

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ

ΤΜ. ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εύκαμπτες Στρώσεις Οδών



**Καθηγητής
ΖΩΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**

Σπουδαστές
ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ **ΑΜ:3167**
ΚΟΛΟΚΟΥΡΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ **ΑΜ:3151**
ΣΠΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ **ΑΜ:3159**

ΠΑΤΡΑ 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ	
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	3
1.2. ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	4
1.3. ΛΥΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ.....	8
1.4. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ	
2.1. ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	14
2.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΣΦΑΛΤΟΙ.....	16
2.2.1. Ασφαλτος νήσου Τριάδος (Trinidad)	16
2.2.2. Ασφαλτος Βενεζουέλας και Γιούτα.....	17
2.2.3. Άλλες φυσικές ασφαλτοι	18
2.3. ΠΙΣΣΑ.....	19
2.4. ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ.....	20
2.4.1. Τύποι ασφάλτων και ταξινόμηση αυτών	21
2.4.2. Χημική σύσταση και δομή της ασφάλτου	26
2.4.2.1. Ασφαλτένια.....	29
2.4.2.2. Μαλτένια	29
2.4.3. Συσχέτιση μεταξύ αλλαγής της χημικής σύστασης και των φυσικών ιδιοτήτων της ασφάλτου	30
2.5. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΚΑΙ ΟΔΩΝ	31
2.6. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	32
2.7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	33
2.8. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	38
2.9. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΑΑSΗΟ	41
2.10. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	47
2.11. ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	54
2.12. ΥΠΕΔΑΦΟΣ.....	56
2.12.1. Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους και παράγοντες επηρεασμού	56
2.12.2. Εκτίμηση CBR του υπεδάφους.....	60
2.12.3. Συσχέτιση CBR και μέτρου ελαστικότητας	62
2.13. Εξυγιαντική στρώση.....	63
2.13.1. Υλικά εξυγιαντικής στρώσης.....	65
2.13.2. Σταθεροποίηση υπεδάφους.....	65
2.13.3. Συμπύκνωση εξυγιαντικής στρώσης.....	67
2.13.4. Χρήση γεωφασμάτων και γεωπλεγμάτων	67
2.14. ΥΠΟΒΑΣΗ.....	70
2.14.1. Υλικά υπόβασης	71
2.15. Βάση	71
2.15.1. Βάση και υπόβαση από ασύνδετα αδρανή	72

2.15.2.	Υπόβαση από σταθεροποιημένα υλικά.....	77
2.15.3.	Σταθεροποιημένη στρώση βάσης με τσιμέντο	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3.1.	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	81
3.2.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	83
3.2.1.	Μονοστρωματικά συστήματα (θεωρία Boussinesq)	84
3.2.2.	Σύστημα δύο στρώσεων (θεωρία Burmister)	89
3.2.3.	Συστήματα τριών ή περισσοτέρων στρώσεων.....	95
3.2.4.	Πρόγραμμα BISAR.....	100
3.2.5.	Υπέδαφος.....	102
3.2.6.	Επιλογή υλικών στρώσεων.....	105
3.2.7.	Διαδικασία υπολογισμού πάχους στρώσεων	108
3.3.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΑΣΗΤΟ.....	109
3.3.1.	Σχεδιαστικές Μεταβλητές.....	112
3.3.2.	Κριτήρια Συμπεριφοράς ή Απόδοσης Οδοστρώματος	118
3.3.3.	Ιδιότητες υλικών	119
3.3.4.	Χαρακτηριστικά του οδοστρώματος (της κατασκευής)	121
3.3.5.	Διαστασιολόγηση ευκάμπτου οδοστρώματος	125
3.4.	ΒΡΕΤΑΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	126
3.4.1.	Καθορισμός κυκλοφοριακού φόρτου	127
3.4.2.	Ασφαλτική βάση και επιφανειακή στρώση	129
3.4.3.	Προστασία από παγετό	132
3.5.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΟΑΕ	132
3.5.1.	Καθορισμός ΙΤΑ.....	134
3.5.2.	Καθορισμός CBR στρώσης έδρασης.....	135
3.5.3.	Καθορισμός ΜΕΘΑ.....	136
3.5.4.	Καθορισμός εξυγιαντικής στρώσης.....	137
3.5.5.	Καθορισμός πάχους βάσης/υπόβασης	137
3.5.6.	Καθορισμός πάχους ασφαλτικών στρώσεων.....	139
3.6.	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΥ.....	140
3.7.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΘΡΑΥΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	144
3.8.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΣ.....	146
3.9.	ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ.....	148
3.10.	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....	155
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	157

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα εύκαμπτα Οδοστρώματα κατανέμουν το φορτίο με το μηχανισμό των στρώσεων. Κατά κανόνα τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται, από μια σειρά στρώσεων, οι οποίες τοποθετούνται κατά τρόπο ώστε τα υλικά να είναι καλύτερης ποιότητας και μεγαλύτερης αντοχής, εκεί όπου τα φορτία είναι μεγαλύτερα, δηλαδή στις επιφανειακές στρώσεις.

Επομένως, η αντοχή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος επιτυγχάνεται με τις στρώσεις που η κάθε μία κατανέμει διαδοχικά ολοένα και μικρότερο φορτίο στην επόμενη, ώσπου τελικά η τελευταία στρώση μεταβιβάζει την επιθυμητή τάση στο έδαφος εδράσεως και όχι με τη φέρουσα καμπτική ικανότητα της πλάκας, όπως συμβαίνει με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Το απαιτούμενο, συνεπώς, πάχος ευκάμπτου οδοστρώματος επηρεάζεται, από τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους εδράσεως.

Στην πράξη έχει, επικρατήσει να θεωρούνται τα ασφαλτικά σκυροδέματα σαν εύκαμπτα οδοστρώματα. Κι όμως, εάν το ασφαλτικό οδόστρωμα έχει, μεγάλη ακαμψία, πράγμα που π.χ. συμβαίνει, όταν το ασφαλτικό έχει μεγάλο πάχος, τότε συμπεριφέρεται, ουσιαστικά σαν δύσκαμπτο. Παράδειγμα αποτελούν τα ασφαλτικά οδοστρώματα που συνίστανται μόνον από ασφαλτικές στρώσεις, όπου αναμφίβολα ή ακαμψία είναι τόσο μεγάλη, ώστε για τον υπολογισμό τους δεν ισχύουν πλέον οι μέθοδοι των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το ίδιο μπορεί να συμβεί εάν χρησιμοποιηθεί σιμέντο σαν πρόσθετο υλικό για τη σταθεροποίηση της βάσεως ή της υποβάσεως.

Για να καθορισθεί επομένως, ένα οδόστρωμα απαιτούνται δυο κατηγορίες υπολογισμών.

- α.** Ο προσδιορισμός των υλικών των στρώσεων, των αναλογίων αναμίξεως, της απαιτούμενης συμπυκνώσεως κλπ., τα οποία διαπραγματεύεται η τεχνολογία των αντίστοιχων υλικών.
- β.** Ο προσδιορισμός της στατικής κατασκευής του οδοστρώματος, δηλαδή ο προσδιορισμός του απαιτούμενου πάχους των στρώσεων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι και οι κλιματολογικές συνθήκες λαμβάνονται υπόψη στον καθορισμό των υλικών των στρώσεων (τύπος ασφάλτου κλπ.) αλλά και στο πάχος των στρώσεων (περίπτωση παγετού κλπ.).

Κατηγορίες οδοστρωμάτων

Τα οδοστρώματα κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την ελαστικότητά τους

- 1. Εύκαμπτα οδοστρώματα:** Τα ασφαλτικά, τα κυκλοφοριόπηκτα, τα διασταθεροποιήσεως και τα σουρωτά.
- 2. Δύσκαμπτα οδοστρώματα:** Τα εκ σκυροδέματος και τα λιθόστρωτα.

Η βασική διαφορά μεταξύ των εύκαμπτων και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων έγκειται στον τρόπο με τον οποίο μεταβιβάζουν και κατανέμουν τα φορτία στο υπέδαφος.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα επειδή έχουν μεγάλη ακαμψία και μέτρο ελαστικότητας τείνουν να κατανείμουν το φορτίο, επάνω σε μεγαλύτερη επιφάνεια εδάφους, και η ίδια η πλάκα αναλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό από το στατικό φορτίο. Έτσι ο σημαντικότερος παράγοντας σε ένα δύσκαμπτο από σκυρόδεμα οδόστρωμα είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Γι' αυτό και μικρές μεταβολές στην αντοχή του εδάφους εδράσεως έχουν ελάχιστη επιρροή στη στατική αντοχή και επομένως στο πάχος του δύσκαμπτου οδοστρώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των εύκαμπτων ασφαλτικών οδοστρωμάτων έχει αλλάξει σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Προηγουμένως, τα περισσότερα οδοστρώματα μπορούσαν εύκολα να καταταχθούν σε μία από τις δύο κατηγορίες: «εύκαμπτα» ή «δύσκαμπτα». Ο σχεδιασμός των δύσκαμπτων ή PCC οδοστρωμάτων βασιζόταν για πολλά χρόνια σε μία θεωρητική ανάλυση που περιείχε μερικές εμπειρικές τροποποιήσεις της κλασικής μεθόδου Westergaard. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα χαρακτηρίζονταν (και ακόμη χαρακτηρίζονται) από μία σχετικά λεπτή ασφαλτική επιφανειακή στρώση και με στρώσεις βάσης και υπόβασης από κοκκώδη υλικά που προστατεύουν το υπέδαφος από υπερφόρτιση. Αυτός ο τύπος σχεδιασμού του οδοστρώματος βασιζόταν κυρίως σε εμπειρικούς κανόνες ή στην πείρα, ενώ η θεωρία έπαιζε δευτερεύοντα ρόλο στην όλη διαδικασία.

Οι πρόσφατες, όμως, αλλαγές στο σχεδιασμό και την κατασκευή που προκάλεσαν κυρίως τα μεγαλύτερα φορτία τροχού, η μεγαλύτερη κυκλοφορία οχημάτων και η αναγνώριση των διαφόρων ανεξάρτητων τρόπων καταπόνησης που συντελούν στη «βλάβη» του οδοστρώματος (όπως λακκούβες, ρήγματα και πτυχώσεις), έχουν οδηγήσει στην εισαγωγή και χρησιμοποίηση σταθεροποιημένων υλικών βάσης και υπόβασης. Σταθεροποιητές όπως η άσφαλτος, η άσβεστος, η ιπτάμενη τέφρα και το σιμέντο χρησιμοποιούνται συχνά για να αυξήσουν την αντοχή του οδοστρώματος αυξάνοντας τη δυσκαμψία του.

Για τους λόγους αυτούς τα τελευταία χρόνια έγινε μία εξαιρετικά εντατική προσπάθεια για τη θεμελίωση του σχεδιασμού οδοστρωμάτων από ασφαλτικό μπετόν με μη σταθεροποιημένες (εύκαμπτες) ή σταθεροποιημένες (ημιδύσκαμπτες) στρώσεις βάσης. Προς το παρόν δεν υπάρχει μία αυστηρά θεμελιακή ή ορθολογιστική διαδικασία σχεδιασμού που να έχει γίνει πλατειά αποδεκτή από τη βιομηχανία οδοστρωμάτων. Μεγάλη όμως εμπιστοσύνη έχει δοθεί από τους μηχανικούς στη χρήση της γραμμικής

θεωρίας ελαστικότητας πολλαπλών στρώσεων. Αυτό φαίνεται και από την εφαρμογή διαφόρων τέτοιων μεθόδων σχεδιασμού που βασίζονται στη θεωρία αυτή.

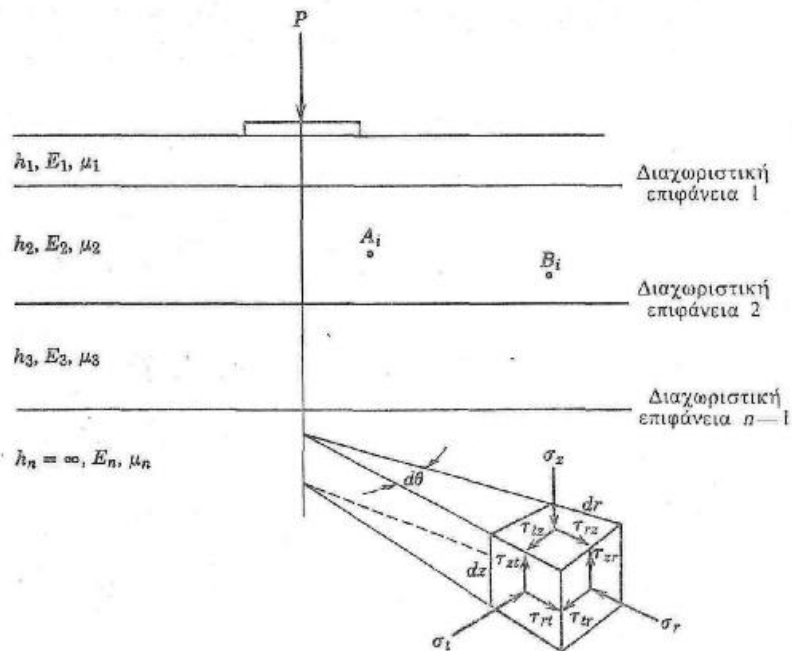
Ο αναγνώστης πρέπει να κατανοήσει ότι για να είναι μία μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων απόλυτα ορθολογική από τη φύση της, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τρία στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι (1) η θεωρία πρόβλεψης της παραμέτρου βλάβης ή καταπόνησης, (2) η αξιολόγηση των καταλλήλων ιδιοτήτων των υλικών, που είναι απαραίτητες για την θεωρία που έχει εκλεγεί και (3) ο προσδιορισμός της σχέσης ανάμεσα στο μέγεθος της παραμέτρου προς το επιθυμητό επίπεδο αντοχής.

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει μόνο το πρώτο από τα στοιχεία αυτά. Σε άλλο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενική συζήτηση των βασικών δοκιμών των υλικών που χρησιμοποιούνται σε ορθολογικούς σχεδιασμούς, ενώ το τρίτο μέρος περιέχει τη βασική ανάπτυξη των θεμελιωδών κριτηρίων που χρησιμοποιούνται σε μεθόδους ορθολογικού σχεδιασμού. Αν και οι αντιδράσεις των περισσότερων υλικών οδοστρώσεως διαφέρουν από τις παραδοχές της θεωρίας και τις «αληθινές» τιμές τάσης, παραμόρφωσης ή κάμψης, η κατανόηση της θεωρίας είναι απαραίτητη στο μηχανικό λόγω της σπουδαιότητας της αναγνώρισης των θεμελιωδών παραγόντων πάνω στους οποίους βασίζονται όλοι οι σχεδιασμοί οδοστρωμάτων.

1.2. ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Το Σχήμα 1.1 απεικονίζει τη γενική μορφή ενός ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων. Γενικά, η αναλυτική λύση της κατάστασης τάσης ή παραμόρφωσης, στηρίζεται σε διάφορες παραδοχές. Είναι (1) οι ιδιότητες του υλικού κάθε στρώσης είναι ομογενείς, δηλ. η ιδιότητα στο σημείο Α είναι η ίδια όπως στο σημείο Β, (2) κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος εκτός από την κατώτερη στρώση και όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση, (3) κάθε στρώση είναι ισότροπη δηλ. η ιδιότητα σε ένα σημείο Λ, είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό, (4) στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή, (5) δεν υπάρχουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια και (6) οι λύσεις των τάσεων χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση. Είναι ο λόγος του Poisson μ και το μέτρο ελαστικότητας Ε. Αν και οι σταθερές αυτές είναι οι πιο κλασικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες θεωρητικές μεθόδους, πρόσφατες εξελίξεις όπως το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή Shell BISAR για πολλαπλές στρώσεις έχουν

την ικανότητα να αναλύουν συστήματα στρώσεων χωρίς τριβή στις διαχωριστικές επιφάνειες και με διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια. Πάντως, οι λύσεις που παρουσιάζονται σ' αυτό το κεφάλαιο, προϋποθέτουν όλες τις παραδοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 1.1.: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων.

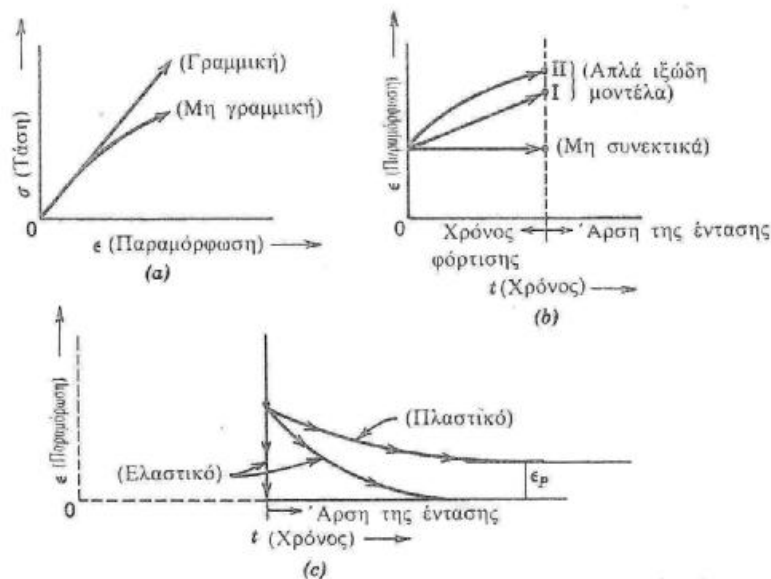
Από τη θεωρία φαίνεται ότι σε ένα σημείο μιας οποιασδήποτε στρώσης, αναπτύσσονται 9 τάσεις. Οι τάσεις αυτές περιλαμβάνουν 3 ορθές τάσεις (σ_z , σ_r , σ_t) που ενεργούν κάθετα στις έδρες του στοιχείου και 6 διατμητικές τάσεις (τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} , τ_{zt}) που ενεργούν παράλληλα προς τις έδρες. Οι συνθήκες στατικής ισορροπίας του στοιχείου δείχνουν ότι οι διατμητικές τάσεις σε δύο τεμνόμενες έδρες είναι ίσες. Έτσι $\tau_{rz}=\tau_{zr}$, $\tau_{rt}=\tau_{tr}$, και $\tau_{tz}=\tau_{zt}$. Σε κάθε σημείο του συστήματος υπάρχει ένας ορισμένος προσανατολισμός του στοιχείου τέτοιος, ώστε οι διατμητικές τάσεις που ενεργούν σε κάθε έδρα είναι μηδέν. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες οι ορθές τάσεις χαρακτηρίζονται σαν κύριες τάσεις και συμβολίζονται με σ_1 (μέγιστη), σ_2 (ενδιάμεση) και σ_3 (ελάχιστη). Ολική τάση θ είναι το άθροισμα των κύριων τάσεων σε ένα σημείο. Με δεδομένο το τριαξονικό σύστημα τάσεων ενός στοιχείου, οι παραμορφώσεις υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (1.3)$$

Ο τύπος της θεωρίας που χρησιμοποιείται διακρίνεται γενικά από τους άλλους με αναφορά σε τρεις ιδιότητες του υλικού. Είναι η σχέση τάσης και παραμόρφωσης (γραμμική ή μη γραμμική), η εξάρτηση της παραμόρφωσης από το χρόνο σε σταθερή εντατική κατάσταση (ιξώδης ή μη ιξώδης) και ο βαθμός μέχρι τον οποίο το υλικό μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση μετά την άρση των τάσεων (πλαστικό ή ελαστικό). Το Σχήμα 1.2 δείχνει μία γενικευμένη μορφή των εννοιών αυτών.



Σχήμα 1.2.: Χαρακτηριστικά υλικού (α) γραμμικότητα, (β) αποτελέσματα συνεκτικότητας, (c) αναστρέψιμα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 1.2α φαίνεται η θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα σε μία γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Αν και τα περισσότερα υλικά οδοστρωμάτων είναι μη γραμμικά, η χρήση ενός γραμμικού μοντέλου επαρκεί, εφόσον οι τάσεις είναι χαμηλές. Το Σχήμα 2.2b δείχνει τι σημαίνει συνεκτικό υλικό. Όπως φαίνεται για τα δύο μοντέλα, το μέγεθος της παραμόρφωσης είναι συνάρτηση του χρόνου εφαρμογής των τάσεων. Το μοντέλο I είναι ένα απλό σύστημα τύπου Maxwell, που αποτελείται από ένα ελατήριο και επανατάκη σε σειρά. Η παραμόρφωση ορίζεται σαν:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma t}{\eta} \quad (1.4)$$

όπου t είναι ο χρόνος και η ο συντελεστής συνεκτικότητας του συστήματος επανατάκτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο μέρη της ολικής παραμόρφωσης. Ένα μέρος είναι το στιγμιαίο και τελείως αναστρέψιμο τμήμα που προσομοιάζεται από το ελατήριο, ενώ το άλλο τμήμα εξαρτάται από το χρόνο και είναι μόνιμο. Το σύστημα Kelvin εικονίζεται από το Μοντέλο II. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα ελατήριο και έναν επανατάκτη σε παράλληλα διάταξη. Η εξηρημένη από το χρόνο παραμόρφωση γι' αυτό το σύστημα είναι:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-Et/\eta}) \quad (1.5)$$

Για το σύστημα Kelvin, καθώς η διάρκεια της φόρτισης προσεγγίζει το άπειρο, η παραμόρφωση πλησιάζει την τιμή του ορίου ελαστικότητας. Με την άρση της φόρτισης, η παραμόρφωση αίρεται επίσης τελείως. Τα περισσότερα ιξώδη υλικά οδοστρωσίας, όπως ασφαλικά μίγματα σε μεγάλες θερμοκρασίες, και πολύ συνεκτικά εδάφη, δεν ακολουθούν καμία από αυτές τις ιδανικές περιπτώσεις και επομένως, διάφοροι συνδυασμοί μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τους.

Το Σχήμα 1.2c παριστάνει τη βασική διαφορά ανάμεσα σε ένα ελαστικό και ένα πλαστικό υλικό. Στην ιδανική περίπτωση, η διαφορά αυτή αφορά στο αν όλη η παραμόρφωση εξαφανίζεται (ελαστικό) με την άρση της φόρτισης ή αν κάποια παραμόρφωση παραμένει (πλαστικό). Η δεύτερη περίπτωση παριστάνεται από τη μόνιμη παραμόρφωση e_p στο διάγραμμα. Από πρακτική άποψη, πολλά από τα ελαστικοίξώδη μοντέλα απαιτούν τόσο πολύ χρόνο για να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, ώστε μεγάλο μέρος της παραμόρφωσης θεωρείται ότι είναι πλαστικό ή μόνιμο από τη φύση του. Το χαρακτηριστικό αυτό εξηγεί γιατί η ελαστικοίξώδης θεωρία χρησιμοποιείται για να προβλέψει τη μόνιμη παραμόρφωση των συστημάτων οδοστρωμάτων.

Έχοντας όλα αυτά υπόψη, ο αναγνώστης πρέπει να έχει αποκτήσει μία γενική γνώση των περιορισμών και εννοιών ενός οποιουδήποτε ειδικού θεωρητικού μοντέλου, όπως το μη γραμμικό ελαστικό ή το γραμμικό πλαστικοίξώδες. Όπως έχει αναφερθεί, ο τύπος της θεωρίας με την πιο πλατιά χρήση σήμερα είναι η γραμμική ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων. Οι λύσεις διάφορων προβλημάτων παρουσιάζονται στο

1.3. ΛΥΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Συστήματα μιας στρώσης. Κατά την ανάλυση τάσεων, παραμορφώσεων και κάμψεων σε ιδεατές μάζες, οι λύσεις βασίζονται κυρίως στις εξισώσεις Boussinesq που αρχικά αφορούσαν ένα ομογενές, ισότροπο και ελαστικό μέσο με ένα φορτίο στην επιφάνεια του συγκεντρωμένο σε ένα σημείο.

Σύμφωνα με τον τύπο του Boussinesq, η κατακόρυφη τάση σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης, που οφείλεται σε ένα συγκεντρωμένο σημείο στην επιφάνεια, είναι:

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2}$$
$$k = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[1 + (r/z)^2]^{3/2}} \quad (1.6)$$

πού r - ακτινική απόσταση από το συγκεντρωμένο φορτίο z = βάθος

Από την εξίσωση 1.6 φαίνεται ότι η κατακόρυφη τάση εξαρτάται από το βάθος και την ακτινική απόσταση και είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του μέσου.

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων κάτω από ένα συγκεντρωμένο φορτίο σε ένα οριζόντιο επίπεδο έχει τη μορφή μιας επιφάνειας σχήματος καμπάνας. Οι μέγιστες τάσεις βρίσκονται στο κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από το σημείο εφαρμογής του. Η πίεση είναι μέγιστη σε μικρά βάθη και θεωρητικά μηδενίζεται στο άπειρο. Στην πράξη γίνεται η παραδοχή ότι προσεγγίζει το μηδέν σε πεπερασμένο βάθος.

Στη μελέτη των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, το φορτίο στην επιφάνεια δεν είναι σημειακό αλλά κατανεμημένο σε μία ελλειπτική επιφάνεια. Οι πιέσεις στο σημείο επαφής τροχού-οδοστρώματος (υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει η επίδραση ελαστικού) είναι ίσες με την πίεση του ελαστικού. Η μεταβολή της τάσης με το βάθος ακολουθεί τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση του σημειακού φορτίου.

Με βάση τις προηγούμενες εξισώσεις του Boussinesq έγινε επέκταση των λύσεων για ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο κυκλικό φορτίο με ολοκλήρωση. Έτσι δόθηκε μία πιο ρεαλιστική και κατάλληλη λύση στα συνηθισμένα προβλήματα υπολογισμού των οδοστρωμάτων.

Ο Newmark κατέστρωσε διαγράμματα επιρροής για τον προσδιορισμό των τάσεων σε ελαστικές εδαφικές μάζες. Τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται πολύ στις

μελέτες θεμελιώσεων. Ο Barber δημοσίευσε πίνακες που διευκολύνουν τους υπολογισμούς των τάσεων και παραμορφώσεων. Οι Sanborn και Yoder παρουσίασαν γραφικές λύσεις τάσεων και βέλους κάμψης σε ένα στερεό του Boussinesq με την παραδοχή ότι η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια είναι ημιελλειψοειδής μάλλον, παρά ομοιόμορφα κατανεμημένη σε μία κυκλική επιφάνεια επαφής.

Ο Πειραματικός Σταθμός των Υδάτινων Οδών, του Σώματος των Μηχανικών, κατέληξε σε τιμές επιρροής για ημιάπειρες ελαστικές μάζες ύστερα από μελέτες τάσεων και παραμορφώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα. Οι Foster και Ahlvin δημοσίευσαν διαγράμματα υπολογισμού κατακόρυφων τάσεων, οριζοντίων τάσεων και κατακόρυφων ελαστικών παραμορφώσεων που προκαλούν κυκλικές φορτισμένες πλάκες. Οι τιμές αυτές ισχύουν για $\mu = 0,5$. Η εργασία αυτή κατόπιν τελειοποιήθηκε από τους Ahlvin και Ulery και επέτρεψε εκτεταμένες λύσεις των τάσεων, παραμορφώσεων και βελών κάμψης σε ένα οποιοδήποτε σημείο στην ομογενή μάζα για οποιαδήποτε τιμή του λόγου του Poisson.

1.4. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΥΠΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Ιστορικά, τα οδοστρώματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Σχήμα 1.3.). Οι κλασικοί ορισμοί των οδοστρωμάτων αποτελούν, μερικές φορές, μία υπεραπλούστευση, όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους. Η κατάταξη οδοστρωμάτων παρουσιάζει περιορισμούς εγγενείς σε όλες τις μεθόδους κατάταξης.

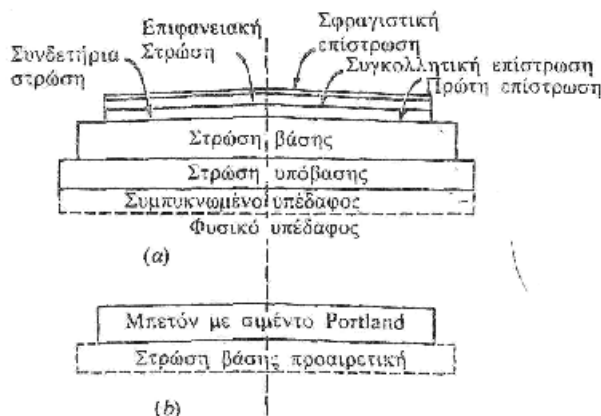
Το εύκαμπτο οδόστρωμα είναι δυνατόν να αποτελείται από μία σχετικά λεπτή επιφανειακή στρώση κατασκευασμένη πάνω σε μία στρώση βάσης και μία στρώση υπόβασης που εδράζονται πάνω στο συμπυκνωμένο υπέδαφος. Αντίθετα, το δύσκαμπτο οδόστρωμα κατασκευάζεται από μετόν με σιμέντο Portland και είναι δυνατόν να περιλαμβάνει ή όχι μία στρώση βάσης πάνω στο υπέδαφος.

Η ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους, εύκαμπτο και δύσκαμπτο, είναι ο τρόπος κατανομής των φορτίων πάνω στο υπέδαφος. Το δύσκαμπτο οδόστρωμα, λόγω της ακαμψίας και του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, τείνει και κατανέμει τα φορτία πάνω σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή του εδάφους. Έτσι ένα μεγάλο μέρος της φέρουσας ικανότητας παρέχεται από την ίδια την πλάκα. Ο κυριότερος παράγοντας σχεδιασμού του δύσκαμπτου οδοστρώματος είναι η αντοχή του μετόν. Γι' αυτό το

λόγο μικροδιακυμάνσεις της αντοχής του υπεδάφους έχουν μικρή επίδραση πάνω στη φέρουσα αντοχή του οδοστρώματος.

Πρέπει να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο ότι ο κλασικός ορισμός του εύκαμπτου οδοστρώματος περιλαμβάνει κυρίως τα οδοστρώματα που έχουν επιφάνεια από ασφαλτικό μπετόν. Αντίθετα, το κλασικό δύσκαμπτο οδόστρωμα είναι από μπετόν με σιμέντο Portland. Είναι προφανές ότι οι όροι «εύκαμπτο» και «δύσκαμπτο» είναι αυθαίρετοι και δόθηκαν για διάκριση ανάμεσα σε οδοστρώματα από ασφαλτικό μπετόν και μπετόν με σιμέντο Portland.

Τα ασφαλτικά οδοστρώματα ενδέχεται να παρουσιάζουν την ακαμψία των οδοστρωμάτων από μπετόν με σιμέντο Portland. Αυτό ισχύει όταν χρησιμοποιούνται σταθεροποιημένα υλικά για τις διάφορες στρώσεις ή αν χρησιμοποιηθούν π.χ. στρώσεις ασφαλτικού μπετόν μεγάλου πάχους. Αντίθετα, αν γίνεται χρήση πολύ λεπτών επιφανειακού προστατευτικού στρώμα το οδόστρωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αναγνώστης πρέπει να έχει υπόψη ότι οι ορισμοί είναι αυθαίρετοι και δεν ισχύουν με την αυστηρή τους έννοια.



Σχήμα 1.3.: Συνιστώσες των (α) εύκαμπτων και (β) δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Στρώσεις βάσης κάτω από δύσκαμπτα οδοστρώματα ονομάζονται συχνά στρώσεις υπόβασης. Το σχήμα δείχνει τις στρώσεις βάσης και υπόβασης σε «κλιμακωτή» διατομή. Στο σχήμα 1.3. η βάση είτε αποστραγγίζεται είτε επεκτείνεται μέχρι το έρεισμα για να αποστραγγίζεται.

Στρώσεις βάσης χρησιμοποιούνται κάτω από δύσκαμπτα οδοστρώματα για διάφορους λόγους όπως (1) έλεγχος ανάβλυσης, (2) έλεγχος επίδρασης παγετού, (3) αποτελεσματικότητα, (4) έλεγχος συστολής και διαστολής του υπεδάφους και (5) ταχύτητα κατά στρώση βάσης (που συχνά ονομάζεται υπόβαση) παρέχει κάποια

στατική στο οδόστρωμα. Όμως, η συμβολή της στη φέρουσα ικανότητα ενδέχεται να είναι μικρή.

Η φέρουσα ικανότητα ενός πραγματικά εύκαμπτου οδοστρώματος κατορθώνεται με την κατανομή φορτίων του συστήματος στρώσεων. Η αντοχή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι το αποτέλεσμα ταχέων στρώσεων που κατανέμουν το φορτίο πάνω στο υπεδάφος. Το πάχος του οδοστρώματος επηρεάζεται από την αντοχή του υπεδάφους. Όταν το ασφαλτικό οδόστρωμα παρουσιάζει μεγάλη ακαμψία ενδέχεται να συμπεριφέρεται περιστασιακά σαν δύσκαμπτο και επομένως η κόπωση της επιφανειακής πλάκας ή άλλης είναι δυνατόν να γίνει κρίσιμη. Στις περιπτώσεις αυτές η μεθοδολογία προσεγγίζει αυτήν που ιστορικά έχει υιοθετηθεί για τα οδοστρώματα. Για παράδειγμα, σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ασφαλτικά οδοστρώματα σε όλο το βάθος. Αυτός ο τύπος οδοστρώματος προσεγγίζει χωρίς αμφιβολία το μέγιστο της ακαμψίας και οι κλασικές μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων δεν εφαρμόζονται πια. Το ίδιο συμβαίνει αν κάποιο συνδετικό υλικό χρησιμοποιηθεί σαν σταθεροποιητής στη βάση ή υπόβαση.

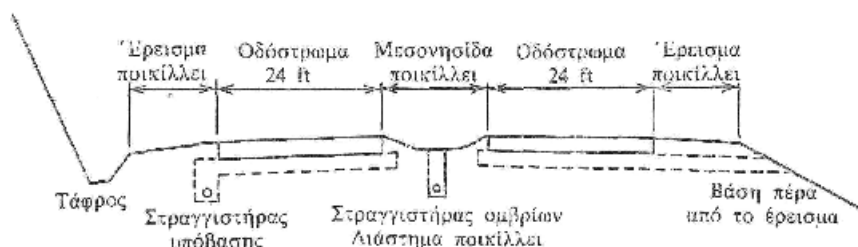
Στρώσεις βάσης κατασκευάζονται μέχρι κάποια απόσταση πέρα από την άκρη της επιφανειακής στρώσης. Αυτό εξασφαλίζει τη μεταβίβαση στις κατώτερες στρώσεις τάσεων που εξασκούνται στην άκρη του οδοστρώματος. Αν οι στρώσεις κατασκευάζονται με απότομη πρόσοψη, τότε φορτία που εξασκούνται στην επιφάνεια πιθανόν να προκαλέσουν βλάβη λόγω έλλειψης υποστήριξης στην άκρη του οδοστρώματος. Οι τάσεις στρώσης γενικά εκτείνονται περίπου 1 πόδι πέρα από την άκρη του οδοστρώματος και .σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατόν να επεκταθούν περισσότερο.

Στρώσεις οδών και αεροδρομίων. Στα Σχήματα 1.4 και 1.5 φαίνονται οι τυπικές διατομές μιας οδού και ενός διαδρόμου και τροχοδρόμου. Το τυπικό πλάτος οδών με μεγάλο οδικό φόρτο (δηλ. κύριες οδοί) είναι γενικά 24ft, αν και για οδούς με μικρή κυκλοφορία το πλάτος ενδέχεται να είναι κάπως μικρότερο. Το πλάτος των ερεισμάτων ποικίλλει αλλά είναι γενικά 10 ft.

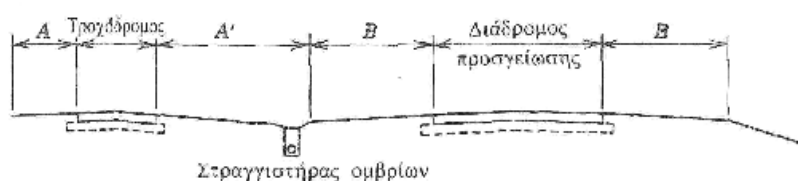
Στρώσεις βάσεων και υποβάσεων μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορους τρόπους. Αν το υλικό είναι διαπερατό, τότε μπορεί να επεκταθεί πέρα από το έρεισμα και η αποστράγγιση να γίνεται στο σημείο που συναντάει το πρανές.

Σε ειδικές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε εκσκαφές, χρησιμοποιούνται στραγγιστήρες υπόβασης και σε πολλές οδούς γίνεται χρήση κλιμακωτής κατασκευής (Βλέπε Σχήμα 1.1). Στις κατασκευές αυτές δεν επιχειρείται αποστράγγιση. Από επιτόπιες εξετάσεις προκύπτει ότι πολλά χιλιόμετρα τέτοιων οδών λειτούργησαν ικανοποιητικά, εφόσον είχε δοθεί προσοχή στη διαβάθμιση και συμπύκνωση των υλικών της βάσης και υπόβασης.

Τα πλάτη στα πολιτικά αεροδρόμια ποικίλλουν από 50 μέχρι 200 ft, ανάλογα με τον τύπο του αεροδρομίου. Το τυπικό πλάτος είναι 150 ft. Μεγαλύτερα πλάτη χρησιμοποιούνται σε μερικά στρατιωτικά αεροδρόμια για την εξυπηρέτηση βαρέων αεροσκαφών.



Σχήμα 1.4.: Τυπική διατομή οδού. Κλίση οδοστρώματος 1/8 έως 1/4 in/ft. Κλίση ερείσματος 3/4 έως 1 1/2 in/ft. Κλίσεις πρανών ποικίλλουν.



Σχήμα 1.5.: Τυπική διατομή διαδρόμου και τροχοδρόμου. Τα πλάτη ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο αεροδρομίου. Οι αποστάσεις A, A' και B προσδιορίζονται βάσει προδιαγραφών.

Οι διάδρομοι αεροδρομίων έχουν σχεδόν πάντα στέψη, ενώ τα οδοστρώματα οδών μπορεί να έχουν ή να μην έχουν. Μερικές φορές είναι οικονομικότερη η κατασκευή οδοστρώματων με κλίση προς τα έξω. Αυτός ο τύπος κατασκευής, όμως, δεν δικαιολογείται για μεγάλα αεροδρόμια λόγω της μεγάλης απόστασης ροής των ομβρίων από τη μία άκρη του οδοστρώματος στην άλλη κατά την αποστράγγιση.

Τα πλάτη των τροχοδρόμων ποικίλλουν από 20 μέχρι 100 ft, ανάλογα με την κατηγορία του αεροδρομίου, με τυπικό πλάτος 75 ft.

Πολλά αεροδρόμια έχουν κατασκευαστεί με σύστημα αποστράγγισης της υπόβασης παρόμοιο με αυτό των οδών. Πάντως, για να είναι αποτελεσματικοί οι στραγγιστήρες πρέπει να τοποθετηθούν ανά μικρά διαστήματα.

Διογκωμένες διατομές οδοστρώματων. Οδοστρώματα με διογκωμένα άκρα χρησιμοποιούνται σε μερικές περιπτώσεις για την αντιμετώπιση υψηλών τάσεων που υπάρχουν στην άκρη του οδοστρώματος. Οι διατομές χαρακτηρίζονται π.χ. σαν 9-8-9in., 9-7-9in. ή 9-6-9in. Τα οδοστρώματα με διογκωμένα άκρα είναι πιο δαπανηρά από τα ομοιόμορφα οδοστρώματα, λόγω της πρόσθετης εργασίας διαμόρφωσης του διογκωμένου άκρου.

Επιπλέον η χρήση οδοστρώματων οδών με διογκωμένη άκρη ήταν συχνή την εποχή που τα πλάτη οδοστρώματων ήταν περίπου 18 έως 20 ft και τα οχήματα ταξίδευαν πολύ κοντά στην άκρη του οδοστρώματος. Σε πλατύτερα οδοστρώματα, όμως, η συγκέντρωση οχημάτων είναι μεταξύ 3 και 4 ft από την άκρη του οδοστρώματος ελαττώνοντας την ανάγκη ενίσχυσης.

Οι τροχόδρομοι και τα άκρα των διαδρόμων πρέπει να κατασκευάζονται με μεγαλύτερο πάχος λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης της κυκλοφορίας. Η προσγείωση στο άκρο του διαδρόμου ενδέχεται να μην είναι κρίσιμη, επειδή το αεροπλάνο είναι στον αέρα μερικά. Η απόσταση από το τέλος του διαδρόμου για την οποία μια ενισχυμένη διατομή είναι αναγκαία κυμαίνεται μεταξύ 10% του συνολικού μήκους του διαδρόμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2.1. ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η άσφαλτος είναι γνωστή και χρησιμοποιείται από αρχαιοτάτων χρόνων. Είναι ίσως ένα από τα πλέον παλαιά και διαδεδομένα δομικά υλικά. Χρησιμοποιείται εδώ και 6.000 χρόνια ως αρίστης ποιότητας μονωτικό και συνδετικό υλικό. Πρώτη αναφορά γίνεται στην Παλαιά Διαθήκη όπου η άσφαλτος χρησιμοποιήθηκε στην επίστρωση της κιβωτού. Οι Σουμέριοι τη χρησιμοποιούσαν στην ανθούσα βιομηχανία κατασκευής πλοίων ενώ οι Βαβυλώνιοι ως συνδετικό υλικό στην παραγωγή μίγματος για πυργοποιία (Πύργος της Βαβυλώνας). Οι Αιγύπτιοι τη χρησιμοποιούσαν τόσο για την ταρίχευση των νεκρών όσο και για την υγρομόνωση των δεξαμενών. Οι Πέρσες περί το 3.000 π.Χ. χρησιμοποίησαν άσφαλτο στην κατασκευή οδών. Τέλος, ο Ηρόδοτος και ο Πλίνιος περιγράφουν τα της εξαγωγής και χρήσης αυτής.

Η λέξη «ασφαλτικό» χρησιμοποιήθηκε στους Ομηρικούς χρόνους με την έννοια του στέρεου ή σταθερού, κατόπιν χρησιμοποιήθηκε από τους Λατίνους και μέχρι σήμερα υπάρχει ο όρος ασφαλτικό ή η ρίζα αυτού σε όλες τις νεότερες γλώσσες. Στην Ελλάδα τελευταία και για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χρησιμοποιούταν ευρέως και η λέξη «πίσσα».

Η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε μέχρι και τις αρχές του εικοστού αιώνα ήταν φυσικό προϊόν. Τα πρώτα φυσικά αποθέματα βρέθηκαν στη Νεκρά Θάλασσα όπου η άσφαλτος εκκρινόταν από το βυθό, επέπλεε και εκβαλλόταν στις όχθες από όπου και συλλεγόταν. Επιφανειακές εκκρίσεις υπήρχαν και σε άλλα σημεία της Μέσης Ανατολής. Αργότερα (13ος-14ος αιώνας μ.Χ.) ανακαλύφθηκαν τα μεγαλύτερα επιφανειακά αποθέματα φυσικής ασφάλτου (λίμνη ασφάλτου) στον κόσμο στη νήσο της Τριάδος και στις απέναντι από τη νήσο αυτή ακτές της Βενεζουέλας.

Φυσική άσφαλτος υπάρχει και υπό μορφή πετρώματος (ασφαλτόλιθος-rock asphalt ή ψαμμάσφαλτος-tar sand), δηλαδή πετρώματα κυρίως ασβεστολιθικά ή ψαμμιτικά εμπλουτισμένα με άσφαλτο. Τέτοια πετρώματα, κατά σειρά μεγέθους αποθεμάτων, βρέθηκαν στην Αλμπέρτα του Καναδά (περιοχή Αθαμπάσκα με τα μεγαλύτερα αποθέματα στον κόσμο), στην ανατολική Βενεζουέλα, στη Μαλαγάση, στη

Γιούτα, στην Καλιφόρνια, στο Νέο Μεξικό και στο Κεντάκυ των ΗΠΑ, στη νήσο Μπούτον της Ινδονησίας, στην Αλβανία (περιοχή Σελενίτζα κοντά στην Αυλώνα), στη Ρουμανία (περιοχή Ντέρνα), στο Καζακστάν καθώς και σε διάφορες άλλες περιοχές, σε μικρότερες εκτάσεις, όπως διάφορες περιοχές της Γαλλίας (Γκαρντ και Θανν) και της Ελβετίας (κοιλιάδα Τραβέρ) και στη Ραγκούσα της Ιταλίας. Στην Ελλάδα απαντάται σε μικρές ποσότητες κυρίως στις νήσους Παξούς και Αντίπαξους και στη Μαραθούπολη.

Η φυσική ασφάλτος, πλην της νήσου Τριάδος και της Βενεζουέλας, χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται περιστασιακά στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Σήμερα, από όλα τα παραπάνω αποθέματα μόνο λίγα είναι υπό εκμετάλλευση (κυρίως της Αλβανίας, της Ρουμανίας και του Καζακστάν). Ο λόγος είναι πρωτίστως οικονομικός, λόγω της δυσκολίας καθαρισμού και συλλογής της ασφάλτου από το πέτρωμα, σε σύγκριση με την ασφάλτο που εξάγεται από την κλασματική απόσταξη του αργού πετρελαίου.

Πλην της φυσικής ασφάλτου υπάρχει και η τεχνητή ασφάλτος. Η τεχνητή ασφάλτος είναι κατάλοιπο κλασματικής απόσταξης πρωτογενούς (αργής) πίσσας (crude tar) ή αργού πετρελαίου (crude oil). Στην πρώτη περίπτωση παράγεται ο πισσίτης ή πισσάσφαλτος ή κοινώς πίσσα και στη δεύτερη η πετρελαϊκή ασφάλτος ή κοινώς ασφάλτος. Και τα δύο προϊόντα οπτικώς είναι όμοια, έχουν παρόμοιες τεχνολογικές ιδιότητες με αυτές της φυσικής ασφάλτου και χρησιμοποιούνται για τις ίδιες εφαρμογές, όπως κατασκευή οδοστρωμάτων, υγραμονώσεις και προστατευτικές επιστρώσεις σε ένα μεγάλο αριθμό βιομηχανικών προϊόντων. Διαφέρουν όμως ριζικά ως προς τη φυσική και χημική σύσταση τους, καθώς επίσης και ως προς την οσμή. Η πίσσα έχει περισσότερο έντονη και χαρακτηριστική αρωματική μυρωδιά από αυτήν της ασφάλτου.

Η ασφάλτος, γενικώς, πλην της χρήσης αυτής στα οδοστρώματα χρησιμοποιείται επίσης και σε ένα μεγάλο φάσμα άλλων εφαρμογών όπως: κτιριακές κατασκευές, μόνωση δεξαμενών, φραγμάτων, καλωδίων, προστασία πρανών και όχθεων από διάβρωση, παραγωγή βερνικιών, διαποτισμό διαφόρων υλικών κλπ. Ο αριθμός τους ξεπερνά τις 250.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να διευκρινισθεί ο όρος «bitumen» που, παρόλο που δε συναντάται στην ελληνική ορολογία των μηχανικών οδοποιίας, χρησιμοποιείται ευρέως στο εξωτερικό από αρκετές χώρες. Ο συγγραφέας κρίνει

σκόπιμο να δανεισθεί τον αγγλικό ορισμό από την πλειάδα ορισμών που υπάρχουν, κυρίως μεταξύ των χημικών επιστημόνων. Ως Bitumen ορίζεται «ένα ιξώδες υγρό ή στερεό, που αποτελείται κυρίως από υδρογονάνθρακες και παράγωγά τους, το οποίο είναι διαλυτό στο τριχλωροαιθυλένιο, είναι κατ' ουσία μη πτητικό και μαλακώνει σταδιακά όταν θερμαίνεται. Είναι χρώματος μαύρου ή καφέ και έχει μονωτικές και συγκολλητικές ιδιότητες. Αποκτάται από διύλιση πετρελαίου και επίσης βρίσκεται ως φυσικό απόθεμα ή ως συστατικό της φυσικής ασφάλτου, στην οποία συνυπάρχει με ορυκτά υλικά».

Ο όρος bitumen, λοιπόν, εμπεριέχει την πετρελαϊκή ασφαλτο και επειδή αυτή είναι που χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στην οδοποιία, τουλάχιστο σε ορισμένες χώρες όπως η Ελλάδα, η λέξη ασφαλτος καθιερώθηκε και εκτόπισε τον όρο bitumen. Για τον ίδιο λόγο, η αρμόδια Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τη σύνταξη ευρωπαϊκών προδιαγραφών (CEN) προτείνει τη χρήση του όρου ασφαλτος ως το συνδετικό υλικό μιγμάτων για εύκαμπτα οδοστρώματα, έναντι του γενικότερου όρου bitumen.

2.2. ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΣΦΑΛΤΟΙ

Η φυσική ασφαλτος προέρχεται από φυσική μεταλλαγή του αργού πετρελαίου. Αυτή επιτεύχθηκε πριν εκατομμύρια χρόνια κάτω από την επίδραση βακτηριδίων. Η βακτηριδιακή αυτή αποσύνθεση του αργού πετρελαίου είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί η περιεκτικότητα του αργού πετρελαίου σε κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες, κυρίως n-αλκυλένια και σε ελαφρά έλαια και να γίνει έτσι το αργό πετρέλαιο περισσότερο βαρύ και παχύρρευστο παίρνοντας τη μορφή της ασφάλτου.

2.2.1. Ασφαλτος νήσου Τριάδος (Trinidad)

Η ασφαλτος που προέρχεται από τη νήσο Τριάδος είναι η περισσότερο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη φυσική ασφαλτος, η οποία χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε έργα οδοποιίας. Τα αποθέματα είναι επιφανειακά και σχηματίζουν «λίμνες». Από το γεγονός αυτό η φυσική αυτή ασφαλτος είναι γνωστή και ως «Ασφαλτος λίμνης» (Lake asphalt). Η κυριότερη και μεγαλύτερη λίμνη ασφάλτου βρίσκεται στο νότιο τμήμα της νήσου. Η συνολική επιφάνεια της είναι περίπου 500 στρέμματα, το μέγιστο βάθος της περίπου 90m και υπολογίζεται ότι υπάρχουν περί τα 15 εκατομμύρια τόνοι

ασφάλτου, που είναι ένα από τα μεγαλύτερα αποθέματα καλής ποιότητας φυσικής ασφάλτου στον κόσμο.

Το παράδοξο είναι ότι παρόλο που συνεχώς εξορύσσεται άσφαλτος, τα αποθέματα παραμένουν σχεδόν τα ίδια. Η εξόρυξη είναι επιφανειακή και η επιφάνεια της «ασφαλτικής» λίμνης είναι τόσο σκληρή ώστε να δύναται να παραλάβει τα φορτία των εξορυκτικών μηχανημάτων.

Η φυσική άσφαλτος της Τριάδος έτσι όπως βγαίνει περιέχει μικρή ποσότητα ύδατος και ξένα υλικά, κυρίως φυτική ύλη και πέτρες, τα οποία απομακρύνονται αφού θερμανθεί στους 160°C και παράλληλα «κοσκινιστεί». Το καθαρό προϊόν, γνωστό ως Trinidad Epure, έχει την έξης τυπική σύνθεση: 54% άσφαλτο, 36% ορυκτές ουσίες και 10% οργανικές ουσίες. Η χημική σύνθεση της ασφάλτου, καθώς και άλλων φυσικών ασφάλτων, δίνεται στον Πίνακα 2.1.

Η καθαρή άσφαλτος (Trinidad Epure) είναι πολύ σκληρή (δισειδυτικότητα περίπου 2pen και σημείο μάλθωσης περίπου 95°C) για να χρησιμοποιηθεί ως έχει στην παραγωγή ασφαλτομιγμάτων. Έτσι, αναμιγνύεται με μαλακή πετρελαϊκή άσφαλτο (συνήθως 200pen) για να παραχθεί κατάλληλη άσφαλτος οδοστρωσίας. (Σε αναλογία 50/50 παράγεται άσφαλτος 50pen.)

2.2.2. Άσφαλτος Βενεζουέλας και Γιούτα

Η φυσική άσφαλτος της Βενεζουέλας, περιοχής Guanoco, είναι και αυτή επιφανειακή, σχηματίζει λίμνη και είναι παρόμοια με αυτήν της νήσου Τριάδος. Η καλυπτόμενη έκταση είναι μεγαλύτερη, περίπου 4.000 στρέμματα αλλά με λιγότερο βάθος, μέγιστο 3m. Οι ποσότητες που υπάρχουν είναι περίπου οι ίδιες με αυτές της νήσου της Τριάδος και η περιεκτικότητα σε άσφαλτο είναι περίπου 64%. Η φυσική αυτή άσφαλτος δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο της νήσου της Τριάδος.

Η φυσική άσφαλτος της Γιούτα των ΗΠΑ, περιοχή Whiterocks, είναι το μεγαλύτερο σε έκταση εμφανές επιφανειακό ασφαλτικό κοιτάσμα στον κόσμο (76.000 στρέμματα με βάθος περίπου 300m). Η περιεκτικότητα του κοιτάσματος σε άσφαλτο, σε σύγκριση με τις δύο προαναφερθείσες φυσικές ασφάλτους, είναι μόνο 10% περίπου, με αποτέλεσμα η εξόρυξη της να είναι επί του παρόντος ασύμφορη.

2.2.3. Άλλες φυσικές άσφαλτοι

Όλες οι άλλες φυσικές άσφαλτοι υπό μορφή πετρώματος, όπως αναφέρθηκαν, δεν είναι εμφανή επιφανειακά κοιτάσματα. Βρίσκονται σε κάποιο βάθος που κυμαίνεται από 3m έως 1000m. Η τυπική περιεκτικότητα των κοιτασμάτων σε άσφαλο κυμαίνεται από 5 έως 20%. Λόγω της μικρής αυτής περιεκτικότητας και της δαπανηρής και χρονοβόρου διαδικασίας καθαρισμού και εμπλουτισμού της, συνήθως με τεχνητή μαλακή άσφαλο ή/και διαλύτες, η εκμετάλλευση των φυσικών αυτών ασφάλτων καθίσταται ασύμφορη. Έτσι είναι πολύ περιορισμένη η χρήση αυτών τόσο στην οδοποιία όσο και στις άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση ορισμένων φυσικών ασφάλτων.

Χώρα Εμφάνισης	Μέσο ποσοστό ασφάλτου (%)	Χημική σύσταση (μέσος όρος τιμών)				
		Κεκορεσμ. υδρογον. (%)	Αρωματ. υδρογον. (%)	Ρητίνες (%)	Ασφαλ- τένια (%)	Περιεκ. θείου (%)
Νήσος Τριάδος Trinidad	54	5.7	24.8	38.5	31.0	6.0-8.0
Βενεζουέλα	64	-	-	-	-	5.9
Αλμπέρτα	2 - 8	17.2	38.2	29.3	15.3	3.54
Καναδάς		13.6	39.8	40.6	6.0	5.30
Athabasca		14.1	20.3	53.3	12.3	-
		14.2	20.6	51.6	13.7	-
N.A.Γαλλία		14.6	30.6	47.9	6.9	-
Περιοχή Tham	-	14.0	25.1	52.0	8.9	-
		10.8	31.8	30.6	26.8	-
Ελβετία		20.5	12.4	53.6	13.5	0.77
Κοιλάδα Travers	-	22.6	27.9	42.3	7.2	1.10
Αλβανία Selenizza	8 - 14	-	-	-	-	6.1
Ρουμανία Derna	15-22	-	-	-	-	0.7
N.Δ.Γαλλία υφαλολεκάνη σε βάθος 1900-2600m	-	1.2-4.6	14.4-35.3	34.6-48.7	19.4-46.8	7.9-10.6

Εξαίρεση παρουσιάζει ο ασφαλτόλιθος της νήσου Μπούτον, (νοτίως της νήσου Σουλουάση), στην Ινδονησία. Στη νήσο αυτή ο ασφαλτόλιθος σχηματίζει βουνά. Το πέτρωμα περιέχει σκληρή φυσική άσφαλο (5-1 Open) σε ποσοστό 15-30% και εύθρυπτο ασβεστόλιθο με προσμίξεις απολιθωμένων οστράκων. Η εξόρυξη είναι πολύ

εύκολη και φτηνή, λόγω και του φτηνού εργατικού κόστους, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται στην παραγωγή ασφαλτομιγμάτων. Ο ασφαλτόλιθος τρίβεται σε λεπτούς κόκκους (διαμέτρου 0-2mm) και αποτελεί το συνδετικό υλικό με την εμπορική ονομασία Asbuton. Το Asbuton αναμιγνύεται με αδρανή υλικά (συγκεκριμένων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων) και διαλύτες και έτσι παράγεται ψυχρό ασφαλτόμιγμα διαφόρων τύπων για τη συντήρηση και κατασκευή οδοστρωμάτων ελαφράς και μέσης κυκλοφορίας. Λόγω της ιδιαιτερότητας του συνδετικού υλικού αλλά και της διασφάλισης της ποιότητας του μίγματος και της κατασκευής έχει αναπτυχθεί ειδική μεθοδολογία σύνθεσης ασφαλτομίγματος. Τα τελευταία χρόνια, με την, αναπτυχθείσα μεθοδολογία, έχουν συντηρηθεί και κατασκευασθεί επιτυχώς αρκετά οδοστρώματα. Το Lasbutag και το Latasbushir, τοπικές ονομασίες χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων ασφαλτομιγμάτων αντίστοιχα, θεωρούνται ως εναλλακτικά ασφαλτομίγματα χαμηλού κόστους για τη συντήρηση και κατασκευή οδικών δικτύων σε απόμακρες περιοχές της Πολυνησίας.

2.3. ΠΙΣΣΑ

Η πίσσα, όπως προαναφέρθηκε, είναι παράγωγο κλασματικής απόσταξης πρωτογενούς πίσσας η οποία παράγεται από την ενανθράκωση φυσικών οργανικών ουσιών όπως γαιάνθρακας ή ξύλο. Όταν η πρωτογενής πίσσα προέρχεται από γαιάνθρακα τότε το προϊόν ονομάζεται λιθανθρακόπισσα (pitch tar), ενώ όταν προέρχεται από ενανθράκωση ξύλου το προϊόν ονομάζεται ξυλόπισσα (wood tar). Η λιθανθρακόπισσα αναμιγνύεται περαιτέρω με αποστάγματα ελαίων και έτσι παράγεται η επεξεργασμένη πίσσα ή πισσάσφαλτος ή κοινώς πίσσα.

Η κατάταξη της πίσσας γίνεται κυρίως συναρτήσει της θερμοκρασίας ισοιξώδους (EVT) και υπάρχουν οκτώ διαφορετικοί τύποι, σύμφωνα με τις Βρετανικές προδιαγραφές, από 30°C EVT έως 58°C EVT. Η EVT είναι η θερμοκρασία στην οποία 50ml πίσσας έχουν χρόνο ροής 50sec όταν διέρχονται διαμέσου συγκεκριμένης οπής 10mm της ιξωδομετρικής συσκευής για πίσσα. Έτσι, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή EVT τόσο πιο ιξώδης είναι η πίσσα. Πίσσα με 50-58°C EVT είναι κατάλληλη για πυκνά ασφαλτομίγματα βαριάς κυκλοφορίας, ενώ πίσσα με 30-38°C EVT χρησιμοποιείται σε ανοικτού τύπου ασφαλτομίγματα ελαφριάς κυκλοφορίας. Για επιφανειακές (ή

ασφαλτικές) επαλείψεις (surface dressings) χρησιμοποιείται συνήθως πίσσα με 34-46°C EVT.

Η πίσσα χρησιμοποιήθηκε ευρέως, για αρκετά χρόνια, τόσο στην οδοποιία όσο και στην παραγωγή μονωτικών υλικών. Τα τελευταία χρόνια, για λόγους κυρίως περιβαλλοντικούς και υγιεινής, η χρήση της πίσσας έχει ελαχιστοποιηθεί. Σε ορισμένες μάλιστα χώρες, όπως Γερμανία, Ολλανδία και ορισμένες πολιτείες των ΗΠΑ, έχει απαγορευθεί η χρήση της σε έργα οδοποιίας. Σήμερα, η πίσσα χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά και μόνο για την παραγωγή συγκεκριμένων ασφαλτομιγμάτων που δεν προσβάλλονται από βενζίνη ή λάδια (αντί-κηροζινικές στρώσεις), ή για την παραγωγή μίγματος πίσσας και ασφάλτου για ασφαλτικές επαλείψεις. Με μίγμα πίσσας και ασφάλτου επέρχεται καλύτερη επικάλυψη των αδρανών και καλλίτερη πρόσφυση της ασφάλτου στο αδρανές. Το μίγμα πίσσας και ασφάλτου χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά και μόνο στην Αγγλία.

Εκτός των παραπάνου δύο πλεονεκτημάτων η πίσσα ή μίγμα αυτής με άσφαλο δεν έχει να προσφέρει τίποτε περισσότερο. Αντιθέτως, είναι περισσότερο ευαίσθητη στις θερμοκρασιακές μεταβολές με αποτέλεσμα να μαλακώνει ευκολότερα και να σκληραίνει και να θρυμματίζεται γρηγορότερα από αντίστοιχου ιξώδους άσφαλο. Στην Ελλάδα, η πίσσα, παρόλο που δεν έχει απαγορευθεί, δε χρησιμοποιείται σε έργα οδοποιίας εδώ και πολλά χρόνια. Η χρήση της πίσσας στην Ελλάδα, όπως και σε άλλες χώρες, απαντάται σε μεμονωμένες περιπτώσεις για την κατασκευή αντικηροζινικών στρώσεων σε δάπεδα στάθμευσης αεροδρομίων.

2.4. ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ

Η πετρελαϊκή άσφαλτος είναι παράγωγο κλασματικής απόσταξης αργού πετρελαίου (crude oil). Το αργό πετρέλαιο προέρχεται από οργανική ύλη (φυτική και θαλάσσιους οργανισμούς) η οποία, πριν από εκατομμύρια χρόνια, εναποτέθηκε σε πολύ μεγάλα πάχη, μαζί με λάσπη και κομμάτια βράχων, στον πυθμένα των ωκεανών. Υπό την επίδραση του υπερκείμενου βάρους σχηματίστηκαν υδατογενή πετρώματα. Το αλατούχο-λιμνώδες περιβάλλον αποσάθρωσε την οργανική ύλη, η οποία κάτω από την επίδραση των υψηλών πιέσεων, θερμοκρασιών, βακτηριδιακής δράσης και πιθανότατα ακτινοβολίας, μετατράπηκε σε υδρογονάνθρακες της μορφής του αργού πετρελαίου. Περαιτέρω εναποθέσεις σε νεώτερους χρόνους σχημάτισαν νέα στρώματα πετρωμάτων

τα οποία πίεσαν το αργό πετρέλαιο να ανέλθει δια μέσου πορωδών πετρωμάτων προς την επιφάνεια της γης. Στο σημείο που τα πορώδη πετρώματα ήταν υπερκαλυμμένα από συμπαγή μη-πορώδη πετρώματα, το αργό πετρέλαιο μαζί με αέρια σχημάτισε τεράστιες υπόγειες δεξαμενές. Εκεί παρέμεινε και παραμένει μέχρι εξορύξεως.

Αναλόγως της αρχικής συστάσεως της οργανικής ύλης και των συνθηκών που επικράτησαν, το αργό πετρέλαιο απέκτησε τις δικές του φυσικές και χημικές ιδιότητες. Έτσι, κάθε πετρελαιοπαραγωγική περιοχή παράγει το δικό της τύπο αργού πετρελαίου. Η μορφή του αργού πετρελαίου διαφέρει από μαύρο παχύρρευστο έως καστανόξανθο λεπτόρρευστο υγρό. Οι κυριότερες πετρελαιοπαραγωγικές περιοχές είναι η Μέση Ανατολή, οι ΗΠΑ, οι χώρες γύρω από την Καραϊβική θάλασσα, οι χώρες της πρώην Σοβιετικής Ενώσεως, η Βόρειος θάλασσα και η Ινδονησία. Σήμερα παγκοσμίως υπάρχουν πλέον των 1500 τύπων αργού πετρελαίου. Παραγωγή πετρελαϊκής ασφάλτου κατάλληλης για την οδοποιία γίνεται από το αργό πετρέλαιο ορισμένων μόνο περιοχών.

Η πετρελαϊκή ασφάλτος, που από εδώ και στο έξης θα αναφέρεται απλώς ως «άσφαλτος», παράγεται από το υπόλειμμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου κατόπιν περαιτέρω αποστάξεως (με υπό-πίεση). Σχηματική παράσταση παραγωγής ασφάλτου δίνεται στο Σχήμα 2.1. Από τη δεύτερη απόσταξη παράγονται διάφοροι τύποι ασφάλτων που θα χρησιμοποιηθούν σε έργα οδοποιίας και έργα αεροδρομίων (άσφαλτος οδοστρωσίας). Ο τύπος της ασφάλτου που θα παραχθεί καθορίζεται τόσο από την προέλευση του αργού πετρελαίου όσο και από τις συνθήκες υποπίεσης (10-100mmHg) και θερμοκρασίας (350-400°C) που επικρατούν στη στήλη απόσταξης.

Η ασφάλτος μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, όπως να οξειδωθεί, να γαλακτωματοποιηθεί ή να διαλυθεί με διαλύτες. Στην πρώτη περίπτωση παράγεται η οξειδωμένη ασφάλτος, στη δεύτερη το ασφατικό γαλάκτωμα και στην τρίτη το ασφατικό διάλυμα. Τέλος, στην ασφαλτο οδοστρωσίας μπορεί να προστεθούν διάφορα χημικά πρόσθετα (βελτιωτικά) και να παραχθεί η τροποποιημένη ασφάλτος.

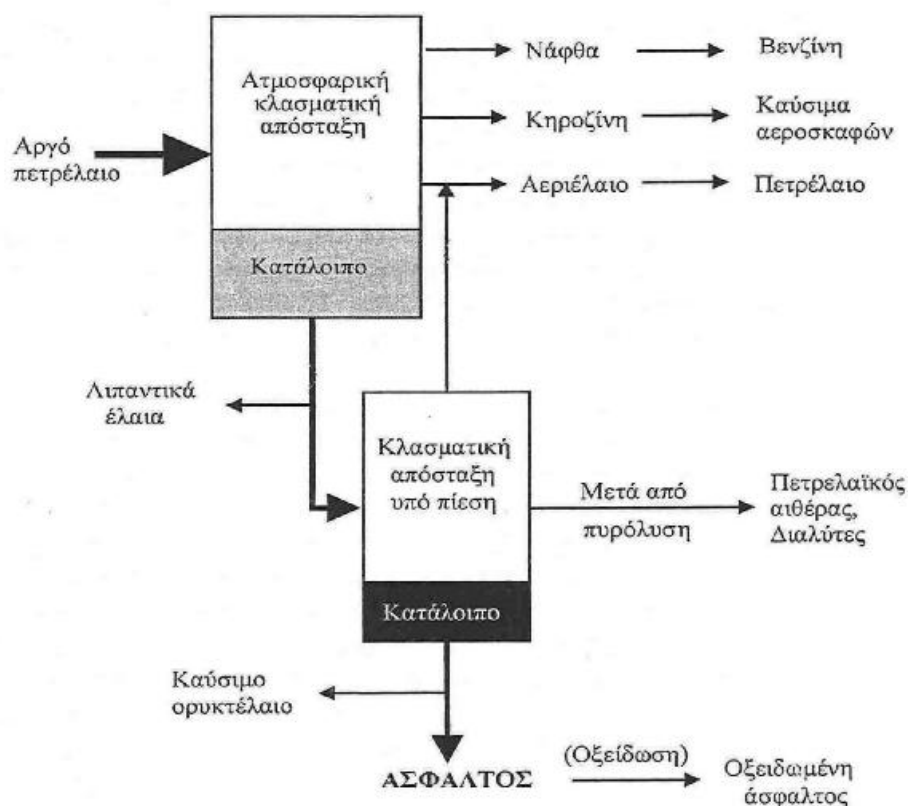
2.4.1. Τύποι ασφάλτων και ταξινόμηση αυτών

Οι διάφοροι τύποι ασφάλτων που υπάρχουν στο εμπόριο μπορούν να χωρισθούν σε δύο γενικότερες κατηγορίες αναλόγως της χρήσεως αυτών: στις ασφάλτους οδοστρωσίας και στις ασφάλτους για βιομηχανική χρήση. Οι ασφαλτοι οδοστρωσίας είναι οι ασφαλτοι όπως παράγονται από την απόσταξη του υπολείμματος

του αργού πετρελαίου, ενώ οι άσφαλοι για βιομηχανική χρήση υφίστανται περαιτέρω οξείδωση.

(α) Άσφαλοι οδοστρώσις

Οι άσφαλοι οδοστρώσις ταξινομούνται, στις περισσότερες χώρες όπως και στην Ελλάδα, συναρτήσει του βαθμού διεισδυτικότητας αυτών (penetration grade), όπου η μονάδα μέτρησης είναι το «pen» (1 pen = 0.1 mm). Οι συνήθεις τύποι ασφάλτων οδοστρώσις είναι οι: 40/50pen, 60/70pen, 80/100pen, 120/150pen και 200/300pen. Η μαλακότερη άσφαλτος είναι αυτή που έχει μεγαλύτερο βαθμό διεισδυτικότητας (ή απλώς μεγαλύτερη διεισδυτικότητα) και η σκληρότερη είναι αυτή που έχει μικρότερο βαθμό διεισδυτικότητας. Το ποια άσφαλτος θα χρησιμοποιηθεί είναι συνάρτηση δύο κυρίως παραγόντων: του τύπου του ασφαλτομίγματος που θα παραχθεί και των θερμοκρασιών περιβάλλοντος που επικρατούν στο έργο. Αναλόγως της χώρας και των αναγκών αυτής, στο ελεύθερο εμπόριο παράγονται και άλλοι τύποι ασφάλτων, κυρίως μαλακότεροι ή και σκληρότεροι των ανωτέρω.



Σχήμα 2.1.: Σχηματικό διάγραμμα παραγωγής ασφάλτου

Ο κάθε τύπος ασφάλτου, πλην της παραπάνω ιδιότητας, της διεισδυτικότητας, παρουσιάζει και άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες, όπως Σημείο μάλθωσης, Ολκιμότητα, Σημείο ανάφλεξης κλπ. Το εύρος τιμών των διαφόρων ιδιοτήτων, αναλόγως των προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται, δίνονται στους πίνακες 2.2, 2.3 και 2.4. Στην Ελλάδα οι ιδιότητες των ασφάλτων οδοστρωσίας καθορίζονται από την Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή (ΠΤΠ) Α200, βασίζονται σε παλιές Αμερικανικές προδιαγραφές και δίνονται στον πίνακα 2.2. Για λόγους καθαρά ενημερωτικούς και δεδομένου ότι οι ελληνικές προδιαγραφές είναι του 1966, κρίθηκε σκόπιμο να δοθούν και οι νεότερες προδιαγραφές που ισχύουν σήμερα σε άλλες χώρες του εξωτερικού όπως στις ΗΠΑ (Πίνακας 2.3) και στην Αγγλία (Πίνακας 2.4). Ανάλογες είναι οι ταξινομήσεις και οι προδιαγραφές που ισχύουν και σε όλες τις άλλες χώρες.

Στις ΗΠΑ, από το 1980 οι άσφαλοι ταξινομούνται κυρίως συναρτήσει του ιξώδους σε μονάδες poises στους 60°C, δίχως να είναι απαγορευτική η ταξινόμηση συναρτήσει του βαθμού διεισδυτικότητας. Η αλλαγή αυτή κρίθηκε σκόπιμη, επειδή θεωρήθηκε ότι ο έλεγχος της διεισδυτικότητας είναι εμπειρικός και ακατάλληλος να καθορίσει επακριβώς τον τύπο της ασφάλτου από την πλειάδα των ασφάλτων οδοστρωσίας που υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο. Υπάρχουν δύο σειρές τύπων ασφάλτου συναρτήσει του ιξώδους. Η μία σειρά βασίζεται στη μέτρηση του ιξώδους της «αρχικής» ασφάλτου και φέρει τα αρχικά AC ακολουθούμενα από έναν αριθμό που δηλώνει το ιξώδες, σε εκατοστά του poise. Η δεύτερη βασίζεται στη μέτρηση του ιξώδους μετά από θέρμανση της ασφάλτου για 5 ώρες στους 163°C και φέρει τα αρχικά AR ακολουθούμενα από έναν αριθμό που δηλώνει και πάλι το ιξώδες σε εκατοστά του poise. Οι τύποι των ασφάλτων οδοστρωσίας συναρτήσει του ιξώδους της αρχικής ασφάλτου καθώς και οι απαιτήσεις των λοιπών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων αυτών, σύμφωνα με τις Αμερικανικές προδιαγραφές δίνονται στον πίνακα 2.5. Παρόμοιος πίνακας για τις ιδιότητες των ασφάλτων AR- μετά από θέρμανση διατίθεται στη βιβλιογραφία.

(β) Άσφαλοι για βιομηχανική χρήση

Οι άσφαλοι για βιομηχανική χρήση είναι κατά κανόνα οι οξειδωμένες άσφαλοι. Η οξείδωση λαμβάνει χώρα μετά την παραγωγή της ασφάλτου, και συνίσταται στην εμφύσηση αέρα δια μέσου της θερμής μάζας της ασφάλτου (θερμοκρασίες 240°C - 320°C). Η διαδικασία οξείδωσης προϋποθέτει την ύπαρξη

ειδικής εγκατάστασης (στήλης οξείδωσης κλπ.) και εκτελείται ανά «παρτίδα» ασφάλτου ή σε συνεχή τροφοδοσία ασφάλτου. Η οξείδωση «αφυδατώνει» την ασφαλτο με αποτέλεσμα, κατά κύριο λόγο, να αυξάνεται το μοριακό βάρος των ασφαλενίων αλλά και να δημιουργούνται επιπλέον ασφαλένια από τη συνεχή φάση των ελαίων (μαλτένια), με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία «ασφάλτου» με μεγαλύτερο μοριακό βάρος. Λόγω αυτών των αλλαγών που επέρχονται κατά την οξείδωση, η ασφαλτος σκληραίνει και γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στις θερμοκρασιακές μεταβολές (αυξάνεται ο Δείκτης διεισδυτικότητας P.I.). Βεβαίως, λόγω της σκλήρυνσης που επέρχεται, η οξειδωμένη ασφαλτος ρηγματώνεται ευκολότερα σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός.

Πίνακας 2.2.: Τύπος και ιδιότητες ασφάλτων οδοστρωσίας σύμφωνα με τις Αμερικανικές προδιαγραφές ΠΤΠ Α200.

Ιδιότητες	Τύποι Ασφάλτου Οδοστρωσίας							
	20/30	40/50	50/60	60/70	80/100	120/150	180/200	220/320
Διεισδυτικότητα στους 25° C, rep	20-30	40-50	50-60	60-70	80-100	120-150	180-120	220-320
Σημείο μάλθωσης, ° C	55-69	47-60	48-58	48-56	44-53	40-48	37-43	34-39
Δείκτης διεισδυτικότητας (P.I.), από/έως	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7	-1/+0.7
Ολκιμότητα στους:								
25° C, cm	> 25	> 60	> 70	> 100	> 100	> 100	> 100	-
15° C, cm	-	-	-	-	-	-	-	> 100
Σημείο ανάφλεξης, ° C (ανοικ. δοχείο)	> 250	> 250	> 230	> 230	> 230	> 220	> 220	> 175
Διαλυτότητα σε διθειάνθρακα (%)	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5
Διαλυτότητα σε τετραχλωράνθρακα (%)	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0
Γέφρα, % κατά βάρος	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Απώλεια βάρους μετά από θέρμανση (5h στους 165° C), (%)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 2.0	< 2.0
Διεισδυτικότητα μετά από θέρμανση, % της αρχικής, στους 25° C	> 80	> 70	> 80	> 80	> 80	> 80	> 75	> 75
Παράφινη, % κατά βάρος	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0
Θερμοκρασία εφαρμογής								
- για διάχυση, ° C	-	-	-	-	150-185	135-175	135-175	135-175
- για ανάμειξη, ° C	175-200	165-180	160-185	150-175	150-165	135-165	135-165	100-135

Ο βαθμός και το μέγεθος της μεταβολής που επέρχεται επί των ρεολογικών ιδιοτήτων της ασφάλτου επηρεάζεται από το ιξώδες της αρχικής ασφάλτου, από την προέλευση του αργού πετρελαίου, από το χρόνο οξείδωσης και από τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η οξείδωση. Αν υποθεθεί ότι το ιξώδες της αρχικής ασφάλτου καθώς και η προέλευση του αργού πετρελαίου είναι δεδομένη, το μόνο που μένει για να παραχθεί οξειδωμένη ασφαλτος συγκεκριμένης ποιότητας είναι να αλλάξει ο χρόνος και η θερμοκρασία οξείδωσης. Κατά κανόνα, με παρατεταμένο χρόνο οξείδωσης σε

συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες παράγεται ασφαλτος με μεγαλύτερο ιξώδες (πολύ σκληρές). Πλην όμως, και οι δύο παράμετροι επηρεάζουν το κόστος και την ταχύτητα παραγωγής. Από πρόσφατη έρευνα που έγινε στην Ελλάδα διαπιστώθηκε ότι η παρουσία ορισμένων οργανικών συμπλόκων (β-δικετονών με δικαρβονικά ή υδροξυλικά οξέα) μειώνει το χρόνο οξείδωσης, για το ίδιο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Πίνακας 2.3.: Τύπος και ιδιότητες ασφάλτων οδοστρωσίας σύμφωνα με τις Αμερικανικές προδιαγραφές AASHTO M 20-70.

Ιδιότητες	Τύποι ασφάλτων οδοστρωσίας (ταξινόμηση βάσει διεισδυτικότητας)				
	40/50	60/70	85/100	120/150	200/300
Διεισδυτικότητα στους 25°C, pen	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Σημείο ανάφλεξης, °C	> 232	> 232	> 232	> 218	> 177
Ολκιμότητα στους 25° C, cm	> 100	> 100	> 100	> 100	-
Διαλυτότητα σε τριχλωροαιθυλένιο, %	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99
Μετά από θέρμανση στους 163°C για 5 ώρες:					
- Απώλεια βάρους, %	< 0.8	< 0.8	< 1.0	< 1.3	< 1.5
- Διεισδυτικότητα, % της αρχικής	> 58	> 54	> 50	> 46	> 40
- Ολκιμότητα στους 25°C	-	> 50	> 75	> 100	> 100

Πίνακας 2.4.: Τύποι και ιδιότητες ασφάλτων οδοστρωσίας σύμφωνα με τις Βρετανικές προδιαγραφές BS 3690, Part 1.

Ιδιότητες	Τύποι ασφάλτων οδοστρωσίας									
	15pen	25pen	35pen	40pen	50pen	70pen	100pen	200pen	300pen	450pen
Διεισδυτικότητα, στους 25° C	15±5	25±5	35±7	40±10	50±10	70±10	100±20	200±30	300±45	450±65
Σημείο μάλθωσης, ° C	63-76	57-69	52-64	58-68	47-58	44-54	41-51	33-42	30-39	25-34
Μετά από θέρμανση στους 163° C για 5 h										
- Απώλεια βάρους %	< 0.1	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.5	< 0.5	< 1.0	< 1.0
- Απώλεια διεισδυτικότητας, % της αρχικής	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 25	< 25
Διαλυτότητα σε τριχλωροαιθυλένιο %	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5

Πίνακας 2.5.: Τύποι και ιδιότητες ασφάλτων οδοστρωσίας σύμφωνα με τις Αμερικανικές προδιαγραφές AASHTO M 226-80.

Ιδιότητες	Τύποι ασφάλτων οδοστρωσίας (Ταξινόμηση βάσει του ιξώδους της αρχικής ασφάλτου)					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Ιξώδες στους 60°C, poises	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Ιξώδες στους 135°, mm ² /s	> 125	> 175	> 250	> 300	> 350	> 400
Διεισδυτικότητα στους 25°C, pen	> 220	> 140	> 80	> 60	> 50	> 40
Σημείο ανάφλεξης, °C	> 163	> 177	> 219	> 232	> 232	> 232
Διαλυτότητα σε τριχλωρο-αιθυλένιο, (%)	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0	> 99.0
Μετά από θέρμανση στους 163°C για 5 ώρες:						
- Απώλεια βάρους ⁽¹⁾ , %	-	< 1.0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
- Ιξώδες στους 60°C, poises	< 1000	< 2000	< 4000	< 8000	< 12000	< 16000
- Ολκιμότητα στους 25°C, cm	> 100 ⁽²⁾	> 100	> 75	> 50	> 40	> 25

(1) Προαιρετικά

(2) Αν η ολκιμότητα στους 25°C είναι μικρότερη του 100, το υλικό γίνεται αποδεκτό εάν η ολκιμότητα στους 15,6° C είναι κατ' ελάχιστον 100

Σε αντίθεση με τις ασφάλτους οδοστρωσίας, οι άσφαλτοι για βιομηχανική χρήση (στέγες, δάπεδα, μαστίχες, επικαλύψεις σωληνώσεων, χρώματα C, κλπ.) ταξινομούνται συναρτήσει του σημείου μάλθωσης και του βαθμού διεισδυτικότητας. Έτσι, μία οξειδωμένη άσφαλτος 85/25 σημαίνει ότι έχει σημείο μάλθωσης 85°C και διεισδυτικότητα 25pen, φυσικά με κάποιες αποκλίσεις που καθορίζονται από τις εκάστοτε προδιαγραφές.

Οι τύποι και οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των οξειδωμένων ασφάλτων, σύμφωνα με τις Βρετανικές και τις Αμερικανικές προδιαγραφές δίνονται στους πίνακες 2.6 και 2.7.

2.4.2. Χημική σύσταση και δομή της ασφάλτου

Η άσφαλτος είναι ένα πολύπλοκο χημικό μίγμα οργανικών ενώσεων που αποτελείται κυρίως από υδρογονάνθρακες με ένα μικρό ποσοστό ετεροκυκλικών ενώσεων που περιέχουν στα ενεργά τους κέντρα θείο, άζωτο και οξυγόνο. Η άσφαλτος επίσης περιέχει ίχνη μετάλλων νικελίου, μαγνησίου, σιδήρου, βαναδίου και ασβεστίου με τη μορφή ανόργανων αλάτων και οξειδίων. Στοιχειακή ανάλυση ασφάλτων που παράχθηκαν από αργό πετρέλαιο από διάφορες πηγές έδειξε ότι οι περισσότερες άσφαλτοι περιέχουν: άνθρακα 82-88%, υδρογόνο 8-11 %, θείο 0-6%, οξυγόνο 0-1.5%

και άζωτο 0-1 %. Η ακριβής σύνθεση της ασφάλτου διαφέρει και εξαρτάται τόσο από την πηγή του πετρελαίου και την τροποποίηση που επέρχεται κατά την κλασματική απόσταξη αυτού, όσο και από την επερχόμενη «γήρανση» της ασφάλτου.

Πίνακας 2.6.: Τύποι οξειδωμένων ασφάλτων για βιομηχανική χρήση κατά BS 3690, Part 2.

Ιδιότητες	Προδια- γραφή ελέγχου	Τύποι οξειδωμένων ασφάλτων					
		75/30	85/25	85/40	95/25	105/35	115/15
Σημείο Μάλθωσης, ° C	BS2000: Part 58	75±5	85±5	85±5	95±5	105±5	115±5
Διεισδυτικότητα 25° C, Pen	BS200: Part 49	30±5	25±5	40±5	25±5	35±5	15±5
Απώλεια βάρους μετά από θέρμανση στους 163° C, % κατά βάρος	BS2000: Part 45	< 0.2	< 0.2	< 0.5	< 0.2	< 0.5	< 0.2
Διαλυτότητα σε τριχλωρο- αιθυλένιο, % κατά βάρος	BS200: Part 47	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5

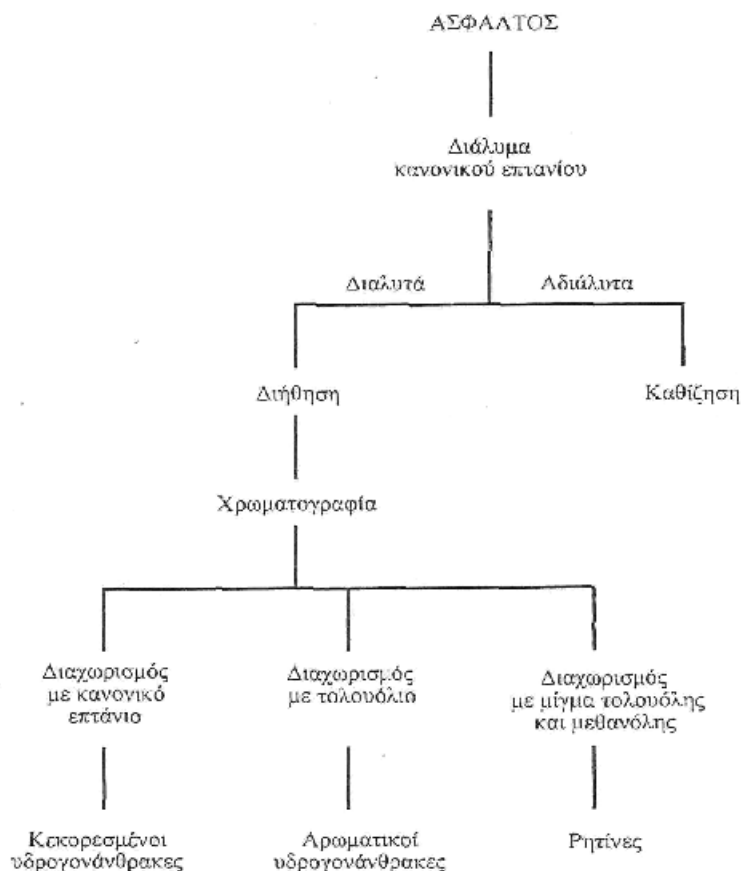
Πίνακας 2.7.: Τύποι οξειδωμένων ασφάλτων για στεγάνωση και υγρομόνωση κατά ASTM D 449-89.

Ιδιότητες	Προδια- γραφή ελέγχου	Τύποι οξειδωμένων ασφάλτων					
		75/30	85/25	85/40	95/25	105/35	115/15
Σημείο Μάλθωσης, ° C	BS2000: Part 58	75±5	85±5	85±5	95±5	105±5	115±5
Διεισδυτικότητα 25° C, Pen	BS200: Part 49	30±5	25±5	40±5	25±5	35±5	15±5
Απώλεια βάρους μετά από θέρμανση στους 163° C, % κατά βάρος	BS2000: Part 45	< 0.2	< 0.2	< 0.5	< 0.2	< 0.5	< 0.2
Διαλυτότητα σε τριχλωρο- αιθυλένιο, % κατά βάρος	BS200: Part 47	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5	> 99.5

Παρ' όλη την πολυπλοκότητα της χημικής συνθέσεως της ασφάλτου είναι δυνατόν να διαχωρίσουμε αυτήν σε δύο ευρύτερες χημικές ομάδες και να πάρουμε έτσι χρησιμότερες πληροφορίες για τις φυσικές της ιδιότητες που επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά της σε διάφορες εφαρμογές, όπως στην οδοποιία. Οι δύο χημικές ομάδες

είναι τα ασφαλτένια και τα μαλτένια. Τα μαλτένια μπορούν ακόμη να υποδιαιρεθούν σε κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες, σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες και σε ρητίνες.

Ο διαχωρισμός της ασφάλτου στα παραπάνω κλάσματα γίνεται με τέσσερις μεθόδους: (α) εκχύλιση με διαλύτες, (β) χρωματογραφία, (γ) κλασματική απόσταξη και (δ) προσρόφηση πάνω σε λεπτόκοκκες στερεές ουσίες και απομάκρυνση των μη προσροφηθέντων με διήθηση. Από τις τέσσερις μεθόδους οι δύο πρώτες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Η πρώτη είναι σχετικά απλή και γρήγορη αλλά με όχι τόσο ακριβή διαχωρισμό όσο η χρωματογραφία. Η χρωματογραφία είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα. Η βάση στη χρωματογραφία είναι να διαχωρισθούν τα ασφαλτένια. Τα ασφαλτένια είναι αδιάλυτα σε διάλυμα κανονικού επτανίου και έτσι κατακρημνίζονται ως ίζημα. Τα μαλτένια είναι διαλυτά στο κανονικό επτάνιο καθώς και σε άλλους διαλύτες. Σχηματική παρουσίαση του διαχωρισμού της ασφάλτου δίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Σχηματική παρουσίαση διαχωρισμού της ασφάλτου.

2.4.2.1. Ασφαλτένια

Τα ασφαλτένια περιέχουν, πλην του άνθρακα και υδρογόνου, άζωτο, θείο και οξυγόνο και έχουν πολύ μεγάλο μοριακό βάρος που από διάφορους ελέγχους βρέθηκε ότι μεταβάλλεται από 1.000 έως 300.000, αναλόγως της μεθόδου καθορισμού και της προέλευσης του αργού πετρελαίου. Η περιεκτικότητα της ασφάλτου σε ασφαλτένια επηρεάζει άμεσα τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου. Αυξάνοντας το ποσοστό των ασφαλτενίων παράγεται άσφαλτος με χαμηλή διεισδυτικότητα, υψηλό σημείο μάλθωσης και κατά συνέπεια υψηλό ιξώδες. Το ποσοστό των ασφαλτενίων στην άσφαλτο συνήθως κυμαίνεται από 5% έως 28%.

2.4.2.2. Μαλτένια

(α) Ρητίνες

Οι ρητίνες είναι διαλυτές στο κανονικό επτάνιο και αποτελούνται από τα ίδια συστατικά με τα ασφαλτένια, πλην όμως έχουν μικρότερο μοριακό βάρος (500 έως 50.000). Οι ρητίνες είναι ισχυρές πολικές ενώσεις σε στερεά ή ημιστερεά μορφή χρώματος σκούρου καφέ. Παίζουν το ρόλο διασπορέων των ασφαλτενίων και η αναλογία αυτών στην άσφαλτο καθορίζει κατά ένα βαθμό τον τύπο συμπεριφοράς της ασφάλτου ως κολλοειδούς διαλύματος (SOL) ή ζελατίνη (GEL).

(β) Αρωματικές ουσίες

Οι αρωματικές ουσίες είναι αρωματικοί ναφθενικοί υδρογονάνθρακες, έχουν το χαμηλότερο μοριακό βάρος των ενώσεων στην άσφαλτο (300 έως 2.000) και αντιπροσωπεύουν το κυριότερο μέσο διασποράς των ασφαλτενίων. Είναι ιξώδη ρευστά σκούρου καφέ χρώματος και βρίσκονται σε ποσοστό 40 έως 65% στην άσφαλτο.

(γ) Κεκορεσμένες ουσίες

Οι κεκορεσμένες ουσίες είναι αλιφατικοί υδρογονάνθρακες με αλκυλ-ναφθένια και αλκυλ-αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Το μοριακό τους βάρος είναι όμοιο με των αρωματικών ουσιών και τα συστατικά τους περιέχουν κηροειδή ή κηροειδή κεκορεσμένα. Οι κεκορεσμένες ουσίες είναι μη πολικά ιξώδη έλαια, χρώματος ξανθού ή λευκού και βρίσκονται σε αναλογία 5 έως 20% στην άσφαλτο.

Η ασφάλτος, γενικά, θεωρείται ως ένα κολλοειδές σύστημα που αποτελείται από υψηλού μοριακού βάρους μικύλια διασπαρμένα ή διαλυμένα σε ένα χαμηλότερου μοριακού βάρους ελαϊκό μέσο διασποράς, τα μαλτένια.

Οποιαδήποτε αυξομείωση των ασφατενίων και των μαλτενίων, ιδιαίτερα των ρητινών και των κεκορεσμένων, επηρεάζει το ιξώδες και τη θερμοκρασιακή ευαισθησία της ασφάλτου (σκληρότητα). Αυξομείωση των παραπάνω λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια και τον τρόπο παραγωγής της ασφάλτου.

2.4.3. Συσχέτιση μεταξύ αλλαγής της χημικής σύστασης και των φυσικών ιδιοτήτων της ασφάλτου

Κατά τη διάρκεια των κλασματικών αποστάξεων (ατμοσφαιρική ή υπο-πίεση) επέρχεται απομάκρυνση (με εξάτμιση) των ελαφρότερων πτητικών συστατικών της ασφάλτου η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ασφατενίων. Επίσης, αύξηση της περιεκτικότητας σε ασφατένια παρατηρείται και κατά την οξείδωση αυτής για την παραγωγή οξειδωμένης ασφάλτου. Το γεγονός αυτό, όπως προαναφέρθηκε, κάνει την ασφάλτο πιο σκληρή και λιγότερο ευαίσθητη στις θερμοκρασιακές αλλαγές, που σημαίνει αύξηση του Δείκτη διεισδυτικότητας (P.I.).

Η χημική σύσταση της ασφάλτου αλλάζει επίσης και κατά τη διάρκεια της χρήσης αυτής. Δηλαδή από τη στιγμή που θερμαίνεται για να χρησιμοποιηθεί μέχρι το τέλος της διάρκειας ζωής της. Η αλλαγή αυτή είναι γνωστή, στη γλώσσα των μηχανικών, ως γήρανση και επιφέρει περαιτέρω σκλήρυνση της ασφάλτου. Οι μεγαλύτερες αλλαγές λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο της ανάμιξης και της συμπίκνωσης. Ως εκ τούτου, μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην ενδεδειγμένη θερμοκρασία ανάμιξης και διάστρωσης των ασφαλτομιγμάτων.

Μετά την κατασκευή και λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας της ασφάλτου επέρχεται φυσική σκλήρυνση αυτής και έκτοτε σταδιακή χημική σκλήρυνση. Η φυσική σκλήρυνση της ασφάλτου οφείλεται στην επαναδιάταξη των μορίων λόγω πτώσης της θερμοκρασίας και στην εξάτμιση μέρους των πτητικών συστατικών. Η σκλήρυνση λόγω επαναδιάταξης των μορίων είναι φαινόμενο αναστρέψιμο ενώ η σκλήρυνση λόγω εξάτμισης των πτητικών συστατικών είναι μη αναστρέψιμο φαινόμενο.

2.5. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΚΑΙ ΟΔΩΝ

Αν και όλες οι μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων παίρνουν υπόψη την αντοχή και σύνθεση του υπεδάφους και των στρώσεων του οδοστρώματος, τα χαρακτηριστικά φορτίου και κυκλοφορίας, τις συνθήκες του περιβάλλοντος και τους οικονομικούς παράγοντες σχεδιασμού και κατασκευής, η φιλοσοφία σχεδιασμού ανάμεσα στα οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων είναι διαφορετική. Η κυριότερη διαφορά είναι ο αριθμός επαναλήψεων τάσης. Ο αριθμός επαναλήψεων τάσης σε μία οδό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της οδού. Μία δευτερεύουσα οδός, π.χ., δέχεται λιγότερα από 100 οχήματα την ημέρα. Αντίθετα πρωτεύοντες αυτοκινητόδρομοι μεγάλου κυκλοφοριακού φόρτου δέχονται κυκλοφορία μεγαλύτερη ίσως από 25.000 αυτοκίνητα την ημέρα. Αν και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των οχημάτων είναι επιβατικά αυτοκίνητα και ελαφρά φορτηγά, που δεν επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, οι αθροιστικές επαναλήψεις τάσης, που χρησιμοποιούνται για την περίοδο σχεδιασμού, μπορεί να είναι ίσως και 10^7 έως 10^8 ισοδύναμα φορτία απλού τροχού (EAL) 18 kips. Αντίθετα με την τιμή αυτή, τα οδοστρώματα αεροδρομίων συνήθως μελετώνται για λιγότερες από 10^5 επαναλήψεις του βαρύτερου κρίσιμου αεροσκάφους, με συνηθέστερες τιμές επαναλήψεων σχεδιασμού μεταξύ 5.000 και 25.000.

Άλλες διαφορές ανάμεσα στους δύο τύπους οδοστρωμάτων είναι τα φορτία σχεδιασμού του συστήματος τροχών, τα πλάτη οδοστρωμάτων, η πλευρική επίδραση της κυκλοφορίας και το τυπικό μέγεθος του έργου. Οι περισσότερες υπηρεσίες οδοποιίας των πολιτειών χρησιμοποιούν σήμερα σαν παράμετρο σχεδιασμού τις ισοδύναμες επαναλήψεις φορτίου απλού τροχού 18 kip σαν δείκτη της έντασης φορτίου και κυκλοφορίας. Σημειώνεται ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα υπολογίζονται γενικά με βάση το κρίσιμο αεροσκάφος.

Τα πλάτη των οδοστρωμάτων έχουν μεγάλη σημασία, επειδή στα αεροδρόμια τα οδοστρώματα είναι συνήθως αρκετά μεγάλα, ώστε η καταπόνηση (λόγω στατικών φορτίων) να συγκεντρώνεται γενικά κοντά στο κέντρο του οδοστρώματος. Τα πλάτη των οδοστρωμάτων οδών, όμως, είναι τέτοια ώστε τα φορτία εφαρμόζονται κοντά στο άκρο του οδοστρώματος. Η επίδραση της κυκλοφορίας στα άκρα προέχει πάντα στον σχεδιασμό. Ακόμη το χαρακτηριστικό αυτό δείχνει τη σημασία όχι μόνο της σωστής

αποστράγγισης, αλλά επίσης και τα ευεργετικά αποτελέσματα των οδοστρωμένων ερεισμάτων.

Τέλος ο μηχανικός πρέπει να έχει πάντα υπόψη την λεπτή διαφορά της φιλοσοφίας σχεδιασμού μεταξύ οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων σχετικά με την κατανομή εδάφους (περιοχές σχεδιασμού).^{*} Αν και κάθε πρόβλημα έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, τα αεροδρόμια συνήθως κατασκευάζονται σε θέσεις πεδινές χωρίς μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Το γεγονός αυτό καθώς και τα μικρά σχετικά μήκη οδοστρωμάτων αεροδρομίων οδηγούν σε μικρότερο αριθμό περιοχών σχεδιασμού εδάφους σε σύγκριση με τα οδοστρώματα οδών. Έτσι όταν σχεδιάζεται μία οδός, ο μηχανικός έχει να πάρει μία ακόμη απόφαση σχετικά με το αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ομοιόμορφος σχεδιασμός με την περιοχή μικρότερης αντοχής εδάφους, ή αν πρέπει να γίνουν διαφορετικοί υπολογισμοί πάχους για κάθε εδαφική περιοχή. Αυτή η απόφαση στηρίζεται σε οικονομικούς καθώς και κατασκευαστικούς παράγοντες.

2.6. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Αν και όλοι οι παράγοντες σχεδιασμού έχουν αναγνωριστεί από τους μηχανικούς οδοστρωμάτων επί μισό αιώνα περίπου, είναι αλήθεια ότι υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στους μηχανικούς και οι μέθοδοι σχεδιασμού που εφαρμόζουν για ορισμένες συνθήκες είναι επομένως διαφορετικές. Αυτό μπορεί να ανησυχήσει καταρχήν τον αναγνώστη. Πρέπει όμως να αναγνωριστεί ότι οι περισσότερες μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων βασίζονται σε διάφορους βαθμούς εμπειρισμού, που αναπτύχθηκε από τη συσχέτιση των μεθόδων σχεδιασμού μεταξύ τους από τις διάφορες υπηρεσίες οδοποιίας. Έτσι δεν είναι ασυνήθιστο να υπολογίζονται διαφορετικά πάχη από διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού για τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους.

Μεγάλο μέρος αυτής της διαφοράς οφείλεται στην έλλειψη ακριβούς και ποσοτικής περιγραφής του τι ακριβώς είναι η αποτυχία του οδοστρώματος οδού. Το υπόλοιπο μέρος προέρχεται από το γεγονός ότι, επειδή η φύση των περισσότερων

^{*} Η επιλογή των μονάδων σχεδιασμού και της αντιπροσωπευτικής για τη μονάδα τιμής αντοχής εδάφους γίνεται πολύ κρίσιμη, όταν εξετάζονται εύκαμπτα οδοστρώματα οδών. Η επιλογή των μονάδων σχεδιασμού γίνεται λιγότερο κρίσιμη για δίσκαμπτα οδοστρώματα λόγω της σχετικής ακαμψίας των οδοστρωμάτων και επομένως της μικρότερης ευαισθησίας του παράγοντα υπεδάφους. Βέβαια η επιτυχία του σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων οδών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του μηχανικού να αναγνωρίζει παρόμοιες συνθήκες εδάφους, περιβάλλοντος και κυκλοφορίας.

μεθόδων είναι εμπειρική, υπήρχαν αρχικά διαφορές στις μεθόδους δοκιμών, στην εκτίμηση των επιδράσεων του περιβάλλοντος καθώς και στους διάφορους τρόπους χειρισμού της κυκλοφορίας. Αφού καταστρώθηκαν οι αρχικές συσχετίσεις συμπεριφοράς-σχεδιασμού, η αδράνεια δυσχέρανε πολύ την εφαρμογή σημαντικών αλλαγών στη μέθοδο σχεδιασμού.

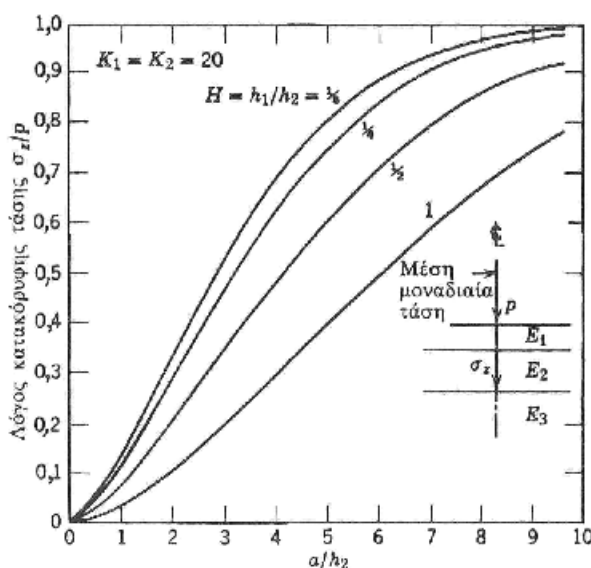
Από το 1959 μέχρι σήμερα παρουσιάστηκαν συνολικά 11 διαφορετικές μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Από τότε έγινε μεγάλη πρόοδος στην τεχνολογία σχεδιασμού και κατασκευής εύκαμπτων οδοστρωμάτων οδών. Η Οδική Δοκιμή AASHO εισήγαγε πολλές σημαντικές έννοιες, όπως η σημαντική επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας και των επαναλήψεων στο πάχος σχεδιασμού. Ίδιας σημασίας ήταν η εισαγωγή ενός ποσοτικού τρόπου καθορισμού συνθηκών «αποτυχίας» ενός οδοστρώματος οδού, που να βασίζεται στην ενόδια χρήση μάλλον παρά στη δομική «αποτυχία». Η έννοια αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης λειτουργικότητας-συμπεριφοράς.

2.7. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Το κεφάλαιο αυτό ασχολήθηκε μέχρι τώρα με το μηχανισμό καθορισμού διαφόρων τάσεων, παραμορφώσεων, και υποχωρήσεων, μέσα σε ένα οδόστρωμα πολλαπλών στρώσεων. Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να δειχθεί πώς μία γενική ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών των ελαστικών στρώσεων μπορεί να οδηγήσει στην κατανόηση των βασικών αρχών σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Τα παραδείγματα που ακολουθούν είναι κάπως απλοποιημένα λόγω του μεγάλου αριθμού συνδυασμών των μεταβλητών A , H , K_1 και K_2 . Η δυνατότητα όμως της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων να δίνει ποσοτική εκτίμηση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων, όταν το γεωμετρικό σχήμα της στρώσης του οδοστρώματος και τα χαρακτηριστικά του υλικού μεταβάλλονται, μας δείχνει τις αρχές που θα σχηματίσουν τον πυρήνα, κάθε μελλοντικής μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων.

Τάσεις του υπεδάφους. Το σχήμα 2.3. δείχνει την επίδραση που έχει η μεταβολή του πάχους της στρώσης του οδοστρώματος πάνω στο συντελεστή κατακόρυφης καταθλιπτικής τάσης σε ένα σύστημα οδοστρώματος τριών στρώσεων. Όπως φαίνεται, η τάση υπεδάφους ελαττώνεται σημαντικά με την ελάττωση της

παραμέτρου A (d/h_2). Αυτό υπονοεί ότι για ένα ορισμένο φορτίο (ακτίνα επαφής a) η ελάττωση αυτή επιτυγχάνεται με μία ελάττωση του πάχους της βασικής στρώσης.



Σχήμα 2.3.: Λόγος κατακόρυφης τάσης στη δεύτερη διαχωριστική επιφάνεια ενός συστήματος τριών στρώσεων σαν συνάρτηση a/h_2 και h_1/h_2 (Κατά Nelson).

Μείωση της τάσης μπορεί επίσης να επιτευχθεί σε μικρότερο βαθμό αυξάνοντας την παράμετρο H (H_1/h_2). Για σταθερό πάχος βασικής στρώσης αυτό μπορεί να γίνει με μία αύξηση του πάχους της επιφανειακής στρώσης.

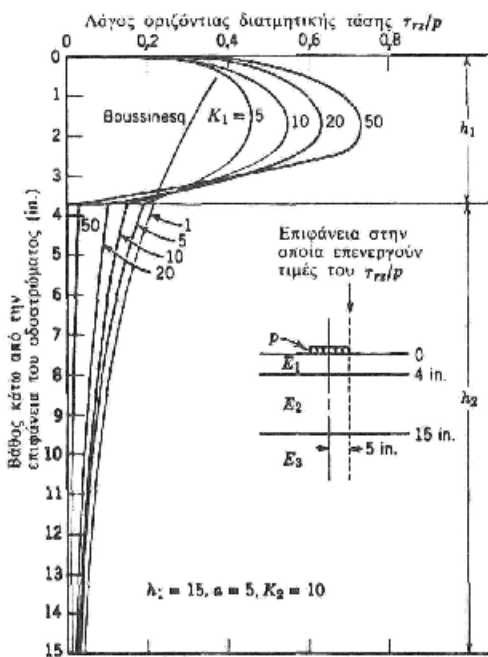
Μία άλλη αποτελεσματική μέθοδος της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης του υπεδάφους είναι η αύξηση της δυσκαμψίας των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος (K_1 και K_2). Σε ένα σύστημα στρώσεων η κύρια επίδραση πάνω στην τάση εξασκείται από τη δυσκαμψία της στρώσης που είναι ακριβώς πάνω από το υπέδαφος. Έτσι σε ένα σύστημα τριών στρώσεων το μέτρο ελαστικότητας E_2 της βασικής στρώσης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της τάσης, ενώ το μέτρο ελαστικότητας E_1 επηρεάζει την τάση του υπεδάφους σε συστήματα δύο στρώσεων. Για να ελαττωθεί η τάση του υπεδάφους μέχρι κάποια ανεκτά όρια, πρέπει ή να αυξηθεί το πάχος της βασικής στρώσης και το πάχος της επιφανειακής στρώσης του ίδιου υλικού στρώσεων ή να αντικατασταθεί το υλικό στρώσεων με ένα πιο δύσκαμπτο υλικό.

Βέλος Κάμψης. Ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος, το ποσοστό του ολικού βέλους κάμψης της επιφάνειας που συνεισφέρει η στρώση του υπεδάφους είναι περίπου 70 έως 95 τοις εκατό. Μπορεί, λοιπόν, να υποθεθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος

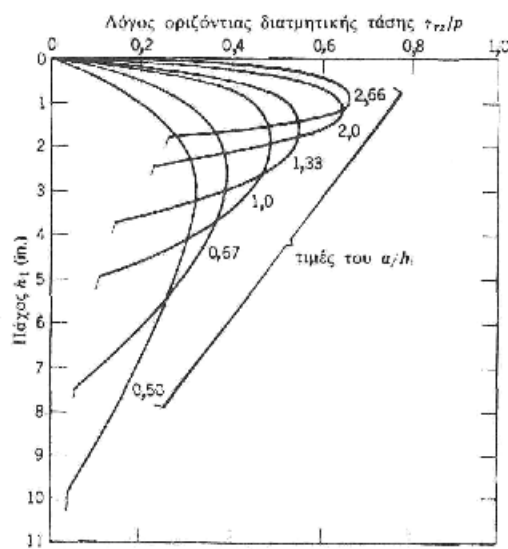
του βέλους κάμψης οφείλεται στην ελαστική σύνθλιψη της στρώσης του υπεδάφους. Τα βέλη κάμψης είναι απλά η μαθηματική ολοκλήρωση της κατακόρυφης παραμόρφωσης με το βάθος. Εφόσον το μέγεθος της παραμόρφωσης, για ένα ορισμένο σημείο σε ένα δεδομένο υλικό, είναι μία απευθείας συνάρτηση τριαξονικής τάσης, συνάγεται ότι οι ίδιοι γενικοί παράγοντες που τείνουν να ελαττώνουν την κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση του υπεδάφους τείνουν, επίσης, να ελαττώνουν το βέλος κάμψης του οδοστρώματος. Γενικά, γίνεται φανερό ότι μία μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας ή τη δυσκαμψία της στρώσης του οδοστρώματος παρά με την αύξηση του πάχους της.

Διατμητική τάση. Το πώς μπορούμε να ελαττώσουμε τις τάσεις του υπεδάφους και τις υποχωρήσεις του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας πιο δύσκαμπτες ανώτερες στρώσεις ή και αυξάνοντας το πάχος τους είναι και επιδίωξη μας στο σχεδιασμό, γιατί ελαχιστοποιεί την καταπόνηση που συνδέεται με διάτμηση του υπεδάφους και συμπύκνωση λόγω φορτίων. Καθώς, όμως, οι ανώτερες στρώσεις γίνονται πιο δύσκαμπτες και παρέχουν αυξημένη ικανότητα εξάπλωσης φορτίων, το όφελος αυτό συνεπάγεται αναπόφευκτα αύξηση της διατμητικής τάσης στη δύσκαμπτη στρώση.

Σε ένα οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο ενός οδοστρώματος πολλαπλών στρώσεων, η μέγιστη οριζόντια διατμητική τάση τ_{tz} δημιουργείται ακριβώς πάνω από την άκρη της φορτισμένης πλάκας. Η τιμή του τ_{tz} είναι μηδέν ακριβώς κάτω από το κεντρικό άξονα της πλάκας και τείνει, επίσης, στο μηδέν, καθώς η ακτινική απόσταση από τον άξονα αυξάνεται. Το Σχήμα 2.4 παριστάνει τον παράγοντα οριζόντιας διατμητικής τάσης σαν συνάρτηση του βάθους κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος σε ένα επίπεδο που διέρχεται από την άκρη της πλάκας για διάφορες τιμές του K_1 . Πολλοί παράγοντες μπορούν να διακριθούν καθώς το μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας αυξάνεται (αύξηση του K_1). Το μέγεθος του τ_{tz} αυξάνεται πολύ στην ανώτερη στρώση, καθώς γίνεται πιο δύσκαμπτη. Η αύξηση αυτή φαίνεται και για την θεωρία Boussinesq, ή μιας στρώσης. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του τ_{tz} στο οδόστρωμα εμφανίζεται περίπου στο μισό βάθος της επιφανειακής στρώσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η οριζόντια διατμητική τάση στην πρώτη διαχωριστική επιφάνεια ελαττώνεται για μεγαλύτερους λόγους μέτρων ελαστικότητας K_1 .



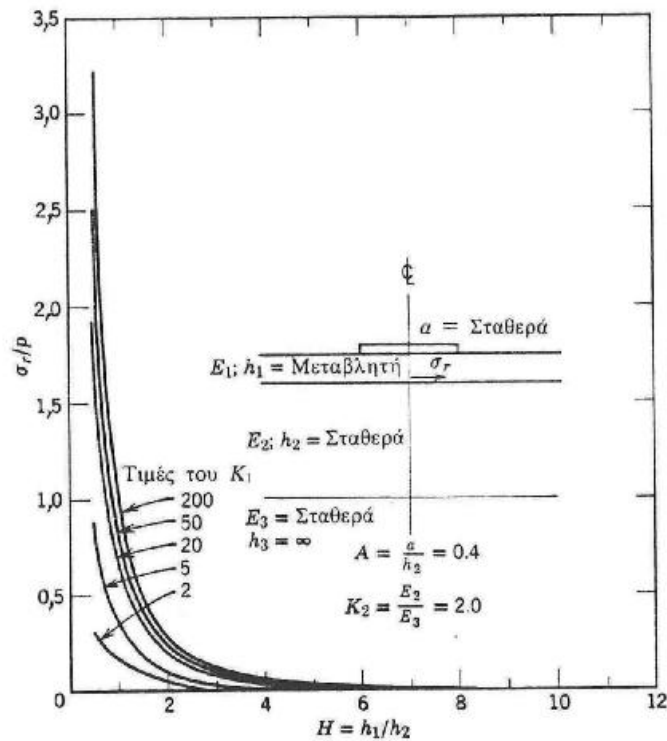
Σχήμα 2.4.:Τυπική κατανομή διατμητικών τάσεων σε ένα σύστημα τριών στρώσεων (Κατά Nielson).



Σχήμα 2.5.: Επίδραση του a/h στο βάθος και μέγεθος του (τ_{rz}/p) για $a = 5$ ίντσες και $K_1 = K_2 = 20$ (Κατά Nielson).

Το πάχος της επιφανειακής στρώσης παίζει επίσης μεγάλο ρόλο στο μέγεθος της διατμητικής τάσης. Το Σχήμα 2.5 δείχνει πως εμφανίζεται αυτή η επίδραση. Για ορισμένους λόγους μέτρων ελαστικότητας K_1 και K_2 είναι φανερό ότι καθώς το πάχος h_1 της επιφανειακής στρώσης αυξάνεται, το μέγεθος της διατμητικής τάσης ελαττώνεται. Επίσης, καθώς το h_1 αυξάνεται, η θέση της μέγιστης τιμής μετατοπίζεται προς τα πάνω από το μισό του πάχους της στρώσης στο ένα τρίτο περίπου.

Εφελκυστική τόση. Μία άλλη σημαντική θεώρηση σε συστήματα στρώσεων είναι η τάση ανάπτυξης μεγάλων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της δύσκαμπτης στρώσης. Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει τους κύριους παράγοντες, που επηρεάζουν αυτήν την παράμετρο. Γενικά, οι πιο κρίσιμοι παράγοντες είναι ένας μεγάλος λόγος K_1 μέτρων ελαστικότητας και μία μικρή παράμετρος H . Όπως φαίνεται επιφανειακές στρώσεις με $H < 2$ και μεγάλη τιμή K_1 είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στην ανάπτυξη μεγάλων εφελκυστικών τάσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι μία μέγιστη εφελκυστική τάση εμφανίζεται σε κάποια χαμηλή τιμή H και ότι μία επακόλουθη μείωση της παραμέτρου αυτής προς το μηδέν θα μετατρέψει την οριζόντια εφελκυστική τάση σε θλιπτική.

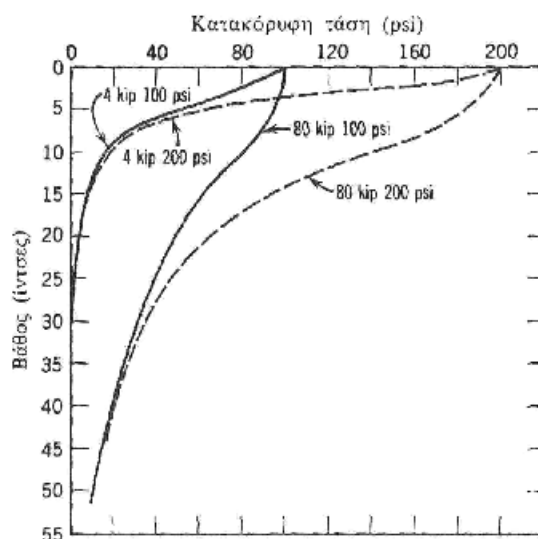


Σχήμα 2.6.: Λόγος οριζόντιας εφελκυστικής τάσης στον πυθμένα της πρώτης στρώσης ενός συστήματος τριών στρώσεων σαν συνάρτηση των K_1 και H .

Επίδραση της Πίεσης Ελαστικού και Ολικού Φορτίου. Το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης σε ένα σημείο λόγω φορτίου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, εξαρτάται από την πίεση αλλά και από το μέγεθος του συνολικού φορτίου. Τα Σχήματα 2.7 και 2.8 παριστάνουν τις κατακόρυφες τάσεις κατά Boussinesq σε μία ιδανική εδαφική μάζα

λόγω διαφόρων συνδυασμών πίεσης ελαστικού και συνολικού φορτίου. Στο Σχήμα 2.7 μία καμπύλη είναι για πίεση ελαστικού 100 psi και απλό φορτίο 80.000 lb. Ακόμη παριστάνεται η κατακόρυφη τάση για το ίδιο φορτίο τροχού αλλά για πίεση 200 psi. Όπως φαίνεται στις καμπύλες η επίδραση της μεγάλης πίεσης ελαστικού είναι έντονη στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος, ενώ σε ένα βάθος 36 ιντσών περίπου οι τάσεις είναι περίπου ίσες και στις δύο περιπτώσεις. Έτσι υψηλές πιέσεις ελαστικού απαιτούν υψηλή ποιότητα υλικών στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος, αλλά το απαιτούμενο ολικό πάχος του οδοστρώματος δεν επηρεάζεται

σημαντικά από τις πιέσεις ελαστικού. Εξάλλου, για μία σταθερή πίεση ελαστικού μία αύξηση ολικού φορτίου αυξάνει την κατακόρυφη τάση σε όλα τα βάθη.



Σχήμα 2.7.: Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης με το βάθος, Πρόβλημα Boussinesq.

Το Σχήμα 2.8 παριστάνει την επίδραση δίδυμων τροχών στις τάσεις για σταθερή πίεση ελαστικού. Οι πιέσεις στην επιφάνεια δεν επηρεάζονται από τη διάταξη των τροχών και είναι ίσες με την εφαρμοζόμενη πίεση ελαστικού. Οι δίδυμοι τροχοί, όμως, συνεπάγονται αυξημένες τάσεις σε μεγαλύτερα βάθη όπως και άξονες εν σειρά, όταν οι βολβοί τάσεων των ελαστικών επικαλύπτονται.

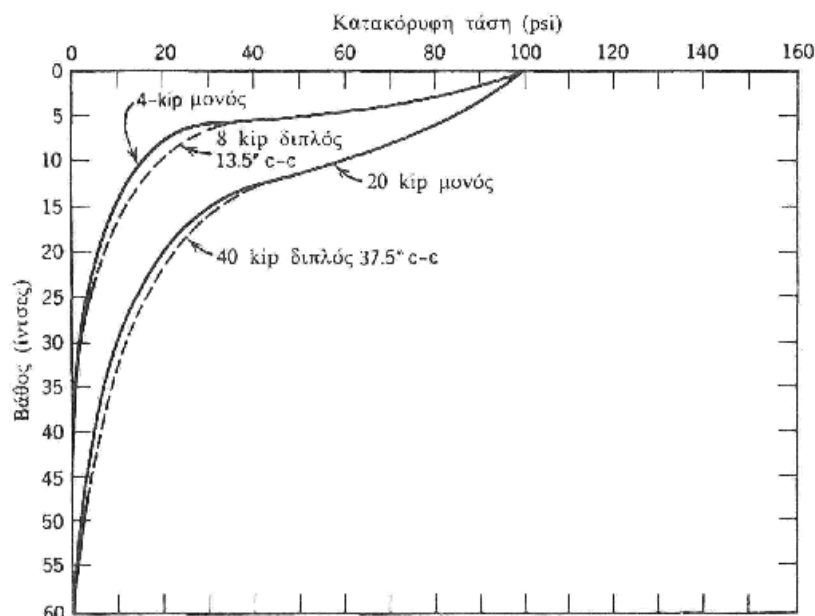
2.8. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Μέχρι τώρα στο κεφάλαιο αυτό εκτέθηκαν ήδη οι γενικές γνώσεις που απαιτούνται στον προσδιορισμό των διαφόρων λύσεων τάσεων, παραμορφώσεων και βελών κάμψης για ελαστικά συστήματα πολλαπλών στρώσεων. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται απευθείας σε διάφορες μεθόδους σχεδιασμού ασφαλτικών οδοστρωμάτων αλλά και αποτελεί για τον μηχανικό ένα χρήσιμο εργαλείο ερμηνείας όλων των βασικών παραγόντων που υπεισέρχονται στο στατικό σχεδιασμό οποιουδήποτε συστήματος οδοστρωμάτων.

Η βασική επιδίωξη των εύκαμπτων οδοστρωμάτων με βάση από κοκκώδη υλικά είναι να παρέχει ένα πάχος βάσης τέτοιο ώστε η κατακόρυφη θλιπτική τάση του υπεδάφους ή το βέλος κάμψης να ελαττωθεί μέχρι κάποια οριακή τιμή μικρότερη από την ανεκτή καταπόνηση που διαγράφεται από τα σχετικά κριτήρια. Αυτός ο τύπος

οδοστρώματος αποτελείται από στρώσεις με προοδευτικά υψηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας στις ανώτερες στρώσεις, αλλά με τιμές των K_1 και K_2 σχετικά χαμηλές.

Έτσι οι ικανότητες εξάπλωσης των φορτίων του συστήματος αυτού πρέπει να οφείλονται στο πάχος των στρώσεων βάσης και υπόβασης από κοκκώδη υλικά.



Σχήμα 2.8.: Επίδραση του αριθμού των τροχών στην κατακόρυφη τάση. Πρόβλημα Boussinesq. Παρατηρήσεις (1) Όλα τα ελαστικά έχουν πίεση 100 psi. (2) Το βάθος στο οποίο η αλληλοεπίδραση των διπλών τροχών είναι σημαντική είναι περίπου ίση με το μισό της απόστασης ανάμεσα στους τροχούς. (3) Το βάθος στο οποίο οι διπλοί τροχοί θα ενεργήσουν σαν μονός τροχός είναι περίπου διπλάσιος από την απόσταση των κέντρων.

Καθώς όλο και περισσότερο δύσκαμπτα υλικά χρησιμοποιούνται στις ανώτερες στρώσεις, γίνεται φανερή η ελάττωση της τάσης και του βέλους κάμψης του υπεδάφους. Για ένα ορισμένο τύπο υπεδάφους αυτό επιτρέπει τη μείωση του πάχους μιας πιο εύκαμπτης στρώσης που είναι πάνω σε παρόμοιο πάχος ασύνδετου κοκκώδους υλικού, ώστε να ικανοποιηθούν οι συνθήκες της επιτρεπομένης καταπόνησης του υπεδάφους ή του περιορισμένου βέλους κάμψης. Αυτό είναι άμεσο αποτέλεσμα των ικανοτήτων για καλύτερη εξάπλωση φορτίων των δύσκαμπτων ή άκαμπτων στρώσεων.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα, όμως, που θα πρέπει να κατανοηθεί πολύ καλά από τον αναγνώστη είναι το ότι αν και πιο δύσκαμπτα υλικά ελαττώνουν την πιθανότητα μιας καταπόνησης του υπεδάφους, όπως η διάτμηση, η παρουσία αυτής της

δύσκαμπτης στρώσης προξενεί μία αύξηση της εφελκυστικής τάσης στον πυθμένα αυτής της στρώσης καθώς και μία αξιοσημείωτη αύξηση των οριζόντιων διατμητικών τάσεων. Έτσι απαιτείται ένας ακόμη υπολογισμός για να εξασφαλισθεί ότι και η διατμητική αντοχή και η αντίσταση σε κάμψη αυτής της στρώσης είναι αρκετές για να παραλάβουν τις υψηλότερες αυτές τάσεις.

Αυτά αποτελούν τις βασικές και θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού οδοστρωμάτων που πρέπει να κατέχει ο αναγνώστης. Έτσι απαιτείται ένας ακόμη υπολογισμός για να εξασφαλισθεί ότι και η διατμητική αντοχή και η αντίσταση σε κάμψη αυτής της στρώσης είναι αρκετές για να παραλάβουν τις υψηλότερες αυτές τάσεις.

Αυτά αποτελούν τις βασικές και θεμελιώδεις αρχές σχεδιασμού οδοστρωμάτων που πρέπει να κατέχει ο αναγνώστης. Επιπλέον, αν και οι αρχές που διέπουν τα συστήματα πολλαπλών στρώσεων αφορούσαν μόνον ασφαλικά οδοστρώματα (εύκαμπτα και ημιδύσκαμπτα) μπορούν εύκολα να επεκταθούν στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Πράγματι, οι μελέτες των McCullough και Nielson έχουν χρησιμοποιήσει τη θεωρία των στρωμάτων βασισμένη στην ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων. Εισήχθησαν λύσεις τάσης και παραμόρφωσης σε μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων, που τις ακολούθησαν τελειοποιημένες λύσεις ηλεκτρονικών υπολογιστών. Από τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, την ανάλογη πρόοδο στην αξιολόγηση υλικών και την ανάπτυξη των κριτηρίων αποτυχίας εξελίχθηκαν διάφορες μέθοδοι σχεδιασμού βασισμένες στη θεωρητική ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων πολλαπλών στρώσεων. Μία κύρια σημαντική αλλαγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού που προήλθε από αυτήν την τεχνική σχεδιασμού ήταν η αναγνώριση ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτυγχάνουν από διαφορετικούς τύπους καταπόνησης και ότι οι μηχανικοί πρέπει να τους εξετάζουν με τη μέθοδο ανάλυσης συστημάτων. Έτσι με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η ανάλυση ρηγμάτων από επαναληπτικά φορτία, μόνιμης παραμόρφωσης λόγω επαναλαμβανόμενης διατμητικής παραμόρφωσης και άλλα.

Η επιλογή των μεθόδων σχεδιασμού που παρουσιάζονται στα επόμενα υποκεφάλαια έγινε έτσι, ώστε να περιγραφούν διάφορες κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται. Οι μέθοδοι αυτές είναι της AASHO (Αμερικανικός Κρατικός Σύνδεσμος Οδοποιίας), του Τμήματος Οδοποιίας του Kentucky, του TAI (Ινστιτούτο Ασφάλτου), του NSCA (Εθνικός Σύνδεσμος Θραυστής Πέτρας) και της California. Η

μέθοδος της NSCA βασίζεται στη μέθοδο σχεδιασμού CBR του Σώματος των Μηχανικών.

2.9. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ AASHO

Ιστορικό. Η μέθοδος σχεδιασμού που προτείνει η AASHO βασίζεται στα εξαγόμενα της εκτεταμένης Οδικής Δοκιμής AASHO που διεξήχθη στην Ottawa, Illinois στα τέλη της δεκαετίας 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Η Επιτροπή Σχεδιασμού της AASHO δημοσίευσε αρχικά έναν Προσωρινό Οδηγό Σχεδιασμού το 1961, που αναθεωρήθηκε το 1972 με βάση έρευνα και αναθεώρηση της αρχικής έκδοσης.

Η μέθοδος σχεδιασμού κατά AASHO εισάγει τον ορισμό αποτυχίας του οδοστρώματος σε σχέση με την ενόδια χρήση του και όχι σαν δομική φθορά με την αυστηρή έννοια (ρωγμές, παραμόρφωση κτλ.). Απλά διατυπωμένα η λειτουργία μιας οδού είναι να παρέχει μία ασφαλή και λεία επιφάνεια για τη μετακίνηση των οχημάτων από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Για να εκφραστεί ποσοτικά μία τέτοια λειτουργική περιγραφή εισήχθησαν διάφορες σημαντικές έννοιες. Η πρώτη έννοια είναι η λειτουργικότητα, που ορίζεται σαν την ικανότητα ενός οδοστρώματος να εξυπηρετεί την κυκλοφορία για την οποία έχει σχεδιαστεί. Η επίδοση είναι η ικανότητα ενός οδοστρώματος να εξυπηρετεί την κυκλοφορία για μία χρονική περίοδο. Συνεπώς η επίδοση μπορεί να ερμηνευτεί σαν το ολοκλήρωμα της συνάρτησης λειτουργικότητα-χρόνος (επανάληψη φορτίου) ενός οδοστρώματος ή ακόμη γενικότερα σαν την τάση της λειτουργικότητας με το χρόνο (επαναλήψεις φορτίου).

Κατά την Οδική Δοκιμή AASHO η επίδοση προσδιορίστηκε από τη λειτουργικότητα κατά την κατασκευή καθώς και σε διάφορα χρονικά διαστήματα μετά την κατασκευή για όλα τα οδοστρώματα. Αρχικά ο τρόπος με τον οποίον γίνονταν οι περιοδικές αυτές διαβαθμίσεις της λειτουργικότητας στηριζόταν στην επιλογή ενός αριθμού ατόμων, που βαθμολογούσαν κάθε οδόστρωμα με μία αυθαίρετη κλίμακα από 0 έως 5, όπου το 5 αντιστοιχούσε σε εξαιρετικό οδόστρωμα. Αυτό το μέτρο λειτουργικότητας ορίζεται σαν ο Βαθμός Παρούσας Λειτουργικότητας (PSR). Επιπλέον μία στατιστική ανάλυση που έγινε συσχέτισε το PSR με διάφορες φυσικές μετρήσεις του οδοστρώματος. Η πρόβλεψη αυτή του PSR από αυτές τις φυσικές μετρήσεις

ορίζεται σαν Δείκτης Παρούσας Λειτουργικότητας (PSI) ή p . Η εξίσωση συσχετισμού που αναπτύχθηκε κατά την Οδική Δοκιμή AASHO για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1 + SV) - 1,38 \overline{RD}^2 - 0,01 (C + P)^{1/2}. \quad (2.1)$$

όπου SV = η παρέκκλιση της κλίσης, μέτρο της κατά μήκος τραχύτητας

\overline{RD} = μέσο βάθος αυλακώσεων

$C+P$ =εμβαδόν ρωγμών τάξεων 2 και 3 συν επιδιορθώσεις (μπαλώματα) ανά 1000 ft²

Οι εξισώσεις της μεθόδου σχεδιασμού AASHO για εύκαμπτα οδοστρώματα στηρίχτηκαν σε μία ανάλυση της επίδρασης του δομικού σχεδιασμού (πάχος στρώσεων και τύπος υλικών) και της φόρτισης (μέγεθος και συχνότητα των αξονικών φορτίων) στην επίδοση των διατομών δοκιμής του εύκαμπτου οδοστρώματος.

Θεμελιώδεις αρχές της μεθόδου σχεδιασμού. Οι βασικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν από την Οδική Δοκιμή AASHO για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι:

$$G_t = \beta(\log W_t - \log p) \quad (2.2)$$

$$\beta = 0,40 + \frac{0,081 (L_1 + L_2)^{3,23}}{(\overline{SN} + 1)^{5,19} L_1^{3,23}} \quad (2.3)$$

$$\log p = 5,93 + 9,36 \log (\overline{SN} + 1) - 4,79 \log (L_1 + L_2) + 4,33 \log L_2 \quad (2.4)$$

όπου G_t =μία συνάρτηση (ο λογάριθμος) του λόγου της απώλειας σε λειτουργικότητα στον χρόνο t προς την πιθανή απώλεια στο σημείο όπου $p_t = 1,5$

β = μία συνάρτηση μεταβλητών σχεδιασμού και φορτίου που επηρεάζει το σχήμα της καμπύλης λειτουργικότητας p - W

p = μία συνάρτηση μεταβλητών σχεδιασμού και φορτίου που αντιστοιχεί στον αναμενόμενο αριθμό εφαρμογών αξονικών φορτίων μέχρι $p=1,5$

W_t = εφαρμογές αξονικού φορτίου στο τέλος του χρόνου t

p_t = λειτουργικότητα στο τέλος του χρόνου t

L_1 = φορτίο σε ένα απλό άξονα ή σε ένα σύστημα «εν σειρά» αξόνων (kips)

L_2 = κώδικας αξόνων ($L_2 = 1$ για απλό άξονα και $L_2 = 2$ για «εν σειρά» άξονες)

\overline{SN} = δομικός αριθμός του οδοστρώματος

Για τη λύση η μέθοδος απλοποιείται σημαντικά, αν οι παράγοντες φορτίου εκφράζονται όλοι σε φορτίο του τυπικού οχήματος. Η μέθοδος σχεδιασμού AASHO

χρησιμοποιεί $L_1 = 18.000$ lb και $L_2 = 1$ που μαζί με τους συντελεστές ισοδύναμου φορτίου τροχού (EALF),. Η ανάλυση των τιμών του PSI για νέα οδοστρώματα κατά την Οδική Δοκιμή οδήγησαν σε ένα αρχικό $PSI = 4,2$. Χρήση της τιμής αυτής καθώς και των τυποποιημένων τιμών L_1 και L_2 καταλήγει στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\log W_{118} = 9,36 \log (\overline{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(\overline{SN} + 1)^{5,19}]} \quad (2.5.)$$

όπου W_{118} είναι ο αριθμός εφαρμογών απλού φορτίου 18 kips μέχρι χρόνου t και p_t είναι το τελικό PSI.

Η εξίσωση 2.5 αντιπροσωπεύει το βασικό σχεδιασμό εύκαμπτου οδοστρώματος που ισχύει για τις συνθήκες υπεδάφους και περιβάλλοντος της Οδικής Δοκιμής AASHO. Για να ισχύει η εξίσωση σχεδιασμού και για άλλες συνθήκες, εισήχθηκαν στον σχεδιασμό και οι έννοιες μιας κλίμακας της αντίδρασης του εδάφους (S) και ένας συντελεστής της περιοχής (R).

Για την συνθήκη υπεδάφους, μία τιμή $S = 3,0$ χρησιμοποιήθηκε σαν σημείο αφετηρίας για τον τύπο υπεδάφους της Οδικής Δοκιμής AASHO. Ένα δεύτερο σημείο της κλίμακας S προσδιορίστηκε ύστερα από εξέταση της επίδρασης βάσεων θραυστής πέτρας μεγάλου πάχους, που επιλέχθηκαν για να ελαχιστοποιήσουν την επίδραση του εδάφους έδρασης. Η τιμή αυτή χαρακτηρίστηκε σαν βαθμός $S = 10,0$ και ενδιάμεσες τιμές βασίστηκαν σε γραμμική σχέση μεταξύ των δύο σημείων τέτοια ώστε:

$$\log W_{118} = \log N_{118} + K(S_i - S_0) \quad (2.6.)$$

όπου S_i = τιμή αντίδρασης εδάφους για συνθήκη i

S_0 = τιμή αντίδρασης εδάφους για τις συνθήκες της Οδικής Δοκιμής

W_{118} = συνολικές εφαρμογές φορτίου για συνθήκη i

N_{118} = συνολικές εφαρμογές φορτίου για τις συνθήκες της Οδικής Δοκιμής

K = σταθερά ($K = 0,372$)

Για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις των διαφόρων κλιματικών συνθηκών, άλλων από αυτές της Οδικής Δοκιμής, εισήχθηκε ένας τοπικός παράγοντας R . Υποτίθεται ότι οι συνολικές εφαρμογές φορτίου είναι μία αντίστροφη συνάρτηση του R τέτοια ώστε:

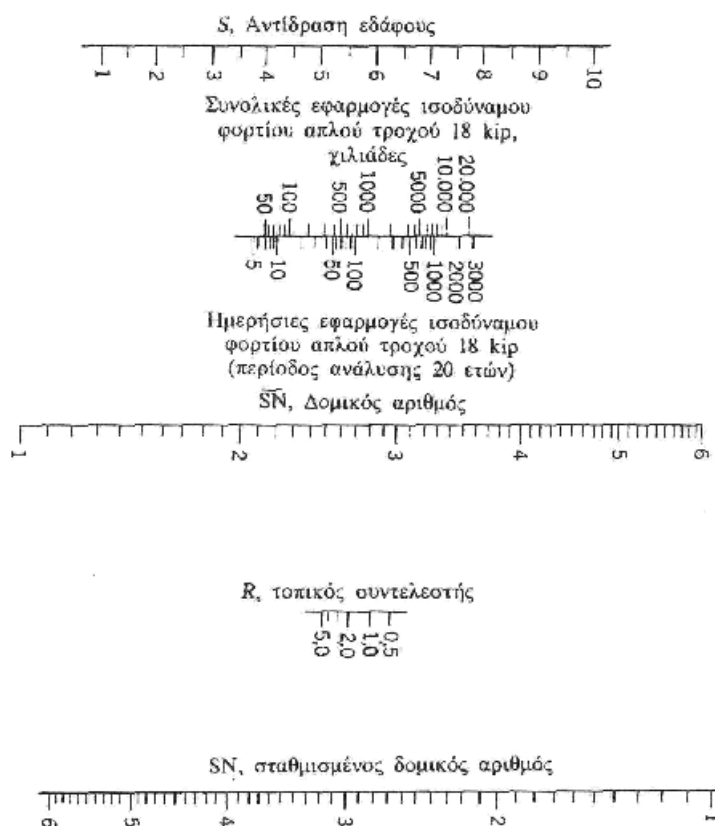
$$W_{118} = N_{118} \left(\frac{1}{R} \right) \quad (2.7.)$$

όπου N_{118} είναι οι συνολικές εφαρμογές φορτίου.

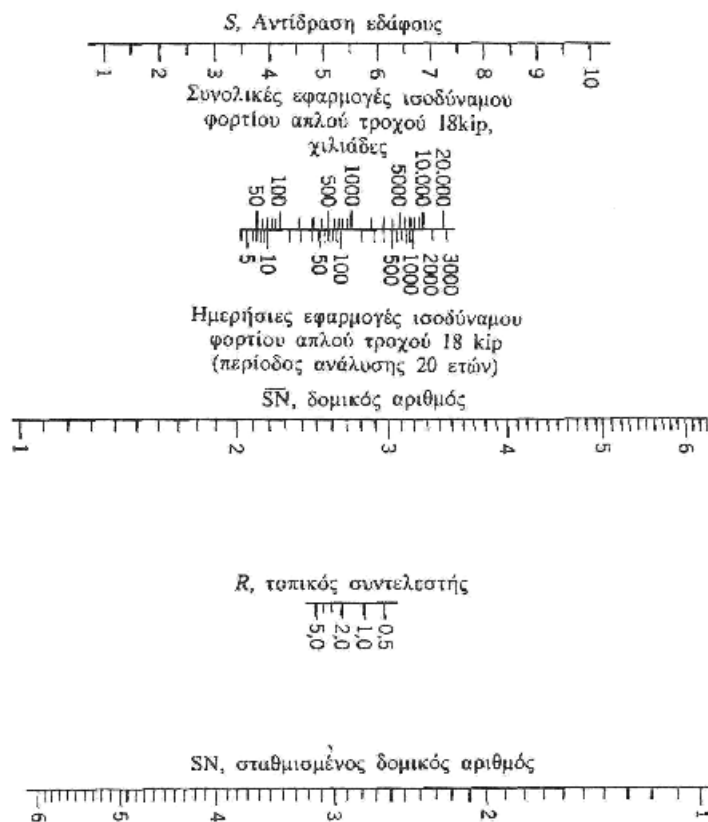
Αντικατάσταση των τροποποιήσεων στην εξίσωση 2.5 οδηγεί στην τελική έκφραση σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος:

$$\log W_{118} = 9,36 \log (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log [(4,2 - p_t)/(4,2 - 1,5)]}{0,40 + [1094/(SN + 1)^{6,19}]} + \log \frac{1}{R} + 0,372 (S_i - 3,0) \quad (2.8.)$$

Έτσι αυτή η τελική έκφραση σχεδιασμού συσχετίζει τον αριθμό επαναλήψεων (W_{118}) του φορτίου απλού τροχού 18 kip, που αντιστοιχούν σε ένα προκαθορισμένο τελικό επίπεδο λειτουργικότητας (p_t) για ένα ορισμένο οδόστρωμα (SN), κλιματικές συνθήκες (R) και υπέδαφος (S_i). Το Σχήμα 2.9 περιλαμβάνει ένα νομογράφημα για τη λύση της εξίσωσης 2.8 για τιμές του p_t (τελικό PSI) ίσες με 2,0 και 2,5. Η λύση επιτυγχάνεται με την εύρεση πρώτα του \overline{SN} (κεντρική κλίμακα) για ένα ορισμένο S και W_{118} . Κατόπιν η τιμή αυτή SN διορθώνεται με έναν τοπικό συντελεστή (K) για να προσδιοριστεί το απαιτούμενο SN σχεδιασμού.



Σχήμα 2.9^α: Νομογράφημα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρώματων κατά AASHTO. (Προσωρινός οδηγός AASHTO, 1972). Διάγραμμα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρώματων, $p_t=2,5$



Σχήμα 2.9^β: Νομογράφημα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά AASHO. (Προσωρινός οδηγός AASHO, 1972). Διάγραμμα σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, $p_t=2,0$

Τελική λειτουργικότητα (p_t). Όπως φαίνεται στο νομογράφημα σχεδιασμού, συνήθως χρησιμοποιούνται τιμές τελικής λειτουργικότητας ίσες με 2,0 και 2,5. Η τιμή p_t , είναι η κατώτερη λειτουργικότητα, που θα είναι ανεκτή στην οδό στο τέλος της περιόδου ανάλυσης της κυκλοφορίας, πριν να χρειαστεί επανεπίστρωση ή ανακατασκευή. Για κύριες οδούς προτείνεται η τιμή 2,5, ενώ για οδούς μικρότερου κυκλοφοριακού όγκου συνιστάται η τιμή $p_t = 2,0$. Συνήθως, η τιμή του p_t , δεν πρέπει ποτέ να είναι μικρότερη από 2,0. Για δευτερεύουσες οδούς, διατηρείται η τιμή $p_t = 2,0$, αλλά ελαττώνεται η χρονική περίοδος κυκλοφοριακής ανάλυσης.

Επαναλήψεις ισοδύναμου φορτίου τροχού (Wt18). Για τη μέθοδο σχεδιασμού AASHO, η μικτή κυκλοφορία σε μια ορισμένη χρονική περίοδο (που καλείται περίοδος κυκλοφοριακής ανάλυσης), λαμβάνεται υπόψη με τους συντελεστές ισοδύναμης φθοράς σε σχέση με το τυπικό φορτίο απλού τροχού 18 kip (Κεφάλαιο 4).

Αν επιλεγεί η συνήθης περίοδος κυκλοφοριακής ανάλυσης 20 ετών, τότε η κυκλοφορία αντιστοιχεί σε ημερήσιες εφαρμογές φορτίου 18 kip ή μπορεί επίσης να εκφραστεί σαν τις συνολικές εφαρμογές φορτίου 18 kip κατά την περίοδο κυκλοφοριακής ανάλυσης. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.9, οι συντελεστές ισοδυναμίας και επομένως οι εφαρμογές W_{hg} είναι συνάρτηση των ρ και SN. Για τα περισσότερα προβλήματα σχεδιασμού, χρησιμοποιείται η τιμή $SN = 3,0$ για την ανάλυση ισοδυναμίας. Η τιμή αυτή οδηγεί συνήθως σε υπερεκτίμηση του W_{h8} αλλά γενικά το τελικό σφάλμα είναι ασήμαντο.

Τοπικός συντελεστής (R). Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, ο τοπικός συντελεστής έχει εισαχθεί στη μέθοδο σχεδιασμού κατά AASHO, για να χρησιμοποιείται όταν το κλιματικό περιβάλλον είναι διαφορετικό από αυτό που ίσχυε κατά την Οδική Δοκιμή. Στη σημερινή του μορφή, ο συντελεστής R είναι μία παράμετρος μεγάλης σημασίας αλλά δυστυχώς όχι πολύ καλά τεκμηριωμένη προς το παρόν. Με βάση μία ανάλυση των εξαγομένων της Οδικής Δοκιμής σχετικά με τον ρυθμό απώλειας της λειτουργικότητας για διάφορες κλιματικές περιόδους κατά τη δοκιμή, προσδιορίστηκαν τυπικές τιμές του R από τον οδηγό της AASHO, που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8.: Τοπικοί συντελεστές*

Συνθήκη	Τιμή του R
Υλικά στο υπέδαφος με παγετό σε βάθος μεγαλύτερο από 5 in.	0,2-1,0
Υλικά στο υπέδαφος ξηρά, καλοκαίρι και φθινόπωρο	0,3-1,5
Υλικά στο υπέδαφος υγρά, τύξη κατά την άνοιξη	4,0-5,0

*από τον Προσωρινό οδηγό AASHO

Με βάση μία μελέτη αξιολόγησης του οδηγού σχεδιασμού κατά AASHO από την NCHRP, αναπτύχθηκε ένας χάρτης ίσων τιμών του R για τις ΗΠΑ. Είναι προφανής η περιορισμένη αξιοπιστία του χάρτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η επιλογή της σωστής τιμής του R πρέπει να βασίζεται στις τοπικές συνθήκες κάθε οδού σε συνδυασμό με την κρίση ενός έμπειρου μηχανικού. Οι προτεινόμενες τιμές του R από τον οδηγό σχεδιασμού AASHO για τις ΗΠΑ είναι μεταξύ 0,5 και 4,0.

Δομικός αριθμός (SN). Ο SN ορίζεται σαν ένας δείκτης, που προκύπτει από μία ανάλυση της κυκλοφορίας, των συνθηκών υπεδάφους και του τοπικού παράγοντα, που μπορεί να εκφραστεί σαν πάχος των διαφόρων στρώσεων εύκαμπτου οδοστρώματος με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών στρώσεων, που σχετίζονται με τον τύπο υλικού που χρησιμοποιείται σε κάθε στρώση του οδοστρώματος.

Το ελάχιστο πάχος κάθε στρώσης προσδιορίζεται έτσι:

$$D_1(\text{min}) = \frac{SN_2}{a_1} = \frac{1,95}{0,42} = 4,64 \text{ inches (5 in.)}$$

$$D_2(\text{min}) = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a_2} = \frac{2,82 - 2,10}{0,13} = 5,54 \text{ inches (6 in.)}$$

$$D_3(\text{min}) = \frac{SN_4 - (SN_2^* + SN_3^*)}{a_3} = \frac{3,78 - (2,88)}{0,095} = 9,47 \text{ inches (9,5 in.)} \quad (2.9)$$

2.10. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Εισαγωγή. Το 1965 οι Dorman και Metcalf παρουσίασαν τις αρχές σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη χρήση της ελαστικής ανάλυσης πολλαπλών στρώσεων. Οι αρχές που εκτέθηκαν από τους ερευνητές αυτούς βασίζονται σε περιορισμένες παραμορφώσεις της ασφαλτικής επιφάνειας και σε μόνιμη παραμόρφωση του υπεδάφους. Η μέθοδος που ακολουθεί βασίζεται στις αρχές αυτές και παρουσιάστηκε από τους Havens, Deen και Southgate σαν κατάλληλη για τις συνθήκες που επικρατούν στο Kentucky. Η μέθοδος Kentucky του 1958 βασίστηκε στο CBR και στα ισοδύναμα φορτία τροχών. Η μέθοδος αυτή συνδέει την ανάλυση πολλαπλών στρώσεων με την αρχική μέθοδο.

Θεμελιώδεις αρχές της μεθόδου σχεδιασμού. Η χρήση της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων σε συνδυασμό με τα κριτήρια περιορισμένης παραμόρφωσης για σχεδιασμό προϋποθέτει την εξέταση τριών παραγόντων: (α) τη χρησιμοποιούμενη θεωρία, (β) τις τιμές χαρακτηρισμού υλικών και (γ) την ανάπτυξη του κριτηρίου αποτυχίας για κάθε τύπο καταπόνησης. Κατά το σχεδιασμό αυτόν, όπως και άλλους σχεδιασμούς ελαστικών στρώσεων, η μόνιμη παραμόρφωση (αυλάκωση) καθώς και η ρηγμάτωση, η μόνιμη παραμόρφωση (αυλάκωση) καθώς και η ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης λόγω κόπωσης θεωρούνται σαν δύο από τους πιο σημαντικούς μηχανισμούς αποτυχίας.

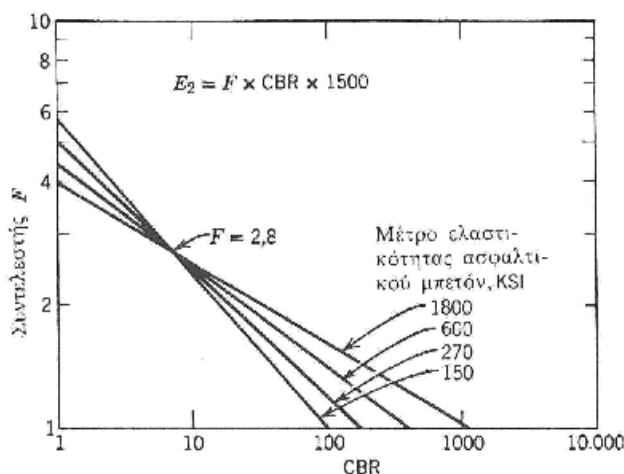
Θεωρία. Κατά την ανάπτυξη της θεωρίας, έγινε χρήση προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή για την εύρεση των τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων μέσα σε ένα ελαστικό σύστημα οδοστρώματος πολλαπλών στρώσεων. Αυτό το πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή περιοριζόταν σε ένα φορτίο απλού τροχού μόνο, έτσι ώστε οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε ένα απλό (κυκλικό) φορτίο 9 kip με πίεση τροχού 80 psi. Προέκυψαν πολυάριθμες λύσεις για μία σειρά τιμών αντίδρασης υπεδάφους, πάχους στρώσεων και τιμών μέτρου ελαστικότητας. Τυπικά οδοστρώματα που αναλύθηκαν ήταν τριών στρώσεων (συμβατικά) και δύο στρώσεων (ασφαλτικά πλήρους βάθους).

Χαρακτηρισμός υλικού. Οι απαραίτητες σταθερές ελαστικών στρώσεων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο περιέχονται στον Πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9.: Τιμές παραμέτρων ελαστικών στρώσεων

Στρώση	Λόγος του Poisson	Μέτρο ελαστικότητας
Ασφαλτικό μπετόν	0,40	Μεταβλητό ($0,15-1,8 \times 10^4$ psi)
Βάση από πυκνά διαβαθμισμένα αδρανή	0,40	$1500 \times F \times \text{CBR}^a$
Υπέδαφος	0,45	$1500 \times \text{CBR}$

a: βλέπε σχήμα 2.10. για τιμή του F.



Σχήμα 2.10.: Υποτιθέμενη σχέση ανάμεσα στα μέτρα ελαστικότητας βάσης και υπεδάφους.

Όπως φαίνεται στον πίνακα, αναπτύχθηκε μία τιμή του F για το μέτρο ελαστικότητας της κοκκώδους βάσης, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η γνωστή εξάρτηση της τιμής από το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους. Με την ανάπτυξη του

συντελεστή αυτού, έγινε η παραδοχή ότι η τιμή $F=2,8$ αντιστοιχεί στην τιμή $CBR = 7$. Επιπλέον έγινε η παραδοχή ότι ο λόγος E_2 προς E_3 ισούται με ένα, όταν τα μέτρα και των τριών στρώσεων είναι ίσα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραδοχές, αναπτύχθηκε μία ευθύγραμμη σχέση σε μία λογαριθμική κλίμακα για τον καθορισμό της τιμής του F που φαίνεται στο Σχήμα 2.10.

Χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο τιμών του E_1 (μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικού μπετόν), επειδή οι μέγιστες ή κρίσιμες επιδράσεις λόγω παραμόρφωσης και κόπωσης αντιστοιχούν σε διαφορετικές ενεργές θερμοκρασίες (μέτρο ελαστικότητας). Η σχέση E_1 -θερμοκρασίας, που υποτίθεται ότι είναι τυπική για τα ασφαλτικά μίγματα του Kentucky κατέληξε στα εξής: (40°F-1.800.000 psi), (60°F-600.000 psi), (80°F-270.000 psi), (100° F-145.000 psi) και (120° F-100.000 psi).

Ανάπτυξη του κριτηρίου αποτυχίας. Η σύνδεση με τις καμπύλες σχεδιασμού του 1958 της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων έγινε με ένα σημείο ελέγχου στην παλαιά καμπύλη κυκλοφορίας $X(256 \times 10^6$ ισοδύναμες επαναλήψεις φορτίου τροχού 5 kip - δύο διευθύνσεων). Αυτό το σημείο ελέγχου ήταν ένα βέλος κάμψης 0,015 ιντσών (λόγω φορτίου απλού άξονα 18 kip), που μετρήθηκε σε ένα οδόστρωμα πάχους 23 in. με $CPR = 7$. Η ελαστική λύση πολλαπλών στρώσεων με $E_1 = 480.000$ psi και $E_2 = 29.400$ psi κατέληξε σε ένα προβλεπόμενο βέλος κάμψης. Για τις συνθήκες αυτές, η κατακόρυφη παραμόρφωση του υπεδάφους (ϵ_s) υπολογισμένη θεωρητικά ήταν 240×10^{-6} in./in. ενώ η τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_a) ήταν 149×10^{-6} in./in.

Επειδή οι καμπύλες σχεδιασμού του 1958 έγιναν με βάση ένα φορτίο απλού τροχού 5 kip και τα αποτελέσματα της AASHO έκαναν χρήση ενός φορτίου απλού άξονα 18 kip, οι καμπύλες σχεδιασμού του 1958 μετατράπηκαν σε ισοδύναμο φορτία απλού άξονα 18 kip. Η εξίσωση του Kentucky για το ισοδύναμο φορτίο τροχού που χρησιμοποιήθηκε για τις καμπύλες τους του 1958 ήταν:

$$N_k(\sqrt{2})^{P_k-10} = EWL \quad (2.10.)$$

όπου N_k είναι ο αριθμός φορτίων τροχού, P_k είναι το αξονικό φορτίο σε kips και $(\sqrt{2})^{P_k-10}$ είναι ο συντελεστής ισοδύναμης φθοράς. Οι τιμές κυκλοφοριακού όγκου που χρησιμοποιήθηκαν από την πολιτεία Kentucky αναφέρονται και στις δύο διευθύνσεις.

Έτσι για την καμπύλη ελέγχου X,

$$N_{18}(\sqrt{2})^{P_i-10} = 128 \times 10^6 \text{ ή}$$

$$N_{18}(16) = 128 \times 10^6$$

$$N_{18} = 8 \times 10^6 \text{ ισοδύναμα φορτία τροχού 18 kip}$$

Για την μετατροπή των προηγούμενων καμπυλών κυκλοφορίας του Kentucky σε τιμές κυκλοφορίας AASHO:

$$\text{AASHO (EAL)} = \frac{\text{Κυκλοφορία Kentucky μιας διεύθυνσης}}{16} \quad (2.11\alpha)$$

Μία προσέγγιση των συντελεστών ισοδυναμίας της AASHO, που χρησιμοποιήθηκαν από την πολιτεία Kentucky, ήταν:

$$F = (1,25)^{P_i-11} \quad (2.11\beta)$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.11β και το EAL (άξονας 18 kip), που σχετίζεται με κάθε προηγούμενη (1958) καμπύλη κυκλοφορίας, βρέθηκε ότι ένα ισοδύναμο φορτίο απλού άξονα (φορτίο τροχού) προκάλεσε υποθετικά την ίδια φθορά ή:

$$\frac{8 \times 10^6}{N_{18}} = (1,25)^{P_i-18} \quad (2.12)$$

όπου N_{18} είναι τα ισοδύναμα φορτία 18 kip που αντιστοιχούσαν στην εξίσωση κυκλοφορίας Kentucky (εξίσωση 2.11α). Με τη χρήση υπολογισμών της ελαστικής θεωρίας αναπτύχθηκε για διάφορα φορτία μία σχέση ανάμεσα στο λόγο της κατακόρυφης παραμόρφωσης του υπεδάφους για ένα ορισμένο φορτίο τροχού (ϵ_s) προς την κατακόρυφη παραμόρφωση υπεδάφους για το τυπικό φορτίο απλού τροχού 9kip (ϵ_{sg}). Η τιμή ϵ_s που βρέθηκε για τη διατομή ελέγχου ($\epsilon_s = 240 \times 10^{-6}$ in./in.) χρησιμοποιήθηκε με τους λόγους παραμόρφωσης για να αναπτυχθεί το κριτήριο αποτυχίας για αυλάκωση. Το κριτήριο αυτό συσχετίζει την επιτρεπόμενη τιμή ϵ_s για έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων φορτίου άξονα 18 kip και φαίνεται στον Πίνακα 12.10. Για το κριτήριο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι: (1) υποθέτει ότι η εξασφάλιση μη παραμόρφωσης θα είναι συγκρίσιμη για όλους τους όγκους κυκλοφορίας, (2) έχει αναπτυχθεί για εύκαμπτα οδοστρώματα που αποτελούνται από 1/3 περίπου ασφαλτικό μπετόν και 2/3 πυκνά διαβαθμισμένο ασύνδετο αδρανές και (3) το ενεργό μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικού μπετόν, που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της κατακόρυφης παραμόρφωσης, ήταν 480.000 psi.

Η ανάπτυξη του κριτηρίου οριακής εφελκυστικής παραμόρφωσης για ρηγμάτωση από κόπωση βασίστηκε σε μία ανάλυση εξαγομένων κόπωσης και σε θεωρητικά εξαγόμενα της διατομής ελέγχου. Στοιχεία κόπωσης, που παρουσίασαν οι Dorman και Metcalf, επεκτάθηκαν για να προσδιοριστεί η επιτρεπόμενη παραμόρφωση μίγματος για μία εφαρμογή απλού φορτίου (N=1). Η τιμή αυτή βρέθηκε να είναι 2240×10^{-6} . Για την διατομή ελέγχου η οριακή εφελκυστική παραμόρφωση ήταν 149×10 in/in για επαναλήψεις $N=8 \times 10$. Χρησιμοποιώντας μία γραμμική σχέση σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα $\log \epsilon_a - \log N$, μία ερμηνευτική ανάλυση των προβλεπόμενων εξαγομένων τάσης-παραμόρφωσης για διάφορα οδοστρώματα και την έννοια της ίσης ενέργειας καθορίστηκαν και περιέχονται στον Πίνακα 2.11. οριακές παραμορφώσεις ασφάλτου σαν συνάρτηση επαναλήψεων φορτίου για διάφορα μέτρα ελαστικότητας ασφατικού μπετόν.

Πίνακας 2.10.: Οριακές παραμορφώσεις υπεδάφους*

Καμπύλη κυκλοφορίας	Αριθμός αξονικών φορτίων 18 kip	Φορτίο τροχού (kips)	$\epsilon_{2N}/\epsilon_{28}$	ϵ_{2N}
IA	5×10^3	25,5	2,837	$6,809 \times 10^{-4}$
	$7,81 \times 10^3$	24,5	2,726	6,542
	1×10^4	24,0	2,664	6,394
I	$1,56 \times 10^4$	23,0	2,553	6,127
	II	$3,12 \times 10^4$	21,4	2,381
III		5×10^4	20,4	2,263
	$6,25 \times 10^4$	19,9	2,208	5,299
	1×10^5	18,8	2,091	5,018
IV	$1,25 \times 10^5$	18,3	2,038	4,891
	V	$2,5 \times 10^5$	16,8	1,863
VI		5×10^5	15,2	1,690
	VII	1×10^6	13,7	1,518
VIII		2×10^6	12,1	1,346
	IX	4×10^6	10,6	1,172
5×10^6		10,1	1,117	2,681
X		8×10^6	9,0	1,000
	1×10^7	8,5	0,944	2,266
XI	$1,6 \times 10^7$	7,5	0,824	1,978
	XII	$3,2 \times 10^7$	5,9	0,654
5×10^7		4,9	0,543	1,303
1×10^8		3,3	0,371	0,890

*Κατά Havens, Dccn και Southgate.

Λόγω της παραδοχής ότι η παραμόρφωση κατά την αποτυχία για μία εφαρμογή απλού φορτίου είναι ανεξάρτητη του μέτρου ελαστικότητας του μίγματος

(θερμοκρασία), οι καμπύλες κόπωσης του Kentucky συγκλίνουν για $N = 1$. Αυτό οδηγεί σε μία σειρά καμπυλών μέτρου ελαστικότητας-κόπωσης που δεν συμφωνούν με κανένα εξαγόμενο κόπωσης από επιτόπιες ή εργαστηριακές παρατηρήσεις. Αυτές οι τελευταίες καμπύλες γενικά είναι παράλληλες ή συγκλίνουν σε μεγάλες τιμές του N .

Οι λύσεις των προβλημάτων σχεδιασμού οδοστρωμάτων έχουν διευκολυνθεί από μία σειρά νομογραφημάτων, που χρησιμοποιούν τα κριτήρια παραμόρφωσης ϵ_s και ϵ_a των Πινάκων 2.10 και 2.11. Κάθε νομογράφημα είναι για ένα οδόστρωμα που να έχει ορισμένο ποσοστό του ολικού πάχους σαν ασφαλικό μπετόν. Τα Σχήματα 2.11 έως 2.13 δείχνουν αυτές τις λύσεις για ποσοστά ασφαλικού μπετόν 33,5 και 100%. Διάφορες άλλες έννοιες εκτίθενται επίσης στη μέθοδο σχεδιασμού.

Πρώτα πρέπει να υπομνηστεί ότι το ενεργό $E_1=480.000$ psi επιλέχτηκε σαν τυπικό ενός οδοστρώματος που αποτελείται κατά το 1/3 (33%) από ασφαλικό μπετόν. Το μέτρο αυτό ελαστικότητας αντιστοιχεί σε μία μέση ετήσια θερμοκρασία οδοστρώματος για τις συνθήκες του Kentucky ίση με 64°F. Για οδοστρώματα ασφαλικού μπετόν μεγάλου πάχους (πλήρους βάθους) μία ισοδύναμη θερμοκρασία σχεδιασμού ίση με 76° θα ήταν καταλληλότερη ($E_1 = 300.000$ psi). Οι Havens κ.ά. ισχυρίζονται ότι: «Σχεδιασμοί με μικρότερα ποσοστά του συνολικού πάχους από ασφαλικό μπετόν ενδέχεται να είναι λιγότερο ευαίσθητα σε αυλάκωση του ασφαλικού μπετόν από τους σχεδιασμούς πλήρους βάθους. Η μειωμένη ευαισθησία μπορεί να θεωρηθεί σαν μία αύξηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του ασφαλικού μπετόν»*. Χρησιμοποιώντας τη λογική αυτή, αναπτύχθηκε μία σταθμισμένη συνάρτηση που δείχνει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του ασφαλικού μπετόν σαν μία συνάρτηση του ποσοστού πάχους του ασφαλικού μπετόν*.

Ο σκοπός της μεθόδου είναι να καταλήξει βασικά σε πάχη σχεδιασμού για κάθε ένα από τους δύο τύπους καταπόνησης, που εξετάζονται. Αντί, όμως, να γίνεται μόνον επιλογή της μέγιστης τιμής (T_a ή T_s) χρησιμοποιείται η ακόλουθη μέθοδος.

Αν το EAL σχεδιασμού (φορτία απλού άξονα 18 kip) είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 4×10^6 επαναλήψεις, επιλέγεται το μεγαλύτερο πάχος. Αν το EAL σχεδιασμού είναι μικρότερο ή ίσο με $7,81 \times 10^3$ επαναλήψεις, ο σχεδιασμός βασίζεται πάντα στο κριτήριο εφελκυστικής παραμόρφωσης (T_a). Ουσιαστικά αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτρέπει

* Ο ισχυρισμός αυτός δεν γίνεται ομοιόμορφα αποδεκτός στην βιβλιογραφία. Μερικοί μηχανικοί, υπηρεσίες σχεδιασμού και αποτελέσματα επιτόπιων δοκιμών δείχνουν ότι πιθανώς αληθεύει το αντίθετο.

ανεξέλεγκτες παραμορφώσεις σε οδούς χαμηλής κυκλοφορίας. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα οικονομικών θεωρήσεων και αντιπροσωπεύει, κατά τη γνώμη του συγγραφέα, ένα πολύτιμο κριτήριο που βελτιώνει τη μέθοδο σχεδιασμού. Για EAL σχεδιασμού μεταξύ αυτών των ορίων, γίνονται προσαρμογές σαν πάχη που απαιτούνται λόγω παραμόρφωσης. Αυτή η νέα προσαρμογή οδηγεί στο αποτέλεσμα ότι μπορεί να επιτραπεί μεγαλύτερη παραμόρφωση, καθώς ελαττώνεται ο κυκλοφοριακός όγκος.

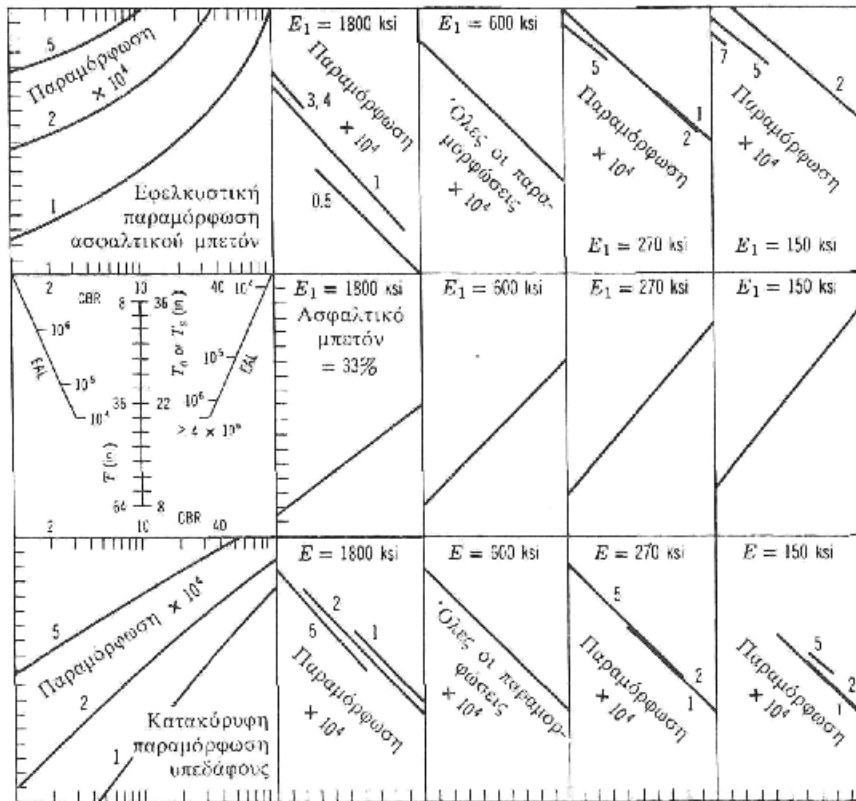
Πίνακας 2.11.: Οριακές εφελκυστικές παραμορφώσεις ασφαλτικού μπετόν

Καμπύλη κυκλοφορίας	Αριθμός αξονικών φορτίων 18-kip	Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικού μπετόν			
		1800 ksi	600 ksi	270 ksi	150 ksi
	5×10^3	$3,69 \times 10^{-4}$	$4,92 \times 10^{-4}$	$6,03 \times 10^{-4}$	$7,03 \times 10^{-4}$
IA	$7,81 \times 10^3$	3,37	4,55	5,64	6,62
	1×10^4	3,20	4,36	5,43	6,40
I	$1,56 \times 10^4$	2,91	4,03	5,08	6,03
II	$3,12 \times 10^4$	2,50	3,57	4,58	5,50
	5×10^4	2,27	3,28	4,26	5,17
III	$6,25 \times 10^4$	2,17	3,14	4,11	5,00
	1×10^5	1,96	2,89	3,82	4,70
IV	$1,25 \times 10^5$	1,87	2,78	3,69	4,56
V	$2,5 \times 10^5$	1,62	2,46	3,22	4,17
VI	5×10^5	1,40	2,18	3,00	3,81
VII	1×10^6	1,22	1,94	2,71	3,48
VIII	2×10^6	1,05	1,72	2,45	3,18
IX	4×10^6	0,91	1,52	2,20	2,89
	5×10^6	0,87	1,46	2,12	2,80
X	8×10^6	0,79	1,35	1,97	2,63
	1×10^7	0,75	1,29	1,91	2,56
XI	$1,6 \times 10^7$	0,68	1,19	1,78	2,41
XII	$3,2 \times 10^7$	0,59	1,06	1,61	2,20
	5×10^7	0,56	0,98	1,50	2,07
	1×10^8	0,46	0,87	1,36	1,90

*Κατά Havens, Deen και Southgate.

Πάντως η μειωμένη τιμή T_s που βρίσκεται με τη μείωση αυτή, δεν επιτρέπεται ποτέ να είναι λιγότερη από το πάχος που απαιτείται για ρηγμάτωση από κόπωση (T_w). Η τελευταία αυτή μείωση βρίσκεται με τη νομογραφική λύση που περιέχεται σε κάθε λύση σχεδιασμού στο Σχήμα 2.11 .

Παράμετροι σχεδιασμού. Τα απαραίτητα στοιχεία για την εύρεση του πάχους του οδοστρώματος είναι ο CBR του υπεδάφους, το EAL σχεδιασμού και το επιθυμητό ποσοστό πάχους από ασφαλτικό μπετόν.



Σχήμα 2.11.: Νομογράφημα σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος για πάχος ασφαλτικού μπετόν 33%. (Κατά Havens, κ.ά.).

2.11. ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οδόστρωμα ορίζεται το σύνολο των επαλλήλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος για τη δημιουργία της οδού. Το οδόστρωμα είναι μια σύνθετη κατασκευή που έχει να επιτελέσει διάφορες λειτουργίες οι οποίες είναι ανόμοιες μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό κάνει την κατασκευή αρκετά πολύπλοκη.

Ο αντικειμενικός σκοπός του οδοστρώματος είναι να παραλάβει τα φορτία της κυκλοφορίας και να τα καταλείψει στο υπέδαφος. Βασική επιδίωξη είναι οι μεταβιβαζόμενες στο υπέδαφος τάσεις να μειώνονται σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να μην επιφέρουν ουσιαστικές παραμορφώσεις ή μετατοπίσεις στην εδαφική στρώση του υπεδάφους. Επιπροσθέτως, η δομή του οδοστρώματος θα πρέπει να είναι σχεδόν αδιαπέραστη από το νερό έτσι ώστε να προστατεύεται το έδαφος έδρασης αλλά και οι στρώσεις από ασύνδετα αδρανή (μη σταθεροποιημένες στρώσεις). Τέλος, η επιφάνεια του οδοστρώματος θα πρέπει να παρέχει μια αντιολισθηρή και ανθεκτική, στη

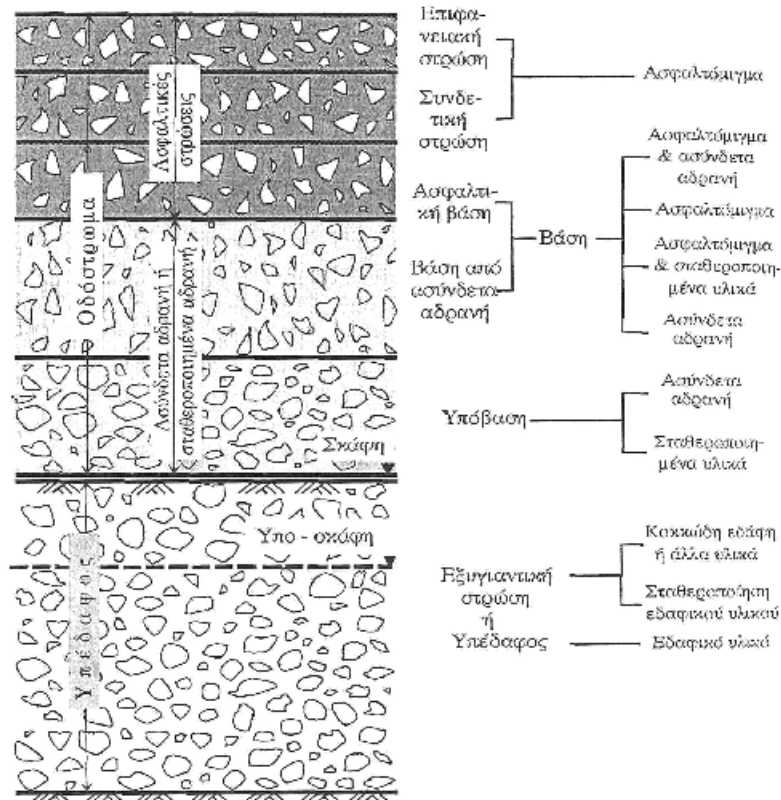
λειαντική δράση των ελαστικών, ομαλή επιφάνεια κύλισης. Έτσι, κάθε στρώση ή ομάδα στρώσεων έχει να επιτελέσει ένα ξεχωριστό ρόλο.

Η δομή του ευκάμπτου οδοστρώματος, γενικότερα, αποτελείται από δύο χαρακτηριστικές ομάδες στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Την ομάδα των στρώσεων από ασύνδετα ή/και σταθεροποιημένα αδρανή, που εδράζεται πάνω στο υπέδαφος, και την ομάδα των στρώσεων από ασφαλτομίγματα, που εδράζεται πάνω στην προηγούμενη ομάδα.

Ο παραπάνω διαχωρισμός της δομής του ευκάμπτου οδοστρώματος βασίζεται στη διαφορετική μηχανική συμπεριφορά των στρώσεων, ομαδοποιημένων, και χρησιμοποιείται σήμερα ως βάση για την ανάπτυξη όλων TCUV μεθοδολογιών διαστασιολόγησης των ευκάμπτων οδοστρωμάτων.

Κατασκευαστικά το εύκαμπτο οδόστρωμα διακρίνεται σε τρεις ομάδες στρώσεων: την επιφανειακή στρώση (ή στρώσεις), τη βάση και την υπόβαση.

Ορισμένες φορές, λόγω ύπαρξης πολύ ασθενούς υπεδάφους, κατασκευάζεται και εξυγιαντική στρώση μεταξύ υποβάσεως και υπεδάφους. Τυπική κατασκευαστική διατομή ευκάμπτου οδοστρώματος δίνεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12.: Τυπική κατασκευαστική διατομή ευκάμπτου οδοστρώματος

2.12. ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Υπέδαφος (subgrade) είναι το διαμορφωμένο και συμπυκνωμένο έδαφος επί του οποίου κατασκευάζεται το οδόστρωμα, εκτεινόμενο μέχρι βάθους τόσο όσο θα επηρεάσει τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Το βάθος αυτό συνήθως είναι 600mm, δεδομένου ότι οι περισσότερες προδιαγραφές απαιτούν επαρκή συμπύκνωση μέχρι το βάθος αυτό. Ελάχιστες φορές, όταν δε χρειάζεται καμία διαμόρφωση ή προπαρασκευή του εδάφους, η επιφάνεια του υπεδάφους ταυτίζεται με την επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Στις περιπτώσεις που είναι αναγκαία η κατασκευή επιχώματος η επιφάνεια του υπεδάφους είναι η τελική επιφάνεια του επιχώματος που προκύπτει.

Η επιφάνεια του υπεδάφους τέλος, ορίζει ένα επίπεδο επί του οποίου θα εδρασθεί το οδόστρωμα. Το επίπεδο αυτό είναι γνωστό ως πλατφόρμα ή «σκάφη» έδρασης. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εξυγιαντική στρώση ή σταθεροποίηση του εδάφους, το επίπεδο της σκάφης είναι η ανώτατη επιφάνεια της εξυγιαντικής στρώσης ή του σταθεροποιηθέντος εδάφους.

2.12.1. Φέρουσα ικανότητα υπεδάφους και παράγοντες επηρεασμού

Η αντοχή ή η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους είναι καθοριστικής σημασίας στη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος, δεδομένου ότι από αυτήν εξαρτώνται άμεσα τα πάχη των υπερκείμενων στρώσεων.

Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων αλλά κυρίως: του μεγέθους των κόκκων και της συνεκτικότητας, της φυσικής υγρασίας και του βαθμού συμπύκνωσης του εδάφους ή του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

Ο μηχανικός οδοποιίας, έχοντας ως βοήθημα τα συστήματα κατάταξης εδαφών, μπορεί να εκτιμήσει την καταλληλότητα ή μη του εδάφους για την παροχή επιφάνειας πάνω στην οποία θα κατασκευασθεί το οδόστρωμα. Η αποτίμηση όμως της φέρουσας ικανότητας αυτού γίνεται μόνο μετά από δοκιμές τόσο στο εργαστήριο όσο και επί τόπου, στο έργο.

Η έκφραση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους για έργα οδοποιίας γίνεται συναρτήσει μιας εκ των παραμέτρων: Καλιφορνιακός δείκτης (CBR), μέτρο αντίδρασης (K) (modulus of reaction), τιμή αντίστασης ή ευστάθειας (R) (resistance R -

value) και μέτρο ελαστικότητας ή επανάκτησης (E ή M_r) (elastic modulus ή resilient modulus).

Η πλέον γνωστή παράμετρος που χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις εμπειρικές ή ημιεμπειρικές μεθοδολογίες διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων είναι το CBR. Επίσης, συνήθης παράμετρος είναι το μέτρο ελαστικότητας ή επανάκτησης, (E ή M_r). Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλυτικές και ορισμένες νεώτερες ημιεμπειρικές μεθοδολογίες. Το μέτρο αντίδρασης χρησιμοποιείται κυρίως στις μεθοδολογίες διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, ενώ η τιμή αντίστασης έχει περιορισμένη χρήση, κυρίως σε ορισμένες πολιτείες των ΗΠΑ.

Ενώ υπάρχουν διάφοροι τρόποι μέτρησης της αντοχής του εδάφους το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός οδοποιίας είναι να καθορίσει την αντιπροσωπευτική τιμή της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους, απαραίτητη παράμετρο για την περαιτέρω διαδικασία διαστασιολόγησης του οδοστρώματος. Καθοριστικής σημασίας στο βασικότατο και δύσκολο αυτό εγχείρημα είναι η εκτίμηση του ποσοστού υγρασίας στην οποία θα μετρήσει την αντοχή του υπεδάφους, η οποία επηρεάζει και τη συμπυκνωμένη ξηρή πυκνότητα. Το ποσοστό αυτό θα πρέπει να συνδέεται τόσο με το ποσοστό υγρασίας του υπεδάφους κατά τη συμπύκνωση, όσο και με το αντιπροσωπευτικό ποσοστό υγρασίας του υπεδάφους κατά τη διάρκεια λειτουργίας του οδοστρώματος. Ο όρος αντιπροσωπευτικό ποσοστό υγρασίας θα μπορούσε να είναι το ποσοστό υγρασίας που κατά κανόνα θα έχει το υπέδαφος σε ετήσια βάση, εάν υποθεθεί ότι τίποτε δεν πρόκειται να αλλάξει στην κατασκευή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Η εκτίμηση ή καλύτερα ο καθορισμός της υγρασίας κατά τη συμπύκνωση είναι εύκολη υπόθεση δεδομένου ότι το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας κατά τη συμπύκνωση είναι αυτό που δίνει τη μέγιστη συμπυκνωμένη πυκνότητα, και καθορίζεται από τον εργαστηριακό έλεγχο κατά Proctor (Τροποποιημένη μέθοδος) ή με τη δονητική σφύρα όταν τα εδάφη είναι κοκκώδη. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, το μόνο που πρέπει να κάνει ο μηχανικός, μετά τον καθορισμό της βέλτιστης υγρασίας και της αντίστοιχης αντοχής, είναι να εξασφαλίσει το ίδιο ποσοστό υγρασίας κατά τη διάρκεια της κατασκευής-συμπύκνωσης.

Το παραπάνω είναι δυνατόν να επιτευχθεί με σχετική ευκολία μόνο εάν οι εργασίες κατασκευής και ειδικότερα της συμπύκνωσης του υπεδάφους εκτελεσθούν

κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Εάν οι εργασίες κατασκευής εκτελεστούν κατά τη διάρκεια χειμερινών μηνών ή βροχοπτώσεων είναι σίγουρο ότι η υγρασία του υπεδάφους κατά τη συμπύκνωση θα είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, η συμπυκνωμένη πυκνότητα μικρότερη και κατά συνέπεια η φέρουσα ικανότητα μικρότερη.

Οι Black και Lister απέδειξαν ότι όταν τα υπεδάφη, ιδιαίτερα τα αργιλικά και αργιλώδη, βρεθούν σε κατάσταση κορεσμού κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η μετέπειτα φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους σε κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μετά το πέρας της κατασκευής, είναι μικρότερη με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Εκτιμήθηκε ότι η διάρκεια ζωής σε αυτές τις περιπτώσεις είναι περίπου η μισή από αυτήν του οδοστρώματος που κατασκευάστηκε κάτω από κανονικές συνθήκες. Ακόμη και στις περιπτώσεις όπου μαζί με τις χωματουργικές εργασίες ταυτόχρονα διαστρώθηκε και η εξυγιαντική στρώση, η αύξηση του ποσοστού υγρασίας του υπεδάφους λόγω βροχοπτώσεων ήταν αισθητή και επηρέασε δυσμενώς τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Έτσι συνιστάται όπως οι χωματουργικές εργασίες εκτελούνται σε περιόδους που δεν αναμένονται βροχοπτώσεις και άνευ διακοπής μέχρι και της διαστρώσεως της πρώτης ασφαλικής στρώσης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί το λάθος που γίνεται αρκετές φορές, όταν η βάση με ασύνδετα αδρανή αφήνεται ακάλυπτη καθόλη τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, για να συνεχισθούν οι εργασίες τους εαρινούς μήνες. Αποδεικνύεται ότι όχι μόνο υπάρχει διάβρωση της επιφάνειας με την απώλεια των λεπτόκοκκων και τη δημιουργία κυματισμών ή και λάκκων, αλλά επηρεάζεται άμεσα και η συνολική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Εάν η διαστασιολόγηση βασιζόταν στην αντοχή του υπεδάφους κάτω από τις προαναφερθείσες, σχεδόν ιδανικές, συνθήκες είναι βέβαιο ότι η κατασκευή θα υποδιαστασιολογούταν και θα παρουσίαζε σύντομα πρόβλημα. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να εκτιμηθούν αντιπροσωπευτικές συνθήκες οι οποίες θα ισχύουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Η ακριβής εκτίμηση του αντιπροσωπευτικού ποσοστού υγρασίας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του οδοστρώματος είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, εγχείρημα. Και τούτο διότι η υγρασία του υπεδάφους καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του οδοστρώματος επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες οι κυριότεροι των οποίων είναι:

ο εποχιακός (αυξομείωση του υδροφόρου ορίζοντα), η ποιότητα (κατάταξη) του εδαφικού υλικού, η καλή ή κακή εκτέλεση της κατασκευής (κυρίως λόγω ύπαρξης ή μη έργων αποστράγγισης και προστασίας του υπεδάφους) και το πάχος των υπερκείμενων στρώσεων (παροχή επιπρόσθετης προστασίας του υπεδάφους).

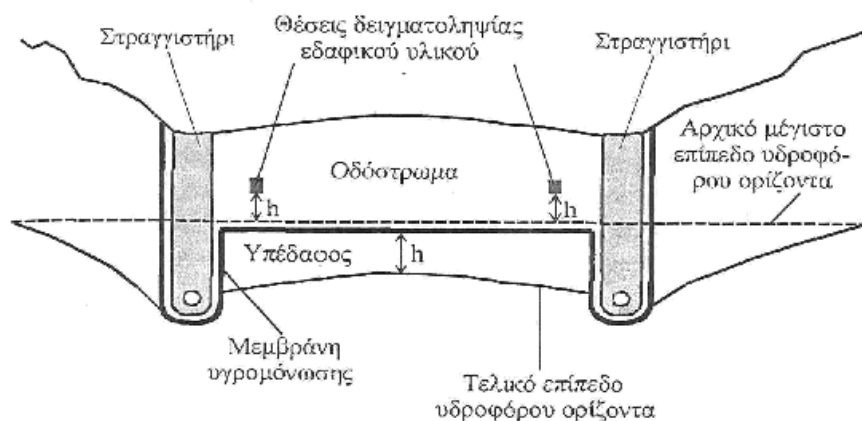
Ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος για να μπορέσει να αντεπεξέλθει ο μηχανικός στο παραπάνω πρόβλημα και να διαστασιολογήσει ορθά το οδόστρωμα είναι να ακολουθήσει πιστά τις οδηγίες της μεθοδολογίας που αποφάσισε να χρησιμοποιήσει. Κατά κανόνα όλες οι μεθοδολογίες ακολουθούν μια

βασική αρχή. Η αντοχή του υπεδάφους να μετριέται σε διαφορετικούς αντιπροσωπευτικούς μήνες και εάν είναι δυνατόν κάθε μήνα. Αυτό συνεπάγεται τη δειγματοληψία εδαφικού υλικού σε αντιπροσωπευτικά χρονικά διαστήματα (άνοιξη-καλοκαίρι-φθινόπωρο-χειμώνα) για τον καθορισμό της φυσικής υγρασίας αυτού καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και κατόπιν προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας. Η σχέση CBR (ή άλλης έκφρασης της αντοχής του υπεδάφους) και υγρασίας και ξηρής πυκνότητας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για το μελετητή. Από αυτή θα καθορισθεί τόσο η σχεδιαστική τιμή του CBR όσο και η επιδιωκόμενη (στοχεύουσα) ξηρή πυκνότητα κατά τη συμπύκνωση.

Ο μελετητής, έχοντας καθορίσει τις παραπάνω σχέσεις και τη σχεδιαστική τιμή της αντοχής του υπεδάφους, ακολουθώντας τις οδηγίες της μεθοδολογίας που χρησιμοποιεί, θα πρέπει να διασφαλίσει ότι οι συνθήκες υγρασίας κάτω από τις οποίες πήρε τα δείγματα του δεν πρόκειται να αλλάξουν καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του οδοστρώματος. Αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στις περιπτώσεις ορυγμάτων όπου τα εδάφη είναι αργιλικά ή ιλυώδη ή αργιλο-ιλυώδη. Η υγρασία του υπεδάφους θα πρέπει να προστατεύεται τόσο από την πιθανή ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα όσο και από την πιθανή διείσδυση των επιφανειακών υδάτων διαμέσου των στρώσεων στο υπέδαφος. Τυπική διατομή προστασίας του υπεδάφους σε όρυγμα δίνεται στο Σχήμα 2.13. Στην περίπτωση που ορισμένες μέρες του χρόνου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στην επιφάνεια του υπεδάφους, ανεξάρτητα εάν έχει καθορισθεί η φέρουσα ικανότητα σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, κατά την κατασκευή του οδοστρώματος θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε ο υδροφόρος ορίζοντας πάντοτε να βρίσκεται σε κάποιο βάθος χαμηλότερα από το επίπεδο της σκάφης. Το βάθος αυτό εξαρτάται άμεσα από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης στο εδαφικό υλικό.

Στην περίπτωση που το υπεδάφος είναι πολύ ευαίσθητο στην υγρασία (Δείκτης πλαστικότητας <25) και ο υδροφόρος ορίζοντας αρκετά ψηλά, συνιστάται όπως κατασκευάζεται μια στραγγιστική στρώση κάτω από το επίπεδο της σκάφης. Η στρώση αυτή αποτελείται από κατάλληλα κοκκώδη υλικά και έχει συνήθως πάχος 150-200mm.

Μια άλλη παράμετρος που θα πρέπει απαραίτητως να λαμβάνεται υπόψη κατά τον καθορισμό της σχεδιαστικής τιμής της αντοχής του υπεδάφους είναι και η σταθερότητα της ομοιομορφίας αυτού καθ' όλο το μήκος της κατασκευής. Αρκετές είναι οι φορές που το έδαφος αλλάζει, συνήθως σε κατασκευές που εκτείνονται σε μήκος πολλών χιλιομέτρων. Στην περίπτωση αυτή ο μελετητής δεν έχει παρά να διαφοροποιήσει τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος ομαδοποιώντας την ποιότητα του υπεδάφους σε δύο ή τρεις ομάδες. Σε έργα ολίγων χιλιομέτρων είναι πιθανόν να επιλέξει τη δυσμενέστερη περίπτωση από άποψη αντοχής υπεδάφους. Βεβαίως αυτό δεν είναι σύνηθες όταν σε μεμονωμένα μόνο σημεία το υπεδάφος παρουσιάζει πρόβλημα. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνιστάται η τοπική εξυγίανση ή σταθεροποίηση του υπεδάφους, ως η οικονομικότερη λύση.



Σχήμα 2.13.: Τυπική διατομή προστασίας υπεδάφους σε όρυγμα

2.12.2. Εκτίμηση CBR του υπεδάφους

Είναι φανερό ότι ο καθορισμός της σχεδιαστικής τιμής της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους είναι μια δαπανηρή και επίπονη αλλά δυστυχώς άκρως αναγκαία εργασία. Ορισμένοι οργανισμοί ή εθνικά εργαστήρια στην προσπάθεια να μειώσουν το υψηλό κόστος, που σε μικρά έργα είναι δυσανάλογο του ολικού κόστους κατασκευής, μετά από εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα κατέληξαν σε πίνακες ή

σχέσεις από τους οποίους είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με σχετική ακρίβεια η σχεδιαστική τιμή CBR του υπεδάφους.

Η πλέον αναλυτική διερεύνηση για την εκτίμηση του CBR του υπεδάφους έγινε από το ερευνητικό εργαστήριο της Αγγλίας (TRRL, που μετονομάστηκε σε TRL) τα αποτελέσματα του οποίου ενσωματώθηκαν και χρησιμοποιούνται στη Βρετανική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδστρωμάτων. Τα αποτελέσματα, που δίνονται στον Πίνακα 2.12, εξήχθησαν με βάση τη δυνατότητα αναρρόφησης (άντλησης) του εδαφικού υλικού και λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδιαστική τιμή της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους οι οποίοι είναι: το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα (υψηλό ή χαμηλό) κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, οι συνθήκες υγρασίας που επικρατούν κατά την εκτέλεση της κατασκευής (κακές, μέτριες, καλές) και το πάχος της υπερκείμενης κατασκευής δηλαδή του οδοστρώματος (μικρό πάχος ή μεγάλο πάχος).

Πίνακας 2.12: Σχεδιαστικές τιμές CBR υπεδάφους (<5) (σε συνθήκες ισορροπίας, δηλ. συμπυκνωμένου στη φυσική του αντιπροσωπευτική υγρασία)

Κατηγορία εδάφους	PI	CBR Υπεδάφους Υψηλός υδροφόρος ορίζοντας						CBR Υπεδάφους Χαμηλός υδροφόρος ορίζοντας					
		Συνθήκες κατασκευής											
		Κακές		Μέτριες		Καλές		Κακές		Μέτριες		Καλές	
		Μι	Με	Μι	Με	Μι	Με	Μι	Με	Μι	Με	Μι	Με
Αργιλώδεις	70	1.5	2	2	2	2	2	1.5	2	2	2	2	2.5
	60	1.5	2	2	2	2	2.5	1.5	2	2	2	2	2.5
	50	1.5	2	2	2.5	2	2.5	2	2	2	2.5	2	2.5
	40	2	2.5	2.5	3	2.5	3	2.5	2.5	3	3	3	3.5
Πυσαργιλώδεις Αμμοαργιλώδεις	30	2.5	3.5	3	4	3.5	5	3	3.5	4	4	4	6
	20	2.5	4	4	5	4.5	7	3	4	5	6	6	8
	10	1.5	3.5	3	6	3.5	7	2.5	4	4.5	7	6	>8
Δαυλώδεις		1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2
Άμμος								20					
- κακής διαβ.								40					
- καλής διαβ.								60					
Αμιτοχάλικο								60					
- καλής διαβ.								60					

Μι = μικρό πάχος οδοστρώματος Με = μεγάλο πάχος οδοστρώματος

Υψηλός υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται αυτός που είναι σε σταθερό βάθος 300mm από το επίπεδο της σκάφης του οδοστρώματος (η πλέον συνήθης των περιπτώσεων). Χαμηλός υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται αυτός που βρίσκεται σε βάθος 1000mm.

Κακές συνθήκες υγρασίας απαντώνται όταν η κατασκευή γίνεται με βροχή και δεν υπάρχει καλή αποστράγγιση της περιοχής και προστασία του υπεδάφους, με συνέπεια η υγρασία του υπεδάφους να είναι πάντοτε μεγαλύτερη από αυτήν που θα έχει το υπέδαφος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας

του όταν η κατάσταση θα εξισορροπηθεί (συνθήκες ηρεμίας- ισορροπίας). Μέτριες συνθήκες υγρασίας απαντώνται όταν κατά την εκτέλεση των εργασιών βρέχει αλλά το υπέδαφος έχει ήδη προστατευθεί με την κατασκευή της υπόβασης ή της εξυγιαντικής στρώσης σε περίοδο ξηρασίας ή ακόμη με τη χρήση υγρομονωτικής μεμβράνης και υπάρχει καλή αποστράγγιση της περιοχής. Τέλος, καλές συνθήκες υγρασίας απαντώνται όταν οι εργασίες γίνονται σε περιόδους ξηρασίας με αποτέλεσμα η υγρασία του υπεδάφους να είναι πάντοτε χαμηλότερη αυτής κατά τις συνθήκες ισορροπίας.

Μικρό πάχος οδοστρώματος θεωρείται όταν το ολικό πάχος του οδοστρώματος (συμπεριλαμβανομένης και της εξυγιαντικής στρώσης, εάν ήθελε χρησιμοποιηθεί) είναι 300mm, σε αντίθεση με το μεγάλο πάχος που θεωρείται το πάχος των 1200mm (η περίπτωση αυτή απαντάται μόνο σε αυτοκινητοδρόμους). Για οδοστρώματα ενδιάμεσου πάχους, που κατασκευάζονται πάνω σε εδάφη με πλαστικότητα, η σχεδιαστική τιμή του CBR εκτιμάται με παρεμβολή.

2.12.3. Συσχέτιση CBR και μέτρου ελαστικότητας

Οι αναλυτικές και ορισμένες ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες διαστασιολόγησης χρησιμοποιούν ως θεμελιώδη μονάδα έκφρασης της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους το μέτρο ελαστικότητας ή επανάκτησης, $E (=M_r)$ που εκφράζει τη δυσκαμψία του υλικού ή της στρώσης. Ο καθορισμός του μέτρου ελαστικότητας απαιτεί τη χρήση πολυπλοκότερης και ακριβότερης του CBR συσκευής, πράγμα που καθιστά την ύπαρξη τέτοιας συσκευής σε κάθε εργαστήριο δύσκολη. Επίσης, υπάρχει τεράστια εμπειρία και όγκος δεδομένων από μετρήσεις της φέρουσας ικανότητας σε CBR. Οι δύο παραπάνω παράγοντες συνηγορούν στο γεγονός ότι η ύπαρξη σχέσης μεταξύ CBR και E θα ήταν πολύ χρήσιμο βοήθημα για το μελετητή.

Απόλυτη και ακριβής συσχέτιση μεταξύ του CBR και του μέτρου ελαστικότητας είναι ουσιαστικά αδύνατον να υπάρξει, δεδομένης της πολυμορφίας του εδάφους και των διαφορετικών εντατικών καταστάσεων που επικρατούν στο

εργαστήριο και στο έργο. Πλην όμως, για τυπικές συνθήκες τάσεων και μετά από εκτεταμένες εργαστηριακές έρευνες από διάφορους οργανισμούς, καθορίστηκαν εμπειρικές σχέσεις οι οποίες συχνά χρησιμοποιούνται, κατά τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας από μετρήσεις CBR. Οι συνηθέστερες σχέσεις που χρησιμοποιούνται, για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά, είναι:

$$E = 17.6 (\text{CBR})^{0.64}, (\text{MN/m}^2) \quad (2.13)$$

$$E(=M_r) = 10.3 \text{ CBR}, (\text{MN/m}^2) \quad (2.14)$$

$$E(=M_r) = 8.0 + 3.8 R, (\text{MN/m}^2) \quad (2.15)$$

Η σχέση 2.13 καθορίστηκε από το Βρετανικό ερευνητικό κέντρο (TRL) και προτείνεται από το Υπουργείο Μεταφορών της Αγγλίας στη νεώτερη μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων. Η πιστότητα της σχέσης αυτής περιορίζεται σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά με εργαστηριακές τιμές CBR από 2% έως 12%.

Οι σχέσεις 2.14 και 2.15 προτείνονται από το Asphalt Institute των Η.Π.Α. και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για εδάφη των κατηγοριών A-7, A-6, A-5, A-4 και τα λεπτότερα της κατηγορίας A-2 (ταξινόμηση κατά AASHTO), ή CL, CH, ML, SC, και SP (κατά Unified classification), ή γενικότερα υλικών που εκτιμώνται ότι έχουν μέτρο επανάκτησης μικρότερο του 207 MN/m².

Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά και όχι για χονδρόκοκκα. Επίσης, από τον περιορισμό της σχέσεως 2.13 διαφαίνεται ότι για συνεκτικά εδάφη με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (π.χ. >30), που κατά κανόνα έχουν μικρό CBR, το μέτρο ελαστικότητας θα πρέπει να καθορίζεται απευθείας από τη δοκιμή καθορισμού του μέτρου ελαστικότητας.

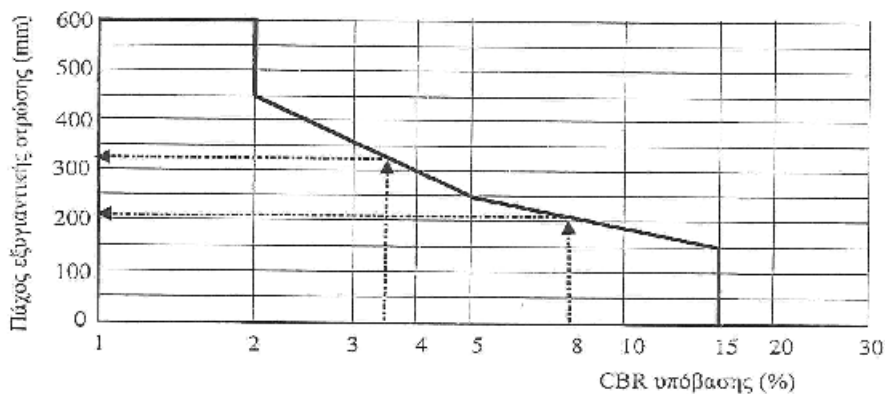
2.13. Εξυγιαντική στρώση

Η εξυγιαντική στρώση είναι η στρώση που κατασκευάζεται μεταξύ υπόβασης και υπεδάφους, όταν αυτό είναι πολύ ασθενές, με σκοπό να εξυγιάνει και να βελτιώσει τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και να προετοιμάσει μια ανεκτή επιφάνεια πάνω στην οποία θα κατασκευασθεί το οδόστρωμα. Εξυγιαντική στρώση συνήθως χρησιμοποιείται όταν το CBR του υπεδάφους είναι μικρότερο του 5%, είναι απολύτως απαραίτητη όταν το CBR είναι μικρότερο του 2.5% και η χρήση της προϋποθέτει και τη χρήση υπόβασης.

Η εξυγιαντική στρώση συνήθως είναι μια επιπλέον στρώση από κοκκώδη εδαφικά υλικά, άνευ απομάκρυνσης του ασθενούς εδαφικού υλικού. Απομάκρυνση του πολύ ασθενούς εδαφικού υλικού και αντικατάσταση αυτού με καλύτερης ποιότητας υλικό συνιστάται μόνο όταν το CBR αυτού είναι κατά πολύ μικρότερο του 2%. Στις περιπτώσεις αυτές το πάχος της στρώσης που απομακρύνεται είναι συνήθως μεταξύ 500 και 1000mm.

Εξυγίανση του υπεδάφους επιτυγχάνεται και με τη σταθεροποίηση αυτού με τσιμέντο ή ασβέστη. Σταθεροποίηση του εδάφους συνιστάται όταν αυτό είναι πολύ ασθενές (CBR < 2%).

Το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης καθορίζεται στο στάδιο της μελέτης διαστασιολόγησης του οδοστρώματος. Στις περισσότερες μεθοδολογίες αφήνεται στην κρίση και εμπειρία του μελετητή να το καθορίσει, δίχως να του παρέχονται περισσότερες πληροφορίες. Συνήθως για CBR 2-4% το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης είναι 400-600mm. Η πρόσφατη Βρετανική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων είναι ίσως η μόνη που παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του πάχους συναρτήσει του CBR. Κατά τη μεθοδολογία αυτή το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης καθορίζεται από το CBR του υπεδάφους, Σχήμα 2.13. Μαζί με την εξυγιαντική στρώση, ανεξαρτήτως πάχους, η μεθοδολογία απαιτεί και την κατασκευή υπόβασης πάχους 150mm.



Σχήμα 2.13.: Υπολογισμός πάχους εξυγιαντικής στρώσης

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η εξυγιαντική στρώση, που συνήθως κατασκευάζεται πάνω στο υπεδάφος δεν αποτελεί μέρος του οδοστρώματος. Το επίπεδο λοιπόν της «σκάφης» είναι εκεί που τελειώνει η εξυγιαντική στρώση. Συνεπώς, ο μελετητής θα πρέπει να την προβλέψει για να μην αλλάξουν μετέπειτα όλα τα

υψόμετρα της οδού. Σε αντίθετη περίπτωση η μόνη εναλλακτική λύση είναι η απομάκρυνση του εδαφικού υλικού και η τοποθέτηση καινούργιου ή η σταθεροποίηση του εδάφους. Στις περιπτώσεις αυτές συνηθέστερο είναι να γίνει σταθεροποίηση αυτού, εφ' όσον αυτό είναι κατάλληλο προς σταθεροποίηση.

2.13.1. Υλικά εξυγιαντικής στρώσης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της εξυγιαντικής στρώσης είναι συνήθως επιλεγμένα κοκκώδη εδαφικά υλικά ή άλλα κοκκώδη υλικά από οποιοδήποτε πέτρωμα, πλην κιμωλίας, καθώς και απορριπτέα υλικά ανθρακωρυχείων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υποβάσεων.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των υλικών για εξυγιαντικές στρώσεις θα πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων που δίνονται στον Πίνακα 2.14. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης και άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες αυτών των υλικών.

Ο Τύπος 6F1 είναι παρόμοιος με τον Τύπο 2, για υποβάσεις, με μόνη διαφορά ότι μαλακότερα αδρανή υλικά καθώς και μη προδιαγραφόμενα εναλλακτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξυγιαντικές στρώσεις. Ο Τύπος 6F2 είναι περισσότερο χονδρόκοκκος του 6F1 και χρησιμοποιείται για στρώσεις με μεγαλύτερο πάχος.

2.13.2. Σταθεροποίηση υπεδάφους

Ορισμένες φορές το υπέδαφος για να εξυγιανθεί σταθεροποιείται με τσιμέντο ή ασβέστη. Αυτό είναι δυνατόν μόνο εάν αυτό είναι κατάλληλο για σταθεροποίηση (Πίνακας 2.14: ιδιότητες υλικού τύπου 6F και 7E). Στην περίπτωση αυτή το υπέδαφος αναμοχλεύεται, προστίθεται σε αυτό το συνδετικό υλικό και συμπυκνώνεται. Σπάνια είναι τέλος η περίπτωση να μεταφερθούν νέα υλικά και να σταθεροποιηθούν. Η μόνη εξαίρεση στην περίπτωση αυτή είναι ίσως η μεταφορά και σταθεροποίηση υλικών με μηδενικό κόστος κτήσης (πχ. ιπτάμενη τέφρα ή άλλα απορριπτέα υλικά ορυχείων ή βιομηχανιών). Η χρήση ή μη της σταθεροποίησης του εδάφους ή των σταθεροποιημένων υλικών καθορίζεται από το συνολικό κόστος (κόστος μεταφοράς, κόστος σταθεροποιητού και κόστος επεξεργασίας) συγκρινόμενο με το συνολικό κόστος και διαθεσιμότητα των φυσικών φερτών υλικών άνευ σταθεροποιητή, θα πρέπει

να αναφερθεί ότι κανένα ουσιαστικό πλεονέκτημα, από μηχανικής συμπεριφοράς οδοστρώματος, δεν έχουν τα σταθεροποιημένα υλικά της εξυγιαντικής στρώσης έναντι των μη σταθεροποιημένων υλικών.

Πίνακας 2.14.: Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων και χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών για εξυγιαντικές στρώσεις

Αριθμός κοσκίνου (mm)	Κοκκώδη εδαφικά υλικά		Σταθεροπ. με τσιμέντο	Σταθεροπ. με ασβέστη
	Τύπος 6F1 ^(α)	Τύπος 6F2 ^(α)	Τύπος 6E ^(α)	Τύπος 7E ^(β)
	Διερχόμενα ποσοστά (%) κατά βάρος			
125	-	100	100	-
90	-	80-100	85-100	-
75	100	65-100	-	100
37.5	75-100	45-100	-	-
28	-	-	-	95-100
10	40-95	15-60	25-100	-
5.0	30-85	10-45	-	-
0.600	10-50	0-25	10-100	-
0.063	< 15	0-12	< 15	15-100
Άλλες ιδιότητες				
Βέλτιστο % υγρασίας	> 2 %	> 2 %	-	καθορίζεται
Τιμή για 10% λεπτόκ.	> 30 kN	-	-	-
Όριο υδαρότητας	-	-	< 45	-
Δείκτης πλαστικότητας	-	-	< 20	> 10
Οργανικές ουσίες	-	-	< 2 %	-
Ποσοστό θεϊκού άλατος	-	-	< 1 %	-
SMC κημωλίας ^(γ)	-	-	< 20 %	-

^(α) Κοκκώδη υλικά

^(β) Συνεκτικά υλικά

^(γ) SMC = Υγρασία κορεσμού ασβεστολιθικών σβόλων (κημωλίας), %

Η χρήση σταθεροποιημένων υλικών με τσιμέντο επιλέγεται μόνο όταν συντρέχουν οι λόγοι που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στην περίπτωση που ήθελε χρησιμοποιηθεί τσιμέντο ή ασβέστης η περιεκτικότητα αυτών στο μίγμα, καθώς και η απαιτούμενη ποσότητα ύδατος, θα πρέπει να καθορισθεί εργαστηριακά με βάση τις αντοχές που επιτυγχάνονται. Η ελάχιστη θλιπτική αντοχή που επιζητείται είναι 345 kPa (50psi). Αυτή η αντοχή επιτυγχάνεται με 2%, κατ' ελάχιστο, τσιμέντο ή ασβέστη και μπορεί να φθάσει και μέχρι 10% κατά βάρος σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων και υψηλός δείκτης πλαστικότητας. Περισσότερες πληροφορίες για τον καθορισμό του ποσοστού της άσβεστου δίνονται στις προδιαγραφές AASHTO T 220-66, ενώ για την καταλληλότητα των αργιλικών εδαφών προς σταθεροποίηση με ασβέστη στις προδιαγραφές AASHTO M 216-99.

Η προσθήκη και ανάμιξη των συνδετικών υλικών και του νερού γίνεται επί του έργου, αφού προηγουμένως το εδαφικό υλικό κονιορτοποιηθεί (σπάσουν οι σβώλοι έτσι ώστε όλοι να περνούν το κόσκινο 28mm) με ειδικά μηχανήματα. Η σταθεροποίηση γίνεται σε στρώσεις μέγιστου συμπυκνωμένου πάχους 250mm. Εάν το πάχος της συμπυκνωμένης στρώσης είναι μεγαλύτερο των 250mm τότε η σταθεροποίηση γίνεται σε στρώσεις ελαχίστου πάχους 130mm και μέγιστου 250mm.

2.13.3. Συμπύκνωση εξυγιαντικής στρώσης

Τα υλικά της εξυγιαντικής στρώσης συμπυκνώνονται, με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανημάτων, σε στρώσεις μέγιστου συμπυκνωμένου πάχους 250mm. Η συμπύκνωση κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές γίνεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του Πίνακα 2.15. Ο βαθμός συμπύκνωσης, ο οποίος στην πράξη εκφράζεται σε αριθμό διελεύσεων του μηχανήματος που χρησιμοποιείται, είναι τόσοσ ώστε, στην προκαθορισμένη υγρασία του υλικού, να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή συμπύκνωση.

Πριν τη διάστρωση της εξυγιαντικής στρώσης, η επιφάνεια επί της οποίας πρόκειται να διαστρωθεί η εξυγιαντική στρώση (όρυγμα ή επίχωμα) θα πρέπει να κυλινδρωθεί αμέσως μετά τη μόρφωση αυτής. Η κυλίνδρωση συνιστάται όπως είναι μια διέλευση οδοστρωτήρα στατικού λείου κυλίνδρου βάρους όχι μικρότερου των 2.100 Kg ανά μέτρο πλάτους κυλίνδρου, ή μια διέλευση δονητικού οδοστρωτήρα βάρους όχι μικρότερου των 700 Kg ανά μέτρο πλάτους κυλίνδρου.

2.13.4. Χρήση γεωφασμάτων και γεωπλεγμάτων

Γεωφάσματα

Η χρήση των γεωφασμάτων συνιστάται όταν το υπέδαφος είναι πολύ ασθενές (CBR <2%) και μπορεί να αντικαταστήσει ένα μέρος της εξυγιαντικής στρώσης, ή όταν το CBR είναι 2%-5%, οπότε αντικαθιστά πλήρως την εξυγιαντική στρώση και πιθανότατα ένα μέρος της υπόβασης. Με τη χρήση γεωφάσματος αυξάνει η αποτελεσματικότητα της εξυγιαντικής στρώσης ή της υπόβασης και δε χάνεται κανένα ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών που σε άλλη περίπτωση ήταν πιθανόν να εμβυθισθούν μέσα στο ασθενές υπέδαφος κατά τη συμπύκνωση. Η θετική επίδραση της χρήσης γεωφάσματος τεκμηριώνεται από πολλές εφαρμογές αλλά και ολοκληρωμένες έρευνες. Τα αποτελέσματα του TRRL έδειξαν ότι με τη χρήση γεωφάσματος η

παραμένονσα παραμόρφωση της στρώσης με ασύνδετα αδρανή πάνω σε υπέδαφος με CBR 2% ήταν κατά πολύ μικρότερη αυτής άνευ γεωφάσματος. Το γεωφάσμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν πολυπροπυλενίου με αντοχή 10,5 kN/μέτρο μήκους και βάρος 450 kg/m².

Πίνακας 2.15.: Συμπύκνωση υλικών εξυγιαντικής στρώσης μετά ή άνευ συνδετικού υλικού.

Τύπος οδοστρωτήρα (ή μηχανήματος συμπύκνωσης)	Κατηγορία βάρους	Ελάχιστος αριθμός διελεύσεων (N) για υλικά 6F1, 6F2 και σταθεροποιημ. 6E			Ελάχιστος αριθμός διελεύσεων (N) για σταθεροπ. υλικό 7E	
		Πάχος συμπυκνωμένης στρώσης (mm)				
		110mm	150mm	250mm	150mm	250mm
Οδοστρωτήρας λείου στατικού κυλίνδρου	Kg/m πλάτους κυλίνδρου	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 2100-2700	16	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 2700-5400 > 5400	8	16	Ακατάλ.	12	Ακατάλ.
Οδοστρωτήρας με ανάγλυφο κύλινδρο	> 2700-5400	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 5400-8000	20	Ακατάλ.	Ακατάλ.	16	Ακατάλ.
	> 8000	12	20	Ακατάλ.	8	Ακατάλ.
Οδοντωτός	4000-6000	12	20	Ακατάλ.	4	8
	> 6000	8	12	20	3	6
Λαστιχοφόρος οδοστρωτήρας	Συν. βάρος οδοστ./πλάτος συμπ. < 4000	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.		Ακατάλ.
	> 4000-6000	12	Ακατάλ.	Ακατάλ.	(α)	16
	> 6000-8000	12	Ακατάλ.	Ακατάλ.	(β)	8
	> 8000-12000	10	16	Ακατάλ.	(γ)	4
	> 12000	8	12	Ακατάλ.	(δ)	4
Δονητικός (λείου κυλίνδρου) (ταχύτητα κυλίνδρου 1.5 έως 2.5 km/h)	Kg/m πλάτους κυλίνδρου	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 270-450	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 450-700	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 700-1300	16	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 1300-1800	6	16	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 1800-2300	4	6	12	12	Ακατάλ.
	> 2300-2900	3	5	11	10	Ακατάλ.
	> 2900-3600	3	5	10	10	Ακατάλ.
	> 3600-4300	2	4	8	8	Ακατάλ.
	> 4300-5000 > 5000	2	4 3	7 6	8 6	Ακατάλ. 12
Συμπυκνωτής δονητικής πλάκας	kg/m ² πλάκας	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	< 1400	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 1400-1800	8	Ακατάλ.	Ακατάλ.	10	Ακατάλ.
	> 1800-2100 > 2100	5 3	8 6	Ακατάλ. 12	8 6	Ακατάλ. Ακατάλ.
Δομητές επιφανείας (Vibro-tampers)	Βάρους					
	> 50kg-65kg	4	8	Ακατάλ.	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 65kg-75kg	3	6	12	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 75kg-100	2	4	10	Ακατάλ.	Ακατάλ.
	> 100kg	2	4	10	8	Ακατάλ.
Κρουστικοί συμπυκνωτές	Βάρους					
	> 100kg-500kg > 500kg	5 5	8 8	Ακατάλ. 14	8 6	Ακατάλ. 10
Συμπυκνωτές πίπτοντος φορτίου		Όλοι είναι ακατάλληλοι				

(α) >1500-2000 : 12, (β) >2000-2500 : 6, (γ) > 2500-4000 : 5, (δ) >4000-6000 : 4, (kg/τροχή : N)

Η χρήση γεωφασμάτων συνιστάται και όταν το υπέδαφος έχει υψηλό ποσοστό αργιλικού υλικού και η υπερκείμενη στρώση της υπόβασης χρησιμοποιείται ως αποστραγγιστική στρώση. Στην περίπτωση αυτή η υπερκείμενη αποστραγγιστική στρώση, εάν δεν προστατευθεί, προσβάλλεται από το λεπτόκοκκο αυτό αργιλικό υλικό το οποίο κλείνει τους πόρους και έτσι λειτουργεί αναποτελεσματικά για ένα μεγάλο μέρος του προβλεπόμενου χρονικού διαστήματος λειτουργίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις η εισροή των πολύ λεπτόκοκκων υλικών στην υπερκείμενη στρώση μπορεί να μειώσει και τη διατμητική αντοχή της στρώσης με δυσάρεστα αποτελέσματα στην όλη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Τα γεωφάσματα κατασκευάζονται από συνθετικές ή άλλες ίνες έτσι ώστε να δημιουργούν μεμβράνη ελάχιστης διαπερατότητας, π.χ. 10 λίτρα/ m²/sec κατά BS 6906: Part 3 ή άλλων προδιαγραφών, (άνοιγμα πόρων συνήθως 0.1 έως 0.3mm). Επίσης θα πρέπει να είναι επαρκούς αντοχής για να μην τραυματίζονται ή καταστρέφονται από τα κοκκώδη αδρανή κατά την εκφόρτωση και τη συμύκνωση αυτών. Έτσι, θα πρέπει να έχουν τις απαραίτητες αντοχές τόσο στη διείδυση όσο και στον εφελκυσμό (έλεγχος κατά DIN 54307, DIN 53587 ή BS 6906).

Συμπερασματικά, η χρήση γεωφασμάτων γίνεται κυρίως για το διαχωρισμό και προστασία των υπερκείμενων του υπεδάφους στρώσεων, παρόλο που η αρκετά μεγάλη εφελκυστική αντοχή του γεωφάσματος συμβάλλει στη μείωση των τάσεων που αναπτύσσονται στο υπέδαφος και έτσι έμμεσα στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους.

Γεωπλέγματα

Η αποτελεσματικότερη αύξηση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους ή άλλης στρώσης, όπως υπόβαση ή βάση, επιτυγχάνεται με τη χρήση γεωπλεγμάτων, που λειτουργούν ως ένα είδος οπλισμού της στρώσης. Το γεώπλεγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με γεώφασμα.

Τα γεωπλέγματα είναι συνήθως πολυεστερικά υλικά ή από πλέξη ινών καλυμμένων με PVC. Το πλέγμα που δημιουργείται είναι τετραγωνικής μορφής διαφόρων διαστάσεων (συνήθως 10mmx10mm έως 50mmx50mm).

Οι διαστάσεις του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζονται από το μέγεθος των κόκκων των αδρανών της υπερκείμενης στρώσης ή της στρώσης μέσα στην οποία θα τοποθετηθεί (μορφή σάντουιτς).

Τα γεωπλέγματα θα πρέπει να έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή έτσι ώστε να μπορούν να παραλάβουν υψηλές εφελκυστικές τάσεις. Τιμές που συνήθως επιζητούνται είναι 35-100 kN/ανά μέτρο μήκους πλέγματος.

Παρόλο που με τη χρήση γεωφασμάτων, και ιδιαίτερα γεωπλεγμάτων, μπορεί να επέλθει μείωση του πάχους της στρώσης και κατ' επέκταση του πάχους του οδοστρώματος, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει καμία μεθοδολογία που να λαμβάνει αυτό υπόψη της. Τεκμηρίωση της μείωσης του πάχους του οδοστρώματος και ποσοτικός καθορισμός αυτής γίνεται μόνο μετά από αναλυτική μελέτη του οδοστρώματος. Τις περισσότερες φορές η μείωση του πάχους, αν γίνεται όταν χρησιμοποιείται γεώπλεγμα ή/και γεωφύσασμα, γίνεται σχεδόν αυθαίρετα βάσει πρότασης του κατασκευαστή των υλικών αυτών. Αρκετές είναι οι περιπτώσεις όπου δεν επέρχεται καμία μείωση του πάχους. Στην περίπτωση αυτή η χρήση των υλικών αυτών λειτουργεί ως συντελεστής ασφαλείας της ποιότητας της κατασκευής, βεβαίως με την αντίστοιχη οικονομική επιβάρυνση.

2.14. ΥΠΟΒΑΣΗ

Η υπόβαση είναι η πρώτη στρώση που τοποθετείται, εάν κριθεί αναγκαία, πάνω στο υπέδαφος ή την εξυγιαντική στρώση και επιτελεί τις εξής βασικές λειτουργίες:

- (α) μεταβιβάζει τα φορτία στο υπέδαφος
- (β) εξασφαλίζει την άνετη κυκλοφορία των εργοταξιακών οχημάτων
- (γ) προστατεύει τα υλικά της βάσης από «μόλυνση» αυτών με εδαφικό υλικό (άργιλος, ιλύς, οργανικά υλικά κλπ)
- (δ) δρα ως αντιπαγετική προστατευτική στρώση στην περίπτωση που το έδαφος είναι παγοπληκτικό
- (ε) μπορεί να λειτουργήσει και ως στρώση αποστράγγισης των υδάτων που πιθανόν να διαπεράσουν τις υπερκείμενες στρώσεις προστατεύοντας το υπέδαφος. Αυτό είναι πολύ πιθανόν να συμβεί στις περιπτώσεις που οι υπερκείμενες ασφαλικές στρώσεις είναι μικρού πάχους ή/και τα χρησιμοποιηθέντα ασφαλτομίγματα όχι τόσο κλειστής υφής.

Στην περίπτωση κατά την οποία η υπόβαση λειτουργεί ως στραγγιστική στρώση είναι απαραίτητη η χρήση υγρομονωτικής μεμβράνης στη διεπιφάνεια με το υπέδαφος. Ο ρόλος της μεμβράνης είναι καθαρά προστατευτικός και στεγανωτικός. Δηλαδή, με την τοποθέτηση αυτής προστατεύεται η αποτελεσματική λειτουργία της αποστραγγιστικής υπόβασης, λόγω αποκλεισμού της μεταφοράς λεπτόκοκκων υλικών από το έδαφος στην υπόβαση, και αποφεύγεται η μείωση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους και πιθανότατα η διόγκωση από την αύξηση της υγρασίας λόγω των επιφανειακών υδάτων που θα διαπεράσουν τις υπερκείμενες στρώσεις. Στις περιπτώσεις που η υπόβαση καλείται να παίξει το ρόλο αποστραγγιστικής στρώσης συνιστάται όπως ελέγχεται η ταχύτητα αποστράγγισης της στρώσης αυτής.

Το πάχος της υπόβασης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην αναπτύσσονται υψηλές θλιπτικές και διατμητικές τάσεις στο υπέδαφος, υπό την επίδραση των φορτίων των εργοταξιακών οχημάτων, ικανές να προκαλέσουν αισθητές παραμορφώσεις. Το ακριβές πάχος καθορίζεται αναλόγως της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης.

Είναι σύνηθες, όταν το υπέδαφος είναι αρκετά καλό (περίπου $CBR > 7\%$), η υπόβαση να παραλείπεται και να κατασκευάζεται μόνο η βάση από ασύνδετα αδρανή.

Στην περίπτωση που η υπόβαση χρησιμοποιείται ως αντιπαγετική στρώση το πάχος αυτής καθορίζεται από το εκτιμώμενο ή υπολογισθέν βάθος διείδυσης του παγετού.

2.14.1. Υλικά υπόβασης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της υπόβασης είναι συνήθως επιλεγμένα κοκκώδη εδαφικά υλικά (αμμοχάλικα). Ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται εδαφικά υλικά σταθεροποιημένα με συνδετικό υλικό το τσιμέντο (κυρίως) ή τον ασβέστη. Περισσότερες πληροφορίες για τα υλικά και την κατασκευή της υπόβασης δίνονται μαζί με τα υλικά βάσης στις παραγράφους 2.15.1 & 2.15.2.

2.15. Βάση

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

Αναλυτικότερα επιτελεί τις εξής βασικές λειτουργίες:

- (α) παρέχει τη βασική δομική στρώση η οποία παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις
- (β) μειώνει τις κάθετες θλιπτικές τάσεις που εξασκούνται στο υπέδαφος (και διαμέσου της υπόβασης, εάν υπάρχει) σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορούν να παραληφθούν από τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και να μην προκαλούν ανεπίτρεπτα μεγάλες παραμορφώσεις
- (γ) παρέχει στο οδόστρωμα τη δυσκαμψία και την αντοχή αυτού στην κόπωση
- (δ) παρέχει μια καλή επιφάνεια έτοιμη να δεχθεί τις επιφανειακές ασφαλτικές στρώσεις
- (ε) οι στρώσεις της βάσης από ασύνδετα αδρανή ή σταθεροποιημένα αδρανή συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη συμπύκνωση των υπερκείμενων ασφαλτικών στρώσεων.

Η βάση του οδοστρώματος αποτελείται από έναν αριθμό στρώσεων των οποίων τα υλικά μπορεί να είναι από αδρανή δίχως συνδετικό υλικό (ασύνδετα αδρανή) ή από αδρανή με συνδετικό υλικό την ασφαλτο (ασφαλτόμιγμα) ή από αδρανή με συνδετικό υλικό το τσιμέντο.

Ο κλασικός συνδυασμός των στρώσεων της βάσης για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι: στρώση ή στρώσεις από ασύνδετα αδρανή (οι κάτω στρώσεις) και στρώση ή στρώσεις από ασφαλτόμιγμα (οι άνω στρώσεις). Ορισμένες φορές η στρώση από ασύνδετα αδρανή σταθεροποιείται με τσιμέντο ή ασφαλτικό υλικό.

Ένας άλλος συνδυασμός μπορεί να είναι: μέρος της βάσης (κάτω στρώση) από σκυρόδεμα και η υπόλοιπη βάση από ασφαλτόμιγμα. Το οδόστρωμα στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται ως μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα.

Τέλος, η βάση μπορεί να είναι εξ ολοκλήρου από ασφαλτόμιγμα. Η αρχή αυτή υιοθετείται από τη Βρετανική μεθοδολογία κατασκευής ευκάμπτων οδοστρωμάτων.

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της βάσης είναι πάντοτε καλύτερης ποιότητας από αυτά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της υπόβασης.

2.15.1. Βάση και υπόβαση από ασύνδετα αδρανή

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των βάσεων από ασύνδετα αδρανή είναι, κατ' αποκλειστικότητα, θραυστά, αδρανή υλικά. Τα θραυστά αδρανή

μπορεί να είναι από πετρώματα ή φυσικές αποθέσεις ή σκωρίες ή υλικά που προέρχονται από ανακύκλωση οδοστρωμάτων με την προϋπόθεση ότι πληρούν τις απαιτήσεις των προδιαγραφών.

Σε αντίθεση με τα υλικά της βάσης, τα υλικά της υπόβασης είναι συνήθως άθραυστα αδρανή φυσικών αποθέσεων (αμμοχάλικο). Πλην όμως, μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και οποιοδήποτε άλλο από τα προαναφερθέντα υλικά βάσης ή ακόμη και μπάζα οικοδομών.

Τα υλικά βάσης και υπόβασης από ασύνδετα αδρανή είναι -γνωστά στην Ελλάδα ως υλικά «3 Α», σταθεροποιημένου τύπου. Η ονομασία 3 Α προήλθε από την προδιαγραφή που καθόριζε, αρχικά, τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών αυτών. Το 1966 η προδιαγραφή αυτή αντικαταστάθηκε με την ΠΤΠ Ο-155 για υλικά βάσεων και την ΠΤΠ Ο-150 για υλικά υποβάσεων. Η μόνη ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο προδιαγραφών είναι ότι η πρώτη αναφέρεται σε θραυστά αδρανή ενώ η δεύτερη και σε μη θραυστά αδρανή. Οι προδιαγραφές αυτές ισχύουν μέχρι και σήμερα δίχως καμία αναθεώρηση.

Ο όρος υλικά σταθεροποιημένου τύπου χρησιμοποιείται στην Ελλάδα με την ευρύτερη έννοια του όρου, δεδομένου ότι με την προσθήκη νερού στο μίγμα, το μίγμα αποκτά κάποια συνοχή λόγω της ύπαρξης ποσοστού παιπάλης. Η προσθήκη επαρκούς ποσότητας ύδατος διαβρέχει την επιφάνεια των αδρανών, μειώνει τις τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη συμπίκνωση και συνεπώς σταθερότερη στρώση από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς. Η σταθερότητα ή ευστάθεια των στρώσεων οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη σύμπλεξη των αδρανών, πράγμα που επιβάλλει τη χρήση καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης αυτών. Ουσιαστική σταθεροποίηση επέρχεται μόνο με την προσθήκη συνδετικού υλικού που στην περίπτωση αυτή είναι κυρίως τσιμέντο (ή άσφαλτος) ή ασφατικό γαλάκτωμα, (παράγραφος 2.15.2).

Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος των αδρανών είναι ουσιαστικής σημασίας και θα πρέπει να είναι εντός συγκεκριμένων ορίων. Τα όρια αυτά, για τις Ελληνικές προδιαγραφές, δίνονται στον Πίνακα 2.16. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα όρια των κόκκο μετρικών καμπυλών των αδρανών για βάσεις και υποβάσεις είναι ακριβώς τα ίδια.

Εκτός της απαίτησης για συγκεκριμένη κοκκομετρική καμπύλη, τα αδρανή που διέρχονται από το κόσκινο 0.425mm (No.40) θα πρέπει να έχουν Δείκτη πλαστικότητας (PI) μικρότερο του 3 για βάσεις και μικρότερο του 4 για υποβάσεις. Επίσης, το Ισοδύναμο άμμου (SE) των λεπτόκοκκων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 50% για βάσεις και μεγαλύτερο του 40%, για υποβάσεις.

Πίνακας 2.16: Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων αδρανών υλικών για την κατασκευή βάσεων και υποβάσεων κατά ΠΤΠ Ο-155 και Ο-150

Αριθμός κοσκίνου mm (in)	Διερχόμενο ποσοστό (%) κατά βάρος				
	Διαβαθμίσεις				
	A	B	Γ	Δ	E
76.2 (3")	100	-	-	-	-
50.8 (2")	65-100	100	-	-	-
38.1 (1 1/2")	-	70-100	100	-	-
31.7 (1 1/4")	-	-	-	100	-
25.4 (1")	45-75	55-85	70-100	83-100	100
19.1 (3/4")	-	50-80	60-90	65-95	70-100
9.52 (3/8")	30-60	40-70	45-75	47-77	50-80
4.76 (No.4)	25-50	30-60	30-60	33-63	35-65
2.00 (No.10)	20-40	20-50	20-50	23-50	25-50
0.42 (No.40)	10-25	10-30	10-30	13-30	15-30
0.074 (No.220)	3-10	5-15	5-15	5-15	5-15

Ο καθορισμός της απαιτούμενης υγρασίας των αδρανών κατά τη συμπίκνωση καθορίζεται εργαστηριακά με τη μέθοδο προσδιορισμού σχέσεως υγρασίας - πυκνότητας κατά Proctor (Τροποποιημένη μέθοδος Δ) για μέγιστη πυκνότητα, όπως περιγράφεται στις Τεχνικές προδιαγραφές E 105-86 με τη διόρθωση που συνιστάται από την ΠΤΠ Ο-155. Η προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας ύδατος μπορεί να γίνει επί του έργου αλλά με την προϋπόθεση ότι θα προστεθεί επακριβώς η κατάλληλη ποσότητα ύδατος και θα γίνει επαρκής αναμόχλευση του υλικού έτσι ώστε να επέλθει ομοιόμορφη διασπορά του ύδατος, θα πρέπει να τονισθεί ότι τόσο λιγότερη υγρασία όσο και, κυρίως, επιπλέον από αυτήν που καθορίστηκε εργαστηριακά δεν είναι επιθυμητή. Και στις δύο περιπτώσεις η πυκνότητα του συμπυκνωθέντος υλικού δε θα είναι η μέγιστη επιθυμητή. Κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές επιτρέπονται αποκλίσεις της τάξεως του $\pm 0.5\%$.

Η τακτική της διαβροχής των διαστρωθέντων αδρανών υλικών, γνωστών ως 3 Α, που συνήθως ακολουθείται στην Ελλάδα, δεν είναι η ενδεδειγμένη. Ο ενδεδειγμένος τρόπος είναι η προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας του ύδατος και η ανάμιξη να

γίνεται στο εργοτάξιο και το τελικό υγρό μίγμα να μεταφέρεται στο έργο έτοιμο προς διάστρωση και συμπύκνωση. Η διάστρωση στην περίπτωση αυτή γίνεται με διαστρωτήρα (finisher). Το μόνο μειονέκτημα της τακτικής αυτής, που ακολουθείται στο εξωτερικό, είναι η πιθανότητα εξάτμισης μέρους της ποσότητας του ύδατος κατά τη μεταφορά.

Ο ιδανικός τρόπος ύγρυνσης και διάστρωσης των αδρανών υλικών βάσεων είναι να χρησιμοποιηθεί ειδικό μηχάνημα που φέρει δεξαμενή νερού, δοσομετρικό σύστημα παροχής και ψεκασμού νερού, αναμκτήρα και δια-στρωτήρα (finisher). Η τροφοδοσία των αδρανών γίνεται από προπορευόμενα φορτηγά που εκφορτώνουν στον κάδο υποδοχής των αδρανών (όπως η τροφοδοσία θερμού ασφαλτομίγματος στο finisher). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ακριβής ύγρυνση των αδρανών, ομοιόμορφη διασπορά του ύδατος και ακριβές πάχος στρώσης.

Οι Βρετανικές προδιαγραφές, σε αντίθεση με τις Αμερικανικές, δεν επιτρέπουν τα θραυστά υλικά Τύπου 1 να έχουν πλαστικότητα (PI= Non Plastic). Για τα υλικά Τύπου 2, επιτρέπουν να έχουν δείκτη πλαστικότητας PI μικρότερο του 6, τιμή που είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν που προτείνεται από τις αμερικανικές προδιαγραφές, αλλά πρέπει να ελέγχεται το CBR. Επίσης, οι Βρετανικές προδιαγραφές απαιτούν τον έλεγχο καθορισμού της δύναμης για 10% λεπτόκοκκα καθώς και τον έλεγχο υγείας, έλεγχοι σκληρότητας και ανθεκτικότητας των αδρανών, αντίστοιχα (Κεφάλαιο 3). Οι αμερικανικές προδιαγραφές προτείνουν μόνο τον έλεγχο για Ισοδύναμο άμμου αλλά βεβαίως να πληρούν και την απαίτηση για αντοχή σε Los Angeles < 40%.

Οι Αμερικανικές προδιαγραφές κατά AASHTO προτείνουν τη χρήση έξι κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, Α έως ΣΤ, τα όρια των οποίων δίνονται στον Πίνακα 2.17.

Οι τύποι Γ, Δ, Ε και ΣΤ χρησιμοποιούνται και για επιφανειακές στρώσεις χωμάτινων δρόμων (μη ασφαλτοστρωμένων). Ο τύπος Α είναι κατά κανόνα από θραυστά αδρανή και είναι παρόμοιος με τον τύπο 1 των Βρετανικών προδιαγραφών καθώς και με το μίγμα για βάση κατά ASTM. Οι υπόλοιποι τύποι είναι κατά κανόνα από φυσικά εδαφικά υλικά και έχουν τη βασική διαφορά ότι εμπεριέχουν πολύ μεγαλύτερο ποσοστό παιπάλης από ότι τα αντίστοιχα μίγματα του Πίνακα 10.5. Το γεγονός αυτό εγκυμονεί κινδύνους διόγκωσης και παγοπληξίας. Έτσι, τα μίγματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε περιοχές που δεν υπάρχει πιθανότητα

παγοπληξίας και η στάθμη του νερού είναι πολύ χαμηλότερα από τη σκάφη του οδοστρώματος.

Πίνακας 2.17.: Κόκκο μετρικές διαβαθμίσεις και άλλες ιδιότητες αδρανών υλικών για βάσεις και υποβάσεις κατά AASHTO M 147.

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Τύποι μίγμάτων Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος μίγματος					
	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ
50	100	100	-	-	-	-
25	-	75-95	100	100	100	100
9.5	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-
4.75	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2.0	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
0.425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
0.075	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Άλλες απαιτήσεις :

- Αντοχή L.A.^(α) < 50
- Όριο υδαρ/τας^(β) < 25
- Δείκτης πλαστ/τας^(β) < 6

^(α) Αντοχή L.A. = Αντοχή κατά Los Angeles

^(β) Για το κλάσμα που διέρχεται από το κόσκινο 0.425mm

Συμπύκνωση αδρανών υλικών βάσεως και υποβάσεως

Βασική προϋπόθεση για την καλή κατασκευή της βάσεως είναι η επαρκής συμπύκνωση στο προκαθορισμένο ποσοστό υγρασίας. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται εργαστηριακά με τη μέθοδο Proctor. Οι Βρετανικές προδιαγραφές συνιστούν τη χρησιμοποίηση δονητικής σφύρας για τη συμπύκνωση των δοκιμίων (BS 5835:1980, Part 1) και ως επιθυμητή συμπύκνωση λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί σε 5% κενά στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Η υγρασία του μίγματος κατά τη συμπύκνωση στο έργο δε θα πρέπει να αποκλίνει από τη βέλτιστη (συνήθως 0,5%) και σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά 1 % και μικρότερη κατά 2% από την καθορισθείσα βέλτιστη.

Η επαρκής συμπύκνωση είναι επίσης συνάρτηση του πάχους της στρώσης καθώς και της ενέργειας συμπύκνωσης που θα επιβληθεί. Το μέγιστο επιτρεπτό πάχος συμπυκνωμένης στρώσης, κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές, είναι 225mm, άλλως η συμπύκνωση θα πρέπει να γίνεται σε δύο ή περισσότερες στρώσεις. Επίσης το ελάχιστο πάχος συμπυκνωμένης στρώσης θα πρέπει να είναι 110mm.

Η ενέργεια συμπύκνωσης είναι συνάρτηση του βάρους του οδοστρωτήρα (ή καλύτερα του βάρους ανά τρέχον μέτρο πλάτους κυλίνδρου), του τύπου του οδοστρωτήρα καθώς και του αριθμού των διελεύσεων. Στον Πίνακα 2.18 δίνονται τα

παραπάνω στοιχεία για επαρκή συμπίκνωση των βάσεων και των υποβάσεων χρησιμοποιώντας τους πλέον κοινούς τύπους οδοστρωτήρων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο συνηθέστερος τύπος οδοστρωτήρα που χρησιμοποιείται σήμερα, στο εξωτερικό, για τη συμπίκνωση της βάσεως και υποβάσεως είναι ο δονητικός οδοστρωτήρας.

2.15.2. Υπόβαση από σταθεροποιημένα υλικά

Η ιδέα της ενίσχυσης της αντοχής της υπόβασης από ασύνδετα αδρανή οδήγησε στη σταθεροποίηση των υλικών κάνοντας χρήση συνδετικών υλικών όπως, το τσιμέντο κυρίως, το ασφαλτικό γαλάκτωμα, ο ασβέστης ή ο ασβέστης με ιπτάμενη τέφρα. Με τη σταθεροποίηση επέρχεται αύξηση της αντοχής και επιπροσθέτως είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και εδαφικά υλικά που δεν πληρούν πλήρως τις απαιτήσεις για υλικά υποβάσεως.

Τα μίγματα που παράγονται είναι κατά κανόνα ισχνά, δηλαδή με πολύ μικρότερες αντοχές ή μέτρα δυσκαμψίας από αυτά των κανονικών σκυροδεμάτων ή ασφαλομιγμάτων. Με τη χρήση σταθεροποιημένων υλικών δεν επέρχεται μείωση του πάχους της στρώσης της βάσεως. Απλά διασφαλίζεται η καλή αντοχή της στρώσης και γενικότερα η μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται οριακά υλικά, λόγω κακής κοκκομετρικής διαβάθμισης ή σχήματος.

Η απόφαση για χρήση σταθεροποιημένων υλικών θα πρέπει να βασίζεται πάντοτε σε οικονομικά κριτήρια σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα ή όχι των συνηθών υλικών που χρησιμοποιούνται (ασύνδετα αδρανή) και με τη συμπεριφορά των σταθεροποιημένων υλικών καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η προσθήκη μικρής ποσότητας συνδετικού υλικού αυξάνει το κόστος κατασκευής αλλά δε βελτιώνει αναγκαία τη γενικότερη μηχανική συμπεριφορά της στρώσης. Η στρώση που έχει σταθεροποιηθεί παραδείγματος χάριν με τσιμέντο μπορεί να έχει μεγαλύτερη αντοχή αλλά ρηγματώνεται με αποτέλεσμα να επηρεάσει πιθανότατα την όλη συμπεριφορά του οδοστρώματος μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Σταθεροποίηση με τσιμέντο

Η προσθήκη τσιμέντου είναι η περισσότερο διαδεδομένη τεχνική για τη σταθεροποίηση των εδαφικών υλικών και την ενίσχυση της αντοχής της υποβάσεως που κατασκευάζονται με αυτά.

Οι Αμερικανικές προδιαγραφές δεν καθορίζουν αυστηρά κοκκομετρικά όρια εντός των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται τα εδαφικά υλικά. Απλά προτείνονται ενδεικνυόμενες περιεκτικότητες τσιμέντου ανάλογα με την ομάδα κατάταξης του εδάφους. Σε γενικές γραμμές, η περιεκτικότητα του τσιμέντου για εδάφη των κατηγοριών A1-A3 (χονδρόκοκκα ή κοκκώδη εδάφη) κυμαίνεται από 3,5% έως 7%, ενώ για εδάφη των κατηγοριών A4-A7 (λεπτόκοκκα εδάφη) κυμαίνεται από 7% έως 10%. Με τη σταθεροποίηση η ελάχιστη θλιπτική αντοχή των 7 ημερών που επιζητείται είναι 2 MN/m². Ο ακριβής καθορισμός του ποσοστού του τσιμέντου καθορίζεται εργαστηριακά ανάλογα με την επιθυμητή αντοχή που επιζητείται.

Για σταθεροποίηση υλικών σύμφωνα με τις Βρετανικές προδιαγραφές, προτείνονται τρεις τύποι μιγμάτων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποβάσεις. Τα μίγματα αυτά φέρουν τα χαρακτηριστικά CBM1, CBM2 και C7.5, Πίνακας 2.16.

Το μίγμα CBM1 αναφέρεται σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά με κοκκομετρική διαβάθμιση λεπτότερη από αυτήν που καθορίζεται από τις τιμές του Πίνακα 2.16. Για να είναι το σταθεροποιημένο μίγμα οικονομικό συνιστάται όπως πληρούνται και οι περιορισμοί:

- (α) το εδαφικό υλικό να έχει καλή και συνεχή κοκκομετρική διαβάθμιση με συντελεστή ομοιομορφίας μεγαλύτερο του 5. Ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι ο λόγος του μεγέθους του κόκκου που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό 60% προς το μέγεθος του κόκκου που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό 10%
- (β) το όριο υδαρότητας των υλικών που διέρχονται το κόσκινο 0,425mm θα πρέπει να είναι μικρότερο του 45% και το όριο πλαστικότητας μικρότερο του 20%.

Το μίγμα CBM2 αναφέρεται σε κοκκώδη υλικά, όπως αμμοχάλικο, υλικά προς απόρριψη από λατομεία, ορυχεία ή χαλυβουργίες.

Το μίγμα C7.5 αναφέρεται σε πολύ ισχνό σκυρόδεμα, γνωστό ως υγρό-ισχνό σκυρόδεμα (wet-lean concrete), από άμμο και χαλίκι. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες όλων των παραπάνω μιγμάτων δίνονται στον Πίνακα 2.18.

Σταθεροποίηση με ασφαλτικό γαλάκτωμα

Εκτός του τσιμέντου ορισμένες φορές χρησιμοποιείται ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Το υλικό αυτό είναι συνήθως ασφαλτικό γαλάκτωμα (κατιονικό ή ανιονικό

αργής διάσπασης). Πριν την προσθήκη με ψεκασμό του γαλακτώματος, το μίγμα των αδρανών αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα ύδατος (περίπου 3-5%). Η ποσότητα του γαλακτώματος που προστίθεται είναι τόση όση να δώσει περίπου 2.5-3.5% άσφαλτο στο μίγμα.

Πίνακας 2.18.: Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών υπόβασης σταθεροποιημένων

Ιδιότητες	Σταθεροποιημένα μίγματα με τσιμέντο		
	Για υποβάσεις (κυρίως) CBM1	Για βάσεις & υποβάσεις CBM2	Για βάσεις & υποβάσεις C7.5
Αριθμός κοσκίνου	Διερχόμενο (%)	Διερχόμενο (%)	
50mm	100	100	Μίγμα άμμου και χαλκιού
37.5	> 95	95-100	
20	> 45	45-100	
10	> 35	35-100	
5	> 25	25-100	(Τυπικό μίγμα ST1 σύμφωνα με το BS 5328: Part 2)
2.36	-	15-90	
0.600	> 8	8-65	
0.300	> 5	5-40	
0.075	> 0	0-10	
Θλιπτική αντοχή κύβων (7-ημερών)	> 4.5 N/mm ² και κανένα δοκίμιο < 2.5 N/mm ²	> 7.0 N/mm ² και κανένα δοκίμιο < 4.5 N/mm ²	> 5.5 N/mm ² (καθορισμός ως σε σκυρόδεμα)
Ρηγμάτωση ή διάγκωση μετά από 7-ημέρες εμβάπτιση σε νερό	Μηδέν	Μηδέν	Μηδέν

Ανάμιξη, διάστρωση, συμπύκνωση

Η προσθήκη των συνδετικών υλικών καθώς και η ανάμιξη του μίγματος γίνεται συνήθως «επί του έργου». Η προσθήκη του συνδετικού υλικού (τσιμέντου ή γαλακτώματος) επί του έργου γίνεται με διασπορά ή ψεκασμό αφού πρώτα το αδρανές υλικό διαστρωθεί σε σειράδια τραπεζοειδούς μορφής. Η ανάμιξη συνιστάται όπως γίνεται με ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα ανάμιξης που παραλαμβάνει το μίγμα από το σειράδιο, το αναμιγνύει και το διαστρώνει στο επιθυμητό πάχος. Το ίδιο μηχάνημα κάνει για όλες τις περιπτώσεις. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει το παραπάνω μηχάνημα η ανάμιξη μπορεί να γίνει και με grader, πλην όμως δεν επιτυγχάνεται τόσο ομοιόμορφα αναμεμιγμένο μίγμα.

Η συμπύκνωση των στρώσεων με υλικά σταθεροποιημένου τύπου γίνεται όπως και στις στρώσεις με ασύνδετα αδρανή.

2.15.3. Σταθεροποιημένη στρώση βάσης με τσιμέντο

Ορισμένες φορές αντί για ασύνδετα θραυστά αδρανή το κάτω μέρος της βάσης κατασκευάζεται από σταθεροποιημένα με τσιμέντο αδρανή υλικά (περίπτωση μικτού ευκάμπτου οδοστρώματος). Τα σταθεροποιημένα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν έχουν τόσο μεγάλη αντοχή όσο αυτά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της πλάκας στην περίπτωση κατασκευής δύσκαμπτου οδοστρώματος. Πλην όμως, και αυτά παρασκευάζονται σε μόνιμη εγκατάσταση και διαστρώνονται με ειδικά μηχανήματα διάστρωσης.

Οι Βρετανικές προδιαγραφές συνιστούν τη χρήση δύο τύπων μιγμάτων. Ο τύπος CBM3 είναι αυτός που συνήθως χρησιμοποιείται. Ο άλλος τύπος, CBM4, με υψηλότερη αντοχή προτείνεται όπως χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που το πάχος της απαιτούμενης στρώσης από σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερο των 230 mm. Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φυσικά αδρανή κατάλληλα για σκυροδέματα ή θραυστό παλαιό σκυρόδεμα ή σκωρίες, σύμφωνα με τις προδιαγραφές BS 882.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον καθορισμό του πάχους της κάθε στρώσης που όλες μαζί συνθέτουν το οδόστρωμα. Σκοπός κατά τη διαστασιολόγηση είναι να κατανεμηθούν τα φορτία του κυκλοφοριακού φόρτου κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι τάσεις που μεταβιβάζονται στο υπέδαφος να μπορούν να παραληφθούν από τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους. Παράλληλα, θα πρέπει οι τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε οποιαδήποτε στρώση να μην υπερβαίνουν τις τάσεις που δύνανται να παραλάβουν τα υλικά που συνθέτουν την κάθε στρώση.

Ο καθορισμός του πάχους της κάθε στρώσης εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος και τη συχνότητα του επιβαλλόμενου φορτίου (κυκλοφοριακός φόρτος), τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης, τη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους και τις κλιματολογικές συνθήκες. Από τις κλιματολογικές συνθήκες, η θερμοκρασία και η υγρασία είναι οι βασικότεροι παράγοντες επηρεασμού.

Επίσης και ένας αριθμός άλλων παραγόντων θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη έτσι ώστε να καθορίζεται η τελική διαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Οι παράγοντες αυτοί είναι: το κόστος, η κατασκευή, η συντήρηση και η διάρκεια ζωής. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος, δεν είναι μια απλή υπολογιστική διαδικασία που υπακούει σε μια συγκεκριμένη μεθοδολογία αλλά μια τεχνο-οικονομική διαδικασία αρκετά πολύπλοκη.

Στις αρχές του αιώνα, η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων ήταν σχεδόν ανύπαρκτη. Ο καθορισμός της μιας, συνήθως, στρώσης πάνω στο υπέδαφος βασιζόταν στην εμπειρία και εκτίμηση του μηχανικού. Σ' αυτό συνετέλεσε το γεγονός ότι οι απαιτήσεις ήταν πολύ μικρές και ότι πολλές από τις βασικές θεωρίες δεν είχαν αναπτυχθεί. Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, με τη ραγδαία ανάπτυξη των αεροδρομίων, της αυτοκινητοβιομηχανίας και των οδικών δικτύων, παρουσιάστηκε έντονη ανάγκη για οικονομικό σχεδιασμό και κατασκευή των οδοστρωμάτων. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων μεθοδολογιών που αρχικά βασίζονταν σε

θεμελιώδεις θεωρίες της εδαφομηχανικής. Γρήγορα φάνηκαν οι αδυναμίες των μεθοδολογιών αυτών, οι οποίες βασίζονταν σε μονοστρωματικά ή το πολύ διστρωματικά συστήματα, με αποτέλεσμα ορισμένες από αυτές να τροποποιηθούν με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονταν από την πράξη. Οι μεθοδολογίες αυτές έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα μέχρι τη δεκαετία του '60. Η οικονομική κρίση της δεκαετίας του '70, η ραγδαία ανάπτυξη των αυτοκινητοδρόμων αλλά και η εμφάνιση πρόωρων αστοχιών ανάγκασε και πάλι τις Υπηρεσίες και τους Οργανισμούς διαφόρων χωρών να αναθεωρήσουν, να τροποποιήσουν ή/και να αναπτύξουν νέες μεθοδολογίες, ικανές να σχεδιάζουν επαρκώς οικονομικά οδοστρώματα, σύμφωνα με τις σύγχρονες απαιτήσεις. Στην προσπάθειά τους αυτή είχαν τη βοήθεια τόσο της ανάπτυξης νέων θεωριών όσο και την πληρέστερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών που συνθέτουν το οδόστρωμα.

Σήμερα, για τη διαστασιολόγηση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων υπάρχουν διάφορες σύγχρονες αναλυτικές (θεωρητικές) και ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες. Όλες βασίζονται στη θεωρία της ελαστικότητας, στην τεράστια εμπειρία που αποκτήθηκε από τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων στην πράξη αλλά και στο μεγάλο αριθμό ερευνητικών εργασιών που εκπονήθηκαν στα διάφορα εργαστήρια.

Αναλυτικές μεθοδολογίες χαρακτηρίζονται αυτές που ο μελετητής υπολογίζει τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε διάφορα κρίσιμα σημεία της δομής του οδοστρώματος και κατόπιν τις συγκρίνει με τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπτά μεγέθη που καθορίζονται από τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών που θα ενσωματωθούν στο οδόστρωμα. Για τον καθορισμό των αναπτυσσομένων τάσεων και παραμορφώσεων ο μελετητής χρησιμοποιεί την ελαστική θεωρία για πολυστρωματικά συστήματα. Οι μέγιστες επιτρεπτές τάσεις ή παραμορφώσεις που μπορούν να αναπτυχθούν καθορίζονται κατά κανόνα στο εργαστήριο από δοκιμές επί των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ο καθορισμός, τέλος, του πάχους του οδοστρώματος επιτυγχάνεται από την ικανοποίηση της απαίτησης ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις ή παραμορφώσεις δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες των μέγιστων επιτρεπτών, για τα προτεινόμενα πάχη των στρώσεων.

Ημι-αναλυτικές μεθοδολογίες χαρακτηρίζονται αυτές που τα πάχη των στρώσεων καθορίζονται εύκολα από διαγράμματα ή νομογραφήματα. Τα διαγράμματα ή νομογραφήματα εξήχθησαν είτε από αναλυτικούς υπολογισμούς παρόμοιους των

αναλυτικών μεθοδολογιών, είτε από συνδυασμό αναλυτικών υπολογισμών και αποτελεσμάτων από την πράξη (κυρίως πειραματικά οδοστρώματα μεγάλης κλίμακας και παρακολούθηση της συμπεριφοράς αυτών κάτω από πραγματικές συνθήκες).

Σε όλες τις σύγχρονες μεθοδολογίες ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται συναρτήσει των Ισοδυνάμων Τυπικών Αξόνων (ΙΤΑ) και όχι συναρτήσει του αριθμού των οχημάτων. Η φέρουσα ικανότητα ή αντοχή του υπεδάφους εκφράζεται συναρτήσει του CBR ενώ ως θεμελιώδης μηχανική ιδιότητα όλων των στρώσεων λαμβάνεται το μέτρο ελαστικότητας (ή μέτρο δυσκαμψίας στην περίπτωση των ασφαλτικών στρώσεων).

Στην Ελλάδα μέχρι σήμερα δεν έχει αναπτυχθεί ή υιοθετηθεί, αλλά και δυστυχώς δεν απαιτείται να εφαρμόζεται, καμία σύγχρονη μεθοδολογία διαστασιολόγησης. Ο καθορισμός του πάχους των στρώσεων γίνεται αβασάνιστα με μια εγκύκλιο του 1961 η οποία βασίζεται σε μεθοδολογία και τεχνολογία της δεκαετίας του '50. Έτσι, ο τρόπος διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων δεν μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς τις ιδιαίζουσες συνθήκες κάθε έργου, τις υψηλές ποιοτικές απαιτήσεις της κατασκευής και την ορθολογιστική χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών.

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθούν ορισμένες από τις πλέον γνωστές νεώτερες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων που εφαρμόζονται με επιτυχία από διάφορες χώρες καθώς και η μεθοδολογία διαστασιολόγησης της Εγνατίας Οδού Α.Ε. (ΕΟΑΕ) η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με την προσθήκη συμπληρωματικών διαγραμμάτων, και σε όλη την Ελλάδα. Πριν την ανάπτυξη των μεθοδολογιών θα γίνει ιστορική αναφορά στις θεμελιώδεις θεωρίες και μεθόδους υπολογισμού τάσεων-παραμορφώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα.

3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα είναι βασικότερη προϋπόθεση και επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες, αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι εξ ορισμού η εδαφική στρώση, δηλαδή το υπέδαφος, θεωρείται ως μια στρώση. Έτσι, η κλασική περίπτωση ενός οδοστρώματος που αποτελείται από βάση από ασύνδετα αδρανή και ασφαλτικές στρώσεις, με τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες, θεωρείται ως ένα

σύστημα τριών στρώσεων (μία του υπεδάφους, μία της στρώσης από ασύνδετα αδρανή και μία των ασφαλτικών στρώσεων). Γενικότερα, η κατασκευή κάθε ενιαίας στρώσης με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από τις άλλες στρώσεις, θεωρείται ως μια διακεκριμένη στρώση.

3.2.1. Μονοστρωματικά συστήματα (θεωρία Boussinesq)

Η θεωρία Boussinesq αναπτύχθηκε στο τέλος του 19ου αιώνα. Αν και δε χρησιμοποιείται σήμερα στα οδοστρώματα, διότι αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση ύπαρξης μιας μόνο στρώσης, αυτής του εδάφους, αποτέλεσε τη βάση ανάπτυξης όλων των μεταγενέστερων θεωριών για κατανομές τάσεων. Η θεωρία Boussinesq βρίσκει εφαρμογή ακόμη και σήμερα στην εδαφομηχανική.

Σύμφωνα με τον Boussinesq, για ελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό, του οποίου η μάζα εκτείνεται στο άπειρο και κατά τις δύο διευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη), οι τάσεις που εξασκούνται σε οποιοδήποτε σημείο υπό την επίδραση σημειακού φορτίου, Σχήμα 3.1 (α), μπορούν να υπολογισθούν από τις παρακάτω θεμελιώδεις εξισώσεις:

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (3.1)$$

$$\sigma_r = -\frac{P}{2\pi} \left[\frac{1}{(r^2 + z^2)^{3/2}} - (1 - 2\mu) \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{z + (r^2 + z^2)^{1/2}} \right] \quad (3.2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2\pi} (1 - 2\mu) \frac{1}{(r^2 + z^2)} \left[\frac{z}{(r^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{(r^2 + z^2)^{1/2}}{z + (r^2 + z^2)^{1/2}} \right] \quad (3.3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi} \frac{rz^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}} \quad (3.4)$$

όπου σ_z = κατακόρυφη θλιπτική τάση,

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

τ_{rz} = διατμητική τάση.

Στην περίπτωση που εξασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο οι αντίστοιχες τάσεις εξάγονται από ολοκλήρωση των παραπάνω εξισώσεων. Για την ειδική περίπτωση επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου κυκλικής διατομής (η συνηθέστερη διατομή που λαμβάνεται σε φορτίσεις οδοστρωμάτων), η θλιπτική τάση και οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις σε οποιοδήποτε βάθος (z) πάνω

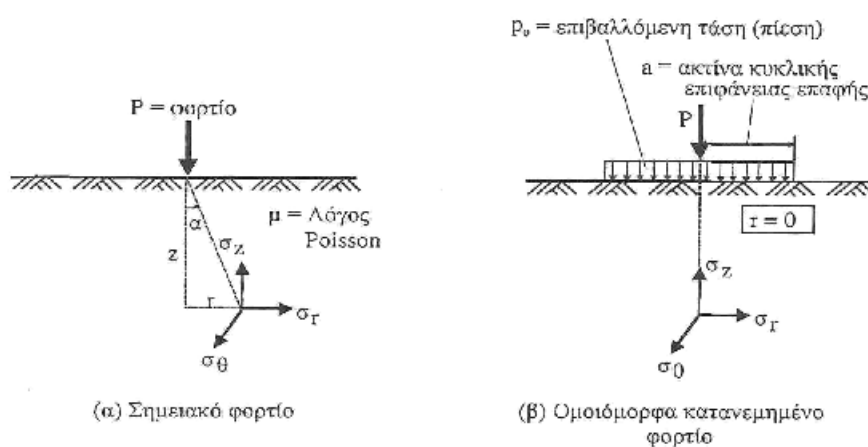
στον άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης, Σχήμα 3.1 (β), δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_z = P \left\{ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right\} \quad (3.5)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{P}{2} \left\{ 1 + 2\mu - \frac{2z(1 + \mu)}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right\} \quad (3.6)$$

όπου P = επιβαλλόμενο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο

a = ακτίνα κυκλικής επιφάνειας επαφής.

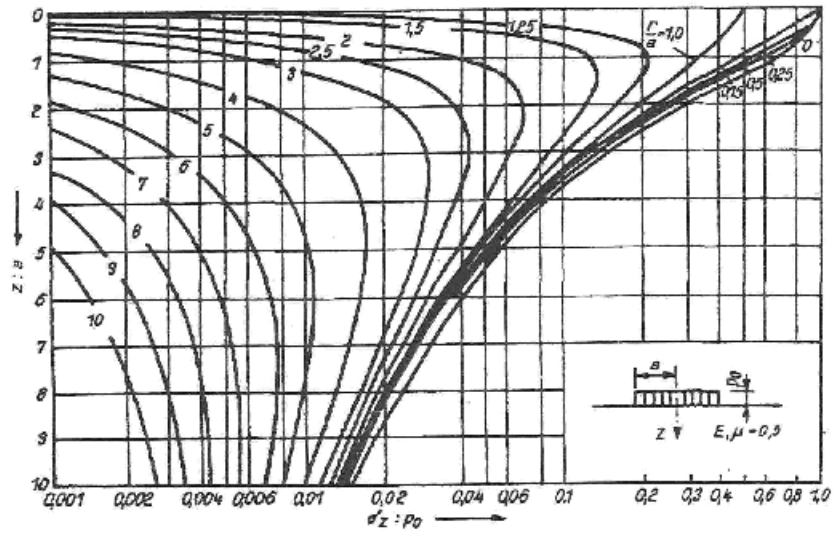


Σχήμα 3.1.: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq

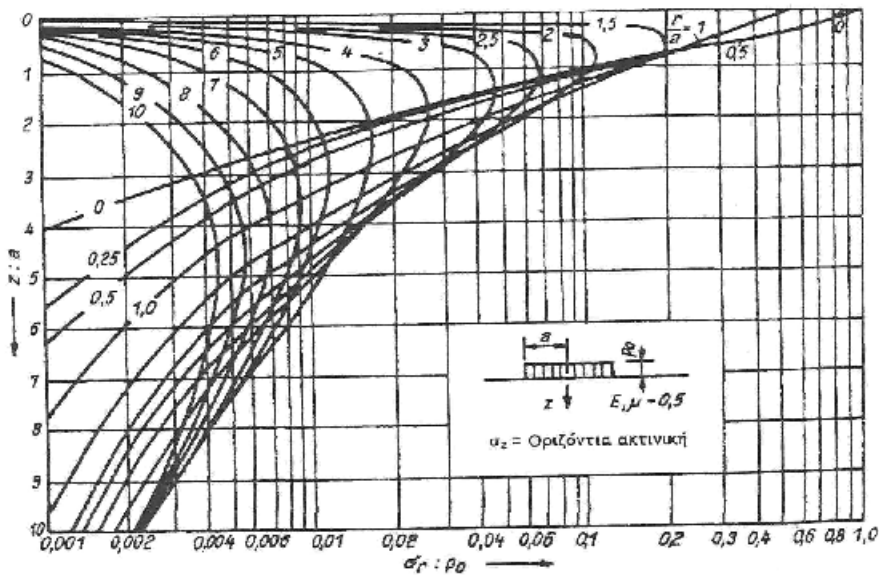
Στην περίπτωση που ζητείται να υπολογισθούν οι τάσεις σε κάποια απόσταση (r) από τον άξονα συμμετρίας συνιστάται όπως χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα των Σχημάτων 11.2, 11.3 και 11.4.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι παραπάνω εξισώσεις είναι ανεξάρτητες του μέτρου ελαστικότητας και επιπροσθέτως οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της ορθής θλιπτικής τάσης είναι ανεξάρτητες και του λόγου Poisson. Αυτό δε θα μπορούσε να ισχύει στην περίπτωση που το υλικό είχε μεταβλητές ελαστικές ιδιότητες.

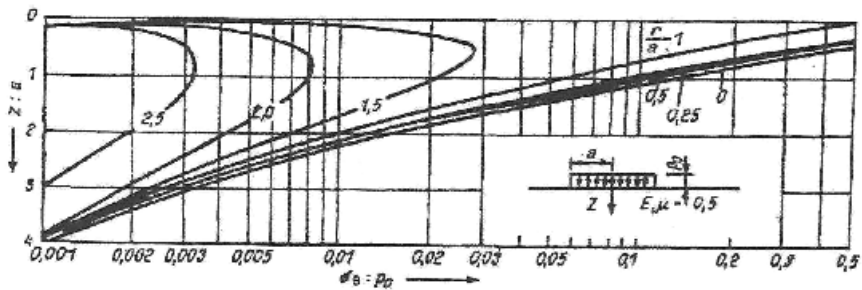
Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αξιοπιστία της θεωρίας Boussinesq είναι καλή μόνο για περιπτώσεις εδαφικών οδοστρωμάτων, δηλαδή οδοστρωμάτων άνευ καμίας πρόσθετης στρώσης.



Σχήμα 3.2.: Υπολογισμός κατακόρυφης θλιπτικής τάσης σ_z



Σχήμα 3.3.: Υπολογισμός κατακόρυφης θλιπτικής τάσης σ_r



Σχήμα 3.4.: Υπολογισμός οριζόντιας εφαπτομενικής τάσης σ_θ

Διαγράμματα Foster-Ahlvin

Οι Foster και Ahlvin, βασιζόμενοι στη θεωρία του Boussinesq, ανέπτυξαν διαγράμματα από τα οποία μπορούν να υπολογισθούν ευκολότερα οι τάσεις και οι ελαστικές παραμορφώσεις που προκαλούν φορτιζόμενες κυκλικές διατομές.

Οι ορθές θλιπτικές τάσεις σε οποιοδήποτε βάθος (Z) υπολογίζονται με τη βοήθεια του Σχήματος 3.2, ενώ οι οριζόντιες ακτινικές τάσεις και οι οριζόντιες εφαπτομενικές υπολογίζονται από τα διαγράμματα 3.3 και 3.4 αντίστοιχα. Η προς υπολογισμό τάση καθορίζεται συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης αφού προηγουμένως υπολογισθούν οι λόγοι z/a και r/a , όπου r η απόσταση από τον άξονα της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης ακτίνας (a).

Ελαστικές βυθίσεις (παραμορφώσεις)

Με βάση τη θεωρία του Boussinesq η επιφανειακή ελαστική βύθιση (Δz) του εδάφους κάτω από το κέντρο της επιφάνειας φόρτισης, υπό την επίδραση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση 3.7.

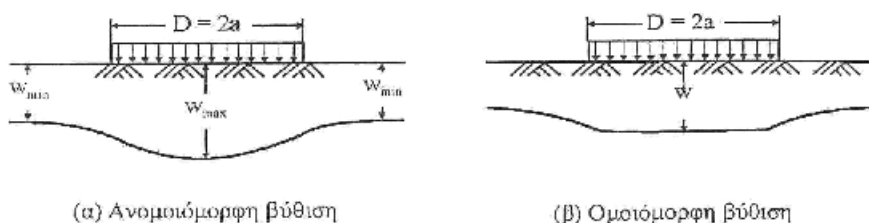
$$\Delta z = [2p_0 \times a \times (1-\mu^2)]/E \quad (3.7)$$

όπου a = επιβαλλόμενη τάση ακτίνα επιφάνειας επαφής

μ = λόγος Poisson

E = μέτρο ελαστικότητας του εδάφους.

Στην περίπτωση ομοιόμορφου φορτίου διακρίνονται δύο περιπτώσεις, ανάλογα με την κατανομή των επιφανειακών βυθίσεων, την ομοιόμορφη βύθιση και την ανομοιόμορφη βύθιση. Ομοιόμορφη βύθιση προκαλείται μόνο όταν το φορτίο επιβάλλεται διαμέσου άκαμπτης πλάκας (μεταλλικής ή από μπετόν) και είναι τελείως ομοιόμορφα κατανεμημένο (ιδανική περίπτωση). Σ' όλες τις άλλες περιπτώσεις η βύθιση είναι ανομοιόμορφη, Σχήμα 3.5(α).



Σχήμα 3.5.: Μορφές κατανομής βυθίσεων

Στην περίπτωση ανομοιόμορφης βύθισης, η βύθιση που αναπτύσσεται κάτω από το κέντρο της επιφάνειας φόρτισης είναι μεγαλύτερη της βύθισης που αναπτύσσεται στην περιφέρεια της επιφάνειας επαφής (στο σύνορο).

Σε περίπτωση ανομοιόμορφης βύθισης, η ελαστική βύθιση ή καθίζηση (W) σε οποιοδήποτε βάθος « Z » επί του άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$W = (p_0 \times a/E) \times w^* \quad (3.8)$$

όπου p_0 = επιβαλλόμενη τάση

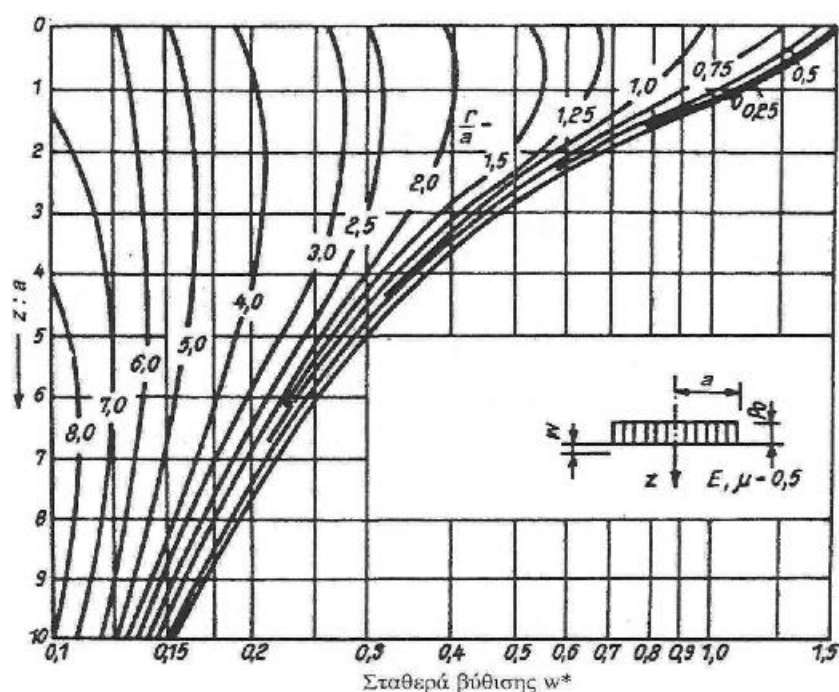
a = ακτίνα επιφάνειας φόρτισης

E = μέτρο ελαστικότητας εδάφους

w^* = σταθερά βύθισης.

Η σταθερά βύθισης (w^*) υπολογίζεται από το νομογράφημα του Σχήματος 3.6.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές που λαμβάνονται από τα διαγράμματα των Foster και Ahlvin ισχύουν μόνο για, λόγο Poisson $\mu = 0.5$. Συμπληρωματική εργασία από τους Ahlvin και Uierg έδωσε τη δυνατότητα να μπορούν να υπολογισθούν οι τάσεις και οι βυθίσεις για οποιαδήποτε τιμή του « μ ». Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής προτάθηκαν υπό μορφή πινάκων, αντί διαγραμμάτων. Οι πίνακες αυτοί καθώς και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται δίνονται στη σχετική βιβλιογραφία.

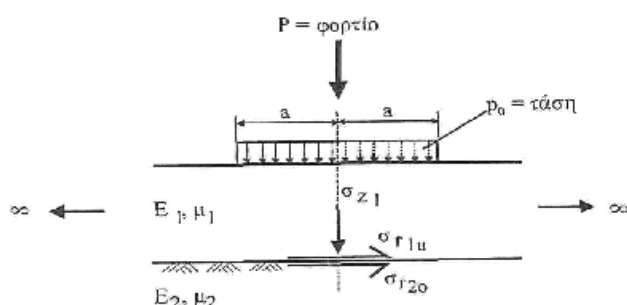


Σχήμα 3.6: Υπολογισμός σταθεράς βύθισης (w^*)

3.2.2. Σύστημα δύο στρώσεων (θεωρία Burmister)

Σαράντα περίπου χρόνια μετά την ανάπτυξη της θεωρίας του Bussinesq, ο Westergaard ανέπτυξε τη δική του θεωρία για τον υπολογισμό τάσεων σε σύστημα δύο στρώσεων, όπου η πρώτη στρώση αποτελείται από σκυρόδεμα. Παρόλο που η θεωρία αυτή δεν κάλυπτε την περίπτωση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη θεωριών για εύκαμπτα οδοστρώματα με δύο στρώσεις. Από τους πρώτους ερευνητές που πρότειναν θεωρίες υπολογισμού τάσεων και παραμορφώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα ήταν ο Burmister. Ακολούθησαν και άλλοι ερευνητές όπως οι Hank και Scrivner, ο Huang, οι Jelinek και Ranke και άλλοι.

Η ανάπτυξη των θεωριών σε σύστημα δύο στρώσεων βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές - προϋποθέσεις. Αυτές είναι: α) το υλικό της κάθε στρώσης θεωρείται ελαστικό, ομογενές και ισότροπο, β) η πρώτη στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο και πεπερασμένες στο κάθετο επίπεδο, γ) η δεύτερη (ή τελευταία) στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κάθετο επίπεδο και δ) η άνω επιφάνεια της πρώτης στρώσης δεν υφίσταται καμία άλλη οριζόντια ή κατακόρυφη φόρτιση, εκτός της κυκλοφορίας, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω παραδοχές χρησιμοποιήθηκαν και για τις θεωρίες που αναπτύχθηκαν για συστήματα με τρεις ή περισσότερες στρώσεις. Η γενική διάταξη ενός συστήματος δύο στρώσεων δίνεται στο Σχήμα 3.7.

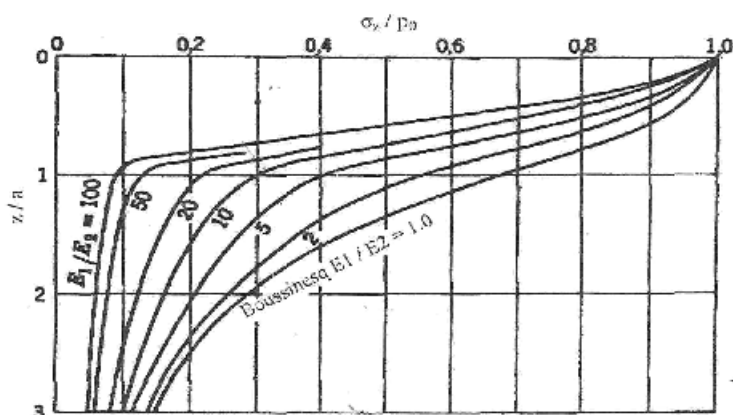


Σχήμα 3.7.: Σύστημα δύο στρώσεων

Η αρίθμηση των στρώσεων αρχίζει πάντοτε από πάνω προς τα κάτω. Έτσι όλες οι ιδιότητες ή μεγέθη φέρουν τον αριθμό «1». Για να καθορισθεί το ακριβές επίπεδο της διεπιφάνειας χρησιμοποιούνται τα γράμματα «u» και «o». Το «u» δηλώνει το κατώτατο σημείο της στρώσης, ενώ το «o» το ανώτατο σημείο της στρώσης. Έτσι, παραδείγματος χάριν ο συμβολισμός σ_{r1u} , αναφέρεται στην οριζόντια (ακτινική) εφελκυστική τάση που

αναπτύσσεται στην κατώτατη επιφάνεια της πρώτης στρώσης. Η ίδια βασική αρχή τηρείται και για τα συστήματα με τρεις ή περισσότερες στρώσεις.

Κατά τη θεωρία του Burmister, η θλιπτική τάση σ_z σε οποιοδήποτε βάθος, συνήθως μικρότερο του $3a$ (όπου «a» η ακτίνα της επιφάνειας φόρτισης), και επί του άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης κυκλικής διατομής, όταν υπάρχει υψηλός συντελεστής τριβής (πλήρης συνοχή) μεταξύ των στρώσεων, μπορεί να υπολογισθεί από το νομογράφημα του Σχήματος 3.8. Ο περιορισμός του βάθους σε $3a$ ετέθη διότι βρέθηκε ότι σε μεγαλύτερο βάθος οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολύ μικρές (περίπου το 10% της εφαρμοσμένης τάσης). Ο λόγος $E1/E2$ είναι ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας των δύο στρώσεων.



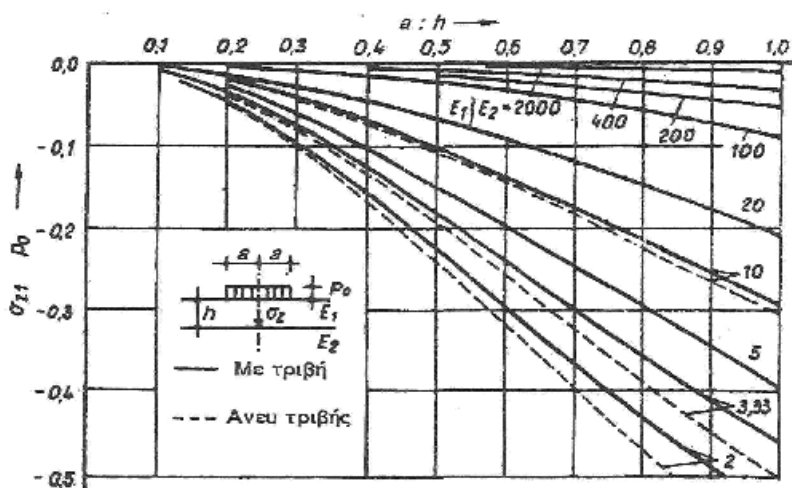
Σχήμα 3.8.: Υπολογισμός κατακόρυφης τάσης κατά Burmister

Παρόμοια είναι και τα νομογραφήματα που πρότειναν οι Hank και Scrivner, Σχήμα 3.9 και Σχήμα 3.10. Στο Σχήμα 3.9 δίνεται το νομογράφημα για τον υπολογισμό της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης στο ανώτατο σημείο της εδαφικής στρώσης, για τις περιπτώσεις α) όπου μεταξύ των δύο στρώσεων αναπτύσσεται υψηλός συντελεστής τριβής και β) όπου ο συντελεστής τριβής είναι μηδενικός. Οι συνεχείς καμπύλες αντιπροσωπεύουν την πρώτη περίπτωση, ενώ οι διακεκομμένες τη δεύτερη.

Η οριζόντια ακτινική εφελκυστική τάση (σ_{r1u}) που αναπτύσσεται στην κατώτατη επιφάνεια της πρώτης στρώσης κατά τους Hank και Scrivner μπορεί να υπολογισθεί από το νομογράφημα του Σχήματος 3.10.

Με παρόμοια νομογραφήματα μπορούν να υπολογισθούν και οι υπόλοιπες τάσεις, όπως η εφαπτομενική και η διατμητική τάση.

Γενικότερα, η ύπαρξη μιας επιπλέον στρώσης με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από αυτό του υπεδάφους, έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι τάσεις που εξασκούνται στο υπέδαφος. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται στο Σχήμα 3.11. Στο αριστερό μέρος του σχήματος δίνονται οι καμπύλες ίσων τάσεων σε μονοστρωματικό σύστημα σύμφωνα με τη θεωρία του Boussinesq, ενώ στο δεξιό οι καμπύλες ίσων τάσεων σε διστρωματικό σύστημα, σύμφωνα με τη θεωρία του Burmister. Και στις δύο περιπτώσεις τα συστήματα φορτίζονται με την ίδια τάση και η επιφάνεια φόρτισης είναι κυκλικής διατομής, ενώ μεταξύ των δύο στρώσεων στην περίπτωση του διστρωματικού συστήματος υπάρχει απόλυτη πρόσφυση. Στο συγκεκριμένο παραδείγματα μέτρο ελαστικότητας της πρώτης στρώσης (E_1) είναι δέκα φορές μεγαλύτερο του μέτρου ελαστικότητας του υπεδάφους (E_2), το πάχος της στρώσης είναι ίσο με την ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης και ο λόγος Poisson ο ίδιος και για τις δύο στρώσεις ($\mu_1 = \mu_2 = 0,5$). Όπως φαίνεται, η κατακόρυφη τάση, ως ποσοστό της επιβαλλομένης τάσης (p_0), σε βάθος $r_1 u = a$ είναι μόνο 30% της επιβαλλομένης, στην περίπτωση διστρωματικού συστήματος, και περίπου 70% στην περίπτωση μονοστρωματικού συστήματος. Έτσι λοιπόν η ύπαρξη της μιας στρώσης ανακουφίζει το υπέδαφος. Αυτή εξάλλου είναι και η κυριότερη αρχή κατασκευής οδοστρωμάτων.



Σχήμα 3.9.: Υπολογισμός κατακόρυφης τάσης κατά Hank και Scrivner

Υπολογισμός των βυθίσεων

Η ελαστική βύθιση της επιφάνειας που επέρχεται από τη φόρτιση αυτής στην περίπτωση διστρωματικού συστήματος μπορεί να υπολογισθεί από τη θεωρία του Burmister. Για τον υπολογισμό της ελαστικής βύθισης (w), όταν η κυκλική επιφάνεια επιβολής του φορτίου είναι εύκαμπτη, χρησιμοποιείται η εξίσωση 3.9:

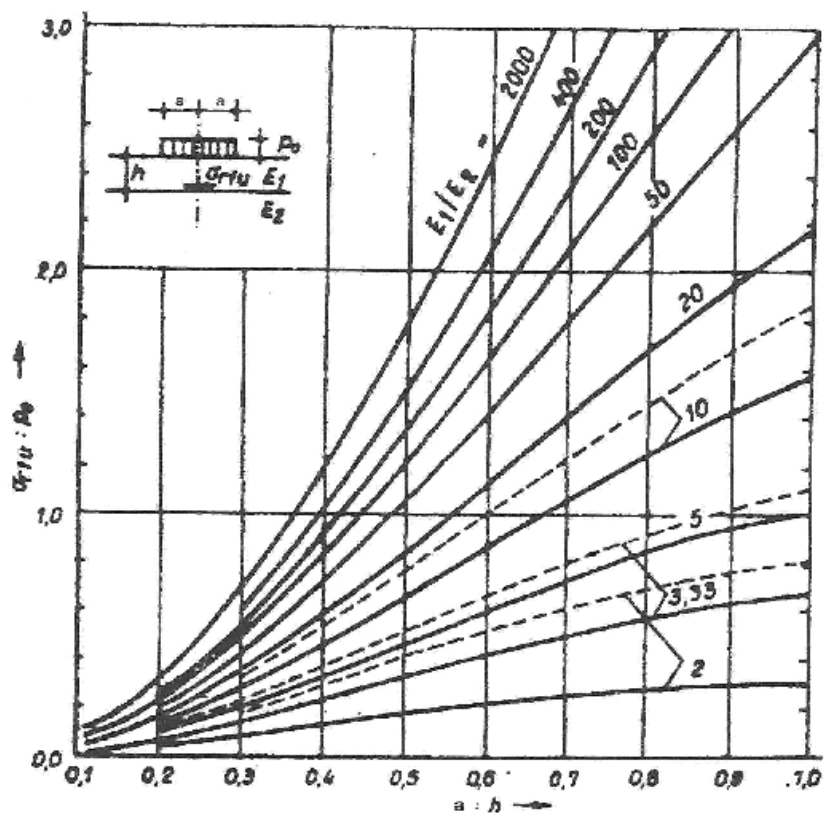
$$w = [(1.5 \times p_0 \times a) / E_2] \times F \quad (3.9.)$$

όπου p_0 = επιβαλλόμενη τάση

a = ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας

E_2 = μέτρο ελαστικότητας της δεύτερης στρώσης

F = συντελεστής βύθισης, από Σχήμα 3.12.

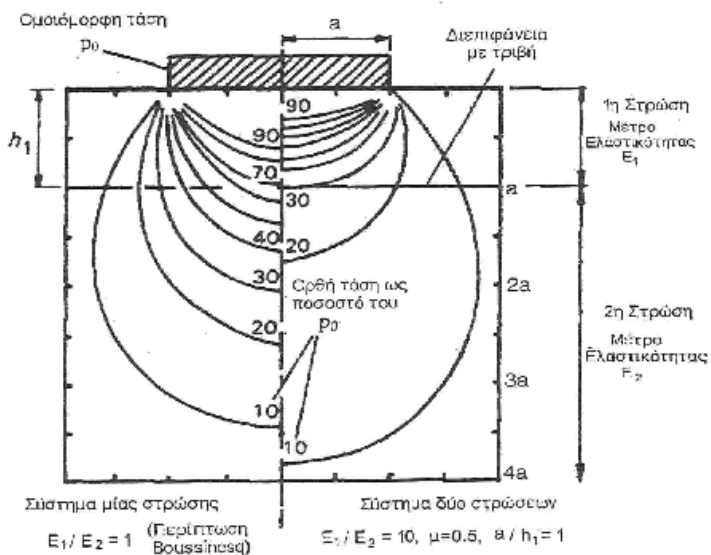


Σχήμα 3.10.: Υπολογισμός οριζόντιας ακτινικής τάσης κατά Hank και Scrinver

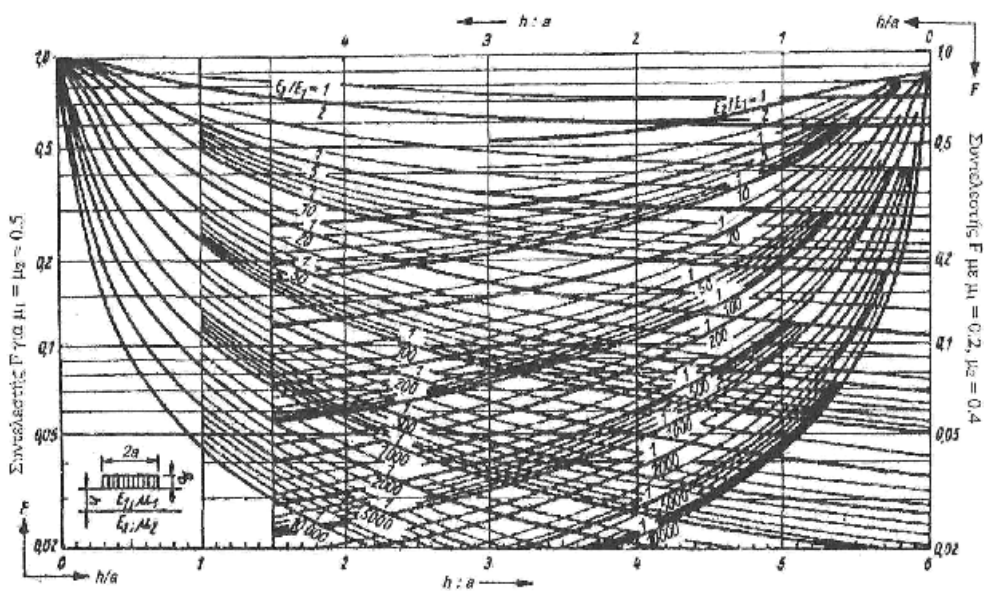
Όταν η επιφάνεια επιβολής του φορτίου είναι άκαμπτη πλάκα τότε αντί του συντελεστή 1.5 χρησιμοποιείται ο συντελεστής 1.18.

Οι τιμές που λαμβάνονται για τη βύθιση, όπως και των άλλων μεγεθών, είναι συνάρτηση του λόγου Poisson των στρώσεων, Σχήμα 3.12 για τον καθορισμό του F .

Έτσι, για οποιοδήποτε άλλο συνδυασμό των λόγων Poisson θα πρέπει να ανατρέξει κανείς σε ανάλογο νομογράφημα. Η σχετική αυτή δυσκολία μπορεί να παρακαμφθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ισοδυναμίας του Odemark ή το νομογράφημα Odemark.



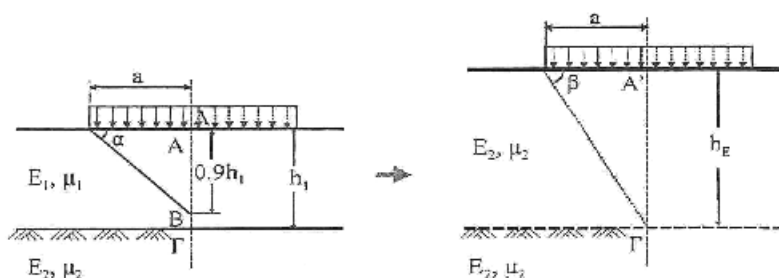
Σχήμα 3.11: Θεωρητική σύγκριση κατανομής κατακόρυφων τάσεων σε μονοστρωματικό και διστρωματικό σύστημα.



Σχήμα 3.12: Υπολογισμός συντελεστή βύθισης.

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, Σχήμα 3.13. Έτσι δημιουργείται μια ελαστική, ισότροπη και ομοιογενής στρώση. Το αυτό ισχύει και για την περίπτωση πλέον των δύο στρώσεων. Δηλαδή, στην περίπτωση τριών στρώσεων, μπορεί να γίνει μετατροπή της πρώτης στρώσης σε ισοδύναμη στρώση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης (υπέδαφος) και στη συνέχεια μετατροπή της δεύτερης στρώσης σε ισοδύναμη στρώση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τρίτης στρώσης. Έτσι και πάλι δημιουργείται μια ελαστική, ισότροπη και ομογενής στρώση της οποίας το ισοδύναμο πάχος είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους ισοδυνάμων παχών που προέκυψαν από τις μετατροπές. Βασική προϋπόθεση είναι η μετατροπή να γίνεται πάντοτε συναρτήσσει της τελευταίας στρώσης (του υπεδάφους).



Σχήμα 3.13: Γεωμετρική ισοδυναμία κατά Odemark

Ο Odemark θεωρεί ότι δύο ή περισσότερες στρώσεις είναι μηχανικά ισοδύναμες όταν:

$$\frac{E_n \cdot I_n}{1 - \mu_n^2} = \frac{E_{n+1} \cdot I_{n+1}}{1 - \mu_{n+1}^2} \quad (3.10)$$

όπου E_n, E_{n+1} , = μέτρα ελαστικότητας στρώσεων

I_n, I_{n+1} , = ροπές αδρανείας στρώσεων

μ_n, μ_{n+1} , = λόγοι Poisson στρώσεων.

Για μοναδιαία λωρίδα οδοστρώματος η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\frac{E_n k^3_n}{1 - \mu_n^2} = \frac{E_{n+1} \cdot k^3_{n+1}}{1 - \mu_{n+1}^2} \quad (3.11)$$

όπου h_n, h_{n+1} , = πάχη στρώσεων.

Έτσι, το πάχος της ισοδύναμης στρώσης (h_E) δίνεται από την εξίσωση:

$$h_E = h_f \sqrt[3]{\frac{E_1(1 - \mu_2^2)}{E_2(1 - \mu_1^2)}} \cdot n \quad (3.12)$$

Όπου n = διορθωτικός συντελεστής, συνήθως 0.9 για εύκαμπτη πλάκα και 0.83 για άκαμπτη πλάκα φόρτισης.

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

Ο Odemark με βάση τα παραπάνω ανέπτυξε εξίσωση υπολογισμού της επιφανειακής βύθισης για σύστημα δύο στρώσεων, για οποιαδήποτε τιμή των «μ» και «E» των στρώσεων. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$w = \frac{P_a \cdot a}{E_1} \left[[2(1 - \mu_1^2) - (1 + \mu_1) [\cos\alpha + (1 - 2\mu_1) \cdot \tan(45^\circ - \frac{\alpha}{2})]] \right. \\ \left. + \frac{E_1}{E_2} (1 + \mu_2) [\cos\beta + (1 - 2\mu_2) \tan(45^\circ - \frac{\beta}{2})] \right] \quad (3.13)$$

όπου α, β = γωνίες, από Σχήμα 3.13.

Η επιφανειακή βύθιση για σύστημα δύο στρώσεων μπορεί επίσης να υπολογιστεί και από νομογράφημα το οποίο δίνεται στη σχετική βιβλιογραφία.

3.2.3. Συστήματα τριών ή περισσότερων στρώσεων

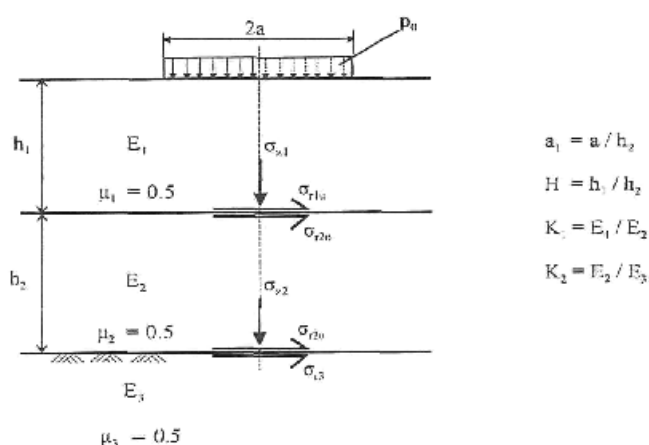
Τα συστήματα τριών ή και περισσότερων στρώσεων προσομοιάζουν επακριβώς με την πραγματική κατάσταση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, δεδομένου ότι σε ένα τυπικό οδόστρωμα υπάρχουν πλέον των δύο στρώσεων. Μία ή περισσότερες στρώσεις από ασφαλτόμιγμα, μία στρώση από ασύνδετα αδρανή, ορισμένες φορές μία στρώση υπόβασης και τέλος το υπέδαφος.

Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πολλαπλασιάζει τις δυσκολίες υπολογισμού των τάσεων και παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αδύνατη η ύπαρξη νομογραφημάτων ή πινάκων που να καλύπτουν όλους τους δυνατούς

συνδυασμούς μεταβολής των χαρακτηριστικών των στρώσεων. Εάν στην παραπάνω δυσκολία προστεθεί και ο πραγματικός τρόπος φόρτισης των οδοστρωμάτων (περισσότερες από μία επιφάνειες φόρτισης - δίδυμοι τροχοί, διαξονικοί δίδυμοι τροχοί κλπ.) τότε είναι απολύτως αδύνατον να υπολογισθούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις (βυθίσεις) από πίνακες ή νομογραφήματα. Σήμερα, με την ανάπτυξη των Η/Υ οι υπολογισμοί των τάσεων και παραμορφώσεων γίνονται με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων, όπως BISAR, DAMA κλπ..

Υπολογισμός τάσεων και παραμορφώσεων από πίνακες και νομογραφήματα

Παρ' όλη την πολυπλοκότητα, αρκετοί ερευνητές δίχως να έχουν την ευκολία των Η/Υ προσπάθησαν να επιλύσουν τα συστήματα τριών ή και περισσότερων στρώσεων. Πρώτος ο Burmister (1943) επέκτεινε τη θεωρία του για σύστημα τριών στρώσεων και λίγα χρόνια αργότερα οι Acum και Fox παρουσίασαν τους πρώτους πίνακες κατακόρυφων και οριζοντίων τάσεων που αναπτύσσονται στον άξονα της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης και στο επίπεδο των διεπιφανειών των στρώσεων. Δεκαπέντε περίπου χρόνια αργότερα ο Jones και ο Peatie πρότειναν εκτεταμένους πίνακες για περισσότερες τιμές παραμέτρων. Οι πίνακες χρησιμοποιήθηκαν από όλους σχεδόν τους μηχανικούς μέχρι της εμφάνισης των προγραμμάτων Η/Υ. Απόσπασμα των πινάκων Jones δίνεται στον Πίνακα 3.1. Για την κατανόηση της λειτουργίας των πινάκων Jones δίνεται το Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14.: Επεξήγηση συμβολισμών σε σύστημα τριών στρώσεων

Πίνακας 3.1.: Απόσπασμα πινάκων Jones για σύστημα τριών στρώσεων.

$H = 0.125, k_1 = 2.0$											
a_1	σ'_{z1}	$\sigma'_{z1} - \sigma'_{r1}$	$\sigma'_{z1} - \sigma'_{r2a}$	σ'_{z2}	$\sigma'_{z2} - \sigma'_{r2}$	$\sigma'_{z2} - \sigma'_{r3}$	$\sigma'_{z1} - \sigma'_{r1}$	$\sigma'_{z1} - \sigma'_{r2a}$	σ'_{z2}	$\sigma'_{z2} - \sigma'_{r2}$	$\sigma'_{z2} - \sigma'_{r3}$
$k_2 = 0.2$											
0.1	0.66045	0.12438	0.62188	0.01557	0.00332	0.01659	0.43055	0.71614	0.35807	0.01682	0.01750
0.2	0.90249	0.13546	0.67728	0.06270	0.01278	0.06391	0.78688	1.01561	0.50780	0.06511	0.06741
0.4	0.95295	0.10428	0.52141	0.21282	0.04430	0.22150	0.98760	0.83924	0.41962	0.23005	0.23346
0.8	0.99520	0.09011	0.45053	0.56395	0.10975	0.54877	1.01028	0.63961	0.31981	0.60886	0.57418
1.6	1.00064	0.08777	0.43884	0.86258	0.13755	0.68777	1.00647	0.65723	0.32862	0.90959	0.68630
3.2	0.99970	0.04129	0.2064	0.94140	0.10147	0.50736	0.99822	0.38165	0.19093	0.94322	0.47335
$k_2 = 2.0$											
0.1	0.66048	0.12285	0.61424	0.00892	0.01693	0.00846	0.42950	0.70622	0.35303	0.00896	0.00858
0.2	0.90157	0.12916	0.64582	0.03480	0.06558	0.03279	0.78424	0.97956	0.48989	0.03493	0.03324
0.4	0.95120	0.08115	0.40576	0.12656	0.23257	0.11629	0.98044	0.70970	0.35488	0.12667	0.11766
0.8	0.99235	0.01323	0.09113	0.37307	0.62863	0.31432	0.99434	0.22319	0.11164	0.36932	0.31501
1.6	0.99918	-0.04136	-0.20680	0.74038	0.98754	0.49377	0.99922	-0.19982	-0.09995	0.72113	0.48853
3.2	1.00032	-0.03804	-0.19075	0.97137	0.82102	0.41051	0.99922	-0.28916	-0.14461	0.96148	0.42015
$k_2 = 20.0$											
0.1	0.66235	0.12032	0.60161	0.00256	0.03667	0.00183	0.43022	0.69332	0.34662	0.00228	0.00173
0.2	0.90415	0.11787	0.58933	0.01011	0.14336	0.00717	0.78414	0.92086	0.46048	0.00899	0.00677
0.4	0.95135	0.03474	0.17370	0.03838	0.52691	0.02635	0.97493	0.46583	0.23297	0.03392	0.02476
0.8	0.98778	-0.14872	-0.74358	0.13049	1.61727	0.08086	0.97806	-0.66535	-0.33270	0.11350	0.07481
1.6	0.99407	-0.50533	-2.52650	0.36442	3.58944	0.17947	0.96921	-2.82889	-1.41430	0.31263	0.16426
3.2	0.99821	-0.80990	-4.05023	0.76669	5.15409	0.25770	0.958591	-5.27906	-2.63954	0.68433	0.25298
$k_2 = 200.0$											
0.1	0.66266	0.11720	0.58599	0.00057	0.05413	0.00027	0.42925	0.67488	0.33744	0.00046	0.00024
0.2	0.90370	0.10495	0.52477	0.00226	0.21314	0.00107	0.78267	0.85397	0.42698	0.00183	0.00095
0.4	0.94719	-0.01709	-0.08543	0.00881	0.80400	0.00402	0.97369	0.21165	0.10582	0.00711	0.00356
0.8	0.99105	-0.34427	-1.72134	0.03259	2.67931	0.01340	0.97295	-1.65954	-0.82977	0.02597	0.01163
1.6	0.99146	-1.21129	-6.05643	0.11034	7.35978	0.03680	0.95546	-6.47707	-3.23855	0.08700	0.03133
3.2	0.99332	-2.89282	-14.4641	0.32659	16.2283	0.08114	0.96377	-16.6738	-8.33691	0.26292	0.07128

Οι τάσεις που μπορούν να υπολογισθούν από τους πίνακες είναι αυτές που φαίνονται στο σχήμα, δηλαδή οι κατακόρυφες στις διεπιφάνειες των στρώσεων και οι ακτινικές οριζόντιες στην κατώτατη και ανώτατη επιφάνεια των διεπιφανειών. Ο υπολογισμός των τάσεων αυτών γίνεται από την απλούστατη γενική εξίσωση :

$$\sigma = \sigma' \times p_0 \quad (3.14)$$

όπου σ = η προς υπολογισμό τάση, αναλόγως
 p_0 = επιβαλλόμενη τάση
 σ' = συντελεστής από πίνακες Jones, αναλόγως της περιπτώσεως (οι θετικές τιμές δηλώνουν θλίψη και οι αρνητικές εφελκυσμό).

Τέλος, ένας άλλος ερευνητής, ο Iwanow, το 1973 πρότεινε νομογραφήματα για τον υπολογισμό των τάσεων. Δύο από τα νομογραφήματα αυτά, για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης και της ακτινικής τάσης που εξασκείται στη δεύτερη διεπιφάνεια, δίνονται στα Σχήματα 3.15 και 3.16, αντίστοιχα. Τα νομογραφήματα Iwanow ισχύουν για $\mu_1=\mu_2=0,25$ και $\mu_3=0,35$.

Η σταθερά k της εξίσωσης που δίνεται από το νομογράφημα (3.15) λαμβάνει τιμές από 0,9 έως 1,0. Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι από το ίδιο νομογράφημα μπορεί να υπολογισθεί η τάση σ_2 σε οποιοδήποτε βάθος χρησιμοποιώντας τους άξονες ($t':a$) και σ_z . Βασική προϋπόθεση στην περίπτωση αυτή είναι να μετατραπεί το σύστημα σε σύστημα μιας ενιαίας στρώσης με μέτρο ελαστικότητας E_3 χρησιμοποιώντας τη θεωρία ισοδυναμίας του Odemark.

Υπολογισμός βυθίσεων (παραμορφώσεων)

Οι βυθίσεις ή παραμορφώσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος και κάτω από το κέντρο της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης, για συστήματα τριών στρώσεων, μπορούν να υπολογισθούν από τους πίνακες Jones. Οι πίνακες είναι παρόμοιοι αυτών για τον υπολογισμό των τάσεων και δημοσιεύθηκαν από τον ίδιο λίγα χρόνια αργότερα. Ουσιαστικά η βύθιση (w) υπολογίζεται από τη σχέση 3.15, της οποίας η σταθερά F_w λαμβάνεται από τους πίνακες Jones που δίνονται στη σχετική βιβλιογραφία. Όλες οι μεταβλητές των πινάκων, όπως a_1 , H , K_1 και K_2 εκφράζουν τα ίδια μεγέθη με αυτά των πινάκων για τον υπολογισμό των τάσεων.

$$w = [(p_0 \times a)/E_1] \times F_w \quad (3.15)$$

όπου p_0 = επιβαλλόμενη τάση

a = ακτίνα επιφάνειας φόρτισης

E_1 = μέτρο ελαστικότητας πρώτης στρώσης.

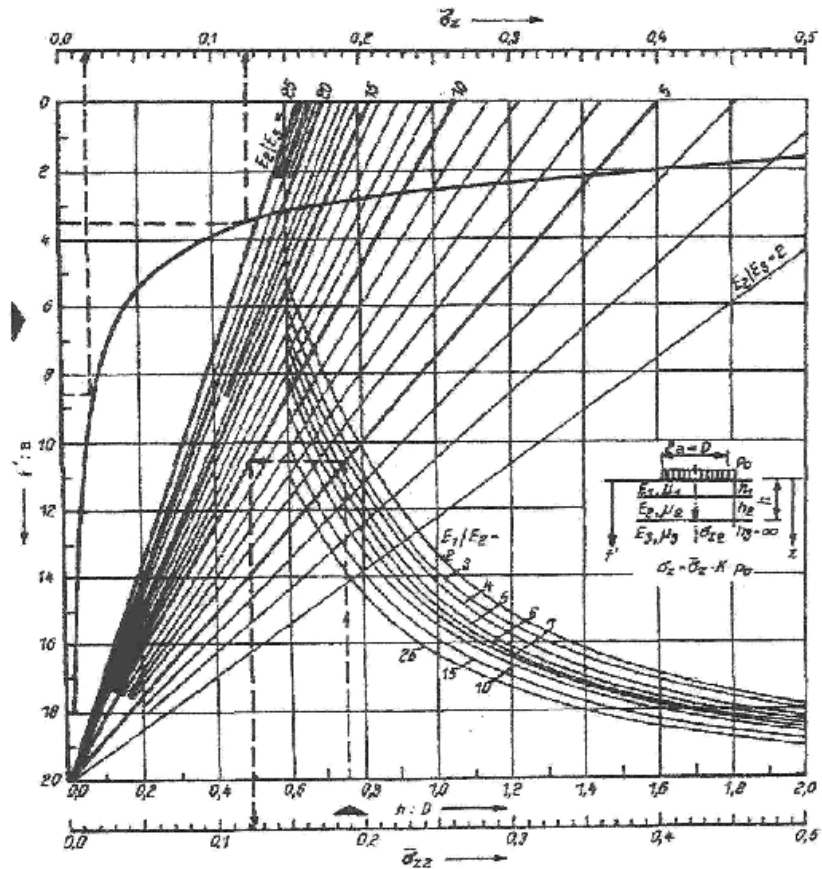
Ειδικότερα, η βύθιση στην ανώτατη επιφάνεια της τρίτης στρώσης (υπεδάφος), w_3 , και στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης, μπορεί να υπολογισθεί και από το νομογράφημα Iwanow σε συνδυασμό με την εξίσωση:

$$W = (p_0 \times a/E) \times w^* \quad (3.16)$$

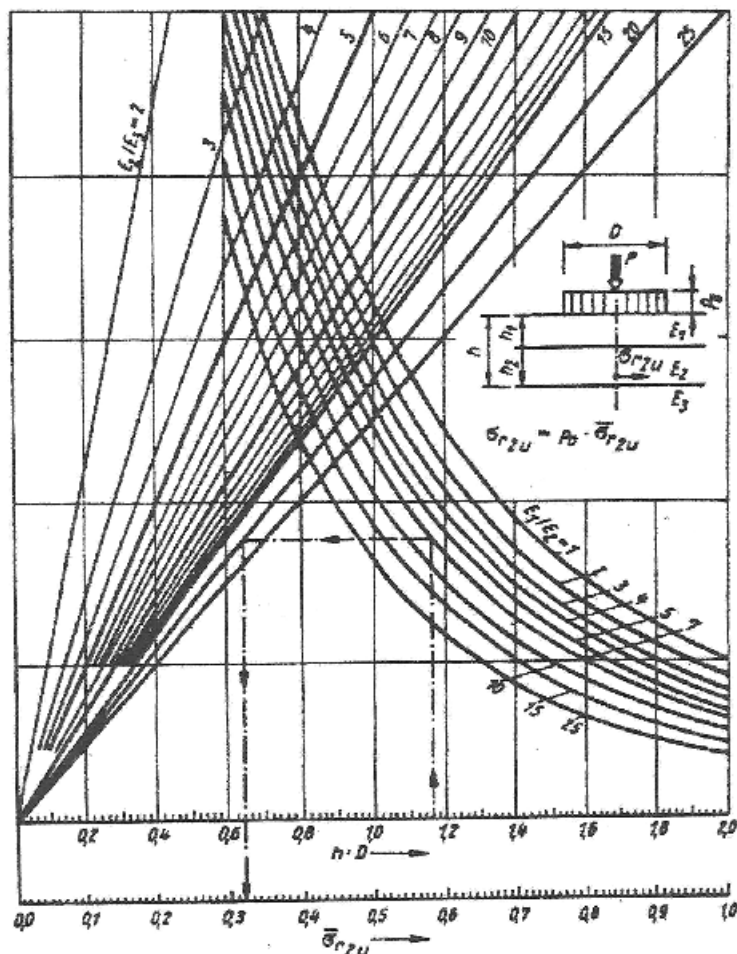
όπου E_3 = μέτρο ελαστικότητας τρίτης στρώσης (υπεδάφους)

F = διορθωτικός συντελεστής, από Πίνακα 3.2

w^* = συντελεστής βύθισης από Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.15: Νομογράφημα Iwanow για τον υπολογισμό της τάσης σ_{zz} .



Σχήμα 3.16.: Νομογράφημα Iwanow για τον υπολογισμό της τάσης σ_{r2u} .

3.2.4. Πρόγραμμα BISAR

Το πρόγραμμα BISAR αναπτύχθηκε από τη Shell στις αρχές του 1970 και είναι ένα πλήρες πρόγραμμα για τον υπολογισμό των τάσεων, των ανηγμένων παραμορφώσεων και των βυθίσεων προς όλες τις διευθύνσεις και σε οποιαδήποτε θέση, σε ένα πολυστρωματικό σύστημα με ελαστικές ιδιότητες και κάτω από την επίδραση ενός ή περισσότερων ομοιόμοφα κατανεμημένων φορτίων κυκλικής διατομής. Το πρόγραμμα επίσης έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη κάτω από την ταυτόχρονη επίδραση και οριζοντίων δυνάμεων (εάν υπάρχουν), υπό δύο συνθήκες συνοχής των διεπιφανειών, δηλαδή με τριβή και άνευ τριβής μεταξύ των στρώσεων. Στο Σχήμα 3.18 δίνεται η τυπική διάταξη αρίθμησης των στρώσεων και διεπιφανειών όπως χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα. Στο Σχήμα 3.19 δίνεται το σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και η παραδοχή που χρησιμοποιείται για τα

θετικά πρόσημα. Τα βέλη δίνουν την κατεύθυνση των θετικών πρόσημων (ουσιαστικά ο εφελκυσμός χαρακτηρίζεται με θετικό πρόσημο και η θλίψη με αρνητικό πρόσημο).

Πίνακας 3.2.: Τιμές διορθωτικού συντελεστή F

E_1/E_2	Τιμές F		
	$h_1/h=0.3$	$h_1/h=0.5$	$h_1/h=0.7$
2	1.00	1.00	1.00
5	1.07	1.00	0.93
10	1.15	1.00	0.85
15	1.15	1.00	0.85
25	1.25	1.00	0.78

Το πρόγραμμα σχεδιάστηκε σε γλώσσα Fortran, για να εκτελείται σε μεγάλα υπολογιστικά συστήματα H/Y (mainframes) και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των διαγραμμάτων της προταθείσης μεθοδολογίας δια-στασιολόγησης της Shell.

Με την ανάπτυξη των προσωπικών υπολογιστών (PC), το 1988 αναπτύχθηκε ειδική έκδοση για PC. Η έκδοση αυτή διαφέρει από το αρχικό πρόγραμμα στο ότι δεν παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων/ παραμορφώσεων υπό την επίδραση και οριζόντιας δύναμης, ο μέγιστος αριθμός των στρώσεων και των κυκλικών φορτίων περιορίζεται σε τέσσερις και ο αριθμός των θέσεων στις οποίες υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις περιορίζεται σε δέκα. Επίσης δε δίνονται όλες οι τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων αλλά μόνο οι μέγιστες στις επιλεγόμενες θέσεις. Οι παραπάνω περιορισμοί δεν αποδυναμώνουν το πρόγραμμα, δεδομένου ότι μπορεί να καλύψει το 99% των περιπτώσεων που εμφανίζονται στην πράξη.

Πίνακας 3.3.: Ποσοστά οχημάτων στη σχεδιαστική λωρίδα (λωρίδα μελέτης)

Συνολικός αριθμός λωρίδων (και στις δύο κατευθύνσεις)	Ποσοστό Οχημάτων στη λωρίδα μελέτης
2	50%
4	45% (35%-48%)*
6 ή περισσότερες	40% (25%-48%)*

* Πιθανό εύρος τιμών

Το ποσοστό ετήσιας αύξησης των οχημάτων εκτιμάται και πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό για όλη τη διάρκεια σχεδιασμού του οδοστρώματος. Παλιές κυκλοφοριακές μελέτες στην ευρύτερη περιοχή που πρόκειται να κατασκευασθεί το οδόστρωμα σε συνδυασμό με τη γενικότερη ετήσια αύξηση των οχημάτων σε εθνικό επίπεδο σε αστικές και υπεραστικές περιοχές βοηθούν στην ακριβέστερη εκτίμηση του ποσοστού αυτού.

Για τον καθορισμό της σύνθεσης της κυκλοφορίας απαιτούνται εξειδικευμένα όργανα που καταγράφουν αριθμό, βάρος και τύπο αξονικών φορτίων και έχουν τη δυνατότητα ομαδοποιήσεως των αποτελεσμάτων. Αυτό είναι μια δαπανηρή και χρονοβόρα υπόθεση, πλην όμως αναγκαία για την ορθή εκτίμηση της καταπόνησης του οδοστρώματος. Μετά την ομαδοποίηση των αξόνων γίνεται η μετατροπή αυτών σε ΙΤΑ.

Ο συνολικός αριθμός των ΙΤΑ καθ' όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος υπολογίζεται από το γινόμενο του ετήσιου αριθμού των ΙΤΑ με τον αθροιστικό συντελεστή αύξησης «λ».

$$\text{Συνολικός αριθμός ΙΤΑ} = \text{ετήσιος αριθμός ΙΤΑ} \times \lambda \quad (3.17)$$

Το «λ» υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = [(1+r)^n - 1]/r \quad (3.18)$$

όπου r = η επί τοις εκατό ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας

n = η διάρκεια της σχεδιαστικής ζωής του οδοστρώματος, σε έτη.

Όταν δεν είναι δυνατόν να γίνει χρήση των εξειδικευμένων μηχανημάτων που προαναφέρθηκαν η μέθοδος συνιστά τη χρήση πίνακα που δίνει το Μέσο Συντελεστή Οχήματος, ανά τύπο οχήματος και ανά περιοχή, σε αστικούς και υπεραστικούς δρόμους (εθνική και επαρχιακή οδοποιία). Ο Μέσος Συντελεστής Οχήματος είναι ο λόγος του αλγεβρικού αθροίσματος του γινομένου του αριθμού των αξόνων επί του αντιστοίχου συντελεστή ισοδυναμίας προς τον αριθμό των οχημάτων (συνήθως λαμβάνεται ο αριθμός 1000 οχήματα). Έτσι η μετατροπή του κυκλοφοριακού φόρτου σε ΙΤΑ απλοποιείται διότι απαιτείται μόνο η καταγραφή των οχημάτων ανά κατηγορία οχήματος. Βεβαίως για να δημιουργηθεί ο πίνακας αυτός απαιτήθηκαν εκτεταμένες μετρήσεις σε όλες τις Πολιτείες κάνοντας χρήση των εξειδικευμένων συσκευών που προαναφέρθηκαν.

3.2.5. Υπέδαφος

Εργαστηριακοί έλεγχοι υλικών υπεδάφους

Οι απαραίτητοι έλεγχοι για το έδαφος έδρασης που καθορίζονται από τη μεθοδολογία είναι: Όριο Υδαρότητας, Όριο Πλαστικότητας, Δείκτης Πλαστικότητας,

Κοκκομετρική Ανάλυση, Συμπύκνωση (σχέση υγρασίας / πυκνότητας), Καθορισμός του μέτρου M_r ή του CBR, ή της τιμής αντίστασης-R (Hveem).

Η δειγματοληψία και ο έλεγχος των υλικών του εδάφους γίνεται σύμφωνα με τις καθιερωμένες διαδικασίες. Ειδικότερα, η δειγματοληψία των υλικών θα πρέπει να γίνεται από βάθος μέχρι περίπου 600mm από την ερυθρά. Σε περίπτωση επιχώματος θα ελέγχεται το υλικό επίχωσης.

Στην περίπτωση κατά την οποία η ποιότητα του υπεδάφους αλλάζει θα πρέπει να συλλέγονται αντιπροσωπευτικά δείγματα από όλα τα εδάφη. Ο αριθμός των δειγμάτων καθορίζεται σε έξι έως οκτώ για κάθε διαφορετικό υλικό έδρασης.

Αν οι αλλαγές του υπεδάφους είναι αισθητές και σε μεγάλο μήκος μπορεί να γίνει διαφορετική διαστασιολόγηση του οδοστρώματος από περιοχή σε περιοχή του έργου.

Τέλος, αν ένα δείγμα δώσει χαμηλές τιμές M_r ή CBR έτσι ώστε το έδαφος να χαρακτηριστεί ασθενές θα πρέπει να παρθούν πρόσθετα δείγματα για να τεκμηριωθεί το αποτέλεσμα. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει το υλικό της περιοχής αυτής να αντικατασταθεί με καλύτερης ποιότητας υλικό ή να αυξηθεί το πάχος του οδοστρώματος στην περιοχή αυτή. Οι τοπικά και μεμονωμένα χαμηλές τιμές δε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον καθορισμό της αντιπροσωπευτικής (σχεδιαστικής) τιμής του M_r .

Καθορισμός της σχεδιαστικής τιμής (M_r) του εδάφους έδρασης

Το μέτρο επανάκτησης ή ελαστικότητας, M_r , μετριέται εργαστηριακά. Σε περίπτωση μέτρησης της ποιότητας του εδάφους με τη μέθοδο CBR, το μέτρο M_r μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τις σχετικές σχέσεις ισοδυναμίας.

Μετά τη δειγματοληψία και τον έλεγχο του μέτρου M_r , θα πρέπει να καθορισθεί η σχεδιαστική τιμή M_r του εδάφους έδρασης (μέση αντιπροσωπευτική τιμή). Ως σχεδιαστική τιμή M_r , δε λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών αλλά η $(M_r)_{50\%}$, $(M_r)_{75\%}$, ή $(M_r)_{87.5\%}$. Δηλαδή η τιμή εκείνη που είναι μικρότερη του 60%, ή του 75%, ή του 87,5% των τιμών που μετρήθηκαν. Το ποιο ποσοστό θα ληφθεί εξαρτάται από τον κυκλοφοριακό φόρτο, Πίνακας 3.4. Η διαδικασία υπολογισμού του $(M_r)_{60\%}$ ή αντιστοίχου είναι η παρακάτω:

Πίνακας 3.4.: Ποσοστά για τον καθορισμό της σχεδιαστικής τιμής M_r

Κυκλοφοριακός Φόρτος σε ΙΓΑ	% για τον υπολογισμό της σχεδιαστικής τιμής M_r
$< 10^4$	60%
$10^4 - 10^6$	75%
$> 10^6$	87.5%

Οι τιμές M_r κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά, στήλη (1) Πίνακα 3.5. Ξεκινώντας από την ελάχιστη τιμή, καθορίζεται πόσες είναι οι τιμές που είναι μεγαλύτερες ή ίσες της τιμής αυτής, στήλη (2). Ο αριθμός αυτός εκφράζεται επί τοις εκατό, στήλη (3). Με τα ποσοστά αυτά και τις αντίστοιχες τιμές M_r σχεδιάζεται διάγραμμα παρόμοιο του Σχήματος 3.17. Η σχεδιαστική τιμή του μέτρου M_r καθορίζεται από το Σχήμα 3.17, χρησιμοποιώντας τα ποσοστά του Πίνακα 3.4. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, εάν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι $>10^6$ η σχεδιαστική τιμή του M_r είναι 59 MPa.

Πίνακας 3.5.: Παράδειγμα υπολογισμού του αρθροιστικού επί τοις % M_r

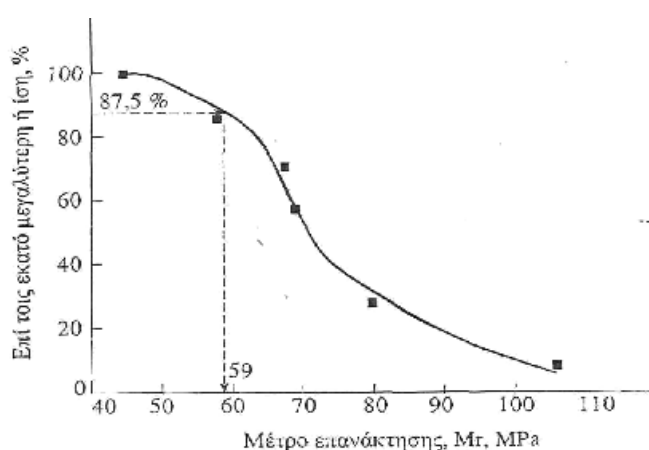
Τιμές M_r (MPa)	Μεγαλύτερη ή ίση	Επί τοις εκατό μεγαλύτερη ή ίση
(1)	(2)	(3)
106.9	1	$(1/7) \times 100 = 14\%$
80.0	2	$(2/7) \times 100 = 29\%$
68.3		
68.3	4	$(4/7) \times 100 = 57\%$
67.6	5	$(5/7) \times 100 = 71\%$
58.6	6	$(6/7) \times 100 = 86\%$
44.8	7	$(7/7) \times 100 = 100\%$

Με την παραπάνω διαδικασία ουσιαστικά λαμβάνεται μικρότερη σχεδιαστική τιμή M_r για υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο έναντι μέτριου και χαμηλού, αντίστοιχα. Αυτό έχει ως συνέπεια να διαστασιολογείται πιο συντηρητικά το οδόστρωμα στην περίπτωση που ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι υψηλός, διασφαλίζοντας έτσι την καλή συμπεριφορά του οδοστρώματος καθ' όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής του ζωής.

Συμπύκνωση εδάφους έδρασης

Σε περίπτωση επιχώματος ή εάν χρησιμοποιηθεί φερτό υλικό για την εξυγίανση του εδάφους έδρασης ή εάν διαταραχθεί το έδαφος έδρασης θα πρέπει να ελέγχεται σχολαστικά η συμπύκνωση των στρώσεων. Ο απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης εξαρτάται από το εάν το υλικό είναι συνεκτικό ή μη συνεκτικό.

Για συνεκτικό υλικό και για τα πρώτα 300mm απαιτείται συμπίκνωση τέτοια ώστε να λαμβάνεται πυκνότητα τουλάχιστον 95% της εργαστηριακής. Για όλο το υπόλοιπο πάχος της στρώσης η πυκνότητα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 90% της εργαστηριακής. Το ποσοστό υγρασίας κατά τη συμπίκνωση θα πρέπει να είναι περίπου το βέλτιστο για μέγιστη πυκνότητα. Γενικώς, συνεκτικά εδάφη που δεν είναι δυνατόν να διογκωθούν θα πρέπει να συμπυκνώνονται με ποσοστό υγρασίας 1 ή 2% χαμηλότερο της βέλτιστης περιεκτικότητας υγρασίας που επιτεύχθηκε στο εργαστήριο. Αντιστρόφως, συνεκτικά διογκούμενα εδάφη θα πρέπει να συμπυκνώνονται με ποσοστό υγρασίας 1 ή 2% πάνω από το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας.



Σχήμα 3.17.: Προσδιορισμός του σχεδιαστικού M_r

Για μη συνεκτικό υλικό και για τα πρώτα 300mm απαιτείται συμπίκνωση τουλάχιστον 100% της εργαστηριακής, ενώ για το υπόλοιπο πάχος τουλάχιστον 95% της εργαστηριακής.

Οι απαιτήσεις για ορθή συμπίκνωση θα πρέπει να είναι αυστηρές έτσι ώστε η συμπυκνωμένη στρώση να μην έχει τελικώς τιμή M_r μικρότερη αυτής που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της μελέτης.

3.2.6. Επιλογή υλικών στρώσεων

Βάση και Υπόβαση με Ασύνδετα Αδρανή

Οι προδιαγραφές των υλικών για βάση ή υπόβαση από ασύνδετα αδρανή προδιαγράφονται στις Αμερικανικές Προδιαγραφές ASTM D 2940, παράλληλα όμως θα πρέπει να ικανοποιούν και τις ιδιότητες του Πίνακα 3.6.

Η συμπύκνωση της βάσης και της υπόβασης θα πρέπει να γίνεται στη βέλτιστη περιεκτικότητα υγρασίας που καθορίστηκε στο εργαστήριο (με επιτρεπτή απόκλιση $\pm 1,5\%$). Τρεις τουλάχιστον έλεγχοι πυκνότητας της συμπυκνωμένης στρώσης θα πρέπει να εκτελούνται για κάθε 2700 τόννους υλικού.

Πίνακας 3.6.: Απαιτήσεις για υλικά βάσης και υπόβασης με ασύνδετα αδρανή

Έλεγχος	Απαιτήσεις	
	Υπόβαση	Βάση
CBR, ελάχιστο*	20	80
Αντίσταση-R, ελάχιστο*	55	78
Όριο Υδαρότητας, μέγιστο	25	25
Δείκτης Πλαστικότητας, μέγιστο	6	NP
Ισοδύναμο Άμμου, ελάχιστο	25	35
Ποσοστό Φύλλερ, μέγιστο	12	7

*Οι εξισώσεις μετατροπής CBR ή αντίστασης R σε M, δεν ισχύουν

Ασφαλτική Βάση και Τάπητας Κυκλοφορίας

(i) 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 μέθοδο Marshall. Η άσφαλτος για μέσες ετήσιες θερμοκρασίες από 7°C έως 24°C συνιστάται όπως είναι 85/100 ή 60/70 pen.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συμπύκνωση των ταπήτων. Για το σκοπό αυτό πρέπει να καθορισθεί η εργαστηριακή πυκνότητα (σκοπεύουσα πυκνότητα) και κατόπιν να συγκριθεί με την επί του έργου πυκνότητα της συμπυκνωμένης στρώσης. Η εργαστηριακή πυκνότητα καθορίζεται από το ίδιο το ασφαλτόμιγμα που παράγεται και πρόκειται να διαστρωθεί και όχι από αυτό του σταδίου της μελέτης σύνθεσης. Για το σκοπό αυτό παράγεται από το ασφαλτοσυγκρότημα επαρκής ποσότητα ασφαλτομίγματος, μια ημερήσια παραγωγή όχι μεγαλύτερη από 2700 τόννους, και χωρίζεται σε παρτίδες. Από κάθε παρτίδα λαμβάνεται επαρκής αριθμός αντιπροσωπευτικών δειγμάτων (ένα από κάθε αυτοκίνητο και σε σύνολο τουλάχιστον πέντε) και συμπυκνώνεται στο εργαστήριο. Από τα δείγματα αυτά εξάγεται η εργαστηριακή («σκοπεύουσα») πυκνότητα (μέσος όρος). Η ποσότητα ασφαλτομίγματος που παράχθηκε διαστρώνεται και συμπυκνώνεται στο έργο. Μετά το πέρας της συμπύκνωσης καθορίζεται η πυκνότητα της συμπυκνωμένης στρώσης από «καρότα» ή χρησιμοποιώντας τον πυρηνικό μετρητή μέτρησης πυκνότητας.

Για βέλτιστη συμπύκνωση των στρώσεων θα πρέπει ο μέσος όρος της πυκνότητας πέντε μετρήσεων α) να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 96% της εργαστηριακής πυκνότητας και καμία μεμονωμένη πυκνότητα από μέτρηση ή από καρτό να μην είναι μικρότερη του 94% της εργαστηριακής (σκοπεύουσας), ή β) να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 92% του θεωρητικά μέγιστου ειδικού βάρους του ασφαλτομίγματος (από υπολογισμούς) και καμία μεμονωμένη πυκνότητα από μέτρηση ή καρτό να μην είναι μικρότερη του 90% του μέγιστου ειδικού βάρους του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος. Με την παραπάνω διαδικασία καθορίζεται και ο απαιτούμενος αριθμός διελεύσεων του οδοστρώτηρα ή συνδυασμού οδοστρώτηρων.

(ii) Ψυχρά ασφαλτομίγματα

Τα ψυχρά ασφαλτομίγματα που προτείνονται να χρησιμοποιηθούν από την παρούσα μεθοδολογία διακρίνονται σε τρεις χαρακτηριστικούς τύπους (κατηγορίες):

Τύπος I, από θραυστά διαβαθμισμένα αδρανή κλειστού τύπου Τύπος II, από ημίθραυστα φυσικά αδρανή (χαλίκια κλπ.) και

Τύπος III, από άμμο (θραυστή ή μίγμα θραυστής και φυσικής).

Το συνδετικό υλικό είναι αποκλειστικά από ασφαλτικό γαλάκτωμα.

Για την ανάμιξη και παραγωγή του Τύπου I απαιτείται ειδικό ασφαλικό συγκρότημα, αυτοκινούμενο ή σε μόνιμη εγκατάσταση, ενώ για τους Τύπους II και III δεν είναι αναγκαίο και μπορούν να αναμιχθούν και «επί του έργου».

Για τη συμπύκνωση των ταπήτων με ψυχρά ασφαλτομίγματα προτείνεται όπως, και στην περίπτωση αυτή, καθορισθεί η εργαστηριακή πυκνότητα και συγκριθεί με την πυκνότητα της συμπυκνωμένης στρώσης. Η εργαστηριακή πυκνότητα καθορίζεται από έξι αντιπροσωπευτικά δείγματα που λαμβάνονται από το ασφαλτόμιγμα που πρόκειται να διαστρωθεί. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της ύπαρξης μικρής ποσότητας ύδατος στο μίγμα τα αποτελέσματα εκφράζονται συναρτήσει της «ξηρής» πυκνότητας. Η πυκνότητα της συμπυκνωμένης στρώσης καθορίζεται από τα τμήματα που διαστρώθηκαν, με τη βοήθεια του πυρηνικού μετρητή πυκνότητας ή με τη μέθοδο της άμμου (καρότα δεν μπορούν να εξαχθούν με επιτυχία από νεοδιαστρωθέντα τάπητα με ψυχρό ασφαλτόμιγμα). Και στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα, από πέντε τυχαίες θέσεις, εκφράζονται συναρτήσει της «ξηρής» πυκνότητας. Η μέση τιμή της «ξηρής» πυκνότητας των μετρήσεων από τη συμπυκνωμένη στρώση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του 95% της μέσης εργαστηριακής τιμής και καμία μέτρηση

πυκνότητας από το έργο δεν πρέπει να έχει τιμή μικρότερη του 92% της εργαστηριακής.

3.2.7. Διαδικασία υπολογισμού πάχους στρώσεων

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

Τα νομογραφήματα από τα οποία καθορίζονται τα πάχη των στρώσεων εξήχθησαν με τη βοήθεια του προγράμματος DAMA χρησιμοποιώντας τις δύο κρίσιμες υπερεντατικές καταστάσεις που προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3. Με βάση τα δύο προαναφερθέντα κριτήρια υπολογίσθηκαν δύο πάχη στρώσεων. Το ένα για να ικανοποιεί το πρώτο κριτήριο και το άλλο για να ικανοποιεί το δεύτερο κριτήριο. Από τα δύο αυτά πάχη κρατήθηκε αυτό που δίνει το μεγαλύτερο πάχος στρώσης, διότι έτσι ικανοποιούνται και τα δύο κριτήρια..

Στην ανάπτυξη των νομογραφημάτων έχει ληφθεί υπόψη και ο θερμοκρασιακός παράγοντας που επηρεάζει άμεσα το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Έτσι επιλέχθηκαν τρεις αντιπροσωπευτικές θερμοκρασίες (μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος, ΜΕΘΑ), 7, 15,5 και 24°C. Για κάθε μια θερμοκρασία δημιουργήθηκαν διαφορετικά νομογραφήματα. Επίσης, για τη μείωση, του αριθμού των διαγραμμάτων επιλέχθηκαν δύο μόνο πάχη βάσης από ασύνδετα αδρανή: το πάχος των 150mm και των 300mm.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι όλα τα διαγράμματα δίνουν πάντα το ολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων (τάπητας κυκλοφορίας και ασφαλική βάση).

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος αυτού γίνεται με τη βοήθεια σχετικών νομογραφημάτων. Τα νομογραφήματα που δίνονται στο παρόν βιβλίο είναι μόνο για θερμοκρασία περιβάλλοντος 15,5°C, η οποία θεωρείται ως η πλέον αντιπροσωπευτική για την Ελλάδα. Τα επιλεγμένα πάχη των 150mm και 300mm είναι το συνολικό πάχος των στρώσεων από ασύνδετα αδρανή, δηλαδή βάση και υπόβαση (αν ήθελε χρησιμοποιηθεί). Στην περίπτωση που ήθελε χρησιμοποιηθεί υπόβαση, το πάχος της βάσης θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 150mm.

Το ελάχιστο πάχος των ασφαλικών στρώσεων (τάπητας κυκλοφορίας και ασφαλική βάση) επί βάσεως από ασύνδετα αδρανή καθορίζεται από τον κυκλοφοριακό φόρτο.

3.3. ΜΕΘΟΔΟΣ AASHTO

Η νεώτερη μεθοδολογία του AASHTO βασίζεται στην αρχική μεθοδολογία που προτάθηκε από τον ίδιο οργανισμό το 1972. Η αρχική μεθοδολογία ήταν απόρροια του μεγάλου πειράματος του AASHTO που ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του '50. Η αρχική μεθοδολογία αναθεωρήθηκε μια φορά το 1981 και κατόπιν τροποποιήθηκε το 1986, οπότε και έλαβε τη μορφή που έχει σήμερα.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ της παλαιάς και νέας έκδοσης για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι:

- α. εισάγεται για πρώτη φορά ο όρος αξιοπιστία (Reliability) έτσι ώστε ο μελετητής να μπορεί να χρησιμοποιήσει την έννοια του «ρίσκου» στη μελέτη,
- β. η «εδαφική υποστήριξη – S», μια παράμετρος καθαρά αυθαίρετη και βασιζόμενη στην εμπειρία του μηχανικού, αντικαθίσταται με το μέτρο επανάκτησης M_r (ή ελαστικότητας), μια καθαρά θεμελιώδη ιδιότητα του υπεδάφους η οποία καθορίζεται αντικειμενικά μετά από εργαστηριακούς ελέγχους,
- γ. οι συντελεστές των στρώσεων, που κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, καθορίζονται σε σχέση με το μέτρο επανάκτησης M_r , καθώς επίσης και με την τιμή CBR ή τιμή αντίστασης-R. Το CBR ή η τιμή-R χρησιμοποιούνται μόνο στις περιπτώσεις που οι στρώσεις είναι από ασύνδετα αδρανή,
- δ. ο τοπικός συντελεστής (R), που έχει εισαχθεί για να καλύπτει τις περιπτώσεις που οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής διαφέρουν από αυτές στις οποίες εκτελέστηκαν τα πειράματα, αντικαθίσταται με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες: υγρασία και παγετός, θερμοκρασία και αποστράγγιση της περιοχής για την οποία σχεδιάζεται το οδόστρωμα και
- ε. εισάγεται μεθοδολογία σταδιακής κατασκευής (ή προσχεδιασμένης αποκατάστασης) του νέου οδοστρώματος.

Σε αντίθεση με όλες τις άλλες νεώτερες μεθοδολογίες ευκάμπτων οδοστρωμάτων, η μεθοδολογία του AASHTO δε χρησιμοποιεί ως σχεδιαστικά κριτήρια για αστοχία του οδοστρώματος, την παραμόρφωση] και την κόπωση (ρηγμάτωση) του οδοστρώματος, αλλά κριτήρια γενικότερης συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Η αστοχία του οδοστρώματος συνδυάζεται με τη λειτουργικότητα του οδοστρώματος, και ειδικότερα με το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχει το οδόστρωμα στο χρήστη τη

συγκεκριμένη στιγμή, και εκφράζεται με το Δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (PSI). Έτσι, ο μελετητής σχεδιάζει το οδόστρωμα κατά τέτοιο τρόπο ώστε στο τέλος της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής οι διάφορες φθορές που πιθανόν θα υπάρχουν στο οδόστρωμα, όπως ρηγματώσεις, παραμορφώσεις, επιφανειακές ανωμαλίες ή μπαλώματα, να είναι σε ανεκτή κατάσταση και το οδόστρωμα να παρέχει ένα ελάχιστο και ανεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης. Είναι μια εντελώς διαφορετική θεώρηση διαστασιολόγησης, περισσότερο πρακτική δεδομένου ότι ο χρήστης δεν ενδιαφέρεται εάν το οδόστρωμα έχει ρηγματωθεί ή παραμορφωθεί ή εάν έχει μπαλώματα αλλά μόνο για το γεγονός ότι το οδόστρωμα του παρέχει ή δεν του παρέχει κάποιο ανεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης. Η υποκειμενικότητα που εμπεριέχεται στον ορισμό «ανεκτό επίπεδο» παρακάμφθηκε με τον καθορισμό διαφόρων τιμών για το Δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (PSI).

Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η μεθοδολογία του AASHTO είναι βασικά μια ημι-αναλυτική μεθοδολογία που βασίζεται κυρίως σε αποτελέσματα που εξήχθησαν από πειραματικές εφαρμογές.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι και αυτή η νεότερη μεθοδολογία του AASHTO κληρονόμησε τα μειονεκτήματα της παλαιάς μεθοδολογίας που εμπεριέχονται στο γεγονός ότι τα νομογραφήματα και οι σχέσεις εξήχθησαν από δοκιμές στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένοι συνδυασμοί οδοστρωμάτων, συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, η κυκλοφορία ήταν από όμοιους άξονες και όμοιες αξονικές διατάξεις και όχι μικτή και τέλος ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν με επιταχυνόμενη διαδικασία μέσα σε δύο χρόνια και τα αποτελέσματα επεκτείνονταν για 10 ή 20 χρόνια. Το παραπάνω ισχύει λίγο-πολύ και για κάθε άλλη μέθοδο με αποτέλεσμα να επαφίεται στις γνώσεις, στην κρίση και στην εμπειρία του μηχανικού η σωστή εφαρμογή της μεθόδου που χρησιμοποιεί.

Τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής στη διαστασιολόγηση ευκάμπτων οδοστρωμάτων μπορούν, γενικότερα, να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες.

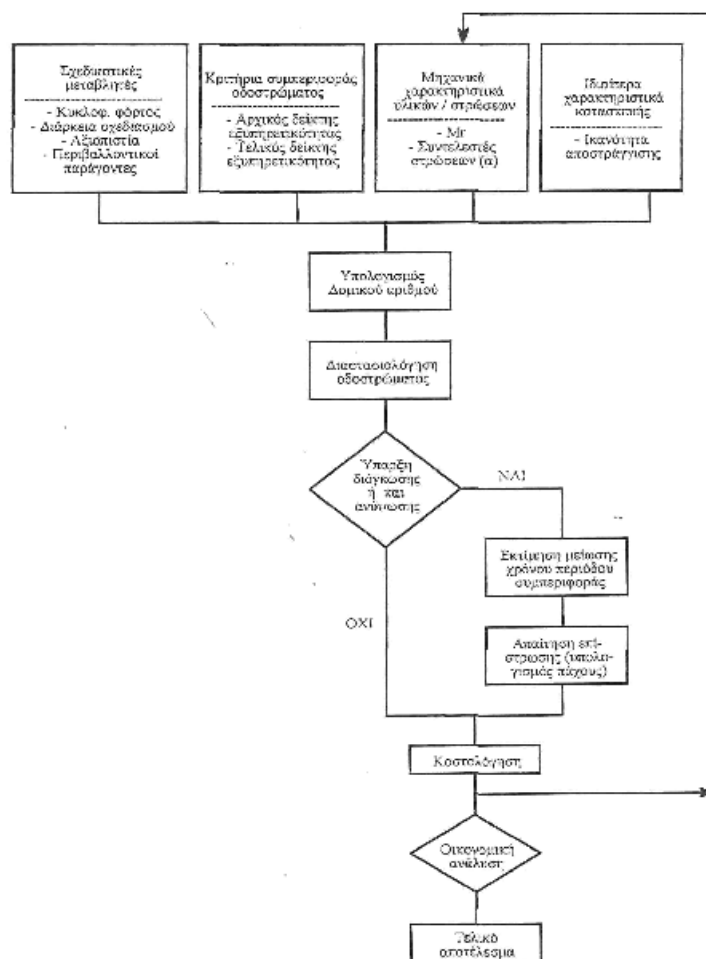
Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι σχεδιαστικές μεταβλητές, όπως οι παράγοντες: κυκλοφοριακός φόρτος, διάρκεια σχεδιασμού, αξιοπιστία δεδομένων και αποτελεσμάτων και περιβαλλοντικοί παράγοντες (παγετός και υγρασία-διόγκωση).

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κριτήρια συμπεριφοράς ή απόδοσης του οδοστρώματος συνδυαζόμενα με το χρήστη. Τα κριτήρια αυτά εκφράζονται με το Δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (PSI) του οδοστρώματος, κατά τη διάρκεια του χρόνου χρήσης.

Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν οι ιδιότητες των υλικών και των στρώσεων εκφραζόμενες συνήθως σε μέτρα επανάκτησης ΜΓ, ή CBR, ή ευστάθεια Marshall. Η δομική συμπεριφορά των στρώσεων εκφράζεται με τους συντελεστές στρώσεων (α_1 , α_2 , κλπ.).

Τέλος, στην τέταρτη κατηγορία ανήκουν όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως ποιότητα αποστράγγισης της κατασκευής και πιθανότητα κορεσμού των στρώσεων του οδοστρώματος.

Η διαδικασία διαστασιολόγησης ενός ευκάμπτου οδοστρώματος με τη μέθοδο του AASHTO δίνεται περιγραφικά στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 3.18.



Σχήμα 3.18.: Λογικό διάγραμμα μεθοδολογίας διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων κατά AASHTO

3.3.1. Σχεδιαστικές Μεταβλητές

(i) Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος εκφράζεται, όπως στις περισσότερες από τις νεώτερες μεθοδολογίες, σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ΙΤΑ). Η μετατροπή του αριθμού των διάφορων αξονικών φορτίων σε ΙΤΑ γίνεται με τη βοήθεια συντελεστών ισοδυναμίας που είναι συνάρτηση τόσο του αξονικού φορτίου όσο και της τελικής τιμής (P_i) του δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος καθώς και του δομικού αριθμού (SN) του οδοστρώματος. Για τη διαστασιολόγηση νέων ευκάμπτων οδοστρώματων προτείνεται όπως χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές που αντιστοιχούν σε τιμές $P_i = 2,5$ και $SN = 5$. Οι συντελεστές που λαμβάνονται είναι όμοιοι με τους συντελεστές ισοδυναμίας που χρησιμοποιεί και η προηγούμενη μέθοδος του Asphalt Institute. Για την εξεύρεση του συνολικού (αθροιστικού) αριθμού των ισοδυνάμων αξόνων για μια ορισμένη χρονική περίοδο (n-ετών) χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 3.17 και 3.18.

Για την ακριβέστερη εκτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου στη λωρίδα μελέτης, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη της τόσο το ποσοστό των διερχομένων οχημάτων ή αξόνων ανά κατεύθυνση, όσο και το ποσοστό κατανομής αυτών ανά λωρίδα οδοστρώματος. Έτσι λοιπόν θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται αν το ποσοστό κυκλοφορίας των οχημάτων είναι κατανομημένο ομοιόμορφα ανά κατεύθυνση, δηλ. 50%/50%. Το σύνθημα είναι ότι δεν είναι κατανομημένο ομοιόμορφα κυρίως στις οδούς, προς και από, μεγάλων αστικών κέντρων. Επίσης, αν ένα οδόστρωμα αποτελείται από περισσότερες από μια λωρίδες ανά κατεύθυνση τότε το ποσοστό των ισοδυνάμων αξόνων που χρησιμοποιεί τη λωρίδα μελέτης είναι συνάρτηση του αριθμού των λωρίδων κυκλοφορίας, Πίνακας 3.7.

Πίνακας 3.7.: Ποσοστό κατανομής αξόνων στη λωρίδα μελέτης

Αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση	Ποσοστό αξόνων στη λωρίδα μελέτης (DL)
1	100%
2	80 - 100%
3	60 - 80%
4	50 - 75%

Έτσι, ο αριθμός των ισοδυνάμων αξόνων στη λωρίδα μελέτης (W_{18}) υπολογίζεται από το παρακάτω γινόμενο:

$$W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18} \quad (3.19)$$

όπου D_D = ποσοστό κατανομής αξόνων ανά κατεύθυνση

D_L = ποσοστό κατανομής αξόνων στη λωρίδα μελέτης (Πίνακας 3.7)

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

(ii) Διάρκεια σχεδιασμού

Η διάρκεια σχεδιασμού είναι μια γενική έννοια που στη μεθοδολογία αυτή καθορίζεται επακριβώς, μια που αυτή είναι καθοριστικός παράγοντας για το βέλτιστο τεχνο-οικονομικό σχεδιασμό του οδοστρώματος. Η μέθοδος αυτή προτείνει τη χρήση των όρων «περίοδος ανάλυσης» και «περίοδος συμπεριφοράς» του οδοστρώματος (σε έτη).

Ως «περίοδος ανάλυσης» ορίζεται η ολική χρονική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος μέσα στην οποία γίνονται συντηρήσεις καθώς και μια ή περισσότερες αποκαταστάσεις του οδοστρώματος. Η περίοδος ανάλυσης είναι ταυτόσημη με αυτή της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής του οδοστρώματος, όρος που χρησιμοποιείται στις περισσότερες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης. Ως περίοδος ανάλυσης για εύκαμπτα οδοστρώματα, όπως είναι γνωστό, λαμβάνεται συνήθως η διάρκεια των 20 χρόνων. Πλην όμως, στη μέθοδο αυτή προτείνεται όπως χρησιμοποιούνται τιμές μεταξύ των ορίων που δίνονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8.: Προτεινόμενες περίοδοι ανάλυσης σε έτη

Κατηγορία οδού	Περίοδος ανάλυσης
Αστικοί δρόμοι με υψηλό κ/φ*	30 - 50 έτη
Υπεραστικές αρτηρίες υψηλού κ/φ	20 - 50 έτη
Ασφαλτοστρωμένοι οδοί μικρού κ/φ	15 - 25 έτη
Μη ασφαλτοστρωμένοι οδοί μικρού κ/φ	10 - 20 έτη

* κ/φ = κυκλοφοριακός φόρτος σε ΓΤΑ

Ως «περίοδος συμπεριφοράς» του οδοστρώματος ορίζεται η περίοδος εκείνη μέσα στην οποία το οδόστρωμα δε χρειάζεται αποκατάσταση παρά μόνο συντήρηση έτσι ώστε το οδόστρωμα να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης. Η περίοδος συμπεριφοράς χωρίζεται σε ελάχιστη και μέγιστη περίοδο. Η ελάχιστη είναι αυτή που

το οδόστρωμα οπωσδήποτε θα αντέξει παρέχοντας κάποιο ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης πριν χρειαστεί αποκατάσταση (σαν ελάχιστη περίοδος συμπεριφοράς μπορούν να ορισθούν τα 10 χρόνια).

Η μέγιστη περίοδος συμπεριφοράς είναι η μέγιστη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος πριν την αποκατάσταση (π.χ. μπορεί ένα οδόστρωμα να σχεδιάζεται για να χρειάζεται αποκατάσταση μετά από 20 χρόνια-περίοδος ανάλυσης). Συνήθως, τα περισσότερα οδοστρώματα χρειάζονται αποκατάσταση πολύ νωρίτερα (15 χρόνια). Συνεπώς, ο μελετητής θα πρέπει να καθορίσει τις παραπάνω περιόδους για να μπορέσει να προχωρήσει σε ακριβείς τεchnο-οικονομικούς σχεδιασμούς-λύσεις.

(iii) Αξιοπιστία (βαθμός «ρίσκου»)

Αξιοπιστία ορίζεται η πιθανότητα που έχει το σχεδιασθέν οδόστρωμα να συμπεριφερθεί ικανοποιητικά καθ' όλη τη διάρκεια σχεδιασμού ανεξάρτητα από τις απρόβλεπτες μεταβολές του κυκλοφοριακού φόρτου και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Έτσι ο μελετητής, επιλέγοντας ένα υψηλό ποσοστό αξιοπιστίας μειώνει το ρίσκο ότι το οδόστρωμα έτσι όπως το σχεδίασε δε θα συμπεριφερθεί όπως προβλέφθηκε, για όλη την περίοδο ανάλυσης (σχεδιασμού). Η αξιοπιστία συνδέεται άμεσα με τη σπουδαιότητα του έργου. Υψηλά επίπεδα (ποσοστά) αξιοπιστίας επιζητούνται σε δρόμους με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο και σε περιοχές όπου οι εργασίες συντήρησης ή αποκατάστασης του οδοστρώματος έχουν υψηλό κόστος λόγω, κυρίως, της κυκλοφοριακής αναστάτωσης που θα προκαλέσουν (παραδείγματος χάριν αυτοκινητόδρομοι σε αστικές και υπεραστικές περιοχές). Ο υψηλός συντελεστής αξιοπιστίας συνεπάγεται άμεσα και μεγαλύτερο κατασκευαστικό πάχος. Οι προτεινόμενες τιμές του παράγοντα αξιοπιστίας R δίνονται στον Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9.: Επίπεδα αξιοπιστίας, R, ανά κατηγορία οδού

Κατηγορία οδού	Προτεινόμενα επίπεδα αξιοπιστίας, R	
	Αστικές περιοχές	Υπεραστικές περιοχές
Αυτοκινητόδρομοι	85 - 99.9%	80 - 99.9%
Κύριες αρτηρίες	80 - 99%	75 - 95%
Δευτερεύουσες αρτηρίες	80 - 95%	75 - 95%
Μικρές τοπικές οδοί	50 - 80%	50 - 80%

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 πρόγνωσης συμπεριφοράς του AASHTO βρέθηκε ότι η ολική σταθερή απόκλιση (S_o) για τα εύκαμπτα οδοστρώματα κυμαίνεται μεταξύ 0,40 – 0,50, και λαμβάνεται η τιμή 0,45.

(iv) Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που θεωρούνται από τη μεθοδολογία ότι επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός νέου οδοστρώματος είναι ο παγετός (frost) και η διόγκωση (swelling) του εδάφους 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 φαινομένων οδηγεί σε αισθητή, πρόσθετη μείωση/απώλεια της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος. Η απώλεια αυτή εκφράζεται συναρτήσει κάποιας απώλειας του δείκτη PSI. Έτσι, η απώλεια εξυπηρετικότητας λόγω διόγκωσης του υπεδάφους εκφράζεται με το APSISW ενώ η απώλεια από ανύψωση λόγω παγετού εκφράζεται με το $\Delta P8I_{rp}$. Η απώλεια της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος λόγω των παραπάνω φαινομένων προστίθεται στην απώλεια που επέρχεται λόγω του κυκλοφοριακού φόρτου. Έτσι, για κάθε εδαφικό υλικό θα πρέπει να εκτιμηθεί ο ρυθμός απώλειας της εξυπηρετικότητας τόσο λόγω διόγκωσης όσο και λόγω υπερύψωσης από παγετό, εφ' όσον βέβαια υπάρχουν οι προϋποθέσεις. Ουσιαστικά θα πρέπει να καθορισθούν οι καμπύλες του Σχήματος 3.19. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης της απώλειας εξυπηρετικότητας σε κάθε χρονική στιγμή της περιόδου ανάλυσης.

α. Διόγκωση υπεδάφους

Η διόγκωση του υπεδάφους είναι σύνηθες φαινόμενο και εμφανίζεται όταν στο υπέδαφος υπάρχει διογκούμενη άργιλος ή άλλα υλικά που είναι δυνατόν να διογκωθούν (αργιλικής ή ιλυώδους μορφής). Ο καθορισμός της απώλειας εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος (APSI_{yW}) γίνεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$APSI_{sw} = 0,00335 \times V_R \times P_s \times (1 - e^{-0t}) \quad (3.20)$$

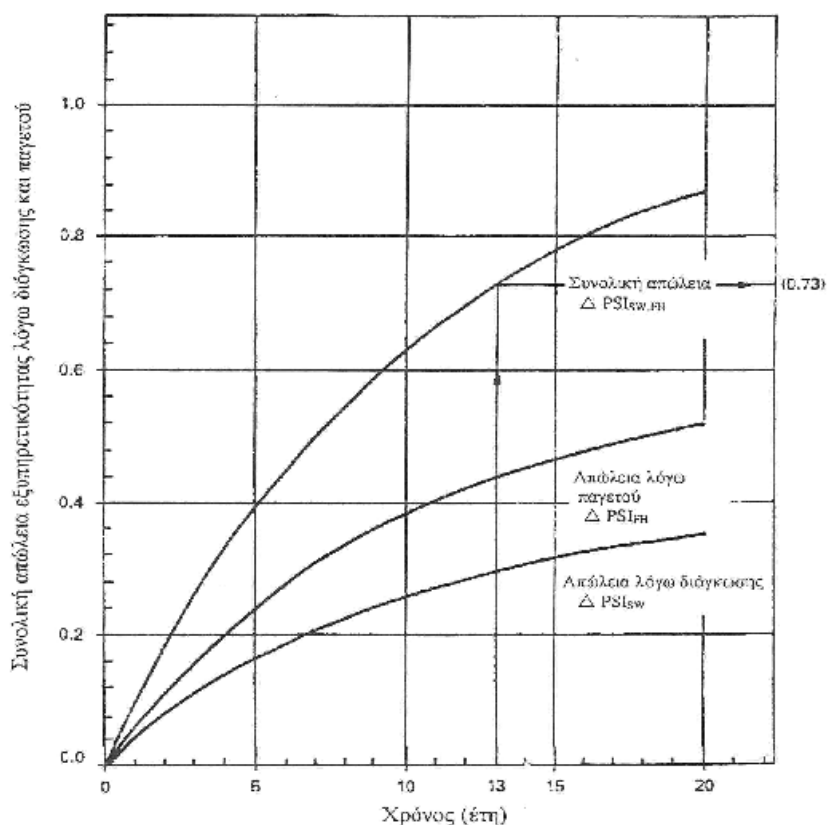
όπου V_R = Δυναμικό κατακόρυφης ανύψωσης (σε inches)

P_s = Πιθανότητα διόγκωσης (ακέραιος αριθμός επί τοις εκατό)

θ = Σταθερά διόγκωσης

t = χρόνια

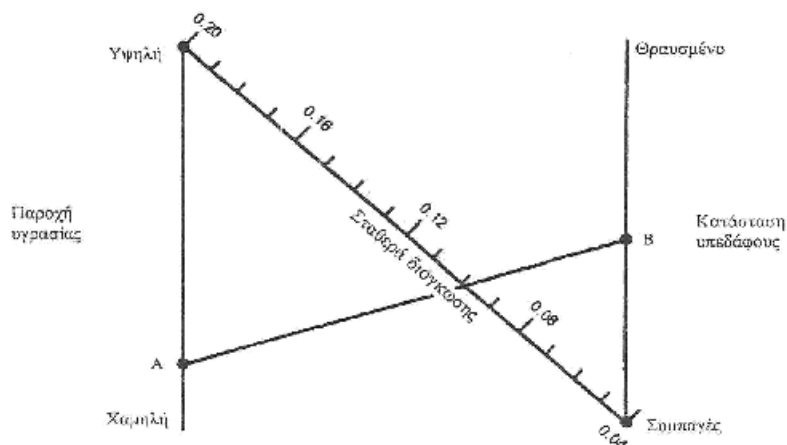
Η σταθερά διόγκωσης εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο η διόγκωση λαμβάνει χώρα. Οι τιμές που μπορεί να πάρει αυτή η σταθερά είναι από 0,04 έως 0,20, Σχήμα 3.20. Σε γενικές γραμμές, η μεγαλύτερη τιμή χρησιμοποιείται όταν το υπεδάφος υπόκειται σε υψηλή υγρασία και η αποστράγγιση είναι ελλιπής. Η τιμή της σταθεράς διόγκωσης βρίσκεται από την τομή της ευθείας που ορίζεται από κάποιο σημείο (A) του άξονα της υγρασίας με κάποιο σημείο της κατάστασης (B) του υπεδάφους και της ευθείας της σταθεράς διόγκωσης.



Σχήμα 3.19.: Καμπύλες απώλειας εξυπηρετικότητας οδοστρώματος λόγω διόγκωσης και παγετού

Το δυναμικό της κατακόρυφης ανύψωσης (VR) υπολογίζεται από το νομογράφημα του Σχήματος 3.21 εφόσον είναι γνωστός ο δείκτης πλαστικότητας (P.I.) του υπεδάφους, οι συνθήκες υγρασίας αυτού μετά την κατασκευή και το πάχος της εδαφικής στρώσης που δύναται να διογκωθεί. Οποσδήποτε, η εκτίμηση της υγρασίας του υπεδάφους κατά τη διάρκεια λειτουργίας του οδοστρώματος είναι υποκειμενική και

θα πρέπει να γίνεται από το μελετητή συγκρίνοντας την υπάρχουσα κατάσταση πριν την κατασκευή και αυτήν που θα δημιουργηθεί μετά την κατασκευή.



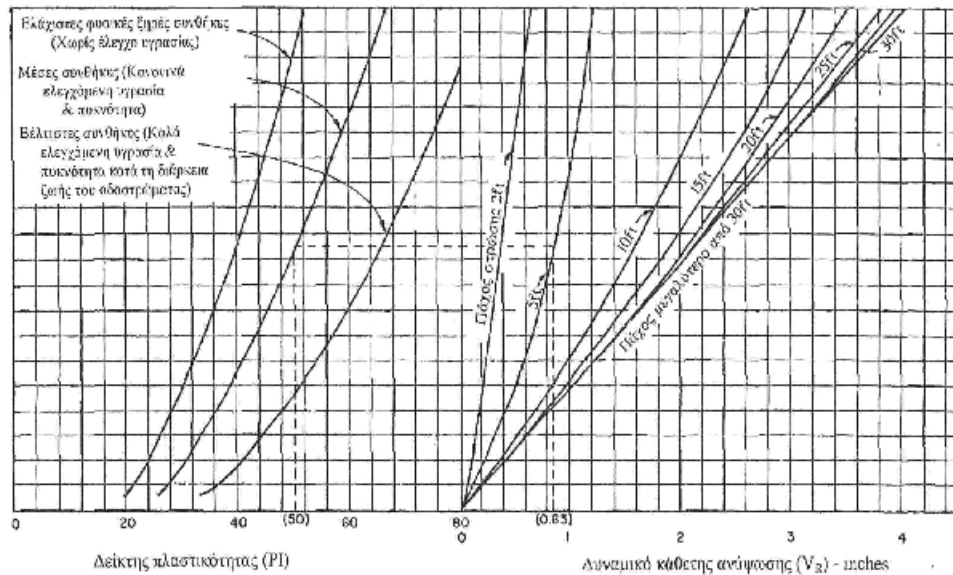
Σχήμα 3.20.: Νομογράφημα εκτίμησης σταθεράς διόγκωσης, θ

Η πιθανότητα διόγκωσης (P_s) αντιπροσωπεύει την αναλογία (εκφραζόμενη επί τοις εκατό) του μήκους του έργου που υπόκειται σε διόγκωση. Η πιθανότητα διόγκωσης του υπεδάφους σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία θεωρείται 100% εάν το υπέδαφος αποτελείται από υλικά με δείκτη πλαστικότητας (P.I.) μεγαλύτερο του 30 και το πάχος της στρώσης των υλικών αυτών είναι μεγαλύτερο των 600mm (ή $VR > 0,2$ inches). Εάν το μήκος του έργου χωρισθεί σε περιοχή που πρόκειται να υπάρξει διόγκωση και σε περιοχή που δεν πρόκειται να υπάρξει διόγκωση, τότε η πιθανότητα διόγκωσης στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται 100% και στη δεύτερη 0%.

Η σχεδιαστική τιμή τόσο για το P_s όσο και για το V_R και θ είναι ο αναλογικός μέσος όρος των τιμών (Weighted average) που προκύπτουν από κάθε τμήμα της οδού. Έτσι λοιπόν, γνωρίζοντας τις παραπάνω τρεις παραμέτρους και χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.20, είναι δυνατόν να βρεθεί η απώλεια εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος από διόγκωση (ΔPSI_{sw}) σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή από την κατασκευή του οδοστρώματος (5, 10, 15, 20 χρόνια) και να δημιουργηθεί η μία από τις καμπύλες του Σχήματος 3.21, χρήσιμη για τους περαιτέρω υπολογισμούς.

β. Ανύψωση λόγω παγετού

Απώλεια της εξυπηρετικότητας του οδοστρώματος (ΔPSI_{FH}) επέρχεται και από την ανύψωση του υπεδάφους λόγω ογκομετρικής διαστολής αυτού οφειλόμενης στην ύπαρξη θερμοκρασιών κάτω του μηδενός.



Σημείωση:

1. Το νομογράφημα βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:
 - α. Το εδαφικό υλικό (για όλα τα αναφερόμενα πάχη) διέρχεται του κοκκίνου Νο 40
 - β. Το υπόδαφος έχει σταθερή περιεκτικότητα υγρανίας και δείκτη πλαστικότητας σε όλα τα πάχος της στρώσης για τις αναφερόμενες συνθήκες
 - γ. Επαρκής πίεση, ενώ πάχος υπερκείμενης στρώσης 20 ιντσών (± 10 ιντσες δεν θα έχουν ουσιαστική επίπτωση)
2. Για πάχος που αναπτύσσονται υπό υπερκείμενες στρώσεις διαφορετικού πάχους, θα πρέπει τη V_R να καθορίζεται υπολογιστικά

Σχήμα 3.21.: Νομογράφημα υπολογισμού δυναμικού κατακόρυφης ανύψωσης V_R (σε ίντσες).

Ο υπολογισμός του (ΔPSI_{FH}) γίνεται κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν για τον υπολογισμό του $(\Delta PSI_S)_W$ αφού προηγουμένως εκτιμηθούν: ο μέσος ρυθμός ανύψωσης λόγω παγετού, η μέγιστη απώλεια εξυπηρετικότητας και η πιθανότητα ανύψωσης λόγω παγετού. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο υπολογισμού του ΔPSI_{FH} μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο του AASHTO. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στις περιπτώσεις που δεν υπεισέρχεται ο παράγοντας παγετός η τιμή του ΔPSI_{FH} λαμβάνεται μηδέν.

Έτσι, εφόσον υπάρχουν οι προϋποθέσεις διόγκωσης του υπεδάφους ή/και ανύψωσης λόγω παγετού είναι δυνατόν να υπολογισθεί η μείωση, σε έτη, που επέρχεται στην «περίοδο συμπεριφοράς του οδοστρώματος» λόγω των παραπάνω φαινομένων.

3.3.2. Κριτήρια Συμπεριφοράς ή Απόδοσης Οδοστρώματος

Το κριτήριο συμπεριφοράς ή απόδοσης του οδοστρώματος που λαμβάνεται υπόψη στη μεθοδολογία αυτή είναι το επίπεδο εξυπηρετικότητας αυτού.

Εξυπηρετικότητα του οδοστρώματος ορίζεται η ικανότητα του οδοστρώματος να εξυπηρετεί το χρήστη/κυκλοφορία. Αυτή εκφράζεται με το Δείκτη Παρούσας Εξυπηρετικότητας (PSI), ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0 (κάκιστος δρόμος) έως 5 (τέλειος δρόμος).

Επίσης χρησιμοποιείται και ο όρος Τελικός Δείκτης Εξυπηρετικότητας (P_t), ο οποίος εκφράζει το κατώτατο ανεκτό επίπεδο εξυπηρετικότητας πριν την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Η τιμή του τελικού δείκτη συσχετίζεται με το τι χαρακτηρίζεται σαν ανεκτό επίπεδο από το χρήστη, συναρτήσει της σπουδαιότητας της οδού. Ο AASHTO προτείνει τιμές μεγαλύτερες από 2,5 για αυτοκινητόδρομους ή κύριες αρτηρίες και 2,0 για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Δεδομένου ότι ο τελικός δείκτης εξυπηρετικότητας επηρεάζει το πάχος του οδοστρώματος και κατά συνέπεια το κόστος κατασκευής, στην περίπτωση που το αρχικό κεφάλαιο είναι μικρό και υποχρεώνει το μελετητή στην πλέον οικονομική λύση, συνιστάται όπως μειώνεται η σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (συνεπώς ο συνολικός αριθμός των ΙΤΑ που πρόκειται να εξυπηρετηθούν από το οδόστρωμα) και όχι η μείωση του P_t σε τιμές κάτω του 2,0.

Εφόσον υπάρχει τελικός δείκτης εξυπηρετικότητας, είναι λογικό να υπάρχει και ένας Αρχικός Δείκτης Εξυπηρετικότητας, P_o , για κάθε νέο οδόστρωμα που δίνεται σε κυκλοφορία. Η μέγιστη θεωρητική τιμή που μπορεί να λάβει αυτός ο δείκτης είναι το 5,0. Πλην όμως, επειδή είναι αδύνατον να υπάρξει απολύτως τέλεια κατασκευή, προτείνεται όπως για τα εύκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιείται η τιμή 4,2, εκτός αν υπάρχει σχετική εμπειρία από την ποιότητα των κατασκευών στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Έτσι, αφού καθορισθεί η τιμή του P_o και του P_t , η συνολική αλλαγή του δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας ΔPSI καθορίζεται από την εξίσωση:

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad (3.21)$$

3.3.3. Ιδιότητες υλικών

(i) Μηχανικές ιδιότητες

Η μηχανική ιδιότητα του υπεδάφους και γενικότερα κάθε υλικού χαμηλής δυσκαμψίας (φυσικά εδάφη, στρώσεις από ασύνδετα αδρανή ή σταθεροποιημένα

εδάφη) εκφράζεται με το μέτρο επανάκτησης, M_r , (Resilient Modulus), όπως και στην προηγούμενη μέθοδο.

Η μηχανική ιδιότητα των υλικών υψηλής δυσκαμψίας (σταθεροποιημένες βάσεις και ασφαλτομίγματα) εκφράζεται με το μέτρο ελαστικότητας, E , (Elastic modulus).

Για το υπέδαφος, η μεθοδολογία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην εποχιακή αλλαγή του μέτρου επανάκτησης. Έτσι, για την εξεύρεση της αντιπροσωπευτικής τιμής του M_r που θα χρησιμοποιηθεί στους περαιτέρω υπολογισμούς, προτείνεται ο καθορισμός της ισοδύναμου τιμής M_r . Ο καθορισμός της ισοδύναμου τιμής M_r γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων συντελεστών που ονομάζονται συντελεστές σχετικής καταστροφής (u_f).

Οι συντελεστές αυτοί συσχετίζουν τη σχετική καταστροφή που θα επέλθει στο μέτρο επανάκτησης λόγω εποχής. Οι συντελεστές σχετικής καταστροφής είναι συνάρτηση του μεγέθους M_r και μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$u_f = 1.18 \times 10^{-8} \times M_r^{-2.32} \quad (3.22)$$

Συνεπώς, για να καθορισθεί η ισοδύναμη τιμή M_r θα πρέπει να βρεθεί ο συντελεστής σχετικής καταστροφής (u_f) για κάθε τιμή M_r , που μετρήθηκε σε διαφορετικούς μήνες ή εποχές και κάτω από διάφορες συνθήκες υγρασίας, και κατόπιν να βρεθεί ο μέσος όρος των συντελεστών u_f . Το ισοδύναμο M_r είναι αυτό που αντιστοιχεί στο μέσο συντελεστή u_f χρησιμοποιώντας την ίδια σχέση (εξίσωση 3.22).

(ii) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Η μέθοδος του AASHTO μετατρέπει το πάχος της κάθε στρώσης σε αντίστοιχο Δομικό Αριθμό (SN_i). Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιούνται οι δομικοί συντελεστές στρώσεων (a_i) οι οποίοι εξαρτώνται από το υλικό των στρώσεων (ασφαλτόμιγμα, ασύνδετα αδρανή κ.λ.π.). Συνεπώς, ο δομικός αριθμός της κάθε στρώσης υπολογίζεται από τη θεμελιώδη σχέση:

$$SN_i = a_i \times h_i \quad (3.23)$$

Με το ίδιο σκεπτικό, το συνολικό πάχος του οδοστρώματος αντιπροσωπεύεται με το δομικό αριθμό του οδοστρώματος SN , ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SN = \sum a_i \times h_i \quad (3.24)$$

Οι δομικοί συντελεστές των στρώσεων (α_i) είναι ανάλογοι των υλικών που χρησιμοποιούνται σε κάθε στρώση και συσχετίζονται με τη μηχανική αντοχή ή φέρουσα ικανότητα των στρώσεων. Τα υλικά των στρώσεων χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες: α) ασφαλτομίγματα, β) υλικά βάσης δίχως συνδετικό υλικό, γ) υλικά υπόβασης δίχως συνδετικό υλικό, δ) ισχνά μίγματα με τσιμέντο (cement treated) και ε) ισχνά μίγματα με άσφαλτο (bituminous treated). Οι δομικοί συντελεστές των στρώσεων υπολογίζονται από σχετικά νομογραφήματα.

Για τον υπολογισμό του δομικού συντελεστή του ασφαλτικού σκυροδέματος (α_1) χρησιμοποιείται η καμπύλη του Σχήματος 3.22, που είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας αυτού. Προτείνεται όπως αποφεύγονται ασφαλτοσκυροδέματα με μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο του 450.000 psi (3100 MPa), στους 20°C, διότι παρόλο που τα μίγματα αυτά είναι πιο άκαμπτα, είναι ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές ρηγματώσεις και στις ρηγματώσεις που επέρχονται από κόπωση.

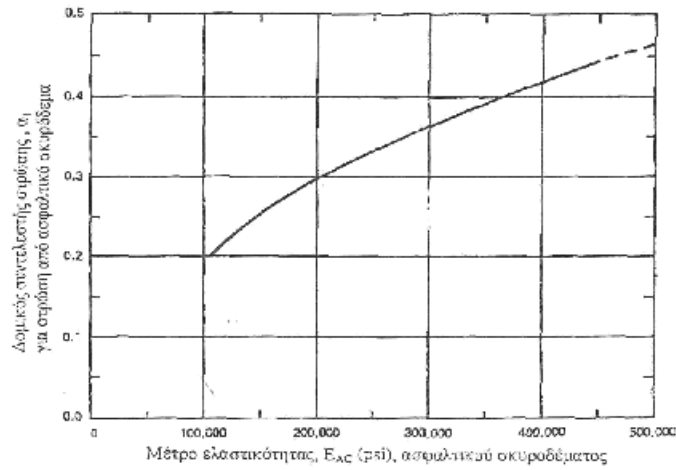
Για τον υπολογισμό του δομικού συντελεστή της βάσης με ασύνδετα αδρανή (α_2) και του συντελεστή της υπόβασης με ασύνδετα αδρανή (α_3), χρησιμοποιούνται τα νομογραφήματα του Σχήματος 3.23 και 3.25. Τα νομογραφήματα είναι συνάρτηση του μέτρου M_r και διαφόρων παραμέτρων μηχανικής αντοχής.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών των στρώσεων, που κατασκευάζονται με ισχνό σκυρόδεμα (συνήθως οι βάσεις), χρησιμοποιείται το νομογράφημα του Σχήματος 3.25, ενώ για τις βάσεις που κατασκευάζονται με ισχνό ασφαλτόμικγμα χρησιμοποιείται το νομογράφημα του Σχήματος 3.26. Όπως φαίνεται, τα νομογραφήματα αυτά είναι συναρτήσεις τόσο του μέτρου M_r όσο και της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη (unconfined), στην περίπτωση του ισχνού σκυροδέματος. Για τα ισχνά ασφαλτομίγματα το νομογράφημα είναι συνάρτηση και της ευστάθειας αυτού κατά Marshall.

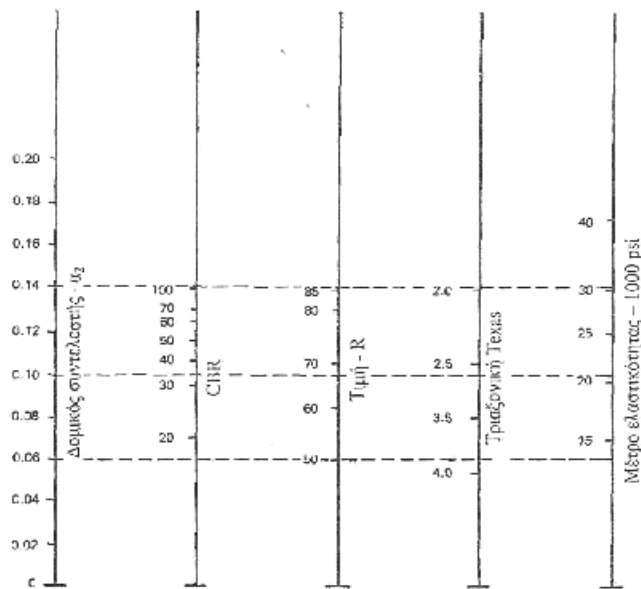
3.3.4. Χαρακτηριστικά του οδοστρώματος (της κατασκευής)

Ως χαρακτηριστικό της κατασκευής, για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, λαμβάνεται η αποστραγγιστική της ικανότητα. Η αποστραγγιστική ικανότητα της κατασκευής, σύμφωνα με τη μεθοδολογία, επηρεάζει τη συμπεριφορά όλων των στρώσεων εκτός αυτών που αποτελούνται από θερμό ασφαλτικό σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό προτείνονται διάφοροι συντελεστές αποστράγγισης, Πίνακας 3.10, οι οποίοι

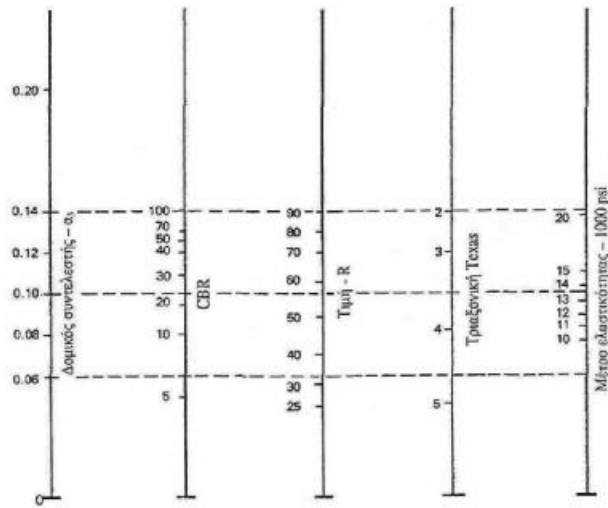
υπεισέρχονται στον υπολογισμό του δομικού αριθμού του οδοστρώματος, SN (εξίσωση 3.24).



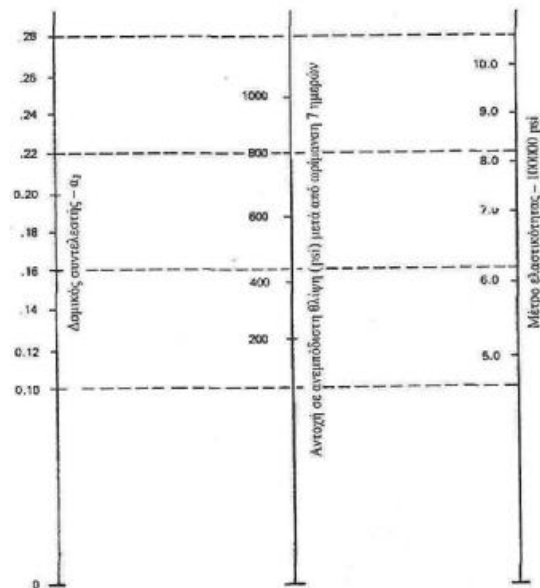
Σχήμα 3.22: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα (α₁)



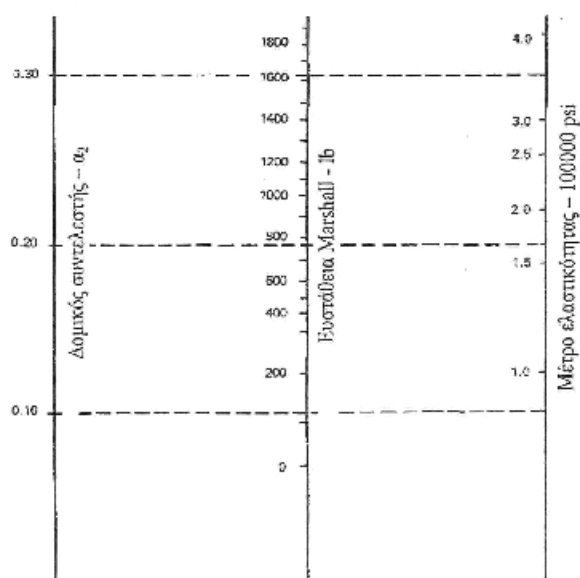
Σχήμα 3.23.: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ασύνδετα αδρανή (α₂).



Σχήμα 3.24.: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών υπόβασης από ασύνδετα αδρανή (α_3)



Σχήμα 3.25.: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ισχύο σκυρόδεμα (α_2)



Σχήμα 3.26.: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ισχνό ασφαλτόμιγμα (a_2)

Στον Πίνακα 3.10 δίνονται πέντε κατηγορίες αποστραγγιστικής ικανότητας του οδοστρώματος και τέσσερις κατηγορίες ποσοστού χρονικής διάρκειας κατά την οποία η κατασκευή εκτίθεται σε επίπεδο υγρασίας πλησίον του κορεσμού. Η εκτίμηση του κατάλληλου συντελεστή αποστράγγισης (m_i) είναι υποκειμενική και επαφίεται στην κρίση και εμπειρία του μελετητή. Η τιμή του συντελεστή $m_i = 1.00$ καθορίσθηκε από τον AASHTO στην περίπτωση που υπάρχει σχετικά καλή ποιότητα αποστράγγισης και το οδόστρωμα εκτίθεται σε επίπεδα υγρασίας που πλησιάζουν την κατάσταση κορεσμού περίπου για το 5% της χρονικής διάρκειας ζωής του.

Πίνακας 3.10.: Συντελεστές αποστράγγισης m_2, m_3, \dots

Αποστραγγιστική Ικανότητα	Ποσοστό χρόνου που το οδόστρωμα εκτίθεται σε υγρασία που πλησιάζει την κατάσταση κορεσμού			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Άριστη (Α.Υ. ⁽¹⁾ σε 2 ώρες)	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Καλή (Α.Υ. σε 1 μέρα)	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Αρκετά καλή (Α.Υ. σε 1 εβδ.)	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Κακή (Α.Υ. σε 1 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

⁽¹⁾ Α.Υ. = Απομάκρυνση ύδατος

3.3.5. Διαστασιολόγηση ευκάμπτου οδοστρώματος

Η διαστασιολόγηση ενός νέου ευκάμπτου οδοστρώματος, το οποίο πρόκειται να εξυπηρετήσει κατά τη διάρκεια σχεδιασμού έναν αριθμό ισοδυνάμων αξόνων μεγαλύτερο των 50.000 ΙΤΑ, επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: α) από το δομικό αριθμό του οδοστρώματος ή β) από το δομικό αριθμό της κάθε στρώσης πολυστρωματικού συστήματος.

Για τον υπολογισμό τόσο του δομικού αριθμού του οδοστρώματος όσο και του δομικού αριθμού της κάθε στρώσης χρησιμοποιείται το βασικό νομογράφημα του Σχήματος 3.27, το οποίο είναι η γραφική λύση της εξίσωσης:

$$\log W_{18} = R \times S_o + 9.36 \log(SN+1) - 0.2 + \log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)] / [0.40 + (1094 / (SN+1)^{5.19})] + 2.32 \log M_r - 8.07 \quad (3.25)$$

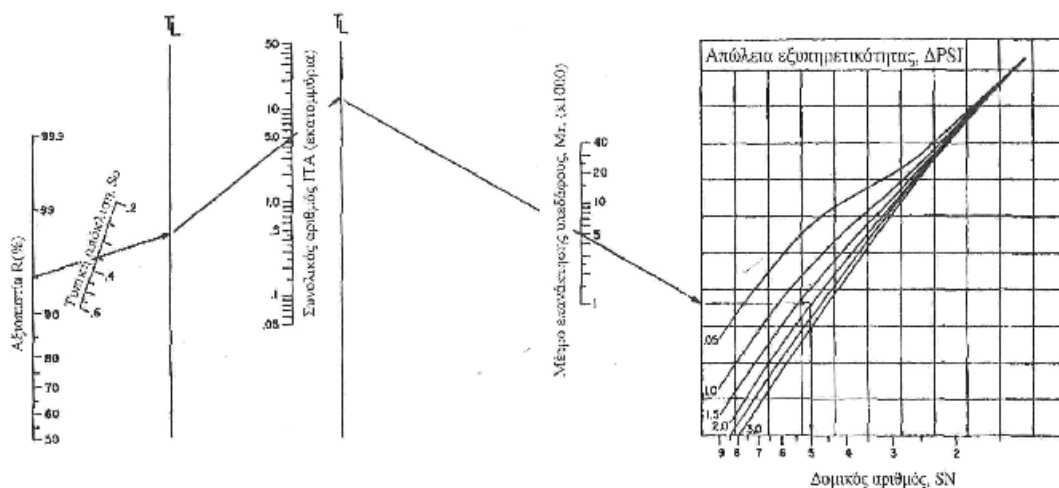
όπου R = αξιοπιστία

S_o = τυπική απόκλιση

SN = δομικός αριθμός

ΔPSI = μεταβολή (απώλεια) δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας

M_r = μέτρο επανάκτησης.



Παράδειγμα:

$$W_{18} = 5 \times 10^6$$

$$R = 95\%$$

$$S_o = 0.35$$

$$M_r = 5000 \text{ psi}$$

$$\Delta PSI = 1.9$$

$$\text{Λύση: } SN = 5.0$$

Σχήμα 3.27.: Νομογράφημα εκτίμησης δομικού αριθμού στρώσης και οδοστρώματος

3.4. ΒΡΕΤΑΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η Βρετανική μέθοδος διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, HD 24/94, είναι μια ημι-αναλυτική 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.

Η ανάπτυξη των διαγραμμάτων για τον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων βασίζεται στα σχεδιαστικά κριτήρια που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 11.3. Ειδικότερα, το εύκαμπτο και «σύνθετο» («μικτό») εύκαμπτο οδόστρωμα σχεδιάζεται για 20 χρόνια στο τέλος των οποίων αναμένεται να παρουσιάζει, σε ποσοστό 15% της επιφανείας του, επιφανειακή βύθιση 20 mm στην τροχιά των τροχών ή διαμήκειες ρωγμές στην τροχιά των τροχών, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επιφανειακή βύθιση οφείλεται στις βυθίσεις που προκαλούνται σε όλες τις στρώσεις με την πάροδο του χρόνου και όχι μόνο στην παραμόρφωση της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης.

Με την εμφάνιση αυτών των κακώσεων (κρίσιμη στιγμή/στάδιο), δηλαδή στο τέλος των 20 χρόνων, το οδόστρωμα, παρόλο που έχει ακόμη ικανοποιητικές δομικές ιδιότητες, θα πρέπει να αποκατασταθεί και/ή να ενισχυθεί, έτσι ώστε να επιζήσει για άλλα 20 χρόνια παρέχοντας ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης. Με το πέρας και των επιπλέον 20 ετών το οδόστρωμα αναμένεται να φτάσει στην κατάσταση "πλήρους" καταστροφής, οπότε τελειώνει και η συνολική διάρκεια ζωής αυτού. Κατάσταση πλήρους καταστροφής θεωρείται από τη μεθολογία όταν στο οδόστρωμα εμφανισθούν πολλαπλές διακλαδιζόμενες ρηγματώσεις και επιφανειακές βυθίσεις μεγαλύτερες των 20mm. Μετά το πέρας των 40 ετών απαιτείται πλήρης ανακατασκευή αυτού.

Η αποκατάσταση/ενίσχυση του οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την επίστρωση ασφαλικού τάπητα, το πάχος του οποίου υπολογίζεται από ανάλογες μεθοδολογίες. Εάν η αποκατάσταση του οδοστρώματος καθυστερήσει και δε γίνει κατά την κρίσιμη στιγμή, η εμφάνιση της πλήρους καταστροφής επιταχύνεται με δυσάρεστες οικονομικές επιπτώσεις.

Με τη μεθοδολογία αυτή μπορεί να διαστασιολογηθεί ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα, ή ένα «σύνθετο» (μικτό) εύκαμπτο οδόστρωμα, όπως επίσης και ένα δύσκαμπτο ή ένα «σύνθετο» δύσκαμπτο οδόστρωμα.

Το εύκαμπτο οδόστρωμα, σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, αποτελείται από τρεις διακεκριμένες στρώσεις: την επιφανειακή ή φθειρόμενη στρώση από

ασφαλτόμιγμα, τη στρώση της βάσης του οδοστρώματος από ασφαλτόμιγμα και τη στρώση από ασύνδετα ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο αδρανή που ονομάζεται υπόβαση.

Στο «σύνθετο-μικτό» εύκαμπτο οδόστρωμα το μόνο που αλλάζει είναι η βάση αυτού, η οποία αποτελείται από μια στρώση άοπλου σκυροδέματος (η κατώτερη στρώση) και μια στρώση από ασφαλτόμιγμα (ανώτερη στρώση).

Εκτός της δυνατότητας διαστασιολόγησης όλων των παραπάνω στρώσεων, η μεθοδολογία παρέχει επίσης τη δυνατότητα καθορισμού του πάχους της εξυγιαντικής στρώσης η οποία απαιτείται στην περίπτωση ασθενούς υπεδάφους.

Η διαδικασία διαστασιολόγησης ευκάμπτων και «μικτών» ευκάμπτων οδοστρωμάτων επεξηγείται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 3.28.

3.4.1. Καθορισμός κυκλοφοριακού φόρτου

Ο κυκλοφοριακός φόρτος που θα εξυπηρετηθεί από το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια του χρόνου σχεδιασμού εκφράζεται, και στη μεθοδολογία αυτή, συναρτήσει του συνολικού αριθμού ισοδυναμιών τυπικών αξόνων (ΙΤΑ). Ο καθορισμός του συνολικού αριθμού των ΙΤΑ μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους, βάσει του μέσου ημερήσιου αριθμού κυκλοφορίας των «εμπορικών» οχημάτων. Ως εμπορικό όχημα ορίζεται κάθε όχημα του οποίου το βάρος (δίχως φορτίο) είναι μεγαλύτερο των 15 kN (περίπου 1500 kg). Με βάση τον ορισμό αυτό φαίνεται ότι κατά τη μεθοδολογία αυτή ο αριθμός των ιδιωτικών επιβατηγών αυτοκινήτων δε λαμβάνεται υπόψη.

Από τις δύο μεθόδους που προτείνονται για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού των ΙΤΑ, η πρώτη, ονομαζόμενη ως «τυπική» μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συνθήκες κυκλοφορίας της Αγγλίας. Και αυτό διότι στα διαγράμματα που δίνονται έχουν ενσωματωθεί, μετά από πολυετείς και αναλυτικές μετρήσεις, η μέση ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας που παρατηρείται στην Αγγλία, όπως και ένας αντιπροσωπευτικός συντελεστής καταπόνησης του οδοστρώματος που εκφράζει την τυπική σύνθεση της κυκλοφορίας των οχημάτων στους Αγγλικούς δρόμους.

Η δεύτερη μέθοδος είναι μια αναλυτική μέθοδος υπολογισμού του συνολικού αριθμού των ΙΤΑ και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο συνολικός αριθμός διελεύσεων ΙΤΑ καθορίζεται αφού πρώτα

υπολογισθεί ο αριθμός των ΙΤΑ ανά κατηγορία εμπορικού οχήματος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.26:

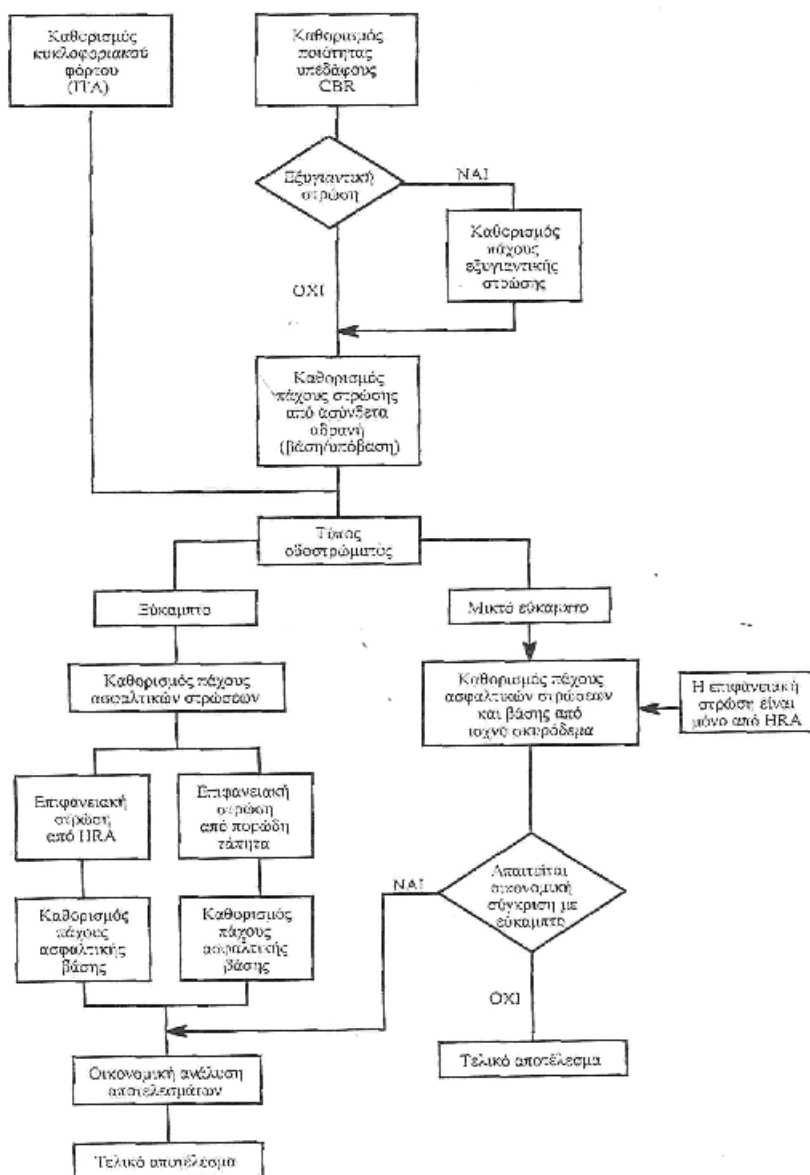
$$ITA = 365 \times F \times Y \times W \times G \times 10^{-6}, \text{ (σε εκατομμύρια ΙΤΑ)} \quad (3.26)$$

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 από το εμπορικό όχημα.

G = συντελεστής αύξησης της κυκλοφορίας



όλων των ασφαλικών στρώσεων. Το πάχος των επιμέρους στρώσεων όπως της επιφανειακής στρώσης και της βάσης, καθορίζεται από το γεγονός ότι η μεθοδολογία προτείνει συγκεκριμένα πάχη για την επιφανειακή στρώση. Από τους δύο τύπους ασφαλτομιγμάτων που συνιστώνται να χρησιμοποιούνται ως επιφανειακές στρώσεις, δηλαδή θερμό Κυλινδρούμενο Ασφαλτόμιγμα (HRA) και ασφαλτόμιγμα για πορώδεις τάπητες τα συνιστώμενα πάχη είναι: 45mm ή 50mm όταν χρησιμοποιείται ασφαλτόμιγμα HRA και 50mm όταν χρησιμοποιούνται πορώδεις τάπητες.

Στην πρώτη περίπτωση το πάχος της ασφαλικής βάσης είναι η διαφορά μεταξύ του αποτελέσματος από το Σχήμα 3.29 και του πάχους των 45 ή 50mm. Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση που κατασκευάζεται πορώδης τάπητας, το πάχος που αφαιρείται δεν είναι αυτό των 50 mm αλλά ένα ισοδύναμο πάχος, αυτό των 20 mm λόγω μειωμένης μηχανικής αντοχής του ασφαλτομίγματος αυτού. Έτσι ουσιαστικά στην περίπτωση αυτή το συνολικό κατασκευαστικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων αυξάνει κατά 30 mm. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε υπόψη στην τεchnο-οικονομική ανάλυση των εναλλακτικών λύσεων για τον καθορισμό της βέλτιστης λύσης.

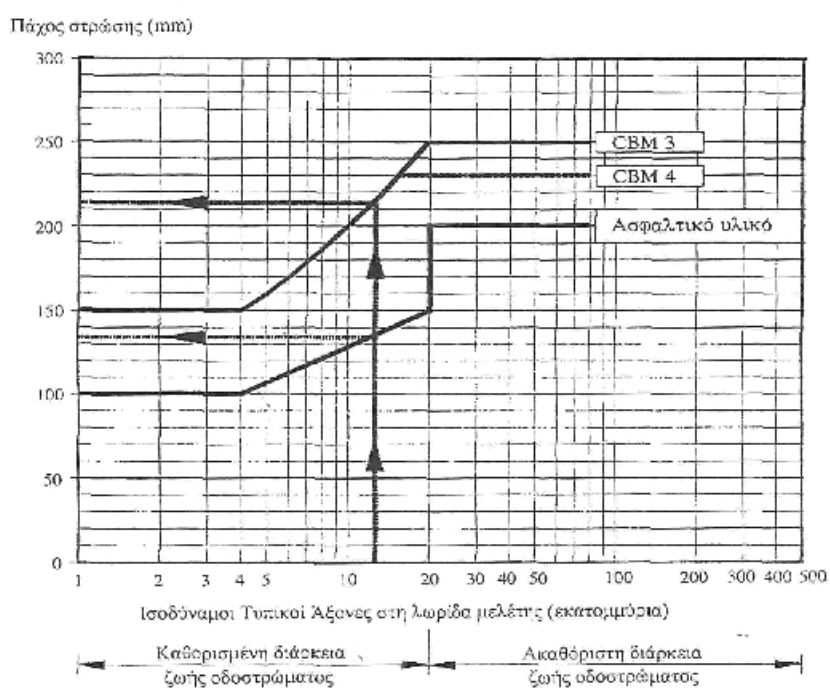
Βασική προϋπόθεση για τη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος με τη μεθοδολογία αυτή είναι να τηρούνται πλήρως και όλες οι άλλες προδιαγραφές σύνθεσης, παραγωγής και συμπύκνωσης των ασφαλτομιγμάτων όπως και γενικότερα όλων των προδιαγραφών κατασκευής ενός οδοστρώματος. Το παραπάνω ισχύει και για όλες τις μεθοδολογίες διαστασιολόγησης.

β) Μικτά εύκαμπτα οδοστρώματα

Η διαστασιολόγηση των μικτών ευκάμπτων οδοστρωμάτων γίνεται κατά τον ίδιο με τον παραπάνω τρόπο αλλά χρησιμοποιώντας το Σχήμα 3.30. Από το σχήμα αυτό καθορίζεται το πάχος της βάσης από ισχύο σκυρόδεμα, συνήθως χρησιμοποιείται μόνο ο τύπος CBM3, και το πάχος των υπερκείμενων ασφαλικών στρώσεων. Η επιφανειακή στρώση συνιστάται όπως είναι πάχους 45mm ή 50mm και μόνο από ασφαλτόμιγμα HRA. Το υπόλοιπο ασφαλικό μίγμα μπορεί να είναι ένα από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, στην περίπτωση ευκάμπτου οδοστρώματος.

Χαρακτηριστικό του Σχήματος 3.30 είναι η διάκριση μεταξύ καθορισμένης διάρκειας ζωής του οδοστρώματος και ακαθορίστου διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

Κατά τη μεθοδολογία, όταν από το μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα διέλθουν συνολικά 20 εκατομμύρια ΙΤΑ, το οδόστρωμα θα παρουσιάζει έντονες ρηγματώσεις και θα χρειασθεί πιθανότατα πλήρη ανακατασκευή με απομάκρυνση και αντικατάσταση της βάσης. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί επιλέγοντας, στο στάδιο της μελέτης, μεγαλύτερα και συγκεκριμένα πάχη όπως αυτά που ορίζονται από τις οριζόντιες παράλληλες ευθείες (δηλαδή 200mm ασφαλτικό και 250mm ή 230mm από ισχύο σκυρόδεμα τύπου CBM3 ή CBM4 αντίστοιχα). Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται ότι πιθανότατα μετά από 20 χρόνια, που είναι συνήθως το τέλος της σχεδιαστικής ζωής, δε θα χρειασθεί ανακατασκευή με απομάκρυνση και αποκατάσταση της βάσης. Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα μικτά εύκαμπτα οδοστρώματα δε θα πρέπει να προτιμούνται σε περιπτώσεις που ο αναμενόμενος κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ μεγάλος.



Σχήμα 3.30.: Υπολογισμός πάχους βάσεως και ασφαλτικών στρώσεων σε μικτό εύκαμπτο οδόστρωμα

Στην περίπτωση κατασκευής μικτών ευκάμπτων οδοστρώματων, το κατασκευαστικό πλάτος της λωρίδας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4,75m. Αυτό μειώνει το ενδεχόμενο εμφάνισης διαμηκών κυρίως ρηγματώσεων στην επιφανειακή στρώση, ιδιαίτερα στην περίπτωση που τα επιλεγμένα πάχη είναι 200mm ασφαλτικών στρώσεων

πάνω σε πάχος 250mm από σκυρόδεμα τύπου CBM3 ή 230mm από σκυρόδεμα τύπου CBM4. Σε μικρότερα πάχη στρώσεων το μέγιστο πλάτος της λωρίδας κατασκευής μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακών ρηγματώσεων γενικά.

3.4.3. Προστασία από παγετό

Σε όλες τις περιπτώσεις διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων, το συνολικό πάχος του οδοστρώματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το βάθος παγοπληξίας, εφ' όσον το έδαφος πάνω στο οποίο εδράζονται είναι παγοπληκτικό. Το βάθος παγοπληξίας (H) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H = 4I^{0,5}, \text{ (cm)} \quad (3.27)$$

όπου I = δείκτης παγοπληξίας

Ο δείκτης παγοπληξίας ορίζεται ως το γινόμενο του αριθμού των ημερών με θερμοκρασία κάτω του μηδενός επί τη μέση θερμοκρασία των ημερών εκείνων, σε βαθμούς Κελσίου.

Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν στοιχεία θερμοκρασιών και ημερών με θερμοκρασία κάτω του μηδενός, το βάθος παγοπληξίας λαμβάνεται 450mm.

3.5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΟΑΕ

Η μέθοδος της Εγνατίας Οδού Α.Ε. (ΕΟΑΕ) είναι μια ημιαναλυτική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε το 1997 από ομάδα επιστημόνων⁴⁰ για να καλύψει τις ανάγκες διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων της Εγνατίας οδού. Με την προσθήκη μικρού αριθμού διαγραμμάτων και μικροσυμπληρώσεων σε ορισμένους πίνακες που εμπεριέχονται, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαστασιολόγηση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων σε όλη την Ελληνική επικράτεια ή γενικότερα σε χώρες με κλιματολογικές συνθήκες όμοιες της Ελλάδος. Η μέθοδος της ΕΟΑΕ ενσωματώθηκε και περιγράφεται στον ΟΣΜΕΟ, ενώ σε ολοκληρωμένη έκδοση, για όλη την επικράτεια, περιγράφεται αναλυτικά στη σχετική βιβλιογραφία.

Η μέθοδος της ΕΟΑΕ αποτελείται από νομογραφήματα και πίνακες που παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων ευκάμπτων οδοστρωμάτων, του πάχους της βάσης και της υπόβασης καθώς και το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης (εάν απαιτείται), συναρτήσει της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους και του κυκλοφοριακού φόρτου.

Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους εκφράζεται συναρτήσει του Καλιφορνιακού δείκτη (CBR) ενώ ο κυκλοφοριακός φόρτος σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ΙΤΑ) των 80 kN.

Η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα διαστασιολόγησης των ασφαλτικών στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα με όλους τους τύπους συμβατικής ασφάλτου οδοστρωσίας, ήτοι 40/50, 50/70 και 80/100 pen (dmm), όπως επίσης και τροποποιημένης ασφάλτου, όσον αφορά το πάχος της ανώτατης ασφαλτικής στρώσης (στρώση κυκλοφορίας).

Λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων, τα νομογραφήματα αναπτύχθηκαν για δύο διακεκριμένες θερμοκρασίες, ήτοι 13°C και 16°C. Οι θερμοκρασίες αυτές αντιπροσωπεύουν την ελαχίστη και τη μέγιστη Μέση Ετήσια θερμοκρασία Αέρος (ΜΕΘΑ) που εμφανίζονται σε όλο το μήκος της Εγνατίας οδού. Για περιοχές με ενδιάμεσες ΜΕΘΑ η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων γίνεται με γραμμική παρεμβολή.

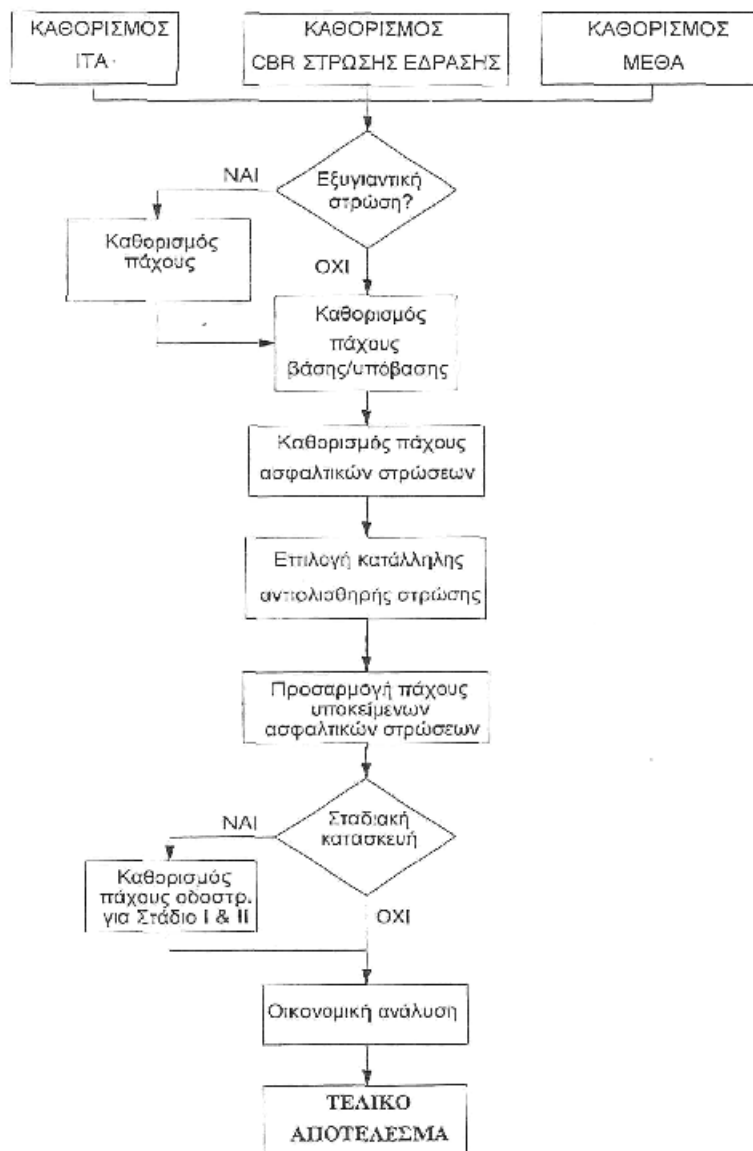
Για τη δημιουργία των νομογραφημάτων διαστασιολόγησης ευκάμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιήθηκε η ελαστική θεωρία πολυστρωματικών συστημάτων, κατά την οποία τα υλικά χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young) και το λόγο Poisson.

Τα σχεδιαστικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των νομογραφημάτων είναι αυτά που αναφέρονται σε προηγούμενες παραγράφους. Επίσης, ελήφθη υπόψη όπως η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση (βάθος τροχοαυλάκωσης) στο τέλος της σχεδιαστικής διάρκειας ζωής του οδοστρώματος να μη ξεπερνά τα 25mm.

Σημειώνεται ότι κατά τη σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος θα απαιτηθεί αντικατάσταση της αντιολισθηρής στρώσης. Ο χρόνος ή συχνότητα επέμβασης εξαρτάται από την καταλληλότητα των αδρανών υλικών της επιφανειακής στρώσης σε σχέση με μέγεθος του κυκλοφοριακού φόρτου.

Τέλος, η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα διαστασιολόγησης των ασφαλτικών στρώσεων σε περίπτωση επιλεγθεί σταδιακή κατασκευή.

Η διαδικασία διαστασιολόγησης των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, σύμφωνα με τη μέθοδο της ΕΟΑΕ, επεξηγείται στο λογικό διάγραμμα του Σχήματος 11.31.



Σχήμα 3.31.: Λογικό διάγραμμα ροής μεθοδολογίας διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων

3.5.1. Καθορισμός ΙΤΑ

Η μετατροπή της κυκλοφορίας σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες γίνεται με τη χρήση των σχετικών συντελεστών ισοδυναμίας.

Για τον υπολογισμό του αθροιστικού αριθμού των ΙΤΑ ($\Sigma(\text{ΙΤΑ})$) ανά κατεύθυνση στη λωρίδα μελέτης καθ' όλη τη διάρκεια σχεδιασμού του οδοστρώματος χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\Sigma(\text{ΙΤΑ}) = (\text{ΙΤΑ}_{\text{ημερ.}}) \times \text{ΠΚΛΜ} \times 365 \times \text{ΑΣ} \quad (3.28)$$

όπου $ITA_{\text{ημερ.}}$ = ημερήσιος αριθμός ισοδυνάμων τυπικών αξόνων ανά κατεύθυνση κατά το έτος έναρξης λειτουργίας της οδού

ΠΚΛΜ = ποσοστό κυκλοφορίας στη λωρίδα μελέτης

ΑΣ = αθροιστικός συντελεστής ($=[(1+r)^n - 1]/r$)

r = μέση ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας (π.χ. 0.03 για 3% μέση ετήσια αύξηση)

n = διάρκεια σχεδιασμού, σε έτη

3.5.2. Καθορισμός CBR στρώσης έδρασης

Η σχεδιαστική τιμή CBR καθορίζεται από την τιμή CBR του χειρότερου συναντώμενου υλικού (μικρότερη τιμή CBR) σε βάθος 600mm από την επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

Η δοκιμή CBR εκτελείται στο εργαστήριο σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 105-86, μετά από υδρεμποτισμό τεσσάρων ημερών. Σε όλες τις περιπτώσεις σαν τιμή CBR θα λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στο 90% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας που καθορίζεται από την τροποποιημένη δοκιμή Proctor. Εξάιρεση αποτελεί μόνο η περίπτωση μη διαταραγμένου εδαφικού υλικού φυσικώς σιμεντωμένου, σε όρυγμα με χαμηλό υδροφόρο ορίζοντα (>1m από την επιφάνεια), οπότε λαμβάνεται το CBR που αντιστοιχεί στο 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας που καθορίζεται από την τροποποιημένη δοκιμή Proctor.

Ο αριθμός των δοκιμών για τον καθορισμό του CBR θα είναι: α) στο στάδιο της προμελέτης, ένας (1) ανά κατηγορία υλικού αφού προηγουμένως γίνει η κατάταξη των υλικών με το σύστημα κατάταξης εδαφών κατά USCS ή κατά AASHTO, και β) στο στάδιο της οριστικής μελέτης, έξι έως οκτώ (6-8) ανά κατηγορία υλικού. Ως αντιπροσωπευτική τιμή CBR του υλικού θα είναι η τιμή που είναι ίση ή υπερβαίνεται από το 90% των τιμών που εξήχθησαν.

Στην περίπτωση κατασκευής οδοστρώματος σε γαιώδες όρυγμα όπου υπάρχει εναλλαγή κατηγοριών του εδαφικού προφίλ (μετά από γεωτεχνική έρευνα για τον καθορισμό της κατάταξης των υλικών), η οδός χωρίζεται σε τόσα αντίστοιχα τμήματα όσα οι διακεκριμένες εναλλαγές των υλικών.

Στην περίπτωση κατασκευής όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο ή/και, πιθανότατα, όταν η κατασκευή εναλλάσσεται από όρυγμα σε επίχωμα, θα

προκύψουν ουσιαστικά τόσες διαφορετικές σχεδιαστικές τιμές CBR, και κατ' επέκταση αντίστοιχες διατομές οδοστρώματος, όσες οι διακεκριμένες κατηγορίες των εδαφικών υλικών. Δεδομένου ότι οι συχνές αλλαγές της διατομής του οδοστρώματος δεν ενδείκνυνται, συνιστάται όπως ο μελετητής μειώσει τον αριθμό των διατομών έτσι ώστε να μην υπάρχει συχνή αλλαγή της διατομής του οδοστρώματος. Συνιστάται όπως το μήκος αλλαγής των διατομών δεν είναι μικρότερο του 1 ή 2km, πλην των περιπτώσεων όπου τοπικά εμφανίζεται πολύ ασθενές υπέδαφος ($CBR < 5$), περίπτωση στην οποία απαιτείται εξυγίανση του υπεδάφους.

Στην περίπτωση που επιλεγεί μείωση των διατομών, το οδόστρωμα θα διαστασιολογηθεί με τη μικρότερη σχεδιαστική τιμή CBR που προκύπτει (πλην της περίπτωσης όπου η τιμές CBR είναι μικρότερες του 5%).

Στην ειδική περίπτωση κατασκευής οδοστρώματος πάνω σε βραχώδες όρυγμα όπου ο μελετητής, για την κατασκευή της στέψης του επιχώματος επιλέγει καλής ποιότητας υλικό, το σχεδιαστικό CBR λαμβάνει τιμές 20% ή 15%, αναλόγως της ποιότητας του υλικού και της κατάστασης του βράχου.

Σε περίπτωση κατασκευής οδοστρώματος σε μικτή διατομή το σχεδιαστικό CBR καθορίζεται από το χειρότερο υλικό της διατομής.

Στην ειδική περίπτωση χρήσης στραγγιστικής στρώσης, η σχεδιαστική τιμή CBR καθορίζεται από το υλικό που βρίσκεται κάτω από τη στραγγιστική στρώση. Δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη η χρήση της στραγγιστικής στρώσης στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος.

3.5.3. Καθορισμός ΜΕΘΑ

Η θερμοκρασία αέρος επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων. Για τις ανάγκες της μεθοδολογίας είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί μόνο η Μέση Ετήσια θερμοκρασία Αέρος (ΜΕΘΑ) του έργου.

Ο προσδιορισμός της ΜΕΘΑ πραγματοποιείται βάσει στατιστικών στοιχείων από τον κοντινότερο στο έργο μετεωρολογικό σταθμό. Δεδομένου ότι η πυκνότητα των μετεωρολογικών σταθμών δεν είναι μεγάλη, ο μελετητής, ανάλογα με τη θέση του έργου, θα πρέπει να εκτιμήσει την αντιπροσωπευτική ΜΕΘΑ της περιοχής του έργου.

Για τις ανάγκες της μεθόδου αναπτύχθηκαν δύο σερ νομογραφημάτων για θερμοκρασία 13°C και 16°C. Σε περίπτωση που προκύπτουν ενδιάμεσες θερμοκρασίες, το πάχος των στρώσεων καθορίζεται με γραμμική παρεμβολή.

3.5.4. Καθορισμός εξυγιαντικής στρώσης

Εξυγιαντική στρώση απαιτείται όταν η κατασκευή του οδοστρώματος γίνεται επί εδαφικού ορύγματος και το CBR του υπεδάφους είναι μικρότερο από 5%. Το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης καθορίζεται από το CBR του υπεδάφους. Η μεθοδολογία διακρίνει δύο τιμές CBR και επομένως δύο πάχη εξυγιαντικής στρώσης. Ειδικότερα, όταν:

- το CBR είναι μικρότερο ή ίσο με 2,5% το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης πρέπει να είναι 600mm
- το CBR είναι μεγαλύτερο από 2,5% και μικρότερο ή ίσο με 5% το πάχος της εξυγιαντικής στρώσης πρέπει να είναι 300mm.

Τα προαναφερόμενα πάχη της εξυγιαντικής στρώσης συνδυάζονται με το πάχος της βάσης και υπόβασης, βλέπε Πίνακα 3.11. Η σχεδιαστική τιμή CBR στις περιπτώσεις που το CBR του υπεδάφους είναι μικρότερο από 3% λαμβάνεται ίση με 3%. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, δηλαδή CBR μεταξύ 3% και 5%, σαν σχεδιαστική τιμή CBR λαμβάνεται η μετρηθείσα τιμή CBR του υπεδάφους.

Σε περιπτώσεις που απαιτείται εξυγιαντική στρώση και η φυσική υγρασία του εδάφους είναι σχετικά υψηλή κατά την κατασκευή, και ειδικότερα όταν το CBR <2,5%, μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη η τοποθέτηση γεωσυνθετικού υλικού στην εκτιθέμενη επιφάνεια του υπεδάφους, μετά την απομάκρυνση των 600mm ή 300mm.

Αν το έδαφος είναι συνεκτικό, η σταθεροποίηση με ασβέστη είναι μια ακόμη εναλλακτική λύση για τη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους. Με την προϋπόθεση της καταλληλότητας του εδάφους, η λύση αυτή μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να αποδειχθεί πιο οικονομική σε σύγκριση με την εξυγιαντική στρώση από διαβαθμισμένο υλικό.

3.5.5. Καθορισμός πάχους βάσης/υπόβασης

Οι στρώσεις της βάσης και της υπόβασης αντιμετωπίζονται σαν μία στρώση από ασύνδετα αδρανή υλικά.

Το πάχος της στρώσης από ασύνδετα αδρανή λαμβάνει τρεις διακεκριμένες τιμές: 400mm, 300mm και 200mm. Η επιλογή του κατάλληλου πάχους εξαρτάται από το CBR της στρώσης έδρασης και θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις οδηγίες του πίνακα 3.31.

Το αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της βάσης/υπόβασης πρέπει να είναι σύμφωνο με την προδιαγραφή ΠΤΠ Ο-155 και το άρθρο 67 της ΤΣΥ της ΕΟΑΕ.

Πίνακας 3.11.: Απαιτούμενα και συνιστώμενα πάχη βάσης / υπόβασης

CBR στρώσης έδρασης (%)	Εξυγιαντική στρώση (mm)	Πάχος βάσης / υπόβασης (mm)
	Απαιτούμενο πάχος	
≤ 2,5	600	400
2,6 - 5,0	300	400
5,1 - 10,0	0	400
	Συνιστώμενο πάχος	
10,1 - 20,0	0	300
>20,0	0	200

Σημείωση: Με τον όρο 'συνιστώμενο πάχος' νοείται ότι στις περιπτώσεις που το CBR είναι μεγαλύτερο του 10% ή >20%, το πάχος των 400mm για βάση/υπόβαση και των 300mm ή 400mm, αντίστοιχα, δεν αποκλείεται.

Όταν το πάχος της βάσης/υπόβασης είναι 400mm επιτρέπεται η κατασκευή των πρώτων 200mm, σε επαφή με τη στρώση έδρασης, να είναι από φυσικό αμμοχάλικο, σύμφωνα με την προδιαγραφή ΠΤΠ Ο-150 και το άρθρο 66 της. Τα υπόλοιπα όμως 200mm θα πρέπει απαραιτήτως να είναι από θραυστό αδρανές υλικό ή θραυστό αμμοχάλικο, σύμφωνα με την προδιαγραφή ΠΤΠ Ο-155 και το άρθρο 67 της ΤΣΥ της ΕΟΑΕ.

Εξαίρεση της προηγούμενης παραγράφου αποτελεί η περίπτωση κατασκευής οδοστρώματος σε περιοχές όπου αναμένονται κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών θερμοκρασίες υπό του μηδενός. Στις περιπτώσεις αυτές συνιστάται η αποκλειστική χρήση υλικού σύμφωνα με την ΠΤΠ ΟΙ 55 και το άρθρο 67 της ΤΣΥ.

Η υπόβαση και η βάση μπορούν να κατασκευαστούν από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό, σύμφωνα με τα άρθρα 26 και 27 της ΤΣΥ της ΕΟΑΕ. Στην περίπτωση αυτή το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης είναι το ίδιο με το πάχος της στρώσης από ασύνδετα αδρανή, δηλαδή καθορίζεται και πάλι από τον Πίνακα 3.11.

Συνιστάται όπως η χρήση σταθεροποιημένου με τσιμέντο υλικού περιορίζεται μόνο στην περίπτωση έλλειψης κατάλληλου υλικού για βάση / υπόβαση στην εγγύτερη περιοχή του έργου. Ακόμη και στην περίπτωση αυτή η χρήση σταθεροποιημένου με τσιμέντο υλικού θα πρέπει να αποδεικνύεται ότι είναι οικονομικά συμφέρουσα έναντι της χρήσης ασύνδετων αδρανών υλικών.

3.5.6. Καθορισμός πάχους ασφαλτικών στρώσεων

Ο καθορισμός του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων πραγματοποιείται με τη χρήση νομογραφήματων που περιέχουν σχεδιαστικές καμπύλες σε διαφορετικές τιμές CBR, για κάθε διακεκριμένο πάχος βάσης / υπόβασης (400mm, 300mm και 200mm), για ΜΕΘΑ 13°C και 16°C και για άσφαλο 50/70pen και 40/50pen.

Επιλέγοντας το κατάλληλο νομογράφημα για προαποφασισθέν πάχος βάσης/υπόβασης και ΜΕΘΑ έργου, και γνωρίζοντας τον αθροιστικό αριθμό ΙΤΑ και το CBR της στρώσης έδρασης, το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων.

Διευκρινίζεται ότι, σε περίπτωση που το CBR λαμβάνει τιμές μεταξύ αυτών που αναγράφονται στα νομογραφήματα, η τιμή στρογγυλεύεται στην αμέσως προηγούμενη ακέραιη μονάδα (δηλαδή, εάν CBR = 6,7% χρησιμοποιείται το 6,0%) και ο καθορισμός του πάχους γίνεται με γραμμική παρεμβολή.

Επίσης, σε περίπτωση όπου η ΜΕΘΑ του έργου είναι μεταξύ 13°C και 16°C, ο υπολογισμός του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων γίνεται με γραμμική παρεμβολή.

Σε όλες τις περιπτώσεις το αποτέλεσμα που λαμβάνεται από τα νομογραφήματα στρογγυλεύεται στα αμέσως επόμενα μεγαλύτερα 5mm, και αυτό είναι το τελικό συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων.

Το ασφαλτόμιγμα που χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις είναι ασφαλτικό σκυρόδεμα.

Η άσφαλτος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να είναι κοινή άσφαλτος οδοστρωσίας 50/70 pen ή 40/50 pen.

Ο μελετητής για να διασφαλίσει την καλή συμπεριφορά του οδοστρώματος, αντί της κοινής άσφαλτου 40/50 pen στην ανώτερη στρώση, μπορεί να χρησιμοποιήσει και τροποποιημένη άσφαλτο. Στην περίπτωση αυτή, δηλαδή όπου μόνο η ανώτερη στρώση (40 ή 50mm) κατασκευάζεται με τροποποιημένη άσφαλτο, η διαστασιολόγηση γίνεται από τα σχετικά νομογραφήματα.

3.6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΥ

Ιστορικό. Η μέθοδος αυτή σχεδιασμού είναι μοναδική ανάμεσα σε όλες τις άλλες μεθόδους σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά το ότι το πάχος σχεδιασμού αφορά ένα οδόστρωμα που αποτελείται μόνον από ασφαλτικά μίγματα*. Αυτή η έννοια εισήχθηκε αρχικά το 1964, ύστερα από εκτενή ανάλυση οδικών δοκιμών των WASHO, AASHO και βρετανικών οδών, που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το ασφαλτικό μπετόν μπορεί να αντικαταστήσει με επιτυχία ασύνδετες κοκκώδεις βάσεις και υποβάσεις του οδοστρώματος σε διάφορες αναλογίες.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί αναλογίες αντικατάστασης που προτείνονται για (α) ασφαλτικές βάσεις άμμου «εν θερμώ» (1,3:1), (β) βάσεις με υγρά ασφαλτικά γαλακτώματα (1,4:1), (γ) αβελτίωτες κοκκώδεις βάσεις (2:1) και (δ) αβελτίωτες κοκκώδεις υποβάσεις (2,7:1). Οι τιμές αυτές επιτρέπουν εναλλακτικούς σχεδιασμούς οδοστρωμάτων με τη μέθοδο αυτή.

Η μέθοδος βασίζεται κυρίως στην ανάλυση της συμπεριφοράς του ασφαλτικού οδοστρώματος κατά την Οδική Δοκιμή AASHO. Έτσι η χρήση της έννοιας επίδοσης-λειτουργικότητας, που παρέχουν τα αποτελέσματα της AASHG, εκδηλώνεται έμμεσα στη μέθοδο σχεδιασμού με την επιλογή ενός τελικού βαθμού λειτουργικότητας 2,5 για αποτυχία. Η χρήση των επαναλήψεων του ισοδύναμου φορτίου απλού άξονα 18 kip γίνεται με τον Αριθμό Κυκλοφορίας Σχεδιασμού (DTN), που αντιπροσωπεύει τον μέσο ημερήσιο αριθμό ισοδύναμων φορτίων απλού άξονα 18 kip, που αντιστοιχεί στη λωρίδα σχεδιασμού κατά την περίοδο σχεδιασμού. Το πάχος (TA) οδοστρωμάτων πλήρους βάθους είναι συνάρτηση του DTN και της αντοχής υπεδάφους που εκφράζεται σαν CBR, τιμή R ή αποτελέσματα δοκιμής φορτιζόμενης πλάκας.

Θεμελιώδεις αρχές της μεθόδου σχεδιασμού. Η μέθοδος σχεδιασμού θεωρείται επαρκής για περιοχές εκτεθειμένες σε κυκλικές συνθήκες παγετού-τήξης. Καμία, όμως, ανάλυση δεν έγινε για τις επιπτώσεις της επίδρασης παγετού εκτός από το ότι ο παγετός ήταν σημαντικός παράγοντας που επηρέασε την επίδοση των διατομών δοκιμής κατά την Οδική Δοκιμή AASHO. Η μέθοδος βασίζεται στο ότι το πάχος σχεδιασμού εκφρασμένο σαν ασφαλτικό οδόστρωμα πλήρους βάθους (TA) είναι συνάρτηση της κρίσιμης αντοχής του υπεδάφους, των αναμενόμενων εφαρμογών

* Όπως ορίζεται από το Ινστιτούτο Ασφάλτου, ένα οδόστρωμα, που έχει ασφαλτικά μίγματα για όλες τις στρώσεις πάνω από το υπέδαφος ή το βελτιωμένο υπέδαφος, λέγεται οδόστρωμα πλήρους βάθους και το πάχος του συμβολίζεται με T.

φορτίου 18 kip που απαιτούνται για τελική λειτουργικότητα ίση με 2,5 και της σχετικής αντοχής των διαφόρων στρώσεων του οδοστρώματος.

Κατά την ανάπτυξη της μεθόδου αυτής, τα εξαγόμενα δοκιμών AASHO αναλύθηκαν για να δώσουν την βασική σχέση μεταξύ T_A και W_{18} . Η σχέση αυτή που ίσχυε μόνο για το υπέδαφος της δοκιμής AASHO επεκτάθηκε και σε άλλες τιμές αντίδρασης υπεδάφους. Χρησιμοποιώντας τις έννοιες φθοράς της κυκλοφορίας (συντελεστές ισοδύναμου φορτίου τροχού), υπολογίστηκαν οι συντελεστές ισοδυναμίας με τη βοήθεια μαθηματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό των επιδράσεων της μικτής κυκλοφορίας. Οι εξισώσεις που προέκυψαν παρουσιάστηκαν με τη μορφή διαγραμμάτων σχεδιασμού και κατόπιν (8η έκδοση) με τη μορφή νομογραφημάτων.

Βασική σχέση πάχους. Η βασική σχέση πάχους ανάμεσα στο πάχος, το φορτίο και τις επαναλήψεις αναπτύχθηκε από μία μελέτη των αποτελεσμάτων των οδικών δοκιμών 3, 4, 5 και 6 της AASHO που περιλάμβαναν φορτία δοκιμών 12 έως 30 kip απλού άξονα και 24 έως 48 kip άξονα «εν σειρά». Η μορφή του μοντέλου που ταίριαξε καλύτερα με τα δεδομένα ήταν:

$$T = a_0 + a_1 \log W + a_2 L_1 + 3L_1 L_2, \quad (3.29)$$

όπου T = δείκτης πάχους

W = εφαρμογές μέχρι $p = 2,5$

L_1 = φορτίο απλού άξονα σε kips ή μισό φορτίο άξονα «εν σειρά» σε kips

L_2 = κωδικός αριθμός ίσος με 0 για απλούς άξονες και 1 για άξονες εν σειρά

a_0, a_1, a_2, a_3 = σταθερές

Ο δείκτης πάχους ορίζεται σαν μία μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται για να συνδυάζει τα μεταβλητά πάχη της επιφανειακής στρώσης, βάσης και υπόβασης σε μία παράμετρο. Έτσι η σχέση αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο της τιμής SN της AASHO. Η σχέση για το T , σαν ισοδύναμο πάχος κοκκώδους βάσης επιλέχθηκε:

$$TG = 1,0D_1 + D_2 + 0,75D_3, \quad (3.30)$$

όπου D_1, D_2, D_3 είναι το πάχος της επιφανειακής στρώσης, βάσης και υπόβασης αντίστοιχα. Μία εξέταση άλλης ανεξάρτητης ανάλυσης, που διεξήχθη στις οδούς δοκιμών των AASHO, WASHO και Alconbury Hill (Αγγλία), έδειξε ότι οι αναλογίες αντικατάστασης της ασφαλικής προς την κοκκώδη βάση μεταβαλλόταν από 1,8 μέχρι περίπου 6,7. Ο λόγος αυτός βρέθηκε να είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων όπως φορτίου, μεθόδου ορισμού της τελικής λειτουργικότητας, επίδοσης ή θεωρητικών

μεθόδων προσδιορισμού. Πάντως τυπικές τιμές βρέθηκαν να είναι σχεδόν 3 για κοκκώδη βάση και περίπου ένα τρίτο περισσότερο για κοκκώδη υπόβαση. Για λόγους σχεδιασμού μία αναλογία αντικατάστασης 2,0 επιλέχθηκε για κοκκώδη βάση και 2,7 για υπόβαση. Έτσι ο ισοδύναμος δείκτης πάχους του ολικού ασφαλτικού μπετόν είναι:

$$T_A = 1,0D_1 + 0,5D_2 + 0,375D_3 \quad (3.31)$$

Με τη βοήθεια στατιστικής ανάλυσης των εξαγομένων της AASHO και μία προσαρμογή της εξίσωσης, έτσι ώστε 97% των 217 σημείων των εξαγομένων να είναι στην συντηρητική πλευρά, προέκυψε η ακόλουθη εξίσωση σχεδιασμού:

$$T_A = - 10,10 + 2,75 \log W + 0,325 L \quad (3.32)$$

Στην εξίσωση 15.16, W είναι οι εφαρμογές του φορτίου L (σε kips για απλούς άξονες και 0,57 φορές για άξονες «εν σειρά») μέχρι $p_t=2,5$. Η εξίσωση 3.32 παριστάνει τη βασική εξίσωση σχεδιασμού για τις συνθήκες υπεδάφους κατά την Οδική Δοκιμή AASHO και εφαρμόζεται για φορτία απλού τροχού μεγαλύτερα από 10 kips και φορτία αξόνων «εν σειρά» μεγαλύτερα από 17,5 kips. Για φορτία μικρότερα από 10 kips σημειώθηκε ότι οι κλίσεις των σχέσεων T-logM ήταν συναρτήσεις του φορτίου σε αντίθεση με τις παράλληλες γραμμές που δίνει η εξίσωση 3.32. Ύστερα από πρόσθετη μελέτη προσδιορίστηκε ότι, για φορτία μικρότερα από 10 kips και με λιγότερες από 100.000 εφαρμογές ($\log W = 5,00$), ίσχυε η εξίσωση 15.16. Για $W \geq 100.000$ εφαρμογές και φορτία απλών αξόνων μεταξύ 2 και 10 kips αναπτύχθηκε η ακόλουθη εξίσωση σχεδιασμού.

$$T_A = 3,65 + 0,325L + \frac{\log W}{2} (10^{0,350+0,0487L}) \quad (3.33)$$

Ανάλυση μικτής κυκλοφορίας. Για τις επιδράσεις της μικτής κυκλοφορίας γίνεται χρήση των συντελεστών ισοδύναμης φθοράς που βασίζονται στην ίση επίδοση. Οι συντελεστές φθοράς αναπτύχθηκαν από το μαθηματικό μοντέλο που προέκυψε από την εύρεση του λόγου των εφαρμογών ενός φορτίου 18 kip (τυποποιημένου) προς τις εφαρμογές οποιουδήποτε άλλου φορτίου που απαιτείται μέχρι $p_t = 2,5$ για ένα ορισμένο πάχος. Για πάχη μεγαλύτερα από 10 kips οι τιμές του F_j ήταν σταθερές, ενώ για φορτία μικρότερα από 10 kips ήταν συναρτήσεις των εφαρμογών φορτίου.

Η έκφραση ισοδυναμίας που προέκυψε από την εξίσωση 3.32 είναι:

$$\frac{W_{18}}{W_L} = F_j = 10^{0,118(L-18)} \quad (3.34)$$

Στη σχέση 3.34, $L \geq 10$ kips και ίσο με το φορτίο απλού άξονα σε kips ή 0,57 φορές το φορτίο άξονα «εν σειρά» σε kips.

Ο σχηματισμός των ισοδυναμιών ειδικού φορτίου επιτρέπει μία λεπτομερή λύση, όταν υπάρχουν πληροφορίες της ειδικής μικτής κυκλοφορίας. Μία προσεγγιστική μέθοδος για την εύρεση των ισοδυνάμων επαναλήψεων με βάση μία ανάλυση μελετών φορτομέτρου υπηρεσιών οδοποιίας των πολιτειών, έχει περιγραφεί προηγουμένως.

Επίδραση της μεταβλητής αντίδρασης υπεδάφους. Έχει σημειωθεί ότι η εξίσωση σχεδιασμού, που αναπτύχθηκε από την Οδική Δοκιμή AASHO, ίσχυε μόνο για τις συνθήκες υπεδάφους της δοκιμαστικής οδού. Έτσι ήταν απαραίτητο, όπως και κατά την εργασία κατάρτισης της μεθόδου σχεδιασμού AASHO, να επεκταθεί η εξίσωση και για διάφορες τιμές αντίδρασης. Προηγούμενα εγχειρίδια σχεδιασμού είχαν δώσει πάχη σχεδιασμού με βάση το CBR, την τιμή R και δοκιμές φορτισμένης πλάκας.

Το ελάχιστο πάχος ασφαλτικού μπετόν είναι 6,5 ίντσες για υλικά βάσης υψηλής ποιότητας. Το SK για κοκκώδη βάση είναι 2,0. Γι' αυτό το απαιτούμενο πάχος θα ήταν $(10,5 \text{ in.} - 6,5 \text{ in.}) \times 2,0 = 8$ ίντσες κοκκώδους βάσης. Λόγω των απαιτήσεων ελάχιστου πάχους επιφανειακής στρώσης, αυτός ο σχεδιασμός είναι ο μόνος εναλλακτικός, όταν χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας υλικά κοκκώδους βάσης.

Το ελάχιστο πάχος επιφανειακής στρώσης ασφαλτικού μπετόν χρησιμοποιώντας βάση ασφαλτόπηκτης άμμου θερμής ανάμιξης είναι 4,0 ίντσες, αφήνοντας 6,5 ίντσες ισοδύναμου υλικού ασφαλτικού μπετόν, για να δεχθεί την κυκλοφορία οχημάτων. Μία στρώση ασφαλτόπηκτης άμμου θερμής ανάμιξης πάχους 4,0 ιντσών είναι ισοδύναμη με 3,0 ίντσες ασφαλτικού μπετόν ($4,0/1,3 = 3,08 \text{ in.}$). Γι' αυτό το πάχος της κοκκώδους υπόβασης πρέπει να παρέχει 3,5 ίντσες ισοδύναμου ασφαλτικού μπετόν. Για $S_R = 2,7$ για κοκκώδη υπόβαση, το απαιτούμενο πάχος θα ήταν 9,5 ίντσες ($2,7 \times 3,5 = 9,45 \text{ in.}$). Έτσι το απαιτούμενο πάχος σχεδιασμού για μία στρώση 6 ιντσών βάσης ασφαλτόπηκτης άμμου θερμής ανάμιξης θα ήταν 4 ίντσες επιφανειακής στρώσης ασφαλτικού μπετόν, 6 ίντσες βάσης ασφαλτόπηκτης άμμου θερμής ανάμιξης και 5 ίντσες κοκκώδους υπόβασης. Το ισοδύναμο TA του οδοστρώματος αυτού θα ήταν:

$$4,0 + \frac{6,0}{1,3} + \frac{5,0}{2,7} = 4,0 + 4,6 + 1,9 = 10,5 \text{ ίντσες} \quad (3.35)$$

3.7 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΘΡΑΥΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ιστορικό. Η μέθοδος του Εθνικού Συνδέσμου Θραυστών Υλικών (NCSA) βασίζεται στη μέθοδο σχεδιασμού οδοστρωμάτων του Σώματος των Μηχανικών των ΗΠΑ με βάση το CBR. Η βάση της μεθόδου αυτής είναι να παρέχει επαρκές πάχος και ποιότητα υλικού για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων διατμητικών παραμορφώσεων μέσα σε μία στρώση. Επιπλέον οι επιδράσεις του παγετού, όταν είναι πρόβλημα, περιορίζονται μέσα σε αποδεκτά όρια.

Αντίθετα με τη χρήση αναλογιών ισοδυναμίας ή αντικατάστασης στρώσεων (υλικού), η φιλοσοφία σχεδιασμού που εκτίθεται εδώ, συνοψίζεται στα ακόλουθα:

«... φαίνεται ότι η χρήση εμπειρικών συντελεστών και λόγων αντικατάστασης κατά το σχεδιασμό χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η θέση μέσα στο οδόστρωμα, ο μεταβαλλόμενος χαρακτήρας της φόρτισης, η ποιότητα των υλικών και της κατασκευής ή οι κλιματικές και άλλες περιβαλλοντικές επιδράσεις είναι λανθασμένη και επικίνδυνη. Υπάρχουν τόσες μεταβλητές, ώστε η εφαρμογή ειδικών συντελεστών ισοδυναμίας δεν μας παρέχει αξιόπιστη βάση για σχεδιασμό».

Βασικές αρχές της μεθόδου σχεδιασμού. Όπως και ο σχεδιασμός εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η μέθοδος CBR για οδούς εξετάζει την κυκλοφορία, την αντοχή υπεδάφους και υλικών, τις επιδράσεις παγετού και επαρκή συμπίκνωση για την πρόληψη μόνιμων παραμορφώσεων λόγω καθιζήσεων, που προξενεί η κυκλοφορία οχημάτων.

Κυκλοφορία. Η παράμετρος της κυκλοφορίας χαρακτηρίζεται από κατηγορίες κυκλοφορίας που ονομάζονται Δείκτες Σχεδιασμού (DI). Η τιμή (EAL) βασίζεται στις διακυμάνσεις τιμών των μέσων ισοδύναμων απλού άξονα 18kip ανά λωρίδα.

Όταν δεν υπάρχουν τέτοια στοιχεία, τότε γίνονται σποραδικές δειγματοληψίες στην κυκλοφορία και τα αυτοκίνητα κατατάσσονται σε μία από τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες: Ομάδα 1, που περιλαμβάνει επιβατικά αυτοκίνητα και φορτηγά, ομάδα 2, που περιλαμβάνει φορτηγά με δύο άξονες φορτωμένα ή μεγαλύτερα οχήματα άδεια ή ελαφρά φορτωμένα και, ομάδα 3 που περιλαμβάνει όλα τα αυτοκίνητα με περισσότερους από 3 φορτωμένους άξονες. Ο Πίνακας 3.12 δείχνει πώς προκύπτει η τιμή DI για οποιαδήποτε μέθοδο.

Πίνακας 3.12.: Κατηγορίες δείκτη σχεδιασμού για κυκλοφορία

Δείκτης Σχεδιασμού	Γενικός χαρακτήρας	Ημερήσιο EAL
DI-1	Ελαφρά κυκλοφορία (λίγα οχήματα βαρύτερα από τα επιβατικά, δεν γίνεται κανονική χρήση από οχήματα της ομάδας 2 ή 3)	5 ή λιγότερο
DI-2	Μέση-ελαφρά κυκλοφορία (παρόμοια με DI-1, μέγιστη κυκλοφορία 1000 οχήματα την ημέρα, μέγιστο ποσοστό 5% οχημάτων της ομάδας 2, δεν γίνεται κανονική χρήση από οχήματα της ομάδας 3)	6-20
DI-3	Μέση κυκλοφορία (μέγιστη 3000 οχήματα την ημέρα, μέγιστα ποσοστά 10% ομάδων 2 και 3, 1% ομάδας 3)	21-75
DI-4	Μέση-βαριά κυκλοφορία (μέγιστη κυκλοφορία 6000 οχήματα την ημέρα, μέγιστα ποσοστά 15% ομάδων 2 και 3, 1% ομάδας 3)	76-250
DI-5	Βαριά κυκλοφορία (μέγιστη 6000 οχήματα την ημέρα, πιθανά μέγιστα ποσοστά 25% ομάδων 2 και 3, 10% ομάδας 3)	251-900
DI-6	Πολύ βαριά κυκλοφορία (μεγαλύτερη από 6000 οχήματα την ημέρα, πιθανό μέγιστο ποσοστό 25% ομάδων 2 και 3).	901-3000

Σημειώσεις:

1. EAL = ισοδύναμο αξονικό φορτίο 18 kíp στην κορυφή σχεδιασμού, μέση ημερήσια χρήση κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής 20 ετών με κανονική συντήρηση.
2. Βλέπε κείμενο για περιγραφή των ομάδων οχημάτων 1, 2 και 3.

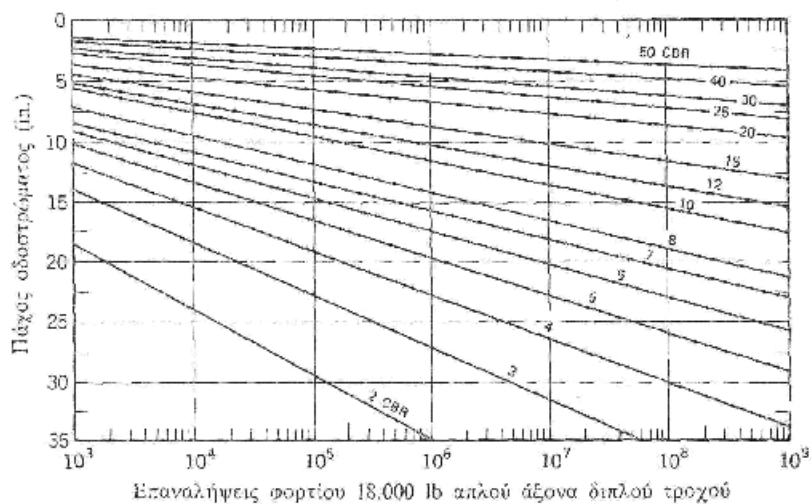
Αντοχή υπεδάφους. Η μέθοδος δοκιμής CBR έχει εκτεθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 8 του βιβλίου αυτού. Κατά το σχεδιασμό συνιστάται η χρήση της τιμής του 75% των εξαγομένων δοκιμών CBR σε μία αρκετά ομοιόμορφη περιοχή σχεδιασμού. Για πολύ μεταβλητές περιοχές σχεδιασμού χρειάζεται να εκλεγεί μεγαλύτερο ποσοστό (μικρότερος CBR σχεδιασμού).

Επιδράσεις παγετού. Αν υπάρχουν και οι τρεις προϋποθέσεις για επίδραση παγετού (πηγή νερού, αργή πτώση της θερμοκρασίας και ευαισθητα σε παγετό εδάφη), τότε ελέγχεται το βασικό πάχος σχεδιασμού, ώστε να επαρκεί κατά τις δυσμενείς συνθήκες του κύκλου παγετού-τήξης. Πλήρης ή περιορισμένη προστασία κατά παγετού δεν συνιστάται εκτός αν πρόκειται για εδάφη F-4. Σχεδιασμοί μειωμένης αντοχής, σαν συναρτήσεις της τιμής F και της κυκλοφορίας (DI) περιέχονται στον Πίνακα 3.13.

Από την άποψη παγετού το υπέδαφος είναι τύπου F-3. Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 3.13, είναι απαραίτητο πάχος 25 in. για την πρόληψη αποτυχίας σε διάτμηση κατά την εαρινή τήξη. Έτσι, το πάχος αυτό είναι η τιμή ελέγχου ή σχεδιασμού. Το τελικό οδόστρωμα αποτελείται από 3 ίντσες ασφαλτικού μετόν, 7 ίντσες κοκκώδους βάσης και 15 ίντσες κοκκώδους υπόβασης και παρέχει σχεδόν πλήρη προστασία κατά της διόγκωσης παγετού.

Οι προδιαγραφές συμπύκνωσης του υπεδάφους απαιτούν τουλάχιστον 100% T-180 για τις ανώτερες 8 ίντσες και τουλάχιστον 95% για τις επόμενες κατώτερες 6 ίντσες.

Σχήμα 3.32.: Καμπύλες σχεδιασμού CBR για 18.000 EAL. (Από το Σώμα των Μηχανικών).



3.8. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΣ

Η μέθοδος σχεδιασμού της Καλιφόρνιας βασίζεται στην τιμή R που είναι η τιμή του ευσταθειόμετρου το οποίο χρησιμοποιείται με τους σχετικές συντελεστές ισοδυναμίας, για τον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Στην πραγματικότητα, καταβάλλεται προσπάθεια για να εξασφαλιστεί σχεδιασμός κατά των διογκωτικών πιέσεων σε διαστελλόμενα εδάφη.

Η εξίσωση σχεδιασμού που βασίζεται σε εξαγόμενα παρατηρήσεων συμπεριφοράς οδοστρωμάτων είναι:

$$GE = 0,0032 (TI) (100 - R) \quad (3.36)$$

όπου GE = ισοδύναμο χαλικιού

TI = δείκτης κυκλοφορίας

R = τιμή ευσταθειόμετρου

Πίνακας 3.13.:

Ισοδύναμα χαλκίου μεθόδου Καλιφόρνιας των στρώσεων σε πόδια.

Μικρότερος από σφαιρικό πάχος τρώσης (ft)	ΔΕΦΑΛΤΙΚΟ ΜΠΙΕΤΟΝ										Σιμεντόπηκτη βάση				
	Δείκτης κυκλοφορίας (TI)										BTB και LTB	Κατηγορία		Βάση από αδρανή αδρανή	
	5,5 από 5	6,5 7,0	7,5 8,0	8,5 9,0	9,5 10,0	10,5 11,0	11,5 12,0	12,5 13,0	13,5 14,0	15,5 14,0		A	B		
	2,50	2,32	2,14	2,01	1,89	1,79	1,71	1,64	1,57	1,52	1,2	1,7	1,2	1,1	1,0
0,10	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,12	—	—	—	—
0,15	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,18	—	—	—	—
0,20	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,33	0,31	0,30	0,24	—	—	—	—
0,25	0,63	0,58	0,54	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38	0,30	—	—	—	—
0,30	0,75	0,70	0,64	0,60	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47	0,46	0,36	—	—	—	—
0,35	0,88	0,81	0,75	0,70	0,66	0,63	0,60	0,57	0,55	0,53	0,42	—	—	0,39	0,35
0,40	1,00	0,93	0,86	0,80	0,76	0,72	0,68	0,66	0,63	0,61	0,48	—	—	0,44	0,40
0,45	1,04	0,96	0,90	0,90	0,85	0,81	0,77	0,74	0,71	0,68	0,54	0,77	0,54	0,50	0,45
0,50	1,16	1,07	1,01	1,01	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76	0,60	0,85	0,60	0,55	0,50
0,55	1,18	1,11	1,04	1,04	0,98	0,94	0,94	0,90	0,86	0,84	0,66	0,94	0,66	0,61	0,55
0,60	1,21	1,13	1,07	1,07	1,03	1,03	0,98	0,94	0,94	0,91	0,72	1,02	0,72	0,66	0,60
0,65	1,31	1,23	1,16	1,16	1,11	1,07	1,07	1,02	1,02	0,99	0,78	1,11	0,78	0,72	0,65
0,70	1,32	1,32	1,25	1,25	1,20	1,15	1,10	1,10	1,06	1,06	0,84	1,19	0,84	0,77	0,70
0,75	1,34	1,28	1,23	1,23	1,18	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	0,90	1,28	0,90	0,83	0,75
0,80	1,37	1,31	1,26	1,26	1,22	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	0,95	1,36	0,96	0,88	0,80
0,85	1,45	1,39	1,33	1,33	1,29	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,02	1,45	1,02	0,94	0,85
0,90	1,54	1,48	1,41	1,41	1,37	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,08	1,53	1,08	0,99	0,90
0,95	1,56	1,49	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,14	1,62	1,14	1,05	0,95
1,00	1,57	1,52	1,46	1,46	1,42	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,20	1,70	1,20	1,10	1,00
1,05	1,60	1,55	1,50	1,50	1,46	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,26	1,79	1,26	1,16	1,05

Σημειώσεις:

BTB είναι ασφαλόπηκτη βάση

LTB είναι ασφαλόπηκτη βάση

Για το σχεδιασμό επιφανειακής στρώσης επιστάτης ανάμειξης, να γίνει χρήση των 0,8 τιμών των συντελεστών ισοδύναμου χαλκίου (G_f), που παρέχονται στον παραπάνω πίνακα για το ασφαλιτικό μπετόν.

3.9. ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ

Ρηγμάτωση μορφής αλλιγάτορα. Ένα από τα πρώτα σημάδια καταπόνησης του οδοστρώματος είναι η εμφάνιση ρωγμών μορφής αλλιγάτορα όπως στο Σχήμα 3.33. Αυτός ο τύπος ρηγμάτωσης ονομάζεται επίσης ρηγμάτωση μορφής χάρτη.



Σχήμα 3.33.: Ρωγμές με μορφή χάρτη ή αλλιγάτορα σε εύκαμπτο οδόστρωμα

Εύκαμπτα οδοστρώματα κατασκευασμένα πάνω σε ελαστικά υπεδάφη συχνά παρουσιάζουν ρηγμάτωση μορφής αλλιγάτορα. Βάσεις μικρής αντοχής ή με ανεπαρκή συμπύκνωση μπορεί να προκαλέσουν την ρηγμάτωση της επιφανειακής στρώσης που οφείλεται σε κόπωση.



Σχήμα 3.34.: Αποτυχία χαλικώδους βάσης. Σημειώνεται ρηγμάτωση μορφής χάρτη κοντά στις οπές, που σημαίνει μετατόπιση της βάσης ή του υπεδάφους.

Το Σχήμα 3.34 παριστάνει μία άσχημα ρηγματωμένη επιφάνεια εύκαμπτου οδοστρώματος στην οποία η καταπόνηση υπήρξε προοδευτική και έτσι σχηματίστηκαν οι οπές, που συχνά οφείλονται επίσης και σε ανεπάρκεια ασφαλικού μπετόν. Αυτός ο τύπος καταπόνησης, σε συνδυασμό με ρηγμάτωση μορφής χάρτη ή αλλιγάτορα όπως στο Σχήμα 3.34, φανερώνει οδόστρωμα με δομική ανεπάρκεια. Η μετατόπιση είναι αποτέλεσμα μαλακού υπεδάφους κατά την ανοιξιάτικη περίοδο τήξης. Η οδός στο Σχήμα 3.34 είχε εξαιρετική συμπεριφορά κατά το καλοκαίρι και το χειμώνα αλλά κατά την ανοιξιάτικη περίοδο τήξης παρουσίασε την βλάβη που φαίνεται.

Προσδιορισμός της δυνατότητας προοδευτικής αποτυχίας γίνεται μόνο με επαρκείς δοκιμές και αξιολόγηση των διαφόρων στρώσεων του οδοστρώματος.

Αυλακώσεις. Η επιφανειακή παραμόρφωση οφείλεται σε καθίζηση μιας ή περισσότερων στρώσεων του οδοστρώματος. Το Σχήμα 3.35 δείχνει αυλακώσεις που προξενήθηκαν από υπερβολικά μεγάλα αξονικά φορτία σε οδόστρωμα που είχε ανεπαρκές πάχος σχεδιασμού. Η καθίζηση στην περίπτωση αυτή έγινε στο υπέδαφος και σε μικρότερο βαθμό στην ίδια τη βάση.

Αποτυχίες σε διάτμηση. Οι αποτυχίες σε διάτμηση εμφανίζονται όταν λείπει η συνοχή και η εσωτερική τριβή ανάμεσα στο οδόστρωμα, και στη βάση. Ο τύπος καταπόνησης του Σχήμα 3.36 τονίζει την ανάγκη για σωστό σχεδιασμό του ερείσματος, για να μειωθούν οι ακραίες αποτυχίες των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.



Σχήμα 3.35.: Αυλάκωση σε μία οδό μεγάλης κυκλοφορίας. Σημειώνεται το νερό στις αυλακώσεις της αριστερής λωρίδας. Οι συνθήκες αυτές είναι επικίνδυνες, γιατί προκαλούν ολίσθηση.



Σχήμα 3.36.: Αποτυχία σε διάτμηση στο άκρο οδοστρώματος. Αυτό το εύκαμπτο οδόστρωμα είναι έξοδος φορτηγών και στάση φορτηγών σε ένα κύριο αυτοκινητόδρομο. Σημειώνεται η σοβαρή ρηγμάτωση μορφής χάρτη

Διαμήκειες ρωγμές. Η μετατόπιση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος μπορεί να συμβεί σε μία οριζόντια διεύθυνση από έλλειψη εσωτερικής τριβής στη βάση ή το υπέδαφος. Το Σχήμα 3.37 δείχνει μία σειρά οριζόντιων ρηγματώσεων που εμφανίστηκαν σε οδόστρωμα κατασκευασμένο σε λεπτή άμμο. Διαμήκειες ρωγμές, όπως αυτές, παρουσιάζουν πλάτος μέχρι και 1/4 in. επιτρέποντας έτσι τη διήθηση του νερού.

Η ρηγμάτωση αυτού του τύπου είναι ένδειξη επίδρασης παγετού ή μεταβολής όγκου στο υπέδαφος. Για την τελευταία περίπτωση είναι προφανής η κατακόρυφη μετατόπιση και έτσι είναι δυνατό να διακρίνουμε τους διάφορους τύπους και αιτίες καταπόνησης οδοστρωμάτων. Καθίζηση επίχωσης ή ολίσθηση των πρανών μπορεί να προκαλέσει τον τύπο αυτό ρωγμών.

Διόγκωση παγετού. Η επιφανειακή ένδειξη διόγκωσης παγετού εξαρτάται από τις συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και υπεδάφους. Σε μερικές περιπτώσεις οι διογκώσεις καλύπτουν σημαντικές διαμήκειες ή εγκάρσιες αποστάσεις, ενώ σε άλλες προκύπτουν τοπικές διογκώσεις όπως αυτές του Σχήματος 3.38. Ειδικά στην περίπτωση αυτή υπήρχε ένας τοπικός θύλακος ιλύος στο άκρο του οδοστρώματος που κατέληξε σε υπερβολική διόγκωση.



Σχήμα 3.37.: Διαμήκειες ρωγμές σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα.



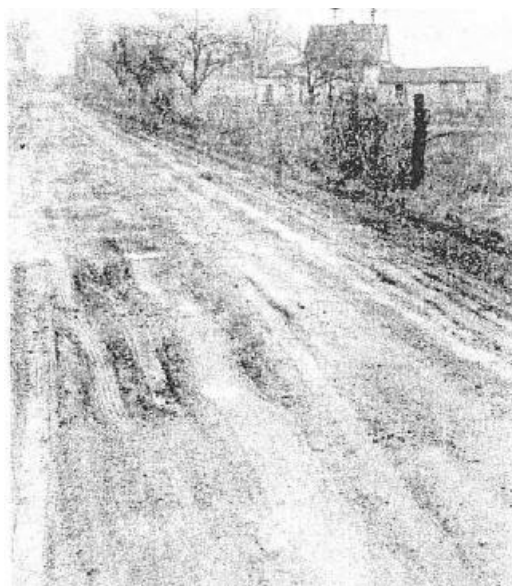
Σχήμα 3.38.: Μικρή διόγκωση παγετού σε εύκαμπτο οδόστρωμα.

Η διόγκωση παγετού και άλλες μετατοπίσεις από ογκομετρικές μεταβολές συχνά παρερμηνεύονται σαν διάτμηση ή και καθίζηση. Στην περίπτωση διάτμησης υπάρχει μία περιοχή βύθισης, καθώς και μία περιοχή διόγκωσης. Στην περίπτωση μεταβολής όγκου λόγω επίδρασης παγετού ή υγρασίας εμφανίζεται γενικά μία διόγκωση, ενώ το υπόλοιπο οδόστρωμα διατηρείται ομοιόμορφο. Η διόγκωση στο

Σχήμα 3.38 δεν είναι τυπική, αλλά δείχνει πως οι κατακόρυφες μετατοπίσεις συμβαίνουν χωρίς υπερβολικές πλευρικές μετατοπίσεις.



Σχήμα 3.39.: Αποτυχία εδάφους από ανοιξιάτικη τήξη.



Σχήμα 3.40.: Αποτυχία χαλικώδους επιφάνειας από ανοιξιάτικη τήξη. Σημειώνονται τα αδύνατα σημεία, που αναπτύχθηκαν στο υπέδαφος από συνεπακόλουθη ώθηση και στερεοποίηση.

Ανοιξιάτικη θραύση. Η κατάσταση της οδού του Σχήματος 3.39. είναι τυπική πολλών χιλιομέτρων οδού κατά την ανοιξιάτικη περίοδο τήξης. Για το τμήμα αυτό της οδού, η αποτυχία βρέθηκε να είναι κατά ένα μέρος στη βάση και ένα άλλο στο υπέδαφος. Στην άκρη του οδοστρώματος ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν υψηλός. Η φωτογραφία λήφθηκε αμέσως μετά την περίοδο τήξης. Το υπέδαφος και η βάση έχασαν την αντοχή τους κατά την περίοδο τήξης του παγετού και επέτρεψαν την υπερβολική

μετατόπιση του οδοστρώματος, που κατέληξε σε φθορά της επιφάνειας και δημιουργία ρηγμάτων.

Η βλάβη του Σχήματος 3.40. είναι μία ακραία περίπτωση απώλειας της στήριξης του υπεδάφους. Όπως φαίνεται έχει επέλθει εξώθηση, και αυλάκωση. Ειδικά για την οδό αυτή χρησιμοποιήθηκε χαλίκι με περιεκτικότητα 20% υλικού που διέρχεται το κόσκινο Νο. 200. Αναπτύχθηκαν μαλακά σημεία σε ολόκληρο το τμήμα της οδού στη βάση, καθώς και στο υπέδαφος που είχαν σαν συνέπεια σοβαρή μετατόπιση.

Εφίδρωση. Η εφίδρωση ασφαλτικών επιφανειών προκαλείται από πολλούς παράγοντες όπως υπερβολική ποσότητα ασφάλτου στο μίγμα, άσφαλτο υπερβολικά μαλακή για το κλίμα, στερεοποίηση της επιφάνειας και άλλες αιτίες. Η εφίδρωση πάντως έχει σχέση με την κυκλοφορία και εμφανίζεται στα ίχνη των τροχών. Μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση και αποτελεί κίνδυνο. Το Σχήμα 3.41. παριστάνει μία τέτοια περίπτωση. Σημειώνεται επίσης ότι η άκρη της οδού αυτής είναι απότομη. Όταν τα οδοστρώματα ανακατασκευάζονται χρειάζεται προσοχή, ώστε οι άκρες τους να μην είναι απότομες. Αυτή η οδός είναι επικίνδυνη λόγω της απότομης άκρης του οδοστρώματος και της εφίδρωσης.



Σχήμα 3.41.: Εφίδρωση μιας ασφαλτικής επιφάνειας (δεξιά λωρίδα). Η συνθήκη αυτή είναι επικίνδυνη και μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση.

Καθίζηση ή μετακίνηση θεμελίωσης. Η καθίζηση ή μετατόπιση των θεμελίων προκαλεί στρέβλωση του οδοστρώματος.

Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, κατασκευασμένο πάνω σε λασπώδες υπόστρωμα π.χ., δημιουργεί περιοχές καθίζησης, αλλά γενικά οι περιοχές θα έχουν σχετικά μεγάλο

μήκος και θα υπάρχουν και ελαφρές μάλλον διογκώσεις. Οι διατμητικές αποτυχίες σε επίχωμα θα προκαλέσουν επίσης ανάπτυξη ρωγμών σε σχήμα ημικυκλικό πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η μετακίνηση αυτού του τύπου επισημαίνεται πρώτα από τη δημιουργία ρωγμών στο άνω μέρος του πρανούς. Επομένως οι ρωγμές που σχηματίζονται με ημικυκλικό ή διαμήκη τρόπο πάνω σε οδόστρωμα πάνω σε επιχώματα πρέπει να διερευνώνται πάντα για τυχόν μετακίνηση των πρανών.

Οι μετατοπίσεις που οφείλονται σε μαλακές στρώσεις σε μεγάλο βάθος είναι ουσιαστικά ανεξάρτητες από το πάχος της βάσης ή του οδοστρώματος. Αναγνωρίζονται εύκολα, γιατί οι καθιζήσεις δεν είναι απότομες αλλά ήπιες. Η επιδιόρθωση τέτοιου είδους βλάβης είναι πέρα από τους σκοπούς του βιβλίου αυτού.

Ανακλαστική ρηγμάτωση. Αν επανεπιστρωθούν δύσκαμπτα οδοστρώματα με α-σφαλτικά υλικά, τότε θα εμφανιστούν γενικά ρωγμές στην επιφάνεια στην θέση αρμών και ρωγμών του μετόν. Το Σχήμα 3.42. παριστάνει ανακλαστικές ρωγμές σε διαπλάτυνση οδοστρώματος με ασφαλική επανεπίστρωση. Οι ανακλαστικές ρωγμές δεν είναι οι ίδιες καταστρεπτικές, εκτός από το ότι επιτρέπουν τη διήθηση επιφανειακού νερού όπως οι ρωγμές και οι αρμοί δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και γι' αυτό πρέπει να στεγανοποιούνται.



Σχήμα 3.42.: Ανακλαστική ρωγμή σε ασφαλική επανεπίστρωση και διαπλάτυνση οδοστρώματος. Αυτό το δύσκαμπτο οδόστρωμα δείχνει ύπαρξη ανάβλυσης.

Δυσμενείς συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα. Η καταπόνηση οδοστρωμάτων μπορεί να προκληθεί από δυσμενείς συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα που προκαλούν με τη σειρά τους μείωση της αντοχής του υπεδάφους. Αυτό απαιτεί απομάκρυνση του νερού κοντά στην πηγή του. Ανανέωση της επιφανειακής στρώσης σε μικρή κλίμακα δεν θα βοηθήσει την κατάσταση για μεγάλο διάστημα, εφόσον υπάρχουν οι δυσμενείς συνθήκες και η καταπόνηση του οδοστρώματος θα εμφανιστεί πάλι.

3.10. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό εκτέθηκαν διάφορες κύριες μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων οδών, που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ΗΠΑ. Αν και είναι προφανείς οι διαφορές στη φιλοσοφία αυτών των μεθόδων, όλες αναγνωρίζουν την ανάγκη θεώρησης του υπεδάφους, των χαρακτηριστικών των υλικών, των δράσεων του περιβάλλοντος, καθώς και της κυκλοφορίας που αναμένεται κατά την περίοδο σχεδιασμού.

Ένας κύριος παράγοντας στη φιλοσοφία σχεδιασμού του οδοστρώματος έχει εισαχθεί με την έννοια της λειτουργικότητας-επίδοσης. Αυτή η μέθοδος οδήγησε σε μία ποσοτική μέθοδο προσδιορισμού της «αποτυχίας» ενός οδοστρώματος. Η βάση της μεθόδου αυτής είναι το ότι προορισμός της οδού είναι να επιτρέπει την ασφαλή και ομαλή κυκλοφορία οχημάτων από ένα σημείο σε ένα άλλο. Μία υποκειμενική εκτίμηση, από μία ομάδα προσώπων, της ικανοποιητικής λειτουργίας της οδού θεωρείται σαν αποδεκτή μέθοδος ανάλυσης.

Η μέθοδος αυτή είναι σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους σχεδιασμού που βασίζονται σε κάποια μορφή δοκιμής αποτυχίας της οδού, Αυτός ο τύπος σχεδιασμού που αναγνωρίζει τους τύπους καταπόνησης, που παρουσιάζονται σε ένα ορισμένο οδόστρωμα πολλαπλών στρώσεων, έχει σημειώσει προόδους. Έχουν γίνει ανεξάρτητοι έλεγχοι σχεδιασμού για να εξασφαλιστεί η διατήρηση της σταθερότητας, κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού, για επαναλαμβανόμενη μόνιμη παραμόρφωση του οδοστρώματος καθώς και επαναλαμβανόμενη κόπωση των σταθεροποιημένων στρώσεων.

Αυτή η τελευταία καταπόνηση έχει γίνει εξαιρετικά σημαντική με την αποδοχή της χρήσης σταθεροποιημένων βάσεων και υποβάσεων σε συνδυασμό με ελαττώσεις του πάχους για την αύξηση της δυσκαμψίας του οδοστρώματος. Μεγάλη σημασία

πρέπει να δίνεται στα κριτήρια βέλους κάμψης, για να κριθεί η στατική επάρκεια του οδοστρώματος. Με βάση στοιχειώδεις θεωρήσεις της μηχανικής, είναι φανερό ότι δύο οδοστρώματα με ίσα βέλη κάμψης πιθανόν να μην έχουν ίσες καμπτικές τάσεις ή παραμορφώσεις λόγω των διαφορετικών μορφών λεκάνης λόγω βέλους κάμψης. Αν και οι περισσότεροι σχεδιασμοί είναι εμπειρικοί, πρόοδοι σε περισσότερο ορθολογιστικούς ή θεμελιώδεις σχεδιασμούς έχουν σημειωθεί και υπόσχονται πολλά για το μέλλον. Η υπερβολική μετακίνηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων, που τελικά δημιουργεί ανώμαλη επιφάνεια κυκλοφορίας οχημάτων, οφείλεται σε κακής ποιότητας υπέδαφος, υπόβαση, βάση ή επιφανειακή στρώση. Ένα ποιοτικό μέτρο της επίδρασης της μετακίνησης προσδιορίζεται μόνο ύστερα από προσεκτική διερεύνηση που μπορεί να γίνει με τη διάνοιξη χανδακιών και οπτική εξέταση της διατομής του οδοστρώματος. Ακόμη μπορούν να γίνουν μετρήσεις των διαφόρων στρώσεων μέσα και έξω από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Η δοκιμή στις διάφορες στρώσεις του οδοστρώματος βοηθάει στον εντοπισμό της πιθανής αιτίας της καταπόνησης.

Οι παράγοντες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους δεν είναι παρά μερικοί μόνον από αυτούς που υπάρχουν. Κάθε καταπόνηση πρέπει να αξιολογείται για να καθοριστεί αν είναι προοδευτική ή αδρανής. Οι ατέλειες που προκαλούνται από κατάκλυση ή εφίδρωση του ασφαλτικού μπετόν είναι προφανείς και δεν αναπτύχθηκαν, πρέπει όμως να τους δοθεί μεγάλη προσοχή ιδιαίτερα από την άποψη αντίστασης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Acum, W. E. A., and L. Fox, "Computation of Load Stresses in a Three-Layer Elastic System," *Geotechnique*, Vol. 2, pp. 295-300, 1951.
2. Ahlvin, R. G., "Development in Pavement Design in the USA-Flexible Pavements," *Proceedings, Aircraft Pavement Design Symposium*, Institute of Civil Engineers, London, England, 1971.
3. Ahlvin, R. G., "Development in Pavement Design in the USA—Flexible Pavements," *Proceedings, Aircraft Pavement Design Symposium*, Institute of Civil Engineers, London, England, 1971.
4. Ahlvin, R. G., and H. H. Ulery, "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space," *Highway Research Board Bulletin* 342, 1962.
5. Air Transport Division Committee, "A Comparison of Design Methods for Airfield Pavements," *Proceedings, ASCE Separate No. 163*, Vol. 78, December, 1952.
6. Air Transport Division Committee, "A Comparison of Design Methods for Airfield Pavements," *Proceedings, ASCE Separate No. 163*, Vol. 78, December, 1952.
7. American Association of State Highway Officials, "Interim Guide for Design of Pavement Structures," 1972.
8. American Association of State Highway Officials, "Interim Guide for Design of Pavement Structures," 1972.
9. American Concrete Institute Committee 325 (Subcommittee VII!), "Design of Concrete Overlays for Pavements," *ACI Journal*, Vol. 64, August 1967.
10. American Concrete Institute Committee 325 (Subcommittee VIII), "Design of Concrete Overlays for Pavements," *ACI Journal*, Vol. 64, August 1967.
11. Brown S.F. and Barksdale R.D., *Pavement design and materials*, *Proceedings of 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, Michigan, Vol.2, p.1 18, 1987.
12. BS 6906, *Methods of test for geotextiles, Part 3: Determination of water flow normal to the plane of geotextile under a constant head*, British Standards Institution, London.
13. Burgess, R. A., j. O. Izatt, and C. T. Metcalf, "Ten Years of Progress in the Dynamic Testing of Pavements," *Proceedings, CTAA, Quebec City, Canada*, November 1965.
14. Burgess, R. A., j. O. Izatt, and C. T. Metcalf, "Ten Years of Progress in the Dynamic Testing of Pavements," *Proceedings, CTAA, Quebec City, Canada*, November 1965.
15. California Division of Highways, Materials and Research Department, "Methods of Test to Determine Overlay and Maintenance Requirements

- by Pavement Deflection Measurements," Test Method No. Calif. 356-C, October 2, 1972.
16. California Division of Highways, Materials and Research Department, "Methods of Test to Determine Overlay and Maintenance Requirements by Pavement Deflection Measurements," Test Method No. Calif. 356-C, October 2, 1972.
 17. Canadian Good Roads Association, "A Guide to the Structural Design of Flexible and Rigid Pavements in Canada," 1965.
 18. Canadian Good Roads Association, "A Guide to the Structural Design of Flexible and Rigid Pavements in Canada," 1965.
 19. Comité Européen de Normalisation (1996), Tests for geometrical properties of aggregates, Part 2: Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures, BS EN 933-2: 1996, British Standards Institution, London.
 20. Corvi, Ivano E., and Bill G. Bullard, "A System for Estimating Present Surface Condition and Remaining Service Life of Existing Pavement Sections," Public Roads, Vol. 36, No. 5, 1972.
 21. Corvi, Ivano E., and Bill G. BulSard, "A System for Estimating Present Surface Condition and Remaining Service Life of Existing Pavement Sections," public Roads, Vol. 36, No. 5. 1972.
 22. Croney D. and Croney P., The Design and Performance of Road Pavements, Second Edition, Chapt.13, McGraw-Hill International, London, 1991.
 23. Finney A. Edwin, Better Concrete Pavement Serviceability, ed. Jointly By, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
 24. Galloway J.W., Harding H.M. and Raithby K.D., Effects of age on flexural fatigue and compressive strength of concrete, Transport and road research laboratory, Report LR 865, TRRL, Crowthorne, 1979.
 25. Highways Agency, The Manual of Contract Documents for Highway Works, Volume 2: Notes for guidance on the specification of highway works, Series NG1000: Road pavements - Concrete and Γ cement bound materials, TSO, London, March, 1998.
 26. International Slurry Seal Association (ISSA), TB No. 145, Test method of methylene blue adsorption value (MBV) of mineral aggregate fillers and fines, ISSA, Washington D.C., 1989
 27. S 882, Specification for aggregates from natural sources for concrete, British Standards Institution, London.
 28. Symons I.F., A preliminary investigation to determine the resistance of cement-stabilized materials to repeated loading, Transport and Road Research Laboratory, Report LR 61, TRRL, Crowthorne, 1967.