

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Πτυχιακή εργασία

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Στέφανος Παπανδρέου

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Πτυχιακή εργασία

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Στέφανος Παπανδρέου

Σύμβουλος καθηγητής
Κος Ιωάννης Οικονομίδης

Λεμεσός 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Στέφανος Παπανδρέου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κύριο Ιωάννη Οικονομίδα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτήν την εργασία, για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών του κλάδου Πολιτικών Μηχανικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου. Στόχος της είναι, η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαδικασία διαστασιολόγησης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος χρησιμοποιώντας ορισμένες μεθοδολογίες. Συγκεκριμένα, στη μελέτη αυτή γίνεται περιγραφή των μεθόδων: του Ινστιτούτου Ασφάλτου, του AASHTO, της Βρετανικής μεθόδου, της Shell και του Τμήματος Δημοσίων Έργων Κύπρου. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες που αφορούν τη δομή, τη λειτουργία και τις αστοχίες που προκαλούνται σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία διαστασιολόγησης του οδοστρώματος και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό του. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σχεδιαστικά κριτήρια πάνω στα οποία στηρίζεται η κάθε μεθοδολογία για υπολογισμό της δομής του οδοστρώματος. Επίσης, περιγράφεται η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται ανεξαρτήτως μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για να σχεδιαστεί το προτεινόμενο οδόστρωμα. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία διαστασιολόγησης των πέντε μεθόδων που αναφέρθηκαν πιο πριν για τον τελικό σχεδιασμό της διατομής ενός οδοστρώματος. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια πρακτική εφαρμογή των μεθόδων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας κάποια υποθετικά στοιχεία, για έργο που βρίσκεται στο στάδιο της μελέτης. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια συγκριτική κατάσταση των υπολογισμών στην οποία φαίνονται τα υπολογιζόμενα πάχη των στρώσεων που προκύπτουν με τη μεταβολή των παραγόντων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό των στρώσεων. Ταυτόχρονα, γίνεται και μια σύγκριση των εναλλακτικών δομών οδοστρώματος που προκύπτουν από κάθε μέθοδο, χρησιμοποιώντας το κόστος κατασκευής τους ανά τετραγωνικό μέτρο. Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται κάποιες παρατηρήσεις που προέκυψαν από τη σύγκριση των μεθόδων. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την παρούσα μελέτη.

ABSTRACT

This study was conducted as part of the BSc Civil Engineering curriculum in the Cyprus University of Technology. The purpose of this study is to investigate the parameters influencing the design process of a flexible pavement using a variety of methodologies. Specifically, there are descriptions of the following methodologies: the Asphalt Institute, AASHTO, the British method, the Shell method and the Department of Public Works Cyprus method. The first chapter presents some general information regarding the structure, operation and failures resulting in a flexible pavement. The purpose of the second chapter is to describe the factors, which influence the design process of the pavement and to present an analysis of the way, which they are taken into account in the pavement design. The third chapter presents the design criteria, which each methodology is based on for the calculation of the pavement structure. Moreover, this chapter describes the general methodology used regardless of the method that will be used to design the proposed pavement. The fourth chapter describes the design process of the five methods mentioned above in terms of the final design of the section of a road. The fifth chapter aims to illustrate a practical application of the methods discussed in the previous chapter using hypothetical data for a project, which is currently at the design stage. In addition, this chapter presents a comparative statement of the calculations, which shows the calculated thickness of the layers obtained by varying the factors affecting the design of the layers. At the same time, in chapter 5, there is a comparison of alternative pavement structures resulting from each process, using the construction cost per square meter. At the end of this chapter a number of observations are presented which resulted from the comparison of methods. At the end of study presents the conclusions drawn from this study.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xv
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	xvii
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ.....	xviii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xix
1 Οδόστρωμα	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Κατηγορίες Οδοστρωμάτων	1
1.2.1 Εύκαμπτα Οδοστρώματα (Flexible Pavement)	2
1.2.2 Δύσκαμπτα Οδοστρώματα (Rigid Pavement).....	2
1.3 Δομή εύκαμπτου οδοστρώματος	3
1.3.1 Υπέδαφος (Subgrade).....	5
1.3.2 Εξυγιαντική Στρώση (Capping Layer)	6
1.3.3 Υπόβαση (Sub-Base).....	6
1.3.4 Βάση (Base).....	7
1.3.5 Συνδετική Στρώση (Binder Course).....	7
1.3.6 Επιφανειακή Στρώση (Surfacing)	8
1.4 Αστοχίες Εύκαμπτου Οδοστρώματος	8
1.4.1 Ρηγματώσεις (Cracking).....	9

1.4.2	Παραμορφώσεις (Distortion).....	10
1.4.3	Αποσύνθεση (Disintegration).....	10
1.4.4	Λείανση Επιφανειακής Στρώσης.....	11
2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη Διαστασιολόγηση του Οδοστρώματος	12
2.1	Γενικά.....	12
2.2	Κυκλοφοριακός φόρτος.....	12
2.3	Χαρακτηριστικά Υπεδάφους.....	18
2.3.1	Σύσταση Εδάφους	18
2.3.2	Φέρουσα Ικανότητα.....	20
2.3.3	Ποσοστό Υγρασίας.....	21
2.4	Κλιματολογικές Συνθήκες.....	22
2.4.1	Βροχοπτώσεις.....	22
2.4.2	Δράση Παγετού	22
2.4.3	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	22
2.5	Υλικά Οδοστρώματος.....	23
2.5.1	Αδρανή Υλικά	23
2.5.2	Ασφαλτικά Υλικά.....	25
3	Διαστασιολόγηση Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων.....	27
3.1	Γενικά.....	27
3.2	Μεθοδολογίες Διαστασιολόγησης Οδοστρωμάτων	27
3.3	Σχεδιαστικά Κριτήρια	28
3.4	Υπολογισμός Τάσεων – Παραμορφώσεων Οδοστρώματος.....	30
3.4.1	Μονοστρωματικά Συστήματα (Θεωρία Boussinesq)	30
3.4.2	Σύστημα Δύο Στρώσεων (Θεωρία Burmister)	32
3.4.3	Συστήματα Τριών ή Περισσοτέρων Στρώσεων	35
3.5	Διαδικασία Σχεδιασμού.....	37

4	Μέθοδοι Διαστασιολόγησης	39
4.1	Μέθοδος Ινστιτούτου Ασφάλτου	40
4.1.1	Καθορισμός Κυκλοφοριακού Φόρτου	40
4.1.2	Φέρουσα Ικανότητα Υπεδάφους	42
4.1.3	Υλικά Στρώσεων	43
4.1.4	Διαδικασία Διαστασιολόγησης Οδοστρώματος.....	46
4.2	Μέθοδος AASHTO	47
4.2.1	Σχεδιαστικές Μεταβλητές	47
4.2.2	Κριτήριο Συμπεριφοράς ή Απόδοσης Οδοστρώματος.....	51
4.2.3	Ιδιότητες των Υλικών.....	51
4.2.4	Χαρακτηριστικά του Οδοστρώματος	53
4.2.5	Διαστασιολόγηση Εύκαμπτου Οδοστρώματος	54
4.3	Βρετανική Μέθοδος	58
4.3.1	Καθορισμός Κυκλοφοριακού Φόρτου	59
4.3.2	Υπολογισμός Πάχους Στρώσεων	63
4.4	Μέθοδος Shell	68
4.4.1	Κυκλοφοριακός Φόρτος	69
4.4.2	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	71
4.4.3	Υπέδαφος.....	72
4.4.4	Ασφαλτικά Υλικά	73
4.4.5	Διαδικασία Διαστασιολόγησης Οδοστρώματος.....	76
4.5	Μέθοδος Τμήματος Δημοσίων Έργων Κύπρου	81
4.5.1	Χαρακτηριστικά Υλικών Οδοστρώματος	81
4.5.2	Κυκλοφοριακός Φόρτος	82
4.5.3	Φέρουσα Ικανότητα Εδάφους	83
4.5.4	Μεθοδολογία διαστασιολόγησης Οδοστρώματος.....	83

5	Σύγκριση Μεθόδων Διαστασιολόγησης	85
5.1	Διαστασιολόγηση οδοστρώματος – Εφαρμογή μεθόδων.....	85
5.1.1	Δεδομένα υπολογισμού	85
5.1.2	Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του Ινστιτούτου Ασφάλτου	86
5.1.3	Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του AASHTO.....	87
5.1.4	Υπολογισμός οδοστρώματος με τη Βρετανική Μέθοδο	89
5.1.5	Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο της Shell	90
5.1.6	Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του ΤΔΕ Κύπρου.....	91
5.2	Γενική σύγκριση μεθόδων οδοστρωμάτων	92
5.2.1	Σημειώσεις – Επεξηγήσεις Αποτελεσμάτων	93
5.2.2	Γραφική Σύγκριση Προτεινόμενων Οδοστρωμάτων	95
5.3	Οικονομική Σύγκριση.....	101
5.3.1	Σύγκριση κόστους κατασκευής οδοστρωμάτων	102
5.3.2	Γραφική Σύγκριση Κόστους Προτεινόμενων Οδοστρωμάτων.....	104
5.4	Παρατηρήσεις.....	110
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	111
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	118
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	123
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	128

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Μέγιστα αξονικά φορτία σε διάφορες χώρες.....	13
Πίνακας 2-2: Τυπικές κατηγορίες εμπορικών οχημάτων & κατανομή φορτίου (a).....	14
Πίνακας 2-3: Τυπικές κατηγορίες εμπορικών οχημάτων & κατανομή φορτίου (b).....	15
Πίνακας 2-4: Συντελεστές Ισοδυναμίας (ΣΙ).....	17
Πίνακας 2-5: Κατάταξη εδαφών κατά USCS.....	19
Πίνακας 2-6: Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO	20
Πίνακας 4-1: Ποσοστά οχημάτων στη λωρίδα μελέτης.....	41
Πίνακας 4-2: Οριακά ποσοστά για τον καθορισμό σχεδιαστικού μέτρου M_r	43
Πίνακας 4-3: Απαιτήσεις για υλικά βάσης και υπόβασης.....	44
Πίνακας 4-4: Ελάχιστα πάχη ασφαλτικών στρώσεων πάνω σε βάση από ασύνδετα αδρανή	44
Πίνακας 4-5: Επιλογή ασφάλτου.....	45
Πίνακας 4-6: Ελάχιστα πάχη επιφανειακής στρώσης πάνω σε βάση από ψυχρό ασφαλτόμιγμα Τύπου II και III.....	45
Πίνακας 4-7: Ποσοστό κατανομής αξόνων στη λωρίδα μελέτης.....	48
Πίνακας 4-8: Προτεινόμενες περίοδοι ανάλυσης.....	49
Πίνακας 4-9: Επίπεδα αξιοπιστίας, R , ανά κατηγορία οδού	49
Πίνακας 4-10: Συντελεστές αποστράγγισης m_2 , m_3 ,	53
Πίνακας 4-11: Ελάχιστα πάχη στρώσεων	55
Πίνακας 4-12: Συντελεστές καταπόνησης ανά κατηγορία εμπορικών οχημάτων (W).....	60
Πίνακας 4-13: Συντελεστές αθροιστικής κυκλοφορίας	71
Πίνακας 4-14: Δυναμικά μέτρα υπεδάφους, E_3 ή ασύνδετων αδρανών, E_2 (E).....	72
Πίνακας 4-15: Προσδιορισμός σχεδιαστικής τιμής CBR	83
Πίνακας 5-1: Πάχη οδοστρωμάτων με τέσσερις συνδυασμούς τιμών C.B.R. και ITA	93
Πίνακας 5-2: Κόστος οδοστρωμάτων με τέσσερις συνδυασμούς τιμών C.B.R. και ITA.....	103

Πίνακας Γ-1: Φύλλο Εργασίας Α.....	124
Πίνακας Γ-2: Φύλλο Εργασίας Β.....	124
Πίνακας Γ-3: Φύλλο Εργασίας Γ.....	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2-1: Κοκκομετρικές καμπύλες τυπικών εδαφών	18
Διάγραμμα 3-1: Προσδιορισμός επιτρεπόμενης τιμής επιβαλλόμενης τάσης ή παραμόρφωσης από τις προβλεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων	29
Διάγραμμα 4-1: Υπολογισμός συντελεστή αύξησης κυκλοφορίας (G)	61
Διάγραμμα 4-2: Ποσοστό κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης.....	62
Διάγραμμα 4-3: Υπολογισμός πάχους υπόβασης.....	63
Διάγραμμα 4-4: Υπολογισμός πάχους εξυγιαντικής στρώσης.....	64
Διάγραμμα 4-5: Υπολογισμό πάχους ασφαλτικών στρώσεων σε εύκαμπτο οδόστρωμα	65
Διάγραμμα 4-6: Υπολογισμός πάχους βάσεως και ασφαλτικών στρώσεων σε μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα.....	66
Διάγραμμα 4-7: Υπολογισμός συντελεστή μετατροπής (L)	70
Διάγραμμα 4-8: Υπολογισμός συντελεστή στάθμισης (W)	70
Διάγραμμα 4-9: Δυσκαμψία ασφαλτομείγματος Vs δυσκαμψία ασφάλτου (M-1).....	74
Διάγραμμα 4-10: Δυσκαμψίας ασφαλτομείγματος Vs θερμοκρασία ασφαλτομείγματος (M-2)	74
Διάγραμμα 4-11: Κόπωση ασφάλτου για F1 (M-3)	75
Διάγραμμα 4-12: Κόπωση ασφάλτου για F2 (M-4)	75
Διάγραμμα 4-13: Προσδιορισμός παχών στρώσεων οδοστρώματος (HN, No.53).....	76
Διάγραμμα 4-14: Προσδιορισμός παχών στρώσεων οδοστρώματος (TN, No.29)	77
Διάγραμμα 4-15: Υποδιαίρεση στρώσης ασύνδετων αδρανών (HT, No.41).....	78
Διάγραμμα 4-16: Προσδιορισμός παραμέτρου $N^{2/3}/E_3$ (P)	79
Διάγραμμα 4-17: Υπολογισμός ολικού πάχους ασφαλτομείγματος (CT, No1).....	79
Διάγραμμα 5-1: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10 ⁶	95
Διάγραμμα 5-2: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10 ⁶	95

Διάγραμμα 5-3: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10 ⁷	96
Διάγραμμα 5-4: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10 ⁷ ...	96
Διάγραμμα 5-5: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10 ⁶	97
Διάγραμμα 5-6: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10 ⁶	97
Διάγραμμα 5-7: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10 ⁷	98
Διάγραμμα 5-8: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10 ⁷	98
Διάγραμμα 5-9: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων για ITA=10 ⁶	99
Διάγραμμα 5-10: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων για ITA=10 ⁷	99
Διάγραμμα 5-11: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ITA=10 ⁶	100
Διάγραμμα 5-12: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ITA=10 ⁷	100
Διάγραμμα 5-13: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10 ⁶	104
Διάγραμμα 5-14: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10 ⁶	104
Διάγραμμα 5-15: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10 ⁷	105
Διάγραμμα 5-16: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10 ⁷	105
Διάγραμμα 5-17: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10 ⁶	106
Διάγραμμα 5-18: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10 ⁶	106
Διάγραμμα 5-19: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10 ⁷	107

Διάγραμμα 5-20: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10 ⁷	107
Διάγραμμα 5-21: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων για ITA=10 ⁶	108
Διάγραμμα 5-22: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων για ITA=10 ⁷	108
Διάγραμμα 5-23: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ITA=10 ⁶	109
Διάγραμμα 5-24: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ITA=10 ⁷	109
Διάγραμμα A-1: Υπολογισμός πάχους ασφαλτικής στρώσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα για πάχος βάσης 150mm	116
Διάγραμμα A-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος ‘ολικού’ πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα	117
Διάγραμμα B-1: Υπολογισμός Mr Υπεδάφους	119
Διάγραμμα B-2: Συντελεστής στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα (a ₁).....	120
Διάγραμμα B-3: Συντελεστής στρώσεως βάσης από ασύνδετα αδρανή (a ₂)	120
Διάγραμμα B-4: Συντελεστής στρώσεως υπόβασης από ασύνδετα αδρανή (a ₃)	121
Διάγραμμα B-5: Υπολογισμός δομικού αριθμού στρώσης και οδοστρώματος	122
Διάγραμμα Γ-1: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για E ₃ =5x10 ⁷ & ITA=10 ⁶	126
Διάγραμμα Γ-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για E ₃ =5x10 ⁷ & ITA=10 ⁷	126
Διάγραμμα Γ-3: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για E ₃ =10 ⁸ & ITA=10 ⁶	127
Διάγραμμα Γ-4: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για E ₃ =10 ⁸ & ITA=10 ⁷	127
Διάγραμμα Δ-1: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος Τύπου NP2 με C.B.R. υπεδάφους 3-5%	130
Διάγραμμα Δ-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος Τύπου NP2 με C.B.R. υπεδάφους 6-10%	131

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1: Κατανομή φορτίων σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα	2
Σχήμα 1-2: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος	3
Σχήμα 1-3: Τυπική κατασκευαστική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.....	4
Σχήμα 1-4: Ρωγμές τύπου αλιγάτορα	9
Σχήμα 1-5: Παραμόρφωση επιφάνειας κύλισης οδοστρώματος.....	10
Σχήμα 2-1: (α)Συσκευή διεξαγωγή εργαστηριακού ελέγχου CBR και (β) συσκευή πεδίου για έλεγχο CBR	21
Σχήμα 2-2: Εφίδρωση Οδοστρωμάτων	23
Σχήμα 3-1: Σχεδιαστικά κριτήρια εύκαμπτων οδοστρωμάτων	29
Σχήμα 3-2: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq	31
Σχήμα 3-3: Μορφές κατανομής βυθίσεων	32
Σχήμα 3-4: Σύστημα δύο στρώσεων	33
Σχήμα 3-5: Θεωρητική σύγκριση κατανομής κατακόρυφων τάσεων σε μονοστρωματικό και διστρωματικό σύστημα.....	34
Σχήμα 3-6: Γεωμετρική ισοδυναμία διστρωματικού συστήματος κατά Odemark	35
Σχήμα 3-7: Επεξήγηση συμβολισμών σε σύστημα τριών στρώσεων	36
Σχήμα 3-8: Γενική αρχή αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων	38
Σχήμα 4-1: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά Asphalt Institute.....	46
Σχήμα 4-2: Υπολογισμός δομικού αριθμού σε σύστημα πολλαπλών στρώσεων	56
Σχήμα 4-3: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά AASHTO	57
Σχήμα 4-4: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη Βρετανική Μέθοδο HD 26/94	67
Σχήμα 4-5: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά Shell... ..	80

Σχήμα 4-6: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά ΤΔΕ....	84
Σχήμα Δ-1: Μοντέλα οδοστρωμάτων - Τύπου οδοστρώματος NP2.....	129

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

- USCS = Unified Soil Classification System (Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών)
- ASTM = American Society of Testing and Materials (Αμερικάνικη Εταιρεία Ελέγχου Υλικών)
- AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials (Αμερικάνικος Σύνδεσμος Υπηρεσιών Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων)
- CBR = California Bearing Ratio (Καλιφορνιακός δείκτης)
- DBM = Dense Bitumen Macadam (Πυκνό Ασφαλτικό Macadam)
- HDM = Heavy Duty Macadam (Macadam Υψηλής Αντοχής)
- HRA = Hot Rolled Asphalt (Θερμό Κυλινδρούμενο Ασφαλτόμιγμα)
- OGV = Other Good Vehicles
- PSV = Public Service Vehicles
- TRL = Transport Research Laboratory
- TRRL = Transport and Road Research Laboratory
- ITA = Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες
- ESAL = Equivalent Single Axle Load
- ΜΕΘΑ = Μέση Ετήσια Θερμοκρασία Αέρα
- σ-ΜΕΘΑ = Σταθμική Μέση Ετήσια Θερμοκρασία Αέρα
- ΜΜΘΑ = Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία Αέρα
- ΜΕΑ = Μονάδες Επιβατικών Αυτοκινήτων
- ΣΙ = Συντελεστής Ισοδυναμίας
- ΕΟ = Εμπορικά Οχήματα
- LL = Liquidity Limit (όριο υδαρότητας)
- PL = Plasticity Limit (όριο πλαστικότητας)
- SL = Shrinkage Limit (όριο συρρίκνωσης)
- PI = Plasticity Index (δείκτης πλαστικότητας)
- PI = Penetration Index (δείκτης διεισδυτικότητας)
- OEMK = Οδηγός Επίβλεψης Μελετών & Κατασκευών

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

R = Τιμή αντίστασης ή ευστάθειας

K = Μέτρο αντίδρασης

E ή Mr = Μέτρο ελαστικότητας ή επανάκτησης

SN = Δομικός Αριθμός (Structural number)

PSI = Δείκτης Παρούσας Εξυπηρετικότητας (Present Serviceability Index)

Poisson's Ratio = Λόγος πλευρικής (εγκάρσιας) προς την αξονική παραμόρφωση

Δοκιμή Marshall = Δοκιμή κατά την οποία ελέγχεται η συμπεριφορά ενός δοκιμίου ασφαλτικού σκυροδέματος (ευστάθεια) υπό θλίψη

BISAR, DAMA = Ειδικά λογισμικά για υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στο οδόστρωμα

Όριο υδαρότητας = Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία για την οποία το έδαφος μεταπίπτει από τη ρευστή στην πλαστική κατάσταση

Όριο πλαστικότητας = Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία για την οποία το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση

Όριο συρρίκνωσης = Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία κατά την οποία ο όγκος του εδάφους με συνεχιζόμενη ξήρανση παραμένει σταθερός

Δείκτης πλαστικότητας = Περιοχή μεταξύ ορίου υδαρότητας και ορίου πλαστιμότητας

Δείκτης διεισδυτικότητας = Σχέση μεταξύ διεισδυτικότητας και σημείου μάλθωσης για μια άσφαλτο

C_u = Συντελεστής ομοιομορφίας εδάφους

C_c = Συντελεστής καμπυλότητας εδάφους

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Σχεδιασμός του οδοστρώματος και γενικά οι κατασκευές στην Οδοποιία είναι ένα από τα πιο βασικά προβλήματα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι πολιτικοί μηχανικοί σε συνεργασία βέβαια και με άλλους φορείς. Οι προκλήσεις σε αυτόν τον τομέα κατασκευών είναι αρκετές, γιατί οι πλείστες κατασκευές είναι δημόσιες και πρέπει να πληρούν όλες τις προδιαγραφές που πρέπει, για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του κοινού.

Από τα αρχαία χρόνια, πρωτοπόροι στην τεχνική της κατασκευής δρόμων θεωρούνταν οι Ρωμαίοι, λόγω της μεγάλης έκτασης του εγχειρήματος τους σε όλη την Ευρώπη, ακόμη και με τα σημερινά μέτρα σύγκρισης. Αρχικά, οι δρόμοι κατασκευάζονταν καθαρά για στρατιωτικούς σκοπούς και δεν είχαν καμιά οικονομική σημασία για τον απλό κόσμο. Τότε, οι δρόμοι ήταν κατασκευασμένοι από επιλεγμένα υλικά της περιοχής και πλάκες από πέτρες λατομείων. Μετά την πρώτη χιλιετία μ.Χ. άρχισαν να βελτιώνονται οι δρόμοι λόγω της ανάπτυξης του εμπορίου και τα νεότερα χρόνια ακόμα περισσότερο λόγω της χρήσης οχημάτων (Οικονομίδης 2015).

Παρόλο που ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων εξελίχθηκε σταδιακά από τέχνη σε επιστήμη, η εμπειρία συνεχίζει να παίζει σημαντικό ρόλο μέχρι και σήμερα. Ως τις αρχές της δεκαετίας του 1920, το πάχος του οδοστρώματος υπολογιζόταν με βάση την εμπειρία. Το ίδιο πάχος οδοστρώματος χρησιμοποιόταν και σε διαφορετικά τμήματα του δρόμου, έστω και αν μεταβάλλονταν τα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου εδάφους κατά μήκος του δρόμου. Με την πάροδο του χρόνου και την αποκτώμενη εμπειρία, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι από διάφορους παγκόσμιους οργανισμούς, με σκοπό τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους του οδοστρώματος (Yang 2004).

Η δυσκολία στο έργο του μηχανικού είναι ότι πρέπει να βρει τη βέλτιστη λύση στον σχεδιασμό του οδοστρώματος, γιατί πρέπει να κάνει τη σωστή διαστασιολόγηση του οδοστρώματος για να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την αντοχή και τη λειτουργικότητα της κατασκευής και ταυτόχρονα να είναι ένα οικονομικό έργο για όλη τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

1 Οδόστρωμα

1.1 Γενικά

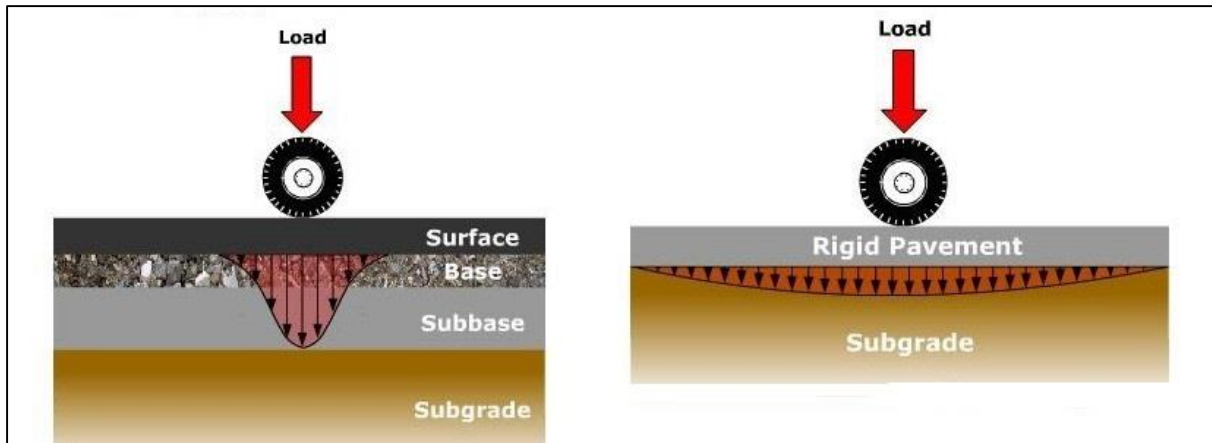
Οδόστρωμα, ορίζεται η κατασκευή που αποτελείται από επάλληλες στρώσεις επιλεγμένων ή επεξεργασμένων υλικών οι οποίες εδράζονται πάνω στο φυσικό έδαφος για τη δημιουργία του δρόμου, γιατί το φυσικό έδαφος δεν είναι ικανό να αντέξει τις καταπονήσεις της κυκλοφορίας και δεν έχει κατάλληλη επιφάνεια για την ομαλή κίνηση των οχημάτων. Έχει ως βασικό σκοπό την εξασφάλιση της απαιτούμενη ποιότητας κύλισης των οχημάτων για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του (Νικολαΐδης 2002).

Το οδόστρωμα για να υλοποιήσει τον σκοπό του θα πρέπει να εξασφαλίζει τα εξής:

- Τη μετάδοση στο έδαφος των φορτίων των κυκλοφορόντων οχημάτων ελαττωμένων σε τέτοιο βαθμό, που να αποτρέπονται ανεπίτρεπτες σε μέγεθος μόνιμες παραμορφώσεις
- Τη δομική επάρκεια του ίδιου του οδοστρώματος στις επαναλαμβανόμενες επιπονήσεις της κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος (αποφυγή ρηγματώσεων, παραμορφώσεων, αποφλοιώσεων)
- Την προστασία του εδάφους θεμελίωσης του οδοστρώματος από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος (παγετός, νερό), οι οποίες θα προκαλέσουν απώλεια φέρουσας ικανότητας και μόνιμες παραμορφώσεις
- Τη διατήρηση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου επιπέδου αντιολισθητικών χαρακτηριστικών της στρώσης κύλισης.

1.2 Κατηγορίες Οδοστρωμάτων

Τα οδοστρώματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα εύκαμπτα και τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Ο διαχωρισμός τους βασίζεται στον βαθμό ελαστικότητας τους σε σχέση με την επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου που ασκείται σε αυτά. Η κύρια διαφορά τους οφείλεται στον τρόπο μεταφοράς των φορτίων στο υπέδαφος. Στο δύσκαμπτο οδόστρωμα το φορτίο κατανέμεται σχεδόν ομοιόμορφα, ενώ στο εύκαμπτο οδόστρωμα το φορτίο που μεταφέρεται στο υπέδαφος τείνει να είναι σημειακό (Σωτηροπούλου 2015).



Σχήμα 1-1: Κατανομή φορτίων σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα

Πηγή: www.ustudy.in

1.2.1 Εύκαμπτα Οδοστρώματα (Flexible Pavement)

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από δύο χαρακτηριστικές ομάδες στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Την ομάδα των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή ή/και σταθεροποιημένα αδρανή, που εδράζεται πάνω στο υπέδαφος και την ομάδα των στρώσεων από ασφαλτομίγματα, που εδράζεται πάνω στην προηγούμενη ομάδα. Η ομαδοποίηση των στρώσεων χρησιμοποιείται ως βάση για την ανάπτυξη όλων των μεθοδολογιών διαστασιολόγησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων (Νικολαΐδης 2002).

Σαν εύκαμπτα οδοστρώματα θεωρούνται:

- i. Τα ασφαλτικά
- ii. Τα κυκλοφοριόπηκτα
- iii. Τα σταθεροποιημένα
- iv. Τα σκυρωτά

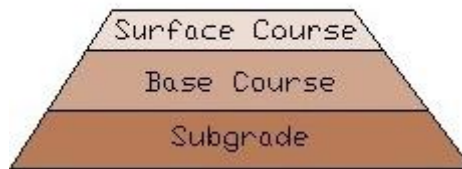
1.2.2 Δύσκαμπτα Οδοστρώματα (Rigid Pavement)

Τα δύσκαμπτα ή άκαμπτα οδοστρώματα, είναι τα οδοστρώματα με μεγάλη ακαμψία που κατ' αποκλειστικότητα κατασκευάζονται από σκυρόδεμα (οπλισμένο ή άοπλο). Λόγω της μεγάλης ακαμψίας που διαθέτουν, σε αντίθεση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι τοπικές καθιζήσεις που πιθανόν να εμφανισθούν κάτω από αυτά δεν αντανακλώνται στην επιφάνεια κύλισης (Νικολαΐδης 2002).

Σαν δύσκαμπτα οδοστρώματα θεωρούνται:

- i. Αυτά που είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα
- ii. Τα λιθόστρωτα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από δύο στρώσεις, την επιφανειακή στρώση και τη βάση.



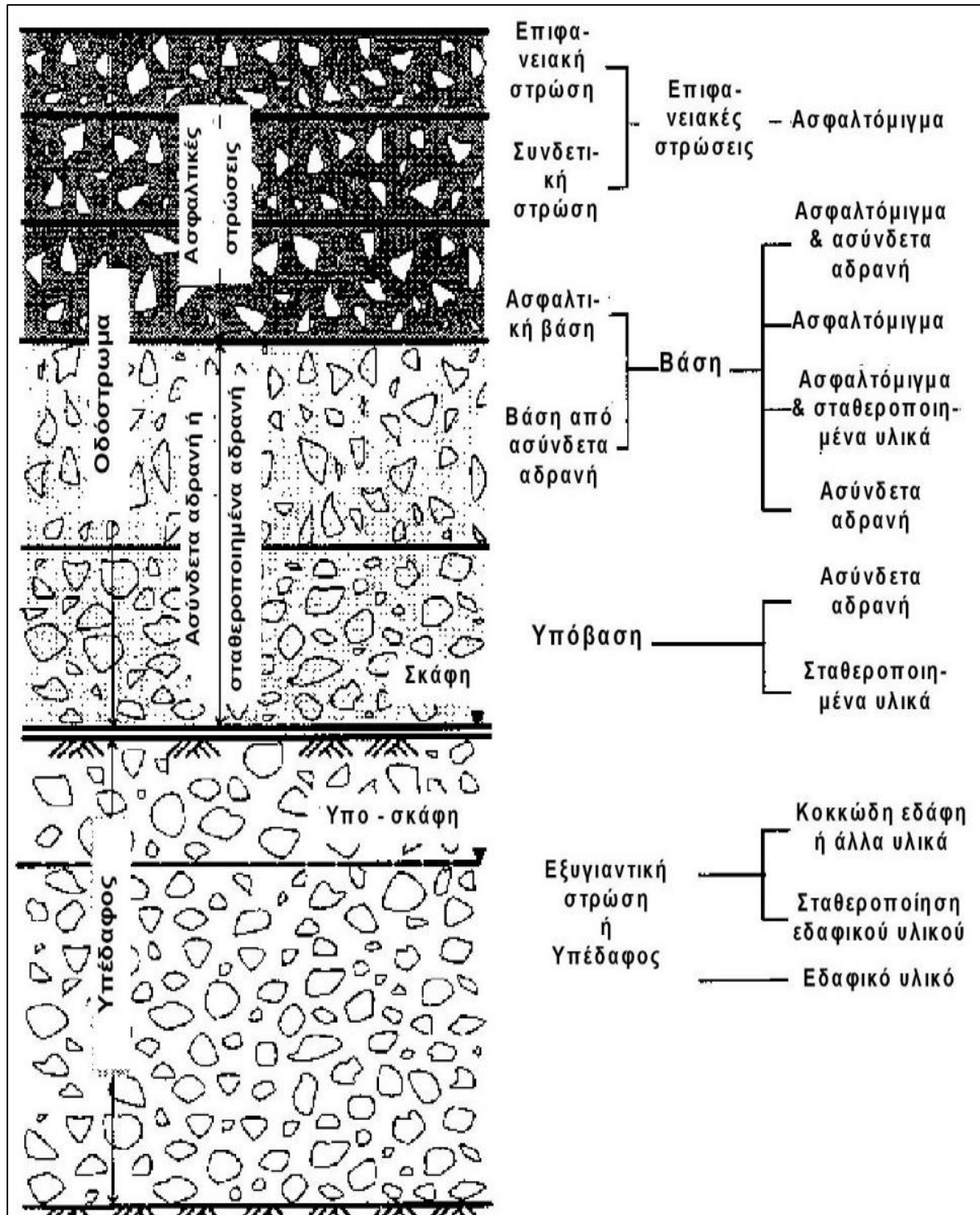
Σχήμα 1-2: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος

Πηγή: www.aboutcivil.org

1.3 Δομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Όπως προαναφέρθηκε προηγουμένως, τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από αδρανή και ασφαλτομίγματα. Κατασκευαστικά όμως διακρίνονται σε τρεις βασικές ομάδες στρώσεων οι οποίες είναι, η επιφανειακή στρώση (ή στρώσεις), η βάση και η υπόβαση. Κάποιες φορές λόγω ύπαρξης πολύ ασθενούς υπεδάφους κατασκευάζεται η εξυγιαντική στρώση μεταξύ υποβάσεως και υπεδάφους. Επίσης, μερικές φορές μεταξύ της επιφανειακής στρώσης και της βάσης τοποθετείται η συνδετική στρώση.

Η μεταφορά των φορτίων στο έδαφος γίνεται διαμέσου των στρώσεων. Για να επιτευχθεί αυτό, το ολικό πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος θα πρέπει να είναι τόσο, ώστε οι δυνάμεις που μεταβιβάζονται σε μεγαλύτερη συνεχώς επιφάνεια να μειωθούν μέχρι να γίνουν ανεκτές από το έδαφος έδρασης του οδοστρώματος. Δηλαδή η ανώτερη στρώση να είναι η πιο ανθεκτική και η κατώτερη η πιο ασθενής και στις ενδιάμεσες στρώσεις να μεταβάλλεται ανάλογα η αντοχή τους.



Σχήμα 1-3: Τυπική κατασκευαστική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

1.3.1 Υπέδαφος (Subgrade)

Το υπέδαφος είναι το έδαφος επί του οποίου κατασκευάζεται το οδόστρωμα. Μπορεί να χρειαστεί να κατασκευασθεί επίχωμα ή όρυγμα και γίνεται με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Αν δεν χρειάζεται να διαμορφωθεί το έδαφος, η επιφάνεια του υπεδάφους ταυτίζεται με την επιφάνεια του φυσικού εδάφους, το οποίο σπάνια συμβαίνει. Η επιφάνεια του υπεδάφους που θα εδρασθεί το οδόστρωμα ονομάζεται πλατφόρμα ή σκάφη έδρασης.

Στο υπέδαφος μας ενδιαφέρει η αντοχή ή η φέρουσα ικανότητα του η οποία είναι καθοριστικής σημασίας στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, γιατί από αυτήν εξαρτώνται τα πάχη των υπερκείμενων στρώσεων. Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους μπορεί να εκφραστεί με τέσσερις διαφορετικούς παραμέτρους:

- i. Καλιφορνιακό δείκτη (CBR)
- ii. Μέτρο αντίδρασης (K)
- iii. Τιμή αντίστασης ή ευστάθειας (R)
- iv. Μέτρο ελαστικότητας (E) ή μέτρο επανάκτησης (Mr)

Η καταλληλότητα του εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί με τα συστήματα κατάταξης εδαφών, ένα από τα οποία είναι το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS) το οποίο είναι αποδεκτό από την Αμερικάνικη Εταιρεία Ελέγχου Υλικών (ASTM) και το σύστημα του Αμερικάνικου Συνδέσμου Υπηρεσιών Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων (AASHTO). Η κατάταξη των εδαφών εξαρτάται και από τα όρια Atterberg (όριο υδαρότητας – LL, όριο πλαστικότητας – PL, όριο συρρίκνωσης – SL).

Επίσης, τα εδάφη χαρακτηρίζονται από τον τρόπο δημιουργίας τους, τα οποία είναι τα:

- I. **Υπολειμματικά εδάφη** (residual), τα οποία δημιουργήθηκαν από πετρώματα που βρίσκονταν κάτω από αυτά λόγω αποσάθρωσης από τις κλιματολογικές συνθήκες
- II. **Ιζηματογενή εδάφη** (sedimentary), τα οποία δημιουργήθηκαν από την καθίζηση των στερεών σωματιδίων σε αιώρηση σε υδάτινο περιβάλλον
- III. **Αιολικά εδάφη** (aeolian), τα οποία δημιουργήθηκαν από τη μεταφορά και την εναπόθεση λεπτόκοκκων υλικών με τη βοήθεια του ανέμου
- IV. **Παγετώδη εδάφη** (glacial), τα οποία δημιουργήθηκαν την εποχή των παγετώνων (Καβαδάς 2006)

1.3.2 Εξυγιαντική Στρώση (Capping Layer)

Η εξυγιαντική στρώση είναι η στρώση που κατασκευάζεται μεταξύ του υπεδάφους και της υπόβασης, όταν το υπέδαφος είναι πολύ ασθενές όπως προαναφέρθηκε. Ο σκοπός της είναι για να βελτιώσει τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και να προετοιμάσει την επιφάνεια στην οποία θα κατασκευασθεί το οδόστρωμα. Η εξυγιαντική στρώση συνήθως χρησιμοποιείται όταν το CBR του υπεδάφους είναι μικρότερο του 5% (Διάγραμμα 4.4) και είναι απαραίτητη όταν είναι μικρότερο του 2,5% και η χρήση της προϋποθέτει τη χρήση υπόβασης. Επίσης, η εξυγιαντική στρώση δεν αποτελεί μέρος του οδοστρώματος και τα υλικά που κατασκευάζεται είναι συνήθως επιλεγμένα κοκκώδη εδαφικά υλικά.

1.3.3 Υπόβαση (Sub-Base)

Η υπόβαση είναι η πρώτη στρώση που χρησιμοποιείται αν κριθεί αναγκαία πάνω στο υπέδαφος ή την εξυγιαντική στρώση και κάνει τις παρακάτω λειτουργίες:

- i. Μεταβιβάζει τα φορτία στο έδαφος
- ii. Εξασφαλίζει την άνετη κυκλοφορία των εργοταξιακών οχημάτων
- iii. Προστατεύει τα υλικά της βάσης από μόλυνση αυτών με εδαφικό υλικό (άργιλος, ιλύς, οργανικά υλικά κτλ.)
- iv. Λειτουργεί ως στρώση αποστράγγισης των υδάτων που εισέρχονται στο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή μετά την κατασκευή του οδοστρώματος
- v. Δρα ως αντιπαγετική προστατευτική στρώση στην περίπτωση που το έδαφος είναι παγόπληκτο
- vi. Δεν επιτρέπει στην υγρασία από το υπέδαφος να ταξιδεύει προς τα πάνω με το σύστημα των τριχοειδών

Τα υλικά με τα οποία κατασκευάζεται η υπόβαση είναι συνήθως κοκκώδη υλικά (αμμοχάλικα). Όταν το υπέδαφος είναι αρκετά καλό (CBR >7%) συνήθως η υπόβαση παραλείπεται και κατασκευάζεται μόνο η βάση από ασύνδετα αδρανή.

1.3.4 Βάση (Base)

Η βάση είναι η βασικότερη δομική στρώση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και κατασκευάζεται μεταξύ του υπεδάφους ή της υπόβασης και των ασφαλτικών επιφανειακών στρώσεων.

Οι λειτουργίες που κάνει είναι οι εξής:

- i. Παρέχει τη βασική δομική στρώση η οποία παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις
- ii. Μειώνει τις κάθετες θλιπτικές τάσεις που εξασκούνται στο υπέδαφος σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορούν να παραλειφθούν από τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και να μην προκαλούν μεγάλες παραμορφώσεις
- iii. Παρέχει στο οδόστρωμα δυσκαμψία και την αντοχή αυτού στην κόπωση
- iv. Παρέχει μια καλή επιφάνεια έτοιμη για να δεχθεί τις επιφανειακές ασφαλτικές στρώσεις
- v. Οι στρώσεις της βάσης από ασύνδετα ή σταθεροποιημένα αδρανή συμβάλουν στην αποτελεσματικότερη συμπίκνωση των υπερκείμενων ασφαλτικών στρώσεων

Τα υλικά με τα οποία κατασκευάζεται η βάση μπορεί να είναι από ασύνδετα αδρανή ή αδρανή με συνδετικό υλικό (άσφαλτο ή τσιμέντο). Συνήθως, οι κάτω στρώσεις είναι από ασύνδετα αδρανή και οι πάνω στρώσεις από ασφαλτόμιγμα. Μπορεί επίσης, μέρος της βάσης να είναι από σκυρόδεμα και η υπόλοιπη βάση από ασφαλτόμιγμα. Με αυτό τον συνδυασμό, το οδόστρωμα χαρακτηρίζεται ως μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα. Τέλος, ένας άλλος συνδυασμός είναι, η βάση κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από ασφαλτόμιγμα.

1.3.5 Συνδετική Στρώση (Binder Course)

Η συνδετική στρώση είναι η ενδιάμεση στρώση μεταξύ του τάπητα κυκλοφορίας και της βάσης και κατασκευάζεται για να παρέχει μια καλή επίπεδη επιφάνεια με τις επιθυμητές κλίσεις επί της οποίας θα διαστρωθεί ο τάπητας κυκλοφορία.

Η συνδετική στρώση δεν πρέπει να έχει μόνιμες παραμορφώσεις, να μη ρηγματώνεται εύκολα και να είναι σχεδόν αδιαπέρατη από το νερό. Σε αρκετές χώρες παραλείπεται γιατί αντικαθίσταται με την ασφαλτική βάση η οποία κάνει τις ίδιες λειτουργίες. Η συνδετική

στρώση είναι απαραίτητη μόνο αν ο τάπητας κυκλοφορίας είναι πορώδης και η ασφαλική βάση είναι μέσης ή ανοικτής υφής.

1.3.6 Επιφανειακή Στρώση (Surfacing)

Η επιφανειακή στρώση ή στρώση κυκλοφορίας είναι η ανώτερη ασφαλική στρώση που έρχεται σε άμεση επαφή με τους τροχούς των οχημάτων και έχει ως σκοπό μια άριστη και ασφαλή επιφάνεια κύλισης. Σε κάποιες χώρες αυτή η στρώση ονομάζεται και φθειρόμενη στρώση (wearing course) εξαιτίας της άμεσης φθοράς που υφίσταται από την κυκλοφορία.

Η επιφανειακή στρώση πρέπει:

- i. Να είναι ανθεκτική στην καταστροφή λόγω κυκλοφορίας και καιρικών συνθηκών
- ii. Να μην έχει μόνιμες παραμορφώσεις λόγω της κυκλοφορίας
- iii. Να έχει αντίσταση στη ρηγμάτωση λόγω των θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών και των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων
- iv. Να παρέχει καλή αντιολισθηρή επιφάνεια κύλισης
- v. Να παρέχει καλή επιπεδότητα
- vi. Να παρέχει επιφάνεια κύλισης με χαμηλό επίπεδο θορύβου
- vii. Να συνεισφέρει στην αντοχή του οδοστρώματος
- viii. Να είναι αδιαπέρατη από το νερό για να μην επιτρέπεται η διείσδυση του νερού στις υποκείμενες στρώσεις, εκτός αν χρησιμοποιείται πορώδους τάπητας

1.4 Αστοχίες Εύκαμπτου Οδοστρώματος

Κάθε οδόστρωμα σχεδιάζεται για να παραλάβει ένα συγκεκριμένο αριθμό αξονικών φορτίων για ένα συγκεκριμένο αριθμό ετών. Η απόδοση του οδοστρώματος μειώνεται σταδιακά λόγω, της ποιότητας κατασκευής, της καταλληλότητας των χρησιμοποιηθέντων υλικών, του κυκλοφοριακού φόρτου, των συνθηκών του περιβάλλοντος και της ορθότητας της μελέτης διαστασιολόγησης του οδοστρώματος (Νικολαΐδης 2002). Οι αστοχίες που εμφανίζονται στα εύκαμπτα οδοστρώματα ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες: τις ρηγματώσεις, τις παραμορφώσεις, τις αποσαθρώσεις και τη λείανση της επιφανειακής στρώσης.

1.4.1 Ρηγματώσεις (Cracking)

Οι μορφές των επιφανειακών ρηγματώσεων ποικίλουν και η έγκαιρη απλή σφράγιση των ρωγμών είναι η ορθότερη και αποτελεσματικότερη συντήρηση.

Οι μορφές των ρηγματώσεων είναι οι εξής:

- i. **Ρωγμές τύπου αλιγάτορα**, οι οποίες σχηματίζουν πολύγωνα κομμάτια όμοια με αυτά του δέρματος του αλιγάτορα
- ii. **Ρωγμές από ανάκλαση**, εμφανίζονται κατά κανόνα σε πρόσθετες ασφαλικές στρώσεις που διαστρώθηκαν στο παρελθόν για αποκατάσταση φθορών του οδοστρώματος και η μορφή που παίρνουν είναι παρόμοιες με τις παλιές ρωγμές που είχε η στρώση που επισκευάστηκε
- iii. **Ρωγμές συρρίκνωσης**, είναι ακανόνιστης μορφής και σχηματίζουν πολύγωνα κομμάτια με οξείες γωνίες
- iv. **Ελικοειδής ρωγμές**, εμφανίζονται με ελικοειδή μορφή κατά μήκος του οδοστρώματος και όχι σε συγκεκριμένη θέση (Γκέκας 2009)



Σχήμα 1-4: Ρωγμές τύπου αλιγάτορα

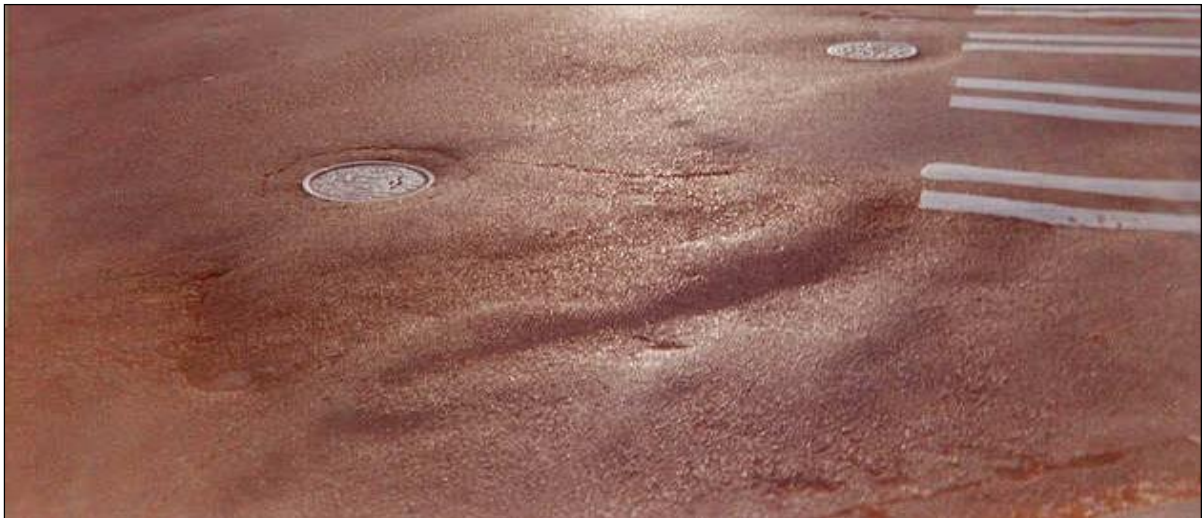
Πηγή: www.blackdiamondpaving.com

1.4.2 Παραμορφώσεις (Distortion)

Οι παραμορφώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι οι φθορές που χαρακτηρίζουν το οδόστρωμα ως μη επίπεδο. Επίσης, αυξάνουν την επικινδυνότητα του δρόμου και μειώνεται η άνεση κατά την οδήγηση. Η συντήρηση των παραμορφώσεων μπορεί να είναι η απλή πλήρωση αυτών με ασφαλτόμιγμα έως την πλήρη αντικατάστασή τους με νέα υλικά.

Οι μορφές των παραμορφώσεων είναι οι εξής:

- i. Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών
- ii. Κυματώσεις
- iii. Τοπικές καθιζήσεις
- iv. Τοπικές διογκώσεις



Σχήμα 1-5: Παραμόρφωση επιφάνειας κύλισης οδοστρώματος

Πηγή: www.pavementinteractive.org

1.4.3 Αποσύνθεση (Disintegration)

Η αποσύνθεση, είναι η θρυμματίση του οδοστρώματος σε μικρά ασύνδετα κομμάτια. Η επισκευή της φθοράς γίνεται με τη χρήση ασφαλτομίγματος και αν δε συντηρηθεί έγκαιρα θα πρέπει να αποκατασταθεί το οδόστρωμα.

Οι κυριότερες μορφές αποσύνθεσης είναι:

- i. Αποκόλληση αδρανών
- ii. Λακκούβες



Σχήμα 1.6: Αποσύνθεση οδοστρώματος

Πηγή: www.pavemaintenance.wikispaces.com

1.4.4 Λείανση Επιφανειακής Στρώσης

Η λείανση της επιφανειακής στρώσης, σε αντίθεση με τους άλλους τύπους φθορών, δεν επιδρά στην επιδείνωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος αλλά στο επίπεδο ασφάλειας και εξυπηρέτησης αυτού.

Η αποκατάσταση της αντιολισθηρότητας της επιφανειακής στρώσης, μπορεί να γίνει με τη διάστρωση διάφορων ασφατομιγμάτων, την εφαρμογή ασφατικής επάλειψης, τη διασπορά προεπαλλειμένων ψηφίδων ή την επαναδημιουργία υφής με μηχανικά μέσα.

2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη Διαστασιολόγηση του Οδοστρώματος

2.1 Γενικά

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, καθορίζει το πάχος της κάθε στρώσης που όλες μαζί συνθέτουν το οδόστρωμα, με σκοπό την παραλαβή και τη μεταβίβαση των φορτίων του κυκλοφοριακού φόρτου στο υπέδαφος.

Ο καθορισμός του πάχους της κάθε στρώσης εξαρτάται από:

- 1) Τον κυκλοφοριακό φόρτο
- 2) Τη λεπτομερή γνώση των χαρακτηριστικών του υπεδάφους
- 3) Τις κλιματολογικές συνθήκες
- 4) Τα υλικά οδοστρώματος

2.2 Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι το μέγεθος και η συχνότητα του επιβαλλόμενου φορτίου, δηλαδή ο αριθμός, το μέγεθος και το είδος των αξόνων των οχημάτων. Αρχικά, κατά τον σχεδιασμό μιας οδού πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αποτίμηση της κυκλοφορίας για να εκτιμηθεί ο μελλοντικός κυκλοφοριακός φόρτος που θα υπάρχει στον νέο δρόμο.

Τα οχήματα ποικίλουν στις διάφορες χώρες, όσο και τα διάφορα οχήματα που κυκλοφορούν στην ίδια χώρα. Τα οχήματα που κυκλοφορούν στον δρόμο είναι ένας συνδυασμός από επιβατικά οχήματα, λεωφορεία, φορτηγά, ρυμουλκά, νταλίκες κτλ. Ο φόρτος και η κατανομή του οχήματος μέσω των αξόνων του και των ελαστικών του είναι άμεσα συνυφασμένο με την καταστροφική ικανότητα του κάθε οχήματος. Στα εμπορικά οχήματα οι άξονες μπορεί να είναι μονοί ή δίδυμοι ή τρίδυμοι. Για την προστασία των οδοστρωμάτων, όλες οι χώρες έχουν θεσπίσει μέγιστα επιτρεπτά βάρη ανά τύπο οχήματος και ανά τύπο άξονα (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2-1: Μέγιστα αξονικά φορτία σε διάφορες χώρες

Χώρα	Μέγιστα επιτρεπτά αξονικά φορτία (τόνοι)			Τρίδυμος
	Μονός άξονας		Δίδυμος	
	Δίχως κίνηση	Με κίνηση		
Αγγλία	9 - 10 ^(α)		16 ή 20 - 26 ^(α)	Δεν καθορίζονται όρια
Αυστραλία	4.6 - 9 ^(α)		9 - 16.5 ^(α)	
Αυστρία	10	10	16	
Βέλγιο	10	13	20	
Γαλλία	13	13	21	
Γερμανία	10	10	16	
Γιουγκοσλαβία	10	10	16	
Δανία	10	10	16	
Ελλάδα	10	13	20	
Ελβετία	10 - 12 ^(α)		18	
ΗΠΑ ^(β)	9	9	15.6	
Ιαπωνία	-	10	20	
Ιρλανδία	10	10.5	11-20	
Ισπανία	13	13	21	
Ιταλία	12	12	19	
Καναδάς	4.5 - 10 ^(α)		16 - 20 ^(α)	
Λουξεμβούργο	10	13	20	
Νορβηγία	10	10	16	
Ολλανδία	10	10	18	
Πορτογαλία	-	10	16	
Σουηδία	10	10	16	
Τουρκία	13	13	19	
Φινλανδία	10	10	16	
Ευρωπαϊκή Ένωση	10	11.5	18	

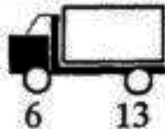
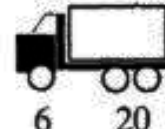
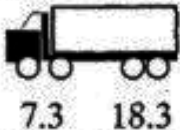
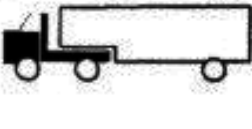
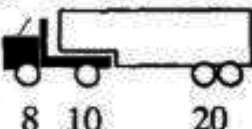
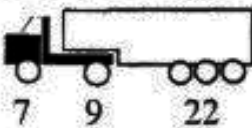
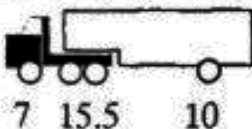
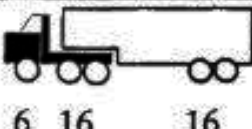
^(α) Εξαρτάται από τον άξονα

^(β) Ενδεικτικά όρια, αλλάζει ελαφρώς από Πολιτεία σε Πολιτεία

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

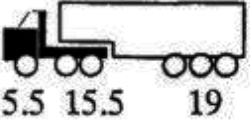
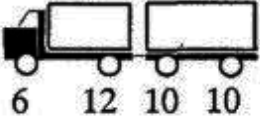
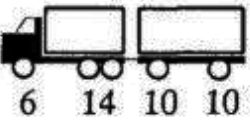
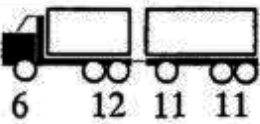
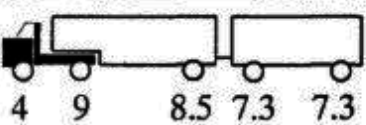
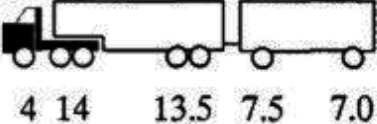
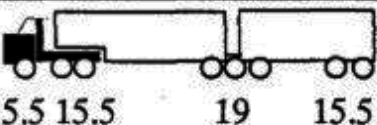
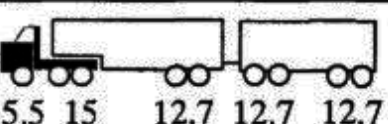
Στους πίνακες 2.2 και 2.3 μπορούμε να δούμε τις τυπικές κατηγορίες οχημάτων και την κατανομή του φορτίου τους.

Πίνακας 2-2: Τυπικές κατηγορίες εμπορικών οχημάτων & κατανομή φορτίου (α)

Τύπος οχήματος	Κατανομή βάρους & σχηματική παράσταση οχήματος(τόννοι)	Μεγ. μικτό βάρος ^(α)
Φορτηγό 2-αξόνων (Τύπος 2) ^(β)	 6 13	(τόννοι) 19 GR 16.3 GB
Φορτηγό 3-αξόνων (Τύπος 3) ^(β)	 6 20	26 GR 24.4 GB 22 USA
Φορτηγό 4-αξόνων (Τύπος 4) ^(β)	 7.3 18.3	25.5 USA 30.5 GB
Ρυμουλκό με ημι- ρυμουλκούμενο (νταλικά) 3-αξόνων (Τύπος 2-S1) ^(β)	 6 13 10	29 GR 24.4 GB
Ρυμουλκό με ημι- ρυμουλκούμενο (νταλικά) 4-αξόνων (Τύπος 2-S2) ^(β)	 8 10 20	38 GR 32.5 GB 35 E.E.
Ρυμουλκό με ημι- ρυμουλκούμενο (νταλικά) 5-αξόνων (Τύπος 2-S3) ^(β)	 7 9 22	38 GB 40 E.E.
Ρυμουλκό με ημι- ρυμουλκούμενο (νταλικά) 4-αξόνων (Τύπος 3-S1) ^{(β)(γ)}	 7 15.5 10	32.5 GB
Ρυμουλκό με ημι- ρυμουλκούμενο (νταλικά) 5-αξόνων (Τύπος 3-S2) ^{(β)(γ)}	 6 16 16	38 GB 36.5 USA 42 E.E

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

Πίνακας 2-3: Τυπικές κατηγορίες εμπορικών οχημάτων & κατανομή φορτίου (b)

Τύπος οχήματος	Κατανομή βάρους & σχηματική παράσταση οχήματος (τόννοι)	Μέγ. μικό βάρος ^(a)
Ρυμουλκό με ημι-ρυμουλκούμενο (νταλικά) 6-αξόνων (Τύπος 3-S3) ^{(β)(γ)}	 5.5 15.5 19	(τόννοι) 40 GR 38 GB 44 E.E.
Φορηγό με ένα ρυμουλκούμενο (συρμός) 4-αξόνων (2-2) ^{(β)(γ)}	 6 12 10 10	38 (32 - 40)
Φορηγό με ένα ρυμουλκούμενο (συρμός) 5-αξόνων (3-2) ^{(β)(γ)}	 6 14 10 10	40 (38 - 44)
Φορηγό με ένα ρυμουλκούμενο (συρμός) 6-αξόνων (3-3) ^{(β)(γ)}	 6 12 11 11	40 (38 - 44)
Νταλικά με ρυμουλκούμενο (συρμός) 5-αξόνων (2-S1-2) ^{(β)(γ)}	 4 9 8.5 7.3 7.3	36.1 USA
Νταλικά με ρυμουλκούμενο (συρμός) 7-αξόνων (3-S2-2) ^{(β)(γ)}	 4 14 13.5 7.5 7.0	46 USA
Νταλικά με ρυμουλκούμενο (συρμός) 8-αξόνων (3-S3-2) ^{(β)(γ)}	 5.5 15.5 19 15.5	55.5 USA
Νταλικά με ρυμουλκούμενο (συρμός) 9-αξόνων (3-S2-4) ^{(β)(γ)}	 5.5 15 12.7 12.7 12.7	58.6 USA

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

Για τον καλύτερο απολογισμό ενός οδοστρώματος, το φορτίο των οχημάτων έχει μετατραπεί σε φορτίο του άξονα. Στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια τη δεκαετίας του 1950, η Αμερικάνικη Ένωση Κρατικών Εθνικών Οδών AASHO εκτέλεσε ένα πείραμα για να καθορίσει τη σχέση μεταξύ της επανάληψης αξονικών φορτίων διαφόρων μεγεθών και συστήματα αξόνων και της απόδοσης διαφόρων οδοστρωμάτων με στρώσεις από διάφορα πάχη και υλικά. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν συμβατικά εμπορικά οχήματα με διαφορετικά αξονικά φορτία και πειραματικά αντιπροσωπευτικά οδοστρώματα.

Το αποτέλεσμα του πειράματος ήταν, να ορισθεί σχεδόν αυθαίρετα ως αντιπροσωπευτικό φορτίο ένας άξονας με δίδυμους τροχούς και φορτίο 18000 lb (8.16 τόνοι) ή 80 kN και ονομάστηκε τυπικός άξονας. Για τον άξονα αυτό θεωρήθηκε ότι με μια διέλευση του προκαλείται φθορά στο οδόστρωμα ίση με μία μονάδα.

Η καταστρεπτική επίδραση των αξονικών φορτίων με μικρότερο ή μεγαλύτερο φορτίο από 80kN εκφράστηκε με ισοδύναμους συντελεστές, μικρότερου ή μεγαλύτερου της μονάδας αντίστοιχα. Με τον καθορισμό αυτών των συντελεστών, δόθηκε η δυνατότητα της έκφρασης και της μετατροπής του κυκλοφοριακού φόρτου με τα διαφορετικά αξονικά φορτία σε μια και μοναδική μεταβλητή, του Ισοδύναμου Τυπικού Άξονα (ΙΤΑ) (Νικολαΐδης 2002).

Για τον καθορισμό των Συντελεστών Ισοδυναμίας (ΣΙ) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$N_t / N_j = (P_j / P_t)^\gamma = a \quad \text{ή} \quad N_t = a * N_j$$

Όπου:

N_t = αριθμός διελεύσεων τυπικού άξονα με φορτίο P_t (=80kN) για να επιφέρει ισοδύναμη φθορά του ίδιου οδοστρώματος

N_j = αριθμός διελεύσεων αξόνων με φορτίο P_j για να προκαλέσει συγκεκριμένη φθορά στο οδόστρωμα

γ = αριθμητική μεταβλητή (παίρνει τιμές από 3.6 - 4.6 αλλά καθιερώθηκε να χρησιμοποιείται ίση με 4)

a = συντελεστής ισοδυναμίας

Οι συντελεστές ισοδυναμίας μπορούν επίσης να ληφθούν από τον πίνακα με τους υπολογισμένους συντελεστές ισοδυναμίας που προέκυψαν από το πείραμα του AASHO (Πίνακας 2.4) για τη μετατροπή μονών, δίδυμων και τρίδυμων αξόνων σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες.

Πίνακας 2-4: Συντελεστές Ισοδυναμίας (ΣΙ)

Βάρος άξονα		Συντελεστές ισοδυναμίας ανά τύπο άξονα		
kN	kips	Μονός	Δίδυμος	Τρίδυμος
4.45	1	0.00002	0.0000	0.0000
8.9	2	0.00018	0.0000	0.0000
17.8	4	0.00209	0.0003	0.0000
26.7	6	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8	0.0343	0.003	0.001
44.5	10	0.0877	0.007	0.002
53.4	12	0.189	0.014	0.003
62.3	14	0.360	0.027	0.006
71.2	16	0.623	0.047	0.010
80.0	18	1.000	0.077	0.017
89.0	20	1.510	0.121	0.027
97.8	22	2.180	0.018	0.040
106.8	24	3.030	0.260	0.057
115.6	26	4.090	0.364	0.080
124.5	28	5.390	0.495	0.109
133.5	30	7.000	0.658	0.145
142.3	32	8.880	0.857	0.191
151.2	34	11.18	1.095	0.246
160.0	36	13.93	1.380	0.313
169.0	38	17.20	1.700	0.393
178.0	40	21.08	2.080	0.487
187.0	42	25.64	2.510	0.597
195.7	44	31.00	3.000	0.723
204.5	46	37.24	3.550	0.868
213.5	48	44.50	4.170	1.033
222.4	50	52.88	4.860	1.220
231.3	52		5.630	1.430
240.2	54		6.470	1.660
249.0	56		7.410	1.910
258.0	58		8.450	2.220
267.0	60		9.659	2.510
275.8	62		10.84	2.850
284.5	64		12.22	3.220
293.5	66		13.73	3.620
302.5	68		15.38	4.050
311.5	70		17.19	4.520
320.0	72		19.16	5.030
329.0	74		21.32	5.570
338.0	76		23.66	6.150
347.0	78		26.22	6.780
356.0	80		29.00	7.450
364.7	82		32.00	8.200
373.6	84		35.30	8.900
382.5	86		38.80	9.800
391.4	88		42.60	10.60
400.3	90		46.80	11.60

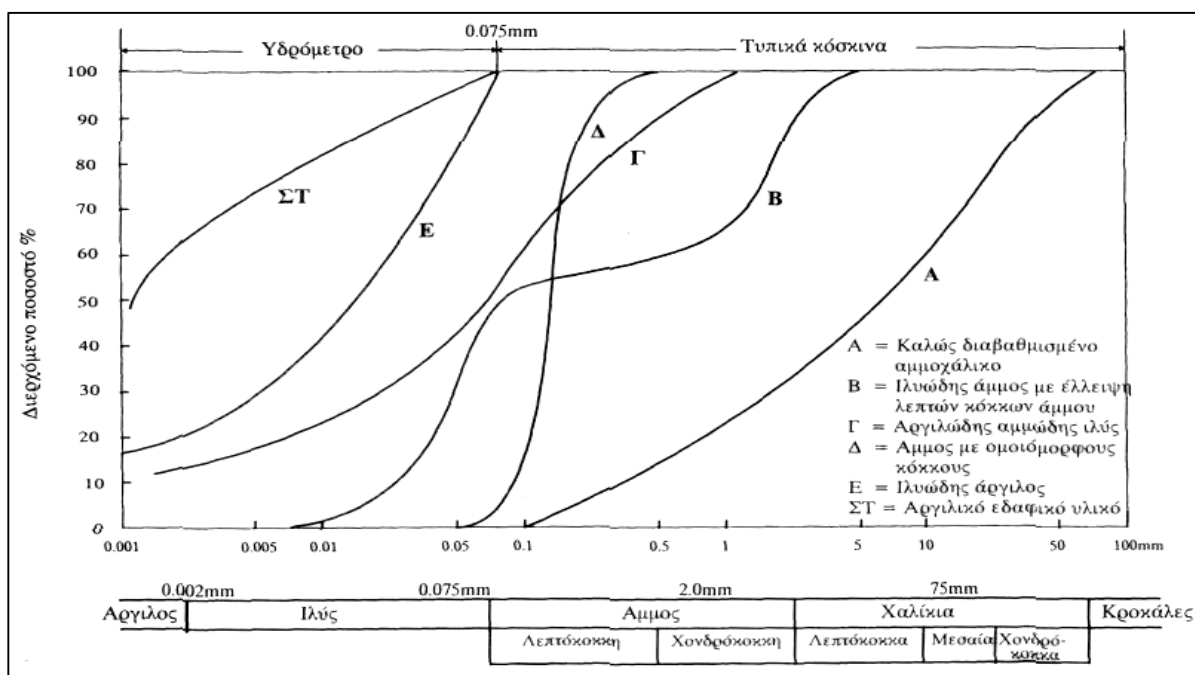
Πηγή: Οικονομίδης, 2015

2.3 Χαρακτηριστικά Υπεδάφους

Τα εδαφικά υλικά του υπεδάφους και γενικά το υπέδαφος, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αρχικά πρέπει να εκτελεστεί μία εδαφοτεχνική μελέτη για το υπέδαφος που θα χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση του οδοστρώματος, για να γνωρίζει ο μελετητής τη σύσταση του εδάφους, τη φέρουσα ικανότητα του και την περιεκτικότητα του σε υγρασία.

2.3.1 Σύσταση Εδάφους

Ο πρώτος έλεγχος που γίνεται είναι η κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους, δηλαδή ο καθορισμός της ποσοστιαίας κατανομής του μεγέθους των κόκκων που εμπεριέχονται στο έδαφος. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, για να καθορίσει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων του εδάφους που συγκρατούνται στο κόσκινο 0.075mm. Το δεύτερο μέρος είναι η κοκκομετρική ανάλυση με υδρόμετρο για να καθορίσει την κατανομή του μεγέθους των πολύ λεπτών κόκκων του εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο 0.075mm. Με αυτούς τους ελέγχους μπορεί να δημιουργηθεί μια κοκκομετρική καμπύλη (Διάγραμμα 2.1) η οποία μας δείχνει τη σύσταση του εδάφους. Ανάλογα με τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, ο μηχανικός θα κάνει και τις ανάλογες δράσεις, αν χρειάζεται βελτίωση το έδαφος ή όχι.



Διάγραμμα 2-1: Κοκκομετρικές καμπύλες τυπικών εδαφών

Πηγή: Νικολαΐδη, 2002

Κατ' επέκταση της σύστασης του εδάφους, γίνεται και η κατάταξη του εδάφους (Πίνακας 2.5, 2.6), δηλαδή η ομαδοποίηση των εδαφών σε γενικές ομάδες για την εκτίμηση της καταλληλότητας τους όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό γίνεται, αφού πρώτα υπολογιστούν τα όρια Atterberg (όριο υδαρότητας – LL, όριο πλαστικότητας – PL, όριο συρρίκνωσης – SL), με τα οποία μπορείς να παρατηρήσεις πως συμπεριφέρεται το συγκεκριμένο έδαφος ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει μέσα σ' αυτό.

Πίνακας 2-5: Κατάταξη εδαφών κατά USCS

Βασικός Διαχωρισμός			Σύμβολα	Περιγραφή	Κριτήρια Κατάταξης			
Χονδρό-Κοκκα εδάφη Περισσότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200	Χάλι-κες 50% ή περισσότερα παραμένουν επί του κόσκινου No 4	Χάλι-κες	GW	Καλά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα	Κατάταξη με βάση το λεπτόκοκκο κλάσμα Διερχ. από το κόσκινο No 200 < 5% GW, GP, SW, SP Διερχ. από το κόσκινο No 200 > 12% GM, GC SM, SC Διερχ. από το κόσκινο No 200 μεταξύ 5% και 12% οριακή περίπτωση χρήση διπλού συμβολισμού	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $1 < C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$ Δεν ισχύουν τα δύο πιο πάνω κριτήρια για GW		
			GP	Ομοιόμορφοι χάλικες ή αμμοχάλικο με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα				
		Χάλικες με λεπτόκοκκα	GM	Πυλώδεις χάλικες. Μίγματα χάλικων - άμμου - ιλύος		PI < 4 η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A		
			GC	Αργιλώδεις χάλικες. Μίγματα χάλικων - άμμου - αργίλου		PI > 7 & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A		
	Άμμοι 50% ή περισσότερα διέρχονται από το κόσκινο No 4	Άμμοι	SW	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα λεπτόκοκκα		$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $1 < C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$ Δεν ισχύουν τα δύο κριτήρια για SW		
			SP	Ομοιόμορφα άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα				
		Άμμοι με λεπτόκοκκα	SM	Πυλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου - ιλύος		PI < 4 η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A		
			SC	Αργιλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου - αργίλου		PI > 7 & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A		
			Λεπτόκοκκα εδάφη Λιγότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200	Ιλείς και άργιλοι WL < 50%		ML	Ανόργανες ιλείς, πολύ λεπτές άμμοι, ιλύωδεις και αργιλώδεις άμμοι	<p>Διάγραμμα πλαστικότητας</p>
						CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας (ενίοτε χαλικώδεις, αμμώδεις ή ιλύωδεις)	
OL	Οργανικές ιλείς ή ιλύωδεις άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας							
Ιλείς και άργιλοι WL > 50%	MH	Ανόργανες, συχνά μαρμαρυγιακές ιλείς υψηλής πλαστικότητας						
	CH	Ανόργανες άργιλοι υψηλής πλαστικότητας						
	OH	Οργανικές άργιλοι μέσης έως υψηλής πλαστικότητας						
Πολύ οργανικά εδάφη		Pt	Βουρκόδη και τυρφώδη εδάφη	Ινώδη οργανικά γεωλυτικά προϊόντα απανθράκωσης				

Πηγή: Παντελίδης, 2012

Πίνακας 2-6: Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO

Γενική κατάταξη	Κοκκώδη (ή χονδρόκοκκα) εδαφικά υλικά, διερχόμενο % από κόσκινο 0.075mm: < 35							Λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά (ιλυο-αργιλώδη), διερχόμενο % από κόσκινο 0.075mm: > 35				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-α	A-1-β		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Διερχ. % από κόσκινο: 2.00 mm 0.425 mm 0.075 mm	50 max 30 max 15 max	50 max 25 max	51 min 10 max	35 max	35 max	35 max	3 max	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min
Χαρακτηριστικά (διερχ. του 0.425mm) Όριο υδαρότητας Δείκτης Πλαστικότητας	6 max		N.P.	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 max 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min ^Α	41 min 11 min ^Β
Συνήθεις τύποι εδαφικών υλικών	Χαλίκια, άμμος και αμμοχάλικο		Λεπτή άμμος	Ιλυώδη ή αργιλώδη αμμοχάλικα				Ιλυώδη εδάφη		Αργιλώδη εδάφη		
Καταλληλότητα ως υπέδαφος	Εξαιρετικά έως καλά							Μέτρια έως ακατάλληλα				

^ΑΟ Δείκτης πλαστικότητας των υλικών της κατηγορίας A-7-5 είναι μικρότερος ή ίσος του (LL - 30)

^ΒΟ Δείκτης πλαστικότητας των υλικών της κατηγορίας A-7-6 είναι μεγαλύτερος του (LL - 30), LL = όριο υδαρότητας

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

2.3.2 Φέρουσα Ικανότητα

Η αντοχή ή φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που πρέπει να γνωρίζει ο μηχανικό για τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος. Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων και τη συνεκτικότητα μεταξύ τους, το ποσοστό υγρασίας και την πυκνότητα του εδάφους και του υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους μπορεί να εκφραστεί, συναρτήσει του Καλιφορνιακού Δείκτη (CBR), ή με το μέτρο αντίδρασης (K), ή με την τιμή αντίστασης ή ευστάθειας (R), ή με το μέτρο ελαστικότητας (E) ή επανάκτησης (Mr). Εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με τη μέθοδο μέτρησης του Καλιφορνιακού δείκτη.

2.3.2.1 Καλιφορνιακός Δείκτης CBR

Ο Καλιφορνιακός δείκτης επιδιώκει τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας εδαφικών υλικών όταν συμπυκνωθούν σε διάφορους βαθμούς συμπύκνωσης στο εργαστήριο στη βέλτιστη υγρασία, η οποία καθορίζεται από τη μέθοδο Proctor και θα είναι αντιπροσωπευτική για τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί και στο εργαστήριο και 'επί του έργου' με ειδική συσκευή εφαρμοσμένη σε όχημα. Οι τιμές που μετρούνται στο εργαστήριο και 'επί του έργου' διαφέρουν λόγω του περιορισμού που επιβάλλει η μεταλλική μήτρα στο εδαφικό υλικό στην περίπτωση που γίνεται στο εργαστήριο. Γι' αυτό ο μηχανικός πρέπει να καθορίσει τη σχέση που υφίσταται μεταξύ των τιμών στο συγκεκριμένο υλικό.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1930 από τη Διεύθυνση Οδοποιίας της Καλιφόρνιας και έκτοτε υιοθετήθηκε από όλες τις υπηρεσίες σε όλο τον κόσμο.

Ως CBR ορίζεται ο λόγος επί τις εκατό της δύναμης η οποία απαιτείται για να διεισδύσει το έμβολο της συσκευής εντός εδαφικού υλικού για αντίστοιχο βάθος διείσδυσης εντός πρότυπου υλικού.



Σχήμα 2-1: (α) Συσκευή διεξαγωγή εργαστηριακού ελέγχου CBR και (β) συσκευή πεδίου για έλεγχο CBR
Πηγή: Σακελλαρίου κ.ά., 2003

Σε περίπτωση που το υπεδάφος είναι πολύ ασθενές και η φέρουσα ικανότητα του πολύ χαμηλή, τότε γίνεται βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους με σταθεροποίηση του εδάφους. Η σταθεροποίηση του εδάφους είναι η ανάμιξη του εδαφικού υλικού με άλλα ειδικά εδαφικά υλικά ή πρόσθετα (υδράσβεστος, τσιμέντο, άσφαλτος, γαλακτώματα κτλ.) τα οποία αυξάνουν την ευστάθεια του εδάφους.

2.3.3 Ποσοστό Υγρασίας

Η φυσική υγρασία του εδάφους είναι μια βασική παράμετρος για τον μηχανικό, γιατί από αυτή εξαρτάται άμεσα η φέρουσα ικανότητα του εδάφους έδρασης του οδοστρώματος. Η ακριβής εκτίμηση του ποσοστού υγρασίας είναι πολύ δύσκολη, γιατί η υγρασία του υπεδάφους συνεχώς επηρεάζεται από τη μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, την ποιότητα του εδαφικού υλικού, την ύπαρξη ή μη έργων αποστράγγισης και προστασίας του υπεδάφους και το πάχος των υπερκείμενων στρώσεων. Γενικά, όταν υπάρχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας στο έδαφος παραμορφώνεται πιο εύκολα το οδόστρωμα κατά την παραλαβή των φορτίων.

2.4 Κλιματολογικές Συνθήκες

Το κλίμα είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την επίδοση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Οι κλιματολογικές συνθήκες περιλαμβάνουν το ύψος των βροχοπτώσεων, τη δράση του παγετού και τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

2.4.1 Βροχοπτώσεις

Η βροχόπτωση επηρεάζει πολύ στην κατασκευή των χωματουργικών έργων, στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους και στον σχεδιασμό της αποστράγγισης των επιφανειακών υδάτων. Γενικά το νερό επιταχύνει τη φθορά του οδοστρώματος σε όλες τις στρώσεις του. Επίσης, είναι υπεύθυνο για τη μείωση της αντοχής του υπεδάφους και για την αύξηση της απώλειας της ικανότητας εξυπηρέτησης των οδοστρωμάτων. Η αυξομείωση της υγρασίας λόγω των κατακρημνισμάτων κυρίως στα αργιλικά εδάφη μπορεί να προκαλέσει διόγκωση ή συρρίκνωση των υλικών αυτών με επακόλουθο την ακαταλληλότητα του οδοστρώματος. Γι' αυτούς τους λόγους πρέπει να σχεδιάζονται καλά και σωστά αποχετευτικά και αποστραγγιστικά έργα στους δρόμους.

2.4.2 Δράση Παγετού

Ο παγετός εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και έχει δύο αρνητικές επιδράσεις στο οδόστρωμα. Η πρώτη επίδραση είναι η ανύψωση του οδοστρώματος, λόγω του πάγου που σχηματίζεται μέσα στο οδόστρωμα με αποτέλεσμα τη διόγκωση του. Έτσι θα έχει ως τελικό αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών στο οδόστρωμα. Η δεύτερη επίδραση που θα έχει, είναι στην τήξη του παγετού κατά τη διάρκεια της άνοιξης. Αφού λιώσει ο πάγος, θα μείνει μόνο νερό το οποίο δε θα μπορεί να αποστραγγιστεί από τις υποκείμενες στρώσεις και έτσι θα προκαλέσει σημαντική μείωση της αντοχής στην υποδομή.

Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα θα πρέπει να προβλέπονται τα βέλτιστα πάχη των στρώσεων για να προστατεύουν το έδαφος και κατά τη μελέτη να λαμβάνεται υπόψη και η μειωμένη αντοχή του εδάφους μετά την τήξη των πάγων.

2.4.3 Θερμοκρασία Περιβάλλοντος

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές συνεισφέρουν και αυτές στην καταστροφή του οδοστρώματος. Κυρίως, τα ασφαλικά υλικά επηρεάζονται σημαντικά, γιατί σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπεριφέρονται ως ψαθυρά υλικά επειδή αυξάνεται το μέτρο δυσκαμψίας τους με συνέπεια τη δημιουργία ρωγμών. Ενώ σε ψηλές θερμοκρασίες το μέτρο δυσκαμψίας τους μειώνεται και

προκαλούνται πλαστικές παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τη κυκλοφορία των οχημάτων. Επίσης, μπορεί να ρευστοποιηθεί η άσφαλτος με αποτέλεσμα, την εφίδρωση του οδοστρώματος και την απώλεια αντιολισθηρότητας του.

Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, σε ψυχρά κλίματα που έχει χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιείται σχετικά μαλακή άσφαλτος και σε θερμά κλίματα που έχει ψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιείται σχετικά σκληρή άσφαλτος.



Σχήμα 2-2: Εφίδρωση Οδοστρωμάτων

Πηγή: OEMK, 2002

2.5 Υλικά Οδοστρώματος

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός δρόμου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να πληρούν δύο προϋποθέσεις:

- i. Να είναι ανθεκτικά στη χρήση και σε βάθος χρόνου
- ii. Να είναι οικονομικά τόσο στην αγορά τους όσο και κατά το κόστος μεταφοράς τους

Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα αδρανή υλικά και τα ασφαλτικά υλικά.

2.5.1 Αδρανή Υλικά

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων προέρχονται κυρίως από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων, ή από φυσικές αποθέσεις ποταμών, χειμάρρων, θαλάσσης ή ορυχείων με ή χωρίς θραύση. Τα αδρανή μπορεί να προέρχονται και από σκωρίες, ή από απορρίμματα ορυχείων, ή και υλικά κατεδαφίσεων με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι απαιτούμενες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά και τεχνητά αδρανή, ή ανακυκλωμένα υλικά από ασφαλτόμιγμα ή από σκυρόδεμα (Νικολαΐδης 2002).

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα Χονδρόκοκκα Αδρανή, τα οποία συγκρατούνται στο κόσκινο των 4.75mm κατά τις Αμερικάνικες προδιαγραφές ή 5mm κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές
- Τα Λεπτόκοκκα Αδρανή, τα οποία διέρχονται από το κόσκινο των 4.75mm κατά τις Αμερικάνικες προδιαγραφές ή 5mm κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές
- Η Παιπάλη ή Φίλλερ, η οποία διέρχεται από το κόσκινο των 75μm, δηλαδή έχει τη μορφή σκόνης (Κάρτα & Παπαθωμά 2007)

Τα αδρανή θα πρέπει να έχουν κατάλληλες μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες.

Οι βασικότερες ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα αδρανή είναι:

- Κοκκομετρική σύνθεση
- Μορφή κόκκων
- Απορρόφηση νερού
- Αντίσταση σε τριβή και κρούση
- Αντίσταση σε στίλβωση
- Αντίσταση σε απότριψη
- Αντίσταση σε θλίψη
- Αντίσταση σε κρούση
- Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση
- Καθαρότητα

Για να εξασφαλισθούν οι παραπάνω ιδιότητες και για να πιστοποιηθεί η καταλληλότητα των αδρανών, εκτελούνται κάποιοι έλεγχοι των αδρανών οι οποίοι ταξινομούνται σε πέντε ομάδες:

- i. Τους περιγραφικούς 'ελέγχους' (σχήμα/επιφανειακή υφή)
- ii. Τους μη καταστροφικούς ποιοτικούς ελέγχους (κοκκομετρική ανάλυση/έλεγχοι μορφής κόκκων/ έλεγχος απορρόφησης νερού)
- iii. Τους ελέγχους σκληρότητας και ανθεκτικότητας
- iv. Τους ελέγχους καθαρότητας
- v. Τους ελέγχους πυκνότητας (καθορισμός ειδικού βάρους)

2.5.1.1 Αδρανή Υλικά Φυσικών Αποθέσεων

Τα αδρανή που προέρχονται από φυσικές αποθέσεις είναι τα χαλίκια, τα αμμοχάλικα και η φυσική άμμος. Αυτά τα υλικά είναι μίγμα διαφόρων πετρωμάτων, κυρίως ασβεστολιθικών, ψαμμιτικών και γρανιτικών. Τα υλικά φυσικών αποθέσεων χρησιμοποιούνται κυρίως ως υλικά υποβάσεων και βάσεων, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη παραγωγή ασφαλτομιγμάτων, αφού πρώτα προκοσκινιστούν και πλυθούν.

2.5.1.2 Θραυστά Αδρανή Πετρωμάτων

Τα θραυστά αδρανή παράγονται από διάφορα πετρώματα με τη θραύση τους με ειδικά μηχανήματα.

Τα πετρώματα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- i. Τα **πυριγενή πετρώματα**, είναι τα πετρώματα τα οποία σχηματίστηκαν από την ψύξη και στερεοποίηση του μάγματος
- ii. Τα **ιζηματογενή πετρώματα**, είναι τα πετρώματα τα οποία σχηματίστηκαν από τη στερεοποίηση ιζημάτων που βρίσκονταν στον πυθμένα των θαλασσών
- iii. Τα **μεταμορφωσιγενή πετρώματα**, είναι πυριγενή ή ιζηματογενή πετρώματα τα οποία κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις μεταμορφώθηκαν σε νέα πετρώματα, λόγω της ανακρυστάλλωσης των ορυκτών

2.5.2 Ασφαλτικά Υλικά

Η άσφαλτος είναι ένα από τα αρχαιότερα και διαδεδομένα δομικά υλικά παγκοσμίως. Είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό. Παράγεται από το υπόλειμμα της ατμοσφαιρικής κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου και έχει συγκολλητικές ιδιότητες και μεγάλη ευστάθεια. Ανάλογα με τη χρήση τους, οι διάφοροι τύποι ασφάλτου που κυκλοφορούν στην αγορά χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις ασφάλτους οδοστρωσίας και τις ασφάλτους για βιομηχανική χρήση. Εμείς θα ασχοληθούμε με τις ασφάλτους οδοστρωσίας οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή την επιφανειακής στρώσης και μέρος της βάσης του οδοστρώματος.

Οι άσφαλτοι οδοστρωσίας ταξινομούνται συναρτήσει του βαθμού διεισδυτικότητας αυτών με μονάδα μέτρησης το pen ($1 \text{ pen} = 0.1 \text{ mm}$). Η μαλακότερη άσφαλτος έχει το μεγαλύτερο βαθμό διεισδυτικότητας και η σκληρότερη άσφαλτος το μικρότερο βαθμό διεισδυτικότητας.

Άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες που έχει η ασφάλτος είναι το σημείο μάλθωσης, η ολκιμότητα, το σημείο ανάφλεξης, το σημείο Fraass κτλ.

Ο τύπος ασφάλτου που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός οδοστρώματος, εξαρτάται από τον τύπο ασφαλτομίγματος που θέλουμε (Ασφαλτικό σκυρόδεμα/Πυκνό ή Ανοικτό ασφαλτικό Macadam/Θερμό κυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα/Ασφαλτόμιγμα Gussasphalt κα.) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που θα κατασκευαστεί ο δρόμος (Στεργιάδης 2005).

Εκτός από τη φυσική ασφάλτο, υπάρχουν επίσης τα ασφαλτικά διαλύματα (Cut-back bitumens) και τα ασφαλτικά γαλακτώματα (Bitumen emulsions).

- Τα Ασφαλτικά Διαλύματα είναι ανάμειξη ασφάλτου και ορισμένου διαλύτη (βενζίνη/νάφθα/φωτιστικό πετρέλαιο/ακάθαρο πετρέλαιο). Έχουν μικρότερο ιξώδες από αυτό της ασφάλτου και σε κανονικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι σε ρευστή μορφή, γι' αυτό δε χρειάζεται ψηλές θερμοκρασίες για να χρησιμοποιηθεί. Η χρήση των ασφαλτικών διαλυμάτων είναι περιορισμένη γιατί είναι ενεργειακά ασύμφορα και περιβαλλοντικά επιβλαβή.
- Τα Ασφαλτικά Γαλακτώματα είναι προϊόντα γαλακτωματοποίησης της ασφάλτου με το νερό. Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ψυχρά ή θερμά αδρανή και δεν προϋποθέτει τη χρήση θέρμανσης σε κανένα στάδιο εφαρμογής τους. Προτιμώνται περισσότερο από τα ασφαλτικά διαλύματα, γιατί συμφέρουν ενεργειακά, μειώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση, χρησιμοποιούνται και με υγρά αδρανή και αποτρέπουν την περαιτέρω οξείδωση της ασφάλτου.

3 Διαστασιολόγηση Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

3.1 Γενικά

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον υπολογισμό του πάχους της κάθε στρώσης, που όλες μαζί συνθέτουν το οδόστρωμα (Νικολαΐδης 2002). Ο κύριος σκοπός της διαστασιολόγησης είναι, η κατασκευή του οδοστρώματος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εξυπηρετεί την κυκλοφορία για όλη τη διάρκεια ζωής του. Για να υλοποιηθεί αυτός ο σκοπός, πρέπει τα φορτία να κατανέμονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τάσεις που μεταβιβάζονται μέσω των στρώσεων στο υπέδαφος, να μπορεί να τα παραλάβει η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους. Επιπλέον, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση κατά τη φόρτιση να μην είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις που μπορεί να παραλάβουν τα υλικά της κάθε στρώσης.

Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός της κάθε στρώσης εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης, τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και τις κλιματολογικές συνθήκες. Επιπλέον, εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και το κόστος κατασκευής.

3.2 Μεθοδολογίες Διαστασιολόγησης Οδοστρωμάτων

Οι μεθοδολογίες διαστασιολόγησης που χρησιμοποιούνται σήμερα κυρίως, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις Αναλυτικές ή Θεωρητικές μεθοδολογίες και τις Ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες.

- **Αναλυτικές Μεθοδολογίες**, είναι οι μεθοδολογίες στις οποίες ο μελετητής υπολογίζει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα διάφορα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος. Στη συνέχεια, αφού υπολογιστούν τα δύο μεγέθη συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπτά μεγέθη τα οποία καθορίζονται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, οι οποίες καθορίζονται από εργαστηριακές δοκιμές. Ο καθορισμός του τελικού πάχους του οδοστρώματος επιτυγχάνεται αν ικανοποιείται η απαίτηση ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που θα αναπτύσσονται δε θα υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπτές, για τα προτεινόμενα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος.

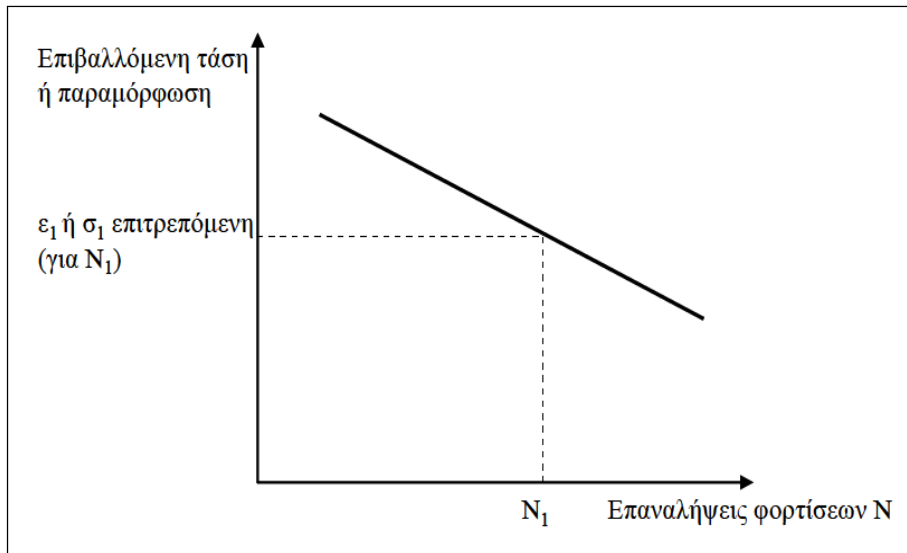
- **Ημι-αναλυτικές Μεθοδολογίες**, είναι οι μεθοδολογίες στις οποίες πολύ εύκολα υπολογίζονται τα πάχη των στρώσεων από νομογραφήματα ή διαγράμματα, τα οποία δημιουργήθηκαν από αναλυτικούς υπολογισμούς ή από συνδυασμό αναλυτικών υπολογισμών και αποτελεσμάτων από πειραματικά οδοστρώματα.

Οι βασικές στρώσεις που θεωρούνται στο εύκαμπτο οδόστρωμα είναι, η ασφαλική στρώση, η στρώση από ασύνδετα αδρανή και το υπέδαφος, δηλαδή ένα σύστημα τριών στρώσεων. Γενικότερα, η κατασκευή κάθε ενιαίας στρώσης με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από τις άλλες στρώσεις, θεωρείται ως μια διακεκριμένη στρώση (Νικολαΐδης 2002). Όλες οι στρώσεις θεωρητικά έχουν απεριόριστες διαστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο, εκτός από το υπέδαφος που επεκτείνεται στο ημιάπειρο και στο κάθετο επίπεδο. Γενικά όμως όλες οι μεθοδολογίες βασίζονται στη θεωρία της ελαστικότητας, στην εμπειρία που αποκτήθηκε μέχρι σήμερα και την έρευνα που γινόταν για την κατασκευή των οδοστρωμάτων. Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα θεωρείται ένα ελαστικό πολυστρωματικό σύστημα του οποίου τα υλικά του χαρακτηρίζονται με το μέτρο ελαστικότητας (E) ή επανάκτησης (M_r) ή μέτρο δυσκαμψίας (S) στην περίπτωση των ασφαλικών στρώσεων και τον λόγο του Poisson (ν). Επίσης, τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται ομογενή και ισότροπα. Σε όλες τις μεθοδολογίες ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται συναρτήσει των Ισοδυνάμων Τυπικών Αξόνων (ITA) και η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους συναρτήσει του καλιφορνιακού δείκτη CBR.

3.3 Σχεδιαστικά Κριτήρια

Κατά τη διαστασιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, ο μελετητής θα πρέπει να καταλήξει σε ένα οδόστρωμα το οποίο κατά τη διάρκεια της ζωής του δε θα παρουσιάσει πρόωρες αστοχίες. Ως αστοχίες, θεωρούνται η ρηγμάτωση και η παραμένουσα παραμόρφωση του οδοστρώματος (Νικολαΐδης 2002). Τα βασικά σχεδιαστικά κριτήρια για να διασφαλιστεί η ικανοποιητική λειτουργία του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της ζωής του είναι να αποφευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι πιο πάνω αστοχίες.

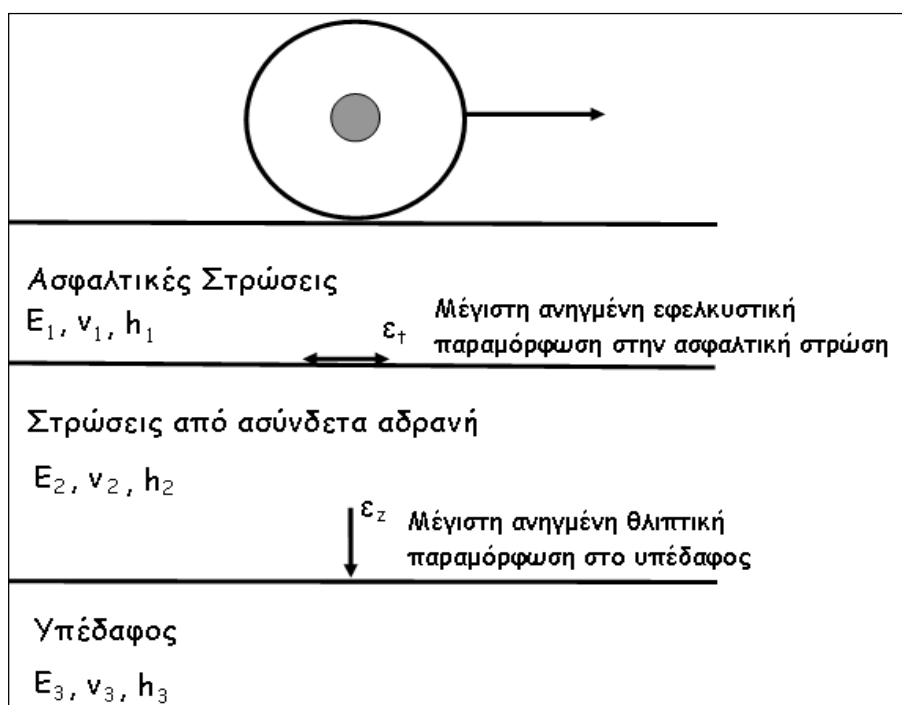
Οι ρηγματώσεις εμφανίζονται πάντα στις ασφαλικές στρώσεις λόγω κόπωσης που προέρχεται από τις επαναλαμβανόμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, των οποίων η μέγιστη ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση εμφανίζεται στην κατώτατη επιφάνεια της ασφαλικής στρώσης (Διάγραμμα 3.1).



Διάγραμμα 3-1: Προσδιορισμός επιτρεπόμενης τιμής επιβαλλόμενης τάσης ή παραμόρφωσης από τις προβλεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Οι παραμένουσες παραμορφώσεις οφείλονται στις παραμένουσες παραμορφώσεις της κάθε στρώσης με μέγιστη ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση στο υπέδαφος ή γενικά την ανώτατη επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, η οποία παραλαμβάνει τα επαναλαμβανόμενα φορτία της κυκλοφορίας.



Σχήμα 3-1: Σχεδιαστικά κριτήρια εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

3.4 Υπολογισμός Τάσεων – Παραμορφώσεων Οδοστρώματος

Ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα είναι βασικότατη προϋπόθεση και επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες, αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα (Νικολαΐδης 2002). Παρακάτω θα δούμε κάποιες θεωρίες που αναπτύχθηκαν όλα αυτά τα χρόνια.

3.4.1 Μονοστρωματικά Συστήματα (Θεωρία Boussinesq)

Όλες οι συμβατικές μέθοδοι υπολογισμού των τάσεων στο εσωτερικό του εδάφους βασίζονται στην ελαστική θεωρία του Boussinesq η οποία αναπτύχθηκε το 1885. Αυτή η θεωρία δε χρησιμοποιείται σήμερα στα οδοστρώματα, γιατί αναφέρεται στην περίπτωση ύπαρξης μιας μόνο στρώσης, αυτής του εδάφους, αλλά ήταν η βάση για την ανάπτυξη όλων των μεταγενέστερων θεωριών για κατανομές τάσεων.

Για να χρησιμοποιηθεί η ελαστική θεωρία πρέπει να γίνουν οι παραδοχές ότι το υλικό της στρώσης είναι, ισότροπο, ομογενές, αβαρές, εκτείνεται σε ημιάπειρο χώρο και υπακούει στον νόμο του Hooke ($F = -k \cdot x$) (Παντελίδης 2014).

Οι τάσεις που εξασκούνται σε οποιοδήποτε σημείο υπό την επίδραση σημειακού φορτίου, μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω θεμελιώδεις εξισώσεις:

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{1}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - (1 - 2\mu) \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{z + (r^2 + z^2)^{1/2}} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2\pi} (1 - 2\mu) \frac{1}{(r^2 + z^2)} \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{z + (r^2 + z^2)^{1/2}} \right]$$

$$\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}}$$

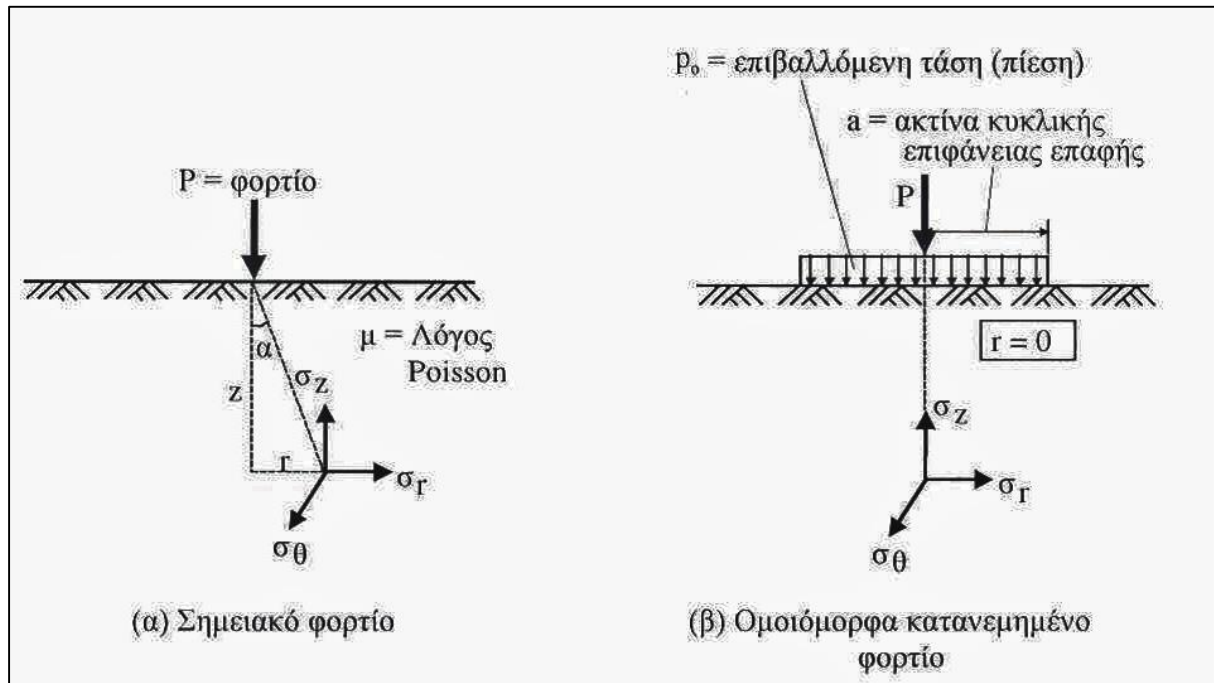
Όπου:

σ_z = κατακόρυφη θλιπτική τάση

σ_r, σ_θ = οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις (ακτινική & εφαπτομενική)

τ_{rz} = διατμητική τάση

Στην περίπτωση που εξασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, οι αντίστοιχες τάσεις εξάγονται από ολοκλήρωση των παραπάνω εξισώσεων.



Σχήμα 3-2: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Με βάση τη θεωρία του Boussinesq η επιφανειακή ελαστική παραμόρφωση (Δz) του εδάφους κάτω από το κέντρο της επιφάνειας φόρτισης, υπό την επίδραση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\Delta z = [2p_0 * a * (1-\mu^2)]/E$$

Όπου:

p_0 = επιβαλλόμενη τάση

a = ακτίνα επιφανειακής επαφής

μ = λόγος Poisson

E = μέτρο ελαστικότητας εδάφους

Στη περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου διακρίνονται δύο περιπτώσεις βυθίσεων, την ομοιόμορφη βύθιση που υπολογίζεται με την πιο πάνω εξίσωση, και την ανομοιόμορφη βύθιση (W) η οποία υπολογίζεται με την πιο κάτω εξίσωση.

$$W = (p_o * a/E) * w$$

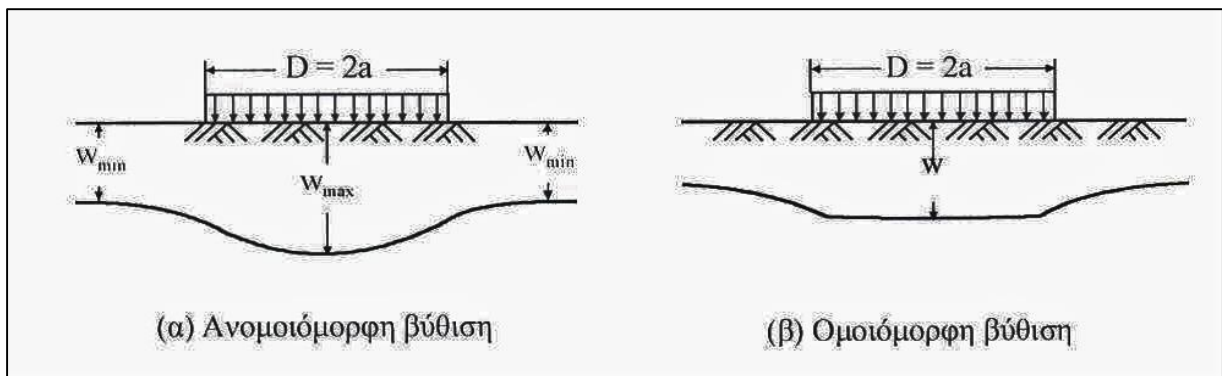
Όπου:

p_o = επιβαλλόμενη τάση

a = ακτίνα επιφανειακής φόρτισης

E = μέτρο ελαστικότητας εδάφους

w = σταθερά βύθισης (υπολογίζεται από νομογράφημα)



Σχήμα 3-3: Μορφές κατανομής βυθίσεων

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

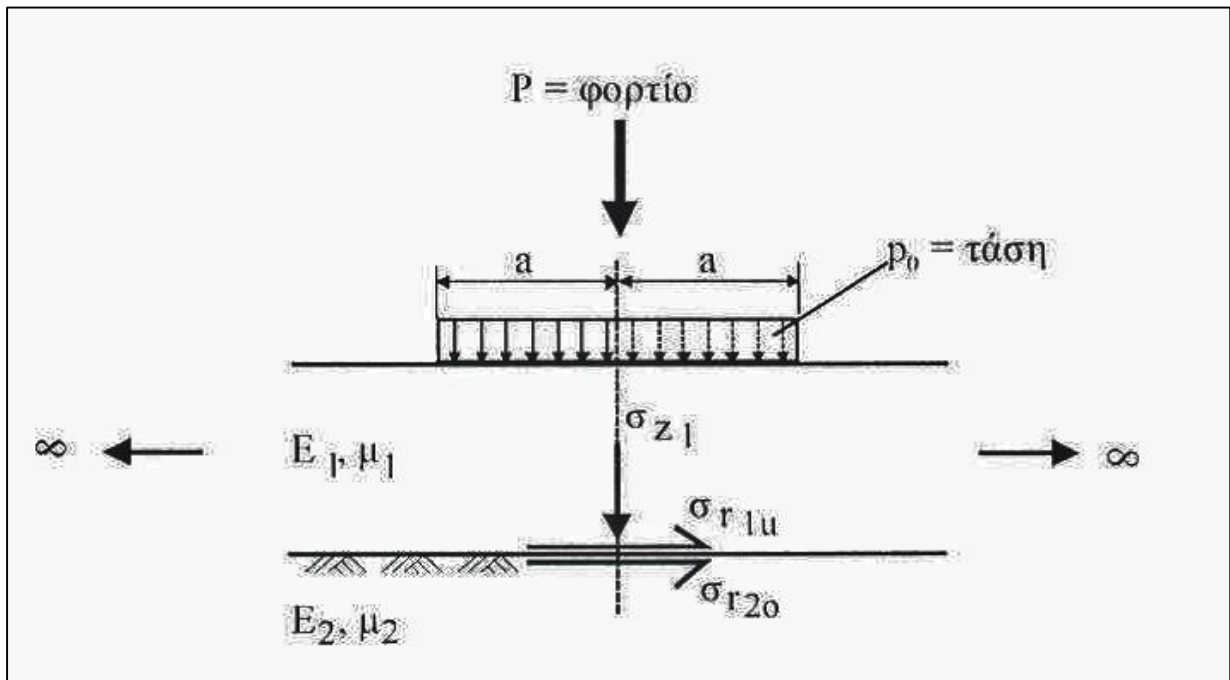
3.4.2 Σύστημα Δύο Στρώσεων (Θεωρία Burmister)

Σαράντα χρόνια μετά την ανάπτυξη της θεωρίας του Boussinesq, ο Westergaard ανέπτυξε τη δική του θεωρία για τον υπολογισμό των τάσεων σε σύστημα των δύο στρώσεων, από τις οποίες η πρώτη στρώση ήταν κατασκευασμένη από σκυρόδεμα (Νικολαΐδης 2002). Αν και δεν κάλυπτε την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρώματων, έγινε βάση για την ανάπτυξη θεωριών για τα εύκαμπτα οδοστρώματα δύο στρώσεων. Ένας από τους ερευνητές που ανέπτυξε τις θεωρίες υπολογισμού τάσεων – παραμορφώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα δύο στρώσεων ήταν ο Burmister.

Η θεωρία του συστήματος βασίζεται σε τέσσερις παραδοχές, οι οποίες είναι:

- Το υλικό κάθε στρώσης θεωρείται ελαστικό, ομογενές και ισότροπο
- Η πρώτη στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο και πεπερασμένες στο κάθετο επίπεδο
- Η τελευταία στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις και στα δύο επίπεδα

- d) Η πάνω επιφάνεια της πρώτης στρώσης δεν υφίσταται καμία άλλη οριζόντια ή κατακόρυφη φόρτιση, πλην της κυκλοφορίας



Σχήμα 3-4: Σύστημα δύο στρώσεων

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Οι τάσεις υπολογίζονται με τη χρήση νομογραφημάτων. Ο υπολογισμός της ελαστικής βύθισης (w) της επιφάνειας που προκαλείται από το βάρος ενός φορτίου στην περίπτωση διστρωματικού συστήματος, όταν η κυκλική επιφάνεια επιβολής του φορτίου είναι κυκλική γίνεται με την παρακάτω εξίσωση.

$$w = [(1.5 * p_0 * a) / E_2] * F$$

Όπου:

p_0 = επιβαλλόμενη τάση

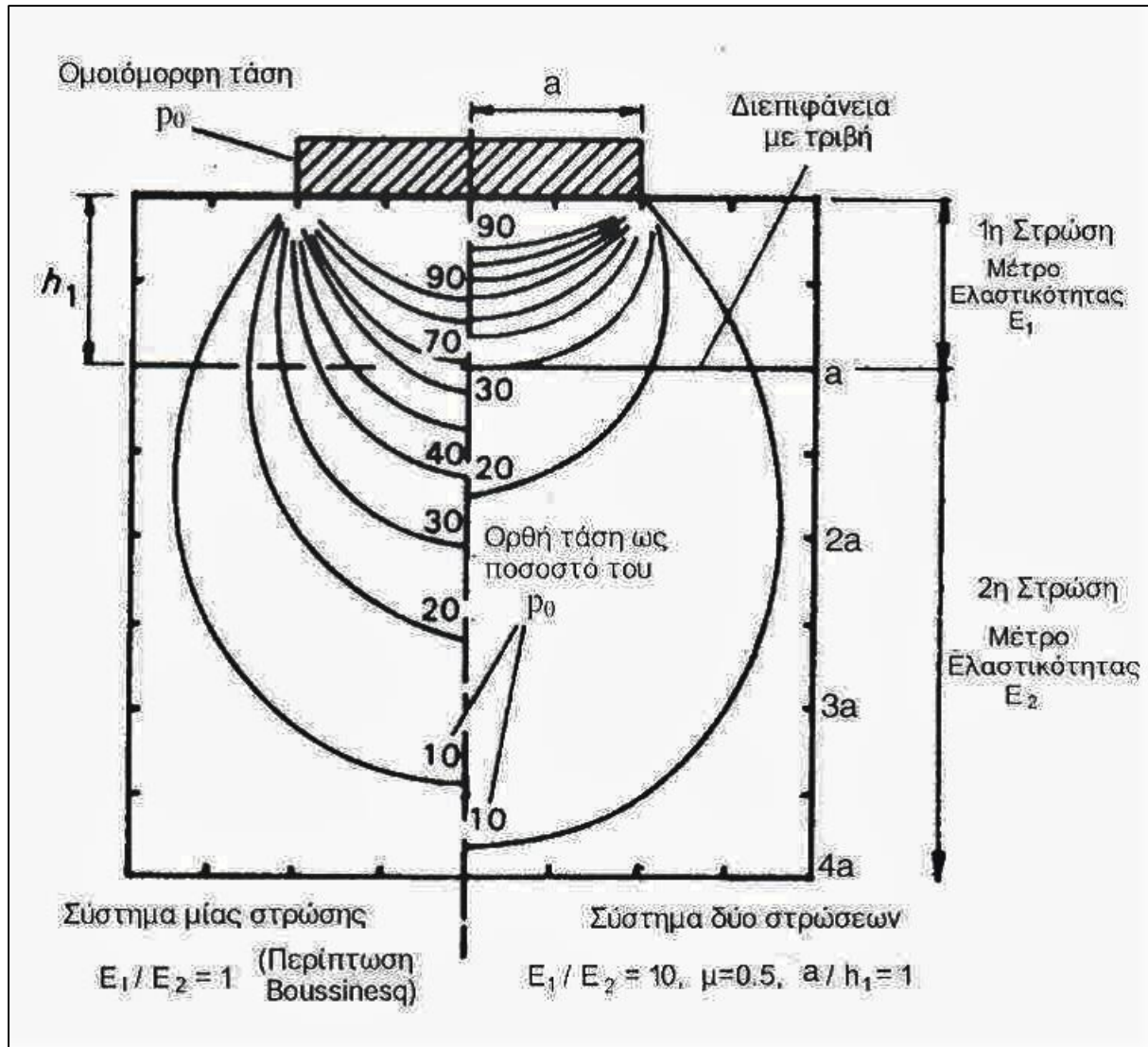
a = ακτίνα κυκλικής επιφάνειας

E_2 = μέτρο ελαστικότητας δεύτερης στρώσης

F = συντελεστής βύθισης (υπολογίζεται από νομογράφημα)

Όταν η επιφάνεια επιβολής του φορτίου είναι άκαμπτη πλάκα, τότε αντί του συντελεστή 1.5 χρησιμοποιείται ο συντελεστής 1.18.

Στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά των τάσεων μεταξύ ενός μονοστρωματικού και ενός διστρωματικού συστήματος.



Σχήμα 3-5: Θεωρητική σύγκριση κατανομής κατακόρυφων τάσεων σε μονοστρωματικό και διστρωματικό σύστημα

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

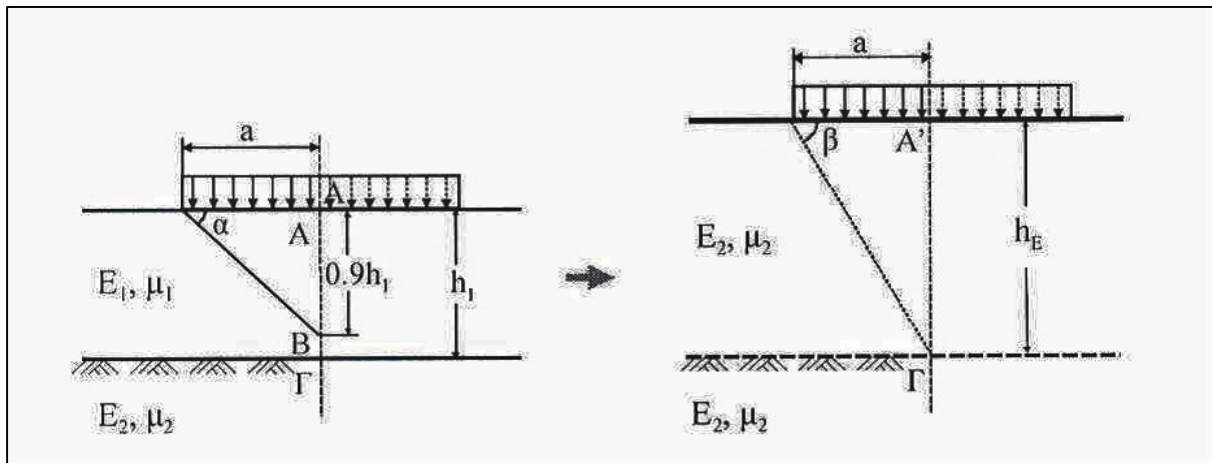
3.4.2.1 Θεωρία ισοδυναμίας του Odemark

Η θεωρία ισοδυναμίας του Odemark συνίσταται στη μετατροπή δύο ελαστικών στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (E και μ) σε μια ισοδύναμη ελαστική στρώση με μηχανικά χαρακτηριστικά αυτά της υποκείμενης στρώσης (Νικολαΐδης 2002).

Αυτή η θεωρία ισχύει και για περισσότερες από δύο στρώσεις. Για παράδειγμα, αν έχουμε τρεις στρώσεις, μετατρέπουμε την πρώτη στρώση ισοδύναμη με τα χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης η οποία είναι το υπέδαφος και μετά μετατρέπουμε και τη δεύτερη στρώση ισοδύναμη με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης. Το άθροισμα των παχών των δύο

ισοδύναμων στρώσεων είναι το νέο συνολικό ύψος μίας στρώσης η οποία γίνεται συναρτήσει της τελευταίας στρώσης (Σχήμα 3.6).

Με τη μετατροπή αυτή, η βύθιση αλλά και οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν από τη θεωρία του Boussinesq.



Σχήμα 3-6: Γεωμετρική ισοδυναμία διστρωματικού συστήματος κατά Odemark

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Το πάχος της ισοδύναμης στρώσης (h_E) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$h_E = h_I \sqrt[3]{\frac{E_1(1-\mu_2^2)}{E_2(1-\mu_1^2)}} * n$$

Όπου:

n = διορθωτικός συντελεστής (0.9 για εύκαμπτη πλάκα και 0.83 για άκαμπτη πλάκα φόρτισης)

Ο Odemark ανέπτυξε την παρακάτω εξίσωση υπολογισμού της επιφανειακής βύθισης για διστρωματικό σύστημα, για οποιαδήποτε τιμή των “ μ ” και το “ E ” των στρώσεων

$$w = \frac{p_0 * a}{E_1} * [[2 * (1 - \mu_1^2) - (1 - \mu_1) * [\cos(\alpha) + (1 - 2\mu_1) * \tan(45^\circ - \alpha/2)]] + \frac{E_1}{E_2} * (1 - \mu_2) * [\cos(\beta) + (1 - 2\mu_2) * \tan(45^\circ - \beta/2)]]$$

Όπου:

α, β = γωνίες από σχήμα 3.6

3.4.3 Συστήματα Τριών ή Περισσοτέρων Στρώσεων

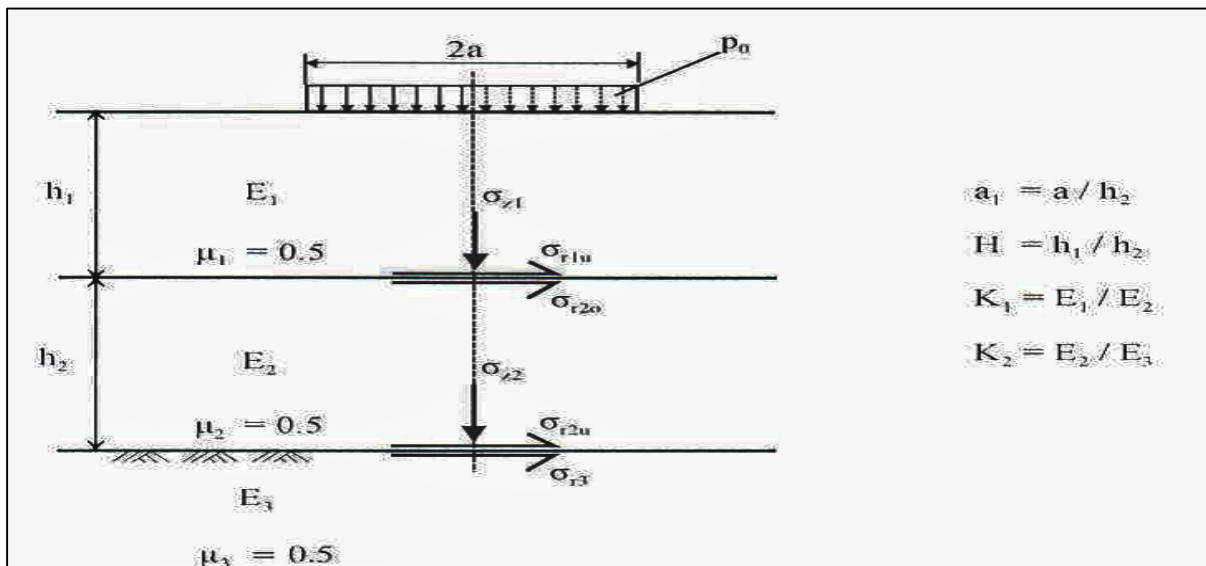
Αυτά τα συστήματα αφορούν τις περιπτώσεις όπου στο οδόστρωμα υπάρχουν περισσότερες από δύο στρώσεις, τα οποία προσομοιάζουν την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

Ένα τυπικό οδόστρωμα έχει μία ή περισσότερες στρώσεις από ασφαλτόμιγμα, μία στρώση από ασύνδετα αδρανή, κάποιες φορές μία στρώση υπόβασης και τέλος το υπέδαφος.

Με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων, οι δυσκολίες υπολογισμού των τάσεων και παραμορφώσεων πολλαπλασιάζονται, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν νομογραφήματα ή πίνακες που να καλύπτουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταβολής των χαρακτηριστικών των στρώσεων. Επιπλέον, θα είναι ακόμα πιο δύσκολο αν προστεθούν και οι πραγματικοί τρόποι φορτίσεων των οδοστρωμάτων.

Σήμερα όμως, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της τεχνολογίας, οι υπολογισμοί των τάσεων και των παραμορφώσεων γίνονται με τη βοήθεια ειδικών λογισμικών προγραμμάτων όπως το BISAR που αναπτύχθηκε από τη Shell στις αρχές του 1970 και το DAMA από το Asphalt Institute των ΗΠΑ.

Μέχρι την εμφάνιση των λογισμικών προγραμμάτων, αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να επιλύσουν τα συστήματα τριών ή περισσότερων στρώσεων παρόλη την πολυπλοκότητα και τις δυσκολίες που είχαν. Δύο ερευνητές, ο Jones και ο Peatie πρότειναν εκτεταμένους πίνακες με τιμές παραμέτρων, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν από όλους τους μηχανικούς της εποχής αυτής. Στο σχήμα 3.7 φαίνεται πως λειτουργούν οι πίνακες Jones.



Σχήμα 3-7: Επεξήγηση συμβολισμών σε σύστημα τριών στρώσεων

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Οι τάσεις που φαίνονται στο πιο πάνω σχήμα μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια των πινάκων Jones και της γενικής εξίσωσης που ακολουθεί.

$$\sigma = \sigma' * p_o$$

Όπου:

σ = η προς υπολογισμό τάση, αναλόγως

p_o = επιβαλλόμενη τάση

σ' = συντελεστής από πίνακες Jones αναλόγως της περιπτώσεως

Οι παραμορφώσεις (w) στην επιφάνεια του οδοστρώματος υπολογίζεται με την εξής σχέση:

$$w = [(p_o * a) / E_1] * F_w$$

Όπου:

p_o = επιβαλλόμενη τάση

a = ακτίνα επιφάνειας φόρτισης

E_1 = μέτρο ελαστικότητας πρώτης στρώσης

F_w = σταθερά η οποία λαμβάνεται από τους πίνακες Jones

Οι παραμορφώσεις (w_3) στην ανώτατη επιφάνεια του υπεδάφους και στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια νομογραφήματος σε συνδυασμό με την πιο κάτω εξίσωση.

$$w_3 = (p_o * a / E_3) * F * w_3'$$

Όπου:

E_3 = μέτρο ελαστικότητας τρίτης στρώσης (υπέδαφος)

F = διορθωτικός συντελεστής

w_3' = συντελεστής βύθισης

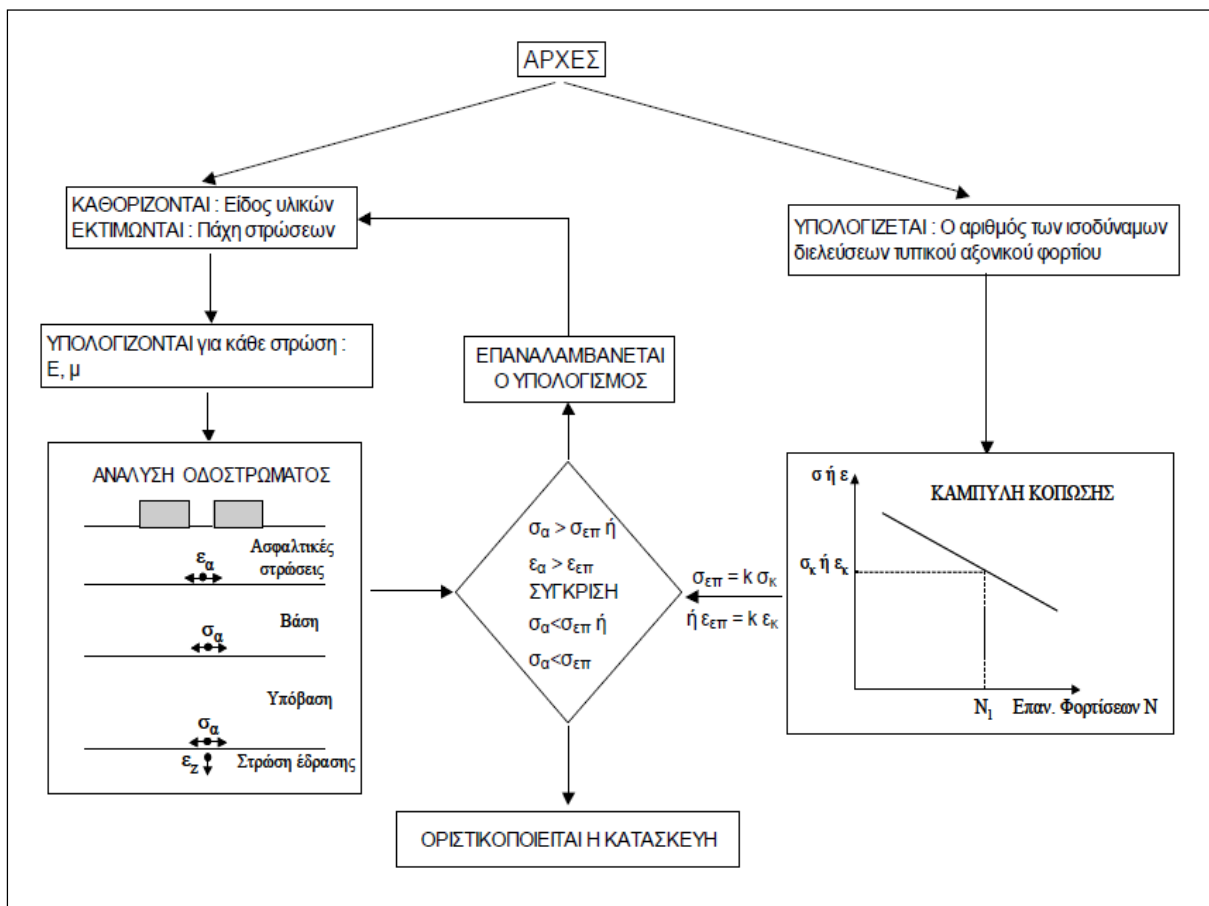
3.5 Διαδικασία Σχεδιασμού

Κατά τη μελέτη της κατασκευής του οδοστρώματος αφού αποφασιστεί η γεωμετρία του δρόμου και ληφθούν υπόψη και οι παράγοντες που επηρεάζουν το πάχος του οδοστρώματος, ο Μηχανικός θα πρέπει να λάβει υπόψη και κάποιους άλλους παράγοντες οι οποίοι είναι:

- Περίοδος Σχεδιασμού, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της οδού, την τοποθεσία που θα βρίσκεται και τον σκοπό που προορίζεται. Αυτά επηρεάζουν άμεσα και τη δυσκολία συντήρησης της οδού στο μέλλον.

- Αποστράγγιση του υπεδάφους, για την οποία είναι σημαντικό να βρεθούν τρόποι που η υγρασία μπορεί να εισέλθει στο οδόστρωμα, για να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ώστε να ελέγχεται το ποσοστό υγρασία μέσα στο οδόστρωμα.
- Μέση Ετήσια Θερμοκρασία του Αέρα (ΜΕΘΑ), η οποία επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων και σε κάποιες μεθόδους είναι απαραίτητο στοιχείο. Ο προσδιορισμός της ΜΕΘΑ γίνεται με τη βοήθεια στατιστικών στοιχείων από τον εγγύτερο από το έργο μετεωρολογικό σταθμό.
- Κατανομή οχημάτων ανά κατεύθυνση και λωρίδα είναι αναγκαία, γιατί επηρεάζει άμεσα τον συνολικό αριθμό των ισοδύναμων τυπικών αξόνων, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό του οδοστρώματος.

Ο Μηχανικός αφού επεξεργαστεί όλα αυτά τα δεδομένα, θα πρέπει να δημιουργήσει το βέλτιστο οδόστρωμα σε συνδυασμό οικονομίας και ποιότητας όπως έχει προαναφερθεί.



Σχήμα 3-8: Γενική αρχή αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4 Μέθοδοι Διαστασιολόγησης

Με το πέρασμα των χρόνων και μετά από πολλές μελέτες και πειράματα διαμορφώθηκαν κάποιες μέθοδοι διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων από διάφορους οργανισμούς που ασχολήθηκαν με το πιο πάνω θέμα. Οι μέθοδοι αυτοί διαχωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες εκ των οποίων οι δύο αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Αυτές οι μέθοδοι είναι οι:

- **Θεωρητικές ή Αναλυτικές Μέθοδοι**, οι οποίες βασίζονται καθαρά στον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων και την επεξεργασία αυτών των μεγεθών για να καταλήξουν σε κάποιο αποτέλεσμα.
- **Ημιαναλυτικές ή Ημιεμπειρικές Μέθοδοι**, οι οποίες βασίζονται τόσο στη θεωρία, όσο και στην εμπειρία. Τα πάχη των στρώσεων υπολογίζονται από νομογραφήματα και διαγράμματα.
- **Εμπειρικές Μέθοδοι**, οι οποίες βασίζονται καθαρά στην εμπειρία, δηλαδή σε στατιστικά στοιχεία με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους.

Παρακάτω θα δούμε τις διαφορές πέντε διαφορετικών μεθόδων διαστασιολόγησης. Θα δούμε ποια δεδομένα χρειάζεται η κάθε μέθοδος για να υπολογιστεί το πάχος του οδοστρώματος.

Οι μέθοδοι που θα δούμε είναι οι εξής:

1. Μέθοδος του Ινστιτούτου Ασφάλτου (Asphalt Institute)
2. Μέθοδος του AASHTO
3. Βρετανική Μέθοδος
4. Μέθοδος της Shell
5. Μέθοδος Τμήματος Δημοσίων Έργων (ΤΔΕ) Κύπρου

4.1 Μέθοδος Ινστιτούτου Ασφάλτου

Η μέθοδος του Ινστιτούτου Ασφάλτου αρχικά προτάθηκε το 1981, σε αντικατάσταση της παλαιάς μεθόδου του ιδίου Ινστιτούτου, συμπληρώθηκε το 1984 και έλαβε τη σημερινή της μορφή το 1991 (Νικολαΐδης 2002). Η μέθοδος χρησιμοποιεί την ελαστική θεωρία πολυστρωματικού συστήματος θεωρώντας ως σχεδιαστικά κριτήρια τη ρηγμάτωση και την παραμένουσα παραμόρφωση. Θεωρεί δύο κρίσιμες καταστάσεις, τη μέγιστη επιτρεπόμενη εφελκυστική παραμόρφωση (ϵ_1) στην κατώτατη επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης και τη μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική παραμόρφωση (ϵ_2) στην ανώτατη επιφάνεια του εδάφους έδρασης. Τα πάχη των στρώσεων καθορίζονται από νομογραφήματα που ετοιμάσθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος DAMA σε συνδυασμό με την πολύχρονη εμπειρία των ερευνητών.

Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να γίνει η διαστασιολόγηση του πάχους του εύκαμπτου οδοστρώματος που αποτελείται από:

- θερμό ασφαλτικό σκυρόδεμα και με βάση (και υπόβαση, αν χρειάζεται) από ασύνδετα αδρανή
- ψυχρό ασφαλτόμιγμα η βάση
- ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου όλες οι στρώσεις και ονομάζεται οδόστρωμα 'ολικού πάχους'

Γενικά, αυτή η μέθοδος για να διαστασιολογήσει το οδόστρωμα λαμβάνει υπόψη τον κυκλοφοριακό φόρτο, τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και τα υλικά των στρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν.

4.1.1 Καθορισμός Κυκλοφοριακού Φόρτου

Ο κυκλοφοριακός φόρτος που πρόκειται να κινηθεί για όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος εκφράζεται σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ITA ή ESAL). Ο καθορισμός του συνολικού αριθμού ITA για όλη τη σχεδιαστική διάρκεια του οδοστρώματος επιτυγχάνεται αφού καθοριστούν κάποιοι παράμετροι οι οποίοι είναι η σύνθεση της κυκλοφορίας, το ποσοστό των οχημάτων στη σχεδιαστική λωρίδα και το ποσοστό της ετήσιας αύξησης των οχημάτων, τα οποία αναλύονται πιο κάτω.

- i. **Η σύνθεση της κυκλοφορίας** (αριθμός και βάρος αξόνων σε κάθε όχημα) κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος. Στην περίπτωση κατά την οποία ο δρόμος είναι καινούριος, η σύνθεση της κυκλοφορίας κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του

οδοστρώματος θα πρέπει να εκτιμηθεί. Θα είναι προτιμότερο να εκτιμηθεί ο ετήσιος αριθμός ΙΤΑ και όχι η σύνθεση της κυκλοφορίας (Νικολαΐδης 2002).

- ii. **Το ποσοστό των οχημάτων στη σχεδιαστική λωρίδα** (λωρίδα μελέτης). Το ποσοστό των οχημάτων στη σχεδιαστική λωρίδα εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας καθώς και την αναλογία της κίνησης των οχημάτων ανά κατεύθυνση. Αν δεν υπάρχουν άλλα αναλυτικά δεδομένα, το ποσοστό των οχημάτων στη λωρίδα μελέτης καθορίζεται από τον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4-1: Ποσοστά οχημάτων στη λωρίδα μελέτης

Συνολικός αριθμός λωρίδων	Ποσοστό οχημάτων στη λωρίδα μελέτης
2	50%
4	45% (35% - 48%)
6 ≤	40% (25% - 48%)

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

- iii. **Το ποσοστό της ετήσιας αύξησης των οχημάτων** (ενιαίο ή κατά κατηγορία οχήματος) που θα εκτιμηθεί, θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικός για όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια στατιστικών για αύξηση οχημάτων, με παλιές κυκλοφοριακές μελέτες, με τον ρυθμό ανάπτυξης της οικονομίας, και της κατανάλωσης καυσίμων κ.ά.. Μετά από αυτή την εκτίμηση προκύπτει ο συντελεστής αύξησης “ λ’ ” ο οποίος χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του τελικού συνολικού κυκλοφοριακού φόρτου και υπολογίζεται με την πιο κάτω σχέση.

$$\lambda = [(1 + r)^n - 1] / r$$

Όπου:

r = η επί τοις εκατό ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας

n = η διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος

Ο συνολικός αριθμός των ΙΤΑ για όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος ισούται με το γινόμενο του ετήσιου αριθμού ΙΤΑ με τον συντελεστή αύξησης ‘λ’.

$$\text{Συνολικός Αριθμός ΙΤΑ} = \text{Ετήσιος Αριθμός ΙΤΑ} \times \lambda$$

4.1.2 Φέρουσα Ικανότητα Υπεδάφους

Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους επειδή είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος, πρέπει να γίνονται κάποιοι έλεγχοι για το έδαφος έδρασης. Η δειγματοληψία και ο έλεγχος των υλικών του εδάφους έδρασης γίνεται με διαδικασίες που περιγράφονται στο εγχειρίδιο MS-10, Soils Manual, του Ινστιτούτου Ασφάλτου.

4.1.2.1 Εργαστηριακοί Έλεγχοι Υλικών Υπεδάφους

Οι απαραίτητοι έλεγχοι υλικών υπεδάφους είναι, το Όριο Υδαρότητας, το Όριο Πλαστικότητας, ο Δείκτης Πλαστικότητας, η Κοκκομετρική Ανάλυση, η Συμπύκνωση και ο Καθαρισμός του μέτρου M_r ή CBR ή της τιμής αντίστασης R . Αν η μέτρηση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους εκτελεσθεί με τη μέθοδο CBR ή με την τιμή R τότε το μέτρο επανάκτησης (M_r) μπορεί να εκτιμηθεί με τις παρακάτω σχέσεις:

$$M_r = 10.3 \times CBR \text{ (MPa)}$$

$$M_r = 8.0 + [3.8 \times (\text{τιμή } R)] \text{ (MPa)}$$

Η δειγματοληψία των υλικών θα πρέπει να γίνεται σε βάθος περίπου 600mm από την ερυθρά γραμμή. Αν η ποιότητα του υπεδάφους αλλάζει, θα πρέπει να συλλέγονται αντιπροσωπευτικά δείγματα από όλα τα εδάφη. Ο αριθμός των δειγμάτων καθορίζεται σε 6 έως 8 για κάθε διαφορετικό υλικό έδρασης. Σε περίπτωση επιχώματος θα ελέγχεται το υλικό της επίχωσης.

Αν κάποιο δείγμα δώσει χαμηλές τιμές M_r ή CBR τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται ασθενές και θα πρέπει να ληφθούν περαιτέρω δείγματα για να τεκμηριωθεί το αποτέλεσμα. Σ' αυτήν την περίπτωση, το υλικό της περιοχής αυτής θα πρέπει να αντικατασταθεί με καλύτερης ποιότητας υλικό ή να αυξηθεί το πάχος του οδοστρώματος της περιοχής αυτής. Οι χαμηλές τιμές του M_r δε λαμβάνονται υπόψη για τον καθορισμό της σχεδιαστικής τιμής του M_r .

4.1.2.2 Καθορισμός Σχεδιαστικής τιμής M_r Υπεδάφους

Μετά τη δειγματοληψία και τον έλεγχο ή την εκτίμηση της τιμής του μέτρου επανάκτησης (M_r), θα πρέπει να καθορισθεί η σχεδιαστική τιμή M_r του εδάφους έδρασης. Ο καθορισμός της σχεδιαστικής τιμής M_r δε λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των τιμών, αλλά με την πιο κάτω διαδικασία που ακολουθεί.

- 1) Κατάταξη των τιμών M_r που πάρθηκαν από τους ελέγχους κατά αριθμητική φθίνουσα τιμή
- 2) Για κάθε διαφορετική τιμή του M_r , αρχίζοντας από τη μικρότερη τιμή, υπολογίζονται πόσες τιμές (συμπεριλαμβανόμενης και του εαυτού της) είναι μεγαλύτερες ή ίσες με την υπό εξέταση τιμή και εκφράζεται επί τοις εκατό
- 3) Με τα υπολογιζόμενα ποσοστά και τιμές M_r , σχεδιάζεται το σχετικό διάγραμμα
- 4) Καθορίζεται η σχεδιαστική τιμή του μέτρου M_r με τη βοήθεια του πίνακα 4.2 χρησιμοποιώντας τα όρια του πίνακα

Πίνακας 4-2: Οριακά ποσοστά για τον καθορισμό σχεδιαστικού μέτρου M_r

Κυκλοφοριακός φόρτος, ΙΤΑ	Ποσοστό σχεδιαστικής τιμής μέτρου M_r (%)
$<10^4$	60
10^4-10^6	75
$>10^6$	87.5

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

4.1.3 Υλικά Στρώσεων

I. Βάση και Υπόβαση με Ασύνδετα Αδρανή

Οι προδιαγραφές των υλικών για βάση ή υπόβαση από ασύνδετα αδρανή προδιαγράφονται στις Αμερικάνικες Προδιαγραφές ASTM specification D 2940, παράλληλα όμως θα πρέπει να ικανοποιούν και τις ιδιότητες του πίνακα 4.3 που ακολουθεί. Επίσης, στον πίνακα 4.4 καθορίζεται το ελάχιστο πάχος των ασφαλικών στρώσεων για την επιφανειακή στρώση.

Πίνακας 4-3: Απαιτήσεις για υλικά βάσης και υπόβασης

Έλεγχος	Απαιτήσεις	
	Υπόβαση	Βάση
CBR, ελάχιστο	20	80
Τιμή – R, ελάχιστο	55	78
Όριο Υδαρότητας, μέγιστο	25	25
Δείκτης Πλαστικότητας, μέγιστο	6	N.P.
Ισοδύναμο Άμμου, ελάχιστο	25	35
Φίλλερ, μέγιστο	12	7

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

Πίνακας 4-4: Ελάχιστα πάχη ασφαλτικών στρώσεων πάνω σε βάση από ασύνδετα αδρανή

Κυκλοφοριακός φόρτος (ΙΤΑ)	Ελάχιστο πάχος Ασφαλτικών στρώσεων (mm)
$<10^4$	75
$10^4 - 10^6$	100
$>10^6$	> 125

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

II. Ασφαλτική Βάση & Τάπητας Κυκλοφορίας

A. Θερμά Ασφαλτομίγματα

Ο τύπος θερμού ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιείται ως ασφαλτική βάση και ως τάπητας κυκλοφορίας είναι το ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου. Η σύνθεση και ο έλεγχος των ασφαλτομιγμάτων γίνεται με τη δοκιμή Marshall.

Το ασφαλτόμιγμα που θα χρησιμοποιηθεί επιλέγεται με βάση τις θερμοκρασιακές συνθήκες που φαίνονται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4-5: Επιλογή ασφάλτου

Καιρικές Συνθήκες	Τύπος Ασφάλτου (pen)
Κρύος καιρός (ΜΕΘΑ, < 7 °C)	85/100 – 120/150
Θερμός καιρός (ΜΕΘΑ, 7 °C - 24 °C)	60/70 – 85/100
Ζεστός καιρός (ΜΕΘΑ, ≥ 24 °C)	40/50 – 60/70

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

B. Ψυχρά Ασφαλτομίγματα

Οι τύποι ψυχρών ασφαλτομιγμάτων που μπορεί να κατασκευαστεί η ασφαλτική βάση είναι:

- Τύπος I από θραυστά διαβαθμισμένα αδρανή
- τύπος II από ημίθραυστα φυσικά αδρανή (χαλίκια)
- τύπος III από άμμο (θραυστή ή μίγμα θραυστής και φυσικής)

Η επιφανειακή στρώση μπορεί να κατασκευασθεί με τους δύο πιο κάτω τρόπους:

- Ψυχρό ασφαλτόμιγμα τύπου I με επιφανειακή επίστρωση
- Τάπητας από ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου

Στον πίνακα 4.6 δίνονται τα ελάχιστα πάχη της επιφανειακής στρώσης πάνω σε βάση από ψυχρό ασφαλτόμιγμα Τύπου II και III συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου.

Πίνακας 4-6: Ελάχιστα πάχη επιφανειακής στρώσης πάνω σε βάση από ψυχρό ασφαλτόμιγμα Τύπου II και III

Κυκλοφοριακός φόρτος (ΓΤΑ)	Ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης (mm)
10 ⁴	50
10 ⁵	50
10 ⁶	75
10 ⁷	100
> 10 ⁷	130

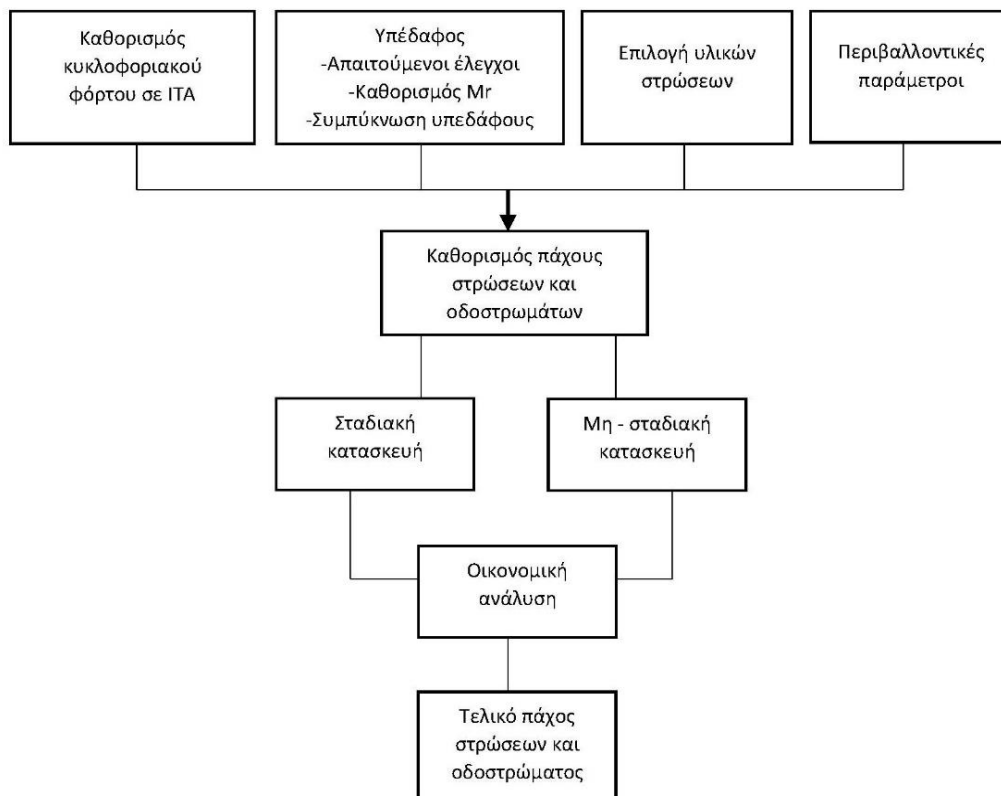
Πηγή: Οικονομίδης, 2015

Στο εγχειρίδιο A Basic Asphalt Emulsion Manual (MS-19) του Ινστιτούτου Ασφάλτου δίνεται αναλυτική περιγραφή της παρασκευής του μίγματος.

4.1.4 Διαδικασία Διαστασιολόγησης Οδοστρώματος

Αφού καθορισθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος, η αντιπροσωπευτική τιμή του μέτρου επανάκτησης (M_r) του εδάφους έδρασης και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος γίνεται με τη βοήθεια των νομογραφημάτων και των περιοριστικών οδηγιών που προαναφέρθηκαν.

Τα νομογραφήματα εξήχθησαν με τη βοήθεια του προγράμματος DAMA, και διακρίνονται μεταξύ τους, από τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν και τον θερμοκρασιακό παράγοντα (ΜΕΘΑ) ο οποίος χωρίζεται με βάση τριών αντιπροσωπευτικών θερμοκρασιών 7, 15.5 και 24 °C. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε τα νομογραφήματα με ΜΕΘΑ 15.5°C (Διαγράμματα Α.1, Α.2) τα οποία φαίνονται στο Παράρτημα Α. Τα πιθανά σενάρια για το πάχος του οδοστρώματος είναι πολλά. Ο μηχανικός θα πρέπει να αποφασίσει πιο σενάριο θα χρησιμοποιήσει μελετώντας την κάθε περίπτωση και να δει ποια θα είναι η βέλτιστη λύση.



Σχήμα 4-1: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά Asphalt Institute

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4.2 Μέθοδος AASHTO

Η μέθοδος του AASHTO βασίζεται στην αρχική μεθοδολογία που προτάθηκε από τον ίδιο τον οργανισμό το 1972. Η μεθοδολογία βασίζεται στα αποτελέσματα του Οδικού Πειράματος AASHO που έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 στην Ottawa του Illinois των ΗΠΑ. Η αρχική μεθοδολογία αναθεωρήθηκε μια φορά το 1981 και μετά τροποποιήθηκε το 1986, οπότε έλαβε και τη μορφή που έχει σήμερα.

Αυτή η μέθοδος είναι μία ημιαναλυτική μέθοδος διαστασιολόγησης οδοστρώματων και χρησιμοποιεί ως κριτήριο αστοχίας, την αστοχία της χρήσεως του οδοστρώματος αντί των κριτηρίων της στατικής αστοχίας, δηλαδή την παραμόρφωση και την κόπωση (ρηγμάτωση) του οδοστρώματος. Η αστοχία του οδοστρώματος συνδυάζεται με τη λειτουργικότητα και ειδικότερα με το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχει το οδόστρωμα στον χρήστη σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και εκφράζεται με τον Δείκτη Παρούσας Εξυπηρέτησης (PSI).

Τα στοιχεία που αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες είναι οι σχεδιαστικές μεταβλητές, τα κριτήρια συμπεριφοράς ή απόδοσης του οδοστρώματος, οι ιδιότητες των υλικών και τέλος, τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

4.2.1 Σχεδιαστικές Μεταβλητές

Οι σχεδιαστικές μεταβλητές που χρειάζονται για τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, η διάρκεια σχεδιασμού, η αξιοπιστία των δεδομένων και των αποτελεσμάτων και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες.

4.2.1.1 Κυκλοφοριακός Φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος όπως και στις άλλες σύγχρονες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης οδοστρώματων, εκφράζεται σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ITA). Η μετατροπή των αξονικών φορτίων σε ITA γίνεται με τη βοήθεια των Συντελεστών Ισοδυναμίας (ΣΙ) που είναι συνάρτηση τόσο του αξονικού φορτίου όσο και της τελικής τιμής (Pt) του δείκτη παρούσας εξυπηρευτικότητας καθώς και του δομικού αριθμού (SN) του οδοστρώματος. Για τη διαστασιολόγηση νέων εύκαμπτων οδοστρώματων προτείνεται η χρήση των συντελεστών με τις αντίστοιχες τιμές $Pt=2.5$ και $SN=5$. Για τον υπολογισμό του συνολικού αθροιστικού αριθμού ITA (W_{18}) στη λωρίδα μελέτης για μια περίοδο n ετών χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση.

$$W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18}$$

Όπου :

D_D = ποσοστό κατανομής αξόνων ανά κατεύθυνση

D_L = ποσοστό χρήσης λωρίδας μελέτης (Πίνακας 4.7)

w_{18} = συνολικός αριθμός ΙΤΑ για όλη τη χρονική διάρκεια της ανάλυσης και στις δύο κατευθύνσεις

Πίνακας 4-7: Ποσοστό κατανομής αξόνων στη λωρίδα μελέτης

Αριθμός λωρίδων σε κάθε κατεύθυνση	% ΙΤΑ στη λωρίδα μελέτης (D_L)
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Πηγή: AASHTO, 1993

4.2.1.2 Διάρκεια Σχεδιασμού

Η σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος είναι μια γενική έννοια που στη μεθοδολογία αυτή καθορίζεται επακριβώς γιατί αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον βέλτιστο τεχνο-οικονομικό σχεδιασμό του οδοστρώματος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο χαρακτηριστικούς όρους οι οποίοι είναι, η ‘περίοδος ανάλυσης’ και η ‘περίοδος συμπεριφοράς’.

- Η περίοδος ανάλυσης ή σχεδιασμένη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος ορίζεται η ολική ζωή του οδοστρώματος κατά την οποία γίνονται συντηρήσεις, καθώς και μία ή περισσότερες αποκαταστάσεις του οδοστρώματος. Η μέθοδος αυτή προτείνει να χρησιμοποιούνται οι τιμές διάρκειας σχεδιασμού που δίνονται στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4-8: Προτεινόμενες περίοδοι ανάλυσης

Κατηγορία Δρόμου	Περίοδος Ανάλυσης
Αστικοί δρόμοι με υψηλό κ/φ	30-50 έτη
Υπεραστικοί δρόμοι με υψηλό κ/φ	20-50 έτη
Ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι μικρού κ/φ	15-25 έτη
Μη Ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι μικρού κ/φ	10-20 έτη

Πηγή: AASHTO, 1993

- Η περίοδος συμπεριφοράς του οδοστρώματος ορίζεται, η χρονική περίοδος κατά την οποία το οδόστρωμα δε χρειάζεται αποκατάσταση, παρά μόνο συντήρηση για να συνεχίσει να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης. Η ελάχιστη περίοδος συμπεριφοράς μπορεί να είναι τα 10 χρόνια και η μέγιστη 15-20 χρόνια.

4.2.1.3 Αξιοπιστία

Αξιοπιστία, ορίζεται η πιθανότητα που έχει το υπό μελέτη οδόστρωμα να συμπεριφερθεί ικανοποιητικά σε όλη τη διάρκεια ζωής του, ανεξάρτητα από όποιες απρόβλεπτες μεταβολές του κυκλοφοριακού φόρτου και των περιβαλλοντικών αλλαγών. Η αξιοπιστία συνδέεται άμεσα με τη σπουδαιότητα του έργου. Ο υψηλός βαθμός αξιοπιστίας συνεπάγεται, μείωση του ρίσκου της μη ικανοποιητικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος και παράλληλα μεγαλύτερο κατασκευαστικό πάχος του οδοστρώματος. Ο βαθμός αξιοπιστίας (R) του έργου δίνεται από τον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4-9: Επίπεδα αξιοπιστίας, R, ανά κατηγορία οδού

Κατηγορία δρόμου	Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας, R	
	Αστικές περιοχές	Υπεραστικές περιοχές
Αυτοκινητόδρομοι	85-99%	80-99.9%
Κύριες αρτηρίες	80-99%	75-95%
Δευτερεύουσες αρτηρίες	80-95%	75-95%
Δρόμοι τοπικής σημασίας	50-80%	50-80%

Πηγή: AASHTO, 1993

Η έννοια της αξιοπιστίας συνδέεται και με τη σταθερή απόκλιση (standard deviation), S_o , των δεδομένων του κυκλοφοριακού φόρτου σε συνδυασμό με την εκτίμηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Από το μοντέλο συμπεριφοράς του AASHTO βρέθηκε ότι το $S_o=0.35$ για εύκαμπτα οδοστρώματα.

4.2.1.4 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός νέου οδοστρώματος είναι ο παγετός (frost) και η διόγκωση (swelling) του εδάφους με την παρουσία νερού και υλικών που υπόκεινται σε διόγκωση. Και στις δύο περιπτώσεις προκαλείται ανύψωση των στρώσεων που εμφανίζεται στην ανώτατη στρώση με ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης. Η ύπαρξη του ενός ή και των δύο παραγόντων μειώνει τη χρονική 'περίοδο συμπεριφοράς' του οδοστρώματος κάτι το οποίο εκφράζεται συναρτήσει κάποιας απώλειας του δείκτη εξυπηρετικότητας. Η απώλεια του δείκτη εξυπηρετικότητας λόγω των παραπάνω φαινομένων προστίθεται στην απώλεια που προκαλείται από τον κυκλοφοριακό φόρτο.

- Η διόγκωση του υπεδάφους εμφανίζεται, αν υπάρχουν στο υπέδαφος υλικά τα οποία μπορούν να διογκωθούν (άργιλος). Η απώλεια εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος (ΔPSI_{sw}) υπολογίζεται με τη χρήση της πιο κάτω εξίσωσης.

$$\Delta PSI_{sw}=0.00335 \times V_R \times P_s \times (1.e^{\theta t})$$

Όπου:

V_R = Δυναμικό κάθετης ανύψωσης (ίντσες) που υπολογίζεται από νομογράφημα που δίνεται στο εγχειρίδιο του AASHTO και εξαρτάται από τον δείκτη πλαστικότητας (PI) του υπεδάφους, τις συνθήκες υγρασίας αυτού μετά την κατασκευή και το πάχος της εδαφικής στρώσης που δύναται να διογκωθεί

P_s = Πιθανότητα διόγκωσης που αντιπροσωπεύει την αναλογία (%) του μήκους του έργου που υπόκειται σε διόγκωση

θ = Σταθερά διόγκωσης που εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο η διόγκωση λαμβάνει χώρα. Παίρνει τιμές από 0.04-0.20. Η μεγαλύτερη τιμή χρησιμοποιείται όταν το υπέδαφος υπόκειται σε ψηλή υγρασία και ελλιπή αποστράγγιση

t = χρόνια

- Ο παγετός προκαλεί απώλεια της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος (ΔPSI_{FH}) και αυτή υπολογίζεται με ανάλογη διαδικασία η οποία περιγράφεται στο εγχειρίδιο του AASHTO.

Σε περιπτώσεις που δεν υπεισέρχεται ο παράγοντας παγετός, η τιμή ΔPSI_{FH} λαμβάνεται ίση με μηδέν.

4.2.2 Κριτήριο Συμπεριφοράς ή Απόδοσης Οδοστρώματος

Το κριτήριο συμπεριφοράς ή απόδοσης του οδοστρώματος που λαμβάνεται υπόψη σε αυτή τη μέθοδο, είναι το επίπεδο εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος.

Η εξυπηρετικότητα του οδοστρώματος είναι ο βασικός στόχος αυτής της μεθόδου. Ορίζεται η ικανότητα του οδοστρώματος να εξυπηρετεί ικανοποιητικά την κυκλοφορία και εκφράζεται με τον Δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (PSI) ο οποίος λαμβάνει τιμές από 5 για άριστο επίπεδο εξυπηρέτησης μέχρι 0 για χειρότερο επίπεδο εξυπηρέτησης.

Το οδόστρωμα μόλις κατασκευαστεί έχει Αρχικό Δείκτη Εξυπηρετικότητας, P_o . Θεωρητικά, ο Αρχικός Δείκτης Εξυπηρετικότητας είναι ίσος με 5, αλλά πρακτικά είναι αδύνατο να υπάρξει τέλει οδόστρωμα, γι' αυτό προτείνεται για εύκαμπτα οδοστρώματα η τιμή 4.2.

Εκτός από τον Αρχικό Δείκτη Εξυπηρετικότητας υπάρχει και ο Τελικός Δείκτης Εξυπηρετικότητας, P_t , ο οποίος εκφράζει το κατώτατο αποδεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης πριν την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Η μέθοδος AASHTO προτείνει τιμές μεγαλύτερες από 2.5 για αυτοκινητόδρομους ή κύριες αρτηρίες και 2.0 για όλες τις άλλες περιπτώσεις.

Αφού καθορισθεί η τιμή του P_o και του P_t , η συνολική αλλαγή του δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας ΔPSI υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση :

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

4.2.3 Ιδιότητες των Υλικών

4.2.3.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Η μηχανική ιδιότητα του υπεδάφους και γενικά όλων των υλικών, εκφράζεται με το μέτρο επανάκτησης, M_r , όπως και στη μέθοδο του Ινστιτούτου Ασφάλτου. Αυτή η μέθοδος δίνει περισσότερη σημασία στην εποχιακή αλλαγή του μέτρου επανάκτησης. Γι' αυτόν τον λόγο, η εξεύρεση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής του M_r συνιστάται με τον καθορισμό της ισοδύναμης τιμής M_r με τη βοήθεια ορισμένων συντελεστών, οι οποίοι ονομάζονται συντελεστές σχετικής καταστροφής u_f . Οι συντελεστές αυτοί συσχετίζονται τη σχετική καταστροφή που θα επέλθει στην τιμή του M_r λόγω εποχής και υπολογίζονται με τη χρήση της πιο κάτω σχέσης.

$$u_f = 1.18 \times 10^8 \times M_r^{-2.32}$$

Συνεπώς, για να υπολογιστεί η σχεδιαστική ή ισοδύναμη τιμή M_r θα πρέπει να υπολογιστεί πρώτα ο συντελεστής σχετικής καταστροφής (u_f) για κάθε τιμή M_r που μετρήθηκε σε διάφορους μήνες ή κάτω από διάφορες συνθήκες υγρασίας και μετά να βρεθεί ο μέσος όρος των συντελεστών u_f . Τέλος, η σχεδιαστική ή ισοδύναμη τιμή M_r είναι αυτή που θα αντιστοιχεί στον μέσο συντελεστή u_f χρησιμοποιώντας την ίδια σχέση που χρησιμοποιήθηκε τελευταία ή με τη χρήση του νομογραφήματος στο διάγραμμα B.1 που φαίνεται στο παράρτημα Β.

Αν τα χαρακτηριστικά του υλικού εκφράζονται μέσω του δείκτη CBR, τότε χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση:

$$M_r = 1500 \times CBR \text{ (psi)}$$

4.2.3.2 Συντελεστές Στρώσεων

Αυτή η μέθοδος μετατρέπει το πάχος της κάθε στρώσης σε ένα αντίστοιχο Δομικό Αριθμό, SN_i (Structural number). Αυτοί οι δομικοί αριθμοί υπολογίζονται με τη χρήση κάποιων συντελεστών, οι οποίοι ονομάζονται δομικοί συντελεστές στρώσεων (a_i) που εξαρτώνται από το υλικό των στρώσεων και υπολογίζονται από τα διαγράμματα B.2-B.4 του παραρτήματος Β. Ο δομικός αριθμός της κάθε στρώσης υπολογίζεται με τη χρήση της πιο κάτω σχέσης.

$$SN_i = a_i * D_i$$

Όπου: D_i = πάχος της στρώσης i

Με τον ίδιο τρόπο, υπολογίζεται και για το συνολικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο αντιπροσωπεύει τον δομικό αριθμό του οδοστρώματος, SN χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$SN = \sum (a_i * D_i)$$

Οι τιμές των δομικών συντελεστών των στρώσεων (a_i) όπως προαναφέρθηκε, είναι ανάλογοι των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κάθε στρώση, τα οποία χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες

- (i) Ασφαλομίγματα
- (ii) Ασύνδετα υλικά βάσης
- (iii) Ασύνδετα υλικά υπόβασης
- (iv) Ισχνά μίγματα με τσιμέντο (cement treated)
- (v) Ισχνά μίγματα με άσφαλο (bituminous treated)

4.2.4 Χαρακτηριστικά του Οδοστρώματος

Το χαρακτηριστικό που λαμβάνεται υπόψη για την κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι η αποστραγγιστική τους ικανότητα. Με βάση τη μέθοδο AASHTO η αποστραγγιστική ικανότητα του οδοστρώματος επηρεάζει τη συμπεριφορά όλων των στρώσεων, εκτός από αυτές που είναι κατασκευασμένες από θερμό ασφαλτικό σκυρόδεμα, δηλαδή την επιφανειακή στρώση. Γι' αυτόν τον λόγο, προτείνονται κάποιοι συντελεστές αποστράγγισης, οι οποίοι υπεισέρχονται στον υπολογισμό του δομικού αριθμού του οδοστρώματος (SN).

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 + \dots$$

Οι συντελεστές αποστράγγισης φαίνονται στον πίνακα 4.10 οι οποίοι χωρίζονται ανάλογα με την αποστραγγιστική ικανότητα και το ποσοστό υγρασία που πλησιάζει την κατάσταση κορεσμού. Σε περίπτωση που μια στρώση αποτελείται από ισχύο σκυρόδεμα, ο συντελεστής αποστράγγισης ισούται με μονάδα.

Πίνακας 4-10: Συντελεστές αποστράγγισης m_2, m_3, \dots

Ικανότητα Αποστράγγισης	Ποσοστό χρόνου που το οδόστρωμα εκτίθεται σε υγρασία που πλησιάζει την κατάσταση κορεσμού			
	< 1%	1 – 5%	5 – 25%	> 25%
Άριστη (Αποστράγγιση σε δύο ώρες)	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Καλή (Αποστράγγιση σε μια μέρα)	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Μέτρια (Αποστράγγιση σε μια βδομάδα)	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Κακή (Αποστράγγιση σε ένα μήνα)	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Πολύ κακή (Το νερό δεν αποστραγγίζεται)	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Πηγή: AASHTO, 1993

4.2.5 Διαστασιολόγηση Εύκαμπτου Οδοστρώματος

Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης που θα ακολουθήσει, είναι για οδοστρώματα που πρόκειται να εξυπηρετούν κατά τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής τους, τουλάχιστον 50.000 ΙΤΑ. Αυτή η διαστασιολόγηση επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

1. Βάσει δομικού αριθμού του οδοστρώματος
2. Βάσει του δομικού αριθμού σε πολυστρωματικό σύστημα

Και για τους δύο τρόπους χρησιμοποιείται το νομογράφημα του διαγράμματος B.5 που φαίνεται στο παράρτημα Β, το οποίο είναι η γραφική λύση της πιο κάτω εξίσωσης.

$$\log_{10}(W_{18}) = R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN+1) - 0.2 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5^3}\right]}{0.4 + \left[\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}\right]} + 2.32 * \log_{10}(Mr) - 8.07$$

Όπου:

R = Αξιοπιστία

S_o = Τυπική απόκλιση

SN = Δομικός αριθμός

ΔPSI = Απώλεια δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας

Mr = Μέτρο επανάκτησης

4.2.5.1 Διαστασιολόγηση Βάσει Δομικού Αριθμού Οδοστρώματος

Ο δομικός αριθμός του οδοστρώματος SN υπολογίζεται από το νομογράφημα του διαγράμματος B.5 που φαίνεται στο παράρτημα Β, δεδομένου ότι είναι γνωστά:

- Το ισοδύναμο μέτρο επανάκτησης (Mr)
- Ο συνολικός αριθμός ΙΤΑ (W₁₈) στη λωρίδα μελέτης
- Η αξιοπιστία (R)
- Η τυπική απόκλιση (S_o)
- Η απώλεια του δείκτη εξυπηρετικότητας (ΔPSI = P_o-P_t)

Αφού υπολογισθεί ο δομικός αριθμός και με τη χρήση της εξίσωσης που ακολουθεί, μπορούν να υπολογισθούν και τα πάχη των στρώσεων.

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3 + \dots$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει άπειρους συνδυασμούς λύσεων, γι' αυτό ο συνδυασμός που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι οικονομικά συμφέρων και να ικανοποιεί τα ελάχιστα πάχη στρώσεων που προτείνει ο AASHTO, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 4.11.

Πίνακας 4-11: Ελάχιστα πάχη στρώσεων

Κυκλοφοριακός Φόρτος	Ελάχιστα Πάχη Στρώσεων (mm)	
	Στρώσεις από Ασφαλικό Σκυρόδεμα	Στρώσεις από Ασύνδετα Αδρανή
< 50000	25	100
50001 – 150000	50	100
150001 – 500000	62.5	100
500001 -2000000	75	150
2000001 -7000000	87.5	150
> 7000000	100	150

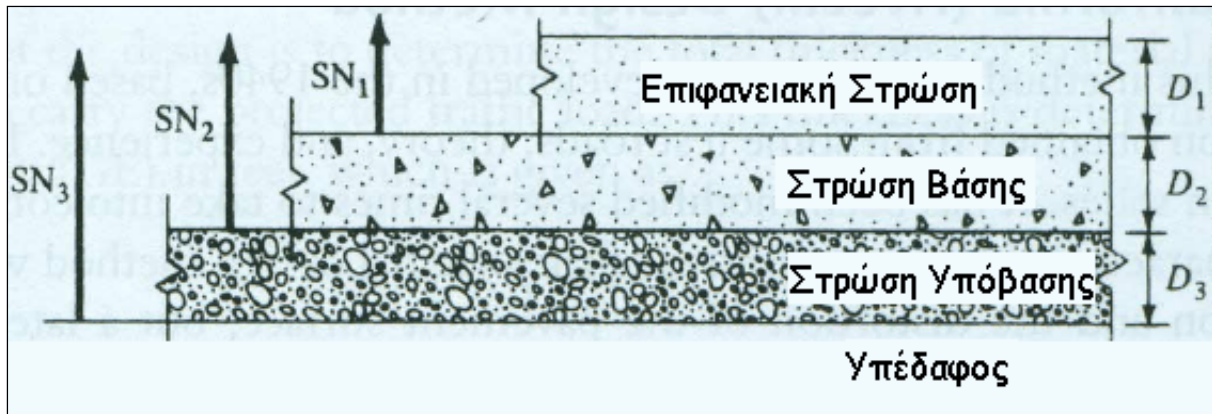
Πηγή: AASHTO, 1993

4.2.5.2 Διαστασιολόγηση Βάσει Δομικού Αριθμού σε Πολυστρωματικό Σύστημα

Ο δομικός αριθμός οδοστρώματος πάνω σε κάθε στρώση, υπολογίζεται από το νομογράφημα του διαγράμματος B.5 που φαίνεται στο παράρτημα Β. Δηλαδή στην περίπτωση οδοστρώματος που αποτελείται από τρεις στρώσεις, αφού γίνει η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων όπως στον προηγούμενο τρόπο, θα υπολογιστεί ο δομικός αριθμός.

- (1) Πάνω στη βάση, SN_1 χρησιμοποιώντας το M_r της βάσης
- (2) Πάνω στην υπόβαση, SN_2 χρησιμοποιώντας το M_r της υπόβασης
- (3) Πάνω στο υπέδαφος, SN_3 χρησιμοποιώντας το M_r του υπεδάφους

Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4-2: Υπολογισμός δομικού αριθμού σε σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

Αφού υπολογισθεί το SN_1 , το πάχος της πρώτης στρώσης (επιφανειακή στρώση) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D^*_1 \geq SN_1 / a_1 \quad (inches)$$

Αν το πάχος της πρώτης στρώσης στρογγυλοποιηθεί προς τα πάνω, έστω D^*_1 , τότε επαναπροσδιορίζεται ο δομικός αριθμός της πρώτης στρώσης:

$$SN^*_1 = D^*_1 \cdot a_1$$

Αφού υπολογισθεί το SN_2 , το πάχος της δεύτερης στρώσης (στρώση βάσης) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D^*_2 \geq (SN_2 - SN^*_1) / (a_2 \cdot m_2) \quad (inches)$$

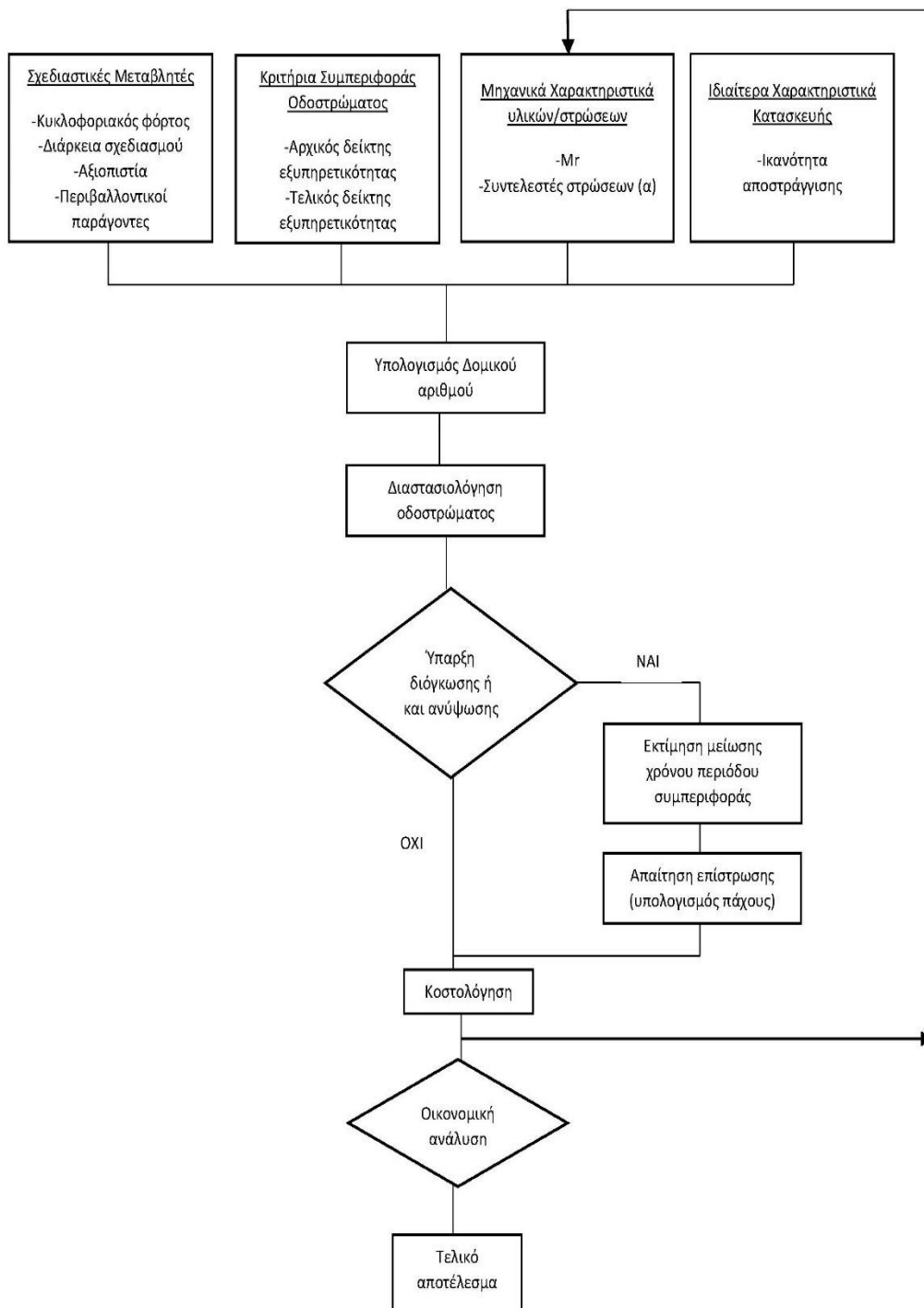
Αν το πάχος της δεύτερης στρώσης στρογγυλοποιηθεί προς τα πάνω, έστω D^*_2 , τότε επαναπροσδιορίζεται ο δομικός αριθμός της δεύτερης στρώσης:

$$SN^*_2 = D^*_1 \cdot a_1 + D^*_2 \cdot a_2 \cdot m_2$$

Αφού υπολογισθεί το SN_3 , το πάχος της τρίτης στρώσης (στρώση υπόβασης) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D^*_3 \geq (SN_3 - SN^*_2) / (a_3 \cdot m_3) \quad (inches)$$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζονται και τα υπόλοιπα πάχη των στρώσεων, αν υπάρχουν.



Σχήμα 4-3: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά AASHTO

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4.3 Βρετανική Μέθοδος

Η Βρετανική μέθοδος διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, HD 24/94 είναι μία ημιαναλυτική μεθοδολογία που έχει ως βάση της τη μεθοδολογία που προτάθηκε το 1970 (Road Note 29). Η μέθοδος έλαβε τη σημερινή της μορφή μετά από μια ριζική αναθεώρηση το 1987 που βασιζόταν στην εικοσαετή ερευνητική εργασία του TRRL (Νικολαΐδης 2002).

Με αυτήν τη μέθοδο, κατασκευάζονται δύο ειδών εύκαμπτα οδοστρώματα, τα τυπικά εύκαμπτα οδοστρώματα και τα 'σύνθετα' ή 'μικτά' οδοστρώματα και η σχεδιαστική διάρκεια ζωής τους είναι για 20 χρόνια. Στο τέλος της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος αναμένεται να εμφανιστεί επιφανειακή βύθιση 20mm σε ποσοστό 15% της επιφάνειάς του, στην τροχιά των τροχών ή διαμήκεις ρωγμές στην τροχιά των τροχών. Με την εμφάνιση αυτών των φθορών, το οδόστρωμα παρόλο που έχει ακόμα τις δομικές ιδιότητες του, πρέπει να αποκατασταθεί ή και να ενισχυθεί για να διαρκέσει η ζωή του επιπλέον 20 χρόνια παρέχοντας ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης. Αφού περάσουν και τα επιπρόσθετα 20 χρόνια, θεωρείται ότι το οδόστρωμα έφθασε στην κατάσταση 'πλήρους' καταστροφής του και έχει τελειώσει η διάρκεια ζωής του. Βάσει της μεθοδολογίας, η κατάσταση πλήρους καταστροφής, θεωρείται όταν εμφανιστούν πολλαπλές διακλαδισμένες ρηγματώσεις και επιφανειακές βυθίσεις πέραν των 20mm. Τα μικτά εύκαμπτα οδοστρώματα αποφεύγονται να κατασκευάζονται σε περιπτώσεις που ο αναμενόμενος κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ μεγάλος.

Σύμφωνα με τη Βρετανική μέθοδο, το εύκαμπτο οδόστρωμα διακρίνεται σε τρεις στρώσεις: την επιφανειακή ή φθειρόμενη στρώση από ασφαλτόμιγμα, τη στρώση της βάσης από ασφαλτόμιγμα και τη στρώση της υπόβασης από ασύνδετα ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο αδρανή. Στην περίπτωση του μικτού εύκαμπτου οδοστρώματος, η στρώση της βάσης αποτελείται από άοπλο σκυρόδεμα η κατώτερη στρώση και από ασφαλτόμιγμα η ανώτερη στρώση.

Σε αυτήν τη μέθοδο, τα στοιχεία που χρειάζονται για τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος είναι ο καθορισμός του κυκλοφοριακού φόρτου και της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους (CBR).

4.3.1 Καθορισμός Κυκλοφοριακού Φόρτου

Ο κυκλοφοριακός φόρτος που θα εξυπηρετείται από το οδόστρωμα κατά τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής του, όπως και στις άλλες μεθόδους, εκφράζεται συναρτήσει του συνολικού αριθμού ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ΙΤΑ). Ο καθορισμός των ΙΤΑ μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους:

- Βάσει του μέσου ημερήσιου αριθμού κυκλοφορίας των ‘εμπορικών’ οχημάτων, τα οποία ορίζονται όσα έχουν βάρος (χωρίς φορτίο) μεγαλύτερο των 15kN (≈ 1500 kg)
- Μία αναλυτική μέθοδος υπολογισμού του συνολικού αριθμού των ΙΤΑ με τη χρήση της πιο κάτω εξίσωσης

$$ITA = 365 * F * Y * W * G * 10^{-6} \text{ (ITA σε εκατομμύρια)}$$

Όπου:

F = μέση ημερήσια κυκλοφορία εμπορικού οχήματος κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του οδοστρώματος

Y = διάρκεια σχεδιασμού του οδοστρώματος σε έτη

W = συντελεστής καταπόνησης του οδοστρώματος (Πίνακας 4.12)

G = συντελεστής αύξησης κυκλοφορίας

Η πιο πάνω εξίσωση, υπολογίζει τον ετήσιο αριθμό των ΙΤΑ ανά κατηγορία εμπορικού οχήματος. Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ισοδύναμων αξόνων ανά κατηγορία εμπορικού οχήματος, είναι ο συνολικός αριθμός διελεύσεων των ΙΤΑ για όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Η πρώτη μέθοδος υπολογισμού του κυκλοφοριακού φόρτου, ονομάζεται ως ‘τυπική μέθοδος και χρησιμοποιείται μόνο για συνθήκες κυκλοφορίας της Αγγλίας. Αυτό γίνεται γιατί τα διαγράμματα που δίδονται είναι προσαρμοσμένα με τη μέση ετήσια αύξηση κυκλοφορίας που παρατηρείται στην Αγγλία, όπως και ένας αντιπροσωπευτικός συντελεστής καταπόνησης του οδοστρώματος, ο οποίος εκφράζει την τυπική σύνθεση της κυκλοφορίας των οχημάτων στην Αγγλία.




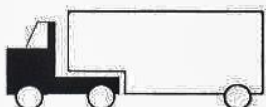

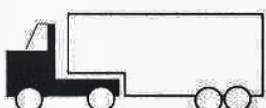

4.3.1.1 Κατηγορίες Εμπορικών Οχημάτων

Τα εμπορικά οχήματα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες ομάδες:

1. Τα λεωφορεία με τον χαρακτηρισμό PSV
2. Τα εμπορικά οχήματα 1, με τον χαρακτηρισμό OGV1, τα οποία αποτελούνται τα 2-αξονικά, 3-αξονικά και 3-αξονικά συρόμενα οχήματα
3. Τα εμπορικά οχήματα 2, με τον χαρακτηρισμό OGV2, τα οποία αποτελούνται από 4-αξονικά, 4-αξονικά συρόμενα και τα 5-αξονικά (και άνω) οχήματα

Στον πίνακα 4.12 φαίνονται οι κατηγορίες των οχημάτων με τους συντελεστές καταπόνησης ανά κατηγορία εμπορικού οχήματος.

Πίνακας 4-12: Συντελεστές καταπόνησης ανά κατηγορία εμπορικών οχημάτων (W)

Κατηγορία Εμπορικού Οχήματος (ΕΟ)	Σχηματική απεικόνιση εμπορικών οχημάτων	Συντελεστής καταπόνησης
1. Λεωφορεία		1.3
2. 2-αξονικά		0.34
3. 3-αξονικά		1.7
4. 3-αξονικά συρόμενα		0.65
5. 4-αξονικά		3.0
6. 4-αξονικά συρόμενα		2.6
7. 5-αξονικά και άνω		3.5

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4.3.1.2 Συντελεστής Καταπόνησης (W)

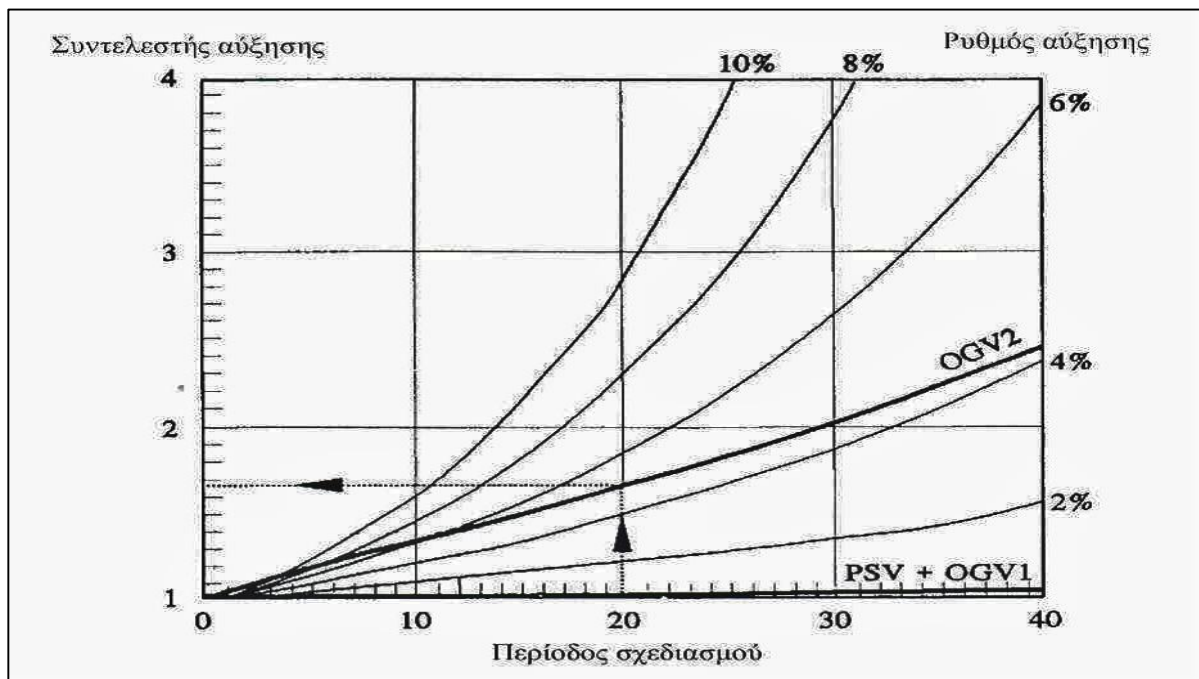
Ο συντελεστής καταπόνησης (W) είναι το άθροισμα των συντελεστών ισοδυναμίας (α) για κάθε άξονα εμπορικού οχήματος. Οι συντελεστές ισοδυναμίας υπολογίστηκαν από τη θεμελιώδη εξίσωση ισοδύναμου καταπόνησης οδοστρωμάτων από αξονικά φορτία για $\gamma=4$. Έτσι, ουσιαστικά πρόκειται περί ενός συντελεστή ισοδυναμίας, ανάλογου του συντελεστή οχήματος της μεθοδολογίας του Ινστιτούτου Ασφάλτου, για μετατροπή του εμπορικού οχήματος σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (Νικολαΐδης 2002).

Με βάση την ομαδοποίηση των κατηγοριών των εμπορικών οχημάτων, υπολογίστηκαν κάποιοι ενιαίοι συντελεστές καταπόνησης μόνο για τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων που θα κατασκευαστούν στην Αγγλία οι οποίοι είναι:

- Για τις ομάδες PSV και OGV1 μαζί το $W = 0.6$
- Για την ομάδα OGV2 το $W = 3.0$

4.3.1.3 Συντελεστής Αύξησης Κυκλοφορίας (G)

Ο συντελεστής αύξησης της κυκλοφορίας (G) εξαρτάται από τη διάρκεια σχεδιασμού του οδοστρώματος και τη μέση ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας και μπορεί να υπολογισθεί από το διάγραμμα 4.1.



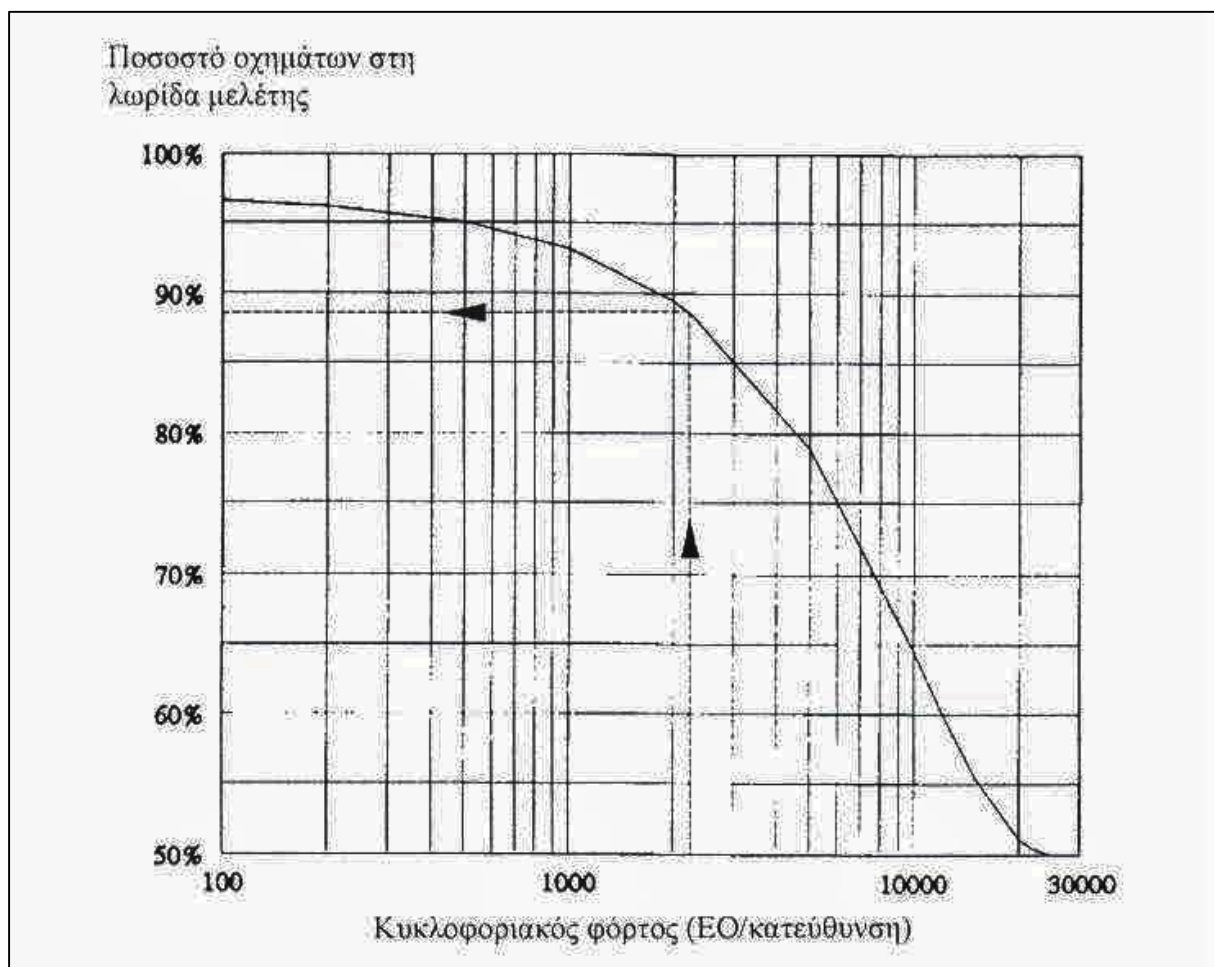
Διάγραμμα 4-1: Υπολογισμός συντελεστή αύξησης κυκλοφορίας (G)

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Ο συντελεστής αύξησης μπορεί να είναι ξεχωριστός για κάθε κατηγορία ή ενιαίος για όλα τα εμπορικά οχήματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πιο πάνω καμπύλες χρησιμοποιούνται μόνο σε περίπτωση που το οδόστρωμα θα κατασκευαστεί στην Αγγλία.

4.3.1.4 Κατανομή Κυκλοφοριακού Φόρτου στη Λωρίδα Μελέτης

Το οδόστρωμα που θα κατασκευασθεί, αν θα έχει μια λωρίδα ανά κατεύθυνση, τότε ο κυκλοφοριακός φόρτος θα είναι ίσος με αυτό που εκτιμάται. Αν θα υπάρχουν δύο ή περισσότερες λωρίδες ανά κατεύθυνση τότε ο κυκλοφοριακός φόρτος υπολογίζεται με της χρήση της καμπύλης του διαγράμματος 4.2.



Διάγραμμα 4-2: Ποσοστό κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Αν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγαλύτερος από 30.000 εμπορικά οχήματα ανά κατεύθυνση τότε λαμβάνεται πάντα το 50% αυτού για τη λωρίδα μελέτης.

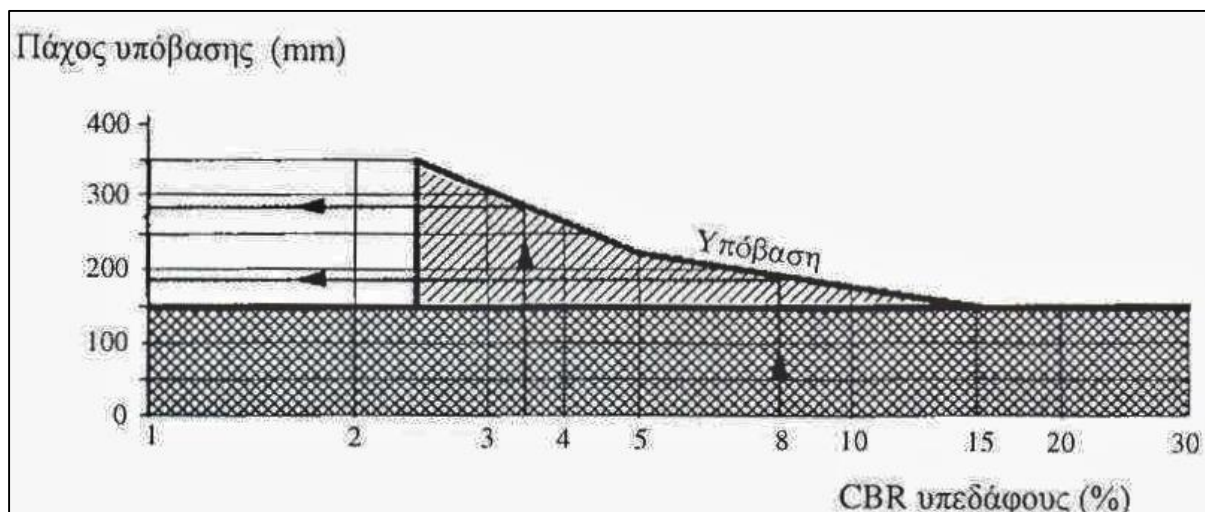
4.3.2 Υπολογισμός Πάχους Στρώσεων

4.3.2.1 Υπόβαση / Εξυγιαντική Στρώση

Ο υπολογισμός του πάχους της υπόβασης, εξαρτάται από τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους, όπως προαναφέρθηκε και εκφράζεται με τον Καλιφορνιακό δείκτη (CBR). Αν η εργαστηριακή τιμή του CBR είναι μεγαλύτερη από 30%, μπορεί να παραληφθεί. Αν το CBR του υπεδάφους είναι μεγαλύτερο από 15%, τότε το πάχος της υπόβασης είναι 150mm. Αν το CBR του υπεδάφους είναι από 2.5% - 15%, η μεθοδολογία παρέχει δύο εναλλακτικές λύσεις:

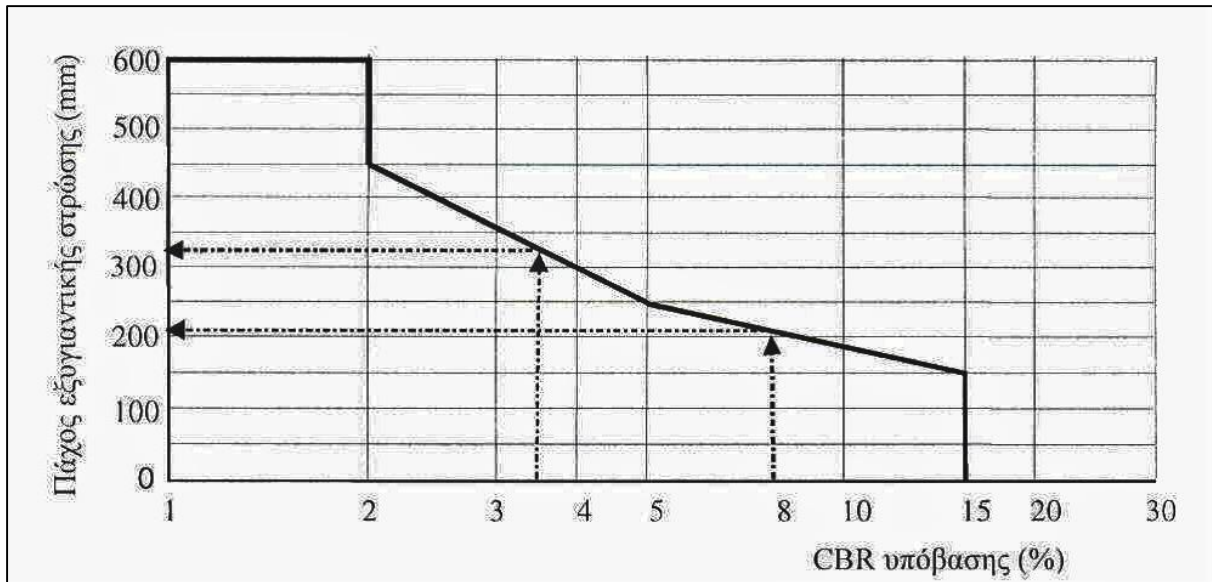
- a. Να κατασκευαστεί υπόβαση που το πάχος της υπόβασης είναι μεταβλητό και μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.3
- b. Να κατασκευαστεί υπόβαση σταθερού πάχους 150mm και ταυτόχρονα να κατασκευαστεί εξυγιαντική στρώση μεταβλητού πάχους, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.4

Αν το CBR του υπεδάφους είναι μικρότερο από 2.5%, τότε είναι απαραίτητη η κατασκευή εξυγιαντικής στρώσης και με παράλληλη κατασκευή υπόβασης σταθερού πάχους 150mm. Η υπόβαση και η εξυγιαντική στρώση, αν θα κατασκευαστεί, θα πρέπει να είναι ομοιόμορφου πάχους σε όλο το πλάτος του οδοστρώματος και το αποτέλεσμα που λαμβάνεται στρογγυλοποιείται στα 10mm.



Διάγραμμα 4-3: Υπολογισμός πάχους υπόβασης

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002



Διάγραμμα 4-4: Υπολογισμός πάχους εξογκαντικής στρώσης

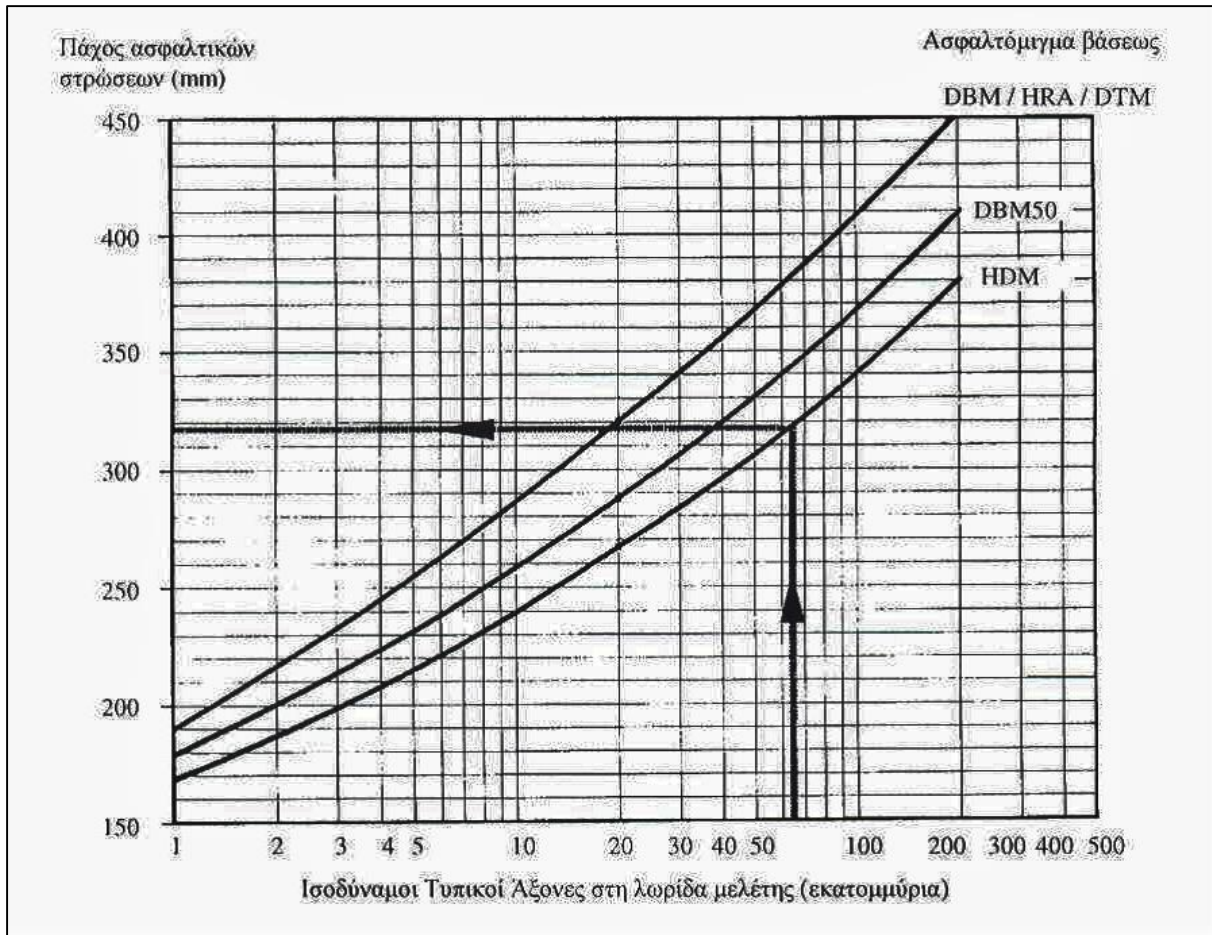
Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4.3.2.2 Ασφαλτική Βάση και Επιφανειακή Στρώση

I. Τυπικά Εύκαμπτα Οδοστρώματα

Το πάχος της ασφαλτικής βάσης και της επιφανειακής στρώσης, δηλαδή το ολικό πάχος όλων των ασφαλτικών στρώσεων εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των ΙΤΑ στην περίοδο μελέτης. Με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.5 μπορεί να υπολογιστεί το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων. Επίσης, το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων εξαρτάται και από τον τύπο του ασφαλτομίγματος. Οι τύποι των ασφαλτομιγμάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

- i. Macadam κλειστού τύπου με άσφαλο 100 pen (DBM) ή ανθρακόπισσα (DTM)
- ii. Θερμό κυλινδρούμενο (HRA)
- iii. Macadam κλειστού τύπου με άσφαλο 50 pen (DBM50)
- iv. Macadam υψηλής αντοχής (HDM)



Διάγραμμα 4-5: Υπολογισμό πάχους ασφαλτικών στρώσεων σε εύκαμπτο οδόστρωμα

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

Αφού υπολογιστεί το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων, μετά πρέπει να υπολογιστούν τα πάχη των επιμέρους στρώσεων δηλαδή της επιφανειακής στρώσης και της βάσης.

Για την επιφανειακή στρώση, η μεθοδολογία συστήνει δύο τύπους ασφαλτομιγμάτων με τα αντίστοιχα πάχη τους:

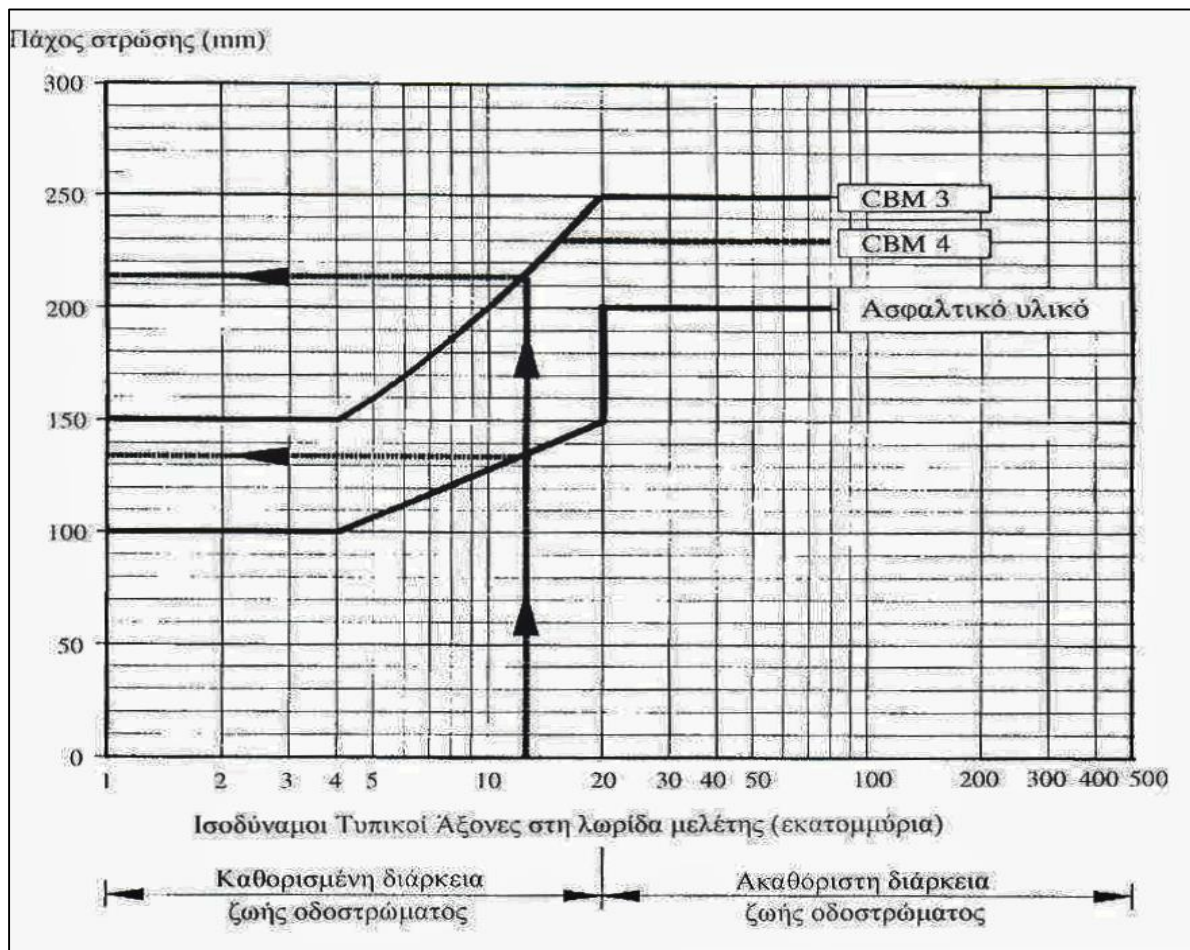
- Θερμό κυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα (HRA) και πάχος 45mm ή 50mm
- Ασφαλτόμιγμα για πορώδεις τάπητες και πάχος 50mm

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται θερμό κυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα, το πάχος της βάσης είναι, η διαφορά μεταξύ του πάχους του θερμού κυλινδρούμενου ασφαλτομίγματος με το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων που υπολογίστηκε από το διάγραμμα.

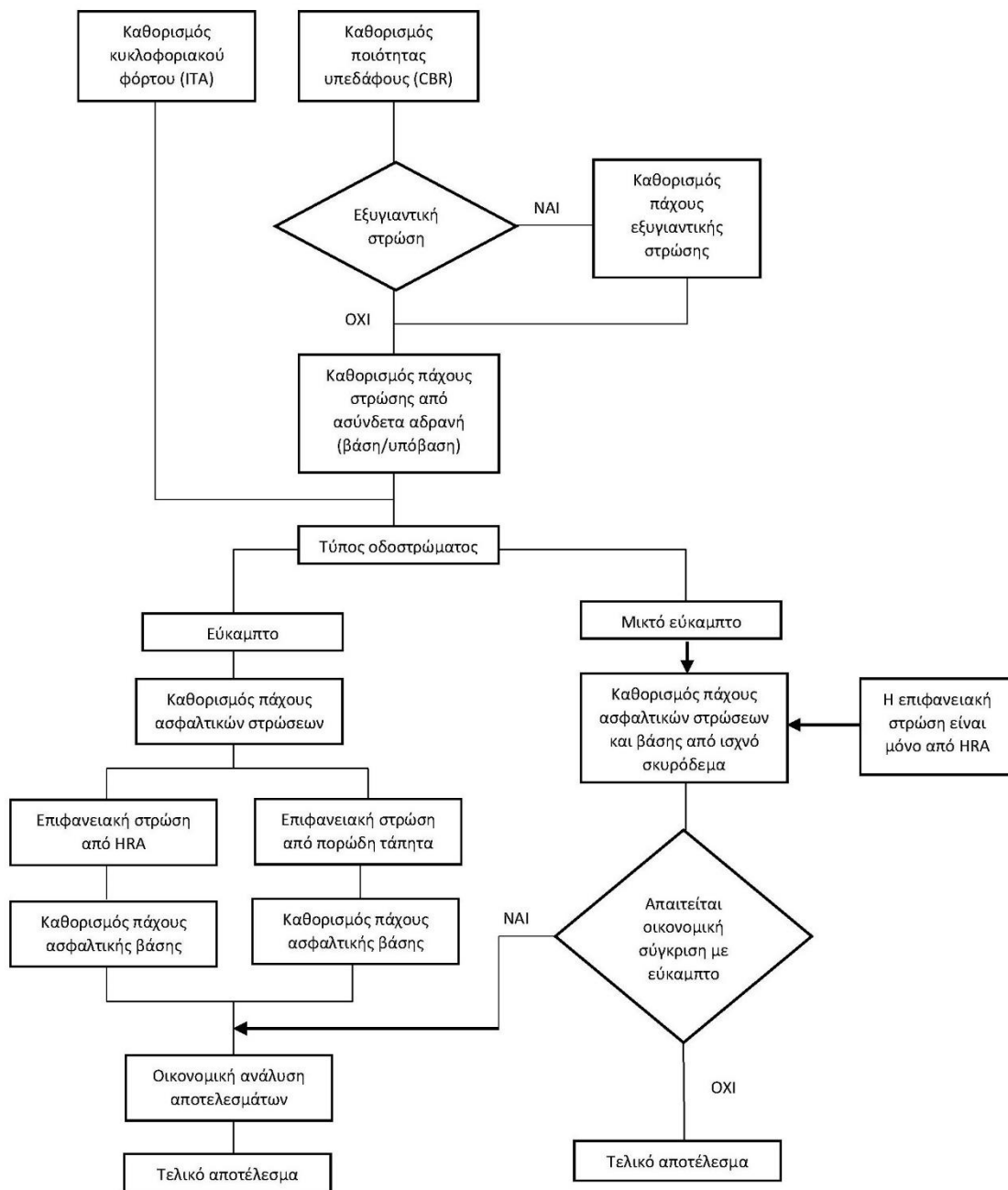
Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ασφαλτόμιγμα για πορώδεις τάπητες, το πάχος που αφαιρείται δεν είναι αυτό των 50mm αλλά ένα ισοδύναμο πάχος των 20mm λόγω μειωμένης αντοχής του ασφαλτομίγματος αυτού. Γι' αυτό, σε αυτήν την περίπτωση το συνολικό κατασκευαστικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων αυξάνεται κατά τα 30mm.

II. Μικτά Εύκαμπτα Οδοστρώματα

Η διαστασιολόγηση των μικτών εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι παρόμοια με την προηγούμενη διαδικασία, χρησιμοποιώντας όμως το διάγραμμα 4.6. Από το διάγραμμα, υπολογίζεται το πάχος της βάσης από ισχύο σκυρόδεμα (συνήθως CBM3) και το πάχος των υπερκείμενων ασφαλτικών στρώσεων. Η επιφανειακή στρώση έχει πάχος 45mm ή 50mm και είναι κατασκευασμένη μόνο από θερμό κυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα. Το υπόλοιπο ασφαλτικό μίγμα μπορεί να είναι ένα από αυτά που αναφέρθηκαν στην περίπτωση του τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος.



Διάγραμμα 4-6: Υπολογισμός πάχους βάσεως και ασφαλτικών στρώσεων σε μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα
Πηγή: Νικολαΐδης, 2002



Σχήμα 4-4: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη Βρετανική Μέθοδο HD 26/94

Πηγή: Νικολαΐδης, 2002

4.4 Μέθοδος Shell

Η μέθοδος της Shell για διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η πρώτη και η πιο γνωστή ως σήμερα. Είναι μια ολοκληρωμένη ημι-θεωρητική αναλυτική μεθοδολογία, η οποία αρχικά παρουσιάστηκε το 1963 και έλαβε την τελική της μορφή το 1978. Χρησιμοποιεί τη θεωρία της ελαστικότητας σε σύστημα τριών διακεκριμένων στρώσεων οι οποίες είναι, (α) το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων, ως πρώτη στρώση, (β) το σύνολο των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο ή ασβέστη αδρανή (βάση και υπόβαση), ως δεύτερη στρώση και (γ) το υπέδαφος, ως τρίτη στρώση.

Η μέθοδος αυτή, παρόλο που χρησιμοποιεί τρεις διακεκριμένες στρώσεις, υπάρχει περίπτωση να χρησιμοποιηθούν στρώσεις από ασύνδετα αδρανή με διαφορετική μηχανική αντοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με την υποδιαίρεση της δεύτερης στρώσης. Αντίστοιχη υποδιαίρεση μπορεί να γίνει και για την πρώτη στρώση, αλλά μόνο για τον υπολογισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης των ασφαλτικών μιγμάτων (Νικολαΐδης 2002). Τα σχεδιαστικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.3.

Τα στοιχεία που αποτελούν καθοριστικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος με τη μέθοδο αυτή είναι τα εξής:

- i. Κυκλοφοριακός φόρτος
- ii. Μηχανική αντοχή υπεδάφους και στρώσεων
- iii. Μέση ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος

Οι τάσεις και οι αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε ένα υποτιθέμενο οδόστρωμα υπολογίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος BISAR το οποίο αναπτύχθηκε από την ίδια την εταιρεία.

Με τη βοήθεια των πιο πάνω στοιχείων δημιουργήθηκε μια σειρά από διαγράμματα, από τα οποία μπορούν να υπολογιστούν τα πάχη των στρώσεων για συγκεκριμένο κυκλοφοριακό φόρτο και ελαστικότητας του υπεδάφους. Τα διαγράμματα αυτά χωρίζονται σε ομάδες και φέρουν τις εξής ονομασίες: HN, HT, TN, EN, CT και CB.

Επίσης, με αυτήν τη μεθοδολογία διαστασιολόγησης του οδοστρώματος, ο μελετητής μπορεί να γνωρίζει και ποιο είναι το σχεδιαστικό κριτήριο που καθορίζει τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος του.

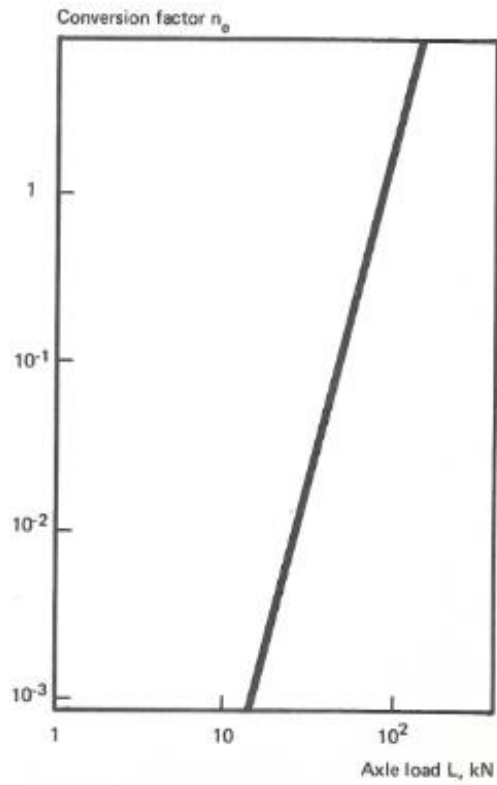
4.4.1 Κυκλοφοριακός Φόρτος

Το κυριότερο κριτήριο για τον καθορισμό του πάχους ενός οδοστρώματος είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος που θα εξυπηρετεί το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του, ο οποίος εκφράζεται σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (ΙΤΑ).

Με αυτήν τη μέθοδο, ο κυκλοφοριακός φόρτος υπολογίζεται με βάση τα πιο κάτω βήματα:

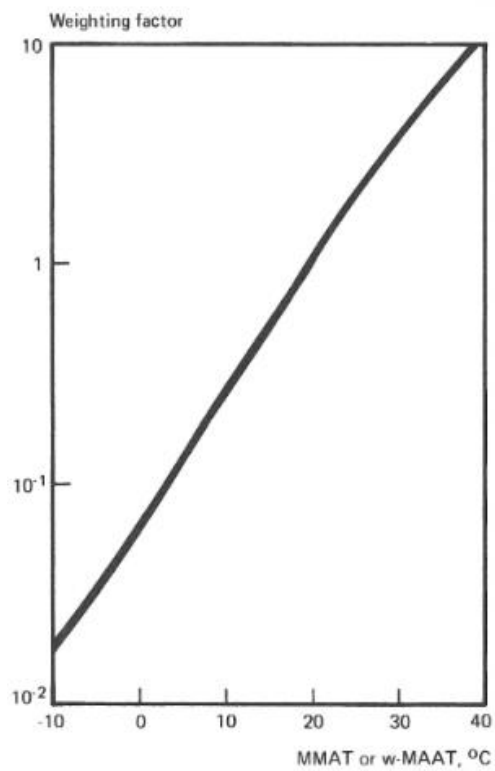
- 1) Χωρίζονται τα αξονικά φορτία ανάλογα με το βάρος τους (L) kN
- 2) Εκτιμάται ο ημερήσιος αριθμός (συχνότητα) του κάθε αξονικού φορτίου ανά λωρίδα
- 3) Υπολογίζεται ο Συντελεστής μετατροπής (n_e) με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.7 ή χρησιμοποιώντας την εξίσωση “ $n_e = 2.4 \times 10^{-8} \times L^4$ ”
- 4) Υπολογίζονται οι ΙΤΑ για κάθε αξονικό φορτίο, πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό που εκτιμήθηκε στο βήμα (2) επί τον αντίστοιχο συντελεστή μετατροπής ($N_e = (2) \times n_e$)
- 5) Υπολογίζεται ο συνολικός ημερήσιος αριθμός των αξονικών φορτίων ανά λωρίδα (W_d)
- 6) Υπολογίζεται ο συνολικό ημερήσιος αριθμός ΙΤΑ ανά λωρίδα ($N_d = \sum N_e$)
- 7) Υπολογίζεται ο συνολικός ετήσιος αριθμός ΙΤΑ ανά λωρίδα ($N_y = N_d \times 365$)
- 8) Υπολογίζεται ο Συντελεστής αθροιστικής κυκλοφορίας (g) με τη βοήθεια του πίνακα 4.13. Ο συντελεστής g εξαρτάται από τον ρυθμό αύξησης της κυκλοφορίας, b (%) και τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος, B (χρόνια)
- 9) Υπολογίζεται τελικός αριθμός ΙΤΑ, πολλαπλασιάζοντας τον συνολικός ετήσιος αριθμός ΙΤΑ ανά λωρίδα επί τον συντελεστή αθροιστικής κυκλοφορίας ($N = N_y \times g$)

Όλα τα δεδομένα για τον κυκλοφοριακό φόρτο καταγράφονται στο Φύλλο εργασίας Α (Πίνακας Γ.1) το οποίο φαίνεται στο παράρτημα Γ.



Διάγραμμα 4-7: Υπολογισμός συντελεστή μετατροπής (L)

Πηγή: Shell, 1985



Διάγραμμα 4-8: Υπολογισμός συντελεστή στάθμησης (W)

Πηγή: Shell, 1985

Πίνακας 4-13: Συντελεστές αθροιστικής κυκλοφορίας

Ρυθμός αύξησης b, (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Σχεδιαστική ζωή B, (χρόνια)	g									
5	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7
10	11	11	12	12	13	14	15	16	17	17
15	16	18	19	21	23	25	27	29	32	35
20	22	25	28	31	35	39	44	49	56	63
25	28	33	38	43	50	58	68	79	92	108
30	35	41	49	58	70	84	101	122	149	181
35	42	51	62	76	93	118	148	186	235	298
40	49	62	78	99	127	164	214	280	365	487

Πηγή: Shell, 1985

Ο συντελεστής αθροιστικής κυκλοφορίας μπορεί επίσης, να υπολογιστεί και με την εξίσωση

$$g = \sum_{i=1}^B \left(1 + \frac{b}{100}\right)^i$$

Όπου:

B = διάρκεια σχεδιαστική ζωής οδοστρώματος

b = ρυθμός αύξησης κυκλοφορίας

i = χρονικό διάστημα (συνήθως 1 χρόνο)

4.4.2 Θερμοκρασία Περιβάλλοντος

Οι διάφορες μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μπορεί να μην παίζουν σημαντικό ρόλο στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή, αλλά επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες της ασφάλτου. Η σταθμική μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος (σ-ΜΕΘΑ) είναι το στοιχείο που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ασφάλτου.

Η σ-ΜΕΘΑ υπολογίζεται, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

1. Αρχικά δίδονται από τον πιο κοντινό τοπικό μετεωρολογικό σταθμό από το έργο, οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρος (ΜΜΘΑ)
2. Υπολογίζονται οι Συντελεστές στάθμισης για κάθε μήνα με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.8.
3. Υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των συντελεστών στάθμισης για όλους τους μήνες του χρόνου και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους
4. Με δεδομένο τον μέσο όρο των συντελεστών στάθμισης, υπολογίζεται η σ-ΜΕΘΑ με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.8.

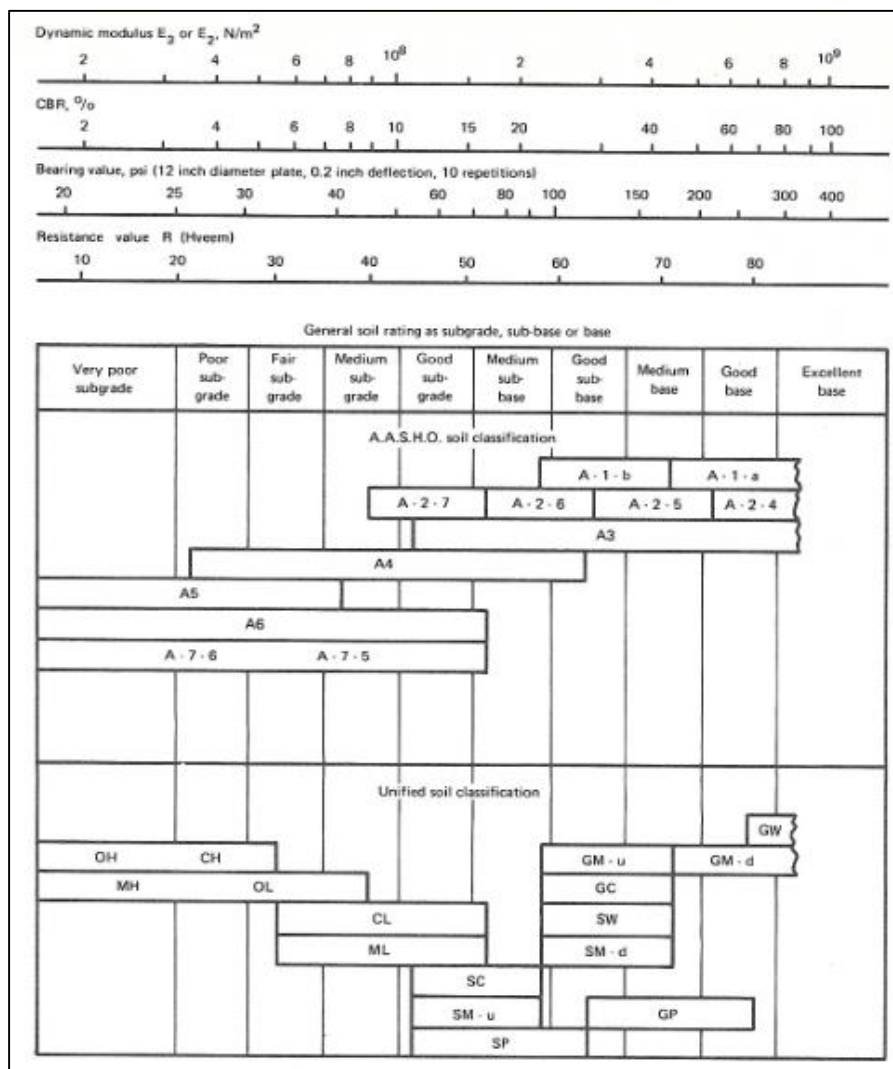
Όλα τα δεδομένα για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος καταγράφονται στο Φύλλο εργασίας Β (Πίνακας Γ.2) το οποίο φαίνεται στο παράρτημα Γ.

4.4.3 Υπέδαφος

Το υπέδαφος, επειδή είναι η επιφάνεια έδρασης του οδοστρώματος, είναι πολύ σημαντικό φέρουσα ικανότητα του να αντέχει τον αναμενόμενο κυκλοφοριακό φόρτο. Για αυτόν τον λόγο υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους (E_3), το οποίο εξαρτάται από τα υλικά που περιέχει και το ποσοστό υγρασία. Το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους εκτιμάται είτε με μετρήσεις στο πεδίο, είτε με εργαστηριακές δοκιμές.

Στον πίνακα 4.14 φαίνεται η κατάταξη των εδαφών και οι σχέσεις μεταξύ διαφόρων μέτρων για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους και των ασύνδετων αδρανών.

Πίνακας 4-14: Δυναμικά μέτρα υπεδάφους, E_3 ή ασύνδετων αδρανών, E_2 (E)



Πηγή: Shell, 1985

4.4.4 Ασφαλτικά Υλικά

Τα είδη των ασφαλικών μειγμάτων ποικίλουν, όμως για τους σχεδιαστικούς σκοπούς των κατασκευών δύο ιδιότητες παίζουν σημαντικό ρόλο, (α) η δυσκαμψία του μείγματος και (β) τα χαρακτηριστικά της κόπωσης του.

Τα είδη των μειγμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη μέθοδο διακρίνονται από τρία χαρακτηριστικά, τη δυσκαμψία (S - stiffness) και την κόπωση (F –fatigue) του μείγματος και τον δείκτη διεσδυτικότητας (pen) της ασφάλτου.

Τα μείγματα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους χωρίζονται σε οχτώ τύπους και κωδικοποιούνται με τον εξής τρόπο:

S1-F1-50	S1-F1-100
S1-F2-50	S1-F2-100
S2-F1-50	S2-F1-100
S2-F2-50	S2-F2-100

Όπου:

S1 = Πυκνό ασφαλικό με μεσαία περιεκτικότητα αδρανών, ασφάλτου και κενών αέρος

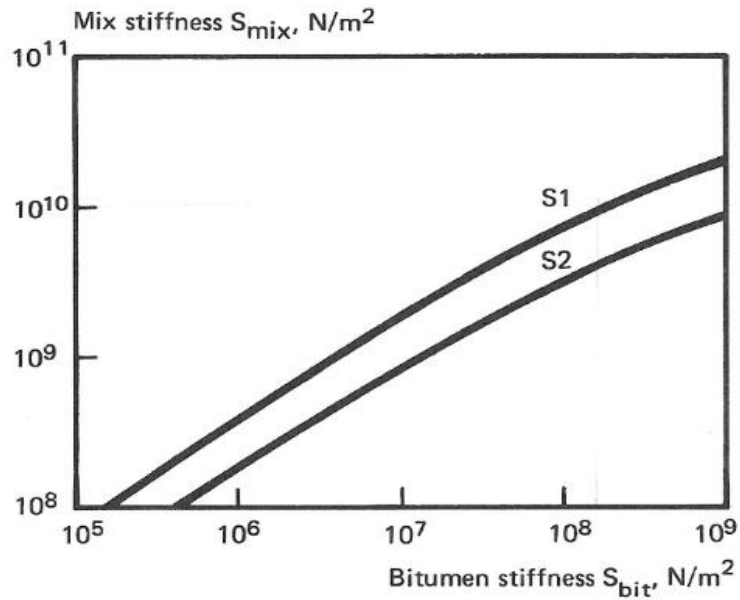
S2 = Ανοιχτό ασφαλικό με μεγάλη περιεκτικότητα κενών αέρος και μικρή περιεκτικότητας ασφάλτου ή πυκνό ασφαλικό με σχετικά μικρό ποσοστό αδρανών και μεγάλο ποσοστό ασφάλτου (για πορώδους τάπητες κυκλοφορίας)

F1 = Για ασφαλτομείγματα με μέση περιεκτικότητα ασφάλτου και κενών αέρος

F2 = Για ασφαλτομείγματα με μεγάλο σχετικά ποσοστό κενών αέρος

50, 100 = Δείκτης διεσδυτικότητας της ασφάλτου (50 pen ή 100 pen)

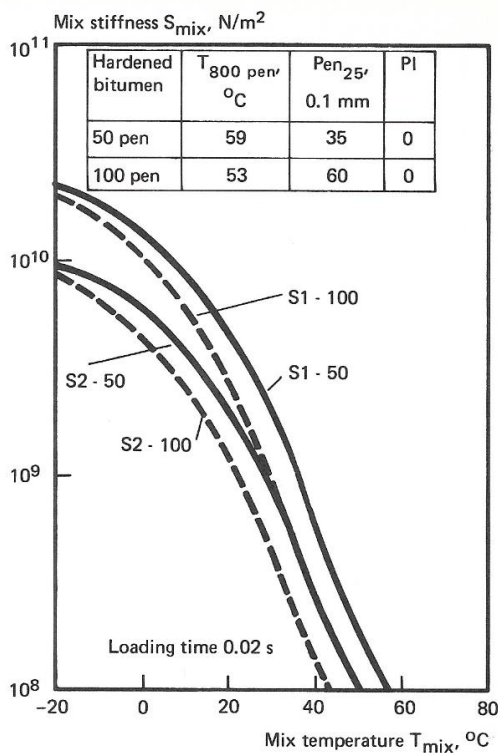
Στο διάγραμμα 4.9 φαίνεται η σχέση μεταξύ δυσκαμψίας ασφαλτομείγματος (S_{mix}) και δυσκαμψίας ασφάλτου (S_{bit}) χρησιμοποιώντας την ανάλογη καμπύλη.



Διάγραμμα 4-9: Δυσκαμψία ασφαλτομείγματος Vs δυσκαμψία ασφάλτου (M-1)

Πηγή: Shell, 1985

Στο διάγραμμα 4.10 φαίνεται η σχέση μεταξύ δυσκαμψίας ασφαλτομείγματος (S_{mix}) και θερμοκρασίας ασφαλτομείγματος (T_{mix}) χρησιμοποιώντας την ανάλογη καμπύλη με χρόνο φόρτισης 0.02 δευτερόλεπτα (50-60 km/h)

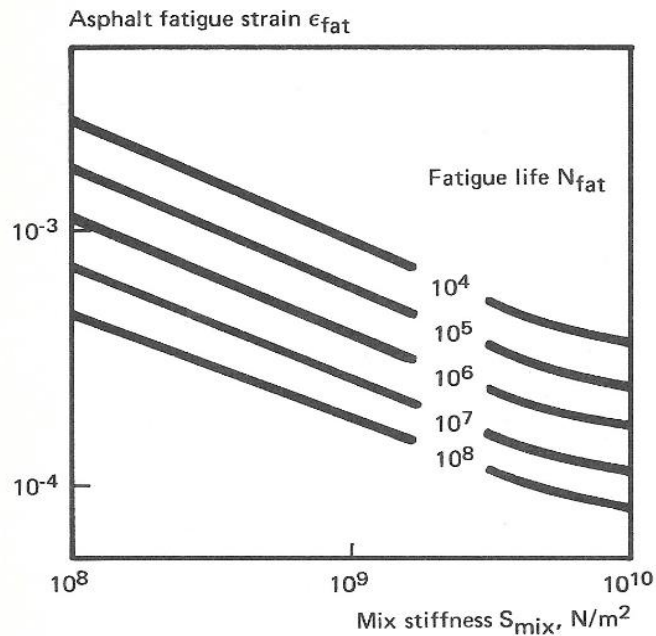


- T_{800} = θερμοκρασία μάλθωσης της ασφάλτου
- Pen₂₅ = διεισδυτικότητα ασφάλτου στους 25°C
- PI = δείκτης διεισδυτικότητας
- 100 pen (80/100, 85/100, 80/120, B80 κ.α.)
- 50 pen (40/50, 40/60, 45/60, B45 κ.α.)

Πηγή: Shell, 1985

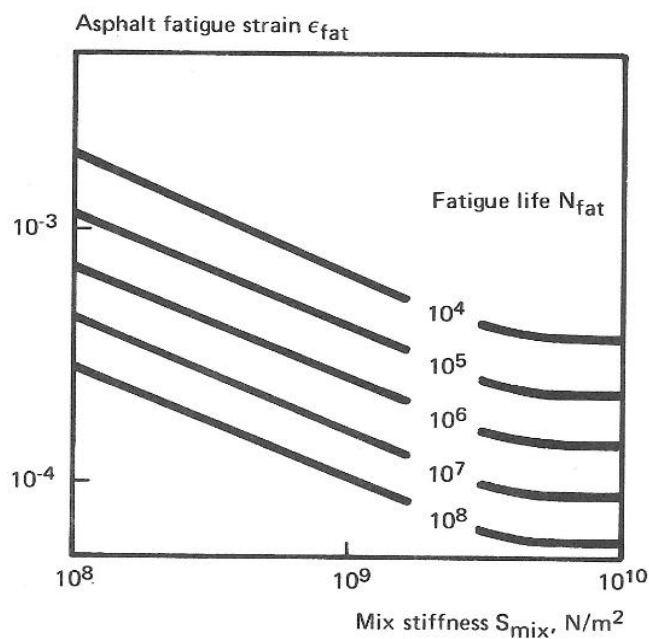
Διάγραμμα 4-10: Δυσκαμψίας ασφαλτομείγματος Vs θερμοκρασία ασφαλτομείγματος (M-2)

Στα διαγράμματα 4.11 και 4.12 φαίνεται η σχέση μεταξύ της καταπόνησης της ασφάλτου λόγω κόπωσης (ϵ_{fat}) και δυσκαμψίας ασφαλτομείγματος (S_{mix}) για τύπους ασφαλτομιγμάτων F1 και F2 αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την ανάλογη καμπύλη που υποδεικνύει την καταπόνηση κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος λόγω της κυκλοφορίας (N_{fat}).



Διάγραμμα 4-11: Κόπωση ασφάλτου για F1 (M-3)

Πηγή: Shell, 1985



Διάγραμμα 4-12: Κόπωση ασφάλτου για F2 (M-4)

Πηγή: Shell, 1985

4.4.5 Διαδικασία Διαστασιολόγησης Οδοστρώματος

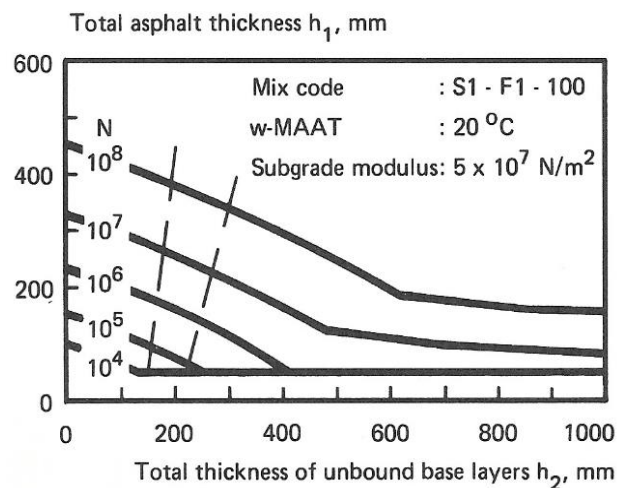
Αφού καθορισθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος, η αντιπροσωπευτική τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E_3) του εδάφους έδρασης και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν και η σταθμική μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος (σ -ΜΕΘΑ), μπορούν να υπολογιστούν τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος από τα διαγράμματα διαστασιολόγησης οδοστρώματος.

Στα διαγράμματα διαστασιολόγησης είναι ενσωματωμένα σ' αυτά οι εξής παράμετροι:

- Τύποι των ασφαλτομιγμάτων (πχ. S1-F1-50)
- σ -ΜΕΘΑ (4, 12, 20, 28 °C)
- Κυκλοφοριακός φόρτος (N) που θα εξυπηρετείται από το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια ζωής του ($10^4 - 10^8$ ΙΤΑ)
- Μέτρο ελαστικότητας υπεδάφους, E_3 ($2.5 \times 10^7, 5 \times 10^7, 10^8, 2 \times 10^8$ N/m²)

Πάντα τρεις από τις τέσσερις παραμέτρους είναι σταθερές και η μία μεταβλητή η οποία αντιπροσωπεύεται από τις καμπύλες που φαίνονται στα διαγράμματα. Οι άξονες των διαγραμμάτων αντιπροσωπεύουν τα συνολικά πάχη των ασφαλτικών στρώσεων (h_1) και των ασύνδετων αδρανών (h_2). Επίσης, σε κάποια διαγράμματα, το συνολικό πάχος των ασύνδετων αδρανών θεωρείται δεδομένο και στη θέση του στον άξονα του διαγράμματος παίρνει ένα από τα πιο πάνω στοιχεία (σ -ΜΕΘΑ ή ΙΤΑ ή E_3), το οποίο δε θεωρείται δεδομένο.

Στο διάγραμμα 4.13 φαίνεται ένα παράδειγμα στο οποίο έχει σταθερά δεδομένα τον τύπο του ασφαλτομίγματος, τη σ -ΜΕΘΑ και το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους και μεταβλητό δεδομένο τον κυκλοφοριακό φόρτο.



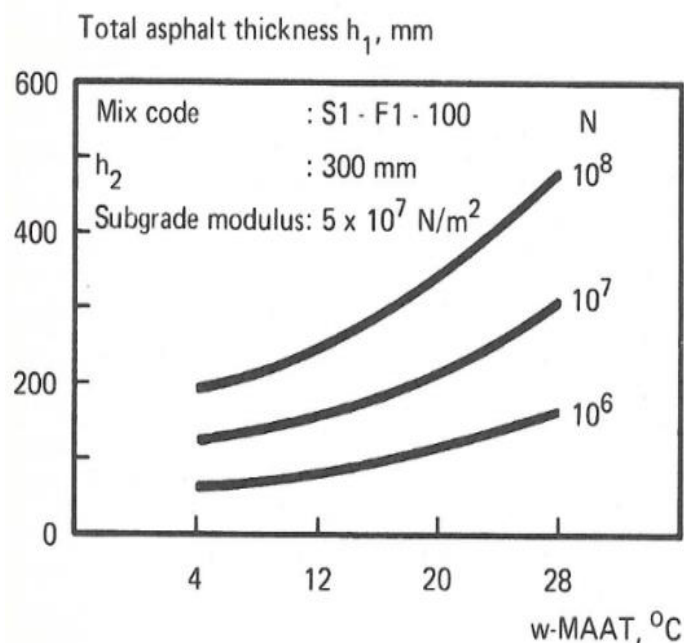
Διάγραμμα 4-13: Προσδιορισμός παχών στρώσεων οδοστρώματος (HN, Νο.53)

Πηγή: Shell, 1985

Στο διάγραμμα 4.14 φαίνεται ένα παράδειγμα στο οποίο έχει σταθερά δεδομένα τον τύπο του ασφαλτομίγματος, το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους και το συνολικό πάχος των ασύνδετων αδρανών και μεταβλητό δεδομένο τον κυκλοφοριακό φόρτο και άγνωστο δεδομένο τη σ -ΜΕΘΑ. Σε περίπτωση που τα δεδομένα δε συμπίπτουν με τα δεδομένα των διαγραμμάτων, γίνεται γραμμική παρεμβολή για να υπολογιστούν τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος.

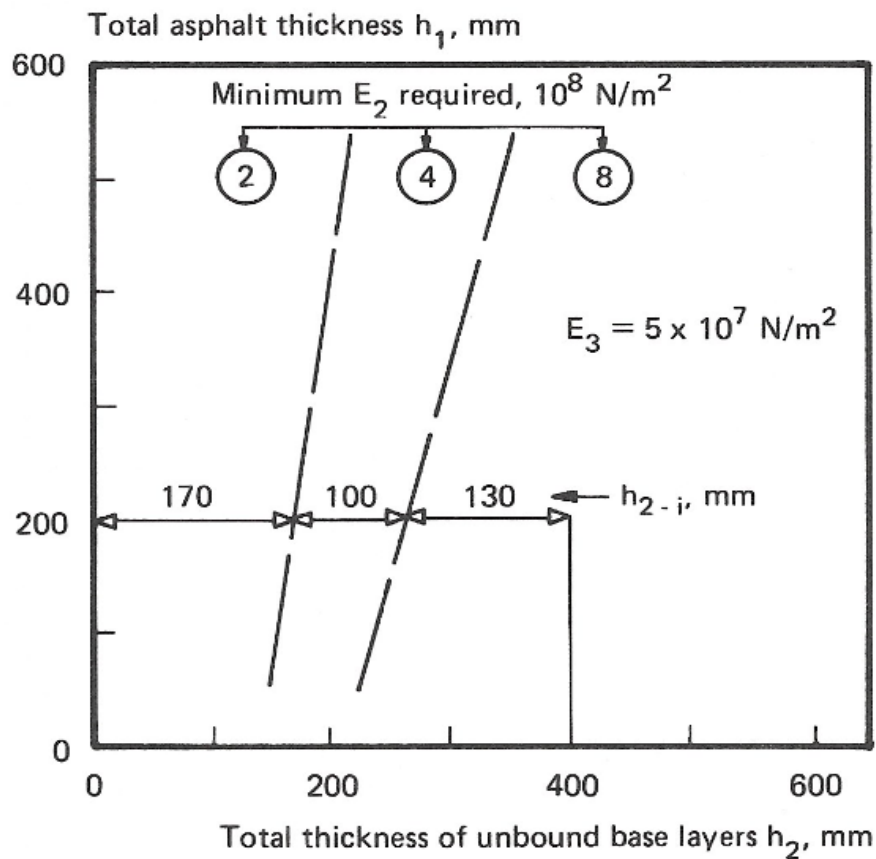
4.4.5.1 Προσδιορισμός πάχους στρώσεων ασύνδετων αδρανών

Συνήθως, οι στρώσεις που αποτελούνται από ασύνδετα αδρανή (βάση και υπόβαση) δεν αποτελούνται από τα ίδια υλικά, άρα έχουν και διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας (E_2). Από τη σειρά διαγραμμάτων που δημιούργησε η Shell, στις ομάδες διαγραμμάτων HN και HT έχουν ενσωματωμένα τα ελάχιστα μέτρα ελαστικότητας (E_{2-i}) για κάθε υποδιαιρεμένη στρώση από ασύνδετα αδρανή. Το πάχος της κάθε υποδιαιρεμένης στρώσης, μπορεί να παρθεί, χρησιμοποιώντας τις σχεδόν κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές που βρίσκονται στα διαγράμματα, σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές του μέτρου ελαστικότητας των αντίστοιχων υλικών. Ο μηχανικός που θα καθορίσει το πάχος των στρώσεων θα πρέπει να λάβει υπόψη και το κόστος του κάθε υλικού, έτσι ώστε να καθορίσει το βέλτιστο πάχος του οδοστρώματος. Στο διάγραμμα 4.15 φαίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού υποδιαιρεμένων στρώσεων από ασύνδετα αδρανή.



Διάγραμμα 4-14: Προσδιορισμός παχών στρώσεων οδοστρώματος (TN, No.29)

Πηγή: Shell, 1985

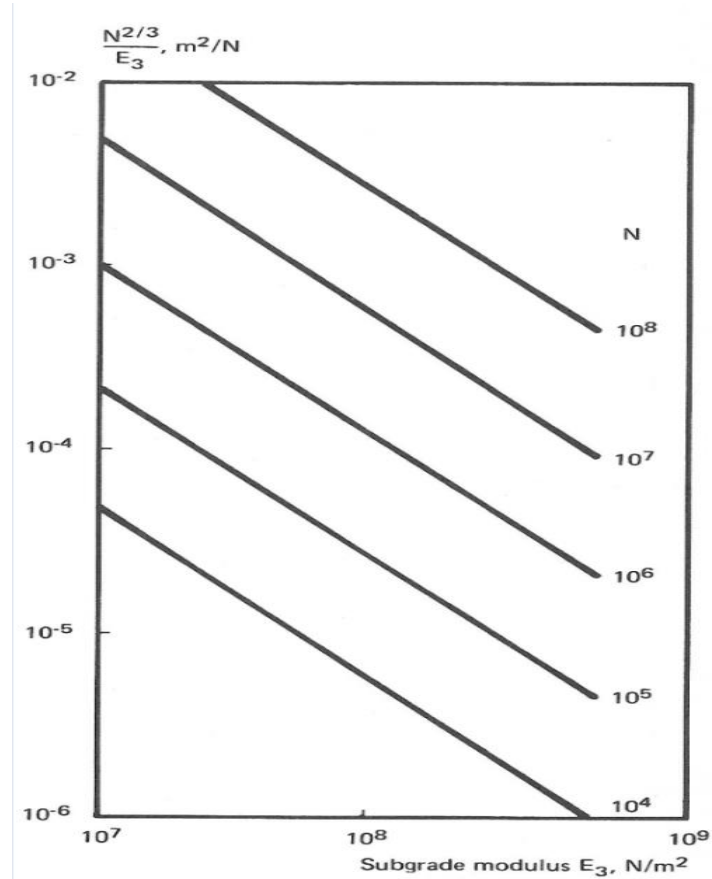


Διάγραμμα 4-15: Υποδιαίρεση στρώσης ασύνδετων αδρανών (HT, No.41)

Πηγή: Shell, 1985

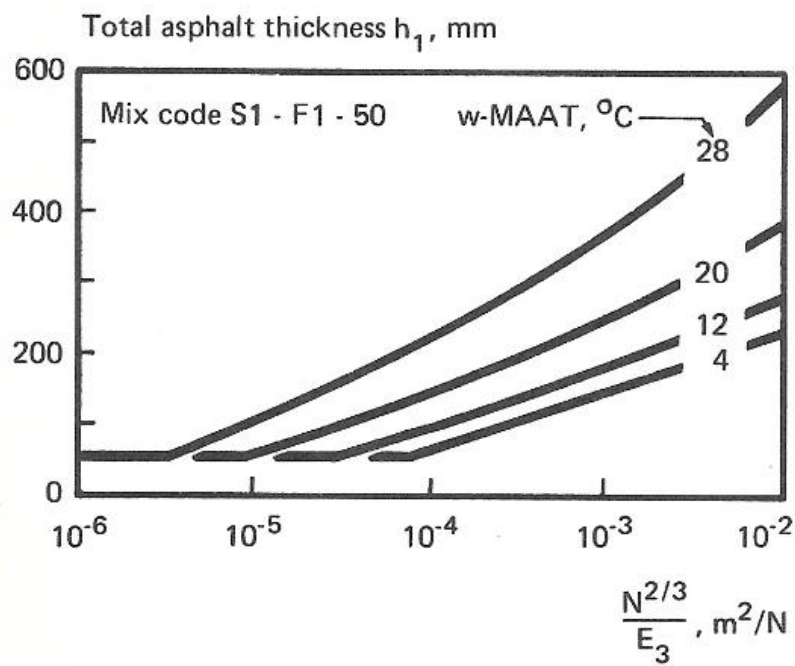
4.4.5.2 Ολικό πάχος οδοστρώματος με ασφαλτόμιγμα

Στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, υπάρχει και η περίπτωση το οδόστρωμα να είναι κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από ασφαλτόμιγμα. Σε πολλές περιπτώσεις συμφέρει η κατασκευή του, γιατί ο σχεδιασμός του είναι λιγότερο ευαίσθητος στις διακυμάνσεις του μέτρου ελαστικότητας του υπεδάφους και του κυκλοφοριακού φόρτου. Επίσης, είναι λιγότερο ευαίσθητο στον παγετό. Επιπλέον, το πρόβλημα της εκτίμησης της μόνιμης παραμόρφωσης στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή εξαλείφεται. Το πάχος του οδοστρώματος μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των διαγραμμάτων για οδοστρώματα εξ ολοκλήρου με ασφαλτόμιγμα με την προϋπόθεση ότι το ασφαλτόμιγμα θα έχει καλές ιδιότητες σε κόπωση (κατηγορίας F1). Τα διαγράμματα δείχνουν τη σχέση μεταξύ του συνολικού πάχους ασφαλτομείγματος (h_1) και της παραμέτρου $N^{2/3}/E_3$ (Διάγραμμα 4.17). Η παράμετρος ($N^{2/3}/E_3$) μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του διαγράμματος 4.16.



Διάγραμμα 4-16: Προσδιορισμός παραμέτρου $N^{2/3}/E_3$ (P)

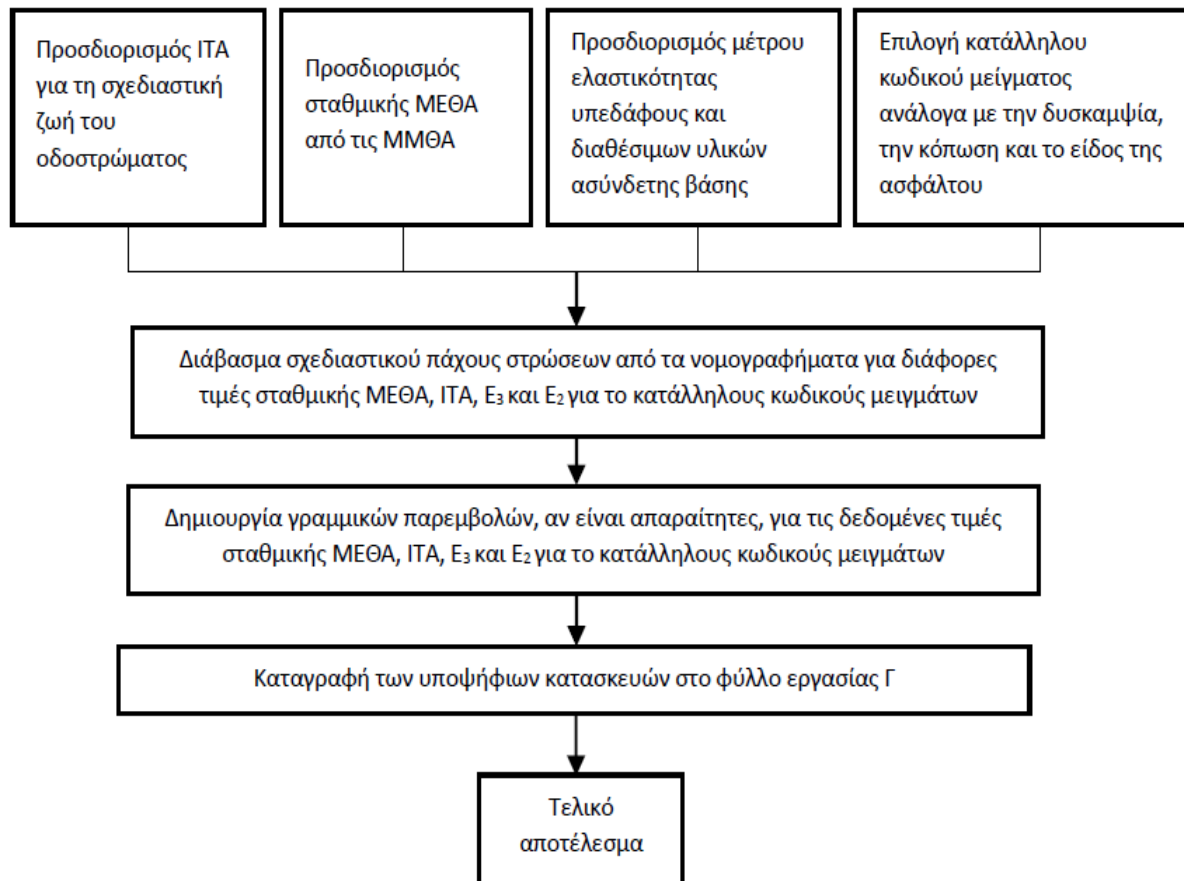
Πηγή: Shell, 1985



Διάγραμμα 4-17: Υπολογισμός ολικού πάχους ασφαλτομείγματος (CT, No1)

Πηγή: Shell, 1985

Όλα τα δεδομένα για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος καταγράφονται στο Φύλλο εργασίας Γ (Πίνακας Γ.3) το οποίο φαίνεται στο παράρτημα Γ.



Σχήμα 4-5: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρώματων κατά Shell

Πηγή: Shell, 1985

4.5 Μέθοδος Τμήματος Δημοσίων Έργων Κύπρου

Το εγχειρίδιο διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων που χρησιμοποιεί το Τμήμα Δημοσίων Έργων εκδόθηκε και άρχισε να εφαρμόζεται το 1989. Την ετοιμασία του εγχειριδίου την έκανε η εταιρεία John Burrow & Partners.

Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην πολυστρωματική θεωρία και έχει ως κριτήριο την παραμόρφωση του οδοστρώματος στα κρίσιμα σημεία. Τα στοιχεία που πρέπει να προσδιοριστούν πριν τη διαστασιολόγηση είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος και η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους.

Με τη χρήση του εγχειριδίου μπορεί να γίνει η διαστασιολόγηση τριών τύπων οδοστρώματος.

1. Οδόστρωμα τύπου NP1

Αποτελείται από ασφαλική επιφανειακή στρώση με Βάση και Υπόβαση από ασύνδετα αδρανή υλικά και ονομάζεται ελαφρύ οδόστρωμα.

2. Οδόστρωμα τύπου NP2

Αποτελείται από επιφανειακή στρώση και βάση κατασκευασμένες με ασφαλικά υλικά τοποθετημένες σε υπόβαση από ασύνδετα αδρανή και ονομάζεται οδόστρωμα βαρετού τύπου.

3. Οδόστρωμα τύπου NP3

Αποτελείται από οδόστρωμα κατασκευασμένο από ασύνδετα αδρανή, πάνω στα οποία κατασκευάζεται μια ασφαλική επάλειψη η οποία δεν προσφέρει καμία δομική αντοχή στο οδόστρωμα.

4.5.1 Χαρακτηριστικά Υλικών Οδοστρώματος

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων χαρακτηρίζονται με βάση το μέτρο επανάκτησης τους (M_r) οι οποίες είναι για:

- Έδαφος: $M_r = 17.6 \times (CBR)^{0.64}$
- Εξυγιαντική Στρώση (Στρώση Στέψης): $M_r = 2 \times M_r$ (εδάφους) , με μέγιστη τιμή 125 MN/m².

- Υπόβαση από ασύνδετα αδρανή: $M_r = 2 \times M_g$ (εξυγιαντικής στρώσης) , με μέγιστη τιμή 250 MN/m^2 . Η ίδια τιμή λαμβάνεται και στην περίπτωση που η στρώση είναι κατασκευασμένη με ισχνό σκυρόδεμα.
- Βάση από ασύνδετα αδρανή: $M_r = 2 \times M_g$ (υπόβασης από ασύνδετα αδρανή) , με μέγιστη τιμή 500 MN/m^2 . Η ίδια τιμή λαμβάνεται και στην περίπτωση που η στρώση είναι κατασκευασμένη με ισχνό σκυρόδεμα.
- Στρώσεις από ασφαλτικό σκυρόδεμα: $M_r = 2500 \text{ MN/m}^2$ για βάση και $M_r = 5000 \text{ MN/m}^2$ για επιφανειακή στρώση.

Ο δείκτης Poisson λαμβάνεται ίσος με 0.35 για όλες τις στρώσεις

4.5.2 Κυκλοφοριακός Φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος που υπολογίζεται, βασίζεται στην κυκλοφορία των εμπορικών οχημάτων στη μια κατεύθυνση για όλη τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Σε αυτοκινητόδρομους που έχουν περισσότερες από μία λωρίδα ανά κατεύθυνση ο υπολογισμός αφορά την εξωτερική λωρίδα (λωρίδα σχεδιασμού).

Ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος υπολογίζεται με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$T_n = 365 \times F_o \times \{[(1 + r)^n - 1]/r\} \times P$$

Όπου:

T_n = Συνολικός αριθμός εμπορικών οχημάτων σε n έτη

F_o = Αρχική ημερήσια κυκλοφορία στη μια κατεύθυνση

P = Ποσοστό κυκλοφορίας που χρησιμοποιεί τη λωρίδα σχεδιασμού

r = Ετήσιος συντελεστής αύξησης κυκλοφορίας

n = Διάρκεια ζωής οδοστρώματος (έτη)

Ο Συνολικός αριθμός ΙΤΑ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Συνολικός αριθμός ΙΤΑ} = D \times T_n$$

Όπου:

D = ο μέσος συντελεστής φθοράς του οχήματος που ισούται με τον αριθμό των ΙΤΑ ανά εμπορικό όχημα

4.5.3 Φέρουσα Ικανότητα Εδάφους

Με τη διεξαγωγή των απαραίτητων ελέγχων πριν τη μελέτη αλλά και κατά τη διάρκεια της κατασκευής του οδοστρώματος μετριέται ο Καλιφορνιακός Δείκτης CBR της στρώσης έδρασης. Οι έλεγχοι για τον υπολογισμό της τιμής του CBR μπορεί να γίνονται είτε στο εργοτάξιο είτε στο εργαστήριο. Όταν είναι αδύνατη η μέτρηση της τιμής του CBR πριν την ανάλυση, το εγχειρίδιο παραθέτει πίνακα για την εκτίμησή της με βάση την κατηγορία του εδάφους, ο οποίος έχει προκύψει από την ταξινόμηση των εδαφικών υλικών.

4.5.4 Μεθοδολογία διαστασιολόγησης Οδοστρώματος

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος ακολουθεί τα πιο κάτω βήματα:

1. Υπολογισμός του συνολικού αριθμού ΙΤΑ
2. Υπολογισμός του Καλιφορνιακού Δείκτη CBR του εδάφους έδρασης και ο καθορισμός της σχεδιαστικής τιμής του, με τη χρήση του πίνακα 4.15

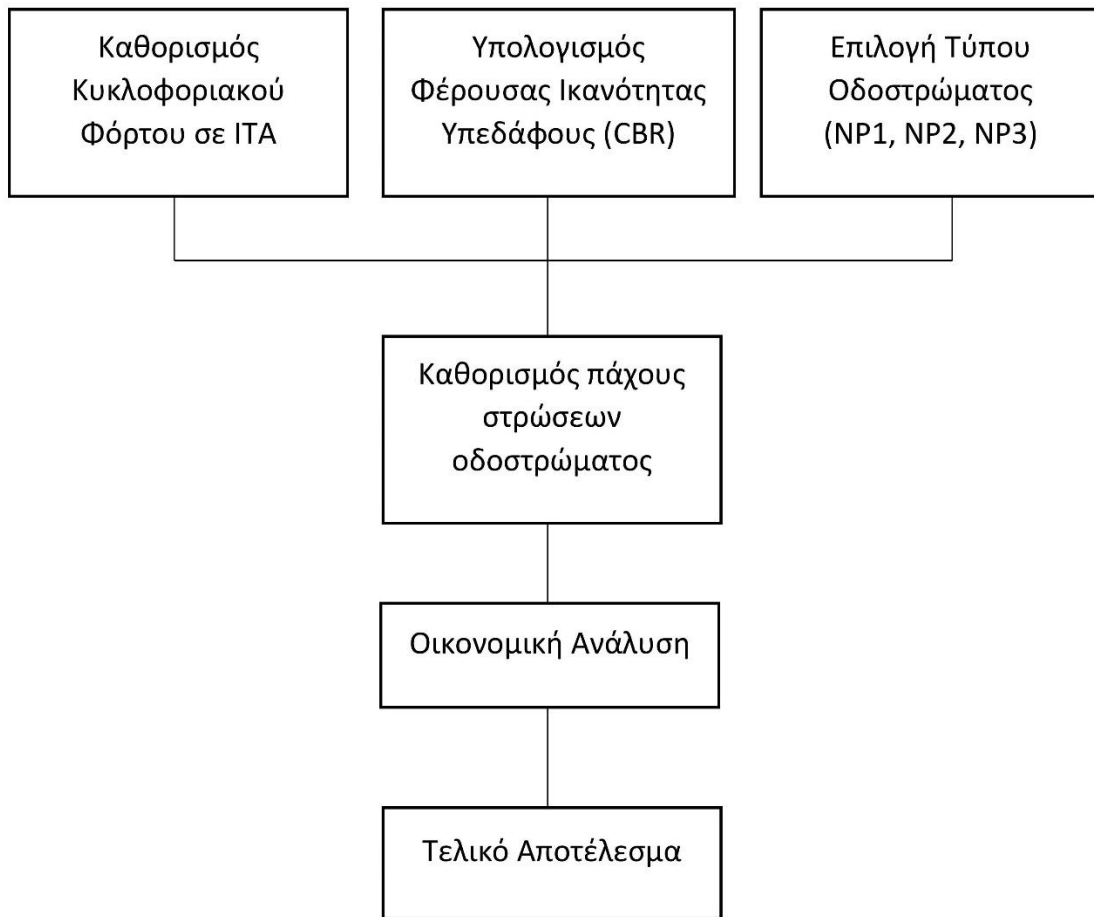
Πίνακας 4-15: Προσδιορισμός σχεδιαστικής τιμής CBR

Σχεδιαστική Τιμή CBR (%)	2	3	6	11
Υπολογισθείσα Τιμή CBR (%)	2	3-5	6-10	>10

Πηγή: Οικονομίδης, 2015

3. Επιλογή του τύπου του οδοστρώματος που θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με τα υλικά που έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν στις στρώσεις του οδοστρώματος
4. Επιλογή του νομογραφήματος ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος και τον Καλιφορνιακό Δείκτη (CBR)

Τα νομογραφήματα του εγχειριδίου φαίνονται στο παράρτημα Δ.



Σχήμα 4-6: Λογικό διάγραμμα διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά ΤΔΕ

5 Σύγκριση Μεθόδων Διαστασιολόγησης

Είναι γνωστό, ότι υπάρχει μεγάλη πληθώρα από μεθόδους διαστασιολόγησης ευκάμπτου οδοστρώματος, οι οποίες, πέντε από αυτές έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βασικά όμως, όποια μεθοδολογία και να χρησιμοποιηθεί, σε γενικές γραμμές, τα δεδομένα που χρειάζεται, είναι κοινά για όλες (κυκλοφοριακός φόρτος, φέρουσα ικανότητα υπεδάφους, ιδιότητες υλικών, κλιματικοί παράγοντες), αυτό όμως, δεν προϋποθέτει ότι θα έχουν και ίδια αποτελέσματα μεταξύ τους.

Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε μεθοδολογία έχει τα δικά της νομογραφήματα και εξισώσεις για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος, τα οποία αναπτύχθηκαν από εμπειρικές διαδικασίες και αναλυτικούς υπολογισμούς. Κάθε μεθοδολογία χρησιμοποίησε στοιχεία μιας συγκεκριμένης χώρας, όμως αυτό δε σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε άλλες χώρες (Παναγιώτου 2011).

5.1 Διαστασιολόγηση οδοστρώματος – Εφαρμογή μεθόδων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η διαστασιολόγηση ενός υποθετικού οδοστρώματος σε συνδυασμό κάποιων δεδομένων με τις πέντε μεθοδολογίες και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα για να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα.

5.1.1 Δεδομένα υπολογισμού

Το οδόστρωμα προορίζεται για υπεραστικό αυτοκινητόδρομο.

Οι συνδυασμοί των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

- Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R.= 5%,
Κυκλοφοριακός φόρτος στη λωρίδα μελέτης: ITA = 10^6
- Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R.= 5%,
Κυκλοφοριακός φόρτος στη λωρίδα μελέτης: ITA = 10^7
- Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R.= 10%,
Κυκλοφοριακός φόρτος στη λωρίδα μελέτης: ITA = 10^6
- Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R.= 10%,
Κυκλοφοριακός φόρτος στη λωρίδα μελέτης: ITA = 10^7

Τα οδοστρώματα που θα κατασκευαστούν, θα αποτελούνται από υπόβαση με ασύνδετα αδρανή αν είναι απαραίτητη, από βάση με ασύνδετα αδρανή ή ασφαλτικό σκυρόδεμα και από επιφανειακή ασφαλτική στρώση. Επίσης, θα κατασκευαστούν και τα οδοστρώματα, που θα αποτελούνται εξ ολοκλήρου από ασφαλτικό σκυρόδεμα.

5.1.2 Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του Ινστιτούτου Ασφάλτου

Κυκλοφοριακός φόρτος: Συνολικός αριθμός ΙΤΑ = 10^6

Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R. = 5% \rightarrow $M_r = 10.3 \times 5 = 51.5$ MPa

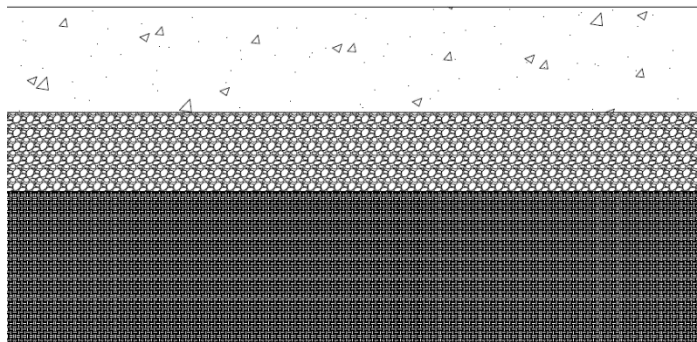
Υπολογισμός πάχους στρώσεων:

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα A.1 του παραρτήματος Α (για Μ.Ε.Θ.Α 15.5°C), προκύπτει ότι το προτεινόμενο οδόστρωμα αποτελείται από:

150mm επιφανειακή στρώση από ασφαλτικό σκυρόδεμα

200mm βάση από ασύνδετα αδρανή

Συνολικό πάχος: 350 mm

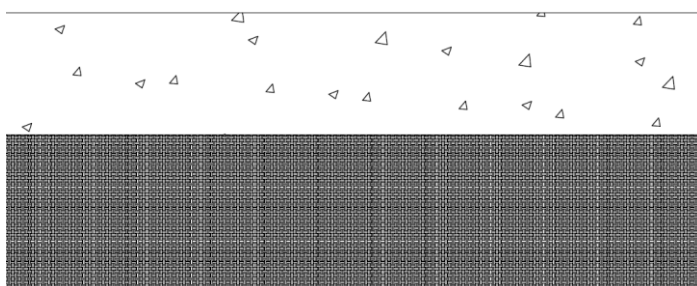


Επιφανειακή στρώση 200mm

Βάση από ασύνδετα αδρανή 150mm

Υπέδαφος

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα A.2 του παραρτήματος Α (για Μ.Ε.Θ.Α 15.5°C), προκύπτει ότι το προτεινόμενο οδόστρωμα αποτελείται εξ ολοκλήρου από 230mm ασφαλτικό σκυρόδεμα



Ολικό πάχος από ασφαλτικό
σκυρόδεμα 230mm

Υπέδαφος

5.1.3 Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του AASHTO

Συντελεστές στρώσεων:

Ασφαλτική στρώση:

Από το διάγραμμα B.2 του παραρτήματος B, θεωρώντας ως μέτρο ελαστικότητας 4×10^5 psi, προκύπτει ο συντελεστής $a_1 = 0.42$.

Στρώση βάσης από ασύνδετα αδρανή:

Από το διάγραμμα B.3 του παραρτήματος B, θεωρώντας ως C.B.R.(βάσης) = 80%, προκύπτει ο συντελεστής $a_2 = 0.133$.

Στρώση υπόβασης από ασύνδετα αδρανή:

Από το διάγραμμα B.4 του παραρτήματος B, θεωρώντας ως C.B.R.(υπόβασης) = 20%, προκύπτει ο συντελεστής $a_3 = 0.094$.

Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους:

C.B.R. = 5% \rightarrow $M_r = 1500 \times 5 = 7500$ psi

Επίπεδο αξιοπιστίας:

Από τον πίνακα 4.9, για αυτοκινητόδρομους για υπεραστικές περιοχές επιλέγουμε επίπεδο αξιοπιστίας, $R=90\%$.

Τυπική απόκλιση:

$S_o = 0.35$

Συντελεστές αποστράγγισης:

Το φυσικό έδαφος θεωρούμαι ότι έχει καλή αποστράγγιση και η κατάσταση κορεσμού του είναι μεγαλύτερη του 25%. Με αυτά τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 4.10, επιλέγουμε τους συντελεστές αποστράγγισης $m_2 = m_3 = 1$.

Απώλεια δείκτη εξυπηρετικότητας:

$P_o = 4.2$

$P_t = 2.5$

$\Delta PSI = P_o - P_t = 4.2 - 2.5 = 1.7$

Υπολογισμός πάχους στρώσεων:

Επιφανειακή στρώση:

Η επιφανειακή στρώση από ασφαλτικό σκυρόδεμα, εδράζεται πάνω στη βάση από ασύνδετα αδρανή. Θεωρείται ως C.B.R. στρώσης βάσης 80% (28500 psi). Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα B.5 του παραρτήματος Β, προκύπτει ο δομικός αριθμός για την επιφανειακή στρώση $SN_1 = 2.1$.

$$\rightarrow D_1 \geq SN_1/a_1 = 2.1/0.42 = 5 \text{ inches} \rightarrow \mathbf{D_1^* = 125mm, SN_1^* = 2.1}$$

Στρώση βάσης:

Η στρώση βάσης από ασύνδετα αδρανή, εδράζεται πάνω στην υπόβαση από ασύνδετα αδρανή. Θεωρείται ως C.B.R. στρώσης υπόβασης 20% (13000 psi). Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα B.5 του παραρτήματος Β, προκύπτει ο δομικός αριθμός για την επιφανειακή στρώση $SN_2 = 2.75$.

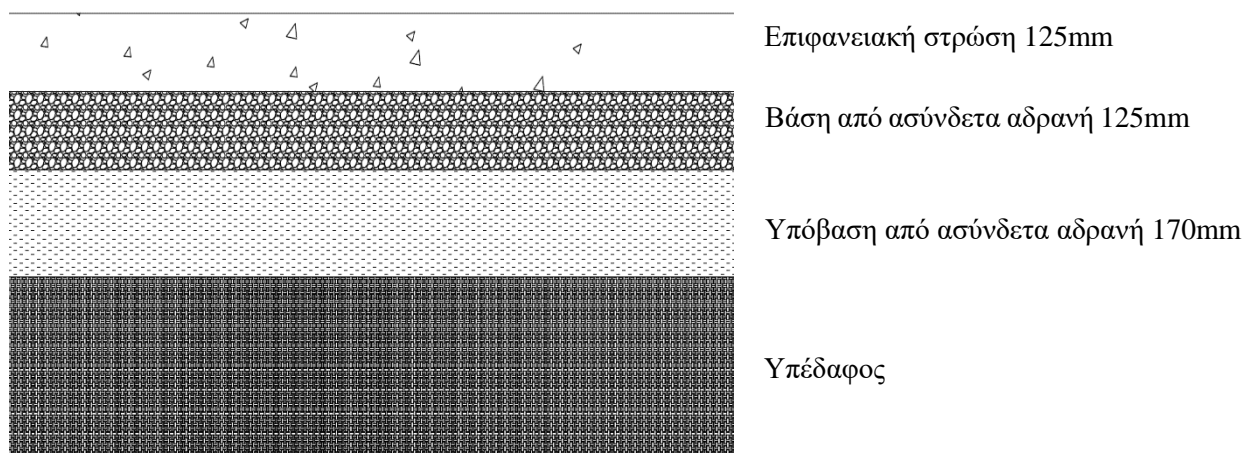
$$\rightarrow D_2 \geq (SN_2 - SN_1^*)/(a_2 \times m_2) = (2.75-2.1)/(0.133 \times 1) = 4.9 \text{ inches} \rightarrow \mathbf{D_2^* = 125mm}$$
$$SN_2^* = (D_1^* \times a_1) + (D_2^* \times a_2) = (5 \times 0.42) + (5 \times 0.133) \rightarrow \mathbf{SN_2^* = 2.765}$$

Στρώση υπόβασης:

Η στρώση υπόβασης από ασύνδετα αδρανή, εδράζεται πάνω στο υπέδαφος. Θεωρείται ως C.B.R. υπεδάφους 5% (7500 psi). Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα B.5 του παραρτήματος Β, προκύπτει ο δομικός αριθμός για τη στρώση υπόβασης $SN_3 = 3.4$.

$$\rightarrow D_3 \geq (SN_3 - SN_2^*)/(a_3 \times m_3) = (3.4-2.765)/(0.094 \times 1) = 6.76 \text{ inches} \rightarrow \mathbf{D_3^* = 170mm}$$

Συνολικό πάχος: 420mm



5.1.4 Υπολογισμός οδοστρώματος με τη Βρετανική Μέθοδο

Κυκλοφοριακός φόρτος: Συνολικός αριθμός ΙΤΑ = 10^6

Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R. = 5%

Υπολογισμός πάχους στρώσεων:

Επιφανειακή στρώση & βάση:

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα 4.5, προκύπτει ότι το πάχος της επιφανειακή στρώσης και της βάσης από ασφαλτόμιγμα, μαζί είναι ίσο με 190mm. Τότε το πάχος της επιφανειακή στρώσης είναι ίσο με 50mm και τα υπόλοιπα 140mm είναι το πάχος της βάσης.

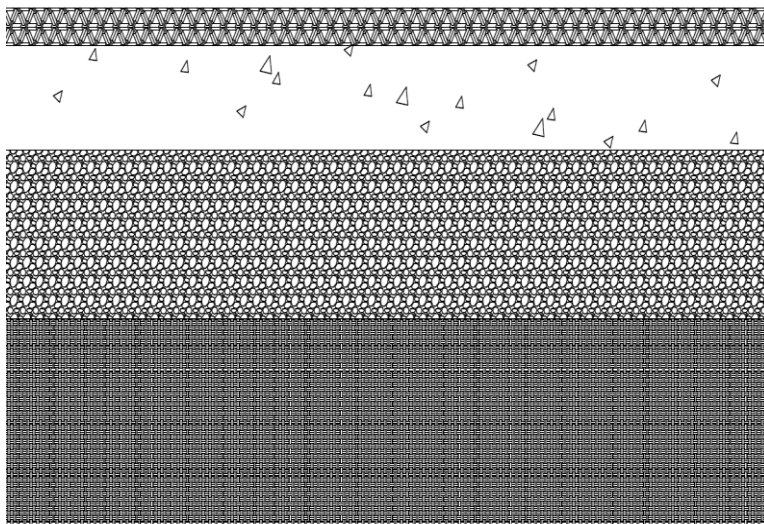
Υπόβαση – Εξυγιαντική στρώση

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα 4.3, προκύπτει ότι το πάχος της υπόβασης από ασύνδετα αδρανή είναι ίσο με 225mm.

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα 4.4, προκύπτει ότι το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης είναι ίσο με 250mm και η υπόβαση έχει σταθερό πάχος ίσο με 150mm.

Στους επόμενους υπολογισμούς θα χρησιμοποιείται μόνο η λύση που το πάχος της υπόβασης είναι μεταβλητό και δε θα χρησιμοποιείται εξυγιαντική στρώση.

Συνολικό πάχος: 415mm



Επιφανειακή στρώση 50mm

Βάση από ασφαλτικό σκυρόδεμα 140mm

Υπόβαση από ασύνδετα αδρανή 225mm

Υπέδαφος

5.1.5 Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο της Shell

Με βάση τις κυπριακές προδιαγραφές του Τμήματος Δημοσίων Έργων, για δρόμους που βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο όπου έχει ψηλές θερμοκρασίες, όπως η παρούσα περίπτωση, η ασφαλτος πρέπει να έχει δείκτη διεισδυτικότητας ίσο με 50 pen (ΤΔΕ 2009). Για αυτόν τον λόγο, ο τύπος του ασφαλτομίγματος που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν τη μέθοδο θα είναι S1-F1-50.

Κυκλοφοριακός φόρτος: Συνολικός αριθμός ΙΤΑ = 10^6

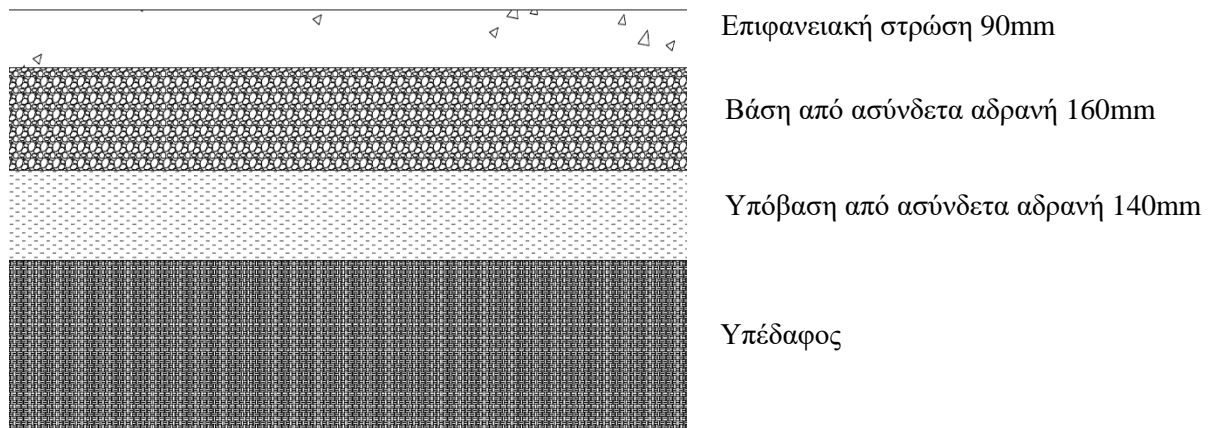
Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R. = 5% = 5×10^7 N/m²

Υπολογισμός πάχους στρώσεων:

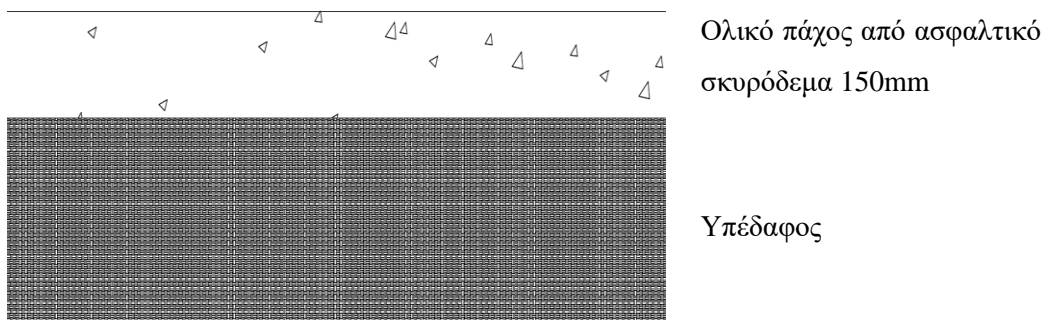
Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Γ.1 του παραρτήματος Γ (για Μ.Ε.Θ.Α 15.5°C), θέτοντας ως σταθερό πάχος των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή (h_2) ίσο με 300mm, προκύπτει το πάχος της ασφαλτικής στρώση (h_1 , επιφανειακή στρώση) ίσο με 90mm.

Με τη βοήθεια του διαγράμματος Γ.1, μπορεί να καθοριστεί το πάχος της πρώτης και της δεύτερης στρώσης από ασύνδετα αδρανή, οι οποίες θεωρούνται η βάση και η υπόβαση αντίστοιχα. Προκύπτει το πάχος της βάσης (h_{2-1}) ίσο με 160mm και το πάχος της υπόβασης (h_{2-2}) ίσο με 140mm.

Συνολικό πάχος: 390mm



Επίσης, χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Γ.1 του παραρτήματος Γ (για Μ.Ε.Θ.Α 15.5°C), θέτοντας ως σταθερό πάχος των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή (h_2) ίσο με 0mm, προκύπτει το πάχος της ασφαλτικής στρώση (h_1 , επιφανειακή στρώση) ίσο με 150mm.



5.1.6 Υπολογισμός οδοστρώματος με τη μέθοδο του ΤΔΕ Κύπρου

Κυκλοφοριακός φόρτος: Συνολικός αριθμός ΙΤΑ = 10^6

Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους: C.B.R. = 5%

Υπολογισμός πάχους στρώσεων:

Ο τύπος οδοστρώματος που επιλέχθηκε σε αυτήν τη μέθοδο είναι ο NP2 που αντιστοιχεί για τους αυτοκινητόδρομους.

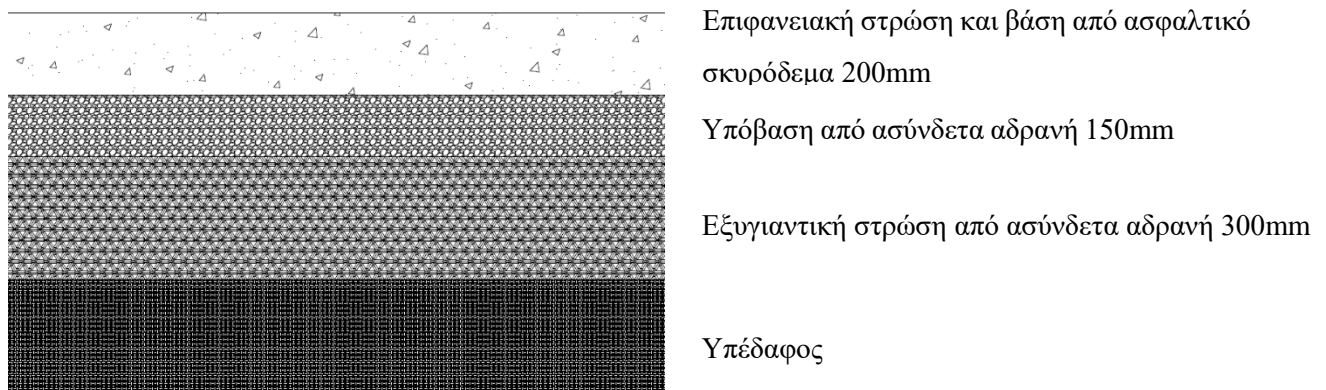
Χρησιμοποιώντας το σχήμα Δ.1 και το διάγραμμα Δ.1 του παραρτήματος Δ προκύπτει ότι το οδόστρωμα θα αποτελείται από:

200mm επιφανειακή στρώση και βάση από ασφαλτικό σκυρόδεμα

150mm υπόβαση από ασύνδετα αδρανή

300mm εξυγιαντική στρώση από ασύνδετα αδρανή

Συνολικό πάχος: 650mm



5.2 Γενική σύγκριση μεθόδων οδοστρωμάτων

Στα πιο πάνω παραδείγματα εφαρμόστηκαν οι πέντε μέθοδοι διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων που μας ενδιαφέρουν και είδαμε τον τρόπο υπολογισμού του πάχους της κάθε στρώσης χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα σχεδιασμού για όλες τις μεθόδους.

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα που προκύπτουν, οι τιμές των υπολογιζόμενων παχών των στρώσεων είναι όλες διαφορετικές. Κάποιες μέθοδοι δίνουν μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος και κάποιες μικρότερο.

Για να έχουμε μια πιο σφαιρική εικόνα σύγκρισης των μεθόδων, στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα πάχη των στρώσεων των οδοστρωμάτων με κάθε μία από τις μεθόδους που αναλύθηκαν πιο πάνω, χρησιμοποιώντας ακόμη τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς κυκλοφοριακού φόρτου – δείκτη C.B.R. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Στόχος αυτής της σύγκρισης ήταν να χρησιμοποιηθεί η ίδια σύνθεση υλικών στις στρώσεις του σχεδιαζόμενου οδοστρώματος σε όλες τις μεθόδους. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, λόγω των αποτελεσμάτων που προκύπταν ή/και λόγω της μεθόδου, κάποια υλικά και κάποιες στρώσεις δεν ήταν εφικτές. Επίσης, σε δύο μεθοδολογίες από τις πέντε σχεδιάστηκαν και οδοστρώματα τα οποία αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από ασφαλτικό σκυρόδεμα.

Πίνακας 5-1: Πάχη οδοστρωμάτων με τέσσερις συνδυασμούς τιμών C.B.R. και ΙΤΑ

CBR = 5% ΙΤΑ = 10 ⁶		CBR = 10% ΙΤΑ = 10 ⁶		CBR = 5% ΙΤΑ = 10 ⁷		CBR = 10% ΙΤΑ = 10 ⁷	
Asphalt Institute (mm)							
Επιφανειακή	200	Επιφανειακή	145	Επιφανειακή	330	Επιφανειακή	290
Βάση	150	Βάση	150	Βάση	150	Βάση	150
Ολικού πάχους	230	Ολικού πάχους	190	Ολικού πάχους	360	Ολικού πάχους	315
AASHTO (mm)							
Επιφανειακή	125	Επιφανειακή	125	Επιφανειακή	180	Επιφανειακή	180
Βάση	125	Βάση	125	Βάση	185	Βάση	185
Υπόβαση	170	Υπόβαση	-	Υπόβαση	200	Υπόβαση	-
Βρετανική Μέθοδος (mm)							
Επιφανειακή	50	Επιφανειακή	50	Επιφανειακή	50	Επιφανειακή	50
Βάση	140	Βάση	140	Βάση	235	Βάση	235
Υπόβαση	225	Υπόβαση	190	Υπόβαση	225	Υπόβαση	190
Shell (mm)							
Επιφανειακή	90	Επιφανειακή	50	Επιφανειακή	150	Επιφανειακή	90
Βάση	160	Βάση	300	Βάση	160	Βάση	300
Υπόβαση	140	Υπόβαση	-	Υπόβαση	140	Υπόβαση	-
Ολικού πάχους	150	Ολικού πάχους	125	Ολικού πάχους	220	Ολικού πάχους	180
Τμήμα Δημοσίων Έργων (mm)							
Επιφανειακή & Βάση	200	Επιφανειακή & Βάση	150	Επιφανειακή & Βάση	480	Επιφανειακή & Βάση	355
Υπόβαση	150	Υπόβαση	300	Υπόβαση	150	Υπόβαση	300
Εξυγιαντική	300	Εξυγιαντική	-	Εξυγιαντική	300	Εξυγιαντική	-

5.2.1 Σημειώσεις – Επεξηγήσεις Αποτελεσμάτων

Μέθοδος Asphalt Institute

- 1) Το οδόστρωμα αποτελείται από:
 - Βάση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Επιφανειακή στρώση: Ασφαλτικό Σκυρόδεμα
 - Ολικού πάχους: Ασφαλτικό Σκυρόδεμα
- 2) Η μέθοδος δεν υπολογίζει τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης

Μέθοδος AASHTO

- 1) Το οδόστρωμα αποτελείται από:
 - Υπόβαση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Βάση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Επιφανειακή στρώση: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
(στις περιπτώσεις με C.B.R.=10% δε χρειάζεται η τοποθέτηση υπόβασης με βάσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών)
- 2) Η μέθοδος δεν υπολογίζει τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης

Βρετανική Μέθοδο

- 1) Το οδόστρωμα αποτελείται από:
 - Υπόβαση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Βάση: Ασφαλικό σκυρόδεμα
 - Επιφανειακή στρώση: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
- 2) Η μέθοδος χρησιμοποιεί τη λύση που δεν υπολογίζει τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης

Μέθοδος Shell

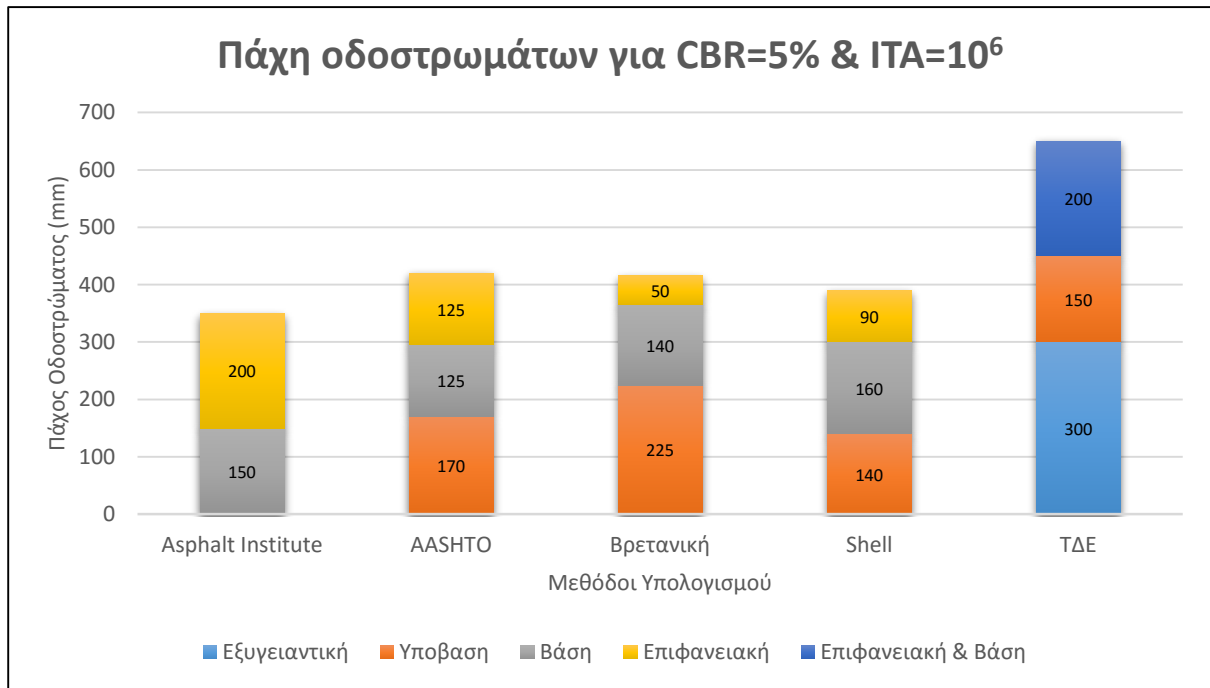
- 1) Το οδόστρωμα αποτελείται από:
 - Υπόβαση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Βάση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Επιφανειακή στρώση: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
(στις περιπτώσεις με C.B.R.=10% δε χρειάζεται η τοποθέτηση υπόβασης με βάσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών)
 - Ολικού πάχους: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
- 2) Η μέθοδος δεν υπολογίζει τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης

Μέθοδο TΔΕ

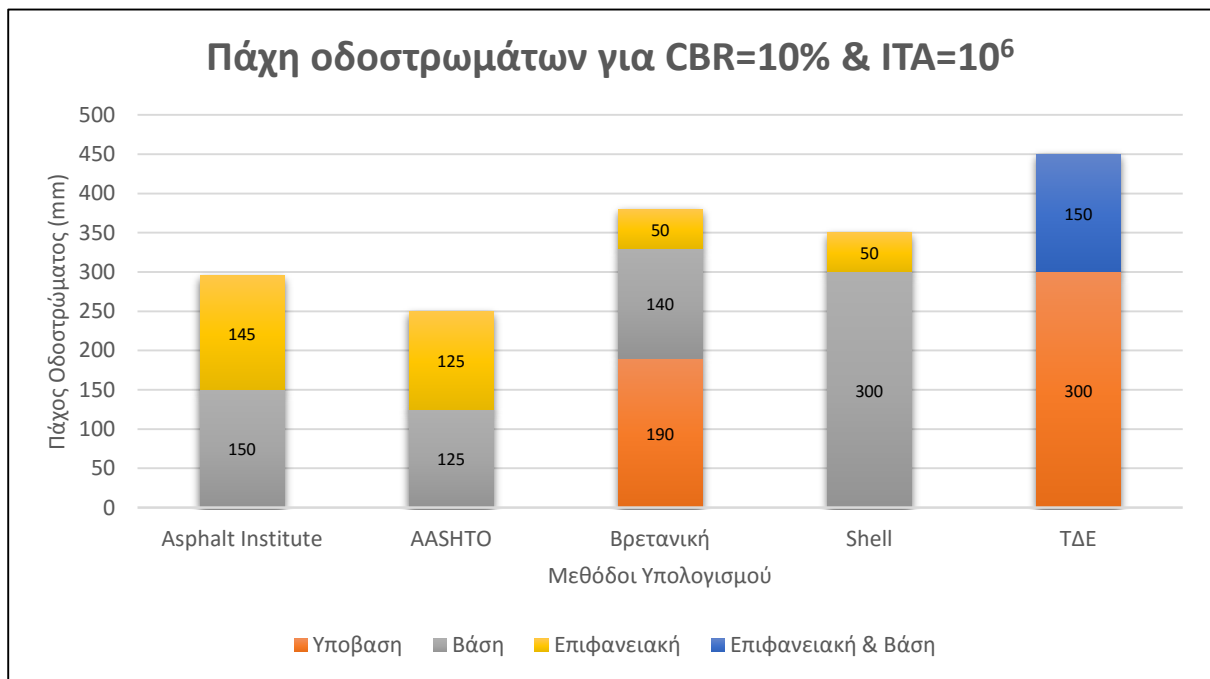
- 1) Το οδόστρωμα (NP2) αποτελείται από:
 - Υπόβαση: Ασύνδετα Αδρανή
 - Βάση: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
 - Επιφανειακή στρώση: Ασφαλικό Σκυρόδεμα
(στις περιπτώσεις με C.B.R.=10% δε χρειάζεται η τοποθέτηση εξυγιαντικής στρώσης)

5.2.2 Γραφική Σύγκριση Προτεινόμενων Οδοστρωμάτων

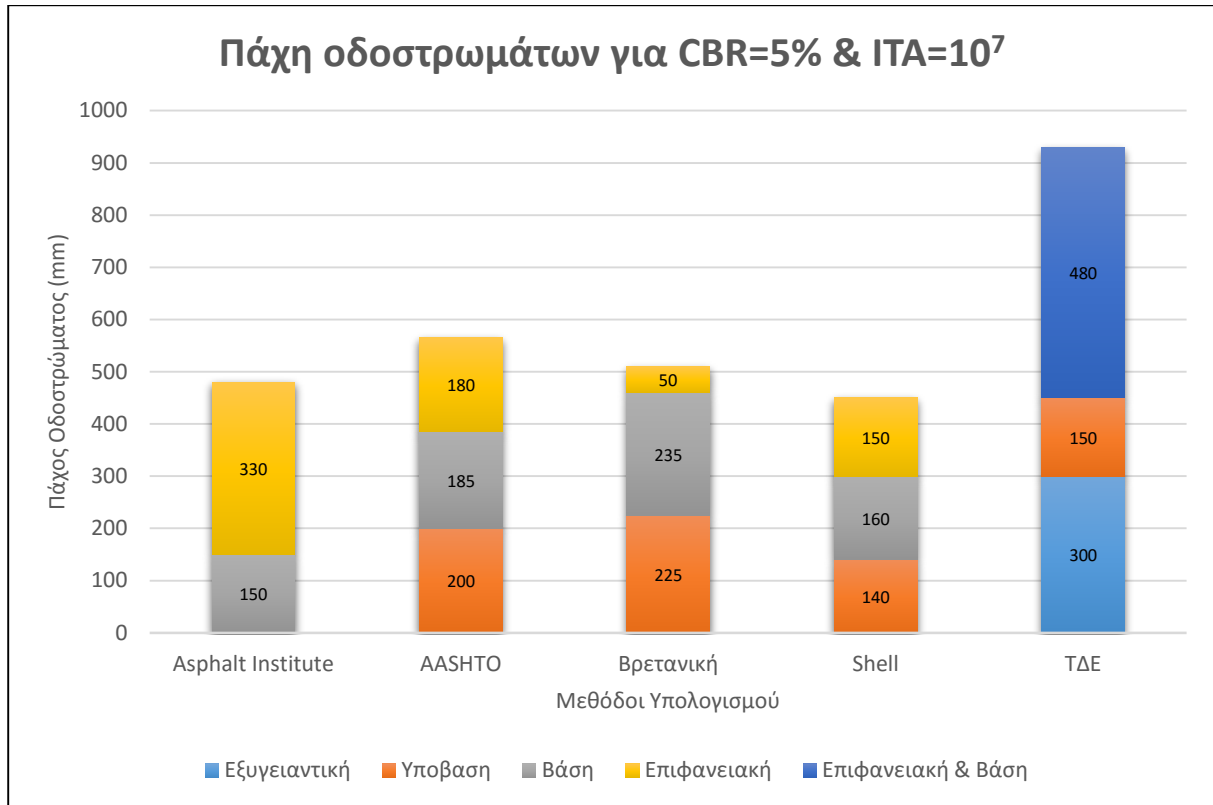
Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα 5.1, στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται μια γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για το συνολικό πάχος των προτεινόμενων οδοστρωμάτων.



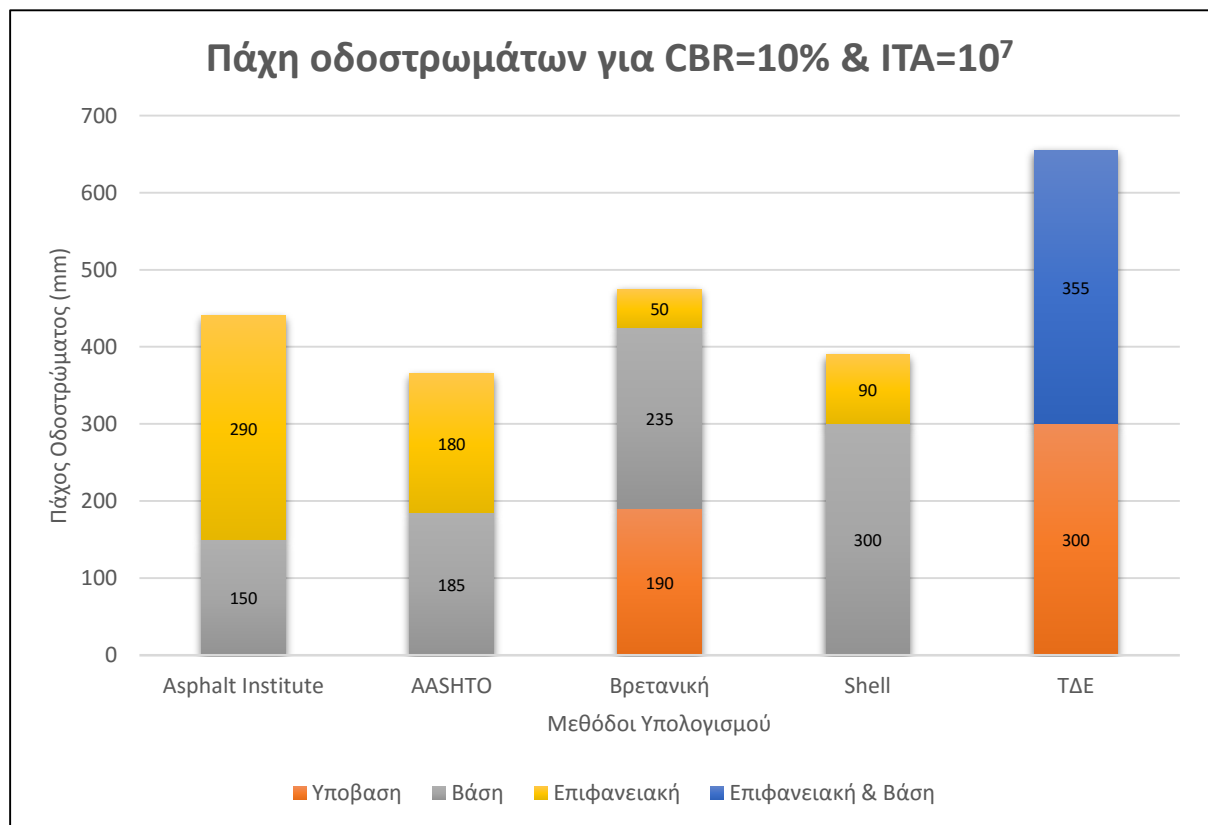
Διάγραμμα 5-1: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10⁶



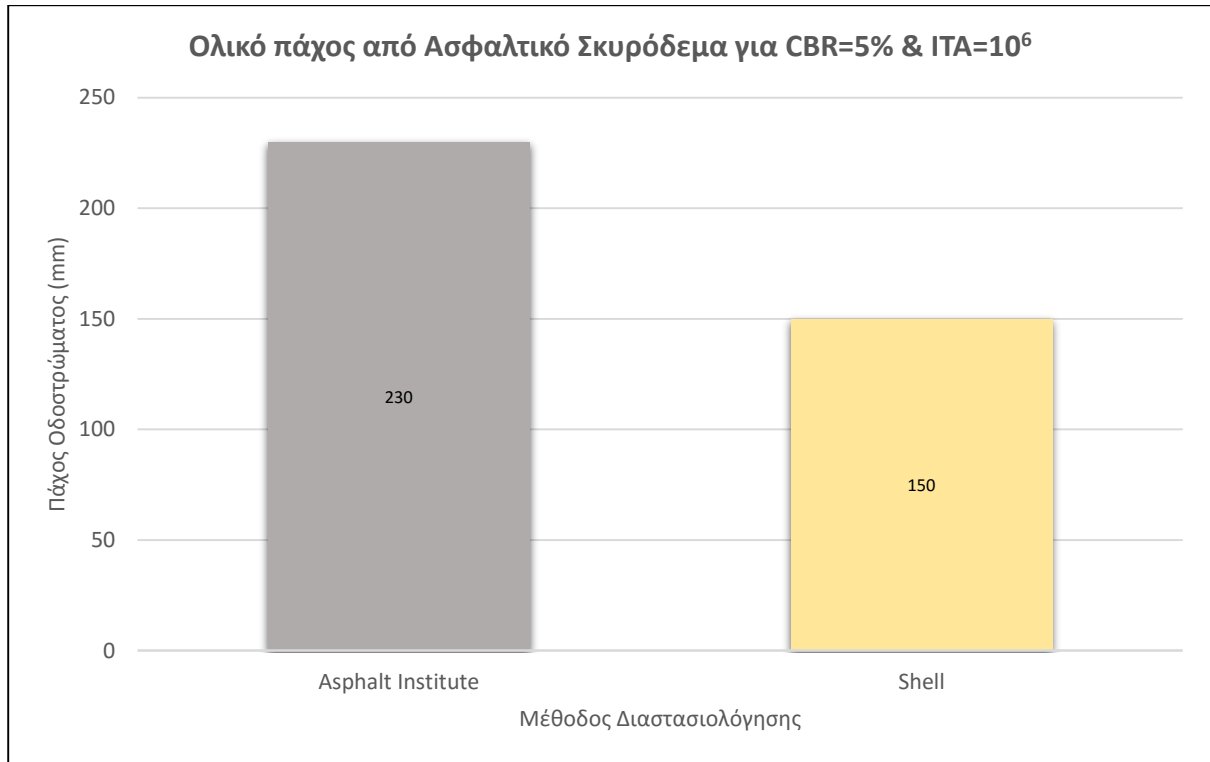
Διάγραμμα 5-2: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10⁶



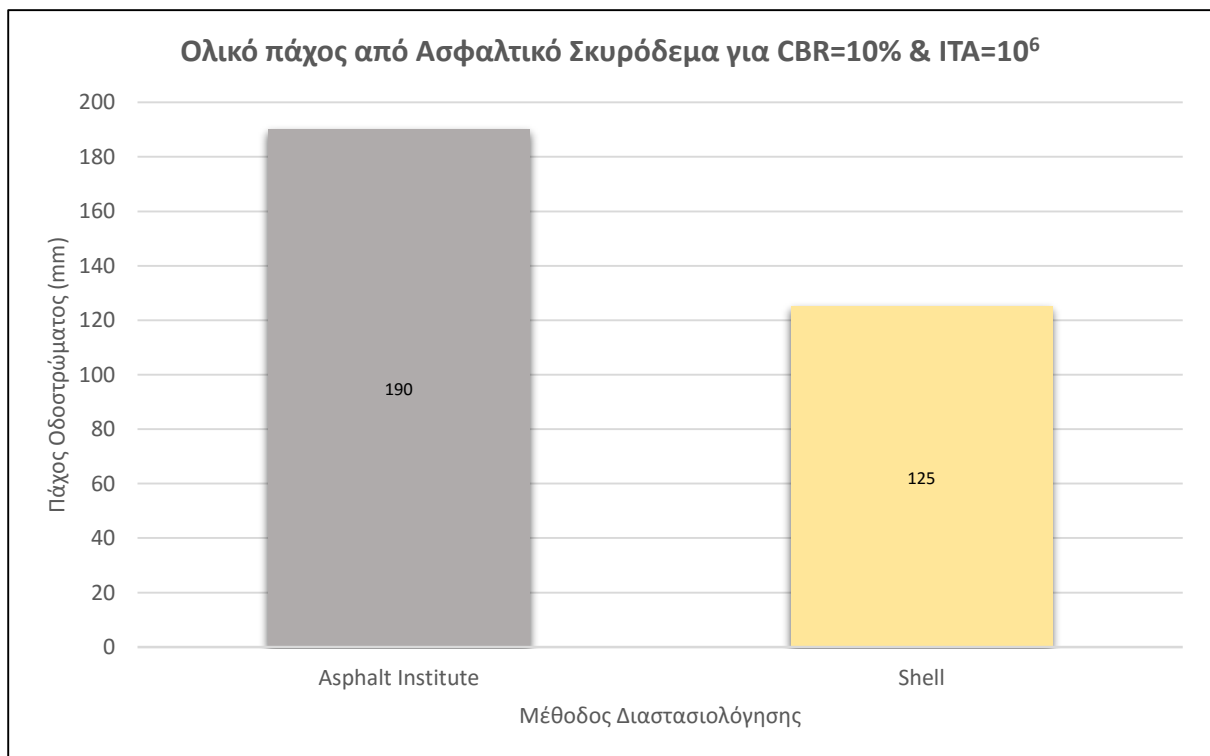
Διάγραμμα 5-3: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10⁷



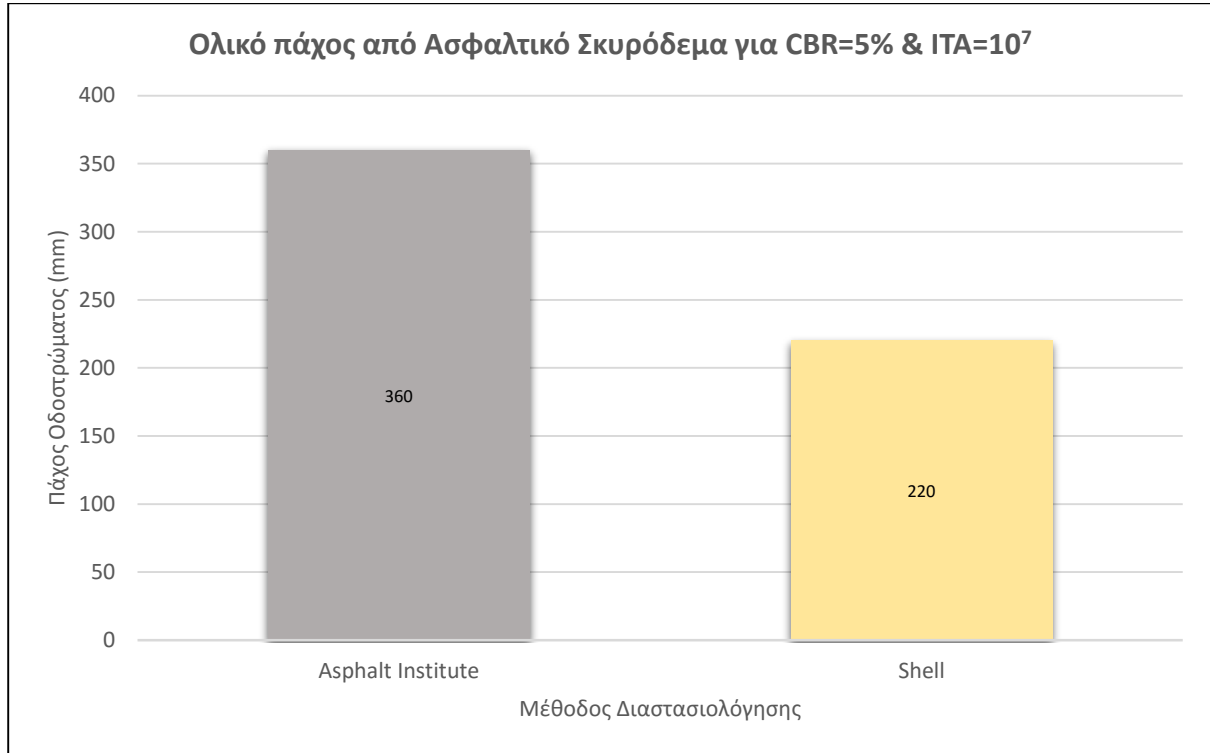
Διάγραμμα 5-4: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10⁷



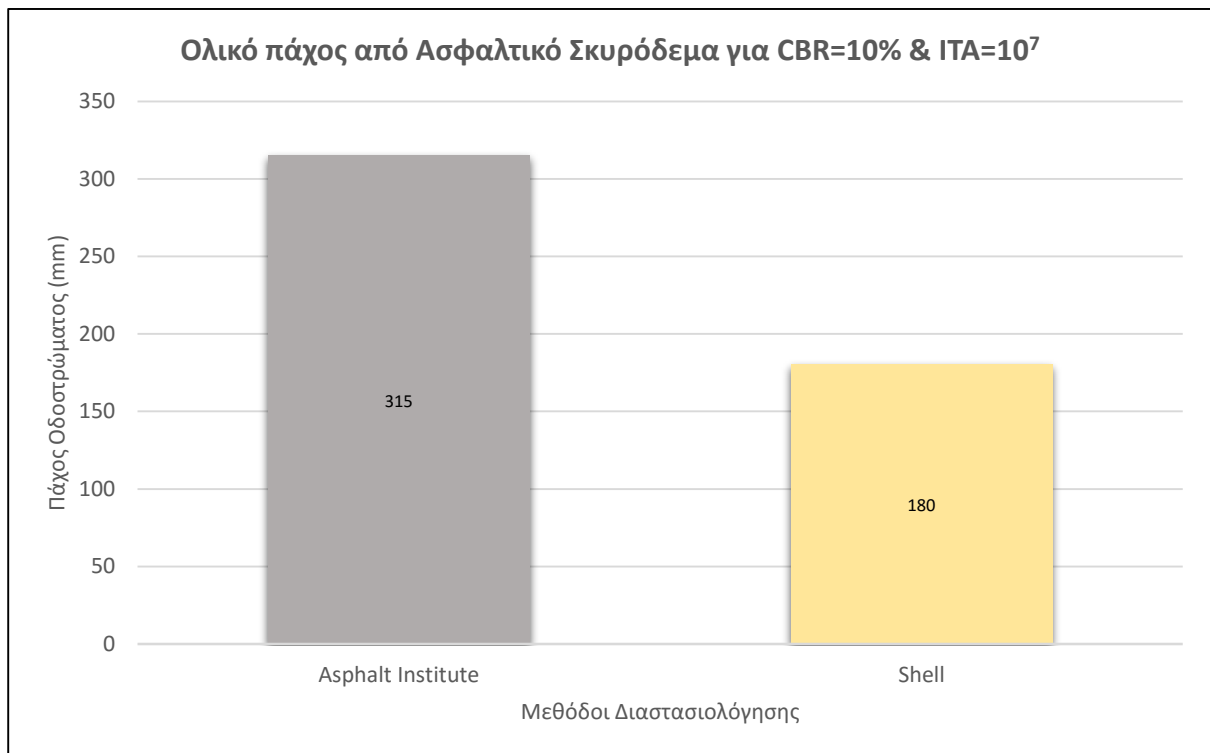
Διάγραμμα 5-5: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10⁶



Διάγραμμα 5-6: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10⁶

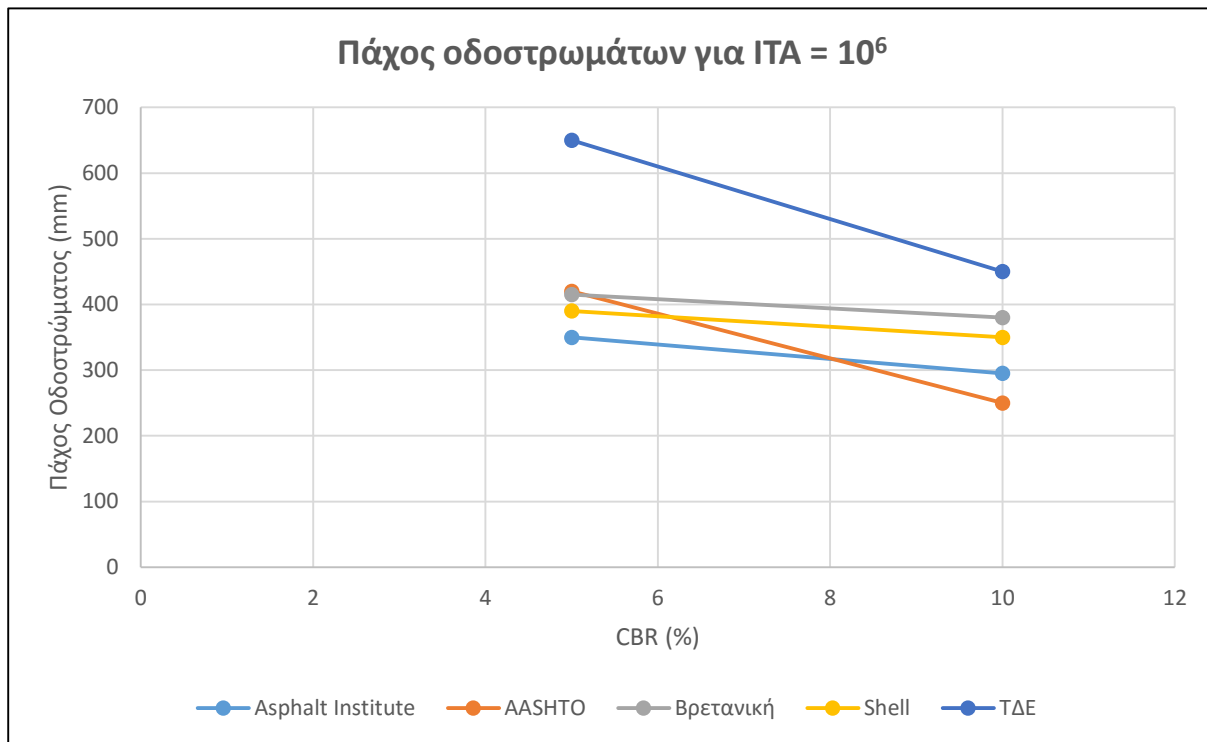


Διάγραμμα 5-7: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10⁷

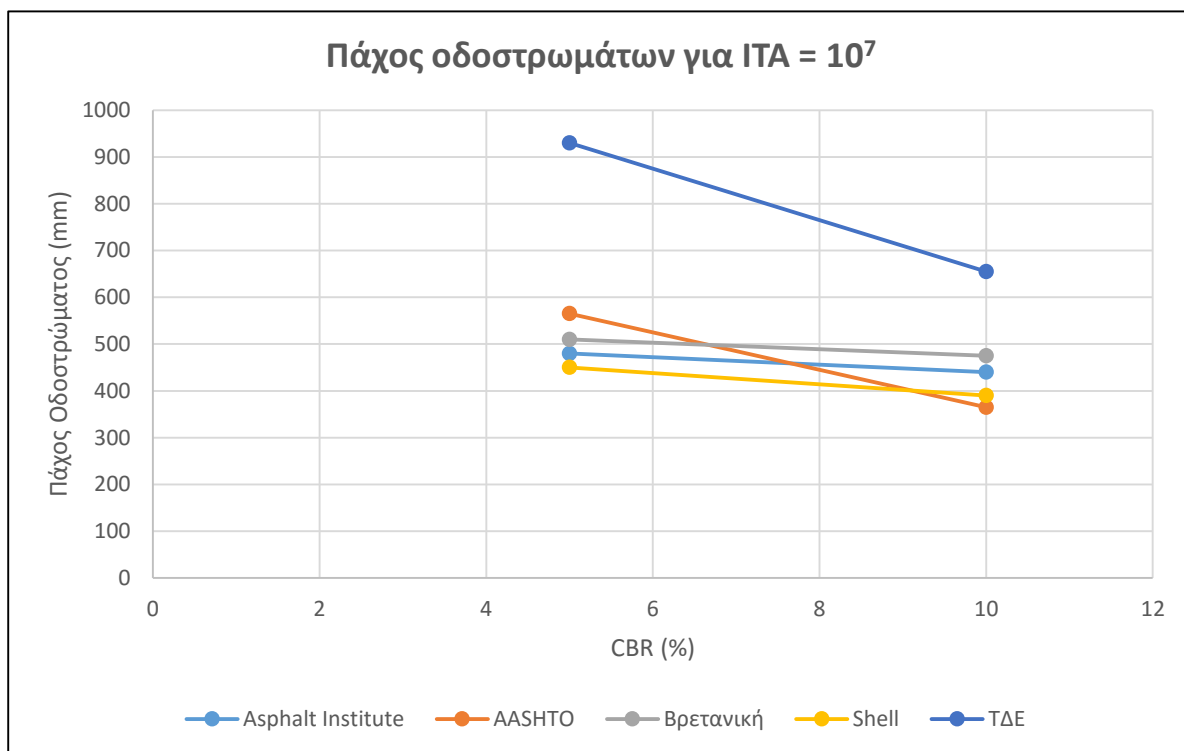


Διάγραμμα 5-8: Γραφική απεικόνιση πάχους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10⁷

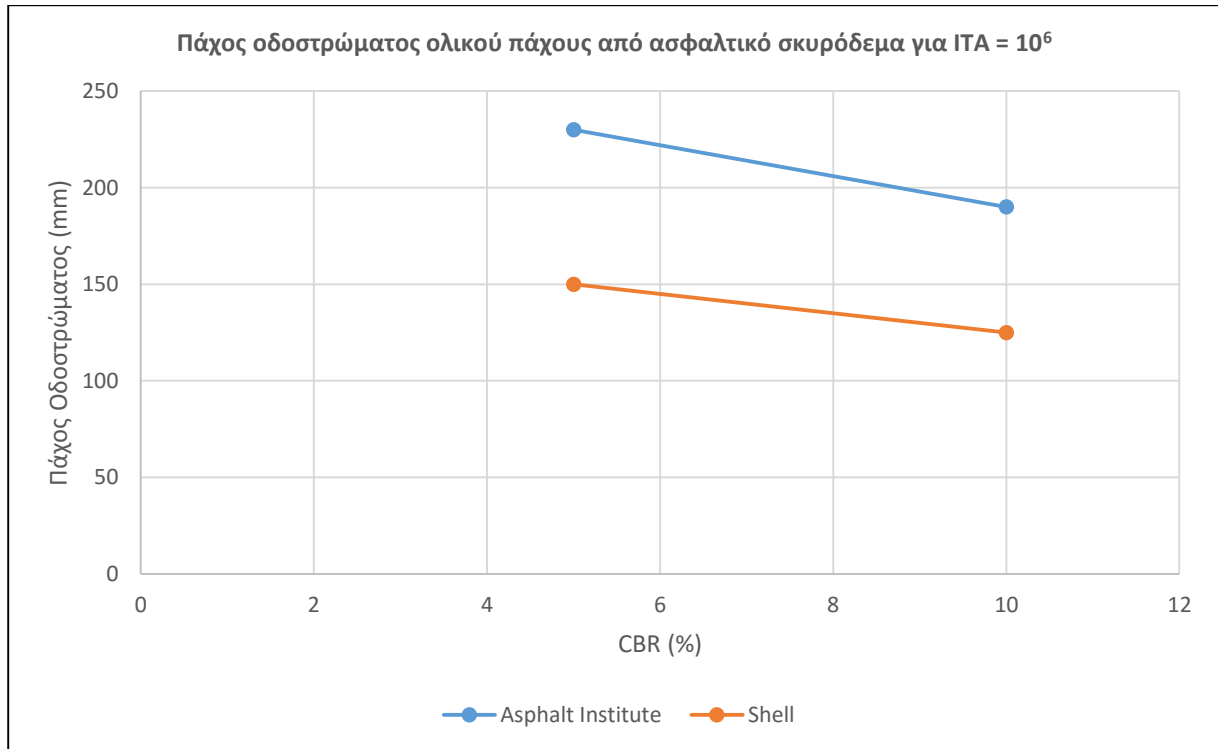
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται μια συγκριτική απεικόνιση του πάχους των οδοστρωμάτων της κάθε μεθόδου συναρτήσει του CBR του εδάφους.



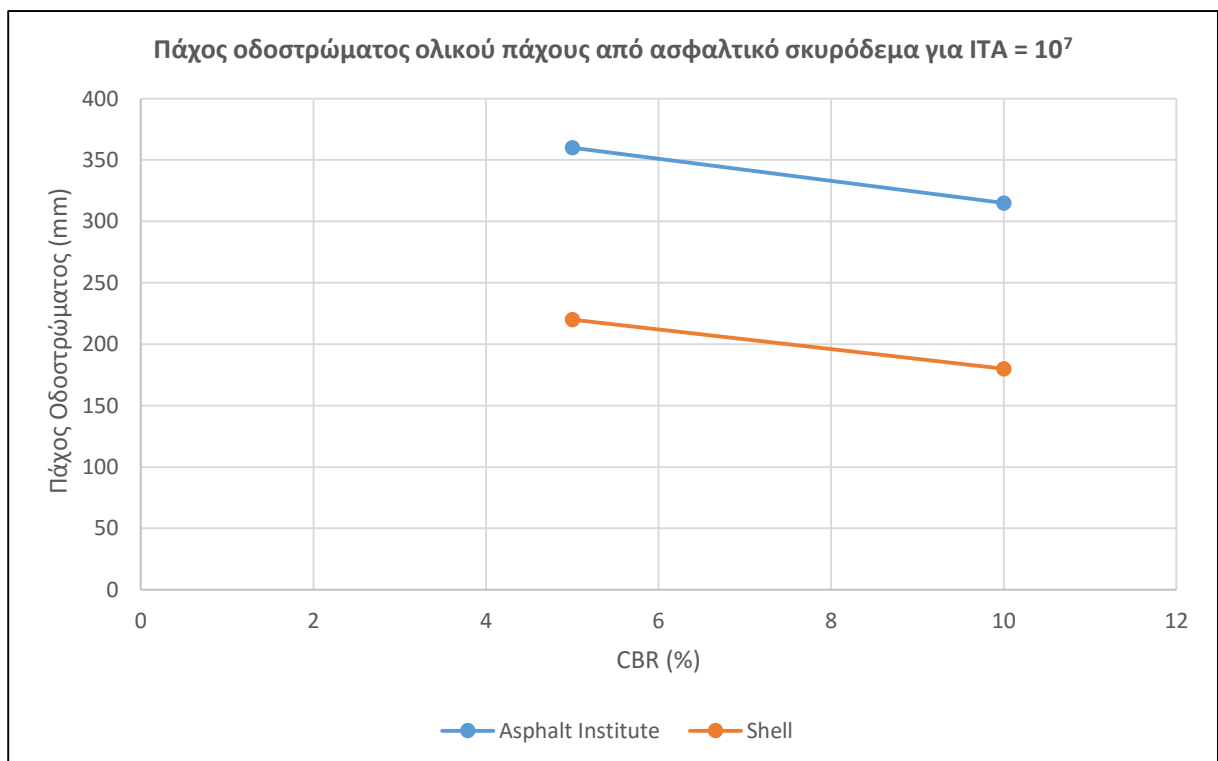
Διάγραμμα 5-9: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων για ITA=10⁶



Διάγραμμα 5-10: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων για ITA=10⁷



Διάγραμμα 5-11: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ΙΤΑ=10⁶



Διάγραμμα 5-12: Σύγκριση υπολογιζόμενων παχών οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ΙΤΑ=10⁷

5.3 Οικονομική Σύγκριση

Παράλληλα, με τον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων, γίνεται και η επιλογή της ιδανικής διατομής του προτεινόμενου οδοστρώματος, για να γίνει και η ανάλυση του κόστους που θα προκύψει από την κατασκευή αυτής της διατομής. Η σωστή μέθοδος σύγκρισης των εναλλακτικών λύσεων βασίζεται στη διεξαγωγή μιας οικονομικής ανάλυσης για όλο τον κύκλο ζωής του σχεδιαζόμενου οδοστρώματος. Κύκλος ζωής ορίζεται η χρονική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος η οποία μπορεί να είναι από 20 μέχρι 50 χρόνια ανάλογα με την κατηγορία του προτεινόμενου δρόμου.

Μία οικονομική ανάλυση περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους οικονομικού κόστους:

1. Εκτίμηση του κόστους κατασκευής ανά μονάδα μέτρησης , για κάθε εναλλακτική λύση
2. Εκτίμηση των ποσών που πιθανόν να δαπανηθούν για σκοπούς ετήσιας συντήρησης, σε περίπτωση που αυτά διαφοροποιούνται σημαντικά για κάθε εναλλακτική λύση
3. Σε περίπτωση που η διάρκεια ζωής οδοστρώματος λόγω των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν διαφέρει, θα πρέπει να εκτιμηθεί και να αποφασισθεί μια κοινή βάση στην οποία θα αναχθούν όλα τα έξοδα για να γίνει η σύγκριση
4. Εκτίμηση του κόστους που θα απαιτηθεί για την τελική αποκατάσταση του οδοστρώματος
5. Υπολογίζεται η παρούσα αξία, του συνολικού ποσού που προκύπτει από τα έξοδα που αναφέρθηκαν πιο πάνω, στο τέλος της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος, είτε ως συνολικό ποσό είτε ως κόστος ανά μονάδα μέτρησης. Αυτό γίνεται για κάθε εναλλακτική λύση. Ο υπολογισμός της παρούσας αξίας γίνεται με την πιο κάτω εξίσωση:

$$P = \frac{A}{(1 + i)^n}$$

Όπου:

P = παρούσα αξία

A = συνολικό κόστος στο τέλος της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής του οδοστρώματος

i = επιτόκιο (ποσοστό απόδοσης που θα μπορούσε να κερδίσει μια επένδυση στις χρηματοπιστωτικές αγορές με παρόμοιο κίνδυνο)

n = διάρκειας ζωής σε χρόνια

Θεωρούμε, ότι τα έξοδα συντήρησης και αποκατάστασης των οδοστρωμάτων που θα συγκριθούν δε θα έχουν σημαντική διαφορά, λόγω ομοιότητας της σύστασης των εναλλακτικών οδοστρωμάτων που συγκρίνονται. Για αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να υπολογιστεί μόνο το κόστος κατασκευής του οδοστρώματος το οποίο είναι το μόνο στοιχείο που διαφοροποιεί ιδιαίτερα το τελικό κόστος του οδοστρώματος (Παναγιώτου 2011).

5.3.1 Σύγκριση κόστους κατασκευής οδοστρωμάτων

Χρησιμοποιώντας τιμές μονάδος του 2015 οι οποίες πάρθηκαν από το ΤΔΕ, θα γίνει μια συγκριτική εκτίμηση του κόστους κατασκευής των εναλλακτικών λύσεων που έχουν υπολογισθεί.

Ως τιμές μονάδος για την προμήθεια και τοποθέτηση των προτεινόμενων υλικών, που θα χρησιμοποιηθούν στις διάφορες στρώσεις του οδοστρώματος θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τιμές:

- Εξυγιαντική στρώση (ασύνδετα αδρανή) : €7.8/m³
- Υπόβαση (ασύνδετα αδρανή) : €12/m³
- Βάση (ασύνδετα αδρανή) : €22/m³
- Επιφανειακή στρώση ή βάση (ασφαλτικό σκυρόδεμα) : €115/m³

Με τη χρήση των πιο πάνω τιμών και της αναγωγής τους σε τιμή ανά τετραγωνικό μέτρο υπολογίζεται το κόστος κάθε εναλλακτικής λύσης ανά τετραγωνικό μέτρο.

Για παράδειγμα στην περίπτωση του προτεινόμενου οδοστρώματος που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Asphalt Institute για κυκλοφοριακό φόρτο 10⁶ ITA και CBR εδάφους 5%, το συνολικό κόστος κατασκευής του οδοστρώματος που υπολογίζεται είναι:

- Βάση : 0.150m x 1m x 1m → 0.15m³ x €22/m³ = €3.3
- Επιφανειακή στρώση: 0.200m x 1m x 1m = 0.2m³ x €115/m³ = €23

ΣΥΝΟΛΟ: €26.3/m²

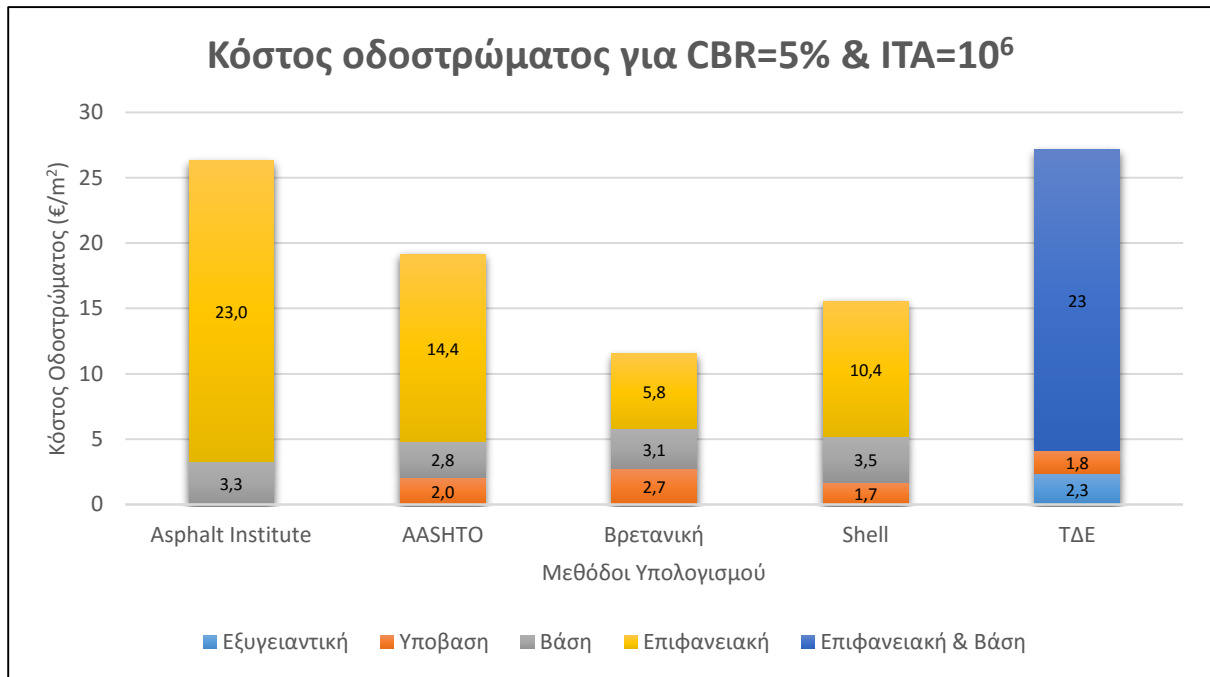
Με ανάλογο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός για τις υπόλοιπες μεθόδους. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα κόστη για κάθε μεθοδολογία και για κάθε συνδυασμό κυκλοφοριακού φόρτου – δείκτη C.B.R.

Πίνακας 5-2: Κόστος οδοστρωμάτων με τέσσερις συνδυασμούς τιμών C.B.R. και ΙΤΑ

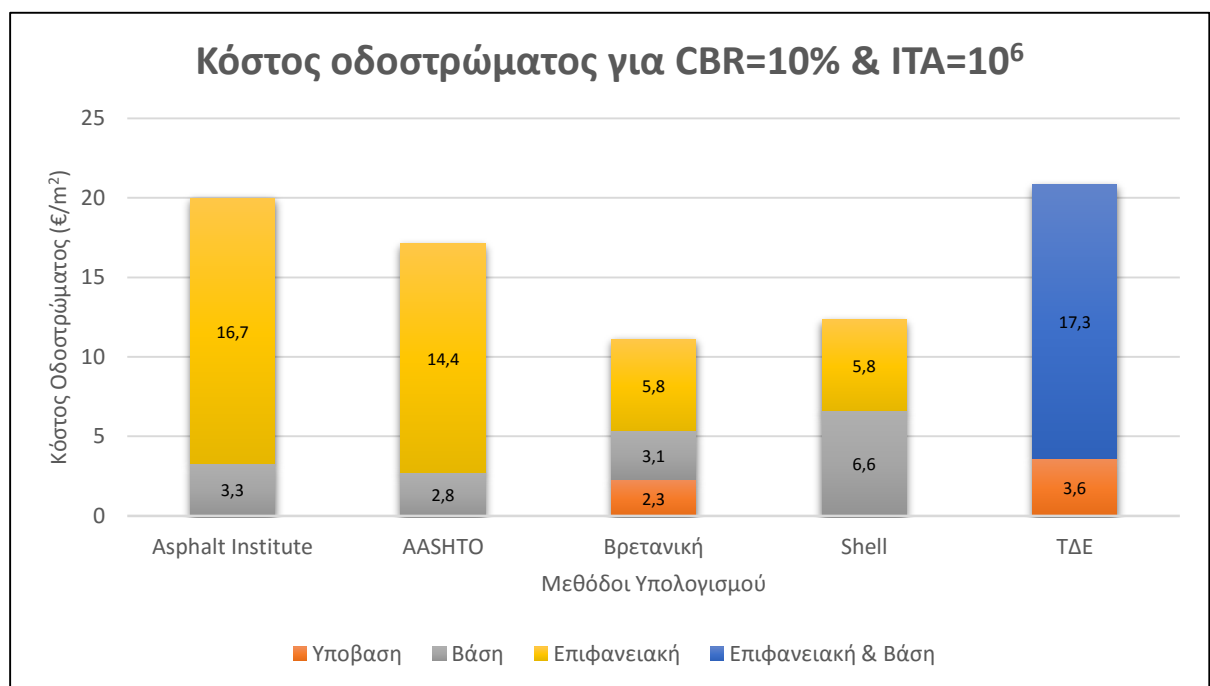
CBR = 5% ΙΤΑ = 10 ⁶		CBR = 10% ΙΤΑ = 10 ⁶		CBR = 5% ΙΤΑ = 10 ⁷		CBR = 10% ΙΤΑ = 10 ⁷	
Asphalt Institute (€/m²)							
Επιφανειακή	23	Επιφανειακή	16,675	Επιφανειακή	37,95	Επιφανειακή	33,35
Βάση	3,3	Βάση	3,3	Βάση	3,3	Βάση	3,3
Ολικού πάχους	26,45	Ολικού πάχους	21,85	Ολικού πάχους	41,4	Ολικού πάχους	36,23
AASHTO (€/m²)							
Επιφανειακή	14,375	Επιφανειακή	14,375	Επιφανειακή	20,7	Επιφανειακή	20,7
Βάση	2,75	Βάση	2,75	Βάση	4,07	Βάση	4,07
Υπόβαση	2,04	Υπόβαση	-	Υπόβαση	2,4	Υπόβαση	-
Βρετανική Μέθοδος (€/m²)							
Επιφανειακή	5,75	Επιφανειακή	5,75	Επιφανειακή	5,75	Επιφανειακή	5,75
Βάση	3,08	Βάση	3,08	Βάση	5,17	Βάση	5,17
Υπόβαση	2,7	Υπόβαση	2,28	Υπόβαση	2,7	Υπόβαση	2,28
Shell (€/m²)							
Επιφανειακή	10,35	Επιφανειακή	5,75	Επιφανειακή	17,25	Επιφανειακή	10,35
Βάση	3,52	Βάση	6,6	Βάση	3,52	Βάση	6,6
Υπόβαση	1,68	Υπόβαση	-	Υπόβαση	1,68	Υπόβαση	-
Ολικού πάχους	17,25	Ολικού πάχους	14,375	Ολικού πάχους	25,3	Ολικού πάχους	20,7
Τμήμα Δημοσίων Έργων (€/m²)							
Επιφανειακή & Βάση	23	Επιφανειακή & Βάση	17,25	Επιφανειακή & Βάση	55,2	Επιφανειακή & Βάση	40,83
Υπόβαση	1,8	Υπόβαση	3,6	Υπόβαση	1,8	Υπόβαση	3,6
Εξυγιαντική	2,34	Εξυγιαντική	-	Εξυγιαντική	2,34	Εξυγιαντική	-

5.3.2 Γραφική Σύγκριση Κόστους Προτεινόμενων Οδοστρωμάτων

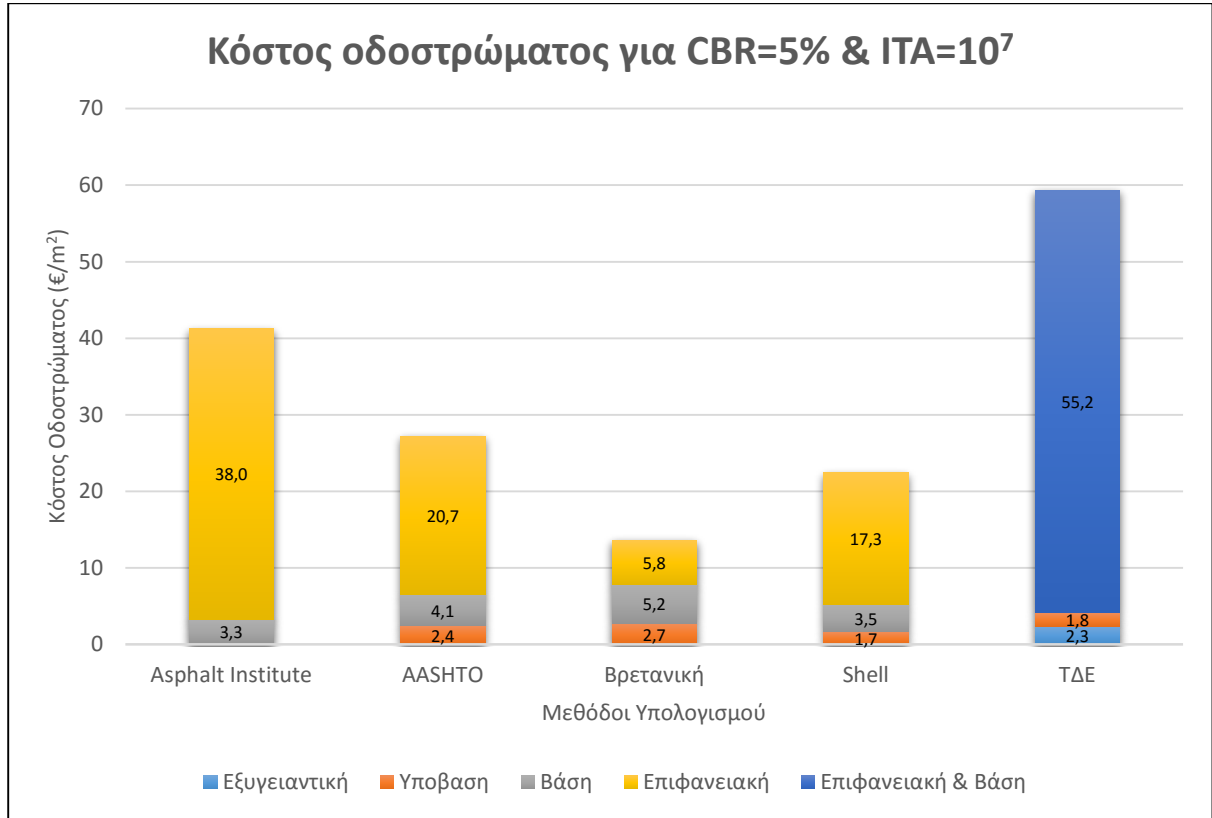
Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τον πίνακα 5.2, στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται μια γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για το κόστος των προτεινόμενων οδοστρωμάτων.



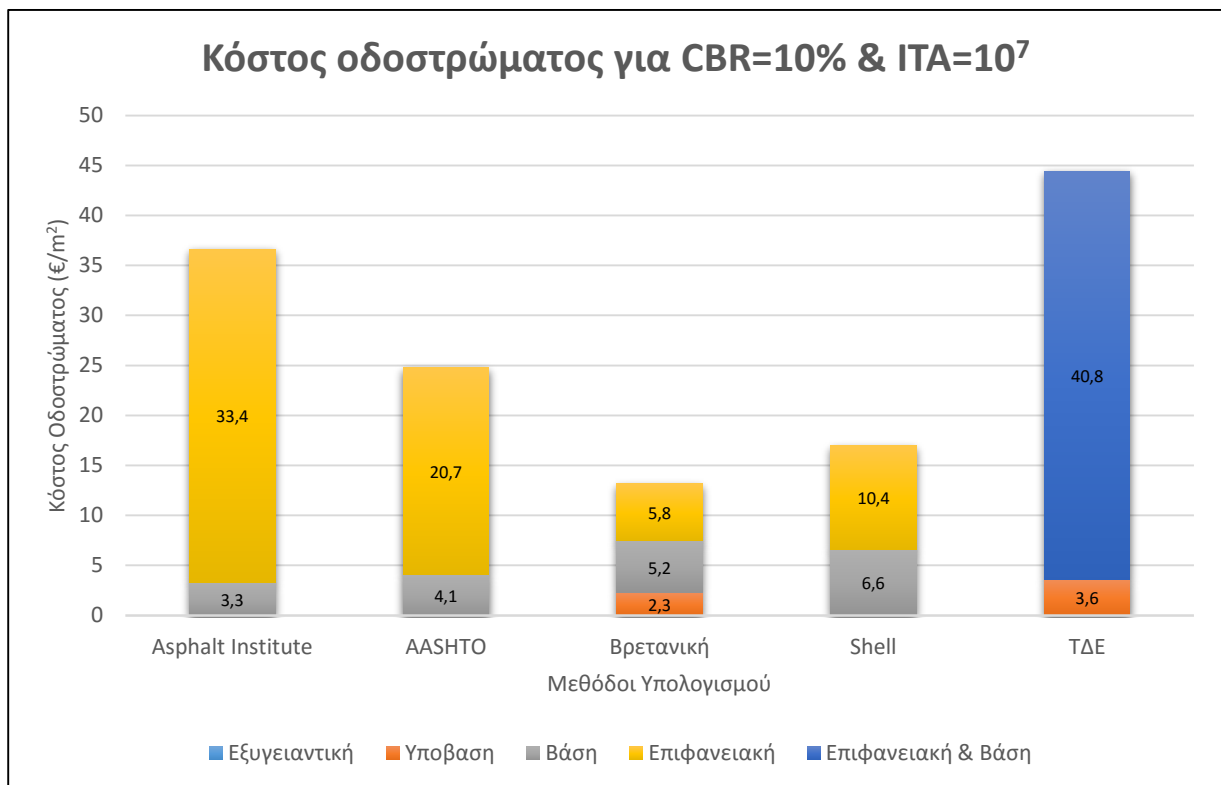
Διάγραμμα 5-13: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10⁶



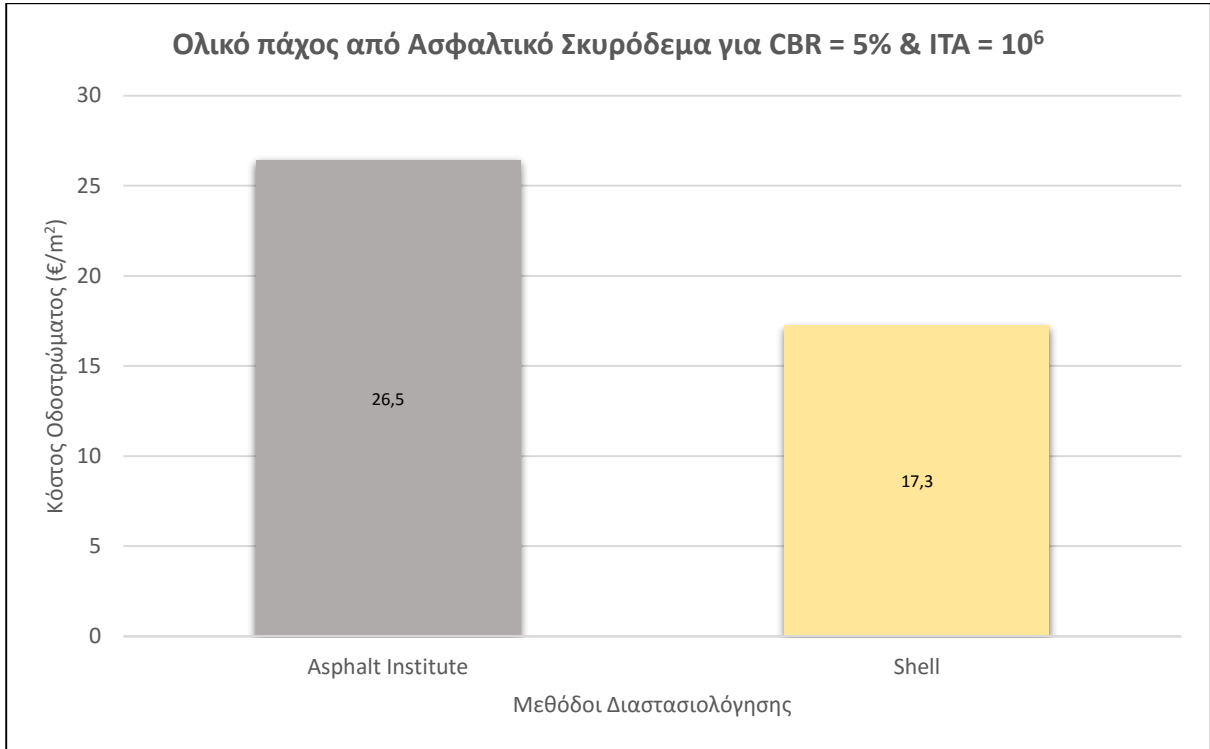
Διάγραμμα 5-14: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10⁶



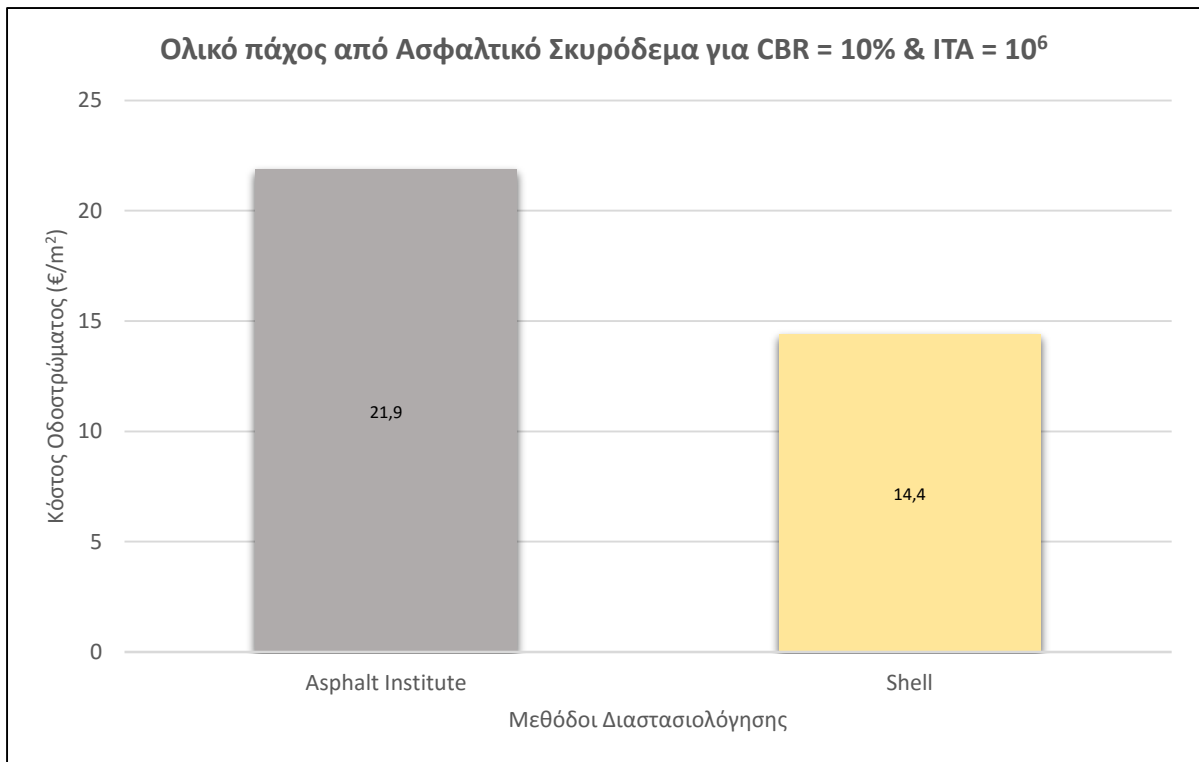
Διάγραμμα 5-15: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=5% & ITA=10⁷



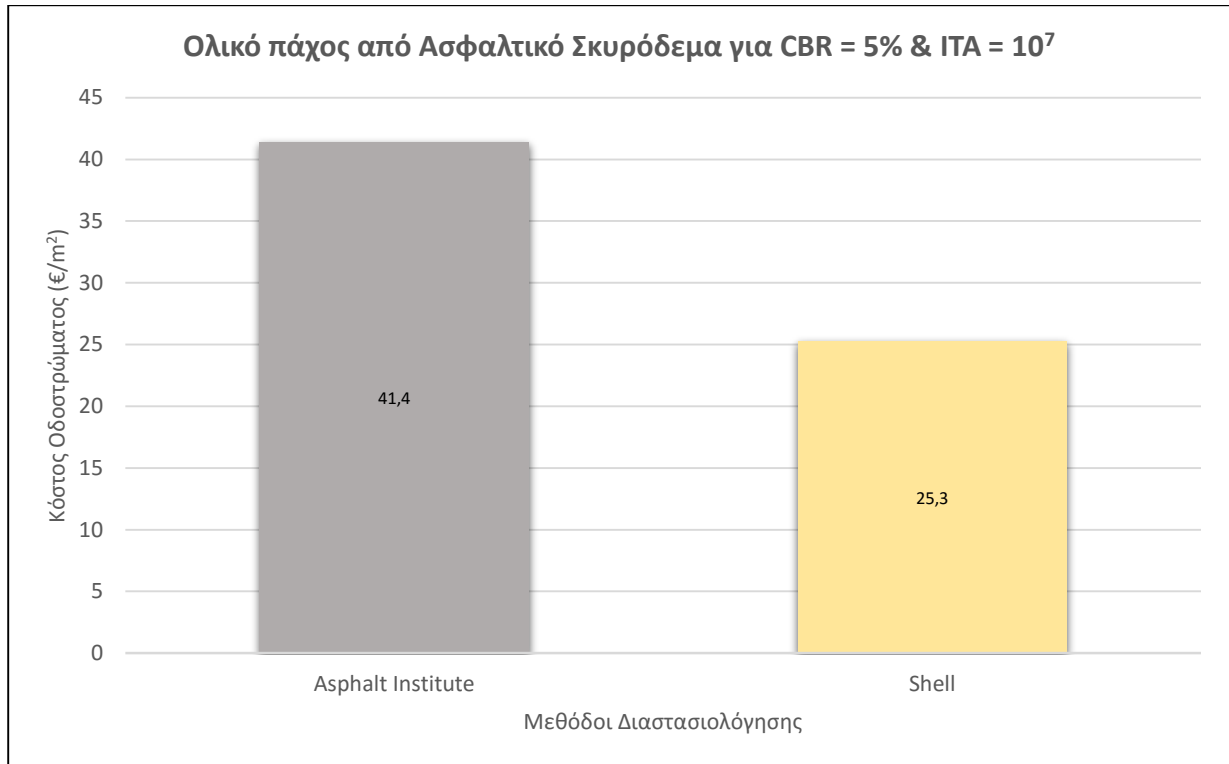
Διάγραμμα 5-16: Γραφική απεικόνιση κόστους οδοστρωμάτων για CBR=10% & ITA=10⁷



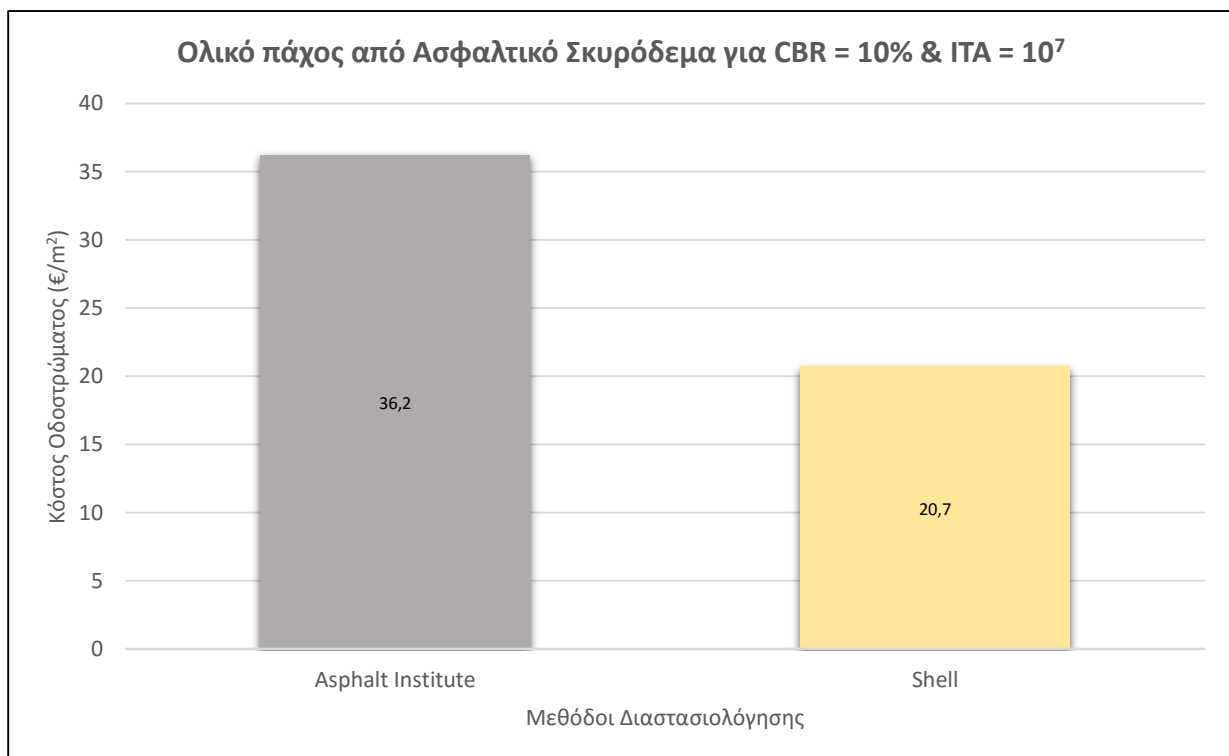
Διάγραμμα 5-17: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10⁶



Διάγραμμα 5-18: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10⁶

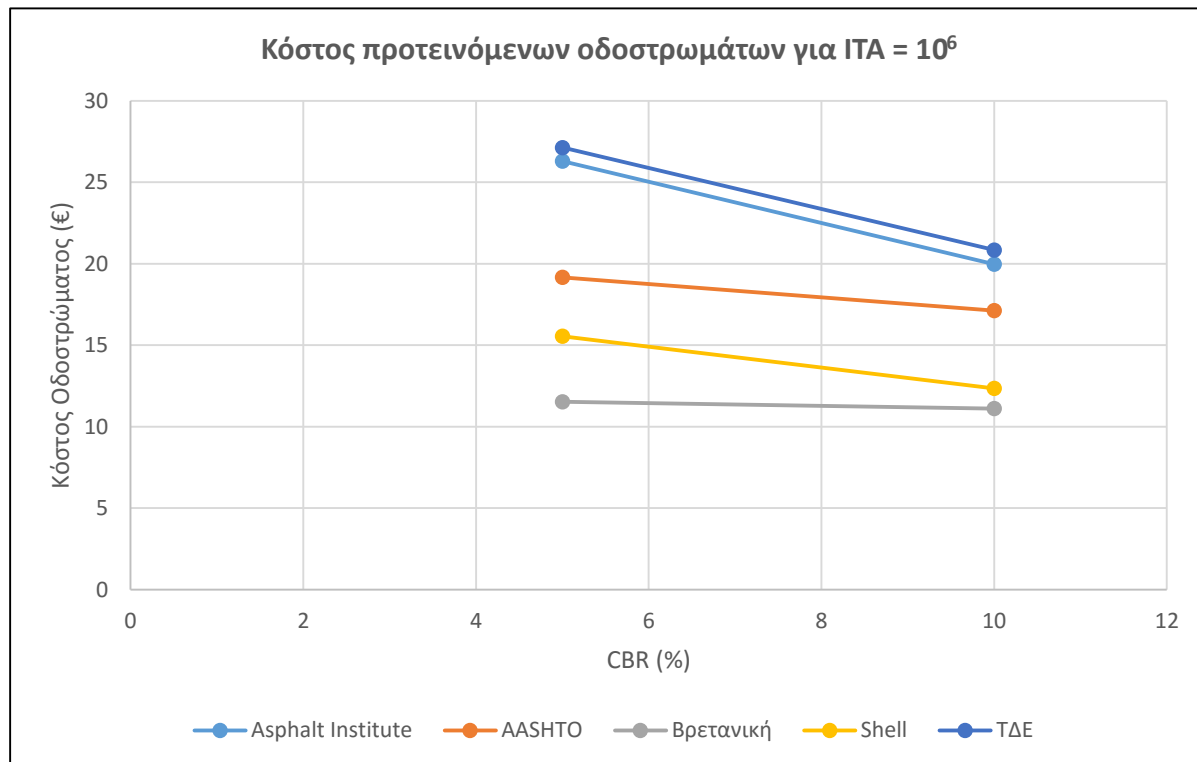


Διάγραμμα 5-19: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=5% & ITA=10⁷

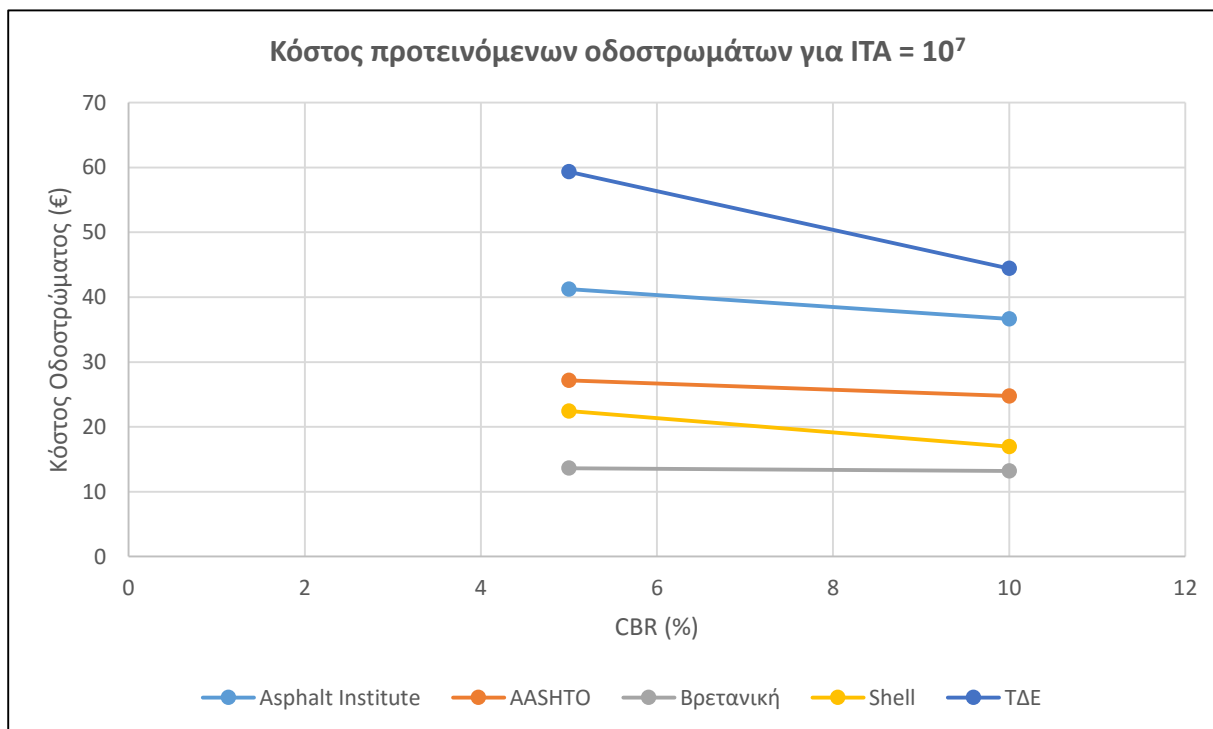


Διάγραμμα 5-20: Γραφική απεικόνιση κόστους ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για CBR=10% & ITA=10⁷

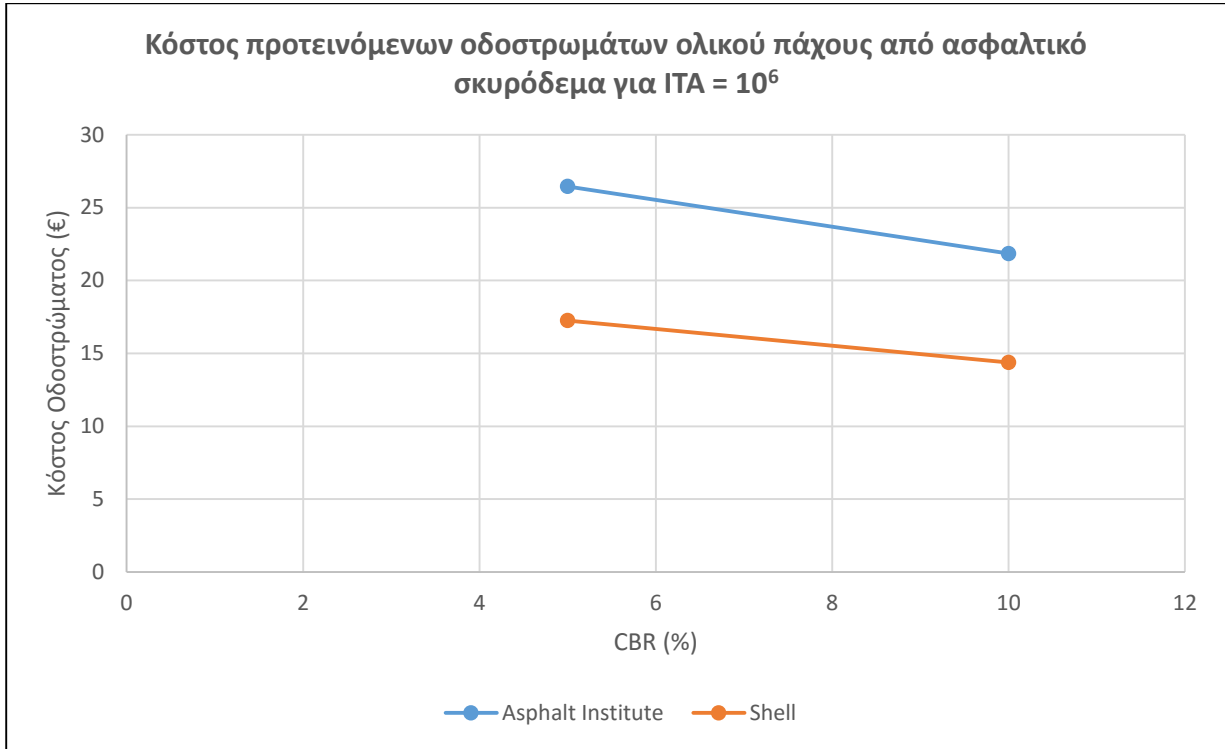
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται μια συγκριτική απεικόνιση του κόστους των οδοστρωμάτων της κάθε μεθόδου συναρτήσει του CBR του εδάφους.



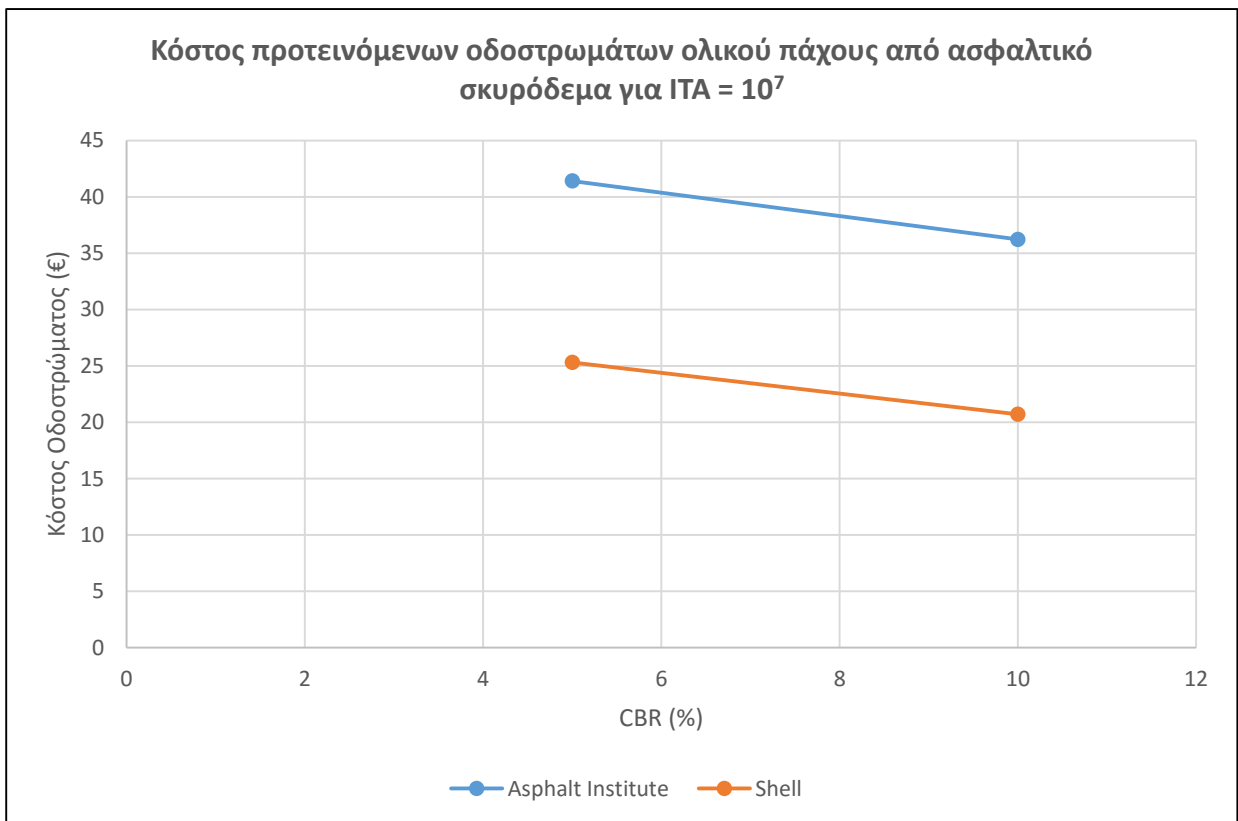
Διάγραμμα 5-21: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων για ITA=10⁶



Διάγραμμα 5-22: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων για ITA=10⁷



Διάγραμμα 5-23: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ΙΤΑ=10⁶



Διάγραμμα 5-24: Σύγκριση κόστους οδοστρωμάτων ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα για ΙΤΑ=10⁷

5.4 Παρατηρήσεις

- Με βάση τα πιο πάνω διαγράμματα, συγκρίνοντας τα συνολικά πάχη που προέκυψαν από κάθε μέθοδο σε σχέση με το συνολικό κόστος κατασκευής τους, φαίνεται ότι τα οδοστρώματα με το μικρότερο πάχος, δεν είναι απαραίτητα και τα πιο φθηνά ή το αντίθετο. Αυτό εξαρτάται από το πάχος της κάθε στρώσης και την τιμή του υλικού που θα κατασκευαστεί η κάθε στρώση. Αυτή η παρατήρηση όμως, δεν ισχύει για τα οδοστρώματα ολικού πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα γιατί κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα των διαστασιολογήσεων είναι όλα διαφορετικά μεταξύ τους.
- Παρόλο που τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε όλες τις μεθόδους τα ίδια, τα προτεινόμενα οδοστρώματα μεταβάλλονται από μέθοδο σε μέθοδο, ανάλογα με τον κυκλοφοριακό φόρτο και τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους.
- Παρατηρήθηκε ότι στις μεθόδους AASHTO και Shell, στις περιπτώσεις που το CBR του εδάφους ήταν 10% δεν ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση υπόβασης.
- Σε όλες τις μεθόδους, το κόστος μειώνεται με την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους, εκτός της Βρετανική μεθόδου η οποία δεν έχει αισθητή μεταβολή του κόστους με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της μελέτης και την ανάλυση της διαδικασίας των διαφόρων μεθοδολογιών οι οποίες έχουν ως σκοπό τον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος, μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα.

Γενικά συμπεράσματα

- Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του οδοστρώματος (φέρουσα ικανότητα εδάφους, κυκλοφοριακός φόρτος, κλιματολογικές συνθήκες και διαθέσιμα υλικά), χρησιμοποιούνται σε όλες τις μεθοδολογίες σχεδιασμού.
- Ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται σχεδόν από όλες τις μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν μέχρι σήμερα.
- Η απόδοση των υλικών που χρησιμοποιούνται στη δομή του οδοστρώματος, απέναντι στα φορτία από την κυκλοφορία των οχημάτων, γίνεται με πολύπλοκους τρόπους και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της τάσης που αναπτύσσεται στο υλικό (θερμοκρασία, υγρασία). Για αυτόν τον λόγο είναι πολύ δύσκολη η απόφαση για το είδος των υλικών ή των μιγμάτων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε στρώση.
- Η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πολύ σοβαρά. Να λαμβάνονται όλα τα αναγκαία μέτρα έτσι ώστε να μην υπάρχει μεταβολή της κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος.
- Ο προσδιορισμός της μέγιστης έντασης της βροχόπτωσης, είναι απαραίτητος για τον σχεδιασμό των αποχετευτικών και αποστραγγιστικών έργων στους δρόμους.
- Τα παγόπληκτα εδάφη προστατεύονται από τον παγετό με την αύξηση του πάχους της “σκυρωτής” βάσης ή υπόβασης.
- Σε ψυχρά κλίματα χρησιμοποιείται σχετικά μαλακή ασφαλτος και σε θερμά κλίματα χρησιμοποιείται σχετικά σκληρή ασφαλτος.
- Εννοείται, ότι η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας πάρα πολλούς συνδυασμούς υλικών σε κάθε στρώση. Ο τελικός σχεδιασμός όμως πρέπει να είναι ο βέλτιστος, δηλαδή να γίνεται με γνώμονα την

επιλογή μιας οικονομικής και ταυτόχρονα αποδοτικής λύσης για τον σκοπό τον οποίο προορίζεται.

Συμπεράσματα σύγκρισης μεθόδων

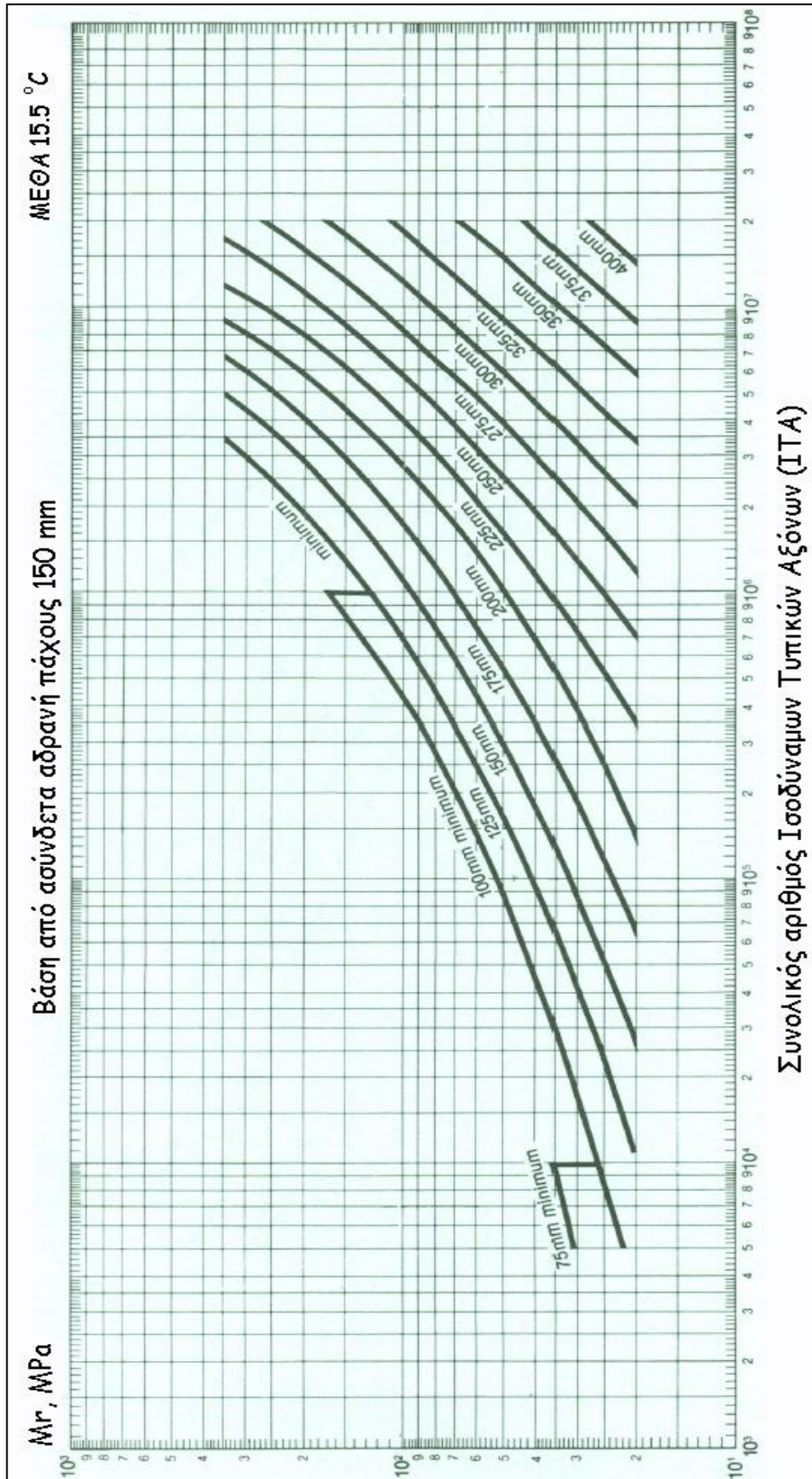
- Τα αποτελέσματα των υπολογισμών από μέθοδο σε μέθοδο διαφοροποιούνται ανάλογα με τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται.
- Η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου έχει ως επακόλουθο την αύξηση του πάχους του οδοστρώματος για το ίδιο CBR εδάφους ανεξαρτήτως μεθόδου.
- Η αύξηση του CBR του εδάφους, έχει ως επακόλουθο τη μείωση του πάχους του οδοστρώματος για τον ίδιο κυκλοφοριακό φόρτο ανεξαρτήτως μεθόδου.
- Οι συνδυασμοί των υλικών και των στρώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι πολλοί και μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τα διαθέσιμα υλικά και το κόστος του κάθε υλικού που υπάρχει στην αγορά.
- Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του οδοστρώματος, χρειάζεται να γίνει μια ανάλυση κόστους των πιθανών σεναρίων για την τελική δομή του οδοστρώματος με στόχο την επιλογή της βέλτιστης λύσης σχεδιασμού για την περίπτωση που μελετάται.
- Η μέθοδος του Τμήματος Δημοσίων Έργων τείνει να δίνει τα μεγαλύτερα συνολικά πάχη. Είναι η πιο συντηρητική από τις πέντε μεθόδους που εξετάστηκαν. Αυτό ίσως να οφείλεται στις κλιματολογικές συνθήκες της Κύπρου και λόγω του ότι βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συμπεριφορά των υφιστάμενων οδοστρωμάτων.
- Η μέθοδος του Ινστιτούτου Ασφάλτου τείνει να έχει τα πιο ακριβά σε κόστος κατασκευής οδοστρώματα ανάλογα με το πάχος των οδοστρωμάτων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτό ίσως να οφείλεται στη συγκεκριμένη σύσταση του οδοστρώματος (βάση ή/και υπόβαση από ασύνδετα αδρανή και ασφαλική επιφανειακή στρώση) και προκύπτουν ακριβότερα οδοστρώματα.
- Η Βρετανική μέθοδος τείνει να υπολογίζει οδοστρώματα με χαμηλότερο κόστος κατασκευής από τις υπόλοιπες μεθόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, DC.
2. ΤΔΕ (Τμήμα Δημοσίων Έργων). (2009). *Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές και Μέθοδος Επιμέτρησης Τόμος Γ'*, Κύπρος.
3. Shell International Petroleum Company (1985). *Shell pavement design manual – asphalt pavements and overlays for road traffic*, London
4. Γκέκας, Γ. (2009). *Εγχειρίδιο Επιθεώρησης Κατάστασης Οδοστρώματος*, <<http://www.slideshare.net/jgekas/ss-19254994>> (Ιαν. 17, 2016) .
5. Σωτηροπούλου Μ. Ι. Χ. (2015). "Ανάπτυξη Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων με Αξιολόγηση Στοιχείων Βιωσιμότητας" Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
6. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων & Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών. (2002). *Οδηγός Επίβλεψης Μελετών και Κατασκευών*, Ελλάδα
7. Yang H. H. (2004). "Pavement Analysis and Design" Pearson Prentice Hall, United States of America
8. Στεργιάδης Χ. Γ. (2005). "Σχεδιασμός Νέων Μοντέλων Οδοστρωσίας υπό το Πρίσμα των Φθορών και των Μηχανικών Ιδιοτήτων των Εδαφών" Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη
9. Παναγιώτου Κ. (2011). "Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων: Σύγκριση Μεθόδων Διαστασιολόγησης" Πτυχιακή διατριβή, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός
10. Κάρτα Π. & Παπαθωμά Δ. (2007). "Κατασκευή Οδοστρωμάτων: Σύνθεση Ασφαλτομιγμάτων και Διαστασιολόγηση Οδοστρώματος" Πτυχιακή διατριβή, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
11. Καββαδάς Μ. (2006). "Στοιχεία Εδαφομηχανικής" Φυσικά Χαρακτηριστικά των Εδαφών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
12. Νικολαΐδης Α. Φ. (2002). "Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά – Έλεγχος Ποιότητας", Τριανταφύλλου Μ. & Σία, Θεσσαλονίκη
13. Οικονομίδης Ι. (2015). «Οδοποιία II CIV441» [Σημειώσεις Μαθήματος], Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
14. Παντελίδης Λ. (2012). «Τεχνική Γεωλογία CIV112» [Σημειώσεις Μαθήματος], Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
15. Παντελίδης Λ. (2014). «Θεμελιώσεις CIV323» [Σημειώσεις Μαθήματος], Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
16. Σακελλαρίου Μ. κ.ά. (2003). "Εργαστηριακές Δοκιμές Εδαφομηχανικής", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
17. Lakshmi, A.K. (2008). "Flexible Pavement Vs Rigid Pavement." UStudy Initiative, <<http://www.ustudy.in/node/8223>> (Δεκ. 19, 2015).
18. Anonymous (2014). "Flexible Pavement Definition." Civil Engineering Portal of Lectures & Training Material, <<http://www.aboutcivil.org/flexible-pavement-road.html>> (Δεκ. 19, 2015).

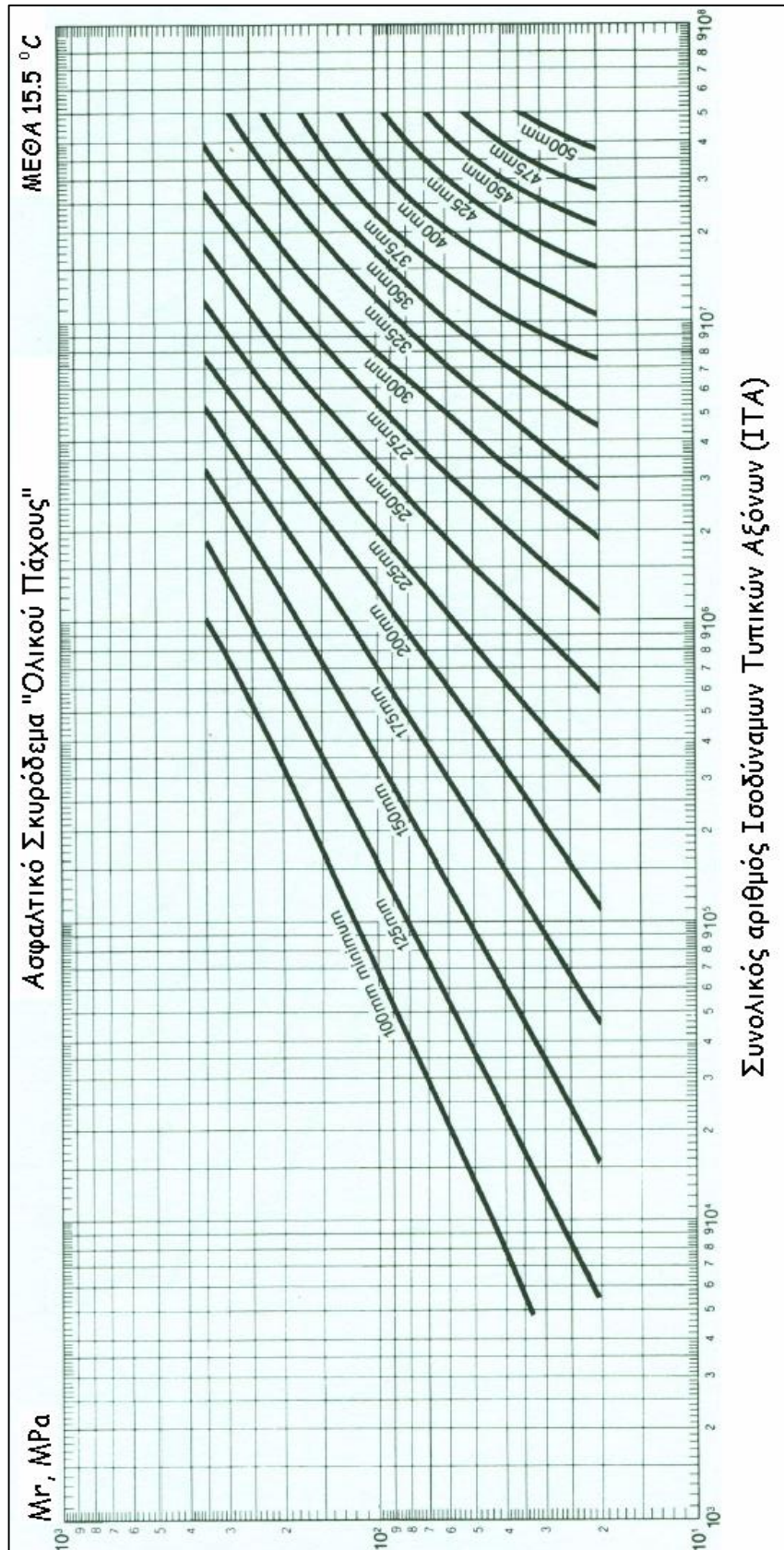
19. Anonymous (2016). "Terms You Should Know." Black Diamond Paving & Concrete, <<http://blackdiamondpaving.com/resources/terms-you-should-know>> (Φεβ. 2, 2016)
20. Pavement Interactive (2012). "Corrugation and Shoving." Pavement Interactive, <<http://www.pavementinteractive.org/article/corrugation-and-shoving>> (Φεβ. 2, 2016)
21. Anonymous (2016). "CVEEN 7570- Spring 2011." PaveMaintenance, <<https://pavemaintenance.wikispaces.com/CVEEN+7570-+Spring+2011>> (Φεβ. 3, 2016)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α



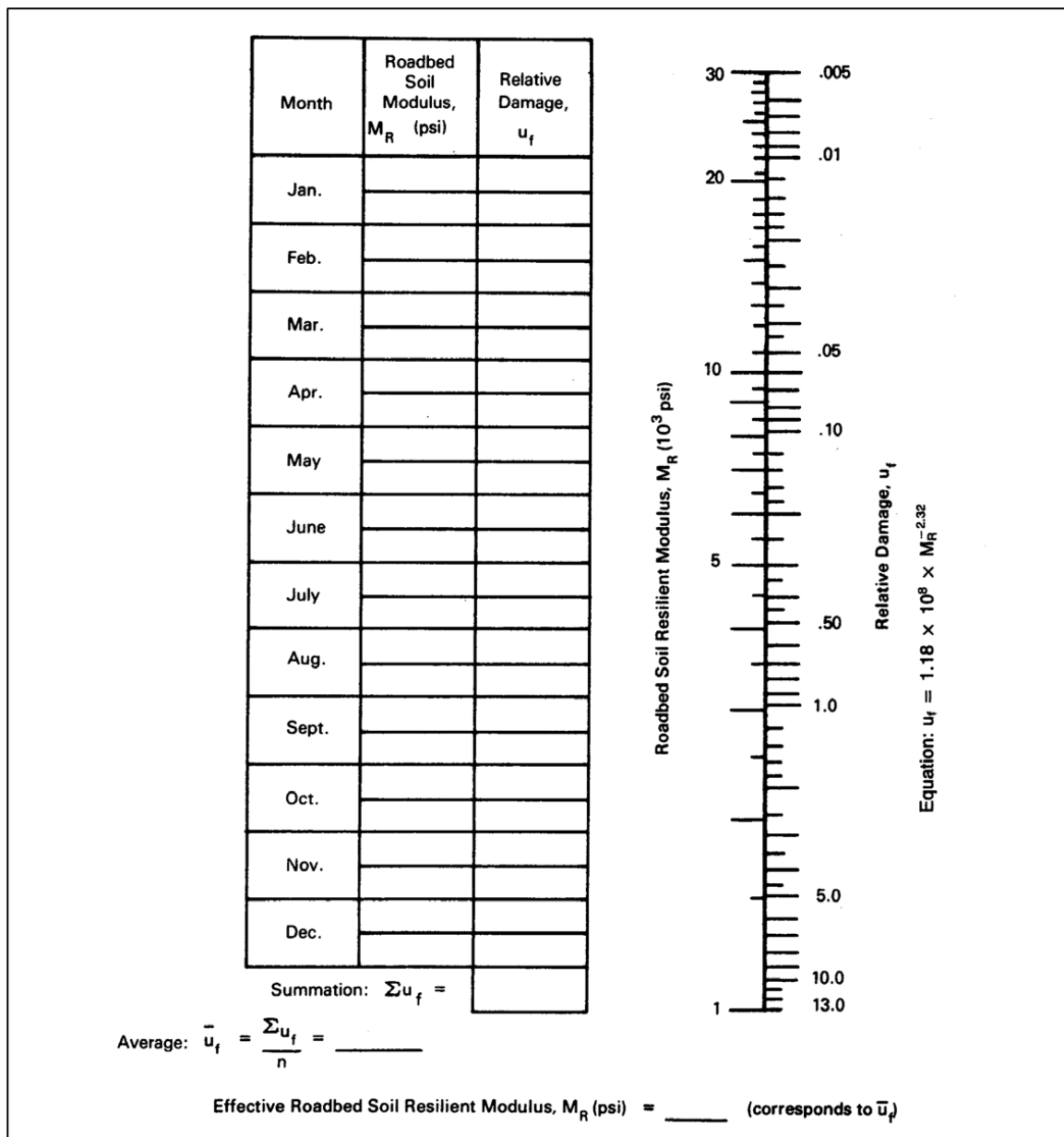
Διάγραμμα A-1: Υπολογισμός πάχους ασφαλτικής στρώσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα για πάχος βάσης 150mm

Πηγή: Οικονομίδης, 2015



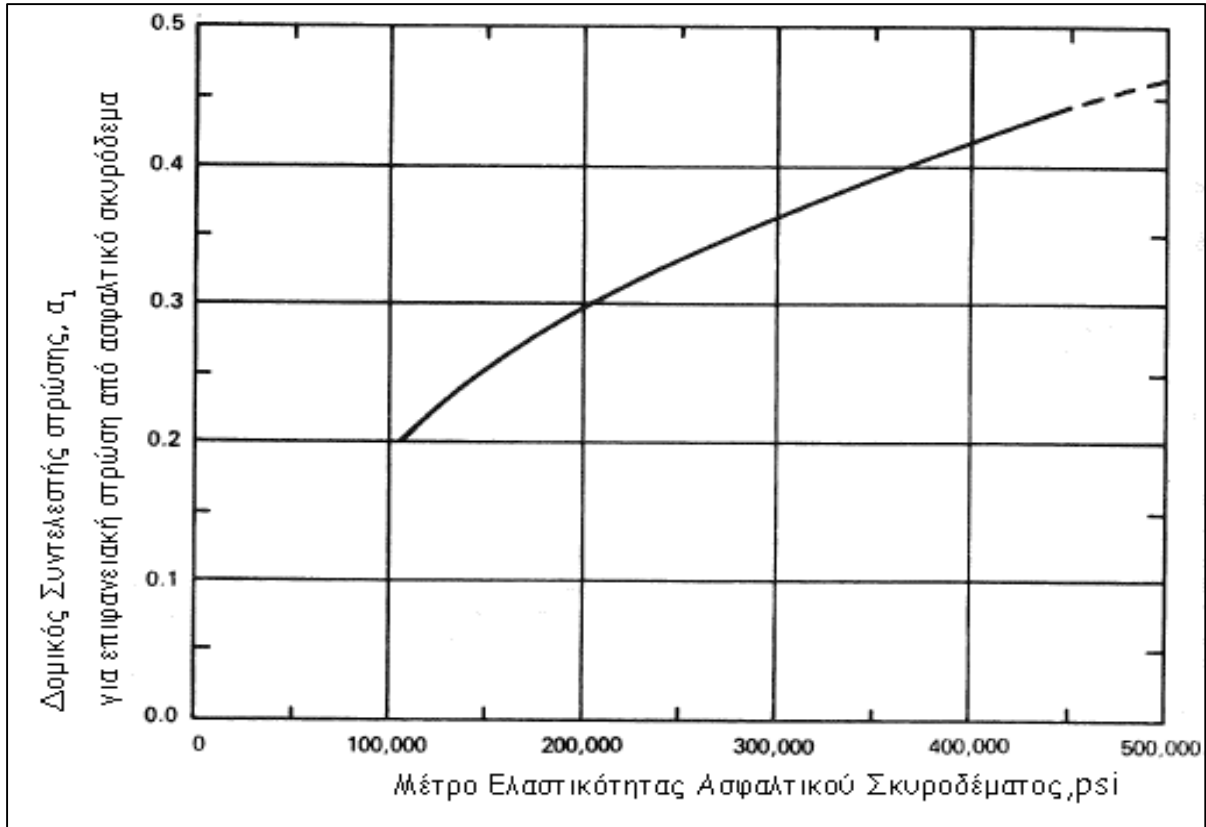
Διάγραμμα Α-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος 'ολικού' πάχους από ασφαλτικό σκυρόδεμα
Πηγή: Οικονομίδης, 2015

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



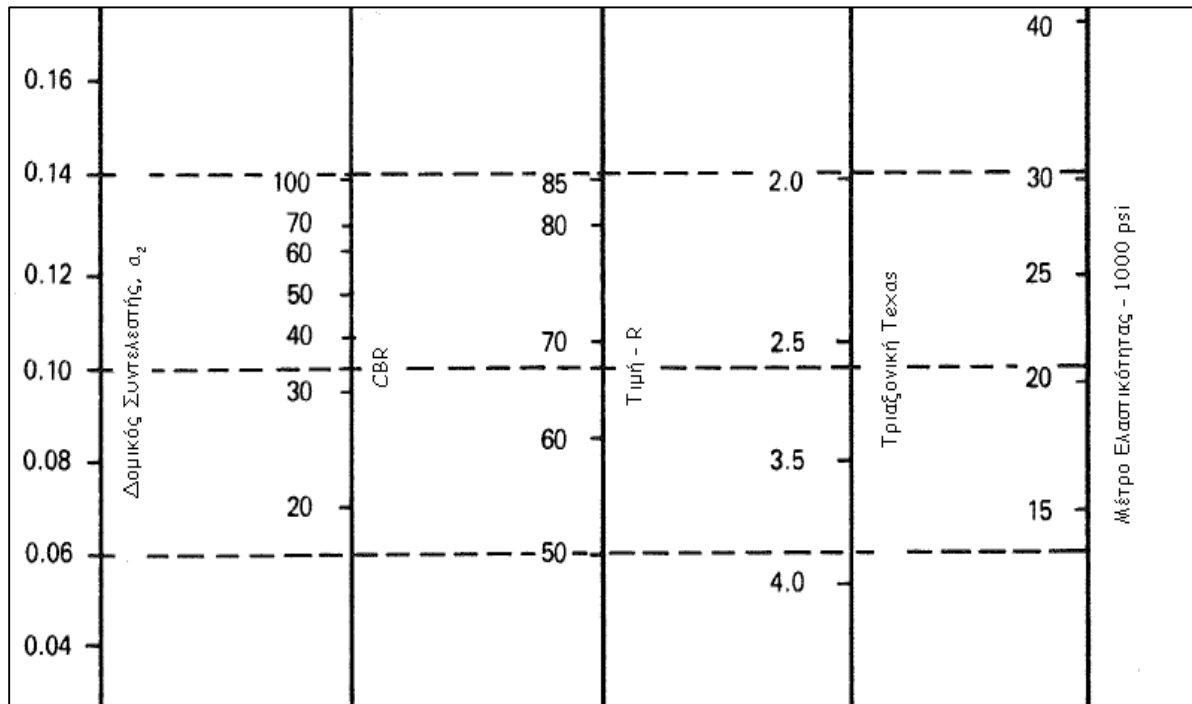
Διάγραμμα Β-1: Υπολογισμός M_R Υπεδάφους

Πηγή: AASHTO, 1993



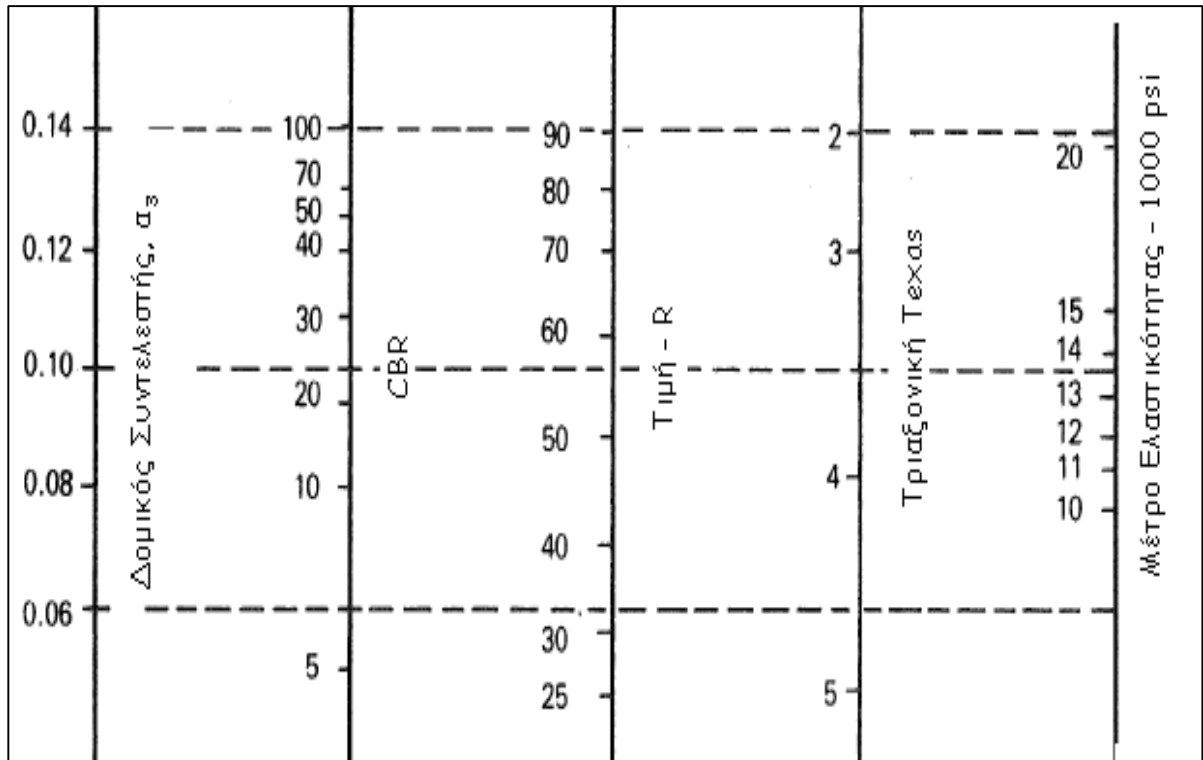
Διάγραμμα B-2: Συντελεστής στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα (a_1)

Πηγή: AASHTO, 1993



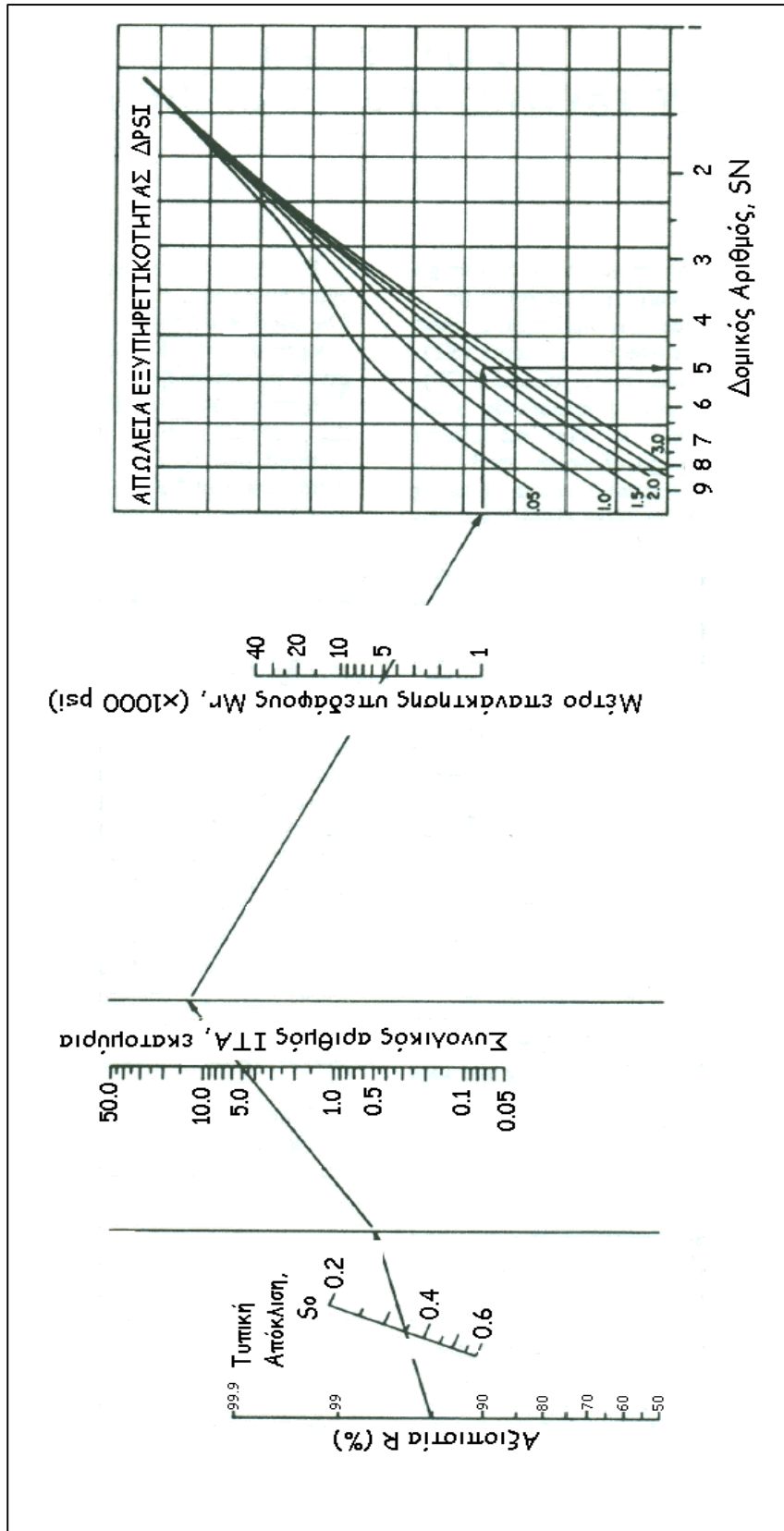
Διάγραμμα B-3: Συντελεστής στρώσεως βάσης από ασύνδετα αδρανή (a_2)

Πηγή: AASHTO, 1993



Διάγραμμα Β-4: Συντελεστής στρώσεως υπόβασης από ασύνδετα αδρανή (α_3)

Πηγή: AASHTO, 1993



Διάγραμμα Β-5: Υπολογισμός δομικού αριθμού στρώσης και οδοστρώματος
 Πηγή: AASHTO, 1993

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας Γ-1: Φύλλο Εργασίας Α

(1) Αξονικό Φορτίο, L (kN)	(2) Αριθμός αξόνων εμπορικών οχημάτων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας ανά μέρα	(3) Συντελεστής Μετατροπής, n_e (νομογράφημα L) ή $n_e = 2,4 \times 10^{-8} \times L^4$	(4) = (2)×(3) Ισοδύναμος Αριθμός Αξόνων, N_e
(5) Συνολικός αριθμός αξόνων εμπορικών οχημάτων ανά λωρίδα κυκλοφορίας ανά χρόνο, W_a :	(6) Συνολικός ισοδύναμος αριθμός τυπικών αξόνων ανά λωρίδα κυκλοφορίας ανά μέρα, N_d :		
	(7) = (6) x 365 Ανά χρόνο, N_y :		
(8) Ρυθμός αύξησης κυκλοφορίας ανά χρόνο, b (%):	(10) Αθροιστικός συντελεστής κυκλοφορίας, g: (από Data Table A)		
(9) Διάρκεια σχεδιαστικής ζωής οδοστρώματος B, (χρόνια):			
(11) = (7) x (10)			
Αθροιστικός ισοδύναμος αριθμός τυπικών αξόνων ανά λωρίδα κυκλοφορίας, (ITA) N:			

Πηγή: Shell, 1985

Πίνακας Γ-2: Φύλλο Εργασίας Β

(1) Μήνας	(2) ΜΜΘΑ, °C	(3) Συντελεστής Στάθμισης (νομογράφημα W)
Ιανουάριος		
Φεβρουάριος		
Μάρτιος		
Απρίλιος		
Μάιος		
Ιούνιος		
Ιούλιος		
Αύγουστος		
Σεπτέμβριος		
Οκτώβριος		
Νοέμβριος		
Δεκέμβριος		
(4) Σύνολο συντελεστών στάθμισης:		
(5) Μέσος όρος συντελεστών στάθμισης:		
(6) Σταθμισμένη ΜΕΘΑ, °C: (νομογράφημα W)		

Πηγή: Shell, 1985

Πίνακας Γ-3: Φύλλο Εργασίας Γ

Σχεδιαστικοί παράμετροι

(1) Φύλλο εργασίας Α: ΙΤΑ	
(2) Φύλλο εργασίας Β: Σταθμισμένη ΜΕΘΑ, °C	
(3) Μέτρο ελαστικότητας υπεδάφους E_3 , N/m ²	

Διαθέσιμα υλικά (ασύνδετα αδρανή) βάσης

(4) Περιγραφή υλικών	(5) Εφικτό δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, 10 ⁸ N/m ²

Πάχη από νομογραφήματα ΗΝ, ΗΤ, ΤΝ, ΕΝ ή CΤ

(για ολικό πάχος κατασκευών βλέπε πρώτα το νομογράφημα $P: N^{2/3}/E_3 =$

Υποψήφιες κατασκευές	1	2	3	4	5	6
----------------------	---	---	---	---	---	---

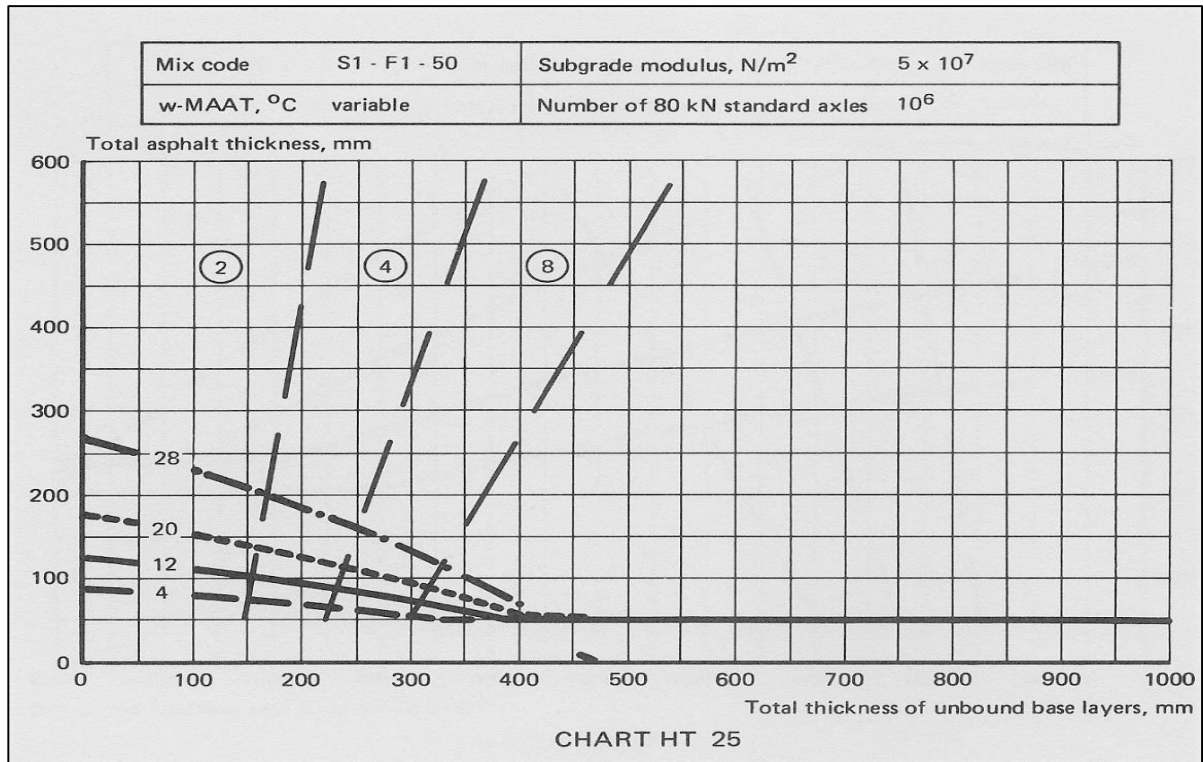
(6) Περιγραφή μείγματος	(7) Κωδικός Μείγματος	(8) Ολικό πάχος ασφαλτικής στρώσης h_i , mm

(9) Ολικό πάχος ασύνδετων στρώσεων h_2 , mm						
---	--	--	--	--	--	--

Υποδιαίρεση ασύνδετης στρώσης (βλέπε νομογραφήματα ΗΝ ή ΗΤ)

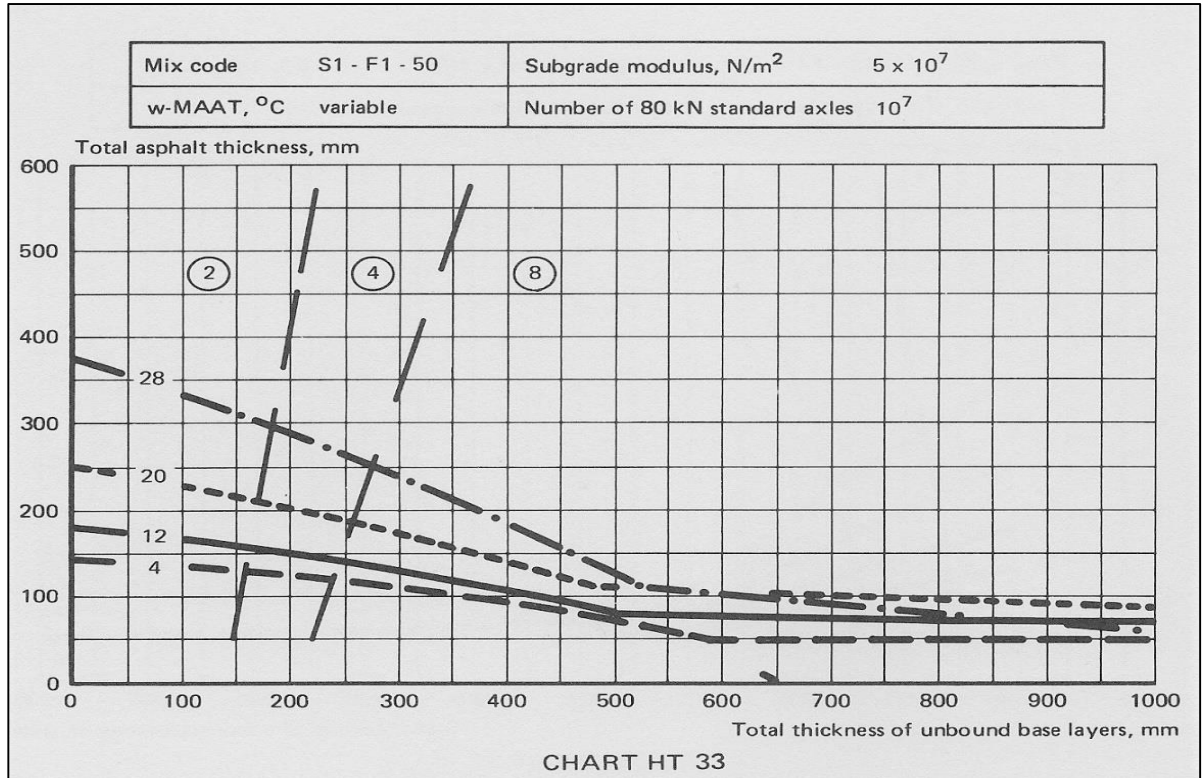
(10) Υλικά	(11) Μέτρο ελαστικότητας E_{2+i} , 10 ⁸ N/m ²	(12) Πάχος υπο-στρώσης h_{2+i} , mm
	h_{2-1}	
	h_{2-2}	
	h_{2-3}	
	h_{2-4}	

Πηγή: Shell, 1985



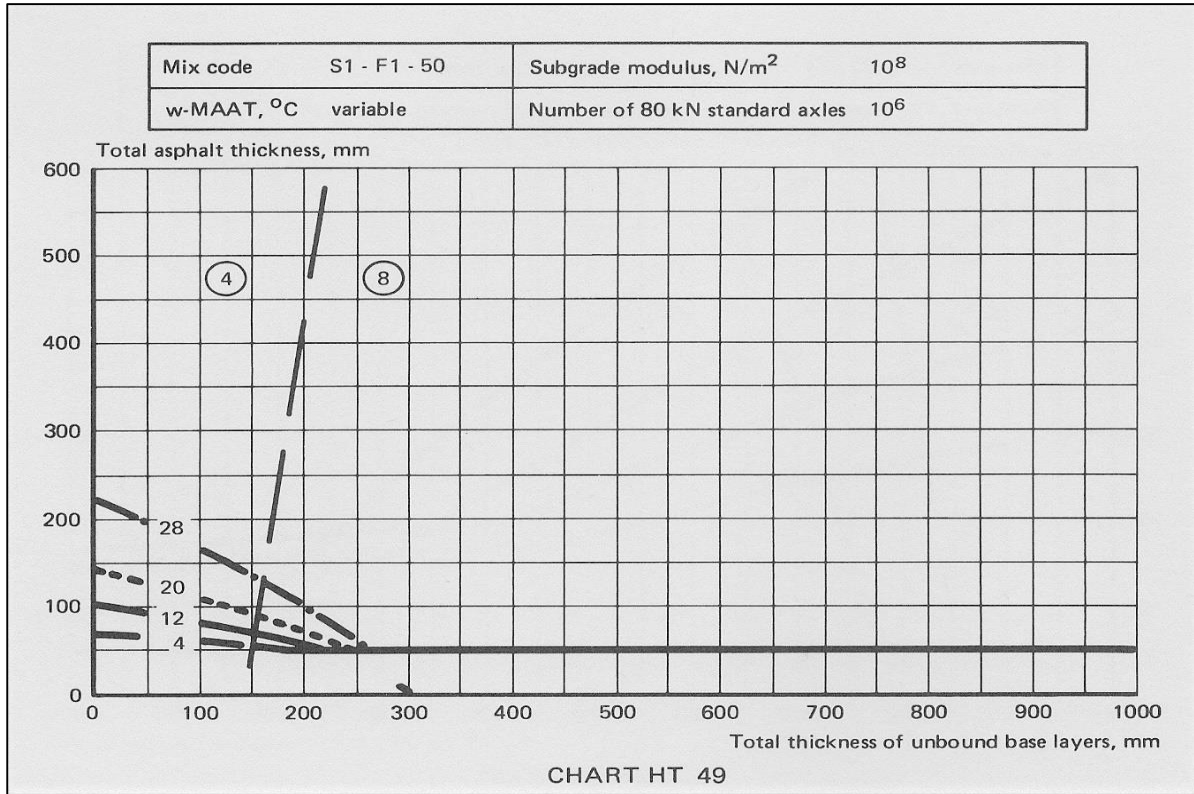
Διάγραμμα Γ-1: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για $E_3=5 \times 10^7$ & $ITA=10^6$

Πηγή: Shell, 1985



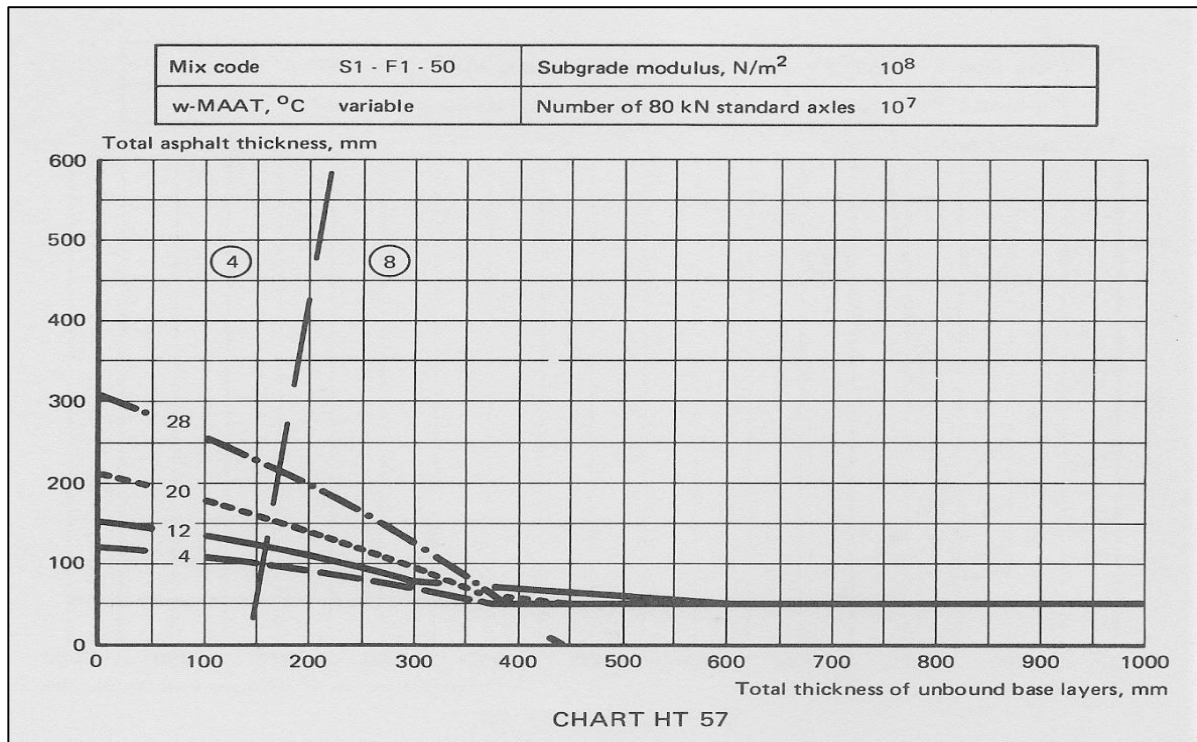
Διάγραμμα Γ-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για $E_3=5 \times 10^7$ & $ITA=10^7$

Πηγή: Shell, 1985



Διάγραμμα Γ-3: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για $E_3=10^8$ & $ITA=10^6$

Πηγή: Shell, 1985



Διάγραμμα Γ-4: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος για $E_3=10^8$ & $ITA=10^7$

Πηγή: Shell, 1985

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

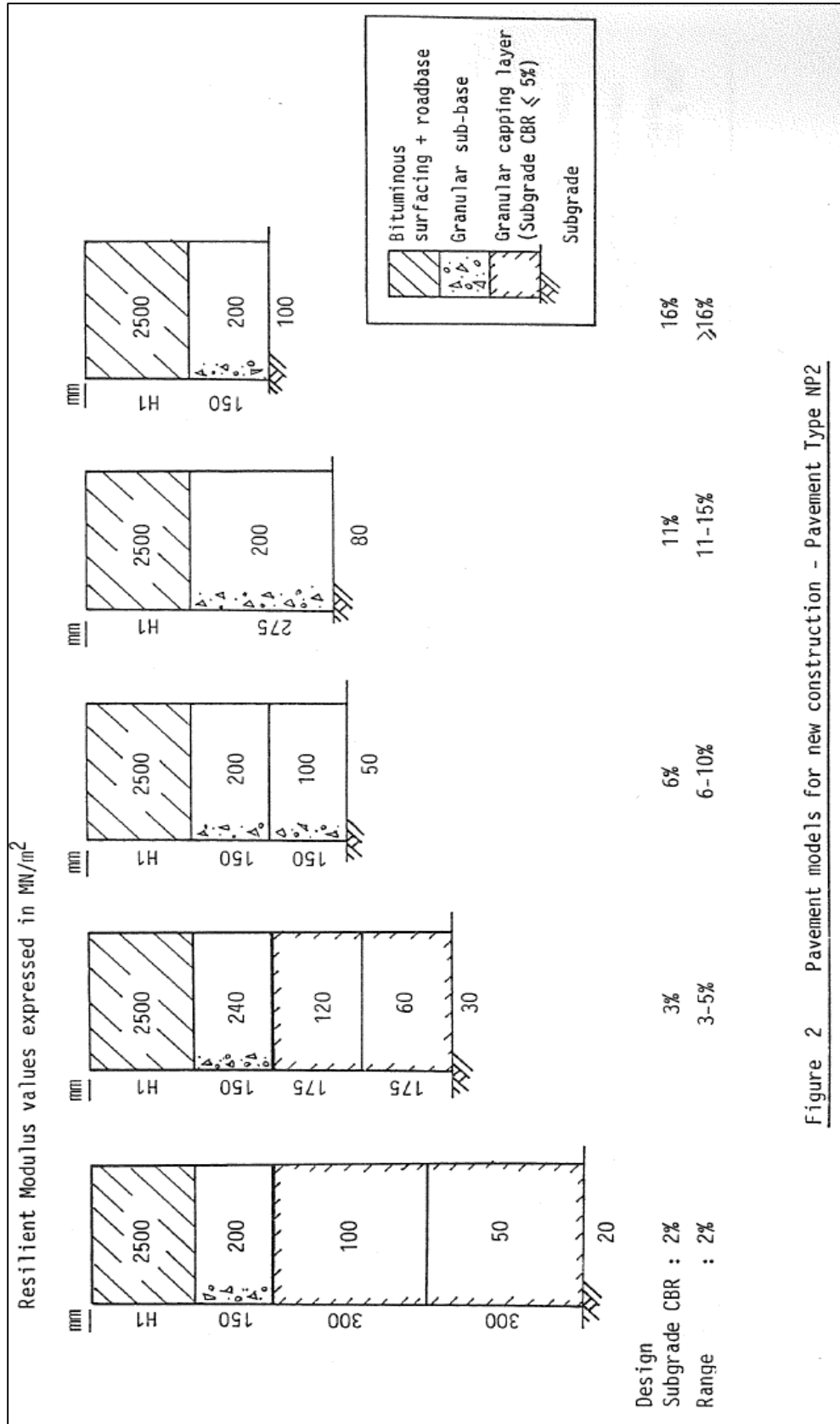
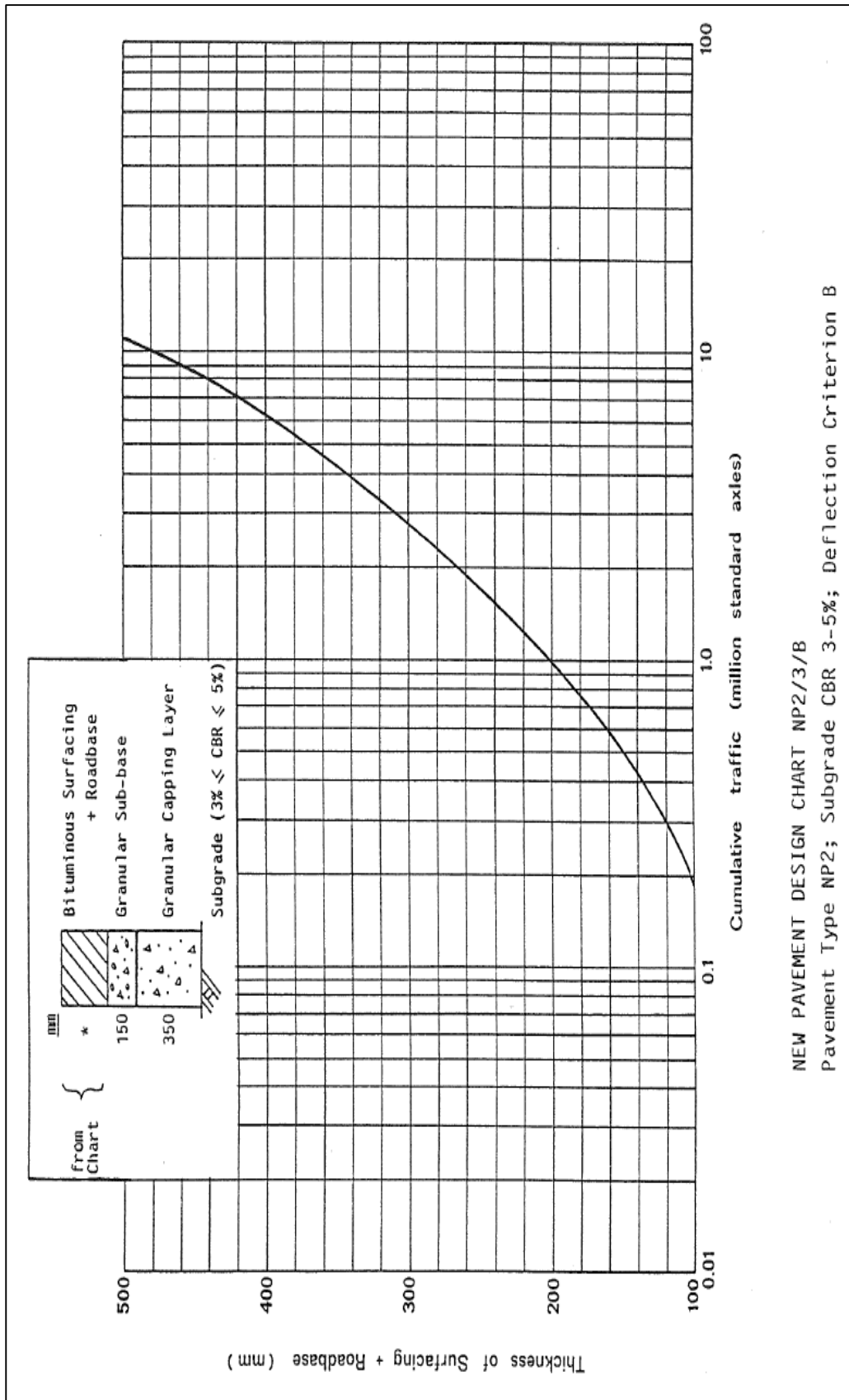


Figure 2 Pavement models for new construction - Pavement Type NP2

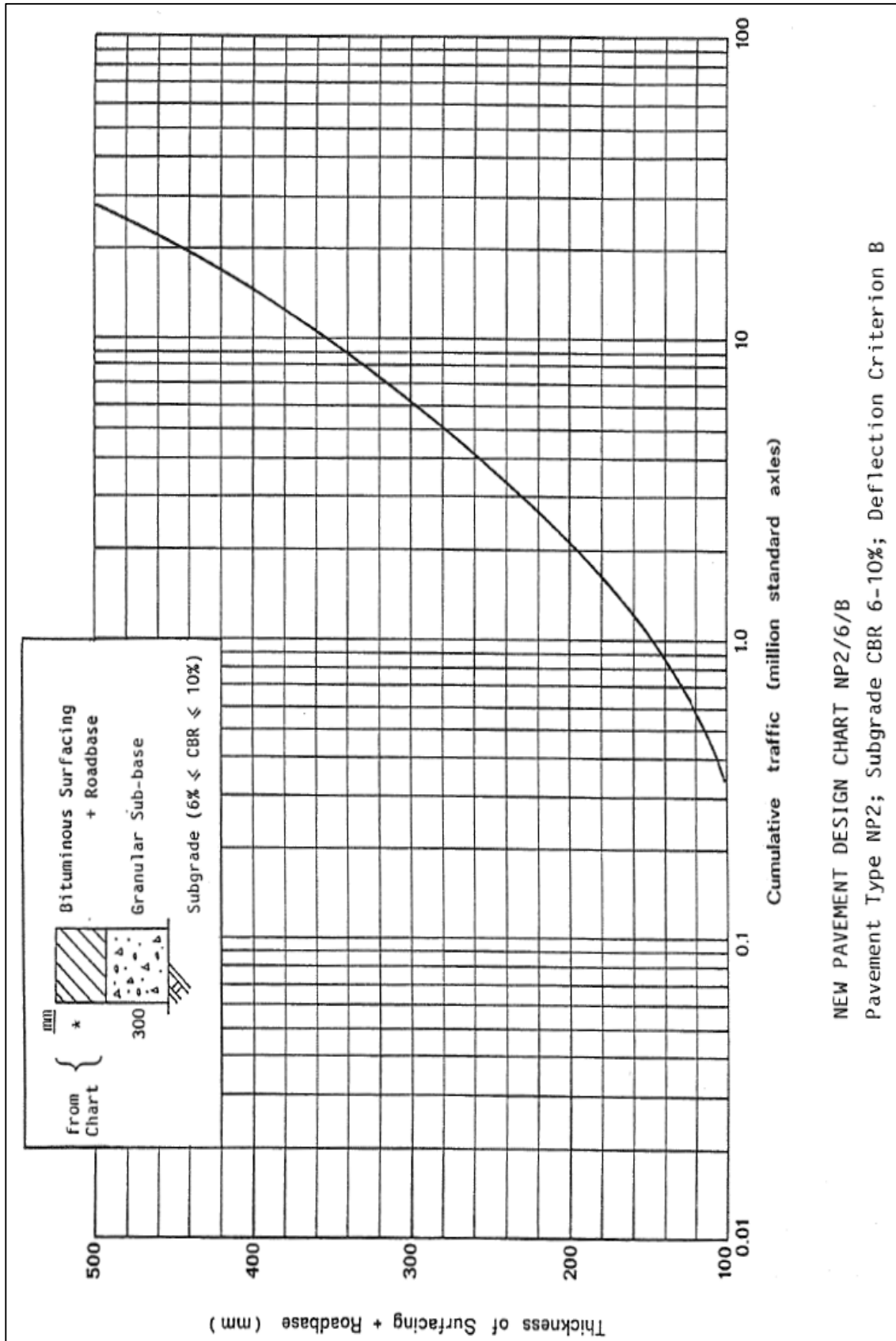
Σχήμα Δ-1: Μοντέλα οδοστρώματων - Τύπου οδοστρώματος NP2

Πηγή: Οικονομίδης, 2015



Διάγραμμα Α-1: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος Τύπου NP2 με C.B.R. υπεδάφους 3-5%

Πηγή: Οικονομίδης, 2015



Διάγραμμα Δ-2: Υπολογισμός πάχους οδοστρώματος Τύπου NP2 με C.B.R. υπεδάφους 6-10%

Πηγή: Οικονομίδης, 2015