

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΩΝ

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΚΔΟΣΗ

ΝΙΚΗ ΜΠΕΣΚΟΥ
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΟΔΩΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
Ομότιμος Καθηγητής
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι παρούσες σημειώσεις αποτελούν την δεύτερη βελτιωμένη, εκσυγχρονισμένη και επαυξημένη έκδοση των σημειώσεων του υποχρεωτικού μαθήματος ‘Κατασκευή Οδών’ που διδάσκεται στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Βελτιώσεις και νέες, σύγχρονες προσθήκες υπάρχουν σε όλα τα κεφάλαια, δύο κεφάλαια (αυτά του σχεδιασμού εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων) γράφτηκαν από την αρχή ενώ προστέθηκαν και τρία νέα κεφάλαια σχετικά με την στατική ελαστική ανάλυση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων καθώς και με τις γεωκατασκευές στην οδοποιΐα. Επί πλέον, οι λυμένες ασκήσεις στο τέλος των σημειώσεων αυτών, αντικαταστάθηκαν κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από νέες ασκήσεις, που αναφέρονται στα νέα κεφάλαια και σε αυτά που ξαναγράφηκαν από την αρχή. Τέλος προστέθηκε εκτενής και σύγχρονη βιβλιογραφία ώστε να μπορεί κανείς εύκολα να ανατρέξει στις πηγές για περισσότερη εμβάθυνση και παραπέρα μελέτη θεμάτων που θίγονται εδώ πολύ περιληπτικά. Το σύνολο των σημειώσεων απέκτησε στην παρούσα έκδοση ομοιομορφία στη διάταξη και εκτύπωση της ύλης, η οποία έλλειπε στην αρχική έκδοση. Ελπίζουμε ότι η παρούσα έκδοση θα αποτελέσει ένα σημαντικό βοήθημα για την καλύτερη κατανόηση και εμπέδωση της ύλης του μαθήματος ‘Κατασκευή Οδών’.

Νίκη Μπέσκου
Δημήτριος Θεοδωρακόπουλος
Πάτρα, Ιούλιος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Μέθοδοι σχεδιασμού	4
1.3 Συστήματα μονάδων	4
2. ΕΛΕΓΧΟΙ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	6
2.1 Γενικά	6
2.2 Δοκιμή C.B.R.	6
2.3 Μέτρο αντίδρασης εδάφους	7
2.4 Συσχέτιση των μεγεθών των δοκιμών	9
3. ΦΟΡΤΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	12
3.1 Γενικά	12
3.2 Διάταξη τροχών και επιφάνεια επαφής	12
3.3 Αξονικά φορτία	15
3.4 Ανάλυση κυκλοφορίας για σχεδιασμό	23
4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	26
4.1 Εισαγωγή	26
4.2 Αναλυτικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης	26
4.3 Αριθμητικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης	35
5. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	40
5.1 Εισαγωγή	40
5.2 Μέθοδος σχεδιασμού AASHTO	40
5.3 Κριτήρια αστοχίας εύκαμπτων οδοστρωμάτων	47
6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	50
6.1 Εισαγωγή	50
6.2 Αναλυτικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης	50
6.3 Αριθμητικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης	52
7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	56
7.1 Εισαγωγή	56
7.2 Μέθοδος σχεδιασμού AASHTO	56
7.3 Κριτήρια αστοχίας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	63
8. ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	66
8.1 Γενικά	66
8.2 Δοκιμές ασφάλτου	66
8.3 Τύποι ασφάλτου και είδη ασφαλτικών	69
8.4 Ασφαλτικές επαλείψεις	72

8.5 Ασφαλτικά σκυροδέματα	77
9. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ	82
9.1 Γενικά	82
9.2 Έλεγχοι πυκνότητας	83
9.3 Έλεγχοι καθαρότητας	83
9.4 Έλεγχοι σκληρότητας και ανθεκτικότητας	85
9.5 Ποιοτικοί έλεγχοι	88
9.6 Αντιολισθηρές κατασκευές	89
10. ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	94
10.1 Γενικά	94
10.2 Ποσοστό ασφάλτου με μέθοδο επιφανειακών εμβαδών	94
10.3 Ποσοστό ασφάλτου με μέθοδο Marshall	95
11. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	100
11.1 Γενικά	100
11.2 Κατασκευή υπόβασης	100
11.3 Κατασκευή βάσης	103
11.4 Σταθεροποίηση φυσικού εδάφους	105
11.5 Κυκλοφοριόπηκτα και υδατόπηκτα οδοστρώματα	106
11.6 Κατασκευαστικά πλάκας σκυροδέματος	108
12. ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	112
12.1 Γενικά	112
12.2 Φθορές και συντήρηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων	113
12.3 Φθορές και συντήρηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων	124
13. ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΔΟΠΟΙΑΣ.....	132
13.1 Γενικά.....	132
13.2 Ορύγματα.....	132
13.3 Επιχώματα.....	133
13.4 Τοίχοι αντιστήριξης.....	134
13.5 Έργα αποστράγγισης οδών.....	138
14. ΛΥΜΕΝΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ	140
14.1 Ασκήσεις κεφαλαίου 2	140
14.2 Ασκήσεις κεφαλαίου 3	141
14.3 Ασκήσεις κεφαλαίου 4	146
14.4 Ασκήσεις κεφαλαίου 5	157
14.5 Ασκήσεις κεφαλαίου 6	159
14.6 Ασκήσεις κεφαλαίου 7	161
15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	166

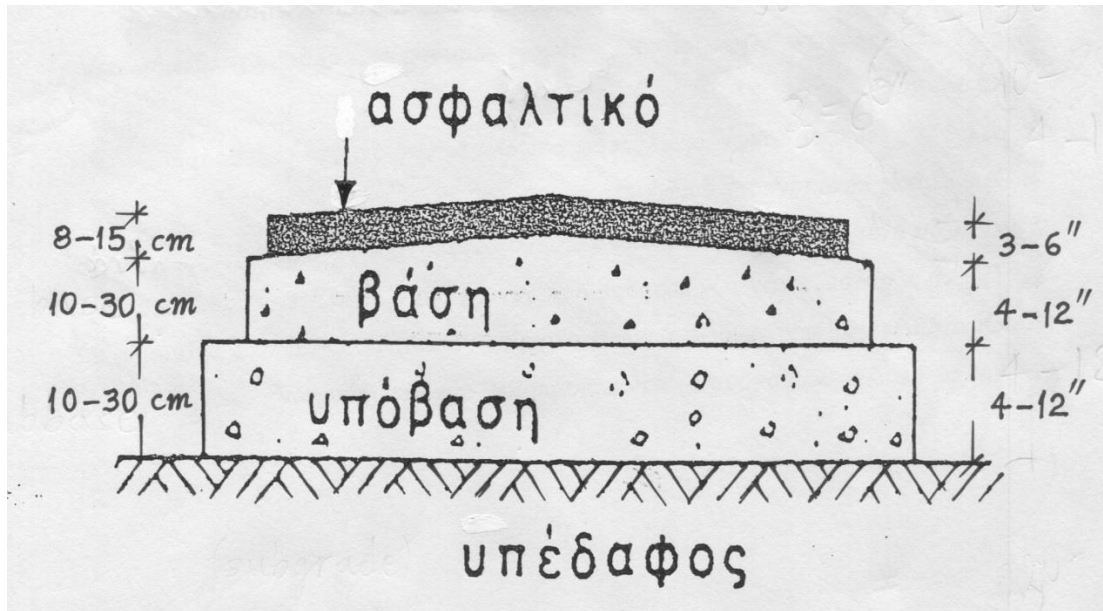
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

1.1 Γενικά

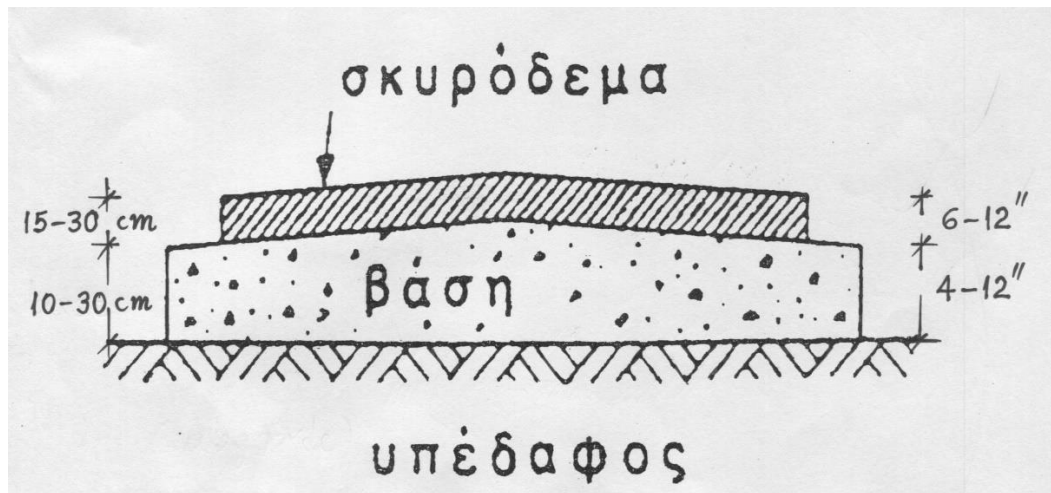
Το οδόστρωμα (pavement) είναι ένα σύνολο στρώσεων πάνω από το φυσικό έδαφος για να το ενισχύσει ώστε αυτό να φέρει με ασφάλεια τα επιβαλλόμενα φορτία οχημάτων και περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασιακά).

Ανάλογα με την ενδοτικότητα τους τα οδοστρώματα διακρίνονται σε εύκαμπτα (flexible) των οποίων η ανώτερη στρώση είναι από ασφαλτικό υλικό και σε δύσκαμπτα (rigid) των οποίων η ανώτερη στρώση είναι από άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα. Μεταξύ των δύο αυτών βασικών κατηγοριών υπάρχει και μία ενδιάμεση κατηγορία, αυτή των ημιεύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα σε τομή φαίνεται στο Σχ.1.1 και αποτελείται από πάνω προς τα κάτω από την ασφαλτική στρώση (asphalt concrete-AC ή hot mix asphalt-HMA), τη βάση (base), την υπόβαση (subbase) και το υπέδαφος (subgrade). Το ανωτέρω σχήμα δείχνει επίσης τυπικές διαστάσεις παχών των διαφόρων στρώσεων. Ένα τυπικό δύσκαμπτο οδόστρωμα σε τομή φαίνεται στο Σχ.1.2 και αποτελείται από πάνω προς τα κάτω από την πλάκα σκυροδέματος (concrete slab), τη βάση (base), η οποία μπορεί και να μην υπάρχει, και το υπέδαφος (subgrade). Το ανωτέρω σχήμα δείχνει επίσης τυπικές διαστάσεις παχών των διαφόρων στρώσεων. Από τις ανωτέρω δύο κατηγορίες οδοστρωμάτων, συντριπτικά μεγαλύτερη εφαρμογή στην πράξη (περίπου 94%) βρίσκουν τα εύκαμπτα οδοστρώματα.



Σχήμα 1.1. Χαρακτηριστική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος



Σχήμα 1.2. Χαρακτηριστική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος

Η ασφαλτική στρώση είναι ένα μίγμα ασφάλτου και αδρανών, η βάση και η υπόβαση αποτελούνται από ασύνδετα ή σταθεροποιημένα (με τσιμέντο) αδρανή, ενώ το άνω μέρος του υπεδάφους (μέχρι 60cm) είναι συμπυκνωμένο. Η πλάκα σκυροδέματος είναι μίγμα τσιμέντου και αδρανών (Portland cement concrete) με ή χωρίς χαλύβδινο οπλισμό. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ότι η ποιότητα των υλικών μειώνεται από τα άνω προς το υπέδαφος διότι οι μεταβιβαζόμενες από την επιφάνεια προς το υπέδαφος τάσεις (μέσω των στρώσεων) μειώνονται σταδιακά λόγω κατανομής του ίδιου φορτίου σε μεγαλύτερη επιφάνεια (εμβαδόν). Το συνολικό πάχος του οδοστρώματος καθορίζεται με βάση το κριτήριο, όταν οι τάσεις φθάσουν στο υπέδαφος να μπορούν να παραληφθούν από αυτό με ασφάλεια.

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα οι στρώσεις υπόβασης-βάσης κατασκευάζονται διότι:

1. Βοηθούν την κατανομή των φορτίων στο έδαφος δια μέσου των στρώσεων
2. Αυξάνουν τη φέρουσα ικανότητα
3. Συντελούν στην αποστράγγιση
4. Παρέχουν προστασία από τον παγετό
5. Αποτρέπουν την άνοδο του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων

Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα η στρώση της βάσης κατασκευάζεται διότι:

1. Διευκολύνει την κατασκευή (εξομάλυνση του εδάφους)
2. Αυξάνει την αντοχή του οδοστρώματος (δηλ. της πλάκας του σκυροδέματος)
3. Αποτρέπει καθιζήσεις του εδάφους
4. Παρέχει προστασία από τον παγετό
5. Αποτρέπει την άνοδο του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων

Στα ημιεύκαμπτα οδοστρώματα γίνεται κατεργασία του θραυστού αμμοχάλικου της υπόβασης-βάσης (σταθεροποίηση) με τσιμέντο, διότι:

1. Αυξάνει την αντοχή του οδοστρώματος
2. Μειώνει τις καθιζήσεις
3. Παρέχει προστασία από τον παγετό

4. Αποτρέπει την άνοδο του νερού λόγω τριχοειδών φαινομένων

Οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν το είδος και το πάχος του οδοστρώματος είναι:

1. Ο κυκλοφοριακός φόρτος (πυκνότητα και σύνθεση κυκλοφορίας)
2. Η ποιότητα του εδάφους έδρασης του οδοστρώματος
3. Οι κλιματολογικές συνθήκες (ύψος βροχοπτώσεων, παγετός, εναλλαγές παγετού-τήξης και υγρασίας-ξηρασίας, μεταβολές θερμοκρασίας)
4. Η ποιότητα και το κόστος των διαθέσιμων υλικών

Κατά τη σύγκριση των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα σε σχέση με τα ασφαλτικά μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πλεονεκτήματα:

1. Μεγάλη διάρκεια ζωής
2. Επιφάνεια ομαλή, κανονική μη ολισθηρή, με μεγάλο βαθμό συνάφειας
3. Καλύτερη ορατότητα τη νύκτα

Μειονεκτήματα:

1. Μεταβολές θερμοκρασίας και κακή ποιότητα εδάφους προκαλούν ρηγματώσεις
2. Ύπαρξη των αρμών και διακοπή κυκλοφορίας όταν επισκευάζονται
3. Θόρυβος κατά τη διέλευση των οχημάτων
4. Κόστος κατασκευής για τον εγκιβωτισμό τους

Για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων χρησιμοποιούνται γενικά τα ίδια υλικά και οι ίδιες μέθοδοι υπολογισμού. Θα πρέπει όμως να τονισθούν ορισμένες διαφορές που υπάρχουν στα δεδομένα των φορτίσεων αλλά και της κατασκευής όπως:

1. Βάρος τροχού αεροσκάφους πολύ μεγαλύτερο από του αυτοκινήτου
2. Διάταξη τροχών διαφορετική και πίεση ελαστικών πολύ μεγαλύτερη στα αεροσκάφη
3. Επαναλήψεις φορτίσεων μεγαλύτερες στις οδούς από ότι στα αεροδρόμια
4. Δυναμικές καταπονήσεις διαφορετικές
5. Δάπεδα στάθμευσης κρίσιμα από πλευράς καταπόνησης
6. Πλάτη οδοστρωμάτων των αεροδρομίων γενικά είναι μεγαλύτερα από αυτά των οδών
7. Οι ασφαλτικές επιστρώσεις των αεροδρομίων προσβάλλονται από τα καύσιμα και τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων των αεροσκαφών

Γενική πληροφόρηση επί των οδοστρωμάτων και των τρόπων σχεδιασμού και κατασκευής τους μπορεί να βρεθεί στα βιβλία των Yoder and Witzak (1975), Ullidtz (1998), Cebon (1999), Κοφίτσα (2001), Νικολαΐδη (2002), Huang (2004), Μουρατίδη (2007), Paragiannakis and Masad (2008) και Nikolaides (2015), καθώς και στα διάφορα εγχειρίδια-οδηγούς για σχεδιασμό οδοστρωμάτων, όπως αυτούς του AASHTO (1993) των Η.Π.Α., ή Τμημάτων Συγκοινωνιακών Έργων διαφόρων πολιτειών των Η.Π.Α. (Caltrans 2015, TXDOT 2011, WSDOT 2015, SCDOT 2008). Ειδική πληροφόρηση επί των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ξεχωριστά

μπορεί να βρεθεί στα βιβλία των Hunter (2000) και Delatte (2008), αντίστοιχα, καθώς και σε διάφορα εγχειρίδια Τμημάτων Συγκοινωνιακών Έργων διαφόρων πολιτειών των Η.Π.Α., όπως π.χ., FDOT (2015) και FDOT (2009) για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα, αντίστοιχα.

1.2 Μέθοδοι σχεδιασμού

Βασικά υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Οι εμπειρικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα πεδίου και σε παρατηρήσεις επί της συμπεριφοράς ήδη κατασκευασμένων οδοστρωμάτων, και οι μηχανιστικές-εμπειρικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται σε αρχές της μηχανικής για τον υπολογισμό της απόκρισης οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων και σε εμπειρικά κριτήρια αντοχής οδοστρωμάτων για την διαστασιολόγησή τους.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού της πράξης ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, είναι δηλαδή εμπειρικές μέθοδοι. Ήδη όμως, οι μέθοδοι της δεύτερης κατηγορίας κερδίζουν διαρκώς αναγνώριση και βελτιώνονται συνεχώς με την έρευνα που γίνεται και επικεντρώνεται σε αυτές. Στις σημειώσεις αυτές περιγράφονται και οι δύο κατηγορίες μεθόδων σχεδιασμού.

Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται εκτενώς οι μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων της AASHTO (1993), δηλαδή της American Association of Highway and Transportation Officials, οι οποίες είναι εμπειρικές μέθοδοι και βασίζονται κυρίως σε εκτεταμένα πειραματικά αποτελέσματα πεδίου (AASHO Road Test, 1962). Δίνεται όμως και αρκετή πληροφόρηση σχετικά με τις μηχανιστικές-εμπειρικές μεθόδους με έμφαση κυρίως στον υπολογισμό της απόκρισης οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων με αναλυτικές και κυρίως με αριθμητικές μεθόδους. Τα φορτία υποτίθενται ότι είναι ακίνητα και στατικά επιβαλλόμενα. Για την περίπτωση κινούμενων φορτίων, η οποία είναι και η πλέον ρεαλιστική, μπορεί κανείς να συμβουλευτεί το άρθρο επισκόπησης των Beskou and Theodorakopoulos (2011) για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα και τις διδακτορικές διατριβές των Darestani (2007) για δύσκαμπτα και Μπέσκου (2016) για εύκαμπτα οδοστρώματα.

1.3 Συστήματα μονάδων

Επειδή οι μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων στην πράξη είναι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α., οι χρησιμοποιούμενες σε αυτές μονάδες των διαφόρων σχετικών φυσικών μεγεθών είναι Αγγλοσαξωνικές. Γι' αυτό, για τη διευκόλυνση του Έλληνα μηχανικού, παρατίθενται παρακάτω οι σχέσεις μετατροπής μονάδων από το Αγγλοσαξωνικό στο μετρικό σύστημα όλων των φυσικών μεγεθών που σχετίζονται με τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Μονάδες μήκους

$$1\text{in} = 2.54\text{cm} = 0.0254\text{ m}$$

$$1\text{mil} = 10^{-3}\text{ in} = 2.54 \cdot 10^{-3}\text{ cm} = 0.0254\text{ mm}$$

$$1\text{ft} = 12\text{ in} = 30.5\text{ cm} = 0.305\text{ m}$$

$$1\text{mile} = 1609\text{ m}$$

Μονάδες βάρους

$$1\text{lb} = 4.448\text{ N}$$

$$1\text{kip} = 10^3\text{ lb} = 4448\text{ N}$$

$$1\text{tn} = 9806.650\text{ N}$$

Μονάδες σύνθετες

$$1\text{psi} = \text{lb}/\text{in}^2 = 6894.757\text{ N}/\text{m}^2 = 6894.757\text{ Pa}$$

$$1\text{ksi} = 10^3\text{ lb}/\text{in}^2 = 6894.757\text{ kN}/\text{m}^2$$

$$1\text{pcf} = \text{lb}/\text{ft}^3 = 157.087\text{ N}/\text{m}^3$$

$$1\text{pci} = \text{lb}/\text{in}^3 = 271447\text{ N}/\text{m}^3$$

Γενικές σχέσεις

$$1\text{k(kilo)} = 10^3, \quad 1\text{M(mega)} = 10^6, \quad 1\text{G(giga)} = 10^9, \quad 1\mu(\text{micro}) = 10^{-6}$$

2. ΕΛΕΓΧΟΙ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

2.1 Γενικά

Ο χαρακτηρισμός των μη συνεκτικών υλικών, δηλαδή του εδάφους έδρασης, της βάσης και της υπόβασης μπορεί να γίνει κατά ποικίλους τρόπους, κυρίως βάσει εμπειρικών δοκιμών. Μερικές από τις δοκιμές αυτές έχουν επικρατήσει διεθνώς και χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα. Μια τέτοια δοκιμή είναι αυτή που προσδιορίζει τη φέρουσα ικανότητα κατά τον Καλιφορνιακό δείκτη CBR (California Bearing Ratio). Η δοκιμή αυτή έχει πολλούς τύπους που εξαρτώνται κυρίως από το υλικό που δοκιμάζεται.

2.2 Δοκιμή C.B.R. (Εργαστηριακή)

Το δείγμα βυθίζεται στο νερό επί 4 μέρες ώστε να καταβραχεί πλήρως το υλικό. Τοποθετείται ακολούθως σε κύλινδρο τυποποιημένης διαμέτρου 6 in (15.2 cm) και πιέζεται με έμβολο διαμέτρου λίγο μικρότερης από 2 in (5.1 cm) που έχει στην άκρη του επιφάνεια 3 in² (19.4 cm²). Το ύψος του δοκιμίου είναι περίπου 4.5 in (11.4 cm).

Ακολούθως εξασκούνται πλευρικά πιέσεις ρυθμιζόμενες έτσι ώστε να αποφεύγεται η πλευρική διαφυγή του υλικού. Οι πιέσεις αυτές αντιπροσωπεύουν τις σταθερές δυνάμεις που εξασκούνται πάνω στη στρώση του υλικού από τις υπερκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος. Η διείσδυση του εμβόλου γίνεται με ρυθμό 0.05 in/min (1.27 mm/min) και μετριέται το μοναδιαίο φορτίο (τάση) για κάθε διείσδυση 0.1 in (2.54 mm) και μέχρι ολικής διείσδυσης 0.5 in (1.3 cm). Οι τιμές διείσδυσης που προέκυψαν από τη δοκιμή θραυστού υλικού άριστης ποιότητας και που λαμβάνονται ως βάση για τον υπολογισμό του CBR δίνονται από τον Πίνακα 2.1.

Διείσδυση	0.1 in (2.5 mm)	Για πίεση 1000 psi	(6.895 MPa)
Διείσδυση	0.2 in (5.1 mm)	Για πίεση 1500 psi	(10.342 MPa)
Διείσδυση	0.3 in (7.6 mm)	Για πίεση 1900 psi	(13.100 MPa)
Διείσδυση	0.4 in (10.2 mm)	Για πίεση 2300 psi	(15.858 MPa)
Διείσδυση	0.5 in (12.7 mm)	Για πίεση 2600 psi	(17.927 MPa)

Πίνακας 2.1. Τιμές διείσδυσης για θραυστό υλικό άριστης ποιότητας.

Η τιμή CBR είναι ο λόγος της πραγματικής τάσης δια της αντίστοιχης τάσης του άριστου υλικού που αναφέρθηκε παραπάνω, εκφραζόμενος σε εκατοστιαίο ποσοστό. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το CBR, τόσο καλύτερο είναι το υλικό, με τιμή CBR=100 να αντιστοιχεί στο άριστης ποιότητας θραυστό υλικό που αναφέρθηκε. Η τάση που λαμβάνεται συνήθως υπόψη είναι αυτή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 0.1 in (2.5 mm). Γενικά, η τιμή CBR μειώνεται αυξανόμενης της διείσδυσης. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, η τιμή CBR για 0.2 in (5.1 mm) διείσδυση, πιθανόν να είναι μεγαλύτερη της τιμής για 0.1 in (2.5 mm) διείσδυση, οπότε και χρησιμοποιείται η τιμή για 0.2 in διείσδυση. Επειδή η δοκιμή CBR είναι εμπειρική, έχει πολλές προϋποθέσεις ισχύος

και για αυτό πρέπει να ακολουθείται η τυποποιημένη διαδικασία εφαρμογής της για να επιτυγχάνονται συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Οι συνηθισμένες τιμές CBR που παρουσιάζει κατά κανόνα το έδαφος έδρασης κυμαίνονται μεταξύ 3 και 10, αλλά πολλές φορές ο δείκτης CBR είναι μικρότερος του 3 και μεγαλύτερος του 10. Μια αντιστοιχία της ποιότητας του εδάφους έδρασης και του δείκτη CBR δίνεται ως ακολούθως:

Πολύ καλό έδαφος CBR > 10

Καλό έδαφος CBR = 6-10

Πτωχό έδαφος CBR = 3-6

Πολύ πτωχό έδαφος CBR < 3

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της υπόβασης και της βάσης, παρουσιάζουν συνήθως τις ακόλουθες τιμές:

Υλικό υπόβασης CBR = 8-50

Υλικό βάσης CBR = 8-80

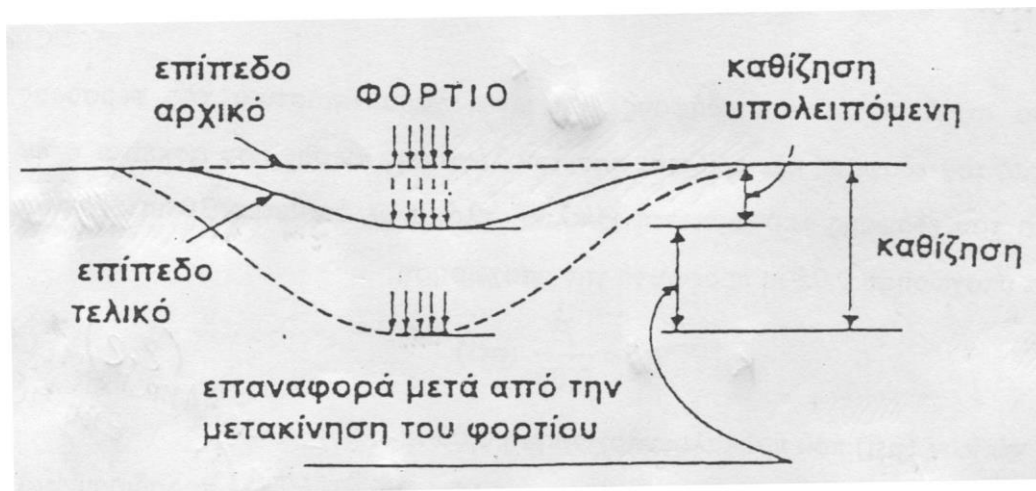
Γνωρίζοντας το CBR λεπτόκοκκου εδάφους, μπορεί κανείς να προσδιορίσει το μέτρο ελαστικότητας E του εδάφους αυτού σε psi από την εμπειρική σχέση του Asphalt Institute των Η.Π.Α.

$$E = 1500 \text{ CBR} \quad (2.1)$$

2.3 Μέτρο αντίδρασης εδάφους (Εργοταξιακή Δοκιμή)

Η δοκιμή φορτιζόμενης πλάκας επι του εδάφους χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της αντοχής κάθε στρώσης σε ένα οδόστρωμα και μπορεί να εφαρμοστεί στο υπέδαφος, στην υπόβαση ή στη βάση και στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η δοκιμή αυτή είναι εργοταξιακή δοκιμή και μετράει την φέρουσα ικανότητα του εδάφους με εφαρμογή, πάνω σε αυτό, πίεσης μέσω άκαμπτης φέρουσας επιφάνειας και στην συνέχεια μέτρηση της υποχώρησης.

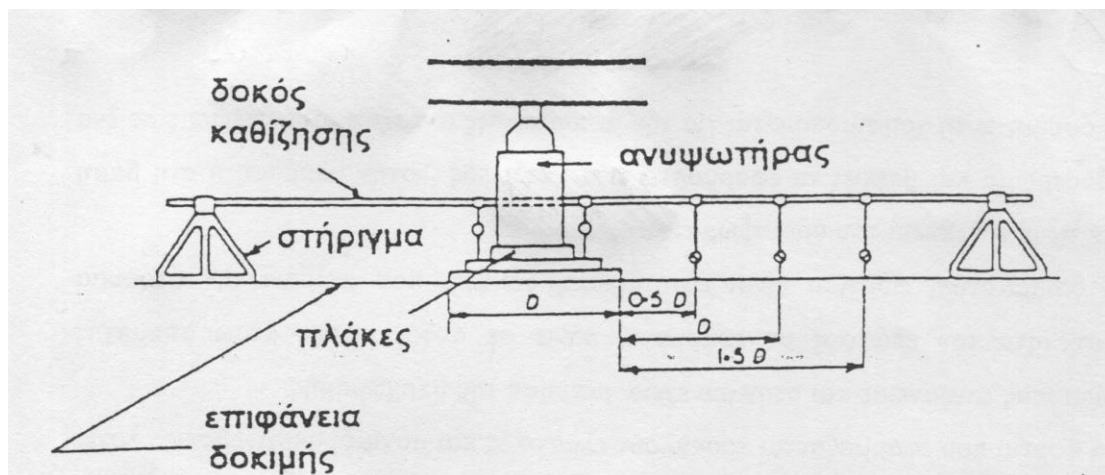
Τα φορτία που εφαρμόζονται προκαλούν ελαστικές και μόνιμες υποχωρήσεις, λόγω του συμπιεστού του εδάφους, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχ.2.1.



Σχήμα 2.1. Καθιζήσεις φορτιζόμενου εδάφους

Η δοκιμαστική φόρτιση διαφέρει από την δοκιμή CBR γιατί η δοκιμή CBR γίνεται στο εργαστήριο ή στο εργοτάξιο σε μικρή επιφάνεια. Επι πλέον, η δοκιμαστική φόρτιση μετράει κυρίως ελαστική και μόνιμη παραμόρφωση, ενώ η δοκιμή CBR μετράει την αντίσταση του εδάφους στην παραμόρφωση, λόγω διάτμησης.

Η πλάκα φόρτισης ενισχύεται με άλλες πλάκες με μικρότερες διαμέτρους και η φόρτιση επιτυγχάνεται με το φορτίο που μεταδίδεται στην πλάκα μέσω ανυψωτήρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχ.2.2.



Σχήμα 2.2. Διάταξη δοκιμής φορτιζόμενης πλάκας

Το μέτρο αντίδρασης του εδάφους k εκφράζεται σε $\text{pci}=\text{lb}/\text{in}^3$ και είναι χαρακτηριστικό της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Το μέτρο αυτό ορίζεται από

τον λόγο της πίεσης που ασκείται στην επιφάνεια του εδάφους από άκαμπτη κυκλική πλάκα με διάμετρο 30 in (76.2 cm) που προκαλεί υποχώρηση 0.05 in (0.127 cm) προς αυτή την υποχώρηση, δηλαδή

$$k = p/0.05 \quad (2.2)$$

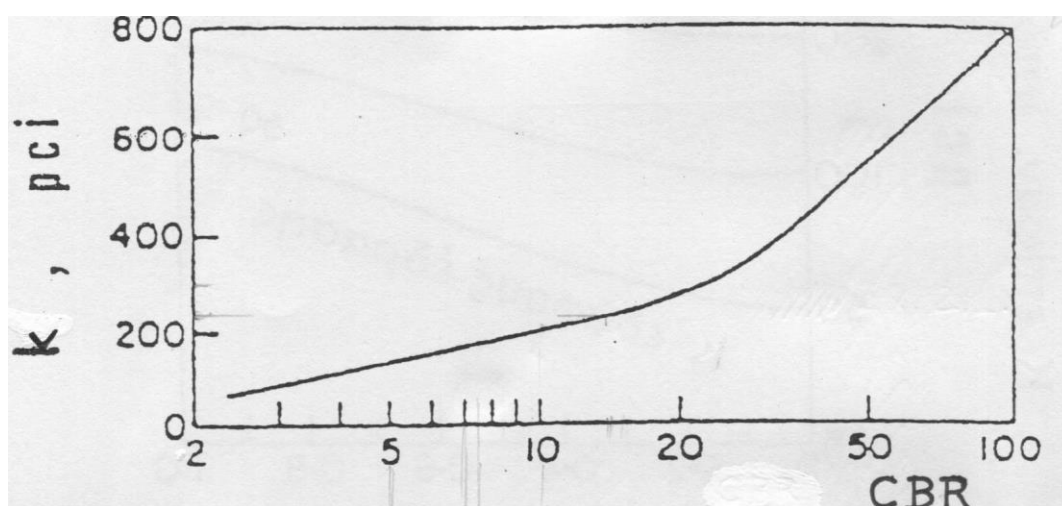
όπου p είναι η πίεση σε psi που προκαλεί υποχώρηση του εδάφους κατά 0.05 in. Κατά την αναθεωρημένη μέθοδο του Σώματος Μηχανικών των Η.Π.Α. (American Corps of Engineers), προσδιορίζεται μόνο η υποχώρηση που αντιστοιχεί σε πίεση 10 psi και έτσι

$$k = 10/\Delta \quad (2.3)$$

όπου Δ είναι η υποχώρηση σε in.

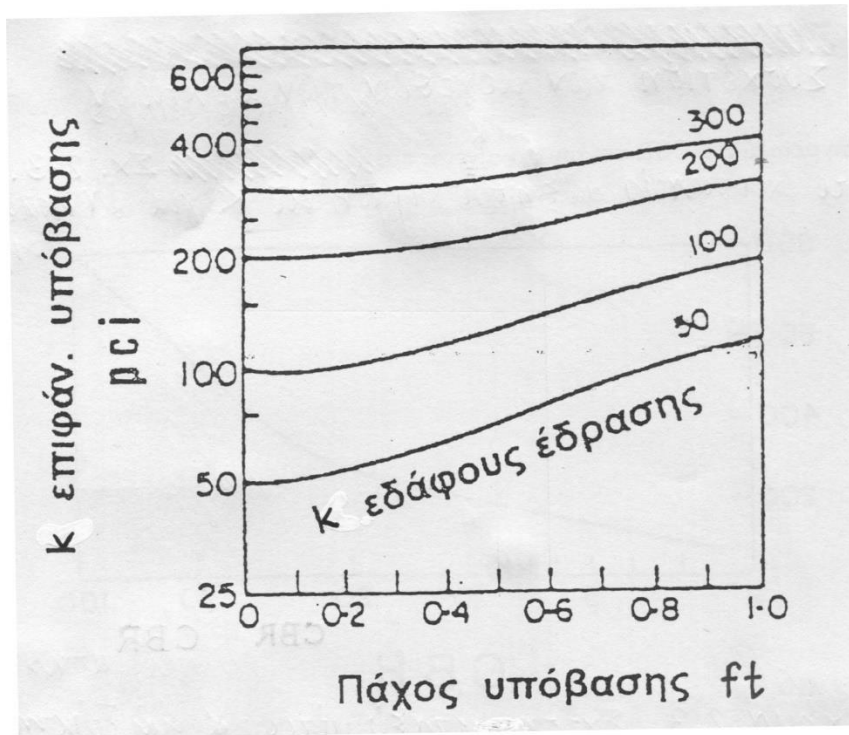
2.4 Συσχέτιση των μεγεθών των δοκιμών

Η σχέση μεταξύ του CBR και του k φαίνεται στο Σχ.2.3. Είναι φανερό ότι έχει κανείς αύξηση τιμών του k για αντίστοιχη αύξηση τιμών του CBR.

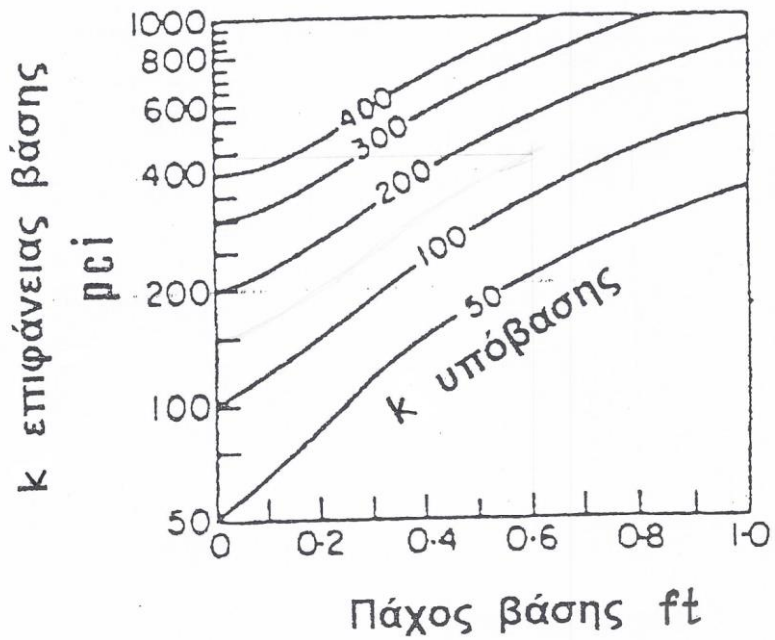


Σχήμα 2.3. Σχέση μεταξύ μέτρου αντίδρασης k και δείκτη CBR.

Αν είναι γνωστή η τιμή k του υπεδάφους και χρησιμοποιείται υπόβαση ή βάση σταθεροποιημένη με τσιμέντο, η τιμή του k στην κορυφή αυτών των στρώσεων μπορεί να υπολογιστεί από τα παρακάτω Σχ.2.4 και 2.5.



Σχήμα 2.4. Επίδραση διαφόρων παχών κοκκωδών υποβάσεων στις τιμές κ.



Σχήμα 2.5. Επίδραση διαφόρων παχών βάσεων σταθεροποιημένων με τσιμέντο στις τιμές κ.

Τα ανωτέρω Σχ.2.3-2.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του σύνθετου μέτρου αντίδρασης k υπεδάφους-υπόβασης, το οποίο χρειάζεται για τον σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

3. ΦΟΡΤΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

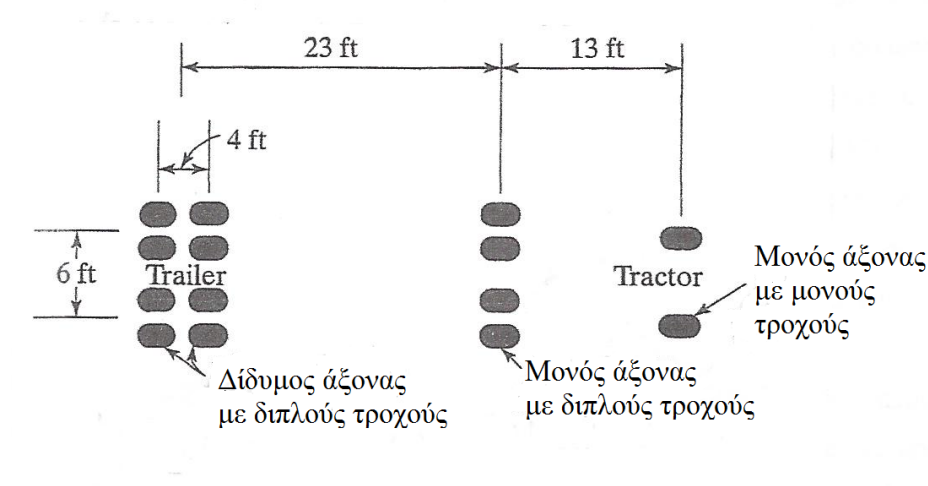
3.1. Γενικά

Κατά την κατασκευή ενός οδοστρώματος, η αποτίμηση του κυκλοφοριακού φόρτου αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους της κατασκευής αυτής, αφού για τον καθορισμό του πάχους του οδοστρώματος πρέπει κανείς να γνωρίζει τον αριθμό και το βάρος του κάθε οχήματος.

Τα οχήματα που κυκλοφορούν σε μία οδό είναι μίγμα από επιβατικά, λεωφορεία, φορτηγά, νταλίκες κλπ. με διαφορετικό αριθμό αξόνων και διαφορετικό φορτίο το καθένα από αυτά. Ανάλογα με το φορτίο κάθε οχήματος και την κατανομή του σε άξονες, προκύπτει και η καταστροφική του ικανότητα έναντι του οδοστρώματος. Επειδή η καταστροφική ικανότητα των επιβατικών οχημάτων είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή των εμπορικών, τα φορτία που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων συνήθως αναφέρονται σε εμπορικά οχήματα. Τα μέγιστα επιτρεπτά αξονικά βάρη διαφόρων τύπων οχημάτων, όπως αυτά έχουν θεσπιστεί σε διάφορες χώρες δίνονται στον Πίνακα 3.1, που έχει ληφθεί από το βιβλίο του Νικολαΐδη (2002). Το μέγιστο μικτό βάρος διαφόρων εμπορικών οχημάτων, όπως και η κατανομή του στους άξονες των οχημάτων αυτών δίνεται σε τόνους ($1\text{tn}=9806.65\text{ N}=2204.622\text{ lbs}$) στον Πίνακα 3.2, που επίσης έχει ληφθεί από το βιβλίο του Νικολαΐδη (2002). Η μέτρηση γίνεται με ζύγιση αυτού σε κατάλληλες ζυγαριές.

3.2 Διάταξη τροχών και επιφάνεια επαφής

Ένα εμπορικό όχημα (ρυμουλκό με ρυμουλκούμενο-tractor with trailer) μπορεί να έχει μονούς άξονες με μονούς ή διπλούς τροχούς (single axle with single or dual tires) και δίδυμους άξονες με διπλούς τροχούς (tandem axle with dual tires) όπως φαίνεται στο Σχ.3.1, που έχει ληφθεί από το βιβλίο του Huang (2004). Στο σχήμα αυτό φαίνονται και οι διάφορες αποστάσεις μεταξύ τροχών και αξόνων.





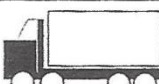
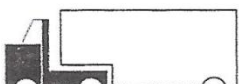
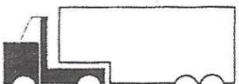
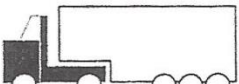

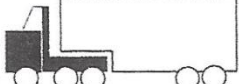
Σχήμα 3.1. Ίχνη τροχών τυπικού Αμερικανικού φορτηγού οχήματος τριών αξόνων (από Huang, 2004).

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

^(α) Εξαρτάται από τον άξονα

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

Πίνακας 3.1. Μέγιστα επιτρεπτά αξονικά φορτία οχημάτων σε διάφορες χώρες (από Νικολαΐδη 2002).

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

^(α) Ενδεικτικό μέγιστο μικτό βάρος, εξαρτάται από τους κανονισμούς της κάθε χώρας

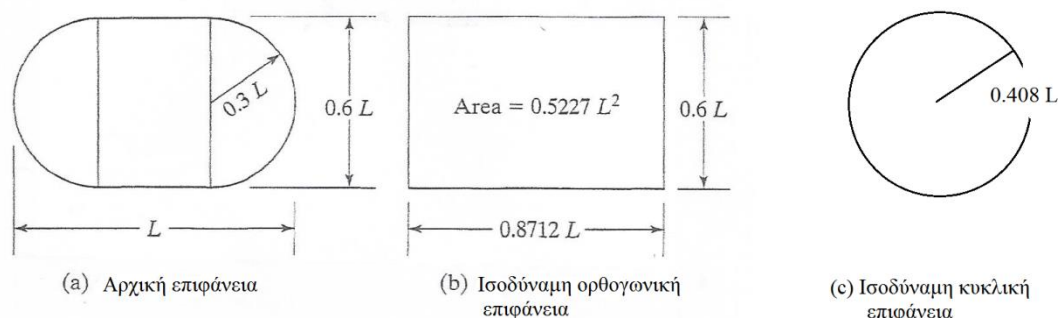
^(β) Εντός παρενθέσεως δηλώνεται ο τύπος του οχήματος συναρτήσει του αριθμού των αξόνων που έχει. Το γράμμα "S" δηλώνει την ύπαρξη ημιρυμουλκούμενου (semitrailer)

^(γ) Το συνολικό βάρος και η κατανομή αυτού εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αξόνων και από το εάν ο άξονας ή το σύστημα των αξόνων έχει κινητήριο δύναμη

Πίνακας 3.2. Τυπικές κατηγορίες εμπορικών οχημάτων και κατανομή φορτίου στους άξονές τους (από Νικολαΐδη, 2002).

Στη μηχανιστική μέθοδο σχεδιασμού, είναι απαραίτητη η γνώση της επιφάνειας επαφής μεταξύ του ελαστικού τροχού και του οδοστρώματος, έτσι ώστε το αξονικό

φορτίο να μπορεί να ληφθεί ως ομοιόμορφα διανεμημένο επί της επιφάνειας επαφής. Το μέγεθος της επιφάνειας επαφής εξαρτάται από την πίεση επαφής, η οποία για τον σχεδιασμό υποτίθεται ίση με την εσωτερική πίεση του ελαστικού τροχού. Επειδή στην πραγματικότητα η πίεση επαφής είναι μικρότερη από την εσωτερική πίεση του ελαστικού τροχού, ο σχεδιασμός είναι από την πλευρά της ασφάλειας. Το Σχ.3.2 δείχνει το προσεγγιστικό σχήμα της επιφάνειας επαφής ενός τροχού με το οδόστρωμα, το οποίο αποτελείται από ένα ορθογώνιο και δύο ημικύκλια.



Σχήμα 3.2. Διαστάσεις επιφάνειας επαφής ενός τροχού με επιφάνεια οδοστρώματος και ισοδύναμες ορθογωνικές και κυκλικές προς αυτήν επιφάνειες (από Huang, 2004).

Υποθέτοντας μήκος L και πλάτος $0.6L$, η επιφάνεια επαφής $A_c = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2$, οπότε

$$L = (A_c / 0.5227)^{0.5} \quad (3.1)$$

όπου η A_c υπολογίζεται διαιρώντας το φορτίο σε κάθε τροχό με την εσωτερική πίεση του τροχού.

Σε τρισδιάστατες αναλύσεις με τη ΜΠΣ, οι άνω επιφανειακές πλευρές των συνήθως χρησιμοποιούμενων πεπερασμένων στοιχείων σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου είναι ορθογωνικές και επομένως συμφέρει η επιφάνεια επαφής ενός τροχού με το οδόστρωμα να είναι ορθογωνική. Επίσης, σε τρισδιάστατες στατικές αναλύσεις με τη μέθοδο του συστήματος στρώσεων, η επιφάνεια επαφής τροχού με οδόστρωμα είναι κυκλική. Γι'αυτούς τους λόγους, η επιφάνεια επαφής ορθογωνίου-δύο ημικυκλίων μετατρέπεται σε ισοδύναμη ορθογωνική ή ισοδύναμη κυκλική, όπως φαίνεται στο Σχ.3.2.

3.3 Αξονικά φορτία

Για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων γίνεται χρήση αξονικού φορτίου και όχι συνολικού φορτίου του οχήματος, αφού οι αποστάσεις μεταξύ των αξόνων του οχήματος είναι αρκετά μεγάλες ώστε οι τάσεις και παραμορφώσεις που δημιουργούνται στο οδόστρωμα από τα φορτία των αξόνων αυτών μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα. Το αξονικό φορτίο αναφέρεται σε μονούς, δίδυμους ή τρίδυμους άξονες (βλέπε Σχ.3.1 με μονούς και δίδυμους άξονες). Ως βάση των υπολογισμών έχει ορισθεί το τυπικό φορτίο 18 kip (80 kN) μονού άξονα. Εάν ένα αξονικό φορτίο δεν είναι 18 kip (80 kN) ή αποτελείται από δίδυμους ή τρίδυμους

άξονες μετατρέπεται σε ένα ισοδύναμο μονο-αξονικό 18 kip (80 kN) με πολλαπλασιασμό του με ένα ισοδύναμο συντελεστή αξονικού φορτίου (EALF=equivalent axle load factor). Αυτή η ισοδυναμία μεταξύ δύο διαφορετικών φορτίων βασίζεται στη δημιουργούμενη βλάβη στο οδόστρωμα και επομένως εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο κριτήριο αστοχίας. Ισοδύναμοι συντελεστές που βασίζονται στο κριτήριο αστοχίας σε κόπωση είναι διαφορετικοί από εκείνους που βασίζονται στο κριτήριο αστοχίας σε αυλάκωση λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων. Επομένως, η χρήση ενός ισοδύναμου συντελεστή για την ανάλυση διαφόρων τύπων καταπόνησης είναι εμπειρική και θα πρέπει να θεωρείται μόνο ως προσεγγιστική (Huang 2004). Επειδή η εύρεση του πάχους (ή παχών) των οδοστρωμάτων διέπεται από τον αριθμό των επαναλήψεων (διελεύσεων) του φορτίου μέσα σε ένα χρονικό διάστημα (ημέρα ή έτη), ο αριθμός αυτός για κάθε μονο-αξονικό ή πολυ-αξονικό φορτίο πρέπει να πολλαπλασιάζεται με το EALF του φορτίου αυτού για να βρεθεί το ισοδύναμο αποτέλεσμα με βάση το μονο-αξονικό φορτίο των 18 kip (80 kN). Το άθροισμα των ισοδύναμων επιρροών όλων των ισοδύναμων αξονικών φορτίων κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ή ζωής του οδοστρώματος δίνει το ισοδύναμο μονοαξονικό φορτίο (ESAL=equivalent single-axle load), το οποίο και αποτελεί την μοναδική κυκλοφοριακή παράμετρο σχεδιασμού (Huang 2004).

Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής EALF καθορίζει την βλάβη στο οδόστρωμα ανά διέλευση ενός άξονα σχετικά με την βλάβη ανά διέλευση του τυπικού μονο-αξονικού φορτίου των 18 kip (80 kN). Ο σχεδιασμός βασίζεται στον συνολικό αριθμό διελεύσεων του τυπικού μονο-αξονικού φορτίου κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού, δηλαδή στον ESAL που υπολογίζεται από τη σχέση

$$ESAL = \sum_{i=1}^m F_i n_i \quad (3.2)$$

όπου m είναι ο αριθμός των ομάδων αξονικών φορτίων, F_i είναι ο EALF για την ομάδα i αξονικών φορτίων και n_i είναι ο αριθμός διελεύσεων της ομάδας i αξονικών φορτίων κατά την διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού (Huang 2004).

Ο συντελεστής EALF εξαρτάται από το είδος του οδοστρώματος (εύκαμπτο ή δύσκαμπτο), το πάχος D της πλάκας οδοστρώματος (για δύσκαμπτο) ή τον δομικό αριθμό SN (για εύκαμπτο) και τις τελικές συνθήκες υπό τις οποίες το οδόστρωμα θεωρείται ότι αστόχησε (τελική λειτουργικότητα p_t). Περισσότερα περί δομικού αριθμού και λειτουργικότητας μπορεί να βρεθούν στο υποκεφάλαιο 5.2. Σύμφωνα με τον AASHTO (1993) ο EALF ορίζεται ως

$$EALF = W_{t18} / W_{tx} \quad (3.3)$$

όπου W_{tx} είναι ο αριθμός διελεύσεων στο τέλος του χρόνου t του αξονικού φορτίου x και W_{t18} είναι ο αριθμός διελεύσεων στο τέλος του χρόνου t του τυπικού μονο-αξονικού φορτίου 18 kip (80 kN).

Ο Πίνακας 3.3 του Asphalt Institute (Huang 2004) δίνει τιμές του EALF για εύκαμπτα οδοστρώματα ως συνάρτηση του υπόψη αξονικού φορτίου όταν $SN=5$ και $p_t=2.5$, οι οποίες τιμές είναι οι πλέον συνήθεις στην πράξη. Ο Πίνακας 3.4 a,b του AASHTO (1993) δίνει επίσης τιμές του EALF για εύκαμπτα οδοστρώματα ως συνάρτηση του υπόψη αξονικού φορτίου για $SN=1-6$ και $p_t=2$ και 2.5. Και οι δύο πίνακες δίνουν τις ίδιες τιμές αφού έχουν κατασκευαστεί εμπειρικά με βάση το Road Test AASHO (1962). Απλώς ο Πίνακας 3.3 δίνει τιμές μόνο για $SN=5$ και $p_t=2.5$, αλλά δίνει και για τρίδυμους άξονες που δεν δίνει ο Πίνακας 3.4.

Axle load (lb)	Equivalent axle load factor			Axle load (lb)	Equivalent axle load factor		
	Single axles	Tandem axles	Tridem axles		Single axles	Tandem axles	Tridem axles
1000	0.00002			41,000	23.27	2.29	0.540
2000	0.00018			42,000	25.64	2.51	0.597
3000	0.00072			43,000	28.22	2.76	0.658
4000	0.00209			44,000	31.00	3.00	0.723
5000	0.00500			45,000	34.00	3.27	0.793
6000	0.01043			46,000	37.24	3.55	0.868
7000	0.0196			47,000	40.74	3.85	0.948
8000	0.0343			48,000	44.50	4.17	1.033
9000	0.0562			49,000	48.54	4.51	1.12
10,000	0.0877	0.00688	0.002	50,000	52.88	4.86	1.22
11,000	0.1311	0.01008	0.002	51,000		5.23	1.32
12,000	0.189	0.0144	0.003	52,000		5.63	1.43
13,000	0.264	0.0199	0.005	53,000		6.04	1.54
14,000	0.360	0.0270	0.006	54,000		6.47	1.66
15,000	0.478	0.0360	0.008	55,000		6.93	1.78
16,000	0.623	0.0472	0.011	56,000		7.41	1.91
17,000	0.796	0.0608	0.014	57,000		7.92	2.05
18,000	1.000	0.0773	0.017	58,000		8.45	2.20
19,000	1.24	0.0971	0.022	59,000		9.01	2.35
20,000	1.51	0.1206	0.027	60,000		9.59	2.51
21,000	1.83	0.148	0.033	61,000		10.20	2.67
22,000	2.18	0.180	0.040	62,000		10.84	2.85
23,000	2.58	0.217	0.048	63,000		11.52	3.03
24,000	3.03	0.260	0.057	64,000		12.22	3.22
25,000	3.53	0.308	0.067	65,000		12.96	3.41
26,000	4.09	0.364	0.080	66,000		13.73	3.62
27,000	4.71	0.426	0.093	67,000		14.54	3.83
28,000	5.39	0.495	0.109	68,000		15.38	4.05
29,000	6.14	0.572	0.126	69,000		16.26	4.28
30,000	6.97	0.658	0.145	70,000		17.19	4.52
31,000	7.88	0.753	0.167	71,000		18.15	4.77
32,000	8.88	0.857	0.191	72,000		19.16	5.03
33,000	9.98	0.971	0.217	73,000		20.22	5.29
34,000	11.18	1.095	0.246	74,000		21.32	5.57
35,000	12.50	1.23	0.278	75,000		22.47	5.86
36,000	13.93	1.38	0.313	76,000		23.66	6.15
37,000	15.50	1.53	0.352	77,000		24.91	6.46
38,000	17.20	1.70	0.393	78,000		26.22	6.78
39,000	19.06	1.89	0.438	79,000		27.58	7.11
40,000	21.08	2.08	0.487	80,000		28.99	7.45

Note. 1 lb = 4.45 N.

Πίνακας 3.3. Τιμές EALF για εύκαμπτα οδοστρώματα με SN=5 και $p_i=2.5$ κατά Asphalt Institute (από Huang, 2004)

Απλό άξονες, $P_t = 2,0$						
Φορτίο άξονα (klps)	SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
10	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08
12	0,16	0,18	0,19	0,18	0,17	0,17
14	0,32	0,34	0,35	0,35	0,34	0,33
16	0,59	0,60	0,61	0,61	0,60	0,60
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,61	1,59	1,56	1,55	1,57	1,60
22	2,49	2,44	2,35	2,31	2,35	2,41
24	3,71	3,62	3,43	3,33	3,40	3,51
26	5,36	5,21	4,88	4,68	4,77	4,96
28	7,54	7,31	6,78	6,42	6,52	6,83
30	10,38	10,03	9,24	8,65	8,73	9,17
32	14,00	13,51	12,37	11,46	11,48	12,17
34	18,55	17,87	16,30	14,97	14,87	15,63
36	24,20	23,30	21,16	19,28	19,02	19,93
38	31,14	29,95	27,12	24,55	24,03	25,10
40	39,57	38,02	34,34	30,92	30,04	31,25
Δίδυμοι άξονες, $P_t = 2,0$						
Φορτίο άξονα (klps)	SN					
	1	2	3	4	5	6
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
12	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
14	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
16	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
18	0,07	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07
20	0,10	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10
22	0,16	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16
24	0,23	0,24	0,26	0,25	0,24	0,23
26	0,32	0,34	0,36	0,35	0,34	0,33
28	0,45	0,46	0,49	0,48	0,47	0,46
30	0,61	0,62	0,65	0,64	0,63	0,62
32	0,81	0,82	0,84	0,84	0,83	0,82
34	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,07
36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
38	1,76	1,75	1,73	1,72	1,73	1,74
40	2,22	2,19	2,15	2,13	2,16	2,18
42	2,77	2,73	2,64	2,62	2,66	2,70
44	3,42	3,36	3,23	3,18	3,24	3,31
46	4,20	4,11	3,92	3,83	3,91	4,02
48	5,10	4,98	4,72	4,58	4,68	4,83

Πίνακας 3.4 α. Τιμές EALF για εύκαμπτα οδοστρώματα με SN=1-6 και $p_t=2$ κατά AASHTO (1993)

Αριθοί άξονες, $P_t = 2.5$						
Φορτίο άξονα (kips)	SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002
6	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
8	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03
10	0,08	0,10	0,12	0,10	0,09	0,08
12	0,17	0,20	0,23	0,21	0,19	0,18
14	0,33	0,36	0,40	0,39	0,36	0,34
16	0,59	0,61	0,65	0,65	0,62	0,61
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	2,61	1,57	1,49	1,47	1,51	1,55
22	2,48	2,38	2,17	2,09	2,18	2,30
24	3,69	3,49	3,09	2,89	3,03	3,27
26	5,33	4,99	4,31	3,91	4,09	4,48
28	7,49	6,98	5,90	5,21	5,39	5,98
30	10,31	9,55	7,94	6,83	6,97	7,79
32	13,90	12,82	10,52	8,85	8,88	9,95
34	18,41	16,94	13,74	11,34	11,18	12,51
36	24,02	22,04	17,73	14,38	13,93	15,50
38	30,90	28,30	22,61	18,06	17,20	18,98
40	39,26	35,89	27,51	22,50	21,08	23,04

Δίδυμοι άξονες, $P_t = 2.5$						
Φορτίο άξονα (kips)	SN					
	1	2	3	4	5	6
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
12	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
14	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
16	0,04	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04
18	0,07	0,10	0,11	0,09	0,08	0,07
20	0,11	0,14	0,16	0,14	0,12	0,11
22	0,16	0,20	0,23	0,21	0,18	0,17
24	0,23	0,27	0,31	0,29	0,26	0,24
26	0,33	0,37	0,42	0,40	0,36	0,34
28	0,45	0,49	0,55	0,53	0,50	0,47
30	0,61	0,65	0,70	0,70	0,66	0,63
32	0,81	0,84	0,89	0,89	0,86	0,83
34	1,06	1,08	1,11	1,11	1,09	1,08
36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
38	1,75	1,73	1,69	1,68	1,70	1,73
40	2,21	2,16	2,06	2,03	2,08	2,14
42	2,76	2,67	2,49	2,43	2,51	2,61
44	3,41	3,27	2,99	2,88	3,00	3,16
46	4,18	3,98	3,58	3,40	3,55	3,79
48	5,08	4,80	4,25	3,98	4,17	4,49

Πίνακας 3.4 b. Τιμές EALF για εύκαμπτα οδοστρώματα με SN=1-6 και $p_t=2.5$ κατά AASHTO (1993)

Ο Πίνακας 3.5 του AASHTO (1993) δίνει τιμές του EALF για δύσκαμπτα οδοστρώματα ως συνάρτηση του υπόψη αξονικού φορτίου όταν το πάχος της πλάκας σκυροδέματος είναι $D=9$ και $p_r=2.5$, οι οποίες τιμές είναι οι πλέον συνήθεις στην πράξη. Ο Πίνακας 3.6 α,β του AASHTO (1993) δίνει επίσης τιμές του EALF ως συνάρτηση του υπόψη αξονικού φορτίου για $D=6-11$ και $p_r=2.0$ και 2.5 .

Axle load (kips)	Equivalent axle load factor			Axle load (kips)	Equivalent axle load factor		
	Single axles	Tandem axles	Tridem axles		Single axles	Tandem axles	Tridem axles
2	0.0002	0.0001	0.0001	48	56.8	7.73	2.49
4	0.002	0.0005	0.0003	50	67.8	9.07	2.94
6	0.01	0.002	0.001	52		10.6	3.44
8	0.032	0.005	0.002	54		12.3	4.00
10	0.082	0.013	0.005	56		14.2	4.63
12	0.176	0.026	0.009	58		16.3	5.32
14	0.341	0.048	0.017	60		18.7	6.08
16	0.604	0.082	0.028	62		21.4	6.91
18	1.00	0.133	0.044	64		24.4	7.82
20	1.57	0.206	0.067	66		27.6	8.83
22	2.34	0.308	0.099	68		31.3	9.9
24	3.36	0.444	0.141	70		35.3	11.1
26	4.67	0.622	0.195	72		39.8	12.4
28	6.29	0.850	0.265	74		44.7	13.8
30	8.28	1.14	0.354	76		50.1	15.4
32	10.7	1.49	0.463	78		56.1	17.1
34	13.6	1.92	0.596	80		62.5	18.9
36	17.1	2.43	0.757	82		69.6	20.9
38	21.3	3.03	0.948	84		77.3	23.1
40	26.3	3.74	1.17	86		86.0	25.4
42	32.2	4.55	1.44	88		95.0	27.9
44	39.2	5.48	1.74	90		105.0	30.7
46	47.3	6.53	2.09				

Note. 1 kip = 4.45 kN, 1 in. = 25.4 mm.

Πίνακας 3.5. Τιμές EALF για δύσκαμπτα οδοστρώματα με $D=9$ in και $p_r=2.5$ κατά AASHTO (1993)

Φορτίο άξονα (kips)	Απλοί άξονες, $P_t = 2.0$					
	Πάχος πλάκας (ln)					
	6	7	8	9	10	11
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
12	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
14	0,35	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34
16	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,55	1,56	1,57	1,58	1,58	1,59
22	2,32	2,32	2,35	2,38	2,40	2,41
24	3,37	3,34	3,40	3,47	3,51	3,53
26	4,76	4,69	4,77	4,88	4,97	5,02
28	6,59	6,44	6,52	6,70	6,85	6,94
30	8,92	8,68	8,74	8,98	9,23	9,39
32	11,87	11,49	11,51	11,82	12,17	12,44
34	15,55	15,00	14,95	15,30	15,78	16,18
36	20,07	19,30	19,16	19,53	20,14	20,71
38	25,56	34,54	24,26	24,63	25,36	26,14
40	32,18	30,85	30,41	30,75	31,58	32,57
Φορτίο άξονα (kips)	Δίδυμοι άξονες, $P_t = 2.0$					
	Πάχος πλάκας (ln)					
	6	7	8	9	10	11
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
12	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
14	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
16	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
18	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
20	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
22	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
24	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44
26	0,63	0,64	0,62	0,62	0,62	0,62
28	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
30	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	0,14
32	1,48	1,45	1,49	1,50	1,51	1,51
34	1,91	1,90	1,93	1,95	1,96	1,97
36	2,42	2,41	2,45	2,49	2,51	2,52
38	3,04	3,02	3,07	3,13	3,17	3,19
40	3,79	3,74	3,80	3,89	3,95	3,98
42	4,67	4,59	4,66	4,78	4,87	4,93
44	5,72	5,59	5,67	5,82	5,95	6,03
46	6,94	6,76	6,83	7,02	7,20	7,31
48	8,36	8,12	8,17	8,40	8,63	8,79

Πίνακας 3.6 α. Τιμές EALF για δίσκαμπτα οδοστρώματα με D=6-11 in και $p_t=2.0$ κατά AASHTO (1993)

Φορτίο άξονα (kips)	Απλοί άξονες, $P_t = 2.5$					
	Πάχος πλάκας (in)					
	6	7	8	9	10	11
2	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
4	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
8	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
12	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17
14	0,38	0,36	0,35	0,34	0,34	0,34
16	0,63	0,62	0,61	0,60	0,60	0,60
18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,51	1,52	1,55	1,57	1,58	1,58
22	2,21	2,20	2,28	2,34	2,38	2,40
24	3,16	3,10	3,23	3,36	3,45	3,50
26	4,41	4,26	4,42	4,67	4,85	4,95
28	6,05	5,76	5,92	6,29	6,61	6,81
30	8,16	7,67	7,79	8,28	8,79	9,14
32	10,81	10,06	10,10	10,70	11,43	11,99
34	14,12	13,04	12,94	13,62	14,59	15,43
36	18,20	16,69	16,41	17,12	18,33	19,52
38	23,15	21,14	20,61	21,31	22,74	24,31
40	29,11	26,49	25,65	26,29	27,91	29,90
Φορτίο άξονα (kips)	Δίδυμοι άξονες, $P_t = 2.5$					
	Πάχος πλάκας (in)					
	6	7	8	9	10	11
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
12	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
14	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
16	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
18	0,16	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
20	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
22	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30
24	0,48	0,46	0,45	0,44	0,44	0,44
26	0,64	0,64	0,63	0,62	0,62	0,62
28	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
30	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	1,14
32	1,43	1,44	1,47	1,49	1,50	1,51
34	1,82	1,82	1,87	1,92	1,95	1,96
36	2,29	2,27	2,35	2,43	2,48	2,51
38	2,85	2,80	2,941	3,04	3,12	3,16
40	3,52	3,42	3,55	3,74	3,87	3,94
42	4,32	4,16	4,30	4,55	4,74	4,86
44	5,26	5,01	5,16	5,48	5,75	5,92
46	6,36	6,01	6,14	6,53	6,90	7,14
48	7,64	7,16	7,27	7,73	8,21	8,55

Πίνακας 3.6 b. Τιμές EALF για δύσκαμπτα οδοστρώματα με D=6-11 in και $p_t=2.5$ κατά AASHTO (1993)

3.4 Ανάλυση κυκλοφορίας για σχεδιασμό

Ο σχεδιασμός οδοστρώματος απαιτεί τον υπολογισμό του αριθμού επαναλήψεων (διελεύσεων) κάθε ομάδας αξονικού φορτίου κατά την διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ή ζωής σχεδιασμού. Αν n_i είναι ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων (διελεύσεων) φορτίου για να χρησιμοποιηθεί στη σχέση (3.2) για τον υπολογισμό του ESAL, τότε (Huang 2004)

$$n_i = (n_o)_i (G)(D)(L)(365)Y \quad (3.4)$$

όπου $(n_o)_i$ είναι ο αρχικός αριθμός επαναλήψεων ανά ημέρα για την ομάδα φορτίου i , G είναι ο συντελεστής αύξησης (growth factor), D είναι ο συντελεστής κατανομής κατά την διεύθυνση της κυκλοφορίας (συνήθως λαμβάνεται ίσος με 0.5), L είναι ο συντελεστής κατανομής σε λωρίδες κυκλοφορίας που ποικίλει ανάλογα με τον όγκο της κυκλοφορίας και τον αριθμό λωρίδων και Y είναι η περίοδος σχεδιασμού σε έτη. Εάν ο σχεδιασμός βασίζεται στο ισοδύναμο μονοαξονικό φορτίο 18 kip (80 kN) τότε το $(n_o)_i$ της (3.4) λαμβάνει τη μορφή

$$(n_o)_i = (p_i F_i)(ADT)_o (T)(A) \quad (3.5)$$

όπου p_i είναι το ποσοστό (%) των ολικών επαναλήψεων για την i ομάδα φορτίων, F_i είναι ο EALF για την i ομάδα φορτίων, $(ADT)_o$ είναι η μέση ημερήσια κυκλοφορία στην αρχή της περιόδου σχεδιασμού, T είναι το ποσοστό (%) φορτηγών στην ADT και A είναι ο μέσος αριθμός αξόνων ανά φορτηγό. Αντικαθιστώντας την σχέση (3.5) στη σχέση (3.4) και αθροίζοντας για όλες τις ομάδες φορτίου έχει κανείς το ισοδύναμο αξονικό φορτίο για τη λωρίδα σχεδιασμού ως

$$ESAL = (\sum_{i=1}^m p_i F_i)(ADT)_o (T)(A)(G)(D)(L)(365)Y \quad (3.6)$$

Αν τώρα εισαχθεί ο συντελεστής φορτηγών T_f , δηλαδή, ο αριθμός διελεύσεων μονοαξονικού φορτίου 18 kip (80 kN) ανά φορτηγό ($T_f = (\sum_{i=1}^m p_i F_i)(A)$) έχει κανείς τελικά

$$ESAL = (ADT)_o (T)(T_f)(G)(D)(L)(365)Y \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής $(ADT)_o$ συνήθως δίνεται. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμος, μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του Πίνακα 3.7. Έχοντας υπόψη τον Πίνακα 3.7, μπορεί κανείς να υπολογίσει το συντελεστή T_f από τον Πίνακα 3.8. Οι δύο αυτοί πίνακες αναφέρονται σε στοιχεία κυκλοφορίας των Η.Π.Α. (Huang 2004). Ο συντελεστής αύξησης G δίνεται από την AASHTO (1993) για την συνολική περίοδο σχεδιασμού, δηλαδή, δίνεται ως

$$(G)(Y) = \frac{(1+r)^Y - 1}{r} \quad (3.8)$$

Truck class	Percent trucks											
	Rural systems						Urban systems					
	Interstate	Other Principal	Minor Arterial	Collectors			Interstate	Other Freeways	Other Principal	Minor Arterial	Collectors	Range
				Major	Minor	Range						
Single-unit trucks												
2-axle, 4-tire	43	60	71	73	80	43-80	52	66	67	84	86	52-86
2-axle, 6-tire	8	10	11	10	10	8-11	12	12	15	9	11	9-15
3-axle or more	2	3	4	4	2	2-4	2	4	3	2	<1	<1-4
All single units	53	73	86	87	92	53-92	66	82	85	95	97	66-97
Multiple-unit trucks												
4-axle or less	5	3	3	2	2	2-5	5	5	3	2	1	1-5
5-axle ^b	41	23	11	10	6	6-41	28	13	12	3	2	2-28
6-axle or more ^b	1	1	<1	1	<1	<1-1	1	<1	<1	<1	<1	<1-1
All multiple units	47	27	14	13	8	8-47	34	18	15	5	3	3-34
All trucks	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	

^a Compiled from data supplied by the Highway Statistics Division, U.S. Federal Highway Administration.
^b Including full-trailer combinations in some states.
Source: Alter AI (1991).

Πίνακας 3.7. Κατανομή φορτηγών οχημάτων που κινούνται σε διάφορες κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α. (από Huang, 2004)

Vehicle type	Truck factors											
	Rural systems						Urban systems					
	Interstate	Other Principal	Minor Arterial	Collectors			Interstate	Other Freeways	Other Principal	Minor Arterial	Collectors	Range
				Major	Minor	Range						
Single-unit trucks												
2-axle, 4-tire	0.003	0.003	0.003	0.017	0.003	0.003-0.017	0.002	0.015	0.002	0.006	—	0.006-0.015
2-axle, 6-tire	0.21	0.25	0.28	0.41	0.19	0.19-0.41	0.17	0.13	0.24	0.23	0.13	0.13-0.24
3-axle or more	0.61	0.86	1.06	1.26	0.45	0.45-1.26	0.61	0.74	1.02	0.76	0.72	0.61-1.02
All single units	0.06	0.08	0.08	0.12	0.03	0.03-0.12	0.05	0.06	0.09	0.04	0.16	0.04-0.16
Tractor semitrailers												
4-axle or less	0.62	0.92	0.62	0.37	0.91	0.37-0.91	0.98	0.48	0.71	0.46	0.40	0.40-0.98
5-axle ^b	1.09	1.25	1.05	1.67	1.11	1.05-1.67	1.07	1.17	0.97	0.77	0.63	0.63-1.17
6-axle or more ^b	1.23	1.54	1.04	2.21	1.35	1.04-2.21	1.05	1.19	0.90	0.64	—	0.64-1.19
All multiple units	1.04	1.21	0.97	1.52	1.08	0.97-1.52	1.05	0.96	0.91	0.67	0.53	0.53-1.05
All trucks	0.52	0.38	0.21	0.30	0.12	0.12-0.52	0.39	0.23	0.21	0.07	0.24	0.07-0.39

^a Compiled from data supplied by the Highway Statistics Division, U.S. Federal Highway Administration.
^b Including full-trailer combinations in some states.
Source: Alter AI (1991).

Πίνακας 3.8. Κατανομή συντελεστών φορτηγών οχημάτων που κινούνται σε διάφορες κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α. (από Huang, 2004)

όπου r είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης (%) και Y ο αριθμός ετών της περιόδου σχεδιασμού. Ο συντελεστής κατανομής σε λωρίδες κυκλοφορίας L λαμβάνει τις εξής τιμές: i) για αυτοκινητόδρομους με δύο λωρίδες (οπότε η λωρίδα ανά κατεύθυνση είναι η λωρίδα σχεδιασμού) είναι $L=100\%$, ii) για αυτοκινητοδρόμους με πολλές λωρίδες (λωρίδα σχεδιασμού είναι η εξωτερική) $L=66-94\%$ για δυο λωρίδες ανα κατεύθυνση και $L=49-82\%$ για τρεις και άνω λωρίδες ανα κατεύθυνση.

4.ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1. Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε κυκλοφοριακά φορτία αποτελεί βασική συνιστώσα της διαδικασίας σχεδιασμού των οδοστρωμάτων αυτών καθώς και του τρόπου εκτίμησης των βλαβών τους.

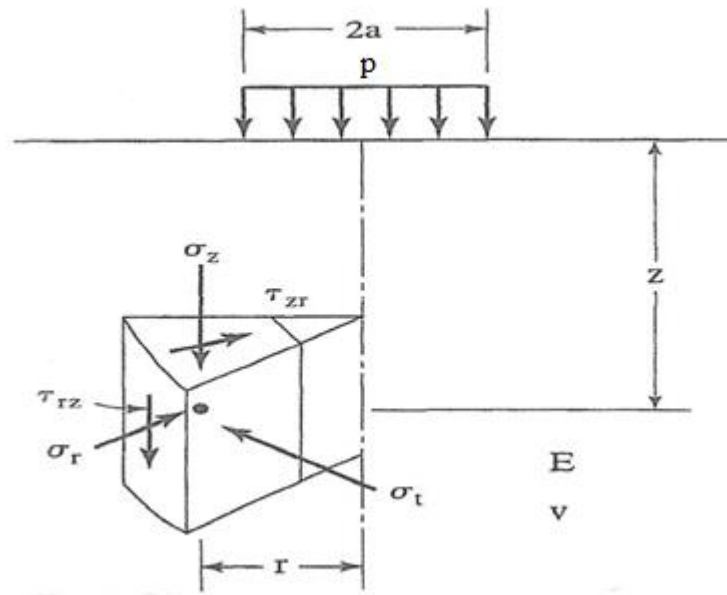
Το κεφάλαιο αυτό περιορίζεται στον προσδιορισμό της στατικής ελαστικής απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε ακίνητα φορτία οχημάτων με χρήση αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου 1, οι ανωτέρω υποθέσεις ακίνητων φορτίων και ελαστικής συμπεριφοράς υλικών, παρ'όλο που οδηγούν σε αποδεκτό σχεδιασμό, αποτελούν προσεγγίσεις της πραγματικότητας, η οποία έχει να κάνει με κινούμενα φορτία και ανελαστική συμπεριφορά υλικών. Τα τελευταία αυτά θέματα είναι ακόμα σε στάδιο έρευνας και δεν αποτελούν αντικείμενο των σημειώσεων αυτών.

Ο προσδιορισμός της στατικής ελαστικής απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε ακίνητα φορτία, που βασίζεται σε αρχές της μηχανικής, σε συνδυασμό με εμπειρικά κριτήρια αστοχίας της κατασκευής των οδοστρωμάτων αυτών, αποτελούν τα δύο βασικά στοιχεία των μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αυτές οι νέες μέθοδοι σχεδιασμού δεν έχουν ακόμη εκτοπίσει τις καθαρά εμπειρικές σημερινές μεθόδους των υπάρχοντων κανονισμών.

4.2. Αναλυτικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης

Η απλούστερη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων επιτυγχάνεται με ένα γραμμικά ελαστικό ομογενή και ισότροπο ημίχωρο που φορτίζεται στατικά με ένα συγκεντρωμένο ή διανεμημένο φορτίο που δρα στην επιφάνειά του. Ο ελαστικός ημίχωρος έχει μία επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και ένα βάθος τα οποία εκτείνονται στο άπειρο. Το πρόβλημα της απόκρισης ενός ελαστικού ημιχώρου σε ένα κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο πάνω στην επιφάνειά του, επιλύθηκε από τον Boussinesq (1885), ο οποίος εξήγαγε αναλυτικές εκφράσεις για μετατοπίσεις, τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις (ή απλά παραμορφώσεις) για κάθε σημείο του ημιχώρου.



Σχήμα 4.1. Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ελαστικό ημίχωρο λόγω αξονοσυμμετρικής στατικής φόρτισης (από Huang, 2004).

Με βάση το Σχ.4.1 μπορεί κανείς να καταγράψει τις παρακάτω εκφράσεις για τις μη-μηδενικές τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3\theta \quad (4.1)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left(3\cos\theta \sin^2\theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta} \right) \quad (4.2)$$

$$\sigma_t = \frac{(1-2\nu)P}{2\pi R^2} \left(-\cos\theta + \frac{1}{1+\cos\theta} \right) \quad (4.3)$$

$$\tau_{rz} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^2\theta \sin\theta \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} (3\cos^3\theta - 2\nu \cos\theta) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left[-3\cos^3\theta + (3-2\nu) \cos\theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta} \right] \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left(-\cos\theta + \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta} \right) \quad (4.7)$$

$$u_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi RE} [2(1-\nu) + \cos^2\theta] \quad (4.8)$$

$$u_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi RE} \left[\cos\theta \sin\theta - \frac{(1-2\nu)\sin\theta}{1+\cos\theta} \right] \quad (4.9)$$

όπου $P=\pi a^2 p$ είναι το συγκεντρωμένο φορτίο με p να είναι το αντίστοιχο διανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια ακτίνας a , E είναι το μέτρο ελαστικότητας, ν είναι ο λόγος του Poisson και θ η γωνία μεταξύ της επιβατικής ακτίνας R και του κατακόρυφου άξονα z και $r = R\sin\theta$ (Σχ.4.1). Θετική σήμανση τάσεων και παραμορφώσεων υπονοεί θλίψη και αρνητική εφελκυσμό. Σε σημεία επί του άξονα του φορτίου (άξονα z) όπου $\theta=0$ και $R=z$, οι ανωτέρω σχέσεις λαμβάνουν τις απλούστερες εκφράσεις:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (4.10)$$

$$\sigma_r = \sigma_t = - \frac{(1-2\nu)P}{4\pi z^2} \quad (4.11)$$

$$\tau_{rz} = 0 \quad (4.12)$$

$$\epsilon_z = \frac{(1+\nu)(3-2\nu)P}{2\pi z^2 E} \quad (4.13)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_t = - \frac{(1+\nu)(1+2\nu)P}{4\pi z^2 E} \quad (4.14)$$

$$u_z = \frac{(1+\nu)(3-2\nu)P}{2\pi z E} \quad (4.15)$$

$$u_r = 0 \quad (4.16)$$

Η κατακόρυφη μετατόπιση στην επιφάνεια του ελαστικού ημίχωρου, όπου $R=r$ και $\theta=90^\circ$, λαμβάνει τη μορφή

$$u_z = \frac{(1-\nu^2)P}{\pi r E} \quad (4.17)$$

Ας σημειωθεί ότι στο σημείο εφαρμογής της δύναμης P , όπου $z=0$, τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις απειρίζονται.

Όταν το φορτίο είναι διανεμημένο σε μία κυκλική επιφάνεια ακτίνας a και έχει τιμή p , τότε οι τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις πάνω στον άξονα z έχουν τη μορφή

$$\sigma_z = p \left[1 - \left(1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right)^{-1.5} \right] \quad (4.18)$$

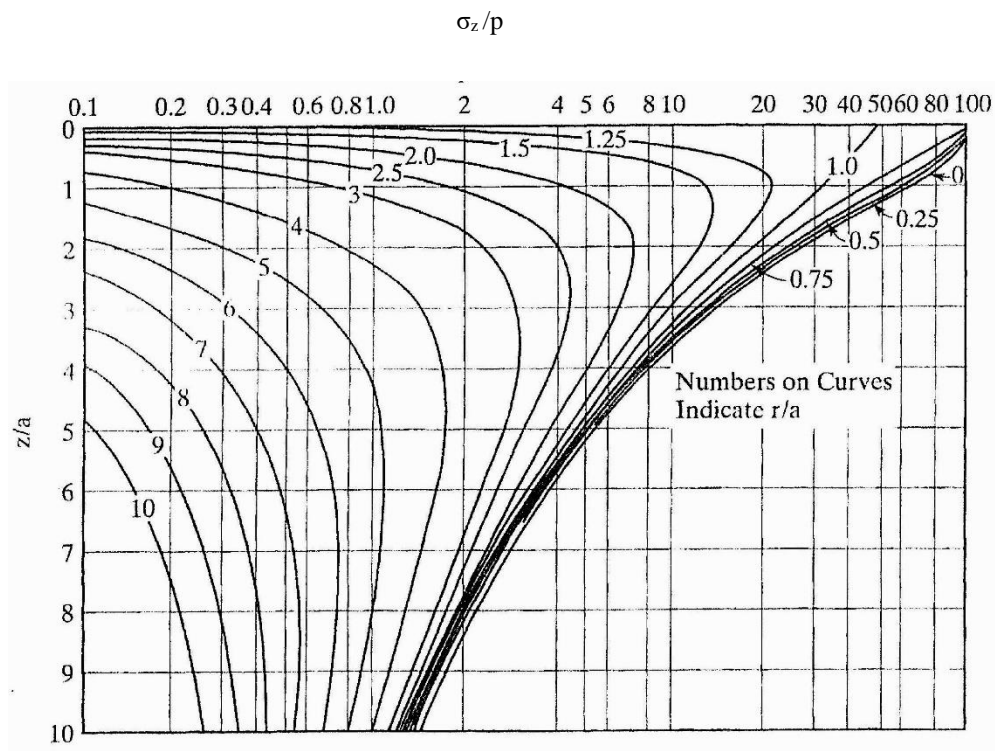
$$\sigma_r = \sigma_t = p \left[\frac{1+2\nu}{2} - (1+\nu)\left(1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right)^{-0.5} + 0.5\left(1 + \left(\frac{a}{z}\right)^2\right)^{-1.5} \right] \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)p}{E} [(z/\alpha)(1+(z/\alpha)^2)^{-1.5} - (1-2\nu)((z/\alpha)(1+(z/\alpha)^2)^{-0.5}-1)] \quad (4.20)$$

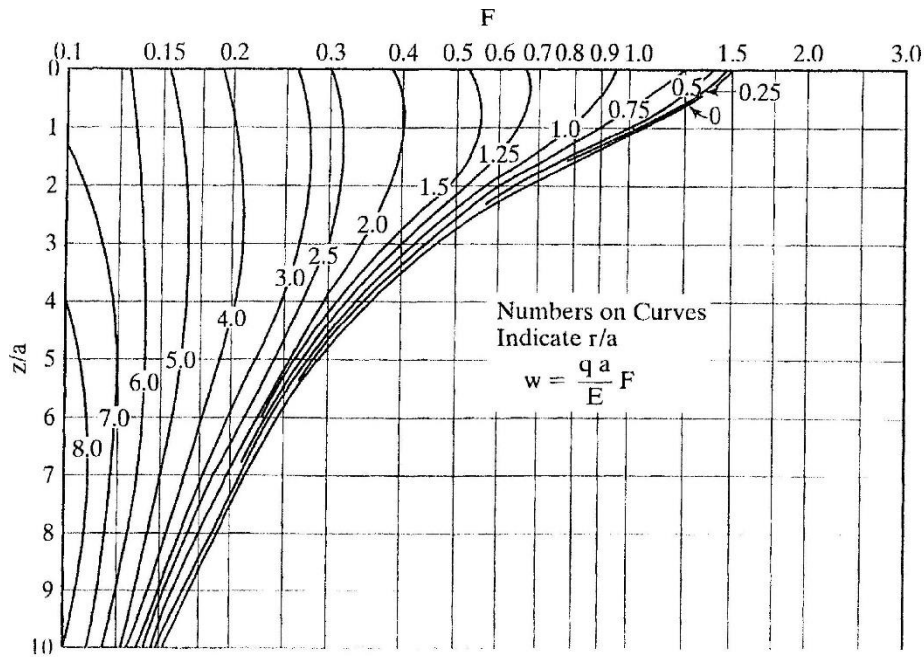
$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = -\frac{(1+\nu)p}{2E} [(z/\alpha)(1+(z/\alpha)^2)^{-1.5} + (1-2\nu)((z/\alpha)(1+(z/\alpha)^2)^{-0.5}-1)] \quad (4.21)$$

$$u_z = \frac{(1+\nu)p\alpha}{E} [(1+(z/\alpha)^2)^{-0.5} + (1-2\nu)((1+(z/\alpha)^2)^{+0.5}-(z/\alpha))] \quad (4.22)$$

Οι ανωτέρω τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και με τη βοήθεια νομογραφημάτων, όπως αυτά των Σχ.4.2 και 4.3 (Huang, 2004) τα οποία έχουν κατασκευαστεί από τους Foster and Ahlvin (1954) για $\nu=0.5$.

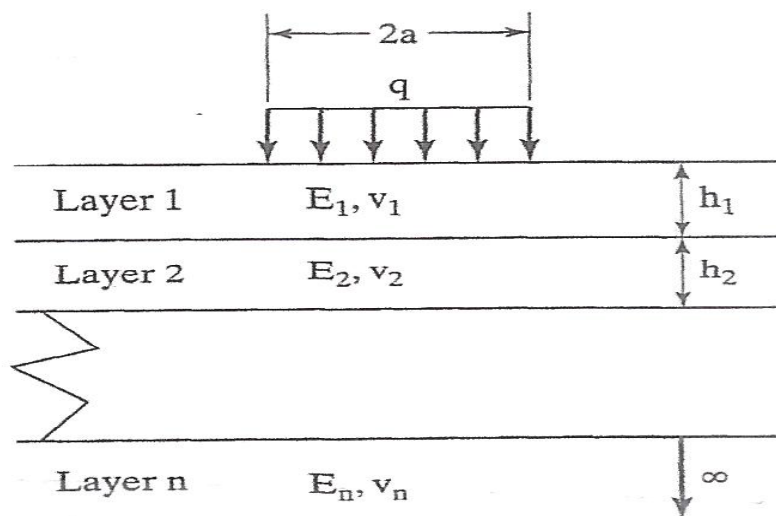


Σχήμα 4.2. Κατακόρυφη τάση συναρτήσει του βάθους σε ελαστικό ημίχωρο υπό διανεμημένο επί κυκλικής επιφάνειας φορτίο (από Foster και Ahlvin, 1954).



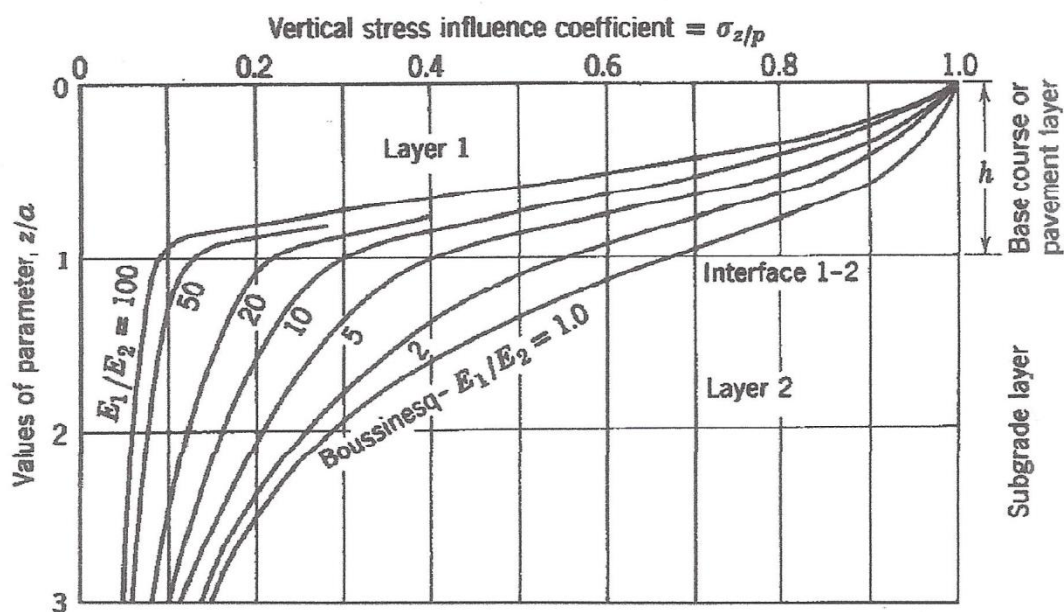
Σχήμα 4.3. Κατακόρυφη μετατόπιση συναρτήσει του βάθους σε ελαστικό ημίχωρο υπό διανεμημένο επί κυκλικής επιφάνειας φορτίο (από Foster και Ahlvin, 1954).

Στην πραγματικότητα ένα εύκαμπτο οδόστρωμα δεν μπορεί να προσομοιωθεί με τον ομογενή ελαστικό ημίχωρο αφού αποτελεί ένα σύστημα στρώσεων. Μάλιστα οι στρώσεις αυτές διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η δυσκαμψία και πυκνότητα των στρώσεων να αυξάνεται από τα κάτω προς τα πάνω με την καλύτερη ποιότητα υλικού να αντιστοιχεί στην κορυφαία στρώση. Ο στρωσιγενής ελαστικός ημίχωρος υπό τη δράση ενός στατικού διανεμημένου φορτίου p , που δρα σε κυκλική επιφάνεια ακτίνας a , αποτελεί ένα καλύτερο προσομοίωμα για να περιγράψει τη συμπεριφορά ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Ένα τέτοιο προσομοίωμα με n στρώσεις, εκ των οποίων η νιοστή αποτελεί ουσιαστικά έναν ελαστικό ημίχωρο, φαίνεται στο Σχ.4.4. Η στατική επίλυση ενός συστήματος ελαστικών στρώσεων είναι πολύ δύσκολη και δεν μπορεί να καταλήξει σε αναλυτικές εκφράσεις όπως στην περίπτωση του ελαστικού ημίχωρου. Το πρόβλημα επιλύεται συνήθως με αριθμητικές μεθόδους, όπως η ΜΠΣ η οποία αναφέρεται στο τέλος του κεφαλαίου αυτού.



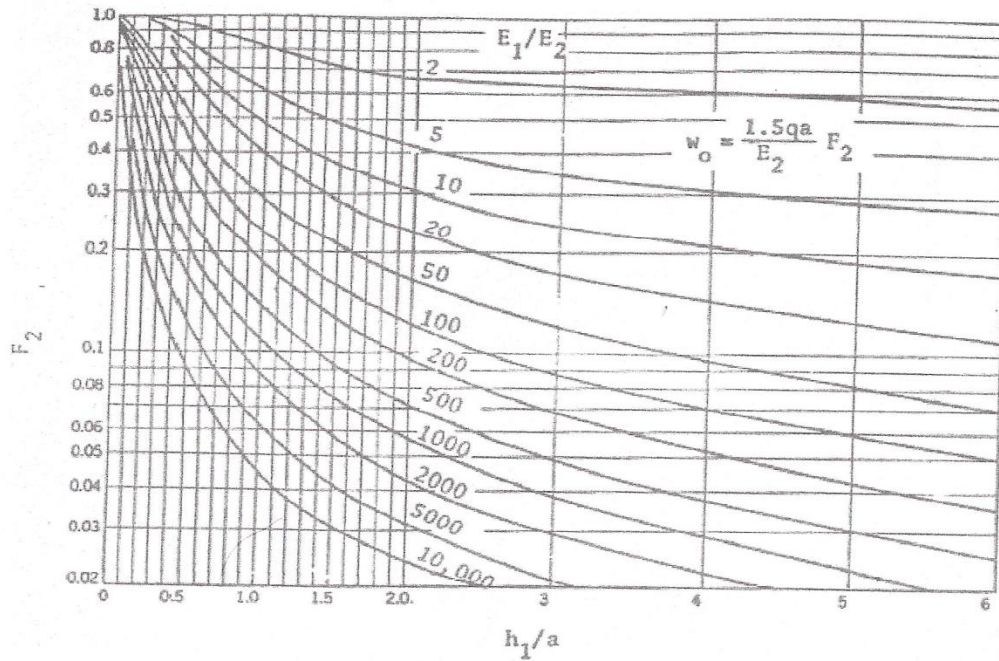
Σχήμα 4.4. Σύστημα n στρώσεων υπό διανεμημένο στατικό φορτίο σε κυκλική επιφάνεια (από Huang, 2004).

Ο Burmister (1943, 1945) πρώτος ανέπτυξε αναλυτική λύση βασισμένη στη θεωρία ελαστικότητας για ένα σύστημα δύο στρώσεων και κατόπιν επεξέτεινε αυτή για ένα σύστημα τριών στρώσεων. Η λύση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια νομογραφημάτων για την πρώτη περίπτωση και νομογραφημάτων και πινάκων για τη δεύτερη. Τα νομογραφήματα επίλυσης για την περίπτωση των δύο στρώσεων είναι εύχρηστα και χρησιμοποιούνται στην πράξη. Αντίθετα οι πίνακες και τα νομογραφήματα των τριών στρώσεων είναι εξαιρετικά δύσχρηστα και δεν συνιστώνται για πρακτική χρήση. Για τη περίπτωση τριών (αλλά και δύο) στρώσεων συνιστάται η χρήση προσεγγιστικών αναλυτικών εκφράσεων που έχουν προταθεί από τον Odemark (1949). Για την περίπτωση δύο στρώσεων, όπως αυτή του Σχ.4.4 με $n=2$, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει εύκολα τα νομογραφήματα του Burmister (1943, 1945, 1958), όπως αυτά των Σχ.4.5 και 4.6 και να προσδιορίσει την τάση σ_z και την μετατόπιση u_z σε οποιοδήποτε βάθος z πάνω στον άξονα των z .



Σχήμα 4.5. Κατανομή κατακόρυφων τάσεων σ_z σε σύστημα δύο ελαστικών στρώσεων κατά Burmister (1958).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος Odemark (1949) αποτελεί ένα υπολογιστικά αποδοτικό αλλά προσεγγιστικό τρόπο προσδιορισμού τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων συστήματος ελαστικών στρώσεων λόγω στατικού διανεμημένου φορτίου που δρα σε κυκλική επιφάνεια. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι οι τάσεις και παραμορφώσεις κάτω από μία στρώση εξαρτώνται μόνο από τη δυσκαμψία αυτής της στρώσης. Εάν το πάχος και οι ελαστικές σταθερές E και ν αυτής της στρώσης αλλάξουν, αλλά η δυσκαμψία της παραμένει αμετάβλητη, οι τάσεις και παραμορφώσεις κάτω από αυτή τη στρώση θα παραμείνουν επίσης σχετικά αμετάβλητες.

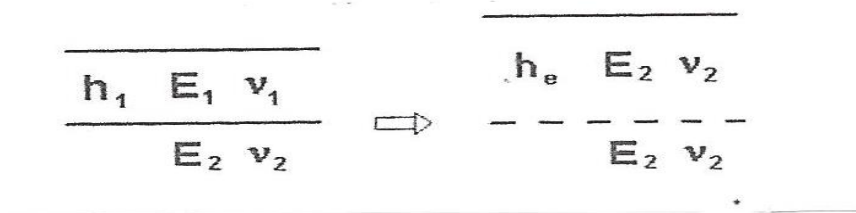


Σχήμα 4.6. Κατακόρυφη μετατόπιση στην επιφάνεια συστήματος δύο ελαστικών στρώσεων κατά Burmister (1958).

Η δυσκαμψία μιας στρώσης, σύμφωνα με την καμπτική θεωρία λεπτών πλακών σε κάμψη, είναι ανάλογη προς την καμπτική δυσκαμψία

$$h^3 E / (1 - \nu^2) \tag{4.23}$$

όπου h είναι το πάχος της στρώσης.



Σχήμα 4.7. Μετασχηματισμός συστήματος ελαστικών στρώσεων κατά Odemark (1949).

Έτσι ο μετασχηματισμός που περιγράφεται στο Σχ.4.7 δεν επηρεάζει τάσεις και παραμορφώσεις στη στρώση 2 υπό την προϋπόθεση ότι

$$\frac{h_1^3 E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{h_e^3 E_2}{1 - \nu_2^2} \tag{4.24}$$

από όπου μπορεί να υπολογιστεί το ισοδύναμο πάχος

$$h_e = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \left(\frac{1-\nu_2^2}{1-\nu_1^2} \right)} \quad (4.25)$$

Το μετασχηματισμένο σύστημα του Σχ.4.7 είναι ένας ελαστικός ημίχωρος για τον οποίο μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις εξισώσεις του Boussinesq (1885), αλλά μόνο για τάσεις και παραμορφώσεις κάτω από τη διεπιφάνεια. Η ακρίβεια της μεθόδου Odemark (1949) μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή f , ο οποίος πολλαπλασιάζει το δεξιό μέλος της εξίσωσης (4.25). Ο συντελεστής αυτός είναι 0.8, εκτός από την περίπτωση της πρώτης διεπιφάνειας, για την οποία είναι 0.9 για σύστημα δύο στρώσεων και 1.0 για σύστημα πολλών στρώσεων. Ακόμα συνιστάται όπως όταν $h_1 < \alpha$, η οριζόντια εφελκυστική τάση στο κάτω όριο της πρώτης στρώσης πρέπει να πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή $1.1(\alpha/h_1)^{0.3}$. Τέλος, επειδή ο λόγος του Poisson ν κυμαίνεται μεταξύ 0.30 και 0.45 και στην πράξη σπάνια προσδιορίζεται με κάποιο βαθμό ακρίβειας, συνιστάται ο λόγος αυτός να λαμβάνεται ο ίδιος σε όλες τις στρώσεις. Στην περίπτωση αυτή ο λόγος $(1-\nu_2^2) / (1-\nu_1^2)$ στο δεξιό μέλος της σχέσης (4.25) είναι ίσος με τη μονάδα και αν ληφθεί υπόψη και ο διορθωτικός συντελεστής f η σχέση αυτή λαμβάνει τη μορφή

$$h_e = f h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (4.26)$$

Έτσι για ένα σύστημα πολλών στρώσεων, όπως αυτό του Σχ.4.4, το ισοδύναμο πάχος των άνω $n-1$ στρώσεων ως προς το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης n υπολογίζεται από

$$h_{e,n} = f \sum_{i=1}^n h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (4.27)$$

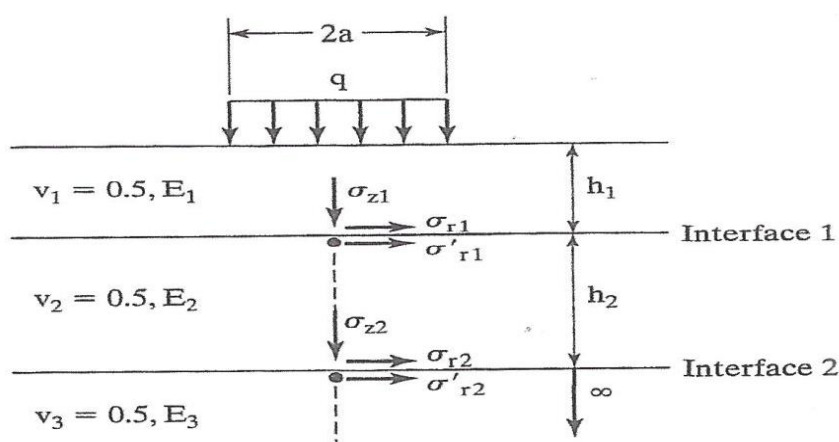
Στρώσεις κάτω από τη στρώση n υποτίθενται ότι έχουν ως μέτρο ελαστικότητας E_n στο μετασχηματισμένο σύστημα του Σχ.4.7.

Μετατοπίσεις υπολογίζονται ως το άθροισμα των συνθλίψεων των στρώσεων συν τη μετατόπιση της τελευταίας στρώσης (ελαστικός ημίχωρος). Η σύνθλιψη κάθε στρώσης υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μετατόπισης της άνω και κάτω επιφάνειας της στρώσης αυτής στο μετασχηματισμένο σύστημα. Για την άνω (κορυφαία) στρώση το μετασχηματισμένο σύστημα είναι ο ελαστικός ημίχωρος με μέτρο ελαστικότητας E_1 .

Η μέθοδος Odemark (1949) δίνει λογικά αποτελέσματα (κοντά σε αυτά της θεωρίας ελαστικότητας) υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις: i) τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων ελαττώνονται με το βάθος ($E_i / E_{i+1} > 2$) και ii) το ισοδύναμο πάχος κάθε στρώσης είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα α της φορτιζόμενης επιφάνειας. Γενικά η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις κατακόρυφες τάσεις αλλά όχι τόσο καλά αποτελέσματα για τις οριζόντιες τάσεις. Παραδείγματα

εφαρμογής της μεθόδου Odemark (1949) μπορούν να βρεθούν στις λυμένες ασκήσεις στο Κεφάλαιο 13 των σημειώσεων αυτών.

Τις περισσότερες φορές στην πράξη το σύστημα στρώσεων ενός οδοστρώματος αποτελείται από τρεις στρώσεις με την τρίτη στρώση να είναι ελαστικός ημίχωρος, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8. Η στρώση 1 περιλαμβάνει τις ασφαλτικές στρώσεις, η στρώση 2 τη βάση και υπόβαση και η στρώση 3 το έδαφος. Από τις διάφορες τάσεις και αντίστοιχες παραμορφώσεις που απεικονίζονται στο Σχ.4.8, οι πλέον σημαντικές από πλευράς σχεδιασμού είναι η εφελκυστική οριζόντια παραμόρφωση ϵ_{r1} στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη ώστε να μην δημιουργούνται ρωγμές και η κατακόρυφη θλιπτική τάση σ_{z2} στο άνω μέρος της εδαφικής στρώσης, η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από την εδαφική αντοχή σε θλίψη.



Σχήμα 4.8. Τάσεις στις διεπιφάνειες ενός συστήματος τριών ελαστικών στρώσεων λόγω στατικής φόρτισης (από Huang, 2004).

4.3. Αριθμητικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης

Λόγω της πολυπλοκότητας των νομογραφημάτων και πινάκων της θεωρίας Burmister (1943, 1945, 1958) για ένα στρωσιγενές ελαστικό σύστημα υπό στατική φόρτιση, αναπτύχθηκαν προγράμματα H/Y βασισμένα στην ανωτέρω θεωρία τα οποία και παρέχουν αριθμητικά την ακριβή λύση του προβλήματος. Από αυτά μπορεί να αναφέρει κανείς το BISAR (De Jong et al, 1973) που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Shell, το ELSYM5 (Kopperman et al, 1986) που αναπτύχθηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο Berkeley των Η.Π.Α. και το KENLAYER (Huang, 2004) που αναπτύχθηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο του Kentucky των Η.Π.Α.

Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε επίσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), η οποία έχει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα, όπως γενικότητα, ευελιξία και δυνατότητα επέκτασης σε μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Από τα πλέον γνωστά προγράμματα ΜΠΣ για στατική ελαστική ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων, μπορεί κανείς να αναφέρει τα ILLI-PAVE (Raad and Figueroa, 1980)

που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Illinois των Η.Π.Α. και MICH-PAVE (Harichandran et al, 1990) που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Michigan State των Η.Π.Α.

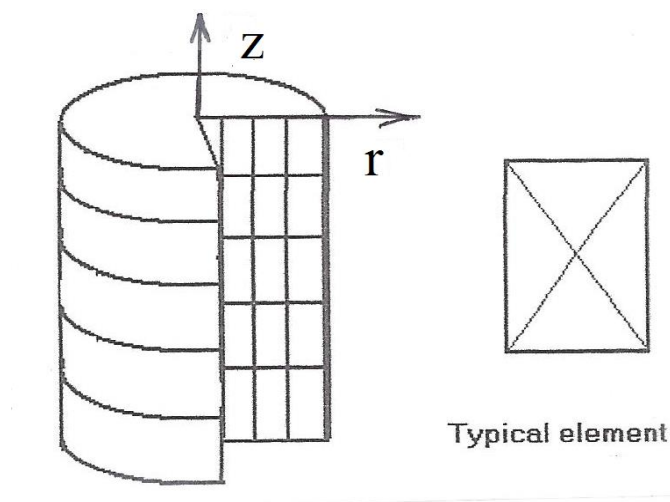
Τα τρισδιάστατα προγράμματα KENLAYER, ILLI-PAVE και MICH-PAVE έχουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν και περιπτώσεις μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών στις διάφορες στρώσεις του οδοστρώματος, ενώ το KENLAYER μπορεί επί πλέον να αντιμετωπίσει και γραμμικά ιξωδοελαστική συμπεριφορά των υλικών.

Τα τελευταία 15-20 έτη, ο συνήθης τρόπος στατικών ή και δυναμικών αναλύσεων εύκαμπτων οδοστρωμάτων με τη ΜΠΣ, γίνεται με τη βοήθεια προγραμμάτων ΜΠΣ γενικού σκοπού. Τα πλέον δημοφιλή τέτοια προγράμματα είναι το ANSYS (2010) και το ABAQUS (2013) στα οποία ο χρήστης μπορεί να προσθέτει ειδικές υπορουτίνες για την αντιμετώπιση ειδικών προβλημάτων του.

Για λόγους πληρότητας, το κεφάλαιο αυτό κλείνει με μία σύντομη περιγραφή της ΜΠΣ για στατική ελαστική ανάλυση.

Η παρακάτω συνοπτική περιγραφή της ΜΠΣ για στατική ελαστική ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων, θεωρούμενων ως αξονοσυμμετρικών τρισδιάστατων στρωσιγενών σωμάτων, βασίζεται στην εργασία των Duncan et al (1968), η οποία και αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου σε εύκαμπτα οδοστρώματα.

Θεωρείται στρωσιγενές αξονοσυμμετρικό χωρίο, όπως αυτό του Σχ.4.9, το οποίο προσομοιώνει ένα εύκαμπτο οδόστρωμα. Το χωρίο αυτό διακριτοποιείται σε αξονοσυμμετρικά στοιχεία και επομένως η διακριτοποίηση αφορά ουσιαστικά σε ένα ακτινικό επίπεδο zr του χωρίου αυτού. Κάθε αρχικά ορθογωνικό στοιχείο υποδιαιρείται σε τέσσερα τριγωνικά στοιχεία, όπως φαίνεται στο Σχ.4.9 και έτσι το πρόβλημα ανάγεται στην κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας $[K]$ μεγέθους $6*6$

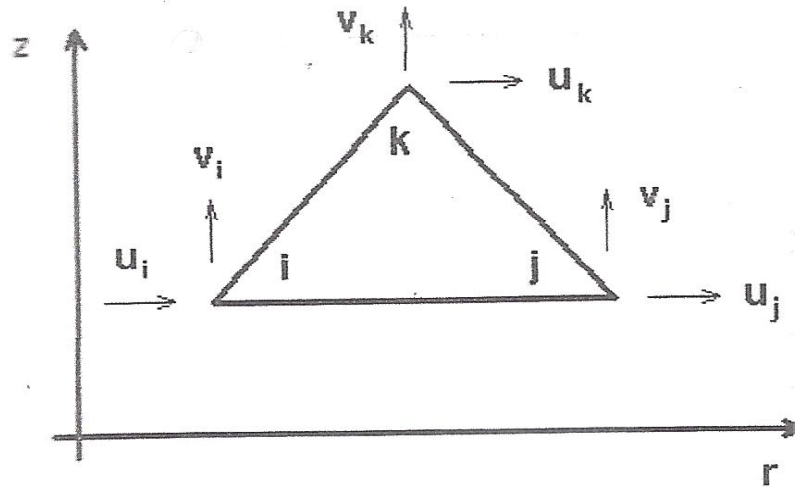


Σχήμα 4.9. Διακριτοποίηση οδοστρώματος σε αξονοσυμμετρικά πεπερασμένα στοιχεία (από Ullidtz, 1998).

ενός τριγωνικού στοιχείου για το οποίο ισχύει η σχέση

$$\{f\} = [K] \{\delta\} \quad (4.28)$$

όπου $\{f\} = \{H_i, H_j, H_k, V_i, V_j, V_k\}^T$ και $\{\delta\} = \{u_i, u_j, u_k, v_i, v_j, v_k\}^T$ είναι τα διανύσματα επικόμβιων εξωτερικών δυνάμεων και επικόμβιων μετατοπίσεων που αναφέρονται στους κόμβους i, j και k του στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχ.4.10.



Σχήμα 4.10. Κόμβοι και επικόμβιες μετατοπίσεις σε τριγωνικό επίπεδο πεπερασμένο στοιχείο (από Ullidtz, 1998).

Το τυχόν στοιχείο K_{mn} ($m, n=1, 2, \dots, 6$) του μητρώου $[K]$ παριστάνει την δύναμη στον βαθμό ελευθερίας m εξ' αιτίας μίας μοναδιαίας τιμής μετατόπισης στο βαθμό ελευθερίας n , όταν οι τιμές των μετατοπίσεων στους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας είναι μηδέν.

Για τον προσδιορισμό των στοιχείων του μητρώου $[K]$ απαιτείται αρχικά η επιλογή μίας συνάρτησης μετατόπισης. Επιλέγοντας μία γραμμική ως προς r και z τέτοια συνάρτηση, έχει κανείς

$$u(r, z) = \alpha_1 + \alpha_2 r + \alpha_3 z$$

$$v(r, z) = \alpha_4 + \alpha_5 r + \alpha_6 z \quad (4.29)$$

ή σε μητρωϊκή μορφή

$$\{U\} = [A] \{\alpha\} \quad (4.30)$$

$$\text{όπου } \{U\} = \{u, v\} \text{ και } \{\alpha\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}^T$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.30) σε κάθε ένα από τους τρεις κόμβους του τριγωνικού στοιχείου του Σχ.4.10 προκύπτει η σχέση

$$\{\delta\} = [\bar{A}] \{\alpha\} \quad (4.31)$$

όπου το μητρώο $[\bar{A}]$ προκύπτει από τα μητρώο $[A]$ υπολογισμένο στους τρεις κόμβους του τριγωνικού στοιχείου. Μεταξύ των σχέσεων (4.30) και (4.31) γίνεται απαλοιφή του διανύσματος $\{\alpha\}$ και προκύπτει

$$\{U\} = [A] [\bar{A}]^{-1} \{\delta\} = [N] \{\delta\} \quad (4.32)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις παραμορφώσεων-μετατοπίσεων της θεωρίας ελαστικότητας

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \end{aligned} \quad (4.33)$$

μετά από κατάλληλη διαφορίση της σχέσης (4.32) μπορεί κανείς να λάβει τη σχέση

$$\{\varepsilon\} = [N'] \{\delta\} \quad (4.34)$$

όπου $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{rz}\}^T$ και $[N']$ είναι το μητρώο που προκύπτει από το $[N]$ μετά από διαφορίσεις σύμφωνα με τη σχέση (4.33). Η ελαστική συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται σύμφωνα με τον νόμο του Hooke ως

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \quad (4.35)$$

ή συμβολικά ως

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (4.36)$$

όπου το $[E]$ καλείται μητρώο ελαστικότητας.

Το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται τώρα από τη σχέση

$$[k] = \int_V [N']^T [E] [N'] dV \quad (4.37)$$

όπου V είναι ο όγκος του αξονοσυμμετρικού στοιχείου. Δοθέντος ότι $dV = r dr d\theta dz$, η ανωτέρω σχέση μπορεί να λάβει την απλούστερη μορφή

$$[k] = 2\pi \int_S [N']^T [E] [N'] r dr dz \quad (4.38)$$

όπου S είναι η επιφάνεια του τριγωνικού στοιχείου του Σχ.4.10. Η ολοκλήρωση στην (4.38) γίνεται αριθμητικά.

Έχοντας το μητρώο δυσκαμψίας $[k]$ ενός αξονοσυμμετρικού στοιχείου, μπορεί κανείς να κατασκευάσει το μητρώο $[K]$ όλου του οδοστρώματος με κατάλληλη

επαλληλία των δυσκαμψιών όλων των στοιχείων στα οποία έχει διακριτοποιηθεί. Έτσι για την όλη κατασκευή μπορεί κανείς να έχει

$$\{F\} = [K] \{\Delta\} \quad (4.39)$$

όπου $\{F\}$ και $\{\Delta\}$ είναι τα διανύσματα των επικόμβιων δυνάμεων και μετατοπίσεων της όλης κατασκευής. Μετά την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών του προβλήματος στην (4.39), η προκύπτουσα εξίσωση επιλύεται αριθμητικά και δίνει τις άγνωστες συνιστώσες μετατοπίσεων του διανύσματος $\{\Delta\}$. Έχοντας αυτές μπορεί κανείς να προσδιορίσει παραμορφώσεις και τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο κάθε στοιχείου με τη βοήθεια των εξισώσεων (4.34) και (4.36), αντίστοιχα.

5.ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων εύκαμπτων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, κυρίως εμπειρικές, που βασίζονται σε πειράματα πεδίου και σε προσεκτικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς υπαρχόντων οδοστρωμάτων. Παρ'όλο που τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί και μέθοδοι σχεδιασμού, οι οποίοι βασίζονται όχι μόνο σε εμπειρικές σχέσεις αλλά και σε αρχές της μηχανικής, όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 5.3., οι εμπειρικές μέθοδοι είναι αυτές που κυρίως χρησιμοποιούνται στην πράξη. Γι'αυτό και στο παρόν κεφάλαιο, η έμφαση είναι σε αυτές τις μεθόδους.

Οι κυριότερες εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι

1. Η μέθοδος AASHTO των Η.Π.Α.
2. Η μέθοδος του Asphalt Institute των Η.Π.Α.

Και οι δύο ανωτέρω μέθοδοι περιγράφονται εκτενώς στα βιβλία των Huang (2004) και Νικολαΐδη (2002). Στις παρούσες σημειώσεις περιγράφεται κατωτέρω, μόνο η μέθοδος AASHTO (1993), επειδή είναι η πλέον γνωστή και η συνηθέστερα εφαρμοζόμενη στην πράξη.

5.2. Μέθοδος σχεδιασμού AASHTO

5.2.1. Βασικές παράμετροι μεθόδου

Η μέθοδος σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) είναι μία εμπειρική μέθοδος που βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα πεδίου (AASHO Road Test, 1962), παρατηρήσεις από κατασκευασθέντα οδοστρώματα και λίγη θεωρία. Η μέθοδος αποτελεί βελτίωση της αρχικής μεθόδου AASHO των 1972/1981. Η βελτίωση αυτή έγινε το 1986 και πρακτικά η έκδοση του 1993 είναι ίδια με αυτή του 1986.

Η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό του απαιτούμενου δείκτη δομικής αντοχής ή δομικού αριθμού SN (Structural Number), που είναι ένας αριθμός που προκύπτει από την ανάλυση των παρακάτω στοιχείων:

1. Σχεδιαστικές μεταβλητές

- α) Κυκλοφοριακός φόρτος, που εκφράζεται σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (ESAL) ως συνάρτηση του αξονικού φορτίου, του δείκτη λειτουργικότητας p_i και του δομικού αριθμού SN. Για νέα οδοστρώματα προτείνονται οι τιμές $p_i=2.5$ και $SN=5$. Ο αριθμός ισοδύναμων αξόνων στη λωρίδα μελέτης W_{18} υπολογίζεται ως

$$W_{18} = D_D D_L W_{18} \quad (5.1)$$

όπου D_D είναι το ποσοστό κατανομής αξόνων ανά κατεύθυνση (π.χ., 50% /

50%), D_L το ποσοστό κατανομής αξόνων στη λωρίδα μελέτης (π.χ., 80-100% για 2 λωρίδες ανά κατεύθυνση) και w_{18} ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων αξόνων για όλη τη χρονική διάρκεια και στις δύο κατευθύνσεις.

- β) Διάρκεια σχεδιασμού, η οποία αναφέρεται στην περίοδο ανάλυσης ή σχεδιαστική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (συνήθως 20 έτη ή και μέχρι 50 έτη) και στην περίοδο συμπεριφοράς, κατά τη διάρκεια της οποίας το οδόστρωμα χρειάζεται μόνο συντήρηση και όχι αποκατάσταση (ελάχιστη 10 χρόνια και μέγιστη 15-20 χρόνια).
- γ) Αξιοπιστία, που εκφράζεται ως η πιθανότητα R ικανοποιητικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος καθ'όλη τη διάρκεια σχεδιασμού (συνήθως $R=75-99\%$) και συνοδεύεται από την τυπική απόκλιση S_o (συνήθως $=0.40-0.50$).
- δ) Περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η διόγκωση υπεδάφους αργιλικής φύσης και η ανύψωση λόγω παγετού. Η επίδρασή τους συνίσταται στη μείωση της λειτουργικότητας οδοστρώματος ΔPSI , η οποία δίνεται από εμπειρικούς τύπους.

2. Στάθμες λειτουργικότητας

Λειτουργικότητα ονομάζεται η ικανότητα του οδοστρώματος να εξυπηρετεί την κυκλοφορία με άνεση, ασφάλεια και οικονομία. Η μεταβολή της λειτουργικότητας με το χρόνο ή με τον αριθμό των φορτίων που κυκλοφορούν, συνιστά την συμπεριφορά του οδοστρώματος. Η λειτουργικότητα έχει συνδεθεί με μετρήσεις της κατασκευής του οδοστρώματος, όπως με την επιφάνεια των επισκευών, το μήκος των ρωγμών, το βάθος των αυλακώσεων και την διακύμανση της κατά μήκος κλίσης, σε ένα ενιαίο δείκτη που ονομάζεται δείκτης λειτουργικότητας p_i .

Οι στάθμες λειτουργικότητας καθορίζονται από τον αρχικό, τον τελικό και τον παρόντα δείκτη λειτουργικότητας p_o , p_i και ΔPSI , αντίστοιχα. Συνήθεις τιμές των δεικτών αυτών είναι $p_o=5$ (πρακτικά 4.2), $p_i \geq 2.0$ ή 2.5, ενώ είναι $\Delta PSI=p_o-p_i$ και γ' αυτό ο δείκτης ΔPSI αναφέρεται επίσης και ως απώλεια λειτουργικότητας.

3. Ιδιότητες υλικών

- α) Μηχανικές ιδιότητες. Για υλικά, όπως βάσεις και ασφαλτομίγματα, οι ιδιότητες αυτές καθορίζονται από το μέτρο ελαστικότητας E (elastic modulus), ενώ για το υπέδαφος από το εποχιακά μεταβαλλόμενο μέτρο επανάκτησης M_r (resilient modulus) που ουσιαστικά είναι ένα μέτρο ελαστικότητας.
- β) Δομικοί συντελεστές στρώσεων α_i , που είναι συνάρτηση της μηχανικής αντοχής των στρώσεων. Με βάση αυτούς, ορίζονται ο δομικός αριθμός SN_i της στρώσης i ως $SN_i = \alpha_i D_i$ και ο συνολικός δομικός αριθμός

$$SN = \sum \alpha_i D_i \quad (5.2)$$

όπου D_i είναι το πάχος της στρώσης i . Οι συντελεστές α_i για ασφαλική στρώση, βάση και υπόβαση δίνονται από τα νομογραφήματα των Σχ.5.1-5.3, αντίστοιχα.

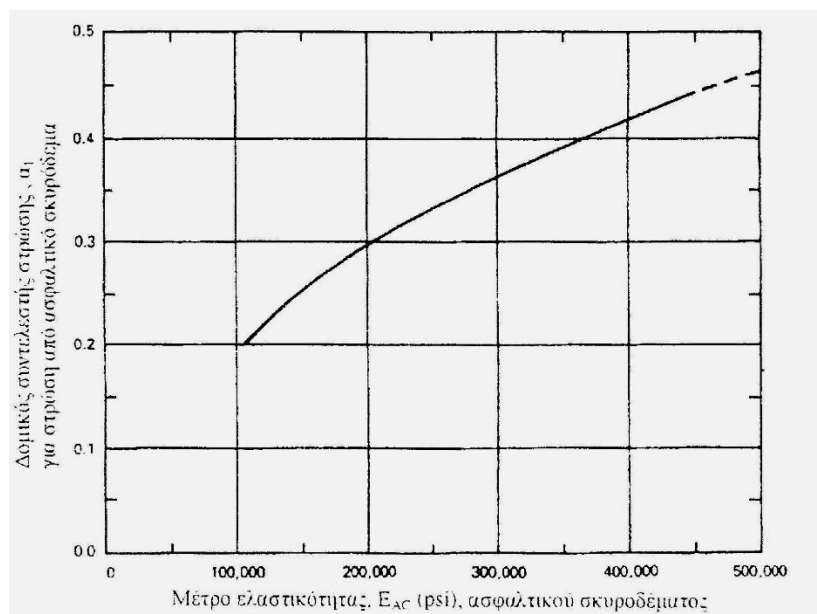
4. Αποστραγγιστική ικανότητα οδοστρώματος

Αφορά σε όλες τις στρώσεις εκτός της ασφαλικής. Αυτή η ικανότητα λαμβάνεται υπόψη με τη βοήθεια συντελεστών αποστράγγισης m_2, m_3, \dots που πολλαπλασιάζουν τους δομικούς συντελεστές a_2, a_3, \dots , αντίστοιχα στη σχέση (5.2). Οι συντελεστές αυτοί δίνονται από τον Πίνακα 5.1.

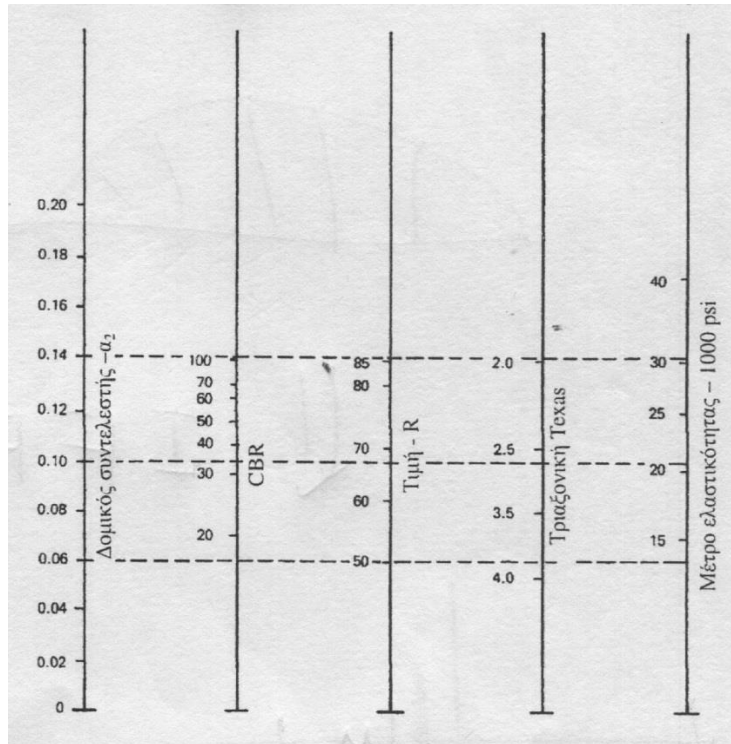
Αποστραγγιστική Ικανότητα	Ποσοστό χρόνου που το οδόστρωμα εκτίθεται σε υγρασία που πλησιάζει την κατάσταση κορεσμού			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Άριστη (Α.Υ. ⁽¹⁾ σε 2 ώρες)	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Καλή (Α.Υ. σε 1 μέρα)	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Αρκετά καλή (Α.Υ. σε 1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

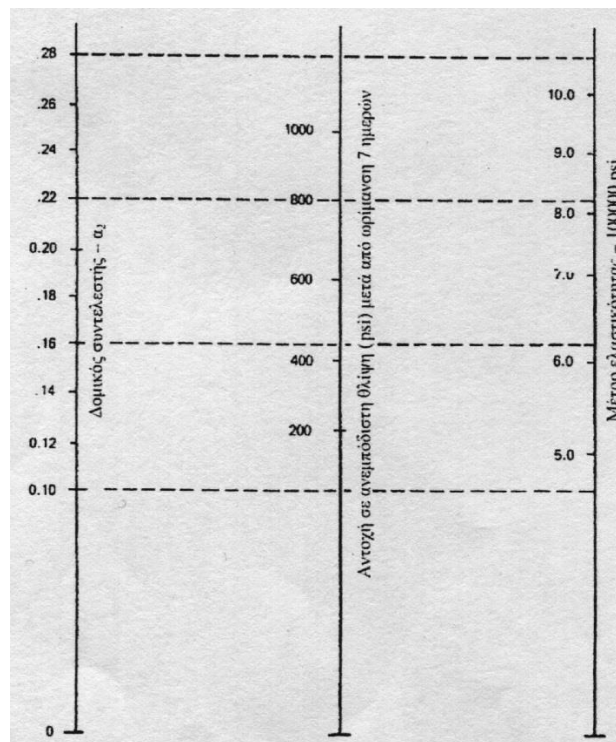
Πίνακας 5.1. Συντελεστές αποστράγγισης m_2, m_3, \dots (από Νικολαΐδη, 2002).



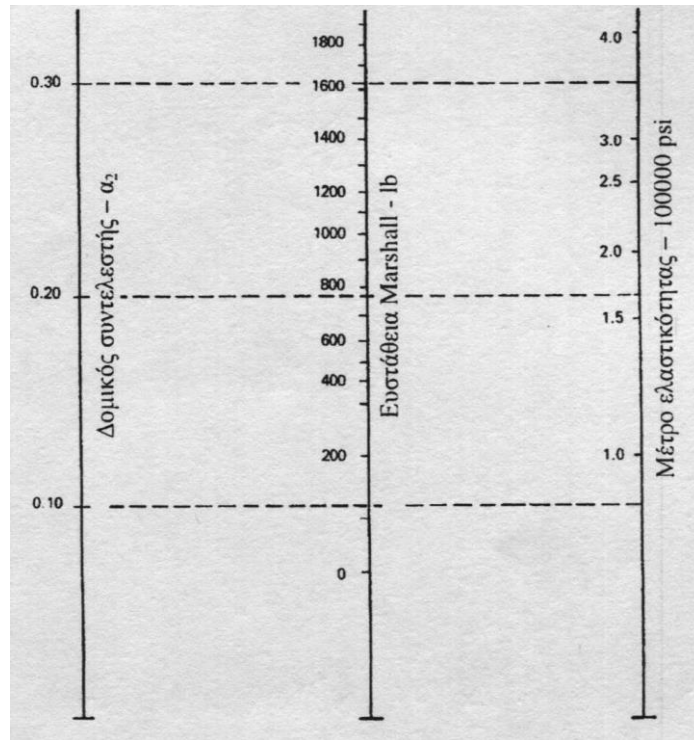
Σχήμα 5.1. Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστών στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα a_1 (από Νικολαΐδη, 2002).



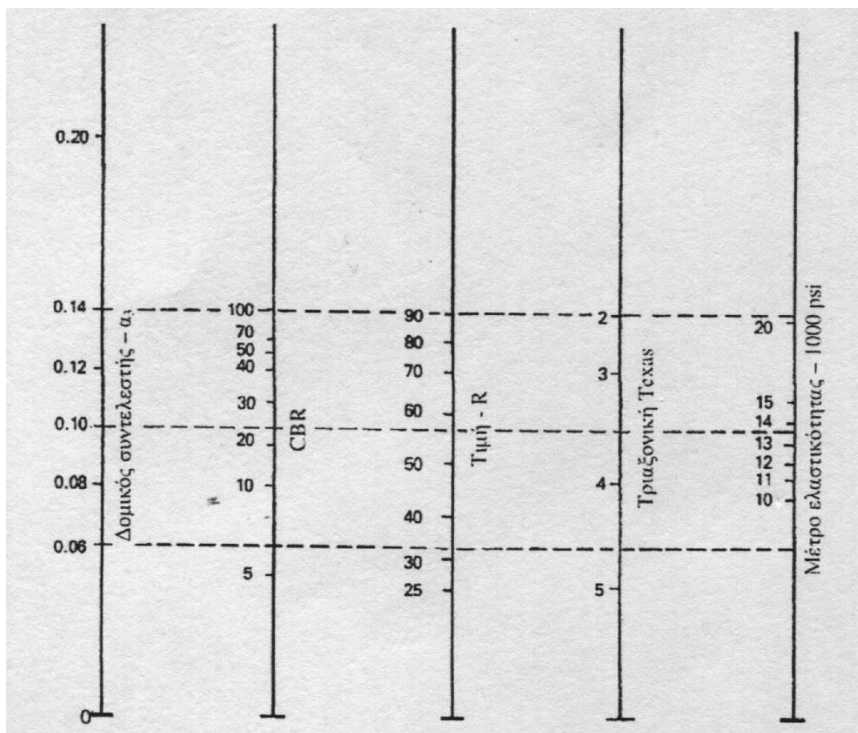
Σχήμα 5.2 α. Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ασύνδετα αδρανή (a_2) (από Νικολαΐδη, 2002).



Σχήμα 5.2 β. Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ισχύο σκυρόδεμα (a_2) (από Νικολαΐδη, 2002).



Σχήμα 5.2 c. Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών βάσης από ισχύο ασφαλτόμιγμα (α_2) (από Νικολαΐδη, 2002).



Σχήμα 5.3. Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστών υπόβασης από ασύνδετα αδρανή (α_3) (από Νικολαΐδη, 2002).

5.2.2. Διαστασιολόγηση με χρήση μεθόδου AASHTO

Η διαδικασία διαστασιολόγησης βασίζεται στο νομογράφημα του Σχ.5.4 με το οποίο μπορεί κανείς να προσδιορίσει τον δομικό αριθμό SN_i κάθε στρώσης και στη σχέση (5.2) με την οποία μπορεί κανείς να προσδιορίσει τα πάχη των στρώσεων D_i του οδοστρώματος. Η όλη διαδικασία προϋποθέτει ότι έχουν ήδη καθοριστεί και είναι γνωστά

- i) Ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων τυπικών αξόνων (ESAL) στη λωρίδα μελέτης
- ii) Η αξιοπιστία R και η τυπική της απόκλιση S_o .
- iii) Το μέτρο επανάκτησης M_r του υπεδάφους.
- iv) Η απώλεια του δείκτη λειτουργικότητας ΔPSI .

Αν υποθέσει κανείς οδόστρωμα με τρεις στρώσεις (ασφαλτική πάχους D_1 , βάση πάχους D_2 , υπόβαση πάχους D_3) επί υπεδάφους, όπως αυτό του Σχ. 5.5, η διαδικασία προσδιορισμού των παχών D_1 , D_2 , και D_3 (διαστασιολόγηση) έχει ως εξής:

- 1) Με χρήση του νομογραφήματος του Σχ.5.4 προσδιορίζονται οι δομικοί αριθμοί SN_1 , SN_2 και SN_3 .
- 2) Με χρήση των νομογραφημάτων των Σχ.5.1-5.3 προσδιορίζονται οι δομικοί συντελεστές a_1 , a_2 και a_3 .
- 3) Με χρήση της σχέσης (5.2) για $i=1$ προσδιορίζεται το ελάχιστο πάχος της πρώτης στρώσης ως

$$D_1 \geq SN_1 / a_1 \quad (5.3)$$

Αν χρειάζεται στρογγύλευση του D_1 προς τα πάνω και προκύψει νέα τιμή D_1^* , τότε θα πρέπει

$$SN_1^* = a_1 D_1^* > SN_1 \quad (5.4)$$

- 4) Με χρήση της σχέσης (5.2) για $i=2$ προσδιορίζεται το ελάχιστο πάχος της δεύτερης στρώσης ως

$$D_2 = (SN_2 - SN_1^*) / a_2 \quad (5.5)$$

Αν χρειάζεται στρογγύλευση του D_2 προς τα πάνω και προκύψει νέα τιμή D_2^* , τότε θα πρέπει

$$SN_2^* = D_2^* a_2 \quad , \quad SN_1^* + SN_2^* > SN_2 \quad (5.6)$$

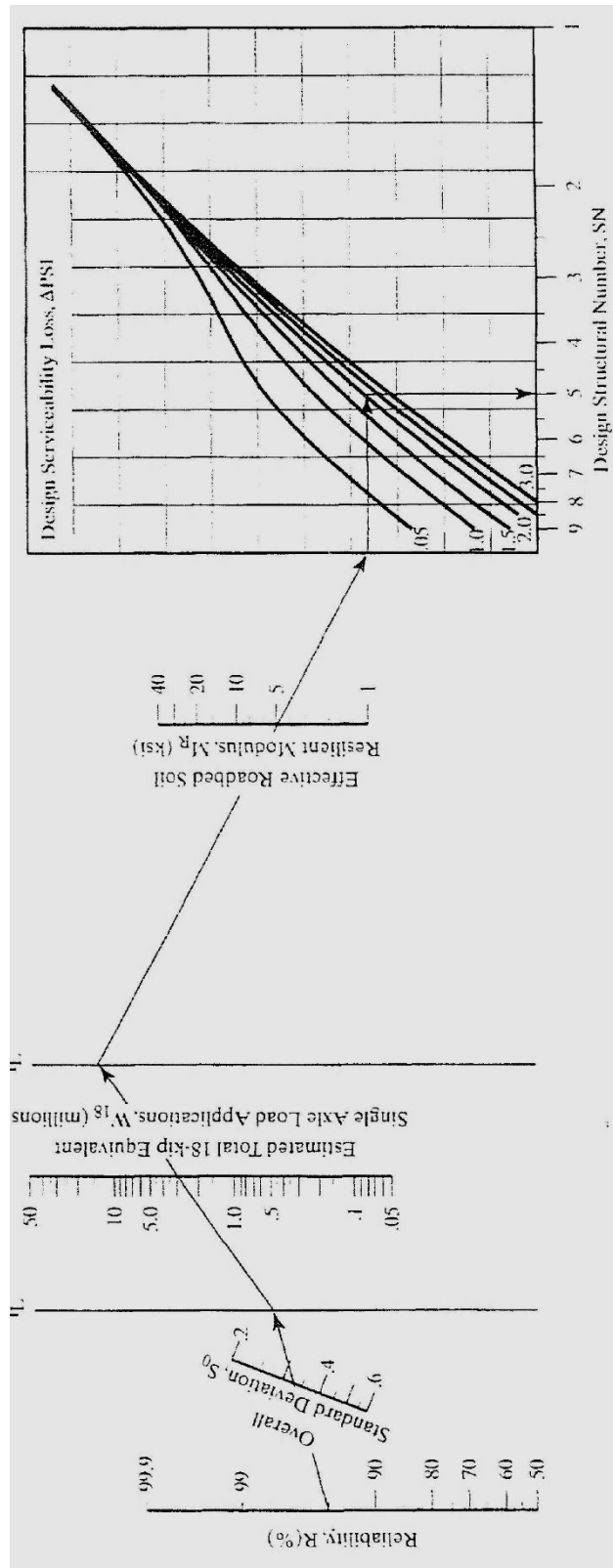
- 5) Με την ίδια όπως ανωτέρω διαδικασία υπολογίζεται και το πάχος D_3 ως

$$D_3 = [SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)] / a_3 \quad (5.7)$$

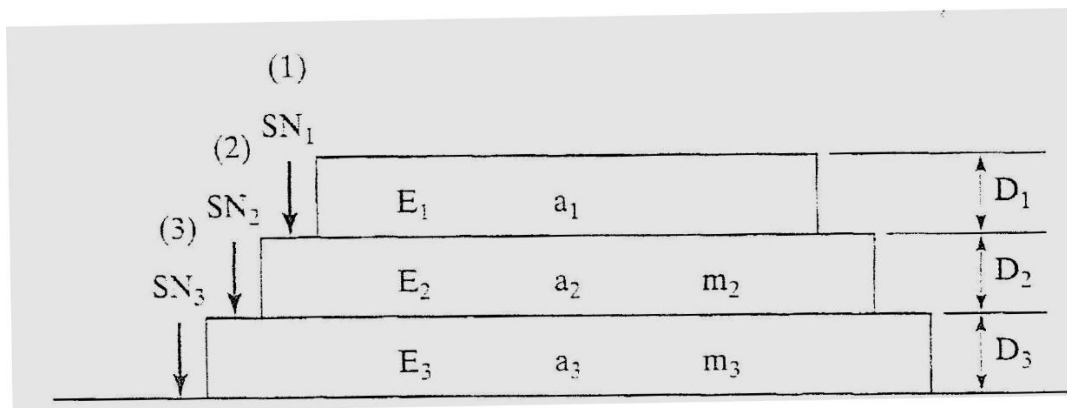
και αν χρειάζεται στρογγυλεύεται σε D_3^* και επακολουθεί έλεγχος του SN_3^* .

Ας σημειωθεί ότι στην ανωτέρω διαδικασία δεν ελήφθησαν υπόψη περιβαλλοντικοί παράγοντες καθώς και η επιρροή της ικανότητας αποστράγγισης.

Ο Πίνακας 5.2 που ακολουθεί, παρέχει τα ελάχιστα πάχη των στρώσεων εύκαμπτου οδοστρώματος ως συνάρτηση του κυκλοφοριακού φόρτου σε ESAL.



Σχήμα 5.4. Νομογράφημα προσδιορισμού δομικού αριθμού (SN) στρώσης και εύκαμπτου οδοστρώματος (από AASHTO, 1993).



Σχήμα 5.5. Τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα σε τομή.

Traffic (ESAL)	Asphalt concrete	Aggregate base
Less than 50,000	1.0	4
50,001–150,000	2.0	4
150,001–500,000	2.5	4
500,001–2,000,000	3.0	6
2,000,001–7,000,000	3.5	6
Greater than 7,000,000	4.0	6

Note. Minimum thickness is in in.: 1 in. = 25.4 mm.

Πίνακας 5.2. Ελάχιστο πάχος ασφαλτικής στρώσης και βάσης αδρανών συναρτήσει κυκλοφοριακού φορτίου (από AASHTO, 1993).

5.3. Κριτήρια αστοχίας εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Οι υπάρχουσες μέθοδοι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, δηλαδή ο προσδιορισμός κατάλληλων υλικών και παχών των στρώσεων αυτών, μπορούν να καταταγούν σε δύο κυρίως κατηγορίες (Huang, 2004): τις εμπειρικές μεθόδους, που βασίζονται κυρίως σε εμπειρικές εξισώσεις από πειράματα πεδίου σε οδοστρώματα (AASHTO, 1962) και τις μηχανιστικές-εμπειρικές, που συνδυάζουν αρχές της μηχανικής για τον προσδιορισμό της απόκρισης του οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις) σε επιβαλλόμενα φορτία οχημάτων με εμπειρικές σχέσεις καταπόνησης-αστοχίας. Οι σύγχρονοι κανονισμοί σχεδιασμού οδοστρωμάτων έχουν αρχίσει να βασίζονται σε μεθόδους της δεύτερης κατηγορίας, αν και στη πράξη γίνεται κυρίως χρήση μεθόδων της πρώτης κατηγορίας.

Στο κεφάλαιο 4 έγινε περιγραφή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων υπό στατική φόρτιση και ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Έχοντας λοιπόν κανείς αυτή την απόκριση, μπορεί να χρησιμοποιήσει εμπειρικά κριτήρια αστοχίας που είναι συναρτήσεις αυτής της απόκρισης και να επιτύχει τον σχεδιασμό του οδοστρώματος. Στα εύκαμπτα

οδοστρώματα τα δύο πλέον σημαντικά κριτήρια αστοχίας είναι αυτά που ασχολούνται με την ρηγμάτωση λόγω κόπωσης (fatigue cracking) της ασφαλικής άνω στρώσης και την αυλάκωση (rutting) της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Το κριτήριο ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης σε εύκαμπτα οδοστρώματα βασίζεται στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στην κάτω επιφάνεια της ασφαλικής στρώσης. Το κριτήριο αστοχίας συσχετίζει τον επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων (διελεύσεων) φορτίου με την ανωτέρω εφελκυστική παραμόρφωση. Η αυλάκωση, η οποία συμβαίνει μόνο σε εύκαμπτα οδοστρώματα, προέρχεται από την παραμένουσα παραμόρφωση κατά μήκος των τροχιών των τροχών των οχημάτων. Το βασικό κριτήριο αστοχίας αυλάκωσης βασίζεται στην κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση της άνω επιφάνειας της στρώσης έδρασης. Το κριτήριο αστοχίας συσχετίζει τον επιτρεπόμενο αριθμό επαναλήψεων φορτίου με την ανωτέρω θλιπτική παραμόρφωση (Huang, 2004).

Τα ανωτέρω κριτήρια αστοχίας έχουν τη γενική μορφή

$$N_f = f_1 (\varepsilon_t)^{-f_2} \quad (5.8)$$

$$N_d = f_3 (\varepsilon_z)^{-f_4} \quad (5.9)$$

όπου N_f και N_d είναι ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου για δημιουργία ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης και αυλάκωσης λόγω αστοχίας στρώσης έδρασης, αντίστοιχα, ε_t και ε_z οι παραμορφώσεις στην κάτω επιφάνεια της ασφαλικής στρώσης (εφελκυσμός) και της άνω επιφάνειας της στρώσης έδρασης (θλίψη), αντίστοιχα, και f_1, f_2, f_3, f_4 εμπειρικοί συντελεστές. Το αναφερόμενο φορτίο είναι το ισοδύναμο 18 kips=80 kN φορτίο μονού άξονα με διπλούς τροχούς.

Ως παραδείγματα τέτοιων κριτηρίων μπορεί να αναφέρει κανείς αυτό του Illinois Department of Transportation του 1987

$$N_f = 5 \cdot 10^{-6} (\varepsilon_t)^{-3} \quad (5.10)$$

και της Εταιρείας Shell του 1985

$$N_d = 1.05 \cdot 10^{-7} (\varepsilon_z)^{-4} \quad (5.11)$$

για ρηγμάτωση και αυλάκωση, αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα κριτήρια αστοχίας με άλλες τιμές των f_1, f_2, f_3 και f_4 στις σχέσεις (5.8) και (5.9) μπορεί να βρει κανείς στο βιβλίο του Huang (2004).

Ο δείκτης βλάβης D_r ορίζεται ως ο λόγος του προσδιορισθέντος ως προς τον επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων και υπολογίζεται για κάθε ομάδα φορτίων σε κάθε περίοδο και αθροίζεται για ένα χρόνο. Έτσι έχει κανείς ότι (Miner, 1945 ; Huang, 2004)

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,j}}{N_{i,j}} \quad (5.12)$$

όπου D_r είναι ο δείκτης βλάβης στο τέλος του χρόνου, $n_{i,j}$ είναι ο προσδιορισθείς αριθμός επαναλήψεων φορτίου για το φορτίο j στην περίοδο i , $N_{i,j}$ είναι ο επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων φορτίου που υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις (5.8) και (5.9), p είναι ο αριθμός περιόδων σε κάθε χρόνο και m είναι ο αριθμός ομάδων φορτίου. Η ζωή σχεδιασμού του οδοστρώματος ορίζεται ως $1/D_r$,

υπολογίζεται και για τα δύο ανωτέρω κριτήρια και η μικρότερη τιμή του είναι αυτή που ελέγχει τον σχεδιασμό.

6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

6.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4 για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, ο προσδιορισμός της απόκρισης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε κυκλοφοριακά φορτία αποτελεί βασική συνιστώσα της διαδικασίας σχεδιασμού τους και του τρόπου εκτίμησης των βλαβών τους.

Το κεφάλαιο αυτό περιορίζεται στον προσδιορισμό της στατικής ελαστικής απόκρισης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε ακίνητα φορτία οχημάτων με χρήση αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, όπως και στην αντίστοιχη περίπτωση του κεφαλαίου 4 για τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Προσδιορισμός της στατικής ελαστικής απόκρισης με βάση αρχές της μηχανικής και συνδυασμός αυτής με εμπειρικά κριτήρια αστοχίας οδηγούν στις λεγόμενες μηχανιστικές-εμπειρικές μεθόδους σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, οι οποίες και αποτελούν βελτιωμένη εξέλιξη των καθαρά εμπειρικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στους υπάρχοντες κανονισμούς.

6.2. Αναλυτικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης

Η απλούστερη προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων επιτυγχάνεται με μία λεπτή οριζόντια καμπτική πλάκα (πλάκα σκυροδέματος) που εδράζεται πάνω στον ελαστικό ημίχωρο (υπεδάφος) και καταπονείται από κατακόρυφα διανεμημένα επί κυκλικών πεπερασμένων επιφανειών φορτία (τροχοί οχήματος). Η εξίσωση που διέπει την συμπεριφορά του ανωτέρω προσομοιώματος έχει τη μορφή

$$D \nabla^4 w + k w = q \quad (6.1)$$

όπου $w=w(x,y)$ είναι η κατακόρυφη μετατόπιση της πλάκας ως συνάρτηση των δύο συντεταγμένων x και y στο οριζόντιο επίπεδο, $q=q(x,y)$ το διανεμημένο φορτίο, k το μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους που ορίστηκε στο κεφάλαιο 2, D η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας της μορφής

$$D = E h^3 / 12 (1-\nu^2) \quad (6.2)$$

με h , E και ν να είναι το πάχος, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson της πλάκας και τέλος ∇ να είναι ο διαφορικός τελεστής

$$\nabla^4 w = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \quad (6.3)$$

Η προσομοίωση της αντίδρασης του υπεδάφους στην πλάκα με τον όρο kw στην εξίσωση (6.1) είναι γνωστή και ως προσομοίωση με ελατήρια Winkler.

Αναλυτική επίλυση της εξίσωσης (6.1) είναι δυνατή μόνο για ορισμένες συνοριακές συνθήκες, π.χ., για απλές στηρίξεις και στις τέσσερις πλευρές της πλάκας ή με χρήση ορισμένων απλοποιητικών παραδοχών. Έχοντας προσδιορίσει την

$w=w(x,y)$, μπορεί κανείς να υπολογίσει τις καμπτικές ροπές M_x , M_y και M_{xy} και από εκεί τις αντίστοιχες τάσεις και παραμορφώσεις. Ο Westergaard (1926, 1933, 1939, 1948) σε μία σειρά εργασιών του πέτυχε να εξαγάγει προσεγγιστικές αναλυτικές λύσεις για μέγιστες τάσεις σ και κατακόρυφες μετατοπίσεις Δ για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης της πλάκας με κυκλικά διανεμημένο φορτίο ενός τροχού. Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε φόρτιση στη γωνία (c=corner), στο εσωτερικό κέντρο (i=interior) και στο μέσο ακραίας πλευράς (e=edge), όπως φαίνεται στο Σχ.6.1 και έχουν ως εξής για $\nu=0.15$:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (6.4)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (6.5)$$

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (6.6)$$

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\alpha}{2l} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{\alpha}{l} \right)^2 \right\} \quad (6.7)$$

$$\sigma_{ec} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{\alpha} \right) + 0.666 \left(\frac{\alpha}{l} \right) - 0.034 \right] \quad (6.8)$$

$$\Delta_{ec} = \frac{0.431P}{kl^2} \left[1 - 0.82 \left(\frac{\alpha}{l} \right) \right] \quad (6.9)$$

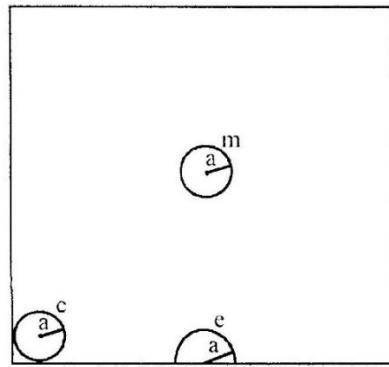
$$\sigma_{esc} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{\alpha} \right) + 0.282 \left(\frac{\alpha}{l} \right) + 0.650 \right] \quad (6.10)$$

$$\Delta_{esc} = \frac{0.431P}{kl^2} \left[1 - 0.349 \left(\frac{\alpha}{l} \right) \right] \quad (6.11)$$

όπου οι υποδείκτες ec=edge circle και esc=edge semi-circle (Σχ.6.1), P είναι το συγκεντρωμένο φορτίο που δρα σε κυκλική επιφάνεια ακτίνας α , k και h είναι το μέτρο αντίδρασης εδάφους και το πάχος της πλάκας, αντίστοιχα, $l=(D/k)^{0.25}$ είναι η ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας μεταξύ πλάκας και υπεδάφους και \log και \ln συμβολίζουν λογαρίθμους με βάση 10 και e, αντίστοιχα. Τέλος η διάσταση b δίνεται ως

$$\begin{aligned} b &= \alpha \quad \text{όταν} \quad \alpha \geq 1.724h \\ b &= \sqrt{1.6\alpha^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{όταν} \quad \alpha < 1.724h \end{aligned} \quad (6.12)$$

Ας σημειωθεί ότι οι τύποι (6.8)-(6.11) είναι από τους Ioannides et al (1985), αφού οι αντίστοιχοι του Westergaard είναι χαμηλής ακρίβειας. Οι Pickett and Ray (1951) κατασκεύασαν νομογραφήματα για τον υπολογισμό ροπών και μετατοπίσεων κατά Westergaard και για φορτίσεις στο εσωτερικό και στο μέσο ακραίας πλευράς. Τα νομογραφήματα αυτά είναι όμως πολυπλοκότερα και δεν χρησιμοποιούνται πλέον, αφού μπορεί εύκολα κανείς να χρησιμοποιήσει τις σχέσεις (6.8)-(6.11) ή αριθμητικές μεθόδους.



m = Μέσο πλάκας
 e = Ακμή πλάκας
 c = Γωνία πλάκας
 $\mu = 0.15$

Σχήμα 6.1. Κρίσιμα σημεία φόρτισης πλάκας κατά Westergaard (από Νικολαΐδη, 2002)

Μία πολύ ακριβέστερη προσομοίωση του προβλήματος είναι αυτή που θεωρεί την πλάκα να εδράζεται επί εδαφικών στρώσεων αντί εδαφικών ελατηρίων Winkler. Στην περίπτωση αυτή όμως, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με αριθμητικές μεθόδους.

Τάσεις επίσης αναπτύσσονται στην πλάκα όχι μόνο εξαιτίας κυκλοφοριακού φόρτου αλλά και λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, που οδηγούν σε διαστολή, συστολή και κύρτωση καθώς και λόγω τριβών στη διεπιφάνεια πλάκας-υπεδάφους. Λεπτομέρειες για αυτές τις τάσεις μπορούν να βρεθούν στα βιβλία των Huang (2004) και Νικολαΐδης (2002).

6.3. Αριθμητικές μέθοδοι στατικής ελαστικής ανάλυσης

Είναι γνωστό ότι πολύπλοκα προβλήματα ανάλυσης των κατασκευών επιλύονται μόνο με αριθμητικές μεθόδους, εκ των οποίων η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) χρησιμοποιείται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα. Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται πολύ περιληπτικά η εφαρμογή της ΜΠΣ στην στατική ελαστική ανάλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί κανείς να συμβουλευτεί το βιβλίο του Huang (2004) στο οποίο βασίζεται το παρόν υποκεφάλαιο.

Σύμφωνα λοιπόν με το πρόγραμμα ΜΠΣ KENSLABS (Huang 2004), η πλάκα διακριτοποιείται σε ένα αριθμό ορθογωνικών πεπερασμένων στοιχείων με ένα μεγάλο αριθμό κόμβων και τα φορτία των τροχών αλλά και αυτά λόγω αντιδράσεων του υπεδάφους εφαρμόζονται στην πλάκα ως κατακόρυφες συγκεντρωμένες δυνάμεις στους κόμβους. Το πρόγραμμα μπορεί να αντιμετωπίσει τρία είδη προσομοιώματος της αντίδρασης του υπεδάφους (θεμελίωσης). Αντίδραση λόγω ελατηρίων Winkler, αντίδραση λόγω ελαστικού ημίχωρου και αντίδραση λόγω στρωσιγενούς συστήματος υπεδάφους.

Στην περίπτωση ελατηρίων Winkler με μέτρο αντίδρασης k που δρουν στους τέσσερεις γωνιακούς κόμβους ενός ορθογωνικού πεπερασμένου στοιχείου πλευρών $2a \times 2b$, δοθέντος ότι η μοναδιαία πίεση $p = kw$ (βλέπε εξίσωση (6.1)), η δύναμη στον τυχόντα κόμβο i του στοιχείου λόγω αντίδρασης του υπεδάφους θα είναι

$$F_{wi} = k \alpha b w_i \quad (6.13)$$

Η ανωτέρω κομβική δύναμη εφαρμόζεται ως έχει αν ο κόμβος είναι σε γωνία της πλάκας. Αν όμως ο κόμβος είναι σε άκρη της πλάκας ή εσωτερικός, χρειάζεται επαλληλία δύο ή τεσσάρων συντρεχόντων εκεί στοιχείων για να βρεθεί η επικόμβια δύναμη αντίδρασης. Το μητρώο δυσκαμψίας της αντίδρασης υπεδάφους για όλη την πλάκα καταλήγει να είναι διαγώνιο λόγω της μορφής (6.13) και αυτό καταδεικνύει την απλότητα αυτής της προσομοίωσης εδάφους.

Στην περίπτωση αντίδρασης λόγω ελαστικού ημίχωρου μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει την μετατόπιση κατά Boussinesq (1885) στην επιφάνεια του ημίχωρου (εξίσωση (4.17)) και να εκφράσει τη μετατόπιση $w_{i,j}$ στον κόμβο i λόγω φορτίου P_j στον κόμβο j με την μορφή

$$w_{i,j} = P_j \frac{(1-\nu_f^2)}{\pi E_f d_{i,j}} \quad (6.14)$$

όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j και E_f και ν_f είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson του υπεδάφους (ημίχωρου). Η ανωτέρω Εξ.(6.14) για $P_j=1$ χρησιμοποιείται για την εύρεση του μητρώου ευκαμψίας στην όλη επιφάνεια του ημίχωρου (η περίπτωση $i=j$ για την οποία $d_{i,j}=0$ αντιμετωπίζεται προσεγγιστικά-αριθμητικά). Αντιστροφή του μητρώου ευκαμψίας δίνει το μητρώο δυσκαμψίας, το οποίο τώρα είναι πλήρες και όχι διαγώνιο, όπως στην προηγούμενη περίπτωση.

Στην περίπτωση αντίδρασης λόγω στρωσιγενούς συστήματος υπεδάφους το μητρώο δυσκαμψίας της αντίδρασης αυτής μπορεί να βρεθεί με παρόμοιο τρόπο, όπως προηγουμένως, αλλά χρησιμοποιώντας αντί της (6.14) την αντίστοιχη και πολύ πιο πολύπλοκη σχέση της θεωρίας Burmister (1943, 1945, 1958).

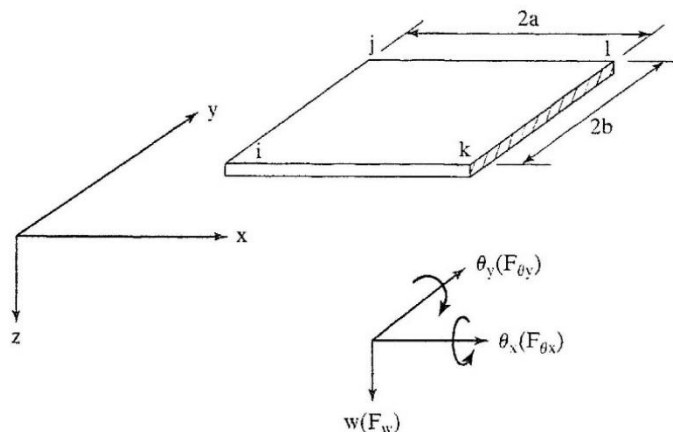
Το σημαντικότερο στοιχείο της ΜΠΣ για την ανάλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η κατασκευή του μητρώου δυσκαμψίας της πλάκας σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται το απλούστερο ορθογωνικό στοιχείο της πλάκας με 4 κόμβους (στις 4 γωνίες του) και 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μία κατακόρυφη μετατόπιση και δύο στροφές), όπως φαίνεται στο Σχ.6.2. Η κατακόρυφη μετατόπιση w της πλάκας επιλέγεται να είναι πολυώνυμο τετάρτου βαθμού ως προς x και y με 12 όρους αφού ο συνολικός αριθμός βαθμών ελευθερίας στο στοιχείο είναι $3 \cdot 4 = 12$. Ακολουθώντας τη γνωστή διαδικασία, μπορεί κανείς να κατασκευάσει το μητρώο δυσκαμψίας $12 \cdot 12 [K_p]^e$ του στοιχείου πλάκας του Σχ.6.2 έτσι ώστε

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_k \\ F_l \end{Bmatrix} = [K_p]^e \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \\ \delta_l \end{Bmatrix} \quad (6.15)$$

όπου για κάθε κόμβο i είναι

$$F_i = \{F_{wi}, M_{\theta_{xi}}, M_{\theta_{yi}}\}^T, \quad \delta_i = \{w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}\} \quad (6.16)$$

Το μητρώο δυσκαμψίας της όλης πλάκας κατασκευάζεται με επαλληλία των μητρώων δυσκαμψίας της μορφής (6.15) όλων των στοιχείων στα οποία αυτή διακριτοποιήθηκε.



Σχήμα 6.2. Ορθογωνικό πεπερασμένο στοιχείο καμπτικής πλάκας και επικόμβιοι βαθμοί ελευθερίας του.

Επειδή στα δύσκαμπτα οδοστρώματα υπάρχουν αρμοί (joints), οι οποίοι μεταφέρουν κατακόρυφες διατμητικές δυνάμεις από πλάκα σε πλάκα μέσω χαλύβδινων ράβδων σύνδεσης (dowel bars), χρειάζεται να υπολογιστεί και η δυσκαμψία των ράβδων αυτών. Ουσιαστικά η δυσκαμψία αυτή προσομοιώνεται με κατακόρυφα κομβικά ελατήρια κατά μήκος του αρμού και έχει τη μορφή

$$k_i = L C_w \quad (6.17)$$

όπου L είναι η απόσταση κόμβων στον αρμό και C_w δίνεται ως συνάρτηση του πλάτους του αρμού και των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων της ράβδου σύνδεσης.

Τελικά, με κατάλληλη επαλληλία των δυσκαμψιών πλάκας, υπεδάφους (θεμελίωσης) και αρμών μπορεί κανείς να βρει την ολική δυσκαμψία $[K]$ της κατασκευής του δύσκαμπτου οδοστρώματος και να σχηματίσει την μητρωϊκή εξίσωση

$$\{F\} = [K] \{\Delta\} \quad (6.18)$$

όπου $\{F\}$ και $\{\Delta\}$ είναι τα επικόμβια διανύσματα εξωτερικών δυνάμεων (από φόρτιση τροχών οχήματος) και γενικευμένων μετατοπίσεων (μετατοπίσεις και στροφές), αντίστοιχα. Επίλυση της εξίσωσης (6.18) δίνει τις μετατοπίσεις από τις οποίες μπορεί κανείς να προσδιορίσει ροπές και τάσεις στους κόμβους και στο εσωτερικό κάθε στοιχείου.

Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα ανωτέρω, μπορεί κανείς να συμβουλευτεί την περιγραφή και τις εφαρμογές του προγράμματος KENSLABS του

Πανεπιστημίου Kentucky των Η.Π.Α. στο βιβλίο του Huang (2004). Άλλα παρόμοια με το KENSLABS προγράμματα ΜΠΣ για στατική ελαστική ανάλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το ILLI-SLAB του Πανεπιστημίου Illinois των Η.Π.Α., το JSLAB της Portland Cement Association και άλλα. Όπως αναφέρθηκε όμως και στο κεφάλαιο 4, τα τελευταία χρόνια, ο συνήθης τρόπος αναλύσεων δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με τη ΜΠΣ είναι με χρήση των προγραμμάτων γενικού σκοπού ANSYS (2010) και ABAQUS (2013).

7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

7.1. Εισαγωγή

Για τον πρακτικό υπολογισμό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται διάφορες εμπειρικές μέθοδοι, όπως και στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί και μέθοδοι σχεδιασμού, οι οποίες συνδυάζουν αρχές και μεθόδους της μηχανικής για τον προσδιορισμό της απόκρισης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων με εμπειρικά κριτήρια αντοχής των οδοστρωμάτων αυτών. Στο κεφάλαιο 6 των σημειώσεων αυτών περιγράφονται αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της απόκρισης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, ενώ στο τελευταίο υποκεφάλαιο του παρόντος κεφαλαίου αναφέρονται κριτήρια αστοχίας για σχεδιασμό.

Επειδή στην πράξη γίνεται κυρίως χρήση εμπειρικών μεθόδων σχεδιασμού, η έμφαση στο κεφάλαιο αυτό δίνεται σε αυτή την κατηγορία μεθόδων. Οι κυριότερες εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι

1. Η μέθοδος AASHTO των Η.Π.Α.
2. Η μέθοδος της Portland Cement Association των Η.Π.Α.

Και οι δύο ανωτέρω μέθοδοι περιγράφονται εκτενώς στο βιβλίο του Huang (2004), ενώ η πρώτη και στο βιβλίο του Νικολαΐδη (2002). Στις παρούσες σημειώσεις περιγράφεται κατωτέρω μόνο η μέθοδος AASHTO (1993), επειδή είναι η πλέον γνωστή και η συνηθέστερα εφαρμοζόμενη στην πράξη.

7.2. Μέθοδος σχεδιασμού AASHTO

7.2.1. Βασικές παράμετροι μεθόδου

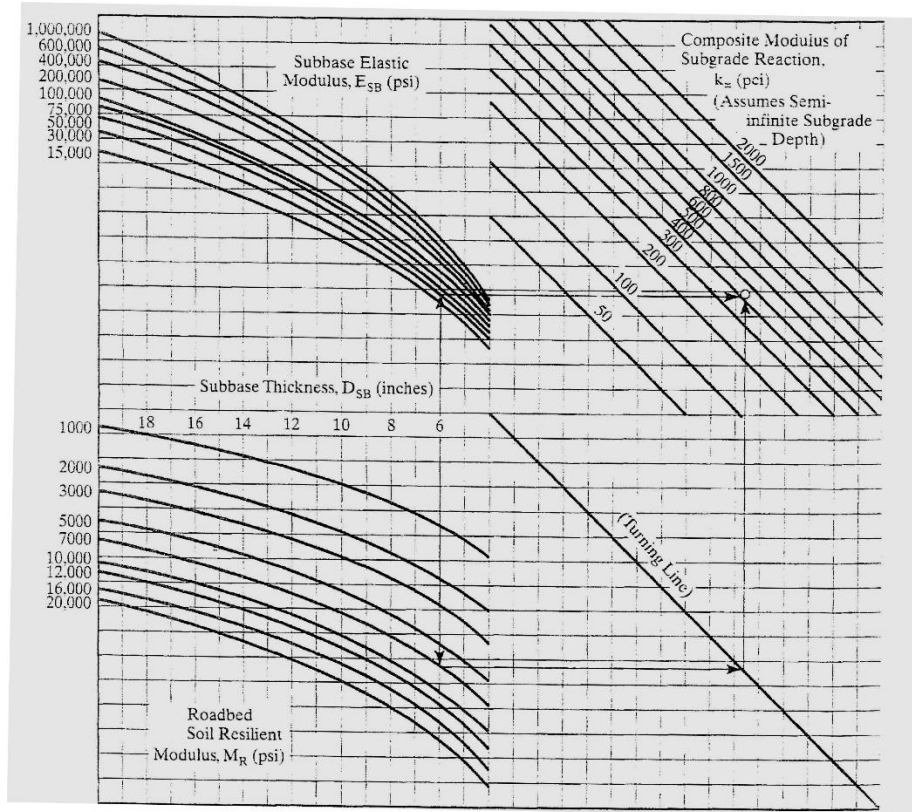
Η μέθοδος σχεδιασμού δύσκαμπτων οδοστρωμάτων AASHTO (1993) είναι μία εμπειρική μέθοδος που βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα πεδίου (AASHTO Road Test, 1962), παρατηρήσεις από κατασκευασθέντα οδοστρώματα και λίγη θεωρία.

Ένα τυπικό δύσκαμπτο οδοστρώμα αποτελείται από την υπόβαση, η οποία εδράζεται στο υπέδαφος και την άοπλη ή οπλισμένη πλάκα σκυροδέματος, η οποία εδράζεται στην υπόβαση. Η τελευταία μπορεί και να μην υπάρχει, οπότε η πλάκα εδράζεται κατευθείαν επί του υπεδάφους.

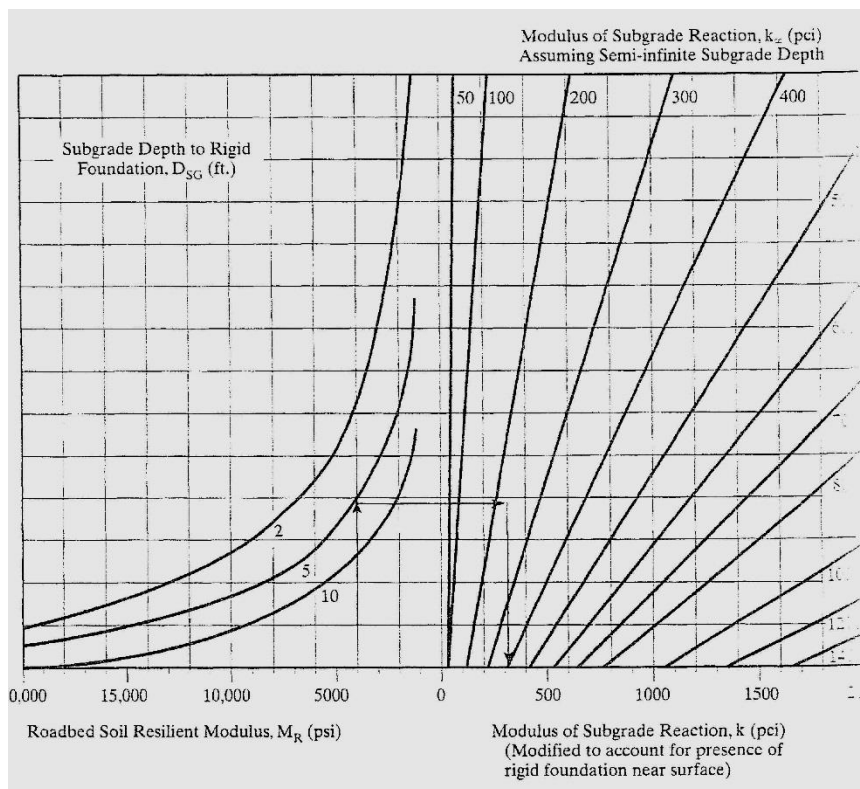
Η μέθοδος AASHTO έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του απαιτούμενου πάχους της πλάκας σκυροδέματος, ο οποίος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων με κυριότερη αυτή του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους και μερικές από αυτές να είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται και κατά το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα οι σχεδιαστικές παράμετροι της μεθόδου είναι

1. Κυκλοφοριακός φόρτος (ESAL), όπως στο υποκεφάλαιο 5.2.1.
2. Διάρκεια σχεδιασμού, όπως στο υποκεφάλαιο 5.2.1.
3. Αξιοπιστία R και τυπική απόκλιση S_o , όπως στο υποκεφάλαιο 5.2.1.
4. Παρών δείκτης λειτουργικότητας ΔPSI, όπως στο υποκεφάλαιο 5.2.1.

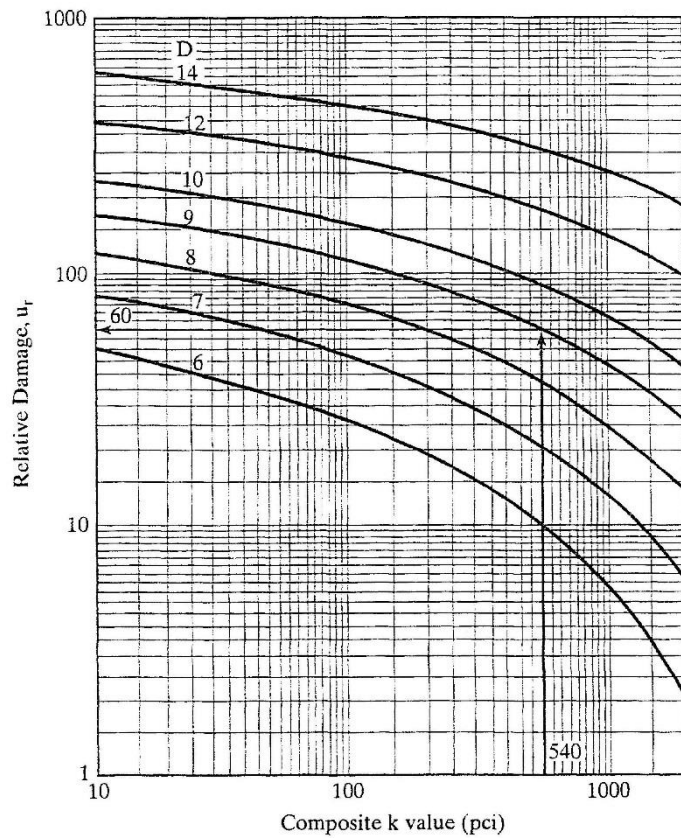
5. Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος $E_c=57000(f_c')^{0.5}$, σε psi, όπου f_c' είναι η θλιπτική αντοχή του σε psi.
6. Μέτρο καμπτικής αντοχής σκυροδέματος (modulus of rupture) S_c σε psi.
7. Εποχιακό μέτρο επανάκτησης M_R του υπεδάφους (συνήθως για κάθε μήνα).
8. Εποχιακό μέτρο ελαστικότητας E_{SB} υπόβασης (συνήθως για κάθε μήνα).
9. Μέτρο αντίδρασης k του υπεδάφους, όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 6. Ο υπολογισμός του k γίνεται με τη βοήθεια της παρακάτω διαδικασίας
 - i) Το k αρχικά υπολογίζεται για κάθε μήνα με τη βοήθεια του νομογραφήματος του Σχ.7.1 για γνωστές τιμές των M_R , E_{SB} και του πάχους D_{SB} της υπόβασης. Το k αυτό ονομάζεται σύνθετο k_∞ διότι αντιστοιχεί σε σύστημα υπόβασης-υπεδάφους και το υπέδαφος αυτό είναι ο ελαστικός ημίχωρος που εκτείνεται στο άπειρο. Αν δεν υπάρχει υπόβαση, τότε $k=M_R/19.4$.
 - ii) Αν υπάρχει βραχώδες υπόστρωμα κοντά στην επιφάνεια του υπεδάφους (μέχρι και 10ft), υπολογίζεται νέο διορθωμένο k από το νομογράφημα του Σχ.7.2.
 - iii) Υπολογίζεται ο συντελεστής σχετικής βλάβης της πλάκας u_r με τη βοήθεια του νομογραφήματος του Σχ.7.3, για την τιμή του σύνθετου (διορθωμένου) k του βήματος ii) και την υπόθεση ενός προσεγγιστικού πάχους D της πλάκας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλους τους 12 μήνες ενός έτους και προσδιορίζεται το \bar{u}_r ως μέσος όρος των $12u_r$.
 - iv) Με βάση την \bar{u}_r χρησιμοποιώντας πάλι το νομογράφημα του Σχ.7.3 βρίσκει κανείς την ενεργό τιμή του μέτρου αντίδρασης k .
 - v) Τέλος, χρήση του νομογραφήματος του Σχ.7.4 και γνώση του συντελεστή απώλειας φέρουσας ικανότητας στρώσης έδρασης πλάκας LS (με τιμές από 0.0 ως 3.0 για διάφορα υλικά της έδρασης πλάκας και μέση τιμή 1.5) δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του διορθωμένου ενεργού μέτρου αντίδρασης (που είναι η σωστή τιμή του k που ζητούσε κανείς) ως συνάρτηση του ενεργού k που προέκυψε από το βήμα iv).
10. Συντελεστής μεταφοράς J , ο οποίος εκφράζει την δυνατότητα της πλάκας σκυροδέματος να μεταφέρει φορτίο μέσω αρμών και ρωγμών με τη βοήθεια των ράβδων ενίσχυσης και σύνδεσης. Μία χαρακτηριστική τιμή του J είναι 3.0.
11. Συντελεστής αποστράγγισης C_d που κυμαίνεται μεταξύ 0.70 και 1.25 με την τιμή 1.0 να αποτελεί μία καλή ενδιάμεση τιμή.



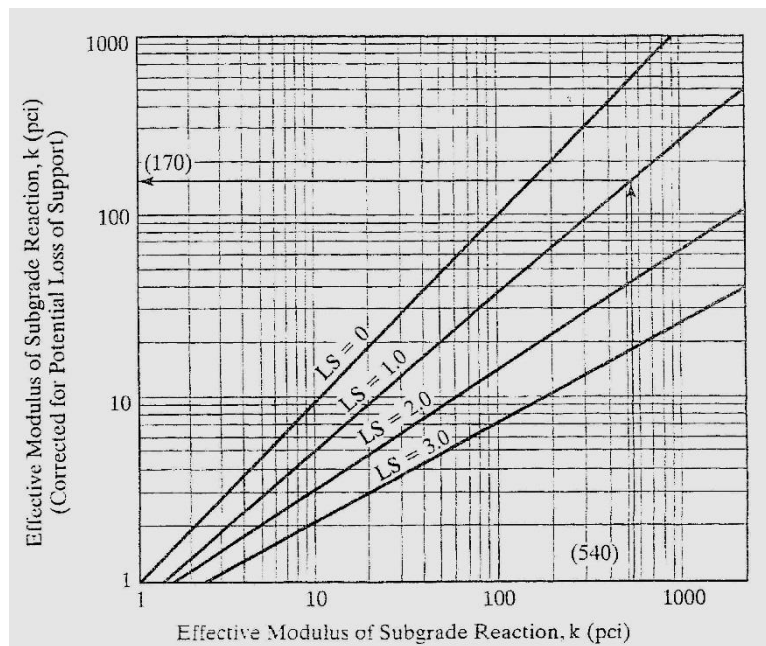
Σχήμα 7.1. Νομογράφημα υπολογισμού του μέτρου αντίστασης k του υπεδάφους κατά AASHTO (1993).



Σχήμα 7.2. Νομογράφημα υπολογισμού του τροποποιημένου μέτρου αντίδρασης k του υπεδάφους κατά AASHTO (1993).



Σχήμα 7.3. Νομογράφημα υπολογισμού της σχετικής βλάβης u_r δύσκαμπτων οδοστρωμάτων συναρτήσει του σύνθετου μέτρου αντίδρασης k του υπεδάφους κατά AASHTO (1993).



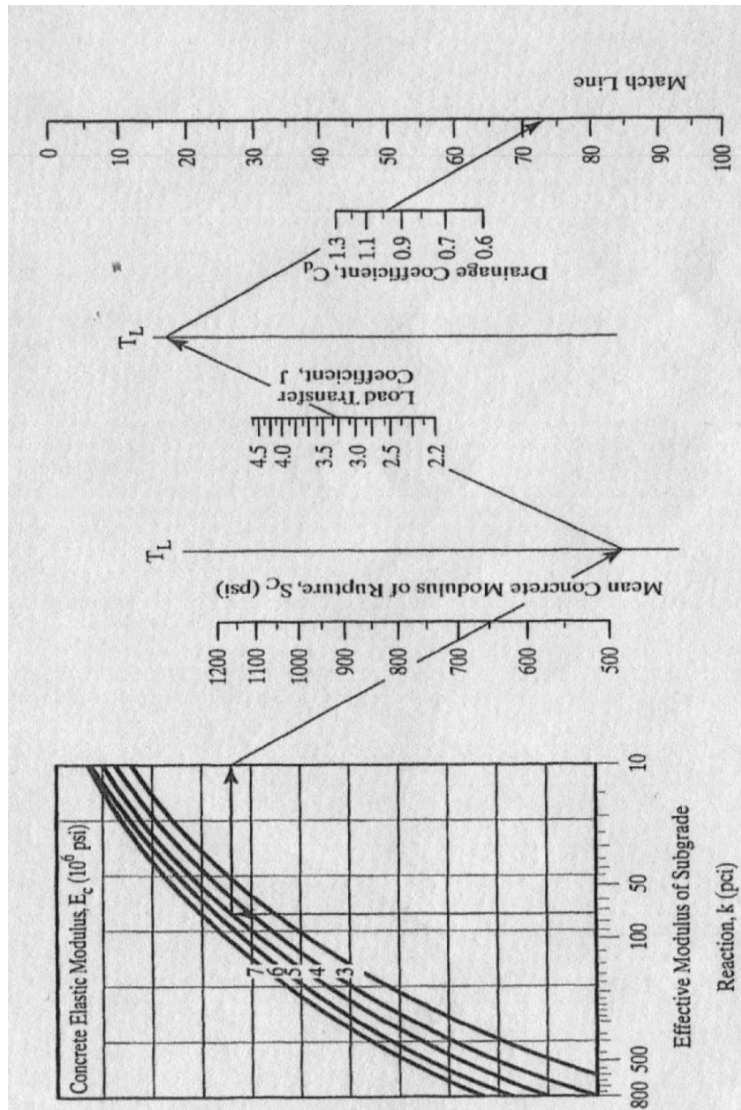
Σχήμα 7.4. Διόρθωση του ενεργού μέτρου αντίδρασης υπεδάφους λόγω απώλειας επαφής του θεμελίου (από Huang, 2004)

7.2.2. Προσδιορισμός πάχους πλάκας με μέθοδο AASHTO

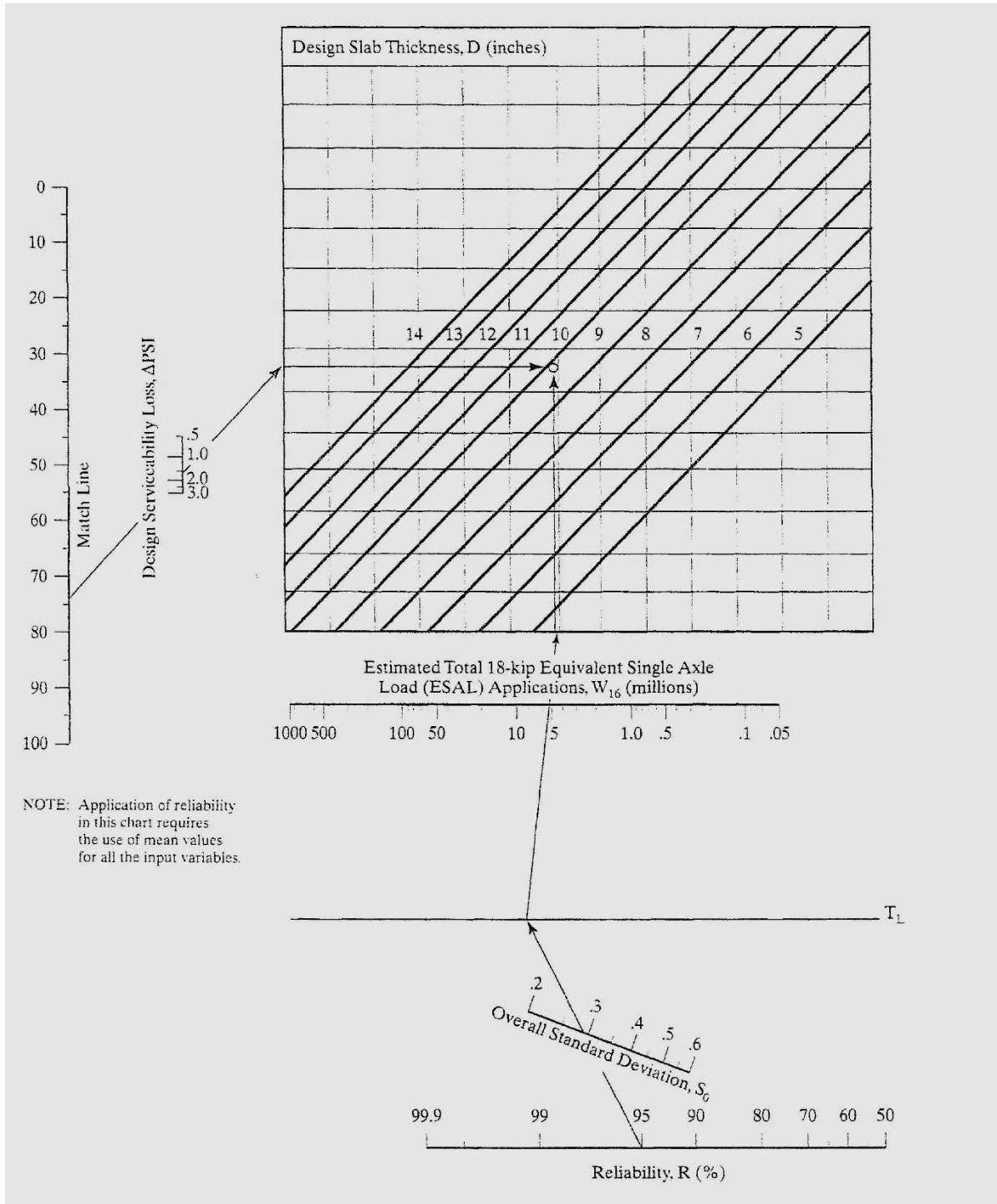
Έτσι μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει το νομογράφημα των Σχ.7.5a,b για τον προσδιορισμό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος. Πράγματι, από το Σχ.7.5a,b, με βάση το μέτρο αντίστασης υπεδάφους k που υπολογίστηκε παραπάνω, το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος E_c , την θλιπτική αντοχή σκυροδέματος S_c , τους συντελεστές μεταφοράς J και αποστράγγισης C_d , τον δείκτη απώλειας λειτουργικότητας ΔPSI , την αξιοπιστία R , την τυπική απόκλιση S_o και τον συνολικό αριθμό ESAL, μπορεί κανείς να προσδιορίσει το απαιτούμενο πάχος της πλάκας σκυροδέματος. Είναι προφανές ότι το πάχος που θα βρεθεί πρέπει να συγκριθεί με αυτό που υποτέθηκε κατά το βήμα iii) υπολογισμού του k . Αν η διαφορά των παχών αυτών είναι μεγάλη, θα πρέπει να επαναληφθούν οι υπολογισμοί.

Λεπτομέρειες σχετικές με την όλη ανωτέρω διαδικασία, μπορεί να βρεθούν στον AASHTO (1993) και τα βιβλία των Huang (2004) και Νικολαΐδη (2002). Επίσης στις ανωτέρω αναφορές μπορεί κανείς να βρει την διαδικασία υπολογισμού του οπλισμού της πλάκας και τον καθορισμό των ράβδων σύνδεσης και ενίσχυσης καθώς και λεπτομέρειες για την περίπτωση πλακών με συνεχή οπλισμό. Ας σημειωθεί ότι για την περίπτωση πλακών με συνεχή οπλισμό τα νομογραφήματα είναι πλέον διαφορετικά.

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι το πλέον δύσκολο τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού κατά AASHTO (1993) είναι αυτό του υπολογισμού του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους k , ιδιαίτερα επειδή απαιτούνται υπολογισμοί για κάθε μήνα του χρόνου. Ένας απλούστερος τρόπος υπολογισμού του k είναι αυτός της χρήσης του Σχ.2.3 που δίνει το k υπεδάφους ως συνάρτηση του δείκτη CBR. Έχοντας γνωστό το k υπεδάφους, μπορεί κανείς να βρει το σύνθετο k (υπεδάφους-υπόβασης) ως συνάρτηση του πάχους της υπόβασης με τη βοήθεια των Πινάκων 7.1 και 7.2 για υπόβαση χωρίς και με ενίσχυση με τσιμέντο, αντίστοιχα. Οι πίνακες αυτοί αποτελούν μέρος των στοιχείων σχεδιασμού κατά τη μέθοδο της Portland Cement Association (PCA, 1984). Αντί των πινάκων αυτών μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τα Σχ.2.4 και 2.5.



Σχήμα 7.5 α. Νομογράφημα υπολογισμού πλάκας σκυροδέματος δύσκαμπτου οδοστρώματος κατά AASHTO (1993) – Μέρος α.



Σχήμα 7.5 b. Νομογράφημα υπολογισμού πλάκας σκυροδέματος δύσκαμπτου οδοστρώματος κατά AASHTO (1993) – Μέρος β.

Subgrade <i>k</i> value (pci)	Subbase <i>k</i> values (pci)			
	4 in.	6 in.	9 in.	12 in.
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Note. 1 in. = 25.4 mm, 1 pci = 271.3 kN/m³.

Πίνακας 7.1. Τιμές σύνθετου μέτρου αντίδρασης *k* συναρτήσει αυτών της υπόβασης (χωρίς τσιμέντο) κατά PCA (1984).

Subgrade <i>k</i> value (pci)	Subbase <i>k</i> values (pci)			
	4 in.	6 in.	8 in.	10 in.
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	—

Note. 1 in. = 25.4 mm, 1 pci = 271.3 kN/m³.

Πίνακας 7.2. Τιμές σύνθετου μέτρου αντίδρασης *k* συναρτήσει αυτών της υπόβασης (με τσιμέντο) κατά PCA (1984).

7.3. Κριτήρια αστοχίας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Στο κεφάλαιο 6 έγινε περιγραφή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού απόκρισης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων υπό στατική φόρτιση και ελαστική συμπεριφορά των υλικών. Έχοντας λοιπόν κανείς αυτή την απόκριση, μπορεί να χρησιμοποιήσει εμπειρικά κριτήρια αστοχίας που είναι συνάρτηση αυτής της απόκρισης και να επιτύχει τον σχεδιασμό του οδοστρώματος, όπως στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων (υποκεφάλαιο 5.3).

Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, το κυριότερο κριτήριο αστοχίας είναι αυτό της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης, που δημιουργείται από τις τάσεις στο μέσο των ακραίων πλευρών της πλάκας σκυροδέματος (Huang, 2004). Στα άκρα αυτά σχηματίζονται εγκάρσιες και διαμήκειες ρωγμές. Ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου για πρόκληση ρηγμάτωσης κόπωσης εξαρτάται από τον λόγο της εφελκυστικής καμπτικής τάσης και του μέτρου ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Επειδή ο σχεδιασμός βασίζεται σε φόρτιση στα άκρα της πλάκας, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό του κυκλοφοριακού φορτίου δρα στα άκρα αυτά, ο ολικός αριθμός διελεύσεων φορτίου πρέπει να μειωθεί σε ένα ισοδύναμο αριθμό διελεύσεων ακραίων φορτίων, έτσι ώστε να προκαλείται η ίδια βλάβη κόπωσης.

Σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας σε ρηγμάτωση των Darter and Barenberg (1977) ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου N_f μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\log N_f = 16.61 - 17.61 (\sigma/S_c) \quad (7.1)$$

όπου σ είναι η καμπτική εφελκυστική τάση στην πλάκα σκυροδέματος και S_c είναι το μέτρο ρηγμάτωσης σκυροδέματος. Η ανωτέρω απλή σχέση αντιστοιχεί στην μέση καμπύλη πειραματικών αποτελεσμάτων για 50% πιθανότητα αστοχίας. Μια πολύ συντηρητική και πολύπλοκη σχέση που έχει προταθεί από την Portland Cement Association (PCA, 1984) και αποτελεί το κάτω όριο των πειραματικών αποτελεσμάτων, μπορεί να βρεθεί στο βιβλίο του Huang (2004).

Μετά τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων N_f από τη σχέση (7.1), μπορεί κανείς να υπολογίσει με βάση τη σχέση (5.12) τη ζωή σχεδιασμού του δύσκαμπτου οδοστρώματος, θεωρώντας τώρα ότι ο δείκτης βλάβης D_r της σχέσης (5.12) αντικαθίσταται εδώ με τον δείκτη ρηγμάτωσης CI (cracking index).

8. ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

8.1. Γενικά

Ασφαλτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία, είναι η καθαρή άσφαλτος, τα παράγωγα αυτής ασφαλτικά διαλύματα και ασφαλτικά γαλακτώματα καθώς και κάθε είδους ασφαλτικά υλικά.

Η άσφαλτος γενικά προέρχεται από τη διύλιση του αργού πετρελαίου ή από κοιτάσματα φυσικής ασφάλτου. Ειδικά η χρησιμοποιούμενη στην οδοποιία άσφαλτος είναι το υπόλειμμα της διύλισης του αργού πετρελαίου. Με ρύθμιση της θερμοκρασίας κατά την απόσταξη παραμένουν στο υπόλειμμα λιγότερα ή περισσότερα ελαιώδη συστατικά και έτσι η παραγόμενη άσφαλτος είναι σκληρή ή μαλακή, αντίστοιχα. Στις περιοχές που έχουν ψυχρό κλίμα χρησιμοποιείται συνήθως μαλακή άσφαλτος, ενώ σε θερμότερα κλίματα χρησιμοποιείται σχετικά σκληρή άσφαλτος.

Κάθε τύπος ασφάλτου χαρακτηρίζεται από το βάθος στο οποίο διεισδύει μέσα στη μάζα αυτής πρότυπη βελόνα υπό την πίεση βάρους 100 gr που ενεργεί κάθετα επί χρόνο 5sec και σε θερμοκρασία 25°C. Έτσι υπάρχουν τύποι ασφάλτου 40/50, 80/100, 180/200 κλπ. Ο τύπος, π.χ., 80/100 σημαίνει ότι η βελόνα διεισδύει μέσα στη μάζα της ασφάλτου του τύπου αυτού σε βάθος 8 έως 10 mm. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κατά κανόνα η άσφαλτος τύπου 80/100. Για τον έλεγχο της ασφάλτου οδοστρωσίας αποστέλλεται δείγμα στο εργαστήριο βάρους 1 έως 2 kg το οποίο υποβάλλεται σε δοκιμές.

8.2. Δοκιμές ασφάλτου

8.2.1. Δοκιμή διεισδυτικότητας

Η διεισδυτικότητα ορίζεται από το βάθος, που διεισδύει τυποποιημένη βελόνα στη μάζα της ασφάλτου, με την επίρεια βάρους 100 gr σε χρόνο 5 sec και σε θερμοκρασία 25°C. Το βάθος διεισδύσεως μετριέται σε δέκατα του χιλιοστού (διείσδυση 1mm ισοδυναμεί με 10 βαθμούς). Ο συμβολισμός π.χ. 80/100 δηλώνει ότι, κατά τη δοκιμή η διείσδυση ήταν μεταξύ 8 και 10mm. Με βάση τη διεισδυτικότητα, οι άσφαλτοι κατατάσσονται σε διάφορους τύπους (50/100, 80/100, 120/150 κλπ.).

8.2.2. Δοκιμή υγρασίας

Η άσφαλτος πρέπει να είναι απαλλαγμένη από νερό, διότι στην αντίθετη περίπτωση, με την θέρμανσή της στο εργοτάξιο υπάρχει κίνδυνος υπερχειλίσεώς της, εξαιτίας αφρισμού. Αν και οι προδιαγραφές απαιτούν να μην περιέχει καθόλου υγρασία, στη πράξη όμως θεωρείται ότι ένα ποσοστό 0.5% είναι επιτρεπτό.

Η δοκιμή υγρασίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας ασφαλτικών υλικών σε νερό με απόσταξη και τη βοήθεια πτητικού διαλύτη. Το δείγμα θερμαίνεται με ένα διαλύτη, που δεν αναμιγνύεται με το νερό και που συναποσπάει με το νερό του δείγματος. Ο συμπυκνωμένος διαλύτης και το νερό διαχωρίζονται στη συνέχεια μέσα σε βαθμολογημένο γυάλινο σωλήνα (παγίδα), το

νερό καταλαμβάνει την κάτω στιβάδα στο βαθμολογημένο τμήμα της παγίδας και ο διαλύτης, με υπερχειλίση, επανέρχεται στον αποστακτήρα.

8.2.3. Δοκιμή μάλθωσης

Σύμφωνα με την δοκιμή αυτή, που βασίζεται στο γεγονός ότι αύξηση της θερμοκρασίας μαλακώνει την ασφάλτο, σιδερένια σφαίρα, με διάμετρο 3/8 in και βάρος 305 gr, αφήνεται να διεισδύσει μέσα σε μάζα ασφάλτου, που γεμίζει έναν δακτύλιο ορισμένων διαστάσεων, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία. Όταν η διείσδυση αυτή είναι 1 in, μετριέται η θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται σημείο μάλθωσης. Η σημασία αυτής της δοκιμής είναι ότι, σε συνδυασμό με τη διεισδυτικότητα, καθορίζει τη μεταβολή του ιξώδους μιας ασφάλτου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Έχοντας σαν βάση το σημείο μάλθωσης και της διεισδυτικότητας σε 25°C, οι ασφαλτοί μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

- α) Ασφαλτοί με διεισδυτικότητα 100, σε 25°C και σημείο μάλθωσης 42.5°C. Οι ασφαλτοί αυτές συμπεριφέρονται ως ιξώδη υγρά και δεν έχουν καμία ελαστική ιδιότητα. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνες στην οδοποιία, αλλά να αναμιγνύονται με άλλες κατηγορίες.
- β) Ασφαλτοί με διεισδυτικότητα 100, σε 25°C και σημείο μάλθωσης 52°C. Οι ασφαλτοί αυτές έχουν μερικές ελαστικές ιδιότητες. Χρησιμοποιούνται στην οδοποιία επειδή συνδυάζουν τις καλές ιδιότητες της προηγούμενης και επόμενης κατηγορίας.
- γ) Ασφαλτοί με διεισδυτικότητα 100, σε 25°C και σημείο μάλθωσης 77°C. Οι ασφαλτοί αυτές έχουν ελαστικές ιδιότητες αλλά μικρή ευαισθησία στη θερμοκρασία. Δεν είναι κατάλληλες για την οδοποιία, διότι γερνούν εύκολα με την επίδραση της κυκλοφορίας.

8.2.4. Δοκιμή ολκιμότητας

Η δοκιμή αυτή δίνει την αντοχή της ασφάλτου σε εφελκυσμό. Τυποποιημένη πλάκα από ασφάλτο τοποθετείται μεταξύ δύο λαβίδων τυποποιημένης συσκευής και τεντώνεται με ορισμένη δύναμη και με ταχύτητα έλξης 5 cm/min. Η ολκιμότητα του υλικού μετριέται ως η απόσταση σε cm, που θα διανύσει η πλάκα μέχρι να κοπεί στη μικρότερή της διατομή, που είναι 1 cm². Η δοκιμή γίνεται σε 25°C.

8.2.5. Δοκιμή τέφρας

Η δοκιμή αυτή γίνεται για να προσδιοριστούν ανόργανες ουσίες, που υπάρχουν στην ασφάλτο και επομένως να καθοριστεί ο βαθμός καθαρότητας της ασφάλτου.

8.2.6. Δοκιμή απώλειας βάρους

Με τη δοκιμή αυτή βρίσκεται το ποσοστό της απώλειας βάρους ασφάλτου, όταν αυτή θερμαίνεται σε ανοικτό δοχείο για 5 ώρες και σε 163°C. Έτσι εξακριβώνεται η θερμική καταπόνηση του ασφαλτικού υλικού. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η

καταλληλότερη περιοχή θερμοκρασιών για την παρασκευή ασφαλτομιγμάτων, είναι 125°C-140°C. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, η θερμική καταπόνηση είναι μεγάλη.

8.2.7. Δοκιμή διαλυτότητας σε οργανικούς διαλύτες

Η πρακτική σημασία της δοκιμής αυτής, είναι ο ποιοτικός έλεγχος της ασφάλτου από άποψη παρουσίας μη επιθυμητών ανόργανων ή οργανικών υλικών. Για τη δοκιμή χρησιμοποιείται η χοάνη Gooch ενώ ως διαλύτης χρησιμοποιείται διθειούχος άνθρακας, τετραχλωριούχος άνθρακας, βενζόλιο, τριχλωραιθυλένιο ή τετραχλωράνθρακας.

8.2.8. Δοκιμή ανάφλεξης

Είναι η δοκιμή με την οποία βρίσκεται η θερμοκρασία ανάφλεξης της ασφάλτου. Για τη δοκιμή χρησιμοποιείται η συσκευή Cleveland. Με τη δοκιμή αυτή εξασφαλίζεται στο εργοτάξιο η θερμοκρασία θέρμανσης της ασφάλτου, χωρίς κίνδυνο ανάφλεξης.

8.2.9. Δοκιμή γαλάκτωσης

Είναι η δοκιμή που δείχνει την καταλληλότητα της ασφάλτου για την παρασκευή αλκαλικών γαλακτωμάτων. Η δοκιμή γίνεται σε συσκευή που αποτελείται από ένα δοχείο με πτερυγοφόρο αναμκτήρα που περιστρέφεται με ταχύτητα 1400 rev/min (στροφές/λεπτό).

Η γαλάκτωση θεωρείται επιτυχής αν όλη η ποσότητα της ασφάλτου καταμεριστεί μέσα στο νερό και το γαλάκτωμα που παρασκευάστηκε είναι ομοιογενές με διασπορά μέσου μεγέθους σωματιδίων ασφάλτου μέχρι 0.005mm. Ο έλεγχος γίνεται μικροσκοπικά ή χρωματομετρικά.

8.2.10. Δοκιμή εκχύλισης ασφάλτου

Η δοκιμή αυτή γίνεται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ασφάλτου στα 'εν θερμώ' παραγόμενα ασφαλτικά μείγματα οδοστρωσίας και στα δείγματα ασφαλτικών οδοστρωμάτων.

Η συσκευή δοκιμής αποτελείται από μία λεκάνη με μηχανισμό περιστροφής και από έναν υποδοχέα. Για την εκχύλιση χρησιμοποιείται τριχλωραιθάνιο, βενζόλιο ή τριχλωραιθυλένιο.

8.2.11. Ποιοτικές προδιαγραφές Δημοσίων Έργων

Η Ελληνική Γραμματεία Δημοσίων Έργων έχει ορίσει ποιοτικούς όρους για την άσφαλτο οδοστρωσίας όλων των τύπων. Παρακάτω αναφέρονται οι ποιοτικοί όροι ασφάλτου 80/100, που χρησιμοποιείται, κατά κανόνα, στη χώρα μας.

- Σημείο ανάφλεξης (°C): 230+
- Διεισδυτικότητα σε 25°C: 80-100
- Σημείο μάλθωσης: (°C): 44-53
- Δείκτης διείσδυσης (PI): -1, +0, 7

- Ολκιμότητα 25°C (cm): 100+
- Διαλυτότητα σε διθειάνθρακα (%): 99.5+
- Διαλυτότητα σε τετραχλωράνθρακα (%): 99+
- Τέφρα % κατά βάρος: 0.5-
- Απώλεια βάρους μετά από θέρμανση 5ωρη, σε 163°C (%): 1-
- Διεισδυτικότητα μετά από θέρμανση, % της αρχικής: 80+
- Θερμοκρασία εφαρμογής (°C): 150-185 (διάχυση), 150-165 (ανάμειξη)

που (+) είναι το μέγιστο όριο και (-) το ελάχιστο όριο.

8.3. Τύποι ασφάλτου και είδη ασφαλτικών

8.3.1. Τύποι και εφαρμογές ασφάλτου

Τύπος 20/30: Για την κατασκευή χυτής ασφάλτου.

Τύπος 50/60: Για την κατασκευή επιστρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα με μικρή αναλογία αδρανούς σκελετού (διάσταση κόκκων μεγαλύτερη των 2mm). Χρησιμοποιείται επίσης και στις περιπτώσεις, που χρειάζεται μεγάλη ευστάθεια ασφαλτομείγματος.

Τύπος 60/70: Ίδια χρήση με την άσφαλο τύπου 50/60.

Τύπος 80/100: Για συγκολλητικές επαλείψεις, απλές και πολλαπλές επιφάνειες επεξεργασίας, εμποτισμούς σκυρωτών, κατασκευή επιστρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα και για παρασκευή ασφαλτικών διαλυμάτων επί τόπου των έργων.

Τύπος 120/150: Για συγκολλητικές επαλείψεις, απλές και επιφανειακές επεξεργασίες, εμποτισμούς σκυρωτών, κατασκευή επιστρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα με μεγάλη αναλογία αδρανούς σκελετού. Διάσταση κόκκων μεγαλύτερη των 2mm.

Τύπος 180/220: Για συγκολλητικές επαλείψεις, απλές και πολλαπλές επιφανειακές επεξεργασίες, εμποτισμούς σκυρωτών, κατασκευή επιστρώσεων με ασφαλτόμιγμα ανοικτής σύνθεσης, που παρασκευάζεται σε μόνιμη εγκατάσταση και για την παρασκευή ασφαλτικών γαλακτωμάτων.

Τύπος 220/320: Για επιφανειακές επεξεργασίες, εμποτισμούς σκυρωτών και για την παρασκευή ασφαλτικών γαλακτωμάτων.

8.3.2. Ασφαλτικά διαλύματα

Τα ασφαλτικά διαλύματα είναι προϊόντα ανάμιξης συνηθισμένων ασφάλτων οδοστρωσίας με ορισμένους διαλύτες και ανήκουν στην κατηγορία των ρευστών ασφαλτικών υλικών. Ως διαλύτες χρησιμοποιούνται βενζίνη, φωτιστικό πετρέλαιο ή ακάθαρτο πετρέλαιο. Ο διαλύτης χρησιμοποιείται για να καταστήσει το ασφαλτικό υλικό εργάσιμο σε χαμηλή θερμοκρασία, αλλά εξατμίζεται όταν εκτεθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα ή σε θερμοκρασία, αφήνοντας έτσι το ασφαλτικό υλικό ως συνδετικό με τα αδρανή.

Τα ασφαλτικά διαλύματα ανάλογα με την πτητικότητα του διαλύτη, που έχει χρησιμοποιηθεί, διακρίνονται σε:

1. Ταχείας εξάτμισης (TE)
2. Μέσης εξάτμισης (ME)

3. Βραδείας εξάτμισης (BE)

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται ασφαλτικά διαλύματα μέσης εξάτμισης (φωτιστικό πετρέλαιο με άσφαλο τύπου 80/100).

Η παρασκευή των ασφαλτικών διαλυμάτων πρέπει να γίνεται με αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας ανάμιξης της ασφάλτου και του διαλύτη, ώστε να δημιουργείται ομοιογενές μίγμα και να αποφεύγεται ο κίνδυνος ανάφλεξης. Για τη παρασκευή των ασφαλτικών διαλυμάτων στο εργοτάξιο θερμαίνεται αρχικά η άσφαλτος σε θερμοκρασία 140 έως 160°C. Στη συνέχεια γίνεται αναρρόφηση αυτής με αντλία σε καθορισμένη αναλογία, ενώ γίνεται αναρρόφηση και της αντίστοιχης ποσότητας φωτιστικού πετρελαίου.

Ανάλογα με τη σύνθεση και τη ρευστότητα τα ασφαλτικά διαλύματα μέσης εξάτμισης διακρίνονται σε 6 τύπους, δηλαδή ME-0, ME-1, ME-2, ME-3, ME-4 και ME-5. Για την επιτυχή εφαρμογή στις ασφαλτικές κατασκευές χρησιμοποιούμε τον ανάλογο τύπο ασφαλτικού διαλύματος. Η εκλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από το είδος της ασφαλτικής κατασκευής, τη θερμοκρασία και την υγρασία της ατμόσφαιρας, την καθαρότητα των αδρανών υλικών κλπ.

Σημειώνεται τέλος ότι η χρήση ακάθαρτου πετρελαίου ως διαλύτη πολλές φορές αποτελεί αιτία κακοτεχνιών στη κατασκευή, διότι διατηρείται η πλαστικότητα του ασφαλτομίγματος για μεγάλο διάστημα, με δυσμενή επίδραση στην ευστάθεια της κατασκευής και στη πρόσφυση του συνδετικού στα αδρανή.

8.3.3. Ασφαλτικά γαλακτώματα

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα αποτελούνται από άσφαλο και νερό. Για την παρασκευή τους θερμαίνεται το ασφαλτικό υλικό μέχρι να υγροποιηθεί (130 έως 140°C) και στη συνέχεια αναμιγνύεται με ζεστό νερό (60 έως 70°C) αναταράσσοντας δυνατά το μίγμα. Το ασφαλτικό υλικό διαιρείται σε λεπτά σταγονίδια και έτσι επιτυγχάνεται ομοιογενές υλικό. Τα σταγονίδια όμως αυτά έχουν την τάση να ενωθούν μεταξύ τους και να διασπασούν το γαλάκτωμα. Για να γίνει το γαλάκτωμα σταθερότερο χρησιμοποιείται κατάλληλη ουσία, που ονομάζεται παράγοντας γαλάκτωσης και συνήθως είναι καυστική σόδα, νιτρικό οξύ, υδροχλωρικό οξύ κλπ.

Όταν το γαλάκτωμα έρθει σε επαφή με τα αδρανή του οδοστρώματος, το νερό απορροφάται ή εξατμίζεται και τα σταγονίδια της ασφάλτου δημιουργούν την απαιτούμενη συνδετική ύλη των αδρανών υλικών.

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Δεν αναφλέγονται
2. Στη συνήθη θερμοκρασία είναι ρευστά και επομένως εύχρηστα
3. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με υγρανθέντα αδρανή υλικά

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα, ανάλογα με τον παράγοντα γαλάκτωσης, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες που είναι οι εξής:

1. Τα αλκαλικά (ανιονικά). Σε αυτά η ηλεκτρική φόρτιση των σταγονιδίων είναι αρνητική.
2. Τα όξινα (κατιονικά). Σε αυτά η ηλεκτρική φόρτιση των σταγονιδίων είναι θετική.

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ αλκαλικών και όξινων γαλακτωμάτων είναι η διαφορετική πρόσφυση στα διάφορα αδρανή υλικά. Τα αλκαλικά επειδή έχουν αρνητική φόρτιση, παρουσιάζουν μεγάλη πρόσφυση με ασβεστολιθικά αδρανή, διότι αυτά τα αδρανή με τη παρουσία υγρασίας φορτίζονται θετικά (τα ετερόνυμα έλκονται). Αντίθετα, δεν παρουσιάζουν καλή πρόσφυση με τα πυριτικά ή χαλαζιακά πετρώματα, διότι αυτά με την παρουσία υγρασίας φορτίζονται αρνητικά. Για τον ίδιο λόγο τα όξινα γαλακτώματα, επειδή έχουν θετική φόρτιση, παρουσιάζουν καλύτερη πρόσφυση με τα πυριτικά ή χαλαζιακά αδρανή. Τα όξινα γαλακτώματα παρουσιάζουν επιπλέον τα εξής πλεονεκτήματα: i) προσφύονται και σε ασβεστολιθικά πετρώματα, ii) παρουσιάζουν πρόσφυση και όταν υπάρχει πολύ υγρασία και iii) αντέχουν περισσότερο στο ψύχος και στην αποθήκευση

Τα αλκαλικά γαλακτώματα διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

1. Ταχείας διάσπασης (τύποι ΑΕ-1, ΑΕ-2)
2. Μέσης διάσπασης (τύποι ΑΕ-3, ΑΕ-4)
3. Βραδείας διάσπασης (τύπος ΑΕ-5)

Τα όξινα γαλακτώματα διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

1. Ταχείας διάσπασης (τύποι ΚΕ-1, ΚΕ-2)
2. Μέσης διάσπασης (τύποι ΚΕ-3, ΚΕ-4, ΚΕ-5)

Ο διαχωρισμός της ασφάλτου από το νερό σε ένα ασφατικό γαλάκτωμα ονομάζεται διάσπαση του γαλακτώματος. Η ταχύτητα διάσπασης στις ασφατικές κατασκευές εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση του αδρανούς υλικού, τη χημική φύση του αδρανούς υλικού, τη σκόνη, τη βροχή, το πάχος της στρώσης κλπ. Η διάσπαση ενός γαλακτώματος επέρχεται ακόμα με: i) χρήση ηλεκτρολύτη, ii) ψύξη του γαλακτώματος σε θερμοκρασία κατώτερη της πήξης του νερού και iii) ανάμιξη δύο αντίθετα φορισμένων γαλακτωμάτων

8.3.4. Αντιδρόφιλα υλικά

Η επιτυχία ή όχι μιας ασφατικής κατασκευής εξαρτάται και από το βαθμό πρόσφυσης του ασφατικού στα αδρανή. Για το λόγο αυτό το ασφατικό και το αδρανές υλικό, που προορίζονται για την κατασκευή ενός οδοστρώματος, υποβάλλονται στη δοκιμή πρόσφυσης.

Κατά τη δοκιμή αυτή το αδρανές επικαλύπτεται με το προς χρήση ασφατικό συνδετικό (καθαρή άσφαλτο ή ασφατικό διάλυμα) και στη συνέχεια τοποθετείται μέσα στο νερό. Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα εκτιμάται με το μάτι πόση επιφάνεια του αδρανούς έχει παραμείνει καλυμμένη με ασφατικό. Αν η παρατηρηθείσα επικάλυψη είναι μεγαλύτερη του 95% , τότε λέγεται ότι το υλικό δεν παρουσιάζει υδροφιλία και δεν χρειάζεται βελτίωση της πρόσφυσης. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή κάτω του 95%, η πρόσφυση δεν είναι καλή.

Για αύξηση του βαθμού πρόσφυσης χρησιμοποιούνται διάφορα χημικά παρασκευάσματα που ονομάζονται αντιδρόφιλα υλικά ή βελτιωτικά υλικά πρόσφυσης. Συνήθως η αναλογία τους προς το ασφατικό υλικό είναι 0.50 έως 1.50%

κατά βάρος. Το απαιτούμενο ποσοστό καθορίζεται με δοκιμές. Βελτίωση της πρόσφυσης με αντιυδρόφιλα υλικά γίνεται στα ασφαλτικά συνδετικά με καθαρή άσφαλτο και σε ασφαλτικά διαλύματα (εκτός από τις περιπτώσεις διαλυμάτων που προορίζονται για ασφαλτικές επαλείψεις, διότι οι τύποι περιέχουν μεγάλο ποσοστό διαλύτη).

Στα ασφαλτικά γαλακτώματα η υδροφιλία αντιμετωπίζεται όχι με προσθήκη αντιυδρόφιλου υλικού, αλλά με χρήση άλλου κατάλληλου ασφαλτικού γαλακτώματος όξινου ή αλκαλικού.

8.4. Ασφαλτικές επαλείψεις

8.4.1. Γενικά

Ο όρος ασφαλτικές επιφανειακές επεξεργασίες, περιλαμβάνει όλες τις ασφαλτικές επαλείψεις που εκτελούνται στα οδοστρώματα. Τα είδη των ασφαλτικών επαλείψεων είναι η προεπάλειψη, η συγκολλητική επάλειψη και η απλή, διπλή ή πολλαπλή επάλειψη. Οι ασφαλτικές αυτές επαλείψεις γίνονται για τους παρακάτω σκοπούς:

1. Για την αδιαβροχοποίηση των αδρανών υλικών βάσης του οδοστρώματος και την συγκόλληση μεταξύ τους και με τη βάση των χαλαρών κόκκων της βάσης, προκειμένου να κατασκευαστεί στη συνέχεια κάποια ασφαλτική κατασκευή.
2. Για την συγκόλληση και συνεργασία παλαιάς με νέα ασφαλτική κατασκευή.
3. Για τη βελτίωση ή συντήρηση παλαιάς ασφαλτικής κατασκευής που έχει υποστεί φθορές ή ρηγματώσεις.
4. Για τη δημιουργία βαθιάς επιφάνειας οδού σε όλες τις εποχές του έτους με μικρή δαπάνη, σε περιπτώσεις ελαφριάς και μέσης κυκλοφορίας.
5. Για τη συντήρηση προσωρινά κατά τη διάρκεια του χειμώνα των βάσεων με αδρανή υλικά, όταν δεν είναι δυνατή η ολοκλήρωση της κατασκευής.
6. Για τη σφράγιση των επιφανειακών κενών στα ημιεμποτισμένα σκυρωτά και στους ασφαλτικούς τάπητες ανοικτής σύνδεσης.
7. Για τη κατασκευή σε παλαιές ή νέες ασφαλτικές κατασκευές αντιολισθηρές επιφάνειες κύλισης.

8.4.2. Προεπάλειψη

Η προεπάλειψη γίνεται στην περίπτωση που πρόκειται να ακολουθήσει μία ασφαλτική κατασκευή επάνω σε μια βάση από αδρανή υλικά. Αυτή συνίσταται στη διάχυση ενός ρευστού ασφαλτικού με χαμηλό ιξώδες.

Ο κύριος σκοπός της προεπάλειψης είναι η σύνδεση της βάσης με την ασφαλτική επίστρωση που στη συνέχεια θα κατασκευαστεί. Παράλληλα εξασφαλίζεται η υδατοστεγανότητα της βάσης με τη διείσδυση του συνδετικού υλικού μέσα στους τριχοειδείς πόρους της και έτσι εμποδίζεται η άνοδος της υγρασίας προς την επιφάνεια του οδοστρώματος και η διείσδυση της επιφανειακής υγρασίας μέσα στη βάση.

Η βάση πάνω στην οποία εφαρμόζεται η προεπάλειψη αποτελείται κυρίως από αδρανή υλικά σταθεροποιημένου τύπου. Σπανιότερα, μπορεί να είναι υδατόπηκτο σκυρωτό ή βάση σταθεροποιημένη με τσιμέντο.

Το ασφαλικό συνδετικό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αρκετά ρευστό, για να μπορέσει να διεισδύσει μέσα στους πόρους της βάσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως ασφατικά διαλύματα και ασφατικά γαλακτώματα. Τα διαλύματα που χρησιμοποιούνται είναι της κατηγορίας μέσης εξάτμισης και μάλιστα των τύπων ME-1 και ME-2. Όταν η επιφάνεια της βάσης είναι πολύ συμπαγής, χρησιμοποιείται το ρευστότερο διάλυμα ME-1, ενώ όταν είναι πορώδης, το διάλυμα ME-2 για να διεισδύσει το ασφατικό υλικό κατά το δυνατό σε μεγαλύτερο βάθος, με σύγχρονο σχηματισμό γύρω από τους κόκκους των αδρανών υλικών ασφατικής μεμβράνης αισθητού πάχους. Τα χρησιμοποιούμενα ασφατικά γαλακτώματα μπορεί να είναι όξινα ή αλκαλικά.

Πριν γίνει η διάχυση του ασφατικού υλικού, η βάση καθαρίζεται με επιμέλεια με σάρωθρα για την απομάκρυνση των χαλαρών κόκκων, τυχόν βόλων ή πλακούντων αργίλου, ξένων υλών κ.α., που εμποδίζουν την επαρκή διείσδυση και την καλή πρόσφυσή του. Στη συνέχεια γίνεται η διάχυση του ασφατικού συνδετικού στην επιφάνεια της βάσης με διανομέα.

Σημαντικά συμβάλλει στην επιτυχία της προεπάλειψης η ομοιόμορφη κατανομή του ασφατικού υλικού. Εάν δεν είναι δυνατή η διακοπή της κυκλοφορίας, η προεπάλειψη θα πρέπει να γίνεται στο μισό πλάτος του καταστρώματος της οδού, για να μην κολλάει το ασφατικό υλικό στους τροχούς των τροχοφόρων. Στη συνέχεια, αφήνεται η επιφάνεια για διάστημα 1 ως 4 ημερών για την απορρόφηση του ασφατικού υλικού. Κατόπιν ακολουθεί η προβλεπόμενη ασφατική κατασκευή.

Όταν οι καιρικές συνθήκες είναι δυσμενείς, όταν δηλαδή η θερμοκρασία είναι κάτω των 10°C και όταν λόγω υγρασίας ή προγενέστερης βροχής, τα κενά της επιφάνειας της βάσης είναι γεμάτα νερό, δεν πρέπει να γίνεται η προεπάλειψη με οποιοδήποτε ασφατικό υλικό, ακόμα και με ασφατικό γαλακτώμα, γιατί το ασφατικό υλικό δεν θα μπορέσει να διεισδύσει στη βάση και φυσικά η προεπάλειψη δεν θα πετύχει.

8.4.3. Συγκολλητική επάλειψη

Όταν σε μία υπάρχουσα ασφατική επιφάνεια πρόκειται να γίνει μια ασφατική κατασκευή, εφαρμόζεται η συγκολλητική επάλειψη, που έχει σκοπό να εξασφαλίσει πολύ καλή πρόσφυση και συνεργασία της νέας με τη παλιά ασφατική κατασκευή.

Τα ασφατικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκολλητική επάλειψη είναι περισσότερο ιξώδη από τα χρησιμοποιούμενα στη προεπάλειψη, επειδή δεν απαιτείται διείσδυση του ασφατικού συνδετικού στην υπάρχουσα στρώση. Εκείνο που επιδιώκεται είναι η δημιουργία μιας πλαστικής λεπτής και συνεχούς μεμβράνης για τη σύνδεση των δύο στρώσεων. Η περίσσεια ασφάλτου είναι δυνατόν να προξενήσει κυματισμό ή ακόμη και ερπυσμό της νέας στρώσης.

Η εκλογή του ασφατικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκολλητική επάλειψη περιορίζεται από τον σκοπό που επιδιώκεται και που είναι η ομοιόμορφη

επικάλυψη όλης της επιφάνειας του οδοστρώματος, με μικρού πάχους ασφαλτική μεμβράνη. Τα περισσότερα κατάλληλα για τον παραπάνω σκοπό είναι τα ασφαλτικά διαλύματα ταχείας εξάτμισης (με βενζίνη) και τα αραιωμένα ασφαλτικά γαλακτώματα ταχείας διάσπασης ώστε η καθαρή άσφαλτος που τελικά θα διαστρωθεί, να είναι περίπου $0.4-0.5 \text{ kg/m}^2$.

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα ασφαλτικά υλικά στη χώρα μας είναι:

1. Άσφαλτος οδοστρωσίας τύπου 80/100 ή 180/220.
2. Ασφαλτικά διαλύματα με φωτιστικό πετρέλαιο το πολύ μέχρι 5%.
3. Ασφαλτικά γαλακτώματα αλκαλικά ή όξινα ταχείας διάσπασης.

Η απαιτούμενη ποσότητα του ασφαλτικού υλικού εξαρτάται από την επιφάνεια της παλιάς στρώσης και από τις συνθήκες εργασίας. Στους παλιούς τάπητες, κατά κανόνα, χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητα.

Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες ποσότητες ασφαλτικού υλικού είναι:

1. Άσφαλτος οδοστρωσίας: $0.4-0.6 \text{ kg/m}^2$
2. Ασφαλτικά διαλύματα: $0.4-0.8 \text{ kg/m}^2$
3. Ασφαλτικό γαλάκτωμα: $0.4-1.0 \text{ kg/m}^2$

Η θερμοκρασία εφαρμογής εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και από τη κατηγορία του ασφαλτικού υλικού.

1. Για την άσφαλτο οδοστρωσίας: $135-175^\circ\text{C}$
2. Για το ασφαλτικό διάλυμα: $100-135^\circ\text{C}$
3. Για το ασφαλτικό γαλάκτωμα: $10-60^\circ\text{C}$

Η επιφάνεια στην οποία θα γίνει η συγκολλητική επάλειψη, πρέπει να καθαρίζεται με επιμέλεια και να απομακρύνεται κάθε ξένο υλικό και κυρίως τυχόν υπάρχουσα άργιλος, για να πραγματοποιηθεί καλή συνεργασία της νέας με την παλιά ασφαλτική στρώση.

Η συγκολλητική επάλειψη χρησιμοποιείται στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Για την συγκόλληση μιας παλιάς ασφαλτικής στρώσης με τη νέα που πρόκειται να κατασκευαστεί.
2. Για τη συγκόλληση μιας επιφάνειας από σκυρόδεμα με την ασφαλτική στρώση που θα κατασκευαστεί πάνω σε αυτή.
3. Για τη συγκόλληση επαλλήλων στρώσεων ασφαλτομίγματος (π.χ. στρώσης βάσης με την ισοπεδωτική και τη στρώση κυκλοφορίας). Σε αυτή τη περίπτωση, δεν χρειάζεται συγκολλητική επάλειψη αν δεν έχει περάσει μεγάλο χρονικό διάστημα από την κατασκευή της προηγούμενης στρώσης εκτός αν η προηγούμενη στρώση έχει καλυφτεί από παιπάλη ή φύλλερ (λεπτοφυές υλικό-γέμισμα). Πάντως η εφαρμογή συγκολλητικής επάλειψης σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και κυρίως από τις καιρικές συνθήκες, από το πάχος της νέας ασφαλτικής στρώσης και από την περιεκτικότητα σε άσφαλτο της προηγούμενης, δεδομένου ότι η ύπαρξη πλεονασμού ασφάλτου μπορεί να προξενήσει τελικά εξίδρωση αυτής στην τελική επιφάνεια κυκλοφορίας με όλα τα δυσμενή επακόλουθα.

Γενικά η επιτυχία της συγκολλητικής επάλειψης, εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, από την καλή εκλογή του είδους του ασφαλτικού υλικού, από το βαθμό καθαρισμού της βάσης και από ομοιόμορφη κατανομή του ασφαλτικού υλικού σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος.

8.4.4. Απλή, διπλή και τριπλή επάλειψη

Η απλή επάλειψη συνίσταται στην διάχυση ασφαλτικού υλικού και στην άμεση επικάλυψη αυτού με ψηφίδα. Η επάλειψη αυτή κατασκευάζεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

1. Σε δρόμους πολύ ελαφριάς κυκλοφορίας. Στην περίπτωση αυτή, η απλή επάλειψη κατασκευάζεται απ'ευθείας στη βάση με αδρανή υλικά. Γίνεται η προεπάλειψη και ακολουθεί η διάστρωση της ψηφίδας. Εάν η προεπάλειψη δεν έχει αρκετή συγκολλητικότητα για να δεσμεύσει τις ψηφίδες, ακολουθεί μετά την προεπάλειψη συγκολλητική επάλειψη και άμεση διάστρωση της ψηφίδας.
2. Επάνω σε παλιούς ή και νέους ασφαλτικούς τάπητες ανοιχτού τύπου για την πλήρωση των επιφανειακών κενών, οπότε ονομάζεται και σφραγιστική επάλειψη.
3. Για την ενεργοποίηση ή συντήρηση παλιών ασφαλτικών ταπήτων.
4. Για την κατασκευή αντιολισθηρών επιφανειών σε παλιούς ή και νέους τάπητες, οπότε γίνεται και κατάλληλη επιλογή των αδρανών υλικών, των συνδετικών και των μεθόδων.

Η διπλή επάλειψη αποτελείται από δύο φάσεις εφαρμογής του ασφαλτικού υλικού και ψηφίδων. Αυτή εφαρμόζεται επάνω σε οποιοδήποτε οδόστρωμα και έχει ως κύριο σκοπό την ενίσχυση, την εξομάλυνση ή την σφράγιση αυτού. Η τριπλή ή πολλαπλή επάλειψη αποτελείται από δύο ή περισσότερες φάσεις εφαρμογής ασφαλτικού υλικού και ψηφίδων. Αυτές εφαρμόζονται κυρίως για την κατασκευή μικρού πάχους ασφαλτικών ταπήτων σε δρόμους ελαφριάς κυκλοφορίας.

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα για τις επαλείψεις αυτές ασφαλτικά υλικά είναι:

1. Καθαρή άσφαλτος τύπου 80/100 ή 180/220.
2. Ασφαλτικά διαλύματα μέσης εξάτμισης (σε φωτιστικό πετρέλαιο).
3. Ασφαλτικά γαλακτώματα ταχείας διάσπασης, όξινα ή αλκαλικά.

Η εκλογή της κατηγορίας και του τύπου του ασφαλτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την φύση των πετρωμάτων και από τα διαθέσιμα υλικά. Πάντως στην περίπτωση που η ασφαλτική επάλειψη θα κατασκευαστεί πάνω σε βάση με αδρανή υλικά, η πρώτη διάχυση θα γίνει με ασφαλτικό υλικό προεπάλειψης.

Τα χρησιμοποιούμενα για τις επαλείψεις αδρανή υλικά θα πρέπει να προέρχονται από σκληρά πετρώματα και να ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Οι ψηφίδες να είναι ομοιόμορφου σχήματος, κατά προτίμηση θραυστές, και να πληρούν τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των προδιαγραφών.
2. Οι ψηφίδες θα πρέπει να είναι καθαρές, γωνιώδους σχήματος και να μην έχουν πλακοειδείς και βελονοειδείς κόκκους.
3. Οι ψηφίδες θα πρέπει να μην έχουν φύλλερ. Η παρουσία του φύλλερ έχει ως αποτέλεσμα να κάθεται επάνω στο ασφαλτικό υλικό και να εμποδίζει την συγκόλληση των κόκκων.

Για τις επαλείψεις χρησιμοποιούνται τρεις διαβαθμίσεις ψηφίδων Νο 5, 7 και 8 και πιο συγκεκριμένα: α) για την απλή επάλειψη χρησιμοποιείται ψηφίδα της

κοκκομετρικής διαβάθμισης Νο 8, β) για την διπλή επάλειψη διαστρώνεται πρώτα η ψηφίδα της διαβάθμισης Νο 7 και μετά την διάχυση του ασφαλτικού υλικού η ψηφίδα διαβάθμισης Νο 8 και γ) για την τριπλή επάλειψη διαστρώνεται πρώτα η ψηφίδα Νο 5 και στη συνέχεια οι ψηφίδες Νο 7 και Νο 8. Ο Πίνακας 8.1. δίνει λεπτομέρειες σχετικές με την διαβάθμιση του υλικού των ψηφίδων.

Η ποσότητα του ασφαλτικού υλικού που εφαρμόζεται σε κάθε στρώση κυμαίνεται συνήθως για μεν τα ασφαλτικά γαλακτώματα και διαλύματα σε 1-2 kg/m², για δε την καθαρή άσφαλτο οδοστρωσίας σε 0.7-0.9 kg/m².

Για την κατασκευή μιας διπλής επάλειψης ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Καθαρισμός υποδομής.
2. Πρώτη διάχυση ασφαλτικού υλικού.
3. Άμεση διάστρωση του αδρανούς υλικού διαβάθμισης Νο 7 με μηχανικό διανομέα σε ποσότητα περίπου 7 kg/m².
4. Ισοπέδωση της ψηφίδας με ελκόμενο σάρωθρο και ελαφριά κυλίνδρωση.
5. Δεύτερη διάχυση ασφαλτικού υλικού.
6. Άμεση διάστρωση του αδρανούς υλικού της διαβάθμισης Νο 8 με μηχανικό διανομέα σε ποσότητα 7 kg/m² και κυλίνδρωση.

Αριθμός κόσκινου		Διερχόμενο % κατά βάρος		
<i>inches</i>	<i>mm</i>	<i>No 5</i>	<i>No 7</i>	<i>No 8</i>
1	25.40	100	-	-
3/4	13.05	90-100	-	-
1/2	12.70	-	100	-
3/8	9.50	20-65	85-100	100
1/4	6.35	0-10	20-50	95-100
0.1874	4.76	0-5	0-10	60-85

Πίνακας 8.1. Διαβάθμιση υλικού ψηφίδων.

Για να πετύχει μια ασφαλτική επάλειψη πρέπει να τηρηθούν σχολαστικά τα παρακάτω:

1. Να χρησιμοποιούνται κατάλληλα αδρανή υλικά ως προς την ποιότητα και την κοκκομετρική διαβάθμιση και κυρίως να μην περιέχουν φύλλερ.
2. Να λαμβάνονται υπόψη οι καιρικές συνθήκες, η υγρασία της υποδομής, η υγρασία των αδρανών υλικών και στη συνέχεια να γίνεται η κατάλληλη εκλογή της κατηγορίας και του τύπου του ασφαλτικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί.
3. Να θερμαίνεται το ασφαλτικό υλικό στην απαιτούμενη θερμοκρασία και να διαστρώνεται το αδρανές υλικό αμέσως μετά την διάχυση του ασφαλτικού υλικού για να κολλήσει στην άσφαλτο πριν αυτή ψυχθεί και να ακολουθεί επίσης ελαφριά κυλίνδρωση.
4. Να γίνει ομοιόμορφη διάχυση του ασφαλτικού υλικού κατά πλάτος και κατά μήκος στην προβλεπόμενη ποσότητα ανά τετραγωνικό μέτρο με διανομέα της

ασφάλτου. Η απαίτηση αυτή είναι βασική και η μη τήρησή της έχει την αφετηρία κακοτεχνίας. Εάν λειτουργούν όλα τα όργανα του διανομέα της ασφάλτου και εάν οι κρουνοί είναι όλοι καθαρισμένοι και έχουν τον κατάλληλο προσανατολισμό και εάν η ράβδος του καταιονισμού του ασφαλτικού υλικού βρίσκεται στο κατάλληλο ύψος, η εργασία θα πετύχει. Φυσικά πρέπει η ταχύτητα του οχήματος να προϋπολογιστεί και να χρησιμοποιείται ικανός οδηγός ώστε το σύνολο της εργασίας να γίνει έντεχνα.

8.5. Ασφαλτικά σκυροδέματα

8.5.1. Γενικά

Με τον όρο ασφαλτικό σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το υλικό κατασκευής των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος που παρασκευάζεται με ανάμιξη αδρανών υλικών και ασφαλικού υλικού. Το ασφαλτικό υλικό μπορεί να είναι καθαρή άσφαλτος, ασφαλτικό διάλυμα ή ακόμη και ασφαλτικό γαλάκτωμα. Ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών, τα ασφαλτομίγματα χωρίζονται σε ανοικτού τύπου, ημικλειστού τύπου και κλειστού τύπου.

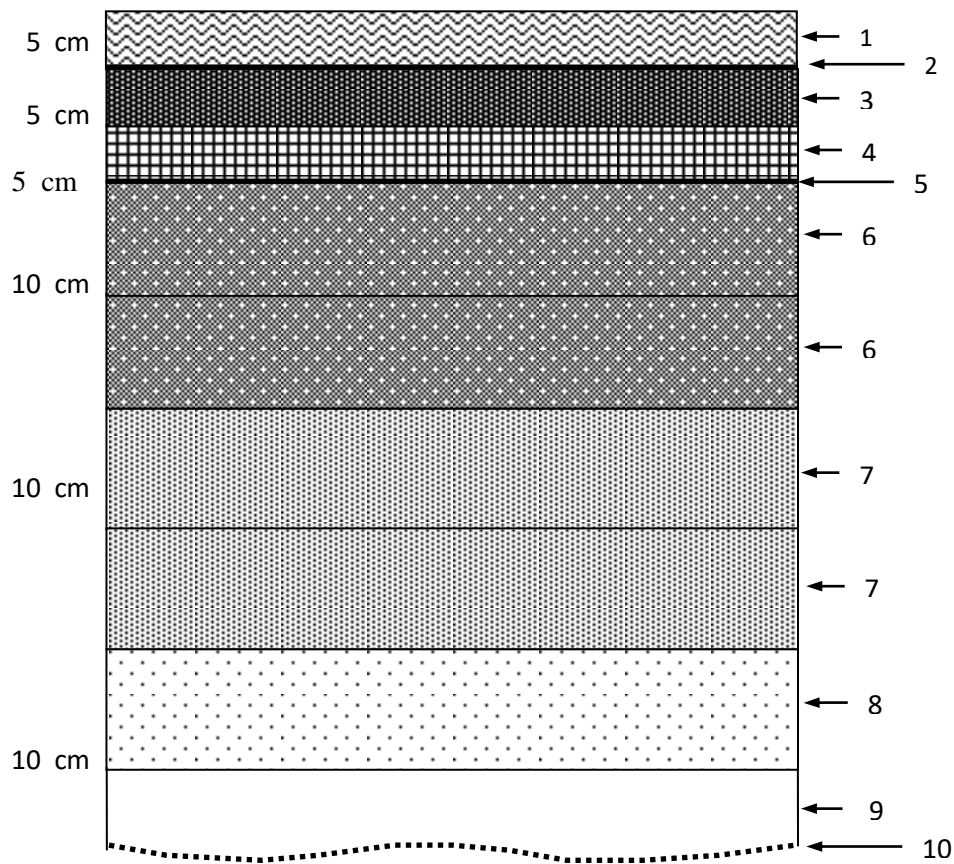
Το ασφαλτόμγμα ημικλειστού ή κλειστού τύπου αποτελείται από ανόργανο σκελετό σκύρων, άμμου και παιπάλης με συνδετικό υλικό από καθαρή άσφαλτο κάτω από αυστηρές και μελετημένες αναλογίες. Τα παραπάνω σκυροδέματα παρασκευάζονται σε μόνιμες εγκαταστάσεις κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες με κατάλληλη θέρμανση των αδρανών πριν από την ανάμιξή τους με το επίσης θερμό συνδετικό υλικό.

Τα σκυροδέματα που παρασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιούνται κυρίως ως ασφαλτικά οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων και διαστρώνονται με μεγάλης ακρίβειας μηχανήματα στο επιθυμητό πάχος. Τα ασφαλτικά οδοστρώματα της κατηγορίας αυτής τοποθετούνται στα ανώτερα στρώματα των επιστρώσεων οδών και αεροδρομίων.

8.5.2. Τύποι ασφαλικών σκυροδεμάτων

Τα ασφαλτικά σκυροδέματα, όπως φαίνεται στο Σχ.8.1 μίας πλήρους τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος, διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

1. Τις στρώσεις βάσης που τοποθετούνται στις κατώτερες στρώσεις της ασφαλικής ζώνης.
2. Τις στρώσεις κυκλοφορίας που τοποθετούνται στις ανώτερες στρώσεις της ασφαλικής ζώνης.
3. Την συνδετική στρώση που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο προηγούμενων.



1. Αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-265.
2. Ασφαλτική συγκολλητική επάλειψη.
3. Ασφαλτική συνδετική στρώση (ισοπεδωτική) πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-265.
4. Ασφαλτική στρώση βάσης πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-260.
5. Ασφαλτική προεπάλειψη ανασφάλτωσης βάσης.
6. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 cm της Π.Τ.Π. Ο-155.
7. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 cm της Π.Τ.Π. Ο-150.
8. Στραγγιστική στρώση συμπιεσμένου πάχους 10 cm
9. Ισοπεδωτική στρώση υπόβασης από φυσικό ή θραυστό αμμοχάλικο.
10. Στάθμη χωματουργικών εργασιών.

Σχήμα 8.1. Πλήρης τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με τρεις στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος πάνω από τη ζώνη οδοστρώματος (υπόβαση και βάση). Π.Τ.Π.=Πρώτυπες Τεχνικές Προδιαγραφές ΥΠΕΧΩΔΕ(τ.Υ.Δ.Ε.), Α-XXX αφορούν ασφαλτικά και Ο-XXX αφορούν οδοστρώσια.

8.5.3. Ιδιότητες ασφαλτικών σκυροδεμάτων

Στα ασφαλτικά σκυροδέματα και ιδιαίτερα πάνω στις επιφανειακές στρώσεις ενεργούν οι παρακάτω δυνάμεις και παράγοντες:

1. Διατμητικές τάσεις, που οφείλονται σε δυνάμεις ολίσθησης, φυγόκεντρου δύναμης, τροχοπέδησης, εκκίνησης και επιτάχυνσης, που προέρχονται από την κυκλοφορία των οχημάτων.
2. Κρούσεις, που προέρχονται από τους τροχούς των οχημάτων και οφείλονται στις επιφανειακές ανωμαλίες του ασφαλτικού οδοστρώματος και στην ταχύτητα των κινούμενων οχημάτων.
3. Τάσεις από τα στατικά φορτία που οφείλονται στο παρκάρισμα των οχημάτων και στην λειτουργία των κινητήρων τους. Οι παραπάνω δυνάμεις προκαλούν υπέρμετρες καταπονήσεις στις θέσεις προθέρμανσης των αεροσκαφών στους διαδρόμους των αεροδρομίων με αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγαλύτερο πάχος ασφαλτικού σκυροδέματος.
4. Κλιματικοί παράγοντες, όπως είναι η ηλιακή θερμότητα, ο ατμοσφαιρικός αέρας, το νερό και ο παγετός.

Στις ανωτέρω δυνάμεις, το ασφαλτικό σκυροδέμα αντιδρά με την ευστάθειά του, δηλαδή με την αντίστασή του στις πλαστικές παραμορφώσεις που προέρχονται από τις παραπάνω δυνάμεις και παράγοντες που δημιουργούν τα φορτία των οχημάτων και οι κλιματικοί παράγοντες. Η αντίσταση αυτή οφείλεται στην διατμητική αντοχή του ασφαλτικού σκυροδέματος, που εξαρτάται από τον επιτυχή συνδυασμό των δύο γνωστών ιδιοτήτων, της εσωτερικής τριβής και της συνοχής, από τις οποίες η μεν πρώτη δίνεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών, η δε δεύτερη εξασφαλίζεται από την συνδετική δύναμη του ασφαλτικού υλικού.

Για να μπορέσει ένα ασφαλτικό σκυροδέμα να ανταποκριθεί στις παραπάνω καταπονήσεις και στις συνεχώς αναπτυσσόμενες συνθήκες κυκλοφορίας πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. Να είναι ευσταθές, δηλαδή ικανό να αντιστέκεται κατά των παραμορφώσεων που προέρχονται από τα φορτία των οχημάτων.
2. Να είναι ανθεκτικό και μακρόβιο, ώστε να αντιστέκεται στις μηχανικές φθορές λόγω της κυκλοφορίας και την μακροχρόνια επιβλαβή δράση των κλιματικών παραγόντων.
3. Να είναι ομαλό και αντιολισθηρό δηλαδή να παρουσιάζει επιφάνεια τελείως ομαλή, αλλά με υφή ορισμένης τραχύτητας, ικανή να ακινητοποιεί τα αυτοκίνητα κατά τα απότομα φρεναρίσματα.
4. Να είναι οικονομικό στην κατασκευή και την εκμετάλλευση με την χρησιμοποίηση καταλλήλων φθηνών επιτόπιων αδρανών υλικών και άριστης ποιότητας εργασίας.

Από τα παραπάνω βγαίνει το συμπέρασμα ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την κατασκευή ενός ασφαλτικού σκυροδέματος που να ανταποκρίνεται στις παραπάνω ιδιότητες είναι ο επιτυχής συνδυασμός των δύο βασικών συστατικών του, του αδρανούς υλικού (τύπος, ποιότητα και κοκκομετρική διαβάθμιση) και του ασφαλτικού υλικού (τύπος, ποιότητα και ποσοστό).

8.5.4. Αδρανή υλικά ασφαλτικών σκυροδεμάτων

Ο ανόργανος σκελετός ενός ασφαλτικού σκυροδέματος αποτελείται από σκύρα, άμμο και παιπάλη που ορίζονται ως εξής:

1. Ως σκύρα ορίζεται το αδρανές υλικό με κόκκους διαμέτρου μεγαλύτερης των 5mm.
2. Ως άμμος ορίζεται το αδρανές υλικό με κόκκους διαμέτρου μεταξύ 0.1 και 5 mm.
3. Ως παιπάλη ορίζεται το αδρανές υλικό με κόκκους διαμέτρου μικρότερης των 0.1 mm.

Ο ανόργανος σκελετός με την εσωτερική τριβή και την μηχανική εμπλοκή, που είναι ιδιότητες που οφείλονται στην κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση, τηνγωνιώδη μορφή και την αντοχή των κόκκων, δίνει κυρίως την ευστάθεια στο ασφαλτικό σκυροδέμα. Για τα παραπάνω αδρανή υλικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει πιο αναλυτικά τα εξής:

1. Τα σκύρα αποτελούνται από θραυστά υλικά, ανθεκτικά και γωνιώδη (κατά κανόνα μορφής κύβου) σωματίδια που έχουν τραχεία επιφάνεια και αποτελούνται από πετρώματα που έχουν απορροφητικότητα μικρότερη του 3%. Αυτά τα σωματίδια αποτελούν τον σκελετό, που με τη μηχανική εμπλοκή δίνει στο μίγμα το μεγαλύτερο μέρος της ευστάθειάς του.
2. Η άμμος, τεχνηκή ή φυσική, συμβάλλει στην ελάττωση των κενών τα οποία έχει ο σκελετός των σκύρων και επομένως στην αύξηση της πυκνότητας και της ευστάθειας. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται για να περιέχει η άμμος την κατάλληλη αναλογία σωματιδίων που να διέρχονται από το κόσκινο Νο 80 και να συγκρατούνται στο κόσκινο Νο 200. Χωρίς αυτό το κλάσμα της λεπτής άμμου το μίγμα θα γίνει πορώδες και θα χρειαστεί μεγάλη ποσότητα ασφάλτου για να συμπληρωθούν τα κενά των αδρανών σε βάρος της ευστάθειας.
3. Επί πλέον η λεπτή άμμος εμποδίζει την θρόμβωση της ασφάλτου κατά την παρασκευή του ασφαλτικού σκυροδέματος μέσα στον αναμκτήρα ως επίσης και την ανύψωση μέχρι την επιφάνεια της στρώσης κατά την κυκλίνδρωση αυτής ή την κυκλοφορία κάτω από θερμές καιρικές συνθήκες.
4. Η παιπάλη συμβάλλει στο γέμισμα των κενών, τα οποία ο σκελετός των σκύρων και άμμου αφήνει όσο καλά κοκκομετρημένος και αν είναι, με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας και ευστάθειας του ασφαλτικού σκυροδέματος και την βελτίωση της στεγανότητας και της επιφανειακής υφής της στρώσης.

Μεγάλη σημασία στην μηχανική συμπεριφορά των αδρανών έχει η διαβάθμιση των κόκκων τους. Ανοικτή διαβάθμιση αδρανούς καλείται εκείνη κατά την οποία τα διάφορα κλάσματα (μεγέθη κόκκων) βρίσκονται σε τέτοια ποσοτική αναλογία, ώστε κατά την τελική σύνθεσή τους (μίγμα αδρανών-ασφάλτου) να εγκλείουν εντός αυτών μεγάλη περιεκτικότητα κενών. Κλειστή διαβάθμιση αδρανούς καλείται εκείνη κατά την οποία τα ποσοστά των κλασμάτων βρίσκονται σε άριστη σχέση, από αυτά των χονδρών μέχρι των πολύ λεπτών κόκκων με αρκετή ποσότητα κενών.

8.5.5. Ασφαλτος ασφαλτικών σκυροδεμάτων

Η ασφαλτος που χρησιμοποιείται εδώ είναι το καθαρό υπόλειμμα της απόσταξης του ακάθαρτου πετρελαίου. Το ακάθαρτο πετρέλαιο είναι ορυκτό που βρίσκεται στις υπόγειες κοιλότητες και αποτελείται από μίγμα υδρογονανθράκων. Τα πετρέλαια γενικά διακρίνονται στα παραφινικής βάσης και στα ασφαλτικής βάσης. Το ποσοστό της ασφάλτου που περιέχεται σε ένα ακάθαρτο πετρέλαιο ποικίλλει από 10% έως 90%.

Για την παραγωγή ασφάλτου οδοποιίας εφαρμόζεται η μέθοδος απόσταξης του ακάθαρτου πετρελαίου δια του ατμού και υπό κενό αέρος και σύγχρονη ανύψωση της θερμοκρασίας.

Για κάθε είδος ασφαλτικού σκυροδέματος απαιτείται ασφαλτος η οποία να εξασφαλίζει συνεκτικότητα ανάλογη προς την κοκκομετρική διαβάθμιση του αδρανούς υλικού, αντοχή, σταθερότητα και διατήρηση των ιδιοτήτων αυτού του υλικού. Θα πρέπει δηλαδή η ασφαλτος, που συνδέει τους αδρανείς κόκκους να παραμένει σταθερή και να μην ρευστοποιείται υπερβολικά με αποτέλεσμα να ανέρχεται στην επιφάνεια κατά το καλοκαίρι, ούτε να γίνεται σκληρή και εύθραυστη και να στερείται των συνδετικών και ελαστικών ιδιοτήτων της κατά το χειμώνα.

Για την εξασφάλιση των ανωτέρω προϋποθέσεων, στα ασφαλτικά σκυροδέματα χρησιμοποιείται αποκλειστικά καθαρή ασφαλτος που πρέπει να είναι των τύπων 50-60, 60-70, 80-100, 120-150, 180-220 και να πληρεί τις απαιτήσεις των πρότυπων τεχνικών προδιαγραφών. Ο ενδεδειγμένος τύπος ασφάλτου καθορίζεται κάθε φορά ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής του έργου, τη σύνθεση του ασφαλτικού σκυροδέματος, το είδος του έργου, τα φορτία κλπ.

9. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

9.1. Γενικά

Τα βασικότερα υλικά των οδοστρωμάτων είναι τα αδρανή υλικά (δεν αντιδρούν χημικά με τις διάφορες συγκολλητικές ύλες), που είναι το σύνολο άμμων, χαλίκων και λίθων ανόργανης σύστασης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης, τα οποία χρησιμοποιούνται είτε αυτούσια (υποβάσεις, βάσεις, στραγγιστικές στρώσεις), είτε με κάποιο συγκολλητικό μέσο για τον σχηματισμό καταλλήλων μιγμάτων για τις διάφορες κατασκευές.

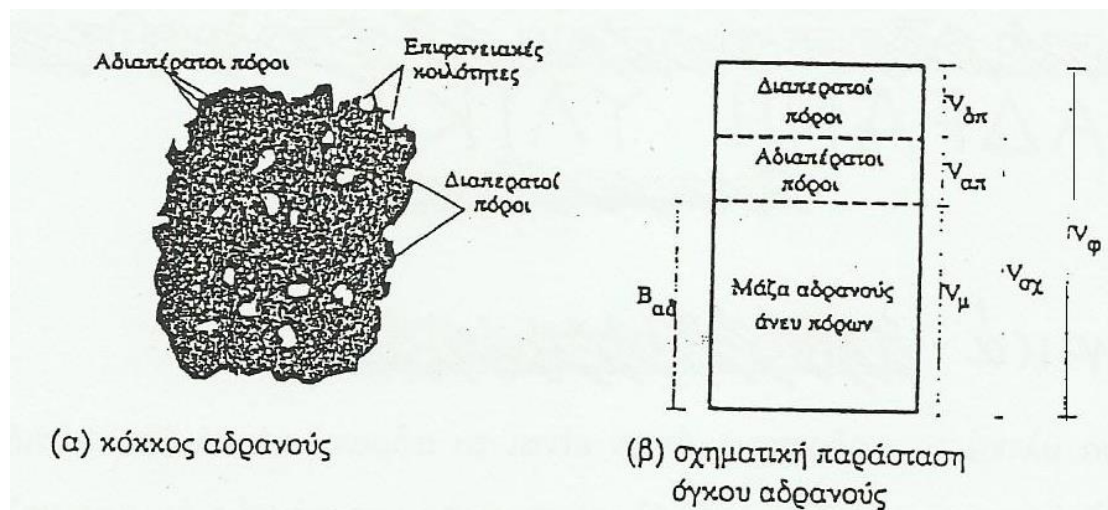
Το συγκολλητικό μέσο μπορεί να είναι:

1. Το τσιμέντο για το σκυρόδεμα και το κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο.
2. Η άσφαλτος, τα ασφαλτικά διαλύματα και τα ασφαλτικά γαλακτώματα για τα ασφαλτικά μίγματα, ασφαλτικές επαλείψεις κλπ.

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τον έλεγχο των ιδιοτήτων που πρέπει να έχουν τα αδρανή υλικά όταν χρησιμοποιούνται στις διάφορες κατασκευές. Οι έλεγχοι των αδρανών μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

1. Έλεγχοι πυκνότητας
2. Έλεγχοι καθαρότητας
3. Έλεγχοι σκληρότητας και ανθεκτικότητας
4. Ποιοτικοί έλεγχοι (μη καταστροφικοί)

Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού περιγράφεται το θέμα των αντιολισθηρών κατασκευών, που σχετίζεται άμεσα με τα αδρανή υλικά.



Σχήμα 9.1. Φυσική και σχηματική δομή αδρανούς υλικού (από Νικολαΐδη, 2002)

9.2. Έλεγχοι ειδικού βάρους και πυκνότητας

Τα αδρανή υλικά έχουν διαπερατά κενά, τα οποία απορροφούν νερό και αδιαπέραστα κενά, που βρίσκονται στο εσωτερικό της μάζας τους, όπως φαίνεται στο Σχ.9.1. Έτσι λοιπόν έχουμε τα ακόλουθα ειδικά βάρη: ειδικό βάρος, σχετικό ειδικό βάρος και φαινόμενο ειδικό βάρος που με βάση το Σχ.9.1 ορίζονται ως εξής:

α) απόλυτο ειδικό βάρος είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς άνευ πόρων υλικού ως προς τον όγκο αυτού, δηλαδή, $\rho_g = B_{ad}/V_\mu$

β) σχετικό ειδικό βάρος είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς άνευ πόρων υλικού ως προς το άθροισμα του όγκου του υλικού άνευ πόρων και του όγκου των αδιαπέρατων κενών, δηλαδή, $\rho_{g\phi} = B_{ad}/(V_\mu + V_{\alpha\pi})$

γ) φαινόμενο ειδικό βάρος είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς άνευ πόρων υλικού ως προς το άθροισμα του όγκου του υλικού άνευ πόρων, του όγκου των αδιαπέρατων κενών και του όγκου των διαπερατών κενών, δηλαδή, $\rho_{g\mu} = B_{ad}/(V_\mu + V_{\alpha\pi} + V_{\delta\pi})$.

Μονάδες όλων των ανωτέρω είναι N/m^3 ή pcf . Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο για τον προσδιορισμό του όγκου των αδρανών ή των κενών στα ασφαλτομίγματα.

Αν αντί για βάρος χρησιμοποιηθεί η μάζα του υλικού τότε προκύπτουν οι αντίστοιχες πυκνότητες (απόλυτη πυκνότητα, σχετική πυκνότητα και φαινόμενη πυκνότητα) οι οποίες εκφράζονται σε kg/m^3 ή gr/cm^3 .

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους $\rho_{g\phi}$ ή της φαινόμενης πυκνότητας ρ_ϕ γίνεται με τη βοήθεια μιάς ζυγαριάς, ενός μεταλλικού καλαθιού με οπές που κρέμεται από την ζυγαριά και ενός υδρόλουτρου. Μία ποσότητα αδρανούς υλικού τοποθετείται στο καλάθι και εμβαπτίζεται σε υγρόλουτρο για 24 ώρες και μετά ζυγίζεται στο νερό μαζί με το καλάθι (βάρος B_1). Επίσης ζυγίζεται χωριστά σε νερό το άδειο καλάθι (βάρος B_2). Τελικά το υλικό ξηραίνεται πλήρως σε φούρνο και ζυγίζεται εκ νέου (βάρος B_3). Έτσι το φαινόμενο ειδικό βάρος $\rho_{g\phi}$ υπολογίζεται από τον τύπο

$$\rho_{g\phi} = \rho_{gw} B_3 / [B_3 - (B_1 - B_2)] \quad (9.1)$$

όπου ρ_{gw} είναι το ειδικό βάρος του νερού. Για την εύρεση της φαινόμενης πυκνότητας χρησιμοποιείται πάλι ο τύπος (9.1) με ρ_ϕ και ρ_w στη θέση των $\rho_{g\phi}$ και ρ_{gw} , αντίστοιχα. Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορεί κανείς να συμβουλευτεί το βιβλίο του Nikolaides (2015).

9.3. Έλεγχοι καθαρότητας

9.3.1. Δοκιμή καθορισμού ποσότητας παιπάλης (φίλλερ)

Το ποσοστό της παιπάλης στα αδρανή ή στο μίγμα αυτών γίνεται με πλύση των αδρανών και η γνώση του είναι πολύτιμη διότι επηρεάζει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Υψηλό ποσοστό παιπάλης συμβάλλει στην αύξηση του ποσοστού ασφάλτου του ασφαλτομίγματος, σε μείωση της εργασιμότητας, σε μείωση της

ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος και σε μη επικάλυψη των κόκκων του αδρανούς από άσφαλτο.

9.3.2. Δοκιμή καθαρισμού ισοδύναμης άμμου

Η ύπαρξη σκόνης αργιλώδους μορφής στα αδρανή που θα χρησιμοποιηθούν για υποβάσεις, βάσεις και μίγματα είναι ένδειξη ότι πρέπει να γίνει κάποιος καθαρισμός, ανάλογα με την χρήση των αδρανών. Το ποσοστό της αργίλου προσδιορίζεται σε δείγμα αδρανών, διερχόμενο από το κόσκινο 4.75mm που τοποθετείται σε διαφανή κύλινδρο που περιέχει ειδικό υδατικό διάλυμα, αναδεύεται για 30 sec και στη συνέχεια ηρεμεί για 20 min. Το ισοδύναμο άμμου υπολογίζεται από τη σχέση

$$SE = \frac{h}{H} * 100 \quad (9.2)$$

όπου h=ύψος άμμου και H=ύψος αργίλου. Η ύπαρξη μικρού ποσοστού αργίλου στα αδρανή, συμβάλλει στην διόγκωσή τους, όταν χρησιμοποιηθούν στις διάφορες στρώσεις. Οι ελάχιστες τιμές ισοδύναμης άμμου δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 9.1.

Αδρανή για	SE
Υπόβαση	>40
Βάση	>50
Ασφαλτόμιγμα (A 260)	>50
Ασφαλτόμιγμα (A 265)	>55
Ψυχρά ασφαλτομίγματα	>55
Ασφαλτικές επαλείψεις	>55
Τσιμεντοκονιάματα	>80

Πίνακας 9.1. Ισοδύναμο άμμου για διάφορες χρήσεις αδρανών υλικών.

9.3.3. Δοκιμή ‘μπλε’ του μεθυλενίου (MBV)

Η δοκιμή αυτή συμπληρώνει τη δοκιμή ισοδύναμης άμμου σχετικά με τον καθορισμό αργιλικών ουσιών στα αδρανή. Λόγω της υδροφιλίας της αργίλου, αργιλικές ουσίες διογκώνονται με νερό και καταστρέφουν το ασφαλτόμιγμα ή/και τις στρώσεις του οδοστρώματος. Πράγματι, ενώ η δοκιμή ισοδύναμης άμμου καθορίζει μόνο την ύπαρξη κόκκων αργίλου, η δοκιμή ‘μπλε’ του μεθυλενίου καθορίζει την παρουσία αργιλικών ορυκτών στα αδρανή.

Τα αργιλικά ορυκτά έχουν πολλή μεγάλη ειδική επιφάνεια σε σχέση με μη αργιλικά ορυκτά και έτσι προσροφούν εύκολα μόρια του μπλε του μεθυλενίου. Η δοκιμή συνίσταται στη μέτρηση της ποσότητας του μπλε που χρειάζεται για την μοριακή επικάλυψη όλων των αργιλικών συστατικών των αδρανών, η οποία είναι ανάλογη με την ποσότητα των αργιλικών ορυκτών.

Η τιμή του ‘μπλε’ του μεθυλενίου (MBV) καθορίζεται από τη σχέση

$$MBV = V/f \quad (9.3)$$

όπου V είναι ο όγκος του 'μπλε' του μεθυλενίου που χρησιμοποιήθηκε και f η ποσότητα των αδρανών. Οι επιτρεπόμενες τιμές του MBV είναι μικρότερες του 1.5 για βάσεις και υποβάσεις, του 1.0 για ασφαλτομίγματα και σκυροδέματα και του 0.5 για μίγματα slurry seals.

9.4. Έλεγχοι σκληρότητας και ανθεκτικότητας

9.4.1. Αντοχή πετρωμάτων σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη βρίσκεται από το πείραμα θλίψης σε 3 τουλάχιστον δοκίμια (συνήθως κυλινδρικά), με ταχύτητα φόρτισης μικρότερη από 7 kg/cm² ανά sec, και δίνεται από τη σχέση:

$$C = P/A \quad (9.4)$$

Όπου P=το ολικό φορτίο και A=το εμβαδο της επιφάνειας.

9.4.2. Δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση

Τα αδρανή υλικά εκτιθέμενα στην επίδραση των κλιματολογικών εναλλαγών, ψύξη-θέρμανση, διαβροχή-ξήρανση, υπόκεινται σε μεγάλες μεταβολές του όγκου τους με καταστρεπτικά αποτελέσματα στα υλικά που δεν είναι ανθεκτικά σε αποσάθρωση (απώλεια φέρουσας ικανότητας στο οδόστρωμα, ρηγμάτωση, οπές, αποσάθρωση).

Η ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση ή αλλιώς 'υγεία' των αδρανών υλικών, προσδιορίζεται είτε με την επίδραση διαλυμάτων θεικών αλάτων (θεικό νάτριο ή θεικό μαγνήσιο) είτε με τη μέθοδο ψύξης και απόψυξης. Οι πιο πάνω μέθοδοι, εφαρμόζονται είτε σε τεμάχια πετρώματος, είτε σε διαβαθμισμένο λεπτόκοκκο και χονδρόκοκκο υλικό, και στοχεύουν στον μετά από κατάλληλη επεξεργασία, προσδιορισμό του ποσοστού φθοράς μετά από κοσκίνιση. Για υγιή πετρώματα, όταν π.χ. χρησιμοποιείται θεικό νάτριο, θα πρέπει τα ποσοστά φθοράς να είναι μικρότερα του 12% και 15% για χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή, αντίστοιχα.

9.4.3. Δοκιμή αντοχής σε τριβή και κρούση κατά Los Angeles

Κατά τη δοκιμή αυτή κατά Los Angeles (AASHTO T96-99, 1999) καθορίζεται η φθορά που επέρχεται σε διαβαθμισμένα αδρανή υπό την επίδραση δυνάμεων τριβής και κρούσης. Το ποσοστό της φθοράς είναι ένας δείκτης κατάλληλος για την χρησιμοποίηση των αδρανών στην οδοποιία. Το πείραμα εκτελείται σε δείγμα 5 kg (προβλέπονται τέσσερις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις Α, Β, Γ και Δ) στη συσκευή Los Angeles (Σχ.9.2) εσωτερικών διαστάσεων D=71.1cm και L=50.8 cm που περιέχει χαλύβδινες σφαίρες και περιστρέφεται 500 φορές με ταχύτητα 30-33 rev/min (στροφές/λεπτό).

Στη συνέχεια το δείγμα εξάγεται από τη μηχανή, κοσκινίζεται με το κόσκινο 1.70 mm (No 12) και το συγκεκριμένο υλικό πλένεται, ξηραίνεται και ζυγίζεται. Το ποσοστό φθοράς W, δίνεται από τη σχέση

$$W = [(B_0 - B) / B_0] 100 \quad (9.5)$$

όπου B_0 =αρχικό βάρος δείγματος και B =βάρος υλικού που συγκρατείται στο κόσκινο. Τα επιτρεπόμενα όρια ποσοστού φθοράς $W(\%)$ αδρανών είναι:

1. Υποβάσεις-βάσεις $\rightarrow W < 40$
2. Στρώσεις κυκλοφορίας $\rightarrow W < 30$



Σχήμα 9.2. Φωτογραφία συσκευής Los Angeles (από Νικολαΐδη, 2002).

9.4.4. Δοκιμή αντοχής σε φθορά και κρούση αδρανών υλικών (Aggregate Impact Value=A.I.V.)

Κατά τη δοκιμή αυτή καθορίζεται η φθορά που επέρχεται σε δείγμα υλικού διερχόμενο από το κόσκινο των 14 mm και συγκρατούμενο από το κόσκινο των 10 mm, το οποίο τοποθετείται σε κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 102 mm και εσωτερικού βάθους 50 mm, υπό την επίδραση 15 κρούσεων με μεταλλική σφύρα 14 kg από ύψος 380+5 mm. Ο δείκτης φθοράς σε κρούση των αδρανών, που δίνει ένα σχετικό μέτρο της αντίστασης σε αιφνίδιο κραδασμό, φόρτιση ή κρούση, δίνεται από τον τύπο

$$\text{Δείκτης φθοράς} = (B/B_0) 100 \quad (9.6)$$

όπου B_0 =αρχικό βάρος και B =βάρος υλικού που διέρχεται από το κόσκινο των 2.36 mm. Για τιμές του δείκτη μεγαλύτερες του 25 τα αδρανή είναι ακατάλληλα για στρώσεις κυκλοφορίας, ενώ για τιμές μικρότερες του 10 θεωρούνται εξαιρετικά σκληρά αδρανή. Ο Πίνακας 9.2 δίνει τιμές του A.I.V. για διάφορα αδρανή κατά BS 812 (1989).

9.4.5. Δοκιμή αντοχής σε συντριβή αδρανών υλικών (Aggregate Crushing Value=A.C.V.)

Ο δείκτης συντριβής των αδρανών υλικών δίνει ένα σχετικό μέτρο της αντίστασής τους στη θραύση όταν βαθμιαία επιβάλλεται φορτίο θλίψης. Η δοκιμή συνίσταται σε εφαρμογή φορτίου 400 kN σε χρόνο 10 min με σταθερή ταχύτητα σε δείγμα διαβάθμισης, ως την προηγούμενη δοκιμή, που τοποθετείται σε δοχείο διαμέτρου 150

mm. Για τιμές του δείκτη φθοράς μεγαλύτερες του 25 τα αδρανή είναι ακατάλληλα για στρώσεις κυκλοφορίας, ενώ για τιμές μικρότερες του 10 θεωρούνται εξαιρετικά σκληρά αδρανή. Ο Πίνακας 9.2 δίνει τιμές του A.C.V. για διάφορα αδρανή κατά BS 812 (1989).

9.4.6. Δοκιμή καθορισμού δυνάμεων για 10% λεπτόκοκκα

Κατά την δοκιμή αυτή καθορίζεται η δύναμη που επιφέρει θραύση των αδρανών, ώστε να δημιουργηθούν λεπτόκοκκα σε ποσοστό 10% (διερχόμενα από το κόσκινο 2.36 mm). Η δοκιμή είναι παρόμοια με την δοκιμή αντοχής σε συντριβή των αδρανών υλικών και χρησιμοποιείται το ίδιο μίγμα υλικών. Η απαιτούμενη δύναμη είναι περίπου 400 kN για σκληρά αδρανή και 10 kN για μαλακά αδρανή.

9.4.7. Δοκιμή αντοχής σε απότριψη (Aggregate Abrasion Value=A.A.V.)

Κατά τη δοκιμή αυτή καθορίζεται το μέτρο αντίστασης των αδρανών υλικών στην επιφανειακή φθορά λόγω τριβής. Για τη δοκιμή χρησιμοποιούνται ψηφίδες υλικού διερχόμενες από το Βρετανικό κόσκινο 14.0 mm και συγκρατούμενες στο ειδικό κόσκινο με σχισμή 20.0 mm και 14 mm (πλάτος σχισμής 10.2+0.15 mm). Οι ψηφίδες τοποθετούνται με σειρά σε ειδική μήτρα και συγκολλούνται με ρητίνη. Έτσι παρασκευάζονται δύο δοκίμια τα οποία τοποθετούνται στη μηχανή τριβής. Αυτή τίθεται σε περιστροφική κίνηση, ενώ συγχρόνως εκρέει ειδική πρότυπη άμμος λείανσης με ρυθμό 700-900 gr/min. Μετά την συμπλήρωση 500 στροφών, υπολογίζεται ο δείκτης φθοράς σε απότριψη W από τον τύπο

$$W = 3 (B_0 - B) / d \quad (9.7)$$

όπου B_0 =το βάρος του δοκιμίου πριν την τριβή (gr), B =το βάρος του δοκιμίου μετά την τριβή (gr) και d =το φαινόμενο βάρος του δείγματος (κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού) (gr/ml). Ο υπολογισμός βασίζεται στην επί τοις εκατό απώλεια κατά βάρος ενός υποτιθέμενου όγκου αδρανούς 33 ml.

Οι τιμές του δείκτη φθοράς σε απότριψη, κυμαίνονται από 2, για μερικά πολύ σκληρά αδρανή, μέχρι και άνω του 35, για αδρανή που χαρακτηρίζονται πολύ μαλακά και δεν είναι κατάλληλα για την κατασκευή επιφανειακών στρώσεων κυκλοφορίας. Ο Πίνακας 9.2 δίνει τιμές του A.A.V. για διάφορα αδρανή κατά BS 812 (1989).

9.4.8. Δοκιμή επιταχυνόμενης στίλβωσης (Accelerated Polishing Test=A.P.T.)

Ο δείκτης στίλβωσης πετρώματος δίνει ένα μέτρο της αντίστασης του πετρώματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην οδοποιία έναντι της στίλβωτικής δράσης τροχού με αεροθάλαμο, σε συνθήκες παρόμοιες με τη δράση των τροχών των οχημάτων στο κατάστρωμα του δρόμου.

Πάντως, η σχέση που υπάρχει μεταξύ του δείκτη αντίστασης σε στίλβωση πετρώματος (Polished Stone Value=P.S.V.) και της αντίστασης σε ολίσθηση του οδοστρώματος, ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες κυκλοφορίας, τον τύπο της επιφάνειας του οδοστρώματος και άλλους παράγοντες. Για τη δοκιμή σχηματίζονται δοκίμια με ψηφίδες πετρώματος μεγέθους περίπου 10.0 mm (3/8 in). Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδική μηχανή επιταχυνόμενης στίλβωσης και υποβάλλονται σε

στύλβωτική δράση, με σύγχρονη ροή τυποποιημένης πυριτικής άμμου. Ακολούθως, μετρίεται η αντίσταση σε ολίσθηση των δοκιμίων με την φορητή συσκευή τύπου εκκρεμούς (Portable Skid-Resistance Tester) και ο προκύπτων συντελεστής τριβής ορίζεται ως δείκτης αντίστασης σε στύλβωση.

Οι δείκτες αντίστασης σε στύλβωση των αδρανών υλικών, κυμαίνονται από 30, για τα μαλακά πετρώματα και γίνονται αρκετά υψηλοί έως και 80, για τα πολύ σκληρά υλικά, π.χ., για τον τεχνικά ψημένο βωξίτη (Cancined Bauxite), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9.2 κατά BS 812 (1989).

9.5. Ποιοτικοί Έλεγχοι

9.5.1. Έλεγχος μορφής των κόκκων

Ο έλεγχος αυτός γίνεται κυρίως στα θραυστά αδρανή όπου και καθορίζεται η μορφή των κόκκων, δηλαδή τα ποσοστά των επιμηκών κόκκων (μήκος/πλάτος > 1.5) και των πλακοειδών κόκκων (πλάτος/πάχος > 2). Η αναλογία της αντικανονικής μορφής κόκκων, επιμηκών και πλακοειδών, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 50% του συνολικού βάρους του υλικού.

9.5.2. Έλεγχος απορρόφησης υγρασίας

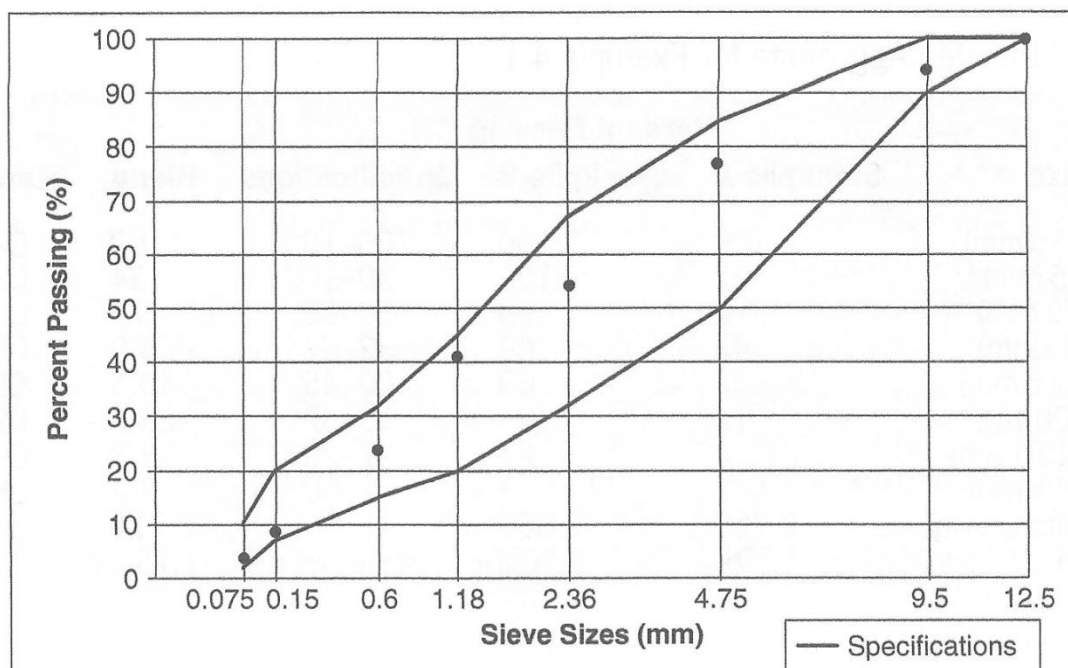
Κατά την δοκιμή αυτή καθορίζεται το πορώδες των αδρανών, το οποίο εν συνεχεία επηρεάζει την ποσότητα της απαιτούμενης ασφάλτου στο μίγμα. Ποσοστό απορροφούμενης υγρασίας των αδρανών μέχρι 2% θεωρείται ικανοποιητικό για στρώσεις κυκλοφορίας ή γενικότερα για επιφανειακές εργασίες.

9.5.3. Κοκκομετρική ανάλυση

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στις στρώσεις του οδοστρώματος είναι μίγματα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών. Το μέγεθος των κόκκων και η κατανομή τους σε ένα κοκκώδες υλικό επηρεάζουν την μηχανική του συμπεριφορά. Η κοκκομετρική ανάλυση καθορίζει την κατανομή των διαστάσεων των κόκκων με την διαδικασία του κοσκινίσματος, με τελικό στόχο τον καθορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών, η οποία θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στην αντίστοιχη ζώνη των προδιαγραφών που προβλέπονται για κάθε στρώση ή κατασκευή του οδοστρώματος. Βασική προϋπόθεση για την ορθή εκτέλεση της δοκιμής αυτής είναι η ύπαρξη αντιπροσωπευτικού βάρους του δείγματος που είναι συνάρτηση των διαστάσεων των κόκκων και κυρίως της μέγιστης ονομαστικής διάστασης των αδρανών (μεγαλύτερες ποσότητες για πιο χονδρόκοκκα υλικά). Μέγιστη διάσταση ορίζεται το μικρότερο άνοιγμα οπής κόσκινου από τις οπές του οποίου διέρχεται όλη η ποσότητα των αδρανών (Αμερικανικές προδιαγραφές) ή συγκρατείται μέχρι 5% των αδρανών (Βρετανικές προδιαγραφές).

Ο καθορισμός των βέλτιστων αναλογιών των αδρανών υλικών στο μίγμα, ώστε η κοκκομετρική του καμπύλη να βρίσκεται εντός των οριακών καμπυλών των προδιαγραφών ονομάζεται σύνθεση των αδρανών. Στο Σχ.9.3 φαίνονται οι κοκκομετρικές καμπύλες προδιαγραφών καθώς και τα σημεία της καμπύλης τυπικού αδρανούς μίγματος. Ο κατακόρυφος άξονας δείχνει το (%) διερχόμενο ποσοστό αδρανών, ενώ ο οριζόντιος άξονας τις διαμέτρους των κοσκίνων σε ίντσες (in). Είναι

προφανές ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος των κοσκίνων, τόσο αυξάνεται το (%) διερχόμενο ποσοστό αδρανών.



Σχήμα 9.3. Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες προδιαγραφών για μίγμα αδρανών (από Papagiannakis and Masad, 2008).

9.6. Αντιολισθηρές κατασκευές

Τα στοιχεία εκείνα τα οποία επηρεάζουν γενικά την συμπεριφορά του οδοστρώματος από άποψη ολισθηρότητας είναι τα χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά, τα χρησιμοποιούμενα συνδετικά υλικά και οι μέθοδοι κατασκευής που θα επιλεγούν. Η αντίσταση λοιπόν σε ολίσθηση της επιφάνειας του οδοστρώματος, εξαρτάται από τους τρεις αυτούς παράγοντες οι οποίοι συνοπτικά εξετάζονται πιο κάτω:

9.6.1. Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά

Είναι προφανές ότι το αδρανές υλικό το οποίο χρησιμοποιείται σε ποσοστό 95% περίπου στη σύνθεση των επιφανειακών στρώσεων των οδοστρωμάτων, αποτελεί τον κυριότερο συντελεστή της αντίστασης σε ολίσθηση του οδοστρώματος. Η επιθυμητή, από την άποψη αυτή, ιδιότητα των αδρανών είναι η ανθεκτικότητα στην λείανση αυτών, που προκαλείται από την επίδραση της κυκλοφορίας.

Τόσο από παρατηρήσεις όσο και από έρευνες σε οδοστρώματα επί των δρόμων και στο εργαστήριο, αποδείχθηκε ότι η συμπεριφορά των διαφόρων αδρανών υλικών στην επίδραση της κυκλοφορίας είναι πολύ διαφορετική. Παρατηρήθηκε ιδιαίτερα ότι

Πέτρωμα	Ειδικό	Υγρασία	PSV Δείκτης αντίστασης	AAV Δείκτης αντοχής	ACV Φθορά σε	AIV Φθορά σε	LA Φθορά Los
---------	--------	---------	------------------------------	---------------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Προέλευση	Βάρος	Απορρόφησης (πορώδες)	στη στίλβωση κατά BS 812	σε απότριψη κατά BS 812	συντριβή κατά BS 812	κρούση κατά BS 812	Angeles κατά AASHTO T 96-99
Σμύριδα Νάξου	3.7-3.8	0.4%	62-28	2.5-3.2	14%	15%	16-22%
Ανδεσίτης Λήμνου	2.65	0.6%	57-62	5.2	10%	10%	19-22%
Ανδεσίτης Αίγινας	2.73	3.0%	50-63	7.3	22%	26%	25-27%
Σκωρία 'ΑΛ-ΣΙ'	3.12	0.8%	49-51	2.5	14%	11%	18-20%
Ψαμμίτης Αράχωβας	2.69	0.5%	60-62	5.7	15%	12%	20-22%
Γνεύσιος Σέριφου	2.64	0.9%	53-56	2.3-3.9	11%	13%	19-23%
Χαλαζίτες	2.64	0.4%	60-65	4.9	16%	22%	23-25%
Συνήθειες απαιτήσεις για δρόμους με μεγάλη κυκλοφορία	---	---	>60	<10	<18%	<25%	<25%

Πίνακας 9.2. Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες σκληρών αδρανών

σε δρόμους βαριάς κυκλοφορίας και σε θέσεις με έντονη φθορά (όπως, π.χ., σε διασταυρώσεις με καμπύλα τμήματα), οι επιφάνειες μερικών κόκκων αδρανών, οι οποίες εκτίθενται στην επίδραση των τροχών των κυκλοφορούντων οχημάτων, γίνονται λείες και ότι, όταν συμβαίνει αυτό η αντίσταση στην ολίσθηση των επιφανειών αυτών δυνατόν να είναι μικρή. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι οι κόκκοι μερικών αδρανών έχουν αξιοσημείωτο βαθμό αντίστασης στην λειαντική δράση της κυκλοφορίας.

Για την μελέτη και κατασκευή μιας αντιολισθηρής στρώσης κυκλοφορίας η πλέον καταλυτική παράμετρος είναι η επιλογή των κατάλληλων αδρανών υλικών σε συσχέτιση με τα προσφερόμενα υλικά και τις οικονομικές δυνατότητες. Η ολισθηρότητα των Ελληνικών οδών, είναι αποτέλεσμα της χρήσης αδρανών υλικών ασβεστολιθικής προέλευσης, που αποτελούν την κυριότερη πηγή αδρανών στη χώρα μας. Τα αδρανή αυτά έχουν ποιοτικά χαρακτηριστικά που καλύπτουν τις απαιτήσεις των αδρανών για οδοστρωσία, ασφαλτομίγματα και σκυροδέματα αλλά δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις για αδρανή για επιφανειακές στρώσεις, διότι τα ασβεστολιθικά αδρανή στίλβωνονται εύκολα και δημιουργούν λείες και ολισθηρές επιφάνειες, ιδιαίτερα όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγάλος.

Ο ρόλος του αδρανούς είναι πρωταρχικός στη δημιουργία ικανοποιητικής τραχύτητας και κατά συνέπεια αντιολισθηρότητας στην επιφανειακή στρώση. Η τραχύτητα, από την οποία εξαρτάται η επαφή ελαστικού-αδρανούς, διακρίνεται στην μικροτραχύτητα που είναι αποτέλεσμα της δομής του αρχικού πετρώματος και την μακροτραχύτητα που είναι αποτέλεσμα των μικρών ανωμαλιών της επιφάνειας της στρώσης και οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος, το σχήμα και τη σχετική θέση των αδρανών.

Η χρήση των αδρανών στις κοινές ασφαλικές στρώσεις επιβάλλει τα αδρανή υλικά να έχουν καθαρότητα και τις συνήθεις μηχανικές ιδιότητες. Στην περίπτωση όμως των αντιολισθηρών στρώσεων, ο δείκτης φθοράς κατά Los Angeles (L.A.) αλλά κυρίως η αντοχή σε απότριψη (A.A.V.) και η αντοχή σε στίλβωση (P.S.V.) είναι οι σπουδαιότερες ιδιότητες των αδρανών που τα χαρακτηρίζουν ως σκληρά αδρανή υλικά και επομένως κατάλληλα για τη δημιουργία αντιολισθηρής επιφάνειας. Η αντοχή σε απότριψη επιτρέπει την διατήρηση της μακροτραχύτητας, ενώ η αντίσταση σε στίλβωση επιτρέπει τη διατήρηση της μικροτραχύτητας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η αντοχή σε στίλβωση εξαρτάται από τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά του πετρώματος και κυρίως την ορυκτολογική του σύσταση, τη σκληρότητα, το μέγεθος και σχήμα των κρυστάλλων, τη συνοχή μεταξύ των κόκκων, τη διαφορετική σκληρότητα μεταξύ των ορυκτολογικών συστατικών και το πορώδες, που σε υψηλό ποσοστό της τάξης του 30% σημαίνει δραστική μείωση της σκληρότητας του αδρανούς.

Στον Πίνακα 9.2 φαίνονται οι ιδιότητες μερικών σκληρών αδρανών της χώρας μας και οι απαιτήσεις για τους δείκτες PSV, AAV, ACV, AIV, LA για σκληρά αδρανή αντιολισθηρών στρώσεων σε δρόμους με βαριά κυκλοφορία. Οι τρεις σπουδαιότεροι δείκτες για το χαρακτηρισμό των αδρανών ως κατάλληλων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι ο δείκτης αντίστασης στη στίλβωση (PSV), ο δείκτης αντοχής σε απότριψη (AAV) και ο δείκτης φθοράς κατά Los Angeles. Για παράδειγμα, αδρανές με PSV=55, AAV=10 και LA=25 είναι υλικό αντιολισθητικό κατάλληλο για τις επικίνδυνες θέσεις της οδού (προσεγγίσεις σε σηματοδότες, διαβάσεις, διασταυρώσεις, κόμβους και σε τμήματα με κλίσεις πάνω από 5%) με βαριά κυκλοφορία.

9.6.2. Τα χρησιμοποιούμενα συνδετικά υλικά

Γενική απαίτηση για την επίτευξη αντιολισθηρών επιφανειών είναι ότι δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να υπάρχει περίσσεια ασφαλικού συνδετικού στην επιφάνεια του οδοστρώματος ούτε να παρουσιαστεί πλεόνασμα ασφάλτου (εξίδρωση) λόγω συμπύκνωσης από την κυκλοφορία ή από άλλους λόγους. Η κάλυψη των επιφανειακών αδρανών από ασφάλτο έχει, όπως είναι εύλογο σαν αποτέλεσμα, την δημιουργία ολισθηρής επιφάνειας.

Παράλληλα όμως δεν θα πρέπει ο ασφαλιτοτάπητας να είναι φτωχός σε συνδετικό υλικό γιατί τότε αποσπώνται από την επιφάνειά του κόκκοι αδρανών, με αποτέλεσμα τη φθορά του οδοστρώματος αλλά και την λείανση των απομενόντων κόκκων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Απαιτείται συνεπώς κατά περίπτωση εκτέλεση ειδικής μελέτης σύνθεσης του ασφαλιτομίγματος και διασφάλιση με κατάλληλο μηχανισμό της πιστής εφαρμογής αυτής της μελέτης, ώστε να αποφευχθούν τα πιο πάνω μειονεκτήματα.

Ένα άλλο σημείο το οποίο απαιτεί προσοχή είναι ο τύπος της χρησιμοποιούμενης ασφάλτου. Ο χρησιμοποιούμενος τύπος με διεισδυτικότητα 80/100 και το σημείο μάλθωσης περίπου 45°C συντελεί εκτός των άλλων στην εκδήλωση του φαινομένου της εξίδρωσης γιατί οι αναπτυσσόμενες κατά το καλοκαίρι στην Ελλάδα θερμοκρασίες στην επιφάνεια των δρόμων υπερβαίνουν τους 60°C, δηλαδή είναι

κατά πολύ υψηλότερες του σημείου μάλθωσης. Φαίνεται λοιπόν ότι θα ήταν προτιμότερο, η χρησιμοποίηση του τύπου της ασφάλτου να καθορίζεται ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, δηλαδή, σκληρότερη σε θερμά κλίματα και μαλακότερη σε ψυχρά κλίματα.

Για ειδικές απαιτήσεις στις αντιολισθηρές κατασκευές έχουν σήμερα παρασκευαστεί και άρχισαν να χρησιμοποιούνται ειδικές ασφαλτοι με πρόσθετα ελαστομερή και ρητίνες.

9.6.3. Μέθοδοι κατασκευής αντιολισθηρών επιφανειών

Το πρόβλημα της κατασκευής των αντιολισθηρών κατασκευών, είναι πρόβλημα οικονομικό και τεχνικό. Οικονομικό, γιατί τα υλικά κατασκευής αντιολισθηρών επιφανειών (αδρανή-συνδετικά), τα οποία διατηρούν υψηλό συντελεστή αντίστασης σε ολίσθηση μ_k για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχουν συνήθως υψηλό κόστος. Είναι όμως και τεχνικό, γιατί οι μέθοδοι τέτοιων κατασκευών απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, εμπειρία και σε πολλές περιπτώσεις την χρησιμοποίηση ειδικών μηχανημάτων.

Εξάλλου η επιλογή της κάθε μεθόδου είναι συνάρτηση και άλλων παραγόντων, όπως η κατηγορία του δρόμου, τα γεωμετρικά στοιχεία, η θέση του τμήματος, οι τυχόν ζητούμενες συμπληρωματικές ιδιότητές της υπό κατασκευή αντιολισθηρής στρώσης (όπως π.χ. ενίσχυση του υφιστάμενου οδοστρώματος), τα διαθέσιμα αδρανή και συνδετικά υλικά κλπ.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αντιολισθηρών στρώσεων είναι οι παρακάτω:

- α) Μέθοδος με προεπαλειμμένες ψηφίδες
- β) Πορώδεις τάπητες
- γ) Μέθοδος θερμού ασφαλτομίγματος
- δ) Μέθοδος slurry seal
- ε) Μέθοδος επιφανειακών επαλείψεων

Τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και ο τρόπος κατασκευής κάθε μεθόδου αναφέρονται στην βιβλιογραφία (π.χ., Νικολαΐδης, 2002). Οι τύποι των αντιολισθηρών ασφαλτικών ταπήτων που είναι πρόσφοροι για την χώρα μας είναι κλειστού-ημίκλειστου τύπου τάπητες, πορώδεις τάπητες και slurry seal, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της οδού και της περιοχής.

10. ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

10.1. Γενικά

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη της σύνθεσης αδρανών και ασφάλτου για τη δημιουργία ασφαλικού σκυροδέματος. Το μίγμα των αδρανών (σκύρα, άμμος και παιπάλη) πρέπει να είναι ομαλά διαβαθμισμένο μεταξύ των καθορισμένων ορίων της κατηγορίας ασφαλικού σκυροδέματος που επιλέχτηκε. Κατά τη σύνθεση αυτή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι εξής παράγοντες που επηρεάζουν ευμενώς την ευστάθεια του ασφαλικού σκυροδέματος, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις βαριάς κυκλοφορίας και μεγάλου ανά τροχό φορτίου:

1. Χρησιμοποίηση αδρανών της μέγιστης δυνατής διάστασης κόκκων.
2. Χρησιμοποίηση αδρανών της μέγιστης δυνατής αναλογίας χοντρόκοκκων αδρανών.
3. Έλεγχος του χρησιμοποιούμενου ποσοστού παιπάλης προς αποφυγή δημιουργίας πλαστικότητας στο ασφαλικό σκυρόδεμα.

Οι μέθοδοι υπολογισμού της μελέτης σύνθεσης αναπτύσσονται στις ακόλουθες φάσεις:

1. Προσδιορισμός αναλογιών των τριών κλασμάτων των αδρανών, ήτοι, σκύρων, άμμου και παιπάλης.
2. Εκλογή δοκιμαστικού ποσοστού (%) ασφάλτου, για την παροχή στο μίγμα της κατάλληλης ευστάθειας και άλλων χαρακτηριστικών.
3. Δοκιμασία του εκλεγέντος ασφαλικού σκυροδέματος για την διαπίστωση όλων των απαιτούμενων ιδιοτήτων. Περιγραφή της δοκιμασίας ευστάθειας για τον καθορισμό του χρησιμοποιηθέντος τελικού μίγματος και των κατασκευαστικών ιδιοτήτων του.

Για τις ποσοτικές αναλογίες σκύρων, άμμου και παιπάλης δεν έχουν καθοριστεί αυστηροί και άκαμπτοι μέθοδοι. Από την πείρα έχει αποδειχθεί ότι η ποσότητα των σκύρων εντός του ασφαλικού σκυροδέματος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 40 και 65% του ολικού βάρους των αδρανών. Σε ποσότητες μικρότερες των 40% τα σκύρα διακινούνται ή αναδεύονται μέσα στο μίγμα. Έτσι δεν παρουσιάζουν μηχανική εμπλοκή με αποτέλεσμα να μειώνεται η ευστάθεια του μίγματος, λόγω μείωσης της γωνίας εσωτερικής τριβής. Σε αναλογία μεγαλύτερη του 65% τα σκύρα θα αφήνουν στη μάζα του μίγματος μεγάλο ποσοστό κενών με αποτέλεσμα να μειωθεί το φαινόμενο βάρους και η ευστάθεια.

10.2. Ποσοστό ασφάλτου με μέθοδο επιφανειακών εμβαδών

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού της ασφάλτου χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι. Η μέθοδος των επιφανειακών εμβαδών είναι η πιο απλή από όλες, δίνει επιτυχή αποτελέσματα και μπορεί να εφαρμοστεί αμέσως στο εργοτάξιο. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται κυρίως πάνω στην αρχή ότι η περιεκτικότητα του μίγματος σε άσφαλτο σχετίζεται στενά προς το πραγματικό εμβαδόν των επιφανειών των κόκκων του αδρανούς. Κάθε κόκκος των διαφόρων κλασμάτων του μίγματος πρέπει να περιβληθεί εξ'ολοκλήρου με μεμβράνη του συνδετικού υλικού. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευκαμψία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα αδρανή των οποίων η κοκκομετρική διαβάθμιση βρίσκεται σε μεγάλα όρια.

Η μέθοδος των επιφανειακών εμβαδών είναι ουσιαστικά αναλυτική, περιλαμβάνει όμως μια εμπειρική σχέση μεταξύ της κοκκομετρικής διαβάθμισης του αδρανούς, της επιφανειακής υφής του και της απαιτούμενης ποσότητας ασφάλτου για την περικάλυψη κάθε κόκκου. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή χρειάζονται τα παρακάτω στοιχεία:

1. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των καθορισθέντων ποσοστών των σκύρων, άμμου και παιπάλης.
2. Δεδομένα που συσχετίζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών με το επιφανειακό εμβαδόν των κόκκων.
3. Δεδομένα που συσχετίζουν το επιφανειακό εμβαδόν των κόκκων με το ποσοστό της απαιτούμενης ασφάλτου.
4. Δεδομένα για την αντιμετώπιση των μεταβολών του ειδικού βάρους και της επιφανειακής υφής και εν συνεχεία διόρθωση του ποσοστού της ασφάλτου συναρτήσει των μεταβολών αυτών.
5. Δεδομένα για την αντιμετώπιση του απαιτούμενου ποσοστού ασφάλτου ανάλογα με τον τύπο της που χρησιμοποιείται σε συσχετισμό με το επιφανειακό εμβαδό ανά μονάδα βάρους των αδρανών υλικών του μίγματος.

10.3. Ποσοστό ασφάλτου με μέθοδο Marshall

Η εργασία προσδιορισμού του ποσοστού της ασφάλτου με τη μέθοδο των επιφανειακών εμβαδών θεωρείται ως δοκιμαστική μέθοδος και πρέπει να επαληθεύεται με εργαστηριακή μέθοδο σε ασφατόμιγμα που περιέχει την ποσότητα ασφάλτου που προσδιορίστηκε με αυτόν τον τρόπο. Η περισσότερο παραδεκτή εργαστηριακή μέθοδος μελέτης σύνθεσης ασφατικών σκυροδεμάτων είναι η μέθοδος Marshall (AASHTO T245-97, 1998) που εφαρμόζεται και στη χώρα μας λόγω των παρακάτω πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει:

1. Η συσκευή δοκιμασίας είναι ελαφριά και μεταφέρεται εύκολα.
2. Εκτός από την απλότητά της, δίνει γρήγορα ασφαλή αποτελέσματα.
3. Μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο των ασφατομιγμάτων αμέσως μόλις βγουν από την εγκατάσταση ανάμιξης.

Η εργαστηριακή αυτή μέθοδος, που επινοήθηκε από τον Αμερικανό μηχανικό Marshall, χρησιμοποιεί τυποποιημένα κυλινδρικά δοκίμια ασφατομίγματος διαμέτρου 10.16 cm και ύψους 6.45 cm τα οποία παρασκευάζονται με ειδικές μεθόδους θέρμανσης, ανάμιξης και συμπίκνωσης των αδρανών με διάφορες αναλογίες ασφάλτου. Η παρακάτω περιγραφή της παρούσας υποενοότητας έχει βασιστεί στο βιβλίο του Νικολαΐδη (2002).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η διερεύνηση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του συμπτυκνωθέντος ασφατικού σκυροδέματος. Οι ανωτέρω ιδιότητες ορίζονται ως εξής:

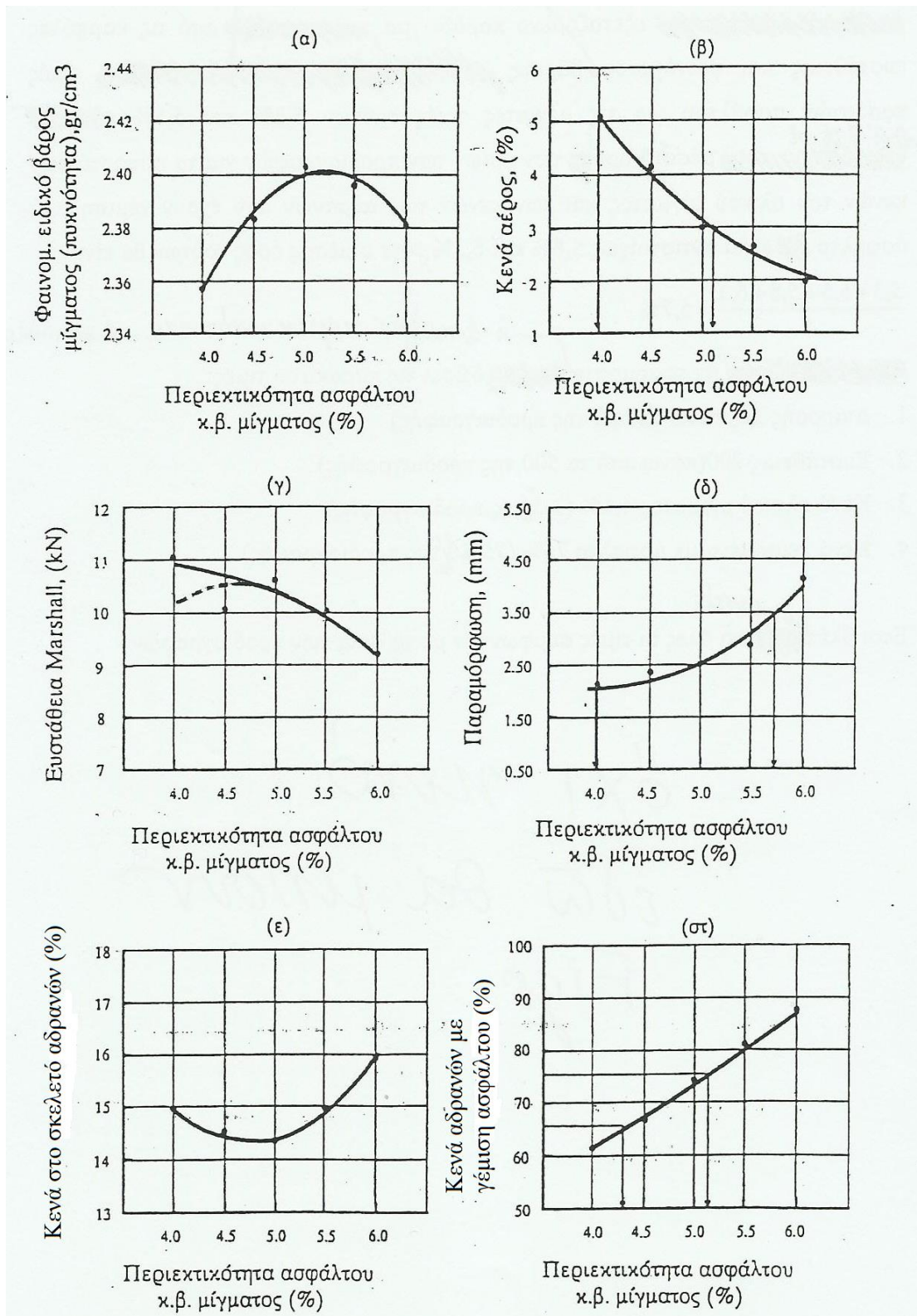
1. Ευστάθεια ενός δοκίμιου είναι το μέγιστο φορτίο σε lbs ή kN που μπορεί να φέρει ένα πρότυπο δοκίμιο στους 60°C όταν φορτίζεται κατά προδιαγεγραμμένη μέθοδο μέχρι τη θραύση του.

2. Υποχώρηση ή διαρροή του παραπάνω δοκιμίου ορίζεται η μετακίνηση ή η παραμόρφωση σε in/100 την οποία παρουσιάζει μεταξύ του μηδενικού φορτίου και του μέγιστου φορτίου (θραύσης) κατά την παραπάνω δοκιμασία της ευστάθειας.
3. Φαινόμενο ειδικό βάρος, ρ_{gp} , είναι το υπολογιζόμενο ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος σε pcf ή gr^*/cm^3 .
4. Ποσοστό (%) κενών αέρα ολικού μίγματος, V_a , είναι το (%) ποσοστό του όγκου των κενών αέρα μέσα στο ολικό συμπτυκνωμένο μίγμα.
5. Ποσοστό (%) κενών στο σκελετό των αδρανών, VMA, είναι το (%) ποσοστό του όγκου των κενών στο σκελετό του συμπτυκνωμένου μίγματος.
6. Ποσοστό (%) κενών που έχουν γέμιση με άσφαλο, VFA, είναι το (%) ποσοστό του όγκου των κενών μέσα στα αδρανή που έχει γεμίσει με άσφαλο.

Σύμφωνα με τη μέθοδο Marshall (AASHTO T245-97, 1998) παρασκευάζεται μία σειρά από 5 δοκίμια ασφαλτομίγματος με διαφορετική περιεκτικότητα σε άσφαλο τα οποία υποβάλλονται σε εργαστηριακές δοκιμές και υπολογισμούς για τον προσδιορισμό των ανωτέρω έξι ιδιοτήτων (ευστάθεια, υποχώρηση, ρ_{gp} , V_a , VMA, VFA) ως συνάρτηση των παραπάνω ποσοστών της ασφάλτου. Ενώνοντας τα πειραματικά σημεία προκύπτουν καμπύλες, όπως αυτές του Σχ.10.1.

Από τη μελέτη τυπικών καμπυλών της εργαστηριακής δοκιμασίας κατά Marshall, όπως αυτές που φαίνονται στο Σχ.10.1, προκύπτει ότι:

1. Το φαινόμενο ειδικό βάρος ρ_{gp} αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου μέχρι μιας μέγιστης τιμής και κατόπιν μειώνεται (Σχ.10.1.α).
2. Τα επί τοις εκατό κενά του ολικού μίγματος V_a μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου μέχρι μηδενισμού (Σχ.10.1.β).
3. Η τιμή της ευστάθειας αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου μέχρι ενός μέγιστου και κατόπιν μειώνεται μέχρι μιας ελάχιστης τιμής (Σχ.10.1.γ). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η καμπύλη ευστάθειας δεν έχει συνήθως μονοσήμαντη μέγιστη τιμή.
4. Η διαρροή (υποχώρηση ή παραμόρφωση) αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου (Σχ.10.1.δ).
5. Τα (%) κενά των αδρανών, VMA, αρχικά μειώνονται και μετά αυξάνονται με το ποσοστό της ασφάλτου (Σχ.10.1.ε).
6. Τα (%) κενά των αδρανών που έχουν γεμίσει από άσφαλο, VFA, αυξάνουν με την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου μέχρι μίας ορισμένης τιμής.



Σχήμα 10.1. Τυπικές καμπύλες αποτελεσμάτων δοκιμών κατά Marshall (από Νικολαΐδη, 2002).

Το βέλτιστο ποσοστό της ασφάλτου για ένα ασφαλτικό σκυρόδεμα προκύπτει με βάση τις προδιαγραφές του Asphalt Institute (1994) για τις διάφορες ιδιότητες της μεθόδου Marshall, όπως αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 10.1, όπου κ/φ σημαίνει

κυκλοφοριακός φόρτος και ITA=ESAL. Το βέλτιστο μίγμα είναι αυτό που ικανοποιεί ταυτόχρονα όλες τις προδιαγραφές του Πίνακα 10.1. Επειδή τέτοια μίγματα είναι περισσότερα από ένα, το τελικό μίγμα επιλέγεται με τη βοήθεια του Σχ.10.2, στο οποίο καταγράφονται οι προδιαγραφές των έξι ιδιοτήτων της μεθόδου Marshall με τις αντίστοιχες οριακές τιμές του ποσοστού ασφάλτου στο μίγμα που προσδιορίζονται με συνδυασμό του Σχ.10.1 και του Πίνακα 10.1.

Κριτήρια Marshall	Μικρός κ/φ ITA < 10 ⁴	Μέσος κ/φ ITA 10 ⁴ -10 ⁶	Μεγάλος κ/φ ITA > 10 ⁶	
	Στρώσεις κυκλοφορίας και βάσεις			
Συμπύκνωση, κτύποι	2x35	2x50	2x75	
Ελάχιστη ευστάθεια, kN (lb)	3.34 (750)	5.34(1200)	8.01 (1800)	
Παραμόρφωση, mm	2.0 - 4.5	2.0 - 4.0	2.0 - 3.5	
Κενά αέρος, %	3 - 5	3 - 5	3 - 5	
Κενά που γέμισαν με άσφαλτο, VFA, %	70 - 80	65 - 78	65 - 75	
	Για όλες τις περιπτώσεις			
	Ονομαστικό μέγεθος αδρανών ^(α) (mm)	Ελάχιστο VMA, (%), για κενά αέρος ^(β) :		
		3%	4%	5%
	63 (2.5")	9.0	10.0	11.0
	50 (2.0")	9.5	10.5	11.5
Κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA), %	37.5 (1.5")	10.0	11.0	12.0
	25.0 (1.0")	11.0	12.0	13.0
	19.0 (3/4")	12.0	13.0	14.0
	12.5 (1/2")	13.0	14.0	15.0
	9.5 (3/8")	14.0	15.0	16.0
	4.75 (No. 4)	16.0	17.0	18.0
	2.36 (No. 8)	19.0	20.0	21.0
	1.18 (No. 16)	21.5	22.5	23.5

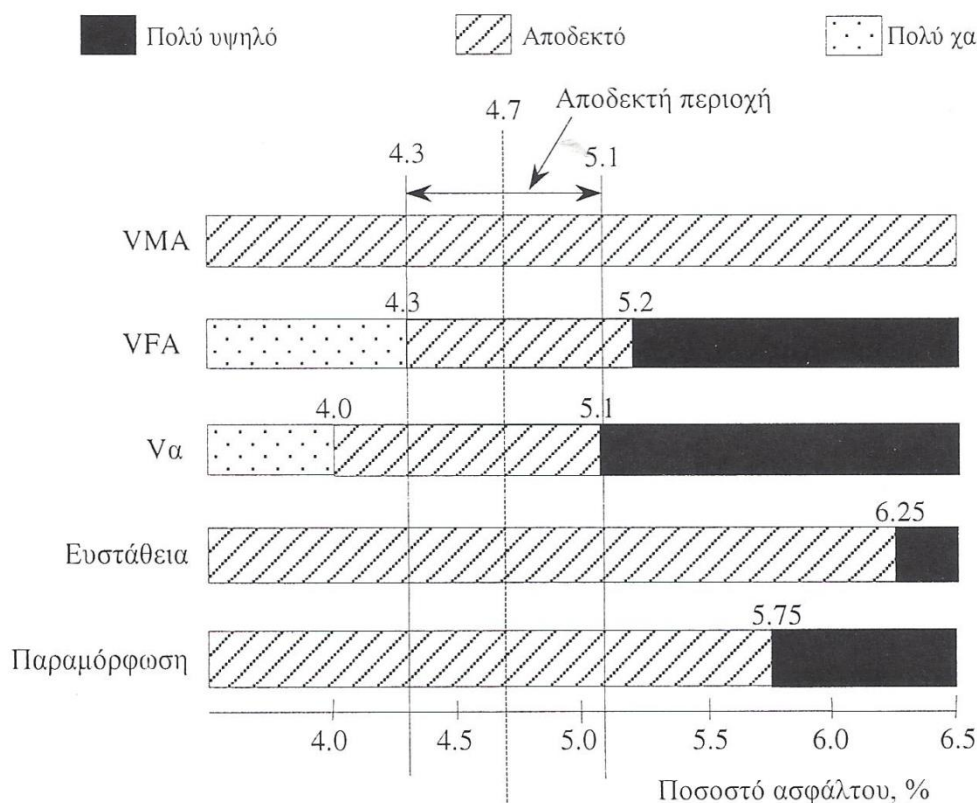
^(α) Το ονομαστικό μέγεθος αδρανών, στην περίπτωση αυτή, καθορίζεται από το αμέσως προηγούμενο μεγαλύτερο κόσκινο του πρώτου, που συγκρατεί περισσότερο από 10% αδρανή υλικά

^(β) Για ενδιάμεσα ποσοστά κενών το VMA καθορίζεται με γραμμική παρεμβολή

Πίνακας 10.1. Προδιαγραφές ιδιοτήτων μεθόδου Marshall κατά Asphalt Institute (1994), (από Νικολαΐδη, 2002).

Οι καμπύλες, του Σχ.10.1 κατασκευάστηκαν για ασφαλτόμιγμα με μέγεθος κόκκων 19mm, που συμπυκνώθηκε με 75 κτύπους για την περίπτωση βαριάς κυκλοφορίας. Από τον Πίνακα 10.1, για κενά αέρος 4% (μέσος όρος μεταξύ 3% και 5%), το ελάχιστο VMA=13%, το VFA=65-75%, η παραμόρφωση=2.0-3.5mm και η ελάχιστη

ευστάθεια 8.01kN. Από τις καμπύλες του Σχ.10.1, μπορεί κανείς να βρει ότι τα ποσοστά ασφάλτου που ανταποκρίνονται στους παραπάνω περιορισμούς είναι: οποιοδήποτε για VMA, 4.3-5.2% για VFA, 4.0-5.1% για V_a , μικρότερο από 5.75% για παραμόρφωση και μικρότερο από 6.25% για ευστάθεια, όπως φαίνεται στο Σχ.10.2.



Σχήμα 10.2. Γραφική παράσταση οριακών τιμών ποσοστού ασφάλτου για ιδιότητες μεθόδου Marshall.

Από το Σχ.10.2, μπορεί κανείς να προσδιορίσει την κοινή αποδεκτή περιοχή ποσοστού ασφάλτου που είναι μεταξύ 4.3 και 5.1% με μέση τιμή 4.7%. Η τιμή αυτή 4.7% αποτελεί το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου του μίγματος κατά βάρος. Έτσι με βάση το Σχ.10.1.α, μπορεί κανείς να προσδιορίσει το μέγιστο φαινόμενο ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος, που προκύπτει ότι είναι $\rho_{gp}=2.387\text{gr}^*/\text{cm}^3$.

11. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

11.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό τίγονται διάφορα θέματα σχετικά με την κατασκευή των στρώσεων ενός οδοστρώματος, όπως κατασκευή υπόβασης και βάσης, σταθεροποίηση εδάφους, κατασκευή κυκλοφοριόπηκτων και υδατόπηκτων οδοστρωμάτων και κατασκευαστικά πλάκας σκυροδέματος.

11.2. Κατασκευή υπόβασης

Κατά κανόνα, η υπόβαση κατασκευάζεται με υλικά σταθεροποιημένου τύπου, δηλαδή αμμοχάλικο θραυστό από ποτάμια, χείμαρρους κλπ. ή θραυστό υλικό από κατάλληλους λίθους κάθε φύσης.

Σχετικά με το αδρανές υλικό κατασκευής υπόβασης, για το οποίο η διαβάθμισή του καθορίζεται από τον Πίνακα 11.1, σημειώνονται τα εξής:

1. Το υλικό πρέπει να αποτελείται από σκληρά και ανθεκτικά κομμάτια της απαιτούμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης.
2. Το υλικό πρέπει να είναι καθαρό, ομοιόμορφο σε ποιότητα, συμπαγές και να μην έχει φυτικές, αργιλικές ή άλλες ξένες προσμίξεις. Οι κόκκοι του πρέπει να είναι κατά το δυνατόν κυβικής μορφής, δηλαδή να μην περιέχει πλακοειδείς ή επιμήκεις κόκκους.
3. Η φθορά σε τριβή και κρούση του υλικού κατά Los Angeles, που συγκρατείται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 4.76 mm (No 4), δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 50 %.
4. Η ποσότητα του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 0.074 mm (No 200), πρέπει να είναι μικρότερη από τη μισή ποσότητα του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 0.42 mm (No 40).
5. Το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 0.42 mm (No 40), πρέπει να έχει όριο υδατότητας όχι μεγαλύτερο από 25 και δείκτη πλαστικότητας όχι μεγαλύτερο από 4.
6. Το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 4.76 mm (No 4) πρέπει να έχει ισοδύναμο άμμου όχι μικρότερο από 40.
7. Η ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (δοκιμή υγείας) πρέπει να γίνεται με θειικό νάτριο και η απώλεια βάρους σε πέντε κύκλους δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 12 %.
8. Σε περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί θραυστό αμμοχάλικο, ποσοστό τουλάχιστον 50 % των κομματιών που συγκρατούνται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής πλευράς 4.76 mm (No 4) πρέπει να έχουν επιφάνεια που να προέρχεται από θραύση.
9. Η τροφοδότηση στο θραυστικό συγκρότημα (σπαστήρα) πρέπει να γίνεται με καθαρό υλικό απαλλαγμένο από προσμίξεις αργίλου.
10. Γενικά πρέπει να προτιμάται υλικό που προέρχεται από λατομεία (κυρίως ασβεστολιθικά στην Ελλάδα), διότι το υλικό που προέρχεται από ποτάμια, χείμαρρους κλπ. δεν είναι σταθερά καλής ποιότητας.

11. Στα πεδινά εδάφη πρέπει το οδόστρωμα να κατασκευάζεται τουλάχιστον 0.30 έως 0.50 m ψηλότερα από το φυσικό έδαφος, έστω και αν έχουν γίνει παλιότερα εργασίες οδοστρωσίας που δεν ικανοποιούν την αρχή αυτή.
12. Αν στα ορύγματα βρεθεί ακατάλληλο υλικό, πρέπει να γίνει αφαίρεση αυτού.

ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΟΣΚΙΝΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΟΠΗΣ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ % ΚΑΤΑ ΒΑΡΟΣ				
ΑΝΟΙΓΜΑ ΒΡΟΧΙΔΑΣ		ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ Α	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ Β	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ Γ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ Δ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ Ε
In	mm					
3	76,2	100	-	-	-	-
2	50,8	65-100	100	-	-	-
1,5	38,1	-	70-100	100	-	-
1 1/4	31,7	-	-	-	100	-
1	25,4	45-75	55-85	70-100	83-100	100
3/4	19,1	-	50-80	60-90	65-95	70-100
3/8	9,52	30-60	40-70	45-75	47-77	50-80
No 4	4,76	25-50	30-60	30-60	33-63	35-65
No 10	2,00	20-40	20-50	20-50	23-50	25-50
No 40	0,42	10-25	10-30	10-30	13-30	15-30
No 200	0,074	3-10	5-15	5-15	5-15	5-15

Πίνακας 11.1. Διαβάθμιση αδρανών υλικών.

Οι δοκιμές επί των αδρανών υλικών είναι:

1. Δειγματοληψία
2. Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών υλικών
3. Ισοδύναμο άμμου
4. Φθορά κατά τη μέθοδο Los Angeles
5. Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (δοκιμή υγείας)
6. Υλικό διερχόμενο από το κόσκινο No 200 (έλεγχος παιπάλης)
7. Όριο υδαρότητας
8. Όριο πλαστικότητας
9. Δείκτης πλαστικότητας
10. Σχέση υγρασίας-πυκνότητας

Από τις ανωτέρω δοκιμές, οι πρώτες έξι έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 9. Το όριο υδαρότητας καθορίζει την περιεχόμενη υγρασία του υλικού και προσδιορίζεται με τη βοήθεια της συσκευής Casagrande. Το όριο πλαστικότητας ορίζεται ως η περιεχόμενη

στο δείγμα υλικού υγρασία ώστε αυτό να θρυμματίζεται σε μικρά τεμάχια όταν πλάθεται σε λεπτές ίνες διαμέτρου 3mm. Ο δείκτης πλαστικότητας ορίζεται ως η διαφορά ορίου υδαρότητας μείον ορίου πλαστικότητας. Τέλος, η σχέση υγρασίας-πυκνότητας συνίσταται σε αύξηση της υγρασίας για μικρές πυκνότητες και μείωσή της για μεγάλες πυκνότητες.

Κατά τη κατασκευή της υπόβασης, αρχικά γίνεται η προπαρασκευή της επιφάνειας έδρασης της υπόβασης, δηλαδή της επιφάνειας των χωματοργικών. Πασσαλώνεται ο άξονας της οδού χρησιμοποιώντας ταχύμετρο, μεταλλική μετροταινία και σιδερένια καρφιά και εξασφαλίζονται τα σημεία που αντιστοιχούν στις εκατομμετρικές θέσεις της μελέτης. Στη συνέχεια χωροσταθμείται ο άξονας και οι διατομές, με τη βοήθεια οδύσεων μεταξύ των τοπογραφικών σημείων αναφοράς (pepers), χρησιμοποιώντας χωροβάτη, σταδία και μετροταινία. Υποχρεωτικά λαμβάνονται διατομές στα κύρια σημεία κάθε καμπύλης.

Στη συνέχεια γίνεται η μεταφορά, διάστρωση, ανάμιξη και συμπύκνωση του υλικού κατά στρώσεις. Το συμπυκνωμένο πάχος κάθε στρώσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 12 cm. Όταν χρειάζονται περισσότερες από μία στρώσεις, πριν κατασκευασθεί η επόμενη, μορφώνεται και συμπυκνώνεται η προηγούμενη προσεκτικά. Η προκύπτουσα επιφάνεια, μετά τη κατασκευή ολόκληρης της υπόβασης, δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο του 1 cm από το ύψος που προβλέπεται από τη μελέτη.

Για κάθε στρώση, αφού τοποθετηθεί το υλικό, αναμιγνύεται καλά με διαμορφωτήρα (grader). Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης προσθέεται και ποσότητα νερού μέχρι το υλικό να έχει τη βέλτιστη υγρασία. Μετά την ανάμιξη γίνεται διάστρωση και συμπύκνωση του υλικού. Η συμπύκνωση γίνεται με οδοστρωτήρα βάρους ανάλογου προς την επιδιωκόμενη συμπύκνωση (συνήθως χρησιμοποιείται οδοστρωτήρας βάρους 8 έως 14 tn με λείους κυλίνδρους). Η κίνηση του οδοστρωτήρα γίνεται πάντα παράλληλα προς τον άξονα της οδού και ποτέ κάθετα ή υπό γωνία. Η κυλίνδρωση γίνεται από τα άκρα της οδού προς τον άξονα στις ευθυγραμμίες και από το χαμηλότερο άκρο προς το ψηλότερο στις καμπύλες. Κάθε διαδρομή του οδοστρωτήρα πρέπει να καλύπτει την προηγούμενη κατά το μισό τουλάχιστον πλάτος του πίσω τροχού. Η κυλίνδρωση συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί πυκνότητα τουλάχιστον ίση προς το 95 % της πυκνότητας που επιτυγχάνεται στο εργαστήριο με τη προηγμένη μέθοδο Proctor. Γενικά οι δοκιμές επί της υπόβασης είναι έλεγχος συμπύκνωσης και δοκιμαστική φόρτιση.

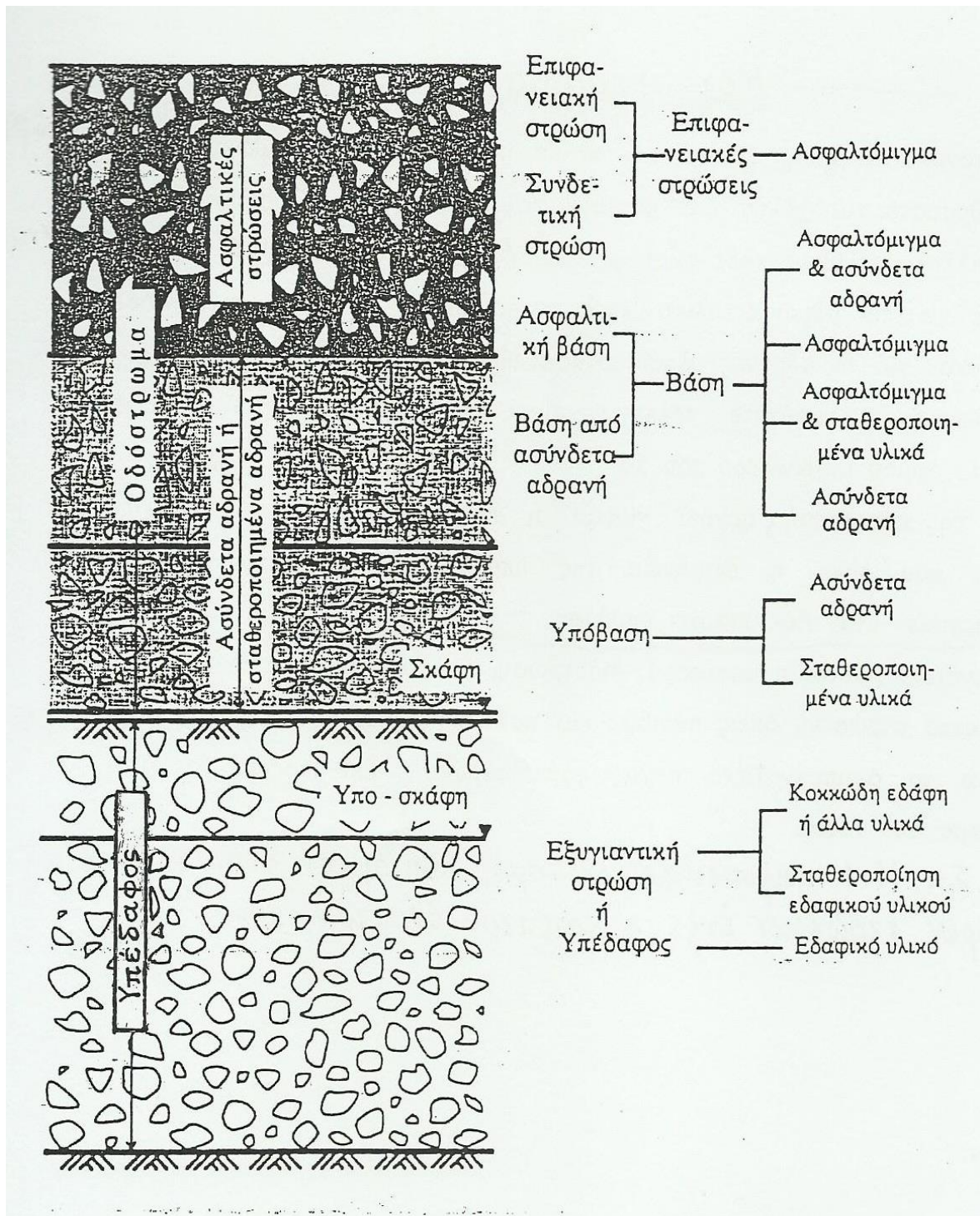
11.3. Κατασκευή βάσης

Κατά κανόνα η βάση κατασκευάζεται με υλικά σταθεροποιημένου τύπου, δηλαδή θραυστό αμμοχάλικο από ποτάμια, χείμαρρους κλπ. ή θραυστό υλικό από κατάλληλους λίθους κάθε φύσης που έχει σταθεροποιηθεί με άργιλο ή τσιμέντο.

Σχετικά με το αδρανές υλικό κατασκευής βάσης ισχύουν γενικά όσα αναφέρθηκαν για το αδρανές υλικό κατασκευής υπόβασης με τη διαφορά ότι εδώ ο δείκτης πλαστικότητας πρέπει να είναι όχι μεγαλύτερος του 3 και το ισοδύναμο άμμου μεγαλύτερο του 50.

Κατά την κατασκευή, αρχικά γίνεται η προπαρασκευή της επιφάνειας έδρασης, που είναι η επιφάνεια της υπόβασης ή η επιφάνεια των χωματουργικών όταν δεν υπάρχει υπόβαση. Στη συνέχεια γίνεται η μεταφορά, διάστρωση, ανάμιξη και συμπίκνωση του υλικού κατά στρώσεις, όπως ακριβώς και κατά τη κατασκευή της υπόβασης. Και εδώ το συμπυκνωμένο πάχος κάθε στρώσης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 12cm.

Το Σχ.11.1. παρουσιάζει σε τομή λεπτομερή διάταξη των διαφόρων στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.



Σχήμα 11.1. Λεπτομερής διάταξη στρώσεων εύκαμπτου οδοστρώματος.

11.4. Σταθεροποίηση φυσικού εδάφους

Σταθεροποίηση εδάφους ονομάζεται η επεξεργασία του εδαφικού υλικού με άλλα εδαφικά υλικά ή με ειδικά πρόσθετα υλικά, που ονομάζονται σταθεροποιητές, ώστε η προκύπτουσα στρώση να έχει αυξημένη ευστάθεια, δηλαδή να μην παραμορφώνεται σημαντικά από την επίδραση των φορτίων της κυκλοφορίας και των καιρικών συνθηκών. Το σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων σταθεροποίησης είναι ότι με αυτές δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης υλικών που στη φυσική τους κατάσταση είναι ακατάλληλα για έργα οδοποιίας. Η σταθεροποίηση του εδάφους μπορεί να γίνει κυρίως με άργιλο και τσιμέντο.

11.4.1. Σταθεροποίηση με άργιλο

Τα χαλικώδη και αμμώδη εδάφη δεν επηρεάζονται από την υγρασία αλλά δεν έχουν ικανή συνοχή, ώστε να αποτελούν ανθεκτικό σύνολο κατάλληλο να αντισταθεί στη δράση της κυκλοφορίας. Τα αργιλώδη εδάφη είναι συνεκτικά μόνο όταν είναι ξηρά, ενώ υπό την επίδραση της υγρασίας γίνονται πλαστικά και ολισθηρά. Με τη σταθεροποίηση αναμιγνύονται χαλίκια, άμμος και άργιλος σε κατάλληλα ποσοστά, ώστε να προκύπτει μίγμα που να έχει τέτοια κοκκομετρική διαβάθμιση που να μπορεί να αντισταθεί στη δράση της κυκλοφορίας. Στο μίγμα αυτό το αμμοχαλικώδες υλικό παίζει το ρόλο του ανθεκτικού υλικού, ενώ η άργιλος το ρόλο του συνδετικού υλικού. Η αναλογία της αργίλου στο μίγμα κυμαίνεται από 20 έως 25%.

Η εργασία της σταθεροποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Εκσκαφή του εδάφους στο καθορισμένο βάθος και δημιουργία της σκάφης (Σχ.11.1).
2. Προμήθεια χονδρού και συνδετικού υλικού.
3. Ανάμιξη και διάστρωση του μίγματος αμμοχάλικου και αργίλου σε στρώση πάχους 20 cm.
4. Διαβροχή και συμπύκνωση της στρώσης. Η συμπύκνωση γίνεται αρχικά με οδοντωτό οδοστρωτήρα και στη συνέχεια με ελαστικοφόρο.

Παρατηρήθηκε ότι τα χωμάτινα οδοστρώματα συμπεριφέρονται καλά όταν είναι λίγο υγρά, αλλά καταστρέφονται εύκολα όταν ξηραίνονται. Για να διατηρείται η σχετική υγρασία ενσωματώνονται στο σταθεροποιημένο έδαφος ορισμένα υγροσκοπικά χημικά προϊόντα (χλωρικό ασβέστιο, χλωρικό νάτριο κλπ.). Οι χρησιμοποιούμενες ποσότητες χλωριούχων αλάτων είναι από 1.10 έως 1.40 kg/m².

11.4.2. Σταθεροποίηση με τσιμέντο

Το τσιμέντο εντός του προς σταθεροποίηση εδαφικού υλικού δεν ενεργεί όπως στη περίπτωση του σκυροδέματος. Εδώ το τσιμέντο δεν γεμίζει τα κενά των αδρανών και δεν περιβάλλει πλήρως τους κόκκους, αλλά δημιουργεί συσσωματώματα με τους μικρούς κόκκους του υλικού, τα οποία συνδέονται ισχυρά μεταξύ τους δημιουργώντας μια κυψελωτή κατασκευή. Η κυψελωτή αυτή κατασκευή δημιουργεί μέσα στη μάζα του υλικού ισχυρότερο σκελετό, ο οποίος αυξάνει τη μηχανική αντοχή του υλικού και βελτιώνει την ανθεκτικότητά του στις επιδράσεις του ύδατος και του

παγετού. Το απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου για κάθε είδος εδάφους πρέπει να προσδιορίζεται εργαστηριακά. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 8 έως 12%. Η εργασία σταθεροποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Σταθεροποίηση της σκάφης σε βάθος από 15 έως 30 cm (Σχ.11.1).
2. Κονιορτοποίηση του εδάφους που πρόκειται να σταθεροποιηθεί. Η κονιορτοποίηση γίνεται με κατάλληλα για το σκοπό αυτό μηχανήματα.
3. Διανομή του τσιμέντου. Αυτή γίνεται επί του σειραδίου με τα χέρια ή με ειδικά μηχανήματα διανομής.
4. Ανάμιξη τσιμέντου και εδάφους. Αυτή γίνεται με διαμορφωτή.
5. Διαβροχή του μίγματος.
6. Διαμόρφωση και κυλίνδρωση του μίγματος.
7. Προφύλαξη του οδοστρώματος κατά την πήξη.

Οι εργασίες σταθεροποίησης με τσιμέντο πρέπει να γίνονται με γρήγορο ρυθμό. Οι απαιτήσεις ως προς τη χρονική διαδοχή των εργασιών καθορίζονται από τη σκλήρυνση του τσιμέντου. Η διάρκεια της διαβροχής πρέπει να είναι το πολύ 3 ώρες. Το υγρό μίγμα εδάφους-τσιμέντου δεν επιτρέπεται να παραμείνει χωρίς ανάμιξη περισσότερο από 0.5 ώρες. Η συμπύκνωση κάθε μίγματος πρέπει να τελειώνει μέσα σε 2 ώρες από το τέλος της ανάμιξης και διαβροχής. Η συνολική διάρκεια των εργασιών από την προσθήκη του τσιμέντου μέχρι το τέλος των εργασιών ανάμιξης, διαβροχής και συμπύκνωσης πρέπει να μην είναι μεγαλύτερη από 6 ώρες.

11.5. Κυκλοφοριόπηκτα και υδατόπηκτα οδοστρώματα

11.5.1. Κυκλοφοριόπηκτα οδοστρώματα

Το βασικό χαρακτηριστικό των κυκλοφοριόπηκτων οδοστρωμάτων είναι ότι η συμπύκνωση του υλικού οδοστρωσίας δεν επιτυγχάνεται με τη χρήση οδοστρωτήρα, αλλά με τη δράση της κυκλοφορίας. Βασικά με τα οδοστρώματα αυτά επιτυγχάνεται η εξασφάλιση βατότητας με απλή, γρήγορη και οικονομική κατασκευή.

Ως υλικό οδοστρωσίας χρησιμοποιείται θραυστό αμμοχάλικο από ποτάμια, χείμαρρους ή λατομεία που αποτελείται από σκληρά υγιή και ανθεκτικά τεμάχια και έχει την κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση.

Η κατασκευή περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Διαμόρφωση της επιφάνειας έδρασης του οδοστρώματος.
2. Μεταφορά και διάστρωση του υλικού με χρήση διαμορφωτήρα.
3. Ανάμιξη του υλικού και προσθήκη νερού μέχρι αυτό να έχει βέλτιστη υγρασία.
4. Διάστρωση του υλικού σε στρώση ορισμένου πάχους. Το συμπυκνωμένο πάχος κάθε στρώσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 cm.
5. Παράδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία, ώστε αυτό να συμπιεστεί και να εμφανιστούν τα ασθενή του σημεία.
6. Διόρθωση των εμφανιζόμενων τοπικών ανωμαλιών.

Τα κυκλοφοριόπηκτα οδοστρώματα απαιτούν άμεση και συνεχή συντήρηση διότι επηρεάζονται σοβαρά από τις καιρικές μεταβολές και την κυκλοφορία των οχημάτων. Η εργασία συντήρησης συνίσταται στην πλήρωση των εμφανιζόμενων λάκκων ή

στην αναμόχλευση και ανακατασκευή τμημάτων του φθαρμένου οδοστρώματος με προσθήκη ή όχι νέου υλικού.

11.5.2. Υδατόπηκτα σκυρωτά οδοστρώματα

Τα υδατόπηκτα σκυρωτά οδοστρώματα (Mac Adam) κατασκευάζονται από σκύρα και σύντριμμα. Όταν το υπέδαφος είναι βραχώδες ή αμμοχαλικώδες, το σκυρωτό εδράζεται απευθείας σε αυτό χωρίς κατασκευή υπόβασης, ενώ διαφορετικά το σκυρωτό εδράζεται σε υπόβαση. Το σκυρωτό δεν αποτελεί στρώση κυκλοφορίας και έτσι η επιφάνειά του πρέπει να προστατεύεται με ασφαλική στρώση κυκλοφορίας.

Τα σκύρα και το σύντριμμα προέρχονται από λίθους ή μεγάλες κροκάλες μετά από πολλαπλή θραύση σε μόνιμη εγκατάσταση. Αυτά πρέπει να αποτελούνται από σκληρά και ανθεκτικά τεμάχια που να είναι γωνιώδη, κατά το δυνατόν κυβικής μορφής και να μην περιέχουν ξένες προσμίξεις. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, ο δείκτης πλαστικότητας, το ισοδύναμο άμμου κλπ. προδιαγράφονται στις αντίστοιχες Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΤΠ) έργων οδοποιίας του Υπουργείου Δημοσίων Έργων.

Το σκυρωτό κατασκευάζεται σε στρώσεις, ώστε το συμπυκνωμένο πάχος κάθε μίας στρώσης να μην είναι μικρότερο από 6.5 cm και μεγαλύτερο από 10 cm. Μετά την κατασκευή του σκυρωτού, το ύψος της επιφάνειας αυτού δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 1cm από το ύψος που προβλέπει η μελέτη.

Η κατασκευή κάθε στρώσης σκυρωτού περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Διάστρωση σκύρων. Αυτή γίνεται με αυτοκινούμενο διανομέα σκύρων.
2. Συμπύκνωση. Αρχικά γίνεται ελαφρό ράντισμα των σκύρων με νερό, ώστε οι επιφάνειές τους να γίνουν ολισθηρές και να διευκολυνθεί έτσι η μετακίνησή τους κατά τη συμπύκνωση χωρίς να θραυστούν. Στη συνέχεια γίνεται η συμπύκνωση με οδοστρωτήρα βάρους 8 έως 10 tn. Η κυλίνδρωση συνεχίζεται μέχρι τέλειας εμπλοκής των σκύρων και μείωσης των κενών στο ελάχιστο.
3. Διάστρωση συντρίμματος. Μετά την τέλεια εμπλοκή των σκύρων διαστρώνεται ομοιόμορφα σύντριμμα σε τέτοιο πάχος, ώστε με την κυλίνδρωση να γίνεται τέλεια απορρόφηση αυτού από τα κενά των σκύρων. Αμέσως μετά την πλήρωση των κενών ενός τμήματος με σύντριμμα, το σκυρωτό καταβρέχεται μέχρι κορεσμού και ακολουθεί κυλίνδρωση. Το κατάβρεγμα και η κυλίνδρωση συνεχίζονται μέχρι να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση. Εμπειρικά αυτό ελέγχεται όταν το σκύρο ριπτόμενο μπρος στους κυλίνδρους του οδοστρωτήρα δεν εισχωρεί εντός του σκυρωτού, αλλά συντρίβεται από αυτούς.

Σημειώνεται τέλος, ότι είναι απαραίτητος ο εγκιβωτισμός του σκυρωτού του οδοστρώματος. Όταν αυτό δεν περιορίζεται από κράσπεδα ή στερεά εγκιβωτισμού, κατασκευάζονται πρώτα τα ερείσματα της οδού τα οποία και συμπυκνώνονται καλά.

11.6. Κατασκευαστικά πλάκας σκυροδέματος

11.6.1. Θεμελίωση πλάκας

Η πλάκα από σκυρόδεμα η οποία αποτελεί και την επιφάνεια κυκλοφορίας του οδοστρώματος, πρέπει να εδράζεται σε κατάλληλη βάση. Η βάση πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 10 cm και η κατασκευή της να γίνεται σύμφωνα με τα γνωστά. Μετά την κυλίνδρωση της βάσης πρέπει να προκύπτει ομαλή επιφάνεια με ανοχή στα υψόμετρα το πολύ 1cm.

11.6.2. Πάχος, οπλισμός και αρμοί πλάκας

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού του πάχους της πλάκας από σκυρόδεμα, τόσο για οδοστρώματα οδών όσο και για οδοστρώματα αεροδρομίων. Πάχη πλακών σκυροδέματος δίνονται στον Πίνακα 11.2.

Κατηγορία	Πάχος πλάκας(cm)	Τσιμέντο (kg/m ³)	Θλίψη (kg/cm ²)	Κάμψη (kg/cm ²)	
Αυτοκινητόδρομοι	22-24	350	450	55	
Οδοί με βαριά κυκλοφορία	24	350	450	55	
Οδοί με μέση κυκλοφορία	20	300	300	40	
Οδοί οικισμών	15	300	300	40	
Κοινοτικές οδοί	15	300	300	40	
Αγροτικές οδοί	12-15	300	300	40	
Οδοστρώματα αεροδρομίων	Ελαφρά	25	350	450	55
	Μεσαία	35	350	450	55
	Βαριά	45	350	450	55

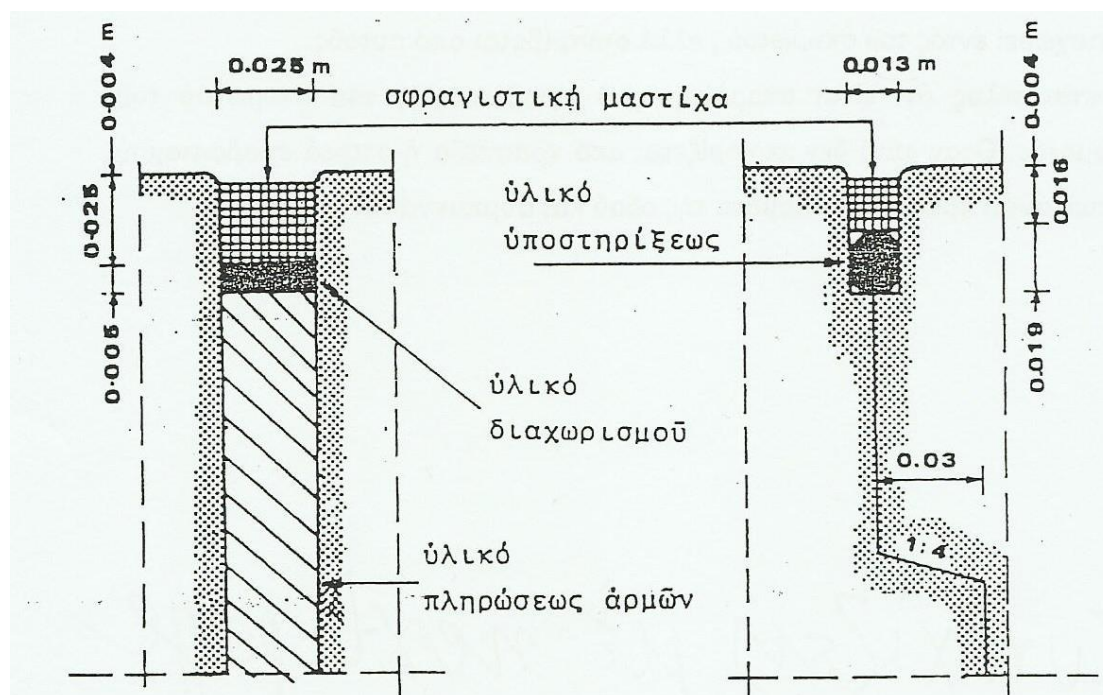
Πίνακας 11.2. Πάχη πλακών σκυροδέματος δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Η πλάκα του οδοστρώματος είναι απαραίτητο να οπλίζεται ώστε να αντέχει στις αλλεπάλληλες καταπονήσεις και να περιορίζονται οι ρωγμές και η καταστρεπτική διείσδυση του νερού. Για τον οπλισμό χρησιμοποιείται συνήθως δομικό πλέγμα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλεγμάτων. Γενικά οι κατά μήκος ράβδοι των πλεγμάτων έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από ότι οι εγκάρσιες. Το βάρος του κατά μήκος οπλισμού ανά μονάδα επιφάνειας πρέπει να είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερο από το βάρος του εγκάρσιου οπλισμού. Ο οπλισμός πρέπει να τοποθετείται σε βάθος 5 cm έως H/3 από την επιφάνεια κύλισης του οδοστρώματος, όπου H το πάχος της πλάκας. Το βάρος του οπλισμού ανά μονάδα επιφάνειας κυμαίνεται από 2 έως 6 kg/m² ανάλογα με τα φορτία και τις διαστάσεις της πλάκας. Πρέπει να υπάρχει επικάλυψη των πλεγμάτων κατά 20 cm περίπου. Συνήθως χρησιμοποιούνται πλέγματα με διάμετρο ράβδων 5 έως 8 mm.

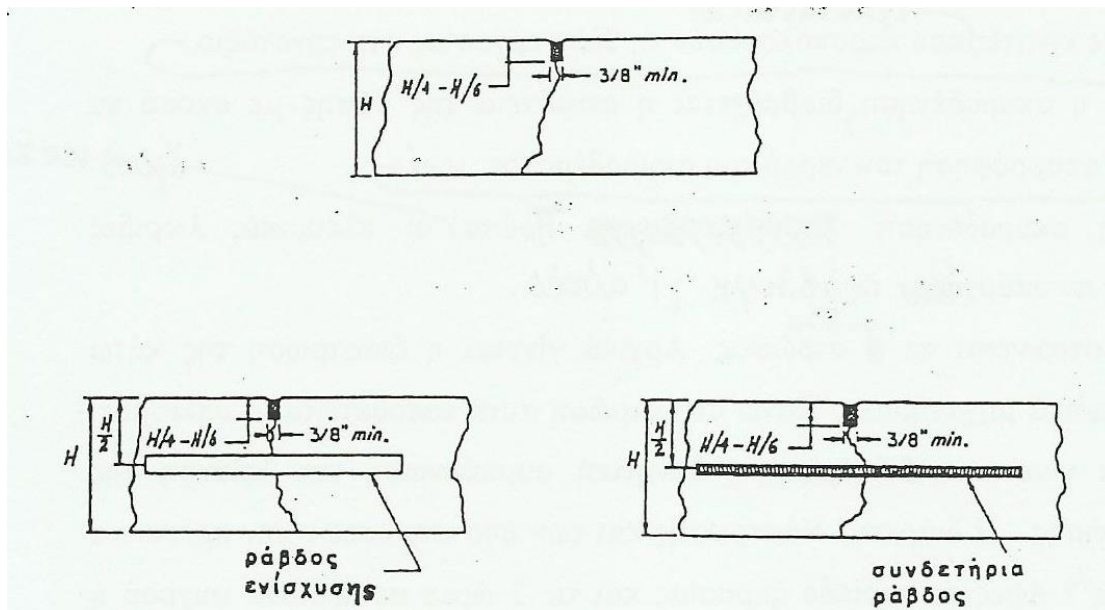
Η πλάκα του οδοστρώματος δεν είναι ενιαία, αλλά χωρίζεται σε επί μέρους πλάκες με εγκάρσιους και διαμήκεις αρμούς (joints) ανά ορισμένες αποστάσεις. Αυτοί διακρίνονται σε αρμούς διαστολής και ψευδοαρμούς. Οι αρμοί διαστολής κατασκευάζονται με μορφή πλήρους εγκοπής της πλάκας, ώστε να πραγματοποιούνται ελεύθερα οι μεταβολές που προέρχονται από τη διαστολή του

σκυροδέματος. Οι ψευδοαρμοί κατασκευάζονται με μορφή απλής εγκοπής στην άνω επιφάνεια του σκυροδέματος βάθους $H/4$ έως $H/6$, όπου H το πάχος της πλάκας. Οι αρμοί διαστολής έχουν πλάτος 2 έως 2.5 cm περίπου, ενώ οι ψευδοαρμοί 1 cm περίπου. Γενικά πρέπει να τοποθετούνται ψευδοαρμοί ανά 5 έως 10 m και αρμοί διαστολής ανά 25 έως 50 m. Η πλήρωση των αρμών γίνεται συνήθως με ασφαλτικό υλικό. Κατά την πλήρωση, οι αρμοί αυτοί πρέπει να είναι καθαροί και χωρίς υγρασία. Το Σχ.11.2 δείχνει λεπτομέρειες αρμών και ψευδοαρμών.

Στους αρμούς τοποθετείται ειδικός οπλισμός που είναι οι ράβδοι ενίσχυσης και οι ράβδοι σύνδεσης. Οι ράβδοι ενίσχυσης, που είναι μηχανισμοί για τη μεταφορά φορτίων, πρέπει να έχουν αντοχή, να τοποθετούνται ανά μικρά διαστήματα, να είναι λείες και να έχουν λιπαντικό στο ένα άκρο τους για την ελεύθερη κίνηση της πλάκας. Στο Σχ.11.3 φαίνονται λεπτομέρειες σχετικές με τις ράβδους ενίσχυσης και σύνδεσης. Στον Πίνακα 11.3 δίνονται χαρακτηριστικές γεωμετρικές τιμές των ράβδων ενίσχυσης για οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων. Οι ράβδοι σύνδεσης που τοποθετούνται για να συγκρατούν δύο πλάκες σφικτά, πρέπει να έχουν νευρώσεις και να είναι αγκυρωμένες στο σκυρόδεμα. Οι ράβδοι σύνδεσης έχουν διάμετρο 15 έως 20 mm περίπου, μήκος 75 cm περίπου και τοποθετούνται ανά αποστάσεις 75 cm περίπου. Τόσο οι ράβδοι ενίσχυσης, όσο και οι ράβδοι σύνδεσης τοποθετούνται στο μέσο του πάχους της πλάκας και παράλληλα προς την επιφάνεια αυτής.



Σχήμα 11.2. Λεπτομέρειες αρμών και ψευδοαρμών σε πλάκα σκυροδέματος δύσκαμπτου οδοστρώματος.



Σχήμα 11.3. Ράβδοι ενίσχυσης και σύνδεσης σε αρμούς πλάκας σκυροδέματος.

Πάχος οδοστρώματος σε cm	Οδοστρώματα οδών			Οδοστρώματα αεροδρομίων		
	Διάμετρος ραβδων	Μήκος ράβδων	Απόσταση ράβδων	Διάμετρος ράβδων	Μήκος ράβδων	Απόσταση ράβδων
15	2	50	30	---	50	---
20	2,5	50	30	2,5	50	30
25	3	50	30	3	50	30
30	---	---	---	4	50	30
35	---	---	---	4	50	30
40	---	---	---	4	50	30
45	---	---	---	5	50	30

Πίνακας 11.3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ράβδων ενίσχυσης για πλάκες οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων.

11.6.3. Κατασκευή και διάστρωση πλάκας

Το σκυρόδεμα παρασκευάζεται σε μόνιμες εγκαταστάσεις και μεταφέρεται στο εργοτάξιο ή σε κινητές εγκαταστάσεις που παρακολουθούν τη θέση εργασίας στο εργοτάξιο. Πριν αρχίσει η σκυροδέτηση, διαβρέχεται η επιφάνεια της βάσης με σκοπό να αποφευχθεί η απορρόφηση του νερού του σκυροδέματος και ακολουθεί η

σκυροδέτηση. Πρώτα όμως κατασκευάζονται οι πλευρικές λωρίδες εγκιβωτισμού αν υπάρχει πρόβλεψη για αυτές.

Η πλάκα διαστρώνεται σε δύο στρώσεις. Αρχικά γίνεται η διάστρωση της κάτω στρώσης με ειδικά μηχανήματα. Πάνω στη στρώση αυτή τοποθετείται ο οπλισμός. Στη συνέχεια γίνεται η διάστρωση, δονητική συμπύκνωση και λείανση της δεύτερης στρώσης. Η διάρκεια διάστρωσης και των δύο στρώσεων δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 2 ώρες σε περίοδο ξηρασίας και τις 3 ώρες σε περίοδο ψυχρού ή υγρού καιρού. Η σκυροδέτηση δεν πρέπει να γίνεται όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από -3°C .

Για προστασία της νωπής επιφάνειας του σκυροδέματος από τον ήλιο και τη βροχή χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι όπως ράντισμα με νερό, σκέπασμα με βρεγμένες λινάτσες, ράντισμα με ειδικά υγρά κλπ. Το οδόστρωμα πρέπει να δίνεται στην κυκλοφορία μετά από 10 έως 14 μέρες από την κατασκευή του όταν χρησιμοποιείται κοινό τσιμέντο. Όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο ταχείας πήξης η κυκλοφορία επιτρέπεται μετά από 4 μέρες.

Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά πρέπει να έχουν καθαρούς, σκληρούς και ανθεκτικούς κόκκους και να μην έχουν βλαβερές προσμίξεις (άργιλο, παιπάλη κλπ.). Οι κόκκοι των σκύρων πρέπει να είναι κατά το δυνατόν σφαιρικής ή κυβικής μορφής. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών έχει άμεση επίδραση στην ποιότητα του σκυροδέματος από άποψη αντοχής, εργασιμότητας, στεγανότητας, πήξης και οικονομίας παρασκευής του. Τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών δίνονται από τους κανονισμούς. Επίσης, κατά τον έλεγχο των αδρανών υλικών γίνεται η δοκιμή αντοχής σε τριβή και κρούση, η δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (δοκιμή υγείας) κλπ.

12. ΦΘΟΡΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

12.1. Γενικά

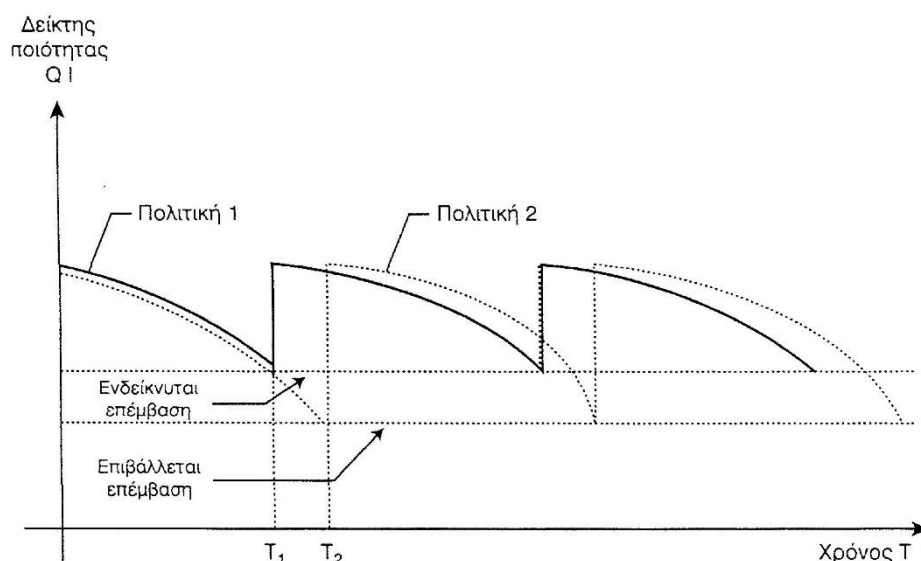
Μόλις τελειώσει η κατασκευή ενός οδοστρώματος αρχίζει η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων μέσα στο σώμα του. Η κυκλοφορία, οι μεταβολές της θερμοκρασίας ή της υγρασίας που περιέχει, οι μικρές κινήσεις του εδάφους κλπ. είναι τα βασικά αίτια εμφάνισης των παραπάνω τάσεων. Οι τάσεις αυτές δημιουργούν αρχικά μικρές φθορές. Με την πάροδο όμως του χρόνου, οι φθορές γίνονται σοβαρότερες και στην ασφαλτική επιφάνεια του οδοστρώματος εμφανίζονται ρωγμές, φωλιές, καθιζήσεις και άλλες παραμορφώσεις και καταπονήσεις οι οποίες αποτελούν το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας της φθοράς.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των φθορών είναι διαφορετικός για κάθε κατηγορία αυτών. Έτσι, αν αυτές είναι γραμμικές, προσδιορίζεται το μήκος της οδού στο οποίο εμφανίζονται, αν είναι εκτεταμένες, η επιφάνεια της οδού στην οποία εμφανίζονται και αν είναι τοπικές, ο αριθμός αυτών των φθορών.

Οι επισκευές του οδοστρώματος πρέπει να γίνονται μόλις διαπιστωθεί η ανάγκη τους, γιατί οι ρηγματώσεις και οι άλλες επιφανειακές μικροφθορές μπορεί να εξελιχθούν σε σοβαρές φθορές, αν δεν επισκευασθούν αμέσως. Οι εργασίες επισκευής που απαιτούνται για να διατηρήσει το οδόστρωμα, όσο είναι δυνατόν, την αρχική κατάσταση, αποτελούν τη λεγόμενη συντήρηση της οδού. Στις εργασίες συντήρησης δεν περιλαμβάνονται εργασίες ανακατασκευής του οδοστρώματος ή βελτίωσης και επισκευές γιατί αυτές επιβάλλονται και για άλλους λόγους εκτός από τις φυσικές φθορές.

Η έγκαιρη επισήμανση και επισκευή φθορών που φαίνονται ασήμαντες είναι χωρίς αμφιβολία η πιο αποτελεσματική εργασία συντήρησης. Για αυτό πρέπει να γίνονται συχνές και προσεκτικές επιθεωρήσεις των οδοστρωμάτων από έμπειρο προσωπικό. Ο καλύτερος τρόπος επισήμανσης των φθορών είναι η επιθεώρηση της οδού με τα πόδια και όχι πάνω σε αυτοκίνητο, έστω και αν το αυτοκίνητο κινείται με μικρή ταχύτητα. Η επιθεώρηση δεν πρέπει να περιορίζεται πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος, αλλά και στο σύστημα αποχέτευσης των νερών. Το Σχ.12.1 περιγράφει την μεταβολή του επιπέδου λειτουργικής ικανότητας ενός οδοστρώματος με τον χρόνο. Η λειτουργική αυτή ικανότητα μειώνεται μη-γραμμικά με το χρόνο και εμφανίζει ασυνέχειες τις χρονικές στιγμές που γίνεται συντήρηση του οδοστρώματος. Η συντήρηση αυτή αυξάνει τον χρόνο ζωής του οδοστρώματος.

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων φθορών σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα καθώς και με τους τρόπους θεραπείας-συντήρησης των φθορών αυτών. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να συμβουλευτεί το εγχειρίδιο των Miller and Bellinger (2003) και τα βιβλία των Μουρατίδη (2008) και Νικολαΐδη (2002). Στις τρεις αυτές πηγές άλλωστε βασίζεται και η ανάπτυξη του κεφαλαίου αυτού.



Σχήμα 12.1. Μεταβολή επιπέδου λειτουργικής ικανότητας με τον χρόνο (από Μουρατίδη, 2008).

12.2. Φθορές και συντήρηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Τα διάφορα είδη φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες: ρηγματώσεις, παραμορφώσεις και αποσαθρώσεις/αλλοιώσεις.

12.2.1. Ρηγματώσεις

Ρηγμάτωση (cracking) είναι η διακοπή της συνέχειας σε μία επιφάνεια ή ένα σώμα. Τα πιο γνωστά είδη ρωγμών είναι τα ακόλουθα:

1. Διαμήκεις ρωγμές (longitudinal cracks). Είναι ρωγμές παράλληλες με τον άξονα του οδοστρώματος λόγω κυκλοφοριακής κόπωσης (fatigue) και θραύσης υλικού μειωμένου πάχους για τα επιβαλλόμενα φορτία (Σχ.12.2). Το άνοιγμα των ρωγμών αυτών για ένα μέσο επίπεδο σοβαρότητας κυμαίνεται μεταξύ 6 και 19 mm. Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται με διάστρωση νέας ασφατικής στρώσης (overlay) και με στραγγιστικά έργα.
2. Εγκάρσιες ρωγμές (transverse cracks). Είναι ρωγμές κάθετα προς τον άξονα του οδοστρώματος λόγω συστολής σε χαμηλές θερμοκρασίες, σκλήρυνσης της ασφάλτου ή ρηγματώσεις υποκείμενων στρώσεων (Σχ.12.3). Το άνοιγμα των ρωγμών αυτών για ένα μέσο επίπεδο σοβαρότητας κυμαίνεται μεταξύ 6 και 19 mm. Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται με διάστρωση νέας ασφατικής στρώσης.
3. Ρωγμές τύπου αλλιγάτορα (alligator cracks). Είναι ρωγμές που σχηματίζουν πολυγωνικά κομμάτια όμοια με αυτά του δέρματος του κροκοδείλου αλλιγάτορα (Σχ.12.4). Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στη μειωμένη φέρουσα

ικανότητα των υποκείμενων στρώσεων (όταν είναι τοπικές) και στην κυκλοφοριακή κόπωση (όταν είναι εκτεταμένες). Η συντήρηση/θεραπεία συνίσταται σε τοπική αντικατάσταση των ασφαλικών στρώσεων για τοπικές ρωγμές και σε εκτεταμένη αντικατάσταση των ασφαλικών στρώσεων ή προσθήκη νέων στρώσεων επί των παλιών για εκτεταμένες ρωγμές. Η τοπική αντικατάσταση είναι γνωστή και ως μάλωμα (patching).

4. Ακραίες ρωγμές (edge cracks). Είναι διαμήκεις ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος (30-50 cm από τα άκρα) με ή και χωρίς εγκάρσιες ρωγμές (Σχ.12.5) λόγω κακής συμπύκνωσης, κακής αποστράγγισης, παγετού, συρρίκνωσης εκ ξηρασίας και μειωμένου πάχους στρώσεων στα άκρα. Η συντήρησή τους γίνεται με πλήρωση αυτών με κατάλληλη άσφαλτο αφού προηγηθεί καθαρισμός.
5. Ρωγμές ανάκλασης (reflection cracks). Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται σε ασφαλικές στρώσεις αποκατάστασης παλιών και έχουν ποικίλες κατευθύνσεις που εξαρτώνται από αυτές των παλιών ρωγμών (Σχ.12.6). Το άνοιγμα των ρωγμών αυτών για ένα μέσο επίπεδο σοβαρότητας είναι μεταξύ 6 και 19 mm. Η αιτία αυτών των ρωγμών είναι οι κάθετες και οριζόντιες μετακινήσεις του υποκείμενου οδοστρώματος. Ο τρόπος συντήρησης ρωγμών ανάκλασης μικρού ανοίγματος (<3 mm) συνίσταται σε σφράγιση/πλήρωση αυτών με άσφαλτο ή σε ασφαλική επάλειψη για ρωγμές σε μικρή ή μεγάλη έκταση, αντίστοιχα. Για ρωγμές μεγάλου ανοίγματος (>3-5 mm), η πλήρωση με άσφαλτο γίνεται μετά από διεύρυνση και καθαρισμό τους ενώ η ασφαλική επάλειψη γίνεται εις διπλούν.
6. Ρωγμές πολυγώνου (block cracks). Οι ρωγμές αυτές διαιρούν το οδόστρωμα σε περίπου ορθογωνικά κομμάτια εμβαδού από 0.1 έως 10 m² και είναι επίσης γνωστές και ως ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks) (Σχ.12.7). Προέρχονται από συστολή του ασφαλτομίγματος σε χαμηλές θερμοκρασίες (ιδιαίτερα όταν αυτό είναι γηρασμένο) ή από συρρίκνωση του υπεδάφους όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης είναι μικρό. Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται όπως και στις ρωγμές ανάκλασης.
7. Ρωγμές ολίσθησης (slippage cracks). Οι ρωγμές αυτές προέρχονται από ολίσθηση του τάπητα κυκλοφορίας επί της υποκείμενης στρώσης λόγω ανεπαρκούς συγκολλητικής επάλειψης ή παρουσίας χωμάτων, λαδιών ή νερού στην διεπιφάνεια των στρώσεων. Η μορφή των ρωγμών αυτών έχει σχήμα παραβολικό ή μισοφέγγαρου (Σχ.12.8). Η θεραπεία εδώ συνίσταται σε αποξήλωση του τάπητα (τοπικά) και πλήρωση με θερμό ασφαλτόμιγμα μετά από καθαρισμό.



Σχήμα 12.2. Διαμήκεις ρωγμές



Σχήμα 12.3. Διαμήκεις και εγκάρσιες ρωγμές



Σχήμα 12.4. Ρωγμές τύπου αλιγάτορα



Σχήμα 12.5. Ρωγμές στα άκρα οδοστρώματος



Σχήμα 12.6. Ρωγμές ανάκλασης



Σχήμα 12.7. Ρωγμές πολυγώνου



Σχήμα 12.8. Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων

12.2.2. Παραμορφώσεις

Οι παραμορφώσεις της επιφάνειας (surface deformations) του οδοστρώματος καταστρέφουν την επιπεδότητά του και οφείλονται στην ιξωδοπλαστικότητα της ασφάλτου και στην χαμηλή της ευστάθεια, στην ανεπαρκή συμπύκνωση των στρώσεων και στις καθιζήσεις του εδάφους. Τα πιο γνωστά είδη επιφανειακών παραμορφώσεων είναι:

1. Αυλακώσεις (ruts or channels). Πρόκειται για διαμήκεις επιφανειακές καθιζήσεις κατά την διεύθυνση της τροχιάς των τροχών των οχημάτων (Σχ.12.9 και 12.10). Οι αυλακώσεις οφείλονται σε παραμένουσες παραμορφώσεις της ασφάλτου, σε καθίζηση στρώσεων λόγω κακής συμπύκνωσης ή σε πλευρική μετακίνηση στρώσεων λόγω φόρτισης. Η συντήρηση συνίσταται σε πλήρωση των αυλακώσεων με ασφαλτόμιγμα ή σε διάστρωση ασφαλτομίγματος μετά από φρεζάρισμα της επιφάνειας του οδοστρώματος.

2. Κυματώσεις ή ρυτιδώσεις (corrugations). Αυτές είναι εξογκώσεις (υπό μορφή κυμάτων) της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά μήκος του άξονά του (Σχ.12.11) και προέρχονται από παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω υψηλών διατμητικών τάσεων σε περιοχές επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων (στάσεις, ανωφέρειες, κατωφέρειες). Όταν η πλαστική εξογκωση είναι τοπική ονομάζεται απώθηση (shoving) (Σχ.12.12). Η συντήρηση οδοστρωμάτων με κυματώσεις γίνεται με φρεζάρισμα της επιφάνειας σε βάθος 30-50 mm και διάστρωση νέων ασφαλτικών στρώσεων εν θερμώ.
3. Τοπικές καθιζήσεις (local depressions or bird baths). Αυτές οι καθιζήσεις είναι τοπικού χαρακτήρα και προέρχονται από τοπική καθίζηση υποκείμενων στρώσεων λόγω βαριάς φόρτισης. Η συντήρησή τους γίνεται είτε με διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος (όταν καθίζηση >25mm), είτε με διάστρωση ψυχρού ασφαλτομίγματος τύπου slurry (όταν καθίζηση <25mm).
4. Τοπικές διογκώσεις (local upheavals or bumps). Οι τοπικές διογκώσεις προέρχονται συνήθως από διαστολή του εγκλωβισμένου νερού στις υποκείμενες στρώσεις λόγω παγετού. Η συντήρηση των διογκώσεων αυτών γίνεται όπως στην περίπτωση ρωγμών τύπου αλλιγάτορα τοπικού χαρακτήρα.



Σχήμα 12.9. Αυλακώσεις από τροχιές τροχών



Σχήμα 12.10. Αυλακώσεις και αυλακώσεις με παραμένοντα νερά



Σχήμα 12.11. Αυλακώσεις και κυματώσεις κατά πλάτος του οδοστρώματος



Σχήμα 12.12. Τοπική πλαστική εξόγκωση και απώθηση

12.2.3. Αποσαθρώσεις/Αλλοιώσεις

Η αποσάθρωση ή αποσύνθεση (disintegration) της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι ο θρυμματισμός του σε μικρά κομμάτια. Η αλλοίωση (defect) της επιφάνειας του οδοστρώματος ορίζεται γενικά ως κάθε μεταβολή της ασφαλτικής επιφάνειας που μειώνει την λειτουργική της ικανότητα. Οι αποσαθρώσεις/αλλοιώσεις περιλαμβάνουν:

1. Αποκόλληση αδρανών (ravelling or weathering). Η αποκόλληση αδρανών στην επιφάνεια του οδοστρώματος αρχίζει από τα άκρα και προχωρεί προοδευτικά προς το κέντρο δημιουργώντας αρχικά φωλιές που πυκνώνουν και καταλήγουν σε λακούβες (Σχ.12.13). Αυτή η αποκόλληση προέρχεται από ανεπαρκή ποσότητα ασφάλτου, χρήση μη καθαρών ή σαθρών αδρανών, υπερθέρμανση της ασφάλτου, κατασκευή του τάπητα υπό βροχή ή κρύο και

μη επαρκή συμπύκνωση. Η θεραπεία συνίσταται κυρίως σε διάστρωση ψυχρού ασφαλτικού μίγματος ή σε επιφανειακές επαλείψεις.

2. Λακκούβες (potholes). Οι λακκούβες έχουν σχήμα κυπέλλου ή λεκάνης με ελάχιστη διάσταση επιφάνειας 150 mm και μέσο βάθος μέσης σοβαρότητας από 25 έως 50 mm (Σχ.12.14). Η δημιουργία τους οφείλεται σε έλλειψη συνδετικού υλικού στο ασφαλτόμιγμα, μειωμένο πάχος του τάπητα κυκλοφορίας, μη καλή αποστράγγιση της οδού και σε αποκόλληση αδρανών. Η συντήρηση γίνεται είτε με καθαρισμό και πλήρωση της λακκούβας με θερμό ή ψυχρό ασφαλτόμιγμα (προσωρινή λύση), είτε με κόψιμο και τετραγωνισμό της λακκούβας, καθαρισμό, πλήρωση με ψυχρό ή θερμό ασφαλτόμιγμα και κυλίνδρωση (οριστική λύση).
3. Εξίδρωση (bleeding). Ως εξίδρωση ορίζεται η ανάδυση ασφάλτου και η εμφάνισή της στην επιφάνεια η οποία εμφανίζεται γυαλιστερή και κολλώδης (Σχ.12.15). Η εξίδρωση οφείλεται σε υπερβολικό ποσοστό συνδετικού υλικού και υψηλές θερμοκρασίες και εντοπίζεται στην τροχιά των τροχών (αυλάκωση) ή σε όλη τη λωρίδα κυκλοφορίας. Η θεραπεία συνίσταται σε απόξεση και επίστρωση λεπτοτάπητα.
4. Άντληση (pumping). Άντληση είναι το φαινόμενο της ανάδυσης ύδατος και λεπτόκοκκου υλικού στην επιφάνεια κυκλοφορίας λόγω της φόρτισης (Σχ.12.16). Η άντληση οφείλεται σε κακή απορροή και αποστράγγιση και σε ακατάλληλη κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών. Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε δύσκαμπτα οδοστρώματα λόγω των αρμών που προσφέρουν διόδους ροής. Η θεραπεία εδώ επιβάλλει κατασκευή καλής αποστράγγισης.
5. Υποβάθμιση μπαλωμάτων (patching deterioration). Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, ένας τρόπος θεραπείας φθορών (ρηγματώσεις αλλιγιάτορα ή λακκούβες) γίνεται με μπαλώματα (patching), δηλαδή, με τοπικές επικαλύψεις. Τα μπαλώματα αυτά με την πάροδο του χρόνου υποβαθμίζονται λόγω κυκλοφοριακής φόρτισης και εμφανίζουν φθορές στην περίμετρο ή/και στο εσωτερικό τους (Σχ.12.17). Η θεραπεία εδώ είναι ίδια με αυτή που εφαρμόζεται σε ρωγμές αλλιγιάτορα και λακκούβες.
6. Λείανση αδρανών (polished aggregates). Το φαινόμενο αυτό έχει εξεταστεί στο υποκεφάλαιο 9.6. Το Σχ. 12.18 δείχνει την λείανση αδρανών στην επιφάνεια εύκαμπτου οδοστρώματος.

Ο Πίνακας 12.1, που έχει ληφθεί από το βιβλίο του Μουρατίδη (2008), περιγράφει συνοπτικά τα διάφορα είδη φθορών του υποκεφαλαίου αυτού (12.2) και τις μεθόδους θεραπείας τους.



Σχήμα 12.13. Μεσαίας και υψηλής σοβαρότητας αποκόλληση αδρανών.



Σχήμα 12.14. Μεσαίας και υψηλής σοβαρότητας λακκούβες.



Σχήμα 12.15. Επίπεδα σοβαρότητας του φαινομένου ανάδυσης ή εξίδρωσης της ασφάλτου.



Σχήμα 12.16. Ανάδυση και άντληση νερού και λεπτόκκοκου υλικού.



Σχήμα 12.17. Επίπεδα σοβαρότητας σε φθαρμένα μπαλώματα.



Σχήμα 12.18. Λείανση επιφανειακών αδρανών.

ΘΕΡΑΠΕΙΑ ΦΘΟΡΕΣ	ΑΠΟΞΕΣΗ (planing)	ΕΠΙΣΚΕΥΗ (patching)	ΣΦΡΑΓΙΣΗ (crack seal)	ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ ΕΠΑΛΕΙΨΗ	ΛΕΠΤΟ- ΤΑΠΗΤΑΣ	ΑΝΑ- ΚΥΚΛΩΣΗ
Τοπικές Διογκώσεις	X	XX	-	-	(*)	(*)
Κυματώσεις	XX	X	-	(*)	XX	-
Ρυτιδώσεις	XX	-	-	-	XX	X
Τοπικές Βυθίσεις	-	XX	(*)	(*)	-	(*)
Στρεβλώσεις	(*)	X	-	-	XX	X
Αυλακώσεις	XX	X	-	(*)	XX	X
Επωθήσεις	X	(*)	-	(*)	XX	(*)
Αλληγοτορικές Ρωγμές	X	(*)	XX	XX	(*)	-
Ρωγμές Πολυγώνου	(*)	X	X	X	XX	-
Διαμήκειες Ρωγμές	(*)	(*)	XX	(*)	(*)	(*)
Ρωγμές στα ίχνη των τροχών	-	(*)	X	X	X	(*)
Ρωγμές παρά το έρεισμα	-	(*)	X	X	(*)	-
Μαιανδρικές Ρωγμές	-	(*)	X	(*)	X	-
Εγκάρσιες Ρωγμές	-	X	(*)	(*)	X	-
Ρωγμές Ανάκλασης	-	(*)	X	(*)	X	-
Ρωγμές Ολίσθησης	-	X	(*)	(*)	(*)	(*)
Απώλεια Ψηφίδων	-	(*)	-	X	XX	-
Απόσπαση Αδρανών	-	X	(*)	XX	XX	(*)
Λείανση Αδρανών	(*)	-	-	X	X	-
Εξίδρωση	X	-	-	(*)	X	(*)
Λακκούβες	-	XX	(*)	(*)	X	-
Μπαλώματα	(*)	X	(*)	(*)	X	(*)
Άντληση Ύδατος	-	(*)	(*)	(*)	-	-
Κακή Απορροή	-	-	-	-	X	-
Ολισθηρότητα	(*)	-	-	XX	XX	(*)

(*) = Πρακτική που σπάνια εφαρμόζεται
X = Πρακτική που χρησιμοποιείται σε ορισμένες χώρες
XX = Συνήθης πρακτική.

Πίνακας 12.1. Φθορές και μέθοδοι θεραπείας εύκαμπτων οδοστρωμάτων (από Μουρατίδη, 2008)

12.3. Φθορές και συντήρηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

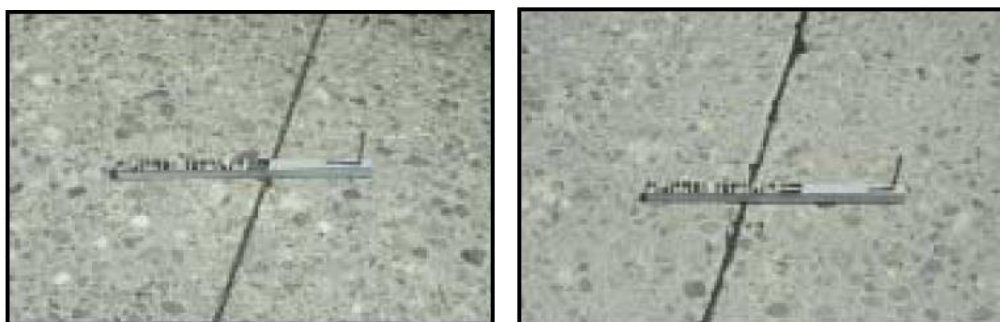
Τα διάφορα είδη φθορών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων μπορούν να καταταγούν σε τέσσερις κατηγορίες: ανεπάρκειες αρμών, ρηγματώσεις, παραμορφώσεις και

αποσαθρώσεις. Η συντήρηση των δύο πρώτων ειδών φθορών αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της όλης συντήρησης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

12.3.1. Ανεπάρκειες αρμών (joint deficiencies)

Τα πιο σημαντικά είδη των φθορών στους αρμούς είναι:

1. Φθορά υλικού πλήρωσης αρμών (joint seal damage). Η κύρια φθορά των αρμών (διαμήκων και εγκάρσιων) είναι η αποκόλληση του υλικού πλήρωσης για τη στεγάνωσή τους (Σχ.12.19). Αυτή συμβαίνει λόγω γήρανσης του υλικού πλήρωσης. Η συντήρηση του αρμού γίνεται με απομάκρυνση του παλιού υλικού, καθαρισμό του αρμού και πλήρωσή του με νέο ελαστομερές υλικό.
2. Θρυμματισμός αρμών (joint spalling). Λόγω χαμηλής αντοχής του σκυροδέματος της πλάκας και υπερφόρτισής της, οι ακμές των αρμών (διαμήκων και εγκάρσιων) θρυμματίζονται και έτσι επιταχύνεται και η φθορά του υλικού πλήρωσής τους (Σχ.12.20). Η συντήρηση που γίνεται για τη φθορά του υλικού πλήρωσης καλύπτει και τον θρυμματισμό των ακμών των αρμών.



Σχήμα 12.19. Χαμηλό και μέσο επίπεδο βλάβης υλικού πλήρωσης αρμών.



Σχήμα 12.20. Θρυμματισμός διαμήκους και εγκάρσιου αρμού.

12.3.2. Ρηγματώσεις (cracking)

Τα πιο σημαντικά είδη ρωγμών είναι:

1. Γωνιακές ρωγμές (corner breaks). Αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται στις γωνίες των πλακών και αν δεν συντηρηθούν, το σχηματιζόμενο τριγωνικό κομμάτι της πλάκας στη γωνία της θα αποκοπεί από αυτήν (Σχ.12.21). Οι ρωγμές αυτές προέρχονται λόγω κακής στήριξης της πλάκας στη βάση ή το έδαφος και η συντήρησή τους περιλαμβάνει καθαρισμό και πλήρωσή τους με ελαστομερές υλικό. Σε περίπτωση αποκοπής του τριγωνικού κομματιού της πλάκας, αυτό απομακρύνεται και τη θέση του καταλαμβάνει ελαστομερές ασφαλικό υλικό (αν το κομμάτι είναι μικρό) ή ασφαλτόμιγμα (αν το κομμάτι είναι μεγάλο).
2. Διαμήκειες ρωγμές (longitudinal cracks). Αυτές είναι ρωγμές παράλληλες προς τον άξονα του οδοστρώματος και προέρχονται κυρίως από συστολή της πλάκας και έλλειψη αρκετών διαμήκων αρμών, αλλά και από διαστολή της υποκείμενης στρώσης ή ασθενή στήριξη της πλάκας από το έδαφος (Σχ.12.22). Η συντήρηση των ρωγμών αυτών συνίσταται σε καθαρισμό και πλήρωση με ελαστομερές ασφαλικό υλικό.
3. Εγκάρσιες ρωγμές (transverse cracks). Οι ρωγμές αυτές έχουν διεύθυνση εγκάρσια ως προς τον άξονα του οδοστρώματος, εμφανίζονται συνήθως στο κέντρο της πλάκας και οφείλονται σε υψηλές καμπτικές τάσεις, στην έλλειψη αρκετών εγκάρσιων αρμών και σε ασθενές υπέδαφος στήριξης (Σχ.12.23). Η συντήρησή τους γίνεται όπως και στην περίπτωση των διαμήκων ρωγμών.
4. Καμπύλες ρωγμές (durability cracks). Οι ρωγμές αυτές βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη, έχουν σχήμα ημισέληνου, εμφανίζονται πλησίον αρμών, ρωγμών ή ελεύθερων πλευρών της πλάκας (Σχ.12.24) και ξεκινούν από γωνίες της πλάκας. Τα αίτια δημιουργίας και η συντήρησή τους είναι παρόμοια με αυτά της περίπτωσης των γωνιακών ρωγμών.



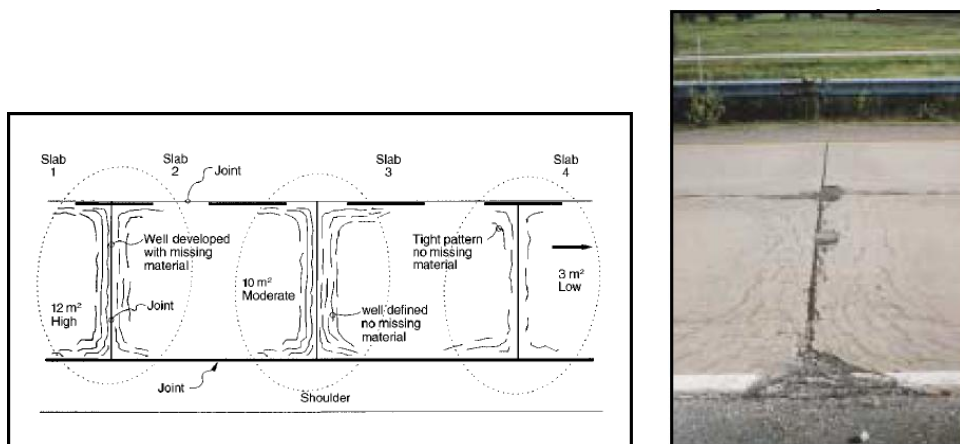
Σχήμα 12.21. Χαμηλής και μέσης σοβαρότητας γωνιακές ρωγμές.



Σχήμα 12.22. Μέσης και υψηλής σοβαρότητας διαμήκεις ρωγμές.



Σχήμα 12.23. Υψηλής σοβαρότητας εγκάρσιες ρωγμές.



Σχήμα 12.24. Υψηλής σοβαρότητας καμπύλες ρωγμές.

12.3.3. Παραμορφώσεις

Οι επιφανειακές παραμορφώσεις στα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι καθιζήσεις (διαφορικές) των πλακών του οδοστρώματος λόγω ανεπαρκούς μεταφοράς του φορτίου από πλάκα σε πλάκα (μέσω των ράβδων σύνδεσης), συστολής ή διαστολής του υπεδάφους ή και άντλησης νερού και λεπτόκοκκων αδρανών μέσω ατελών αρμών (Σχ.12.25). Καθιζήσεις μικρού μεγέθους αντιμετωπίζονται με ασφαλτόμιγμα τύπου slurry. Καθιζήσεις μεγάλου μεγέθους αντιμετωπίζονται με πρόσθετη στρώση ασφαλτοτάπητα πάνω σε μια ισοπεδωτική στρώση. Τέλος η άντληση λεπτόκοκκων υλικών αντιμετωπίζεται με πλήρωση του δημιουργηθέντος κενού με ειδικό ασφαλτικό υλικό που εφαρμόζεται με αντλία.

12.3.4. Αποσαθρώσεις

Οι αποσαθρώσεις (disintegration) περιλαμβάνουν τα παρακάτω είδη:

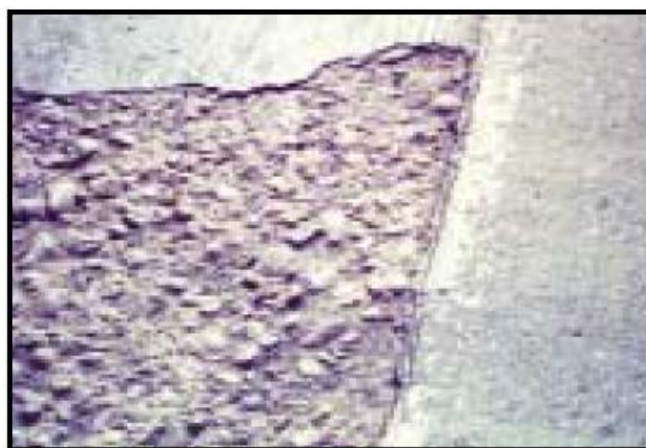
1. Λεπίδωση (scaling). Η λεπίδωση είναι αποκόλληση επιφανειακών αδρανών (βάθος < 25 mm) λόγω μη καλής ανάμιξης του σκυροδέματος, χρήσης ακατάλληλων αδρανών, πήξης του σκυροδέματος σε χαμηλές θερμοκρασίες και χρήσης άλατος τον χειμώνα για αποφυγή παγετού (Σχ.12.26). Η συντήρηση γίνεται με διάστρωση ψυχρού ασφαλτομίγματος τύπου slurry. Αν η αποκόλληση των αδρανών έχει προχωρήσει σε βάθος > 25mm η συντήρηση γίνεται με διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος ή σκυροδέματος με τσιμέντο Portland.
2. Θρυμματισμός πλακών (slab buckling or spalling). Ο θρυμματισμός των πλακών στις ακμές, στις γωνίες ή και στο μέσον τους προέρχεται από διαστολή των πλακών, διόγκωση του υπεδάφους ή γέμισμα των αρμών με χαλίκια (Σχ.12.27). Συνήθως ο θρυμματισμός συνοδεύεται και από αποκόλληση τμημάτων του σκυροδέματος και γι'αυτό απαιτείται όχι συντήρηση αλλά αποκατάσταση του οδοστρώματος. Η αποκατάσταση αυτή γίνεται είτε με ανακατασκευή των πλακών με σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland (όταν οι πλάκες είναι λίγες), είτε με διάστρωση ασφαλτομίγματος (μετά από απομάκρυνση θρυμματισμένων τμημάτων και βάνσιμο τοιχωμάτων με ασφαλτικό γαλάκτωμα), είτε με διάστρωση νέας στρώσης από σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland (μετά από απομάκρυνση θρυμματισμένων τμημάτων και καθαρισμό). Μία νέα τεχνική ανακατασκευής δύσκαμπτων οδοστρωμάτων όταν το σκυρόδεμα είναι άοπλο συνίσταται σε διάσπαση των πλακών σκυροδέματος σε μικρά τεμάχια (50-100cm), σε βύθιση αυτών στη βάση ή στο υπέδαφος με τη βοήθεια βαριάς κυλίνδρωσης, σε προσθήκη αδρανών με επανασυμπύκνωση και τελικά σε διάστρωση νέου ασφαλτοτάπητα πάχους 10-15 cm.

Ο Πίνακας 12.2, που έχει ληφθεί από το βιβλίο του Μουρατίδη (2008), περιγράφει συνοπτικά τα διάφορα είδη φθορών του υποκεφαλαίου αυτού (12.3) και τις μεθόδους θεραπείας τους.

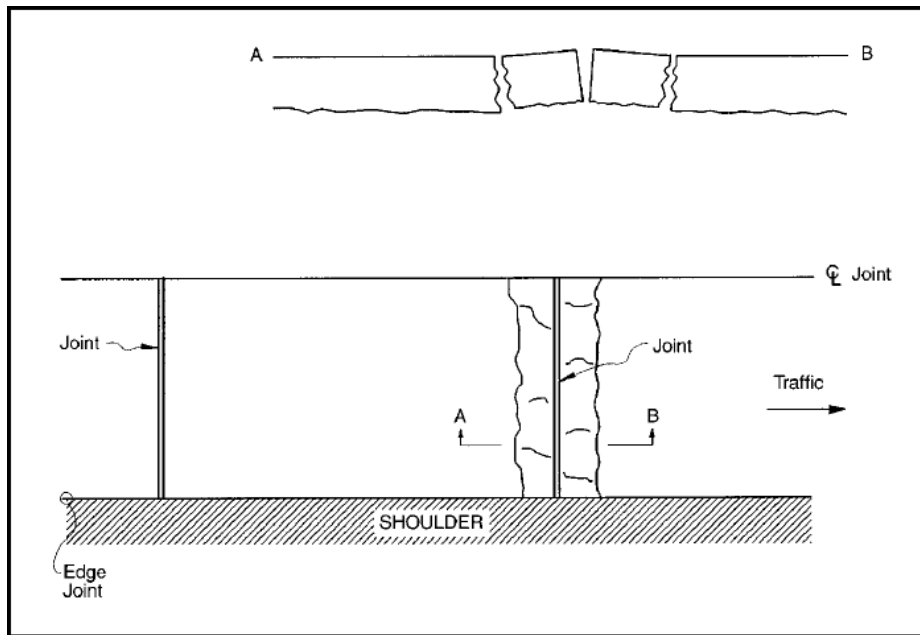
Τέλος, ο Πίνακας 12.3, που έχει επίσης ληφθεί από το βιβλίο του Μουρατίδη (2008), περιγράφει συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε σύγκριση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Από τον ανωτέρω πίνακα μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα υπερτερούν των εύκαμπτων οδοστρωμάτων ως προς τα περισσότερα κριτήρια σύγκρισης. Το σημαντικό όμως κόστος κατασκευής τους έναντι αυτού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα τα τελευταία να χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στην οδοποιία (94% στις Η.Π.Α.).



Σχήμα 12.25. Επιφανειακές παραμορφώσεις (καθιζήσεις).



Σχήμα 12.26. Αποκόλληση επιφανειακών αδρανών ή λεπίδωση.



Σχήμα 12.27. Θρυμματισμός πλακών.

Κατάταξη εργασιών	Είδος εργασίας	Περιγραφή εργασιών	Είδος Δύσκαμπτου Οδοστρώματος		
			Άοπλο με αρμούς (JP)	Οπλισμένο με αρμούς (JR)	Συνεχούς οπλισμού (CR)
- Στοιχειώδης συντήρηση	- Εργασίες καθαρισμού, επισκευών	Αποψίλωση, επαναδιαγράμμιση, καθαρισμός στραγγιστηρίων	*	*	*
- Περιοδική συντήρηση	- Προληπτικές επεμβάσεις	Επανάταξη ράβδων μεταφοράς φορτίου	*	-	-
		Επανάταξη ερεισιμάτων σκυροδέματος	*	*	-
		Συναρμογή πλευρικών στραγγιστηρίων	*	*	-
		Σφράγιση αρμών	*	*	-
	- Επισκευές - Αποκαταστάσεις	Αντικατάσταση πλακών	*	-	-
		Επισκευή συνολικής διατομής	-	*	*
		Επισκευή μερικής διατομής	*	-	-
	- Αναβάθμιση	Επιφανειακή χάραξη (φρεζάρισμα)	*	*	-
		Επίστρωση σκυροδέματος πλήρους σύνδεσης	*	*	*
		Επίστρωση ασύνδετης πλάκας σκυροδέματος	*	*	*
- Ανακατασκευή	Συνολική ανακατασκευή οδοστρώματος	*	*	*	

Πίνακας 12.2. Εργασίες συντήρησης δύσκαμπτων οδοστρώματων (από Μουρατίδη, 2008)

ΙΔΙΟΤΗΤΑ		ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ (+) ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ (-)	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
1	Κόστος κατασκευής	-	- Σημαντικό κόστος κατασκευής έναντι του αντίστοιχου για εύκαμπτο οδόστρωμα
2	Δαπάνες συντήρησης	+	- Περιορισμένες σε σχέση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα
3	Φέρουσα ικανότητα	+	- Σημαντικά μεγαλύτερη από τα παραδοσιακά οδοστρώματα
4	Αντίσταση σε εφαπτομενικά φορτία	+	- Υψηλή αντοχή
5	Κλιματικά φαινόμενα	+	- Υψηλή αντοχή
6	Διαδικασία συντήρησης ή ενίσχυσης	-	- Δύσκολες και δαπανηρές τεχνικές
7	Συμπεριφορά έναντι μετατοπίσεων της υποδομής	+	- Εξαιρετική συμπεριφορά έναντι μικρών μετατοπίσεων
		-	- Σημαντικές αστοχίες σε μεγάλες μετατοπίσεις

Πίνακας 12.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (από Μουρατίδη, 2008)

13. ΓΕΩΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

13.1. Γενικά

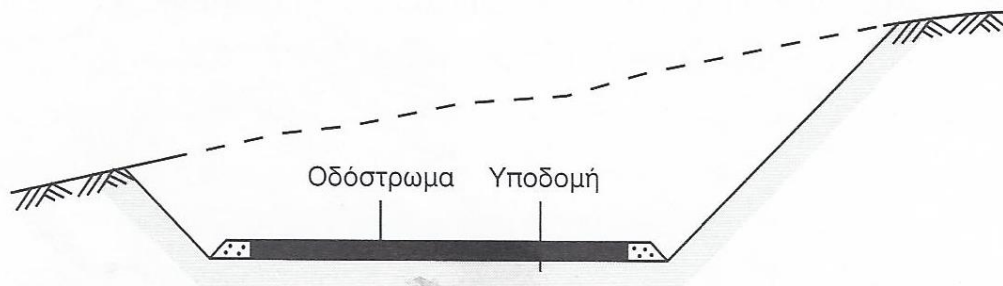
Η ολοκληρωμένη κατασκευή οδών περιλαμβάνει εκτός της κατασκευής του οδοστρώματος και την κατασκευή χωματουργικών έργων απολύτως απαραίτητων για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των οδοστρωμάτων. Τα χωματουργικά αυτά έργα ή γεωκατασκευές είναι μεγάλης κλίμακας στη σύγχρονη οδοποιία, ιδιαίτερα αυτή των εθνικών οδών, που περιλαμβάνει τεταμένες χαράξεις με μικρές κατά μήκος κλίσεις και μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας σε οριζόντιες και κατακόρυφες συναρμογές.

Οι γεωκατασκευές οδοποιίας περιλαμβάνουν ορύγματα, επιχώματα, τοίχους αντιστήριξης, έργα αποστράγγισης οδών, σήραγγες σε βραχώδες έδαφος, μέτωπα σηράγγων και σήραγγες εκσκαφής και επανεπίχωσης. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια πολύ σύντομη περιγραφή των ανωτέρω έργων εκτός από αυτά που αναφέρονται στις σήραγγες και περιγράφονται σε ειδικά βιβλία (π.χ. Hung et al, 2009 και Μουρατίδης, 2007). Για περισσότερες πληροφορίες, ο αναγνώστης μπορεί να συμβουλευτεί το εξαιρετικό στον τομέα αυτό βιβλίο του Μουρατίδη (2007) πάνω στο οποίο βασίζεται το παρόν κεφάλαιο.

13.2. Ορύγματα

Το όρυγμα είναι το αποτέλεσμα εκσκαφής για κατασκευή της οδού σε στάθμη χαμηλότερη από αυτή του φυσικού εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχ.13.1. Η εκσκαφή των ορυγμάτων πραγματοποιείται με εκσκαφή κατά στρώματα, διά κεντρικής τάφρου, με εγκάρσια προβολή και με χρήση εκρηκτικών. Ανάλογα με την ύπαρξη πρηνών στα άκρα μιάς διατομής ορύγματος, μπορεί κανείς να έχει αμφίπλευρο ή μονόπλευρο όρυγμα.

Το σημαντικότερο πρόβλημα κατά την κατασκευή ορυγμάτων είναι αυτό της κατασκευής ευσταθών πρηνών, δηλαδή πρηνών με κλίση τέτοια ώστε αυτά να είναι ευσταθή. Ο Πίνακας 13.1 παρέχει τιμές κλίσεων πρηνών για διάφορες κατηγορίες εδαφών ώστε αυτά να είναι ευσταθή. Πρηνή μεγάλου ύψους πρέπει να έχουν αναβαθμούς ανά 8-10m πρηνούς. Σε περιπτώσεις ορυγμάτων με κλίση μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης γίνεται χρήση μεταλλικού επιφανειακού πλέγματος που στερεώνεται με αγκύρια. Όταν υπάρχει περίπτωση πτώσης λίθων από τα πρηνή, εκτός από προστατευτικά πλέγματα, χρησιμοποιούνται και βραχοπαγίδες, δηλαδή παχείς τοίχοι οπλισμένου σκυροδέματος ύψους 1.20-2.40m που απέχουν 1.5-3.0m από τον πόδα του πρηνούς.



Σχήμα 13.1. Τυπική διατομή οδοστρώματος σε όρυγμα (από Μουρατίδη, 2007).

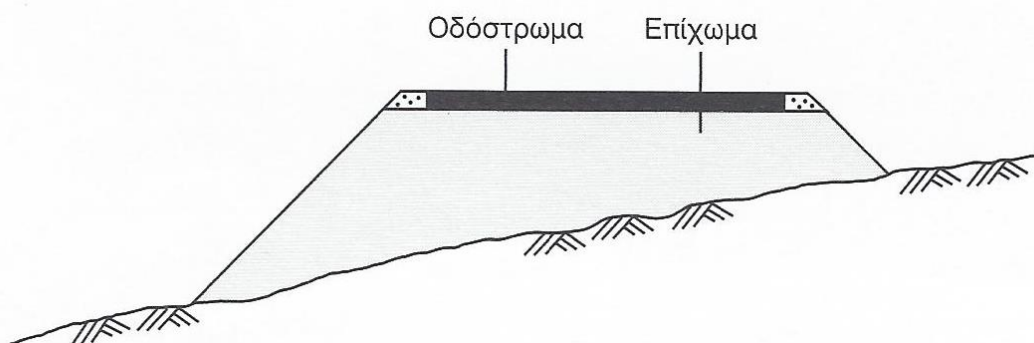
Κατηγορία εδάφους	Ύψος πρανούς (m)	Κλίση πρανούς $\alpha:\beta$
Συνεκτικά γαιώδη, ημιβραχώδη	Μέχρι 2 m	1:2
Συνεκτικά γαιώδη, ημιβραχώδη	> 2 m	1:1
Πολύ συνεκτικά, ημιβραχώδη		2:1 ως 3:1
Βραχώδη		3:1 ως 10:1
Χαλαρά με κίνδυνο διαβρώσεως		1:2 ως 1:3

Πίνακας 13.1. Τιμές κλίσεων ευσταθών πρανών ορυγμάτων (από Μουρατίδη, 2007).

13.3. Επιχώματα

Το επίχωμα είναι το αποτέλεσμα εναπόθεσης χώματος για κατασκευή της οδού σε στάθμη υψηλότερη από αυτή του φυσικού εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχ.13.2. Το ύψος των επιχωμάτων είναι σήμερα μέχρι 50-60m (στην Ελλάδα) και πέραν των 100m (στο εξωτερικό).

Σε οδικά έργα με διατομές σε όρυγμα και επίχωμα, γίνεται συνήθως προσπάθεια εξίσωσης των χωματισμών ώστε τα χώματα εκσκαφής για δημιουργία ορυγμάτων να χρησιμοποιούνται ακριβώς για δημιουργία επιχωμάτων, πράγμα που αποτελεί την οικονομικότερη λύση. Στη σύγχρονη οδοποιία δεν ακολουθείται αυτή η τακτική διότι



Σχήμα 13.2. Τυπική διατομή οδοστρώματος σε επίχωμα (από Μουρατίδη, 2007).

δεν εξασφαλίζει οδούς μεγάλων ταχυτήτων, ενώ τα χωματουργικά έργα εκτελούνται σήμερα ευκολότερα με τη χρήση πανίσχυρων μηχανημάτων.

Επιχώματα θα πρέπει να αποφεύγονται όταν οι εγκάρσιες κλίσεις του φυσικού εδάφους είναι μεγάλες, διότι υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης αυτών. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται βαθμίδες αγκύρωσης. Οι κλίσεις των πρανών επιχωμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες ώστε να εξασφαλίζεται ευστάθεια. Ο Πίνακας 13.2 παρέχει τιμές επιτρεπόμενων κλίσεων πρανών επιχωμάτων για διάφορες κατηγορίες εδαφών. Για προστασία των πρανών έναντι βροχοπτώσεων, η επιφάνειά τους μπορεί να καλυφθεί από συρματοκιβώτια. Συρματοκιβώτια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του ποδός επιχωμάτων.

Περίπτωση		Ύψος επιχώματος	Κλίση $\nu:\beta$
α.	Γαιώδη υλικά	έως 1,50 m	1:3
		1,50 ÷ 3,00 m	1:2
		> 3,00 m	1:1,5
β.	Βραχώδη προϊόντα κατόπιν ειδικής μελέτης		1:1
γ.	Σε κίνδυνο διάβρωσης γαιωδών υλικών		1:3

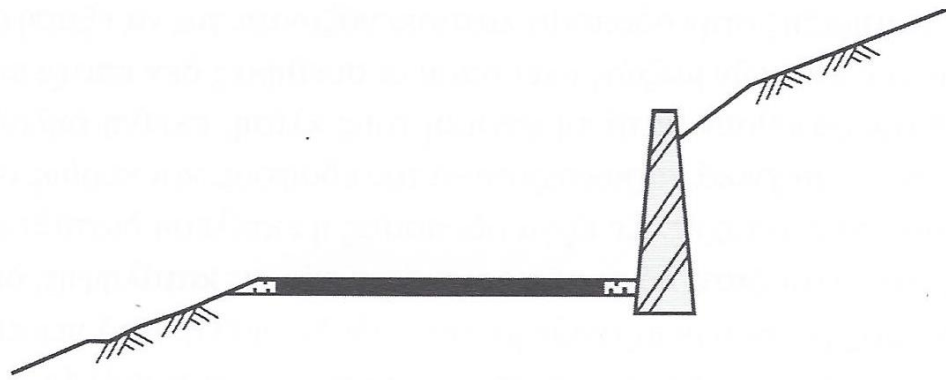
Πίνακας 13.2. Τιμές κλίσεων ευσταθών πρανών επιχωμάτων (από Μουρατίδη, 2007).

13.4. Τοίχοι αντιστήριξης

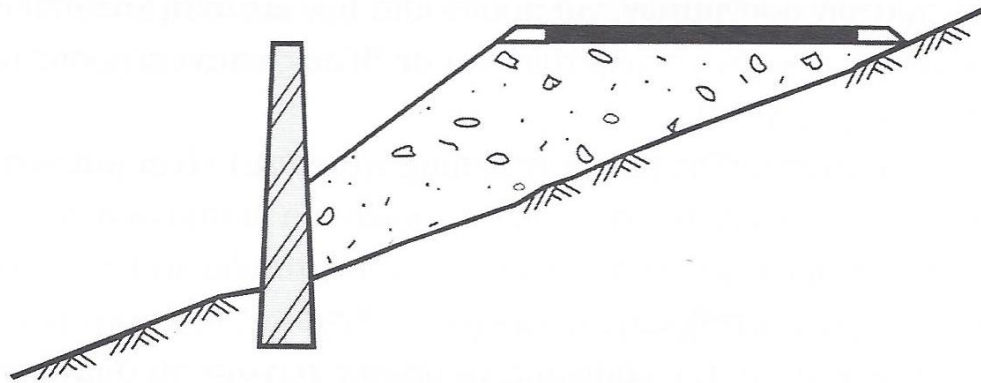
Πολλές φορές η διαμόρφωση των πρανών δεν είναι δυνατή κατά τη φυσική τους κλίση, δηλαδή την συνήθως μικρή κλίση που προκύπτει από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους (γωνία τριβής, συνοχή) και απαιτείται μεγάλη κλίση λόγω περιορισμού των εκσκαφών (σε ορύγματα) ή των επιχωματώσεων (σε επιχώματα). Στις περιπτώσεις αυτές η ευστάθεια των πρανών εξασφαλίζεται με την κατασκευή τοίχων αντιστήριξης που εμποδίζουν την κατολίσθηση χωμάτων, λίθων ή βράχων (Σχ.13.3).

Οι τοίχοι αντιστήριξης εμποδίζουν τις οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους προς τα κατάντη, που δρουν σε επίπεδα κάθετα στον άξονα της οδού. Οι τοίχοι αντιστήριξης (retaining walls) διακρίνονται σε

- 1) Τοίχους βαρύτητας (gravity walls)
- 2) Τοίχους προβόλους (cantilever walls)
- 3) Αντιριωτούς τοίχους (counterfort walls)
- 4) Τοίχους Βερολίνου (Berlin-type retaining walls)
- 5) Ειδικούς τοίχους αντιστήριξης, όπως διαφράγματα και πασσαλοσανίδες



α. Αντιστήριξη πρανούς ορύγματος

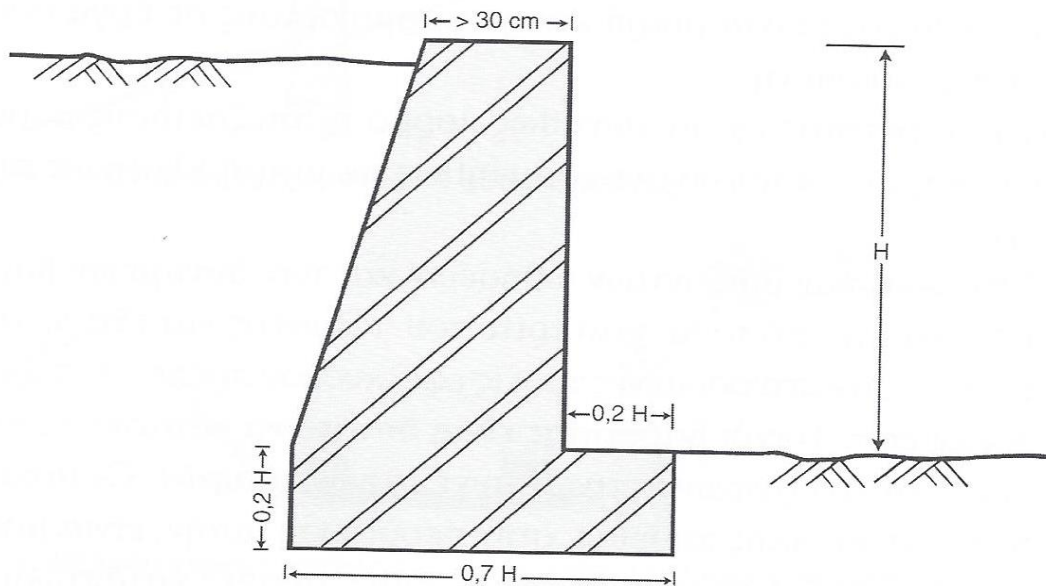


β. Υποστήριξη επιχώματος σε φυσικό πρανές

Σχήμα 13.3. Τοίχοι αντιστήριξης πρανών: α) ορύγματος, β) επιχώματος (από Μουρατίδη, 2007).

13.4.1. Τοίχοι βαρύτητας

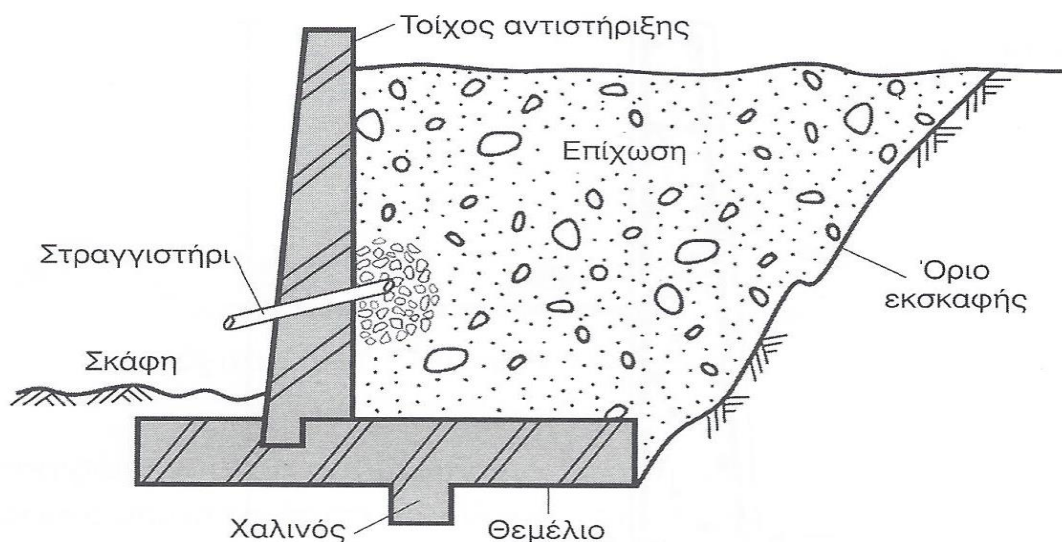
Οι τοίχοι αυτοί αποτελούνται από λιθοδομές ή άοπλο σκυρόδεμα, έχουν ύψος μέχρι 4m και αντιστέκονται στις εδαφικές ωθήσεις με την μεγάλη τους μάζα. Η εφαρμογή τους στη σύγχρονη οδοποιία είναι περιορισμένη. Μια τυπική διατομή τοίχου βαρύτητας φαίνεται στο Σχ.13.4.



Σχήμα 13.4. Τυπική διατομή τοίχου βαρύτητας (από Μουρατίδη, 2007).

13.4.2. Τοίχοι πρόβολοι

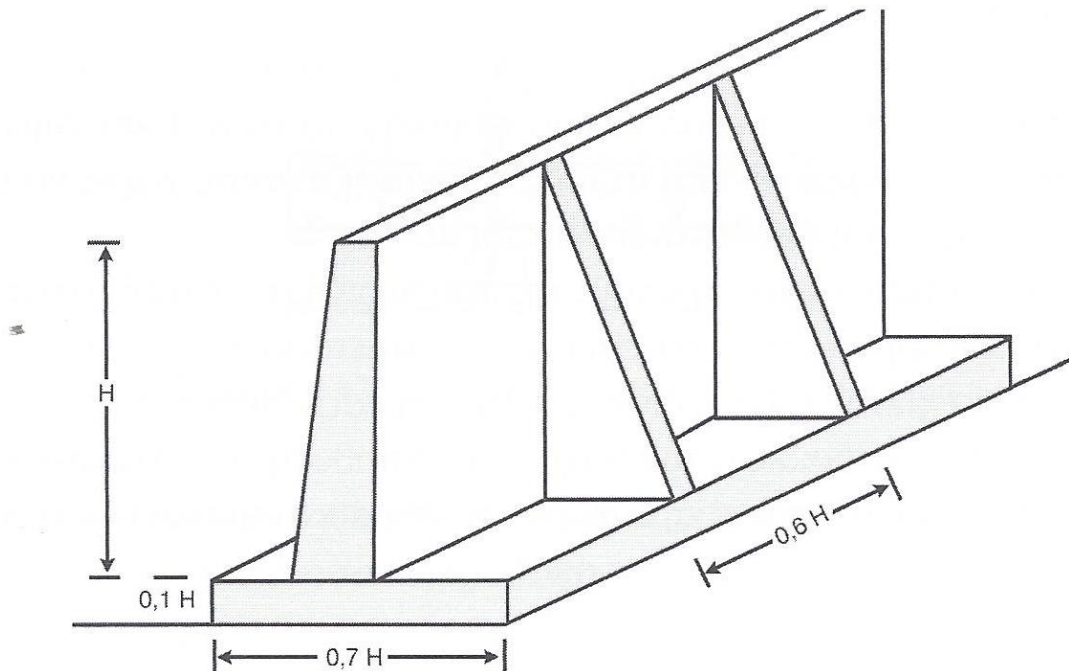
Οι τοίχοι αυτοί κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, έχουν πολύ μικρότερη διατομή από αυτή των τοίχων βαρύτητας, ύψος μέχρι 8m και αναλαμβάνουν με επιτυχία τις ενεργητικές ωθήσεις των πρανών λειτουργώντας ως πρόβολοι, όπως φαίνεται στο Σχ.13.5. Αποτελούν το συνηθέστερο τύπο τοίχου αντιστήριξης στην οδοποιία. Πολλές φορές ο τοίχος πρόβολος ενισχύεται και με αγκύρια.



Σχήμα 13.5. Τυπική διατομή τοίχου πρόβολου με πάχος ποδός προβόλου $\approx H/8$ και πλάτος θεμελίου $\approx 0.8H$, όπου H το ύψος του προβόλου (από Μουρατίδη, 2007).

13.4.3. Αντιριδωτοί τοίχοι

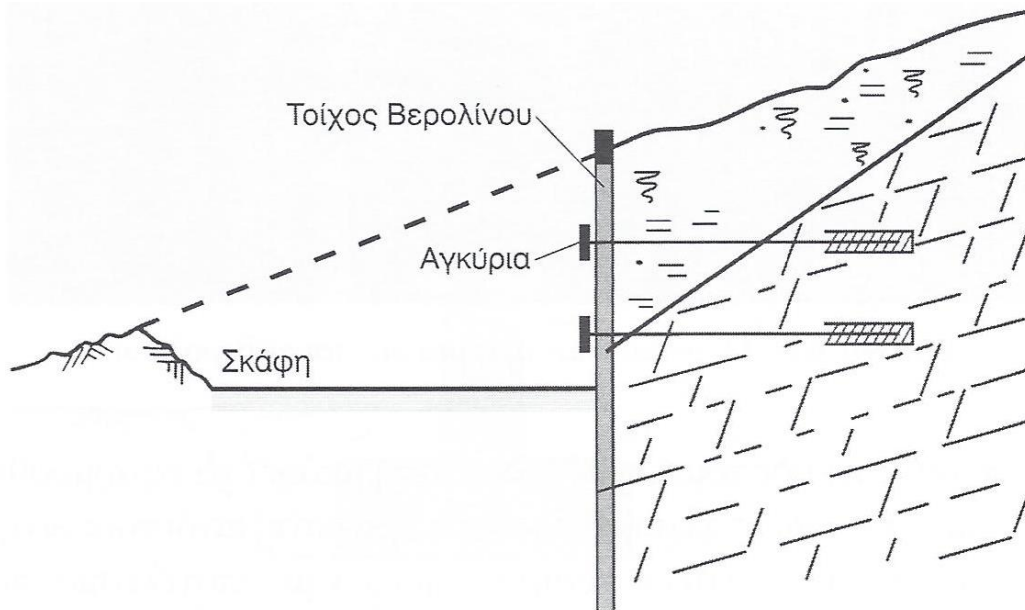
Οι τοίχοι αυτοί συνιστώνται για περιπτώσεις μεγάλου ύψους χωμάτων (8-12m) και είναι τοίχοι πρόβολοι με αντιρίδες ανά αποστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχ.13.6.



Σχήμα 13.6. Τυπικός αντιριδωτός τοίχος (από Μουρατίδη, 2007).

13.4.4. Τοίχοι Βερολίνου

Οι τοίχοι αυτοί αποτελούν μία ειδική κατηγορία τοίχων αντιστήριξης, κυρίως στην αστική οδοποιία και λειτουργούν ως κατακόρυφοι πρόβολοι. Οι τοίχοι Βερολίνου κατασκευάζονται προ και κατά τη φάση εκσκαφής. Πριν την εκσκαφή τοποθετείται στο περίγραμμα της μία σειρά πασσάλων (μεταλλικών ή από σκυρόδεμα) σε πυκνή διάταξη και σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό του σκάμματος. Ακολούθως εκτελείται η εκσκαφή και αποκαλύπτεται η εξωτερική (προς το σκάμμα) επιφάνεια των πασσάλων, ενώ στα μεταξύ τους κενά τοποθετούνται πλάκες μεταλλικές ή από σκυρόδεμα ή μεταλλικό πλέγμα στο οποίο εκτοξεύεται σκυρόδεμα. Έτσι το σύστημα πασσάλων-πλακών ενεργεί ως κατακόρυφο διάφραγμα το οποίο υπερτερεί των συνήθων τοιχών προβόλων λόγω της απλούστερης κατασκευής του. Πολλές φορές γίνεται και ενίσχυση του συστήματος αυτού με αγκύρια. Τυπική διατομή αντιστήριξης εκσκαφής με τοίχο Βερολίνου φαίνεται στο Σχ.13.7.



Σχήμα 13.7. Τυπική διατομή αντιστήριξης εκσκαφής με τοίχο Βερολίνου (από Μουρατίδη, 2007).

13.5. Έργα αποστράγγισης οδών

Η δομική ακεραιότητα και η ασφαλής λειτουργία μιάς οδού εξαρτάται σημαντικά από την ύπαρξη έργων απομάκρυνσης των νερών της βροχής από την επιφάνεια, το σώμα και το έδαφος θεμελίωσης της οδού. Η διαβρωτική ικανότητα του νερού προκαλεί φθορές στα ασφαλτικά και εδαφικά υλικά του οδοστρώματος, ενώ η παρουσία του στην επιφάνεια αυτού μειώνει την ασφάλεια της κυκλοφορίας. Για τους ανωτέρω λόγους, είναι απαραίτητη η κατασκευή διαφόρων υδραυλικών τεχνικών έργων για τον έλεγχο της ροής και της δράσης των νερών της βροχής ώστε να προστατευθούν τα έργα οδοποιίας. Τα υδραυλικά τεχνικά έργα αποσκοπούν

- 1) Στην προστασία οδού και οδοστρώματος από υπόγεια και επιφανειακά νερά.
- 2) Στον έλεγχο της ροής σε υδραυλικούς αγωγούς για αποφυγή ξαφνικών πλημμυρών σε πλησίον καλλιέργειες και κτίσματα.

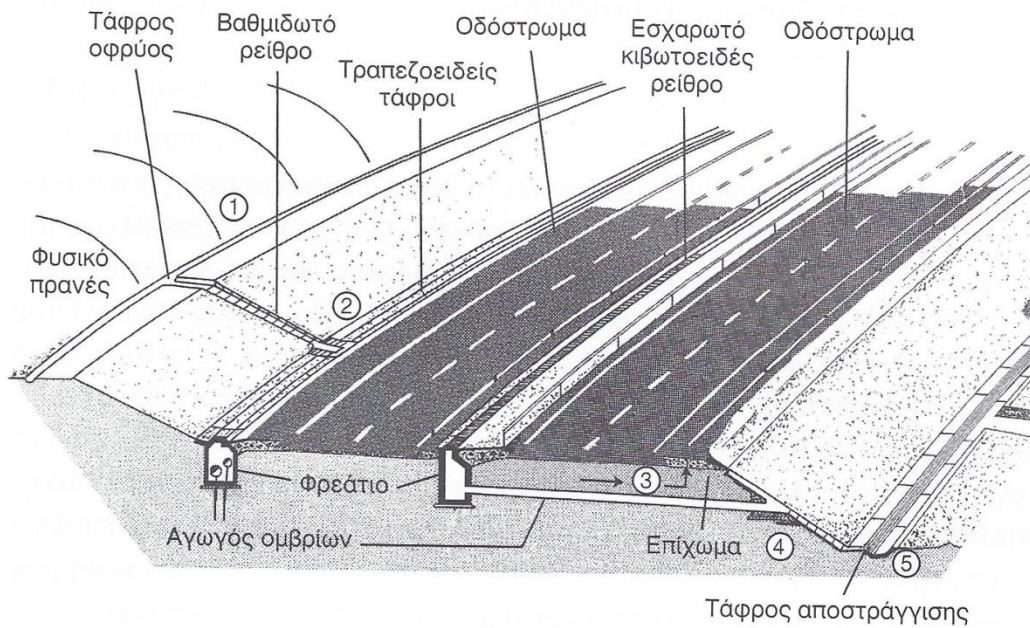
Ένα σωστά μελετημένο έργο οδοποιίας πρέπει να δέχεται στο κατάστρωμά του μόνο νερά της βροχής που πέφτουν σε αυτό. Νερά που προέρχονται από άλλες περιοχές, όπως τα εκατέρωθεν πρανή, πρέπει να εμποδίζονται με

- 1) Αποστραγγιστικές ή συλλεκτήριες τάφρους οφρύος (κεφαλή πρανούς).
- 2) Αυλάκια και τάφρους στους πόδες των πρανών ορυγμάτων.
- 3) Οχετούς για παροχέτευση φυσικών ροών κάτω από επιχώματα.

Τα υδραυλικά τεχνικά έργα αποστράγγισης οδών διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Έργα επιφανειακής αποστράγγισης ή έργα αποχέτευσης της οδού (τάφροι, αυλάκια, ρείθρα).
- 2) Έργα αποκατάστασης φυσικών ροών (γέφυρες, οχετοί).
- 3) Έργα υπεδάφιας αποστράγγισης (τάφροι, στραγγιστήριοι σωλήνες).

Το Σχ.13.8 δίνει μία σχεδόν πλήρη εικόνα των διαφόρων υδραυλικών τεχνικών έργων για την αποστράγγιση οδού από νερά της βροχής.



Σχήμα 13.8. Υδραυλικά τεχνικά έργα για αποστράγγιση οδού (από Μουρατίδη, 2007).

15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHO Road Test (1962), Special Reports 61A-61G, Highway Research Board, Washington D.C., U.S.A.
- AASHTO (1993), Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., U.S.A.
- AASHTO T 245-97 (1998), “Standard method of test for resistance to plastic flow of Bituminous mixtures using Marshall apparatus”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A.
- AASHTO T 96-99 (1999), “Standard method of test for resistance to degradation of small size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine”, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A.
- ABAQUS (2013), Analysis User’s Guide, Abaqus 6.13, Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, U.S.A.
- ANSYS (2010), ANSYS User’s Guide, Release 13, ANSYS Inc. Southpointe, Canonsburg, PA, USA.
- Asphalt Institute (1994), Mix Design Methods for Asphalt Concrete and other Hot Mix-types, Manual Series No 2 (MS-2), 6th Edition, Lexington, U.S.A.
- Beskou N.D., Theodorakopoulos D.D. (2011), ‘Dynamic effects of moving loads on road pavements: A review’, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31, 547-567.
- Boussinesq J.V. (1885), ‘Applications des Potentiels a L’Etude de l’Equilibre et du Movement des Solides Elastiques’, Gauthier Villars, Paris.
- BS 812 (1989), “Testing aggregates, Part 103: Method for determination of particle Size distribution”, British Standard Institution, London, U.K.
- Burmister D.M. (1943), ‘The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways’, with discussion by Palmer L.A., Barber E.S., Casagrande A., Middlebrooks T.A., Highway Research Board Proceedings 23, 126-148.

- Burmister D.M. (1945), 'The general theory of stresses and displacements in layered systems, I, II & III', *Journal of Applied Physics* 16, 89-94, 126-127 & 296-302.
- Burmister D.M. (1958), 'Evaluation of pavement systems of the WASHO road test by layered systems method, Highway Research Board, Bulletin 177, 26-54.
- Caltrans (2015), *Highway Design Manual*, California Department of Transportation, Sacramento, CA, U.S.A.
- Cebon D. (1999), 'Handbook of Vehicle-Road Interaction', Taylor & Francis, London.
- Darestani M.Y. (2007), 'Response of concrete pavements under moving vehicular loads and environmental effects', Ph.D. thesis, Centre of Built Environment and Engineering Research, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- Darter M.I., Barenberg E.J. (1977), 'Design of zero-maintenance plain jointed concrete pavement', Report No.FHWA-RD-77-111, Vol.1, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Dellatte, N. (2008), *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, Taylor & Francis, London.
- Duncan J.M., Monismith C.L., Wilson E.L. (1968), 'Finite element analyses of pavements', *Highway Research Record* 228, 18-33.
- Elliott R.P., Thompson M.R. (1985), 'ILLI-PAVE mechanistic analysis of AASHO road test flexible pavements', *Transportation Research Record* 1043, 33-49.
- FDOT (2015), *Flexible Pavement Design Manual*, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, U.S.A.
- FDOT (2009), *Rigid Pavement Design Manual*, Florida Department of Transportation, Tallahassee, Florida, U.S.A.
- Foster C.R., Ahlvin R.G. (1958), 'Development of multiple-wheel CBR design criteria', *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division of ASCE* 84, 1647-1 to 1647-12.
- Harichandran R.S., Yeh M.S., Baladi G.Y. (1990), 'MICH-PAVE: A nonlinear finite element program for analysis of flexible pavements', *Transportation Research Record* 1286, 123-131.

- Huang Y.H. (2004), 'Pavement Analysis and Design', Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Hung C.J., Monsees J., Munfah N., Wisniewski J. (2009), 'Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements', Publication No FHWA-NHI-10-034, U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., U.S.A.
- Hunter R.N. (Editor), (2000), Asphalts in Road Construction, Thomas Telford, London.
- Ioannides A.M., Thomson M.R., Barenberg E.J. (1985), 'Westergaard solutions reconsidered', Transportation Research Record 1043, 13-23.
- Κορίτσας Ι.Δ. (2001), Στοιχεία Οδοποιίας, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
- Kopperman, S., Tiller, G., Tseng, M. (1986), ELSYM5, Interactive Microcomputer Version, User's Manual, Report No FHWA-TS-87-206, Federal Highway Administration, Wasington D.C., U.S.A.
- Λοΐζος, Α. (2011), Σημειώσεις Οδοστρωμάτων, Σχολή Τεχνικής Εκπαίδευσης Αξιοματικών Μηχανικού (ΣΤΕΑΜΧ), Αθήνα.
- Miller J.S., Bellinger W.Y. (2003), "Distress identification manual for long- term Pavement performance program", 4th edition, Report No FHWA-RD-03-031, Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, Georgetown, VA, U.S.A.
- Μουρατίδης Α.Κ. (2007), 'Οδοποιία, Η Κατασκευή των Οδικών Έργων', University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Μουρατίδης Α.Κ. (2008), «Οδοποιία Η Διαχείριση των Οδικών Έργων», University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Μπέσκου Ν.Δ. (2016), 'Δυναμική απόκριση τρισδιάστατων εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε κινούμενα οχήματα με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Νικολαΐδης Α.Φ. (2002), Οδοποιία: Οδοστρώματα-Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας, 2^η Έκδοση, Μ.Τριανταφύλλου & Σία, Θεσσαλονίκη.
- Nikolaides A. (2015), 'Highway Engineering, Pavements, Materials and Control of Quality', CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, U.S.A.

- Odemark N. (1949), 'Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity', Meddelanden 77 fran Statens Vaginstitut, Stockholm, Sweden, (In Swedish: Translation in English by M.A. Hibbs & J.Silfwerbrand, A.M. Ioannides, Editor, 1990, available through TRID of Transportation Research Board, U.S.A.).
- Papagiannakis A.T. and Masad E.A. (2008), 'Pavement Design and Materials', John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J., U.S.A.
- PCA (1984), 'Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements', Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S.A.
- Pickett G., Ray G.K. (1951), 'Influence charts for concrete pavement', Transactions of ASCE 116, 49-73.
- SCDOT (2008), Pavement Design Guidelines, South Carolina Department of Transportation, Columbia, SC, U.S.A.
- TXDOT (2011), Pavement Design Guide, Texas Department of Transportation, Austin, TX, U.S.A.
- Ullidtz P. (1998), 'Modelling Flexible Pavement Response and Performance', Technical University of Denmark Press, Lyngby.
- Westergaard H.M. (1926), 'Stress in concrete pavements computed by theoretical analysis', Public Roads 7(2), 25-35.
- Westergaard H.M. (1933), 'Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements', Public Roads 14(10), 185-188.
- Westergaard H.M. (1939), 'Stresses in concrete runways of airports', Proceedings of Highway Research Board 19, 197-202.
- Westergaard H.M. (1948), 'New formulas for stresses in concrete pavements of airfields', Transactions of ASCE 113, 425-444.
- WSDOT (2015), Design Manual, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA, U.S.A.

