1.00
Μέτριου πάχους	$(\text{ολικό πλάτος}/570)^{-1.36} * (\text{μήκος}/198)^{-1.40}$ ή $(\text{ολικό πλάτος}/570)^{-1.23} * (\text{διάμετρος}/1059)^{-1.14}$	0.96	0.97	1.00
Μεγάλου πάχους	-	1.00	1.00	1.00

Ωστόσο η COST, κατά την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας δεν έχει λάβει υπόψη άλλα χαρακτηριστικά, δηλαδή τη διαμόρφωση της ανάρτησης αλλά και πιο σύνθετων διατάξεων αξόνων, όπως διπλούς και τριπλούς άξονες. Θεωρεί μάλιστα πως οι συνθετότερες αξονικές διατάξεις με απόσταση μεταξύ τους μικρότερη των 1.8 μέτρων, πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν το άθροισμα μονών αξόνων. Διακρίνεται πως η καταστρεπτικότητα διπλών και τριπλών αξόνων είναι λίγο μεγαλύτερη από τις δύο και τρεις διελεύσεις αριθμών μονών αξόνων αντίστοιχα. Συνεπώς η απλούστευση αυτών των σύνθετων διατάξεων με την αθροιστική διαδικασία μονών αξόνων, δεν αποτελεί μια καλή προσαρμογή για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, διότι η ασφαλτος είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό οπότε σε κάθε επιτόνηση από τη διέλευση αξονικού φορτίου, θα αναπτυχθούν τάσεις οι οποίες θα πάρουν συγκεκριμένο χρόνο για ένα μέρος απόσβεσής τους. Συνεπώς με τη διέλευση ενός όμοιου άξονα στην συνέχεια, θα δημιουργηθεί υπερτίμηση των τάσεων συγκριτικά με την απ' ευθείας διέλευση ενός σύνθετου άξονα. Δεύτερον, επειδή οι σχέσεις συμπεριφοράς εμφανίζουν μη γραμμικότητα, οι σύνθετες αξονικές διατάξεις ενδέχονται να αυξήσουν έντονα τις τάσεις στο οδόστρωμα κάτω από τον άξονα, εν συγκρίσει με το άθροισμα αντιδράσεων των αντίστοιχων μεμονωμένων αξόνων. Εντούτοις, για αίτια απλούστευσης σχεδιασμού, αυτές οι διατάξεις εκτιμώνται με την αθροιστική συνθήκη μονών αξόνων (COST - European Co-operation, et al., 2001).

Στον υπολογισμό των συνολικών διελεύσεων ESALS, αρκετές χώρες χρησιμοποιούν την παρακάτω φόρμουλα, στην οποία βασικά στοιχεία είναι η μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία των οχημάτων, διορθωμένη συνήθως από ένα μέγεθος CF (conversion factor) που αναφέρεται μόνο στο ποσοστό των βαρέων οχημάτων. Οι παράγοντες f_1 , f_2 με τη σειρά τους ρυθμίζουν την κατανομή στην κατεύθυνση και αντίστοιχα στη λωρίδα σχεδιασμού, ενώ τα f_3 , f_4 αφορούν άλλα χαρακτηριστικά όπως την πλευρική κατανομή εντός της λωρίδας σχεδιασμού και την κατά μήκος κλίση της. Η κυκλοφορία ανάγεται στην περίοδο DP μετρημένη σε έτη για την οποία σχεδιάζεται το οδόστρωμα (design period) και προσαυξάνεται με ένα συντελεστή ετήσιας αύξησης GF (growth factor).

$$ESALS = AADT \times CF \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times 365 \times DP \times GF \quad (3.21)$$

Η σχέση αποτελεί ένα γενικό κανόνα υπολογισμού και μια γενική εκτίμηση παραγόντων που οι χώρες χρησιμοποιούν στον σχεδιασμό. Επεξηγηματικά, λίγες είναι στην Ευρώπη οι χώρες που ευαισθητοποιούνται στη χρήση γεωμετρικών χαρακτηριστικών οδού, όπως η κατά μήκος κλίση ή χαρακτηριστικών όπως η ευαισθητοποίηση περί πλευρικής κατανομής φορτίου, ενώ σχεδόν οι μισές λαμβάνουν στο σχεδιασμό την κατανομή κυκλοφορίας για τη μια κατεύθυνση, μέσα στην οποία από κάποιες χώρες δεν εξετάζεται η κυκλοφορία για μια συγκεκριμένη λωρίδα (COST - European Co-operation, et al., 1999).

3.2.6 Μέθοδοι Austroads και Νεοζηλανδική TNZ

Μέσα από τον οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων στη Νέα Ζηλανδία (State Highway Pavement Design and Rehabilitation Manual το 1987 – 1989 ή όπως αναγνωριζόταν αργότερα TNZ Design Manual), εκφράστηκαν οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες (EDA – equivalent design axles). Ως τυπικός άξονας κρίθηκε μονός άξονας διπλών ελαστικών πίεσης επαφής 580

kPa με φορτίο τα 80 kN (8.2 tons). Τα ελαστικά διαγράφουν κυκλική ακτίνα 105 mm ενώ η μεταξύ τους απόσταση ορίζεται στα 315 mm (TNZ - Transfund New Zealand, 1997).

Στη μέθοδο αυτή οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες ή αλλιώς ο συντελεστής ισοδυναμίας, εκδηλώνεται μέσα από την 4^η δύναμη στη **Σχέση 3.22** στην οποία το φορτίο L αναφέρεται στον επιβαλλόμενο άξονα που εξετάζεται, ενώ το L_{ref} είναι το τυπικό φορτίο οποιουδήποτε άξονα που η φθορά που θα προκαλέσει θα ναι όμοια με μια διέλευση τυπικού άξονα. Για το αντίστοιχο φορτίο L μονού ή πολλαπλού άξονα μονών ή διπλών ελαστικών, λαμβάνεται τυπικό φορτίο L_t από τον **Πίνακα 3.7**, ανάλογα της επιβαλλόμενης διάταξης, ως προς τον υπολογισμό του συντελεστή ισοδυναμίας (Tooma, et al., 2009).

$$EDA = \left(\frac{L}{L_{ref}} \right)^4 \times n \quad (3.22)$$

Με:

EDA = ο αριθμός των ισοδύναμων τυπικών διελεύσεων που προκαλούν ίδια ζημιά με εκείνη του εξεταζόμενου άξονα στο οδόστρωμα

L = το εισαγόμενο φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα σε tons

L_{ref} = το τυπικό φορτίο ανάλογη της διάταξης άξονα σε tons

n = ο αριθμός των αξόνων που εξετάζεται (1, 2, 3, ...)

Πίνακας 3.7: Τυπικά φορτία για αξονικές διατάξεις μονών και πολλαπλών αξόνων μονών ή και περισσότερων ελαστικών εκατέρωθεν (σε τόνους ανά άξονα)

	Μονά ελαστικά	Διπλά ελαστικά	Τετραπλά ελαστικά	Οκταπλά ελαστικά
Μεμονωμένοι άξονες	6.70	8.20	13.00	14.90
Σε σύστημα δύο αξόνων	7.05	8.62	13.70	15.69
Σε σύστημα τριών αξόνων	7.17	8.77	13.91	15.94
Σε σύστημα τεσσάρων ή και περισσότερων αξόνων	7.26	8.88	14.08	16.14

Βασική αποσαφήνιση που πρέπει να δοθεί, είναι πως για ένα διπλό άξονα μονών ελαστικών 13 τόνων για παράδειγμα, το τυπικό φορτίο δεν είναι οι 7.05 τόνοι αλλά 7.05×2 , διότι ο πίνακας αναφέρεται σε τόνους ανά άξονα. Αφού το κλάσμα υψωθεί στον εκθέτη, είναι αναγκαίο να πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των αξόνων n που εξετάζονται. Στην προκειμένη περίπτωση το n λαμβάνει την τιμή 2. Αυτό γίνεται επειδή το αποτέλεσμα που έχει προκύψει μέχρι στιγμής δεν συνιστά ακόμη τους οριστικούς ισοδύναμους τυπικούς άξονες αλλά τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες ανά επιβαλλόμενο άξονα. Με τον πολλαπλασιασμό εκείνου με τον αριθμό των αξόνων n, προκύπτουν οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες για την εν λόγω αξονική διάταξη. Δηλαδή $(13 / 7.05 \times 2)^4 \times 2 = 1.45$ EDA.

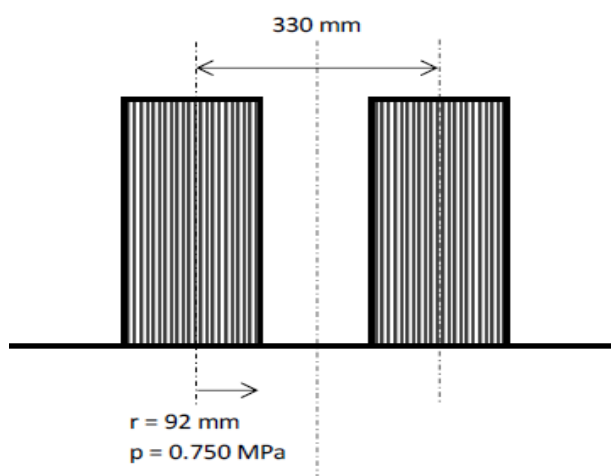
Εκτός της παραπάνω σχέσης υπολογισμού των ισοδύναμων τυπικών αξόνων, δίνεται και μια εξίσωση εκτίμησής τους για ένα όχημα. Έτσι η καταστρεπτικότητα που προκαλεί ένα όχημα που μελετάται, ορίζεται στη **Σχέση 3.23**:

$$EDA_{οχήματος} = \left(\frac{\text{μέγιστο μικτό βάρος οχήματος}}{\text{άθροισμα φορτίων αναφοράς}} \right)^4 \times \text{αριθμός αξόνων} \times 0.55 \quad (3.23)$$

Το 0.55 είναι ένα ποσοστό που πιστεύεται πως τα οχήματα θα είναι φορτωμένα περίπου στο μισό ενόσω κυκλοφορούν. Με άλλα λόγια, εκτιμάται πως τα οχήματα κυκλοφορούν στη μισή περίπου απόσταση με πλήρες φορτίο ενώ θα καλύπτουν την άλλη μισή με μηδενικό επιπρόσθετο φορτίο (Tooma, et al., 2009).

Οστόσο, αυτή η μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων θεωρήθηκε στα επόμενα χρόνια ξεπερασμένη. Η ήδη υπάρχουσα Αυστραλιανή μέθοδος (Austroads) υιοθετήθηκε από την Νέα Ζηλανδία το 1996 με κάποια στοιχεία στο σχεδιασμό που διατηρήθηκαν ακέραια για τις συνθήκες της Νέας Ζηλανδίας. Ένα από τα βασικά αίτια εκείνης της απόφασης είναι πως ο Νεοζηλανδέζικος συντελεστής ισοδυναμίας αποδείχτηκε λιγότερο συντηρητικός από εκείνον της Αυστραλιανής εκτίμησης. Αυτό κατ' επέκταση εξασφάλιζε καλύτερη αξιοπιστία. Το 1992 η Austroads εξέδωσε τον πρώτο οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Pavement Design – A Guide to Structural Design of Road Pavements – Austroads 1992), ενώ μεταγενέστερες εκδόσεις σχεδιασμού έλαβαν σειρά (Austroads 2004a, 2012) (Gribble, et al., 2008) (TNZ - Transfund New Zealand, 1997). Όλα τα τεύχη σχεδιασμού αναφέρονται τόσο σε εύκαμπτο όσο και σε ημιάκαμπτο και δύσκαμπτο οδόστρωμα και αποτελούν προϊόν πολυετούς έρευνας, μελέτης των υλικών και συνεχών παρατηρήσεων.

Στο κομμάτι της κυκλοφορίας, ο τυπικός άξονας που ορίστηκε από την Austroads παρουσιάζει σχετικά παρόμοια γεωμετρία με αυτή της Νέας Ζηλανδίας. Ο Αυστραλιανός τυπικός άξονας είναι επίσης ένας μονός άξονας φορτίου 80 kN, τα ελαστικά του οποίου διαθέτουν πίεση ίση με 750 kPa και ακτίνα 92 mm ενώ η μεταξύ τους απόσταση υπολογίζεται στα 330 mm όπως γίνεται εμφανές στην **Εικόνα 3.15** (Petho, 2014).



Εικόνα 3.15: Διαστάσεις των διπλών ελαστικών κατά το ήμισυ του τυπικού άξονα της μεθόδου Austroads (Petho, 2014)

Ο συντελεστής ισοδυναμίας ή ακριβέστερα οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες, όπως δίνεται από την Αυστραλιανή βιβλιογραφία ESA (equivalent single axles), αποτελούν τη βασική συνθήκη υπολογισμού κυκλοφορίας για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και στην Αυστραλία. Εκτός όμως από τα ESA, δημιουργήκε και μια παραπλήσια έννοια του συντελεστή ισοδυναμίας, το μέγεθος SAR (standard axle repetitions). Τα ESA και τα SAR μοιράζονται την ίδια σχέση υπολογισμού (**Σχέσεις 3.24 και 3.25**). Τα ESA αναφέρονται στους ισοδύναμους τυπικούς άξονες, σχετιζόμενοι με τη γενική φθορά ενός οδοστρώματος ενώ τα SAR περιγράφουν τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες που προκύπτουν από τους πραγματικούς, με βάση την ανάλογη μορφή φθοράς ($m = 5$ για την κόπωση της ασφαλτικής στρώσης, $m = 7$ για την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης του οδοστρώματος, $m = 12$ για κόπωση σταθεροποιημένων στρώσεων με τσιμέντο). Τα SAR όταν υψώνονται στον εκθέτη με τιμή 4, δίνουν τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες ESA. Ο εκθέτης 4 λαμβάνεται βασιζόμενος στις αρχές του εμπειρικού σχεδιασμού, καθώς προκύπτει από μελέτες πεδίου πάνω στην απόδοση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αντιθέτως, οι τιμές 5, 7 και 12 έχουν προέλθει μέσω αναλυτικών μεθόδων ύστερα από σχέσεις κόπωσης και το κριτήριο παραμορφώσεων της στρώσης έδρασης. Οι εκθέτες 5 και 7 αφορούν μορφές φθοράς σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα ενώ η εκθετική τιμή 12 προβλέπει τη φθορά σε ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα (Austroads, 2012) (Queensland Government, 2018). Οι τιμές του εκθέτη συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 3.8** (Austroads, 2012).

$$ESA_{ij} = SAR4_{ij} = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i} \right)^4 \quad (3.24)$$

$$SARm_{ij} = \left(\frac{L_{ij}}{SL_i} \right)^m \quad (3.25)$$

Όπου:

ESA_{ij} = ο αριθμός των επαναλήψεων ισοδύναμων τυπικών αξόνων που προκαλούν ίδια φθορά στο οδόστρωμα με τη διέλευση μιας i διάταξης άξονα φορτίου L_{ij}

SAR_{ij} = ο αριθμός των επαναλήψεων ισοδύναμων τυπικών αξόνων που προκαλούν ίδια φθορά τύπου m στο οδόστρωμα με τη διέλευση μιας i διάταξης άξονα φορτίου L_{ij}

L_{ij} = j μέγεθος φορτίου στον τύπο άξονα i

SL_i = τυπικό φορτίο για την κατάλληλη διάταξη άξονα i

m = ο εκθέτης βασισμένος στη μορφή καταπόνησης του οδοστρώματος

Πίνακας 3.8: Εκθέτες φθοράς m στην έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας με βάση τη μορφή φθοράς του οδοστρώματος κατά Austroads

Τύπος Οδοστρώματος	Μορφή φθοράς οδοστρώματος	Εκθέτης φθοράς m
Οδοστρώματα με κοκκώδη υλικά βάσης και λεπτή ασφαλτική επιφάνεια	Συνολική φθορά οδοστρώματος	4
Οδοστρώματα με μια ή περισσότερες συνδετικές στρώσεις	Κόπωση ασφαλτικής στρώσης	5
	Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης και απώλεια επιφάνειας	7
	Κόπωση σταθεροποιημένων στρώσεων με τσιμέντο	12

Οι αναφερθείσες συντομογραφίες παρακάτω στον **Πίνακα 3.9** περιγράφουν την διάταξη του άξονα (π.χ SADT – single axle dual wheel κ.ο.κ) (Austroads, 2017). Οι διατάξεις αξόνων (TADT, TRDT κλπ) προκύπτουν όταν οι άξονες απέχουν λιγότερο των 2.1 μέτρων μεταξύ τους. Τα τυπικά ισοδύναμα φορτία των διατάξεων αυτών απεικονίζονται στον **Πίνακα 3.10** (Austroads, 2017). Ο συντελεστής ισοδυναμίας για διάφορες αξονικές διατάξεις της μεθόδου Austroads παρουσιάζεται και μέσω του **Πίνακα Π – 10** στο **Παράρτημα** του αρχείου (Austroads, 2017).

Πίνακας 3.9: Τυπικό φορτίο για αξονικές διατάξεις διπλών ελαστικών

Διάταξη άξονα	Τυπικό φορτίο (kN)
Μονός άξονας με διπλά ελαστικά (SADT)	80
Διπλός άξονας με διπλά ελαστικά (TADT)	135
Τριπλός άξονας με διπλά ελαστικά (TRDT)	181
Τετραπλός άξονας με διπλά ελαστικά (QADT)	221

Πίνακας 3.10: Τυπικό φορτίο για αξονικές διατάξεις μονών ελαστικών

Διάταξη άξονα	Ονομαστικό πλάτος ελαστικού	Τυπικό φορτίο (kN)
Μονός άξονας με μονά ελαστικά (SAST)	Μικρότερο από 375 mm	53
	375 mm και άνω μέχρι 450 mm	58
	450 mm και άνω	71
Διπλός άξονας με μονά ελαστικά (TAST)	Μικρότερο από 375 mm	89
	375 mm και άνω μέχρι 450 mm	98
	450 mm και άνω	119
Τριπλός άξονας με μονά ελαστικά (TRST)	Μικρότερο από 375 mm	121
	375 mm και άνω μέχρι 450 mm	132
	450 mm και άνω	162
Τετραπλός άξονας με μονά ελαστικά (QAST)	Μικρότερο από 375 mm	150
	375 mm και άνω μέχρι 450 mm	164
	450 mm και άνω	201

Ο υπολογισμός των συνολικών ESALs εύκαμπτου οδοστρώματος απαιτεί τον υπολογισμό των αξονικών διατάξεων από τα βαρέα οχήματα (HVAG). Η σχέση υπολογισμού ξεκινά με το να υπολογιστούν τα καθημερινά βαρέα οχήματα στη λωρίδα σχεδιασμού.

$$N_i = AADT \times DF \times \frac{\% HV}{100} \times LDF \quad (3.26)$$

Όπου :

N_i = τα αρχικά καθημερινά βαρέα οχήματα στη λωρίδα σχεδιασμού

$AADT$ = η μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία οχημάτων το πρώτο έτος

DF = ο συντελεστής κατεύθυνσης που αντιστοιχεί στο πόση από την κυκλοφορία αφορά την κατεύθυνση σχεδιασμού

$\% HV$ = μέσο ποσοστό βαρέων οχημάτων

LDF = ο συντελεστής κατανομής των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού

Στη συνέχεια με τον κατάλληλο συντελεστή ανάπτυξης της κυκλοφορίας για τα επόμενα χρόνια, υπολογίζονται τα βαρέα οχήματα που θα προκύψουν στην εκτιμώμενη περίοδο σχεδιασμού.

$$N_{HV} = 365 \times CGF \times N_i \quad (3.27)$$

$$CGF = \begin{cases} \frac{(1 + 0.01 \times R)^P - 1}{0.01 \times R} & R > 0 \\ P & R = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

Όπου:

N_{HV} = αθροιστικός αριθμός βαρέων οχημάτων στην περίοδο σχεδιασμού

CGF = αθροιστικός συντελεστής ανάπτυξης κυκλοφορίας

P = έτη περιόδου σχεδιασμού

R = ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης κυκλοφορίας σε %

Από εκεί και μετά, ουσιαστικό αποτελεί το να μετατραπούν σε αξονικές διατάξεις βαρέων οχημάτων N_{DT} . Αυτό επιτυγχάνεται στη **Σχέση 3.29** μέσα από το N_{HVAG} . Το N_{HVAG} αντιπροσωπεύει το μέσο αριθμό των αξονικών αυτών διατάξεων ανά βαρέο όχημα. Αν και δίνονται υποθετικοί πίνακες για τον προσδιορισμό αυτού του μεγέθους, συνηθίζεται να προσδιορίζεται μέσα από την διαδικασία κατανομής του κυκλοφοριακού φόρτου. Έτσι, η κυκλοφορία χρειάζεται να μετατραπεί στον κάθε τύπο άξονα, με βάση τη συχνότητα που εντοπίζεται και με βάση το πλήθος των φορτίων που συναντώνται σε εκείνους. Ύστερα, το N_{HVAG} υπολογίζεται από το ποσοστό των $SAST$ και $TAST$, μιας και συνιστούν τους

κατευθυντήριους άξονες διεύθυνσης σε κάθε βαρέο όχημα (steering axles). Εφόσον είναι γνωστό ότι αυτή η αξονική διάταξη συναντάται σε κάθε φορτηγό μια φορά, τότε αν διαιρεθεί το συνολικό ποσοστό των αξονικών διατάξεων με το ποσοστό των κατευθυντήριων αξόνων ή αλλιώς των βαρέων οχημάτων, προκύπτει δια της λογικής το συγκεκριμένο μέγεθος N_{HVAG} .

$$N_{DT} = N_{HV} \times N_{HVAG} \quad (3.29)$$

Όπου:

N_{DT} = κυκλοφορία σχεδιασμού σε αθροιστικές αξονικές διατάξεις βαρέων οχημάτων

N_{HVAG} = μέσος αριθμός αξονικών διατάξεων ανά βαρέο όχημα

Το τελευταίο ζητούμενο που απαιτείται για την εύρεση των συνολικών ισοδύναμων τυπικών αξόνων στην περίοδο σχεδιασμού (DESA) (**Σχέση 3.31**), είναι η δημιουργία του πηλίκου $ESA / HVAG$ στη **Σχέση 3.30**, όπου στην ουσία εκτιμάται ο αριθμός των διελεύσεων τυπικού άξονα για κάθε αξονική διάταξη των οχημάτων.

$$\frac{ESA}{HVAG} = \sum_{i,j} \left[P_i \times P_2 \times \left(\frac{L_{ij}}{SL_i} \right)^4 \right] \quad (3.30)$$

$$DESA = \frac{ESA}{HVAG} \times N_{DT} \quad (3.31)$$

Όπου:

P_2 = το ποσοστό σύνθεσης της κάθε αξονικής διάταξης i

P_{ij} = το ποσοστό σύνθεσης των φορτίων j εντός της κάθε αξονικής διάταξης i

$DESA$ = ο αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων της κυκλοφορίας σχεδιασμού

$\frac{ESA}{HVAG}$ = ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων τυπικών αξόνων ανά αξονική διάταξη

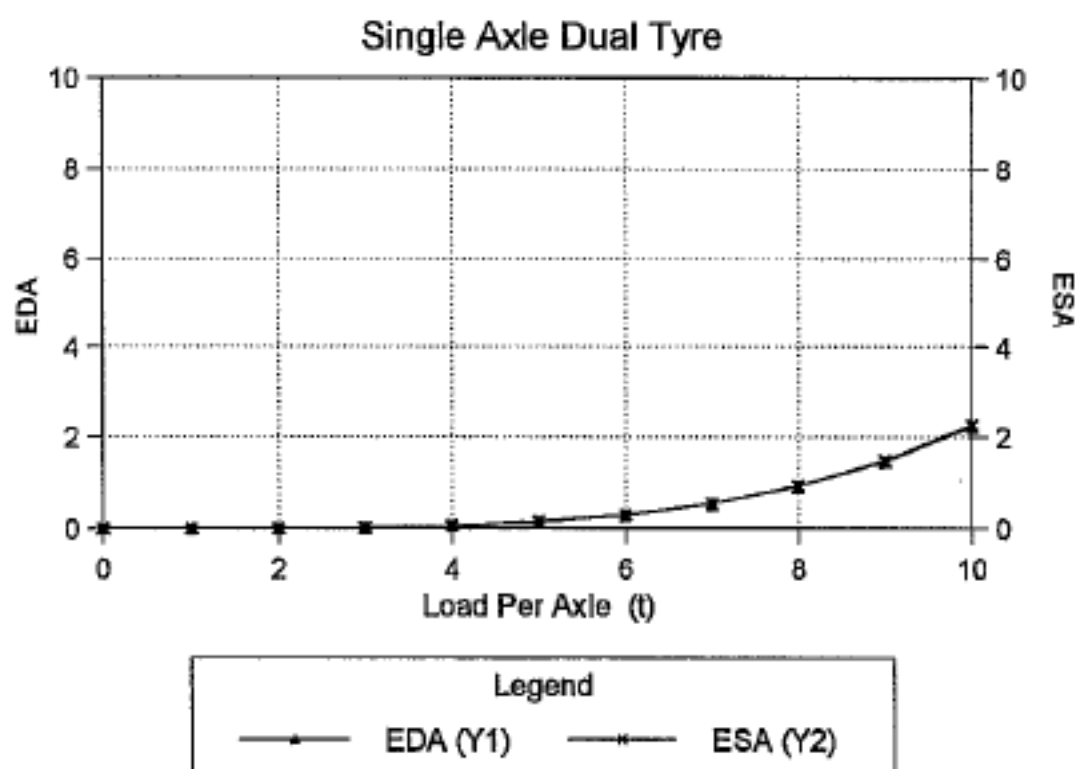
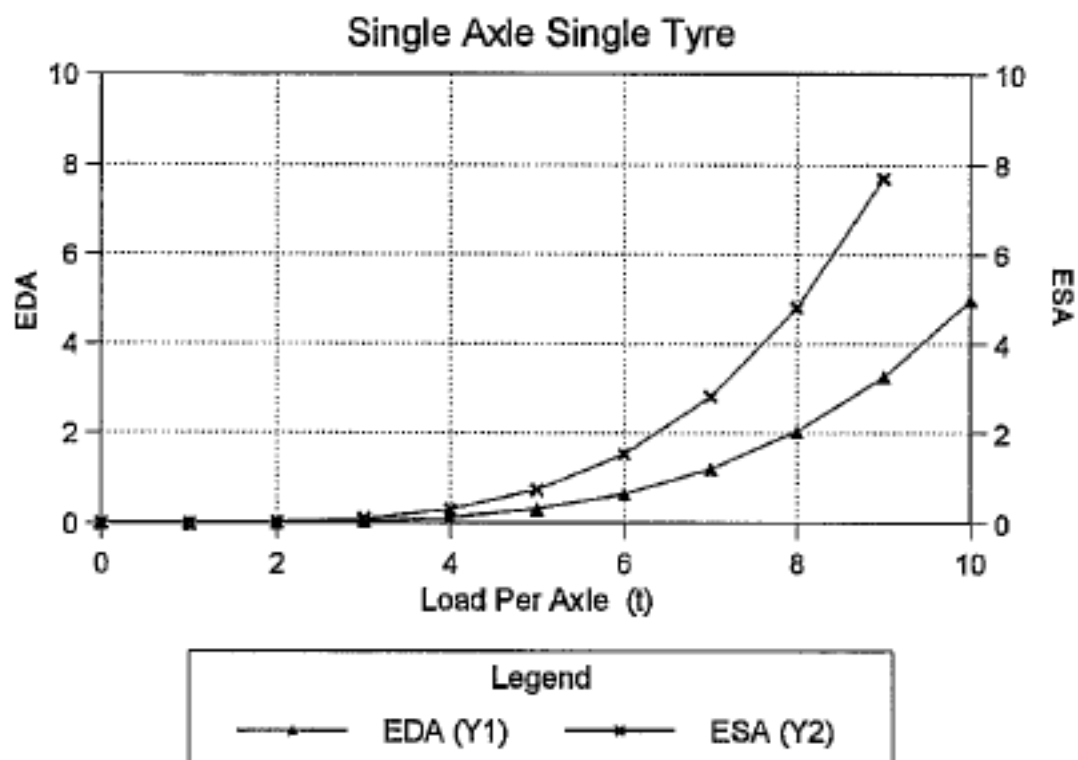
βαρέων οχημάτων

Επίσης, δίνεται στην επόμενη σχέση ο υπολογισμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (SAR) για την κάθε μορφή φθοράς m στο οδόστρωμα για την εκτιμώμενη περίοδο σχεδιασμού (DESA). Στην περίπτωση αυτή, εκείνοι υπολογίζονται μέσω απλής αναλογίας.

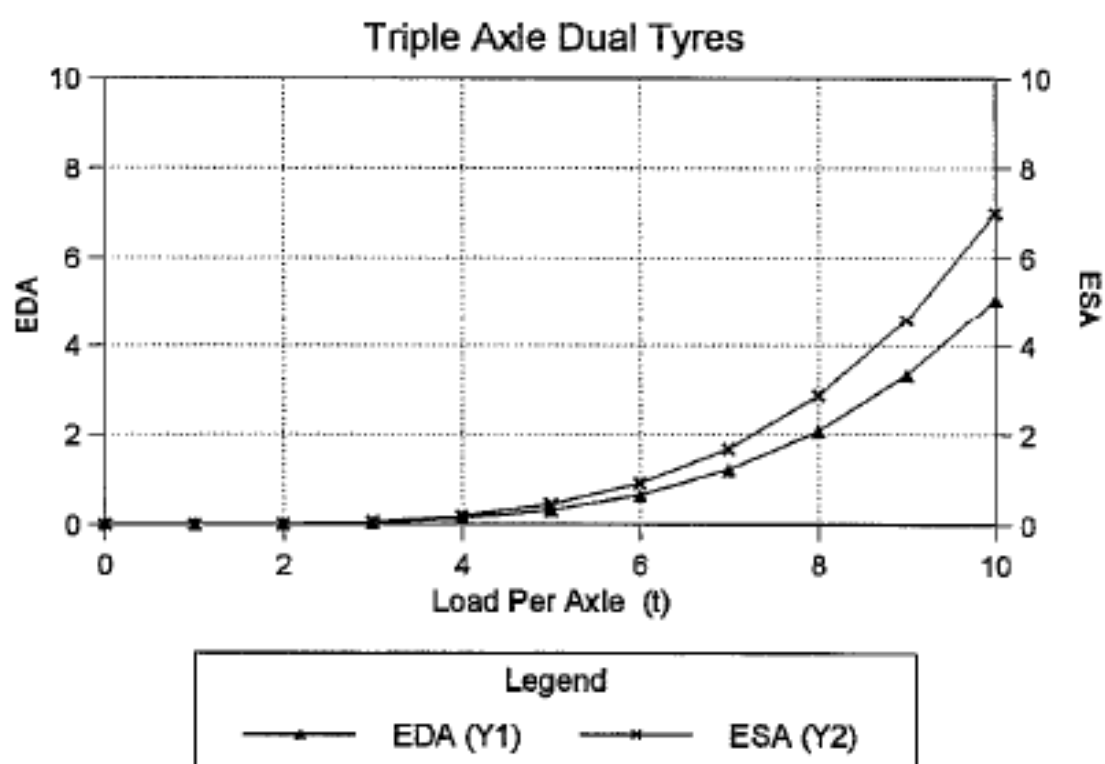
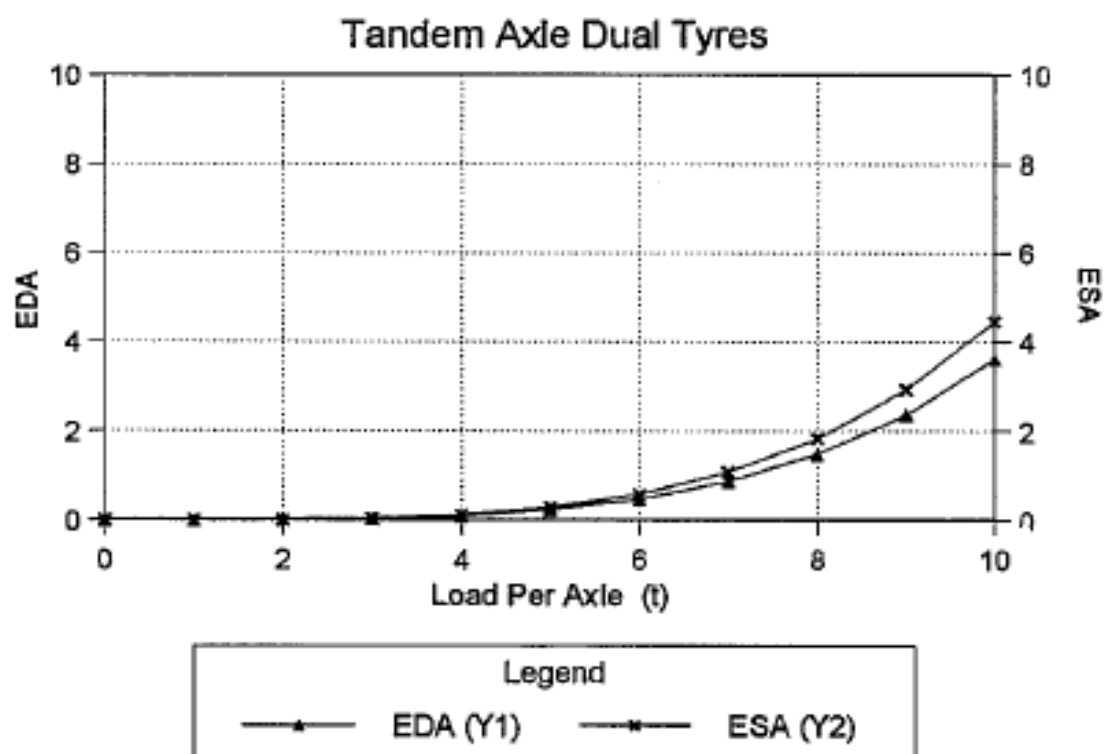
$$DSAR_m = DESA \times \frac{SAR_m}{ESA} \quad (3.32)$$

Η διαφορά είναι πως στα δύσκαμπτα οδοστρώματα δεν περιλαμβάνεται η έννοια του συντελεστή ισοδυναμίας με τη συνθήκη του κανόνα της 4^{ης} δύναμης. Κατά το σχεδιασμό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η κυκλοφορία σχεδιασμού λαμβάνεται από τις αξονικές διατάξεις των βαρέων οχημάτων οι οποίες πολλαπλασιάζονται με ένα παράγοντα ασφαλείας φορτίου ανάλογος με την επιθυμητή αξιοπιστία του έργου, κατά το στάδιο της κατανομής της κυκλοφορίας (Austroads, 2017).

Εφόσον προσδιορίστηκαν οι συντελεστές ισοδυναμίας από τις δύο αυτές μεθόδους, παρατίθενται τα διαγράμματα στις **Εικόνες 3.16 και 3.17** στις οποίες γνωστοποιούνται οι ποσοτικές διαφορές ανάμεσα στους συντελεστές ισοδυναμίας (TNZ - Transfund New Zealand, 1997). Παρατηρείται όπως προαναφέρθηκε, πως ο συντελεστής της μεθόδου Austroads εκδηλώνει μεγαλύτερες τιμές από εκείνες της TNZ, οπότε λαμβάνεται από τη μέθοδο μια πιο συντηρητική θεώρηση στο κομμάτι της κυκλοφορίας και της επικείμενης φθοράς μεταγενέστερα.



Εικόνα 3.16: Διαγράμματα συντελεστών ισοδυναμίας (EDA & ESA) με βάση το φορτίο για μονούς άξονες μονών και διπλών ελαστικών (TNZ - Transfund New Zealand, 1997)

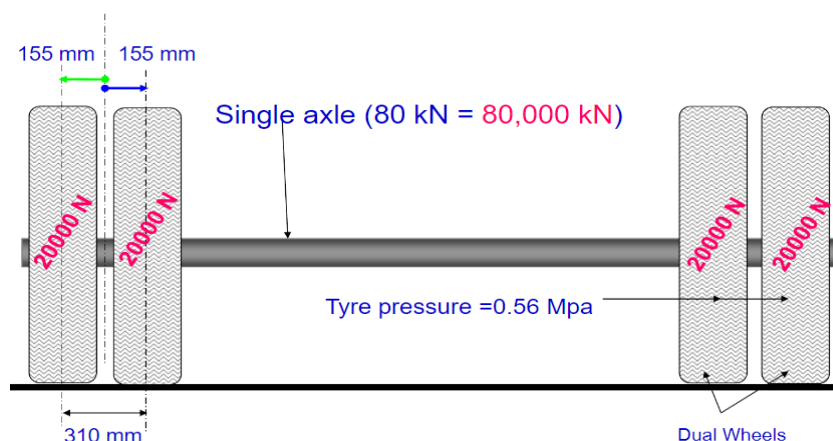


Εικόνα 3.17: Διαγράμματα συντελεστών ισοδυναμίας (EDA & ESA) με βάση το φορτίο για διπλούς και τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών (TNZ - Transfund New Zealand, 1997)

3.2.7 Ινδική μέθοδος IRC

Από τις πρώτες μεθόδους σχεδιασμού, βασισμένη στην εμπειρική θεώρηση ήταν η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην Ινδία πρώτη φορά το 1970 (IRC – Indian Road Congress). Επηρεασμένη σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο CBR, κυκλοφόρησε το πρώτο εγχειρίδιο σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων τότε. Ακολούθησαν νέες εκδόσεις σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων όπως τα IRC: 37 – 1984, IRC: 37 – 2001, IRC: 37 – 2012, IRC: 37 – 2018. Κατά την εξελικτική διαδικασία των νέων εκδόσεων, ο σχεδιασμός αποκτούσε αναλυτικό – εμπειρικό χαρακτήρα. Η εκτίμηση στην κυκλοφορία υπολογίζεται με τις ίδιες εφαρμογές μέσα στο ερευνητικό διάστημα, ωστόσο συμπληρώθηκαν στοιχεία ανά τα χρόνια (IRC - Indian Roads Congress, 2018).

Ως τυπικός άξονας στην Ινδία είναι ένας μονός άξονας συνολικού φορτίου 80 kN με δύο διπλά ελαστικά που απέχουν μεταξύ τους 310 mm και πίεσης 560 kPa, όπως γίνεται φανερό στην **Εικόνα 3.18** (Kumar, 2022).



Εικόνα 3.18: Τυπικός άξονας κατά IRC (Kumar, 2022)

Και σε αυτή την μεθοδολογία σχεδιασμού ο συντελεστής ισοδυναμίας υπολογίζεται μέσω της 4^{ης} δύναμης. Το L_x αφορά το φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα στο οδόστρωμα ενώ το L_t αναφέρεται στο φορτίο του τυπικού άξονα, ανάλογο με την αξονική διάταξη.

$$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^4 \quad (3.33)$$

Με:

$L_t = 65$ kN για μονούς άξονες μονών ελαστικών

$L_t = 80$ kN για μονούς άξονες διπλών ελαστικών

$L_t = 148$ kN για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών

$L_t = 224$ kN για τριλούς άξονες διπλών ελαστικών

Η σχέση μπορεί να ληφθεί υπόψη για διαφορετικές διατάξεις αξόνων και ως εκ τούτου διάφορα τυπικά φορτία εξυπηρετούν αυτή τη συνθήκη. Η IRC το 2001 συμπεριέλαβε στο σχεδιασμό και άξονες διπλούς ενώ το 2012 άξονες τριπλούς και μονούς με μονά ελαστικά. Το τυπικό φορτίο L_t λαμβάνει τιμές ανάλογα με αυτές τις διατάξεις. Σύνθετες διατάξεις αξόνων μπορεί να θεωρηθούν στην περίπτωση που οι άξονες μεταξύ τους δεν είναι απομακρυσμένοι περισσότερο του 1.3 του μέτρου. Η αιτία αυτής της επιλογής είναι διότι πάνω από εκείνη την απόσταση οι τάσεις που προκαλούνται από τους άξονες δεν αλληλοκαλύπτονται (IRC - Indian Roads Congress, 2012).

Στην περίπτωση που τα κριτήρια του συντελεστή αφορούν φαινόμενα φθοράς όπως την παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης ή την κόπωση της ασφαλτικής στρώσης, ο εκθέτης λαμβάνεται απλοποιητικά πάλι με 4. Ιδανικά στην παραμένουσα παραμόρφωση με γενέτειρα τη στρώση έδρασης, θα ήταν καλό να ληφθεί για τον εκθέτη η τιμή 4.5 ενώ στην κόπωση της ασφαλτικής στρώσης 3.89 (Mathew, 2019).

Η έκφραση αυτή του συντελεστή ισοδυναμίας χρησιμοποιείται για τα πλαίσια σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Όσον αφορά τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, ο σχεδιασμός δεν περιλαμβάνει χρήση συντελεστή ισοδυναμίας. Για περισσότερη έρευνα, υπάρχει αντίστοιχο τεύχος από την IRC (IRC: 58 - 1988) (IRC - Indian Roads Congress, 1991).

Ο υπολογισμός των συνολικών διελεύσεων ESALs μπορεί να προκύψει από τη **Σχέση 3.34**. Οι συντελεστές A και D προσδιορίζουν την κίνηση των βαρέων οχημάτων, εξαρτώμενοι από την κανανομή στην εξεταζόμενη λωρίδα. Η κυκλοφορία ανά τα χρόνια εντός της διάρκειας ζωής η του έργου, ενδεχομένως να παρουσιάζει κάποιο ποσοστό αύξησης r. Επιπλέον, χρειάζεται ο συντελεστής βαρέων οχημάτων F για την μετατροπή των βαρέων οχημάτων σε ισοδύναμους άξονες. Βασική προϋπόθεση για τον υπολογισμό του F είναι να υφίσταται μια κατανομή του φόρτου κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων σε επιβαλλόμενους άξονες. Ειδικά, το F δύναται να εκτιμηθεί από κάποιες ενδεικτικές τιμές που υπάρχουν σε πίνακες εντός του IRC: 37 (IRC - Indian Roads Congress, 2018).

$$ESALs = \frac{365 \times [(1 + r)^n - 1]}{r} \times A \times D \times F \quad (3.34)$$

Όπου:

ESALs = συνολικός αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων (συνηθίζεται να μετατρέπονται και να δίνονται ανά 1 εκατομμύριο άξονες (msa – million standard axles)

A = η αρχική κίνηση των βαρέων οχημάτων το έτος ολοκλήρωσης της οδού σε όρους βαρέων οχημάτων ανά ημέρα

D = συντελεστής κατανομής λωρίδας (δίνεται από αντίστοιχο πίνακα στην IRC: 37)

F = ο συντελεστής βαρέων οχημάτων (στην Ινδική βιβλιογραφία συναντάται και ως συντελεστής φθοράς βαρέων οχημάτων VDF – vehicle damage factor)

n = περίοδος σχεδιασμού σε έτη

r = ετήσιος ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων σε δεκαδική μορφή

Όσο για αυτή την αρχική κίνηση των οχημάτων, η μέθοδος αυτή ευαισθητοποιείται να συμπεριλάβει μέσω της **Σχέσης 3.35**, την κυκλοφορία στην περίοδο κατασκευής του έργου πριν τη λειτουργία.

$$A = P \times (1 + r)^x \quad (3.35)$$

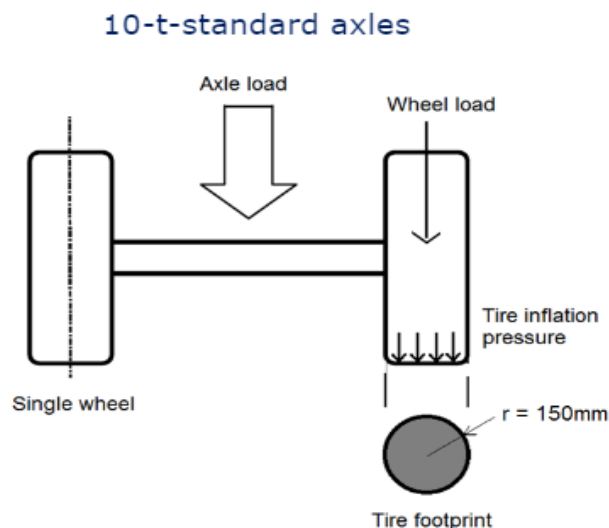
Στην οποία:

P = αριθμός οχημάτων βάσει της τελευταίας καταμέτρησης

x = έτη που χρειάζονται για την πραγματοποίηση του έργου (από το έτος αρχής μέχρι το έτος ολοκλήρωσης του)

3.2.8 Γερμανική μέθοδος

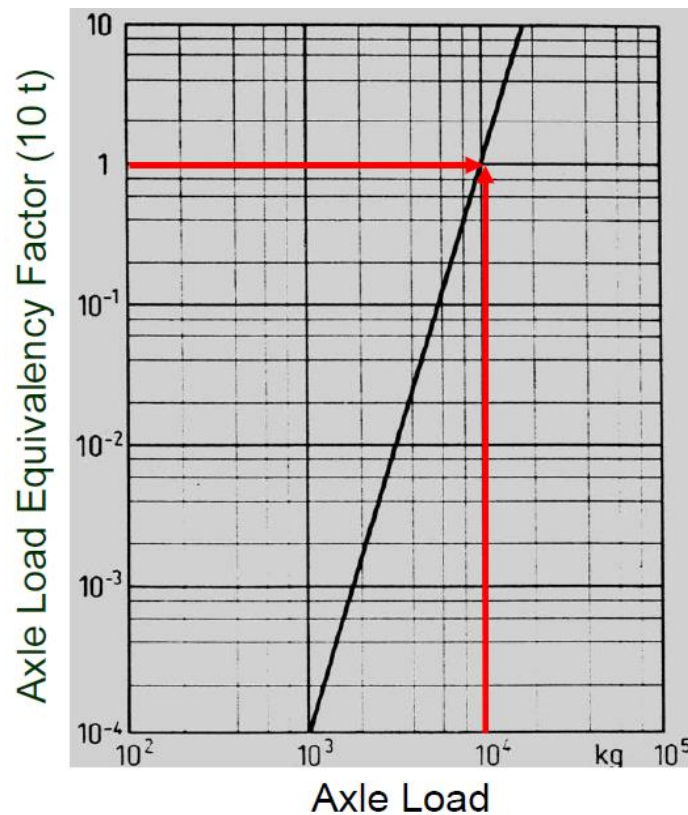
Πρόκειται για μια μεθοδολογία που συναντάται στους Γερμανικούς καταλόγους τυπικών δομών οδοστρωμάτων (RstO – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen) από την Ερευνητική Εταιρεία Δρόμων και Κυκλοφορίας (FGSV – Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen), στους οποίους εξετάζεται εκτός του σχεδιασμού και η έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας. Στο εγχειρίδιο RStO 01 περιγράφεται αναλυτικά η θεωρία γύρω από τον συντελεστή ισοδυναμίας. Πληροφορίες είναι δυνατόν να αντληθούν και από άλλα τεύχη (RStO 12). Η Γερμανική μέθοδος θεωρεί τυπικό αξονικό φορτίο τα 10 tons (100 kN κατά προσέγγιση) με ένα άξονα μονών ελαστικών πίεσης 700 kPa. Οι διαστάσεις του εμφανίζονται στην **Εικόνα 3.19** (Wellner, et al., 2015).



Εικόνα 3.19: Τυπική διάταξη άξονα Γερμανικής μεθόδου (Wellner, et al., 2015)

Ο συντελεστής ισοδυναμίας βασίζεται για ακόμη μια φορά στην 4^η δύναμη στη **Σχέση 3.36**. Σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο άξονα L_x , ο τυπικός άξονας L_t λαμβάνει σταθερή τιμή (10 tons ή προσεγγιστικά 100 kN). Απεικονίζεται και γραφικά στην **Εικόνα 3.20** (Jendia, 2011).

$$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^4 \quad (3.36)$$



Εικόνα 3.20: Σχηματική απεικόνιση του συντελεστή ισοδυναμίας βάσει του αξονικού φορτίου (Jendia, 2011)

Η σχέση του συντελεστή ισοδυναμίας χρησιμοποιείται για οποιοδήποτε τύπο οδοστρώματος, διατηρώντας την ίδια μορφή έκφρασης, χωρίς κάποια αλλαγή του εκθέτη. Ακόμα, μια σημαντική ιδιαιτερότητά της **Σχέσης 3.36** αποτελεί το γεγονός πως σε πολυπλοκότερες δομές αξόνων δεν τροποποιείται και το αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα των μονών αξόνων που τις συνιστούν (FGSV - Road and Transport Research Association, 2012).

Μεγάλο ενδιαφέρον, εμπεριέχει ο υπολογισμός των ESALs καθότι μπορεί να ακολουθηθούν, ως προς την εύρεσή τους, δύο διαφορετικές μεθοδολογίες, συμπεριλαμβάνοντας κυκλοφοριακά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού.

Η πρώτη μεθοδολογία χρησιμοποιεί τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες μέσω της 4^{ης} δύναμης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Τα συνολικά ESALs υπολογίζονται από τη **Σχέση 3.37** όπου N η διάρκεια ζωής του έργου σε χρόνια (συνήθως 30), ADA οι ημερήσιες διελεύσεις αξόνων της βαριάς κυκλοφορίας, f_z όπως συναντάται και σε άλλες σχέσεις υπολογισμού ο συντελεστής αύξησης της κυκλοφορίας (**Σχέση 3.38**), ρ ο ετήσιος ρυθμός αύξησής της κυκλοφορίας, f_1 αντιπροσωπεύοντας στην κυκλοφορία τον αριθμό των εξεταζόμενων λωρίδων, f_2 για το πλάτος της λωρίδας και το f_3 για την μέγιστη διαμήκη κλίση

της οδού. Στο τεύχος RStO 12 δίνονται αναλυτικά οι πίνακες ως προς την επιλογή των κατάλληλων τιμών για τους συντελεστές αυτούς.

$$ESALs = 365 \times N \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_z \times \left[\sum ADA \times \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^4 \right] \quad (3.37)$$

Με:

$$f_z = \frac{(1+p)^N - 1}{p \times N} \quad (3.38)$$

Εδώ είναι σημαντικό να αναγνωριστεί η έμφαση που έχει δοθεί στην περίπτωση που κάποια χαρακτηριστικά μεταβληθούν στην πορεία λειτουργίας του έργου (f_{1i} , f_{2i} , p_i). Τότε, εν προκειμένω να υπολογιστούν τα συνολικά ESALs, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί ένας επιμερισμός και να υπολογιστούν ξεχωριστά οι άξονες ανά το έτος και στο τέλος να αθροιστούν. Το i χρησιμοποιείται για να συμβολίσει το έτος λειτουργίας του έργου ώστε να είναι πιο εύκολο να εντοπιστεί σε ποιο έτος η εν λόγω μεταβλητή παρουσιάζει άλλη τιμή.

$$ESALs = 365 \times f_3 \times \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\sum ADA \times \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^4 \right]_{i-1} \times f_{1i} \times f_{2i} \times (1 + p_i) \right\} \quad (3.39)$$

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού των ESALs προϋποθέτει την δημιουργία τριών άλλων παραμέτρων για την σύνθεση της έννοιας του συντελεστή βαρέων οχημάτων. Αυτές είναι ένα πηλικό q_{BM} που προκύπτει από το κλάσμα ισοδύναμων τυπικών αξόνων προς τους πραγματικούς, ο f_A εκφράζοντας τον μέσο αριθμό αξόνων ανά βαρέο όχημα και η μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία AADT των βαρέων οχημάτων. Το γινόμενο AADT με το f_A στις **Σχέσεις 3.40 και 3.41** αναφορικά δίνει τους άξονες των βαρέων οχημάτων (ADA), οι οποίοι μέσω του q_{BM} μετατρέπονται σε ισοδύναμοι (FGSV - Road and Transport Research Association , 2012).

$$ESALs = 365 \times N \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_z \times q_{BM} \times AADT \times f_A \quad (3.40)$$

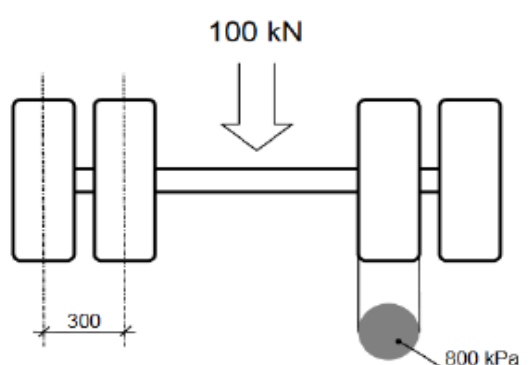
Διαφορετικά αν εκτιμώνται αλλαγές επί της κυκλοφορίας ή άλλων στοιχείων οδού μέσα στην εκτιμώμενη περίοδο σχεδιασμού, τότε χρησιμοποιείται η επόμενη σχέση υπολογισμού (**Σχέση 3.41**):

$$ESALs = 365 \times f_3 \times \sum_{i=1}^N [AADT_{i-1} \times q_{BMi-1} \times f_{Ai-1} \times f_{1i} \times f_{2i} \times (1 + p_i)] \quad (3.41)$$

3.2.9 Σουηδική μέθοδος

Σχετική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί και στη Σουηδία. Η Σουηδική Διοίκηση Μεταφορών (Swedish Transport Administration – Trafikverket), πρώην Σουηδική Οδική Διοίκηση (Swedish Road Administration – Vägverket), μέσα από τεχνικές περιγραφές (ATB Väg) περιελάμβανε θεματική γύρω από την κατασκευή και τη συντήρηση οδοστρωμάτων. Κάπου εκεί στις προϋποθέσεις σύνθεσης ενός οδοστρώματος, προέκυψε και το ζήτημα διαχείρισης της κυκλοφορίας. Έτσι αναπτύχθηκε και από εκείνη μια έκφραση συντελεστή ισοδυναμίας (Vägverket, 2008) (Trafikverket, 2011).

Όπως και η Γερμανική έτσι και η Σουηδική μέθοδος χρησιμοποίησε για ισοδύναμο τυπικό φορτίο τα 100 kN για ένα άξονα με διπλά ελαστικά ακτίνας 100 mm που απέχουν 300 mm, η γεωμετρία του οποίου παρίσταται στην **Εικόνα 3.21** (Hjort, et al., 2008), ενώ η πίεση ανέρχεται στα 800 kPa (Trafikverket, 2011).



Εικόνα 3.21: Τυπική διάταξη Σουηδικού άξονα (Hjort, et al., 2008)

Με βάση τα 100 kN ως τυπικό φορτίο, διαμορφώνεται ο συντελεστής ισοδυναμίας. Στην αρχή, η μεθοδολογία δανειζόταν τον κανόνα της 4^{ης} δύναμης χωρίς τη διαφοροποίηση μονών, διπλών και τριπλών διατάξεων άξονα.

$$LEF = \left(\frac{L_x}{100} \right)^4 \quad (3.42)$$

Σε μια πιο πρόσφατη αναφορά ο τύπος αναθεωρήθηκε και ολοκληρώθηκε στη **Σχέση 3.43**. Ο συντελεστής πλέον καλύπτει και διατάξεις διπλών και τριπλών αξόνων με τη μεταβλητή k . Θεωρώντας τυπικό φορτίο για τη διπλή διάταξη τα 180 kN και για την τριπλή τα 240 kN, το k χρησιμεύει στο να αναγάγει τους σύνθετους άξονες σε ισοδύναμους τυπικούς. Στην περίπτωση φορτίων μονών αξόνων, το k λαμβάνει τιμή ίση με 1 (Hjort, et al., 2008). Οι σουηδικοί κανονισμοί ορίζουν την μέγιστη απόσταση που επιτρέπεται να έχουν οι άξονες μεταξύ τους για να αποτελούν ομάδα αξόνων.

$$LEF = \left(\frac{L_x}{100} \right)^4 \times k \quad (3.43)$$

Με:

L_x = το φορτίο του εξεταζόμενου άξονα σε kN

$k = 1$ για μονούς άξονες

$$k = \left(\frac{100}{180}\right)^4 = 0.0952 \text{ για διπλούς άξονες}$$

$$k = \left(\frac{100}{240}\right)^4 = 0.0302 \text{ για τριπλούς άξονες}$$

Δεν γνωστοποιείται αν η Σουηδική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας αφορά εκτός από το εύκαμπτο οδόστρωμα, και περισσότερους τύπους οδοστρώματος.

Ο συντελεστής βαρέων οχημάτων ήταν μια έννοια που έπρεπε να συμπεριληφθεί για τον προσδιορισμό της επιδραστικότητας των βαρέων οχημάτων και κατ' επέκταση του συνόλου των ESALs. Το σύνηθες εύρος τιμών του συντελεστή κυμαίνεται από 0.8 έως 1.3 (Schmidt, et al., 2018). Από το 1994 χρησιμοποιούταν το 1.3 ως συνήθης τιμή για την αποτύπωση του συντελεστή (Rodin, et al., 2017) (Hjort, et al., 2008). Ύστερα εκδόθηκαν ενδεικτικά στοιχεία για την εκτίμηση του συντελεστή όπως απεικονίζονται μέσω του **Πίνακα 3.11** (Trafikverket, 2005).

Πίνακας 3.11: Ο συντελεστής βαρέων οχημάτων με βάση τον τύπο της οδού

Κατηγορία Οδού	B
Ευρωπαϊκή Οδός	1.3 - 4.0
Περιφερειακή Οδός, μεγάλη κυκλοφορία	3.0 - 5.0
Περιφερειακή Οδός, κανονική κυκλοφορία	0.9 - 2.5
Τοπική Οδός, μικρή κυκλοφορία	0.2 - 1.0
Τοπική Οδός, μεγάλη κυκλοφορία	3.0 - 5.5

Μια ακόμη πιο αποσαφηνιστική μεθοδολογία υπολογισμού αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό, ωστόσο. Βασισμένος λοιπόν σε δεδομένα από φάσματα φορτίου αξόνων αλλά και στην έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας, ο συντελεστής βαρέων οχημάτων δίνεται στη **Σχέση 3.44** στην εξής μορφή όπου N_{hv} ο αριθμός των βαρέων οχημάτων L_{ij} φορτίου άξονα με διάταξη i και φορτίο j , $L_{standard}$ το τυπικό φορτίο άξονα αναφερόμενο σε οποιαδήποτε διάταξη (100 kN, 180 kN, 240 kN για μονούς, διπλούς και τριπλούς αντίστοιχα), N_i ο αριθμός αξόνων για κάθε i διάταξη και μια κανονικοποιημένη συχνότητα f_j κάθε φορτίου άξονα (Erlingsson, 2010).

$$T_f = \frac{1}{N_{hv}} \times \sum_{i=1}^4 N_i \times \sum_{j=1}^{n_j} \left(\frac{L_{ij}}{L_{standard}} \right)^4 \times \frac{f_j}{100} \quad (3.44)$$

Μέσα στα τεύχη ATB Väg ο συνολικός υπολογισμός των τυπικών αξόνων δίνεται από τη **Σχέση 3.45**:

$$\begin{aligned}
 ESALs &= AADT \times 3.65 \times A \times B \times \sum_{j=1}^n \left(1 + \frac{r}{100}\right)^j \\
 &= \begin{cases} AADT \times 3.65 \times A \times B \times \left(1 + \frac{100}{r}\right) \times \left[\left(1 + \frac{r}{100}\right)^n - 1\right] & \text{αν } r \geq 1 \\ AADT \times 3.65 \times A \times B \times n & \text{αν } r = 0 \end{cases} \quad (3.45)
 \end{aligned}$$

Όπου:

AADT = η ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία στη λωρίδα σχεδιασμού

A = ποσοστό βαρέων οχημάτων από το AADT

B = ο ισοδύναμος αριθμός τυπικών αξόνων ανά βαρέο όχημα ή κοινώς ο συντελεστής βαρέων οχημάτων

n = προσδοκώμενη περίοδος λειτουργίας του έργου σε έτη

j = 1, 2, 3, ..., n έτος λειτουργίας μέχρι το τελευταίο n

r = ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας σε %

Η σχέση αυτή αποτελείται και από κάποιους ακόμα ρυθμιστικούς συντελεστές που της προσδίδουν ευαισθησία. Συγκεκριμένα στο συντελεστή βαρέων οχημάτων B, πρέπει να ληφθούν κατά νου παράγοντες γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού, όπως το πλάτος της λωρίδας και χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τον τύπο της οδού και την ταχύτητα αναφοράς των οχημάτων (Trafikverket, 2011).

3.2.10 Νοτιοαφρικανική μέθοδος SANRAL

Ο συντελεστής ισοδυναμίας αποτέλεσε βασική συνθήκη σχεδιασμού και στη Νότια Αφρική. Οι Τεχνικές Συστάσεις Αυτοκινητοδρόμων (Technical Recommendations for Highways – TRH) είναι μια σειρά από τεύχη τα οποία με την έγκριση της COTO (Committee of Transport Officials) αποσκοπούσαν στην ομοιογένεια στην πρακτική πάνω στο σχεδιασμό σε όλη την Νότια Αφρική (COTO - Committee of Transport Officials, 2012). Τα έγγραφα αυτά είχαν εκδόσει το Συμβούλιο Οδών Νότιας Αφρικής (South African Roads Board), κομμάτι του Υπουργείου Μεταφορών, το οποίο στη συνέχεια το διαδέχθηκε το 1998 η Εθνική Υπηρεσία Οδών της Νότιας Αφρικής (The South African National Roads Agency Limited and National Roads Act – SANRAL) (Wikipedia).

Στην Νοτιοαφρικανική μέθοδο ως τυπικός άξονας είναι ένας μονός των 80 kN με διπλά ελαστικά πίεσης 520 kPa και σχετικής απόστασης μεταξύ των κεντρών τους τα 350 mm. Ο συντελεστής ισοδυναμίας αναφέρεται στα εύκαμπτα και στα ημιεύκαμπτα οδοστρώματα. Μέσω της 4^{ης} δύναμης, μεταφράζει τους πραγματικούς άξονες σε ισοδύναμους τυπικούς (ESA ή διαφορετικά E80). Στο νόμο έκφρασής του, το L_x εισάγεται σε kN ενώ το n μπορεί να

λάβει διάφορες τιμές με την συνήθη το 4 (COLTO - Committee of Land Transport Officials , 1996) (SANRAL - South African National Roads Agency Ltd, 2013).

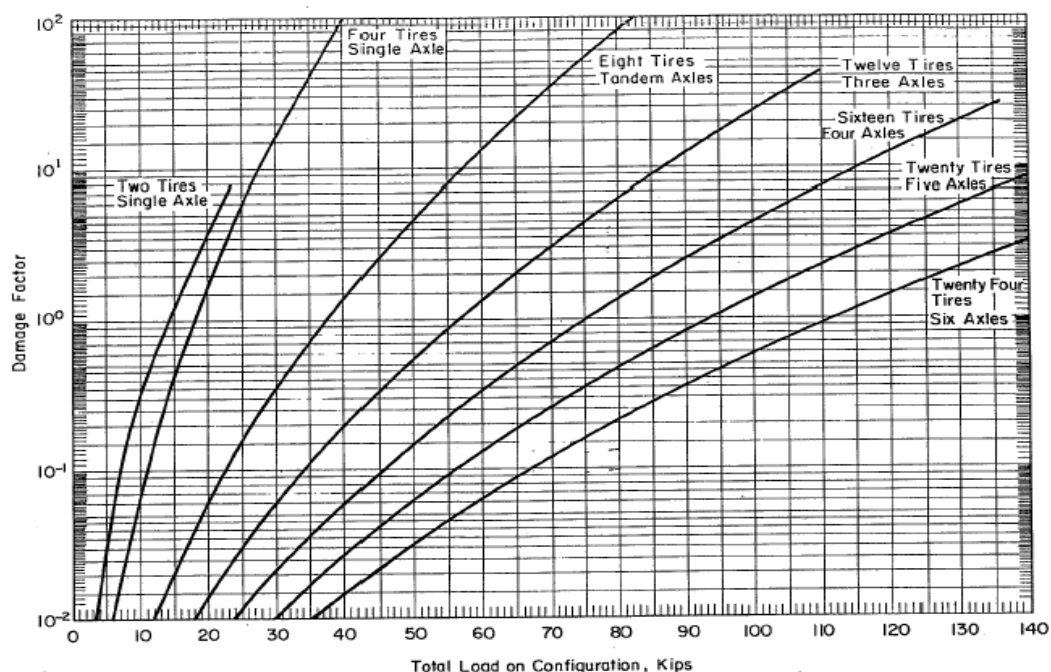
$$ESA = \left(\frac{L_x}{80}\right)^n \quad (3.46)$$

Ωστόσο στον **Πίνακα 3.12** δίνονται κάποιες προτεινόμενες που περιλαμβάνονται στο TRH4, βάσει της ποιότητας των υποκείμενων στρώσεων (COLTO - Committee of Land Transport Officials , 1996).

Πίνακας 3.12: Προτεινόμενες τιμές για τον εκθέτη φθοράς n

Συνδυασμός βάσης/υπόβασης		Εύρος τιμών και (προτεινόμενες τιμές)
Κοκκώδης / κοκκώδης		3 - 6 (4)
Κοκκώδης / σταθεροποιημένη με τσιμέντο		2 - 4 (3)
Σταθεροποιημένη με τσιμέντο / κοκκώδης	προ - ρηγματωμένη	4 - 10 (5)
	μετα - ρηγματωμένη	3 - 6 (5)
Σταθεροποιημένη με τσιμέντο / τσιμεντοειδής	προ - ρηγματωμένη	3 - 6 (4 - 5)
	μετα - ρηγματωμένη	2 - 5 (4 - 5)
Σταθεροποιημένη με ασφαλτο / κοκκώδης		2 - 6 (4)
Ασφαλτομιγματοειδής / σταθεροποιημένη με τσιμέντο		2 - 5 (4)
Σκυρόδεμα		(4.5)

Δεσπόζουσα δέσμευση αυτής της έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας αποτελεί το γεγονός ότι δεν έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει και άλλες αξονικές διατάξεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέθοδος αναγκάζεται να δανειστεί μοντέλα από άλλους οργανισμούς. Στη συνέχεια τα μοντέλα αυτά έχουν βελτιωθεί και επικυρωθεί από την Υπηρεσία Οδών της Νότιας Αφρικής, όπως το νομογράφημα της **Εικόνας 3.22** (SANRAL - South African National Roads Agency Ltd, 2013).



Εικόνα 3.22: Συντελεστής ισοδυναμίας ανάλογος του φορτίου για διάφορες αξονικές διατάξεις για εύκαμπτο οδόστρωμα (SANRAL - South African National Roads Agency Ltd, 2013)

Όσον αφορά την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, υιοθετήθηκε το εγχειρίδιο σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων M10 που εκδόθηκε από τη μέθοδο AASHTO το 1995. Ύστερα από απαραίτητες απλουστεύσεις και τροποποιήσεις, το εγχειρίδιο σχεδιασμού AASHTO M10 προσαρμόστηκε για τις συνθήκες των Νοτιοαφρικάνικων οδών (SANRAL - South African National Roads Agency Ltd, 2013).

Η υπολογισμός των συνολικών ESALS συνιστά μια ήδη γνώριμη διαδικασία. Οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες μπορούν να υπολογιστούν με την αναφερθείσα έκφραση συντελεστή ισοδυναμίας. Από την άλλη στα τεύχη TRH4 και TRH16 είχαν αναπτυχθεί πίνακες (**Πίνακες 3.13 και 3.14**) αναφερόμενοι στη βαριά κυκλοφορία, που δίνουν τους ισοδύναμους τυπικούς άξονες με βάση τον τύπο του οχήματος, την πλήρωση του οχήματος καθώς και τον τύπο της οδού (COLTO - Committee of Land Transport Officials, 1996) (CSRA - Committee of the State Road Authorities, 1991).

Πίνακας 3.13: Μέση τιμή E80 με βάση τη φόρτωση των βαρέων οχημάτων ή τον τύπο της οδού

Φόρτωση βαρέων οχημάτων (ή τύπος της οδού)	E80 ανά βαρέο όχημα
Ως επί το πλείστον χωρίς φορτίο (αγροτικοί οδοί)	0.6
50% πιθανότητα οχημάτων πλήρους φόρτισης (κυρίως σε υπεραστικές οδούς)	1.2
Άνω των 70% πιθανότητα πλήρους φόρτισης στα οχήματα (βασικές αρτηριακές οδοί ή μεγάλοι βιομηχανικοί δρόμοι)	2.0

Πίνακας 3.14: Εύρος και μέση τιμή των E80 ανά όχημα για διάφορες περιπτώσεις οχημάτων

Τύπος οχήματος	Μέση τιμή E80s ανά όχημα	Εύρος τιμών E80 ανά όχημα σε διαφορετικές τοποθεσίες
2 αξόνων φορτηγό	0.70	0.30 - 1.10
2 αξόνων λεωφορείο	0.73	0.41 - 1.52
3 αξόνων φορτηγό	1.70	0.80 - 2.60
4 αξόνων φορτηγό	1.80	0.80 - 3.00
5 αξόνων φορτηγό	2.20	1.00 - 3.00
6 αξόνων φορτηγό	3.50	1.60 - 5.20
7 αξόνων φορτηγό	4.40	3.80 - 5.00

Ο υπολογισμός εμπεριέχει και την εκτίμηση μιας μέσης ετήσιας ημερήσιας κυκλοφορίας στην περίοδο που το έργο ολοκληρώνεται, όπως ακριβώς γίνεται και στην Ινδική μέθοδο IRC. Η μέση ημερήσια κυκλοφορία των ισοδύναμων αξόνων τον αρχικό χρόνο (AADE) εκτιμάται στη **Σχέση 3.47** με την προσαύξηση ενός συντελεστή g_x στην εκτιμώμενη μέση ημερήσια κυκλοφορία ισοδύναμων αξόνων (ADE) που έχουν ληφθεί από προγενέστερα κυκλοφοριακά δεδομένα.

$$AADE = ADE \times g_x \quad (3.47)$$

&

$$g_x = (1 + 0.01 \times i)^x \quad (3.48)$$

Όπου:

g_x = συντελεστής προσαύξησης της κυκλοφορίας

i = ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας σε %

x = χρόνος μεταξύ του προσδιορισμού δεδομένων κυκλοφορίας και της διάθεσης του έργου προς λειτουργία μετρημένος σε έτη

ADE = μέση ημερήσια κυκλοφορία ισοδύναμων τυπικών αξόνων (E80) τα οποία αποκτήθηκαν από προηγούμενη έρευνα κυκλοφορίας

AADE = μέση ετήσια ημερήσια κυκλοφορία ισοδύναμων τυπικών αξόνων (E80) κατά το αρχικό έτος λειτουργίας του έργου

Εφόσον υπάρχουν στοιχεία κυκλοφοριακής μελέτης, τότε το ADE προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων του πλήθους της κάθε αξονικής διάταξης με συγκεκριμένο φορτίο με τον αντίστοιχο συντελεστή ισοδυναμίας για το φορτίο αυτό.

$$ADE = \sum t_j \times F_j \quad (3.49)$$

Με:

t_j = ο αριθμός των αξόνων με φορτίο j

F_j = ο συντελεστής ισοδυναμίας για τους άξονες φορτίου j

Έπειτα τα ESALs υπολογίζονται στη **Σχέση 3.50** κατά τα γνωστά:

$$ESALs = 365 \times AADT \times (1 + 0.01 \times i) \times \frac{[(1 + 0.01 \times i)^y - 1]}{(0.01 \times i)} \times B \quad (3.50)$$

Κατά την οποία:

y = η εκτιμώμενη περίοδος σχεδιασμού του έργου σε έτη

B = ένας συντελεστής κατανομής της κυκλοφορίας στη λωρίδα σχεδιασμού

Η έννοια του συντελεστή βαρέων οχημάτων δεν εμφανίζεται στη μέθοδο αυτή με τον τρόπο που έχει εξηγηθεί πιο πάνω σε άλλες μεθόδους, καθώς στον υπολογισμό των ESALs λαμβάνονται τόσο η κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων όσο και η απλή κυκλοφορία των επιβατηγών οχημάτων. Πρέπει να προστεθεί το ότι αν αυξηθεί το ποσοστό κυκλοφορίας των βαρέων οχημάτων σε ετήσια βάση λόγω αύξησης της συνολικής κυκλοφορίας ή εξ' αιτίας της αύξησης του ποσοστού των βαρέων οχημάτων στο σύνολο κυκλοφορίας, τότε μπορεί να εκτιμηθεί στο ρυθμό αύξησης κυκλοφορίας i με τη **Σχέση 3.51**. Στη σχέση αυτή, τα h και v εισάγονται σε μορφή ποσοστών και δηλώνουν με τη σειρά τον ετήσιο ρυθμό αύξησης του όγκου των βαρέων οχημάτων και τον ετήσιο ρυθμό αύξησης των ισοδύναμων τυπικών αξόνων ανά βαρέο όχημα (SANRAL - South African National Roads Agency Ltd, 2013).

$$i = [(1 + 0.01 \times h) \times (1 + 0.01 \times v) - 1] \quad (3.51)$$

3.2.11 Άλλες μέθοδοι στον κόσμο

Σχετικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν και σε διάφορα άλλα μέρη του κόσμου. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι η Κινέζικη μέθοδος, η οποία συναντάται στις προδιαγραφές σχεδιασμού ασφαλικού οδοστρώματος (JTJ 014 - 97, 1994) καθώς και σε μεταγενέστερα τεύχη (JTJ D50, 2006). Στην Κινέζικη μέθοδο, ορίζεται ως τυπικός άξονας ένας μονός άξονας φορτίου 100 kN με διπλά ελαστικά πίεσης 700 kPa και απόστασης μεταξύ τους 319.5 mm (Lusheng, et al., 2019). Τα ESALs υπολογίζονται σύμφωνα με τη **Σχέση 3.52** στην οποία L_x και L_t αποτελούν ως γνωστόν τα φορτία επιβαλλόμενου και τυπικού άξονα αντίστοιχα, C_1 ένας συντελεστής σχετικός με την απόσταση μεταξύ των γειτονικών αξόνων, C_2 ένας συντελεστής για τον αριθμό των τοποθετημένων ελαστικών εκατέρωθεν του επιβαλλόμενου άξονα και n οι διελεύσεις του επιβαλλόμενου άξονα ανά ημέρα. Μέσω της σχέσης προκύπτουν οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες ανά ημέρα, που με κατάλληλες αναγωγές καθορίζονται για την

περίοδο σχεδιασμού. Φυσικά για τον υπολογισμό μόνο του συντελεστή ισοδυναμίας, αποκλείεται από τη σχέση το μέγεθος n . Η παρακάτω σχέση με τους συντελεστές C_1 , C_2 , n , είναι προσαρμοσμένη τόσο για αξονικά φορτία πάνω από 25 kN, κατά τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης στα εύκαμπτα οδοστρώματα, όσο και για αξονικά φορτία πάνω από 50 kN που απευθύνονται στην καταπόνηση του κάτω μέρους της σταθεροποιημένης βάσης ή της υποβασικής στρώσης στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα (Lusheng, et al., 2019) (Njock., et al., 2015).

$$ESALs = \sum C_1 \times C_2 \times n_1 \times \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^n \quad (3.52)$$

Με

L_t = το φορτίο του τυπικού άξονα

L_x = το φορτίο του επιβαλλόμενου άξονα

$$C_1 = \begin{cases} 1 + 1.2 \times (m - 1) & \text{για την ασφαλτική στρώση στα εύκαμπτα οδοστρώματα} \\ 1 + 2 \times (m - 1) & \text{για τις υποκείμενες στρώσεις στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα} \end{cases}$$

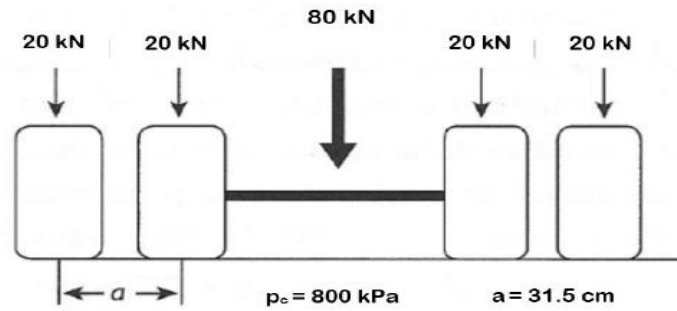
m = ο αριθμός των αξόνων (αν η απόσταση μεταξύ αξόνων είναι πάνω από 3 μέτρα, τότε πρέπει να θεωρηθούν σαν μεμονωμένοι άξονες)

C_2 = συντελεστής ελαστικών ($C_2 = 6.4$ για μονό άξονα διπλών ελαστικών, $C_2 = 1$ για μονό άξονα με τέσσερα ελαστικά, $C_2 = 0.38$ για μονό άξονα με οκτώ ελαστικά για την περίπτωση της ασφαλτικής στρώσης ενώ για τις υποκείμενες οι τιμές για μονό άξονα διπλών, τεσσάρων και οκτώ ελαστικών αντίστοιχα είναι 18.5, 1 και 0.09

$$n = \begin{cases} 4.35 & \text{για εντατική κατάσταση στον πυθμένα ασφαλτικής στρώσης στα} \\ & \text{εύκαμπτα οδοστρώματα} \\ 8 & \text{για εντατική κατάσταση στον πυθμένα σταθεροποιημένων στρώσεων στα} \\ & \text{ημιάκαμπτα οδοστρώματα} \end{cases}$$

Επίσης στην Ιταλία, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (National Research Council – CNR) εξέδωσε το 1994 τον οδηγό σχεδιασμού CATALOGO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI (Winter, et al., 2020). Βάσει τούτου, η έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας δεν διαφέρει σε τίποτα με ότι έχει ήδη αναφερθεί (**Σχέση 3.53**). Ορίζεται δηλαδή από ένα τυπικό άξονα των 80 kN διπλών ελαστικών με τη διαμόρφωση που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.23** και υπολογίζεται από την 4^η δύναμη, στην οποία περιλαμβάνεται και ένας συντελεστής k ο οποίος ευαισθητοποιείται σε ορισμένα δομικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος και σε περιβαλλοντικές συνθήκες (Panao, 2018). Για τον συντελεστή, δεν διευκρινίζεται αν πέρα από το εύκαμπτο οδόστρωμα, αναφέρεται και σε άλλους τύπους οδοστρώματος. Ο υπολογισμός των συνολικών αξόνων ESALs δίνεται εξίσου με την τεχνική που ήδη αναφέρθηκε πιο πάνω σε άλλες μεθόδους.

$$LEF = k \times \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^4 \quad (3.53)$$



Εικόνα 3.23: Τυπικός άξονας φόρτιου σύμφωνα με τους Ιταλικούς κανονισμούς (Panaro, 2018)

Στους Πολωνικούς Καταλόγους εύκαμπτων και ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων που ξεκίνησαν να εκδίδονται από το 1997 και μετά, θεωρείται πως ο τυπικός άξονας είναι ένας των 100 kN με μονά ελαστικά πίεσης 850 kPa. Η έκφραση για τον συντελεστή ισοδυναμίας (**Σχέση 3.54**) συντίθεται μέσα από την 4^η δύναμη για διάφορες διατάξεις αξόνων ($L_t = 100$ kN για μονούς άξονες, $L_t = 184$ kN για διπλούς και $L_t = 263$ kN για τους τριπλούς άξονες) (Jaskula, et al.) (Judyski, et al., 2016) (Loizos, et al., 2017). Τα συνολικά ESALs εκτιμώνται με παρόμοιους μηχανισμούς προηγούμενων μεθόδων με την συνεκτίμηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού (διαμήκης κλίση και πλάτος λωρίδας) (Judyski, et al., 2016).

$$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t} \right)^4 \quad (3.54)$$

Παρόμοιας γεωμετρίας μονού τυπικού άξονα με μονά ελαστικά χρησιμοποιεί και η Βρετανική μέθοδος. Σαν τυπικό φορτίο είναι τα 80 kN με ενιαία πίεση ελαστικών 558 kPa, ακτίνας 151 mm (Pereira, et al., 2017) (Wang, et al., 2016).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει η εξίσωση συντελεστή ισοδυναμίας στην Ουγγαρία στη **Σχέση 3.55**, η οποία επηρεάζεται και από το φούσκωμα των ελαστικών. Με τυπικό άξονα έναν μονό των 100 kN με διπλά ελαστικά εκατέρωθεν, ορίζεται η ακόλουθη σχέση υψωμένη στην 5^η δύναμη. Το μέγεθος AF υποδηλώνει τη μορφή των ελαστικών πάνω στον άξονα που θα μετατραπεί σε τυπικός (1 για διπλά ελαστικά, 1.04 για τύπους μονών πλατύπελμων ελαστικών, 1.06 για απλούς τύπους μονών ελαστικών) ενώ το BF συνιστά έναν διορθωτικό συντελεστή με εύρος τιμών 0.90 – 1.15, αμιγώς εξαρτημένος από το φούσκωμα του ελαστικού (Soos, et al., 2016).

$$LEF = \left(AF \times BF \times \frac{L_x}{L_t} \right)^5 \quad (3.55)$$

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται πως υπάρχουν και άλλες μέθοδοι σχετικά με την έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας. Παραδείγματα τέτοια είναι η Ισπανική, η Δανέζικη, η Σλοβενική και η Ολλανδική μέθοδος.

3.3 Συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων

Για λόγους σύγκρισης, συγκεντρώνονται όλες οι μέθοδοι θεώρησης ισοδύναμης κυκλοφορίας που παρουσιάστηκαν στο **Υποκεφαλαίο 3.2**. Στις στήλες του **Πίνακα 3.15** αναφέρονται με τη σειρά τα χαρακτηριστικά και η γεωμετρία του τυπικού άξονα, καθώς επίσης και η έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας από την κάθε μέθοδο.

Πίνακας 3.15: Σύγκριση των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας

Μέθοδος	Χαρ/κα τυπικού άξονα	Έκφραση συντελεστή ισοδυναμίας
Κανόνας 4ης δύναμης (έκφραση AASHTO)	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 577$ Kpa ❖ $S1 = 315$ mm ❖ $r = 105$ mm	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^4$ ❖ $L_t = 80$ kN για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 147.9$ kN για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 211.7$ kN για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών
Μέθοδος AASHTO	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 577$ Kpa ❖ $S1 = 315$ mm ❖ $r = 105$ mm	$LEF = \frac{W_{18}}{W_x}$ $\log\left(\frac{W_x}{W_{18}}\right) = 4.79 \times \log(18 + 1) - 4.79 \times \log(L_x + L_2) + 4.33 \times \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$ $\beta_x = 0.40 + \frac{0.081 \times (L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \times L_2^{3.23}} \text{ (το φορτίο } L_x \text{ σε kips)}$ $G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right)$ ❖ $L_2 = 1$ για μονούς άξονες ❖ $L_2 = 2$ για διπλούς άξονες ❖ $L_2 = 3$ για τριπλούς άξονες ❖ $\beta_{18} = \beta_x$ για $L_x = 18$ kips και $L_2 = 1$
Μέθοδος γενικού συντελεστή άξονα GAF	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 577$ kPa ❖ $S1 = 315$ mm ❖ $r = 105$ mm	$LEF = (0.01169 \times L_x + 0.064)^{\left(4 + \frac{8.9}{L_x}\right)} \text{ (το φορτίο } L_x \text{ σε kN)}$ ❖ Σε σύνθετες διατάξεις άξονα, οι επιμέρους άξονες υπολογίζονται μέσω της σχέσης ως απλοί μονοί άξονες και στην συνέχεια αθροίζονται.
Καναδική μέθοδος TAC	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 690$ Kpa ❖ $S1 = 350$ mm ❖ $r = 96$ mm	❖ $LEF = 0.004836 \times L^{2.9093}$ (το φορτίο L σε tons) για μονούς άξονες μονών ελαστικών ❖ $LEF = 0.002418 \times L^{2.9093}$ (το φορτίο L σε tons) για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $LEF = 0.001515 \times L^{2.5430}$ (το φορτίο L σε tons) για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $LEF = 0.002363 \times L^{2.1130}$ (το φορτίο L σε tons) για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών
Γαλλική μέθοδος	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 130 kN (32.5 ανα τροχή) ❖ $p = 662$ Kpa ❖ $S1 = 375$ mm ❖ $r = 125$ mm	$LEF = K \times \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^5 \text{ (το φορτίο } L_x \text{ σε kN)}$ ❖ $K = 1$ για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $K = 0.75$ για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $K = 1.1$ για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών

Μέθοδος COST Action 334	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 100 kN (25 kN ανα τροχή) ❖ $p = 650 \text{ kPa}$ (750 kPa σε συνθήκες κυκλοφορίας)	$LEF = \frac{W_t}{W_x} = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^n \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN ή tons})$ ❖ $L_t = 100 \text{ kN ή tons}$ ❖ Οι σύνθετες διατάξεις άξονα αντιμετωπίζονται σαν περιπτώσεις μονών αξόνων οι οποίες στο τέλος αθροίζονται ❖ Η ιδιαιτερότητα της είναι πως μέσω ενός συντελεστή TCF που πολλαπλαζέται στον συντελεστή ισοδυναμίας, υπολογίζεται και η διαφορά εξαιτίας των ελαστικών σε σχέση με εκείνα του τυπικού άξονα ❖ $n = 4$ για τη συνολική φθορά του οδοστρώματος ❖ $n = 1 - 2$ για την παραμένουσα παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση ❖ $n = 3 - 4$ για παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης έδρασης ❖ $n = 4 - 7$ για τη κόπωση της ασφαλτικής στρώσης
Αυστραλιανή μέθοδος Austroads	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 750 \text{ Kpa}$ ❖ $S1 = 330 \text{ mm}$ ❖ $r = 92 \text{ mm}$	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^n \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN})$ ❖ $L_t = 53$ για μονούς άξονες μονών ελαστικών ❖ $L_t = 80 \text{ kN}$ για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 135 \text{ kN}$ για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 181 \text{ kN}$ για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 221 \text{ kN}$ για τετραπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $n = 4$ για τη συνολική φθορά του οδοστρώματος ❖ $n = 5$ για κόπωση της ασφαλτικής στρώσης ❖ $n = 7$ για παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης και απώλεια επιφάνειας ❖ $n = 12$ για κόπωση τσιμεντοειδών υλικών
Ινδική μέθοδος IRC	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 560 \text{ Kpa}$ ❖ $S1 = 310 \text{ mm}$ ❖ $r = 106.6 = 107 \text{ mm}$	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^n \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN})$ ❖ $L_t = 65 \text{ kN}$ για μονούς άξονες μονών ελαστικών ❖ $L_t = 80 \text{ kN}$ για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 148 \text{ kN}$ για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 224 \text{ kN}$ για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $n = 4$ για τη συνολική φθορά του οδοστρώματος ❖ Ιδανικά μπορούν να ληφθούν $n = 3.89$ και $n = 4.5$ για τον υπολογισμό αξόνων σε κόπωση της ασφαλτικής στρώσης και παραμένουσας παραμόρφωσης στη στρώση έδρασης αντίστοιχα
Γερμανική μέθοδος FGSV	❖ Μονός άξονας μονών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 100 kN (50 kN ανα τροχή) ❖ $p = 700 \text{ Kpa}$ ❖ $S1 = 0 \text{ mm}$ (αποτελείται από μονά ελαστικά) ❖ $r = 150 \text{ mm}$	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^4 \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN ή tons})$ ❖ $L_t = 100 \text{ kN ή } 10 \text{ tons}$ ❖ Σε σύνθετες διατάξεις άξονα, οι επιμέρους άξονες υπολογίζονται μέσω της σχέσης ως απλοί μονοί άξονες και στην συνέχεια αθροίζονται
Σουηδική μέθοδος	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 100 kN (25 kN ανα τροχή) ❖ $p = 800 \text{ Kpa}$ ❖ $S1 = 300 \text{ mm}$ ❖ $r = 100 \text{ mm}$	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^4 \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN})$ ❖ $L_t = 100 \text{ kN}$ για μονούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 180 \text{ kN}$ για διπλούς άξονες διπλών ελαστικών ❖ $L_t = 240 \text{ kN}$ για τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών
Νοτιοαφρικανική μέθοδος SANRAL	❖ Μονός άξονας διπλών τροχών ❖ Φορτίο άξονα = 80 kN (20 kN ανα τροχή) ❖ $p = 520 \text{ Kpa}$ ❖ $S1 = 350 \text{ mm}$ ❖ $r = 110.6 = 111 \text{ mm}$	$LEF = \left(\frac{L_x}{L_t}\right)^n \quad (\text{το φορτίο } L_x \text{ σε kN})$ ❖ $L_t = 80 \text{ kN}$ για μονούς άξονες διπλών ελαστικών

		❖ Σε σύνθετες διατάξεις άξονα, ο συντελεστής ισοδυναμίας υπολογίζονται μέσω νομογραφήματος ❖ $n = 4$ συνήθης τιμή για ένα οδόστρωμα κοκκώδους βάσης / υπόβασης
--	--	--

4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Βασικά στοιχεία ανάλυσης

4.1.1 Γενικά

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και τα σχετικά ευρήματα στο **Κεφάλαιο 3**, αποτέλεσαν την ώθηση στην αναλυτική διαδικασία που ακολουθεί. Βασικός σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η συγκριτική ανάλυση των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας για τον ορθότερο σχεδιασμό εύκαμπτου οδόστρώματος. Κριτήριο αποτέλεσε η φθορά λόγω του φαινομένου της κόπωσης της ασφαλικής στρώσης. Στη διαδικασία αυτή θεωρήθηκαν κάποια βασικά στοιχεία τα οποία είναι τα εξής:

- ❖ Διατομή οδοστρώματος και χαρ/κα στρώσεων
- ❖ Νόμος κόπωσης ασφαλικής στρώσης
- ❖ Δεδομένα κυκλοφορίας
- ❖ Μετατροπή αξόνων σε ισοδύναμους τυπικούς

Για τη συγκριτική ανάλυση, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό 3D – MOVE Analysis, το οποίο αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Νεβάδα στο Ρένο για την ανάλυση εύκαμπτων ασφαλικών οδοστρωμάτων, βασισμένο στις αρχές της αναλυτικής – εμπειρικής προσέγγισης σχεδιασμού MEPDG (UNR - The University of Nevada). Η ρουτίνα του λογισμικού περιλαμβάνει νόμους αστοχίας του υλικού, αναφερόμενοι τόσο στην κόπωση της ασφαλικής στρώσης, όσο και στην παραμένουσα παραμόρφωση για την ασφαλική στρώση, τη βάση, την υπόβαση όπως και για την στρώση έδρασης. Η συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιεί το νόμο κόπωσης ασφάλτου στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης για τον υπολογισμό της φθοράς από τις μεθόδους ισοδυναμίας. Ο νόμος κόπωσης έχει αναπτυχθεί για το τυπικό αξονικό φορτίο των 8.16 τόνων (80 kN) ενός μονού άξονα με διπλά ελαστικά και έχει βαθμονομηθεί σύμφωνα με την αναλυτική – εμπειρική μέθοδο του ερευνητικού προγράμματος NCHRP 1 – 37A. Συνεπαγωγικά, έχουν εξαιρεθεί από τη διαδικασία οι μέθοδοι που θεωρούν διαφορετικό τυπικό αξονικό φορτίο από εκείνο της ανάλυσης (Γαλλική μέθοδος, Μέθοδος COST Action 334, Γερμανική μέθοδος FGSV, Σουηδική μέθοδος). Μάλιστα η Γερμανική μέθοδος χρειάζεται να εξαιρεθεί και για έναν ακόμα λόγο που θα δημιουργούσε μεγάλη διασπορά στο αποτέλεσμα, καθώς ο τυπικός άξονάς της είναι μονός με μονά ελαστικά, εν συγκρίσει με όλες τις άλλες που δέχονται ένα μονό άξονα επί διπλών ελαστικών.

Ως μέθοδος αναφοράς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος η οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη ανά τον κόσμο και αποτέλεσε ορόσημο για τη σύνθεση της έννοιας του συντελεστή ισοδυναμίας: η μέθοδος AASHTO. Η σύγκριση γίνεται ως προς τη φθορά, προερχόμενη από την κόπωση της ασφαλικής στρώσης, των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας που θα επιλεχθούν, με τη φθορά από τη μέθοδο αναφοράς. Ως εκ τούτου, κρίθηκε ορθό να επιλεχθεί η θεωρητική έκφρασή του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO σαν τη μέθοδο αναφοράς έτσι ώστε να συγκριθεί με την εμπειρική έκφρασή της για

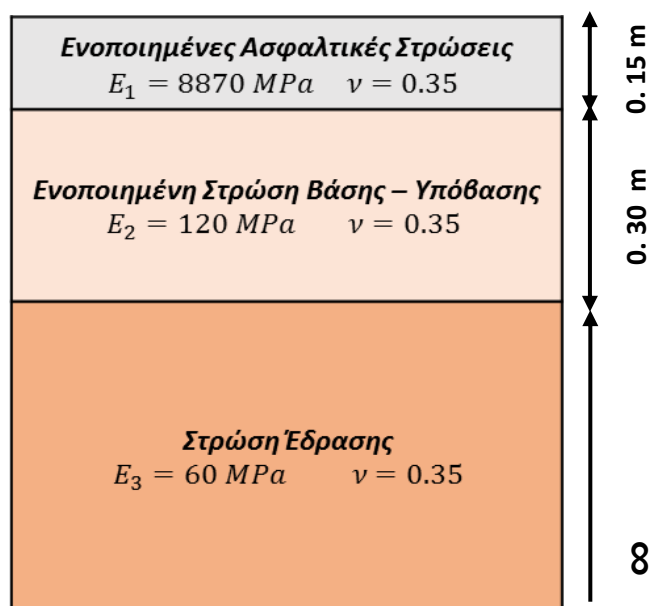
ένα οδόστρωμα δομικής επάρκειας $SN = 5$ τριών σεναρίων τελικής εξυπηρετικότητας $p_t = 2, 2.5$ και 3 . Σημαντική στην ανάλυση εξίσου, κρίθηκε η μέθοδος GAF η οποία επίσης έχει αναπτυχθεί από τη μέθοδο AASHTO με μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον στην απλούστευση της διαδικασίας έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας, καθώς και η Καναδική μέθοδος TAC που αναπτύχθηκε εκείνη την περίοδο χρονικά με την προηγούμενη. Εκτός αυτών, δεν έπρεπε να παραλειφθούν η Αυστραλιανή μέθοδος από Austroads και η Ινδική μέθοδος IRC, διότι εμφανίζουν κοινά σημεία στην έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας με την μέθοδο AASHTO. Στο σημείο αυτό, επιπλέον έχει αποκλειστεί η μεθοδολογία της Νότιας Αφρικής SANRAL, καθώς οι σύνθετες διατάξεις άξονα δεν υπολογίζονται από τη σχέση που αναγράφεται στην τελευταία σειρά του **Πίνακα 3.15**. Συγκεκριμένα, ευρίσκονται από σχετικό νομογράφημα που έχει αναπτύξει η μέθοδος (**Εικόνα 3.22**). Διαπιστώνεται πως η προσπάθεια αναζήτησης του συντελεστή ισοδυναμίας στις σύνθετες αξονικές διατάξεις από το νομογράφημα, ενδέχεται να αποδώσει αποτελέσματα με σχετική ασάφεια μη αντιπροσωπευτικά, εξ' αιτίας της δυσχέρειας ανάγνωσής τους.

Συνοψίζοντας, από τις μεθόδους επιλέχθηκαν για τη συγκριτική ανάλυση:

- 1) Ο κανόνας της 4^{ης} δύναμης από τη μέθοδο AASHTO (μέθοδος αναφοράς)
- 2) Η μέθοδος AASHTO για οδόστρωμα με $SN = 5$ και $p_t = 2$
- 3) Η μέθοδος AASHTO για οδόστρωμα με $SN = 5$ και $p_t = 2.5$
- 4) Η μέθοδος AASHTO για οδόστρωμα με $SN = 5$ και $p_t = 3$
- 5) Η μέθοδος γενικού συντελεστή άξονα GAF
- 6) Η Καναδική μέθοδος TAC
- 7) Η Αυστραλιανή μέθοδος Austroads
- 8) Η Ινδική μέθοδος IRC

4.1.2 Διατομή οδοστρώματος και χαρ/κα στρώσεων

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε θεωρητική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (**Εικόνα 4.1**), αντιπροσωπευτική της διατομής οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου.



Εικόνα 4.1: Διατομή οδοστρώματος

Αποτελείται από τρεις βασικές στρώσεις:

- ❖ Ενοποιημένη στρώση συνδετικής ασφαλικής στρώσης ΑΣ 12.5, ασφαλικής βάσης ΑΣ 20, μέτρων ελαστικότητας $E_1 = 8870$ MPa και συνολικού πάχους 15 cm. Επί τούτης υπάρχει μια αντιολισθηρή επιφανειακή στρώση πάχους 3 cm η οποία δεν έχει ληφθεί υπόψη στην δομική επάρκεια που προσφέρει το οδόστρωμα και κατ' επέκταση στον σχεδιασμό του.
- ❖ Ενοποιημένη στρώσης βάσης και υπόβασης ασύνδετου θραυστού αμμοχάλικου με μέτρο ελαστικότητας $E_2 = 120$ MPa, πάχους 30 cm.
- ❖ Στρώση έδρασης μέτρου ελαστικότητας $E_3 = 60$ MPa.

Η θερμοκρασία σχεδιασμού της ασφαλικής στρώσης θεωρήθηκε $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η σύσταση του ασφαλτομίγματος χαρακτηρίζεται από όγκο κενών αέρα $V_a = 4\%$ και ενεργό ποσοστό ασφάλτου $V_{be} = 9.80\%$. Ο λόγος Poisson για όλες τις στρώσεις παραμένει σταθερός στο $\nu = 0.35$, ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας παρατηρείται στα 10 m κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος και η βραχώδη εδαφική μάζα στα 20 m.

4.1.3 Νόμος κόπωσης ασφαλικής στρώσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο **Υποκεφάλαιο 2.2.4**, οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα της βάσης της ασφαλικής στρώσης είναι υπαίτιες για το φαινόμενο αστοχίας από την κόπωση της ασφαλικής στρώσης. Η φθορά αυτή γίνεται εμφανής με την εμφάνιση κατά μήκος ρηγματώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η ανάπτυξή τους οφείλεται καθαρά από την επιβολή φορτίου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, στην προκειμένη περίπτωση από τον τυπικό άξονα της κάθε μεθόδου. Με στόχο να υπολογιστεί η φθορά εξ' αιτίας της κόπωσης, εκτιμώμενη από τις διάφορες μεθόδους ισοδύναμης κυκλοφορίας, χρειάζεται να είναι γνωστή η αντοχή του οδοστρώματος, δηλαδή το ποιος είναι ο αριθμός των επιτρεπόμενων ισοδύναμων τυπικών αξόνων N_f που μπορεί εκείνο να φέρει πριν την αστοχία. Προκύπτει επομένως η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί ένας νόμος κόπωσης που θα συνδέει την εντατική αυτή κατάσταση (εφελκυστικές παραμορφώσεις) με τις επιτρεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις N_f τυπικού άξονα που το οδόστρωμα μπορεί να φέρει.

Όσον αφορά τους νόμους κόπωσης ασφάλτου όπως εκφράζονται από πολλές μεθόδους σχεδιασμού οδοστρώματος, προβλέπεται να διαφέρουν αρκετά ακόμα και για ένα σταθερό εξεταζόμενο φορτίο, καθώς πολλές φορές δημιουργούνται από διαφορετικές εργαστηριακές δοκιμές και εκδηλώνουν διαφορετική ευαισθησία σε βασικές παραμέτρους επιρροής τους. Επιπρόσθετα, κάθε νόμος κόπωσης έχει δημιουργηθεί με βάση τον τυπικό άξονα με τη διαμόρφωση που η κάθε μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας θεωρεί αντίστοιχα. Έτσι και στις μεθόδους που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, όλες με μονό άξονα διπλών ελαστικών, τυπικού φορτίου τα 80 kN, παρατηρήθηκαν διάφοροι νόμοι κόπωσης ασφάλτου. Αν και δεν είναι απόλυτα ορθό, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένας κοινός παρανομαστής, ο νόμος κόπωσης εντός του λογισμικού, που χρησιμοποιείται για την παρούσα ανάλυση και έχει δημιουργηθεί για το συγκεκριμένο φορτίο των 8.16 tons (80 kN) μονού άξονα διπλών ελαστικών με τη διαμόρφωση του τυπικού άξονα που θεωρεί η μέθοδος AASHTO, ίδιος για όλες τις μεθόδους. Αυτό καθώς πιστεύεται ότι οι μικρές αποκλίσεις στις διαμορφώσεις των τυπικών αξόνων των μεθόδων δε θα επηρεάσουν σημαντικά το

αποτέλεσμα των επιτρεπόμενων διελεύσεων από το να χρησιμοποιούνταν διαφορετικοί νόμοι κόπωσης για τον κάθε τυπικό άξονα που δεν είναι απολύτως γνωστό το πώς και με ποια κριτήρια έχουν κατασκευαστεί.

Ο νόμος κόπωσης του λογισμικού θεωρείται μια μετεξέλιξη του νόμου του Ινστιτούτου Ασφάλτου. Εκφράζεται από τη Σχέση 4.1, σύμφωνα με την αναλυτική – εμπειρική μέθοδο του προγράμματος NCHRP 1 – 37A.

$$N_f = 0.00432 \times C \times C_H \times k_{f1} \times \beta_{f1} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)^{k_{f2} \times \beta_{f2}} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{k_{f3} \times \beta_{f3}} \quad (4.1)$$

Με:

$$C = 10^{4.84 \times \left[\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69\right]} \quad (4.2)$$

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49 \times H_{AC})}}} \quad (4.3)$$

Στην οποία:

N_f = οι επιτρεπόμενες διελεύσεις του ισοδύναμου άξονα πριν την αστοχία του οδο – στρώματος εξ' αιτίας της κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης

ε_r = μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης mm

E = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της ασφάλτου σε KPa (8870000 KPa)

V_{be} = ενεργό ποσοστό όγκου ασφάλτου ή το ποσοστό όγκου ασφάλτου το οποίο δεν έχει δεσμευτεί από τα αδρανή (9.8%)

V_a = ποσοστό όγκου κενών αέρα (4 %)

H_{AC} = πάχος ασφαλτικής στρώσης mm (150 mm)

$k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}, \beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = συντελεστές παλινδρόμησης εξαρτώμενοι από το φορτίο και τις τοπικές συνθήκες ($k_{f1}, \beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3} = 1, k_{f2} = 3.9492, k_{f3} = 1.281$)

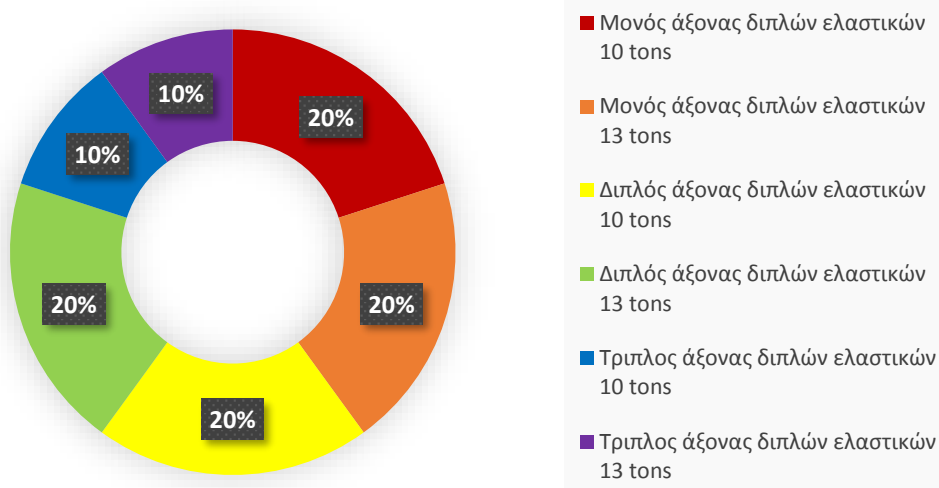
4.1.4 Δεδομένα κυκλοφορίας

Τα κυκλοφοριακά δεδομένα έχουν βασιστεί σε πραγματικά δεδομένα κυκλοφοριακής μελέτης για ένα αυτοκινητόδρομο δύο κατευθύνσεων κυκλοφορίας με δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση. Η κυκλοφορία αναφέρεται σε περίοδο σχεδιασμού 20 ετών. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν δεδομένα κυκλοφορίας για ημερήσιους άξονες βαρέων οχημάτων όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.1**, στα οποία εντοπίζεται μια ετήσια αύξηση μεταβαλλόμενη στο διάστημα σχεδιασμού. Στην επόμενη στήλη υπολογίζονται οι άξονες για τη μια κατεύθυνση και αμέσως μετά εκτιμάται η κυκλοφορία τους στο κάθε έτος. Έχει θεωρηθεί 100% διέλευση βαρέων οχημάτων από τη δεξιά λωρίδα (λωρίδα σχεδιασμού).

Πίνακας 4.1: Δεδομένα κυκλοφορίας για την περίοδο σχεδιασμού 20 ετών

Έτος	Άξονες βαρέων οχημάτων ημερησίως	Μια κατεύθυνση	Ετήσια κυκλοφορία αξόνων βαρέων οχημάτων
[1]	[2]	[3] = [2] * 0.5	[4] = [3] * 365
2021	3,932	1,966	717,551
2022	4,128	2,064	753,318
2023	4,333	2,167	790,855
2024	4,528	2,264	826,286
2025	4,730	2,365	863,295
2026	4,801	2,401	876,245
2027	4,873	2,437	889,388
2028	4,946	2,473	902,729
2029	5,021	2,510	916,270
2030	5,096	2,548	930,014
2031	5,172	2,586	943,965
2032	5,250	2,625	958,124
2033	5,329	2,664	972,496
2034	5,409	2,704	987,083
2035	5,490	2,745	1,001,890
2036	5,572	2,786	1,016,918
2037	5,656	2,828	1,032,172
2038	5,741	2,870	1,047,654
2039	5,827	2,913	1,063,369
2040	5,914	2,957	1,079,320
2041	6,003	3,001	1,095,509
Συνολικοί άξονες			19,664,451

Ωστόσο η σύνθεση της κυκλοφορίας αποτελούμενη από διαφορετικές αξονικές διατάξεις έχει γίνει με αυθαίρετο τρόπο. Η αιτία είναι πως γίνεται μια συγκριτική ανάλυση, επομένως δεν είναι αναγκαίο να γίνει μια αμιγώς ρεαλιστική εισαγωγή στοιχείων. Αντιθέτως, η θεώρηση μονών, διπλών και τριπλών αξόνων με φορτία 10 και 13 τόνων όπως γίνεται παρακάτω, αναδεικνύει την ίδια την αξία της βιβλιογραφικής έρευνας με το να χρησιμοποιηθούν αρκετές μέθοδοι έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας που τη συνυπολογίζουν. Μάλιστα τα φορτία αυτά έχουν επιλεγεί με σκοπό να συμπορεύονται με τον κανονισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που ισχύει στην Ελλάδα (13 tons). Εφόσον λοιπόν διασπάται το πλήθος των αξόνων σε θεωρητικά ποσοστά διατάξεων άξονα σύμφωνα με την **Εικόνα 4.2**, προκύπτει το πλήθος τους στο κάθε έτος στις στήλες του **Πίνακα 4.2** και με το άθροισμά τους, ο αριθμός τους συνολικά στην 20ετία.



Εικόνα 4.2: Καταμερισμός των συνολικών αξόνων

Πίνακας 4.2: Πλήθος διαφόρων διατάξεων άξονα βαρέων οχημάτων

Έτος	Ετήσια κυκλοφορία αξόνων βαρέων οχημάτων	Μονός άξονας διπλός τροχός 10 tons	Μονός άξονας διπλός τροχός 13 tons	Διπλός άξονας διπλός τροχός 10 tons	Διπλός άξονας διπλός τροχός 13 tons	Τριπλός άξονας διπλός τροχός 10 tons	Τριπλός άξονας διπλός τροχός 13 tons
[1]	[4] = [3] * 365	20% του [4]	20% του [4]	20% του [4]	20% του [4]	10% του [4]	10% του [4]
2021	717,551	143,510	143,510	143,510	143,510	71,755	71,755
2022	753,318	150,664	150,664	150,664	150,664	75,332	75,332
2023	790,855	158,171	158,171	158,171	158,171	79,085	79,085
2024	826,286	165,257	165,257	165,257	165,257	82,629	82,629
2025	863,295	172,659	172,659	172,659	172,659	86,330	86,330
2026	876,245	175,249	175,249	175,249	175,249	87,624	87,624
2027	889,388	177,878	177,878	177,878	177,878	88,939	88,939
2028	902,729	180,546	180,546	180,546	180,546	90,273	90,273
2029	916,270	183,254	183,254	183,254	183,254	91,627	91,627
2030	930,014	186,003	186,003	186,003	186,003	93,001	93,001
2031	943,965	188,793	188,793	188,793	188,793	94,396	94,396
2032	958,124	191,625	191,625	191,625	191,625	95,812	95,812
2033	972,496	194,499	194,499	194,499	194,499	97,250	97,250
2034	987,083	197,417	197,417	197,417	197,417	98,708	98,708
2035	1,001,890	200,378	200,378	200,378	200,378	100,189	100,189
2036	1,016,918	203,384	203,384	203,384	203,384	101,692	101,692
2037	1,032,172	206,434	206,434	206,434	206,434	103,217	103,217
2038	1,047,654	209,531	209,531	209,531	209,531	104,765	104,765
2039	1,063,369	212,674	212,674	212,674	212,674	106,337	106,337
2040	1,079,320	215,864	215,864	215,864	215,864	107,932	107,932
2041	1,095,509	219,102	219,102	219,102	219,102	109,551	109,551
Συνολικοί άξονες	19,664,451	3,932,890	3,932,890	3,932,890	3,932,890	1,966,445	1,966,445

4.1.5 Μετατροπή σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες

Βάσει των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, μετατρέπονται τα φορτία 10 t και 13 t των μονών, διπλών και τριπλών αξόνων που συγκροτούν την πραγματική κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες.

Επειδή κάθε μέθοδος ακολουθεί δικιά της σχέση έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας, προκύπτει στον επόμενο **Πίνακα 4.3** διαφορετικός αριθμός ισοδύναμων τυπικών αξόνων από τη κάθε μια ξεχωριστά. Στη διαφοροποίηση αυτή συμβάλλει επίσης το γεγονός πως κάθε μέθοδος θεωρεί τον δικό της τυπικό άξονα, με διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως η πίεση και η ακτίνα των ελαστικών αλλά και η απόσταση S_1 μεταξύ των διπλών ελαστικών. Η διαφορετικότητα αυτή του άξονα αναμένεται να δημιουργήσει και κάποιες μικρές διαφορές τιμών οριζόντιων παραμορφώσεων ϵ_t στον πυθμένα της ασφατικής στρώσης, κατ' ακολουθία και διαφορές στις επιτρεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις N_f μέσω του νόμου κόπωσης της ανάλυσης. Παρά ταύτα, υπάρχουν και κοινά στοιχεία. Ο τυπικός άξονας όλων των μεθόδων που επιλέχθηκαν, είναι ένας μονός άξονας διπλών ελαστικών εκατέρωθέν του, με φορτίο 80 kN.

Πίνακας 4.3: Μετατροπή αξόνων από τα βαρέα οχήματα σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες

		Μονός άξονας διπλών ελαστικών 10 tons	Μονός άξονας διπλών ελαστικών 13 tons	Διπλός άξονας διπλών ελαστικών 10 tons	Διπλός άξονας διπλών ελαστικών 13 tons	Τριπλός άξονας διπλών ελαστικών 10 tons	Τριπλός άξονας διπλών ελαστικών 13 tons	Συνολικοί άξονες
Άξονες βαρέων οχημάτων		3,932,890	3,932,890	3,932,890	3,932,890	1,966,445	1,966,445	19,664,451
Ισοδύναμοι τυπικοί άξονες (ESALs)	Κανόνας 4ης δύναμης	8,880,442	25,363,430	760,189	2,171,177	90,548	258,615	37,524,402
	AASHTO SN=5 pt=2	9,334,194	28,285,787	651,219	2,025,274	69,686	212,049	40,578,209
	AASHTO SN=5 pt=2.5	8,650,045	23,116,327	715,536	2,144,763	78,402	235,693	34,940,766
	AASHTO SN=5 pt=3	7,804,751	17,599,948	812,624	2,317,455	91,932	271,874	28,898,584
	GAF	8,589,143	23,672,351	1,194,855	3,273,672	187,594	516,816	37,434,433
	TAC	7,717,349	16,556,309	2,080,293	4,053,987	602,762	1,049,320	32,060,019
	Austroroads	8,880,442	25,363,430	1,095,114	3,127,756	169,453	483,976	39,120,171
	IRC	8,880,442	25,363,430	758,137	2,165,315	72,239	206,322	37,445,885

Στη δεξιά στήλη του **Πίνακα 4.3**, προκύπτουν τα συνολικά ESALs από την κάθε μέθοδο έκφραση συντελεστή ισοδυναμίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για τον υπολογισμό

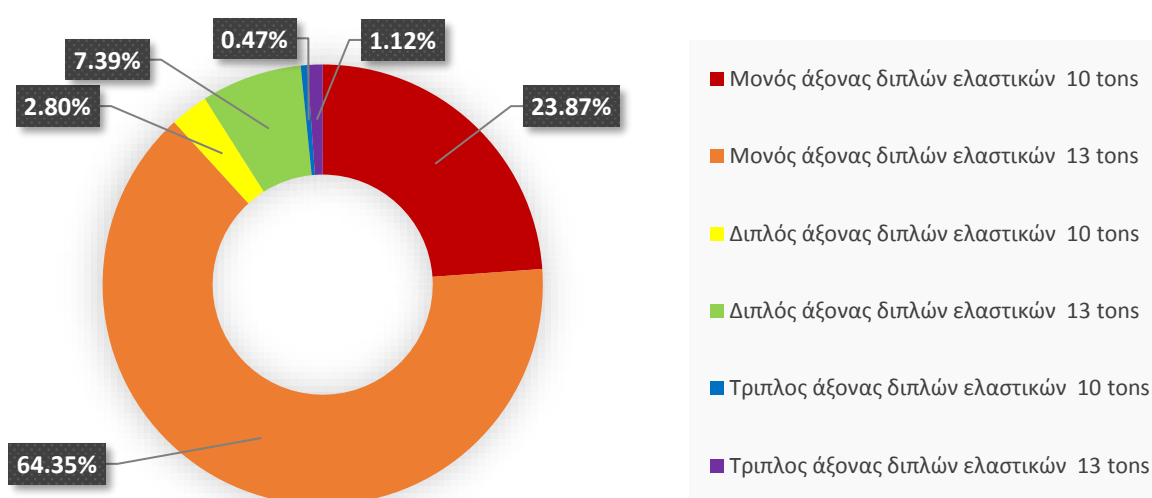
τους, κάθε μέθοδος έχει συνθέσει τη δική της σχέση βασισμένη στις παραμέτρους που η ίδια κρίνει σημαντικές. Γενικότερα η σχέση υπολογισμού των συνολικών ESALs βασίζεται τις περισσότερες φορές στα ίδια δεδομένα (κατεύθυνση αναφοράς, ποσοστό βαρέων στη λωρίδα σχεδιασμού, ετήσια αύξηση στην περίοδο σχεδιασμού κλπ). Για τις επιλεγμένες μεθόδους δεν υπάρχουν κάποιες διαφορές ως προς τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού και η διαδικασία είναι κοινή με αυτή που ακολουθήθηκε.

Οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες και ο αριθμός τους είναι το τελικό προϊόν από την επεξεργασία των δεδομένων κυκλοφορίας, το οποίο στη συνέχεια εισάγεται στο λογισμικό για τη διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης για τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Στην προκειμένη περίπτωση η ανάλυση είναι στατική. Αυτό σημαίνει πως τα φορτία των ισοδύναμων τυπικών αξόνων επιβάλλονται στατικά στο οδόστρωμα, χωρίς θεώρηση ταχύτητας κίνησης.

4.2 Αποτελέσματα συγκριτικής ανάλυσης

4.2.1 Μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης

Ως γνωστό, το πόσο μεγάλη είναι η φθορά σε ένα οδόστρωμα εξαρτάται από το πλήθος των ισοδύναμων τυπικών αξόνων. Από τον **Πίνακα 4.3** παρατηρείται πως η κάθε μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας μετατρέπει τις διελεύσεις της κάθε αξονικής διάταξης σε ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα. Αν υπολογιστεί ο μέσος όρος των ισοδύναμων διελεύσεων τυπικών αξόνων που δίνουν οι μέθοδοι, για την κάθε αξονική διάταξη, τότε μπορεί να δημιουργηθεί το διάγραμμα της **Εικόνας 4.3**. Στην ουσία, το διάγραμμα δείχνει το μέσο όρο των ισοδύναμων τυπικών αξόνων από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης ή απλοποιητικά το μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης. Αναλογικά, την ίδια επίδραση στη φθορά θα είχαν οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες μεμονωμένα ανά μέθοδο.



Εικόνα 4.3: Μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις κάθε αξονικής διάταξης

Η ίδια εικόνα θα μπορούσε επίσης να παρουσιάσει και το μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά ανά αξονική διάταξη. Αυτό διότι οι διελεύσεις των δύο μονών και των δύο διπλών διατάξεων άξονα είναι ισόποσες, κάθε μια με 20%, οπότε η αναλογία της συμβολής τους θα έμενε η ίδια μεταξύ αυτών. Ωστόσο οι τελευταίοι δύο τριπλοί άξονες έχουν διελεύσεις στο 10%. Επειδή όμως οι τριπλοί άξονες συμμετέχουν σε αρκετά μικρό βαθμό στη συνολική φθορά, πάλι θα προέκυπτε πως έχουν ελάχιστη συμβολή στο σύνολο αν αυξάνονταν οι διελεύσεις τους. Επομένως, αν υπήρχε υποθετικά ένας ίσος καταμερισμός των διελεύσεων της κάθε αξονικής διάταξης έτσι ώστε να μην λαμβάνονται καθόλου υπ' όψη, θα επηρεαζόταν ελάχιστα ο καταμερισμός της φθοράς που φαίνεται από το διάγραμμα της **Εικόνας 4.3**.

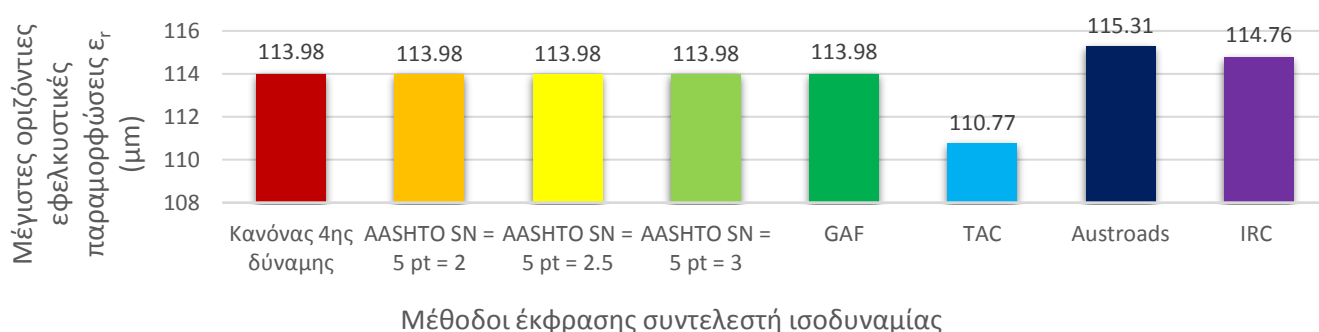
Έτσι, η **Εικόνα 4.3** παρουσιάζει το πόσο μεγάλη είναι η επιδρατικότητα του μονού άξονα εν συγκρίσει με τις πιο σύνθετες διατάξεις, τόσο για το φορτίο των 10 tons όσο και για τα 13 tons. Επιπρόσθετα, απεικονίζει το κατά πόσο οι διατάξεις με το μεγαλύτερο φορτίο συμβάλλουν περισσότερο στη φθορά που θα επέλθει στο οδόστρωμα (κατά δυόμιση φορές περίπου μεγαλύτερη).

4.2.2 Μέγιστες οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_r

Για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρθηκε, το λογισμικό 3D – MOVE. Για την υπολογιστική διαδικασία απαιτούνται:

- ❖ Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του τυπικού άξονα της κάθε μεθόδου
- ❖ Οι ισοδύναμες τυπικές διελεύσεις από κάθε μέθοδο (στατική ανάλυση)
- ❖ Οι στρώσεις και τα πάχη του οδοστρώματος
- ❖ Μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων (E , ν)
- ❖ Σύσταση ασφαλτομίγματος (V_a , V_{be})
- ❖ Βάθος βραχώδους εδάφους και βάθος υδροφόρου ορίζοντα

Προσδιορίστηκαν οι οριζόντιες παραμορφώσεις στον πυθμένα της ασφατικής στρώσης για την κόπωση. Από το σύνολο των οριζόντιων παραμορφώσεων που αναπτύχθηκαν και στις δύο διευθύνσεις (παράλληλα και κάθετα με τη φορά της κίνησης), λήφθηκε υπόψη η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή στην κάθε μέθοδο, δηλαδή εκείνη με την οποία θα προκληθεί η μεγαλύτερη φθορά. Οι εφελκυστικές αυτές παραμορφώσεις δίνονται κάτω στην **Εικόνα 4.4**.

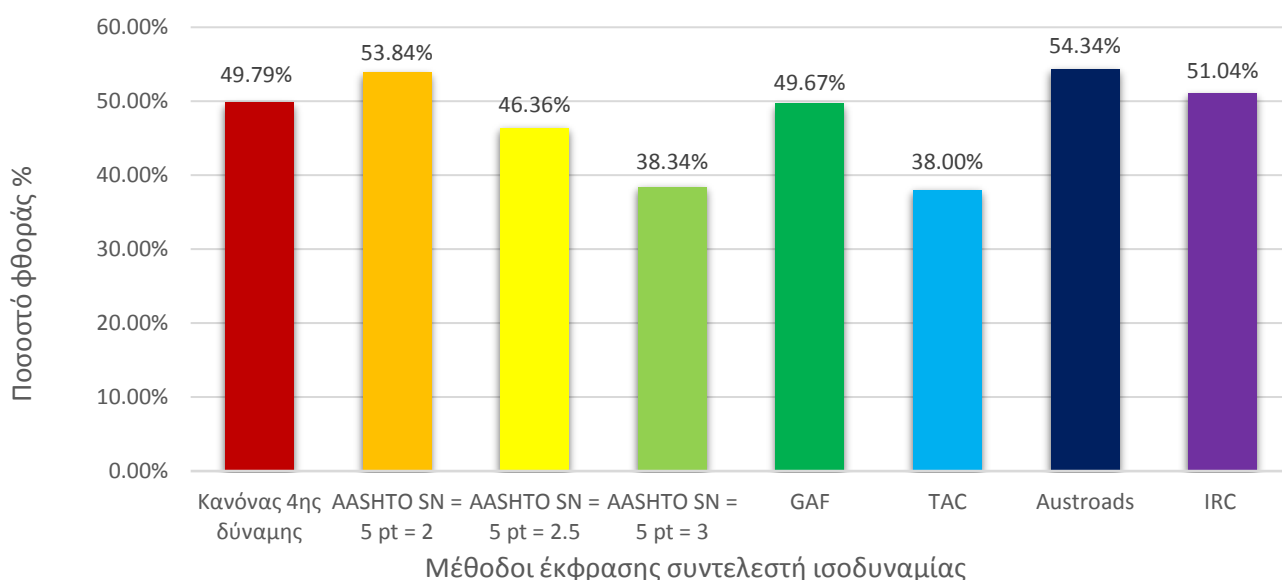


Εικόνα 4.4: Μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας

Παρατηρείται πως οι μέγιστες παραμορφώσεις στις πρώτες 5 περιπτώσεις εμφανίζουν ίδια τιμή. Αυτό οφείλεται στο ότι διατηρούν την ίδια τυπική διάταξη που επιβάλλεται στο οδόστρωμα. Αντίθετα οι λοιπές, παρά το γεγονός πως επιβάλλουν φορτίο 80 kN μέσω του τυπικού άξονά τους, παρουσιάζουν μικρές διαφορές στις παραμορφώσεις, εξ' αιτίας της διαφορετικής τους διαμόρφωσης σε αυτόν. Η διάταξη τυπικού άξονα της Καναδικής μεθόδου TAC φαίνεται να οδηγεί στην ανάπτυξη των μικρότερων παραμορφώσεων ενώ οι τυπικοί άξονες των μεθόδων της Αυστραλίας Austroads και της Ινδίας IRC επιφέρουν τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

4.2.3 Φθορά από κόπωση ασφαλικής στρώσης

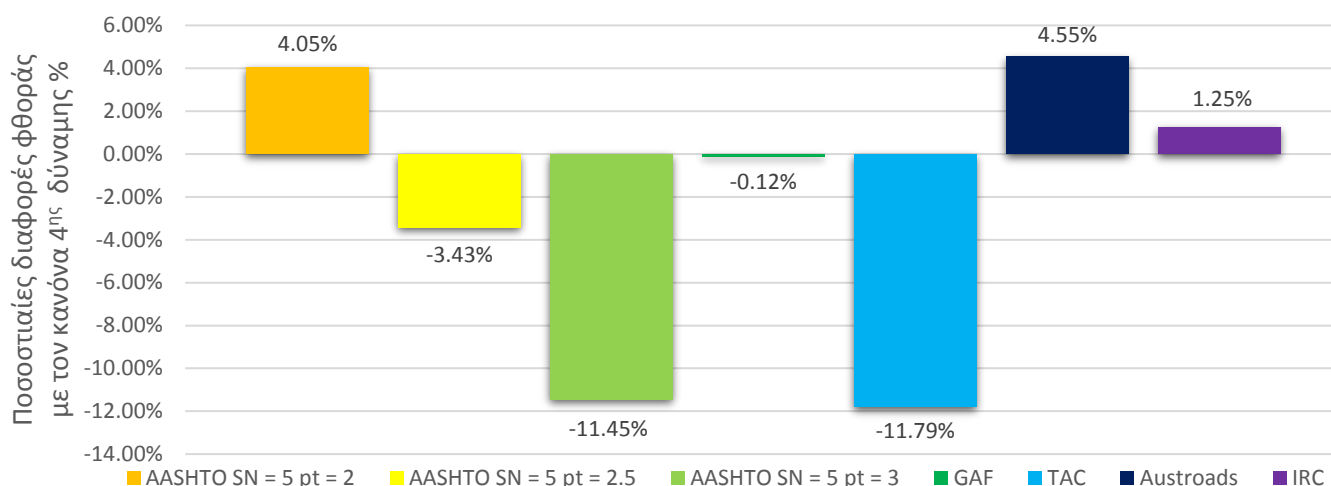
Με εφαρμογή των επιμέρους μεθόδων, εκτός από τις παραμορφώσεις, υπολογίστηκε και η φθορά για την κόπωση της ασφαλικής στρώσης. Οι υπολογισμένες φθορές φαίνονται στην **Εικόνα 4.5** που ακολουθεί.



Εικόνα 4.5: Ποσοστά φθοράς μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας

Διαπιστώνεται πως η φθορά από την θεωρητική έκφραση της μεθόδου AASHTO του κανόνα της 4^{ης} δύναμης είναι σχεδόν όμοια με εκείνη της μεθόδου GAF. Παρομοίως συμβαίνει και με την μέθοδο AASHTO για SN = 5 και $p_t = 3$ με την Καναδική μέθοδο TAC, ενώ η μέθοδος AASHTO για SN = 5 και $p_t = 2$ εκδηλώνει φθορά αρκετά κοντά σε τιμή σε εκείνη της μεθόδου Austroads. Ακόμη παρατηρείται πως οι φθορές από τις διάφορες εκφράσεις της μεθόδου AASHTO δεν εμφανίζουν πολύ μεγάλη διασπορά, εκτός αυτής για SN = 5 και $p_t = 3$. Εκτός αυτού, εντοπίζεται πως η πιο συντηρητική εκτίμηση φθοράς είναι εκείνη της μεθόδου Austroads ενώ λιγότερο συντηρητική φαίνεται σε εκείνη της μεθόδου TAC.

Καταληκτικά, παρατίθεται και η **Εικόνα 4.6** στην οποία παρουσιάζονται αυτές οι φθορές με τις αποκλίσεις τους σε σχέση με την επιλεγμένη μέθοδο αναφοράς, τη θεωρητική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO μέσω του κανόνα της 4^{ης} δύναμης.



Μέθοδοι έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας

Εικόνα 4.6: Ποσοστιαίες διαφορές φθοράς μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας με κανόνα 4^{ης} δύναμης

Διακρίνεται καλύτερα αυτό που είχε παρατηρηθεί από την προηγούμενη **Εικόνα 4.5**, στο πόσο κοντά φέρεται να εκδηλώνεται η φθορά από την μέθοδο GAF σχετικά με του κανόνα 4^{ης} δύναμης. Ακολουθούν με μικρές αποκλίσεις η Ινδική μέθοδος IRC και η εμπειρική έκφραση της μεθόδου AASHTO για SN = 5 και $p_t = 2.5$. Αντίθετα οι AASHTO για SN = 5 και $p_t = 3$ καθώς και η Καναδική μέθοδος TAC παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες ποσοστιαίες διαφορές.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επιστέγασμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αφενός η αποτύπωση των διάφορων μεθοδολογιών θεώρησης ισοδύναμης κυκλοφορίας που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητικούς οργανισμούς και αφετέρου, η σύγκρισή τους στο τελικό τους προϊόν, τη φθορά, για ένα πειραματικό θεωρητικό εύκαμπτο οδόστρωμα σε συνθήκες ρεαλιστικής κυκλοφορίας.

Η εργασία επιμερίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος πραγματοποιήθηκε η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Έγινε μια ιστορική αναδρομή στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με αναφορά στις δύο προσεγγίσεις σχεδιασμού, την εμπειρική και την αναλυτική. Εντοπίστηκαν δέκα βασικές μέθοδοι μετατροπής της κυκλοφορίας σε ισοδύναμη που χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο, με έμφαση στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων, αλλά και κάποιες ακόμη που χρήζουν περαιτέρω ακαδημαϊκής διερεύνησης.

Στο δεύτερο μέρος, από τις προαναφερόμενες μεθόδους επιλέγονται οι καταλληλότερες για τον σκοπό μιας συγκριτικής ανάλυσης. Η επιλογή έγινε βάσει των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των μεθόδων έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας, καθώς και των περιορισμών χρήσης του λογισμικού που αξιοποιήθηκε για την ανάλυση. Θεωρήθηκε μια διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, όπως επίσης δεδομένα κυκλοφορίας σε διελεύσεις αξόνων βασισμένα σε κυκλοφοριακές μελέτες για αυτοκινητόδρομο. Σε αυτά έγινε ένας αυθαίρετος διαχωρισμός σε μονές, διπλές και τριπλές διατάξεις αξόνων φορτίων 10 και 13 tons. Τα δεδομένα κυκλοφορίας μετατράπηκαν σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες όπως τους ορίζει η κάθε επιλεγμένη μέθοδος, και στη συνέχεια εισήχθησαν στο λογισμικό. Η ανάλυση θεωρήθηκε στατική. Αυτό σημαίνει ότι τα φορτία των αξόνων επιβλήθηκαν στο οδόστρωμα στατικά και όχι δυναμικά με κάποια μέση ταχύτητα. Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν κρίσιμα εντατικά μεγέθη κατά το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Αυτά αφορούν τις κρίσιμες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις που οδηγούν στην κόπωση της ασφαλικής στρώσης από τη διαφορετική τυπική αξονική διάταξη που ορίζει η εκάστοτε μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας. Με βάση τις οριζόντιες παραμορφώσεις, υπολογίστηκαν οι φθορές. Τα αποτελέσματα φθοράς συγκρίθηκαν με τη φθορά της επιλεγμένης μεθόδου αναφοράς, τον κανόνα 4^{ης} δύναμης όπως αποδίδεται θεωρητικά από τη μέθοδο AASHTO. Η σύγκριση οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Σχετικά με το μέσο ποσοστό συμβολής στη φθορά από τις διελεύσεις της κάθε αξονικής διάταξης από τα δεδομένα κυκλοφορίας (Εικόνα 4.3):

Παρατηρείται πως οι διελεύσεις μονής αξονικής διάταξης επί διπλών ελαστικών 10 και 13 tons, έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό συμβολής στη φθορά. Με τα ίδια φορτία, ακολουθούν οι διελεύσεις διατάξεων διπλών αξόνων στη συνεισφορά τους στη φθορά και τέλος, η μικρότερη συμμετοχή στη φθορά λαμβάνεται από τις διελεύσεις των τριπλών αξονικών διατάξεων. Αυτό οφείλεται διότι οι μονοί άξονες δημιουργούν μεγαλύτερες τάσεις στο οδόστρωμα μιας και τα φορτία 10 και 13 tons συγκεντρώνονται σε μια σχετικά μικρή

επιφάνεια,. Αντιθέτως, το φορτίο επιμερίζεται περισσότερο στους διπλούς άξονες και ακόμα πιο πολύ στους τριπλούς. Επομένως όσο περισσότεροι άξονες συγκεντρώνονται σε μια αξονική διάταξη, τόσο πιο ήπια είναι η επιδραστικότητά της στο οδόστρωμα. Από τις μεθόδους έκφρασης του συντελεστή ισοδυναμίας τότε, αναμένεται να δημιουργηθούν λίγοι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες. Σαν επακόλουθο γίνεται αντιληπτό πως ένας τέτοιος άξονας συμμετέχει με μικρή συμβολή στη συνολική φθορά σε σχέση με αξονικές διατάξεις λιγότερων αξόνων. Επίσης, από τη σύγκριση φορτίων 10 και 13 tons, προκύπτει πως η επιδραστικότητα του άξονα των 13 tons είναι περίπου δυνάμει φορές μεγαλύτερη από εκείνη των 10 tons σε οποιαδήποτε αξονική διάταξη.

Οι διελεύσεις της μονής και της διπλής διάταξης άξονα για το κάθε φορτίο, εμφανίζονται στο ίδιο ποσοστό (20%) από τους συνολικούς άξονες των βαρέων οχημάτων. Επιπλέον, οι διελεύσεις καθεμιάς από αυτές τις τέσσερις αξονικές διατάξεις, εμφανίζονται σε διπλάσιο ποσοστό από εκείνες των διατάξεων τριπλών αξόνων που λαμβάνουν το 10% για το κάθε φορτίο. Εντούτοις, η μικρή επίδραση των τριπλών αξόνων δε θα άλλαζε κάτι ιδιαίτερα στο αποτέλεσμα της συμβολής στη φθορά, αν ήταν και εκείνων οι διελεύσεις ισόποσες με τις προηγούμενες σε αριθμό.

Σχετικά με τα αποτελέσματα μέγιστων ανηγμένων οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης (Εικόνα 4.4).

Η επεξεργασία των δεδομένων μέσω του λογισμικού έδωσε για τον τυπικό άξονα της κάθε επιλεγμένης μεθόδου, κάποιες κρίσιμες οριζόντιες παραμορφώσεις για το φαινόμενο της κόπωσης της ασφαλικής στρώσης. Από το σύνολο των παραμορφώσεων, οι οποίες εκδηλώνονται οριζόντια στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης και στις δύο διευθύνσεις (παράλληλα και κάθετα με τη φορά κίνησης), επιλέχθηκε η μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή. Αυτό διότι θα είναι εκείνη η οποία, μέσω του νόμου κόπωσης του υλικού, που θα δώσει και τον “ελάχιστο” μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων που το οδόστρωμα μπορεί να υποστηρίξει πριν την αστοχία του. Οποιαδήποτε άλλη παραμόρφωση θα παρήγαγε περισσότερες επιτρεπόμενες διελεύσεις. Ως εκ τούτου επιζητάται εκείνη η τιμή παραμόρφωσης που θα οδηγήσει πρώτη στην αστοχία και σε μια πιο συντηρητική εκτίμηση φθοράς.

Στη συνέχεια στην **Εικόνα 4.4** καταγράφονται οι μέγιστες εφελκυστικές παραμορφώσεις από τον τυπικό άξονα της κάθε μεθόδου έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας. Η θεωρητική και η εμπειρική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO καθώς και η μέθοδος GAF, παράγωγο επίσης της μεθόδου AASHTO, θεωρούν όμοια τη διαμόρφωση του τυπικού άξονα, επομένως εμφανίζουν τις ίδιες παραμορφώσεις (113.98 μm), σε αντίθεση με τις μεθόδους TAC, Austroads και IRC στις οποίες οι παραμορφώσεις διαφέρουν. Οι διαφορές πάρα ταύτα, είναι αρκετά μικρές μεταξύ τους, επειδή το τυπικό αξονικό φορτίο είναι 80 kN σε όλες τις μεθόδους και ο άξονας απαρτίζεται από διπλά ελαστικά, οπότε οι αποκλίσεις έγκεινται στη διαμόρφωση της απόστασης μεταξύ των διπλών ελαστικών όπως επίσης και της πίεσής τους στο φούσκωμα. Από αυτές τις 3 παραμορφώσεις των μεθόδων, πιο κοντινή στην παραμόρφωση της μεθόδου AASHTO παρουσιάζεται εκείνη της μεθόδου IRC. Η εξήγηση σε αυτό είναι πως ο τυπικός άξονας της μεθόδου πλησιάζει ικανοποιητικά στη γεωμετρία και στα χαρακτηριστικά του τυπικού άξονα της μεθόδου AASHTO.

Σχετικά με τα αποτελέσματα φθοράς (Εικόνες 4.5 και 4.6)

Συμπεραίνεται πως όλες οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν με βάση τη βιβλιογραφική έρευνα, δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές φθοράς. Οι περισσότερες από τις μεθόδους συντελεστή ισοδυναμίας, εκδηλώνουν φθορές σε ένα εύρος τιμών 46% με 54%. Εξαιρέση αποτελούν οι μέθοδοι TAC και η εμπειρική έκφραση AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 3$, καθότι εμφανίζουν μικρότερες φθορές της τάξης του 38%.

Εστιάζοντας περισσότερο στη σύγκριση της μεθόδου αναφοράς, τον κανόνα της 4^{ης} δύναμης από τη μέθοδο AASHTO, διαπιστώνεται άμεσα πως η GAF είναι η μεθοδολογία με την ελάχιστη απόκλιση (0.12 %). Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί καθώς η GAF είναι μια μέθοδος της οποίας τα θεμέλια βασίζονται αμιγώς στην μεθοδολογία της μεθόδου AASHTO και των πρακτικών της. Η ομοιότητά τους επίσης, μπορεί να οφείλεται στο ότι αποτελούν και οι δύο μια θεωρητική έκφραση για τον προσδιορισμό ισοδύναμων αξόνων. Επιπρόσθετα, από τη βιβλιογραφική έρευνα προέκυψε ότι η μέθοδος GAF προσεγγίζει την εμπειρική μέθοδο AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 2.5$. Κατά την ανάλυση, η ποσοστιαία διαφορά φθοράς τους φαίνεται πως είναι στο 3.31 %, μια τιμή ιδιαίτερα μικρή. Έτσι λοιπόν και ο κανόνας 4^{ης} δύναμης, αποκλίνει περίπου στο ίδιο ποσοστό με την εμπειρική αυτή έκφραση (3.43 %), όπως η μέθοδος GAF.

Ωστόσο η μέθοδος αναφοράς παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητική σχέση φθοράς και με την Ινδική μέθοδο IRC. Η διαφορά εντοπίζεται στο 1.25 %, συνθέτοντας τη δεύτερη επαρκέστερη σε θέμα προσέγγισης μέθοδο έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας σχετικά με τη μέθοδο αναφοράς, μετά από την άριστη σχέση που έχει με τη μέθοδο GAF. Η απόκλιση είναι εξίσου μικρή και για τη μέθοδο IRC επειδή ο τυπικός της άξονας και τα τυπικά της φορτία για τις πιο σύνθετες διατάξεις άξονα παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με εκείνα από τη μέθοδο AASHTO.

Έπονται, με ικανοποιητική σχετικά προσέγγιση με την 4^η δύναμη, η εμπειρική έκφραση της μεθόδου AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 2.5$ (3.43 %) όπως αναφέρθηκε, και η ίδια έκφραση για $SN = 5$ και $p_t = 2$ (4.05 %). Αυτές οι εκφράσεις της μεθόδου AASHTO συνιστούν και τις συνηθέστερες κατά το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Γίνεται αντιληπτό το πόσο επαρκώς η θεωρητική έκφραση της 4^{ης} δύναμης τις προσεγγίζει.

Η μέθοδος Austroads επίσης παρουσιάζει μικρή ποσοστιαία διαφορά (4.55 %). Θεωρείται η πιο συντηρητική μέθοδος από την τρέχουσα ανάλυση, γιατί η έκφρασή της παράγει από τους περισσότερους ισοδύναμους τυπικούς άξονες. Συγχρόνως, η τυπική διάταξη της μεθόδου αυτής, έχει μεγάλες πιέσεις στα ελαστικά με μικρότερη ακτίνα σε αυτά και μεγαλύτερο άνοιγμα στους δίδυμους τροχούς. Το αποτέλεσμα είναι να αναπτύσσονται μεγαλύτερες οριζόντιες παραμορφώσεις όποτε επιδέχονται λιγότερες επιτρεπόμενες διελεύσεις, γεγονός που αυξάνει ακόμα περισσότερο τη φθορά. Όλα αυτά τα αίτια συμβάλλουν στη μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση της από τη μέθοδο αναφοράς, εν συγκρίσει πάντα με τις προηγούμενες.

Από εκεί και ύστερα, ξεκινούν οι μεγάλες ποσοστιαίες αποκλίσεις. Η εμπειρική έκφραση της μεθόδου AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 3$ εμφανίζει έντονη απόκλιση από τη σταθερά. Είναι λογικό διότι αναφέρεται σε ένα οδόστρωμα στο οποίο δεν του επιτρέπεται να "πτωχεύσουν" η εξυπηρετικότητα και τα χαρακτηριστικά του κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Όταν επιζητάται τελική εξυπηρετικότητα αριθμού 3, σημαίνει πως το οδόστρωμα χρήζει αποκατάστασης συντήρησης σε ένα σημείο στο οποίο η ποιότητά του εξακολουθεί να είναι

ακόμα καλή. Επομένως το οδόστρωμα προσφέρει μια καλή εξυπηρετικότητα στους χρήστες της οδού κατά τη λειτουργία του. Έτσι, οι ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα αναμένονται να είναι λιγότερες συγκριτικά με άλλες μεθόδους, πράγμα που συμβάλλει άμεσα σε μια τελική μικρή τιμή φθοράς. Αντίθετα, στην έκφραση $SN = 5$ και $p_t = 2$, υπολογίζονται οι περισσότεροι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες από κάθε άλλη μέθοδο. Ο λόγος είναι ο ίδιος αλλά με αντίθετο πρόσημο, δηλαδή το οδόστρωμα αφήνεται εντελώς στο να ελαττωθούν τα χαρακτηριστικά του και η λειτουργικότητά του σε σημείο που πρέπει να αποκατασταθεί άμεσα ή να ανακατασκευαστεί. Αυτό δικαιολογεί στον κύκλο ζωής του και τα μεγάλα ποσοστά φθοράς του.

Εν τέλει, η λιγότερο συντηρητική μέθοδος εξ' αιτίας της μικρής φθοράς που αποτυπώνει, προκύπτει πως είναι η μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας TAC. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση από αυτών της 4^{ης} δύναμης. Μέσω αυτής, δεν δημιουργούνται πολλές ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα όσο σε άλλες μεθόδους. Σε αυτή, συμπληρωματικά αναφέρεται ότι εμπεριέχεται ένα μικρό σφάλμα. Η μέθοδος θεωρεί κανονικά τον τυπικό της άξονα 8 tons ενώ στην ανάλυση έχει εισαχθεί ως 8.16 tons (80 kN), αφενός για λόγους απλούστευσης, αφετέρου για να συνάδει με τον εμπεριεχόμενο νόμο κόπωσης στο λογισμικό, κατασκευασμένος για 8.16 tons. Έτσι η παραπάνω διάταξη έχει τροποποιηθεί στον τυπικό της άξονα από ο,τι ορίζει ακριβώς η μέθοδος TAC, στοιχείο που συντελεί ενδεχομένως σε ένα όχι τόσο ακριβές αποτέλεσμα για εκείνη. Εκτός του ότι θεωρείται πως επιβάλλεται φορτίο 80 kN, μέσω της τυπικής αξονικής διάταξης, η μέθοδος TAC παρουσιάζει σημαντικές διαφορές διαμόρφωσης στον τυπικό άξονα με εκείνο της μεθόδου AASHTO. Κατ' επέκταση ο τυπικός της άξονας κάνει το οδόστρωμα να εκδηλώνει τη μικρότερη οριζόντια παραμόρφωση μεταξύ των άλλων μεθόδων. Αυτό αυτόματα οδηγεί στις μεγαλύτερες επιτρεπόμενες διελεύσεις για το οδόστρωμα. Έτσι μπορεί να εξηγηθεί το χαμηλό ποσοστό φθοράς. Υπάρχει μια ακόμη αντίφαση η οποία θέτει υπό αμφισβήτηση την αξιοπιστία της μεθόδου, το γεγονός πως θεωρείται μια μέθοδος που υπερτιμά τον αριθμό των ισοδύναμων τυπικών αξόνων σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως με την AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 2.5$ (**Εικόνα 3.9**). Αποδεικνύεται όμως στην πράξη πως προκύπτουν λιγότεροι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες από εκείνη.

Γενικά συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, διαπιστώνεται πως η μέθοδος αναφοράς, δηλαδή η θεωρητική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO μέσω του κανόνα της 4^{ης} δύναμης, να μεν είναι μια μεθοδολογία που μετατρέπει την κυκλοφορία σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες για τον προσδιορισμό της φθοράς, αλλά στο αποτέλεσμά της δεν εμφανίζει ιδιαίτερα μεγάλες αποκλίσεις από την εκτίμηση φθοράς άλλων μεθόδων όπως της GAF, της IRC, της Austroads και των εμπειρικών θεωρήσεων της, με εξαίρεση εκείνης που έχει σαν κριτήρια οδοστρώματος $SN = 5$ και $p_t = 3$. Επιπλέον, παρατηρείται πως η φθορά του οδοστρώματος με τη χρήση του κανόνα 4^{ης} δύναμης είναι περίπου στη μέση μεταξύ των ενδείξεων φθοράς που προκύπτουν από τις εμπειρικές εκφράσεις της μεθόδου AASHTO για $SN = 5$ και $p_t = 2$ και 2.5. Επομένως, συμπεραίνεται πως η θεωρητική έκφραση του συντελεστή ισοδυναμίας της μεθόδου AASHTO προσεγγίζεται ικανοποιητικά στον ίδιο βαθμό και από τις δύο αυτές εμπειρικές εκφράσεις της.

Η μέθοδος GAF δείχνει να παρουσιάζει άριστη ομοιότητα με τη μέθοδο αναφοράς. Αυτό είναι φυσικό μιας και έχει αναπτυχθεί με βάση τη μέθοδο AASHTO. Προτείνεται λοιπόν η χρήση

της στην περίπτωση που ο σχεδιασμός αναφέρεται σε κάποιον άλλο τύπο οδοστρώματος μιας και η 4^η δύναμη, σε αυτή τη μορφή, δεν τους καλύπτει. Η IRC επίσης είναι μια μέθοδος με καλή προσέγγιση στη μέθοδο αναφοράς και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια συντηρητική μέθοδος στο αποτέλεσμα της φθοράς. Η πιο συντηρητική μέθοδος απ' όλες ωστόσο προκύπτει να είναι η μέθοδος Austroads και συνίσταται στο να χρησιμοποιείται στην περίπτωση που στον σχεδιασμό υπάρχει μια γενικότερη ανασφάλεια στο πόσο ακόμη φορτίο μπορεί να παραλάβει το οδόστρωμα πριν την αστοχία του. Εν δυνάμει θα μπορούσε να συντελέσει σε μια έγκαιρη παρέμβαση στο οδόστρωμα για αποκατάσταση. Αν τώρα επιζητείται συγκεκριμένη εξυπηρετικότητα που καλείται να έχει το οδόστρωμα πριν από την αποκατάστασή του ή μια συγκεκριμένη δομική επάρκεια, συστήνεται η χρήση της μεθόδου AASHTO μέσω των εμπειρικών σχέσεων. Όσον αφορά τη μέθοδο TAC, δεν συνιστάται η χρήση της, μιας και είναι η μόνη μέθοδος η οποία φαίνεται να μην είναι και τόσο αξιόπιστη. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως δεν υπάρχει μια μέθοδος έκφρασης συντελεστή ισοδυναμίας η οποία να είναι η καταλληλότερη στη χρήση έναντι των υπολοίπων. Η καταλληλότητα αυτή έγκειται επί της ουσίας στο τι επιζητείται κάθε φορά στον σχεδιασμό.

Τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν το ερέθισμα για περαιτέρω προτάσεις έρευνας στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Αυτές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- ❖ Να διεξαχθεί μια παρόμοια συγκριτική ανάλυση με τα ίδια χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, αλλά με διαφορετική θεώρηση στη διελεύσεων αξόνων από τα βαρέα οχήματα, ενδεχομένως σε διαφορετική αναλογία, με διαφορετικά επιβαλλόμενα φορτία, δυνητικά με περισσότερες διατάξεις αξόνων (πχ. μονός άξονας μονών τροχών) ή ακόμα με τον υπολογισμό της φθοράς για κάποια άλλη μορφή αστοχίας (παραμένουσα παραμόρφωση για μια συγκεκριμένη υποκείμενη στρώση).
- ❖ Να πραγματοποιηθεί δυναμική ανάλυση για μια συγκεκριμένη μέση ταχύτητα ισοδύναμων τυπικών αξόνων και να συγκριθεί με τη στατική ανάλυση.
- ❖ Να γίνει παρόμοια διερεύνηση για δύσκαμπτα και ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aalim Muhammed Salegh College of Engineering UNIT – III, Design of Flexible and Rigid Pavements [Report] / Department of Civil Engineering, Highway Engineering ; Aalim Muhammed Salegh College of Engineering. - 2020. - pp. 18 - 29.

AASHTO AASHTO Guide for Design of Pavement Structures [Book]. - Washington D.C. : AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

AASHTO Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice, Interim Edition [Book]. - [s.l.] : AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. - ISBN: 978 - 1 - 56051 - 423 - 7.

Addis R. R. COST 334: Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres [Online] // Trid Transportation Research Board (TRB). - <https://trid.trb.org/view/1151689>.

ADOT - Arizona Department of Transportation Pavement Design Manual [Report]. - Phoenix : Arizona Department of Transportation, Roadway Engineering Group, Pavement Design Section, 2017.

Agrawal J. N. and Bhosale S. S. Parametric Study on the Effect of Increase in the Truck Axle Load Carrying Capacity [Journal] // International Journal of Scientific Research (IJSR). - 2018. - Issue: 8 : Vol. No. 7. - pp. 38 - 40. - ISSN: 2277 - 8179.

Al - Qadi I. L. and Wang H. Evaluation of Pavement Damage Due to New Tire Design [Report] : Research Report FHWA ICT - 09 - 048 / Department of Civil and Environmental Engineering ; Illinois Center for Transportation. - Illinois : [s.n.], 2009. - ISSN: 0197 - 9191.

Al - Qadi I. L. and Wang H. Pavement Damage Due to Different Tire and Loading Configurations on Secondary Roads [Report] : NEXTRANS Project No 008IY01, Final Report / Department of Civil and Environmental Engineering ; University of Illinois. - Illinois : Nexttrans Center (U.S), 2009.

Al - Yagout M. A. [et al.] Improving Traffic Characterization to Enhance Pavement Design and Performance: Load Spectra Development [Report] : Final Research Report / Washington State Transportation Center - TRAC . - Washington D.C. : [s.n.], 2005.

Alaska Dept. of Transportation & Public Facilities Alaska Flexible Pavement Design Manual, 6/ Design Input - Equivalent Singel Axles Loads [Report]. - 2020.

Almeida A. M. M. A Methodological Framework for Pavement Damage Estimation Considering Simulated Axle Load Spectra [Report] : PhD Thesis in the Scientific Area of Civil Engineering, Speciality of Urbanism, Spatial Planning / Faculty of Sciences ; University of Coimbra . - 2014.

Anand K. Transportation Engineering - I [Report] : Lecture Notes on Pavement Design / Department of Civil Engineering ; G Pullaiah College of Engineering and Technology. - 2017.

Anderson A. O., Bervell J. A. and Temply S. Impact of Changes in Vehicle Weight Legislation on Pavements in Alberta [Report]. - 1992.

Anupaju S. Design of Flexible Pavement by Semi Empirical Method [Online] // The Constructor. - <https://theconstructor.org/transportation/flexible-pavement-design-semi-empirical-method/14796/>.

Anupaju S. Flexible Pavement Design by California Bearing Ratio (CBR) Method [Online] // The Constructor. - <https://theconstructor.org/transportation/flexible-pavement-design-cbr-method/11442/>.

Anupaju S. Flexible Pavement Design by Group Index Method [Online] // The Constructor. - <https://theconstructor.org/transportation/flexible-pavement-design-group-index-method/11163/>.

ARC - Asphalt Research Consortium Free Softwares [Online] // ARC - Asphalt Research Consortium. - <http://www.arc.unr.edu/Software.html>.

Armando O. and Jackson G. Construction Cost Analysis Related to the Mechanistic Design of Pavements with Different Fatigue Models [Journal]. - 2015. - Vol. No. 30. - pp. 177 - 188.

Arnold G. [et al.] The Relationship Between Vehicle Axle Loadings and Pavement Wear on Local Roads [Report] : New Zealand Transport Agency Research Report 603. - Wellington : NZ Transport Agency, 2017. - ISSN: 1173 - 3764 (electronic) / ISBN: 978 - 1 - 98 - 851202 - 0 (electronic).

Ashtiani R. S. [et al.] Characterization and Quantification of Traffic Load Spectra in Texas Overweight Corridors and Energy Sector Zones: Final Report [Report] : Technical Report: 0 - 6965 - 1 / The University of Texas at El Paso. - Austin : [s.n.], 2019.

Aslam U. [Online] // Slide Share. - 2019. - <https://www.slideshare.net/03157999/group-index-method>.

Austroroads Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Fourth Edition [Book]. - Sydney : Austroroads Ltd, 2017. - ISBN 978 - 1 - 925854 - 69 - 5.

Austroroads Guide to Pavement Technology, Part 2: Pavement Structural Design [Book]. - Sydney : Austroroads Ltd, 2012. - ISBN 978 - 1 - 921991 - 11 - 0.

Austroroads Pavement Design, Guide to Pavement Technology Parts 2 and 4C [Report]. - Sydney : Austroroads Ltd, 2018.

Battelle Team Pavements and Truck Size and Weight Regulations, Working Paper 3 [Report] : Comprehensive Truck Size and Weight (TS & W). - Ohio : [s.n.], 1995.

Beer M. De [et al.] Load Equivalency Factors (LEFs) for Abnormal Vehicles (AVs) and Mobile Cranes in South Africa Based on the Mechanistic - Empirical (M - E) Design Methodology [Report] : Proceedings of the 28th Southern African Transport Conference . - 2009.

Bekele A. Implementation of the AASHTO Pavement Design Procedures into MULTI - PAVE [Report] : Master Degree Project / Department of Civil and Architectural Engineering ; Royal Institute of Technology. - Stockholm : Division of Highway and Railway Engineering, 2011. - ISSN: 1650 - 867X.

Boile M. [et al.] Infrastructure Cost Attributable to Commercial Vehicles [Report] : Final Report, FHWA NJ - 2001 - 030 / Department of Civil & Environmental Engineering ; Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT). - 2001.

Bradley A. and Thiam P. M. Analysis of Car and Truck Pavement Impacts [Report] : Info Type. - [s.l.] : FPInnovations , 2018.

Bradley A. H. and Thiam P. M. Assessing the Impacts of Proposed High - Efficiency Log Truck Configurations on Ontario Pavements [Report]. - 2021.

Bradley A. H. and Thiam P. M. New Load Equivalency Equations Account for Steering Axle Tire Size [Journal] // Vehicle Weights & Dimensions Task Force Meeting. - 2020.

Bradley A. H. and Thiam P. M. Predicted Pavement Damage from Widebase Steering Tires, A Methodology to Estimate Widebase Steering Tire Load Equivalency [Report] : Technical Report No. 12. - [s.l.] : FPInnovations, 2020.

Bradley A. H. and Thiam P. M. Use of a Newly Developed Methodology for Estimating Widebase Steering Tire ESALs to Predict Pavement Damage from 9x Log Trucks [Report]. - 2020.

Braja M. D. Principles of Geotechnical Engineering [Book]. - [s.l.] : Cengage Learning, 2010. - Seventh .

Bratina L. Designing of Asphalt Pavements on Parking Lots [Report] : Graduation Thesis No.: 3282/PS / Faculty of Civil and Geodetic Engineering ; University of Ljubljana . - Ljubljana : [s.n.], 2013.

Carvalho R. L Mechanistic - Empirical Design of Flexible Pavements: A Sensitivity Study [Report] : Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science / Department of Civil and Environmental Engineering ; University of Maryland. - 2006.

Chandra S. Concept of Equivalent Single Wheel Load and Equivalent Single Axle Load [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=9Nou2Z8DrJU>.

Chandra S. Vehicle Damage Factor, How to Determine VDF for Pavement Design [Online] // YouTube. - https://www.youtube.com/watch?v=el7_fDkR_cM.

Chastain E. and Schwartz D. R. AASHO Road Test Equations Applied to the Design of Bituminous Pavements in Illinois [Report]. - 1965.

Chhabra S. [Online] // Modern Civilians. - 2018. - <https://moderncivilians.blogspot.com/2018/02/group-index-method-construction-of.html>.

Choubane B. and Greene J. Accelerated Pavement Testing: Celebrating over 100 Years of Innovation and Economic Benefits [Journal]. - 2019.

Civil Concept California bearing ratio test (CBR) – Procedure, Formula, and Significance [Online] // Civil Concept. - <https://www.civilconcept.com/california-bearing-ratio-test/>.

Civilinear Classes California Resistance Value (CRV) Method | Design of Flexible Pavement | Highway Engineering [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=pmFS13G5sdU>.

Clary L. An Examination of the Affect of Axle Spacing [Report] : A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science / Department of Civil Engineering ; University of Calgary. - Calgary : [s.n.], 2010.

Clinker Pavers Planning, Design and Construction of Surfaces with Original Clinker Pavers [Report] : Technical Information. - Berlin : Pflaster Klinker, 2018.

COLTO - Committee of Land Transport Officials TRH - Technical Recommendations for Highways, Draft TRH4 - Structural Design of Flexible Pavements for Interurban and Rural Roads [Report]. - Pretoria : Department of Transport, 1996. - ISBN: 1 - 86844 - 218 - 7.

COST - European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research COST Action CA17133, Implementing Nature - Based Solutions for Creating a Resourceful Circular City [Report] : Report on the State - of - the - Art and Existing Case Studies, Deliverable 2 . - 2019.

COST - European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research and European Commission Directorate General Transport COST 334, Effects on Wide Single Tyres and Dual Tyres [Report] : Final Report of the Action. - [s.l.] : Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

COST - European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research and European Commission Directorate General Transport COST 333, Development of New Bituminous Pavement Design Method [Report] : Final Report of the Action. - [s.l.] : Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999. - ISBN: 92 - 828 - 6796 - X.

COTO - Committee of Transport Officials TRH - Technical Recommendations for Highways, TRH27, South African Manual for Permitting Services in Road Reserves [Report]. - Pretoria : The South African National Roads Agency Limited, 2012.

CSIR - Council of Scientific & Industrial Research and Roads and Transportation Technology The Damaging Effects of Overloaded Heavy Vehicles on Roads, Fourth Edition [Report]. - Pretoria : Department of Transport, 1997. - ISBN: 1 - 86844 - 285 - 3 .

CSRA - Committee of the State Road Authorities TRH - Technical Recommendations for Highways, Draft TRH16, Traffic Loading for Pavement and Rehabilitation Design [Report]. - Pretoria : Department of Transport, 1991. - ISBN: 1 - 874844 - 46 - 1.

Darter M. I. Impacts of Research, Practice, and Teaching on Pavement Engineering [Report] : Pavement Conference / NRR - National Road Research Alliance . - 2016.

Davis W. C. and Jones W. G. Flexible Pavement Design by the Group Index Method [Report] : Research Report / Missouri State Highway Department. - Missouri : HRB - Highway Research Board, 1954. - pp. 40 - 50. - Issue Number: 16:B.

Department of Human Settlements Section 1: Transportation and Road Pavements, The Neighbourhood Planning and Design Guide [Report] / Human Settlements. - 2019. - ISBN: 978 - 0 - 6399283 - 2 - 6.

Destafney T. M. CBR Design of Flexible Airfield Pavements with Case Study [Report]. - 1985.

DOT - U.S Department of Transportation FHWA - Federal Highway Administration Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual, Chapter 3.0 Geotechnical Issues In Pavement Design And Performance (continued) [Online] // FHWA DOT. - <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/03b.cfm>.

DOT - U.S Department of Transportation FHWA - Federal Highway Administration Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual, Chapter 5.0 Geotechnical Inputs For Pavement Design (continued) [Online] // FHWA DOT. - <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/05b.cfm>.

El - Badawy S. M. and Kamel M. A. Assessment and Improvement of the Accuracy of the Odemark Transformation Method [Journal] // International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies. - 2011. - Issue: 1 : Vol. No. 6. - pp. 105 - 110. - ISSN: 2230 - 7818.

El - Hamrawy S. A. and El - Maaty A. I. A. Effect of Excess Axle Loads and High Tire Pressures on Flexible Pavement Performance [Journal] // Engineering Research Journal. - 2012. - Issue: 4 : Vol. No. 35. - pp. 393 - 389 .

Erlingsson S. A New Software for Structural Design of Pavements [Report] / The Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). - Linköping : [s.n.], 2021.

Erlingsson S. Characterization of Heavy Traffic on the Swedish Road Network [Report] : 11th International Conference on Asphalt Pavement. - Tokyo : International Society for Asphalt Pavements (ISAP), 2010. - ISBN: 978 - 4 - 88950 - 713 - 3.

Evensen R. Axle Loads; Equivalent Axles or Load Spectrum? [Report] : Joint Nordic / Baltic Symposium on Pavement Design and Performance Indicators. - 2008.

Farooqi M. A. Airport Pavement Design, Airport Classification, and Runway Pavement Design using Canadian Department of Transport Method [Report].

FGSV - Road and Transport Research Association Guidelines for the Standardisation of Pavement Structures of Traffic Areas, R1, RStO 12 [Book]. - Cologne : FGSV Verlag GmbH, 2012. - ISBN: 978 - 3 - 86446 - 021 - 0.

Finney E. A. Report on Maryland Road Test One - MD [Report] : Report No. 159 / State Highway Department . - 1951.

Fonte E. [Online] // Slide Share. - 2015. - <https://www.slideshare.net/rededdie/pavement-design-group-9>.

Geotechnical Aspects of Pavements Reference Manual [Online] // FHWA DOT. - <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/05037/03b.cfm>.

Gierhart D. [Online] // Slide Share. - 2017. - <https://slideplayer.com/slide/11979460/>.

Gilchrist C. W. [Online] // The Canadian Encyclopedia. - 2006. - <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/transportation-association-of-canada>.

Gillmann R. Axle Spacing and Load Equivalency Factors [Journal] // Transportation Research: Record Journal of the Transportation Research Board. - [s.l.] : TRB - Transportation Research Record, 1999.

Global Road Technology Equivalent Standard Axle - First Principles [Online] // Global Road Technology. - <https://globalroadtechnology.com/equivalent-standard-axle-first-principles/>.

Government of Nepal and Ministry of Physical Infrastructure and Transport Road Transport Safety and Axle Control Study in Nepal, Part B: Axle Load Control [Report] : Nepal India

Regional Trade And Transport Project (NIRTTP) / Department of Transport Management. - 2015.

Gribble M. and Patrick J. Adaptation of the Austroads Pavement Design Guide for New Zealand Conditions [Report] : Land Transport New Zealand Research Report 305. - [s.l.] : Land Transport New Zealand, 2008. - ISSN 1177 - 0600 / ISBN: 0 - 478 - 28717 - 8.

Guclu A. Sensitivity Analysis of Rigid Pavement Design Inputs Using Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide [Report] : A Thesis Submitted to the Graduate Faculty in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science / Iowa State University . - Ames : [s.n.], 2005.

H. P. van Tonder, Hasluck J. P. and Wium D. J. W. The South African Heavy Vehicle Load Limit Study [Report]. - Pretoria : [s.n.], 1992. - pp. 413 - 417. - ISBN: 07277 - 1903 - 3.

Hajek J. J. and Agarwal A. C. Influence of Axle Group Spacing on Pavement Damage [Report]. - [s.l.] : Transportation Research Record, Issue Number: 1286, Transportation Research Board, 1990. - pp. 138 - 149. - ISSN: 0361 - 1981.

Hajek J. J. and Selezneva O. I. Estimating Cumulative Traffic Loads, Final Report for Phase 1 [Report] : Final Report No. FHWA - RD - 00 - 054. - Virginia : DOT - U.S Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration, 2000.

Hajek J. J. General Axle Load Equivalency Factors [Report]. - [s.l.] : Transportation Research Record, Issue Number: 1482, Transportation Research Board, 1995. - pp. 67 - 78. - ISSN: 0361 - 1981.

Hesham A. A. and Shiraz D. T. Mechanistic Evaluation of Test Data From LTPP Flexible Pavement Test Sections Volume I: Final Report [Report] : FHWA - RD - 98 - 012. - [s.l.] : ERES Consultants Inc., 1998.

Hjort M., Haraldsson M. and Jansen J. M. Road Wear from Heavy Vehicles - An Overview [Report]. - [s.l.] : NFV Committee Vehicles and Transports, 2008. - ISSN: 0347 - 2485.

HRB - Highway Research Board The AASHO Road Test, Report 3, Traffic Operations and Pavement Maintenance [Report] : Special Report 61C / Highway Research Board. - Washington D.C. : National Academy of Sciences - National Research Council, Publication No. 952, 1962.

HRB - Highway Research Board The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research [Report] : Special Report 61E / Highway Research Board. - Washington D.C. : Highway Research Board, Publication No. 954, 1962.

HRB - Highway Research Board The AASHO Road Test, Report 6, Special Studies [Report] : Special Report 61F / Highway Research Board. - Washington D.C. : National Academy of Sciences - National Research Council, Publication No. 955, 1962.

HRB - Highway Research Board The AASHO Road Test, Report 7, A Summary Report [Report] : Special Report 61G / Highway Research Board. - Washington D.C. : National Academy of Sciences - National Research Council, Publication No. 1061, 1962.

HRB - Highway Research Board, National Research Council and National Academy of Sciences National Academy of Engineering Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures [Report] : National Cooperative Highway Research Program Report 128

(NHCRP - 128). - [s.l.] : National Cooperative Highway Research Program. - ISBN: 0 - 309 - 02009 - 3.

Huang Y. H. Pavement Analysis and Design [Book]. - Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2004. - Second .

Humer B. [Online] // Asphalt Magazine. - <http://asphaltmagazine.com/from-ancient-roads/>.

Inoma J. E., Pavlou D. G. and Zec J. Implementation of Linear Double - Linear, and Nonlinear Fatigue Damage Accumulation Rules for Fatigue Life Prediction of Offshore Drilling Top - Drive Tie - Rods [Conference] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - [s.l.] : IOP Publishing Ltd, 2019.

International Society for Concrete Pavements [Online] // Concrete Pavements. - <https://www.concretepavements.org/2020/10/29/influential-1920s-road-test-conducted-in-illinois/>.

International Society for Concrete Pavements [Online] // Concrete Pavements. - <https://www.concretepavements.org/2020/11/20/history-1958-1960-aasho-rd-test-encompassed-most-substantive-pavement-research-in-the-20th-century/>.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Flexible Pavements for Low Volume Rural Roads, IRC: SP - 72 - 2015, First Revision [Book]. - New Delhi : Indian Roads Congress, 2016.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Flexible Pavements, IRC: 37 - 1984, First Revision [Book]. - New Delhi : The Indian Roads Congress, 1995.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Flexible Pavements, IRC: 37 - 2001, Second Revision [Book]. - New Delhi : The Indian Roads Congress, 2001.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Flexible Pavements, IRC: 37 - 2012, Third Revision [Book]. - New Delhi : Indian Roads Congress, 2012.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Flexible Pavements, IRC: 37 - 2018, Fourth Revision [Book]. - New Delhi : Indian Roads Congress, 2018.

IRC - Indian Roads Congress Guidelines for the Design of Rigid Pavements for Highways, IRC: 58 - 1988, First Revision [Report]. - New Delhi : The Indian Roads Congress, 1991.

Jain S., Yoshi Y. P. and Goliya S. S. Design of Rigid And Flexible Pavements by Various Methods & Their Cost Analysis of Each Method [Journal] // International Journal of Engineering Research and Applications, Research Article. - 2013. - Issue: 5 : Vol. No. 3. - pp. 119 - 123.

Jaskula P. and Rys D. Polish Pavements [Report] / Department of Highway and Transportation Engineering ; Gdansk University of Technology. - Gdansk : [s.n.].

Jendia S. RStO 01, Lecture 4 [Report] / Islamic University of Gaza. - 2011.

Jove F., Argoty J. L. and Cerpa L. Comparison of Damage Factors and Unit Damage of Loaded Trucks along a Road Corridor in Northern Colombia [Report]. - 2020. - pp. 99 - 105. - ISSN: 0798 - 1015.

Judycki J. [et al.] New Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi - Rigid Pavements [Journal]. - Gdansk : EDP Sciences, 2016.

Judycki J. Equivalent Axle Load Factors for Design of Rigid Pavements Derived from Fatigue Criteria [Journal] // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. - [s.l.] : Vilnius Gediminas Technical University, 2011. - Issue: 4 : Vol. No. 6. - pp. 219 - 224. - ISSN: 1822 - 427X.

Kaewdee S., Kanitpong K. and Sawangsuriya A. Determination of Truck Factor from WIM Data in Thailand [Journal] // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. - 2011. - Vol. No. 8.

Kawa I., Zhang Z. and Hudson W. R. Evaluation of the AASHTO 18 - Kip Load Equivalency Concept [Report] : Research Report 0 - 1713 - 1 / The University of Texas at Austin . - Austin : [s.n.], 1998.

Kemp L., Steenkamp A. J. and Nordengen P. Methodology for Estimating the Road Wear Cost of Heavy Vehicles on a Road Network [Report] : International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology. - Rotterdam : [s.n.], 2018.

Khanna S. K. and Justo C. E. G. Highway Engineering [Book]. - Roorkee : Nem Chand & Bros, Civil Lines, 2011. - Ninth .

Kharrazi S. [et al.] Performance Based Standards for High Capacity Transports in Sweden [Report] : FIFFI project 2013 - 03881 - Report 1, Review of Existing Regulations and Literature, VTI Report 859A. - [s.l.] : Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2015. - ISSN: 0347 - 6030.

Kim S. S. [et al.] Determination of Equivalent Single Axle Load (ESAL) Factor for Georgia Pavement Design, Georgia Dot Research Project 18 - 04 [Report] : Final Report / Civil Engineering, College of Engineering ; University of Georgia. - [s.l.] : GDOT - Georgia Department of Transport, 2021.

Kruse C. J. [et al.] A Modal Comparison of Domestic Freight Transportation Effects on the General Public: 2001 - 2019 [Report] = Final Report / Texas A & M Transportation Institute; Texas A & M University System. - Houston : [s.n.], 2022.

Ktari R. [et al.] Effect of Climate Asphalt Pavement Performance Using Two Mechanistic - Empirical Methods [Journal] // International Journal of Pavement Engineering. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2021.

Kulauzovic B. and Jamnik J. Bridge Weight - in - Motion as a Tool for Road Damage Remediation [Report] : World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM). - Milan : [s.n.], 2017.

Kulauzovic B. Izracun Premetnih Obremenitev Cesnih Odsekov s Pomocjo Tehtanja Vozil Med Voznjo [Report] : Diplomsko Delo Visjesolskega Strokovnega Studija. - 2010.

Kumar R. V. and Pavithra M. Experimental Study on Design of Flexible Pavement Using CBR Method [Journal] // International Journal of Engineering Research. - Tirupati : [s.n.], 2016. - Special 1 : Vol. No. 5. - pp. 63 - 68. - ISSN:2319 - 6890 (online), 2347 - 5013 (print).

Kumar S. R. Recent Advancement in Flexible Pavement Design, An Overview on IRC: 37 [Online] // Research Gate. - 2022. - https://www.researchgate.net/publication/360963818_Recent_Advancement_in_Flexible_Pavement_Design_-AN_OVERVIEW_ON_IRC37.

Kumar V. and Bishnoi A. Analysis of Design of a Flexible Pavement with Cemented Base and Granular Subbase [Journal] // International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR). - [s.l.] : Vandana Publications, 2015. - Issue: 4 : Vol. No. 5. - pp. 187 - 192. - ISSN (ONLINE): 2250 - 0758, ISSN (PRINT): 2394 - 6962.

Langer I. A. A. Analysis of Road Damage due to Over Loading [Report] : Thesis / University of Diponegoro. - Semarang : [s.n.], 2011.

LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées and SETRA French Design Manual for Pavement Structures, Guide Technique [Book]. - 1997.

Lechner B. Ballastless Tracks on Asphalt Pavements - Design and Experiences in Germany - [Report] / Munich University of Technology . - Munich : [s.n.], 2005.

Lenner R., Wet D. P. G. de and Viljoen C. Traffic Charecteristics and Bridge Loading in South Africa [Journal] // Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Technical Paper . - 2017. - Issue: 4 : Vol. No. 59. - pp. 34 - 46. - ISSN: 1021 - 2019.

Lishman D. A Critical Evaluation of Road Pricing in South Africa [Report] : Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of Masters of Commerce (Applied Economics) Degree at the University of Cape Town / University of Cape Town. - Cape Town : [s.n.], 2013.

Liu P., Wang D. and Oeser M. Application of Semi - Analytical Finite Element Method to Analyze Asphalt Pavement Response under Heavy Traffic Loads [Journal] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). - 2017. - Issue: 2 : Vol. No. 4. - pp. 206 - 214. - Original Research Paper.

Loizos A., Al - Qadi I. L. and Scarpas T. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields [Book] / ed. Loizos A., Al - Qadi I. L. and Scarpas T.. - [s.l.] : Taylor & Francis Group, 2017. - ISBN: 978 - 1 - 138 - 29595 - 7.

Lusheng Q. and Quoqing W. Semi - Rigid Asphalt Pavement's Premature Failures on Chinese Motorway Network [Report] : Proceedings of the International Conferences on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. - 2019.

Maadani O. Evaluation of the AASHTO Mechanistic Empirical Pavement Design Guide: An Experimental and Analytical Investigation of the Performance of Flexible Roads [Report] : A thesis submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy / Carleton University. - Ottawa : [s.n.], 2015.

Malovrh A. Prometne Obremenitve Voziscne Konstrukcije [Report] : Dipomska Naloga / Fakulteza za Gradbenistvo in Geodezijo ; Univerza v Ljubjani. - Ljubjana : [s.n.], 2009.

Mathew T. V. Civil iitb [Online] // Flexible pavement design, Lecture Notes in Transportation Systems Engineering . - 2019. - https://www.civil.iitb.ac.in/~vmtom/nptel/409_InTse/web/web.html.

Mathew T. V. Flexible Pavement Design, Lecture Notes in Transportation Systems Engineering [Online] // Civil iitb. - 2019. - https://www.civil.iitb.ac.in/~vmtom/nptel/409_InTse/web/web.html.

Mathew T. V. IRC Method of Design of Flexible Pavements, Lecture Notes in Transportation Systems Engineering [Online] // Civil IITB. - 2009. - https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100_LnTse/410_InTse/plain/plain.html.

Medani T. O. and Molenaar A. A. A. Estimation of Fatigue Characteristics of Asphaltic Mixes Using Simple Tests [Journal]. - [s.l.] : Delft University of Technology, 2000. - Issue: 3 : Vol. No. 45. - pp. 155 - 165. - ISSN: 0046 - 7316.

Mikulik J., E and Doupal Impact of Heavy Vehicles on European Roads [Report] / Transport Research Centre. - Brno : [s.n.], 2005.

Ministero Delle Infrastrutture e Della Mobilita [Report] : Relazione Sulla Pavimentazione Stradale. - 2016.

Ministry of Transportation Materials Engineering and Research Office Pavement Design and Rehabilitation Manual [Book]. - Ontario : Materials Engineering and Research Office, Ministry of Transportation, 2013. - Second. - ISBN: 978-1 - 4435 - 2872 - 6 (PRINT) / 978 - 1 - 4435 - 2873 - 3 (PDF).

Ministry of Transportation and Highways Pavement Design Standards [Report] : Technical Circular T - 9/95 / Geotechnical and Materials Engineering Branch. - Province of British Columbia : [s.n.], 1995.

Mostafa A. K. A. and Reinau K. H. Evaluating the Effects of the A - Double Vehicle Combinations if Introduced to a Line - Haul Freight Transport Network [Journal]. - [s.l.] : Sustainability, 2021. - Issue: 15 : Vol. No. 13. - ISSN: 2071 - 1050.

Muhammet A. and Braimah S. Verification of Pavement Deformation Prediction Models [Report] : Master's Thesis in the Master's Programme Geo and Water Engineering / Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Geo Engineering, Road and TRAFFIC Group ; Chalmers University of Technology. - Göteborg : [s.n.], 2010.

Nair A. M. Question paper, IAT - II [Report] / CMR Institute of Technology. - Bengaluru : [s.n.], 2019.

Nanjundaswamy P. Pavement Design Data Handbook [Report] / Department of Civil Engineering ; Sri Jayachamarajendra College Of Engineering. - Mysore : [s.n.], 2011.

Neaylon K. Incorporating Heavy Vehicles Into Seal Designs [Report] : 11th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA). - Sun City : [s.n.], 2015.

Neaylon K. L. The Effects of Heavy Vehicle Single, Tandem and Tri - Axles on Sprayed Seal Wear in Australia [Report] : A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy / University of South Australia . - Melbourne : [s.n.], 2017.

Njock. P. G. A. and Yueguang L. Comparative Study of French and Chinese Asphalt Pavement Design Methods [Online] // Sci Alert. - 2015. - <https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2015.923.928>.

Nordengen P. A. The Development and Evaluation of a Performance - Based Standards Approach for Regulating the Use of Heavy Vehicles in South Africa [Report] : Submitted in fulfillment of the requirement for the degree of PhD / College of Agriculture, Engineering and Science ; University of KwaZulu - Natal. - 2013.

North Carolina Department of Transportation Modifications to the April 2000 Interim Pavement Design Procedure [Report]: Interim Pavement Design Procedure with Modifications List. - 2007.

NZ Forest Road Engineering Manual 6.1 Traffic Loading [Online] // NZ Forest Road. - <https://docs.nzfoa.org.nz/live/nz-forest-road-engineering-manual/6-pavement-design-subgrade-preparation-pavement-construction/6.1-traffic-loading/>.

Odongo J. K. Projected Flexible Road Pavement Performance of Nairobi - Thika Superhighway in Kenya [Report] : A Thesis Submitted in Partial Fulfilment for the Degree of Master of Science in Civil Engineering (Transportation Engineering) / University of Nairobi, School of Engineering. - 2018.

Ojha K. N. Flexible Pavement Thickness (A Comparative Study Between Standard and Overloading Condition) [Journal] // American Scientific Research Journal for Engineering, Tehcnology, and Sciences (ARSJETS). - Lalitpur : [s.n.], 2019.

Pais J. C. [et al.] A Model for Equivalent Axle Load Factors, International Journal of Pavement Engineering [Journal] // International Journal of Pavement Engineering. - [s.l.] : Taylor & Francis, 2014. - Issue: 10 : Vol. No. 16. - pp. 881 - 893. - ISSN: 1029 - 8436.

Panaro M. Progetto Di Pavimentazioni Semigrade con Fondazione in Misto Cementato [Report] : Tesi di Laurea Magistrale / Politecnico di Torino. - Torino : [s.n.], 2018.

Parsons T. J., Transportation Research Committee and DOT - U.S Department of Transportation FHWA - Federal Highway Administration Pavement Damage Attributable to Four Axle Single Unit Trucks, TRC 8804 [Report] : Final Report. - 1989.

Pavement Design [Online] // Civilax4u. - 2018. - <http://civilax4u.blogspot.com/2018/12/pavement-design.html>.

Pavement Interactive 1993 AASHTO Flexible Pavement Structural Design [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/1993-aashto-flexible-pavement-structural-design/>.

Pavement Interactive AASHTO Road Test [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/aashto-road-test/>.

Pavement Interactive California Bearing Ratio [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/california-bearing-ratio/>.

Pavement Interactive Equivalent Single Axle Load [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/equivalent-single-axle-load/>.

Pavement Interactive Flexible Pavement ESAL Equation [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/flexible-pavement-esal-equation/>.

Pavement Interactive Resistance Value [Online] // Pavement Interactive. - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/resistance-value/>.

Pellinen T. K. [et al.] Fatigue Transfer Functions: How Do They Compare? [Journal]. - [s.l.] : Transportation Research Board, 2004. - Issue: 1896. - pp. 77 - 87. - ISSN: 0361 - 1981.

Pereira P. and Pais J. Main Flexible Pavement and Mix Design Methods in Europe and Challenges for the Development of an European Method [Journal] // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English). - [s.l.] : Elsevier B.V, 2017. - pp. 316 - 346.

Petho L. P9 Cost - Effective Design of Thick Asphalt Pavements: High Modulus Asphalt Implementation [Report] : Project No. 007161. - [s.l.] : National Asset Centre of Excellence (NACOE), 2014.

Praba M., Lokeshwaran K. and Kumar S. R. An Optimum Design Approach for Design [Journal] // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). - Chennai : IAEME Publication, 2020. - Issue: 3 : Vol. No. 11. - pp. 146 - 157. - ISSN Print: 0976 - 6308, ISSN Online: 0976 - 6316.

Prasada Rao M. M. K. V. Study of Axle Load Spectrum on Some Identified Highways Using Alternative Incremental Analysis [Report] : A Dissertation / Department of Civil Engineering ; University of Roorkee. - Roorkee : [s.n.], 1998.

Queensland Government Guide to Traffic Impact Assessment [Report] : Practice Note: Pavement Impact Assessment / Department of Transport and Main Roads . - 2018.

Republika Slovenija Ministrstvo za Promet TSC: 06.511: 2009, Prometne Obremenitve Dolocitev in Razvrstitev [Report] : Tehnična Specifikacija za Javne Ceste . - Ljubljana : [s.n.], 2009.

Reddy B. J. Transportation Engineering [Report] : Lecture 8 / Y.S.R. Engineering College of Yogi Vermana University. - Proddatur : [s.n.], 2020.

Reddy K. S. and Pandey B. B. Analytical Evaluation of Bituminous Overlays on Flexible Pavements [Report] / Department of Civil Engineering ; Indian Institute of Technology . - Kharagpur : Transportation Research Record 1449, 1993. - pp. 218 - 227.

Rica C. R. Comparative Analysis of Various Pavement Design Methods [Report] / Barcelona School of Civil Engineering. - Barcelona : [s.n.], 2015.

Rigid Pavement ESAL Equation [Online] // Pavement Interactive . - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/rigid-pavement-esal-equation/>.

Riou E. Soil Removal and Deposit Fee [Report] : Council Report. - Abbotsford : [s.n.], 2008.

Road Directorate Federation of B & H and Public Company "Republic of SRPSKA Roads" Guidelines for Road Design, Construction, Maintenance and Supervision, Volume 1: Designing, Section 1: Road Designing, Part 7: Road Structural Elements [Report]. - Sarajevo, Banja Luka : [s.n.], 2005.

Road User Charges Review Group An Independent Review of the New Zealand Road User Charging System [Report]. - 2009. - ISBN: 978 - 0 - 478 - 07240 - 2.

Rodin A. and Andersson E. U. Implementation of the Permanent Deformation Model PEDRO for Pavement Structures [Report] : Master's Thesis in the Master's Programme Infrastructure and Environmental Engineering / Department of Civil and Environmental Engineering, Division

of Geo Engineering, Research Group Road and Traffic ; Chalmers University of Technology. - Göteborg : [s.n.], 2017.

Rys D. and Jaskula P. Analysis of Pavement Structure Sensitivity to Passage of Oversized Heavy Duty Vehicle in Terms of Bearing Capacity [Journal]. - Gdansk : IOP Publishing Ltd, 2018. - Vol. No. 356.

Rys D. Contribution of Dynamic Vehicle Loads to Pavement Failure [Journal] // Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields . - Gdansk : Taylor & Francis Group, 2022. - Vol. No. 2. - ISBN: 978 - 1 - 032 - 12049 - 2.

Rys D., Judycki J. and Jaskula P. Determination of Vehicles Load Equivalency Factors for Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi - Rigid Pavement Structure [Journal]. - Gdansk : Elsevier, 2016. - Vol. No. 14. - pp. 2382 - 2391.

Said S. [et al.] Fatigue Life Evaluation of Flexible Pavement [Journal] // International Journal of Pavement Research and Technology. - [s.l.] : Chinese Society of Pavement Engineering, 2011. - Issue: 2 : Vol. No. 4. - ISSN: 1997 - 1400.

Said S. F. [et al.] Prediction of Rutting in Asphalt Concrete Pavements - The PEDRO Model [Report] : VTI Report 1016A. - [s.l.] : Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2020. - ISSN: 0347 - 6030.

SANRAL - South African National Roads Agency Ltd South African Pavement Engineering Manual, Chapter 10: Pavement Design [Book]. - [s.l.] : South African National Roads Agency Ltd, 2013. - ISBN: 978 - 1 - 920611 - 10 - 1.

Santhosh A. [Online] // Studocu. - 2020/2021. - <https://www.studocu.com/in/document/apj-abdul-kalam-technological-university/highway-pavement-design/hpd-module-3-motes-of-hpd-as-per-ktu/34582322>.

Schmidt F., Erlingsson S. and C. van Geem Extensive Infrastructure Design Criteria Review [Report] / Institut Français des Sciences et Technologies des Transports (IFSTTAR). - 2018.

Schwarz C. W. and Carvalho R. L. Implementation of the NCHRP 1-37A Design Guide, Volume 2: Evaluation of Mechanistic - Empirical Design Procedure [Report] : Final Report / Department of Civil and Environmental Engineering ; The University of Maryland. - 2007.

Scott G. Kolob Kanyons Road UT FTNP Zion 13(1) [Report] : Final Geotechnical Design Report. - Utah : [s.n.], 2018.

Sharma S. K. [Online] // Civil Engineering Soft Studies. - 2014. - <https://civilengineering-softstudies.com/80-group-index-method-of-pavement-design.html>.

SHRP - Strategic Highway Research Program and National Research Council Evaluation of the AASHTO Design Equations and Recommended Improvements [Report] : SHRP - P - 394. - Washington D.C. : [s.n.], 1994. - ISBN: 0 - 309 - 05803 - 1.

Singh V. Design of Flexible Pavement: CBR Method Numerical [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=XVEBog418aQ>.

Singh V. Design of Flexible Pavements: California Resistance Value Method [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=EE15Bg-jSag>.

Singh V. Pavement Design: Design of Flexible Pavements: Mcleod Method & Triaxial Method [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=g8hzYMZo3dU&t>.

Singh V. Pavement Design: Methods of Design of Flexible Pavements [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=TYP4KQNxC-O>.

SLOMAN - Henningman S. Company for Consulting and Engineering Ltd Design of Heavy Load Asphalt Pavement [Report]. - 2019.

Smith B. C. [et al.] Development of Truck Equivalent Single - Axle Load (ESAL) Factors Based on Weight - in - Motion Data for Pavement Design in Virginia, Final Report VTRC 09 - R18 [Report] : Research Report. - Charlottesville : [s.n.], 2009.

Soos Z., Toth C. and Boka D. Determination of Load Equivalency Factors by Statistical Analysis of Weight - in - Motion Data [Journal] // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering . - 2016. - pp. 266 - 273. - ISSN: 1822 - 427X / eISSN: 1822 - 4288.

Sounthararajah A. [et al.] Development of New Mechanistic Pavement Design Approach for Cement Stabilized Bases [Report] : Conference Paper. - 2015. - ISBN 978 - 955 - 1411 - 01 - 5.

Southgate H. F. [et al.] Effects of Load Distributions and Axle and Tire Configurations on Pavement Fatigue [Report] : Research Report UKTRP - 85 - 13, Prepared for Presentation to the Second International Conference on Weight - in - Motion. - Atlanta : [s.n.], 1985.

Steenkamp A. J. [et al.] Comparing Dynamic Road Wear of a Performance Based Standards and Baseline Vehicle [Report]. - Johannesburg : [s.n.], 2021.

Tangella S. C. S. R. [et al.] Construction Cost Analysis Related to the Mechanistic Design of Pavements with Different Fatigue Models [Report] : Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures / Institute of Transportation Studies ; University of California . - Berkeley : [s.n.], 1990.

Texas Department of Transportation Construction and Materials Tips [Report]. - [s.l.] : Construction and Bridge Divisions, 2005.

Thogersen F., Busch C. and Henrichsen A. Mechanistic Design of Semi - Rigid Pavements - An Incremental Approach [Report] : Report 138 / Danish Road Institute. - [s.l.] : Road Directorate, Danish Road Institute, 2004. - ISSN: electronic 0909 - 1386 / ISBN electronic: 87 - 91177 - 56 - 1.

Timm D. H., Robbins Mary M. and Tram N. Recalibration Procedures for the Structural Asphalt Layer Coefficient in the 1993 AASHTO Pavement Design Guide [Report] : NCAT Report 14 - 08. - [s.l.] : NCAT - National Center for Asphalt Technology, 2014.

TNZ - Transfund New Zealand Design Traffic Data for the New Zealand Supplement to the Austroads Pavement Design Guide [Report] : Transfund New Zealand Research Report No. 76. - Auckland : Bartley Consultants Ltd, 1997. - ISSN: 1174 - 0574 / ISBN: 0 - 478 - 10534 - 7.

Tooma G. and Prince P. Road Users Charges Review Group [Report] : Engineering Advice / SKM - Sinclair Knight Merz. - [s.l.] : Sinclair Knight Merz Ltd, 2009.

Trafikverket ATB Väg Kapitel C Dimensionering [Book]. - [s.l.] : Trafikverket, 2005.

Trafikverket TRVK Väg [Book]. - [s.l.] : Trafikverket, 2011. - ISBN: 978 - 91 - 7467 - 137 - 7.

Transportation History An Influential 1920s Road Test is Conducted in Illinois [Online] // Transportation History. - <https://transportationhistory.org/2020/10/28/an-influential-road-test-is-conducted-in-illinois/>.

TRB - Transportation Research Board Pavement Lessons Learned from the AASHTO Road Test and Performance of the Interstate Highway System [Report] : Transportation Research Circular E - C118. - Washington D.C. : Transportation Research Board of the National Academies, 2007.

TRB - Transportation Research Board, National Research Council and National Academy of Sciences Transportation Research Record 949, Pavements: Designs for Heavy Vehicles, Computer Simulations and Geogrid Reinforcements [Report]. - Washington D.C. : Transportation Research Board, 1983.

TRB - Transportation Research Board, National Research Council Commission on Sociotechnical Systems and National Academy of Sciences Transportation Research Record 725, Pavement Systems: Assessment of Load Effects, Design, and Bases [Report]. - Washington D.C. : Transportation Research Board, 1979.

University of Trieste Il Progetto Pavimentazioni Flessibili, Capitoli 9, 10 [Report]. - Trieste : [s.n.]. - pp. 212 - 264.

UNR - The University of Nevada UNR Releases 3D - Move Analysis Software [Report] / The University of Nevada. - Reno : [s.n.].

Urbaz E. and Erskine James Project Level Australian Methodology for Flexible Pavement Design [Report]. - Sydney : [s.n.], 2011.

Uz V. E., Saltan M. and Gokalp I. Feasibility of Using 4th Power in Design of Plastic Deformation Resistant Low Volume Roads [Journal] // Advances in Transportation Geotechnics 3, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG). - [s.l.] : Elsevier B.V., 2016. - Vol. No. 163. - pp. 961 - 970.

Vägverket VVTK Väg [Book]. - [s.l.] : Vägverket, 2008. - ISSN: 1401 - 9612.

VCET Civil 15CV833 MCLEOD METHOD OF FLEXIBLE PAVEMENT DESIGN PHD [Online] // YouTube. - <https://www.youtube.com/watch?v=MAdeucu7fV4>.

Wang J., Liu S. and Yu H. S. A Comparison between a Shakedown Design Approach and the Analytical Design Approach in the UK for Flexible Road Pavements [Conference] // Advances in Transportation Geotechnics 3, The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). - [s.l.] : Elsevier B.V., 2016. - Vol. No. 143. - pp. 971 - 978 .

Weidong L. [et al.] Rutting Resistance of Asphalt Overlay with Multilayer Wheel Tracking Test [Journal] // Journal of Wuhan University of Technology- Mater.Sci. Ed.. - Wuhan : [s.n.], 2006. - Issue: 3 : Vol. No. 21.

Wellner F. and Leischner S. The German Empirical - Mechanistic Design System, Part II - Design Approach for Thin Surfaced Pavements [Online] // Doc Player. - 2015. - <http://docplayer.org/111554807-The-german-empirical-mechanistic-design-system-part-ii-design-approach-for-thin-surfaced-pavements.html>.

Wikipedia AASHTO Soil Classification System [Online] // Wikipedia. - https://en.wikipedia.org/wiki/AASHTO_Soil_Classification_System.

Wikipedia SANRAL [Online] // Wikipedia. - <https://en.wikipedia.org/wiki/SANRAL>.

Winter M. [et al.] Design of Flexible Pavements with Cold Recycled Asphalt Bases: Comparison of Five National Approaches [Online] // 5DOK. - 2020. - <https://5dok.org/document/lq5pl37y-design-flexible-pavements-recycled-asphalt-comparison-national-approaches.html>.

Winter M. [et al.] International Pavement Designs with Cold Recycled Material [Report] : Deliverable D5. - [s.l.] : Conference of European Directors of Roads (CEDR), 2020.

Winter M. [et al.] Validation of National Empirical Pavement Design Approaches for Cold Recycled Asphalt Bases [Report]. - [s.l.] : Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 2021. - pp. 87 - 95. - ISBN: 978 - 1 - 032 - 12044 - 7.

Wooltorton F. L. D. Moisture Content and the CBR Method of Design [Report] : Special Report. - [s.l.] : HRB - Highway Research Board, 1958. - pp. 268 - 297.

Yoder E. J. and Witczak M. W. Principles of Pavement Design [Book]. - [s.l.] : Wiley - Interscience Publication, 1975. - Second .

Yousif R. A. and Jameel A. K. Structural Design of Highway, Special Tests for Pavement Design [Report] / Highway and Transportation Engineering ; AI - Mustansiriyah University. - 2019 - 2020.

Zhang Z., Kawa I. and Hudson W. R. Impact of Changing Traffic Characteristics and Environmental Conditions on Pavement Performance [Report] : Technical Report 0 - 1713 - 2 / Center for Transportation Research ; The University of Texas. - Austin : [s.n.], 2000.

Zhang Z., Kawa I. and Hudson W. R. Impact of Changing Traffic Characteristics and Environmental Conditions on Performance of Pavements [Report] / Center for Transportation Research ; The University of Texas at Austin. - Austin : [s.n.], 2005.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. Σημειώσεις για το μάθημα "Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων [Βιβλίο]. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας, 2021.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. Σημειώσεις για το μάθημα "Κατασκευή Οδών" Ενότητα: Υλικά και Δομή [Βιβλίο]. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Εργαστήριο Οδοποιίας, 2021.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. Σημειώσεις για το μάθημα "Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων" [Βιβλίο]. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας, 2021.

Πατριανάκου Α. Συγκριτική Ανάλυση Πραγματικής και Ισοδύναμης Κυκλοφορίας στο Πλαίσιο Αξιολόγησης της Συμπεριφοράς Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων [Εκθεση] : Διπλωματική Εργασία / Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Οδοποιίας ; Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. - Αθήνα : [s.n.], 2022.

Τσούτσουρας Δ. Θ. Σύγκριση Νόμων Αστοχίας της Στρώσης Έδρασης Ευκάμπτων Οδοστρωμάτων [Εκθεση] : Διπλωματική Εργασία. - Αθήνα : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Οδοποιίας, 2020.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π – 1: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 2$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.030	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.608	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	29.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	81.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113	108	97	86	81	82

Πίνακας Π – 2: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 2$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

Πίνακας Π – 3: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 2$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.06	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Πίνακας Π – 4: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 2.5$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
40	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	112	102	79	60	53	55

Πίνακας Π – 5: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 2.5$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	0.004	0.006	0.005	0.000	0.000	0.003
10	0.008	0.013	0.011	0.001	0.007	0.006
12	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.430
18	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
20	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
22	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
24	0.231	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
26	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
28	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
30	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	25.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	37.5	34.4	27.6	22.2	21.3	23.6
76	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7
82	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Πίνακας Π – 6: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 2.5$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
16	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
18	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
24	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
28	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
32	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
34	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
36	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
38	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
40	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
42	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
44	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692
46	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
48	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9
90	17.1	15.8	13.2	11.3	11.6	12.9

Πίνακας Π – 7: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για μονούς άξονες, εξυπηρετικότητα $p_t = 3$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
4	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
6	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
8	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
10	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
12	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
14	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
16	0.594	0.633	0.695	0.693	0.651	0.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50	110	94	61	37	30	32

Πίνακας Π – 8: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για διπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 3$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
6	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
8	0.006	0.011	0.009	0.005	0.003	0.003
10	0.011	0.024	0.020	0.012	0.008	0.007
12	0.019	0.042	0.039	0.024	0.017	0.014
14	0.031	0.066	0.068	0.045	0.032	0.026
16	0.049	0.096	0.109	0.076	0.055	0.046
18	0.075	0.134	0.164	0.121	0.090	0.076
20	0.113	0.181	0.232	0.182	0.139	0.119
22	0.166	0.241	0.313	0.260	0.205	0.178
24	0.238	0.317	0.407	0.358	0.292	0.257
26	0.333	0.413	0.517	0.476	0.402	0.360
28	0.457	0.534	0.643	0.614	0.538	0.492
30	0.616	0.684	0.788	0.773	0.702	0.656
32	0.817	0.870	0.956	0.953	0.896	0.855
34	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
36	1.38	1.38	1.38	1.39	1.38	1.38
38	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
58	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
60	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	8.6
62	16.3	14.2	10.2	7.7	7.8	9.5
64	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
66	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
68	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
70	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
72	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
74	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
76	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
78	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
80	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
82	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
84	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
86	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
88	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
90	92.7	78.8	51.7	32.7	27.4	30.5

Πίνακας Π – 9: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου AASHTO εύκαμπτων οδοστρώματων για τριπλούς άξονες, εξυπηρετικότητας $p_t = 3$

Φορτίο Άξονα (kips)	Δείκτης Δομικής Επάρκειας Οδοστρώματος (SN)					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
8	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
10	0.005	0.008	0.005	0.003	0.002	0.002
12	0.007	0.014	0.010	0.006	0.004	0.003
14	0.011	0.023	0.018	0.011	0.007	0.006
16	0.016	0.035	0.030	0.018	0.013	0.010
18	0.022	0.050	0.047	0.029	0.020	0.017
20	0.031	0.069	0.069	0.044	0.031	0.026
22	0.043	0.090	0.097	0.065	0.046	0.039
24	0.059	0.116	0.132	0.092	0.066	0.056
26	0.079	0.145	0.174	0.126	0.092	0.078
28	0.104	0.179	0.223	0.168	0.126	0.107
30	0.136	0.218	0.279	0.219	0.167	0.143
32	0.176	0.265	0.342	0.279	2.180	0.188
34	0.226	0.319	0.413	0.350	2.790	0.243
36	0.286	0.382	0.491	0.432	0.352	0.310
38	0.359	0.456	0.577	0.524	0.437	0.389
40	0.447	0.543	0.671	0.626	0.536	0.483
42	0.550	0.643	0.775	0.740	0.649	0.593
44	0.673	0.760	0.889	0.860	0.777	0.720
46	0.817	0.894	1.014	1.001	0.920	0.865
48	0.984	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
50	1.18	1.23	1.30	1.31	1.26	1.22
52	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
58	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
60	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
62	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
64	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
66	4.09	3.79	3.25	3.04	3.27	3.58
68	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
70	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
72	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
74	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
76	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
78	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
80	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
82	11.0	9.9	7.4	6.0	6.4	7.7
84	12.3	10.9	8.1	6.5	6.9	8.3
86	13.7	12.1	8.9	7.0	7.4	9.0
88	15.3	13.4	9.8	7.6	8.0	9.6
90	16.9	14.8	10.7	8.2	8.5	10.4

Πίνακας Π – 10: Συντελεστές ισοδυναμίας φορτίου Austroads εύκαμπτων οδοστρωμάτων για μονούς άξονες μονών ελαστικών (SAST), μονούς άξονες διπλών ελαστικών (SADT), διπλούς άξονες μονών ελαστικών (TAST), διπλούς άξονες διπλών ελαστικών (TADT), τριπλούς άξονες διπλών ελαστικών (TRDT)

Φορτίο αξονικής διάταξης (kN)	Αξονική διάταξη				
	SAST	SADT	TAST	TADT	TRDT
10	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.020	0.004	0.003	0.000	0.000
30	0.103	0.020	0.013	0.002	0.001
40	0.324	0.063	0.041	0.008	0.002
50	0.792	0.153	0.100	0.019	0.006
60	1.642	0.316	0.207	0.039	0.012
70	3.043	0.586	0.383	0.072	0.022
80	5.191	1.000	0.653	0.123	0.037
90	8.315	1.602	1.046	0.198	0.060
100	12.673	2.441	1.594	0.301	0.091
110	18.555	3.574	2.334	0.441	0.133
120	26.280	5.063	3.305	0.624	0.189
130	36.197	6.973	4.552	0.860	0.260
140	48.687	9.379	6.123	1.157	0.350
150	64.160	12.360	8.069	1.524	0.461
160	83.057	16.000	10.445	1.973	0.597
170	105.85	20.391	13.312	2.515	0.761
180	133.04	25.629	16.731	3.160	0.957
190	165.16	31.817	20.771	3.924	1.188
200	202.78	39.063	25.501	4.817	1.458
210	246.48	47.481	30.997	5.855	1.773
220	296.88	57.191	37.336	7.053	2.135
230	354.66	68.321	44.602	8.425	2.551
240	420.48	81.000	52.879	9.989	3.024
250	495.06	95.367	62.259	11.760	3.560
260	579.15	111.57	72.834	13.758	4.165
270	673.52	129.75	84.702	16.000	4.844
280	778.98	150.06	97.965	18.505	5.602
290	896.37	172.68	112.73	21.294	6.446
300	1026.6	197.75	129.10	24.387	7.382
310	1170.4	225.47	147.19	27.804	8.417
320	1328.9	256.00	167.12	31.569	9.557
330	1503.0	289.53	189.01	35.704	10.809
340	1693.6	326.25	212.99	40.233	12.180
350	1901.8	366.36	239.17	45.179	13.677