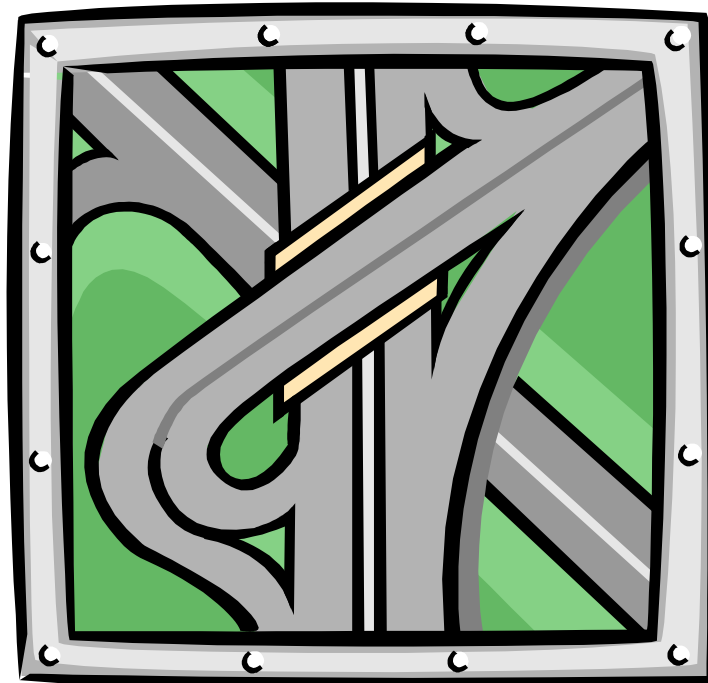


ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ



Καθηγητής  
ΖΩΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Σπουδαστές  
ΜΠΑΚΑΛΑΡΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ  
ΖΗΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ ΚΥΡΙΑΚΗ  
ΚΑΡΦΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΠΑΤΡΑ 2006

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### Εύκαμπτα οδοστρώματα

1.1.	Γενικά .....	5
1.2.	Έννοιες του συστήματος στρώσεων .....	6
1.2.1.	Συστήματα μιας στρώσης .....	10
1.2.2.	Συστήματα δύο στρώσεων .....	24
1.2.3.	Συστήματα τριών στρώσεων .....	27
1.3.	Βασικές έννοιες σχεδιασμού .....	55
1.3.1.	Τάσεις του υπεδάφους .....	56
1.3.2.	Βέλος Κάμψης .....	57
1.3.3.	Διατμητική τάση .....	58
1.3.4.	Εφελκυστική τάση .....	59
1.3.5.	Επίδραση της Πίεσης Ελαστικού και Ολικού Φορτίου .....	60

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Δύσκαμπτα οδοστρώματα

2.1.	Γενικά .....	62
2.2.	Καμπύλωση και τάσεις λόγω κάμψης .....	63
2.3.	Σχετική δυσκαμψία πλακών .....	64
2.4.	Μέτρο αντίδρασης υπεδάφους .....	65
2.5.	Διαφορές θερμοκρασίας .....	67
2.5.1.	Τάσεις λόγω κύρτωσης .....	67
2.6.	Τάσεις λόγω τριβής .....	72
2.7.	Αποτελέσματα κύρτωσης, συστολής και διαστολής .....	74
2.7.1.	Θερμοκρασιακός οπλισμός .....	76
2.8.	Σύγκριση απλών και οπλισμένων οδοστρωμάτων .....	77
2.8.1.	Χρήση ράβδων ενίσχυσης .....	79
2.9.	Αρμοί .....	80
2.9.1.	Αρμοί συστολής .....	80
2.9.2.	Αρμοί διαστολής .....	82
2.9.3.	Κατασκευαστικοί αρμοί .....	83
2.9.4.	Αρθρωτοί ή αρμοί κύρτωσης .....	83
2.10.	Τάσεις σε οπλισμένα οδοστρώματα .....	84
2.10.1.	Ράβδοι ενίσχυσης .....	84
2.10.2.	Ράβδοι σύνδεσης .....	85
2.10.3.	Τάσεις σε ράβδους ενίσχυσης .....	85
2.10.4.	Επενέργεια ομάδας ράβδων ενίσχυσης .....	89
2.10.5.	Μεταβίβαση φορτίων διαμέσου αρμών .....	91
2.10.6.	Μήκος ενσωμάτωσης ράβδου .....	92
2.10.7.	Επιτρεπόμενη τάση επαφής .....	92
2.10.8.	Επενέργεια ομάδας ράβδων .....	94
2.11.	Ράβδοι σύνδεσης .....	96
2.12.	Συνεχής οπλισμός .....	97
2.13.	Οδοστρώματα προεντεταμένου σκυροδέματος .....	101

2.14.	Τάσεις λόγω φορτίου.....	102
2.15.	Διαγράμματα επιρροής.....	103
2.15.1.	Διαγράμματα τάσεων .....	104
2.16.	Προσδιορισμός των τάσεων από διαγράμματα .....	111
2.16.1.	Οδοστρώματα με συνεχή οπλισμό .....	112
2.17.	Επίδραση της πίεσης ελαστικού, του ολικού φορτίου και της διάταξης των τροχών.....	113
2.18.	Επίδραση του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους στο πάχος .....	113
2.19.	Συνδυασμένες τάσεις.....	115
2.20.	Επίδραση των $k$ και $h$ στις τάσεις κύρτωσης.....	116
2.21.	Κριτήρια επιλογής πάχους.....	116

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### Συντήρηση και ενίσχυση οδοστρωμάτων

3.1.	Γενικά .....	118
3.2.	Σχέση συντήρησης, αποκατάστασης και διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.....	121
3.3.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος.....	123
3.4.	Φθορές ευκάμπτων οδοστρωμάτων .....	125
3.5.	Ρηγματώσεις (cracking) .....	125
3.5.1.	Σφράγιση/πλήρωση ρωγμών.....	125
3.5.2.	Ρωγμές τύπου αλλιγάτορα (alligator cracks) .....	126
3.5.3.	Ρωγμές στα άκρα τον οδοστρώματος (edge cracks).....	128
3.5.4.	Ρωγμές μεταξύ λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυνσης (lane and widening cracks).....	129
3.5.5.	Ρωγμές από ανάκλαση (reflection cracks) .....	129
3.5.6.	Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων (slippage cracks) .....	131
3.5.7.	Ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks) .....	132
3.5.8.	Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (wheel path cracks) .....	132
3.5.9.	Ελικοειδείς ρωγμές.....	133
3.6.	Νέες μέθοδοι για τη συντήρηση ή αποκατάσταση ρηγματωμένων επιφανειών.....	133
3.6.1.	Χρήση ασφαλτοϋφασμάτων (asphalt overlay fabric) .....	133
3.6.2.	Μεμβράνη ή μίγμα απορρόφησης τάσεων (SAM) (stress absorbing membrane).....	135
3.6.3.	Μεμβράνη οπλισμένη με ίνες (fibre reinforced membrane).....	136
3.7.	Παραμορφώσεις (στρεβλώσεις) της επιφάνειας (surface distortion) .....	136
3.7.1.	Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών (channel or ruts) .....	138
3.7.2.	Κυματώσεις (ρυτιδώσεις) (corrugations) .....	139
3.7.3.	Τοπικές καθιζήσεις (local depressions).....	141
3.7.4.	Τοπικές διογκώσεις (local upheaval) .....	141
3.7.5.	Τοπικές καθιζήσεις σε τομές οδοστρώματος (utility cut depressions) .....	142
3.8.	Αποσύνθεση (disintegration) .....	142
3.9.	Λακκούβες (potholes) .....	143
3.10.	Λεία επιφάνεια οδοστρώματος .....	144
3.10.1.	Λείανση των αδρανών – Ολισθηρότητα .....	144

3.10.2.	Ανάδυση ασφάλτου (asphalt bleeding or flushing) .....	152
3.11.	Φθορές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.....	152
3.12.	Ρηγματώσεις – Αρμοί.....	153
3.12.1.	Φθορές στους αρμούς.....	153
3.12.2.	Γωνιώδεις (γωνιακές) ρωγμές (edge cracks).....	154
3.12.3.	Διαμήκειες ρωγμές (longitudinal cracks) .....	155
3.12.4.	Εγκάρσιες ρωγμές (transverse cracks) .....	155
3.12.5.	Διαγώνιες ρωγμές (diagonal cracks) .....	155
3.13.	Επιφανειακές παραμορφώσεις δύσκαμπτων οδοστρωμάτων .....	156
3.14.	Αποσύνθεση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (disintegration).....	156
3.14.1.	Ασφαλτική στρώση εκτόνωσης ρωγμών .....	158
3.14.2.	Διάσπαση και βύθιση .....	159
3.15.	Ολισθηρότητα επιφανείας.....	160
3.16.	Ασφαλτικές επαλείψεις (Surface dressing).....	160
3.16.1.	Τύποι ασφαλτικών επαλείψεων .....	161
3.17.	Ενίσχυση οδοστρωμάτων.....	163
3.18.	Υπολογισμός πάχους ενισχυτικής ασφαλτικής επίστρωσης επί ευκάμπτων οδοστρωμάτων .....	165
3.18.1.	Μέθοδος των βυθίσεων.....	165
3.18.2.	Μέθοδος τον ισοδύναμου πάχους .....	166
3.19.	Υπολογισμός πάχους ενισχυτικής ασφαλτικής επίστρωσης επί δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	169
3.19.1.	Μέθοδος των βυθίσεων κατά Asphalt Institute .....	170
3.19.2.	Μέθοδος του ισοδύναμου πάχους .....	171
3.20.	Ενισχυτική επίστρωση σκυροδέματος πάνω σε δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα .....	172
3.20.1.	Διαστασιολόγηση επίστρωσης από σκυρόδεμα επί δύσκαμπτου οδοστρώματος σύμφωνα με τις Βρετανικές προδιαγραφές .....	173
3.21.	Μέθοδος διαστασιολόγησης ενισχυτικών επιστρώσεων κατά AASHTO.....	175
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>177</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## Εύκαμπτα οδοστρώματα

### 1.1. Γενικά

Σημαντική είναι η αλλαγή που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στο σχεδιασμό και στην κατασκευή των ασφαλικών οδοστρωμάτων. Μέχρι πρότινος, τα περισσότερα οδοστρώματα μπορούσαν εύκολα να καταταχθούν σε μία από τις δύο κατηγορίες: «εύκαμπτα» ή «δύσκαμπτα».

Ο σχεδιασμός των δύσκαμπτων ή PCC οδοστρωμάτων βασιζόταν για πολλά χρόνια σε μία θεωρητική ανάλυση που περιείχε μερικές εμπειρικές τροποποιήσεις της κλασικής μεθόδου Westergaard. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα χαρακτηρίζονταν (και ακόμη χαρακτηρίζονται) από μία σχετικά λεπτή ασφαλική επιφανειακή στρώση και με στρώσεις βάσης και υπόβασης από κοκκώδη υλικά που προστατεύουν το υπέδαφος από υπερφόρτιση. Αυτός ο τύπος σχεδιασμού του οδοστρώματος βασιζόταν κυρίως σε εμπειρικούς κανόνες ή στην πείρα, ενώ η θεωρία έπαιζε δευτερεύοντα ρόλο στην όλη διαδικασία.

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

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

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

Ο αναγνώστης πρέπει να κατανοήσει ότι για να είναι μία μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων απόλυτα ορθολογική από τη φύση της, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τρία στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι:

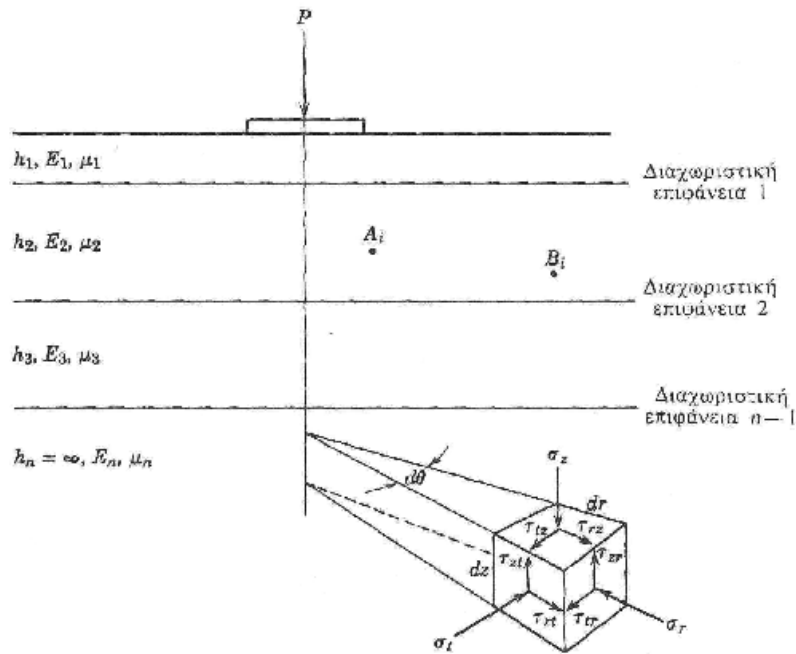
- (1) η θεωρία πρόβλεψης της παραμέτρου βλάβης ή καταπόνησης
- (2) η αξιολόγηση των καταλλήλων ιδιοτήτων των υλικών, που είναι απαραίτητες για την θεωρία που έχει εκλεγεί και
- (3) ο προσδιορισμός της σχέσης ανάμεσα στο μέγεθος της παραμέτρου προς το επιθυμητό επίπεδο αντοχής.

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει μόνο το πρώτο από τα στοιχεία αυτά. Αν και οι αντιδράσεις των περισσότερων υλικών οδοστρωσίας διαφέρουν από τις παραδοχές της θεωρίας και τις «αληθινές» τιμές τάσης, παραμόρφωσης ή κάμψης, η κατανόηση της θεωρίας είναι απαραίτητη στο μηχανικό λόγω της σπουδαιότητας της αναγνώρισης των θεμελιωδών παραγόντων πάνω στους οποίους βασίζονται όλοι οι σχεδιασμοί οδοστρωμάτων.

## 1.2. Έννοιες του συστήματος στρώσεων

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

επιφάνειες και με διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια. Πάντως, οι λύσεις που παρουσιάζονται σ' αυτό το κεφάλαιο, προϋποθέτουν όλες τις παραδοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



**Σχήμα 1.1. Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων**

Από τη θεωρία φαίνεται ότι σε ένα σημείο μιας οποιασδήποτε στρώσης, αναπτύσσονται 9 τάσεις. Οι τάσεις αυτές περιλαμβάνουν 3 ορθές τάσεις ( $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$ ) που ενεργούν κάθετα στις έδρες του στοιχείου και 6 διατμητικές τάσεις ( $\tau_{rt}, \tau_{tr}, \tau_{rz}, \tau_{zr}, \tau_{tz}, \tau_{zt}$ ) που ενεργούν παράλληλα προς τις έδρες. Οι συνθήκες στατικής ισορροπίας του στοιχείου δείχνουν ότι οι διατμητικές τάσεις σε δύο τεμνόμενες έδρες είναι ίσες. Έτσι  $\tau_{tz} = \tau_{zt}, \tau_{rt} = \tau_{tr}, \tau_{rz} = \tau_{zr}$ . Σε κάθε σημείο του συστήματος υπάρχει ένας ορισμένος προσανατολισμός του στοιχείου τέτοιος, ώστε οι διατμητικές τάσεις που ενεργούν σε κάθε έδρα είναι μηδέν. Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες οι ορθές τάσεις χαρακτηρίζονται σαν κύριες τάσεις και συμβολίζονται με  $\sigma_1$  (μέγιστη),  $\sigma_2$  (ενδιάμεση) και  $\sigma_3$  (ελάχιστη). Ολική τάση  $\theta$  είναι το άθροισμα των κύριων τάσεων σε ένα σημείο. Με δεδομένο το τριαξονικό σύστημα τάσεων ενός στοιχείου, οι παραμορφώσεις υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

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

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

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

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

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

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

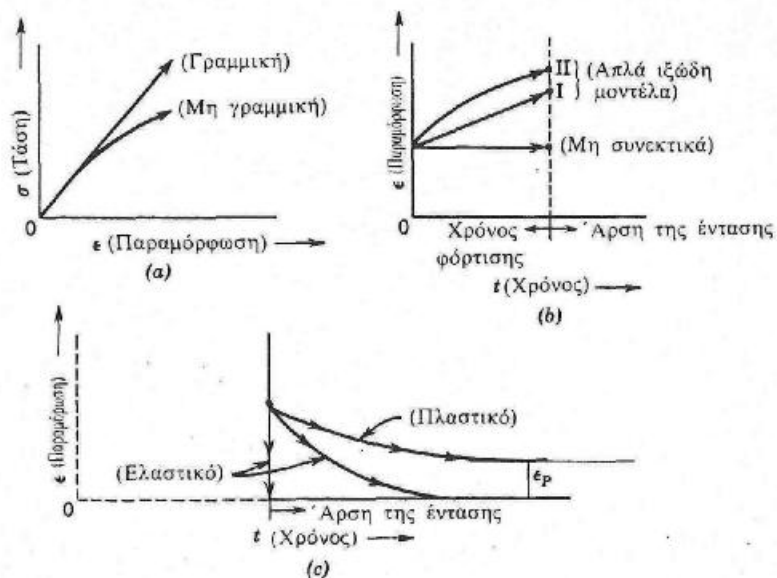
όπου  $t$  είναι ο χρόνος και  $\eta$  ο συντελεστής συνεκτικότητας του συστήματος επανατάκτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο μέρη της ολικής παραμόρφωσης. Ένα μέρος είναι το στιγμιαίο και τελείως αναστρέψιμο τμήμα που προσομοιάζεται από το ελατήριο, ενώ το άλλο τμήμα εξαρτάται από το χρόνο και είναι μόνιμο.

Το σύστημα Kelvin εικονίζεται από το Μοντέλο II. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα ελατήριο και έναν επανατάκτη σε παράλληλα διάταξη. Η εξηρητημένη από το χρόνο παραμόρφωση γι' αυτό το σύστημα είναι:



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

1.5



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

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

Το σχήμα 1.2c παριστάνει τη βασική διαφορά ανάμεσα σε ένα ελαστικό και ένα πλαστικό υλικό. Στην ιδανική περίπτωση, η διαφορά αυτή αφορά στο αν όλη η παραμόρφωση εξαφανίζεται (ελαστικό) με την άρση της φόρτισης ή αν κάποια παραμόρφωση παραμένει (πλαστικό). Η δεύτερη περίπτωση παριστάνεται από τη μόνιμη παραμόρφωση  $\epsilon_p$  στο διάγραμμα. Από πρακτική άποψη, πολλά από τα ελαστικοίξώδη μοντέλα απαιτούν τόσο πολύ χρόνο για να επανέλθουν στην αρχική

τους κατάσταση, ώστε μεγάλο μέρος της παραμόρφωσης θεωρείται ότι είναι πλαστικό ή μόνιμο από τη φύση του. Το χαρακτηριστικό αυτό εξηγεί γιατί η ελαστικοϊξώδης θεωρία χρησιμοποιείται για να προβλέψει τη μόνιμη παραμόρφωση των συστημάτων οδοστρωμάτων.

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

### 1.2.1. Συστήματα μιας στρώσης

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

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

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2} \tag{1.6}$$

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

όπου  $r$ = ακτινική απόσταση από το συγκεντρωμένο φορτίο  $z$ = βάθος

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

Η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων κάτω από ένα συγκεντρωμένο φορτίο σε ένα οριζόντιο επίπεδο έχει τη μορφή μιας επιφάνειας σχήματος καμπάνας. Οι μέγιστες τάσεις βρίσκονται στο κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από το σημείο εφαρμογής

του. Η πίεση είναι μέγιστη σε μικρά βάθη και θεωρητικά μηδενίζεται στο άπειρο. Στην πράξη γίνεται η παραδοχή ότι προσεγγίζει το μηδέν σε πεπερασμένο βάθος.

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

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

Ο Newmark κατέστρωσε διαγράμματα επιρροής για τον προσδιορισμό των τάσεων σε ελαστικές εδαφικές μάζες. Τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται πολύ στις μελέτες θεμελιώσεων. Ο Barber δημοσίευσε πίνακες που διευκολύνουν τους υπολογισμούς των τάσεων και παραμορφώσεων. Οι Sanborn και Yoder παρουσίασαν γραφικές λύσεις τάσεων και βέλους κάμψης σε ένα στερεό του Boussinesq με την παραδοχή ότι η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια είναι ημιελλειψοειδής μάλλον, παρά ομοιόμορφα κατανεμημένη σε μία κυκλική επιφάνεια επαφής.

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

Οι λύσεις για τις διάφορες παραμέτρους φαίνονται στον Πίνακα 1.1. Οι εξισώσεις εκφράζονται με τη μορφή συναρτήσεων (A ... H), που παρέχονται από τον Πίνακα 1.2. Κάθε συνάρτηση εκφράζεται από το βάθος και την απόσταση σε ακτίνες ( $z/a$  και  $r/a$ ) που προσδιορίζουν έτσι το συγκεκριμένο σημείο της εδαφικής μάζας. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.3.

Αν και τα περισσότερα ασφαλικά οδοστρώματα δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν ομοιογενή, η χρήση των εξισώσεων του Πίνακα 1.1 θεωρείται ότι μπορεί να εφαρμοστεί για τη μελέτη τάσεων, παραμορφώσεων και υποχωρήσεων του υπεδάφους, όταν ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του οδοστρώματος και του υπεδάφους πλησιάζει τη μονάδα. Περισσότερο αντιπροσωπευτική θεωρείται η περίπτωση ενός συμβατικού εύκαμπτου οδοστρώματος με κοκκώδη βάση και υπόβαση και μία λεπτή επιφανειακή στρώση ασφαλτικού μπετόν.

**Πίνακας 1.2. Ελαστικές Εξισώσεις μιας Στρώσης\* (κατά Ahlvin και Ulery)**

Παράμετρος	Γενική περίπτωση	Ειδική περίπτωση ( $\mu = 0,5$ )
Κατακόρυφη τάση	$\sigma_z = p[A + B]$	(ίδια)
Ακτινική οριζόντια τάση	$\sigma_r = p[2\mu A + C + (1 - 2\mu)F]$	$\sigma_r = p[A + C]$
Εφαπτομενική οριζόντια τάση	$\sigma_t = p[2\mu A - D + (1 - 2\mu)E]$	$\sigma_t = p[A - D]$
Κατακόρυφη ακτινική διατμητική τάση	$\tau_{rz} = \tau_{zr} = pG$	(ίδια)
Κατακόρυφη παραμόρφωση	$\epsilon_z = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)A + B]$	$\epsilon_z = \frac{1,5p}{E_1} B$
Ακτινική οριζόντια παραμόρφωση	$\epsilon_r = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)F + C]$	$\epsilon_r = \frac{1,5p}{E_1} C$
Εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση	$\epsilon_t = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)E - D]$	$\epsilon_t = -\frac{1,5p}{E_1} D$
Κατακόρυφη παραμόρφωση	$\Delta_z = \frac{p(1 + \mu)a}{E_1} \left[ \frac{z}{a} A + (1 - \mu)H \right]$	$\Delta_z = \frac{1,5pa}{E_1} \left( \frac{z}{a} A + \frac{H}{2} \right)$
Ολική τάση	$\theta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t$	
Ολική παραμόρφωση	$\epsilon_\theta = \epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_t$	
Κατακόρυφη εφαπτομενική διατμητική τάση	$\tau_{zt} = \tau_{tz} = 0 \therefore [\sigma_t(\epsilon_t) \text{ είναι κύρια τάση (παραμόρφωση)}]$	
Κύριες τάσεις	$\sigma_{1,2,3} = \frac{(\sigma_z + \sigma_r) \pm \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (2\tau_{rz})^2}}{2}$	
Μέγιστη διατμητική τάση	$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	

\*Βλέπε Πίνακα 1.2 για τιμές των συναρτήσεων A, B, C, D, E, F, G και H. Οι τιμές (+) είναι θλιπτικές.

**Πίνακας 1.2α. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)**

		Συνάρτηση A																
Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες κύκλου																	
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,1	,90050	,89748	,88679	,86126	,78797	,43015	,09645	,02787	,00856	,00211	,00084	,00042						
0,2	,80388	,79824	,77884	,73483	,63014	,38269	,15433	,05251	,01680	,00419	,00167	,00083	,00048	,00020				
0,3	,71265	,70518	,68316	,62690	,52081	,34375	,17964	,07199	,02440	,00622	,00250							
0,4	,62861	,62015	,59241	,53767	,44329	,31048	,18709	,08593	,03118									
0,5	,55279	,54403	,51622	,46448	,38390	,28156	,18556	,09499	,03701	,01013	,00407	,00209	,00118	,00053	,00025	,00014	,00009	
0,6	,48550	,47691	,45078	,40427	,33676	,25588	,17952	,10010										
0,7	,42654	,41874	,39491	,35428	,29833	,21727	,17124	,10228	,04558									
0,8	,37531	,36832	,34729	,31243	,26581	,21297	,16206	,10236										
0,9	,33104	,32492	,30669	,27707	,23832	,19488	,15253	,10094										
1	,29289	,28763	,27005	,24697	,21468	,17868	,14329	,09849	,05185	,01742	,00761	,00393	,00226	,00097	,00050	,00029	,00018	
1,2	,23178	,22795	,21662	,19890	,17626	,15101	,12570	,09192	,05260	,01935	,00871	,00459	,00269	,00115				
1,5	,16795	,16552	,15877	,14804	,13436	,11892	,10296	,08048	,05116	,02142	,01013	,00548	,00325	,00141	,00073	,00043	,00027	
2	,10557	,10453	,10140	,09647	,09011	,08269	,07471	,06275	,04496	,02221	,01160	,00659	,00399	,00180	,00094	,00056	,00036	
2,5	,07152	,07098	,06947	,06698	,06373	,05974	,05555	,04880	,03787	,02143	,01221	,00732	,00463	,00214	,00115	,00068	,00043	
3	,05132	,05101	,05022	,04886	,04707	,04487	,04241	,03839	,03150	,01980	,01220	,00770	,00505	,00242	,00132	,00079	,00051	
4	,02986	,02976	,02907	,02832	,02802	,02749	,02651	,02490	,02193	,01592	,01109	,00768	,00536	,00282	,00160	,00099	,00065	
5	,01942	,01938				,01835			,01573	,01249	,00949	,00708	,00527	,00298	,00179	,00113	,00075	
6	,01361					,01307			,01168	,00983	,00795	,00628	,00492	,00299	,00188	,00124	,00084	
7	,01005					,00976			,00894	,00784	,00661	,00548	,00445	,00291	,00193	,00130	,00091	
8	,00772					,00755			,00703	,00635	,00554	,00472	,00398	,00276	,00189	,00134	,00094	
9	,00612					,00600			,00566	,00520	,00466	,00409	,00353	,00256	,00184	,00133	,00096	
10									,00477	,00465	,00438	,00397	,00352	,00326	,00241			

**Πίνακας 1.2β. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)**

Συνάρτηση *B*

Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	,09852	,10140	,11138	,13424	,18796	,05388	-,07899	-,02672	-,00845	-,00210	-,00084	-,00042					
0,2	,18857	,19306	,20772	,23524	,25983	,08513	-,07759	-,04448	-,01593	-,00412	-,00166	-,00083	-,00024	-,00010			
0,3	,28362	,26787	,28018	,29483	,27257	,10757	-,04316	-,04999	-,02166	-,00599	-,00245						
0,4	,32016	,32259	,32748	,32273	,26925	,12404	-,00766	-,04535	-,02522								
0,5	,35777	,35752	,35323	,33106	,26236	,13591	,02165	-,03455	-,02651	-,00991	-,00388	-,00199	-,00116	-,00049	-,00025	-,00014	-,00009
0,6	,37831	,37531	,36308	,32822	,25411	,14440	,04457	-,02101									
0,7	,38487	,37962	,36072	,31929	,24638	,14986	,06209	-,00702	-,02329								
0,8	,38091	,37408	,35133	,30699	,23779	,15292	,07530	,00614									
0,9	,36962	,36275	,33734	,29299	,22891	,15404	,08507	,01795									
1	,35355	,34553	,32075	,27819	,21978	,15355	,09210	,02814	-,01005	-,01115	-,00608	-,00344	-,00210	-,00092	-,00048	-,00028	-,00018
1,2	,31485	,30730	,28481	,24836	,20113	,14915	,10002	,04378	,00023	-,00995	-,00632	-,00378	-,00236	-,00107			
1,5	,25602	,25025	,23338	,20694	,17368	,13732	,10193	,05745	,01385	-,00669	-,00600	-,00401	-,00265	-,00126	-,00068	-,00040	-,00026
2	,17889	,18144	,16644	,15198	,13375	,11331	,09254	,06371	,02836	,00028	-,00410	-,00371	-,00278	-,00148	-,00084	-,00050	-,00033
2,5	,12807	,12633	,12126	,11327	,10298	,09130	,07869	,06022	,03429	,00661	-,00130	-,00271	-,00250	-,00156	-,00094	-,00059	-,00039
3	,09487	,09394	,09099	,08635	,08033	,07325	,06551	,05354	,03511	,01112	,00157	-,00134	-,00192	-,00151	-,00099	-,00065	-,00046
4	,05707	,05666	,05562	,05383	,05145	,04773	,04532	,03995	,03066	,01515	,00595	,00155	-,00029	-,00109	-,00094	-,00068	-,00050
5	,03772	,03760				,03384			,02474	,01522	,00810	,00371	,00132	-,00043	-,00070	-,00068	-,00049
6	,02666					,02468			,01968	,01380	,00867	,00496	,00254	,00028	-,00037	-,00047	-,00045
7	,01980					,01868			,01577	,01204	,00842	,00547	,00332	,00093	-,00002	-,00029	,00037
8	,01526					,01459			,01279	,01034	,00779	,00554	,00372	,00141	,00035	-,00008	-,00025
9	,01212					,01170			,01054	,00888	,00705	,00533	,00386	,00178	,00066	,00012	-,00012
10									,00924	,00879	,00764	,00631	,00501	,00382	,00199		

Πίνακας 1.2c. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)

Συνάρτηση C

Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																	
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,1	-,04926	-,05142	-,05903	-,07708	-,12108	,02247	,12007	,04475	,01536	,00403	,00164	,00082						
0,2	-,09429	-,09755	-,10872	-,12977	-,14552	,02419	,14896	,07892	,02951	,00796	,00325	,00164	,00094	,00039				
0,3	-,13181	-,13484	-,14415	-,15023	-,12990	,01988	,13394	,09816	,04148	,01169	,00483							
0,4	-,16008	-,16188	-,16519	-,15985	-,11168	,01292	,11014	,10422	,05067									
0,5	-,17889	-,17835	-,17497	-,15625	-,09833	,00483	,08730	,10125	,05690	,01824	,00778	,00399	,00231	,00098	,00050	,00029	,00018	
0,6	-,18915	-,18663	-,17336	-,14934	-,08967	-,00304	,06731	,09313										
0,7	-,19244	-,18831	-,17393	-,14147	-,08409	-,01061	,05028	,08253	,06129									
0,8	-,19046	-,18481	-,16784	-,13393	-,08066	-,01744	,03582	,07114										
0,9	-,18481	-,17841	-,16024	-,12664	-,07828	-,02337	,02359	,05993										
1	-,17678	-,17050	-,15188	-,11995	-,07634	-,02843	,01331	,04939	,05429	,02726	,01333	,00726	,00433	,00188	,00098	,00057	,00036	
1,2	-,15742	-,15117	-,13467	-,10763	-,07289	-,03575	-,00245	,03107	,04522	,02791	,01467	,00824	,00501	,00221				
1,5	-,12801	-,12277	-,11101	-,09145	-,06711	-,04124	-,01702	,01088	,03154	,02652	,01570	,00933	,00585	,00266	,00141	,00083	,00039	
2	-,08944	-,08491	-,07976	-,06925	-,05560	-,04144	-,02687	-,00782	,01267	,02070	,01527	,01013	,00321	,00327	,00179	,00107	,00069	
2,5	-,06403	-,06068	-,05839	-,05259	-,04522	-,03605	-,02800	-,01536	,00103	,01384	,01314	,00987	,00707	,00569	,00209	,00128	,00083	
3	-,04744	-,04560	-,04339	-,04089	-,03642	-,03130	-,02587	-,01748	-,00528	,00792	,01030	,00888	,00689	,00392	,00232	,00145	,00096	
4	-,02854	-,02737	-,02562	-,02585	-,02421	-,02112	-,01964	-,01586	-,00956	,00038	,00492	,00602	,00561	,00389	,00254	,00168	,00115	
5	-,01886	-,01810				-,01568			-,00939	-,00293	-,00128	,00329	,00391	,00341	,00250	,00177	,00127	
6	-,01333					-,01118			-,00819	-,00405	-,00079	,00129	,00234	,00272	,00227	,00173	,00130	
7	-,00990					-,00902			-,00678	-,00417	-,00180	-,00004	,00113	,00200	,00193	,00161	,00128	
8	-,00763					-,00699			-,00552	-,00393	-,00225	-,00077	,00029	,00134	,00157	,00143	,00120	
9	-,00607					-,00423			-,00452	-,00353	-,00235	-,00118	-,00027	,00082	,00124	,00122	,00110	
10									-,00381	-,00373	-,00314	-,00233	-,00137	-,00063	,00040			

Πίνακας 1.2d. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)

Συνάρτηση D

Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	,04926	,04998	,05235	,05716	,06687	,07635	,04108	,01803	,00691	,00193	,00080	,00041					
0,2	,09429	,09552	,09900	,10546	,11431	,10932	,07139	,03444	,01359	,00384	,00159	,00081	,00047	,00020			
0,3	,13181	,13305	,14051	,14062	,14267	,12745	,09078	,04817	,01982	,00927	,00238						
0,4	,16008	,16070	,16229	,16288	,15756	,13696	,10248	,05887	,02545								
0,5	,17889	,17917	,17826	,17481	,16403	,14074	,10894	,06670	,03039	,00921	,00390	,00200	,00116	,00049	,00025	,00015	,00009
0,6	,18915	,18867	,18573	,17887	,16489	,14137	,11186	,07212									
0,7	,19244	,19132	,18679	,17782	,16229	,13926	,11237	,07551	,03801								
0,8	,19046	,18927	,18348	,17306	,15714	,13548	,11115	,07728									
0,9	,18481	,18349	,17709	,16635	,15063	,13067	,10866	,07788									
1	,17678	,17503	,16886	,15824	,14344	,12513	,10540	,07753	,04456	,01611	,00725	,00382	,00224	,00096	,00050	,00029	,00018
1,2	,15742	,15618	,15014	,14073	,12823	,11340	,09757	,07484	,04575	,01796	,00835	,00446	,00264	,00114			
1,5	,12801	,12754	,12237	,11549	,10657	,09608	,08491	,06833	,04539	,01983	,00970	,00532	,00320	,00140	,00073	,00043	,00027
2	,08944	,09080	,08668	,08273	,07814	,07187	,06566	,05589	,04103	,02098	,01117	,00643	,00398	,00179	,00095	,00056	,00036
2,5	,06403	,06565	,06284	,06068	,05777	,05525	,05069	,04486	,03532	,02045	,01183	,00717	,00457	,00213	,00115	,00068	,00044
3	,04744	,04834	,04760	,04548	,04391	,04195	,03963	,03606	,02983	,01904	,01187	,00755	,00497	,00242	,00133	,00080	,00052
4	,02854	,02928	,02996	,02798	,02724	,02661	,02568	,02408	,02110	,01552	,01087	,00757	,00533	,00280	,00160	,00100	,00065
5	,01886	,01950				,01816			,01535	,01230	,00939	,00700	,00523	,00299	,00180	,00114	,00077
6	,01333					,01351			,01149	,00976	,00788	,00625	,00488	,00301	,00190	,00124	,00086
7	,00990					,00966			,00899	,00787	,00662	,00542	,00445	,00292	,00192	,00130	,00092
8	,00763					,00759			,00727	,00641	,00554	,00477	,00402	,00275	,00192	,00131	,00096
9	,00607					,00746			,00601	,00533	,00470	,00415	,00358	,00260	,00187	,00133	,00099
10									,00542	,00506	,00450	,00398	,00364	,00319	,00239		



**Πίνακας 1.2ε. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)**

		Συνάρτηση E															
Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	,5	,5	,5	,5	,5	,5	,34722	,22222	,12500	,05556	,03125	,02000	,01389	,00781	,00500	,00347	,00255
0,1	,45025	,44949	,44698	,44173	,43008	,39198	,30445	,20399	,11806	,05362	,03045	,01959					
0,2	,40194	,40043	,39591	,38660	,36798	,32802	,26598	,18633	,11121	,05170	,02965	,01919	,01342	,00762			
0,3	,35633	,35428	,33809	,33674	,31578	,28003	,23311	,16967	,10450	,04979	,02886						
0,4	,31431	,31214	,30541	,29298	,27243	,24200	,20526	,15428	,09801								
0,5	,27639	,27407	,26732	,25511	,23639	,21119	,18168	,14028	,09180	,04608	,02727	,01800	,01272	,00734	,00475	,00332	,00246
0,6	,24275	,24247	,23411	,22289	,20634	,18520	,16155	,12759									
0,7	,21327	,21112	,20535	,19525	,18093	,16356	,14421	,11620	,08027								
0,8	,18765	,18550	,18049	,17190	,15977	,14523	,12928	,10602									
0,9	,16552	,16337	,15921	,15179	,14168	,12954	,11634	,09686									
1	,14645	,14483	,14610	,13472	,12618	,11611	,10510	,08865	,06552	,03736	,02352	,01602	,01157	,00683	,00450	,00318	,00237
1,2	,11589	,11435	,11201	,10741	,10140	,09431	,08657	,07476	,05728	,03425	,02208	,01527	,01113	,00664			
1,5	,08398	,08356	,08159	,07885	,07517	,07088	,06611	,05871	,04703	,03003	,02008	,01419	,01049	,00636	,00425	,00304	,00228
2	,05279	,05105	,05146	,05034	,04850	,04675	,04442	,04078	,03454	,02410	,01706	,01248	,00943	,00590	,00401	,00290	,00219
2,5	,03576	,03426	,03489	,03435	,03360	,03211	,03150	,02953	,02599	,01945	,01447	,01096	,00850	,00546	,00378	,00276	,00210
3	,02566	,02519	,02470	,02491	,02444	,02389	,02330	,02216	,02007	,01585	,01230	,00962	,00763	,00505	,00355	,00263	,00201
4	,01493	,01452	,01495	,01526	,01446	,01418	,01395	,01356	,01281	,01084	,00900	,00742	,00612	,00431	,00313	,00237	,00185
5	,00971	,00927				,00929			,00873	,00774	,00673	,00579	,00495	,00364	,00275	,00213	,00168
6	,00680					,00632			,00629	,00574	,00517	,00457	,00404	,00309	,00241	,00192	,00154
7	,00503					,00493			,00466	,00438	,00404	,00370	,00330	,00264	,00213	,00172	,00140
8	,00386					,00377			,00354	,00344	,00325	,00297	,00273	,00228	,00185	,00155	,00127
9	,00306					,00227			,00275	,00273	,00264	,00246	,00229	,00194	,00163	,00139	,00116
10									,00210	,00220	,00225	,00221	,00203	,00200	,00171		

**Πίνακας 1.2φ. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)**

		Συνάρτηση $F$																
Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																	
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	
0	,5	,5	,5	,5	,5	0	-,34722	-,22222	-,12500	-,05556	-,03125	-,02000	-,01389	-,00781	-,00500	-,00347	-,00255	
0,1	,45025	,44794	,43981	,41954	,35789	,03817	-,20800	-,17612	-,10950	-,05151	-,02961	-,01917						
0,2	,40194	,39781	,38294	,34823	,26215	,05466	-,11165	-,13381	-,09441	-,04750	-,02798	-,01835	-,01295	-,00742				
0,3	,35633	,35094	,34508	,29016	,20503	,06372	-,05346	-,09768	-,08010	-,04356	-,02636							
0,4	,31431	,30801	,28681	,24469	,17086	,06848	-,01818	-,06835	-,06684									
0,5	,27639	,26997	,24890	,20937	,14752	,07037	,00388	-,04529	-,05479	-,03595	-,02320	-,01590	-,01154	-,00681	-,00450	-,00318	-,00237	
0,6	,24275	,23444	,21667	,18138	,13042	,07068	,01797	-,02749										
0,7	,21327	,20762	,18956	,15903	,11740	,06963	,02704	-,01392	-,03469									
0,8	,18765	,18287	,16679	,14053	,10604	,06774	,03277	-,00365										
0,9	,16552	,16158	,14747	,12528	,09664	,06533	,03619	,00408										
1	,14645	,14280	,12395	,11225	,08850	,06256	,03819	,00984	-,01367	-,01994	-,01591	-,01209	-,00931	-,00587	-,00400	-,00289	-,00219	
1,2	,11589	,11360	,10460	,09449	,07486	,05670	,03913	,01716	-,00452	-,01491	-,01337	-,01068	-,00844	-,00550				
1,5	,08398	,08196	,07719	,06918	,05919	,04804	,03686	,02177	,00413	-,00879	-,00995	-,00870	-,00723	-,00495	-,00353	-,00261	-,00201	
2	,05279	,05348	,04994	,04614	,04162	,03593	,03029	,02197	,01043	-,00189	-,00546	-,00589	-,00544	-,00410	-,00307	-,00233	-,00183	
2,5	,03576	,03673	,03459	,03263	,03014	,02762	,02406	,01927	,01188	,00198	-,00226	-,00364	-,00386	-,00332	-,00263	-,00208	-,00166	
3	,02566	,02586	,02255	,02395	,02263	,02097	,01911	,01623	,01144	,00396	-,00010	-,00192	-,00258	-,00263	-,00223	-,00183	-,00150	
4	,01493	,01536	,01412	,01259	,01386	,01331	,01256	,01134	,00912	,00508	,00209	,00026	-,00076	-,00148	-,00153	-,00137	-,00120	
5	,00971	,01011				,00905			,00700	,00475	,00277	,00129	,00031	-,00066	-,00096	-,00099	-,00093	
6	,00680					,00675			,00538	,00409	,00278	,00170	,00088	-,00010	-,00053	-,00066	-,00070	
7	,00503					,00483			,00428	,00346	,00258	,00178	,00114	,00027	-,00020	-,00041	-,00049	
8	,00386					,00380			,00350	,00291	,00229	,00174	,00125	,00048	,00003	-,00020	-,00033	
9	,00306					,00374			,00291	,00247	,00203	,00163	,00124	,00062	,00020	-,00005	-,00019	
10									,00267	,00246	,00213	,00176	,00149	,00126	,00070			

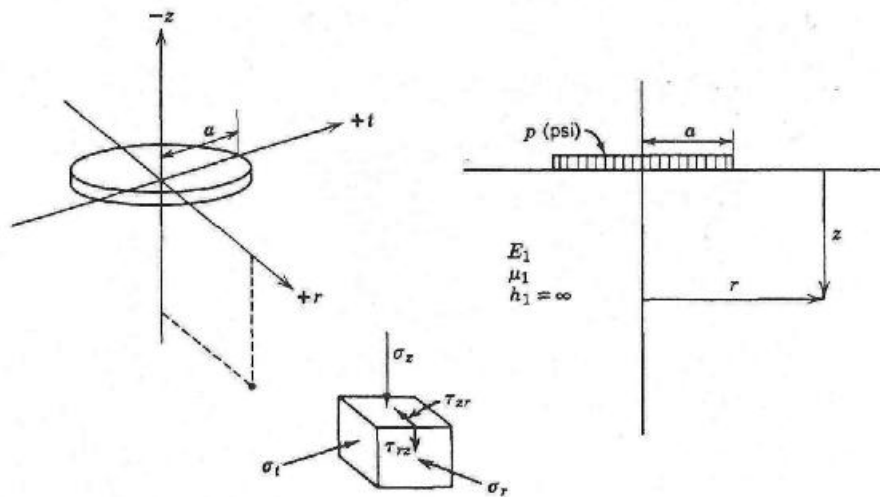
Πίνακας 1.2g. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)

		Συνάρτηση G																
Βάθος (z) σε ακτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																	
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14	
0	0	0	0	0	0	,31831	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,1	0	,00315	,00802	,01951	,06682	,31405	,05555	,00865	,00159	,00023	,00007	,00003						
0,2	0	,01163	,02877	,06441	,16214	,30474	,13592	,03060	,00614	,00091	,00026	,00010	,00005	,00002				
0,3	0	,02301	,05475	,11072	,21465	,29228	,18216	,05747	,01302	,00201	,00059							
0,4	0	,03460	,07883	,14477	,23442	,27779	,20195	,08233	,02138									
0,5	0	,04429	,09618	,16426	,23652	,26216	,20731	,10185	,03033	,00528	,00158	,00063	,00030	,00009	,00004	,00002	,00001	
0,6	0	,04966	,10729	,17192	,22949	,24574	,20496	,11541										
0,7	0	,05484	,11256	,17126	,21772	,22924	,19840	,12373	,04718									
0,8	0	,05590	,11225	,16534	,20381	,21295	,18953	,12855										
0,9	0	,05496	,10856	,15628	,18904	,19712	,17945	,28881										
1	0	,05266	,10274	,14566	,17419	,18198	,16884	,12745	,06434	,01646	,00555	,00233	,00113	,00036	,00015	,00007	,00004	
1,2	0	,04585	,08831	,12323	,14615	,15408	,14755	,12038	,06967	,02077	,00743	,00320	,00159	,00051				
1,5	0	,03483	,06688	,09293	,11071	,11904	,11830	,10477	,07075	,02599	,01021	,00460	,00233	,00078	,00033	,00016	,00009	
2	0	,02102	,04069	,05721	,06948	,07738	,08067	,07804	,06275	,03062	,01409	,00692	,00369	,00129	,00055	,00027	,00015	
2,5	0	,01293	,02534	,03611	,04484	,05119	,05509	,05668	,05117	,03099	,01650	,00886	,00499	,00185	,00082	,00041	,00023	
3	0	,00840	,01638	,02376	,02994	,03485	,03843	,04124	,04039	,02886	,01745	,01022	,00610	,00241	,00110	,00057	,00032	
4	0	,00382	,00772	,01149	,01480	,01764	,02004	,02271	,02475	,02215	,01639	,01118	,00745	,00340	,00167	,00090	,00052	
5	0	,00214				,00992		,01343	,01551	,01601	,01364	,01105	,00782	,00404	,00216	,00122	,00073	
6	0					,00602		,00845	,01014	,01148	,01082	,00917	,00733	,00432	,00243	,00150	,00092	
7	0					,00396			,00687	,00830	,00842	,00770	,00656	,00432	,00272	,00171	,00110	
8	0					,00270			,00481	,00612	,00656	,00631	,00568	,00413	,00278	,00185	,00124	
9	0					,00177			,00347	,00459	,00513	,00515	,00485	,00381	,00274	,00192	,00133	
10	0								,00199	,00258	,00351	,00407	,00420	,00411	,00346			

Πίνακας 1.2h. Τιμές Ελαστικών Συναρτήσεων μιας Στρώσης (κατά Ahlvin και Ulery)

Συνάρτηση *H*

Βάθος (z) σε ικτίνες	Απόσταση (r) σε ακτίνες																
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	14
0	2,0	,97987	,91751	,80575	,62553	,27319	,93676	,71185	,51671	,33815	,25200	,20045	,16626	,12576	,09918	,08346	,07023
0,1	,80998	,79018	,72886	,61961	,44711	,18107	,92670	,70888	,51627	,33794	,25184	,20081					
0,2	,63961	,62068	,56242	,46001	,30614	,09996	,90098	,70074	,51382	,33726	,25162	,20072	,16688	,12512			
0,3	,48806	,47044	,40979	,32442	,19210	,02740	,86726	,68823	,50966	,33638	,25124						
0,4	,35407	,33802	,28963	,20822	,09555	,96202	,83042	,67238	,50412								
0,5	,23607	,22176	,17894	,10830	,01312	,90298	,79308	,65429	,49728	,33293	,24996	,19982	,16668	,12493	,09996	,08295	,07123
0,6	,13238	,11998	,08350	,02154	,94120	,84917	,75653	,63469									
0,7	,04131	,03037	,99794	,91049	,87742	,80030	,72143	,61442	,48061								
0,8	,96125	,95175	,92386	,87928	,82136	,75571	,68809	,59398									
0,9	,89072	,88251	,85856	,82616	,77950	,71495	,65677	,57361									
1	,82843	,85005	,80465	,76809	,72587	,67769	,62701	,55364	,45122	,31877	,24386	,19673	,16516	,12394	,09952	,08292	,07104
1,2	,72410	,71882	,70370	,67937	,64814	,61187	,57329	,51552	,43013	,31162	,24070	,19520	,16369	,12350			
1,5	,60555	,60233	,57246	,57633	,55559	,53138	,50496	,46379	,39872	,29945	,23495	,19053	,16199	,12281	,09876	,08270	,07064
2	,47214	,47022	,44512	,45656	,44502	,43202	,41702	,39242	,35054	,27740	,22418	,18618	,15846	,12124	,09792	,08196	,07026
2,5	,38518	,38403	,38098	,37608	,36940	,36155	,35243	,33698	,30913	,25550	,21208	,17898	,15395	,11928	,09700	,08115	,06980
3	,32457	,32403	,32184	,31887	,31464	,30969	,30381	,29364	,27453	,23487	,19977	,17154	,14919	,11694	,09558	,08061	,06897
4	,24620	,24588	,24820	,25128	,24168	,23932	,23668	,23164	,22188	,19908	,17640	,15596	,13864	,11172	,09300	,07864	,06848
5	,19805	,19785				,19455			,18450	,17080	,15575	,14130	,12785	,10585	,08915	,07675	,06695
6	,16554					,16326			,15750	,14868	,13842	,12792	,11778	,09990	,08562	,07452	,06522
7	,14217					,14077			,13699	,13097	,12404	,11620	,10843	,09387	,08197	,07210	,06377
8	,12448					,12352			,12112	,11680	,11176	,10600	,09976	,08848	,07800	,06928	,06200
9	,11079					,10989			,10854	,10548	,10161	,09702	,09234	,08298	,07407	,06678	,05976
10									,09900	,09820	,09510	,09290	,08980	,08300	,07710		



**Σχήμα 1.3. Διάγραμμα τάσεων μιας στρώσης**

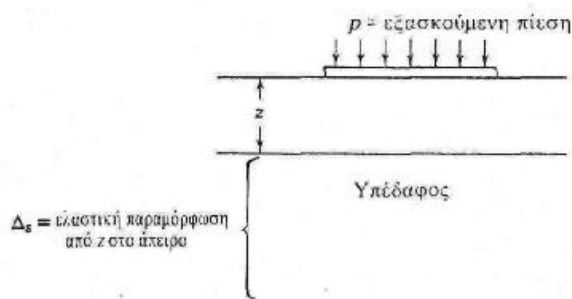
Συνήθως, όταν γίνονται μελέτες βέλους κάμψης για τα οδοστρώματα αυτού του τύπου, γίνεται η παραδοχή ότι το τμήμα του οδοστρώματος (πάνω από το υπέδαφος) δεν συνεισφέρει καμία συνιστώσα του βέλους κάμψης στο ολικό βέλος κάμψης της επιφάνειας. Έτσι το μεγαλύτερο βέλος κάμψης εμφανίζεται στο υπέδαφος από  $z$  μέχρι το άπειρο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.4. Άρα, όταν εφαρμόζεται η θεωρία της μιας στρώσης στην ανάλυση του εύκαμπτου οδοστρώματος, είναι:

$$\Delta_T = \Delta_p + \Delta_s = \Delta_s \quad 1.7$$

όπου  $\Delta_T$  = ολικό βέλος κάμψης στην επιφάνεια

$\Delta_p$  = βέλος κάμψης μέσα στο οδόστρωμα = 0

$\Delta_s$  = βέλος κάμψης μέσα στο υπέδαφος



**Σχήμα 1.4. Διάγραμμα με τις παραδοχές της ολοκλήρωσης**

**Αριθμητικό παράδειγμα 1.1.** Για το εύκαμπτο οδόστρωμα με τα δεδομένα του Σχήματος 1.5. υπολογίστε τις ακόλουθες τιμές χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις μιας στρώσης του Πίνακα 1.1.

- Δ στο σημείο m
- $\sigma_z$  και  $\epsilon_r$  στο σημείο 0
- $\sigma_{1,2,3}$  και  $T_{\max}$  στο σημείο p

Εφόσον ζητάμε το βέλος κάμψης της επιφάνειας, για τις προϋποθέσεις της μιας στρώσης, είναι  $\Delta_m = \Delta_n$  ( $\Delta_P = 0$ ).

Για  $p = 80 \text{ psi}$ ,  $E_1 = 6.000 \text{ psi}$ ,  $\mu_1 = 0,40$ ,  $a = 6 \text{ ίντσες}$ ,  $z = 12 \text{ ίντσες}$

Από τον Πίνακα 1.1

$$\frac{z}{a} = \frac{12}{6} = 2 \quad \frac{r}{a} = \frac{0}{6} = 0$$

Από τον Πίνακα 1.2

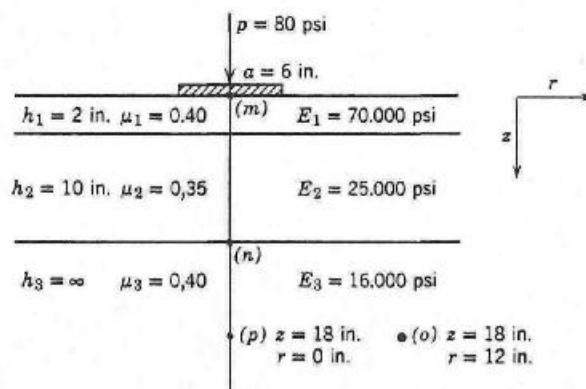
$$A = ,10557 \quad H = ,47214$$

$$\Delta = \frac{80(1 + 0,4)6}{16.000} \left[ \frac{12}{6} (,10557) + (1 - 0,4)(,47214) \right] = 0,021$$

(Πρέπει να σημειωθεί ότι το  $E_1$  που χρησιμοποιείται στις αντίστοιχες εξισώσεις του Πίνακα 1.1 αναφέρεται στο μέτρο του υπεδάφους E}).

$$z = 18 \text{ ίντσες} \quad \frac{z}{a} = 3$$

$$r = 12 \text{ ίντσες} \quad \frac{r}{a} = 2$$



**Σχήμα 1.5. Ιδιότητες του εύκαμπτου οδοστρώματος του παραδείγματος**

Από τον Πίνακα 1.1

$$\sigma_z = p[A + B]$$

$$\epsilon_r = \frac{p(1 + \mu)}{E_1} [(1 - 2\mu)F + C]$$

Από τον Πίνακα 1.2

$$A = ,03150 \quad C = -,00528$$

$$B = ,03511 \quad F = ,01144$$

$$\sigma_z = 80[,03150 + ,03511] = 5,3 \text{ psi}$$

$$\epsilon_r = \frac{80(1 + 0,4)}{15.000} [(0,2)(,01144) - ,00528]$$

$$= -20,9 \times 10^{-6} \text{ ίντσες ανά ίντσα ή } 20,9 \text{ μικροϊντσες ανά ίντσα}$$

$$z = 18 \text{ ίντσες} \quad \frac{z}{a} = 3$$

$$r = 0 \quad \frac{r}{a} = 0$$

Λόγω συμμετρίας γύρω από τον άξονα της πλάκας, είναι  $\sigma_t = \sigma_r$ . Επίσης, εφόσον  $T_{Tz} = 0$ ,  $\sigma_t = \sigma_r$  είναι κύριες τάσεις. Επομένως, η  $\sigma_z$  είναι η τρίτη κύρια τάση.

Από τον Πίνακα 1.1

$$\sigma_t = \sigma_r = p[2\mu A - D + (1 - 2\mu)E]$$

$$\sigma_z = p[A + B]$$

$$\tau_{rz} = pG$$

$$\sigma_{1,2,3} = \frac{(\sigma_z + \sigma_r) \pm \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (2\tau_{rz})^2}}{2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Από τον Πίνακα 1.2

$$A = ,05132 \quad D = ,04744 \quad G = 0$$

$$B = ,09487 \quad E = ,02566$$

$$\sigma_t = \sigma_r = 80[(2)(0,4)(,05132) - ,04744 + (1 - 0,8)(,02566)]$$

$$= -0,1 \text{ psi}$$

$$\sigma_z = 80[,05132 + ,09487] = 11,7 \text{ psi}$$

$$\tau_{rz} = 80(0) = 0$$

$$\sigma_{1,3} = \frac{(\sigma_z + \sigma_r) \pm \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2}}{2}$$

$$\therefore \sigma_1 = \sigma_z = 11,7 \text{ psi} \quad \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_t = -0,1 \text{ psi}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{11,7 - (-0,1)}{2} = 5,9 \text{ psi}$$

### 1.2.2. Συστήματα δύο στρώσεων

Τα συνηθισμένα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από στρώσεις ώστε τα μέτρα ελαστικότητας να ελαττώνονται με το βάθος. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των τάσεων και των υποχωρήσεων στο υπέδαφος σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν σε ιδεατό ομοιογενές μέσο.

Λύσεις του προβλήματος με συνθήκες που προσεγγίζουν τις πραγματικές έχουν επιτευχθεί από τον Burmister. Κατά τη λύση του προβλήματος δύο στρώσεων γίνονται ορισμένες αναγκαίες παραδοχές σχετικά με τις οριακές συνθήκες και τις συνθήκες συνέχειας. Τα υλικά των στρώσεων υποτίθεται ότι είναι ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά. Η επιφανειακή στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο, ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο. Η υποκείμενη στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο πλευρικά και κατακόρυφα.

Οι οριακές συνθήκες και συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση να μην υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός περιοχής φόρτισης.

Οι τιμές τάσης και βέλους κάμψης όπως δίνονται από τον Burmister εξαρτώνται από το λόγο αντοχής των στρώσεων,  $E_1/E_2$ , όπου  $E_1$  και  $E_2$  είναι τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων ενίσχυσης και υπεδάφους αντίστοιχα. Το σχήμα 1.6 δείχνει τις τιμές της κατακόρυφης τάσης κάτω από το κέντρο μιας κυκλικής πλάκας για το σύστημα δύο στρώσεων.

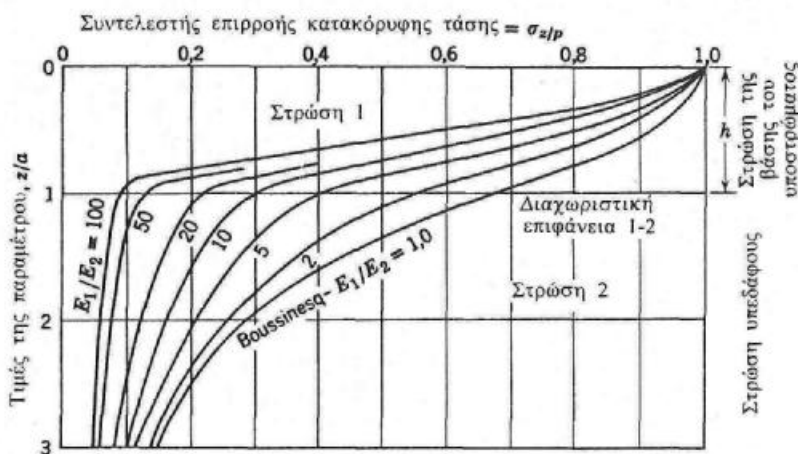
Το αποτέλεσμα επίδρασης των δύσκαμπτων ενισχυτικών στρώσεων είναι έντονο. Οι δοκιμές έχουν δείξει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τάσεις που υπολογίζονται με τις εξισώσεις του Boussinesq είναι μεγαλύτερες από τις τιμές μέτρησης τους. Το ίδιο ισχύει και για τα βέλη κάμψης. Στο σχήμα 1.6 οι κατακόρυφες τάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια βάσης-υπεδάφους ( $E_1/E_2=1$ ) υπολογισμένες με τις εξισώσεις Boussinesq είναι περίπου το 70% της εφαρμοσμένης πίεσης, ενώ σύμφωνα



με τη θεωρία των δύο στρώσεων σε μία βάση με ένα μέτρο ελαστικότητας 100 φορές μεγαλύτερο από του υπεδάφους, οι τάσεις είναι περίπου το 10% της εφαρμοσμένης πίεσης.

Ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας είναι οι κλίσεις που δίνει η θεωρία των δύο στρώσεων σε αντίθεση με τις εξισώσεις Boussinesq. Αν και σε μεγάλα βάθη οι δύο αναλύσεις προσεγγίζουν ένα κοινό επίπεδο ( $z/a = 3$ ), οι διαφορές είναι τεράστιες κοντά στην επιφάνεια επαφής βάσης-υπεδάφους.

Οι παράγοντες αυτοί είναι πολύ σημαντικοί όταν σχεδιάζονται οι στρώσεις βάσης και υπόβασης για εύκαμπτα οδοστρώματα. Η ποιότητα της βάσης, όπως και το πάχος της, καθορίζουν κατά ένα μέρος αντίσταση στην παραμόρφωση.



**Σχήμα 1.6. Βασικός τρόπος διαμόρφωσης των καμπυλών επιρροής δυο στρώσεων Burmister (Από Burmister, Δελτίο No 177, του Συμβουλίου Έρευνας Οδών).**

Τα ολικά βέλη κάμψης,  $\Delta_r$ , για συστήματα δύο στρώσεων υπολογίζονται από τις εξισώσεις 1.8 και 1.9

$$\text{Εύκαμπτη πλάκα} \quad \Delta = 1,5 \frac{pa}{E_2} F_2 \quad 2.8.$$

$$\text{Δύσκαμπτη πλάκα} \quad \Delta = 1,18 \frac{pa}{E_2} F_2 \quad 2.9$$

όπου  $p$  = μοναδιαίο φορτίο κυκλικής πλάκας

$a$  = ακτίνα της πλάκας

$E_2$  = μέτρο ελαστικότητας της κατώτερης στρώσης

$F_2$  =αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας του υπεδάφους και του οδοστρώματος, καθώς και από το λόγο του βάθους προς την ακτίνα

Οι καμπύλες του  $F_2$  για διάφορους λόγους βάθους και μέτρα ελαστικότητας παριστάνονται στο σχήμα 1.7.

**Αριθμητικό παράδειγμα 1.2.** Να υπολογιστεί η υποχώρηση επιφάνειας κάτω από το κέντρο ενός ελαστικού ( $a = 6$  ίντσες  $p = 80$  psi) για ένα οδόστρωμα πάχους 12 ιντσών, μέτρου ελαστικότητας οδοστρώματος και υπεδάφους 50.000 psi και 10.000 psi αντίστοιχα με βάση τη θεωρία δύο στρώσεων.

**Λύση**

Για  $z = 12$  ίντσες,  $a = 6$  ίντσες  $p = 80$  psi  $E_1 = 50.000$  psi  $E_2 = 10.000$  psi

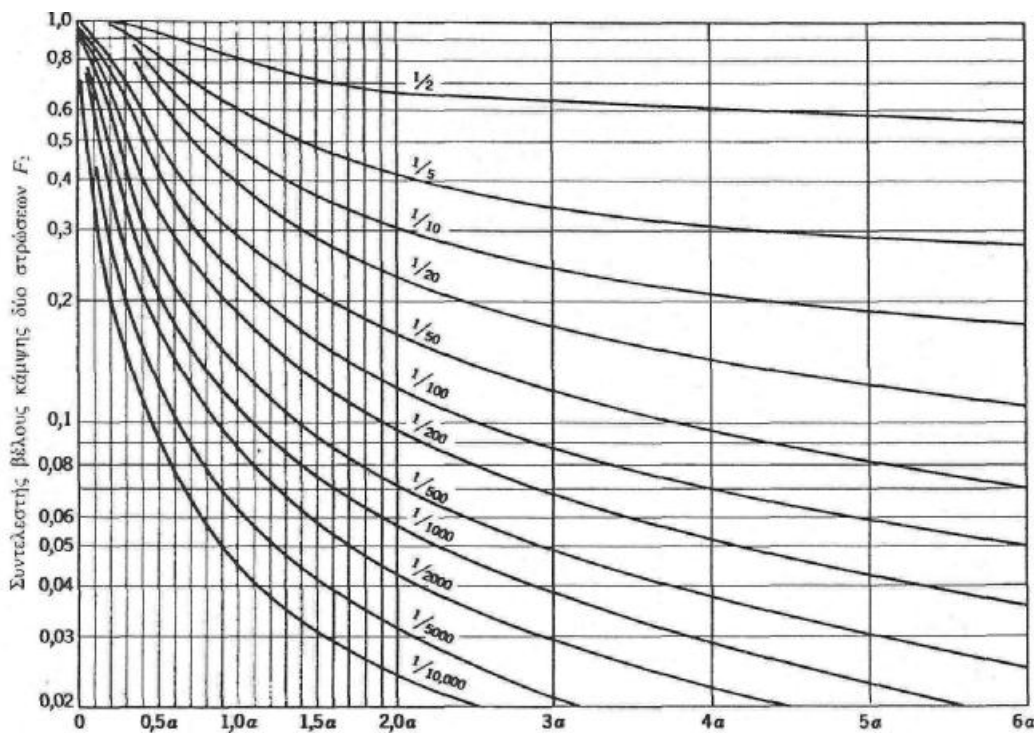
Από την εξίσωση 1.8

$$\Delta_T = 1,5 \cdot \frac{pa}{E_2} \cdot F_2$$

Για  $z/a = 12/6 = 2$  και  $E_2/E_1 = 10.000/50.000 = 1/5$  από το σχήμα 1.7 psi

$$F_2 = 0,42$$

$$\Delta_T = 1,5 \frac{(80)(6)}{10.000} (0,42) = ,030 \text{ ίντσες}$$



**Σχήμα 1.7 Τιμές επιρροής-θεωρία δύο στρώσεων (κατά Burmister, Συμβούλιο Έρευνας Οδών)**

Ο Huang έχει καταστρώσει διαγράμματα για τον προσδιορισμό των βελών κάμψης  $\Delta_s$  της διαχωριστικής επιφάνειας με βάση μία επέκταση της θεωρίας των δύο στρώσεων του Burmister. Οι τιμές του  $F$  παρέχονται στο σχήμα 1.8. Κάθε διάγραμμα είναι για ένα ορισμένο λόγο μέτρων ελαστικότητας. Οι τιμές του  $F$  είναι συναρτήσεις του βάθους (πάχους οδοστρώματος) και των οριζοντίων αποστάσεων εκφρασμένων σε ακτίνες. Όπως και στην ανάλυση του βέλους κάμψης επιφάνειας των δύο στρώσεων, κατά Burmister, τα διαγράμματα προϋποθέτουν λόγο του Poisson για κάθε στρώση 0,5. Το βέλος κάμψης της διαχωριστικής επιφάνειας,  $\Delta_s$ , υπολογίζεται από την εξίσωση 1.10.

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.3.** Να υπολογιστεί το βέλος κάμψης  $\Delta_s$  της διαχωριστικής επιφάνειας και το βέλος κάμψης μέσα στη στρώση του οδοστρώματος  $\Delta_p$  με τα δεδομένα του παραδείγματος 2.2.

**Λύση**

$$\frac{E_1}{E_2} = 5 \quad E_2 = 10,000 \text{ psi} \quad r = 0 \quad z = 12 \text{ in.}$$

$$p = 80 \text{ psi} \quad a = 6 \text{ in.}$$

Για  $E_1/E_2=5$ ,  $r/a=0$ , και  $z/a=12/6$  από το σχήμα 1.8,  $F=0,48$

$$\therefore \Delta_s = \frac{pa}{E_2} \cdot F = \frac{80(6)}{10,000} (0,48) = ,023 \text{ ίντσες}$$

Εφόσον  $\Delta_T = \Delta_p + \Delta_s$  όπου  $\Delta_T = ,030$  ίντσες (παράδειγμα 1.2.)

$$\Delta_p = \Delta_T - \Delta_s = ,007 \text{ ίντσες}$$

### 1.2.3. Σύστημα τριών στρώσεων

Αν και η εργασία του Burmister κατέληξε σε αναλυτικές εκφράσεις τάσεων και μετατοπίσεων σε ελαστικά συστήματα δύο και τριών στρώσεων ο Fox και οι Acum και Fox κατέστρωσαν τους πρώτους εκτεταμένους πίνακες ορθών και ακτινικών τάσεων σε συστήματα τριών στρώσεων στην τομή του άξονα της πλάκας με τις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων. Ο Jones και ο Reattie επέκτειναν αργότερα τις λύσεις αυτές για πολύ περισσότερες τιμές παραμέτρων.

Το αντιπροσωπευτικό οδόστρωμα τριών στρώσεων και οι τάσεις που υπολογίζονται με βάση τιμές συντελεστών που περιέχονται στο βιβλίο αυτό παριστάνονται στο σχήμα 1.9. Οι λύσεις των πέντε τάσεων είναι:

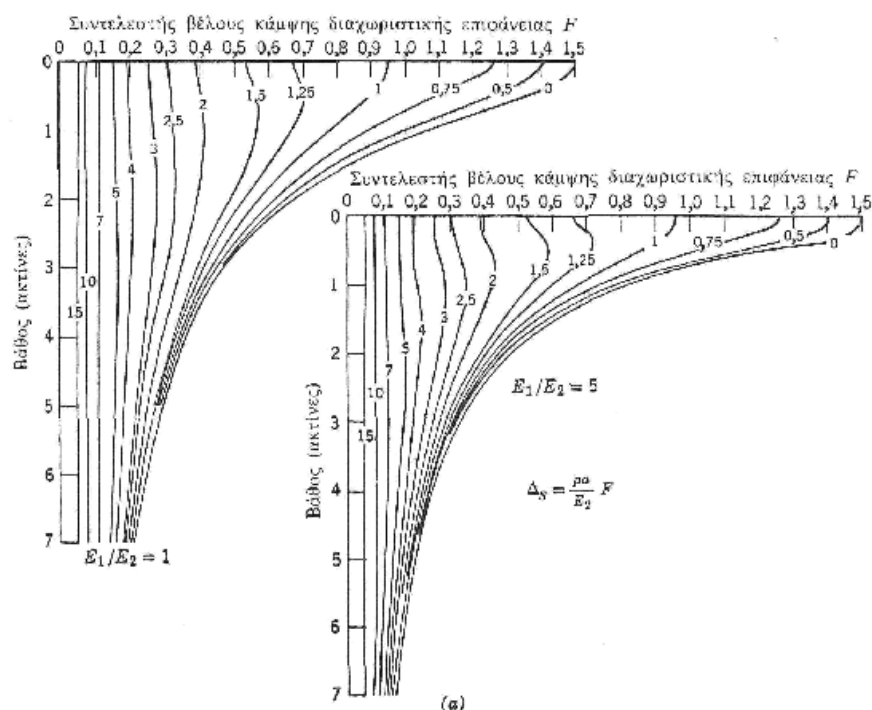
- $\sigma_{z1}$ : Κατακόρυφη τάση στη διαχωριστική επιφάνεια 1
- $\sigma_{z2}$ : Κατακόρυφη τάση στη διαχωριστική επιφάνεια 2
- $\sigma_{r1}$ : Οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης 1
- $\sigma_{r2}$ : Οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης 2
- $\sigma_{r3}$ : Οριζόντια τάση στην κορυφή της στρώσης 3

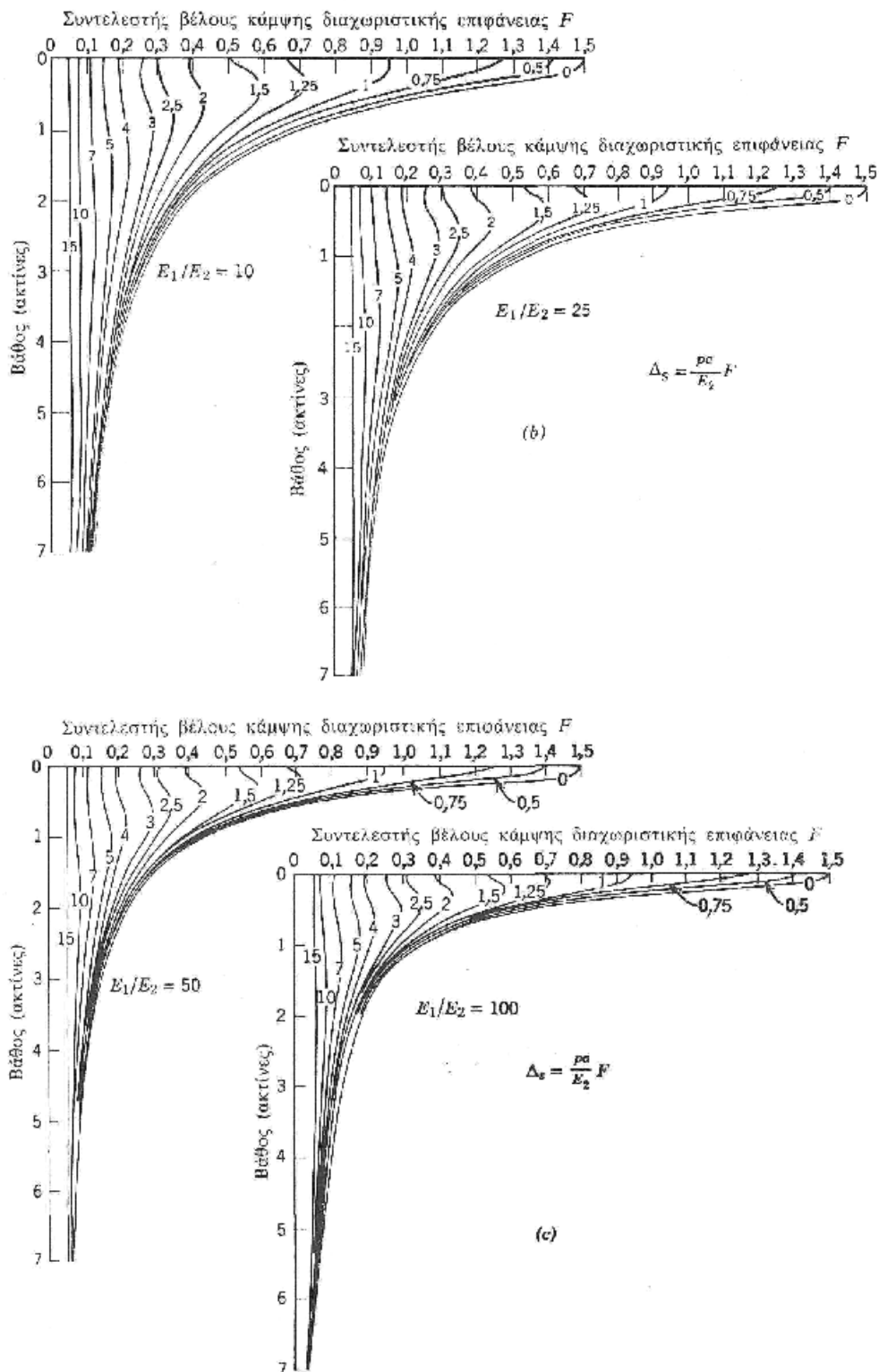
Λύσεις για τις κατακόρυφες τάσεις έχουν δοθεί από τον Peattie (30) και παριστάνονται γραφικά στο σχήμα 1.10. Οι λύσεις για τις οριζόντιες τάσεις έχουν δοθεί από τον Jones και περιέχονται στον Πίνακα 1.3. Οι τιμές των τάσεων είναι όλες κατά μήκος του άξονα συμμετρίας ενός συγκεντρωμένου φορτίου. Είναι λοιπόν  $\sigma_r = \sigma_t$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα και οι πίνακες έγιναν με  $\mu = 0,5$  για όλες τις στρώσεις. Το πρόσημο είναι θετικό σε θλίψη. Αν και η παρεμβολή είναι απαραίτητη σε πολλά προβλήματα για τον προσδιορισμό των παραγόντων τάσης, η επέκταση των καμπυλών δεν επιτρέπεται.

Οι ακόλουθες παράμετροι χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό και των κατακόρυφων τάσεων (γραφικές λύσεις) και των οριζοντίων τάσεων (πίνακες):

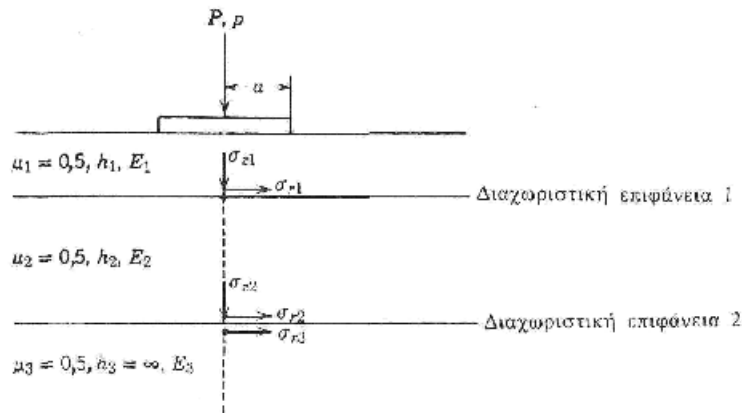
$$k_1 \text{ ή } K1 = \frac{E_1}{E_2} \quad k_2 \text{ ή } K2 = \frac{E_2}{E_3}$$

$$a_1 \text{ ή } A = \frac{a}{h_2} \quad H = \frac{h_1}{h_2}$$





**Σχήμα 1.8. Κατακόρυφο βέλος κάμψης στη διαχωριστική επιφάνεια ενός συστήματος δύο στρώσεων.** Οι τιμές του βέλους κάμψης δίνονται από την εξίσωση 1.10. Οι αριθμοί στις καμπύλες παριστάνουν οριζόντιες αποστάσεις εκφρασμένες σε ακτίνες. Οι καμπύλες είναι για διάφορους λόγους μέτρων ελαστικότητας: (α)  $E_1/E_2 = 1$  ή 5, (b)  $E_1/E_2 = 10$  ή 25, (c)  $E_1/E_2 = 50$  ή 100 (κατά Huang).



**Σχήμα 1.9. Σύστημα οδοστρώματος τριών στρώσεων με τη θέση των λύσεων των τάσεων που παρουσιάζονται στο κείμενο.**

Οι ακόλουθοι συνδυασμοί τιμών για τις παραμέτρους αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια:

$$k_1 (K1) = 0,2, 2,0, 20,0, 200,0$$

$$k_2 (K2) = 0,2, 2,0, 20,0, 200,0$$

$$a_1 (A) = 0,1, 0,2, 0,4, 0,8, 1,6, 3,2$$

$$H = 0,125, 0,25, 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 8,0$$

Οι κατακόρυφες τάσεις  $\sigma_{z1}$  και  $\sigma_{z2}$  προσδιορίζονται από τα διαγράμματα του σχήματος 1.10. Από τα διαγράμματα αυτά παρέχεται μία τιμή του συντελεστή τάσης (ZZ1 ή ZZ2) για τις τιμές K1, K2, A και H του συστήματος οδοστρώματος. Έτσι οι τάσεις είναι:

$$\sigma_{z1} = p(ZZ1) \quad 1.11$$

$$\sigma_{z2} = p(ZZ2) \quad 1.12$$

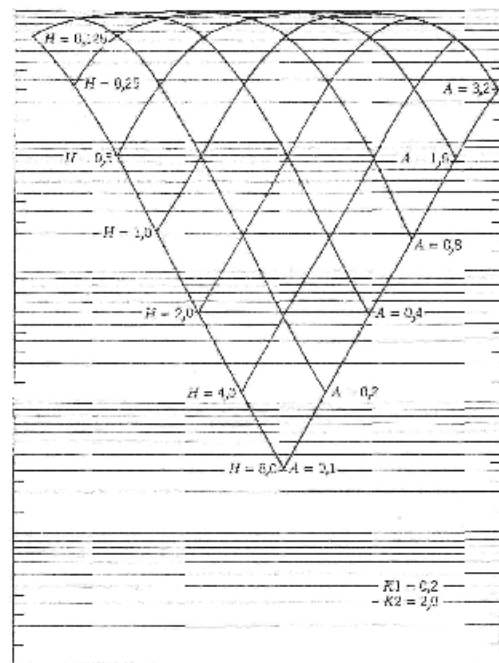
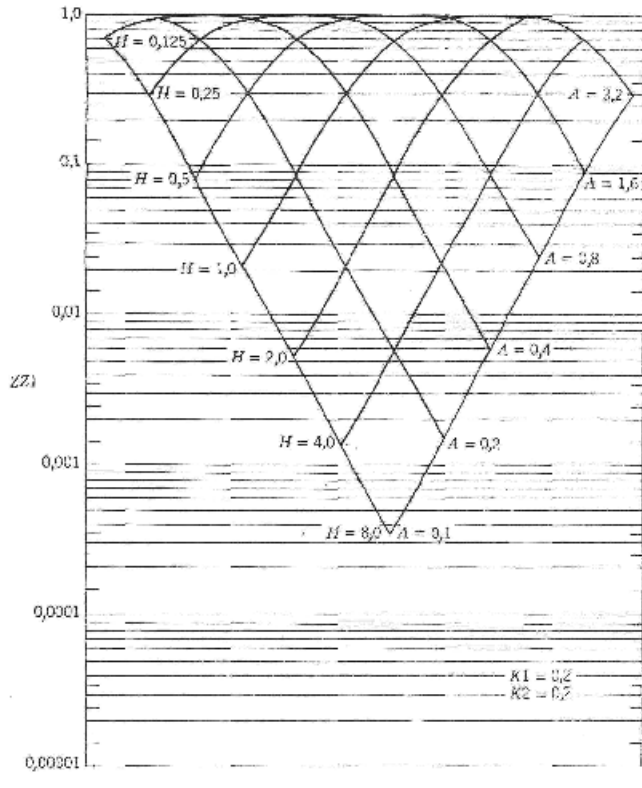
Οι οριζόντιες τάσεις  $\sigma_{r1}$ ,  $\sigma_{r2}$  και  $\sigma_{r3}$ , βασίζονται στους συντελεστές τάσης του Πίνακα 1.3. Για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $a_1$  και H παρουσιάζονται τρεις ομάδες συντελεστών τάσεων. Οι συντελεστές τάσης δίνονται με τη μορφή διαφοράς τάσης δηλαδή (ZZI—RR1), (ZZ2—RR2) και (ZZ2—RR3). Το γινόμενο της πίεσης της πλάκας επί το συντελεστή τάσης είναι η διαφορά τάσης.

Άρα για τον προσδιορισμό των τιμών της οριζόντιας τάσης, απαιτείται ο υπολογισμός των  $\sigma_{z1}$  και  $\sigma_{z2}$ .

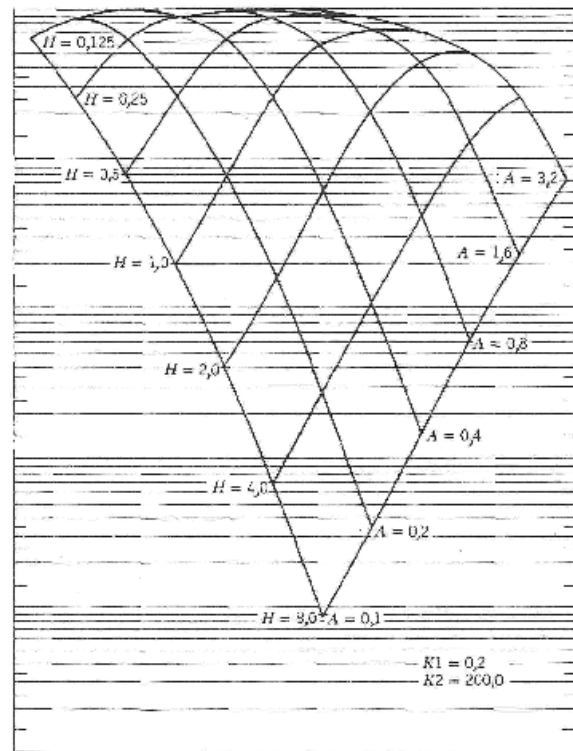
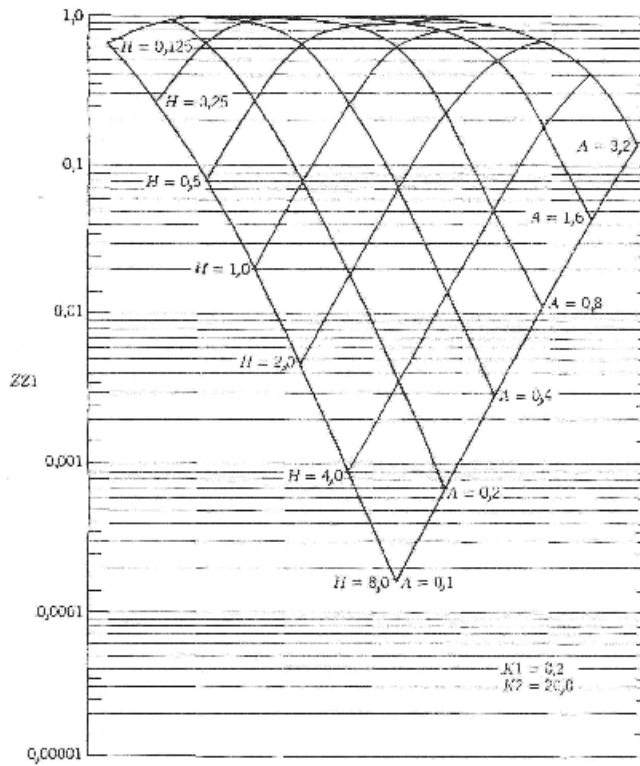
$$\sigma_{z1} - \sigma_{r1} = p[ZZ1 - RR1] \quad 1.13$$

$$\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = p[ZZ2 - RR2] \quad 1.14$$

$$\sigma_{z3} - \sigma_{r3} = p[ZZ3 - RR3] \quad 1.15$$



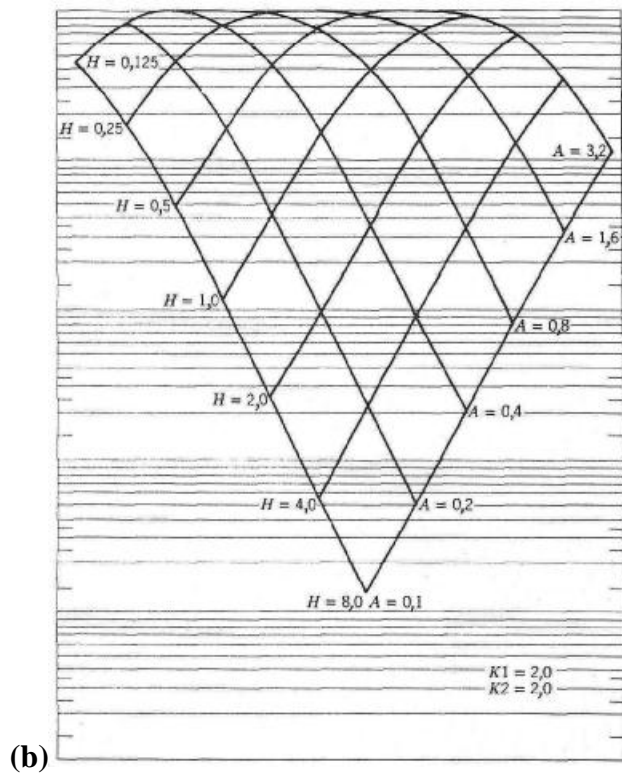
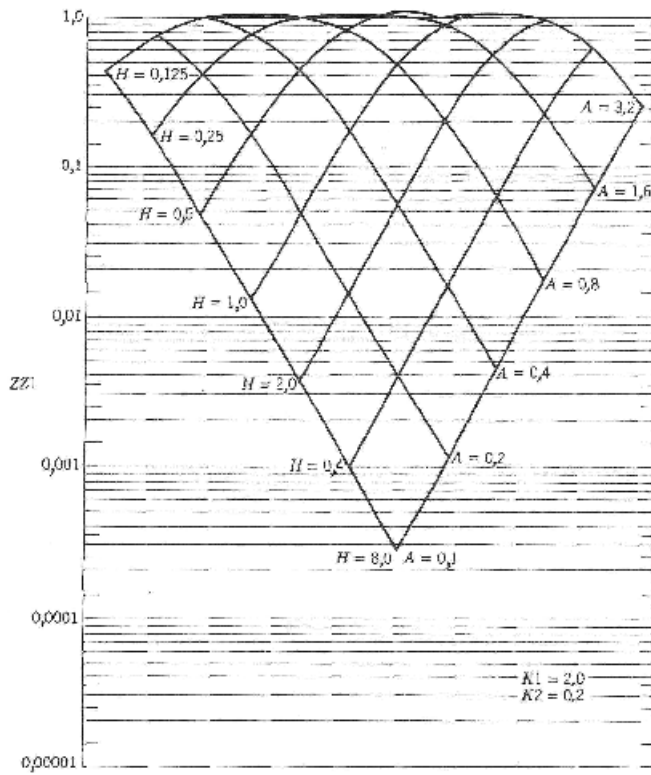
(a)

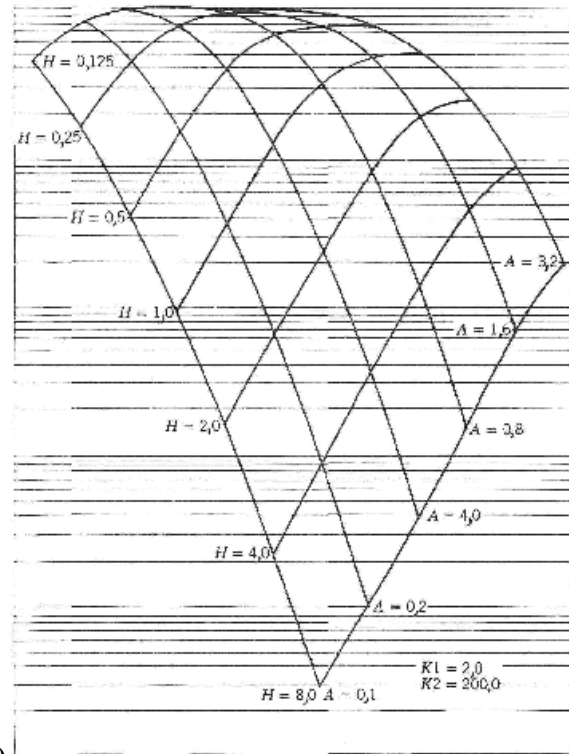
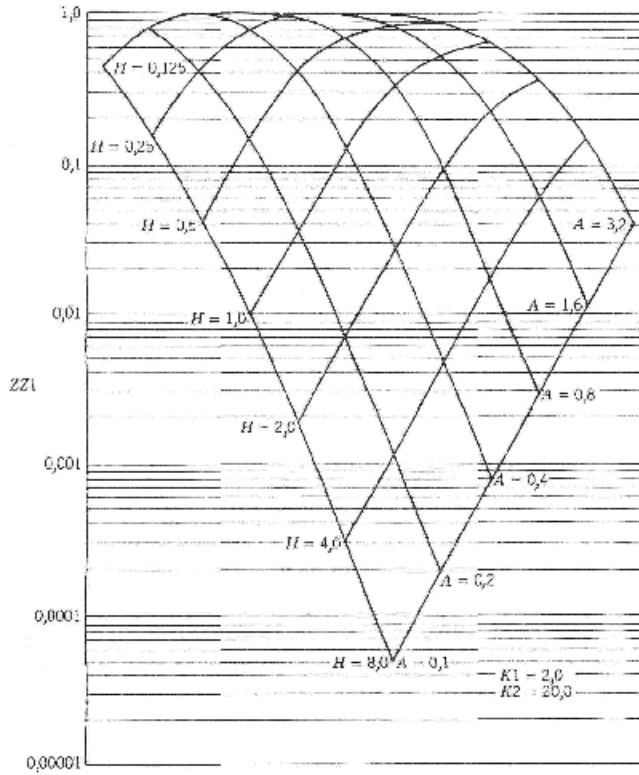


(α)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (α) κατακόρυφη τάση, ZZ1, K1=0,2, K2=0,2 έως 200,00**

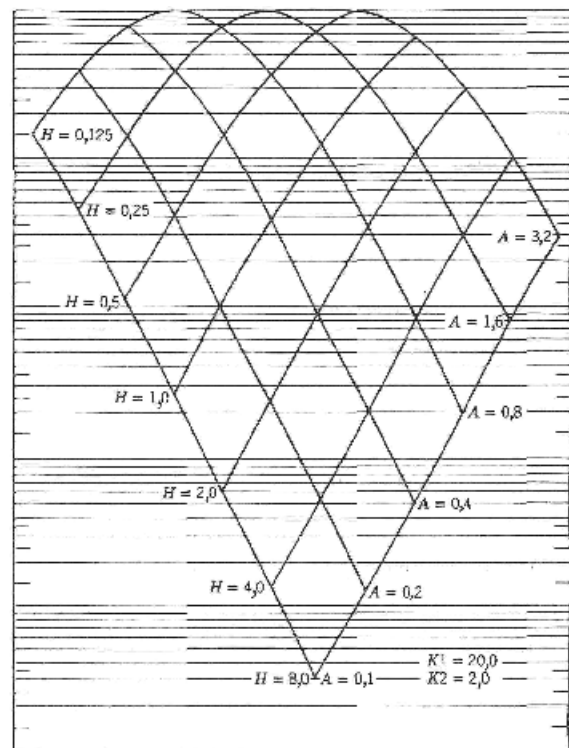
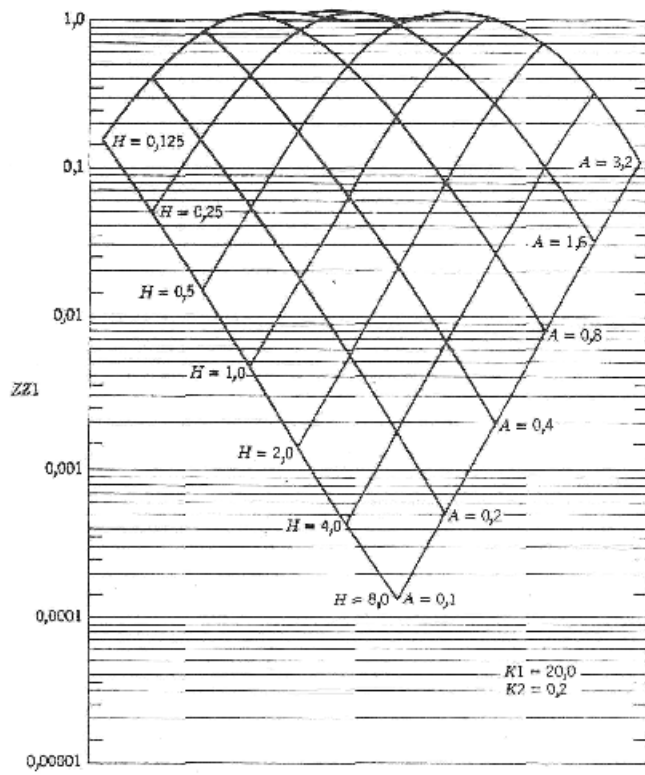




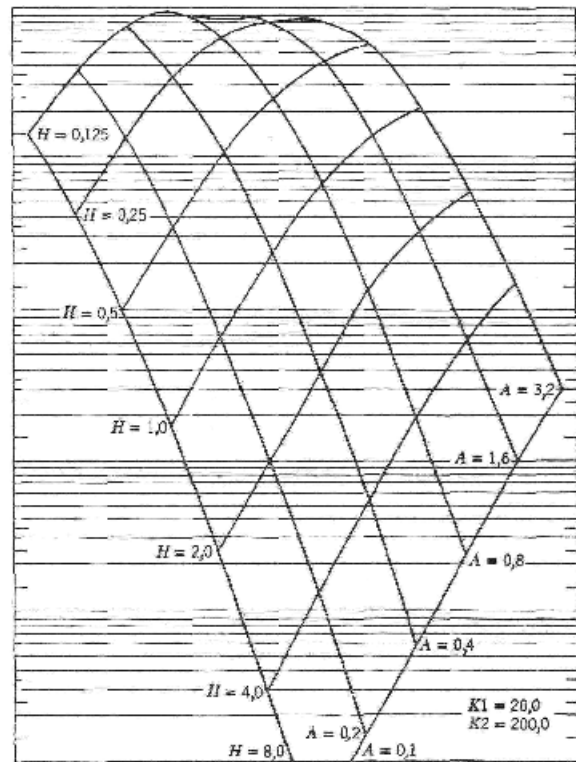
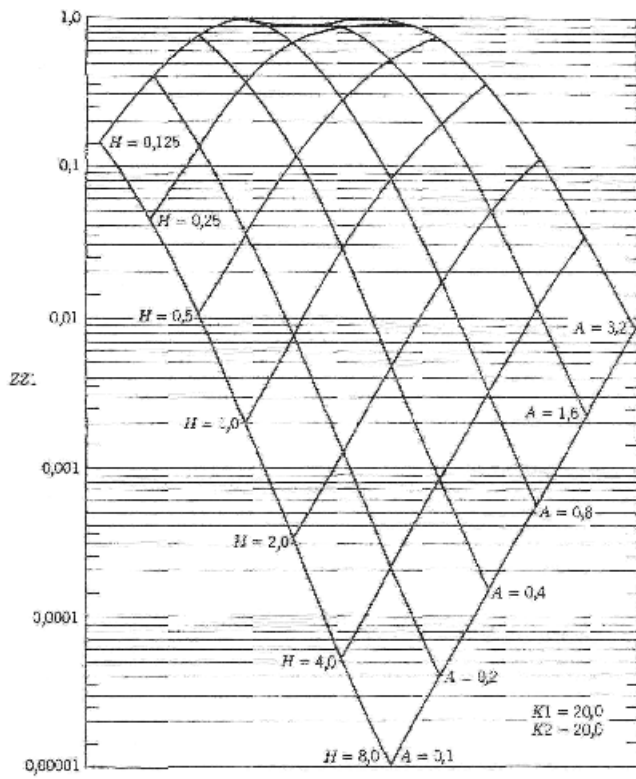


(b).

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (b) κατακόρυφη τάση, ZZ1, K1=2,0, K2=0,2 έως 200,00**

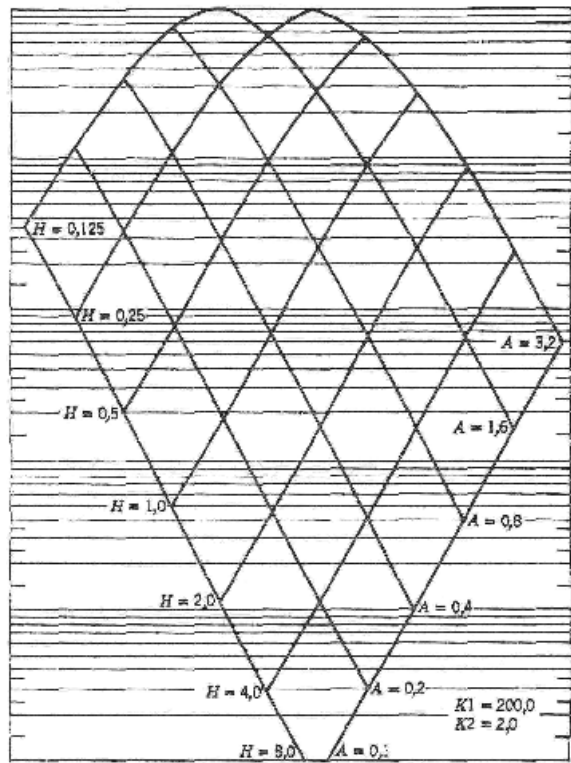
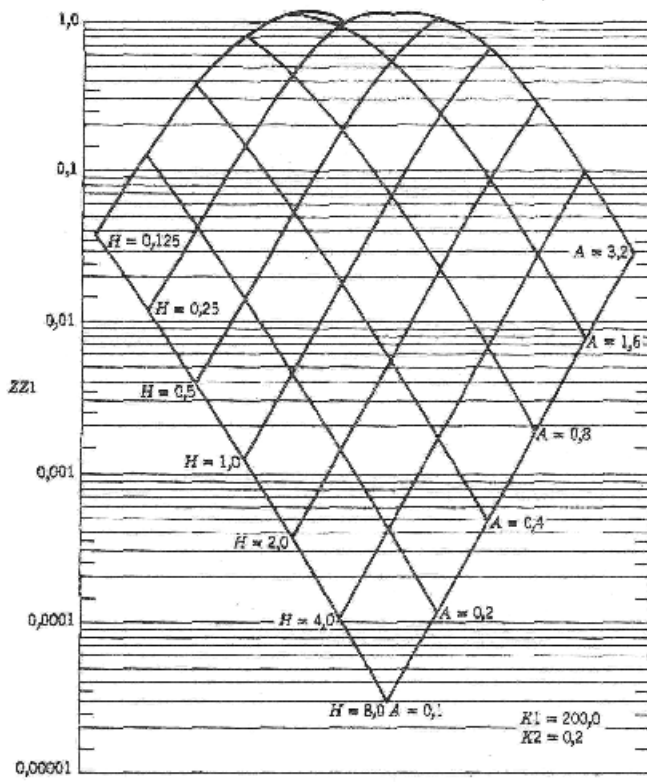


(c)

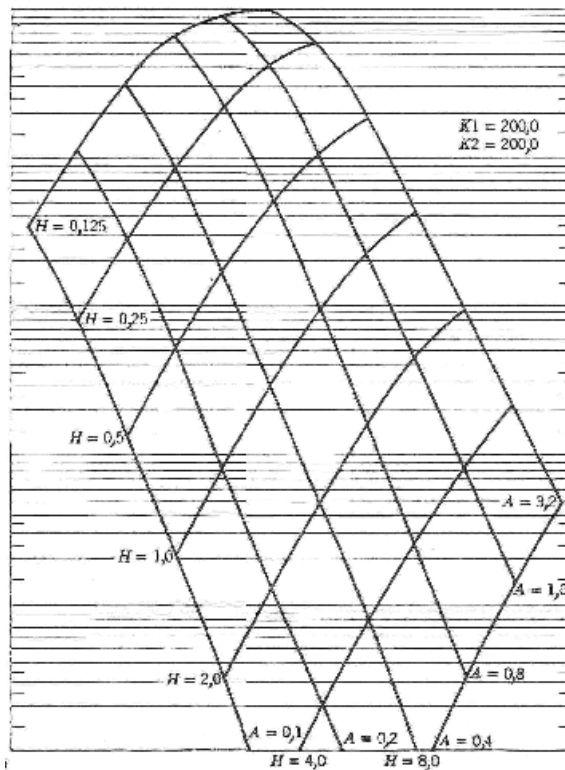
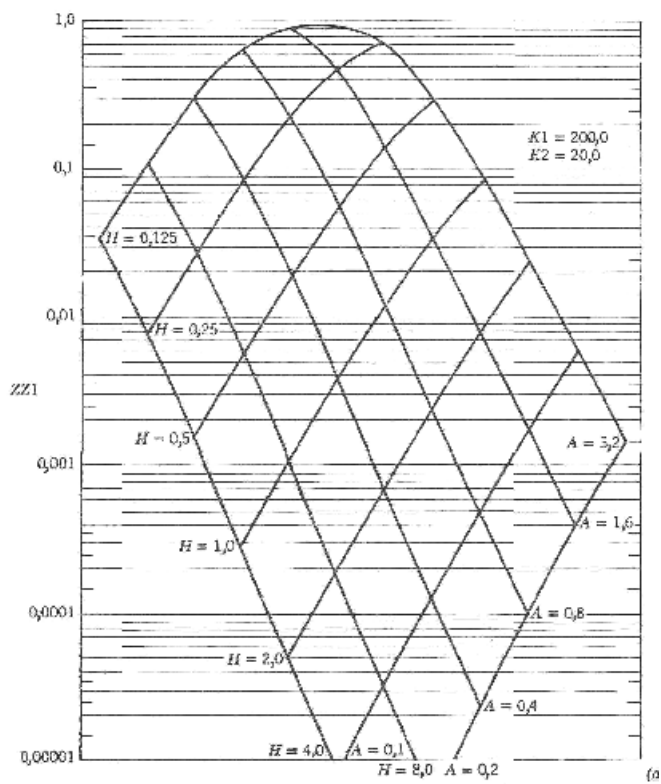


(c)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (c) κατακόρυφη τάση, ZZ1, K1=20,0, K2=0,2 έως 200,00**

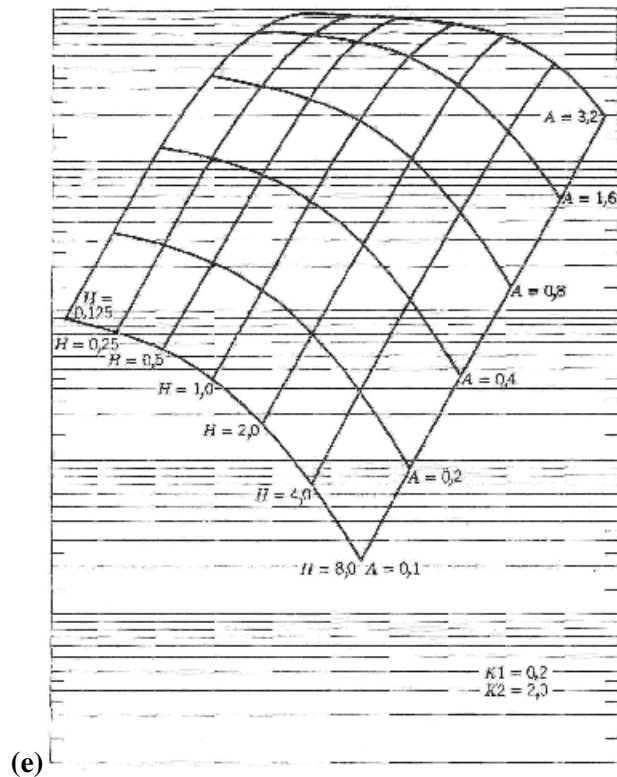
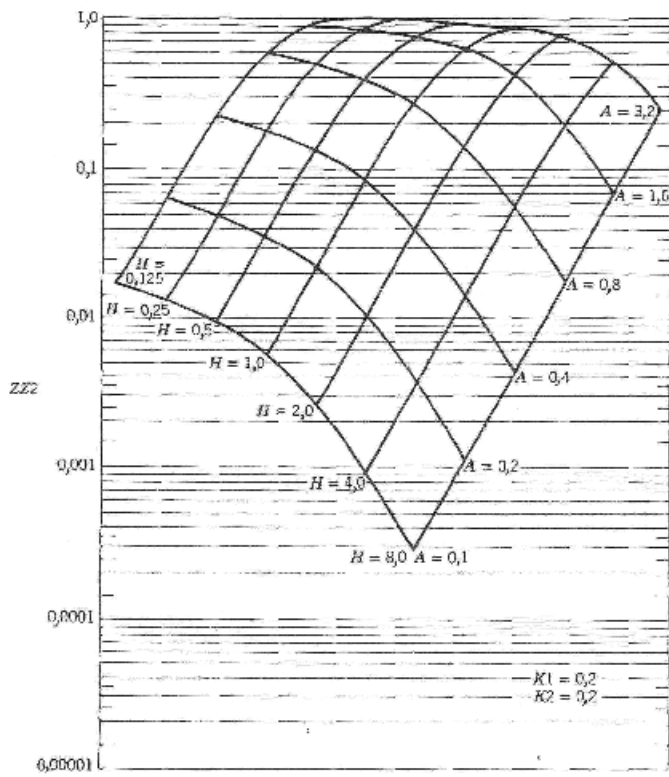


(d)

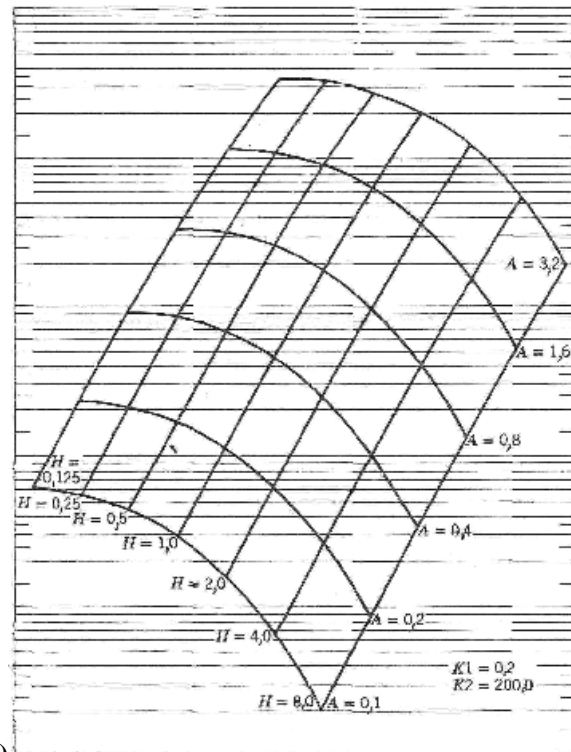
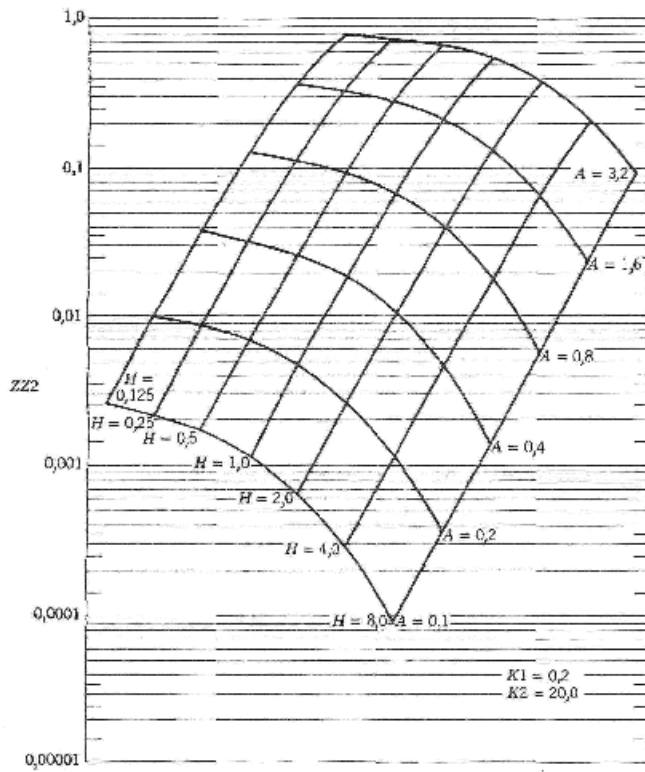


(d)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (d) κατακόρυφη τάση, ZZ1, K1=200,0, K2=0,2 έως 200,00**



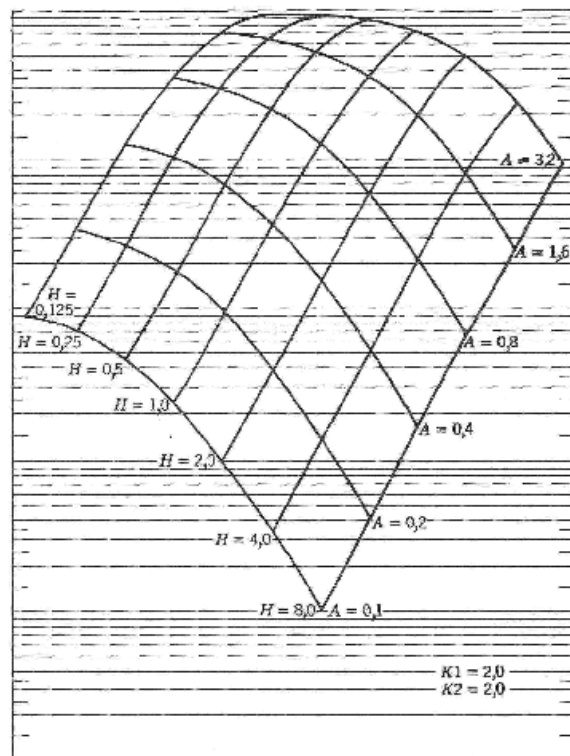
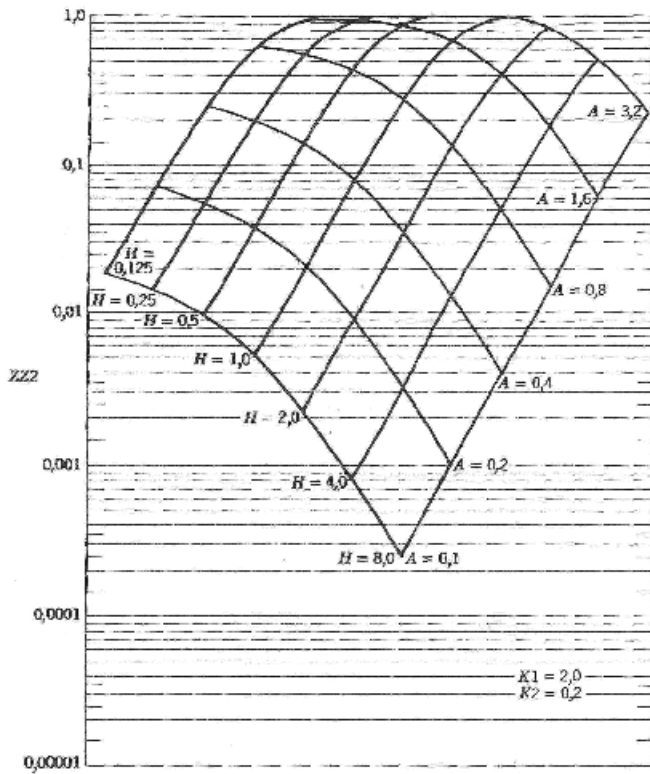
(e)



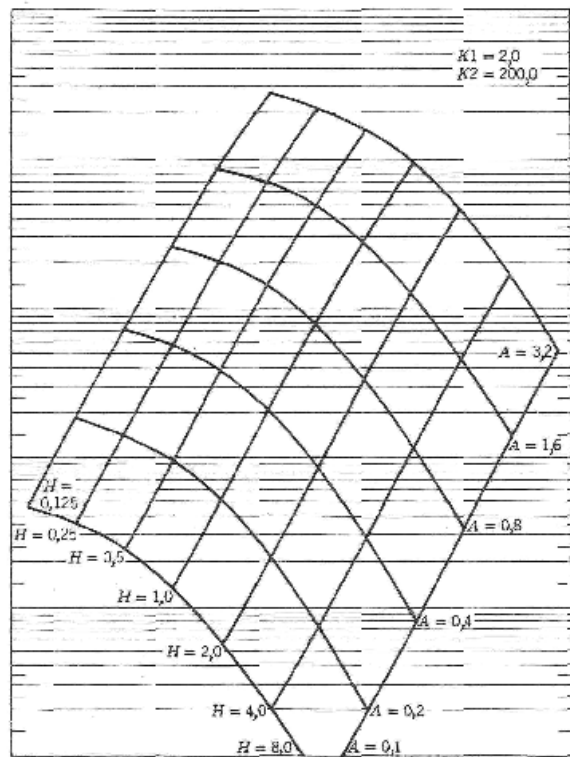
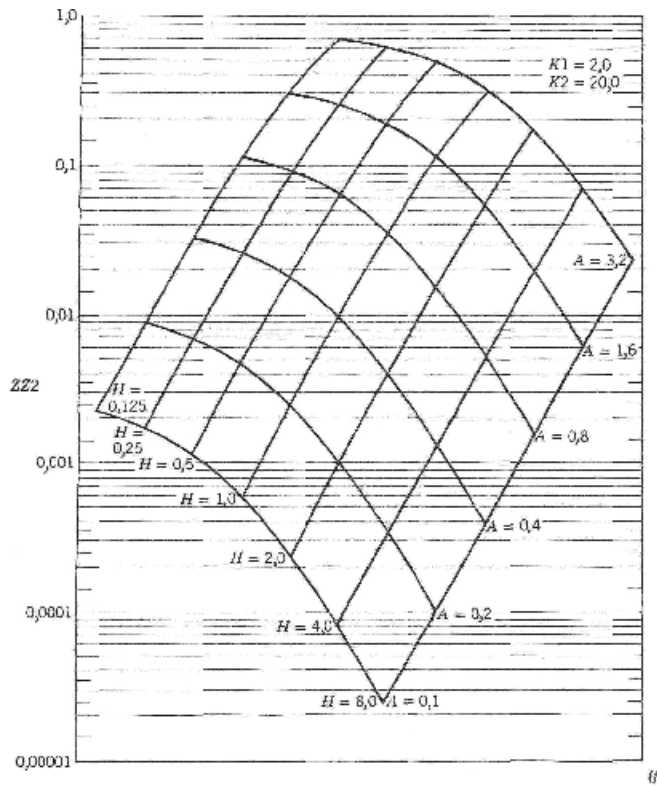
(e)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (e) κατακόρυφη τάση, ZZ2, K1=0,2, K2=0,2 έως 200,00**



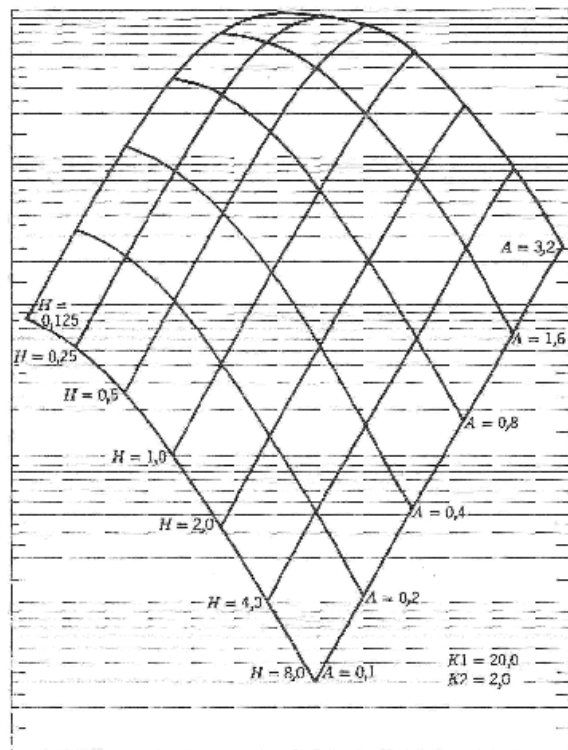
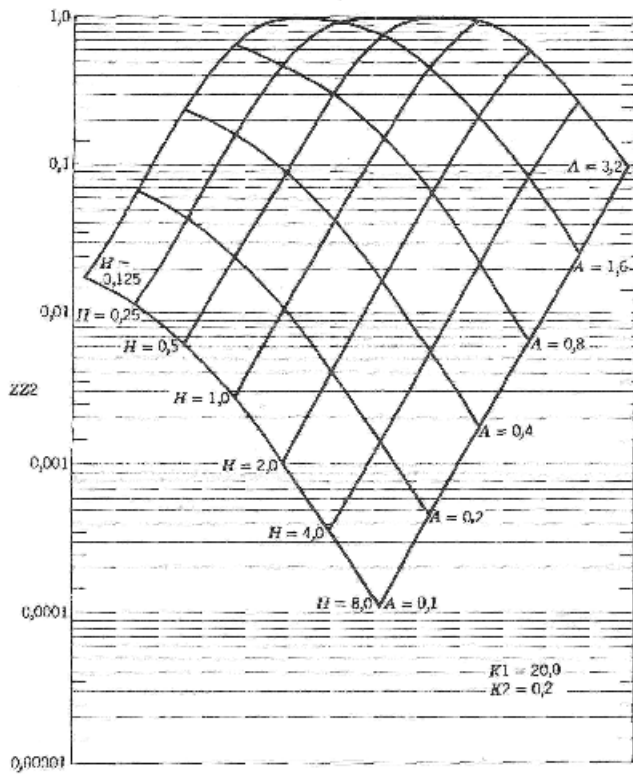


(f)

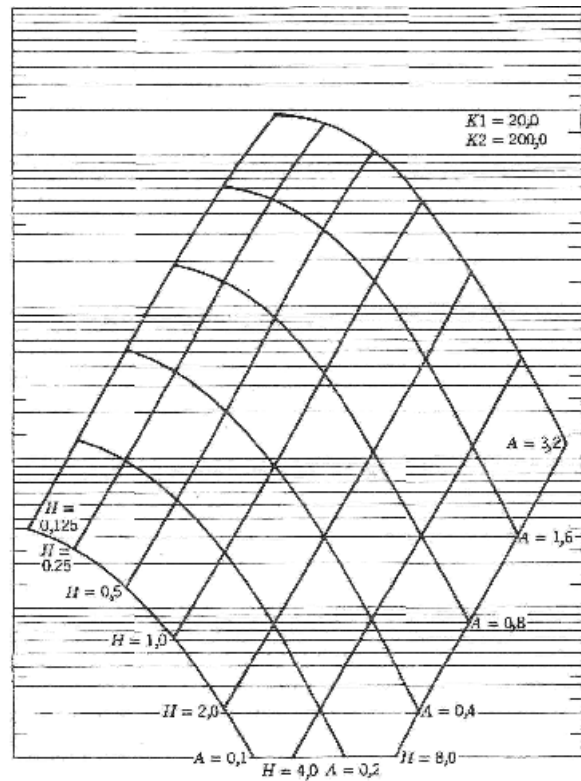
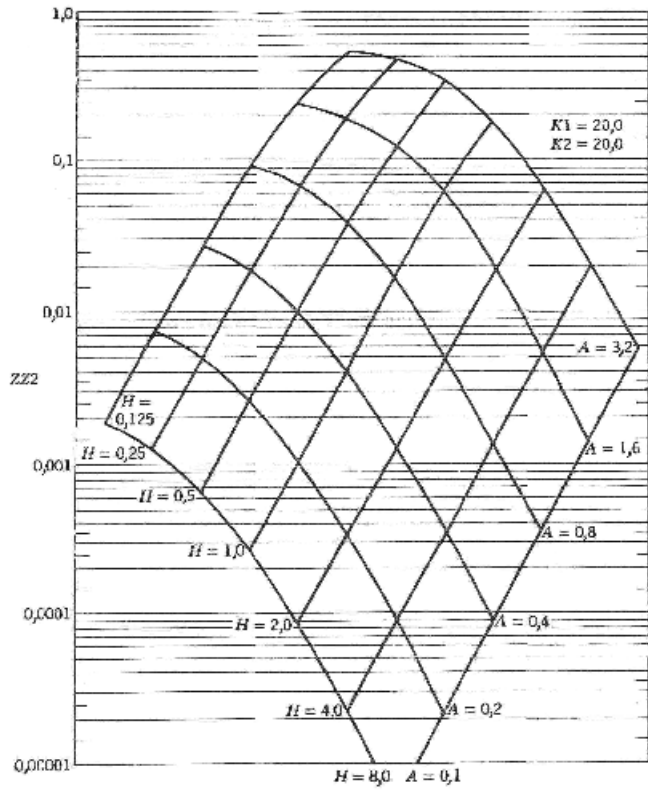


(f)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (f) κατακόρυφη τάση,  $Zz_2$ ,  $K_1=0,2$ ,  $K_2=0,2$  έως 200,00**

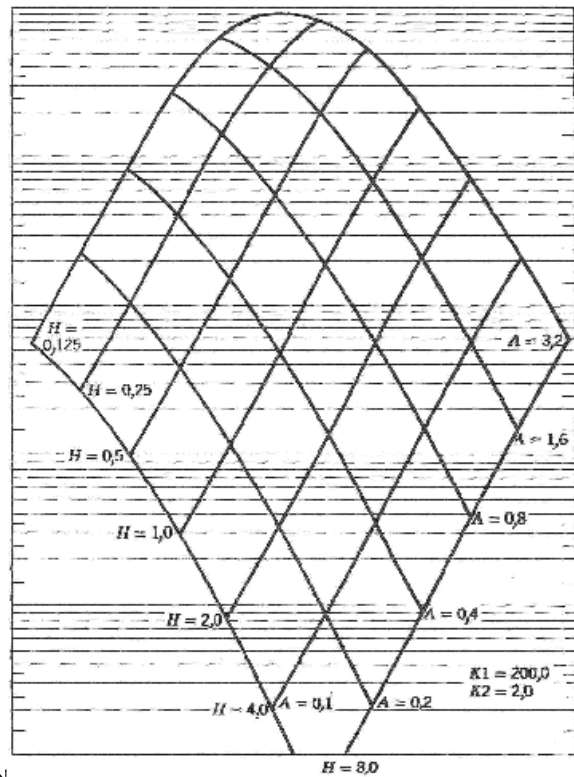
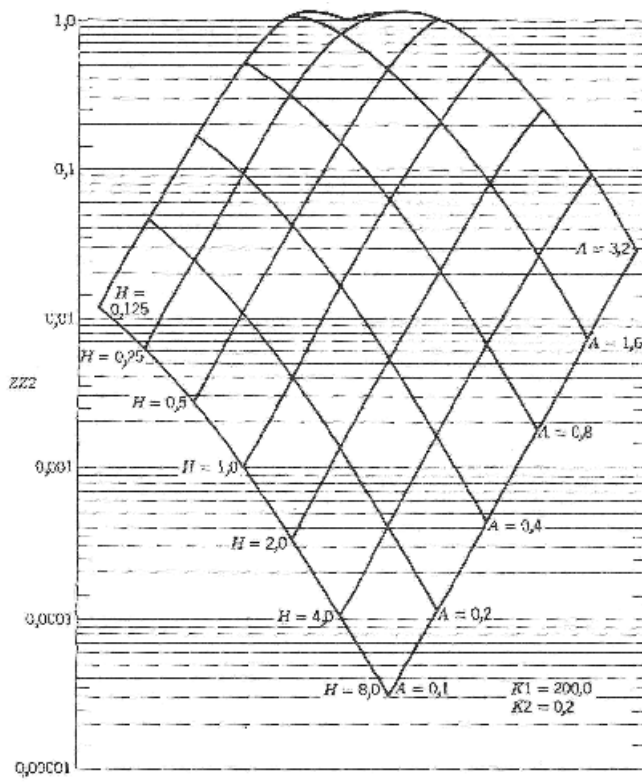


(g)

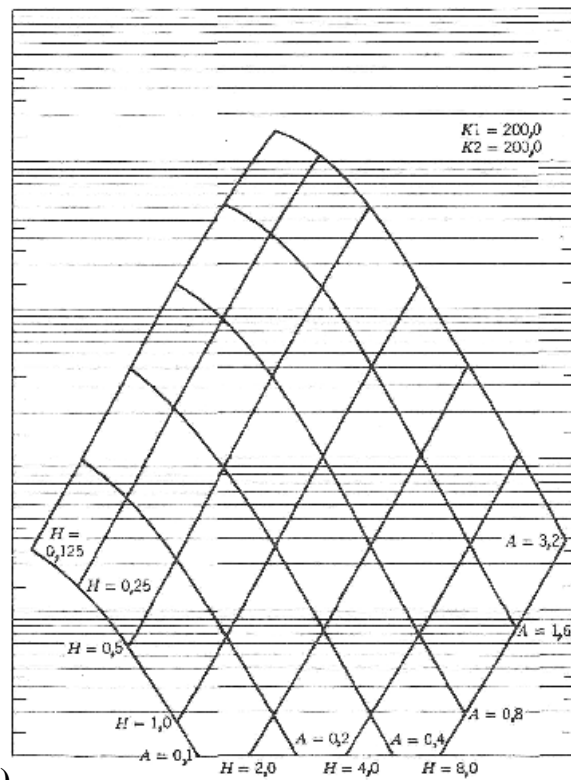
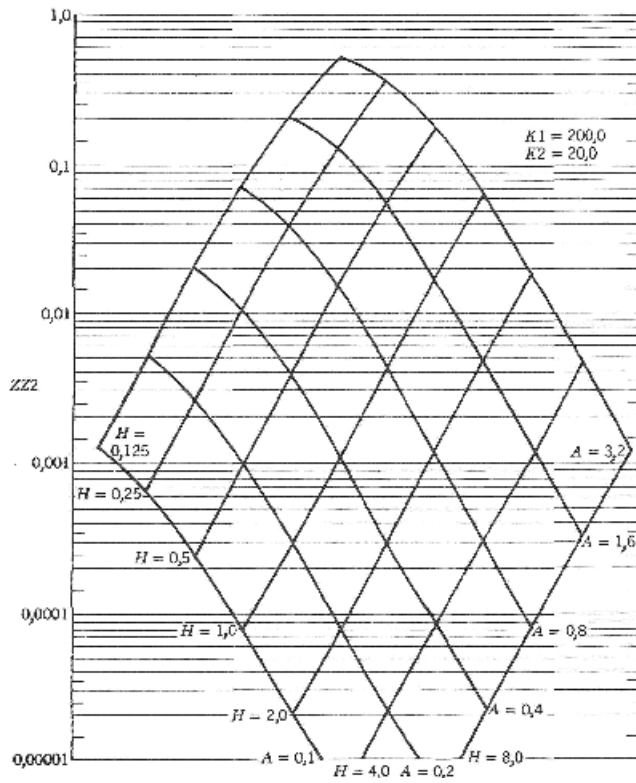


(g)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (g) κατακόρυφη τάση, ZZ2, K1=20,0, K2=0,2 έως 200,00**



(h)



(h)

**Σχήμα 1.10. Συντελεστές τριών στρώσεων (κατά Peattie), (h) κατακόρυφη τάση, ZZ2, K1=200,0, K2=0,2 έως 200,00**

Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)

$\alpha_1$	$H = 0,125$ $k_1 = 0,2$			$H = 0,125$ $k_1 = 2,0$			$H = 0,125$ $k_1 = 20,0$			$H = 0,125$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)
			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$
0,1	0,12438	0,00332	0,01659	0,71614	0,00350	0,01750	1,80805	0,00322	0,01611	2,87564	0,00201	0,01005
0,2	0,13546	0,01278	0,06391	1,01561	0,01348	0,06741	3,75440	0,01249	0,06244	7,44285	0,00788	0,03940
0,4	0,10428	0,04430	0,22150	0,83924	0,04669	0,23346	5,11847	0,04421	0,22105	15,41021	0,02913	0,14568
0,8	0,09011	0,10975	0,54877	0,83961	0,11484	0,57418	3,38600	0,11468	0,57342	9,70261	0,08714	0,43568
1,6	0,08777	0,13755	0,88777	0,65723	0,13726	0,88630	1,81603	0,13687	0,88436	7,02380	0,13705	0,88524
3,2	0,04129	0,10147	0,50736	0,38165	0,09467	0,47335	1,75101	0,07578	0,37890	2,35459	0,06594	0,32971
			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$
0,1	0,12285	0,01693	0,00846	0,70622	0,01716	0,00858	1,81178	0,01542	0,00771	3,02259	0,00969	0,00485
0,2	0,12916	0,06558	0,03279	0,87956	0,06647	0,03324	3,78886	0,06003	0,03002	8,02452	0,03312	0,01906
0,4	0,08115	0,23257	0,11629	0,70970	0,23531	0,11766	5,16717	0,21640	0,10820	17,64175	0,14286	0,07143
0,8	0,01823	0,62863	0,31432	0,22319	0,63003	0,31501	3,43631	0,60493	0,30247	27,27701	0,45208	0,22604
1,6	-0,04136	0,98754	0,49377	-0,19982	0,97707	0,48853	1,15211	0,97146	0,48573	23,38638	0,90861	0,45430
3,2	-0,03804	0,82102	0,41051	-0,28916	0,84030	0,42015	-0,06894	0,88358	0,44179	11,87014	0,91469	0,45735
			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$
0,1	0,12032	0,03667	0,00183	0,69332	0,03467	0,00173	1,80664	0,02985	0,00149	3,17763	0,01980	0,00099
0,2	0,11787	0,14336	0,00717	0,92086	0,13541	0,00677	3,74573	0,11697	0,00585	8,86097	0,07827	0,00391
0,4	0,03474	0,52691	0,02635	0,46583	0,49523	0,02476	5,05489	0,43263	0,02163	20,12259	0,29887	0,01494
0,8	-0,14872	1,61727	0,08086	-0,66535	1,49612	0,07481	2,92533	1,33736	0,06687	36,29943	1,01694	0,05085
1,6	-0,50533	3,58944	0,17947	-2,82859	3,28512	0,16426	-1,27093	2,99215	0,14961	49,40657	2,64313	0,13216
3,2	-0,30990	5,15409	0,25779	-5,27906	5,06952	0,25288	-7,35384	5,06489	0,25324	57,84369	4,89895	0,24495
			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$
0,1	0,11720	0,05413	0,00027	0,67488	0,04848	0,00024	1,78941	0,04010	0,00020	3,26987	0,02809	0,00014
0,2	0,10495	0,21314	0,00170	0,85397	0,19048	0,00095	3,68097	0,15781	0,00079	9,02669	0,11136	0,00066
0,4	-0,01709	0,80400	0,00402	0,21165	0,71221	0,00356	4,80711	0,59391	0,00297	21,56482	0,43035	0,00215
0,8	-0,34427	2,67934	0,01340	-1,66954	2,32652	0,01163	1,90825	1,95709	0,00979	41,89873	1,53070	0,00765
1,6	-1,21139	7,35978	0,03680	-6,47707	6,26638	0,03133	-5,28803	5,25110	0,02626	69,63157	4,56707	0,02284
3,2	-2,89282	16,22830	0,08114	-16,67376	14,25621	0,07128	-21,62546	12,45058	0,08225	120,96931	11,42045	0,06710

**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$a_1$	$H = 0,25$ $k_1 = 0,2$			$H = 0,25$ $k_1 = 2,0$			$H = 0,25$ $k_1 = 20,0$			$H = 0,25$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ3-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ3-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ3-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ3-RR3)
			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$
0,1	0,06598	0,00274	0,01370	0,28658	0,00277	0,01384	0,61450	0,00202	0,01011	0,66844	0,00090	00,0451
0,2	0,12628	0,01060	0,05302	0,72176	0,01075	0,05377	1,76875	0,00793	0,03984	2,71354	0,00357	0,01784
0,4	0,14219	0,03744	0,18722	1,03476	0,03842	0,19211	3,58850	0,02931	0,14653	6,83021	0,01365	0,06624
0,8	0,12360	0,09839	0,49196	0,88833	0,10337	0,51887	4,58845	0,08771	0,43854	13,18864	0,04624	0,23118
1,6	0,10534	0,13917	0,69586	0,66438	0,14103	0,70540	2,31165	0,14039	0,70194	13,79134	0,10591	0,52955
3,2	0,05063	0,11114	0,55569	0,41539	0,09804	0,49020	1,24415	0,07587	0,37934	2,72991	0,06808	0,43037
			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$
0,1	0,05477	0,01409	0,00704	0,28382	0,01353	0,00677	0,63215	0,00962	0,00481	0,96553	0,00407	0,00203
0,2	0,12138	0,06484	0,02742	0,70225	0,05278	0,02639	1,83766	0,03781	0,01891	3,10783	0,01811	0,00806
0,4	0,12390	0,19780	0,09890	0,96634	0,19178	0,09589	3,88779	0,14159	0,07079	8,37852	0,06221	0,03110
0,8	0,06482	0,56039	0,28019	0,66886	0,55211	0,27605	5,50796	0,44710	0,22355	18,95534	0,21880	0,10980
1,6	-0,00519	0,96216	0,48108	0,17331	0,93080	0,47540	4,24281	0,90115	0,45058	31,18008	0,56553	0,29277
3,2	-0,02216	0,87221	0,43610	-0,05691	0,80390	0,44695	1,87494	0,83254	0,40627	28,98500	0,59191	0,44595
			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$
0,1	0,06192	0,03116	0,00156	0,27580	0,02728	0,00136	0,65003	0,01930	0,00096	1,08738	0,00861	0,00043
0,2	0,11209	0,12227	0,09611	0,67115	0,10710	0,00586	1,90693	0,07823	0,00381	3,59448	0,03421	0,00171
0,4	0,08822	0,45504	0,02275	0,84462	0,39918	0,01996	4,13876	0,29072	0,01454	10,30923	0,13365	0,00668
0,8	-0,07351	1,44285	0,07214	0,21951	1,26565	0,06328	6,48948	0,98565	0,04928	26,41442	0,49135	0,02457
1,6	-0,40234	3,37001	0,16850	-1,22411	2,94860	0,14743	6,95639	2,55231	0,12782	57,48409	1,58833	0,07692
3,2	-0,71901	5,10060	0,25503	-3,04320	4,89878	0,24404	6,05854	4,78234	0,23812	99,28034	3,80964	0,18048
			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$
0,1	0,04956	0,04704	0,00024	0,26776	0,03814	0,00019	0,65732	0,02711	0,00014	1,18099	0,01311	0,00007
0,2	0,10068	0,18557	0,00093	0,63973	0,15040	0,00075	1,93764	0,10741	0,00054	4,00968	0,05223	0,00026
0,4	0,04248	0,70524	0,00353	0,71620	0,57046	0,00285	4,28004	0,41459	0,00207	11,98405	0,20551	0,00103
0,8	-0,24071	2,40585	0,01203	-0,28250	1,92636	0,00963	6,94871	1,48947	0,00735	32,67364	0,77584	0,00388
1,6	-1,00743	6,82481	0,03412	-3,09856	5,35936	0,02680	8,55770	4,36521	0,02183	82,77997	2,63962	0,01820
3,2	-2,54264	15,45931	0,07730	-9,18214	12,64318	0,06322	10,62614	10,93570	0,05488	180,37439	7,80287	0,03801



**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$a_1$	$H = 0,5$ $k_1 = 0,2$			$H = 0,5$ $k_1 = 2,0$			$H = 0,5$ $k_1 = 20,0$			$H = 0,5$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)
			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$
0,1	0,01705	0,00208	0,01030	0,08398	0,00181	0,00906	0,16526	0,00098	0,00488	0,22388	0,00033	0,00163
0,2	0,05724	0,00804	0,04020	0,26904	0,00711	0,03554	0,58918	0,00386	0,01929	0,81803	0,00130	0,00648
0,4	0,13089	0,02824	0,14822	0,72313	0,02634	0,13172	1,66749	0,01474	0,07369	2,52558	0,00506	0,02529
0,8	0,15514	0,08369	0,41843	1,03603	0,07992	0,39992	3,23121	0,04967	0,24834	6,11429	0,01844	0,09221
1,6	0,13250	0,13729	0,88547	0,83475	0,13973	0,69863	3,54853	0,11279	0,56385	10,82705	0,05399	0,26693
3,2	0,06970	0,12874	0,83371	0,45119	0,10667	0,53336	1,27334	0,09527	0,47637	9,34212	0,08624	0,43121
			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$
0,1	0,01617	0,01074	0,00537	0,08250	0,00878	0,00439	0,17997	0,00440	0,00220	0,26620	0,00128	0,00064
0,2	0,05375	0,04208	0,02103	0,28318	0,03454	0,01727	0,64779	0,01744	0,00872	0,98772	0,00509	0,00254
0,4	0,11770	0,15534	0,07767	0,70119	0,12954	0,06477	1,89817	0,06722	0,03361	3,19580	0,01998	0,00998
0,8	0,11252	0,47045	0,23523	0,96681	0,41187	0,20504	4,09582	0,23476	0,11738	8,71973	0,07434	0,03717
1,6	0,04887	0,80072	0,45036	0,70726	0,85930	0,42965	6,22002	0,62046	0,31023	20,15765	0,23838	0,11919
3,2	0,01380	0,94385	0,47192	0,33878	0,96353	0,48176	5,41828	0,92831	0,46915	34,25229	0,54931	0,27466
			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$
0,1	0,01439	0,02415	0,00121	0,08044	0,01778	0,00089	0,19872	0,00911	0,00046	0,31847	0,00257	0,00013
0,2	0,04669	0,09519	0,00476	0,27574	0,07027	0,00351	0,72264	0,03620	0,00181	1,19698	0,01025	0,00051
0,4	0,09018	0,36008	0,01800	0,67174	0,26817	0,01341	2,19520	0,14116	0,00706	1,62732	0,04047	0,00202
0,8	0,01260	1,19151	0,05958	0,86191	0,91168	0,04558	5,24726	0,51585	0,02579	12,00885	0,15452	0,00773
1,6	-0,24336	2,85409	0,14770	0,39588	2,38377	0,11919	10,30212	1,59341	0,07987	32,77028	0,53836	0,02692
3,2	-0,58220	4,86789	0,24339	-0,41078	4,47022	0,22351	16,38520	3,69109	0,18455	77,62843	1,56409	0,07820
			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$
0,1	0,01243	0,03682	0,00018	0,07864	0,02515	0,00013	0,21440	0,01355	0,00007	0,37065	0,00387	0,00002
0,2	0,03912	0,14576	0,00073	0,26853	0,09968	0,00060	0,78493	0,05395	0,00027	1,40493	0,01544	0,00008
0,4	0,06006	0,50051	0,00280	0,64303	0,33497	0,00192	2,44430	0,21195	0,00106	4,86215	0,06118	0,00031
0,8	0,10447	1,96771	0,00984	0,74947	1,36766	0,00684	6,23424	0,79588	0,00388	15,33902	0,23698	0,00118
1,6	-0,67154	5,77869	0,02888	-0,02761	4,08937	0,02045	14,11490	2,67578	0,01338	45,93954	0,86345	0,00432
3,2	-1,86126	13,63423	0,06817	-1,28545	10,25631	0,05128	29,95815	7,81457	0,03807	128,13051	2,80877	0,01404

**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$a_1$	$H = 1,0$ $k_1 = 0,2$			$H = 1,0$ $k_1 = 2,0$			$H = 1,0$ $k_1 = 20,0$			$H = 1,0$ $k_1 = 200,0$		
	$(ZZ1 - RR1)$	$(ZZ2 - RR2)$	$(ZZ2 - RR3)$	$(ZZ1 - RR1)$	$(ZZ2 + RR2)$	$(ZZ2 - RR3)$	$(ZZ1 - RR1)$	$(ZZ2 - RR2)$	$(ZZ2 - RR3)$	$(ZZ1 - RR1)$	$(ZZ2 - RR2)$	$(ZZ2 - RR3)$
	$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$		
0,1	0,00464	0,00128	0,00638	0,02186	0,00096	0,00478	0,04050	0,00039	0,00196	0,05507	0,00010	0,00051
0,2	0,01773	0,00503	0,02515	0,08396	0,00378	0,01890	0,15675	0,00155	0,00777	0,21467	0,00041	0,00203
0,4	0,05976	0,01903	0,09516	0,28966	0,01448	0,07241	0,55548	0,00606	0,03028	0,78191	0,00160	0,00801
0,8	0,13818	0,06192	0,30960	0,71684	0,04924	0,24820	1,53667	0,02198	0,10991	2,38055	0,00607	0,03037
1,6	0,15978	0,13002	0,65010	0,97206	0,11558	0,57790	2,77359	0,06327	0,31635	5,57945	0,02028	0,10140
3,2	0,09722	0,14348	0,71742	0,60091	0,12527	0,62637	2,55195	0,09906	0,49525	9,29529	0,04847	0,24236
	$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$		
0,1	0,00410	0,00687	0,00343	0,02179	0,00453	0,00227	0,04751	0,00160	0,00080	0,06883	0,00035	0,00017
0,2	0,01561	0,02713	0,01357	0,08337	0,01797	0,00899	0,18481	0,00637	0,00319	0,26966	0,00138	0,00069
0,4	0,05166	0,10351	0,05175	0,28491	0,06934	0,03467	0,66727	0,02498	0,01249	1,00131	0,00545	0,00273
0,8	0,11111	0,34703	0,17351	0,71341	0,24250	0,12125	1,97428	0,09268	0,04634	3,24971	0,02092	0,01046
1,6	0,10364	0,79986	0,39993	1,02680	0,63631	0,31815	4,37407	0,29253	0,14626	8,92442	0,07335	0,03668
3,2	0,06967	0,99757	0,49879	0,90482	0,97509	0,48754	6,97695	0,65446	0,32723	20,83387	0,21288	0,10644
	$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$		
0,1	0,00306	0,01591	0,00080	0,02249	0,00920	0,00046	0,05737	0,00322	0,00016	0,08469	0,00062	0,00003
0,2	0,01145	0,06310	0,00316	0,08618	0,03654	0,00183	0,22418	0,01283	0,00064	0,33312	0,00248	0,00012
0,4	0,03540	0,24396	0,01220	0,29640	0,14241	0,00712	0,82430	0,05063	0,00253	1,25495	0,00985	0,00049
0,8	0,05163	0,86114	0,04306	0,76292	0,51815	0,02591	2,59872	0,19267	0,00963	4,26100	0,03825	0,00191
1,6	-0,07218	2,36054	0,11803	1,25168	1,56503	0,07825	6,77014	0,66326	0,03316	12,91809	0,13989	0,00699
3,2	-0,25569	4,28169	0,21408	1,70723	3,51128	0,17556	15,23252	1,88634	0,09432	36,04291	0,46544	0,02277
	$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$		
0,1	0,00214	0,02412	0,00012	0,02339	0,01319	0,00007	0,06733	0,00478	0,00002	0,10075	0,00087	0,00000
0,2	0,00777	0,09587	0,00048	0,09018	0,05252	0,00026	0,26401	0,01908	0,00010	0,39741	0,00347	0,00002
0,4	0,02076	0,37417	0,00187	0,31470	0,20609	0,00103	0,98346	0,07557	0,00038	1,51234	0,01381	0,00007
0,8	-0,00538	1,36930	0,00685	0,83274	0,76955	0,00385	3,23164	0,29194	0,00146	5,28939	0,05403	0,00027
1,6	-0,28050	4,23805	0,02119	1,53521	2,53100	0,01265	9,28148	1,05385	0,00527	17,01872	0,20250	0,00101
3,2	-0,90965	10,36507	0,05183	2,76420	6,99283	0,03496	24,85236	3,37605	0,01688	52,23615	0,70098	0,00350

**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$H = 2,0$ $k_1 = 0,2$			$H = 2,0$ $k_1 = 2,0$			$H = 2,0$ $k_1 = 20,0$			$H = 2,0$ $k_1 = 200,0$			
$\{ZZ1 - RR1\}$	$\{ZZ2 - RR2\}$	$\{ZZ3 - RR3\}$	$\{ZZ1 - RR1\}$	$\{ZZ2 - RR2\}$	$\{ZZ3 - RR3\}$	$\{ZZ1 - RR1\}$	$\{ZZ2 - RR2\}$	$\{ZZ3 - RR3\}$	$\{ZZ1 - RR1\}$	$\{ZZ2 - RR2\}$	$\{ZZ3 - RR3\}$	
$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			
0,1	0,00121	0,00069	0,00302	0,00545	0,00011	0,00203	0,00968	0,00014	0,00068	0,01350	0,00003	0,00015
0,2	0,00477	0,00240	0,01202	0,02155	0,00162	0,00909	0,03839	0,00055	0,00273	0,05366	0,00012	0,00058
0,4	0,01821	0,00939	0,04695	0,08288	0,00834	0,03172	0,11845	0,00218	0,01078	0,29811	0,00046	0,00232
0,8	0,06106	0,03422	0,17112	0,28226	0,02348	0,11744	0,52414	0,00820	0,04101	0,76035	0,00180	0,00901
1,6	0,19660	0,09826	0,49131	0,67844	0,07109	0,35545	1,41720	0,02740	0,13698	2,29698	0,00849	0,03244
3,2	0,12899	0,15705	0,78723	0,79393	0,12583	0,62913	2,38258	0,06384	0,31919	5,26589	0,01912	0,09562
$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			
0,1	0,00008	0,00039	0,00170	0,00555	0,00188	0,00094	0,01219	0,00051	0,00025	0,01737	0,00009	0,00004
0,2	0,00389	0,01350	0,00675	0,02199	0,00750	0,00375	0,04843	0,00203	0,00101	0,05913	0,00036	0,00018
0,4	0,01485	0,05288	0,02644	0,08465	0,02950	0,01475	0,18857	0,00803	0,00401	0,27103	0,00142	0,00071
0,8	0,04977	0,19467	0,09733	0,29365	0,11080	0,05540	0,68382	0,03093	0,01547	1,00808	0,00553	0,00277
1,6	0,10924	0,57811	0,28905	0,75087	0,35515	0,17757	2,04134	0,10864	0,05432	3,27590	0,02043	0,01021
3,2	0,12296	1,00199	0,50100	1,17294	0,77434	0,38717	4,60426	0,30709	0,15354	9,02195	0,06638	0,03319
$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			
0,1	0,00056	0,00825	0,00041	0,00652	0,00378	0,00019	0,01563	0,00094	0,00005	0,02160	0,00014	0,00001
0,2	0,00221	0,03286	0,00164	0,02486	0,01507	0,00075	0,06236	0,00374	0,00019	0,08604	0,00058	0,00003
0,4	0,00819	0,12033	0,00647	0,10917	0,05958	0,00298	0,24425	0,01486	0,00074	0,33866	0,00229	0,00011
0,8	0,02431	0,48595	0,02430	0,35641	0,22795	0,01140	0,90564	0,05789	0,00289	1,27835	0,00901	0,00046
1,6	0,03070	1,55804	0,07790	1,00785	0,78347	0,03917	2,91994	0,21199	0,01069	4,33311	0,03399	0,00170
3,2	-0,00926	3,39853	0,16994	2,16033	2,13215	0,10661	7,95104	0,67732	0,03387	13,20873	0,11666	0,00583
$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			
0,1	0,00032	0,01234	0,00006	0,00778	0,00542	0,00003	0,01927	0,00131	0,00061	0,02587	0,00019	0,00000
0,2	0,00124	0,04922	0,00025	0,03990	0,02163	0,00011	0,07675	0,00524	0,00003	0,16310	0,00075	0,00000
0,4	0,00436	0,19450	0,00097	0,12030	0,08578	0,00043	0,30182	0,02085	0,00010	0,40576	0,00300	0,00002
0,8	0,00955	0,74256	0,00371	0,43693	0,33214	0,00165	1,13555	0,08180	0,00041	1,54951	0,01183	0,00006
1,6	-0,02172	2,02847	0,01264	1,32879	1,19190	0,00596	3,83254	0,30676	0,00153	5,43705	0,04515	0,00023
3,2	-0,15589	6,69835	0,03349	3,40664	3,67558	0,01838	11,55403	1,04794	0,00524	17,58810	0,15107	0,00081

**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$\alpha_1$	$H = 4,0$ $k_1 = 0,2$			$H = 4,0$ $k_1 = 2,0$			$H = 4,0$ $k_1 = 20,0$			$H = 4,0$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)
			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$
0,1	0,00028	0,00023	0,00114	0,00128	0,00044	0,00071	0,00233	0,00004	0,00021	0,00334	0,00001	0,00004
0,2	0,00112	0,00091	0,00454	0,00511	0,00057	0,00284	0,00632	0,00017	0,00085	0,01333	0,00003	0,00016
0,4	0,00444	0,00360	0,01801	0,02022	0,00226	0,01129	0,03692	0,00065	0,00240	0,05295	0,00013	0,00065
0,8	0,01686	0,01391	0,06968	0,07722	0,00877	0,04884	0,14242	0,00266	0,01331	0,20621	0,00051	0,00256
1,6	0,05529	0,04909	0,24545	0,25655	0,03133	0,15660	0,48826	0,00983	0,04914	0,74824	0,00195	0,00975
3,2	0,11356	0,12670	0,63252	0,58704	0,08500	0,42501	1,31627	0,02990	0,14951	2,25016	0,00660	0,03298
			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$
0,1	0,00026	0,00130	0,00065	0,00147	0,00065	0,00032	0,00312	0,00015	0,00007	0,00437	0,00002	0,00001
0,2	0,00104	0,00518	0,00259	0,00587	0,00260	0,00130	0,01215	0,00029	0,00029	0,01746	0,00009	0,00005
0,4	0,00412	0,02057	0,01029	0,02324	0,01032	0,00516	0,04944	0,00235	0,00117	0,08947	0,00036	0,00018
0,8	0,01574	0,07977	0,03989	0,08957	0,04031	0,02015	0,19247	0,00924	0,00462	0,27221	0,00144	0,00072
1,6	0,05311	0,28357	0,14178	0,31215	0,14735	0,07388	0,69749	0,03488	0,01744	1,01140	0,00553	0,00277
3,2	0,12524	0,73651	0,37825	0,81908	0,43632	0,21816	2,09049	0,14553	0,05776	3,28913	0,01951	0,00975
			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$
0,1	0,00018	0,00325	0,00016	0,00201	0,00128	0,00006	0,00413	0,00025	0,00001	0,00545	0,00003	0,00000
0,2	0,00072	0,01298	0,00065	0,00903	0,00510	0,00026	0,01651	0,00009	0,00005	0,02178	0,00014	0,00001
0,4	0,00283	0,05159	0,00258	0,03191	0,02032	0,00102	0,06569	0,00396	0,00020	0,08673	0,00054	0,00003
0,8	0,01089	0,20134	0,01007	0,12427	0,07991	0,00400	0,25739	0,01565	0,00078	0,34131	0,00215	0,00011
1,6	0,03790	0,73422	0,03688	0,45100	0,29991	0,01500	0,05622	0,00993	0,00300	1,28773	0,00833	0,00042
3,2	0,10841	2,13666	0,10983	1,38427	0,97701	0,04885	3,10980	0,20906	0,01045	4,38974	0,03010	0,00150
			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$
0,1	0,00019	0,00487	0,00002	0,00263	0,00180	0,00001	0,00515	0,00033	0,00000	0,00652	0,00004	0,00000
0,2	0,00078	0,01947	0,00010	0,01050	0,00720	0,00004	0,02055	0,00131	0,00001	0,02606	0,00017	0,00000
0,4	0,00309	0,07792	0,00039	0,04179	0,02870	0,00014	0,08191	0,00524	0,00003	0,10389	0,00068	0,00000
0,8	0,01199	0,30432	0,00152	0,18380	0,11334	0,00057	0,32231	0,02077	0,00010	0,40907	0,00289	0,00004
1,6	0,04352	1,13373	0,00567	0,60898	0,43231	0,00216	1,21587	0,08634	0,00040	1,56284	0,01049	0,00005
3,2	0,14445	3,59608	0,01798	1,68899	1,48306	0,00747	4,14395	0,28961	0,00145	5,48870	0,03866	0,00019

**Πίνακας 1.3 Συντελεστές τάσης τριών στρώσεων (κατά Jones)**

$\alpha_1$	$H = 8,0$ $k_1 = 0,2$			$H = 8,0$ $k_1 = 2,0$			$H = 8,0$ $k_1 = 20,0$			$H = 8,0$ $k_1 = 200,0$		
	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)	(ZZ1-RR1)	(ZZ2-RR2)	(ZZ2-RR3)
	$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$			$k_2 = 0,2$		
0,1	0,00006	0,00007	0,00036	0,00028	0,00004	0,00022	0,00056	0,00001	0,00006	0,00083	0,00000	0,00001
0,2	0,00023	0,00028	0,00142	0,00111	0,00017	0,00087	0,00223	0,00005	0,00025	0,00330	0,00001	0,00005
0,4	0,00090	0,00113	0,00567	0,00444	0,00069	0,00347	0,00889	0,00020	0,00099	0,01320	0,00004	0,00018
0,8	0,00354	0,00449	0,02246	0,01752	0,00275	0,01373	0,03522	0,00079	0,00393	0,05242	0,00014	0,00072
1,6	0,01335	0,01725	0,08624	0,06662	0,01060	0,05298	0,13569	0,00306	0,01528	0,20411	0,00056	0,00282
3,2	0,04270	0,05907	0,29533	0,22014	0,03693	0,18466	0,47240	0,01105	0,05524	0,74013	0,00212	0,01058
			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$			$k_2 = 2,0$
0,1	0,00008	0,00041	0,00021	0,00039	0,00020	0,00010	0,00070	0,00004	0,00002	0,00100	0,00001	0,00000
0,2	0,00030	0,00165	0,00083	0,00157	0,00078	0,00039	0,00316	0,00016	0,00008	0,00438	0,00002	0,00001
0,4	0,00121	0,00660	0,00330	0,00628	0,00311	0,00156	0,01260	0,00064	0,00032	0,01748	0,00009	0,00005
0,8	0,00480	0,02616	0,01308	0,02487	0,01237	0,00618	0,05007	0,00253	0,00127	0,06956	0,00037	0,00018
1,6	0,01841	0,10080	0,05040	0,09597	0,04802	0,02401	0,19496	0,00993	0,00496	0,27262	0,00145	0,00072
3,2	0,06307	0,35008	0,17504	0,33606	0,17188	0,08594	0,70709	0,03678	0,01839	1,01322	0,00547	0,00273
			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$			$k_2 = 20,0$
0,1	0,00010	0,00105	0,00005	0,00061	0,00037	0,00002	0,00106	0,00006	0,00000	0,00136	0,00001	0,00000
0,2	0,00040	0,00421	0,00021	0,00242	0,00149	0,00007	0,00425	0,00025	0,00001	0,00546	0,00003	0,00000
0,4	0,00158	0,01679	0,00084	0,00967	0,00596	0,00030	0,01696	0,00100	0,00005	0,02181	0,00013	0,00001
0,8	0,00629	0,06664	0,00333	0,03845	0,02369	0,00118	0,06751	0,00398	0,00020	0,08687	0,00052	0,00003
1,6	0,02463	0,25871	0,01294	0,15010	0,09274	0,00464	0,26466	0,01565	0,00078	0,34202	0,00204	0,00010
3,2	0,09123	0,92478	0,04624	0,54942	0,34233	0,01712	0,98450	0,05892	0,00295	1,29190	0,00777	0,00039
			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$			$k_2 = 200,0$
0,1	0,00015	0,00162	0,00001	0,00082	0,00052	0,00000	0,00133	0,00008	0,00000	0,00163	0,00001	0,00000
0,2	0,00059	0,00648	0,00003	0,00328	0,00206	0,00001	0,00531	0,00032	0,00000	0,00654	0,00004	0,00000
0,4	0,00235	0,02587	0,00013	0,01310	0,00825	0,00004	0,02122	0,00128	0,00001	0,02613	0,00016	0,00000
0,8	0,00938	0,10287	0,00051	0,05216	0,03287	0,00016	0,08453	0,00509	0,00003	0,10417	0,00063	0,00000
1,6	0,03710	0,40238	0,00201	0,20491	0,12933	0,00065	0,33268	0,02009	0,00010	0,41121	0,00249	0,00001
3,2	0,14226	1,48097	0,00740	0,76769	0,48719	0,00244	1,25614	0,07660	0,00038	1,56843	0,00957	0,00005

Λόγω της συμμετρίας που χαρακτηρίζει την ανάλυση τάσεων, διάφοροι τύποι παραμόρφωσης μπορούν να υπολογισθούν με βάση τις υπολογισμένες τάσεις και τις εξισώσεις παραμορφώσεων. Για παράδειγμα, γνωρίζοντας τα  $\sigma_{z1}$  και  $\sigma_{r1}$  η οριζόντια τάση στον πυθμένα της στρώσης 1,  $\epsilon_{r1}$ , μπορεί να υπολογισθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\epsilon_{r1} = \frac{\sigma_{r1}}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_{t1}}{E_1} - \mu_1 \frac{\sigma_{z1}}{E_1}$$

Για  $\mu_1=0,5$  και  $\sigma_{t1}=\sigma_{r1}$

$$\epsilon_{r1} = \frac{1}{2E_1} [\sigma_{r1} - \sigma_{z1}]$$

Είναι φανερό ότι οι κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις είναι δυνατό να υπολογισθούν στον πυθμένα των στρώσεων 1 και 2 καθώς και την κορυφή της στρώσης 3.

Οι μέθοδοι των λύσεων τάσεων και παραμορφώσεων που εκτέθηκαν για συστήματα τριών στρώσεων μπορούν να εφαρμοσθούν και στον υπολογισμό παρόμοιων τιμών για συστήματα δύο στρώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται αν ληφθεί  $E_1=E_2$  ( $k_1$  ή  $KI = 1.0$ ) και εκλεγεί μία κατάλληλη τιμή του  $H$  και  $a_1$  (A), απ' ευθείας από τον πίνακα ή το διάγραμμα, τέτοιες ώστε το άθροισμα  $h_1+h_2$  να είναι ίσο με το πάχος του οδοστρώματος του προβλήματος των δύο στρώσεων.

**Αριθμητικό Παράδειγμα 1.4. Πρόβλημα Τριών Στρώσεων.** Έχοντας υπόψη το σχήμα 1.9 ένα οδόστρωμα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:  $h_1= 3$  ίντσες,  $h_2= 12$  ίντσες,  $E_1=600.000$  psi,  $E_2= 30.000$  psi και  $E_3=15.000$  psi. Για  $p=80$  psi και  $a=6$  ίντσες υπολογίζεται:

$$\begin{array}{lll} \text{a. } \sigma_{z1} & \text{c. } \sigma_{r1}, \sigma_{r2}, \sigma_{r3} & \text{e. } \epsilon_{z3} \\ \text{b. } \sigma_{z2} & \text{d. } \epsilon_{r1} & \end{array}$$

Οι τιμές παραμέτρων του συστήματος είναι:

$$\begin{array}{ll} k_1 (K1) = \frac{E_1}{E_2} = \frac{600.000}{30.000} = 20 & a_1 (A) = \frac{a}{h_2} = \frac{6 \text{ in.}}{12 \text{ in.}} = 0.5 \\ k_2 (K2) = \frac{E_2}{E_3} = \frac{30.000}{15.000} = 2 & H = \frac{h_1}{h_2} = \frac{3 \text{ in.}}{12 \text{ in.}} = 0.25 \end{array}$$

Ας σημειωθεί ότι οι τιμές  $k_1$ ,  $k_2$ , και  $H$  βρίσκονται στο σχήμα 1.10 και στον πίνακα 1.3. Η τιμή 0,5 του  $a_1$  (A) προσδιορίζεται με παρεμβολή.

α. Για  $K1 = 20$ ,  $K2=2$  και  $H=0,25$  από το κατάλληλο διάγραμμα του σχήμα 1.10 και για

$\alpha_1 (A) = 0,5$  είναι  $ZZ_1 = 0,47$ .

$$\therefore \sigma_{z1} = p(ZZ1) = 80(0,47) = 37,6 \text{ psi}$$

β. Από το κατάλληλο διάγραμμα του σχήμα 2.10 είναι  $ZZ2 = 0,10$

$$\therefore \sigma_{z2} = p(ZZ2) = 80(0,10) = 8,0 \text{ psi}$$

γ. Αφού οι συντελεστές οριζόντιας τάσης του Πίνακα 1.3 δεν δίνουν τιμή για  $\alpha_1(A) = 0,5$ , η τιμή αυτή απαιτεί παρεμβολή. Ο ακόλουθος πίνακας παριστάνει τη σειρά εργασιών για τον υπολογισμό του  $\sigma_{r1}$ . Η τιμή του  $\sigma_{r1}$  μπορεί να προσδιορισθεί με παρεμβολή. Με την μέθοδο αυτή προκύπτουν  $\sigma_{r1} = 315 \text{ psi}$ ,  $\sigma_{r2} = 9,0 \text{ psi}$  και  $\sigma_{r3} = -1,0 \text{ psi}$ .

$\alpha_1 (A)$	$(ZZ1 - RR1)$	$\sigma_{z1} - \sigma_{r1}$	$\sigma_{r1}$
0,1	0,63215	50,57	-13,0 psi
0,2	1,83766	147,01	-109,4 psi
0,4	3,86779	309,42	-271,8 psi
0,8	5,50796	440,64	-403,0 psi
1,6	4,24281	339,42	-301,8 psi
3,2	1,97494	157,00	-120,4 psi

δ. Γνωρίζοντας τα  $\sigma_{r1}$  και  $\sigma_{z2}$

$$\epsilon_{r1} = \frac{1}{2E_1} [\sigma_{r1} - \sigma_{z1}] = \frac{1}{2(600.000)} [-315 - 37,6]$$

$$= -2,938 \times 10^{-4} \text{ ίντσες/ίντσα}$$

ή επιμήκυνση 294 μικροΐντσες/ίντσα

ε. Γνωρίζοντας τα  $\sigma_{z2}$  και  $\sigma_{r3}$

$$\epsilon_{r3} = \frac{1}{E_3} [\sigma_{z2} - \sigma_{r3}] = \frac{1}{15.000} [8 - (-1)]$$

$$= 6,000 \times 10^{-4} \text{ ίντσες/ίντσα}$$

ή συστολή 600 μικροΐντσες/ίντσα.

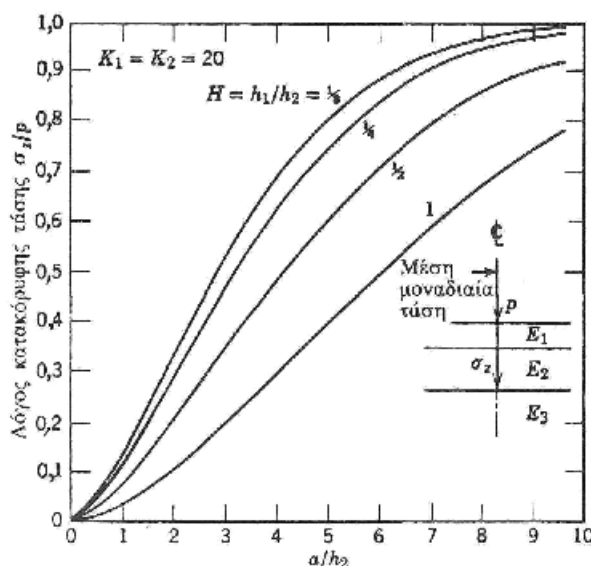
### 1.3. Βασικές έννοιες σχεδιασμού

Στο κεφάλαιο αυτό ασχοληθήκαμε μέχρι τώρα με το μηχανισμό καθορισμού διαφόρων τάσεων, παραμορφώσεων, και υποχωρήσεων, μέσα σε ένα οδόστρωμα πολλαπλών στρώσεων. Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να δειχθεί πώς μία γενική

ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών των ελαστικών στρώσεων μπορεί να οδηγήσει στην κατανόηση των βασικών αρχών σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Τα παραδείγματα που ακολουθούν είναι κάπως απλοποιημένα λόγω του μεγάλου αριθμού συνδυασμών των μεταβλητών  $A$ ,  $H$ ,  $K_1$  και  $K_2$ . Η δυνατότητα όμως της θεωρίας πολλαπλών στρώσεων να δίνει ποσοτική εκτίμηση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων, όταν το γεωμετρικό σχήμα της στρώσης του οδοστρώματος και τα χαρακτηριστικά του υλικού μεταβάλλονται, μας δείχνει τις αρχές που θα σχηματίσουν τον πυρήνα, κάθε μελλοντικής μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων.

### 1.3.1. Τάσεις του υπεδάφους

Το σχήμα 1.11 δείχνει την επίδραση που έχει η μεταβολή του πάχους της στρώσης του οδοστρώματος πάνω στο συντελεστή κατακόρυφης καταθλιπτικής τάσης σε ένα σύστημα οδοστρώματος τριών στρώσεων. Όπως φαίνεται, η τάση υπεδάφους ελαττώνεται σημαντικά με την ελάττωση της παραμέτρου  $A$  ( $d/h_2$ ). Αυτό υπονοεί ότι για ένα ορισμένο φορτίο (ακτίνα επαφής  $a$ ) η ελάττωση αυτή επιτυγχάνεται με μία ελάττωση του πάχους της βασικής στρώσης.



**Σχήμα 1.11. Λόγος κατακόρυφης τάσης στη δεύτερη διαχωριστική επιφάνεια ενός συστήματος τριών στρώσεων σαν συνάρτηση  $a/h_2$  και  $h_1/h_2$  (κατά Nelson).**



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

Μία άλλη αποτελεσματική μέθοδος της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης του υπεδάφους είναι η αύξηση της δυσκαμψίας των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος ( $K_1$  και  $K_2$ ). Σε ένα σύστημα στρώσεων η κύρια επίδραση πάνω στην τάση εξασκείται από τη δυσκαμψία της στρώσης που είναι ακριβώς πάνω από το υπέδαφος. Έτσι σε ένα σύστημα τριών στρώσεων το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  της βασικής στρώσης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση της τάσης, ενώ το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  επηρεάζει την τάση του υπεδάφους σε συστήματα δύο στρώσεων. Το γεγονός γίνεται φανερό στο σχήμα 1.6 που δείχνει την ικανότητα εξάπλωσης φορτίου των δύσκαμπτων ή μεγάλου μέτρου ελαστικότητας στρώσεων οδοστρώματος. Άρα για να ελαττωθεί η τάση του υπεδάφους μέχρι κάποια ανεκτά όρια, πρέπει ή να αυξηθεί το πάχος της βασικής στρώσης και το πάχος της επιφανειακής στρώσης του ίδιου υλικού στρώσεων ή να αντικατασταθεί το υλικό στρώσεων με ένα πιο δύσκαμπτο υλικό.

### 1.3.2. Βέλος Κάμψης

Ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος, το ποσοστό του ολικού βέλους κάμψης της επιφάνειας που συνεισφέρει η στρώση του υπεδάφους είναι περίπου 70% έως 95%. Μπορεί, λοιπόν, να υποθεθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος του βέλους κάμψης οφείλεται στην ελαστική σύνθλιψη της στρώσης του υπεδάφους. Τα βέλη κάμψης είναι απλά η μαθηματική ολοκλήρωση της κατακόρυφης παραμόρφωσης με το βάθος. Εφόσον το μέγεθος της παραμόρφωσης, για ένα ορισμένο σημείο σε ένα δεδομένο υλικό, είναι μία απευθείας συνάρτηση τριαξονικής τάσης, συνάγεται ότι οι ίδιοι γενικοί παράγοντες που τείνουν να ελαττώνουν την κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση του υπεδάφους τείνουν, επίσης, να ελαττώνουν το βέλος κάμψης του οδοστρώματος. Για παράδειγμα και με αναφορά στο σχήμα 1.7, μία αύξηση είτε του πάχους  $h_1$  του οδοστρώματος είτε της δυσκαμψίας της στρώσης  $E_1$  του οδοστρώματος, προκαλεί μία μείωση του βέλους κάμψης. Γενικά, γίνεται φανερό ότι μία μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας ή τη δυσκαμψία της στρώσης του οδοστρώματος παρά με την αύξηση του πάχους της.

### 1.3.3. Διατμητική τάση

Προηγούμενα στο κεφάλαιο αυτό ασχοληθήκαμε με το πώς μπορούμε να ελαττώσουμε τις τάσεις του υπεδάφους και τις υποχωρήσεις του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας πιο δύσκαμπτες ανώτερες στρώσεις ή και αυξάνοντας το πάχος τους.

Αυτό είναι και επιδίωξη μας στο σχεδιασμό, γιατί ελαχιστοποιεί την καταπόνηση που συνδέεται με διάτμηση του υπεδάφους και συμπύκνωση λόγω φορτίων. Καθώς, όμως, οι ανώτερες στρώσεις γίνονται πιο δύσκαμπτες και παρέχουν αυξημένη ικανότητα εξάπλωσης φορτίων, το όφελος αυτό συνεπάγεται αναπόφευκτα αύξηση της διατμητικής τάσης στη δύσκαμπτη στρώση.

Σε ένα οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο ενός οδοστρώματος πολλαπλών στρώσεων, η μέγιστη οριζόντια διατμητική τάση τη δημιουργείται ακριβώς πάνω από την άκρη της φορτισμένης πλάκας. Η τιμή του  $\tau_{tz}$  είναι μηδέν ακριβώς κάτω από το κεντρικό άξονα της πλάκας και τείνει, επίσης, στο μηδέν, καθώς η ακτινική απόσταση από τον άξονα αυξάνεται.

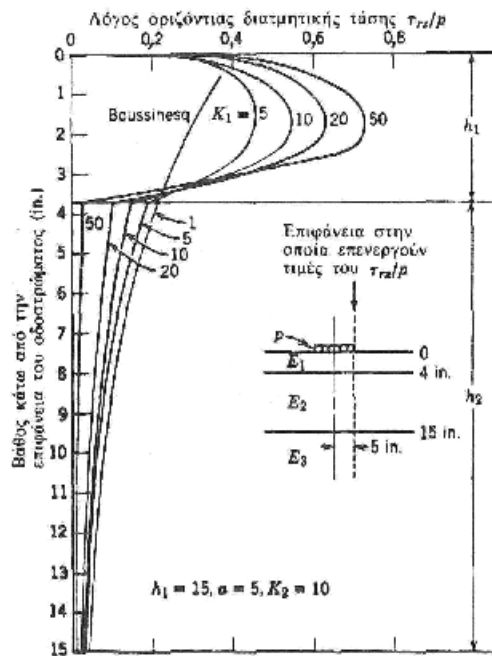
Το σχήμα 1.12 παριστάνει τον παράγοντα οριζόντιας διατμητικής τάσης σαν συνάρτηση του βάθους κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος σε ένα επίπεδο που διέρχεται από την άκρη της πλάκας για διάφορες τιμές του  $K_1$ .

Πολλοί παράγοντες μπορούν να διακριθούν καθώς το μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας αυξάνεται (αύξηση του  $K_1$ ).

Το μέγεθος του  $\tau_{tz}$  αυξάνεται πολύ στην ανώτερη στρώση, καθώς γίνεται πιο δύσκαμπτη. Η αύξηση αυτή φαίνεται και για την θεωρία Boussinesq, ή μιας στρώσης. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του  $\tau_{tz}$  στο οδόστρωμα εμφανίζεται περίπου στο μισό βάθος της επιφανειακής στρώσης.

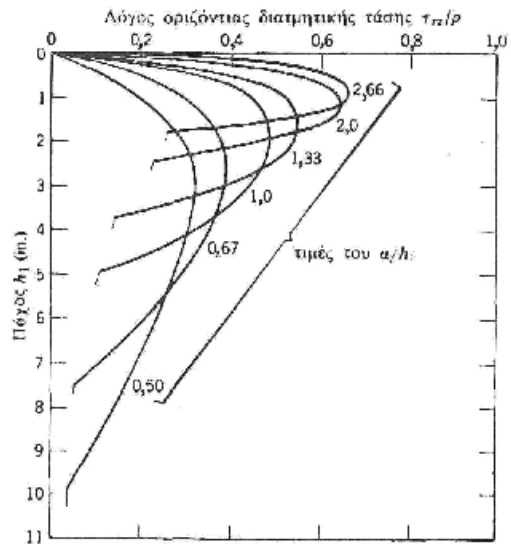
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η οριζόντια διατμητική τάση στην πρώτη διαχωριστική επιφάνεια ελαττώνεται για μεγαλύτερους λόγους μέτρων ελαστικότητας  $K_1$ .

Το πάχος της επιφανειακής στρώσης παίζει επίσης μεγάλο ρόλο στο μέγεθος της διατμητικής τάσης. Το σχήμα 1.13 δείχνει πως εμφανίζεται αυτή η επίδραση. Για ορισμένους λόγους μέτρων ελαστικότητας  $K_1$  και  $K_2$  είναι φανερό ότι καθώς το πάχος  $h_1$  της επιφανειακής στρώσης αυξάνεται, το μέγεθος της διατμητικής τάσης ελαττώνεται. Επίσης, καθώς το  $h_1$  αυξάνεται, η θέση της μέγιστης τιμής μετατοπίζεται προς τα πάνω από το μισό του πάχους της στρώσης στο ένα τρίτο περίπου.



**Σχήμα 1.12. Τυπική κατανομή διατμητικών τάσεων σε ένα σύστημα τριών στρώσεων (κατά Nielson).**

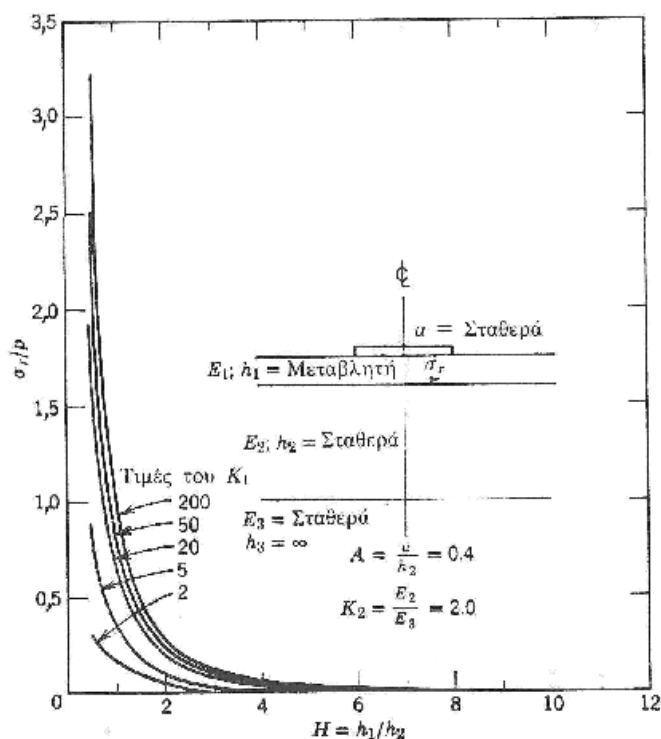
**Σχήμα 1.13. Επίδραση του  $\alpha/h$  στο βάθος και μέγεθος του ( $\tau_{rz}$ ) για  $\alpha = 5$  ίντσες και  $K_1=K_2=-20$  (κατά Nielson).**



#### 1.3.4. Εφελκυστική τάση

Μία άλλη σημαντική θεώρηση σε συστήματα στρώσεων είναι η τάση ανάπτυξης μεγάλων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της δύσκαμπτης στρώσης. Το σχήμα 1.14 απεικονίζει τους κύριους παράγοντες, που επηρεάζουν αυτήν την παράμετρο. Γενικά, οι πιο κρίσιμοι παράγοντες είναι ένας μεγάλος λόγος  $K_1$  μέτρων ελαστικότητας και μία μικρή παράμετρος  $H$ . Όπως φαίνεται επιφανειακές στρώσεις με

$H < 2$  και μεγάλη τιμή  $K_1$  είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στην ανάπτυξη μεγάλων εφελκυστικών τάσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι μία μέγιστη εφελκυστική τάση εμφανίζεται σε κάποια χαμηλή τιμή  $H$  και ότι μία επακόλουθη μείωση της παραμέτρου αυτής προς το μηδέν θα μετατρέψει την οριζόντια εφελκυστική τάση σε θλιπτική.

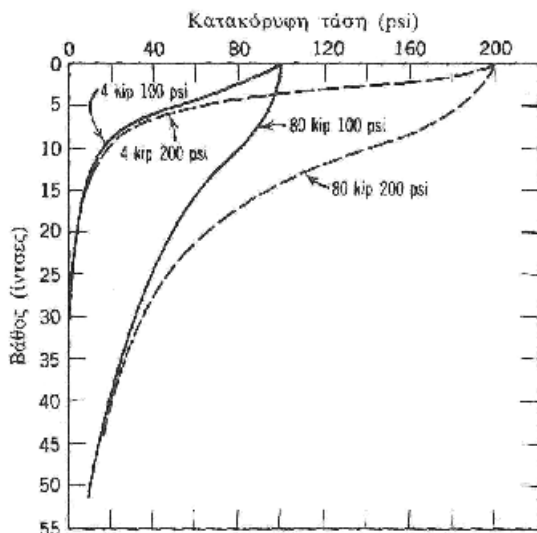


**Σχήμα 1.14. Λόγος οριζόντιας εφελκυστικής τάσης στον πυθμένα της πρώτης στρώσης ενός συστήματος τριών στρώσεων σαν συνάρτηση των  $K_1$  και  $H$ .**

### 1.3.5. Επίδραση της Πίεσης Ελαστικού και Ολικού Φορτίου

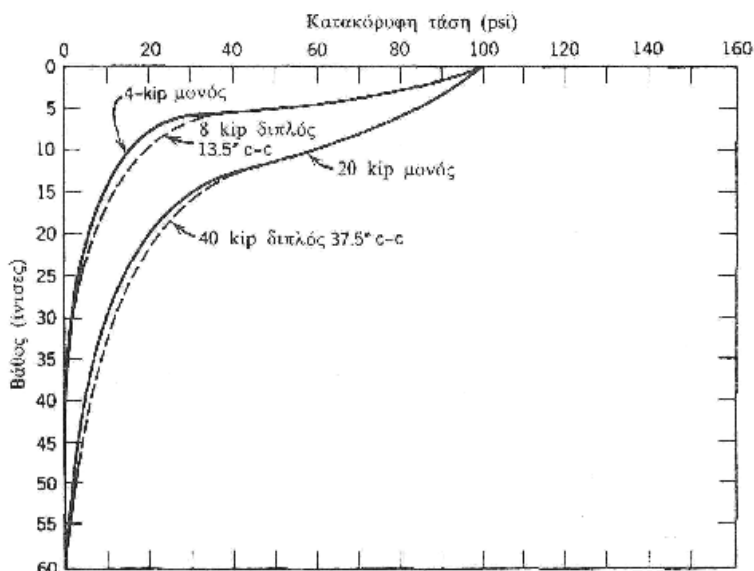
Το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης σε ένα σημείο λόγω φορτίου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, εξαρτάται από την πίεση αλλά και από το μέγεθος του συνολικού φορτίου. Το σχήμα 1.15 και 1.16 παριστάνουν τις κατακόρυφες τάσεις κατά Boussinesq σε μία ιδανική εδαφική μάζα λόγω διαφόρων συνδυασμών πίεσης ελαστικού και συνολικού φορτίου. Στο σχήμα 1.15 μία καμπύλη είναι για πίεση ελαστικού 100 psi και απλό φορτίο 80.000 lb. Ακόμη παριστάνεται η κατακόρυφη τάση για το ίδιο φορτίο τροχού αλλά για πίεση 200 psi. Όπως φαίνεται στις καμπύλες η επίδραση της μεγάλης πίεσης ελαστικού είναι έντονη στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος, ενώ σε ένα βάθος 36 ιντσών περίπου οι τάσεις είναι περίπου ίσες και στις δύο περιπτώσεις. Έτσι υψηλές πιέσεις ελαστικού απαιτούν υψηλή ποιότητα υλικών στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος, αλλά το απαιτούμενο ολικό πάχος του

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



**Σχήμα 1.15. Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης με το βάθος. Πρόβλημα Boussinesq.**

Το σχήμα 1.16 παριστάνει την επίδραση δίδυμων τροχών στις τάσεις για σταθερή πίεση ελαστικού. Οι πιέσεις στην επιφάνεια δεν επηρεάζονται από τη διάταξη των τροχών και είναι ίσες με την εφαρμοζόμενη πίεση ελαστικού. Οι δίδυμοι τροχοί, όμως, συνεπάγονται αυξημένες τάσεις σε μεγαλύτερα βάθη όπως και άξονες εν σειρά, όταν οι βολβοί τάσεων των ελαστικών επικαλύπτονται.



**Σχήμα 1.16. Επίδραση του αριθμού των τροχών στην κατακόρυφη τάση. Πρόβλημα Boussinesq.** Παρατηρήσεις (1) Όλα τα ελαστικά έχουν πίεση 100 psi. (2) Το βάθος στο οποίο η αλληλεπίδραση των διπλών τροχών είναι σημαντική είναι περίπου ίση με το μισό της απόστασης ανάμεσα στους τροχούς. (3) Το βάθος στο οποίο οι διπλοί τροχοί θα ενεργήσουν σαν μονός τροχός είναι περίπου διπλάσιος από την απόσταση των κέντρων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## Δύσκαμπα οδοστρώματα

### 2.1. Γενικά

Ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από μία σχετικά λεπτή πλάκα διαστρωμένη σε υπεδάφος ή στρώση βάσης. Εφόσον το μέτρο ελαστικότητας της πλάκας μπετόν είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του υλικού θεμελίωσης, ένα μεγάλο μέρος της φέρουσας αντοχής οφείλεται στην ίδια την πλάκα. Αυτό συχνά χαρακτηρίζεται σαν «ενέργεια δοκού».

Οι τάσεις στα δύσκαμπα οδοστρώματα οφείλονται σε διάφορες αιτίες, όπως φορτία τροχών, περιοδικές μεταβολές θερμοκρασίας και ογκομετρικές μεταβολές του υπεδάφους ή της στρώσης βάσης. Οι μεταβολές αυτές τείνουν να παραμορφώνουν την πλάκα, προκαλώντας τάσεις με μεγάλη διακύμανση της έντασης τους. Επιπλέον, το μέγεθος των τάσεων εξαρτάται από τη συνέχεια της στήριξης του υπεδάφους. Η απόλυτη συνέχεια μπορεί να διαταραχθεί από ανάβλυση και πλαστική παραμόρφωση του υπεδάφους.

Είναι προφανές ότι οι παράγοντες που προκαλούν τις τάσεις είναι τελείως περίπλοκοι. Σε μερικές περιπτώσεις δεν μπορούν να εκτιμηθούν εκτός αν γίνουν απλουστευτικές παραδοχές. Έτσι, στη μαθηματική ανάλυση γίνονται ορισμένες παραδοχές αναφορικά με τη συνέχεια και την ελαστικότητα. Φυσικά δεν είναι δυνατόν να περιληφθούν όλες οι ενδεχόμενες συνθήκες, ειδικά εκείνες που προκύπτουν από μόνιμη παραμόρφωση του μέσου στήριξης. Οι ρηγματωμένες σε μεγάλο βαθμό πλάκες δεν μπορούν να παραλάβουν φορτία παρουσιάζοντας κάμψη και έτσι τείνουν προς τις συνθήκες «ευκαμψίας».

Κατά την ανάλυση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, οι παράγοντες που προκαλούν τις τάσεις μπορούν να καταταγούν σε διάφορες πλατειές κατηγορίες όπως (1) παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασίας και υγρασίας, (2) εξωτερικά φορτία, (3) μεταβολές όγκου του υλικού στήριξης όπως η επίδραση παγετού και (4) συνέχεια της στήριξης του υπεδάφους όπως επηρεάζεται από μόνιμες παραμορφώσεις του υπεδάφους ή από την απώλεια της αντοχής λόγω ανάβλυσης.



**Σχήμα 2.1. Καμπτική παραμόρφωση δοκού πάνω σε ελαστικό υπόστρωμα**

## 2.2. Καμπύλωση και τάσεις λόγω κάμψης

Για να περιγράψουμε τις οριακές συνθήκες, θεωρούμε πρώτα την απλή περίπτωση μιας δοκού που στηρίζεται πάνω σε ελαστικό υπόστρωμα. Το σχήμα 2.1 δείχνει τις δυνάμεις και τις παραμορφώσεις που εξετάζονται στην περίπτωση αυτή. Γίνεται η υπόθεση ότι πίεση της αντίδρασης είναι ανάλογη με την παραμόρφωση δηλαδή  $p = ky$ . Ο όρος κλέγεται μέτρο αντίδρασης υπεδάφους. Οι μονάδες του  $k$  είναι λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα ανά ίντσα βέλους κάμψης ή απλά λίβρες ανά κυβική ίντσα ( $\text{pci}$ ). Η παραδοχή ότι το  $k$  είναι σταθερό, σημαίνει ελαστικό υπέδαφος. Όμως η υπόθεση αυτή ισχύει μόνον σε στενά όρια. Η αριθμητική τιμή του  $k$  εξαρτάται από την υφή, πυκνότητα και υγρασία του εδάφους και από άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του εδάφους.

Καθώς η φορτισμένη δοκός του σχήμα 2.1 κάμπτεται, προκαλεί στο υπέδαφος την ανάπτυξη πίεσης ανάλογης με το βέλος κάμψης. Πρέπει να γίνει η παραδοχή ότι οι πιέσεις αντίδρασης είναι κατακόρυφες μόνο. Δυνάμεις τριβής βεβαίως αναπτύσσονται αλλά τις αγνοούμε. Δοκιμές έχουν δείξει, επίσης, ότι το μέτρο αντίδρασης υπεδάφους μεταβάλλεται ανάλογα με τις διαστάσεις της φορτισμένης επιφάνειας, καθώς και το μέγεθος της παραμόρφωσης. Αν και στην πραγματικότητα μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες της δοκιμής, μικρές διακυμάνσεις της τιμής του  $k$  δεν έχουν μεγάλη σημασία και στην πράξη μία μέση τιμή χρησιμοποιείται σε μερικά προβλήματα.

Οι τιμές του  $k$  προσδιορίζονται συνήθως στο πεδίο με τη βοήθεια μιας δοκιμής φορτιζόμενης πλάκας. Επειδή οι τιμές που προκύπτουν ποικίλλουν, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στις δοκιμές, χρησιμοποιείται γενικά μία πλάκα διαμέτρου 30 ιντσών. Η τιμή της αντίδρασης του υπεδάφους υπολογίζεται για ένα ορισμένο φορτίο πάνω στην πλάκα, 10  $\text{pci}$ .

Διάφορες εργασίες στο πεδίο της μηχανικής των υλικών έχουν αποδείξει ότι, για δοκούς, η σχέση ανάμεσα σε ροπή και ακτίνα καμπυλότητας είναι:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad 2.1$$

Αναγνωρίζεται ότι, αν δύο δοκοί παρουσιάζουν ίσα βέλη κάμψης, αλλά με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας, η δοκός με τη μικρότερη ακτίνα υπόκειται σε μεγαλύτερη τάση. Έτσι για ίσα βέλη κάμψης σκληρά υπεδάφη προκαλούν μεγαλύτερες τάσεις σε οδοστρώματα από μπετόν από ότι μαλακότερα εδάφη λόγω διαφορετικών ακτινών καμπυλότητας.

Αν θεωρηθεί ένα στοιχείο της δοκού που φαίνεται στο σχήμα 2.1 είναι:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = - \frac{d^2M}{dx^2} \quad 2.2$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = - ky + q \quad 2.3$$

Η εξίσωση 2.3 είναι η διαφορική εξίσωση ελαστικής γραμμής δοκού πάνω σε ελαστικό υπόστρωμα. Είναι σκόπιμο να υπενθυμίσουμε τις παραδοχές που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους και τη συνέχεια της στήριξης του υπεδάφους.

### 2.3. Σχετική δυσκαμψία πλακών

Μία φορτισμένη πλάκα από μπετόν παραμορφώνεται με ένα χαρακτηριστικό τρόπο σε σχήμα πιάτου που εξαρτάται από την θέση, το μέγεθος και την επιφάνεια επαφής του φορτίου πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η αντίσταση στην παραμόρφωση εξαρτάται από τη δυσκαμψία του υπεδάφους καθώς και της πλάκας.

Η εξίσωση 2.4 είναι η βασική σχέση που συνδέει τη ροπή κάμψης με τις ιδιότητες της δοκού και τις συντεταγμένες x και y. Η εξίσωση 2.5 είναι η έκφραση της εξίσωσης για μία πλάκα.

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad 2.4$$



$$M_x = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \frac{d^2w}{dx^2} \quad 2.5$$

Στην εξίσωση 2.4 ο όρος EI καλείται δυσκαμψία της δοκού, ενώ για την πλάκα ο όρος δυσκαμψίας είναι το τμήμα της εξίσωσης 2.5 που καλείται D και είναι:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \quad 2.6$$

Η σχετική δυσκαμψία της πλάκας και του υπεδάφους σύμφωνα με τον Westergaard ορίζεται όπως στην εξίσωση 2.7. Ονομάζεται ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας, έχει γραμμικές διαστάσεις και εξαρτάται από τις ιδιότητες και της πλάκας αλλά και του υπεδάφους.

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad 2.7$$

όπου I= ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας (in.)

E = μέτρο ελαστικότητας του οδοστρώματος (psi)

H = πάχος του οδοστρώματος (in.)

μ = λόγος του Poisson του οδοστρώματος

A = μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους (pci)

Η ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας παρουσιάζεται σε πολλές εξισώσεις σχετικές με τάσεις και παραμόρφωση οδοστρωμάτων από μετόν. Τιμές της ακτίνας σχετικής δυσκαμψίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

#### 2.4. Μέτρο αντίδρασης υπεδάφους

Η σταθερά που χαρακτηρίζει το υπέδαφος σε κλασικές εργασίες δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το μέτρο αντίδρασης υπεδάφους

$$p = k\Delta$$

k = μέτρο αντίδρασης υπεδάφους (pci)

p = πίεση αντίδρασης (psi)

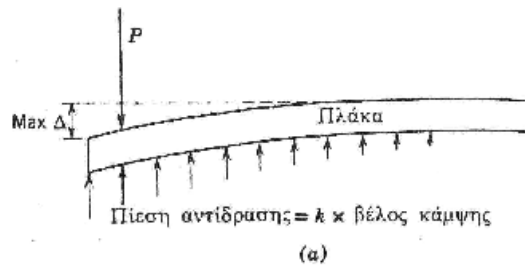
Δ = βέλος κάμψης της πλάκας (in.)

2.8

**Πίνακας 2.1. Ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας (μ = 0,15 E = 4.000.000 psi)**

( $\mu = 0,15$   $E = 4.000.000$  psi)

$h$ (in.)	$k = 50$	$k = 100$	$k = 200$	$k = 300$	$k = 400$	$k = 500$
9,0	47,22	39,71	33,39	30,17	28,08	26,55
9,5	49,17	41,35	34,77	31,42	29,24	27,65
10,0	51,10	42,97	36,14	32,65	30,39	28,74
10,5	53,01	44,57	37,48	33,87	31,52	29,81
11,0	54,89	46,16	38,81	35,07	32,64	30,87
11,5	56,75	47,72	40,13	36,26	33,74	31,91
12,0	58,59	49,27	41,43	37,44	34,84	32,95
12,5	60,41	50,80	42,72	38,60	35,92	33,97
13,0	62,22	52,32	43,99	39,75	36,99	34,99
14,0	65,77	55,31	46,51	42,02	39,11	36,99
15,0	69,27	58,25	48,98	44,26	41,19	38,95
16,0	72,70	61,13	51,41	46,45	43,23	40,88
17,0	76,08	63,98	53,80	48,61	45,24	42,78
18,0	79,41	66,78	56,16	50,74	47,22	44,66
19,0	82,70	69,54	58,48	52,84	49,17	46,51
20,0	85,95	72,27	60,77	54,92	51,10	48,33
21,0	89,15	74,97	63,04	56,90	53,01	50,13
22,0	92,31	77,63	65,28	58,98	54,89	51,91
23,0	95,44	80,26	67,49	60,98	56,75	53,67
24,0	98,54	82,86	69,68	62,96	58,59	55,41



Σχήμα 2.2. Βασικές παραδοχές της συμπεριφοράς υπεδάφους.

Το σχήμα 2.2 απεικονίζει την αρχή ότι η πίεση αντίδρασης είναι ανάλογη με το βέλος κάμψης. Η τιμή του  $k$  προσδιορίζεται με τη βοήθεια της δοκιμής της φορτισμένης πλάκας. Οι μονάδες του  $k$  είναι λίβρες ανά κυβική ίντσα ( $\text{pci}$ ). Η παραδοχή σχετικά με το  $k$  ισχύει μόνον εφόσον η πλάκα βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με το υπέδαφος. Ο όρος  $k$  ονομάζεται συχνά «σταθερά ελατηρίου» ή «σταθερά πυκνού υγρού».

## 2.5. Διαφορές θερμοκρασίας

Οι δοκιμές έχουν δείξει ότι οι μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας εμφανίζονται την ημέρα κατά τους μήνες της άνοιξης και του καλοκαιριού. Κατά την άνοιξη το υπέδαφος είναι δροσερό και η πλάκα που είναι εκτεθειμένη στον ήλιο ζεσταίνεται γρηγορότερα από το υπέδαφος. Κατά τους θερινούς μήνες, η πλάκα κρυώνει κατά τη νύχτα και η επιφάνεια της θερμαίνεται κατά την ημέρα. Οι μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας για πλάκες πάχους 6 και 9 ιντσών προσεγγίζουν 21/2 έως 3 βαθμούς ανά ίντσα πλάκας. Οι αριθμοί αυτοί θα χρησιμοποιηθούν στο κείμενο αυτό. Για τις νύχτες οι τιμές αυτές ίσως είναι πολύ μεγάλες.

Οι πραγματικές διαφορές θερμοκρασίας εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος. Αν η γωνία πτώσης των ηλιακών ακτινών πάνω στο οδόστρωμα είναι μεγάλη, η θερμοκρασία του οδοστρώματος είναι επίσης μεγάλη. Το χρώμα της πλάκας (π.χ. καινούργια επίστρωση) έχει επίσης κάποια επίδραση.

### 2.5.1. Τάσεις λόγω κύρτωσης

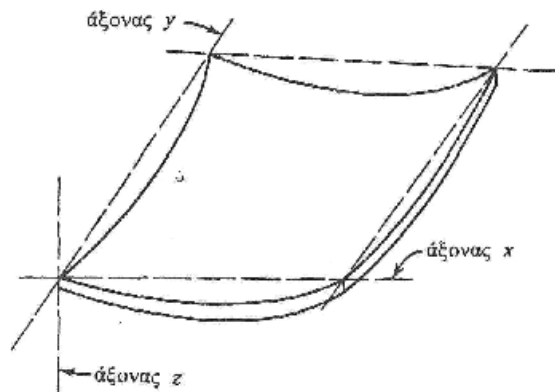
Όταν μία πλάκα οδοστρώματος υπόκειται σε θερμοκρασία που ποικίλλει με το βάθος της, η επιφάνεια της τείνει να κυρτώνεται (σχήμα 2.3). Η τάση για κύρτωση περιορίζεται από το βάρος της ίδιας της πλάκας. Αν π.χ. η επιφάνεια της πλάκας είναι πιο κρύα από τον πυθμένα της τότε οι γωνίες τείνουν να συστραφούν προς τα πάνω, αλλά το βάρος του μπετόν τείνει να κρατήσει την πλάκα στην αρχική της θέση με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τάσεις μέσα στην πλάκα. Η ανάλυση των τάσεων με δύσκαμπτες πλάκες βασίζεται σε μία εργασία του Westergaard. Οι εξισώσεις που παριστάνουν την κυρτωμένη επιφάνεια στο σχήμα 2.3 είναι οι ακόλουθες:

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{12}{Eh^3} (M_x - \mu M_y) + \frac{\epsilon_i \Delta t}{h} \quad 2.9$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{12}{Eh^3} (M_y - \mu M_x) + \frac{\epsilon_i \Delta t}{h} \quad 2.10$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{12}{Eh^3} (1 + \mu) M_x \quad 2.11$$

Θεωρώντας τάσεις κύρτωσης που προκαλούνται από θερμοκρασιακές διαφορές μέσα σε μία πλάκα, ο Westergaard κατάστρωσε εξισώσεις για τρεις περιπτώσεις. Για την περίπτωση 1, η πλάκα υποτίθεται ότι τείνει στο άπειρο και στις δύο διευθύνσεις x και y, για την περίπτωση 2 η πλάκα υποτίθεται ότι τείνει στο άπειρο στις διευθύνσεις y και  $\pm x$ , και για την περίπτωση 3 η πλάκα υποτίθεται ότι τείνει στο άπειρο στις διευθύνσεις  $\pm x$  με πεπερασμένο πλάτος b. Οι τάσεις για τις περιπτώσεις 2 και 3 διατυπώνονται με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων της περίπτωσης 1.



**Σχήμα 2.3. Καμπύλωση ελαστικής επιφάνειας λόγω θερμοκρασιακής κύρτωσης.**

Για την περίπτωση που η πλάκα εκτείνεται στο άπειρο στις διευθύνσεις x και y, σε κάποια απόσταση από την άκρη το Z πρέπει να είναι ίσο με μηδέν.

$$M_x = M_y = -\frac{Eh^2 \epsilon_i \Delta t}{12(1 - \mu)} \quad M_z = 0 \quad 2.12$$

Διαιρώντας με τη ροπή αντίστασης της διατομής, η τάση είναι:

$$\sigma_0 = \frac{E\epsilon_t \Delta t}{2(1 - \mu)} \quad 2.13$$

Αν η μία άκρη της πλάκας είναι στον άξονα  $x$  και η πλάκα εκτείνεται στο άπειρο κατά τις διευθύνσεις  $y$  και  $\pm x$ , τότε το βέλος κάμψης που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μέσα στην πλάκα είναι συνάρτηση του  $y$  μόνο. Απαλείφοντας το  $M_x$  η εξίσωση 2.14 γίνεται:

$$M_y = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \left( -\frac{d^2z}{dy^2} - \frac{(1 + \mu)\epsilon_t \Delta t}{h} \right) \quad 2.14$$

Και σε ισορροπία η δεύτερη παράγωγος της ροπής ως προς  $y$  είναι ίση με:

$$\frac{d^2M_y}{dy^2} = -kz \quad 2.15$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές από την εξίσωση 2.14:

$$\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \frac{d^4z}{dy^4} + kz = 0 \quad 2.16$$

Αντικαθιστώντας την ακτίνα σχετικής ακαμψίας  $l$  στην εξίσωση 2.16:

$$l^4 \frac{d^4z}{dy^4} + z = 0 \quad 2.17$$

Στην κατάσταση αυτή, οι συναρτήσεις των  $Z$  και  $dz/dy$  συγκλίνουν προς το μηδέν όταν το  $y$  αυξάνεται και στην άκρη όπου το  $y$  είναι ίσο με το μηδέν, η ροπή κάμψης και η κατακόρυφη διατμητική τάση πρέπει και αυτές να είναι ίσες με το μηδέν. Οι εφελκυστικές τάσεις στην επιφάνεια της πλάκας στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  είναι:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[ 1 - \sqrt{2} \sin \left( \frac{y}{l\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-y/(l\sqrt{2})} \right] \quad 2.18$$

$$\sigma_x = \sigma_0 \left[ 1 - \mu \sqrt{2} \sin \left( \frac{y}{l\sqrt{2}} + \frac{\pi}{4} \right) e^{-y/(l\sqrt{2})} \right] \quad 2.19$$

Θεωρώντας μία πλάκα πεπερασμένου πλάτους  $b$ , τα άκρα έχουν εξισώσεις  $y = \pm(b/2)$ . Η τάση στην επιφάνεια της πλάκας κατά τη διεύθυνση  $y$  είναι:

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\sin 2\lambda \sinh 2\lambda} \left( (\tan \lambda + \tanh \lambda) \cos \frac{y}{l\sqrt{2}} \cosh \frac{y}{l\sqrt{2}} + (\tan \lambda - \tanh \lambda) \sin \frac{y}{l\sqrt{2}} \sinh \frac{y}{l\sqrt{2}} \right) \right] \quad 2.20$$

όπου  $\lambda = b/l \sqrt{B}$ .

Η αντίστοιχη τάση στη διεύθυνση x είναι:

$$\sigma_x = \sigma_0 + \mu(\sigma_y - \sigma_0) \quad 2.21$$

Ο Bradbury χρησιμοποίησε αυτές τις έννοιες και κατέληξε σε συντελεστές για τη λύση του προβλήματος. Οι συντελεστές φαίνονται στο σχήμα 2.4 και χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες εξισώσεις:

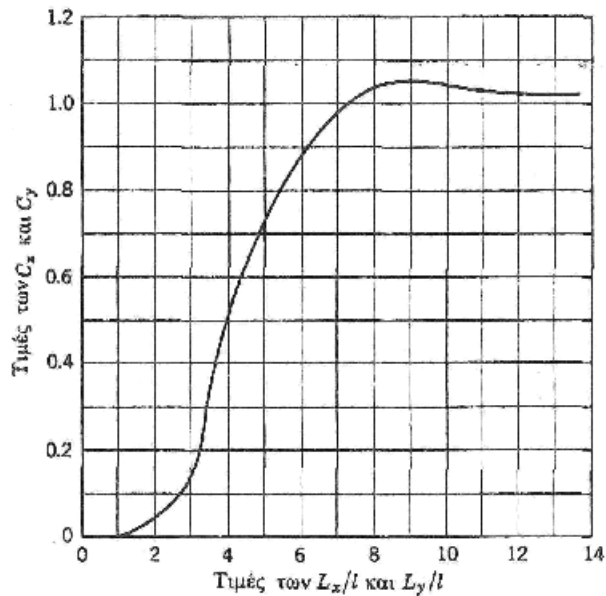
Τάσεις άκρων:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon_1 \Delta t}{2} \left( \frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right) \quad 2.22$$

Εσωτερικές τάσεις:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon_1 \Delta t}{2} \left( \frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right) \quad 2.23$$

Ο συντελεστής  $C_1$  είναι κατά την επιθυμητή διεύθυνση ενώ ο  $C_2$  είναι για τη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση αυτή.  $L_x$  και  $L_y$  είναι το ελεύθερο μήκος και ελεύθερο πλάτος αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.4. Συντελεστές τάσεων κύρτωσης (κατά Bradbury)**

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.1.** Να προσδιοριστεί η τάση κύρτωσης για ένα οδόστρωμα από μπετόν πάχους 10 ιντσών με αρμούς διαστολής ανά 40 πόδια και πλάτος λωρίδας 12 πόδια. Το μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους είναι 100 psi (λίβρες ανά κυβική ίντσα). Οι διαφορές θερμοκρασίας κατά την ημέρα είναι 3°F ανά ίντσα βάθους.

Οι εσωτερικές τάσεις είναι:

$$\frac{4.000.000(0,000005)(30)}{2} \left[ \frac{1,05 + 0,15(0,25)}{1 - 0,15^2} \right] = 365 \text{ psi}$$

Οι κατά μήκος της άκρης τάσεις είναι

$$\frac{1,05(4.000.000)(0,000005)(30)}{2} = 315 \text{ psi}$$

Ανάλογα με τη θέση του εξωτερικού φορτίου την ώρα της ημέρας, οι τάσεις κύρτωσης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες, ώστε να προκαλέσουν βλάβη της πλάκας. Νωρίς το πρωί η πλάκα είναι κρύα στην επιφάνεια και θερμή στον πυθμένα και οι γωνίες της πλάκας τείνουν να συστραφούν προς τα επάνω. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού φορτίου στη γωνία της πλάκας σ' αυτή την ώρα της ημέρας προκαλεί τάσεις φόρτισης που προστίθενται στις τάσεις κύρτωσης, ενώ εφαρμογή του ίδιου φορτίου στο κέντρο της πλάκας προκαλεί τάσεις φόρτισης που αφαιρούνται από τις τάσεις

κύρτωσης. Σε μερικές περιπτώσεις οι τάσεις κύρτωσης υπερβαίνουν τις τάσεις που προκαλούνται από τα εξωτερικά φορτία.

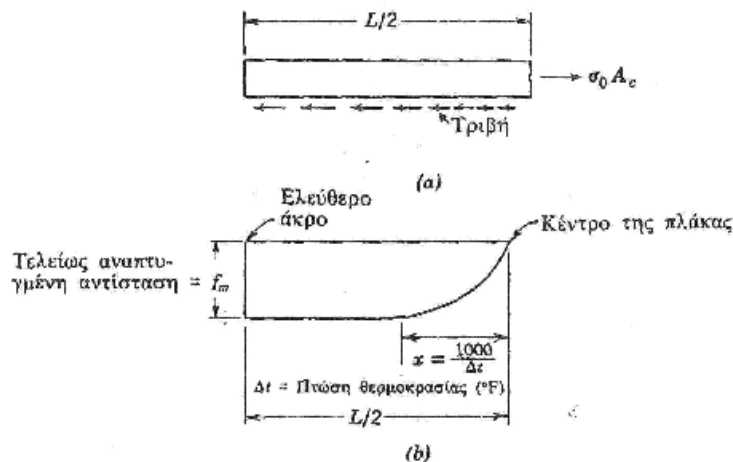
## 2.6. Τάσεις λόγω τριβής

Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα οι τάσεις αναπτύσσονται επίσης σαν αποτέλεσμα ομοιόμορφων θερμοκρασιακών μεταβολών που προκαλούν συστολές ή διαστολές της πλάκας. Αν μία πλάκα κρυώσει ομοιόμορφα, μία ρωγμή εμφανίζεται γενικά στο κέντρο περίπου της πλάκας. Συστολή του μπετόν επίσης προκαλεί ρήγματα. Η υπερβολική διαστολή πιθανόν να προκαλέσει «εκτινάξεις».

Το σχήμα 2.5α δείχνει τις δυνάμεις που επιδρούν σε μία πλάκα που συστέλλεται. Η μισή μόνον πλάκα απεικονίζεται. Αν η πλάκα έχει ελευθερία κίνησης (χωρίς τριβή ανάμεσα στην πλάκα και το υπέδαφος) δεν θα εμφανισθούν τάσεις. Αν, όμως, υπάρχει τριβή ανάμεσα στην πλάκα και το υπέδαφος, θα υπάρξει παρεμπόδιση από τις δυνάμεις τριβής. Για να υπάρξουν συνθήκες ισορροπίας θα πρέπει το άθροισμα των δυνάμεων τριβής από το κέντρο της πλάκας έως το ελεύθερο άκρο να είναι ίσο με το σύνολο των τάσεων στο μπετόν. Με πλάκες μεγάλου μήκους, οι δυνάμεις τριβής μπορεί να είναι τόσο μεγάλες που να προκαλέσουν υπερκαταπόνηση του μπετόν που οδηγεί σε ρήγμα.

Οι τάσεις σε πλάκες από μπετόν που οφείλονται σε τριβή ποικίλλουν ανάλογα με το μήκος της πλάκας. Σε πλάκες μικρού μήκους δεν είναι βέβαιο ότι αναπτύσσεται αρκετά μεγάλη τριβή, ώστε να προκαλέσει επιβλαβείς τάσεις. Οι δυνάμεις τριβής προϋποθέτουν κίνηση. Έτσι, για να αναπτυχθεί όλη η αντίσταση τριβής κατά τη συστολή θα πρέπει να υπάρξει ολίσθηση ανάμεσα στην πλάκα και το υπέδαφος. Έχειδειχθεί ότι η ελάχιστη μετατόπιση που απαιτείται για πλήρη ανάπτυξη της τριβής είναι 0,06 ίντσες. Μία πλάκα κατά τη συστολή θα κινηθεί περισσότερο στο ελεύθερο άκρο της από ότι στο κέντρο, έτσι ώστε η αντίσταση τριβής να μεταβάλλεται κατά μήκος της πλάκας από το κέντρο προς το ελεύθερο άκρο της. Ο Kelley κατέληξε στην κατανομή των τάσεων τριβής που φαίνεται στο σχήμα 2.5b. Αποτελέσματα δοκιμών έδειξαν ότι η πλήρης ανάπτυξη της αντίστασης τριβής πραγματοποιείται σε απόσταση  $x$ , αλλά από εκεί μέχρι το κέντρο της πλάκας η κατανομή τάσεων είναι παραβολικής μορφής.





**Σχήμα 2.5. Τάσεις που προκαλούνται από συστολή, (α) Δυνάμεις που ενεργούν στην πλάκα κατά την συστολή. (β) Μεταβολή της αντίστασης υπεδάφους με το μήκος (κατά Kelley)**

Η αντίσταση τριβής όπως χρησιμοποιείται συχνά σε υπολογισμούς τάσεων για πλάκες μεγάλου μήκους υποτίθεται ότι έχει πεπερασμένη τιμή που εξαρτάται από το βάρος της πλάκας και το συντελεστή της τριβής ολίσθησης. Η αντίσταση, όμως, στην κίνηση κατά τη συστολή είναι αποτέλεσμα αντίστασης σε διάτμηση στο υπέδαφος συν την τριβή ολίσθησης. Αν μία πλάκα από μπετόν έχει διαστρωθεί σε υπέδαφος ή πάνω σε στρώση βάσης, ο πυθμένας της πλάκας είναι τραχύς και σε άμεση επαφή με το υπέδαφος. Κατά τη συστολή αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις στο υπέδαφος αμέσως κάτω από την πλάκα. Οι διατμητικές τάσεις μεταδίδονται κάτω δια μέσου του υπεδάφους μέχρις ότου ατονίσουν σε κάποιο βάθος. Έτσι, φαίνεται ότι τραχύ μπετόν που ολισθαίνει πάνω σε έδαφος έχει ένα συντελεστή αντίστασης που εξαρτάται κατά ένα μέρος από τη διατμητική αντίσταση του εδάφους ή της βασικής στρώσης.

Το άθροισμα των δυνάμεων του σχήματος 2.5α δίνει την εξίσωση 2.14

$$\sigma_s = \frac{WLf}{24h}$$

όπου  $\sigma_s$  = μοναδιαία τάση μέσα στο μπετόν σε psi

$W$  = βάρος της πλάκας (psf)

$L$  = μήκος της πλάκας σε πόδια

$f$  = μέσος συντελεστής αντίστασης υπεδάφους

$h$  = πάχος της πλάκας σε ίντσες

2.24

Οι περισσότεροι μηχανικοί χρησιμοποιούν μία μέση τιμή του  $f$  ίση με 1,5 στους υπολογισμούς τάσεων.

Οι εξισώσεις για τη μέση τιμή του συντελεστή αντίστασης υπεδάφους είναι οι ακόλουθες (βλέπε σχήμα 2.5b).

Για  $x$  μικρότερο από  $1/2 L$

$$f_a = f_m \left( 1 - \frac{2x}{3L} \right) \quad 2.25$$

Για  $x$  μεγαλύτερο από  $1/2 L$

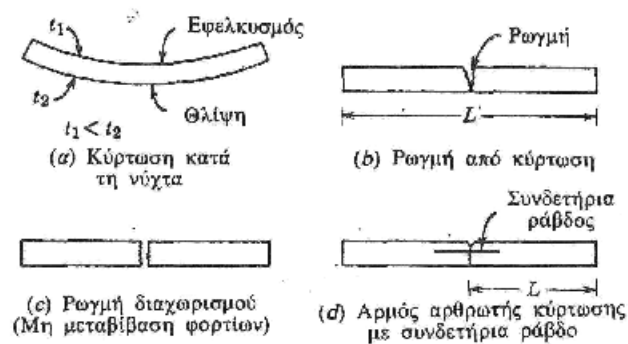
$$f_a = \frac{2f_m}{3} \sqrt{\frac{L}{2x}} \quad 2.26$$

Διευκρινίζεται ότι αν η κύρτωση της πλάκας οφείλεται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στην πλάκα, η πλάκα δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το υπέδαφος. Έτσι, οι υπολογισμοί της αντίστασης τριβής που προϋποθέτουν πλήρη επαφή δεν ισχύουν απόλυτα. Οι τάσεις που οφείλονται σε κύρτωση είναι κρίσιμες για πλάκες μέσου μήκους (30 ως 40 πόδια) ενώ οι δυνάμεις αντίστασης τριβής είναι κρίσιμες για πλάκες μεγάλου μήκους (μεγαλύτερες από 100 πόδια).

## 2.7. Αποτελέσματα κύρτωσης, συστολής και διαστολής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν μία πλάκα οδοστρώματος υποβληθεί σε θερμοκρασιακή διαφορά κατά το βάθος της, η επιφάνεια της τείνει να κυρτωθεί (βλ. σχήμα 2.6α). Η τάση για κύρτωση παρεμποδίζεται από το βάρος της ίδιας της πλάκας. Πρέπει να σημειωθεί ότι τάσεις κύρτωσης εμφανίζονται μόνο επειδή υπάρχει αυτή η παρεμπόδιση από το βάρος της πλάκας. Σε δύσκαμπτα οδοστρώματα οι τάσεις οφείλονται, επίσης και σε ομοιόμορφες θερμοκρασιακές μεταβολές που προκαλούν συστολή ή επιμήκυνση της πλάκας. Οποσδήποτε, πλάκες μεγάλου μήκους σχεδόν πάντα παρουσιάζουν ρηγμάτωση σε μία ή περισσότερες θέσεις ανάμεσα στους αρμούς.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6b αν εμφανιστεί μία ρωγμή από κύρτωση, η πλάκα στη συνέχεια εδράζεται πάνω στο υπέδαφος σταθερά. Στο σχήμα 2.6α φαίνεται ότι αν οι πλάκες χάσουν την επαφή μεταξύ τους από ομοιόμορφη πτώση θερμοκρασίας, τότε δεν μπορεί να γίνει μεταβίβαση φορτίων. Το Σχήμα 2.6c απεικονίζει την αρχή της χρησιμοποίησης συνδετήριων ράβδων δια μέσου ενός αρμού για την αποφυγή διαχωρισμού και η μεταβίβαση φορτίων επιτυγχάνεται με την «εμπλοκή των κόκκων» σαν αποτέλεσμα της συγκράτησης των πλακών από τη συνδετήρια ράβδο.



**Σχήμα 2.6. (α-γ) Σχηματισμός ρωγμής σε πλάκα από κύρτωση, (α) Μεταβίβαση φορτίου με τη χρήση συνδετήριας ράβδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος  $L$ , για τον υπολογισμό τάσεων οπλισμού κατανομής (μέρος b) και συνδετήριων ράβδων (μέρος d) σημειώνεται στο σχήμα.**

Επειδή για πλάκες μεγάλου μήκους, ρηγματώση σε ενδιάμεσα σημεία ανάμεσα στους αρμούς είναι σχεδόν αναπόφευκτη, η συνηθισμένη μέθοδος κατά το σχεδιασμό είναι η τοποθέτηση οπλισμού κατανομής σε όλο το μήκος, πλακών μεγάλου μήκους για τη συγκράτηση των ρωγμών έτσι ώστε η μεταβίβαση φορτίων να εξασφαλίζεται με την εμπλοκή κόκκων. Εννοείται ότι αυτός ο οπλισμός κατανομής δεν έχει σκοπό την αύξηση της φορτοικανότητας της πλάκας, αλλά τον περιορισμό του πλάτους των ρωγμών.

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι οι τάσεις που οφείλονται σε μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας είναι ανεξάρτητες φορτίων. Οι τάσεις φορτίων, όμως, σε μερικές περιπτώσεις πρέπει να προστίθενται στις τάσεις που οφείλονται στην παρεμπόδιση της κίνησης.

Επιπλέον, οι ρωγμές που προκαλούν η κύρτωση και η συστολή (και μερικές φορές τα φορτία) είναι επιβλαβείς μόνον όταν είναι αδύνατη η μεταβίβαση φορτίου δια μέσου της ρωγμής. Έτσι ένας από τους κύριους παράγοντες που ο μηχανικός πρέπει να παίρνει υπόψη είναι οι τρόποι μεταβίβασης φορτίων διαμέσου μιας ρωγμής. Αυτό μπορεί να εξασφαλισθεί με διάφορους τρόπους.

1. Κατασκευή πλακών μικρού μήκους και μεταβίβαση φορτίων με «εμπλοκή κόκκων».
2. Η ρωγμή ή ο αρμός μπορούν να συνδεθούν με συνδετήριες ράβδους ή με κατανεμημένο οπλισμό που να εμποδίζουν τη ρωγμή ή τον αρμό να ανοίγει.
3. Η κίνηση στους αρμούς μπορεί να επιτραπεί με τη βοήθεια ράβδων ενίσχυσης.

### 2.7.1. Θερμοκρασιακός οπλισμός

Για την αντιμετώπιση των θερμοκρασιακών ρωγμών σε πλάκες δύσκαμπτου οδοστρώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν συρμάτινα πλέγματα ή πλέγματα ράβδων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο οπλισμός αυτός δεχόμαστε ότι δεν προσθέτει τίποτε στην φορτοϊκανότητα του οδοστρώματος.

Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα εμφανίζονται επίσης εγκάρσιες ρωγμές σαν αποτέλεσμα κύρτωσης, συστολής και φόρτισης. Οι ίδιες οι ρωγμές δεν είναι επιβλαβείς εφόσον το άνοιγμα τους είναι περιορισμένο. Η ποσότητα οπλισμού που απαιτείται για την συγκράτηση μιας ρωγμής υπολογίζεται θεωρώντας την ισορροπία των δυνάμεων σε οριζόντιο επίπεδο. Υποθέτοντας, ότι μία ρωγμή θα ανοίξει και ότι την αντίσταση στην κίνηση θα αναλάβει ο εφελκυσμός του χάλυβα, τότε προκύπτει:

$$A_s = \frac{WfL}{2f_s} \quad 2.27$$

όπου  $A_s$  = αναγκαίος οπλισμός ανά πόδι πλάτους

$W$  = βάρος της πλάκας ( $\text{lb}/\text{ft}^2$ )

$f$  = συντελεστής αντίστασης (γενικά υποτίθεται ότι είναι ίσος με 1,5)

$f_s$  = επιτρεπτή τάση χάλυβα

$L$  = μήκος της πλάκας

Στην εξίσωση 2.27 φαίνεται ότι η αναγκαία ποσότητα οπλισμού ποικίλλει ανάλογα με το μήκος της πλάκας. Άρα η ποσότητα του οπλισμού ελαττώνεται σε μηδέν αν το μήκος της πλάκας περιοριστεί. Ο οπλισμός πλέγματος δεν εφαρμόζεται συνήθως σε αεροδρόμια, επειδή οι πλάκες είναι βραχύτερες σε τέτοιου είδους οδοστρώματα, καθώς και για το γεγονός ότι τα φορτία εφαρμόζονται στο μέσο της πλάκας και όχι στην άκρη του οδοστρώματος.

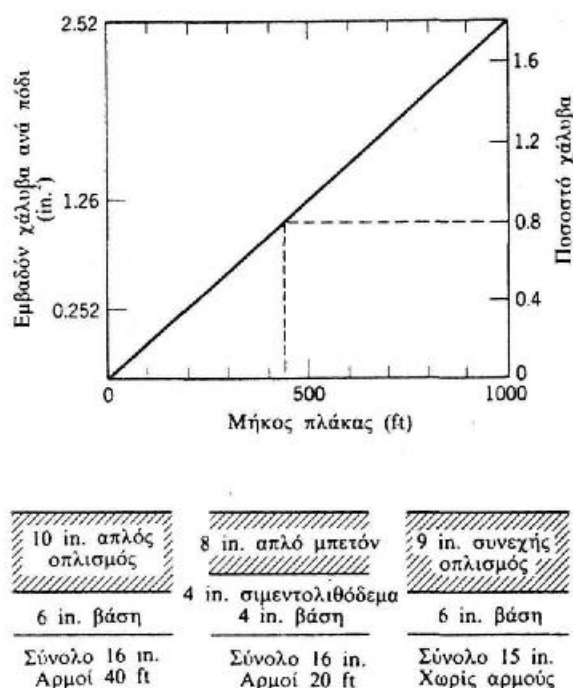
Οδοί με εγκάρσιους αρμούς ανά 20 έως 100 πόδια και με λωρίδες πλάτους 12 ποδιών απαιτούν περισσότερο διαμήκη παρά εγκάρσιο οπλισμό. Τα εγκάρσια σύρματα ενεργούν, κυρίως, σαν οπλισμός συγκράτησης, εφόσον γενικά δεν προξενούνται διαμήκεις ρωγμές. Οι τάσεις κύρτωσης ανακουφίζονται από το διαμήκη αρμό.

Γενικά σύρματα μικρής διαμέτρου σε μικρές αποστάσεις είναι πιο αποτελεσματικά από σύρματα μεγάλης διαμέτρου σε μεγαλύτερα διαστήματα. Διαμήκη σύρματα με διαμέτρους μικρότερες των 0,25 ιντσών σπάνια χρησιμοποιούνται σε οδοστρώματα.

## 2.8. Απλά και οπλισμένα οδοστρώματα

Μία από τις αποφάσεις που ο μηχανικός σχεδιασμού πρέπει να πάρει, είναι αν θα χρησιμοποιήσει απλό ή οπλισμένο σκυρόδεμα. Κατά κανόνα άοπλα οδοστρώματα χωρίς ράβδους ενίσχυσης χρησιμοποιούνται σε οδούς μικρής κυκλοφορίας ή όταν μεταξύ της πλάκας και του υπεδάφους τοποθετηθεί υπόβαση με σιμέντο. Άρα οι αποφάσεις σχετικά με τη χρήση απλού ή οπλισμένου οδοστρώματος εξαρτώνται μέχρι ενός σημείου από τις αποφάσεις σχετικά με τη χρήση βάσης κάτω από το οδόστρωμα.

Το σχήμα 2.7 δείχνει μία σύγκριση ενός αντιπροσωπευτικού απλού και οπλισμένου σκυροδέματος για σχετικά βαρεία κυκλοφορία. Στο σχήμα αυτό, όλοι οι σχεδιασμοί θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται στις προϋποθέσεις σχεδιασμού. Η εκλογή εξαρτάται κυρίως από τη σύγκριση της δαπάνης κατασκευής των αρμών και της δαπάνης οπλισμού, καθώς και του κυκλοφοριακού όγκου. Για οδούς με πολύ βαρεία κυκλοφορία κάποιες βλάβες θα υπάρξουν, εκτός αν χρησιμοποιηθούν ενισχυτικές ράβδοι στους εγκάρσιους αρμούς. Η ενόχληση των ελαττωματικών αρμών μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση λοξών αρμών (Σχήμα 2.8).

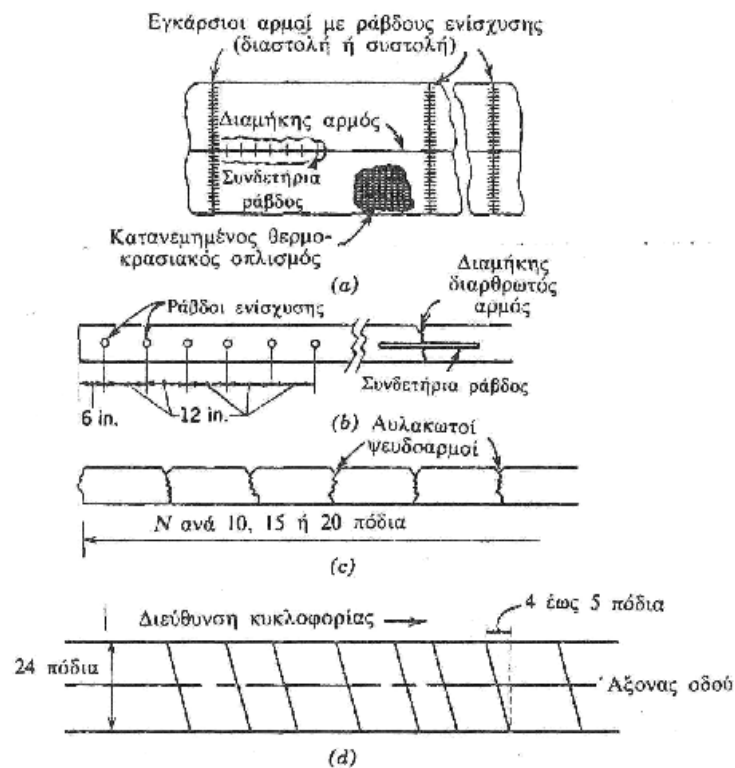


**Σχήμα 2.7. Σύγκριση οδοστρωμάτων από απλό και οπλισμένο μπετόν. Να σημειωθεί ότι τα πάχη είναι σχετικά και εξαρτώνται από την κυκλοφορία κ.τ.λ.**

Το Σχήμα 2.7 απεικονίζει την επίδραση του μήκους της πλάκας στην ποσότητα οπλισμού που απαιτείται για την αποφυγή ρωγμών. Αν η πλάκα έχει μήκος μικρότερο από 20 πόδια, η ποσότητα του πλέγματος που απαιτείται είναι αμελητέα και άρα μπορεί να παραλειφθεί. Ακόμη, αν κάτω από το οδόστρωμα κατασκευασθεί μία βάση με σιμέντο, η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος θα αυξηθεί και επίσης θα διευκολυνθεί η μεταβίβαση φορτίων διαμέσου των αρμών με ή χωρίς ενισχυτικές ράβδους. Επομένως, η χρήση πλακών μικρού μήκους συνοδεύεται μερικές φορές από βάση με σιμέντο. Το μήκος της πλάκας, επίσης, επηρεάζει την εμπλοκή των κόκκων για μεταβίβαση φορτίων. Οι ενισχυτικές ράβδοι μπορούν να παραλειφθούν, αν η μεταβίβαση φορτίων επιτυγχάνεται στον αρμό με την εμπλοκή αδρανών.

Αν η απόσταση μεταξύ αρμών αυξηθεί σε 40 πόδια περίπου είναι αναγκαία η χρήση κάποιου οπλισμού για την αποφυγή των ρωγμών. Γι' αυτό στις περιπτώσεις αυτές γίνεται χρήση οπλισμού συρμάτινων πλεγμάτων στους αρμούς που συμβάλλει στη μεταβίβαση φορτίων μαζί με τις ράβδους ενίσχυσης.

Αν η απόσταση μεταξύ αρμών αυξηθεί σε 500 πόδια, η ποσότητα οπλισμού που απαιτείται για τη συγκράτηση των ρωγμών είναι πολύ μεγάλη. Τα οδοστρώματα τότε γίνονται οδοστρώματα συνεχούς οπλισμού και δεν γίνεται χρήση αρμών, εκτός αν είναι απαραίτητοι κατασκευαστικοί αρμοί ή αρμοί διαστολής. Αυτός ο τύπος οδοστρώματος θα εξεταστεί σε επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου, όπως και στα κεφάλαια σχεδιασμού οδοστρωμάτων από μπετόν.



**Σχήμα 2.8. Αρμοί σε διάφορους τύπους οδοστρωμάτων, (α) Οδόστρωμα με απλό σπλισμό. (β) Αρμός με ράβδους ενίσχυσης, (γ) Άοπλο οδόστρωμα, (δ) Λοξοί αρμοί.**

Περίληπτικά, η χρήση οδοστρωμάτων άοπλου ή απλά σπλισμένου μετόν συνδέεται με (1) την απόσταση αρμών και (2) τη χρήση βάσης ανάμεσα στο οδόστρωμα και στο υπέδαφος. Πριν αποφασιστεί, λοιπόν, ποια διατομή οδοστρώματος θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να γίνει μία εκτίμηση του κόστους του κάθε τύπου οδοστρώματος.

### 2.8.1. Χρήση ράβδων ενίσχυσης

Όπως τονίστηκε πριν, οι ράβδοι ενίσχυσης χρησιμοποιούνται σε αρμούς πλακών μεγάλου μήκους ή όπου η μεταβίβαση φορτίων δεν εξασφαλίζεται με εμπλοκή κόκκων. Η εμπλοκή των κόκκων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το άνοιγμα ενός αρμού από σύμπτυξη ή και θερμοκρασιακή συστολή. Το άνοιγμα του αρμού μπορεί να εκτιμηθεί με την εξίσωση 2.28.

$$z = L(12)[\epsilon\Delta t + \delta]$$

2.28

όπου  $L$  = μήκος της πλάκας (ft)

$Z$  = άνοιγμα αρμού

$\epsilon$  = συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής όγκου (0,000005 in./in./°F)

$\delta$  = συντελεστής σύμπτυξης (0,00005 in./in.)

$\Delta t$  = ολική πτώση θερμοκρασίας

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές ανοίγματος αρμών:

πλάκα μήκους 10 ποδιών:

$$z = 10(12)[0,000005(60) + 0,00005] = 0,042 \text{ ίντσες}$$

πλάκα μήκους 40 ποδιών:

$$z = 40(12) [0,000005(60) + 0,00005] = 0,17 \text{ ίντσες}$$

Αρμοί χωρίς ράβδους ενίσχυσης είναι γενικά ικανοποιητικοί, αν το άνοιγμα του αρμού είναι 0,04 ίντσες ή λιγότερο. Για αρμούς με ράβδους ενίσχυσης το άνοιγμα πρέπει να είναι 0,25 ίντσες ή λιγότερο. Έτσι δεν χρειάζονται ράβδοι ενίσχυσης σε οδοστρώματα με πλάκες μικρού μήκους. Συνηθίζεται όμως από πολλούς μηχανικούς η χρήση ράβδων ενίσχυσης ανεξάρτητα από απόσταση μεταξύ αρμών. Υπενθυμίζεται ότι οι πλάκες μικρού μήκους της Οδικής Δοκιμής AASHO περιείχαν ράβδους ενίσχυσης.

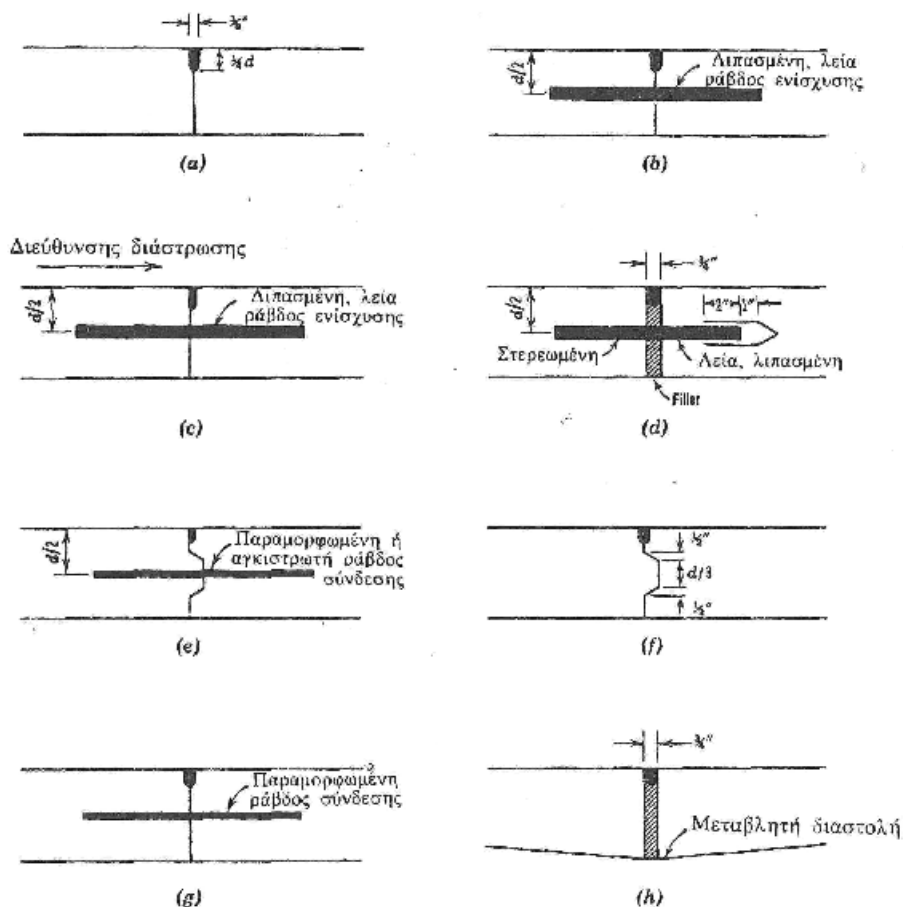
## 2.9. Αρμοί

Οι αρμοί των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων χωρίζονται σε τέσσερις βασικές ομάδες. Περιλαμβάνουν (1) αρμούς συστολής, (2) αρμούς διαστολής, (3) κατασκευαστικούς αρμούς και (4) αρθρωτούς αρμούς ή αρμούς κύρτωσης. Κάθε τύπος αρμού έχει μία ξεχωριστή λειτουργία και έτσι χρησιμοποιείται μόνον σε ορισμένα τμήματα του οδοστρώματος.

### 2.9.1. Αρμοί συστολής

Το σχήμα 2.9 απεικονίζει διαγραμματικά τα διάφορα είδη αρμών. Το σχήμα 2.9α είναι ένας συμβατικός αυλακωτός ψευδοαρμός συστολής. Για το είδος αυτό του αρμού, ένα αυλάκι δημιουργείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος έτσι ώστε η ενδεχόμενη ρηγμάτωση να εμφανιστεί στη θέση αυτή. Στο σχήμα 2.9α ο ψευδοαρμός δεν περιέχει ενισχυτικές ράβδους. Η μεταβίβαση φορτίων εξασφαλίζεται με την εμπλοκή των κόκκων του ραγισμένου κατώτερου μέρους της πλάκας.





**Σχήμα 2.9. Τυπικοί αρμοί, (α) Ψευδοαρμοί συστολής, (β) ψευδοαρμοί συστολής με ράβδους ενίσχυσης, (γ) ορθογωνικός κατασκευαστικός, (δ) διαστολής, (ε) διαμήκης κατασκευαστικός με σφήνα και συνδετήριες ράβδους, (φ) κατασκευαστικός αρθρωτός ή κύρτωσης με σφήνα, (γ) κύρτωσης, διαμήκης, με συνδετήριες ράβδους, (η) διαστολής διογκωμένου άκρου (αεροδρόμια).**

Οι αρμοί συστολής προορίζονται να ανακουφίσουν εφελκυστικές μόνον τάσεις που οφείλονται σε συστολή και κύρτωση του μπετόν. Ο αρμός δεν ανακουφίζει τάσεις διαστολής. Σε μερικές περιπτώσεις, η μεταβίβαση φορτίων με εμπλοκή των κόκκων είναι αμφίβολη και έτσι ενισχυτικές ράβδοι τοποθετούνται στον αρμό. Οι ράβδοι ενίσχυσης είναι γενικά ορισμένου τύπου που ποικίλλει από τόπο σε τόπο. Γενικά τοποθετούνται στο μέσο του πάχους της πλάκας. Η ράβδος ενίσχυσης προορίζεται να μεταβιβάσει φορτία διαμέσου του αρμού και εφόσον οι πλάκες κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη (κατά μήκος), είναι αναγκαίο να λιπανθεί τουλάχιστον η μισή ράβδος ενίσχυσης, ώστε να επιτραπεί η ελεύθερη ολίσθηση.

Η αυλάκωση δημιουργείται με πριόνι ή με την τοποθέτηση μεταλλικής ή συνθετικής λωρίδας πριν από την πήξη του μπετόν και την αφαίρεσή της, όταν στερεοποιηθεί το μπετόν. Αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν πριονισμένοι αρμοί, τότε ο

παράγοντας χρόνος είναι μεγάλης σημασίας, καθώς είναι απαραίτητο να διαμορφωθεί ο αρμός αμέσως μετά τη διάστρωση αλλά όχι τόσο σύντομα, ώστε να αφήσει σημάδια στο οδόστρωμα ή να μετατοπίσει αδρανή. Ο χρόνος διαμόρφωσης των αρμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα εργαλεία που είναι διαθέσιμα σε κάθε έργο.

Οι μέθοδοι διαμόρφωσης των ψευδοαρμών με τοποθέτηση στο νωπό μπετόν ενός υλικού διαφέρουν από πολιτεία σε πολιτεία. Μία μέθοδος είναι η τοποθέτηση μιας μικρής ράβδου μεγέθους όσο ο αρμός και η αφαίρεση της την κατάλληλη στιγμή.

### 2.9.2. **Αρμοί διαστολής**

Οι αρμοί διαστολής πρέπει να κατασκευάζονται με διάκενο σε όλο το βάθος της πλάκας που να επιτρέπει τη διαστολή (σχήμα 2.9d). Το διάκενο αυτό είναι συνήθως 3/4 ίντσες, αν και σε μερικές περιπτώσεις είναι επιθυμητή η δημιουργία ανοίγματος 1 ίντσας. Εφόσον ο αρμός δεν παρέχει εμπλοκή των κόκκων, πρέπει να εξασφαλιστεί ένας τρόπος μεταβίβασης φορτίων. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα με τη βοήθεια ράβδων ενίσχυσης που να είναι λείες και λιπασμένες τουλάχιστον στην μία πλευρά. Ένα κάλυμμα διαστολής, επίσης, είναι απαραίτητο ώστε να εξασφαλίζει τον αναγκαίο χώρο για τη διαστολή της ράβδου ενίσχυσης.

Οι αρμοί διαστολής οδοστρωμάτων ευνοούν το φαινόμενο της ανάβλυσης και γι' αυτό πολλές πολιτείες έχουν καταργήσει τη χρήση τους. Η επάρκεια ενός αρμού διαστολής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διάταξη μεταβίβασης φορτίων. Αν η μεταβίβαση φορτίων γίνεται επαρκώς, η παραμόρφωση της εμπρόσθιας πλάκας ελαχιστοποιείται και η ανάβλυση ελαττώνεται. Είναι αναγκαία η συντήρηση των αρμών περιοδικά και σε ορισμένες περιπτώσεις η αντικατάσταση του υλικού πλήρωσης του αρμού.

Η εισχώρηση εδαφικού υλικού από το έρεισμα ή το υπέδαφος σε αρμούς διαστολής προκαλούν συμπίεση του υλικού πλήρωσης κατά τη φάση της διαστολής. Κοινοί τύποι υλικών πλήρωσης είναι ινώδη και ασφαλτικά υλικά καθώς και φελλός.

Είναι απαραίτητη η περιοδική στεγανοποίηση των αρμών για την αποφυγή διείσδυσης επιφανειακών υδάτων. Η επαναστεγανοποίηση πρέπει να γίνεται κατά την κρύα περίοδο, όταν ο αρμός έχει ανοίξει, επιτρέποντας έτσι την τοποθέτηση του ασφαλτικού σφραγιστικού υλικού.

Όπως αναφέρθηκε πριν, πολλές πολιτείες έχουν εγκαταλείψει τη χρήση των αρμών διαστολής λόγω της ανεπάρκειας στη μεταβίβαση φορτίων, καθώς και της καταπόνησης που προκαλεί η ανάβλυση. Μερικές πολιτείες, όμως, χρησιμοποιούν ακόμη αρμούς διαστολής -στην πραγματικότητα πολλές πολιτείες χρησιμοποιούν αρμούς διαστολής αντί αρμών συστολής. Μερικές πολιτείες χρησιμοποιούν έναν αρμό διαστολής για κάθε τρεις ή τέσσερις αρμούς συστολής. Οι αρμοί διαστολής στα οδοστρώματα αεροδρομίων χρησιμοποιούνται ανά 1000 έως 2000 πόδια τις περισσότερες φορές στις συναρμογές διαδρόμων προσγείωσης και τροχοδρόμων.

Μεγάλες τάσεις διαστολής προξενούνται κυρίως όταν χρησιμοποιούνται ορισμένα αδρανή υλικά. Επιτόπιες έρευνες έδειξαν ότι η συχνότητα ανατινάξεων είναι συνάρτηση της πηγής και του τύπου χονδρόκοκκων αδρανών. Έτσι αν η εκλογή των αδρανών γίνει σωστά, οι βλάβες από ανατινάξεις ελαχιστοποιούνται. Έτσι παύουν να είναι απαραίτητοι οι αρμοί διαστολής στις περισσότερες κατασκευές.

### 2.9.3. **Κατασκευαστικοί αρμοί**

Οι αρμοί κατασκευής είναι συνήθως ορθογωνικού τύπου και περιέχουν ράβδους ενίσχυσης για τη μεταβίβαση φορτίων διαμέσου ενός αρμού. Κατασκευαστικοί αρμοί χρησιμοποιούνται στη μετάβαση από την παλιά στη νέα κατασκευή, όπως στο τέλος της διάστρωσης μίας ημέρας. Σε μερικές περιπτώσεις γίνεται χρήση σφήνας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9f. Ο ορθογωνικός τύπος είναι ίσως ο πιο συνηθισμένος σε έργα οδοποιίας, ενώ οι διαμήκεις κατασκευαστικοί αρμοί με σφήνα χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε αεροδρόμια. Διαμήκεις κατασκευαστικοί αρμοί με σφήνα δεν συνδέονται συνήθως με συνδετήριες ράβδους εκτός από τις ακραίες πλάκες. Αν χρησιμοποιούνται διαμήκεις κατασκευαστικοί αρμοί με σφήνα συνηθίζεται η διάστρωση εναλλασσόμενων λωρίδων, ενώ η σφήνα διαμορφώνεται με τη βοήθεια ειδικών μεταλλικών πλακών ή με ξύλινους πήχεις προσαρμοσμένους στους ξυλότυπους.

### 2.9.4. **Αρθρωτοί ή αρμοί κύρτωσης**

Οι αρμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση ρηγμάτων κατά μήκος του άξονα της οδού. Ο τύπος πλάκας που χρησιμοποιείται εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο διάστρωσης του μπετόν. Αν κατασκευάζεται κάθε λωρίδα ξεχωριστά, τότε γίνεται χρήση αρμών με σφήνα. Σε μερικές περιπτώσεις οι αρμοί με σφήνες

συγκρατούνται μεταξύ τους με συνδετήριες ράβδους για να εξασφαλισθεί η συμμετοχή της σφήνας στη μεταβίβαση φορτίων.

Αν κατασκευάζονται δύο λωρίδες, ο πιο κατάλληλος τύπος διαμήκους αρμού κύρτωσης είναι ο ψευδοαρμός, όπου οι συνδετήριες ράβδοι τοποθετούνται σε αποστάσεις περίπου 3 ποδιών, ώστε να εξασφαλισθεί η εμπλοκή των κόκκων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβίβαση φορτίων σε αρμό με συνδετήριες ράβδους γίνεται με εμπλοκή κόκκων. Έτσι, οι ράβδοι σύνδεσης πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένες για να εμποδίζεται η μετατόπιση. Μερικές πολιτείες χρησιμοποιούν αγκιστρωτές συνδετήριες ράβδους σε κατά μήκος αρμούς. Οι συνδετήριες ράβδοι ψευδοαρμών ωθούνται μέσα στο νωπό μπετόν πριν από τη διαμόρφωση της αυλάκωσης. Σε μερικές περιπτώσεις, ο αρμός σχηματίζεται με την τοποθέτηση διαβρεγμένου ινώδους υλικού κατά μήκος του άξονα της οδού. Το υλικό αυτό παραμένει στο μπετόν και αποτελεί μέρος του αρμού κύρτωσης.

## 2.10. Τάσεις σε οπλισμένα οδοστρώματα

Στις προηγούμενες παραγράφους εκτέθηκαν οι θεωρίες τάσεων σε άοπλα δύσκαμπτα οδοστρώματα και εξετάστηκε η εμφάνιση ρωγμών που επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές. Με την πλατεία έννοια, στα οπλισμένα οδοστρώματα περιλαμβάνονται όλα τα δύσκαμπτα οδοστρώματα στα οποία χρησιμοποιούνται θερμοκρασιακός οπλισμός ή ράβδοι ενίσχυσης. Αυτό, όμως, είναι θέμα ορισμού, εφόσον μερικοί μηχανικοί περιλαμβάνουν μόνον οδοστρώματα που έχουν ενσωματωμένο ένα πλήρες πλέγμα συνδεδεμένων ράβδων οπλισμού.

Συρμάτινα πλέγματα και πλέγματα ράβδων. Ο προορισμός του κατανεμημένου οπλισμού είναι βασικά ο έλεγχος των ρωγμών. Ο θερμοκρασιακός οπλισμός δεν θα εμποδίσει το σχηματισμό ρωγμών, αλλά ενεργεί σαν στοιχείο σύνδεσης που ελέγχει το μέγεθος της ρωγμής. Ο συνεχής οπλισμός αναφέρεται σε σχετικά μεγάλα ποσοστά οπλισμού σε αντίθεση με τα συνηθισμένα. Οι παράγοντες αυτοί θα αναπτυχθούν σε επόμενες παραγράφους.

### 2.10.1. Ράβδοι ενίσχυσης

Έχει μεγάλη σημασία να κατανοηθεί η θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα σε ράβδους ενίσχυσης και ράβδους σύνδεσης. Οι ράβδοι ενίσχυσης είναι διατάξεις

μεταβίβασης φορτίων και γι' αυτό πρέπει να έχουν αρκετό πάχος και να τοποθετούνται σε μικρά διαστήματα, ώστε να αυξάνουν την αντοχή του μπετόν σε κάμψη και διάτμηση. Ο σχεδιασμός των ράβδων ενίσχυσης ποικίλλει από τόπο σε τόπο. Το μέγεθος των ράβδων ενίσχυσης προσδιορίζεται βασικά με βάση την εμπειρία. Σε έργα οδοποιίας χρησιμοποιούνται συνήθως ράβδοι ενίσχυσης διαμέτρου 1 1/4 ιντσών, μήκους 2 ποδιών και τοποθετημένες ανά διαστήματα 1 ποδιού διαμέσου του εγκάρσιου αρμού.

### 2.10.2. **Ράβδοι σύνδεσης**

Αντίθετα με τις ράβδους ενίσχυσης, οι ράβδοι σύνδεσης δεν είναι διατάξεις μεταβίβασης φορτίου, αλλά σύνδεσης δύο πλακών. Έτσι, ενώ οι ράβδοι ενίσχυσης πρέπει να είναι λείες και λιπασμένες στο ένα άκρο τους για να εξασφαλίζουν την ελεύθερη ολίσθηση της πλάκας, οι ράβδοι σύνδεσης πρέπει να έχουν το άκρο τους διαμορφωμένο σε γάντζο και πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένοι στο μπετόν ώστε να λειτουργούν κανονικά. Οι ράβδοι σύνδεσης είναι μικρότερες από τις ράβδους ενίσχυσης και τοποθετούνται ανά μεγαλύτερα διαστήματα. Αντιπροσωπευτικές του είδους αυτού είναι οι ράβδοι διαμέτρου 5/8 ίντσας ανά διαστήματα 3 ποδών.

### 2.10.3. **Τάσεις σε ράβδους ενίσχυσης**

Οι τάσεις στις ράβδους ενίσχυσης οφείλονται σε διάτμηση, κάμψη και εγκάρσια φόρτιση. Οι τάσεις αυτές μπορούν να αναλυθούν για να προσδιορισθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της μεταβίβασης φορτίων. Η αυστηρή ανάλυση, όμως, δεν είναι τόσο αναγκαία στο σχεδιασμό επειδή πρέπει να γίνουν ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Πρώτα απ' όλα δεχόμαστε ότι οι ράβδοι ενίσχυσης είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες και ελεύθερες για ολίσθηση. Ελλιπής λίπανση ή ευθυγράμμιση μπορεί να προκαλέσουν το «πάγωμα» των ράβδων και την εμφάνιση θραυσμάτων στους αρμούς. Ακόμη, η αποτελεσματικότητα των ράβδων σύνδεσης στο να μεταβιβάζουν φορτία διαμέσου ενός αρμού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Γι' αυτό οι περισσότεροι οργανισμοί έχουν καταλήξει σε τυποποιημένα μεγέθη ράβδων, στις οποίες η διάμετρος και το μήκος της ράβδου εξαρτάται μόνον από το πάχος του οδοστρώματος.

Παρά τις αβεβαιότητες κατά την ανάλυση των τάσεων των ράβδων ενίσχυσης, έχει σημασία για τον μηχανικό να κατανοήσει τις αιτίες και τα σχετικά μεγέθη των τάσεων. Η ανάλυση των τάσεων των ράβδων ενίσχυσης βασίζεται σε εργασίες του Timoshenko.

Σύμφωνα με τον Timoshenko μία ράβδος ενίσχυσης εγκιβωτισμένη σε μπετόν θα καμφθεί, όπως δείχνει το σχήμα 2.10. Αν ένα φορτίο επενεργήσει στο άκρο της ράβδου ενίσχυσης, η ράβδος θα καμφθεί προς τα κάτω εξασκώντας πίεση στην κάτω επιφάνεια της ράβδου και σε απόσταση από το Α έως το Β του σχήματος 2.10. Στο σημείο αυτό, υπάρχει ένα σημείο καμψής όπου η πίεση μεταφέρεται στο επάνω μέρος της ράβδου και έπειτα σε κάποια απόσταση από αυτό η πίεση βρίσκεται πάλι στο κάτω μέρος της ράβδου. Για λόγους θεωρητικούς, πρέπει να δεχθούμε ότι η ράβδος έχει άπειρο μήκος και εκτείνεται μέσα σε ένα ελαστικό σώμα. Η παραδοχή, όμως, αυτή μπορεί να απλουστευθεί αν αγνοηθούν οι μικρές πιέσεις που εξασκούνται στη ράβδο σε κάποια απόσταση μέσα στο ελαστικό σώμα.

Οι Bradbury και Friberg (7) παρουσίασαν μαθηματικές αναλύσεις σχεδιασμού ράβδων ενίσχυσης που βασίζονται όλες στις αρχές που τέθηκαν από τον Timoshenko.

Η σχετική δυσκαμψία μίας ράβδου ενσωματωμένης σε μπετόν δίνεται στην εξίσωση 1.29.

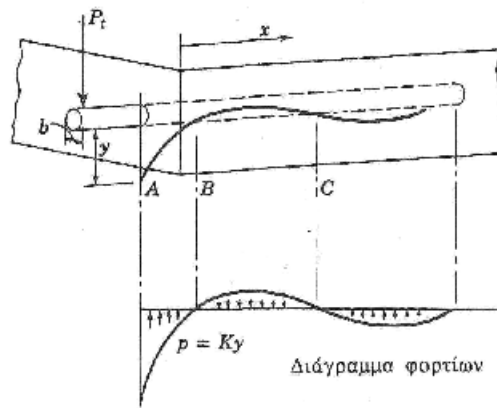
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}} \quad 2.29$$

όπου  $K$  = μέτρο στήριξης της ράβδου (pci)

$b$  = διάμετρος της ράβδου

$E$  = μέτρο ελαστικότητας της ράβδου

$I$  = ροπή αδράνειας της ράβδου



**Σχήμα 2.10. Πίεση που ασκείται σε φορτισμένη ράβδο ενίσχυσης.**

Σύμφωνα με τον Timoshenko το βέλος κάμψης της ράβδου που προκαλεί φορτία  $p_t$  είναι:

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2 EI} [P_t \cos \beta x - \beta M_0 (\cos \beta x - \sin \beta x)] \quad 2.30$$

όπου  $e$  = βάση φυσικών λογαρίθμων

$x$  = απόσταση κατά μήκος της ράβδου από το μέτωπο του μπετόν

$M_0$  = ροπή κάμψης της ράβδου στο μέτωπο του μπετόν

$P_t$  = φορτίο μεταβίβασης

**Ανάλυση** Friberg. Η εξίσωση 2.30 επεκτάθηκε από τον Friberg στις ράβδους ενίσχυσης για να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό με τον ακόλουθο τρόπο. Η ροπή κάμψης και η διάτμηση στη ράβδο ενίσχυσης μπορούν να εκφραστούν όπως στις εξισώσεις 2.31 και 2.32.

$$-EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M = -\frac{e^{-\beta x}}{\beta} [P_t \sin \beta x - \beta M_0 (\sin \beta x + \cos \beta x)] \quad 2.31$$

$$\frac{dM}{dx} = V = -e^{-\beta x} [(2\beta M_0 - P_t) \sin \beta x + P_t \cos \beta x] \quad 2.32$$

Αν  $Z$  είναι το άνοιγμα του αρμού και επειδή το μπετόν είναι πολύ δύσκαμπτο σε σύγκριση με τη χαλύβδινη ράβδο, η ροπή στη διαχωριστική επιφάνεια ράβδου-μπετόν είναι η ακόλουθη:

$$M_0 = -\frac{P_t Z}{2} \quad 2.33$$

Από την εξίσωση 2.30 για  $x = 0$  και  $M_0 = P_t/2$  το βέλος κάμψης της ράβδου ενίσχυσης στον αρμό είναι:

$$y_0 = \frac{P_t}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) \quad 2.34$$

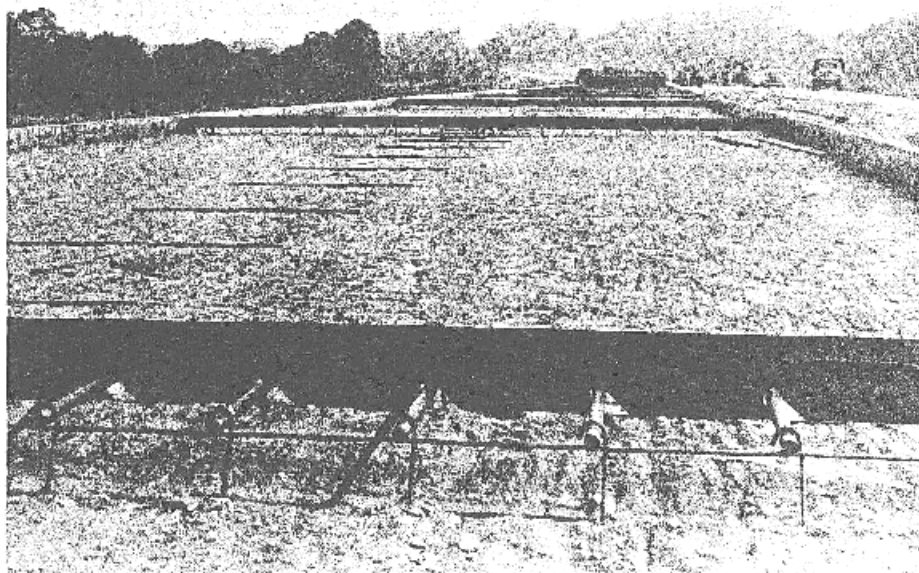
Η πίεση πάνω στο μπετόν στον αρμό είναι:

$$\sigma = Ky_0 = \frac{KP_t}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) \quad 2.35$$

Η μέγιστη ροπή παρουσιάζεται στο σημείο που η διάτμηση είναι ίση με μηδέν ( $dM/dx = 0$ ) και μπορεί να διατυπωθεί

$$M = -\frac{P_t e^{-\beta x}}{2\beta} \sqrt{1 + (1 + \beta z)^2} \quad 2.36$$

Οι εξισώσεις 2.35 και 2.36 μπορούν να εφαρμοσθούν κατευθείαν σε υπολογισμούς τάσεων. Σε κάθε περίπτωση,  $P_t$  είναι το φορτίο που μεταβιβάζει η ράβδος και είναι μικρότερο από το φορτίο σχεδιασμού, εφόσον ένα τμήμα του φορτίου μεταβιβάζεται από το οδόστρωμα στο υπέδαφος. Οι τιμές του  $K$  κυμαίνονται μεταξύ 300.000 και 1.500.000 pci. Εφόσον το  $\beta$  μεταβάλλεται, όπως η  $\sqrt[4]{K}$ , μεγάλες μεταβολές του μέτρου στήριξης  $K$  δεν επηρεάζουν σημαντικά τους υπολογισμούς των τάσεων. Έτσι η χρήση της τιμής 1.500.000 pci είναι δικαιολογημένη.



**Σχήμα 2.11. Αποψη των ράβδων ενίσχυσης κατασκευαστικού αρμού πριν από τη διάστρωση του μπετόν.** Να σημειωθούν οι ράβδοι σύνδεσης που βρίσκονται στην κατάλληλη θέση έτοιμοι να ενσωματωθούν στο μπετόν. Στο έργο αυτό, οι ράβδοι σύνδεσης τοποθετούνται στην οριστική τους θέση από εργάτες με τη βοήθεια μικρών γάντζων.



#### 2.10.4. **Επενέργεια ομάδας ράβδων ενίσχυσης**

Όταν εφαρμόζονται φορτία σε έναν αρμό, ένα τμήμα φορτίου μεταβιβάζεται διαμέσου της ράβδου ενίσχυσης στην επόμενη πλάκα. Οι ράβδοι που βρίσκονται αμέσως κάτω από το φορτίο παραλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος του φορτίου, ενώ οι άλλες ράβδοι σύνδεσης παραλαμβάνουν προοδευτικά μικρότερα τμήματα φορτίου. Η συμπεριφορά μίας ομάδας ράβδων ενίσχυσης κάτω από ένα φορτίο εξετάστηκε αναλυτικά από τον Friberg . Ο Friberg παρατήρησε ότι σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση του Westergaard, το μέγιστο αρνητικό φορτίο εμφανίζεται σε μια απόσταση 1,81 από το φορτίο. Έτσι, αν σχεδιασθεί μία σειρά ράβδων ενίσχυσης, η ράβδος αμέσως κάτω από το φορτίο λειτουργεί με πλήρη απόδοση, που ελαττώνεται σε μηδέν σε απόσταση 1,81 από τη ράβδο αυτή (βλέπε σχήμα 2.12).

Στο σχήμα η φορτοϊκανότητα της ομάδας των ράβδων είναι ίση με το άθροισμα των φορτίων όλων των ράβδων. Αν εφαρμοστεί ένα φορτίο σε δύο τροχούς, θα προκληθεί μία επικάλυψη τάσεων στις ράβδους-όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12b.

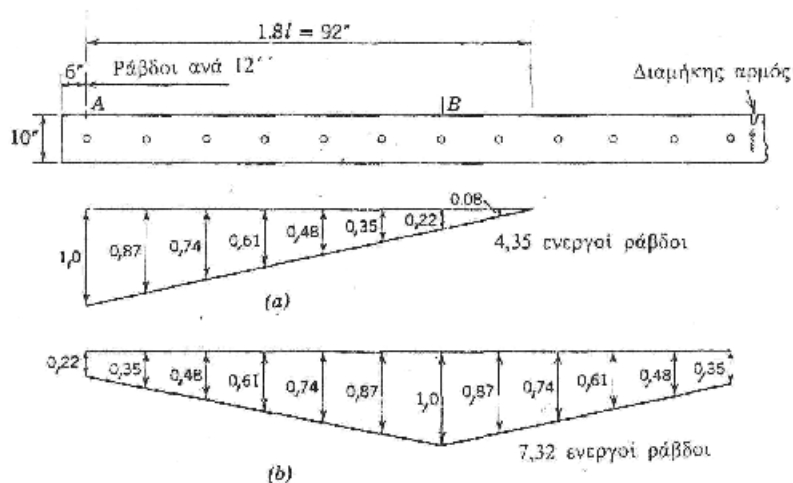
Για τον καθορισμό του αποτελέσματος της επικάλυψης που οφείλεται σε δύο τροχούς, είναι αναγκαίο να γίνουν ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Πρώτο, η ελαστική γραμμή σε έναν φορτισμένο αρμό δεν είναι ευθεία γραμμή. Το φορτίο που μεταβιβάζεται σε κάθε συνδετήρια ράβδο της ομάδας είναι συνάρτηση του βέλους κάμψης στη θέση της ράβδου. Δεύτερο, το βέλος κάμψης κάτω από την επίδραση γωνιακού φορτίου είναι μεγαλύτερο από το βέλος κάμψης αν το φορτίο ήταν στο εσωτερικό της πλάκας. Η ελαστική γραμμή είναι επίσης μία καμπύλη.

Εφόσον το φορτίο που μεταβιβάζεται διαμέσου της ράβδου είναι συνάρτηση του βέλους κάμψης, η γωνιακή ράβδος είναι η κρίσιμη για γωνιακά φορτία. Για πλάκες με μικρές ακτίνες σχετικής δυσκαμψίας (μεγάλο  $k$ ) η επίδραση του δεύτερου τροχού μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Για πλάκες, όμως, με μεγάλη ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας ισχύει το αντίστροφο. Έτσι, με εξαίρεση μεγάλες τιμές του  $k$  η παραδοχή της γραμμικής μεταβολής είναι ικανοποιητική.

Το σχήμα 2.12 δείχνει την κατανομή διατμήσεων ράβδων ενίσχυσης για μία ειδική περίπτωση. Το οδόστρωμα είναι πάχους 10 ιντσών, το μέτρο αντίδρασης υπεδάφους είναι 50 pci. Κάνοντας την παραδοχή ότι για τη ράβδο στο A το φορτίο που

μεταβιβάζεται είναι ίσο με τη μονάδα και υποθέτοντας διάτμηση ίση με μηδέν σε απόσταση 1.8l, τα φορτία σε κάθε ράβδο που οφείλονται σε μία φόρτιση στο A φαίνονται στο σχήμα 2.12α. Τα συνολικά φορτία στις ράβδους είναι το άθροισμα των ποσοτήτων. Το σχήμα 2.12b δείχνει την κατανομή των φορτίων για ένα φορτίο τροχού στο B. Φαίνεται ότι η ράβδος στο A καταπονείται λίγο από το φορτίο στο B. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές του k (100 έως 200 psi) η καταπόνηση είναι αμελητέα.



**Σχήμα 2.12. Φορτία σε ομάδα ράβδων ενίσχυσης. Οδόστρωμα = 10 ίντσες, k=50 psi, ράβδοι διαμέτρου 3/4 ιντσών ανά 12 ίντσες, (α) Ενεργοί ράβδοι λόγω φορτίου στο A, (b) ενεργοί ράβδοι λόγω φορτίου στο B.**

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.2.** Να προσδιοριστούν οι πιέσεις επαφής στο μπετόν στον αρμό του σχήμα 2.12. Τα φορτία εφαρμόζονται από διπλούς τροχούς στα A και B. Το φορτίο σε κάθε ζευγάρι τροχών είναι 9000 λίβρες. Να γίνει η παραδοχή αρμού συστολής με άνοιγμα ίσο με 0,2 ίντσες (για αρμούς διαστολής η τιμή αυτή θα ήταν 0,5 έως 0,75 ίντσες). Η απόσταση από κέντρο σε κέντρο των τροχών είναι 6 πόδια. Εφόσον, η πρώτη ράβδος είναι σε απόσταση 6 ιντσών από το άκρο, μπορεί να υποθεθεί ότι ο τροχός διασκελίζει τη ράβδο αυτή και ότι οι 9000 λίβρες είναι συγκεντρωμένες στο σημείο A.

Η πρώτη απόφαση που πρέπει να πάρουμε, είναι σχετικά με την ποσότητα φορτίου που μεταβιβάζεται από τη ράβδο. Αν μία ράβδος είναι 100% αποτελεσματική, θα μεταβιβάσει μέχρι 50% του φορτίου. Αυτό ισχύει αν λάβουμε υπόψη ότι, για αποτελεσματικότητα 100%, κάθε πλάκα παραμορφώνεται ίσα, μεταβιβάζοντας το μισό του φορτίου στο υπέδαφος κάτω από κάθε πλευρά του αρμού. Η χαλαρότητα που

προξενεί η επανάληψη των φορτίων, η έλλειψη ευθυγράμμισης και άλλοι παράγοντες τείνουν να μειώσουν αυτή την τιμή.

Υποθέτοντας μεταβίβαση φορτίων κατά 50%, το φορτίο που παραλαμβάνει η ράβδος στο A, λόγω φορτίου στο A, είναι  $4500/4,35 = 1035$  λίβρες.

Το φορτίο που παραλαμβάνει η ράβδος στο A, λόγω φορτίου στο B, είναι  $4500/7,32 (0,22) = 135$  λίβρες.

Το ολικό φορτίο της ράβδου στο A είναι, λοιπόν, 1170 λίβρες. Το φορτίο στο B έχει λίγη επίδραση στις τάσεις της ράβδου στο A για το παράδειγμα αυτό.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι η επίδραση του φορτίου στο B εκτείνεται πέρα από το διαμήκη αρμό. Αν και χρησιμοποιούνται ράβδοι σύνδεσης στον αρμό, υποτίθεται ότι δεν γίνεται μεταβίβαση φορτίου.

Η τιμή του  $\beta$  για το πρόβλημα αυτό είναι:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kb}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{(1,5 \times 10^6)(0,75)}{4(29 \times 10^6)(0,0155)}} = 0,889 \text{ ίντσ}^{-1}$$

Το βέλος κάμψης στον αρμό είναι:

$$y_0 = \frac{P_t}{4\beta^3 EI} (2 + \beta z) = \frac{1170}{4(0,889)^3(29 \times 10^6)(0,0155)} (2 + 0,889(0,2)) = 0,002 \text{ ίντσες}$$

Η πίεση επαφής του μετεόν στο μέτωπο της ράβδου είναι τότε:

$$\sigma = Ky_0 = 1.500.000(0,002) = 3000 \text{ psi}$$

#### 2.10.5. Μεταβίβαση φορτίων διαμέσου αρμών

Θεωρητικά αν η ράβδος ενίσχυσης είναι 100% αποτελεσματική, θα μεταβιβάσει το μισό φορτίο από τη μία πλάκα στην άλλη. Αυτό ισχύει αν κάθε πλάκα παρουσιάζει ίσα βέλη κάμψης στον αρμό και παραλαμβάνει το μισό φορτίο. Άρα αν ένα φορτίο εφαρμόζεται σε μικρή απόσταση από τον αρμό, τότε το φορτίο σχεδιασμού για τη ράβδο πρέπει να είναι το μισό του ολικού φορτίου σχεδιασμού. Η χαλαρότητα όμως που προξενείται στην πάκτωση της ράβδου από τις επαναλήψεις φορτίου τείνει να ελαττώσει τη μεταβίβαση φορτίων. Η ελάττωση εξαρτάται μέχρι ενός σημείου από το μέγεθος του φορτίου. Το φορτίο που μεταβιβάζεται διαμέσου του αρμού προσεγγίζει τη θεωρητική τιμή για μεγάλα βέλη κάμψης που οφείλονται σε μεγάλα φορτία, επειδή

κάποια χαλάρωση της πάκτωσης παραλαμβάνεται σχετικά εύκολα. Για μικρότερα φορτία, όμως, η ελάττωση του φορτίου που μεταβιβάζεται που προξενεί η χαλάρωση, θεωρείται ότι είναι 5% έως 10%. Έτσι, το μεταβιβαζόμενο φορτίο σχεδιασμού είναι 45% του φορτίου σχεδιασμού για τις πιο πολλές περιπτώσεις. Το φορτίο μεταβίβασης συμβολίζεται με  $P_t$ .

#### 2.10.6. Μήκος ενσωμάτωσης ράβδου

Η ικανότητα μεταβίβασης μιας ράβδου ενίσχυσης εξαρτάται από το μήκος ενσωμάτωσης. Ο Friberg έχει αποδείξει ότι αν η ράβδος κοπεί στο δεύτερο σημείο καμπής δεν επηρεάζεται η πίεση επαφής του μπετόν. Δοκιμές έχουν δείξει ότι για ράβδους διαμέτρου 3/4 ίντσας, το μήκος ενσωμάτωσης πρέπει να είναι περίπου ίσο με 8 διαμέτρους, αλλά το μήκος αυτό ελαττώνεται με την αύξηση της διαμέτρου της ράβδου.

Η επιτροπή στατικού σχεδιασμού του ACI (American Concrete Institute, Αμερικανικό Ινστιτούτο Μπετόν), συνιστά ράβδους μήκους 18 ιντσών για οδούς, ενώ για αεροδρόμια συνιστά ράβδους μήκους 18, 20 και 24 ιντσών, αντίστοιχα, για διαμέτρους ράβδων 1, 1 1/4 και 1 1/2 ιντσών.

Το άνοιγμα αρμού που χρησιμοποιείται συνήθως σε αρμούς συστολής και κατασκευαστικούς αρμούς είναι 0,25 ίντσες. Για αρμούς διαστολής συνηθίζεται άνοιγμα 0,75 ιντσών.

#### 2.10.7. Επιτρεπόμενη τάση επαφής

Η επιτρεπόμενη τάση επαφής έχει προσδιορισθεί πειραματικά και αποδείχθηκε ότι ποικίλλει με τη διάμετρο της ράβδου ενίσχυσης. Οι τιμές που προτείνονται από την Επιτροπή 325 του ACI προσδιορίζονται με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.37.

$$f_b = \left( \frac{4 - b}{3,0} \right) f_c' \quad 2.37$$

όπου  $f_b$  = επιτρεπόμενη τάση επαφής (psi)

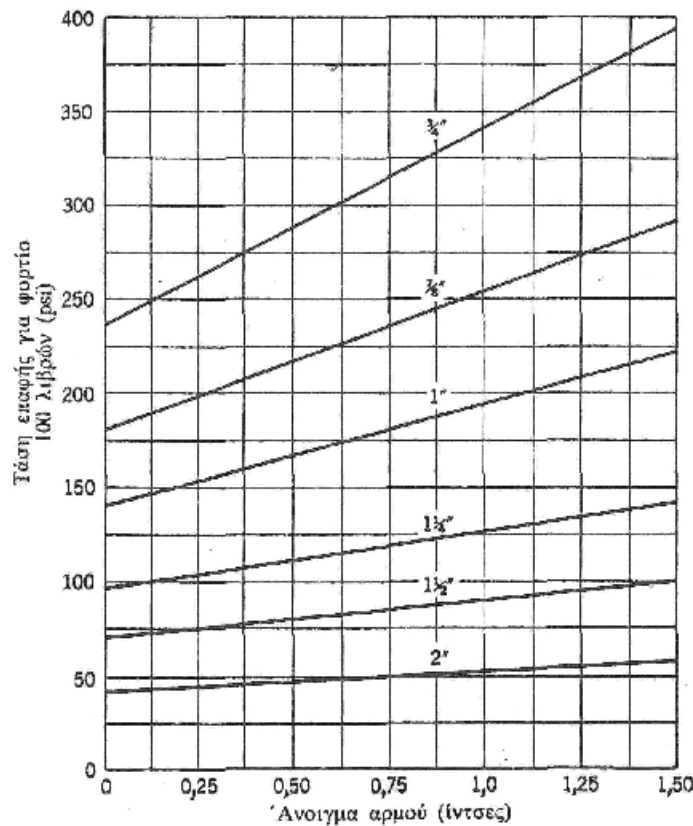
$b$  = διάμετρος της ράβδου ενίσχυσης (in.)

$f_c'$  = θλιπτική τάση θραύσης του μπετόν (psi)

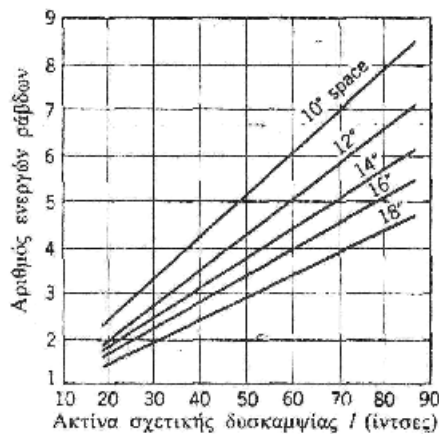
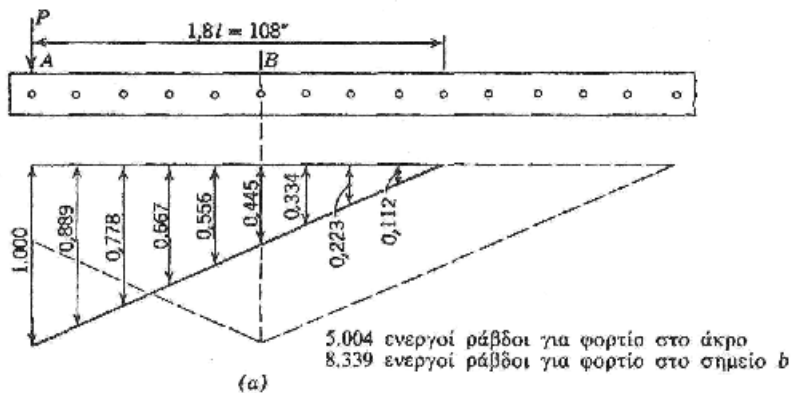
**Αριθμητικό παράδειγμα 2.3. Τάση επαφής από διάγραμμα.** Το σχήμα 2.13 δείχνει την τάση επαφής ανά 100 λίβρες φορτίου όπως υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.35. Το μέτρο αντίδρασης της ράβδου υποτίθεται ότι είναι 1.500.000 pci. Οι τάσεις επαφής δίνονται για διάφορα ανοίγματα αρμών.

Η ικανότητα μεταβίβασης φορτίων μιας μονής ράβδου προσδιορίζεται με τη διαίρεση της επιτρεπόμενης τάσης επαφής δια της τάσης που δίνεται στο σχήμα 2.13 και τον πολλαπλασιασμό της τιμής αυτής επί 100. Για παράδειγμα, ας υποτεθεί ότι η επιτρεπόμενη τάση επαφής του μπετόν είναι 3200 psi. Να υπολογισθεί η ικανότητα μεταβίβασης μιας ράβδου διαμέτρου 3/4 ίντσας με άνοιγμα αρμού 0,25 ίντσες.

$$\frac{3200}{265} (100) = 1210 \text{ λίβρες}$$



**Σχήμα 2.13. Τάση επαφής μονών ράβδων ενίσχυσης (μέτρο αντίδρασης ράβδου K= 1.500.000 pci).**



**Σχήμα 2.14. Μέθοδος υπολογισμού ικανότητας ομάδας ράβδων ενίσχυσης.** (α) Ικανότητα ομάδας ράβδων, μονός τροχός στο άκρο, ράβδος ανά 12 ίντσες (c-c),  $l = 60$  ίντσες, (b) Παράγοντες ικανότητας για διάφορες τιμές του  $l$ .

### 2.10.8. Επενέργεια ομάδας ράβδων

Το σχήμα 2.14 δείχνει τη μέθοδο υπολογισμού της ικανότητας ομάδας ράβδων, χρησιμοποιώντας την ανάλυση Friberg. Τα δεδομένα του σχήμα 2.14α είναι για ένα μονό τροχό στο άκρο, ράβδους ανά αποστάσεις κέντρων 12 ιντσών και για δύσκαμπτο οδόστρωμα με ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας ίση με 60 ίντσες. Η ικανότητα μεταβίβασης της ομάδας των ράβδων, υποθέτοντας μοναδιαίο συντελεστή στήριξης για την ακραία ράβδο, είναι ίση με το σύνολο των φορτίων που παραλαμβάνονται από όλες τις ράβδους από την άκρη μέχρι μία απόσταση 108 ιντσών. Το άθροισμα αυτό λέγεται συντελεστής ικανότητας. Για παράδειγμα, ας υποτεθεί ότι οι ράβδοι έχουν διάμετρο 3/4 ίντσας και ο αρμός έχει άνοιγμα 0,25 ίντσες. Από τις προηγούμενες παραγράφους

προκύπτει ότι η ικανότητα μιας ράβδου είναι 1210 λίβρες. Έτσι, η ικανότητα της ομάδας ράβδων για τις συνθήκες αυτές είναι:

$$5,004 (1210) = 6055 \text{ λίβρες}$$

Ο υπολογισμός αυτός ισχύει για ένα τροχό ακριβώς πάνω από την εξωτερική ράβδο. Για διπλά ελαστικά φορτηγών τοποθετημένα ανά 13 ίντσες, ο εξωτερικός τροχός υποτίθεται ότι βρίσκεται στην άκρη και ο εσωτερικός τροχός μόλις προς το εσωτερικό από την πρώτη ράβδο. Το φορτίο σχεδιασμού υποτίθεται ότι είναι συγκεντρωμένο πάνω από την πρώτη ράβδο.

Το σχήμα 2.14b περιέχει τους παράγοντες ικανότητας για ράβδους ενίσχυσης με αποστάσεις μεταξύ τους από 10 έως 18 ίντσες. Οι παράγοντες αυτοί ισχύουν μόνον στην περίπτωση μονού φορτίου στην εξωτερική άκρη του οδοστρώματος. Αν ένα δεύτερο φορτίο εφαρμοστεί σε απόσταση μικρότερη από 1,81 από την άκρη οι παράγοντες πρέπει να διορθωθούν με τον ακόλουθο τρόπο. Για παράδειγμα, υποθέστε ότι ένα δεύτερο φορτίο εφαρμόζεται στην έκτη ράβδο όπως δείχνει η διακεκομμένη γραμμή (σημείο B) του σχήματος 2.14. Υπάρχουν 5.004 ενεργές ράβδοι κάτω από το ακραίο φορτίο και 8.339 ενεργές ράβδοι για το φορτίο στο B. Ο ίδιος αριθμός (8.339) μπορεί να προκύψει με τον ακόλουθο τρόπο. Το σύνολο των τεταγμένων στο μεγάλο διάγραμμα για το φορτίο στο B είναι διπλάσιο του αθροίσματος του ακραίου διαγράμματος μείον το άθροισμα του 1,00 (η μεσαία τεταγμένη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί· δύο φορές) και των τεταγμένων που προεκτείνονται έξω από το διάγραμμα ( $0,112 + 0,223 + 0,334 = 0,669$ ). Το άθροισμα των τεταγμένων στο μεγάλο διάγραμμα είναι λοιπόν:

$$(2) (5,004) - 1,669 = 8,339$$

Χρησιμοποιώντας το σχήμα 2.14b και στρογγυλεύοντας λόγω του βαθμού ακρίβειας στην ανάγνωση των διαγραμμάτων, το άθροισμα των τιμών για το φορτίο στο σημείο B είναι:

$$(2) (5,0) - (1,7) = 8,3$$

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.4. Υπολογισμός ράβδων ενίσχυσης.** Να προσδιοριστούν οι διαστάσεις των ράβδων ενίσχυσης που απαιτούνται για το οδόστρωμα του σχήματος 2.14a για ένα φορτίο σχεδιασμού 15.500 λιβρών ανά τροχό. Πρόκειται για μονούς τροχούς, έναν σε κάθε πλευρά του οχήματος και με απόσταση

τροχών 5 πόδια. Η λύση είναι συνήθως λύση διαδοχικών προσεγγίσεων. Ας υποθεθεί ότι οι ράβδοι έχουν διάμετρο 1 ίντσας και ότι το άνοιγμα του αρμού είναι 0,25 ίντσες (αρμός συστολής). Η τάση ανά 100 λίβρες φορτίου από το σχήμα 2.13 είναι 155 psi. Η επιτρεπόμενη τάση επαφής για  $f_i = 3000$  psi είναι:

Αν δεχθούμε μεταβίβαση φορτίων 45% τα φορτία μεταβίβασης (Pt) στα σημεία Α και Β είναι ίσα με  $(0,45)(15500) = 6975$  λίβρες. Το ολικό φορτίο στην εξωτερική ράβδο υπολογίζεται προσθέτοντας τις επιδράσεις των φορτίων στα Α και Β και είναι ίσο με:

$$f_b = \left( \frac{4 - 1}{3,0} \right) (3000) = 3000 \text{ psi}$$

Η πίεση επαφής στην εξωτερική ράβδο (από το σχήμα 2.13) είναι ίση με:

$$\frac{6975}{5} + 6975 \left( \frac{0,44}{8,33} \right) = 1763 \text{ λίβρες}$$

Αυτή είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη των 3000 psi και έτσι η ράβδος διαμέτρου 1 ίντσας είναι ικανοποιητική.

$$155 \left( \frac{1763}{100} \right) = 2732 \text{ psi}$$

## 2.11. Ράβδοι σύνδεσης

Η σχέση ανάμεσα στον απαιτούμενο σπλισμό κατανομής και στο μήκος της πλάκας είναι όπως στην εξίσωση 2.38. Οι ίδιες αρχές ισχύουν για τις ράβδους σύνδεσης όπως και για το θερμοκρασιακό σπλισμό. Η μόνη διαφορά με το συμβατικό τρόπο ανάλυσης είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σωστή τιμή του L στην εξίσωση.

Για συνδετήριες ράβδους σε διαμήκεις αρμούς το ελεύθερο σώμα που χρησιμοποιήθηκε στην κατάστρωση της εξίσωσης είναι μία λωρίδα. Έτσι, αν το μήκος της λωρίδας είναι L, η εξίσωση 2.38 για ράβδους σύνδεσης γίνεται:

$$A_s = \frac{WfLd}{f_s} \tag{2.38}$$

όπου W = το βάρος της πλάκας (psf)

f = συντελεστής αντίστασης

L = πλάτος της λωρίδας

$f_s$  = επιτρεπτή τάση χάλυβα (psi)

d = απόσταση μεταξύ ράβδων



Η τάση συνάφειας στη συνδεδετήρια ράβδο είναι:

$$u = \frac{WfLd}{\Sigma\sigma(t/2)} \quad 2.39$$

όπου  $\Sigma\sigma$  = περίμετρος της ράβδου (in.)

$t$  = μήκος της ράβδου (in.)

## 2.12. Συνεχής οπλισμός

Ο θερμοκρασιακός οπλισμός, χρησιμοποιείται με σκοπό τον έλεγχο του ανοίγματος των ρωγμών, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής μεταβίβαση φορτίων. Η απαιτούμενη ποσότητα είναι σχετικά μικρή και η επίδρασή της στην φορτοϊκανότητα είναι αμελητέα. Ο απαιτούμενος οπλισμός που προκύπτει από την εξίσωση 2.27 δεν εξασφαλίζει ότι η ρωγή θα συγκρατηθεί αν χρησιμοποιηθούν πλάκες μεγάλου μήκους. Είναι προφανές από την εξέταση της εξίσωσης ότι η απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού είναι συνάρτηση του συντελεστή αντίστασης, καθώς και του μήκους της πλάκας. Καθώς το μήκος της πλάκας αυξάνεται, η απαιτούμενη ποσότητα θερμοκρασιακού οπλισμού αυξάνεται επίσης.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς εγκάρσιους αρμούς, αν υπάρχει επαρκής οπλισμός. Μία πλάκα άοπλου σκυροδέματος και μεγάλου μήκους θα ρηγματωθεί περίπου στο μέσο της. Το ρήγμα θα είναι έως 1/4 ίντσας και ύστερα θα δημιουργηθούν και άλλα ρήγματα στα κέντρα των τμημάτων που δημιουργήθηκαν. Οδοστρώματα συνεχούς οπλισμού χαρακτηρίζονται αυτά που δεν έχουν εγκάρσιους αρμούς (εκτός από κατασκευαστικούς και κάποιους αρμούς διαστολής) και με σχετικά μεγάλες ποσότητες θερμοκρασιακού οπλισμού για τη συγκράτηση των ρωγμών.

Σε οδοστρώματα συνεχούς οπλισμού, ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν από διάφορες αιτίες όπως σύμπτυξη, συστολή, κύρτωση και φόρτιση. Η πείρα έχει δείξει ότι ένας μεγάλος αριθμός ρωγμών σχηματίζονται λίγο μετά τη διάστρωση του μπετόν. Οι ρωγμές αυτές σχηματίζονται πιθανόν από συνδυασμό τάσεων σύμπτυξης, συστολής κι κύρτωσης.

Εξετάζοντας πρώτα την σύμπτυξη και συστολή, οι ρωγμές αναπτύσσονται σαν αποτέλεσμα περιορισμένης κίνησης που οφείλεται σε θερμοκρασιακές μεταβολές, αν και οι συντελεστές θερμικής μεταβολής όγκου του χάλυβα και του μπετόν είναι σχεδόν

ίσοι (0,000005 in./in./°F). Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ρηγμάτωση οφείλεται σε εφελκυσμό που αναπτύσσεται ίσα και στο χάλυβα και στο μπετόν.

Εφόσον ο χάλυβας έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το μπετόν, το μπετόν υπερκαταπονείται και αναπτύσσει ρωγμές. Η σύμπτυξη του μπετόν λίγο μετά τη διάστρωση προκαλεί, επίσης, υπερκαταπόνηση του μπετόν όπως επίσης και η αντίσταση του υπεδάφους στην κίνηση. Μεγάλες πτώσεις της θερμοκρασίας οδηγούν σε γρήγορη ανάπτυξη ρωγμών. Αν π.χ. μία πλάκα από μπετόν διαστρωθεί μία πολύ ζεστή ημέρα και μετά η θερμοκρασία πέσει κατά τη νύχτα, τότε θα σημειωθεί σοβαρή ρηγμάτωση. Ο Vetter έκανε ανάλυση των τάσεων σε στοιχεία μπετόν με συνεχή οπλισμό, θεωρώντας το σχήμα 2.15 η κατανομή τάσεων στο χάλυβα και το μπετόν είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15α και β. Οι τάσεις όπως φαίνεται και στο σχήμα αφορούν ένα στοιχείο από μπετόν συνεχούς οπλισμού που υπόκειται σε σύμπτυξη και θερμοκρασιακές μεταβολές. Εξετάζοντας πρώτα τη σύμπτυξη, κατά τη διάρκεια της σύμπτυξης το μπετόν και ο χάλυβας καταπονούνται ομοιόμορφα. Ύστερα το μπετόν υπερκαταπονείται και δημιουργούνται ρωγμές. Η εξίσωση 2.40 έχει καταστρωθεί από τον Vetter και δείχνει το ποσοστό του οπλισμού που απαιτείται για τη συγκράτηση των ρωγμών αυτών.

$$p = \left[ \frac{S_c'}{S_s + zE_s - nS_c'} \right] 100 \quad 2.40$$

Όπου  $S_c'$  = εφελκυστική τάση θραύσης του μπετόν

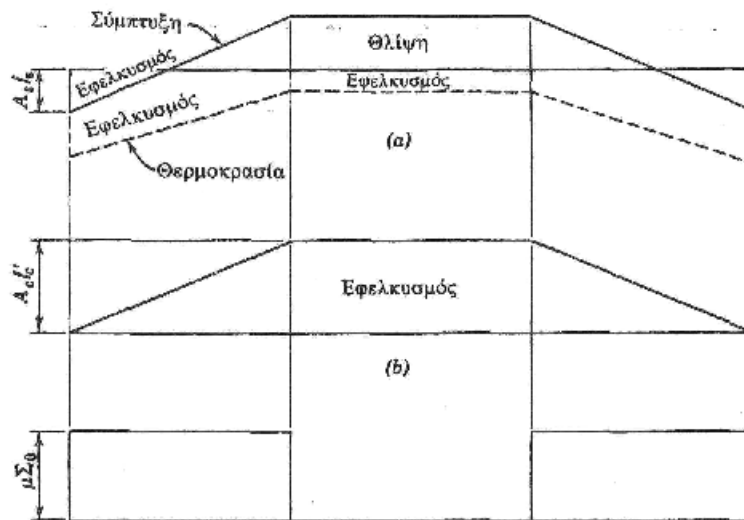
$S$  = όριο ελαστικότητας του χάλυβα

$z$  = συντελεστής σύμπτυξης

$n = E_s/E_c$

$$L = \frac{(S_c')^2}{np^2 \frac{\Sigma_0}{A_s} u(zE_c - S_c')} \quad 2.41$$

$$p = \frac{S_c'}{S_s} (100) \quad 2.42$$



**Σχήμα 2.15.** Κατανομή τάσεων ανάμεσα σε ρωγμές ενός στοιχείου μπετόν με συνεχή οπλισμό, που υπόκειται σε σύμπτυξη και θερμοκρασιακή μεταβολή, (α) Τάση οπλισμού, (β) τάση μπετόν, (γ) τάση συνάφειας (κατά Vetter).



**Σχήμα 2.16.** Άποψη ράβδων διαμήκους οπλισμού τοποθετημένων κατάλληλα πριν από τη διάστρωση του μπετόν για την κατασκευή οδοστρώματος από μπετόν συνεχούς οπλισμού με ξυλότυπους ολίσθησης.

Το ποσοστό οπλισμού που δίνει η εξίσωση 2.42 είναι το ελάχιστο ποσοστό που απαιτείται και κατά το σχεδιασμό, το ποσοστό αυτό πρέπει να συγκρίνεται με αυτό που υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 2.40.  $L$  είναι η απόσταση ανάμεσα στις ρωγμές και  $k$  είναι η τάση συνάφειας.

Οι αντίστοιχες εξισώσεις για πτώση θερμοκρασίας είναι οι 2.43, 2.44 και 2.45. Η εξίσωση 2.45 δίνει την ελάχιστη τιμή απαιτούμενου οπλισμού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού αυξάνεται με την αύξηση της ολικής πτώσης θερμοκρασίας ( $t$ ). Έτσι, σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, αν προβλέπονται μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας σε ένα χρονικό διάστημα μετά τη διάστρωση, τότε το απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού αυξάνεται:

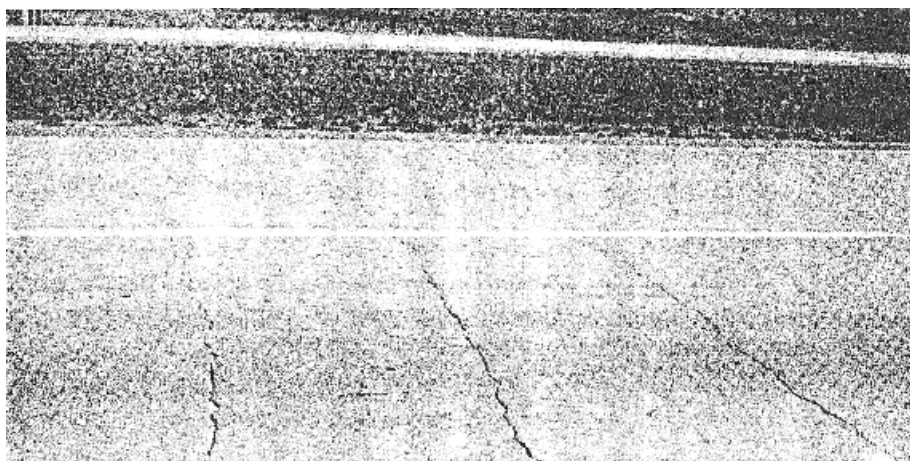
$$p = \left[ \frac{S_c'}{2(S_s - t\epsilon E_s)} \right] 100 \quad 2.43$$

όπου  $t$  = συνολική πτώση της θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{F}$ )

$\epsilon$  = συντελεστής θερμικής μεταβολής όγκου

$$L = \frac{(S_c')^2}{np^2 \frac{\sum u}{A_s} u(E_c \epsilon t - S_c')} \quad 2.44$$

$$p = \left[ \frac{S_c'}{S_s - nS_c'} \right] 100 \quad 2.45$$



**Σχήμα 2.17. Οι ρωγμές σε οδοστρώματα από μπετόν με συνεχή οπλισμό εμφανίζονται ανά μικρές αποστάσεις και συχνά με τυχαίες διευθύνσεις.**

Η απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού για τη συγκράτηση των ρωγμών, όπως παρέχεται από τις προηγούμενες εξισώσεις κυμαίνεται από 0,6 έως 0,8 τοις εκατό της διατομής του μπετόν. Στις ΗΠΑ, συνήθως, χρησιμοποιείται η τιμή 0,6%. Σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.41 και 2.44, η απόσταση μεταξύ ρωγμών είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων του μπετόν και του χάλυβα, των θερμοκρασιακών μεταβολών, των συντελεστών θερμικής μεταβολής όγκου και σύμπτυξης και ποσοστού οπλισμού που χρησιμοποιείται.

Πολλοί ερευνητές έχουν μετρήσει τις αποστάσεις μεταξύ ρωγμών σε οδοστρώματα από μπετόν με συνεχή οπλισμό και προσπάθησαν να καταστρώσουν σχέσεις μεταξύ των αποστάσεων αυτών και της λειτουργίας των ρωγμών. Ρωγμές σε αποστάσεις από 3 έως 10 πόδια έχουν δείξει άριστη λειτουργία. Παράλληλες ρωγμές όμως, σε κοντινές αποστάσεις (μικρότερες από 2 πόδια) δείχνουν ότι επέρχεται μεγάλη βλάβη, ιδίως όταν οι ρωγμές παρουσιάζουν μεγάλο θρυμματισμό (βλέπε σχήμα 2.17).

Επιτόπιες παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι τα ελεύθερα άκρα οδοστρωμάτων από μπετόν με συνεχή οπλισμό υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές μήκους που προκαλούν οι μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές, καθώς και η ηλικία της πλάκας. Γι' αυτό επιβάλλεται η κατασκευή αρμών διαστολής σε όλες τις γέφυρες και σε άλλες θέσεις όπου οι μεταβολές μήκους μπορεί να είναι επιβλαβείς. Μία εναλλακτική λύση είναι η κατασκευή αγκυρώσεων στα άκρα της πλάκας.

### 2.13. **Οδοστρώματα προεντεταμένου σκυροδέματος**

Στις ΗΠΑ έχουν κατασκευαστεί πολλά πειραματικά οδοστρώματα από προεντεταμένο μπετόν. Τα κυριότερα προεντεταμένα οδοστρώματα σε σημερινή χρήση έχουν κατασκευαστεί στην Ευρώπη. Η προένταση προϋποθέτει τη συνεχή θλίψη της πλάκας, όπως περίπου γίνεται κατά την προένταση του μπετόν στις γέφυρες και άλλα έργα. Οι μεγαλύτερες δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν αφορούν μεθόδους αγκύρωσης των προεντεταμένων πλακών, σκεύρωση της πλάκας κατά την ελευθέρωση των τάσεων από τις αγκυρώσεις και κατασκευή κατάλληλων αρμών μεταξύ των πλακών. Η χειρωνακτική εργασία που απαιτούν τα οδοστρώματα προεντεταμένου μπετόν είναι σχετικά πολλή και γι' αυτό η χρήση τους δεν είναι εκτεταμένη. Σε ειδικές περιπτώσεις, όμως, το προεντεταμένο μπετόν προσφέρει μεγάλες δυνατότητες, ιδίως όταν τα διαθέσιμα υλικά κατασκευής δεν αφθονούν.

#### 2.14. Τάσεις λόγω φορτίου

Στην πρωτότυπη εργασία του, ο Westergaard θεώρησε τρεις περιπτώσεις φόρτισης: (1) γωνιακό φορτίο, (2) ακραίο φορτίο και (3) εσωτερικό φορτίο. Για το γωνιακό φορτίο η ροπή κάμψης είναι:

$$M = -\frac{P}{2} \left[ 1 - \left( \frac{a_1}{l} \right)^{0,6} \right] \quad 2.46$$

όπου  $a_1$  είναι όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18

Διαιρώντας την εξίσωση 2.46 δια της ροπής αντίστασης διατομής μοναδιαίου πλάτους  $\Lambda^2/6$ , προκύπτει η εφελκυστική τάση όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.47.

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a_1}{l} \right)^{0,6} \right] \quad 2.47$$

Οι εξισώσεις για εσωτερική και ακραία φόρτιση βασίζονται σε δύο θεωρίες. Για την πρώτη, που ονομάζεται κανονική θεωρία, γίνεται η παραδοχή ότι οι ευθείες γραμμές της πλάκας παραμένουν ευθείες και κάθετες στον ουδέτερο άξονα, όταν εφαρμόζεται η φόρτιση. Για τη δεύτερη, γνωστή σαν ειδική θεωρία, η παραδοχή αυτή εγκαταλείπεται στην άμεση γειτονία του φορτίου. Η εξίσωση του Westergaard για το εσωτερικό φορτίο για  $\mu = 0,5$  είναι:

$$\sigma_c = \frac{0,316P}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \left( \frac{l}{b} \right) + 1,069 \right] \quad 2.48$$

$$b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h \quad 2.49$$

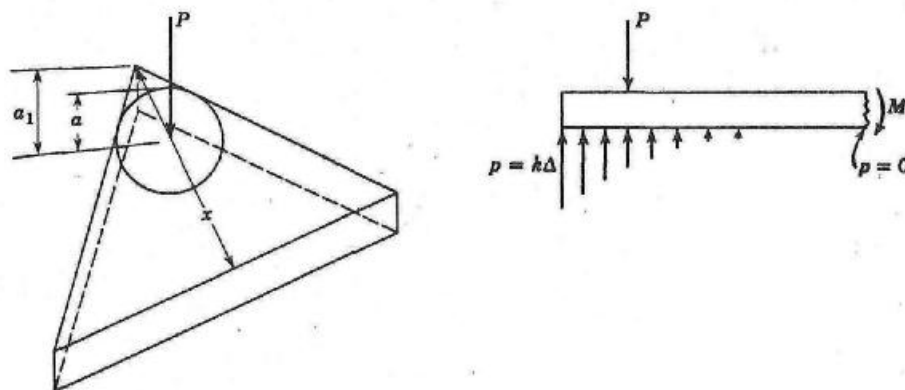
Για τιμές του  $a$  μικρότερες από 1,724A, εφαρμόζεται η ειδική θεωρία και το  $b$  υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.49. Για μεγαλύτερες τιμές του  $a$ , χρησιμοποιείται η κανονική θεωρία δηλ.  $b = a$ . Η εξίσωση για την ακραία φόρτιση είναι:

$$\sigma_c = \frac{0,572P}{h^2} \left[ 4 \log_{10} \left( \frac{l}{b} \right) + 0,359 \right] \quad 2.50$$

Από τότε που έγινε η πρωτότυπη εργασία από τον Westergaard πολλοί ερευνητές βελτίωσαν τις μεθόδους υπολογισμού των τάσεων. Ειδικά με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι δυνατή η λύση προβλημάτων που έχουν πολλές μεταβλητές.

Η γενική θεωρία του Westergaard δεν θα παρουσιαστεί εδώ, γιατί ξεφεύγει από το θέμα της εργασίας βιβλίου. Αντί γι' αυτήν θα γίνει χρήση διαγραμμάτων επιρροής που επιτρέπουν τον υπολογισμό τάσεων οδοστρωμάτων από μπετόν για όλα τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην πράξη.

Ακόμη γίνεται αναφορά σε λύσεις με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή που έχουν αναπτυχθεί από την Packard και που διατίθεται για επαγγελματική χρήση.



**Σχήμα 2.18. Τάσεις λόγω γωνιακού φορτίου**

### 2.15. Διαγράμματα επιρροής

Οι Pickett και Ray (22) έχουν καταστρώσει διαγράμματα επιρροής για την επίλυση των γενικών εξισώσεων. Τα διαγράμματα έχουν καταστρωθεί για δύο περιπτώσεις φόρτισης: (1) με την παραδοχή ότι το υπέδαφος συμπεριφέρεται σαν ένα πυκνό υγρό (συμβατικό  $k$ ) και (2) με την παραδοχή ότι το υπέδαφος συμπεριφέρεται σαν ελαστικό στερεό σώμα.

Για τη δεύτερη περίπτωση η σταθερά που ορίζει το υπέδαφος είναι:

$$k_e = \frac{pd}{\Delta} \quad 2.51$$

Τα σχήματα 2.19 έως 2.22 παρουσιάζουν διαγράμματα επιρροής για ροπές κάμψης και παραμορφώσεις δύσκαμπτων οδοστρωμάτων για την περίπτωση πυκνού υγρού. Η λύση βρίσκεται χαράσσοντας την επιφάνεια του αποτυπώματος επαφής του τροχού στο διάγραμμα, μετρώντας τον αριθμό των πεδίων (τετραπλεύρων) που επικαλύπτονται από την επιφάνεια και επιλύοντας τις παρακάτω εξισώσεις:

Παραμόρφωση

$$\Delta = \frac{0,0005pl^4N}{D} \quad 2.52$$

Ροπές

$$M = \frac{pl^2N}{10.000} \quad 2.53$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad 2.54$$

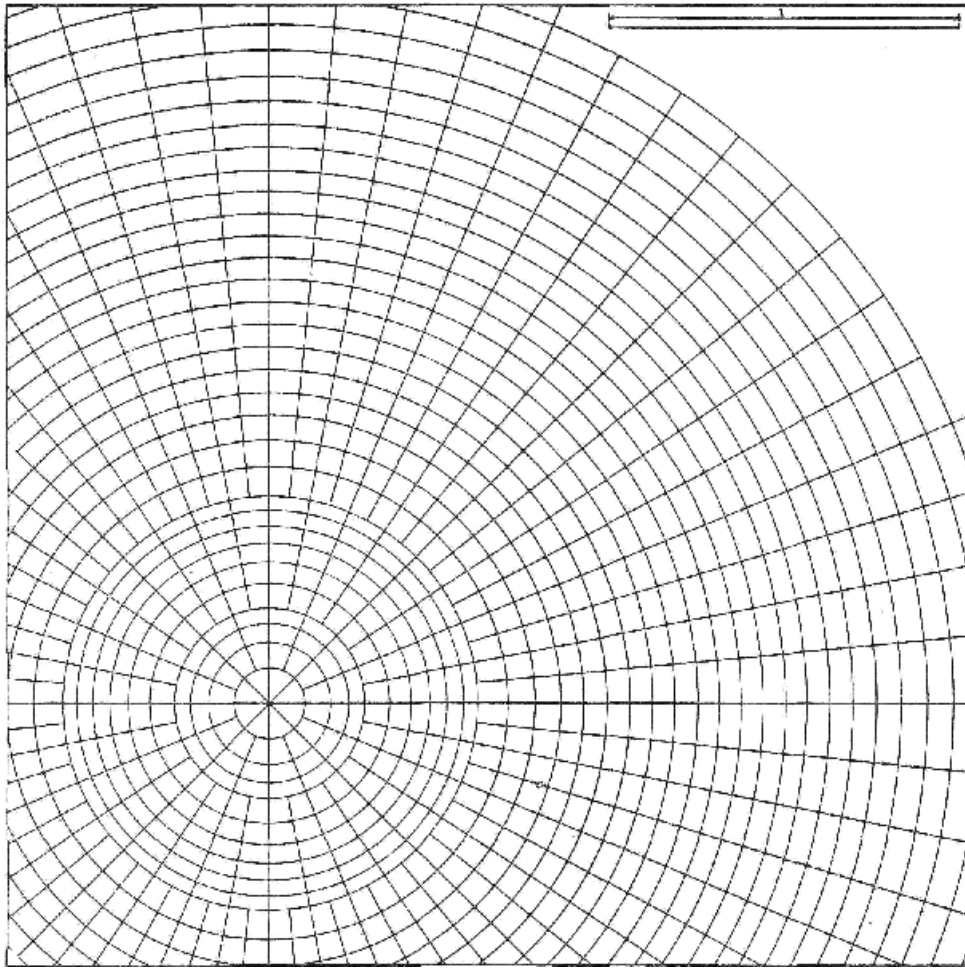
$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}$$

$$\text{Τάση} = \frac{6M}{h^2} \quad 2.55$$

### 2.15.1. Διαγράμματα τάσεων

Τα σχήματα 2.23 και 2.24 δείχνουν διαγράμματα τάσεων που χρησιμοποιούνται για τη λύση ορισμένων προβλημάτων τάσεων. Οι τιμές που παρέχουν τα διαγράμματα είναι ο αριθμός των πεδίων κάτω από τους τροχούς από τα σχήματα 2.21 και 2.22 και για διάφορες θέσεις των τροχών. Οι τάσεις είναι στη διεύθυνση του η όπως πριν. Τα διαγράμματα αυτά δίνουν τις τάσεις για δύο περιπτώσεις, εσωτερικές τάσεις κατά μήκος του μικρού άξονα των τροχών και ακραίες κατά μήκος του μεγάλου άξονα (τροχός παράλληλος προς την άκρη).



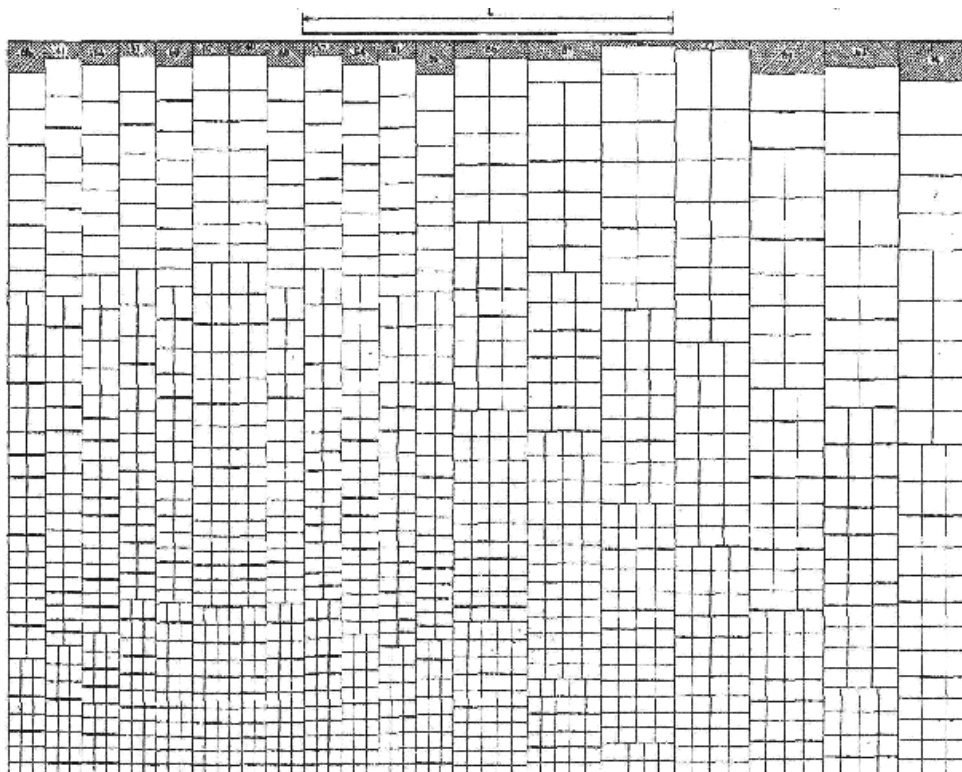


**Σχήμα 2.19. Διάγραμμα επιρροής για παραμόρφωση πλάκας από μπετόν που οφείλεται σε εσωτερική φόρτιση** (το υπέδαφος υποτίθεται ότι είναι πυκνό υγρό. Ο λόγος του Poisson για το μπετόν είναι 0,15). (Από το σχ. 1 των Pickett και Ray, «Διαγράμματα επιρροής για οδοστρώματα από μπετόν», Πρακτικά, ASCE, 1951).

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.5. Διαγράμματα των Pickett και Ray.** Να προσδιοριστεί η τάση κάτω από ένα τροχό ενός συστήματος δίδυμων εν σειρά τροχών 160.000 λιβρών, με πίεση ελαστικού 150 psi στο εσωτερικό μιας πλάκας πάχους 14 ιντσών. Το μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους είναι 100 pci. Από τον Πίνακα 3.1, η ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας είναι 55,31 ίντσες. Η επιφάνεια επαφής είναι  $40.000/150 = 267$  τετραγωνικές ίντσες ανά ελαστικό. Το πρώτο βήμα στη λύση είναι η χάραξη των αποτυπωμάτων ελαστικού στα διαγράμματα επιρροής χρησιμοποιώντας την κατάλληλη κλίμακα που σημειώνεται στο επάνω μέρος του διαγράμματος. Στο σχήμα 2.21, η

κλίμακα της ακτίνας σχετικής δυσκαμψίας στο επάνω μέρος του σχήματος είναι ίση με 55,31 ίντσες. Τα αποτυπώματα ελαστικού είναι λοιπόν όπως απεικονίζονται.

Κάθε αποτύπωμα κατασκευάζεται έτσι ώστε το πλάτος είναι 0,6 φορές το μήκος και οι κύκλοι στα άκρα έχουν ακτίνες ίσες με το μισό του πλάτους. Έτσι, το μήκος μπορεί να υπολογίζεται από τον τύπο  $L = \sqrt{A/0,523}$ , όπου A είναι η επιφάνεια επαφής.



**Σχήμα 2.20. Διάγραμμα επιρροής για παραμόρφωση στο άκρο (σημείο 0) πλάκας από μπετόν που οφείλεται σε φόρτιση στην γειτονία του άκρου. (Το έδαφος υποτίθεται ότι είναι ένα πυκνό υγρό. Ο λόγος του Poisson για το μπετόν είναι 0,15). (Από το Σχ. 2 των Pickett και Ray, «Διαγράμματα επιρροής για οδοστρώματα από μπετόν», Πρακτικά, ASCE, 1951).**

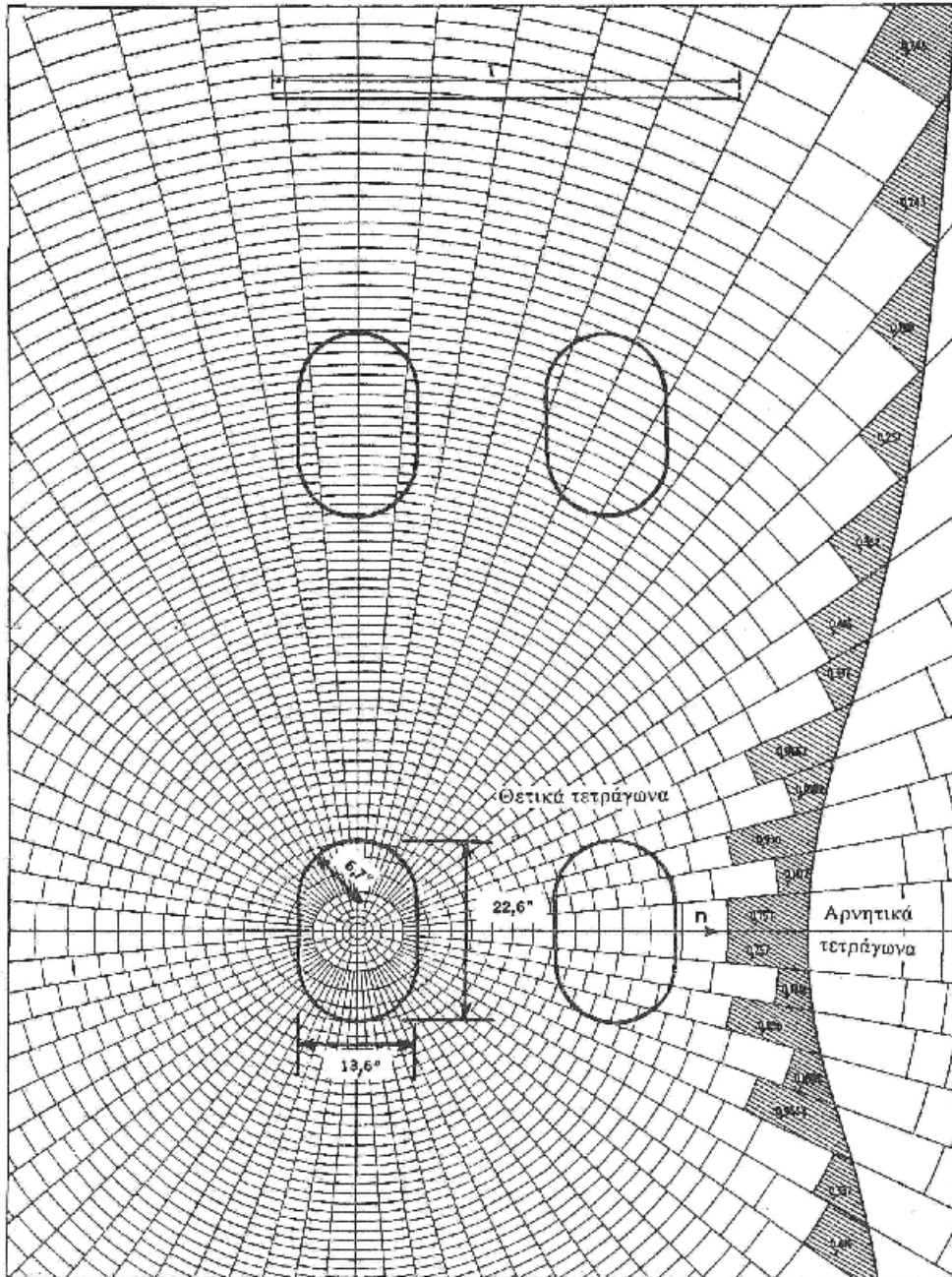
Είναι προφανές ότι η ροπή κάμψης που προκύπτει με τον τρόπο αυτό θα είναι μέγιστη όταν ο αριθμός πεδίων που επικαλύπτουν οι επιφάνειες επαφής ελαστικού είναι μέγιστος. Οι ροπές κάμψης είναι πάντα στην αρχή κατά τη διεύθυνση η ανεξάρτητα από τη θέση του φορτίου. Στο παράδειγμα αυτό ο αριθμός των επικαλυμμένων πεδίων είναι 295. Η ροπή κάμψης είναι:

$$\frac{150(55,31)^2(295)}{10,000} = 13.537 \text{ inch pounds}$$

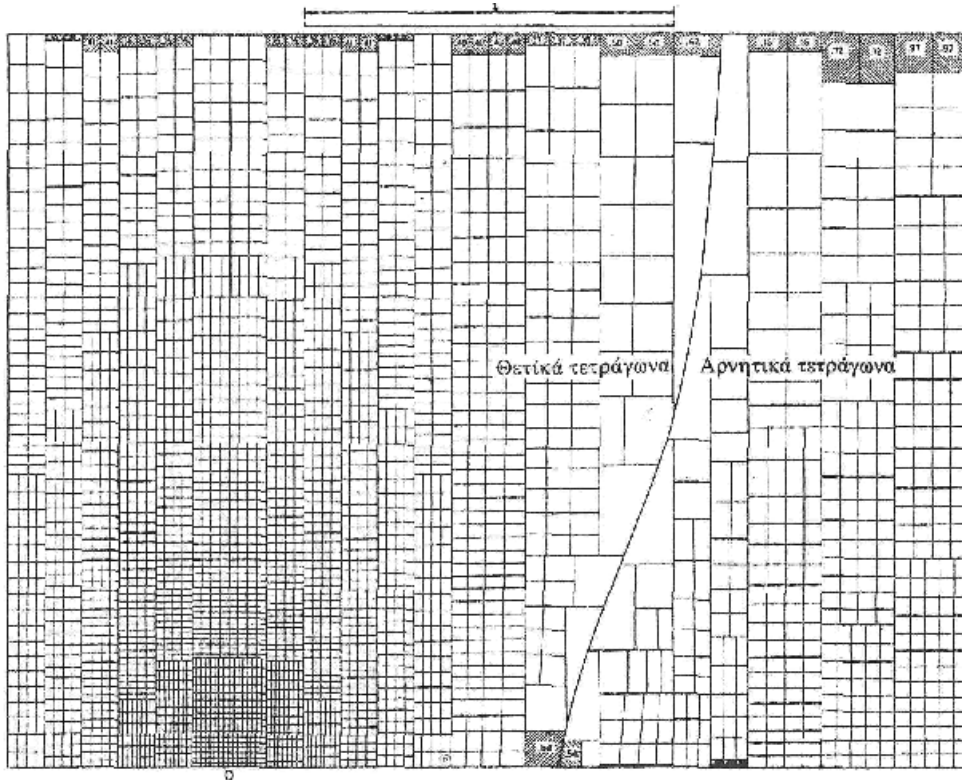
Διαιρώντας δια της ροπής αντίστασης  $h^2/6$  η τάση είναι:

$$\frac{13.537(6)}{(14)^2} = 414 \text{ psi}$$

Οι παραμορφώσεις και η τάση στο άκρο μπορούν να προσδιοριστούν με ένα παρόμοιο τρόπο.



**Σχήμα 2.21. Διάγραμμα επιρροής για τη ροπή κάμψης ΜΠ σε ένα οδόστρωμα από μπετόν που προκαλεί ένα εσωτερικό φορτίο πλάκας. (Το υπέδαφος υποτίθεται ότι είναι ένα πυκνό υγρό. Ο λόγος του Poisson για το οδόστρωμα είναι 0,15). (Από το Σχ. 3 των Pickett και Ray, «Διαγράμματα επιρροής για οδοστρώματα από μπετόν», Πρακτικά, ASCE, 1951).**



**Σχήμα 2.22. Διάγραμμα επιρροής για την ροπή M στο άκρο (σημείο O) μιας πλάκας από μπετόν λόγω φορτίου στη γειτονία του άκρου. (Το υπέδαφος υποτίθεται ότι είναι ένα πυκνό υγρό. Ο λόγος του Poisson για οδόστρωμα είναι 0,15). (Από το Σχ. 4 των Pickett και Ray, «Διαγράμματα επιρροής για οδοστρώματα από μπετόν», Πρακτικά, ASCE, 1951).**

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.6. Διαγράμματα τάσης.** Να προσδιοριστούν οι τάσεις εσωτερικού και άκρου για τα ίδια δεδομένα όπως πριν, αλλά με τη βοήθεια των διαγραμμάτων των σχημάτων 2.23 και 2.24. Τα γεωμετρικά δεδομένα του προβλήματος περιέχονται στο σχήμα 2.25. Οι τιμές του N, αριθμός πεδίων κάτω από τους τροχούς μπορούν να αναγνωσθούν απευθείας από τα σχήματα 2.23 και 2.24. Η λύση του προβλήματος φαίνεται στον Πίνακα 2.2.

Οι τιμές του αριθμού των πεδίων για εσωτερική και ακραία φόρτιση είναι 300 και 546 αντίστοιχα. Έτσι οι ροπές κάμψης και τάσεις σε κάθε περίπτωση είναι:

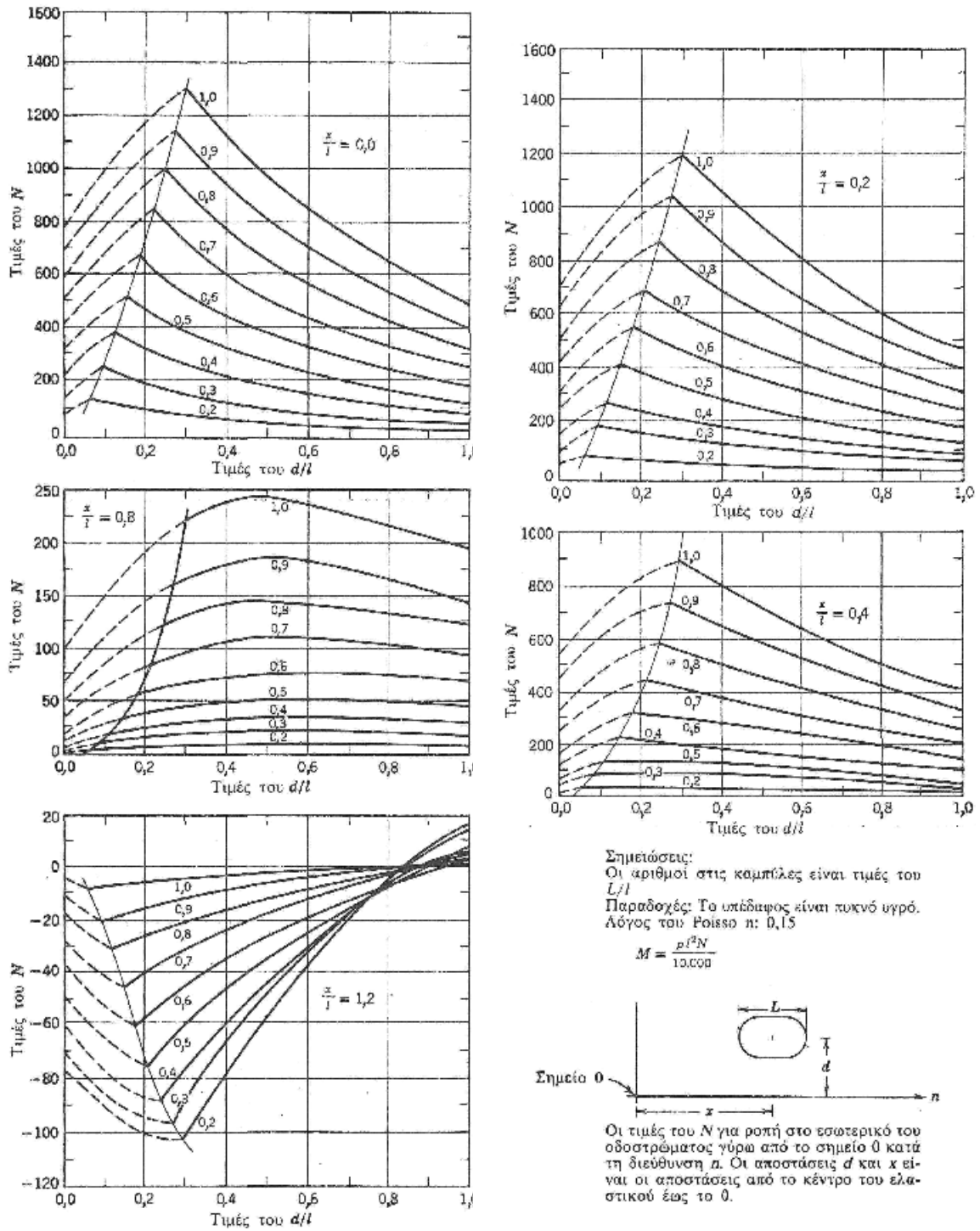
Εσωτερικό

$$M = \frac{150(55,31)^2(300)}{10.000} = 13.766 \text{ ίντσες λίβρες}$$

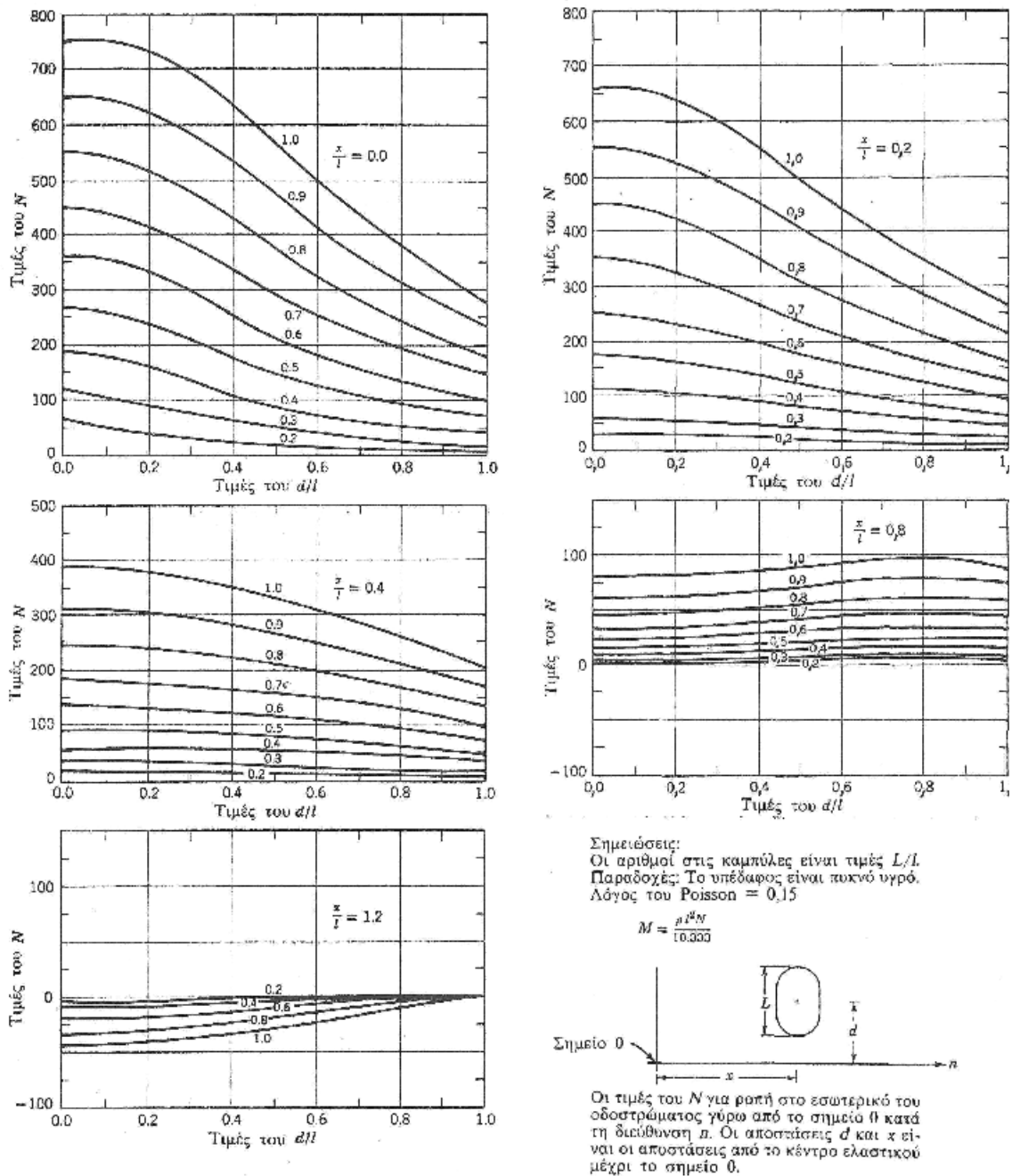
$$\sigma_i = \frac{13.766(6)}{(14)^2} = 421 \text{ psi}$$

Άκρο (ανάλογα με τις τιμές του N)

$$\sigma_i = \frac{546}{300} (421) = 766 \text{ psi}$$

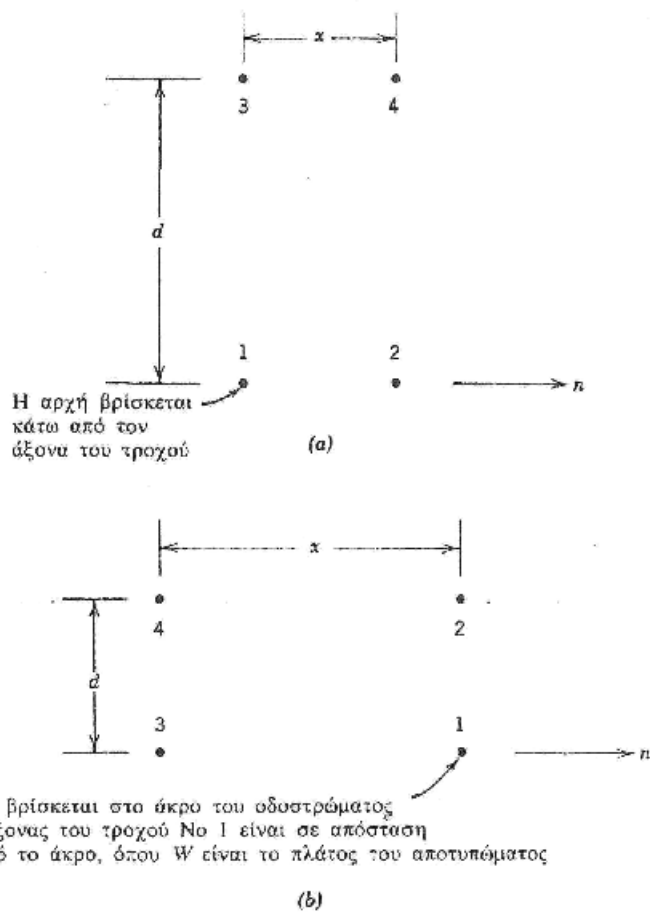


**Σχήμα 2.23.** Τιμές του  $N$  για ροπές γύρω από το σημείο 0 στο άκρο του οδοστρώματος κατά τη διεύθυνση  $n$ . Οι αποστάσεις από το κέντρο του τροχού μέχρι το σημείο 0 φαίνονται στο διάγραμμα στο κάτω δεξιό μέρος. (Βλέπε επίσης Σχήμα 2.25 για επεξήγηση της μεθόδου).



Σχήμα 2.24.

**Οι τιμές του  $N$  για ροπή στο εσωτερικό του οδοστρώματος γύρω από το σημείο  $\theta$  κατά τη διεύθυνση  $n$ .** Οι αποστάσεις από το κέντρο του τροχού μέχρι το σημείο  $\theta$  είναι όπως φαίνεται στο κάτω δεξιό άκρο του διαγράμματος (Βλέπε επίσης το Σχήμα 2.25 για αποσαφήνιση της μεθόδου).



**Σχήμα 2.25 Γεωμετρικά στοιχεία για τη λύση του αριθμητικού παραδείγματος 2.6.**

### 2.16. Προσδιορισμός των τάσεων από διαγράμματα

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων από μετόν βασίζεται σε τιμές επιτρεπτών τάσεων. Έτσι τα διαγράμματα που έχουν συνταχθεί βασίζονται στο ότι το πάχος του οδοστρώματος υπολογίζεται με τη βοήθεια τιμών της επιτρεπτής τάσης, του μέτρου αντίδρασης του υπεδάφους και του φορτίου τροχού.

Τα διαγράμματα υπολογισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστροφα, δηλαδή για τον προσδιορισμό των τάσεων σε ένα οδόστρωμα ορισμένου πάχους.

**Πίνακας 2.2. Παράδειγμα υπολογισμού τάσεων από διαγράμματα (σχήμα 2.23 και σ.24). Βλέπε σχήμα 2.25 για τη διάταξη του προβλήματος.**

Πάχος οδοστρώματος = 14 in.

Μέτρο  $k = 100$  pci

Ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας = 55,31 in.

Μήκος αποτυπώματος ελαστικού = 2,6 in.

Πλάτος αποτυπώματος ελαστικού = 13,6 in.

Αποστάσεις τροχών = 60 in.  $\times$  31 in.

$$\frac{L}{l} = \frac{22,6}{55,31} = 0,41$$

Περίπτωση	Τροχός No	$x$ (in.)	$\frac{x}{l}$	$d$ (in.)	$\frac{d}{l}$	$N$
Εσωτερικό	1	0	0	0	0	190
	2	31	0,56	0	0	50
	3	0	0	60	1,08	45
	4	31	0,56	60	1,08	15
Σύνολο $N$						300
Άκρο	1	0	0	6,8	0,12	395
	2	0	0	37,8	0,68	190
	3	60	1,08	6,8	0,12	-29
	4	60	1,08	37,8	0,68	-10
Σύνολο $N$						546

**Αριθμητικό παράδειγμα 2.7.** Να προσδιοριστούν οι τάσεις στο εσωτερικό του οδοστρώματος του παραδείγματος 2.6 για μία φόρτιση Boeing 707 με τη βοήθεια διαγράμματος υπολογισμού. Να σημειωθεί ότι οι διαστάσεις του συστήματος είναι διαφορετικές από ότι στο προηγούμενο παράδειγμα (56in.X34,6in.) και η πίεση ελαστικού είναι 184 psi αντί 150 psi. Χρησιμοποιώντας το σχήμα 16.4 αντίστροφα για οδόστρωμα πάχους 14 ιντσών,  $k$  ίσο με 100 pci και φορτίο συστήματος τροχών 160.000 λιβρών προκύπτει τάση 470 psi.

#### 2.16.1. Οδοστρώματα με συνεχή οπλισμό

Τα οδοστρώματα από μπετόν με συνεχή οπλισμό δεν μπορούν να μελετηθούν με τη βοήθεια των εξισώσεων Westergaard, γιατί τα οδοστρώματα αυτά έχουν εγκάρσιες ρωγμές ανά μικρές αποστάσεις. Η φορτοϊκανότητα οδοστρωμάτων με συνεχή οπλισμό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρώτο, ένα μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από το υπέδαφος, όταν το οδόστρωμα παραμορφώνεται. Δεύτερο, ένα τμήμα του φορτίου μεταβιβάζεται με εμπλοκή αδρανών δια μέσου της ρωγμής από το ένα μέρος του μπετόν στο άλλο. Τρίτο, ένα τμήμα του φορτίου παραλαμβάνεται από την ανασχετική ενέργεια του διαμήκους οπλισμού.



### 2.17. **Επίδραση της πίεσης ελαστικού, του ολικού φορτίου και της διάταξης των τροχών**

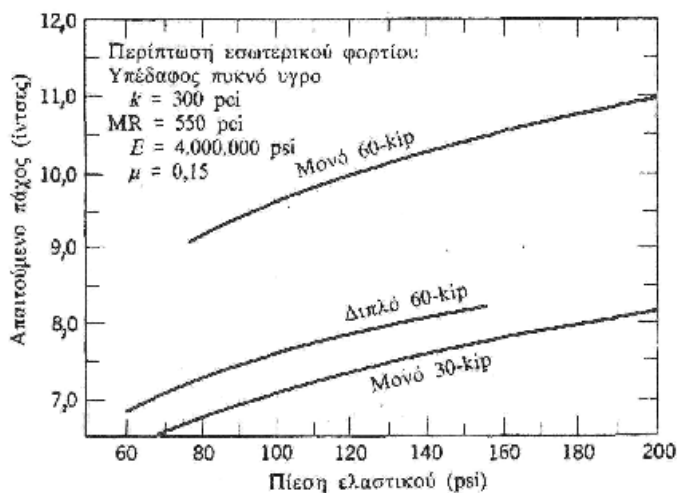
Οι τάσεις στα δύσκαμπτα οδοστρώματα εξαρτώνται από το μικτό φορτίο, την πίεση ελαστικού, τις αποστάσεις μεταξύ πολλαπλών τροχών, τη θέση της φόρτισης στο οδόστρωμα (γωνία ή εσωτερικό) και την αποτελεσματικότητα της στήριξης του υπεδάφους. Η παραδοχή ότι η στήριξη του οδοστρώματος είναι συνεχής και αμετάβλητη με το χρόνο, για να ισχύει εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας στην πλάκα, τη συμπύκνωση του υλικού του υπεδάφους ύστερα από επανειλημμένες φορτίσεις, την ποιότητα της κατασκευής και άλλους παράγοντες. Οι διαφορές θερμοκρασίας μέσα στην πλάκα προκαλούν κύρτωση, με αποτέλεσμα ένα μέρος της πλάκας να είναι αστήρικτο. Επαναλήψεις φορτίων ίσως προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση του υπεδάφους ή του υλικού της βασικής στρώσης, με αποτέλεσμα το οδόστρωμα να χάσει την επαφή του. Εφόσον οι υπολογισμοί τάσεων σε δύσκαμπτα οδοστρώματα βασίζονται σε συνεχή στήριξη της πλάκας του οδοστρώματος, η απώλεια της στήριξης οδηγεί στον υπολογισμό τάσεων με τιμές χαμηλές και πιθανόν ανασφαλείς.

Το σχήμα 2.26 δείχνει τη σχετική επίδραση του μικτού φορτίου και της πίεσης ελαστικού για μία ειδική περίπτωση. Σημαντική ποσότητα οδοστρώματος μπορεί να εξοικονομηθεί με τη χρήση διπλών τροχών για ορισμένο φορτίο τροχού (να συγκριθούν οι καμπύλες των 60-kip για μονούς και διπλούς τροχούς). Ένας άλλος παράγοντας με ενδιαφέρον είναι η επίδραση της μεταβλητής πίεσης ελαστικού. Αυξάνοντας τις πιέσεις από 70 psi σε 200 psi για ένα ελαστικό των 30-kip, π.χ., προκύπτουν μεγαλύτερες τάσεις που απαιτούν οδόστρωμα μεγαλύτερου πάχους. Ελαστικά μεγάλης πίεσης προκαλούν συγκέντρωση μεγάλων τάσεων λόγω μειωμένης ακτίνας καμπυλότητας. Επιπλέον, μικρά ελαστικά προκαλούν μεγαλύτερες τάσεις από ότι τα μεγάλα ελαστικά για την περίπτωση της ακραίας φόρτισης, επειδή τέτοια φορτία μπορούν να επενεργήσουν πλησιέστερα προς το άκρο.

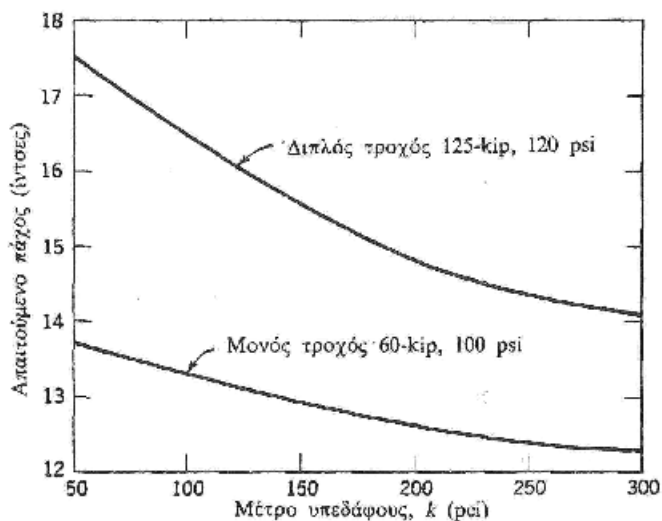
### 2.18. **Επίδραση του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους στο πάχος**

Τα αριθμητικά δεδομένα του σχήμα 2.27 απεικονίζουν την επίδραση του μέτρου αντίδρασης υπεδάφους στο απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος. Φαίνεται ότι για τον μονό τροχό 60-kip, η αύξηση του μέτρου από 50 σε 300 pci επιτρέπει μείωση του πάχους οδοστρώματος κατά 11/2 ίντσες μόλις. Η μείωση, όμως, είναι πάνω από 3

ίντσες για φορτίο 125-κίρ. Έτσι το  $k$  έχει μεγαλύτερη επίδραση στο απαιτούμενο πάχος για μεγάλα φορτία από ότι για μικρά φορτία. Για πολύ μικρά φορτία, η επίδραση του  $k$  στο πάχος είναι συχνά αμελητέα.



**Σχήμα 2.26. Επίδραση της πίεσης ελαστικού και του αριθμού των τροχών στο απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος.**



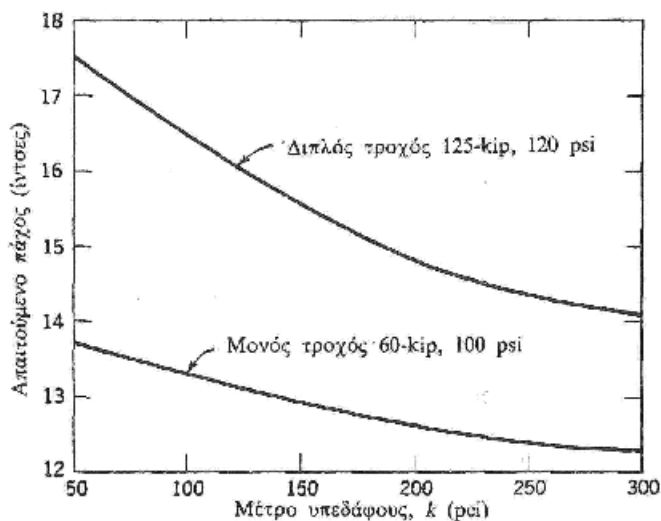
**Σχήμα 2.27. Επίδραση του μέτρου υπεδάφους στο απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για την περίπτωση εσωτερικού φορτίου (τάση λειτουργίας του μπετόν 380 psi).**

## 2.19. Συνδυασμένες τάσεις

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκαν οι τάσεις που προκύπτουν από κλιματικές μεταβολές, καθώς και από συνθήκες φόρτισης. Η συνθήκη κρίσιμης τάσης είναι όταν οι τάσεις λόγω θερμοκρασίας και λόγω φορτίου συνδυάζονται. Αυτό συμβαίνει όταν οι γωνίες της πλάκας κυρτώνουν προς τα πάνω και ένα φορτίο εφαρμόζεται στη γωνία ή όταν τα άκρα της πλάκας κυρτώνουν προς τα κάτω και ένα φορτίο εφαρμόζεται στο εσωτερικό της πλάκας.

Τάσεις κύρτωσης, καθώς και τάσεις που προκαλούνται από ομοιόμορφες θερμοκρασιακές μεταβολές, αυξάνονται από τους αρμούς προς το εσωτερικό της πλάκας. Το σχήμα 2.28 παριστάνει τη μεταβολή της τάσης κύρτωσης σε συνάρτηση με την απόσταση από τον αρμό. Το πάχος της πλάκας υποτίθεται ότι είναι 10 ίντσες, με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 4.000.000 psi. Ο λόγος του Poisson είναι ίσος με 0,15 και ο συντελεστής θερμικής διαστολής 0,000005.

Στο Σχήμα 2.28 δίνεται επίσης, η τάση φόρτισης για ένα φορτίο 12.000 λιβρών εφαρμοσμένο στο άκρο. Φαίνεται ότι στο κέντρο η τάση κύρτωσης είναι περίπου 400 psi και η συνδυασμένη τάση είναι λίγο μεγαλύτερη από 600 psi. Για την περίπτωση αυτή, και ανάλογα με την ποιότητα του μπετόν, η ίδια η τάση κύρτωσης ίσως προκαλέσει ρωγμή στο κέντρο της πλάκας.



Σχήμα 2.28. Τάση θερμοκρασίας και φόρτισης.

## 2.20. Επίδραση των $k$ και $h$ στις τάσεις κύρτωσης

Οι τάσεις κύρτωσης αυξάνονται καθώς αυξάνει η δυσκαμψία ( $k$ ) του υπεδάφους, εφόσον για πολύ δύσκαμπτα υπεδάφη (αυτά με μεγάλες τιμές του  $k$ ) το υπέδαφος δεν υποχωρεί. Για μαλακότερα υπεδάφη, π.χ. αργιλικά, το υπέδαφος θα υποχωρήσει καθώς η πλάκα κυρτώνεται και θα πάρει το σχήμα της περιμέτρου του οδοστρώματος. Για την περίπτωση αυτή το οδόστρωμα στηρίζεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του και οι τάσεις ελαττώνονται. Στην ακραία περίπτωση, που η πλάκα τοποθετείται κατευθείαν πάνω σε μία άλλη πλάκα ή πάνω σε βράχο, οι τάσεις κύρτωσης μπορεί να είναι τόσο μεγάλες, ώστε η πλάκα να ρηγματωθεί. Ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτό είναι η κατασκευή της επάνω πλάκας με μεγάλο πάχος.

Η πείρα έχει δείξει ότι λεπτές επιστρώσεις- από μπετόν κατασκευασμένες πάνω σε υπάρχουσες πλάκες από μπετόν ρηγματώνονται έντονα. Η προηγούμενη παράγραφος εξηγεί έναν παράγοντα που συμβάλλει σ' αυτό, αν και οι τάσεις κύρτωσης δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που υπεισέρχονται. Γι' αυτό το λόγο λεπτά επιστρώματα από μπετόν πρέπει να συνδέονται καλά με τα υπάρχοντα οδοστρώματα.

## 2.21. Κριτήρια επιλογής πάχους

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων υπολογίζονται με τη βοήθεια της θεωρίας του Westergaard. Είναι απαραίτητη η επιλογή συντελεστών ασφάλειας που να μπορούν να εφαρμοστούν στην επιτρεπόμενη τάση κάμψης των οδοστρωμάτων από μπετόν. Οι συντελεστές ασφάλειας θα πρέπει να διακυμαίνονται ανάλογα με τον τύπο του έργου που μελετάται και να είναι μεγαλύτεροι σε περιοχές με εγκιβωτισμένη κυκλοφορία όπως οι τροχόδρομοι.

Ο θεωρητικός υπολογισμός δεν μπορεί να εφαρμοστεί πάντα στα οδοστρώματα, αφού η συνεχής στήριξη του υπεδάφους είναι αμφίβολη. Εφόσον οι τάσεις σε δύσκαμπτα οδοστρώματα επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό από τις τιμές του μέτρου αντίδρασης του υπεδάφους, μπορούμε να υποθέσουμε με αρκετή ακρίβεια ότι, εφόσον λαμβάνονται υπόψη η ανάβλυση, η επίδραση του παγετού και η επαρκής συμπύκνωση, το απαιτούμενο πάχος για οδούς είναι στην πράξη ανεξάρτητο από τον τύπο του υπεδάφους.

Οι περισσότερες πολιτείες χρησιμοποιούν μία τυπική διατομή για δύσκαμπτα οδοστρώματα οδών. Οι κυριότερες μεταβλητές που εξετάζονται είναι η επανάληψη και

το μέγεθος των φορτίων, καθώς και το πάχος της βασικής στρώσης για την αποφυγή της ανάβλυσης και της επίδρασης παγετού.

Διαγράμματα σχεδιασμού. Διαγράμματα για τη γενική λύση των εξισώσεων μπορούν να καταστρωθούν με βάση τα διαγράμματα επιρροής. Οι τάσεις που προκύπτουν από διάφορα φορτία, για τιμές αντίδρασης του υπεδάφους και για διάφορα πάχη του οδοστρώματος μπορούν να προκαθοριστούν και ύστερα να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό. Τα διαγράμματα σχεδιασμού θα αναπτυχθούν σε ακόλουθα κεφάλαια.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

## **Συντήρηση και ενίσχυση οδοστρωμάτων**

### **3.1. Γενικά**

Κάθε νέο οδόστρωμα, από τη στιγμή που δίνεται στην κυκλοφορία, αρχίζει να υπόκειται στην καταστροφική επίδραση διαφόρων εξωτερικών παραγόντων όπως των οχημάτων, των καιρικών συνθηκών, της ηλιακής ακτινοβολίας, κλπ. Παράλληλα, αρχίζει και μια σταδιακή επιδείνωση της ποιότητας του οδοστρώματος η οποία οφείλεται κυρίως στη γήρανση και κόπωση των υλικών που το συνθέτουν. Οι παραπάνω παράγοντες σε συνδυασμό με την ορθότητα / αξιοπιστία της μελέτης, την καταλληλότητα των υλικών και την ποιότητα της κατασκευής είναι οι μοναδικές αιτίες για την εμφάνιση, αργά ή γρήγορα, των επιφανειακών φθορών, της κόπωσης και τέλος της αποσύνθεσης του οδοστρώματος.

Η κατασκευή ενός νέου οδοστρώματος θα πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε σαν μια επένδυση του κοινωνικού συνόλου. Ο διαχειριστής του κεφαλαίου που επενδύθηκε για την κατασκευή του οδοστρώματος, δηλαδή το κράτος, έχει την ευθύνη αλλά και την υποχρέωση όχι μόνο να το διατηρήσει αλλά και να το διαχειριστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποδώσει κέρδος (όφελος). Το κέρδος στην προκειμένη περίπτωση είναι άμεσο (μείωση του χρόνου και του κόστους μετακίνησης, μείωση των ατυχημάτων, μείωση του κόστους συντήρησης των οχημάτων κλπ.) και έμμεσο (κοινωνικό όφελος όπως άνετη και ασφαλής μετακίνηση του κοινωνικού συνόλου για τις κοινωνικές και εμπορικές του δραστηριότητες).

Για τη διατήρηση του κεφαλαίου και την απόδοση οφέλους, το οδόστρωμα θα πρέπει να συντηρείται έτσι ώστε να διατηρείται η κατάσταση του σε ένα ανεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης, καθ' όλη την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του. Το όφελος τέλος, μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη διατήρηση του οδοστρώματος σε όσο το δυνατόν υψηλότερο επίπεδο εξυπηρέτησης.

Συνεπώς, καθίσταται σαφές ότι η συντήρηση των οδοστρωμάτων είναι επιτακτική ανάγκη. Ο όρος συντήρηση στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται με

την ευρεία του έννοια. Ακριβολογώντας, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι όροι όπως αυτοί που παρατίθενται παρακάτω.

Η ορολογία που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του οδοστρώματος σε ένα ανεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης διαφέρει αισθητά από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται ευρέως ο γενικός όρος «συντήρηση», ενώ σε άλλες χώρες χρησιμοποιούνται όροι όπως: συνεχής συντήρηση (routine maintenance), προληπτική συντήρηση, διορθωτική συντήρηση, κύρια συντήρηση, αποκατάσταση, ενίσχυση και αναζωογόνηση του οδοστρώματος.

**Συνεχής συντήρηση** ορίζεται το σύνολο των δραστηριοτήτων (εργασιών) που εκτελούνται συνεχώς σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία ή ετήσια βάση στα στοιχεία που συνθέτουν μια οδό με σκοπό τη διασφάλιση της εξυπηρετικότητας κάτω από οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες. Οι κύριες δραστηριότητες είναι: (α) ο καθαρισμός της επιφάνειας του οδοστρώματος, του συστήματος αποστράγγισης, της σήμανσης και των σηματοδοτών κλπ., ακόμη και η αποψίλωση των πρανών και το κλάδεμα των δέντρων, (β) η αποκατάσταση των φθορών που εμφανίζονται στην περιοχή γύρω από τα καλύμματα των φρεατίων επίσκεψης, η αποκατάσταση των φθορών της σήμανσης και των σηματοδοτών, του φωτισμού, κ.λπ., (γ) η αντικατάσταση των κατεστραμμένων στηθαίων ασφαλείας, των σημάτων και γενικότερα της επίπλωσης της οδού και (δ) η χειμερινή συντήρηση του οδοστρώματος, όπως εκχιονισμός και πρόληψη δημιουργίας πάγου στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Όπως είναι φανερό, στον ορισμό της συνεχούς συντήρησης δεν περιλαμβάνονται οι εργασίες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη δομή του οδοστρώματος.

**Προληπτική συντήρηση** ορίζεται το σύνολο των εργασιών που σκοπό έχουν να προλάβουν την πρόωρη εμφάνιση φθορών στο οδόστρωμα και, κατ' επέκταση, την πρόωρη καταστροφή του.

**Διορθωτική συντήρηση** ορίζεται το σύνολο των εργασιών που σκοπό έχουν να διορθώσουν τις ατέλειες της επιφάνειας του οδοστρώματος οι οποίες είναι άκρως επικίνδυνες για την ασφάλεια του χρήστη.

Οι εργασίες που περιλαμβάνονται στην προληπτική και διορθωτική συντήρηση δεν είναι ουσιαστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους, εκτός από την εργασία σφράγισης ρωγμών, και συνεπώς δε θα αναφερθούν μεμονωμένα ανά περίπτωση. Οι εργασίες για προληπτική και διορθωτική συντήρηση στο σύνολο τους είναι: σφράγιση ρωγμών,

πλήρωση λάκκων, τοπική εξυγίανση (μπαλώματα), ασφαλικές επαλείψεις (surface dressing), σφραγιστική με slurry, εργασίες για την αποκατάσταση της αντολισθηρότητας της επιφάνειας, εργασίες για την αποκατάσταση της ομαλότητας.

**Κύρια συντήρηση ή αποκατάσταση οδοστρώματος, ή αναζωογόνηση οδοστρώματος,** ορίζεται το σύνολο των εργασιών που σκοπό έχουν να αποκαταστήσουν πλήρως την ποιοτική κατάσταση του οδοστρώματος. Οι εργασίες συνίστανται στην κατασκευή ασφαλικής στρώσης πάχους πλέον των 25mm (ασφαλική επίστρωση) από νέα ή ανακυκλωμένα υλικά, μετά ή άνευ ισοπεδωτικής στρώσης ή/και φρεζαρίσματος της παλαιάς επιφάνειας του οδοστρώματος. Με την κατασκευή της ασφαλικής στρώσης επέρχεται και ενίσχυση του οδοστρώματος που συμβάλλει άμεσα στη δυνατότητα παραλαβής από το οδόστρωμα μεγαλύτερου αριθμού αξονικών φορτίων.

Για την καλύτερη αποσαφήνιση του όρου **συντήρηση** οδοστρώματων προτείνεται όπως χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω, που συνιστάται από το Asphalt Institute:

**Συντήρηση** οδοστρώματος ορίζεται το σύνολο των εργασιών για τη διατήρηση της ποιοτικής κατάστασης του οδοστρώματος όσο το δυνατόν πλησιέστερα της αρχικής. Στο σύνολο των εργασιών περιλαμβάνονται: η αποκατάσταση επιφανειακών φθορών, η σφράγιση των ρωγμών, η αποκατάσταση αντολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας, η αποκατάσταση των αρμών, ο καθαρισμός της επιφάνειας, η ανανέωση των διαγραμμίσεων και η απομάκρυνση ξένων σωμάτων από το οδόστρωμα (φερτά υλικά, χιόνι κλπ).

Είναι φυσικό ότι η επ' άπειρο συντήρηση του οδοστρώματος είναι αδύνατο να διατηρήσει την κατάσταση αυτού όμοια με αυτήν της αρχικής ποιότητας κατά την κατασκευή. Υπάρχουν φαινόμενα μη αναστρέψιμα όπως η κόπωση του οδοστρώματος, η αύξηση της κυκλοφορίας και οι περιστασιακές αντίξοες καιρικές συνθήκες, τα οποία συνδυαζόμενα μεταξύ τους μειώνουν την αρχική ποιότητα του οδοστρώματος σε τέτοιο επίπεδο ώστε μετά από κάποια χρονική περίοδο μια περαιτέρω συντήρηση να μην είναι οικονομικά συμφέρουσα και αποτελεσματική. Απαιτείται επομένως αποκατάσταση του οδοστρώματος, ειδικότερα των ασφαλικών, κυρίως, στρώσεων.

Αποκατάσταση οδοστρώματος ορίζεται το σύνολο των εργασιών που απαιτούνται για την πλήρη ποιοτική αποκατάσταση του οδοστρώματος με παράλληλη ενίσχυση αυτού έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερο αριθμό αξονικών

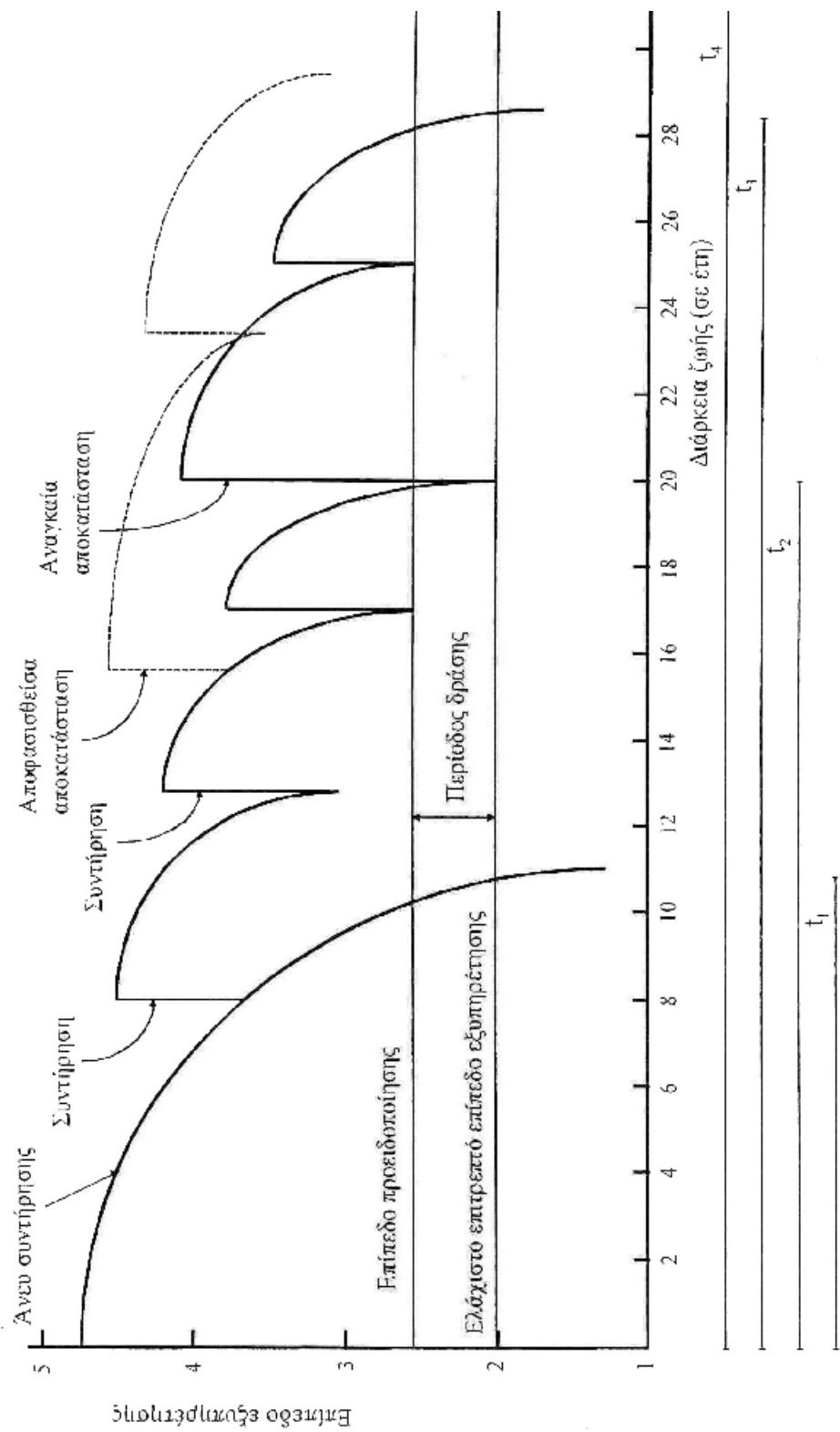


φορτίων αυξάνοντας ουσιαστικά τη διάρκεια ζωής του. Στο σύνολο των εργασιών περιλαμβάνονται η κατασκευή ασφαλικής επίστρωσης (overlay) μεταβλητού πάχους, αναλόγως των απαιτήσεων, όλες οι εργασίες προεργασίας για την κατασκευή αυτής της στρώσης καθώς και όλες οι μετά την κατασκευή εργασίες (διαγράμμιση κλπ). Το πάχος της ασφαλικής επίστρωσης, σύμφωνα με το Asphalt Institute, για να θεωρηθεί αποκατάσταση, πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 25mm και το μήκος μεγαλύτερο αυτού που απαιτείται για τοπικές αποκαταστάσεις του οδοστρώματος. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν το πάχος επίστρωσης είναι μικρότερο των 25mm, η επέμβαση θεωρείται συντήρηση. Ειδικότερα, για την αποκατάσταση μικτών ευκάμπτων ή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ή μικτών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων το πάχος της ασφαλικής επίστρωσης συνιστάται να είναι μεγαλύτερο των 40mm.

Οι εργασίες συντήρησης θεωρούνται εργασίες για τη διατήρηση του κεφαλαίου που επενδύθηκε, ενώ οι εργασίες αποκατάστασης θεωρούνται Ο3ς εργασίες για την αύξηση απόδοσης του κεφαλαίου.

### 3.2 **Σχέση συντήρησης, αποκατάστασης και διάρκειας ζωής του οδοστρώματος**

Κάθε οδόστρωμα σχεδιάζεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό ετών, ή καλύτερα για να παραλάβει ένα συγκεκριμένο αριθμό αξονικών φορτίων μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα. Με την απόδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία, η ποιότητα του οδοστρώματος, που εκφράζεται με το επίπεδο εξυπηρέτησης, είναι η μέγιστη. Το επίπεδο εξυπηρέτησης συνεχώς μειώνεται και για να βελτιωθεί ή να διατηρηθεί σε κάποιο επιθυμητό επίπεδο απαιτείται συντήρηση του οδοστρώματος. Η έναρξη της συντήρησης και η συχνότητα αυτής διασφαλίζουν την επίτευξη του αρχικού στόχου, δηλαδή το οδόστρωμα να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης καθ' όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής του ζωής. Εάν δε συντηρηθεί είναι πολύ πιθανόν ότι το οδόστρωμα δε θα μπορέσει να εξυπηρετήσει το χρήστη επαρκώς για όλο το χρονικό διάστημα που απαιτείται. Κατά κανόνα ο χρόνος διάρκειας της καλής έως ανεκτής λειτουργίας του οδοστρώματος δίχως καμία συντήρηση ( $t_1$ ) είναι πάντοτε μικρότερος από αυτόν, όταν το οδόστρωμα συντηρείται συστηματικά ( $t_2$ ), Σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1.1. Επίδραση συντήρησης και αποκατάστασης στο επίπεδο εξυπηρέτησης και στη διάρκεια ζωής του.**

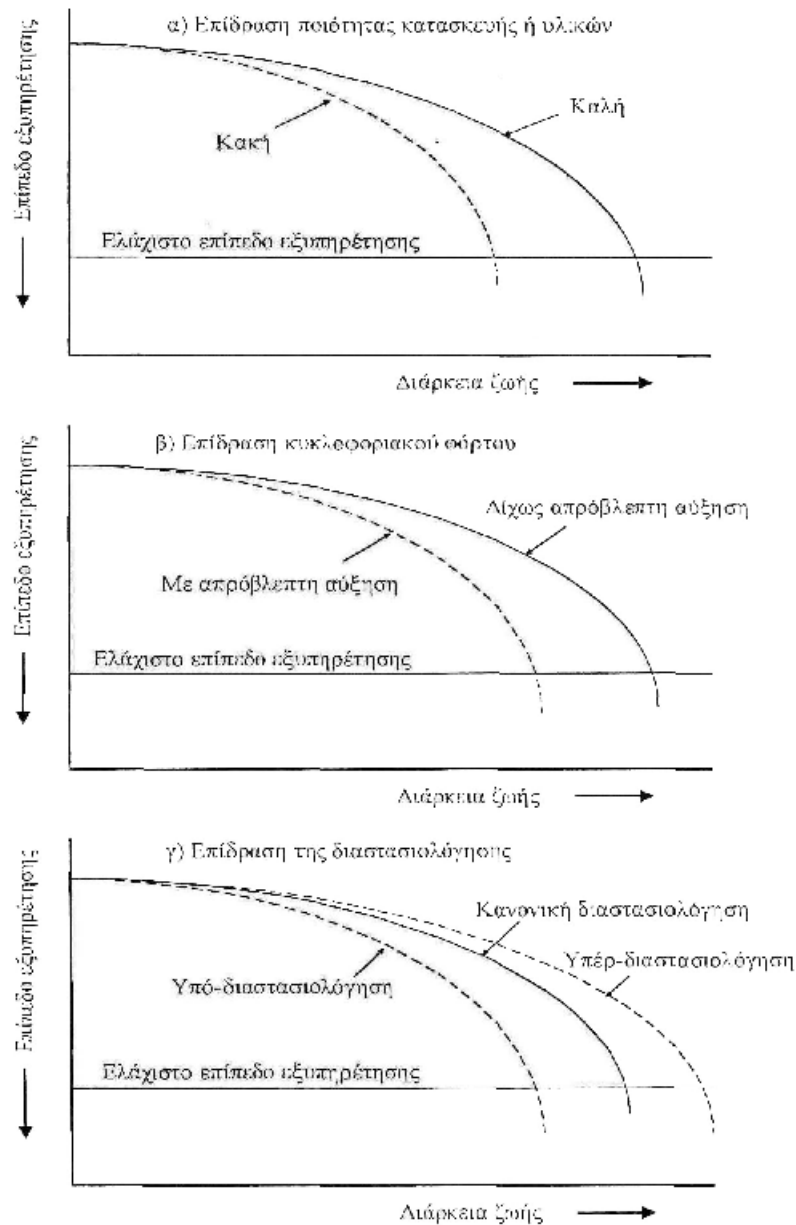
Σε κάποιο σημείο της ζωής του οδοστρώματος είναι αναγκαία η αποκατάσταση αυτού με σκοπό τη βελτίωση της κατάστασης του (βελτίωση του επιπέδου εξυπηρέτησης) και τη δυνατότητα παραλαβής μεγαλύτερου αριθμού αξονικών φορτίων ή/και την αύξηση της διάρκειας ζωής του. Έτσι, η καινούργια διάρκεια ζωής του οδοστρώματος είναι  $t_3$ . Εάν η αποκατάσταση γίνει νωρίτερα από τη χρονική στιγμή κατά την οποία το οδόστρωμα λαμβάνει την ελαχίστη επιτρεπτή τιμή επιπέδου εξυπηρέτησης τότε, με μικρότερο κόστος αποκατάστασης, το οδόστρωμα θα παρέχει τις υπηρεσίες του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χρόνος  $t_4 > t_3$ . Συνεπώς, η συστηματική και έγκαιρη συντήρηση του οδοστρώματος είναι αναγκαία και η αποκατάσταση αυτού είναι προτιμότερο να γίνεται πριν το επίπεδο εξυπηρέτησης λάβει την ελαχίστη επιτρεπτή τιμή.

### **3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος**

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ή καλύτερα την «απόδοση» του οδοστρώματος είναι: η ποιότητα της κατασκευής, η καταλληλότητα των χρησιμοποιηθέντων υλικών, ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι συνθήκες του περιβάλλοντος και η ορθότητα της μελέτης διαστασιολόγησης του οδοστρώματος.

Αν η συμπεριφορά εκφραστεί σε επίπεδο εξυπηρέτησης τότε η επίδραση της καλής ή μη καλής κατασκευής φαίνεται στο σχήμα 3.2(α). Ένα κακώς κατασκευασμένο οδόστρωμα θα έχει σημαντικά μικρότερη διάρκεια ζωής από αυτό που κατασκευάστηκε σύμφωνα με όλες τις προβλεπόμενες προδιαγραφές. Παρόμοια είναι και η επίδραση της ποιότητας των υλικών. Η χρήση οριακών και κατά κανόνα φθηνών υλικών έχει σαν συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

Η μη αναμενόμενη αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου, πλέον αυτής που εκτιμήθηκε στο στάδιο της μελέτης, και ιδιαίτερα των βαρέων αξονικών φορτίων, μειώνουν επίσης τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, σχήμα 3.2(β). Η απρόβλεπτη αύξηση των αξονικών φορτίων μπορεί να οφείλεται και στην ύπαρξη υψηλών ποσοστών υπέρβαρων αξόνων. Σε έρευνα που έγινε από το Εργαστήριο Οδοποιίας σε συνεργασία με το Τμήμα Τοπογράφων Μηχανικών του ΑΠΘ βρέθηκε ότι το ποσοστό των υπέρβαρων αξόνων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι από 20% έως 45% περίπου, ανάλογα με την κατηγορία του αξονικού φορτίου.



**Σχήμα 13.2.: Επίδραση παραγόντων στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος**

**Οι συνθήκες του περιβάλλοντος** που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδοστρώματος είναι η υγρασία του υπεδάφους, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ο παγετός και η παρουσία ή μη υλικών που διαστέλλονται παρουσία νερού (άργιλος κλπ). Οι υψηλές υγρασίες υπεδάφους, οι πολύ υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και η παρουσία υλικών που διαστέλλονται σε συνδυασμό με την επίδραση των αξονικών φορτίων μειώνουν τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Η μελέτη διαστασιολόγησης του οδοστρώματος ορισμένες φορές μπορεί να μην είναι σωστή, λόγω κακής εκτίμησης ή υπολογισμού των σχεδιαστικών παραμέτρων. Έτσι, μπορεί να προταθούν μικρότερα από τα απαιτούμενα πάχη στρώσεων (υπό-διαστασιολόγηση) ή μεγαλύτερα πάχη στρώσεων (υπέρ-διαστασιολόγηση). Στην πρώτη περίπτωση η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος μειώνεται, ενώ στη δεύτερη αυξάνεται αλλά σε βάρος του κόστους κατασκευής, σχήμα 3.2(γ).

#### 3.4. **Φθορές ευκάμπτων οδοστρωμάτων**

Όλες οι φθορές που εμφανίζονται στα εύκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ρηγματώσεις, στη δεύτερη οι παραμορφώσεις παντός είδους, στην τρίτη οι αποσαθρώσεις και στην τέταρτη η λείανση της επιφάνειας κύλισης.

Αναλυτική περιγραφή όλων των αναπτυσσομένων φθορών μαζί με τα πιθανά αίτια που τις προκαλούν καθώς και των προτεινόμενων τρόπων συντήρησης-θεραπείας αυτών δίνεται παρακάτω. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι, για τον καθορισμό της καταλληλότερης συντήρησης-θεραπείας των φθορών θα πρέπει πρώτα να καθορίζεται επακριβώς η κύρια αιτία που προκάλεσε τη φθορά.

#### 3.5. **Ρηγματώσεις (cracking)**

Οι μορφές των επιφανειακών ρηγματώσεων του οδοστρώματος ποικίλουν και οφείλονται σε διάφορες αιτίες. Σε πολλές περιπτώσεις η έγκαιρη απλή σφράγιση της ρωγμής ή των ρωγμών είναι η σωστότερη και αποτελεσματικότερη συντήρηση. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, είναι αναγκαία η πλήρης εξυγίανση της περιοχής που προσβλήθηκε.

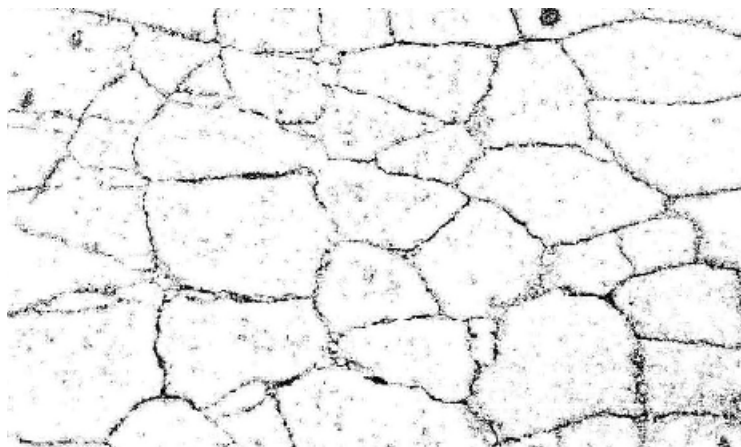
##### 3.5.1. **Σφράγιση/πλήρωση ρωγμών**

Η σφράγιση/πλήρωση των ρωγμών σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται με χυτό υλικό που είναι ειδική τροποποιημένη ασφάλτος. Η τροποποιημένη ασφάλτος (ελαστομερής) θα πρέπει να πληρεί τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ASTM 1190(2) ή της BS 2499(3). Για την εφαρμογή της τροποποιημένης ασφάλτου προς σφράγιση των ρωγμών απαιτείται η χρήση ειδικού μηχανικού εξοπλισμού, όπως: (α) μηχανήμα θέρμανσης της ελαστομερούς ασφάλτου με δυνατότητα θέρμανσης μέχρι και 200°C και

με δυνατότητα παροχής του θερμού ασφαλτικού υλικού επί της ρωγμής και (β) ειδικό φλόγιστρο (προπανίου) που εκτοξεύει υπέρθερμο αέρα (όχι φλόγα), για τη θέρμανση και τον καθαρισμό της ρωγμής πριν τη διάχυση της τροποποιημένης ασφάλτου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές ρηγματώσεων.

### 3.5.2. **Ρωγμές τύπου αλλιγάτορα** (alligator cracks)

Οι ρωγμές τύπου αλλιγάτορα είναι διακλαδιζόμενες και αλληλοσυνδεόμενες ρωγμές που σχηματίζουν πολυγωνικά κομμάτια (μπλοκ) όμοια με αυτά του δέρματος του αλλιγάτορα. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα κομμάτια αυτά δίνουν την εντύπωση ότι είναι σχεδόν έτοιμα να αποκολληθούν. Τυπική μορφή ρηγματώσεων τύπου αλλιγάτορα δίνεται στη φωτογραφία 3.1.



**Φωτογραφία 3.1.: Ρωγμές αλλιγάτορα**

Τα αίτια που προκαλούν τις ρηγματώσεις αυτές, τις περισσότερες φορές, είναι το μεγάλο βέλος κάμψης που αναπτύσσεται στις ασφαλτικές στρώσεις του οδοστρώματος λόγω μειωμένης φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους ή/και της υπόβασης/βάσης. Η μείωση προέρχεται από τη μείωση της φέρουσας ικανότητας των στρώσεων αυτών λόγω εποχιακής αύξησης της υγρασίας στις στρώσεις αυτές. Οι ρωγμές στην περίπτωση αυτή συνήθως εμφανίζονται τοπικά και σε περιορισμένη έκταση.

Όταν οι ρωγμές τύπου αλλιγάτορα εμφανίζονται σε μεγάλη έκταση κατά μήκος του δρόμου, η αιτία εμφάνισης τους είναι διαφορετική. Στην προκειμένη περίπτωση η αιτία(-ες) που προκάλεσε τη φθορά αυτή είναι η πλήρης κόπωση του οδοστρώματος λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων του οδοστρώματος από τον κυκλοφοριακό

φόρτο, σε συνδυασμό πιθανότατα και με την ύπαρξη ασθενούς υπεδάφους ή μειωμένου πάχους υποκείμενων στρώσεων. Το τελευταίο θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται και να καθορίζεται.

Για τοπικές εμφανίσεις η θεραπεία συνίσταται σε: Η ριζική επισκευή των ρωγμών αλλιγάτορα εφ' όσον οφείλονται στη μειωμένη ευστάθεια του εδάφους έδρασης συνίσταται: (i) στην πλήρη απομάκρυνση όλων των ασφαλικών στρώσεων, των στρώσεων με ασύνδετα αδρανή και μέρους του εδάφους έδρασης, (ii) στη λήψη κατάλληλων μέτρων για την υποβάθμιση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και (iii) στην ανακατασκευή όλων των στρώσεων με νέα κατάλληλα υλικά. Για καλύτερα αποτελέσματα συνιστάται να αντικαθίστανται όλες οι στρώσεις με ασφαλικό σκυρόδεμα.

Η επιφάνεια που θα ανοιχθεί για επισκευή θα πρέπει να επεκτείνεται, κατά πλάτος, περίπου μισό μέτρο μέσα στην υγιή περιοχή. Επίσης, συνιστάται να ψεκάζονται οι κάθετες αλλά και οριζόντιες επιφάνειες της περιοχής που ανοίχθηκε με κατάλληλο κατιονικό γαλάκτωμα. Μετά από τη διάστρωση της κάθε στρώσης, σε πάχος όχι μεγαλύτερο των 100-150mm, απαιτείται επαρκής συμπύκνωση με κατάλληλο, δονητικό κατά προτίμηση, μηχάνημα.

Μετά τη διάστρωση και συμπύκνωση της τελευταίας ασφαλικής στρώσης, συνιστάται όπως τοποθετείται ειδικό ελαστομερές ασφαλικό υλικό (χυτό υλικό) σε όλη την περίμετρο της τομής μεταξύ της παλιάς και της νέας επιφάνειας, σε πλάτος περίπου 40-50mm, για να επιτυγχάνεται η άριστη στεγάνωση του ασθενούς αυτού σημείου. Το ελαστομερές ασφαλικό υλικό είναι αυτό που χρησιμοποιείται στη γενική περίπτωση σφράγισης ρωγμών. Το παραπάνω ισχύει για όλες τις περιπτώσεις που γίνονται τομές και αποκατάσταση αυτών στο οδόστρωμα.

Η παραπάνω εργασία, δηλαδή της αποξήλωσης μιας ή περισσοτέρων στρώσεων και η ανακατασκευή αυτής (-ων) με νέα υλικά, είναι γνωστή ως «μπάλωμα» (patching).

Σε μεγάλης έκτασης ρωγμές δηλαδή όταν οι ρωγμές τύπου αλλιγάτορα οφείλονται σε κόπωση του οδοστρώματος, η θεραπεία γίνεται: (α) με αντικατάσταση μέρους ή όλων των ασφαλικών στρώσεων με νέες ασφαλικές στρώσεις, ή (β) με την προσθήκη νέων ασφαλικών στρώσεων δίχως την απομάκρυνση των ρηγματωμένων στρώσεων. Λεπτομέρειες για τον υπολογισμό του πάχους των νέων ασφαλικών στρώσεων δίνονται στην παράγραφο 3.18. Στην περίπτωση που δεν απομακρύνονται οι

ρηγματωμένες στρώσεις, συνιστάται η διάστρωση ισοπεδωτικής στρώσης, πριν τη διάστρωση των ασφαλικών στρώσεων. Η διάστρωση ισοπεδωτικής στρώσης είναι απολύτως αναγκαία στην περίπτωση που ορισμένα κομμάτια έχουν αποκολληθεί ή εμφανίζονται ταυτόχρονα και τοπικές καθιζήσεις.

Στην περίπτωση μερικής αντικατάστασης των ασφαλικών στρώσεων, το νέο ασφαλτόμιγμα συνιστάται όπως παράγεται με ελαστομερή άσφαλτο (όχι θερμοπλαστική ή πλαστομερή). Επίσης, εναλλακτικά ή επιπροσθέτως (αναλόγως της σοβαρότητας και των συνθηκών του έργου) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ασφαλτοϋφάσματα ή οι μεμβράνες απορρόφησης τάσεων. Τα ασφαλτοϋφάσματα ή οι μεμβράνες τοποθετούνται επί της ρηγματωμένης επιφάνειας ή επί της ισοπεδωτικής (αν απαιτείται να χρησιμοποιηθεί). Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στην παράγραφο 3.7.

Στην περίπτωση που το άνοιγμα των ρωγμών τύπου αλλιγάτορα είναι μικρότερο των 3mm η προσωρινή συντήρηση της επιφάνειας μπορεί να γίνει και με σφραγιστικά ψυχρά ασφαλτομίγματα τύπου Slurry Seal, διαβάθμισης I ή II, ή με μεμβράνη απορρόφησης τάσεων (SAM), παράγραφος 3.7.2.

### 3.5.3. **Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος** (edge cracks)

Οι ρωγμές αυτές είναι συνήθως επιμήκεις και εμφανίζονται περίπου 30-50 cm από τα άκρα του οδοστρώματος, μετά ή άνευ εγκαρσίων ρωγμών.

Οφείλονται κυρίως στην ανεπαρκή υποστήριξη του οδοστρώματος λόγω ενός ή περισσότερων από τους παρακάτω λόγους: κακή συμύκνωση, κακή αποστράγγιση, δράση παγετού, συρρίκνωση λόγω ξηρασίας του εδάφους της περιοχής ή λόγω μειωμένου πάχους των στρώσεων στα σημεία αυτά.

Η συντήρηση των ρωγμών αυτών συνίσταται στην πλήρωση αυτών με κατάλληλη τροποποιημένη άσφαλτο, μετά από επιμελή καθαρισμό. Εάν στην περιοχή παρουσιάζεται και καθίζηση τότε αυτή θα πρέπει να πληρούται με τη διάστρωση ψυχρού ή θερμού ασφαλτομίγματος. Ψυχρό ασφαλτόμιγμα τύπου Slurry, διαβάθμισης III ή IV, διαστρώνεται όταν η καθίζηση είναι μικρότερη των 25mm, άλλως χρησιμοποιείται θερμό ασφαλτόμιγμα.

Αν υπάρχει πρόβλημα αποστράγγισης του οδοστρώματος αυτό εντοπίζεται και αποκαθίσταται.



#### 3.5.4. **Ρωγμές μεταξύ λωρίδων διάστρωσης ή διαπλάτυνσης** (lane and widening cracks)

Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται μεταξύ των λωρίδων διάστρωσης ή της διαπλάτυνσης και είναι πάντοτε διαμήκεις (πλην της περίπτωσης διακοπής των εργασιών).

Οφείλονται αποκλειστικά και μόνο σε κακοτεχνία κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όπως: διάστρωση τάπητα με μειωμένη ποσότητα ασφαλτομίγματος στη ραφή, κακή ή ανεπαρκή συγκόλληση της κάθετης επιφάνειας της προηγούμενης λωρίδας διάστρωσης και πτώση της θερμοκρασίας κατά την εκτέλεση των εργασιών. Στην ειδική περίπτωση, που η ρωγμή εμφανίζεται πάνω στο σημείο που έγινε διαπλάτυνση της οδού, το αίτιο πιθανόν να είναι η κακή συμπύκνωση των υποκείμενων νέων στρώσεων. Πλην όμως, στις περιπτώσεις αυτές θα υπάρχει, κατά πάσα πιθανότητα, εμφάνιση και άλλης μορφής αστοχίας του οδοστρώματος (κυρίως καθίζηση). Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται όπως και των ρωγμών από ανάκλαση.

#### 3.5.5. **Ρωγμές από ανάκλαση** (reflection cracks)

Οι ρωγμές από ανάκλαση εμφανίζονται κατά κανόνα σε πρόσθετες ασφατικές στρώσεις, (overlays) που διαστρώθηκαν στο παρελθόν για την αποκατάσταση σοβαρών φθορών του οδοστρώματος. Η μορφή και η κατεύθυνση τους ποικίλλει από διαμήκης, εγκάρσια, διαγώνια ή και μερικώς διακλαδιζόμενη, ανάλογα με τη μορφή που είχαν οι παλαιές ρωγμές της επισκευασθείσης επιφάνειας. Τυπικές ρωγμές από ανάκλαση είναι αυτές που εμφανίζονται σε ασφατικές επιστρώσεις πάνω σε δύσκαμπτα οδοστρώματα, ή οδοστρώματα από βάση με ισχύο σκυρόδεμα ή ακόμη σε επιστρώσεις που έγιναν πάνω από παλαιά εγκιβωτισμένα ερείσματα ή διαπλατύνσεις.

Τα αίτια που προκαλούν αυτού του είδους τις ρωγμές είναι οι κάθετες και οριζόντιες μετακινήσεις του υποκείμενου οδοστρώματος. Οι μετακινήσεις αυτές μπορεί να οφείλονται σε μετακινήσεις του υπεδάφους, ή στη διόγκωση/συρρίκνωση αυτού λόγω ύπαρξης αργλικών υλικών σε συνδυασμό με αυξομείωση της υγρασίας, ή στην κάθετη μετακίνηση των πλακών του δύσκαμπτου οδοστρώματος ή στην κάθετη μετακίνηση των ανεξάρτητων ρηγματωμένων κομματιών της παλαιάς επιφάνειας, γενικότερα. Ο τρόπος συντήρησης των ρωγμών από ανάκλαση εξαρτάται από το μέγεθος και την έκταση αυτών, όπως:

(α) Όταν οι ρωγμές έχουν άνοιγμα μικρότερο των 3mm περίπου και είναι σε μικρή έκταση, η συντήρηση γίνεται με τη σφράγιση/πλήρωση αυτών με τροποποιημένη άσφαλτο.

(β) Όταν οι ρωγμές έχουν άνοιγμα μικρότερο των 3mm περίπου και είναι σε μεγάλη έκταση, η συντήρηση μπορεί να γίνει με απλή ασφαλτική επάλειψη.

(γ) Όταν οι ρωγμές έχουν άνοιγμα μεγαλύτερο των 3-5mm και είναι σε μικρή έκταση, τότε η συντήρηση αυτών γίνεται ως ακολούθως: (i) οι ρωγμές ανοίγονται με ειδικό κόφτη σε βάθος περίπου 10-15mm και πλάτος όσο το πλάτος που δημιουργείται από τον κόφτη (10-15mm). Ο ειδικός κόφτης έχει τη δυνατότητα να ακολουθεί τη ρωγμή, δηλαδή μπορεί να στρίβει εύκολα υπό οξείες γωνίες. Με αυτό επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των χαλαρών (σαθρών) μικρών τεμαχίων του ασφαλτομίγματος που έχουν δημιουργηθεί στη ρωγμή, (ii) η διευρυνθείσα ρωγμή καθαρίζεται με συμπιεσμένο αέρα, κατόπιν στεγνώνεται και θερμαίνεται με ειδικό φλόγιστρο υπέρθερμου αέρα, και (iii) η καθαρισμένη ρωγμή γεμίζει, αμέσως μετά τη θέρμανση, με ειδική ελαστομερή άσφαλτο. Η πλήρωση της διευρυμένης ρωγμής μπορεί να γίνει και με ψυχρό ασφαλτόμιγμα τύπου slurry - διαβάθμισης I.

Σε ορισμένες χώρες, όπως η Αγγλία, η ελαστομερής άσφαλτος - όταν το πλάτος της λωρίδας που δημιουργείται είναι μεγαλύτερο των 20mm -περιέχει και λεπτόκοκκη σκληρή άμμο έτσι ώστε η επιφάνεια να έχει ικανοποιητικό συντελεστή αντίστασης σε ολίσθηση (>55 με το Βρετανικό εκκρεμές). Η ίδια απαίτηση υπάρχει στην Αγγλία και στην περίπτωση θεραπείας όπως (α), ιδιαίτερα όταν πρόκειται για διαμήκεις ρωγμές.

Σε περιπτώσεις που οι ανακλαστικές ρωγμές είναι αρκετά μεγάλες (>5mm) ή επειδή δημιουργήθηκαν λόγω ύπαρξης παλαιού υποκείμενου δύσκαμπτου οδοστρώματος, από ορισμένους οργανισμούς και υπηρεσίες του εξωτερικού ακολουθείται σήμερα η παρακάτω θεραπεία: (i) οι ρωγμές «φρεζάρονται» κατά τη διαμήκη τους διεύθυνση, με ειδικές μικρές φρέζες σε βάθος 10-20mm και πλάτος όσο το δημιουργηθέν μικρό πλάτος της φρέζας, (ii) η φρεζαρισθείσα επιφάνεια, αφού καθαριστεί, πληρούται με ελαστομερή άσφαλτο και (iii) επί της ελαστομερούς ασφάλτου διαστρώνονται μονόκοκκα αδρανή (6mm περίπου) για τη δημιουργία αντι-ολισθηρής επιφάνειας.

Εναλλακτικά, για την παραπάνω περίπτωση, η ρωγμή μπορεί να δια-νοιχθεί σε πλάτος 50-100mm και βάθος περίπου 40mm, το ασφαλτόμιγμα να αφαιρεθεί και να πληρωθεί με καινούργιο κατάλληλο ασφαλτόμιγμα.

(δ) Όταν οι ρωγμές έχουν άνοιγμα μεγαλύτερο των 3mm περίπου και είναι σε μεγάλη έκταση, επειδή η παραπάνω θεραπεία (γ) είναι χρονοβόρα, εξετάζεται, βάσει τεχνο-οικονομικής ανάλυσης, μια από τις παρακάτω τεχνικές συντήρησης: απλή ή διπλή ασφαλική επάλειψη, χρήση μεμβρά-νης απορρόφησης τάσεων (SAM), μεμβράνη με ίνες, ψυχρό ασφαλικό μίγμα τύπου Slurry με ελαστομερή άσφαλο και ίνες, ή λεπτοτάπητας με θερμό ασφαλτόμιγμα με τροποποιημένη άσφαλο ή ακόμη και ασφαλική επίστρωση πάχους 40mm-50mm μετά ή άνευ ασφαλτοϋφάσματος. Η ασφαλική επίστρωση είναι σοβαρός υποψήφιος στην περίπτωση που συντρέχει και άλλος λόγος όπως ενίσχυση του οδοστρώματος, οπότε στην περίπτωση αυτή το πάχος της στρώσης καθορίζεται ανάλογα με τις συνθήκες και τις απαιτήσεις.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, όταν οι ρωγμές είναι τοπικές και πυκνές σε σχετικά μικρή επιφάνεια ορισμένων τετραγωνικών μέτρων, είναι σύνηθες το φαινόμενο να αποξηλώνεται η τελευταία ασφαλική στρώση και να αποκαθίσταται με νέο κατάλληλο ασφαλτόμιγμα. Η εκτέλεση των εργασιών είναι όμοια με αυτήν της αποκατάστασης τοπικών ρωγμών τύπου αλλιγάτορα.

### 3.5.6. **Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων** (slippage cracks)

Η μορφή των ρωγμών από ολίσθηση των ταπήτων έχει σχήμα «μισοφέγγαρου». Οι ρωγμές αυτές οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην ολίσθηση του τάπητα κυκλοφορίας επί της υποκείμενης στρώσης λόγω κακής συνοχής αυτών. Η κακή συνοχή των ταπήτων οφείλεται στην απουσία συγκολλητικής επάλειψης ή την ανεπαρκή και κακή συγκολλητική επάλειψη, ή την ύπαρξη μεταξύ των στρώσεων χωμάτων (κυρίως αργιλικών) ή λαδιών αυτοκινήτων ή ύδατος. Οι ρωγμές αυτής της μορφής μπορεί να οφείλονται επίσης, ελάχιστες όμως φορές, στη μεγάλη περιεκτικότητα του ασφαλτομίγματος σε λεπτόκοκκα αδρανή ή ακόμη και στην κακή συμύκνωση της υπερκείμενης στρώσης.

Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται μόνο με την απομάκρυνση του τάπητα κυκλοφορίας γύρω από τη ρωγμή, μέχρι του σημείου όπου υπάρχει καλή συνοχή ταπήτων, και κατόπιν πλήρωση της αποξηλωθείσης επιφάνειας με θερμό

ασφαλτόμιγμα. Πριν την πλήρωση η επιφάνεια θα πρέπει να καθαριστεί επιμελώς και κατόπιν να ψεκαστεί επ' αυτής και επί των καθέτων τοιχωμάτων της συγκολλητική επάλειψη από κατιονικό γαλάκτωμα. Τέλος, απαιτείται επαρκής συμπίκνωση της πληρωθείσης επιφάνειας με δονητικό μηχάνημα ή οδοστρωτήρα.

### 3.5.7 **Ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks)**

Οι ρωγμές συρρίκνωσης είναι συνήθως ακανόνιστης μορφής, διακλαδιζόμενες και ως ένα βαθμό συνδεδεμένες μεταξύ τους, σχηματίζοντας μεγάλα πολυγωνικά μπλοκ με οξείες γωνίες.

Οι ρωγμές αυτές οφείλονται στη συρρίκνωση του ασφαλτομίγματος ή των υλικών της βάσης ή/και της υπόβασης. Πλην όμως, είναι δύσκολο να αποδοθούν μετά βεβαιότητας στο ένα ή στο άλλο υλικό. Συστολή του ασφαλτομίγματος μπορεί να επέλθει όταν αυτό έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αδρανή και φίλλερ και υψηλό ποσοστό σκληρής ασφάλτου. Η έλλειψη κυκλοφοριακού φόρτου βοηθά στη δημιουργία αυτών των ρωγμών.

Σε οδοστρώματα για μικρό κυκλοφοριακό φόρτο, όπου οι ασφαλικές στρώσεις είναι μικρού πάχους (περίπου 50mm), οι ρωγμές συρρίκνωσης είναι πιθανόν να οφείλονται στη συρρίκνωση του υπεδάφους.

Η συντήρηση των ρωγμών αυτών γίνεται όπως στις ρωγμές από ανάκλαση.

### 3.5.8. **Ρωγμές στην τροχιά των τροχών (wheel path cracks)**

Οι ρωγμές αυτές που εμφανίζονται στην τροχιά των τροχών είναι πάντοτε διαμήκεις. Οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην τοπική θραύση του οδοστρώματος. Η θραύση οφείλεται στη μειωμένη φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους (εποχιακή ή μη) σε συνδυασμό με τα μεγάλα αξονικά φορτία που επιβάλλονται και το μειωμένο πάχος των ασφαλικών στρώσεων και της βάσεως (περίπτωση υπο-διαστασιολόγησης του οδοστρώματος). Πλην όμως, η εμφάνιση ρωγμών στην τροχιά των τροχών μπορεί να οφείλεται και στην κόπωση των ασφαλτομιγμάτων (σύνηθες φαινόμενο). Συνεπώς, απαιτείται η συστηματική διερεύνηση των αιτιών και η λήψη των κατάλληλων μέτρων προς αποφυγή περαιτέρω επιδείνωσης.

Η συντήρηση των ρωγμών αυτών, όταν οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στην εποχιακή μείωση της φέρουσας ικανότητας του υπεδάφους, γίνεται όπως και στις

ρωγμές από ανάκλαση με παράλληλη ρύθμιση του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα (στραγγιστικά έργα). Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το οδόστρωμα χρειάζεται ενίσχυση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διάστρωση νέας ασφαλτικής στρώσης (overlay).

### 3.5.9. **Ελικοειδείς ρωγμές**

Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται με ελικοειδή μορφή (μη διακλαδιζόμενη) κατά μήκος του οδοστρώματος και όχι σε συγκεκριμένη θέση. Η εμφάνιση των ρωγμών αυτών οφείλεται συνήθως στη δράση του παγετού ή στην κόπωση του οδοστρώματος. Οι ρωγμές αυτές συντηρούνται όπως και οι ρωγμές από ανάκλαση.

## 3.6. **Νέες μέθοδοι για τη συντήρηση ή αποκατάσταση ρηγματωμένων επιφανειών**

### 3.6.1. **Χρήση ασφαλτοϋφασμάτων (asphalt overlay fabric)**

Τα τελευταία χρόνια για τη συντήρηση ή αποκατάσταση των ρηγματωμένων επιφανειών χρησιμοποιούνται τα ασφαλτοϋφάσματα. Τα ασφαλτοϋφάσματα αποτελούνται από συνθετικές ή φυσικές ίνες και είναι της ίδιας μορφής και υφής με αυτά των γεωϋφασμάτων που χρησιμοποιούνται στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή (κυρίως μεταξύ υπεδάφους και υπόβασης). Η βασική διαφορά τους είναι ότι τα ασφαλτοϋφάσματα είναι ανθεκτικά (δε λειώνουν) στις υψηλές θερμοκρασίες, που έχει το ασφαλτόμιγμα κατά τη διάστρωση. Η ονομασία ασφαλτοϋφασμα χρησιμοποιείται για να γίνεται αντιδιαστολή με τα γεωϋφάσματα (geo-textiles).

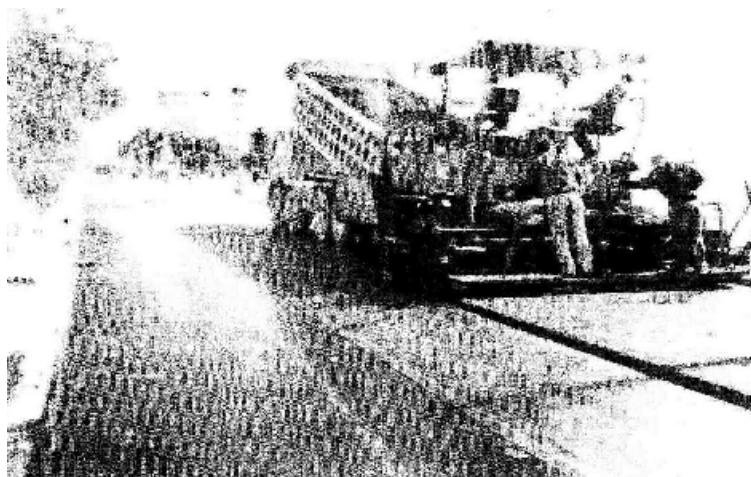
Με τη χρήση των ασφαλτοϋφασμάτων, λόγω της καλής εφελκυστικής αντοχής τους, επιβραδύνεται η εμφάνιση των ανακλαστικών ρωγμών στη νέα ασφαλτική επίστρωση. Επίσης, επειδή εμποτίζονται με άσφαλτο, τα ασφαλτοϋφάσματα δρουν και ως υγρομονωτική στρώση, προστατεύοντας έτσι τις υποκείμενες στρώσεις από την καταστρεπτική επίδραση των επιφανειακών υδάτων που πιθανόν να διαπεράσουν τη νέα ασφαλτική επίστρωση. Η χρήση τους σήμερα είναι περιορισμένη, παρ' όλα τα θετικά αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από τις περισσότερες των περιπτώσεων όπου εφαρμόστηκαν, πιθανότατα λόγω του πρόσθετου κόστους κατασκευής.

Το ασφαλτοϋφασμα τοποθετείται επί της ρηγματωμένης επιφάνειας αφού προηγουμένως καθαρισθεί επιμελώς και ψεκασθεί με συγκολλητική στρώση από

κατιονικό ασφαλτικό γαλάκτωμα ταχείας διάσπασης (KE-1). Η ποσότητα που απαιτείται εξαρτάται από τον τύπο του ασφαλτοϋφάσματος και την κατάσταση της ρηγματωμένης επιφάνειας. Συνήθως οι ποσότητες που απαιτούνται είναι 0.9-1.2 kg/m<sup>2</sup>. Η διάστρωση του ασφαλτοϋφάσματος, που διατίθεται σε ρολό (πλάτους 3.5-4.0m και μήκους συνήθως 100m), γίνεται με κατάλληλα διαμορφωμένο μηχάνημα. Κατά τη διάστρωση θα πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία πτυχώσεων και να επιδιώκεται η αλληλοκάλυψη των άκρων κατά 10-15cm περίπου κατά την εγκάρσια διεύθυνση και κατά 5-10cm κατά τη διαμήκη διεύθυνση (στα σημεία αλληλοκάλυψης ψεκάζεται επί του ασφαλτοϋφάσματος επιπλέον ποσότητα γαλακτώματος που βοηθά στη συγκόλληση των άκρων).

Τα ασφαλτοϋφάσματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις για ελάχιστη εφελκυστική αντοχή, για ελάχιστο ποσοστό επιμήκυνσης και για αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (>150°C). Οριακές τιμές που να είναι αποδεκτές διεθνώς επί του παρόντος δεν υπάρχουν.

Στη φωτογραφία 3.2 φαίνεται ένα παράδειγμα χρήσης ασφαλτοϋφάσματος σε τμήμα της Λ. Νίκης, Θεσσαλονίκης. Το ασφαλτοϋφασμα, πολυπροπυλενίου πλεκτού τύπου, είχε τις εξής ιδιότητες: αντοχή σε θραύση > 40KN/m και στις δύο διευθύνσεις κατά BS 6906:Part 1, μέση μέγιστη επιμήκυνση 8% κατά BS 6910:Part 1, ειδικό βάρος > 0.90gr/m<sup>3</sup>, βάρος ανά μονάδα επιφάνειας > 225gr/m<sup>2</sup>. Το πάχος της νέας ασφαλτικής στρώσης που διαστρώθηκε ήταν 50mm και πριν την τοποθέτηση του ασφαλτοϋφάσματος και επί της ρηγματωμένης επιφάνειας ψεκάστηκε ποσότητα 0.9-1.0 Kg/m<sup>2</sup> ασφαλτικού γαλακτώματος KE-2.



**Φωτογραφία 3.2.: Συντήρηση οδοστρώματος με διάστρωση ασφαλτοϋφάσματος**

### 3.6.2. **Μεμβράνη ή μίγμα απορρόφησης τάσεων (SAM)** (stress absorbing membrane)

Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια της απλής επιφανειακής επάλειψης με τη μόνη διαφορά ότι η ποσότητα του ασφαλτικού υλικού που ψεκάζεται είναι μεγαλύτερη και το ασφαλτικό υλικό είναι κατ' αποκλειστικότητα τροποποιημένη άσφαλτος. Η τεχνική συνίσταται στη δημιουργία μιας μεμβράνης, πάχους περίπου 3.5mm, ικανής να αποσβένει τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται. Έτσι, η τεχνική έλαβε την ονομασία «stress absorbing membrane» (SAM). Επί της δημιουργηθείσας μεμβράνης διαστρώνονται μονόκοκκα αδρανή μεγέθους κόκκου 8-10mm ή 10-16mm, τα οποία κυλινδρώνονται ελαφρώς με λαστιχοφόρο οδοστρωτήρα. Η μεμβράνη απόσβεσης των τάσεων δημιουργείται από τον ψεκασμό ειδικής τροποποιημένης (πολυμερούς) ασφάλτου μεγάλου ιξώδους. Η τεχνική αυτή, που αρχικά αναπτύχθηκε στην Αμερική και σύντομα εφαρμόστηκε στην Ευρώπη, έχει το πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται η δημιουργία πτυχώσεων και διασφαλίζεται η καλή συγκόλληση της με την υποκείμενη στρώση. Επίσης, δεν απαιτείται η χρήση επιπλέον μηχανημάτων για τη διάστρωση της μεμβράνης, όπως στην περίπτωση του ασφαλτοϋφάσματος.

Τα αδρανή που διαστρώνονται θα πρέπει να είναι σκληρά, κατάλληλα για αντιολισθηρές στρώσεις. Τα αδρανή διαστρώνονται σε θερμοκρασίες 130°C - 150°C. Η θερμοκρασία ψεκασμού της τροποποιημένης ασφάλτου δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι συνήθως 170 - 200°C. Οι ποσότητες των υλικών που ψεκάζονται και διαστρώνονται είναι ως ακολούθως:

- τροποποιημένη άσφαλτος: 2.5 - 2.8 kg/m<sup>2</sup> και επ' αυτής 18kg/m<sup>2</sup> μονόκοκκο καθαρό αδρανές μεγέθους 10-16mm
- τροποποιημένη άσφαλτος: 2.0 - 2.3 kg/m<sup>2</sup> και επ' αυτής 15 kg/m<sup>2</sup> μονόκοκκο καθαρό αδρανές μεγέθους 8-10mm.

Η τεχνική αυτή όταν εφαρμόζεται, όπως παραπάνω, σκοπό έχει την προσωρινή συντήρηση του οδοστρώματος για την προστασία αυτού από περαιτέρω ρηγμάτωση και αποσάθρωση.

Όταν επί της μεμβράνης με τα αδρανή διαστρώνεται και τάπητας πάχους 40mm, η τεχνική ονομάζεται SAMI, λόγω της δημιουργίας ενδιάμεσης στρώσης με SAM. Η τροποποιημένη αυτή τεχνική σκοπό έχει τη μονιμότερη συντήρηση (αποκατάσταση) του ρηγματωμένου οδοστρώματος. Στην περίπτωση αυτή τα μονόκοκκα αδρανή δεν είναι αναγκαίο να είναι από σκληρά αδρανή.

### 3.6.3. **Μεμβράνη οπλισμένη με ίνες** (fibre reinforced membrane)

Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με την τεχνική SAM με τη μόνη διαφορά ότι αμέσως μετά τον ψεκασμό της ασφάλτου διαστρώνονται κατάλληλες συνθετικές ή φυσικές ίνες και κατόπιν ακολουθεί νέος ψεκασμός της επιφάνειας. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται με ειδικό μηχάνημα ψεκασμού και διασποράς των ινών. Επί της διαμορφωθείσης οπλισμένης μεμβράνης μπορεί να διαστρωθεί η ασφαλική επίστρωση ή τα μονόκοκκα αδρανή, αναλόγως των περιπτώσεων. Οι ποσότητες που απαιτούνται ανά υλικό, προδιαγράφονται από τον παραγωγό, όπως και ο τύπος της ασφάλτου που θα χρησιμοποιηθεί. Τα αποτελέσματα αυτής της τεχνικής είναι εξίσου καλά με αυτά που επιτυγχάνονται με ασφαλτοϋφασμα, πλην όμως το κόστος είναι αισθητά χαμηλότερο.

### 3.7. **Παραμορφώσεις (στρεβλώσεις) της επιφάνειας** (surface distortion)

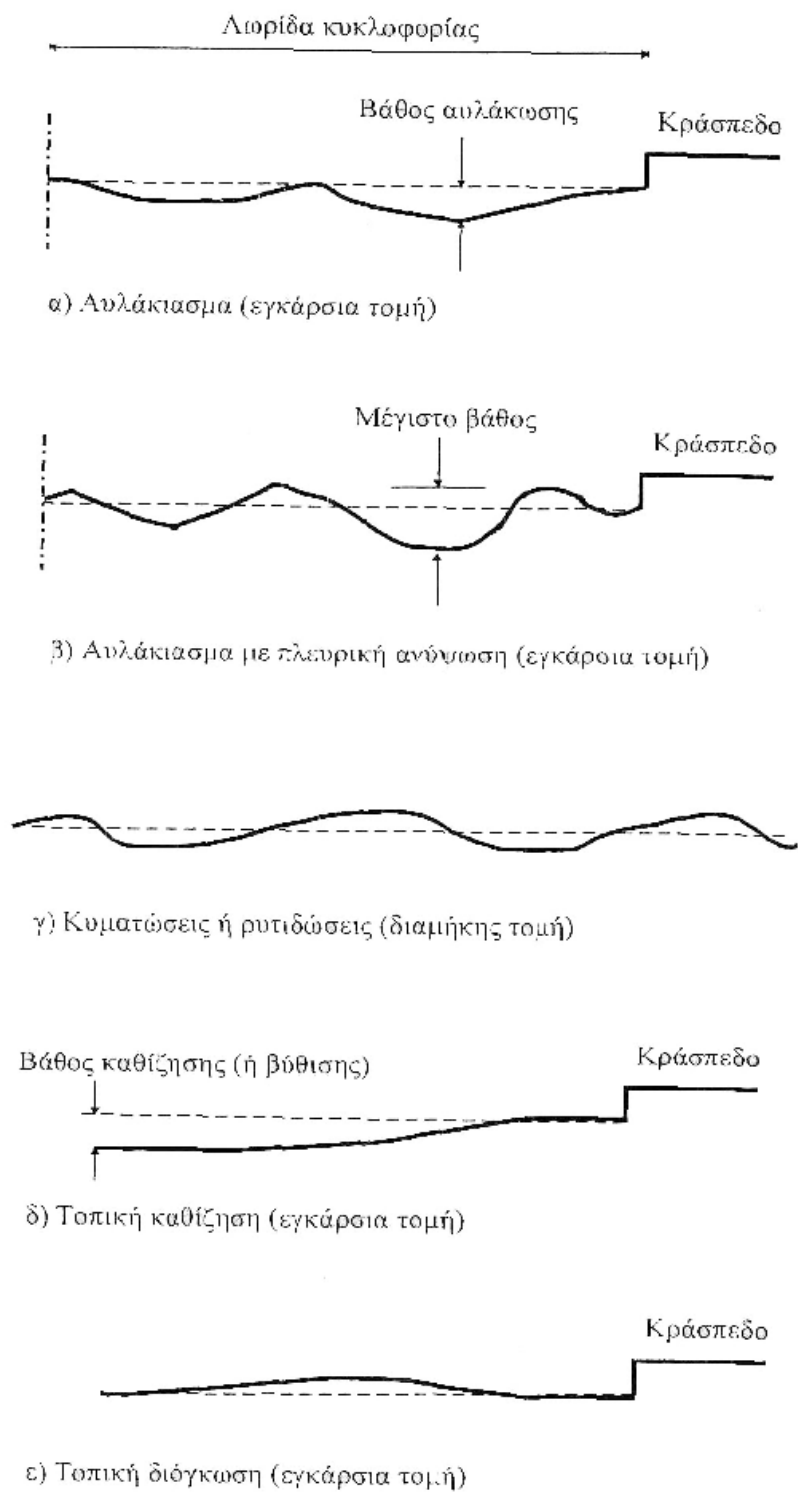
Οι παραμορφώσεις ή στρεβλώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος είναι σε γενικές γραμμές οι φθορές εκείνες που χαρακτηρίζουν το οδόστρωμα ως μη επίπεδο. Η εμφάνιση επιφανειακών παραμορφώσεων αυξάνει την επικινδυνότητα της οδού δεδομένου ότι, αναλόγως της ταχύτητας του οχήματος, χάνεται ή μειώνεται η επαφή του ελαστικού με το οδόστρωμα. Επιπροσθέτως, επιφέρουν σημαντική μείωση της άνεσης κατά την οδήγηση. Οι παραμορφώσεις μπορεί να συνοδεύονται και από ρηγματώσεις πράγμα που επιδεινώνει ακόμη περισσότερο την κατάσταση, κυρίως ως προς τη δομική λειτουργία του οδοστρώματος.

Οι παραμορφώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος μπορεί να οφείλονται σε έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω λόγους: (α) στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, (β) στη χαμηλή ευστάθεια, των ασφαλτομιγμάτων, (γ) στη μη καλή συμπύκνωση όλων των στρώσεων και (δ) στην καθίζηση του υπεδάφους. Για την αποτελεσματικότερη συντήρηση των παραμορφώσεων είναι αναγκαίο να διερευνηθούν και να εντοπιστούν επακριβώς τα αίτια.

Γενικά, η συντήρηση των παραμορφώσεων μπορεί να είναι από απλή πλήρωση αυτών με θερμό ή ψυχρό ασφαλτόμιγμα έως την πλήρη απομάκρυνση της προσβληθείσης περιοχής και την αντικατάστασή της με νέα υλικά.



Τυπικές μορφές επιφανειακών παραμορφώσεων σχηματικά φαίνονται στο σχήμα 3.3. Οι διάφορες μορφές παραμορφώσεων που εμφανίζονται στα εύκαμπτα οδοστρώματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.



**Σχήμα 3.3.: Επιφανειακές παραμορφώσεις**

### 3.7.1. **Αυλακώσεις στις τροχιές των τροχών** (channel or ruts)

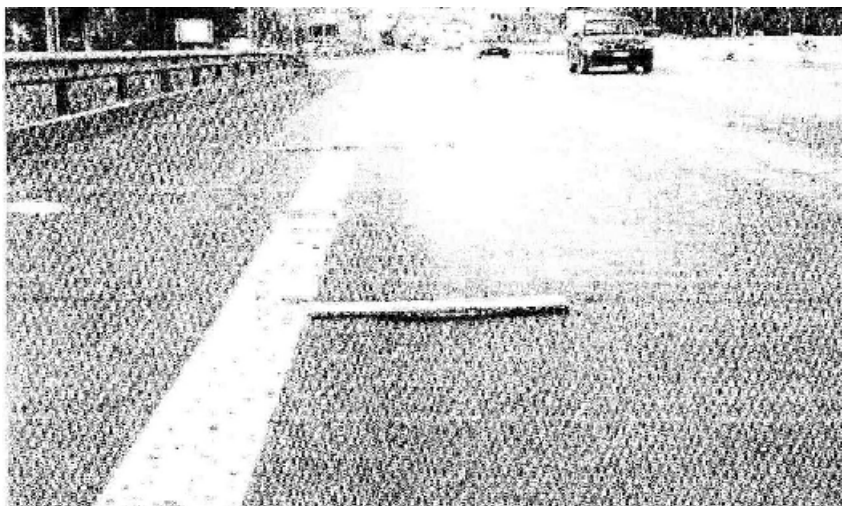
Οι αυλακώσεις αυτές είναι καναλοποιημένες καθιζήσεις κατά μήκος της τροχιάς των τροχών, γνωστές ως τροχοαυλακώσεις, σχήμα 3.3(α) και 3.3(β).

Οφείλονται σε μια ή περισσότερες από τις παρακάτω αιτίες: την παραμένουσα παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος που εμφανίζεται με την πάροδο του χρόνου (> 5-7 ετών) ή την καθίζηση των στρώσεων λόγω κακής συμπίκνωσης ή την πλευρική μετακίνηση μιας ή περισσότερων στρώσεων κάτω από την επίδραση των αξονικών φορτίων. Τυπική μορφή τροχοαυλακώσεων που οφείλεται στους παραπάνω λόγους φαίνεται στο σχήμα 3.3(α). Επίσης, τροχοαυλακώσεις μπορούν να δημιουργηθούν και μόνο από την υψηλή παραμορφωσιμότητα του ασφαλτομίγματος, που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ευστάθεια και υψηλή παραμόρφωση κατά Marshall, μικρό ποσοστό κενών, υψηλό ρυθμό και βάθος τροχοαυλάκωσης και χαμηλό στατικό μέτρο δυσκαμψίας. Στην προκειμένη περίπτωση, οι τροχοαυλακώσεις αυτές εμφανίζονται συνήθως σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την κατασκευή και, με την πάροδο του χρόνου, συνοδεύονται και από τοπικές ανυψώσεις δεξιά και αριστερά της αυλάκωσης και καθ' όλο το μήκος αυτής, σχήμα 3.3(β). Τυπική μορφή τροχοαυλακώσεων (α) και (β) δίνονται στις φωτογραφίες 3.3 και 3.4.

Η συντήρηση των τροχοαυλακώσεων στην πρώτη περίπτωση γίνεται με μια από τις παρακάτω επεμβάσεις: ((α) με την πλήρωση των αυλακώσεων με ψυχρό ασφαλτόμιγμα τύπου slurry-διαβάθμισης II ή III, (β) με την διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος αφού προηγουμένως τοπικά, (στο εύρος της τρο-χοαυλάκωσης) φρεζαρισθεί η επιφάνεια του οδοστρώματος, (γ) με την διάστρωση ισοπεδωτικής και νέας ασφαλικής στρώσης, και (δ) με την διάστρωση νέας ασφαλικής στρώσης αφού προηγουμένως φρεζαρισθεί η επιφάνεια του οδοστρώματος. Σε κάθε μια από τις παραπάνω επεμβάσεις, πριν από την διάστρωση του ασφαλτομίγματος ψεκάζεται συγκολλητική επάλειψη με κατιονικό γαλάκτωμα σε ποσότητα 0.25-0.5 lt/m<sup>2</sup>.

Για τη συντήρηση των τροχοαυλακώσεων της δεύτερης περίπτωσης, δηλαδή λόγω υψηλής παραμορφωσιμότητας του ασφαλτομίγματος, απαιτείται οπωσδήποτε η απομάκρυνση της συγκεκριμένης ασφαλικής στρώσης και κατόπιν η επαναδιάστρωση αυτής με νέο κατάλληλο ασφαλτόμιγμα. Η απομάκρυνση της στρώσης γίνεται με φρεζάρισμα σε βάθος συνήθως 40 -50 mm, ή αναλόγως του πάχους των στρώσεων που πρέπει να αποξηλωθούν. Πριν τη διάστρωση του νέου άσφαλο μίγματος απαιτείται

συγκολλητική επάλειψη με κατιονικό γαλάκτωμα σε ποσότητες περίπου 0.25 - 0.35 lt/m<sup>2</sup>.



**Φωτογραφία**

13.3.

**Τυπική  
τροχοαυλά-  
κωση μορφής (α)**



**Φωτογραφία**

13.4.

**Τυπική  
τροχοαυλά-  
κωση μορφής (β)**

### 3.7.2. **Κυματώσεις (ρυτιδώσεις) (corrugations)**

Οι κυματώσεις, ή ρυτιδώσεις ή πτυχώσεις (corrugations), είναι μια μορφή πλαστικής μετακίνησης που έχει ως αποτέλεσμα την τοπική εξόγκωση της επιφάνειας υπό μορφή κυματώσεων, σχήμα 3.3(γ). Στην ειδική περίπτωση που η πλαστική μετακίνηση είναι τοπική, το φαινόμενο ονομάζεται απώθηση (shoving). Οι ρυτιδώσεις ή απωθήσεις εμφανίζονται συνήθως σε περιοχές όπου αναπτύσσονται υψηλές διατμητικές τάσεις όπως σε περιοχές φρεναρίσματος (στάσεις και διασταυρώσεις), ή

ανωφέρειες και κατωφέρειες και δε συνοδεύονται από ρηγματώσεις, εκτός ορισμένων περιπτώσεων απωθήσεων. Οι ρυτιδώσεις αναπτύσσονται σε όλη την επιφάνεια του οδοστρώματος, είναι όμως περισσότερο έντονες στην κύρια λωρίδα της κυκλοφορίας.

Οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στη χαμηλή ευστάθεια του ασφαλομίγματος και στην πλαστική παραμόρφωση αυτού.

Η χαμηλή ευστάθεια του ασφαλομίγματος, συνήθως του τύπου κυκλοφορίας, μπορεί να οφείλεται στο υψηλό ποσοστό ασφάλτου, ή στη χρήση ασφάλτου με χαμηλό ιξώδες (μαλακή άσφαλτος, με διεισδυτικότητα μεγαλύτερη των 100 pen), στο υψηλό ποσοστό άμμου έναντι των χονδρόκοκκων αδρανών, ή στο γεγονός ότι το μίγμα έχει κενά μικρότερα της ελαχίστης επιτρεπτής τιμής, ή στη χρήση φυσικών αδρανών (μη θραυστά και στρογγυλεμένα αδρανή) ή, τέλος, στη μη πλήρη εξάτμιση των διαλυτών των διαλυμάτων, που κακώς χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα από ορισμένους κατασκευαστές για συγκολλητικές ή και προεπαλείψεις.

Η συντήρηση των οδοστρωμάτων με ρυτιδώσεις ή απωθήσεις γίνεται με φρεζάρισμα της επιφάνειας σε βάθος 30-50mm ή μεγαλύτερο, ανάλογα του πάχους των ασφαλικών στρώσεων με το προβληματικό ασφαλομίγμα, και τη διάστρωση νέας ή νέων ασφαλικών στρώσεων τύπου από θερμό ασφαλομίγμα, αφού προηγουμένως ψεκαστεί συγκολλητική επάλειψη με κατιονικό γαλάκτωμα.

Αν η συντήρηση αποφασιστεί να γίνει μόνο με φρεζάρισμα, δίχως τη διάστρωση νέου τύπου, τότε η επιφάνεια πρέπει να σφραγίζεται με σφραγιστικό λεπτοτάπητα τύπου slurry, διαβάθμισης III ή με απλή ασφαλική επάλειψη. Η απόφαση του να φρεζαρισθεί, σε μικρό πάχος, δίχως τη διάστρωση νέου τύπου βασίζεται στο μέγεθος και την έκταση των κυματισμών, δηλαδή εάν εμφανίζονται σε μικρή σχετικά επιφάνεια και όχι σε όλο το μήκος της οδού.

Όταν το οδόστρωμα αποτελείται από μία μόνο ασφαλική στρώση πάχους 40-50 mm και βάση από ασύνδετα αδρανή (3 A) η συντήρηση μπορεί να γίνει (μάλιστα συνιστάται σε ορισμένες χώρες) με σπάσιμο του τύπου με ειδικό μηχάνημα, την αναμόχλευση αυτού και μέρος της βάσης, την προσθήκη μικρής ποσότητας ασφάλτου ή γαλακτώματος και τέλος τη διαμόρφωση και κυλίνδρωση του μίγματος (θραύσματα, αδρανή βάσης και συνδετικό υλικό). Μετά την κυλίνδρωση μπορεί να διαστρωθεί μια απλή ή διπλή ασφαλική επάλειψη ή ένας ψυχρός λεπτοτάπητας τύπου slurry, ή ακόμη και μια ασφαλική επίστρωση από θερμό ασφαλομίγμα.

### 3.7.3. Τοπικές καθιζήσεις (local depressions)

Τοπικές καθιζήσεις χαρακτηρίζονται οι καθιζήσεις που είναι σε περιορισμένη έκταση και συνήθως δε συνοδεύονται από μικρορωγμές, Σχήμα 3.3 (δ). Οι καθιζήσεις αυτές κατακρατούν νερό, είναι πηγή επιταχυνόμενης φθοράς του οδοστρώματος και συγχρόνως κίνδυνος για τους χρήστες της οδού (ολισθηρότητα, πάγος κλπ).

Οι τοπικές καθιζήσεις είναι συνήθως περιορισμένης έκτασης και οφείλονται στην τοπική καθίζηση των υποκειμένων στρώσεων κάτω από την επίδραση υψηλών αξονικών φορτίων. Οι καθιζήσεις των υποκειμένων στρώσεων μπορεί να οφείλονται σε κακή κατασκευή αυτών, ή/και σε τοπική μείωση της φέρουσας ικανότητας αυτών.

Η συντήρηση των τοπικών καθιζήσεων γίνεται είτε με τη διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος είτε με τη διάστρωση ψυχρού λεπτοτάπητα τύπου slurry, ανάλογα με το βάθος της βύθισης.

Όταν το βάθος της καθίζησης είναι μεγαλύτερο των 25mm περίπου, η συντήρηση γίνεται με θερμό ασφαλτόμιγμα, αφού προηγουμένως αποξηλωθεί ο τάπητας σε βάθος τουλάχιστον 40mm και ψεκασθεί η περιοχή με συγκολλητική επάλειψη από κατιονικό γαλάκτωμα (0.25-0.51t/m<sup>2</sup>). Το ασφαλτόμιγμα διαστρώνεται και συμπυκνώνεται κατάλληλα, έτσι ώστε να μη δημιουργηθεί ανισοψία με την παλαιά επιφάνεια.

Όταν το μέγιστο βάθος βύθισης είναι μικρότερο των 20-30 mm, η τοπική καθίζηση πληρούται με ψυχρό σφραγιστικό ασφαλτόμιγμα τύπου slurry, διαβάθμισης III, σε μία, δύο ή και τρεις στρώσεις (όσες χρειασθούν), αφού προηγουμένως η περιοχή καθαριστεί και ψεκασθεί με συγκολλητική. Σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιείται το θερμό ασφαλτόμιγμα το οποίο διαστρώνεται κατάλληλα έτσι ώστε να μη δημιουργηθεί «δόντι». Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται επαρκής συμπύκνωση με οδοστρωτήρα 6-8 ton.

### 3.7.4. Τοπικές διογκώσεις (local upheaval)

Οι τοπικές διογκώσεις οφείλονται σε τοπική διόγκωση του υπεδάφους ή της υπόβασης ή της βάσης και σπανίως των ασφαλικών στρώσεων. Η συνηθέστερη αιτία που προκαλεί τη διόγκωση είναι η διαστολή του εγκλωβισμένου ύδατος κατά τη διάρκεια του χειμώνα, λόγω παγετού. Βεβαίως, δεν πρέπει να αποκλείεται και η

επίδραση της υγρασίας σε διογκούμενα εδαφικά υλικά. Οι διογκώσεις ανύψωσης χαρακτηρίζονται από διακλαδιζόμενες ρηγματώσεις.

Η συντήρηση των τοπικών διογκώσεων είναι η ίδια με τη ριζική επισκευή που περιγράφεται στην παράγραφο 3.6.2. (α).

### 3.7.5. **Τοπικές καθιζήσεις σε τομές οδοστρώματος** (utility cut depressions)

Οι τοπικές αυτές καθιζήσεις εμφανίζονται από την κακή συμπίκνωση των υλικών επίχωσης των εγκαρσίων τομών που ανοίγονται κυρίως από οργανισμούς κοινής ωφελείας ή ιδιώτες.

Η συντήρηση αυτών των καθιζήσεων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.8.3.

## 3.8. **Αποσύνθεση** (disintegration)

Αποσύνθεση είναι η θρυμμάτιση του οδοστρώματος σε μικρά ασύνδετα κομμάτια. Σ' αυτό περιλαμβάνεται και η αποκόλληση των αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Εάν η αποσύνθεση, όπως ορίστηκε παραπάνω, δε συντηρηθεί έγκαιρα, είναι σίγουρο ότι θα οδηγήσει πολύ σύντομα σε κατάσταση όπου θα απαιτείται αποκατάσταση του οδοστρώματος.

Οι κυριότερες μορφές αποσύνθεσης του οδοστρώματος σε αρχικό στάδιο είναι η αποκόλληση αδρανών (ravelling) και οι λακκούβες (potholes).

Η αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος είναι το γνωστό «ψώριασμα» ή απογύμνωση της επιφάνειας που αρχίζει συνήθως από την άκρη του οδοστρώματος προς το κέντρο. Η αποκόλληση των αδρανών γίνεται προοδευτικά. Πρώτα αποκολλώνται τα λεπτόκοκκα αδρανή και κατόπιν τα χονδρόκοκκα. Στα πρώτα στάδια η επιφάνεια παρουσιάζει μια σχετική τραχύτητα και κατόπιν μικρές «φωλιές» που αρχίζουν να πυκνώνουν και να μεγαλώνουν δημιουργώντας έτσι σε πολλές περιπτώσεις λακκούβες.

Οι αιτίες που προκαλούν αυτού του είδους τη φθορά είναι: (α) η χαμηλή περιεκτικότητα του μίγματος σε άσφαλτο, (β) η χρήση μη καθαρών αδρανών, (γ) η κατασκευή του τάπητα σε χαμηλές θερμοκρασίες ή/και με βροχή, (δ) η υπερθέρμανση της ασφάλτου ή του ασφαλτομίγματος, (ε) η χρήση αδρανών που έχουν την τάση να

αποσυντίθενται (σαθρά αδρανή) και (στ) η μη επαρκής συμπύκνωση, στην περίπτωση των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων μόνο.

Η επισκευή της φθοράς γίνεται με τη διάστρωση ψυχρού ασφαλτικού μίγματος slurry seal, διαβαθμίσεις II ή III, ή με επιφανειακές επαλείψεις. Επίσης, όταν η κατάσταση του οδοστρώματος είναι πολύ κακή, εξετάζεται και η περίπτωση πρόσθετης ασφαλτικής στρώσης.

### 3.9. **Λακκούβες** (potholes)

Οι γνωστές λακκούβες δημιουργούνται από αδυναμίες του ασφαλτομίγματος ή της δομής του οδοστρώματος όπως: (α) έλλειψη συνδετικού υλικού στο ασφαλτόμιγμα, (β) μειωμένο πάχος τάπητα κυκλοφορίας, (γ) τοπική αστοχία κατά την κατασκευή των στρώσεων, κυρίως της βάσης και (δ) μη καλή τοπική αποστράγγιση της οδού. Λακκούβες μπορούν να δημιουργηθούν και από επιδείνωση της αποκόλλησης των αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος.

Η συντήρηση των λάκκων μπορεί να είναι πρόσω ρίνη ή οριστική. Κατά την προσωρινή συντήρηση γίνεται απλός καθαρισμός της λακκούβας και πλήρωση αυτής με κατάλληλο θερμό ή ψυχρό ασφαλτόμιγμα ή έτοιμο συσκευασμένο ψυχρό ασφαλτόμιγμα (BITUMIX ή παρόμοιου τύπου).

Κατά την οριστική συντήρηση γίνεται κόψιμο και τετραγωνισμός της λακκούβας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει υγιές πλευρικό υλικό στρώσης, επιμελής καθαρισμός, ψεκάσμος των τοιχωμάτων και της επιφάνειας με κατιονικό γαλάκτωμα, πλήρωση αυτής με κατάλληλο θερμό ή ψυχρό ασφαλτόμιγμα και τέλος κατάλληλη κυλίνδρωση.

Το ψυχρό ασφαλτόμιγμα μπορεί να παρασκευαστεί επί του έργου ή σε μόνιμες εγκαταστάσεις, με κατάλληλο κατιονικό γαλάκτωμα. Επίσης ψυχρό ασφαλτόμιγμα μπορεί να παρασκευασθεί με τη χρήση ειδικών διαλυτών. Η χρήση διαλυτών παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης αυτού για μακρό χρονικό διάστημα μέχρι και 8 μήνες, αφού προηγουμένως συσκευασθεί κατάλληλα. Το μίγμα αυτό, επειδή μπορεί να αποθηκευθεί και να χρησιμοποιηθεί όποτε χρειαστεί, λύνει το πρόβλημα της έλλειψης θερμού ασφαλτομίγματος κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Επίσης, λύνει το πρόβλημα των περιοχών που στερούνται συγκροτημάτων παραγωγής ασφαλτομιγμάτων, ή της ανεύρεσης μικρών ποσοτήτων ασφαλτομίγματος για τοπικές επουλώσεις. Ένα επιπλέον

πλεονέκτημα του μίγματος αυτού είναι η ευκολία στη χρήση του που συνίσταται στο άνοιγμα του δοχείου, εναπόθεση του μίγματος στη λακούβα και ελαφρά κυλίνδρωση.

### **3.10. Λεία επιφάνεια οδοστρώματος**

Η λεία επιφάνεια είναι μια φθορά του οδοστρώματος η οποία, σε αντίθεση με τους άλλους τύπους φθορών, δεν επιδρά στην επιδείνωση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος αλλά στο επίπεδο ασφάλειας και εξυπηρέτησης αυτού και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ολισθηρότητα της επιφάνειας.

Η λεία επιφάνεια του οδοστρώματος οφείλεται κυρίως στη λείανση των επιφανειακών αδρανών. Επίσης, μπορεί να οφείλεται και στην ανάδυση της ασφάλτου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, ή στη βύθιση των χονδρόκοκκων αδρανών ή ακόμη και στη χρήση λείων και σφαιρικών αδρανών (αμμοχάλικο χειμάρρου κλπ.). Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις επέρχεται μείωση ή εκμηδένιση της μικρό- και μακρο-υφής της επιφάνειας του οδοστρώματος και κατά συνέπεια μείωση του συντελεστή τριβής μεταξύ των ελαστικών και της επιφάνειας. Η παρουσία νερού επιδεινώνει την κατάσταση και παράλληλα είναι αιτία ανάπτυξης του φαινομένου της υδρολίστεσης (ιδιαίτερα στα σημεία παρακράτησης ύδατος). Επιδείνωση της ολισθηρότητας μπορεί επίσης να επέλθει με την παρουσία λαδιών ή χώματος (κυρίως αργιλικών υλικών) πάνω στην επιφάνεια, καθώς επίσης και με την εναπόθεση ελαστικών (στις περιοχές που παρατηρείται έντονη πέδηση των οχημάτων).

Η ολισθηρότητα συνδέεται άμεσα με τα τροχαία ατυχήματα. Έτσι λοιπόν, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή για την άμεση αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας.

#### **3.10.1. Λείανση των αδρανών - Ολισθηρότητα**

Η λείανση των αδρανών της επιφάνειας οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη χρήση ακατάλληλων σκληρών αδρανών. Τέτοια υλικά είναι όλα τα ασβεστολιθικά υλικά που παράγονται και χρησιμοποιούνται, δυστυχώς μέχρι και σήμερα, σχεδόν σε όλους τους τάπητες κυκλοφορίας στην Ελλάδα!

Η συντήρηση της επιφάνειας και η αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας αυτής, δηλαδή αύξηση του συντελεστή αντίστασης σε ολίσθηση, γίνεται με μια από τις παρακάτω τεχνικές:



- α) Διάστρωση θερμών ασφαλτομιγμάτων για λεπτές στρώσεις κυκλοφορίας
- β) Διάστρωση ψυχρού λεπτοτάπητα τύπου slurry (Μικρο-επιφανειακή στρώση)
- γ) Διάστρωση ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης
- δ) Διάστρωση ασφαλτικού σκυροδέματος για αντλιοσθηρή στρώση πάχους 40 cm από κατάλληλο θερμό ασφαλτόμιγμα.
- ε) Διασπορά προεπαλειμμένων ψηφίδων
- στ) Εφαρμογή ασφαλτικής επάλειψης
- ζ) Επαναδημιουργία υφής με μηχανικά μέσα

Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, πλην της (ζ), απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση κατάλληλων σκληρών αδρανών, μη ασβεστολιθικών. Η καταλληλότητα των αδρανών αυτών ελέγχεται με τους ελέγχους Αντίστασης σε λείανση (συντελεστής PSV) και Αντίστασης σε απότριψη (συντελεστής AAV) συμπεριλαμβανομένων και όλων των άλλων απαιτήσεων για την καταλληλότητα αυτών για άσφαλτο μίγματα, όπως απώλεια κατά Los Angeles, ισοδύναμο άμμου, υδροφιλία, αντίσταση σε κρούση και θλίψη, έλεγχος υγείας και απορροφητικότητας σε νερό.

**α) Διάστρωση θερμών ασφαλτομιγμάτων για λεπτές στρώσεις κυκλοφορίας**

Η τεχνική της διάστρωσης θερμών ασφαλτομιγμάτων για λεπτές στρώσεις κυκλοφορίας άρχισε να εφαρμόζεται με επιτυχία τα τελευταία δεκαπέντε περίπου χρόνια για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της αποκατάστασης της αντλιοσθηρότητας δίχως να σπαταλούνται μεγάλες ποσότητες σκληρών αδρανών. Η τεχνική συνίσταται στη χρήση θερμών ασφαλτομιγμάτων που δύνανται να διαστρωθούν σε λεπτές (20-30mm) έως πολύ λεπτές (15-20mm) στρώσεις. Τα μίγματα για λεπτές επιφανειακές στρώσεις είναι αυτά που αναπτύσσονται στην παράγραφο 6.2.10. Τα μίγματα για πολύ λεπτές στρώσεις είναι συνήθως πατενταρισμένα και προϋποθέτουν τη χρήση ειδικών μηχανημάτων διάστρωσης. Σημειώνεται ότι η τεχνική της διάστρωσης θερμών ασφαλτομιγμάτων για λεπτές στρώσεις κυκλοφορίας, σε πολλές χώρες αποτελεί την κυριότερη μέθοδο αποκατάστασης αλλά και κατασκευής επιφανειακής αντλιοσθηρής στρώσεις (νέα οδοστρώματα). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ασφαλτόμιγμα SMA, για πάχος στρώσης 30mm.

**β) Διάστρωση ψυχρού λεπτοτάπητα τύπου slurry (Μικρό-επιφανειακή στρώση)**

Η διάστρωση ψυχρού λεπτοτάπητα τύπου slurry (11)(24), ή άλλως γνωστή ως διάστρωση μικρο-επιφανειακής στρώσης, προϋποθέτει και αυτή τη χρήση κατάλληλων σκληρών αδρανών, πλην όμως οι απαιτούμενες ποσότητες ανά τετραγωνικό μέτρο είναι κατά πολύ μικρότερες, περίπου το 12%-15%, της ποσότητας που απαιτείται στην τεχνική (δ). Συνεπώς, με τη μέθοδο αυτή αφενός μειώνεται το κόστος της κατασκευής και αφετέρου γίνεται εξοικονόμηση των φυσικών αποθεμάτων σκληρών αδρανών.

Η εξοικονόμηση των φυσικών αποθεμάτων δεν οφείλεται μόνο στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες αδρανών αλλά και στο ότι χρησιμοποιείται όλο το φάσμα των λεπτόκοκκων (σε αντίθεση με τις προεπαλειμμένες ψηφίδες που είναι μονόκοκκα αδρανή).

Άλλα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η μη αισθητή αύξηση της υψομετρικής στάθμης του οδοστρώματος (πάχος περίπου 10mm), η ταχύτητα κατασκευής και η εύκολη αποκατάσταση των τυχόν τοπικών κατασκευαστικών αστοχιών, ή της μελλοντικής τοπικής επιδιόρθωσης.

Ο λεπτοτάπητας που κατασκευάζεται με τη μέθοδο αυτή είναι μόνο για την επίτευξη αντλιοστηρής και σφραγιστικής επιφάνειας και όχι για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος (αύξηση του αριθμού ισοδύναμων αξόνων που μπορεί να παραλάβει το οδόστρωμα).

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται εδώ και δεκαπέντε περίπου χρόνια στην Ελλάδα, με πολύ καλά αποτελέσματα.

**γ) Διάστρωση ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης**

Η διάστρωση ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης εκμηδενίζει παράλληλα και την πιθανότητα ανάπτυξης υδρολίσθησης, καθώς επίσης μειώνει αισθητά και την ανάπτυξη σταγονιδίων ύδατος που εκτοξεύονται από τα ελαστικά των αυτοκινήτων. Πλην όμως, η διάστρωση ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης προϋποθέτει την ύπαρξη καλής εγκάρσιας κλίσης και στεγανότητας της υποκείμενης στρώσης. Έτσι, σε περίπτωση αποκατάστασης της αντλιοστηρής ικανότητας του οδοστρώματος, θα πρέπει απαραίτητα να διασφαλίζονται οι παραπάνω δύο προϋποθέσεις. Βεβαίως, και στην περίπτωση αυτή επέρχεται υπερέψωση της στάθμης του οδοστρώματος όσο το πάχος της στρώσης (40-50mm).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διάστρωση ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης δε συμβάλλει αποτελεσματικά στην ενίσχυση του οδοστρώματος και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνη της σε περιπτώσεις όπου απαιτείται και παράλληλη ενίσχυση του τάπητα. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με την επιπρόσθετη διάστρωση ασφαλτομίγματος πυκνής υφής (ασφαλτικό σκυρόδεμα).

#### **δ) Διάστρωση ασφαλτικού σκυροδέματος για αντιολισθηρή στρώση**

Η τεχνική της διάστρωσης ασφαλτικού σκυροδέματος για αντιολισθηρή στρώση προϋποθέτει την κατασκευή στρώσης πάχους 40-50 mm από δύο εναλλακτικούς τύπους ασφαλτομιγμάτων, τον Τύπο Ι ή τον Τύπο ΙΙ.

Ο Τύπος Ι είναι κλειστού τύπου συμβατικό ασφαλτικό σκυρόδεμα και ο Τύπος ΙΙ είναι ανοικτού τύπου ασφαλτόμιγμα. Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι διαστρώνεται τάπητας πάχους 40-50mm και συνεπώς χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες σκληρών αδρανών (περίπου 80-100 Kg/m<sup>2</sup>). Το πρώτο έχει σαν αποτέλεσμα την δίχως αιτία σχετικά μεγάλη αύξηση της στάθμης της οδού με όλα τα συνεπακόλουθα μειονεκτήματα, ενώ το δεύτερο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους κατασκευής. Επίσης με το ασφαλτόμιγμα Τύπου Ι δεν επιτυγχάνεται τραχεία επιφάνεια κύλισης ήτοι επιφάνεια με ικανοποιητικό βάθος μακροϋφής.

#### **ε) Διασπορά προεπαλειμμένων ψηφίδων**

Το μειονέκτημα της αύξησης της στάθμης του οδοστρώματος, έχει και η διασπορά των προεπαλειμμένων ψηφίδων, δεδομένου ότι προαπαίτηση είναι η κατασκευή τάπητα πάχους συνήθως 40mm για την έμπηξη των ψηφίδων.

Ένα επίσης βασικό μειονέκτημα της τεχνικής των προεπαλειμμένων ψηφίδων είναι η δυσκολία δημιουργίας και διατήρησης ομοιόμορφης επιφάνειας εξαιτίας είτε της κακής αρχικής κατανομής, είτε της σταδιακής αποκόλλησης των ψηφίδων, είτε ακόμη λόγω της βύθισης των ψηφίδων. Όλες σχεδόν οι εφαρμογές προεπαλειμμένων ψηφίδων στην Ελλάδα, μέχρι σήμερα, παρουσιάζουν τα παραπάνω προβλήματα.

Η τεχνική των προεπαλειμμένων ψηφίδων συνίσταται στη διασπορά (κατανομή) συγκεκριμένης ποσότητας μονόκοκκων αδρανών (ψηφίδων) επί άσφαλο μίγματος υποδοχής, τα οποία έχουν προεπαλειφθεί με μικρή ποσότητα ασφάλτου (τύπου 40/50 ή 60/70pen). Οι ψηφίδες που χρησιμοποιούνται έχουν, συνήθως, δύο ονομαστικά μεγέθη: 10-14mm και 14-20mm, αναλόγως της μακροϋφής που επιδιώκεται να επιτευχθεί. Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των ψηφίδων δίνονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1.: Κοκκομετρική διαβάθμιση ψηφίδων για προεπάλειψη.**

Κόσκινο τετραγωνικής οπής (British Standard)	Ονομαστικό μέγεθος ψηφίδων	
	10 - 14mm	14 - 20mm
	Διερχόμενο ποσοστό (%)	
28mm	-	100
20	100	90 - 100
14	90 - 100	0 - 15
10	0 - 15	-
6.3	0 - 3	0 - 3
0.6	0 - 1	0 - 1
0.075	0 - 0.5*	0 - 0.5*

\* Ο προσδιορισμός του κλάσματος αυτού πρέπει να γίνεται με έκπλυση σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM C-117.

Για τα δύο ονομαστικά μεγέθη, οι ποσότητες που συνιστώνται να κατανέμονται, από τις Ελληνικές τεχνικές οδηγίες, είναι: για 10-14mm,  $7 \pm 1 \text{ kg/m}^2$ , ενώ για 14-20mm,  $10 \pm 1 \text{ kg/m}^2$ . Το ποσοστό ασφάλτου που χρησιμοποιείται για την προεπάλειψη των ψηφίδων κυμαίνεται από 1-1,5%, για αδρανή υλικά με ειδικό βάρος  $2.6-2.8 \text{ gr/cm}^3$  και κανονικό πορώδες.

Η κατανομή των προεπαλειμμένων ψηφίδων γίνεται από ειδικό αυτοκινούμενο μηχάνημα-κατανομέα που ακολουθεί το διαστρωτήρα (finisher) σε απόσταση 10 περίπου μέτρων.

Το ασφαλτόμιγμα υποδοχής των προεπαλειμμένων ψηφίδων, κατά τις Τεχνικές Οδηγίες του ΥΠΕΧΩΔΕ θα πρέπει να έχει κοκκομετρική διαβάθμιση εντός των προδιαγραφόμενων ορίων που δίνονται στον Πίνακα 3.2. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στις σχετικές Τεχνικές Οδηγίες.

#### στ) Ασφαλτική επάλειψη

Η ασφαλτική επάλειψη συνίσταται στον ψεκασμό συνδετικού υλικού (άσφαλτος, ή ασφαλτικό ελαστομερές γαλάκτωμα ή ελαστομερής άσφαλτος) και στη διασπορά μονόκοκκων αδρανών συγκεκριμένου μεγέθους σε μία ή δύο στρώσεις. Οι ποσότητες του συνδετικού υλικού και των αδρανών ανά μονάδα επιφάνειας, καθώς επίσης και το κατάλληλο μέγεθος των αδρανών εξαρτάται από το είδος του συνδετικού υλικού, τη σκληρότητα της επιφάνειας και τον κυκλοφοριακό φόρτο. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στην παράγραφο 3.16.

**Πίνακας 3.2.: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομίγματος υποδοχής προεπαλειμμένων ψηφίδων**

Κόσκινο τετραγωνικής οπής (ASTM)	Λιερχόμενο ποσοστό (%)
12.5mm (1/2")	100
9.5 (3/8")	80 - 100
4.75 (No. 4)	55 - 75
2.36 (No. 8)	35 - 50
0.6 (No. 30)	18 - 29
0.3 (No. 50)	13 - 23
0.15 (No. 100)	8 - 16
0.075 (No. 200)	4 - 10

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι το σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής και η ευκολία της κατασκευής. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η περιοδική αποκόλληση των αδρανών, ιδιαίτερα σε δρόμους υψηλών ταχυτήτων και με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο. Η μέθοδος αυτή, αν και χρησιμοποιείται ευρέως στο εξωτερικό, δεν έχει μέχρι σήμερα εφαρμοστεί στην Ελλάδα (πλην μιας μικρής πειραματικής έκτασης στην περιοχή των Ιωαννίνων).

### **ζ) Επαναδημιουργία υφής με μηχανικά μέσα**

Η επαναδημιουργία υφής με κατάλληλα μηχανικά μέσα αποσκοπεί στην προσωρινή αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας και όχι στη μονιμότερη αποκατάσταση που επέρχεται με όλες τις άλλες μεθόδους. Τα μηχανικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι: εκτοξευτήρες θερμού συμπιεσμένου αέρα, ειδικές φρέζες και ειδικά κρουστικά μηχανήματα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι τα συνήθη μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την αποξήλωση του φθαρμένου τάπητα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, διότι αυτά συνήθως αφήνουν διαμήκεις συνεχείς ραβδώσεις. Οι ραβδώσεις αυτές είναι πολύ επικίνδυνες για την οδήγηση και δε συμβάλλουν καθόλου στην επίτευξη αντιολισθηρής επιφάνειας. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται δημιουργούν τυχαία μακροϋφή στο οδόστρωμα.

Η τεχνική αυτή, εάν χρησιμοποιηθεί, προϋποθέτει ότι ο τάπητας κυκλοφορίας θα είναι σε καλή κατάσταση και δε θα παρουσιάζει άλλες φθορές. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής σε χώρες με θερμό κλίμα όπως η Ελλάδα αμφισβητείται.

Οι τεχνικές (α), (β) και (γ) θεωρούνται οι πλέον ενδεδειγμένες για την αποκατάσταση ή την παροχή αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας του οδοστρώματος. Η τεχνική (δ) θεωρείται αντιοικονομική σε σχέση με την αποτελεσματικότητα της επιφάνειας που παρέχει. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής (ε) στην Ελλάδα δεν ήταν η αναμενόμενη και σε συνδυασμό με το συνολικό κόστος κατασκευής συνίσταται να αποφεύγεται. Τέλος, οι τεχνικές (στ) και (ζ) ουσιαστικά δεν έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα. Αναλυτικότερα:

Η τεχνική της διάστρωσης θερμών ασφαλτο μιγμάτων για λεπτές στρώσεις κυκλοφορίας, και ειδικότερα το θερμό ασφαλτόμιγμα για λεπτή επιφανειακή στρώση, σε αρκετές χώρες σήμερα αποτελεί την κυριότερη μέθοδο αποκατάστασης αλλά και παροχής αντιολισθηρής επιφάνειας οδοστρώματος (ήτοι για συντήρηση και νέα οδοστρώματα). Πλην της άριστης αντιολισθηρής επιφάνειας και της οικονομίας της κατασκευής, η ασφαλική επιφάνεια που επιτυγχάνεται έχει επιπλέον το πλεονέκτημα της μείωσης του θορύβου και των σταγονιδίων που εκτοξεύονται από τα οχήματα κινούμενα σε βρεγμένη επιφάνεια. Στην Ελλάδα η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε πειραματικά σε τμήματα της Εγνατίας Οδού (έτος 2001) και υιοθετήθηκε από την Εγνατία Οδό Α.Ε. ως η κύρια τεχνική παροχής αντιολισθηρής επιφάνειας.

Η τεχνική της διάστρωσης ψυχρής μικρο-επιφανειακής στρώσης χρησιμοποιείται με επιτυχία τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια στην Ελλάδα και στο εξωτερικό και αποτελεί μαζί με την προηγούμενη τεχνική την άλλη οικονομική και αποτελεσματική εναλλακτική λύση αποκατάστασης ή παροχής αντιολισθηρής επιφάνειας.

Η μέθοδος της διάστρωσης ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα σε χώρες όπου έχει χρησιμοποιηθεί. Σε ορισμένες μάλιστα χώρες, όπως η Αγγλία, είναι μία από τις δύο επίσημα αναγνωρισμένες μεθόδους παροχής αντιολισθηρής επιφάνειας σε νέες κατασκευές, ενώ στην Ολλανδία συνιστάται ως η πρώτη επιλογή κυρίως σε αυτοκινητοδρόμους εντός κατοικημένων περιοχών, λόγω της μείωσης του θορύβου που επέρχεται. Σε περίπτωση χρήσης της μεθόδου αυτής σε παλαιό τάπητα θα πρέπει να διασφαλίζεται η επαρκής εγκάρσια κλίση της οδού και η στεγανότητα της υποκείμενης επιφάνειας. Σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα διευθέτησης των επιφανειακών υδάτων που απορρέουν από τη στρώση.

Στην Ελλάδα η τεχνική της διάστρωσης ασφαλτομίγματος πορώδους σύνθεσης παρόλη την επιτυχή εφαρμογή της σε δοκιμαστικά τμήματα του Εθνικού δικτύου, δεν έχει εφαρμοσθεί μέχρι σήμερα σε ευρεία κλίμακα.

Η τεχνική της διάστρωσης στρώσης πάχους 40cm από «κατάλληλο» θερμό ασφαλτόμιγμα και ειδικότερα του μίγματος Τύπου Ι, των Τεχνικών Οδηγιών του ΥΠΕΧΩΔΕ, πλην των μειονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν στο (δ), δεν παρέχει ικανοποιητικό βάθος επιφανειακής μακροϋφής και ως εκ τούτου δεν παρέχει ικανοποιητικό συντελεστή τριβής μετά την πάροδο μικρού χρονικού διαστήματος από την απόδοση της οδού στην κυκλοφορία. Βάσει των παραπάνω το ασφαλτόμιγμα τύπου Ι που προτάθηκε να χρησιμοποιείται στην Ελλάδα δεν θα πρέπει σε καμιά περίπτωση να χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση ή την παροχή αντιολισθηρής επιφάνειας. Σχετικά με το ασφαλτόμιγμα τύπου ΙΙ, από την μέχρι σήμερα εφαρμογή του στην Ελλάδα συμπεραίνεται ότι παρόλο που επιτυγχάνεται τραχύτερη επιφάνεια σε σχέση με τον τύπο Ι, σε αρκετά έργα παρατηρήθηκε εξίδρωση της ασφάλτου ή/και ταχεία μείωση της μακροϋφής της επιφάνειας. Συνυπολογίζοντας τα παραπάνω και όσα αναφέρθηκαν στο (δ) συνιστάται όπως ο τύπος ΙΙ αποφεύγεται για την αποκατάσταση ή παροχή αντιολισθηρής επιφάνειας και όταν σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται, να λαμβάνονται όλα τα μέτρα ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα του μίγματος και η συμβατότητα αυτού με την μελέτη σύνθεσης.

Οι ασφαλικές επαλείψεις είναι μια τεχνική που δίνει και αυτή πολύ καλά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται ευρέως στο εξωτερικό. Η χρήση της αρχικά περιοριζόταν σε όλες τις κατηγορίες δρόμων εκτός από τους αυτοκινητοδρόμους. Πλην όμως σήμερα, με τη ραγδαία ανάπτυξη των τροποποιημένων ασφάλτων, ο περιορισμός αυτός τείνει να εξαλειφθεί. Στην Ελλάδα οι ασφαλικές επαλείψεις δεν έχουν ακόμη εφαρμοσθεί. Συνιστάται να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον σε όλους τους δρόμους εκτός από τους αυτοκινητοδρόμους, δεδομένου ότι παρέχουν μια αποδεδειγμένα καλή και οικονομική εναλλακτική λύση.

Η επαναδημιουργία υφής με μηχανικά μέσα συνιστάται να χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις προσωρινής αποκατάστασης της αντιολισθηρότητας μέχρι να διαστρωθεί κατάλληλη αντιολισθηρή στρώση.

### 3.10.2. **Ανάδυση ασφάλτου** (asphalt bleeding or flushing)

Ανάδυση ασφάλτου είναι το φαινόμενο της κάθετης μετακίνησης της ασφάλτου μέσα στο ασφαλτόμιγμα και η εμφάνιση αυτής στην επιφάνεια του οδοστρώματος δημιουργώντας έναν ασφαλτικό υμένα. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται μόνο κατά την περίοδο των θερινών μηνών.

Η μόνη αιτία εμφάνισης ανάδυσης ασφάλτου είναι η ύπαρξη περίσσειας ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα ή ο ψεκασμός πλέον της απαιτούμενης ποσότητας συγκολλητικής ή προεπάλειψης (ανάδυση ασφάλτου από προεπάλειψη μπορεί να συμβεί μόνο στην περίπτωση διάστρωσης ενός τάπητα πάχους 40-50mm).

Τοπική ανάδυση ασφάλτου αποκαθίσταται συνήθως με διασπορά και κυλίνδρωση θερμών λεπτόκοκκων αδρανών, ή με εκτοξευτήρες θερμού αέρα. Στην περίπτωση διασποράς θερμών αδρανών συνιστάται να γίνονται οι εργασίες τις θερμότερες μέρες του έτους. Σε ορισμένες περιπτώσεις η επιφάνεια μπορεί να φρεζαρισθεί με ειδικές φρέζες (αυτές που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της αντολισθηρότητας). Οι εργασίες στην περίπτωση αυτή καλό είναι να γίνονται με χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Όταν η ανάδυση ασφάλτου είναι σε μεγάλη έκταση, και ιδιαίτερα όταν αυτή είναι σοβαρή (δηλαδή σχετικά μεγάλο πάχος υμένα), συνιστάται να αποξηλώνεται όλη η στρώση και να αποκαθίσταται με νέο ασφαλτόμιγμα. Ορισμένες φορές, η διάστρωση ισχυρής ισοπεδωτικής στρώσης με παράλληλη κατασκευή νέας ασφαλτικής στρώσης είναι η άλλη εναλλακτική λύση.

### 3.11. **Φθορές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

Οι φθορές που παρουσιάζουν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, όμοιες με αυτές των ευκάμπτων οδοστρωμάτων, δηλαδή: ρηγματώσεις, επιφανειακές παραμορφώσεις, αποσύνθεση επιφάνειας και λείανση επιφάνειας.

Πριν αναπτυχθούν αναλυτικά οι παραπάνω φθορές θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επιτυχής συντήρηση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με τσιμεντοκονίαμα ή γενικότερα με νέο σκυρόδεμα, μετά ή άνευ οπλισμού, είναι πολύ δύσκολη και πολλές φορές αδύνατη. Για το λόγο αυτό οι μέθοδοι συντήρησης που θα αναπτυχθούν παρακάτω βασίζονται κυρίως σε συντήρηση με ασφαλτικά υλικά ή ασφαλτικά μίγματα.



### 3.12. Ρηγματώσεις - Αρμοί

Οι ρωγμές είναι οι περισσότερο κοινές φθορές των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Οφείλονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στην ογκομετρική συμπεριφορά του σκυροδέματος κάτω από θερμοκρασιακές αυξομειώσεις, αλλά και στην επαναλαμβανόμενη φόρτιση που επέρχεται από την κυκλοφορία. Ρωγμές εμφανίζονται καθ' όλες τις διευθύνσεις, πλην όμως μπορούν να αποφευχθούν ή να περιορισθούν με την κατασκευή αρμών (διαστολής, συστολής και στρέβλωσης-διαμήκεις αρμοί). Παρόλο που οι αρμοί περιορίζουν την ανάπτυξη ρωγμών, δημιουργούν σοβαρό πρόβλημα συντήρησης τους. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η συντήρηση των αρμών είναι εξίσου σημαντική, αν όχι σημαντικότερη, από τη συντήρηση των ρωγμών. Και αυτό διότι η έναρξη ενός μεγάλου ποσοστού ρηγματώσεων οφείλεται στη μη καλή και έγκαιρη συντήρηση των κατασκευασθέντων αρμών. Η συντήρηση των αρμών και των ρηγματώσεων καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό των έργων συντηρησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Οι φθορές στους αρμούς και οι συνήθεις ρωγμές αναλύονται παρακάτω.

#### 3.12.1. Φθορές στους αρμούς

Οι φθορές που παρουσιάζονται στους αρμούς είναι συνήθως η αποκόλληση του υλικού πλήρωσης, που τοποθετείται για τη στεγάνωση αυτών, και η ρηγμάτωση πλησίον του αρμού. Πολλές φορές εμφανίζεται και θραύση με αποκόλληση τμήματος των ακμών του αρμού.

Η αποκόλληση του υλικού οφείλεται στη γήρανση και οξείδωση του υλικού πλήρωσης, ενώ η ρηγμάτωση στη χαμηλή αντοχή του σκυροδέματος σε συνδυασμό με τα μεγάλα φορτία των οχημάτων.

Η συντήρηση πρέπει να γίνεται μόλις εμφανισθούν τα πρώτα σημάδια της φθοράς, έτσι ώστε να μην επιδεινωθεί η γενικότερη κατάσταση του οδοστρώματος με την εισροή ύδατος. Η συντήρηση του αρμού γίνεται με την απομάκρυνση του παλαιού υλικού, χρησιμοποιώντας κατάλληλο μηχανικό μέσο, τον καθαρισμό αυτού με συμπιεσμένο υπέρθερμο αέρα, ή/και αμμοβολή (αν χρειαστεί) και την πλήρωση του με νέο ασφαλικό ελαστομερές υλικό, κατάλληλο για αρμούς. Πριν την πλήρωση του καθαρού αρμού τοποθετείται καινούργιο υλικό πωματισμού του αρμού (σήμερα

χρησιμοποιείται ειδικό «σφουγγάρι» πολυαιθυλενίου, ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες).

Η ελαστομερής ασφαλτος που χρησιμοποιείται θα πρέπει να εκπληρώνει, όπως και σε όλες τις περιπτώσεις πλήρωσης ρωγμών, τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ASTM D 1190, ή της προδιαγραφής BS 2499. Η πλήρωση στην προκειμένη περίπτωση γίνεται «εν θερμό» χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξοπλισμό που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.6.

Στους αρμούς των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, και ιδιαίτερα στην περιοχή στάθμευσης των αεροσκαφών, υπάρχει ορισμένες φορές η απαίτηση για το υλικό πλήρωσης να μπορεί να ανθίσταται στην καταστρεπτική επίδραση των καυσίμων και λαδιών. Στις περιπτώσεις αυτές το ελαστομερές υλικό, που συνήθως παράγεται από πίσσα, θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ASTM D 1854.

Πλήρωση των αρμών μπορεί να γίνει και «εν ψυχρό». Στην περίπτωση αυτή το χυτό ασφατικό υλικό θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ASTM D I 850.

### 3.12.2. **Γωνιώδεις (γωνιακές) ρωγμές (edge cracks)**

Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται στις γωνίες των πλακών. Αν δε συντηρηθεί έγκαιρα η ρωγμή, το ρηγματωμένο γωνιακό κομμάτι θα αποκολληθεί πλήρως από την πλάκα.

Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται λόγω μη καλής υποστήριξης της πλάκας από το έδαφος έδρασης. θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι γωνίες της πλάκας είναι το πιο ευαίσθητο σημείο της.

Η συντήρηση της ρωγμής, όπως και κάθε άλλης ρωγμής, συνίσταται στον καθαρισμό και στην πλήρωση αυτής με κατάλληλο ελαστομερές υλικό (παράγραφος 3.12.1.).

Στην περίπτωση που το γωνιακό ρηγματωμένο κομμάτι έχει αποκολληθεί πλήρως, αυτό απομακρύνεται και η δημιουργηθείσα λακκούβα γεμίζει, αναλόγως του μεγέθους της, με ελαστομερές ασφατικό υλικό (εάν η λακκούβα είναι μικρή), ή με θερμό ή ψυχρό ασφατόμιγμα, (εάν η λακκούβα είναι σχετικά μεγάλη). Στη δεύτερη περίπτωση συνιστάται να αφήνεται το κενό του αρμού, το οποίο πληρούται με

ελαστομερή άσφαλτο. Το θερμό ασφαλτόμιγμα μπορεί να είναι ασφατικό σκυρόδεμα τύπου A 265B ή Γ. Το ψυχρό ασφαλτόμιγμα είναι αυτό που χρησιμοποιείται για την πλήρωση λάκκων και το οποίο διατίθεται συσκευασμένο (παράγραφος 3.9.2). Και στις δύο περιπτώσεις, μετά τον καθαρισμό απαιτείται ψεκασμός συγκολλητικής και επαρκής συμπίκνωση.

### 3.12.3. **Διαμήκεις ρωγμές** (longitudinal cracks)

Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται παράλληλα με τον άξονα του οδοστρώματος.

Οφείλονται κυρίως στη συστολή της πλάκας και την ανυπαρξία κατάλληλου αριθμού διαμηκών αρμών. Πιθανές αιτίες μπορούν επίσης να είναι και η διαστολή της υποκείμενης στρώσης, οι τάσεις στρέβλωσης που αναπτύσσονται σε συνδυασμό με τα φορτία της κυκλοφορίας, ή η μειωμένη υποστήριξη του εδάφους έδρασης.

Η επισκευή των ρωγμών γίνεται με καθαρισμό αυτών και της εκατέρωθεν περιοχής, τουλάχιστον 25mm εκατέρωθεν, με αμμοβολή ή συμπιεσμένο υπέρθερμο αέρα και κατόπιν πλήρωση με κατάλληλη ελαστομερή άσφαλτο. Σε περίπτωση που το οδόστρωμα αμέσως μετά τη συντήρηση δοθεί στην κυκλοφορία, συνιστάται να διασπέρνεται μικρή ποσότητα άμμου επί του υλικού πλήρωσης.

### 3.12.4. **Εγκάρσιες ρωγμές** (transverse cracks)

Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται σχεδόν κάθετα στον άξονα του οδοστρώματος και συνήθως στο κέντρο της πλάκας. Οφείλονται στην υπεφόρτιση και ανάπτυξη μεγάλων ροπών κάμψης, ή στην ανυπαρξία κατάλληλου αριθμού εγκαρσίων αρμών, ή στην ύπαρξη ασθενούς υπεδάφους.

Η συντήρηση αυτών γίνεται όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

### 3.12.5. **Διαγώνιες ρωγμές** (diagonal cracks)

Είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται στις γωνίες των πλακών σχηματίζοντας μεγαλύτερα τρίγωνα από αυτά που σχηματίζονται από τις γωνιώδεις ρωγμές. Οι αιτίες για την ανάπτυξη αυτών είναι οι ίδιες με αυτές των γωνιωδών ρωγμών και η συντήρηση αυτών γίνεται όπως αναφέρεται στην παράγραφο 3.12.2.2.

### 3.13. **Επιφανειακές παραμορφώσεις δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

Οι επιφανειακές παραμορφώσεις στα δύσκαμπτα οδοστρώματα περιορίζονται αποκλειστικά και μόνο σε καθιζήσεις. Οι διαφορικές καθιζήσεις των πλακών μπορεί να οφείλονται στο ανεπαρκές σύστημα μεταφοράς του φορτίου από πλάκα σε πλάκα ή στην περαιτέρω συμπύκνωση ή συστολή του εδάφους έδρασης. Διαφορική καθίζηση μπορεί επίσης να αναπτυχθεί αν λόγω ατελούς πλήρωσης του αρμού «αντληθούν» προς τα έξω τα λεπτόκοκκα υλικά του εδάφους έδρασης. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αναμένεται και ρηγμάτωση και θραύση κατά μήκος της ακμής της πλάκας.

Ορισμένες καθιζήσεις μικρού μεγέθους μπορούν να συντηρηθούν καινά αποκατασταθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλο ασφατικό ελαστομερές υλικό και σφραγιστικό ασφατόμιγμα τύπου slurry. Τις περισσότερες όμως φορές η συντήρηση και η αποκατάσταση των καθιζήσεων γίνεται μόνο με πρόσθετη στρώση ασφατοτάπητα, αφού προηγουμένως εξομαλυνθούν οι καθιζήσεις με μια ισοπεδωτική στρώση.

Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται και άντληση λεπτόκοκκων υλικών, θα πρέπει πρώτα να γίνει σχολαστικά η πλήρωση του κενού που δημιουργήθηκε. Η επαρκής πλήρωση του κενού αυτού, που είναι αρκετά δύσκολη, γίνεται με ειδικό ασφατικό υλικό υψηλού σημείου μάλθωσης. Το υλικό αυτό εφαρμόζεται με αντλία και θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ASTM D 314106).

### 3.14. **Αποσύνθεση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (disintegration)**

Αποσύνθεση της επιφάνειας δύσκαμπτου οδοστρώματος είναι τόσο η αποκόλληση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών από την επιφάνεια του σκυροδέματος όσο και ο θρυμματισμός των ακμών και των γωνιών των πλακών. Η αποκόλληση των αδρανών οφείλεται στη μη καλή ανάμιξη του μίγματος, στη χρήση ακατάλληλων αδρανών, στις μη κατάλληλες συνθήκες πήξης του σκυροδέματος και στη χημική δράση του άλατος που πιθανόν να χρησιμοποιείται για την αποφυγή δημιουργίας πάγου στο οδόστρωμα.

#### **α.) Αποκόλληση αδρανών - λεπίδωση (scaling)**

Η συντήρηση των περιοχών που παρουσιάζουν αποκολλήσεις, σε βάθος όχι μεγαλύτερο των 25mm, γίνεται μόνο με τη διάστρωση ψυχρού σφραγιστικού άσφαλο μίγματος τύπου slurry, διαβάθμισης II ή III. Σε περίπτωση που η αποκόλληση των

αδρανών έχει δημιουργήσει «φωλιές» βάθους μεγαλύτερου των 25mm η συντήρηση γίνεται συνήθως με τη διάστρωση θερμού ασφαλτομίγματος. Πριν τη διάστρωση του θερμού ασφαλτομίγματος, απαιτείται συγκολλητική επάλειψη με κατιονικό γαλάκτωμα ταχείας διάσπασης KE-1 ή KE-2 (ποσότητες περίπου 0.25-0.50 λίτρα/m<sup>2</sup>).

### **β) Θρυμματισμός πλακών**

Ο θρυμματισμός των πλακών στις ακμές (spalling) και στις γωνίες, ή ακόμη και στο μέσο της πλάκας, οφείλεται κυρίως στη διαστολή αυτών και, ορισμένες μόνο φορές, στις μεγάλες ανωστικές πιέσεις του υπεδάφους. Παράγοντες που συντελούν στην εμφάνιση της θραύσης είναι το ασθενές σκυρόδεμα, η πιθανότητα εγκλωβισμού αδρανών μέσα στον αρμό και η κακή κατασκευή του αρμού.

Όταν ο θρυμματισμός ή/και η αποκόλληση τμημάτων σκυροδέματος είναι σοβαρή, η οποιαδήποτε συντήρηση δεν είναι αποτελεσματική. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται πλήρης αποκατάσταση του οδοστρώματος. Η αποκατάσταση μπορεί να γίνει είτε με την ανακατασκευή των πλακών, είτε με διάστρωση ενισχυτικής ασφαλτικής επίστρωσης, ή ακόμη και με διάστρωση νέας ενισχυτικής στρώσης από σκυρόδεμα.

Ανακατασκευή πλακών επιλέγεται μόνον όταν οι φθαρμένες πλάκες είναι περιορισμένες σε αριθμό, αλλιώς επιλέγεται μια από τις άλλες δύο εναλλακτικές λύσεις. Η ανακατασκευή γίνεται και πάλι από σκυρόδεμα, αφού απομακρυνθεί όλη η φθαρμένη πλάκα και αντικατασταθεί (αν χρειασθεί) η υπόβαση. Κατά την ανακατασκευή επανακατασκευάζονται και οι ανάλογοι αρμοί.

Η διάστρωση νέας ενισχυτικής στρώσης συνήθως γίνεται με ασφαλτόμιγμα και όχι από σκυρόδεμα δεδομένου ότι το δεύτερο παρουσιάζει αρκετές κατασκευαστικές δυσκολίες.

Η συνηθέστερη μέθοδος αποκατάστασης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, που είναι η κατασκευή ασφαλτικής ενισχυτικής στρώσης, εγκυμονεί κινδύνους πρόωρης εμφάνισης ανακλαστικών ρωγμών, κυρίως στα σημεία ύπαρξης αρμών και χαλαρών τεμαχίων της πλάκας του οδοστρώματος. Για την αποφυγή εμφάνισης ρωγμών, η νέα επίστρωση θα πρέπει να έχει το ενδεδειγμένο πάχος ή/και να λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα όπως: α) κατασκευή πρόσθετης ασφαλτικής στρώσης εκτόνωσης ρωγμών (crack relief layer), μεταξύ της υφισταμένης πλάκας και της νέας επίστρωσης, ή β) περαιτέρω διάσπαση της πλάκας και βύθιση των τεμαχίων στην υπόβαση (cracking and seating). Οι παραπάνω δύο τεχνικές αναπτύσσονται εν συντομία παρακάτω.

Για την αποφυγή ανάπτυξης ανακλαστικών ρωγμών μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα γεωπλέγματα ή ασφαλτοϋφάσματα ή ακόμη και μεμβράνες απορρόφησης τάσεων μετά ή άνευ ινών. Τα αποτελέσματα, θεωρητικά τουλάχιστον, θα πρέπει να είναι θετικά. Μέχρι σήμερα δεν έχουν εξαχθεί πάγια συμπεράσματα που να βασίζονται σε τεχνο-οικονομικά συγκριτικά στοιχεία, επειδή δεν υπάρχει μακροχρόνια παρακολούθηση της συμπεριφοράς αυτών.

### 3.14.1 Ασφαλτική στρώση εκτόνωσης ρωγμών

Η ασφαλτική στρώση εκτόνωσης ρωγμών κατασκευάζεται από θερμό ασφαλτόμιγμα ανοικτού τύπου, με πολλά κενά και με πολύ χονδρόκοκκα

θραυστά αδρανή. Το υψηλό ποσοστό κενών του μίγματος είναι αυτό που συντελεί στη μη-άμεση μετάδοση των μετακινήσεων των θραυσμένων πλακών, οι οποίες είναι και η μόνη αιτία δημιουργίας ρωγμών στη νέα ασφαλτική επίστρωση.

Το τελικό μίγμα έχει κενά από 25 έως 35%, αναλόγως της διαβάθμισης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα προτεινόμενα όρια των κοκκομετρικών καμπυλών για τους τρεις τύπους μιγμάτων που χρησιμοποιούνται δίνονται στον Πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.3.: Όρια κοκκομετρικών καμπυλών μιγμάτων στρώσης εκτόνωσης ρωγμών**

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Μίγμα Α <sup>(α)</sup>	Μίγμα Β <sup>(α)</sup>	Μίγμα Γ <sup>(β)</sup>
	Διερχόμενο ποσοστό (%)		
75	100	-	-
63	95 - 100	100	-
50	-	-	100
37.5	30 - 70	35 - 70	75 - 90
19.0	3 - 20	5 - 20	50 - 70
9.5	0 - 5	-	-
4.75	-	-	8 - 20
2.36	-	0 - 5	-
0.150	-	-	0 - 5
0.075	-	0 - 3	-
Ποσοστό ασφάλτου 40/50pen	1.5 - 3.0% κατά βάρος μίγματος		

<sup>(α)</sup> Το μίγμα αυτό χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν από πυρηνικά αδρανή ή όταν οι αμμοί είναι σε απόσταση μεγαλύτερη των 6.0m

<sup>(β)</sup> Το μίγμα αυτό χρησιμοποιείται όταν το σκυρόδεμα παρασκευάστηκε από αββεστολιθικά αδρανή

Το πάχος της στρώσης εκτόνωσης συνιστάται όπως είναι 90mm. Επ' αυτής διαστρώνεται συνδετική / ισοπεδωτική στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος κλειστού

τύπου με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 3 8mm και μια στρώση κυκλοφορίας πάλι από ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου με ονομαστικό μέγεθος αδρανών 19mm. Το συνολικό πάχος όλων των στρώσεων συμπεριλαμβανομένης και της στρώσης εκτόνωσης συνήθως είναι από 175mm έως 225mm.

Πριν τη διάστρωση της στρώσης εκτόνωσης, η επιφάνεια ψεκάζεται με επαρκή ποσότητα διαλυμένου ασφαλτικού γαλακτώματος KE-4 ή AE-4 (αναλογία διάλυσης με νερό 50/50). Η ποσότητα που ψεκάζεται είναι περίπου 2.7 kg/m<sup>2</sup>.

Η διάστρωση του μίγματος γίνεται με ενισχυμένο διαστρωτήρα και η συμπύκνωση αυτού με στατικό οδοστρωτήρα 4-10 τόνων. Βαρύτεροι οδοστρωτήρες δε χρησιμοποιούνται διότι θα θρυμματίσουν τα αδρανή. Μία έως τρεις διελεύσεις είναι αρκετές για επαρκή συμπύκνωση. Πάνω στη διαστρωμένη επιφάνεια δεν επιτρέπεται να κυκλοφορεί κανένα όχημα εκτός εάν διαστρωθεί και η ισοπεδωτική στρώση.

Η παραπάνω τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στα άοπλα όσο και στα οπλισμένα οδοστρώματα από σκυρόδεμα.

#### 3.14.2. Διάσπαση και βύθιση

Η διάσπαση της πλάκας και η βύθιση των τεμαχίων με πολύ βαρύ συρόμενο οδοστρωτήρα είναι σχετικά παλαιά τεχνική η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο στα οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα. Η τεχνική απαιτεί ειδικό μηχάνημα για τη θραύση των πλακών, όπως υδραυλική ή αέρος σφύρα ή πίπτουσα σφύρα, και πολύ βαρύ συρόμενο μεταλλικό οδοστρωτήρα (50 τόνων). Εάν υπάρχει καμιά παλαιά ασφαλτική επίστρωση θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν την έναρξη της θραύσης.

Κατά την τεχνική αυτή δεν απαιτείται σπάσιμο όλων των πλακών αλλά μόνο αυτών που έχουν χάσει την έδρασή τους πάνω στην υπόβαση, κυρίως λόγω άντλησης των λεπτόκοκκων υλικών. Ο εντοπισμός της πλάκας που πρόκειται να σπαστεί γίνεται με τη διέλευση του βαρίου οδοστρωτήρα. Όποια πλάκα μετακινείται κατά τη διέλευση του σημειώνεται και θραύεται.

Τα τεμάχια που προκύπτουν κυλινδρώνονται καλά (συνήθως 2-3 διελεύσεις) έτσι ώστε να βυθισθούν και να σταθεροποιηθούν μέσα στην υπόβαση. Μετά το πέρας των εργασιών και πριν τη διάστρωση της ασφαλτικής επίστρωσης, η επιφάνεια ψεκάζεται με επαρκή ποσότητα γαλακτώματος και κατόπιν διαστρώνεται ισοπεδωτική στρώση. Η επίστρωση μπορεί να είναι και από σκυρόδεμα (οπλισμένο με συνεχή

οπλισμό είναι πιο τεχνοοικονομικό). Και στην περίπτωση αυτή απαιτείται ισοπεδωτική στρώση.

### 3.15. **Ολισθηρότητα επιφανείας**

Η ολισθηρότητα της επιφάνειας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη λείανση των αδρανών (χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων). Η αντιμετώπιση και η αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας γίνεται α) με τη δημιουργία αυλακώσεων, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αυτοκινούμενους κόφτες, β) με τη χρήση ειδικών χημικών ουσιών οι οποίες μετά τη χημική αντίδραση με τα υλικά της επιφανείας δημιουργούν μια ικανοποιητική υφή και γ) με μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα εύκαμπτα οδοστρώματα.

Η πρώτη μέθοδος είναι αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα και προϋποθέτει άριστη κατάσταση επιφάνειας, ελεύθερη από κάθε άλλου είδους φθορά. Η δεύτερη είναι αρκετά ακριβή αλλά και μη φιλική προς το περιβάλλον, διότι τα χημικά που χρησιμοποιούνται μολύνουν το υπέδαφος της περιοχής.

Η εφαρμογή μιας από τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν για την αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, προϋποθέτει συντήρηση των αρμών (αν χρειασθεί). Η πλέον αποτελεσματική και οικονομική λύση για την αποκατάσταση της αντιολισθηρότητας είναι η διάστρωση ψυχρού λεπτοτάπητα ή ασφαλικών επαλείψεων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οποιαδήποτε μέθοδος με ασφαλτόμιγμα, γενικότερα, και αν χρησιμοποιηθεί, αργά ή γρήγορα, αναμένεται να εμφανισθούν μικροροίγμές στα σημεία ύπαρξης αρμών.

### 3.16. **Ασφαλικές επαλείψεις (Surface dressing)**

Η ασφαλική επάλειψη ή επιφανειακή επάλειψη ή surface dressing. όπως είναι γνωστή διεθνώς, είναι μία από τις παλαιότερες μεθόδους συντήρησης των οδοστρωμάτων. Εφαρμόζεται ευρέως σε πολλές χώρες για την αποκατάσταση της αντιολισθηρής ικανότητας της επιφάνειας, τη σφράγιση αυτής από την καταστρεπτική επίδραση του ύδατος και την αναχαίτιση της αποσύνθεσης του οδοστρώματος, θα πρέπει να τονισθεί ότι, η ασφαλική επάλειψη δεν μπορεί να αποκαταστήσει την επιπεδότητα της οδού ή να συμβάλλει στη δομική ενίσχυση του οδοστρώματος.



Η τυπική τεχνική της ασφαλτικής επάλειψης συνίσταται στον ψεκάσμο της υφιστάμενης επιφάνειας με συνδετικό υλικό και στην άμεση επικάλυψη της ψεκασμένης επιφάνειας με θραυστό μονόκοκκο αδρανές. Το ασφαλτικό υλικό μπορεί να είναι: κοινή άσφαλτος (σε ορισμένες χώρες χρησιμοποιείται εναλλακτικά και μίγμα ασφάλτου και πίσσας), ασφαλτικό γαλάκτωμα με κοινή άσφαλτο, τροποποιημένη άσφαλτος, ή ασφαλτικό γαλάκτωμα με τροποποιημένη άσφαλτο.

Αρχικά, τα πεδία εφαρμογής της μεθόδου αυτής ήταν δρόμοι με μικρή και μέση κυκλοφορία. Σήμερα, με τη βελτίωση των συνδετικών υλικών, οι ασφαλτικές επαλείψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις κατηγορίες των οδών που έχουν κατασκευασθεί από εύκαμπτα ή δύσκαμπτα οδοστρώματα. Στην Ελλάδα, παρόλο που σαν τεχνική προδιαγράφηκε από το 1966 με την Πρότυπη Τεχνική Προδιαγραφή (ΠΤΠ) Α222(17), δεν έχει τύχει ευρείας εφαρμογής μέχρι σήμερα. Τα όσα θα αναφερθούν παρακάτω για τις ασφαλτικές επαλείψεις δεν αναφέρονται στις προαναφερθείσες προδιαγραφές, λόγω του γεγονότος ότι πολλές αλλαγές έχουν επέλθει από τότε μέχρι σήμερα στην τεχνική αυτή. Ως εκ τούτου η αναφορά στις μη αναθεωρημένες Ελληνικές προδιαγραφές μόνο σύγχυση και αστοχίες κατά την κατασκευή μπορεί να επιφέρει. Η περιγραφή των ασφαλτικών επαλείψεων που ακολουθεί, βασίζεται σε πρόσφατη διεθνή πρακτική και κατά κύριο λόγο στη νεώτερη Βρετανική προδιαγραφή RN 39, που κατά τον συγγραφέα θεωρείται η πληρέστερη.

### 3.16.1. Τύποι ασφαλτικών επαλείψεων

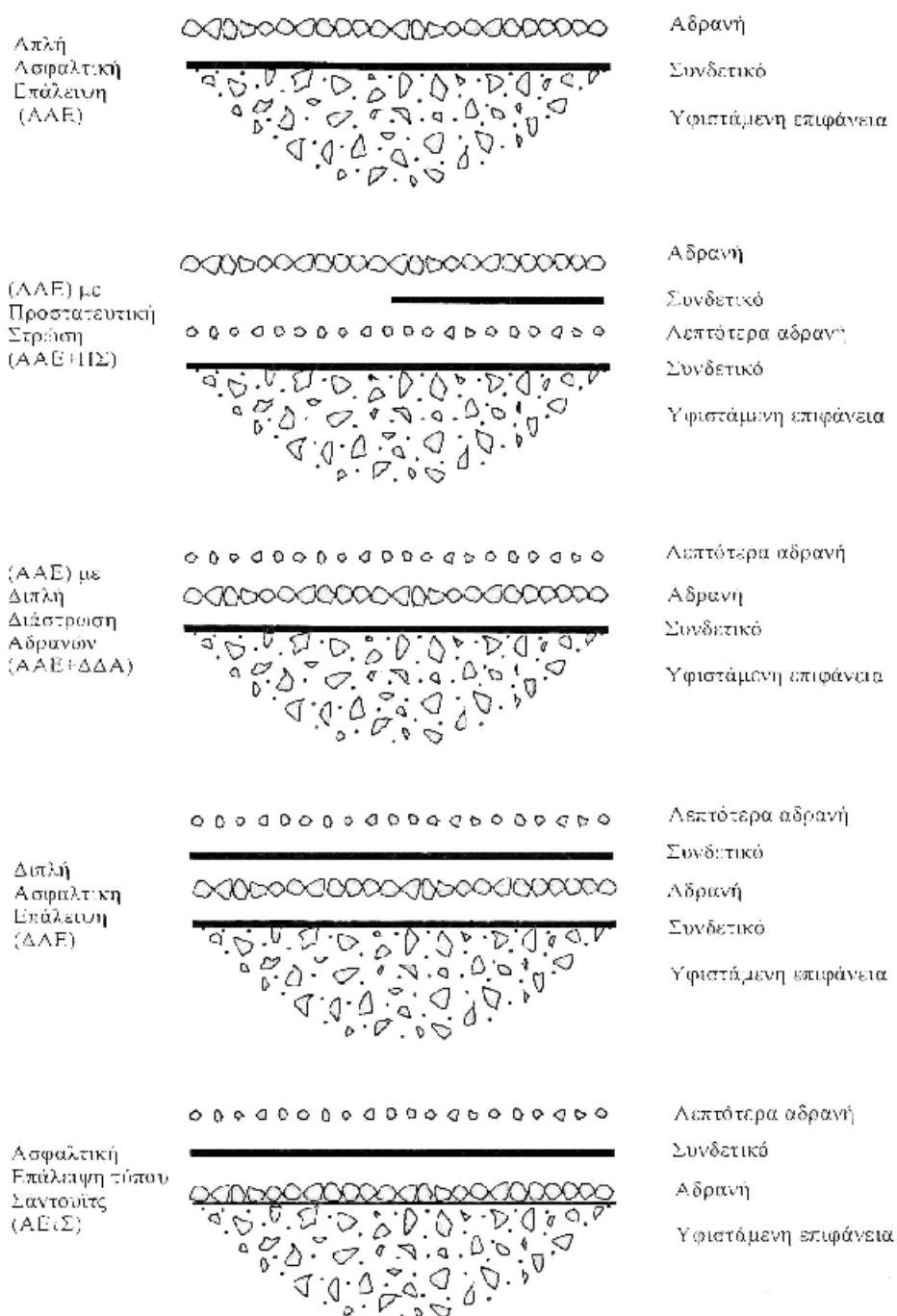
Οι τύποι των ασφαλτικών επαλείψεων, όπως διακρίνονται διεθνώς, είναι πέντε και περιγράφονται παρακάτω. Σχηματικά οι πέντε διαφορετικοί τύποι επεξηγούνται στο Σχήμα 3.4.

#### **Απλή ασφαλτική επάλειψη (ΛΑΕ)**

Είναι ο θεμελιώδης τύπος, ο απλούστερος στην κατασκευή, χρησιμοποιεί τις μικρότερες ποσότητες συνδετικού υλικού και αδρανών και είναι ο πλέον κατάλληλος τύπος για μη κύριες οδούς, εκτός εάν χρησιμοποιηθεί ασφαλτικό συνδετικό υλικό με εποξειδική ρητίνη και τεχνητά αδρανή (όπως πε-φρυγμένος βωξίτης).

Σε θέσεις με υψηλό κίνδυνο ατυχημάτων, όπου ταυτόχρονα αναπτύσσονται και μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις λόγω πέδησης (διασταυρώσεις σε αστικές και υπεραστικές οδούς, κατάστρωμα γεφυρών εντός αστικών περιοχών κλπ.), σε αρκετές χώρες

χρησιμοποιείται απλή ασφαλτική επάλειψη με ασφαλτούχο συνδετικό υλικό εποξειδικής ρητίνης και πολύ σκληρά τεχνητά αδρανή, όπως πεφρυγμένος βωξίτης. Το σύστημα αυτό παρέχει πολύ υψηλή και μακράς διάρκειας αντίσταση στην ολίσθηση, πλην όμως είναι κατά πολύ ακριβότερο από όλους τους άλλους τύπους των ασφαλτικών επαλείψεων.



**Σχήμα 3.4.: Τύποι ασφαλτικών επαλείψεων**

### **Απλή ασφαλική επάλειψη με προστατευτική στρώση (ΑΑΕ+ΠΣ)**

Στον τύπο αυτό η απλή ασφαλική επάλειψη εφαρμόζεται αφού προηγουμένως διαστρωθεί άλλη ασφαλική επάλειψη με λεπτότερα αδρανή. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε σκληρές επιφάνειες όπως σκυρόδεμα ή ασφαλτόμιγμα του οποίου ή ασφαλτος έχει οξειδωθεί ή περιέχει μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών. Η πρώτη λεπτή επίστρωση λειτουργεί ως στρώση υποδοχής και προστασίας της ασφαλικής επάλειψης.

### **Απλή ασφαλική επάλειψη με διπλή διάστρωση αδρανών (ΑΑΕ+ΔΔΑ)**

Στον τύπο αυτό το 90% περίπου των αδρανών που χρησιμοποιούνται στην ΑΑΕ διαστρώνεται ως ασφαλική επάλειψη και τα κενά που αφήνονται γεμίζουν με μια δεύτερη διάστρωση λεπτότερων αδρανών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερο μηχανικό «κλείδωμα» των αδρανών και έτσι λαμβάνεται πολύ πιο σταθερή δομή. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε θέσεις όπου ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι μεγάλος και αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες.

### **Διπλή ασφαλική επάλειψη (ΑΑΕ)**

Η διπλή ασφαλική επάλειψη έχει δύο στρώσεις αδρανών, όπως και ο προηγούμενος τύπος, πλην όμως, πριν τη διάστρωση της δεύτερης στρώσης ψεκάζεται νέα ποσότητα συνδετικού υλικού. Έτσι, τα κενά μεταξύ των αδρανών της πρώτης στρώσης πληρούνται με συνδετικό υλικό. Ο τύπος αυτός είναι κατάλληλος για επιφάνειες που είναι «ισχνές» σε ασφαλτο. Το βάθος υφής που επιτυγχάνεται είναι κατά κανόνα μικρότερο αυτού που επιτυγχάνεται με τον τύπο (ΑΑΕ+ΔΔΑ).

### **Ασφαλική επάλειψη τύπου σάντουιτς (ΑΕτΣ)**

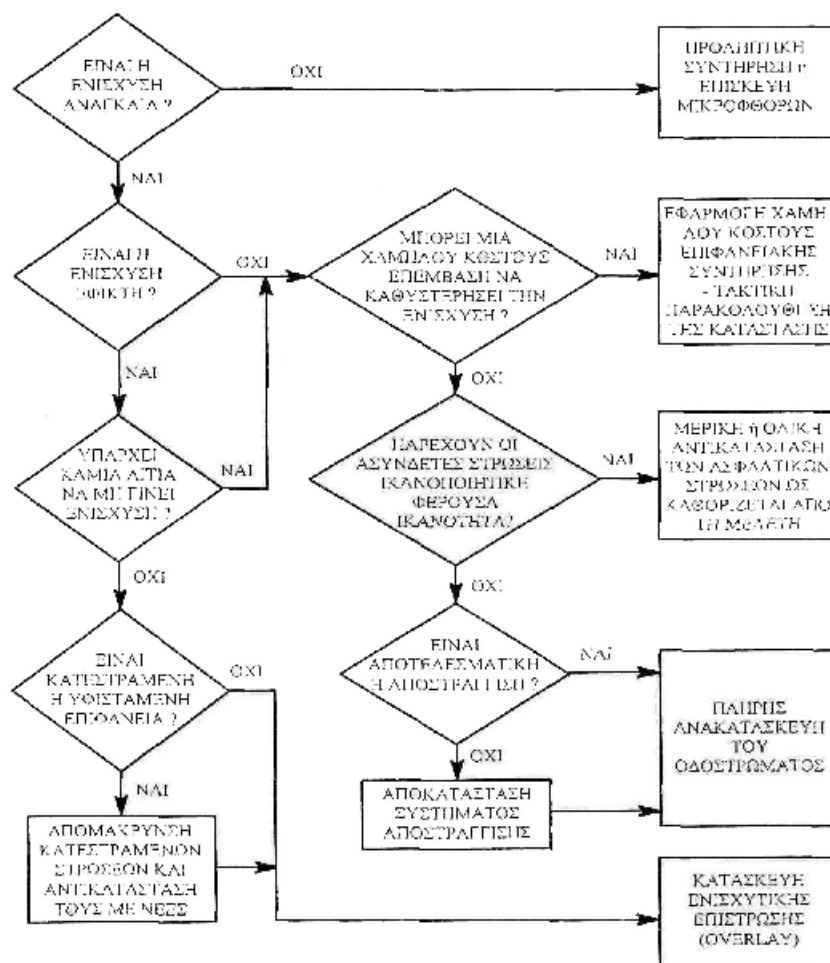
Στην περίπτωση αυτή, επί της επιφάνειας του οδοστρώματος διαστρώνεται πρώτα μια στρώση χονδρόκοκκων αδρανών, επ' αυτών ψεκάζεται το συνδετικό υλικό και επί της ψεκασθείσης επιφάνειας διαστρώνεται νέα στρώση λεπτόκοκκων αδρανών. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται σε θέσεις όπου η επιφάνεια είναι πλούσια σε ασφαλτο.

## **3.17. Ενίσχυση οδοστρωμάτων**

Κατά την αποκατάσταση των οδοστρωμάτων συνιστάται όπως πάντοτε διερευνάται η περίπτωση παράλληλης ενίσχυσης του οδοστρώματος. Το πάχος της πρόσθετης στρώσης για ενίσχυση του οδοστρώματος δεν είναι τυχαίο αλλά καθορίζεται μετά από εξέταση της υφιστάμενης δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Μια

ορθολογική αντιμετώπιση του προβλήματος ενίσχυσης του οδοστρώματος, κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές, δίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 3.7.

Για τον υπολογισμό του πάχους της απαιτούμενης ενισχυτικής επίστρωσης (overlay) χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι οι περισσότερες των οποίων βασίζονται στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τα μηχανήματα αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται διεθνώς και θα αναπτυχθούν στο παρόν κεφάλαιο, για τον υπολογισμό του πάχους της ενισχυτικής ασφαλικής στρώσης επί ευκάμπτων ή μικτών ευκάμπτων οδοστρωμάτων, είναι η μέθοδος των βυθίσεων και η μέθοδος του ισοδυνάμου πάχους. Βεβαίως ο υπολογισμός του πάχους της ενισχυτικής ασφαλικής στρώσης μπορεί να γίνει και με αναλυτικές μεθόδους, όπως κατά τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων με αναλυτικές μεθόδους, βασιζόμενοι στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το Falling Weight Deflectometer.



### **Σχήμα 3.7.: Ορθολογική επιλογή ενίσχυσης οδοστρώματος**

Για τον υπολογισμό της ενισχυτικής επίστρωσης επί δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η οποία μπορεί να είναι είτε από σκυρόδεμα είτε από ασφαλτόμιγμα, θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία που προτείνεται από τις νεώτερες Βρετανικές προδιαγραφές και το Asphalt Institute, αντίστοιχα.

Σε όλες τις περιπτώσεις, συνιστάται όπως το ελάχιστο πάχος της ενισχυτικής ασφαλικής επίστρωσης επί ευκάμπτων οδοστρωμάτων είναι 40mm, ενώ επί δύσκαμπτων οδοστρωμάτων 100mm.

### **3.18. Υπολογισμός πάχους ενισχυτικής ασφαλικής επίστρωσης επί ευκάμπτων οδοστρωμάτων**

#### **3.18.1. Μέθοδος των βυθίσεων**

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου των βυθίσεων είναι ότι η δομική κατάσταση του οδοστρώματος αξιολογείται αντικειμενικότερα σε σύγκριση με τη μέθοδο του ισοδύναμου πάχους. Η μεθοδολογία των βυθίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Οι δύο μέθοδοι που περιγράφονται παρακάτω βασίζονται σε μετρήσεις βυθίσεων με τη δοκό Benkelman.

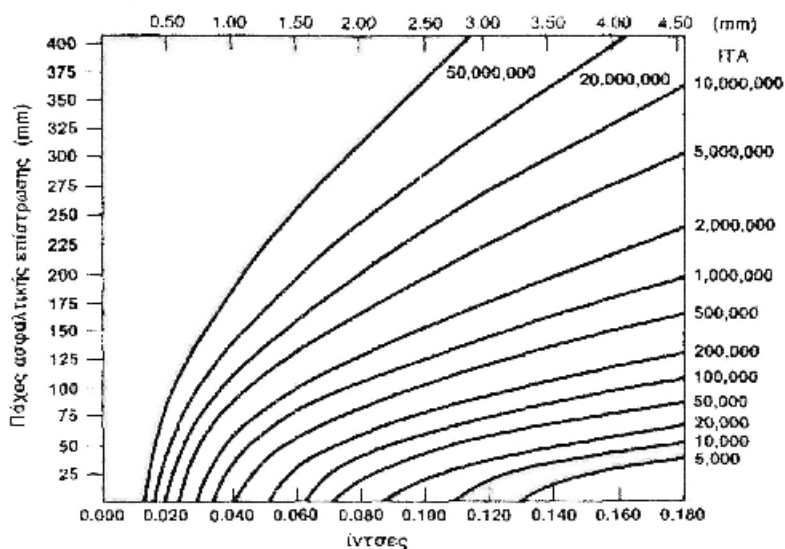
#### **(α) Μέθοδος του Asphalt Institute**

Για τον υπολογισμό του πάχους της ενισχυτικής ασφαλικής επίστρωσης ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- i.** Μετράται, με τη βοήθεια της δοκού Benkelman, η ανακλώμενη βύθιση και κατόπιν μετά από τις σχετικές διορθώσεις, καθορίζεται η αντιπροσωπευτική τιμή αυτής.
- ii.** Εκτιμάται ο συνολικός αριθμός των Ισοδυνάμων Τυπικών Αξόνων (ITA) που θα κυκλοφορήσουν επί του νέου οδοστρώματος με την ενισχυτική επίστρωση.
- iii.** Με βάση τα παραπάνω δύο δεδομένα, το απαιτούμενο πάχος της ενισχυτικής επίστρωσης καθορίζεται από τις καμπύλες του σχήματος 3.8.

Η ενισχυτική στρώση κατασκευάζεται από ασφαλικό σκυρόδεμα. Πριν την κατασκευή της θα πρέπει να επιδιορθώνονται όλες οι τυχόν επιφανειακές φθορές, όπως λακκούβες, φαγάματα, ρηγματώσεις, καθιζήσεις κλπ. Σε αντίθετη περίπτωση, η

διάρκεια ζωής του νέου οδοστρώματος θα είναι μικρότερη από την αναμενόμενη. Επίσης, πριν τη διάστρωση θα πρέπει να ελέγχονται και να επιδιορθώνονται και οι εγκάρσιες κλίσεις του οδοστρώματος έτσι ώστε να υπάρξει βελτιστοποίηση της κατασκευής. Βελτίωση των κλίσεων και πλήρωση των επιφανειακών φθορών γίνεται με τη διάστρωση ισοπεδωτικής στρώσης, αφού προηγουμένως ψεκασθεί επί της παλαιάς επιφάνειας συγκολλητική επάλειψη με κατιονικό γαλάκτωμα. Η παραπάνω προεργασία της παλαιάς επιφάνειας ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευής ενισχυτικής επίστρωσης.



**Σχήμα 3.8.: Υπολογισμός ενισχυτικής ασφαλτικής επίστρωσης κατά Asphalt Institute**

### 3.18.2. Μέθοδος των ισοδύναμου πάχους

Η μέθοδος του ισοδύναμου πάχους έχει προταθεί, και αυτή, από το Asphalt Institute ως εναλλακτική μέθοδος στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της δοκού Benkelman. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά υποκειμενική δεδομένου ότι η αξιολόγηση ή καλύτερα η εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος γίνεται με οπτική επισκόπηση αυτού από έμπειρους μηχανικούς.

Η μέθοδος βασίζεται στη μετατροπή του υφιστάμενου οδοστρώματος, με όλες τις πιθανές φθορές, σε «ισοδύναμο» οδόστρωμα, του οποίου όλες οι στρώσεις είναι από ασφαλτικό σκυρόδεμα (οδόστρωμα «ολικού» πάχους). Το πάχος του ισοδύναμου οδοστρώματος θα είναι οπωσδήποτε μικρότερο του αντίστοιχου αρχικού λόγω της

βασικής αρχής ότι: κάθε νέο οδόστρωμα από τη στιγμή που δίνεται στην κυκλοφορία αρχίζει να παραλαμβάνει αξονικά φορτία σε βάρος της δομικής του κατάστασης, που στην παρούσα περίπτωση εκφράζεται με μείωση του ενεργού πάχους αυτού.

Για τη μετατροπή του υφιστάμενου οδοστρώματος σε ισοδύναμο οδόστρωμα χρησιμοποιούνται συντελεστές ισοδυναμίας που συσχετίζονται με τη δομική κατάσταση της κάθε στρώσης. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Για τον υπολογισμό του πάχους της πρόσθετης επίστρωσης υπολογίζεται: (α) το ισοδύναμο πάχος του υπάρχοντος οδοστρώματος ( $T_E$ ) και (β) το πάχος του «ολικού» οδοστρώματος ( $T_N$ ) σε να επρόκειτο για καινούργια κατασκευή  $\tau$  οποία θα παραλάβει την επιπλέον κυκλοφορία, σε ισοδύναμους τυπικούς άξονες (ITA). Κατόπιν τούτου το πάχος της ενισχυτικής επίστρωσης ( $T_O$ ) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_O = T_N - T_E \quad (3.1)$$

Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους του οδοστρώματος πρέπει να είναι γνωστή η κατάσταση της κάθε στρώσης, καθώς και το πάχος και το είδος των υλικών της κάθε στρώσης. Η κατάσταση της κάθε στρώσης, αφού εκτιμηθεί, αντιπροσωπεύεται με ένα συντελεστή μετατροπής ή ισοδυναμίας ( $c$ ). Ο συντελεστής αυτός, ένας για κάθε στρώση, πολλαπλασιαζόμενος με το πάχος της στρώσης ( $T$ ) δίνει το ισοδύναμο πάχος της στρώσης ( $T_{Ei}$ ). Το αλγεβρικό άθροισμα των ισοδυνάμων παχών των στρώσεων δίνει το ισοδύναμο πάχος του οδοστρώματος ( $T_E$ ). Έτσι,

$$T_E = \sum T_{Ei} = \sum (cT_i) \quad (3.2)$$

Οι συντελεστές ισοδυναμίας δίνονται στον πίνακα 3.12. Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.12 η εκτίμηση των συντελεστών εμπεριέχει κάποιο βαθμό υποκειμενικότητας. Πλην όμως, η μέχρι τώρα χρήση αυτών σε άλλες χώρες έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για τον υπολογισμό του πάχους του «ολικού» οδοστρώματος είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η ποιότητα του εδάφους έδρασης και οπωσδήποτε ο αναμενόμενος κυκλοφοριακός φόρτος, σε συνολικό αριθμό ισοδυνάμων αξόνων.

**Πίνακας 3.12.: Συντελεστές ισοδυναμίας για μετατροπή στρώσεων σε ισοδύναμο οδόστρωμα**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ - ΣΤΡΩΣΕΩΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ
I	α) Φυσικά εδάφη όλων των κατηγοριών β) Βελτιωμένο υπέδαφος από κοκκώδη υλικά με Δείκτη Πλαστικότητας (P.I.) $\leq 10$ γ) Υπέδαφος τροποποιημένο με άσβεστο, υλικά με P.I. $> 10$	0.0
II	Κοκκώδης υπόβαση ή βάση από διαβαθμισμένα αδρανή, με ορισμένη πλαστικότητα και CBR $> 20$ . Χρησιμοποιείται η ανώτατη τιμή αν P.I. $\leq 6$ και η κατώτατη τιμή της περιοχής αν P.I. $> 6$	0.1-0.2
III	Υπόβαση ή βάση σταθεροποιημένη με τσιμέντο ή υπτάμενη τέφρα κατασκευασμένη από υλικά με P.I. $\leq 10$	0.2-0.3
IV	α) Τάπητες και βάσεις από ψυχρά ασφαλτομίγματα ή μίγματα από διαλύματα που εμφανίζουν πολλές ρηγματώσεις αποσαθρώσεις, έντονες αυλακώσεις και μειωμένη ευστάθεια. β) Δύσκαμπτα οδοστρώματα που έχουν θρυμματισθεί σε μικρά κομμάτια με μέγιστη διάσταση $\leq 0.6m$ . Χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη τιμή όταν υπάρχει υπόβαση και η μικρότερη όταν δεν υπάρχει γ) Βάσεις από ισχνό σκυρόδεμα ή άσβεστο ή υπτάμενη τέφρα που έχουν ρηγματωθεί. Χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή όταν οι ρωγμές είναι πολύ μικρές και η ελάχιστη όταν οι ρωγμές είναι μεγάλες ή υπάρχουν ενδείξεις αστάθειας της στρώσης	0.3-0.5
V	α) Θρυμματισμένη πλάκα β) Ρηγματωμένη πλάκα με τεχνική "διάσπασης και βύθισης" (Όταν υπάρχει μη σταθεροποιημένη βάση χρησιμοποιείται η μικρότερη τιμή ενώ όταν υπάρχει χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη)	0.4-0.7 0.5-0.7
VI	α) Τάπητες και βάσεις από ασφαλτικό σκυρόδεμα που παρουσιάζουν πολλές ρηγματώσεις και φθορές β) Τάπητες και βάσεις από ψυχρό ασφαλ/μα που παρουσιάζουν λίγες ρηγματώσεις, αποσαθρώσεις και παραμορφώσεις και έχουν καλή ευστάθεια γ) Δύσκαμπτο οδόστρωμα με ρωγμές που δεν μπορούν να συντηρηθούν αποτελεσματικά με πλήρωση και με θραυσμένα τμήματα του ενός έως τεσσάρων τετραγ. μέτρων (ή βάση από σκυρόδεμα κάτω από ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας)	0.5-0.7
VII	α) Τάπητες και βάσεις από θερμό ασφαλ/μα με πολύ λίγες ρηγματώσεις και φθορές β) Τάπητες και βάσεις από ψυχρό ασφαλ/μα δίχως ρηγματώσεις ή άλλες φθορές με ελάχιστη παραμόρφωση στους τροχούς γ) Δύσκαμπτο οδόστρωμα με ρωγμές που έχουν πληρωθεί και ορισμένες ρηγματώσεις που δε σχηματίζουν ρηγματωμένα κομμάτια μικρότερα του ενός τετραγ. μέτρου (ή βάση από σκυρόδεμα κάτω από ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας)	0.7-0.9
VIII	α) Τάπητες και βάσεις από θερμό ασφαλ/μα δίχως ρηγματώσεις, σε καλή γενικά κατάσταση αλλά με μικρή παραμόρφωση στις τροχιές των τροχών β) Βάση από σκυρόδεμα, κάτω από ασφαλοτάπητα σε καλή σχετική κατάσταση εκτός από λίγες ρηγματώσεις που εμφανίζονται σαν ανακλώμενες ρωγμές	0.9-1.0

Η ποιότητα του εδάφους έδρασης θα πρέπει να μετρηθεί κατά τη διάρκεια της μελέτης υπολογισμού της πρόσθετης στρώσης. Τα στοιχεία που πιθανόν να υπάρχουν από το αρχικό στάδιο της μελέτης δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται, αν δεν είναι βέβαιο ότι οι συνθήκες του υπεδάφους δεν έχουν αλλάξει. Η αντιπροσωπευτική τιμή της ποιότητας του υπεδάφους εκφράζεται με το μέτρο επανάκτησης (Mr). Εναλλακτικά, αν είναι αδύνατη η μέτρηση ενός των παραπάνω μεγεθών, τα εδάφη μπορούν να



ταξινομηθούν, για τις ανάγκες της παρούσας μεθοδολογίας, σε τρεις κατηγορίες: Κακό, Μέτριο και Καλό.

Κακό έδαφος χαρακτηρίζεται αυτό που γίνεται μαλακό και πλαστικό όταν υγρανθεί. Περιλαμβάνει δηλαδή τα εδάφη που έχουν αρκετή ποσότητα αργίλου και ιλύος. Σαν αντιπροσωπευτικές τιμές μπορούν να ληφθούν οι  $M_r=30$  MPa ή  $CBR=3$ .

Μέτριο έδαφος χαρακτηρίζεται αυτό που έχει κάποια σκληρότητα όταν υγρανθεί. Περιλαμβάνει δηλαδή εδάφη με ιλύ και άμμο, ή/και αμμοχάλικο με μικρή ποσότητα αργίλου και ιλύος. Σαν αντιπροσωπευτικές τιμές μπορούν να ληφθούν οι  $M_r=80$  MPa ή  $CBR=8$ .

Καλό έδαφος χαρακτηρίζεται αυτό που διατηρεί κατά ένα μεγάλο ποσοστό τη φέρουσα ικανότητα του όταν υγρανθεί. Εδώ περιλαμβάνονται το καθαρό αμμοχάλικο, η καθαρή άμμος και όλα τα διαβαθμισμένα φυσικά υλικά ελεύθερα από κατάλοιπα αργίλου ή ιλύος. Σαν αντιπροσωπευτικές τιμές μπορούν να ληφθούν οι  $M_r=170$  MPa ή  $CBR=17$ .

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, ανεξάρτητα με τον υπολογισμό του πάχους της ενισχυτικής επίστρωσης, με τη μέθοδο αυτή μπορεί επίσης να υπολογισθεί και ο εναπομένον αριθμός ισοδυνάμων αξόνων. Αυτό επιτυγχάνεται από την αντίστοιχη καμπύλη του πάχους και με την τιμή  $M_r$  βρίσκεται ο αριθμός των ΙΤΑ που μπορεί να παραλάβει το οδόστρωμα εάν δε γίνει καμία ενίσχυση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι χρήσιμο για να αποφασισθεί εάν το οδόστρωμα χρειάζεται ή πότε θα χρειασθεί ενίσχυση. Βεβαίως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως και άλλοι μέθοδοι που ξεφεύγουν από το θέμα της παρούσης.

### **3.19. Υπολογισμός πάχους ενισχυτικής ασφαλτικής επίστρωσης επί δύσκαμπτου οδοστρώματος**

Η ασφαλτική επίστρωση που πολλές φορές διαστρώνεται πάνω σε φθαρμένα δύσκαμπτα οδοστρώματα ενέχει την έννοια της συντήρησης αυτού προς αποκατάσταση της ποιότητας οδήγησης και όχι τόσο την έννοια της ενίσχυσης αυτού, όπως αντιμετωπίστηκε στα εύκαμπτα οδοστρώματα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, για να αποφασισθεί ασφαλτική επίστρωση επί δύσκαμπτου οδοστρώματος, οι φθορές της υφιστάμενης επιφάνειας θα πρέπει να είναι περιορισμένες. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν υπάρχει εκτεταμένη και έντονη ρηγμάτωση και θραύση ή/και αποκόλληση των πλακών, με έντονες διαφορικές καθιζήσεις και φθορά των ακμών των αρμών, είναι

προτιμότερο να θραυστεί όλη η επιφάνεια με κατάλληλα μηχανήματα και κατόπιν να διαστρωθεί ο ασφαλικός τάπητας.

Κύριος σκοπός κατά τη διαστασιολόγηση της ασφαλικής επίστρωσης πάνω σε φθαρμένο δύσκαμπτο οδόστρωμα είναι να διασφαλισθεί ότι δε θα αναπτυχθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα ανακλαστικές ρωγμές. Οι ανακλαστικές ρωγμές αναπτύσσονται κυρίως λόγω διαφορικής καθίζησης των πλακών ή των ρηγματωμένων επιφανειών καθώς και λόγω των θερμοκρασιακών συστολο/διαστολών της υποκείμενης στρώσης σκυροδέματος.

Η διασφάλιση της μη ανάπτυξης πρόωρων ανακλαστικών ρηγματώσεων επιτυγχάνεται κυρίως με τη διάστρωση επαρκούς πάχους στρώσης. Βεβαίως και άλλα μέτρα συμβάλλουν και θα πρέπει να λαμβάνονται, πριν τη διάστρωση της ασφαλικής στρώσης, όπως: (α) τοπική συντήρηση των κατεστραμμένων επιφανειών, (β) κατασκευή στρώσης εκτόνωσης ρωγμών, (γ) διάσπαση και βύθιση των ρηγματωμένων πλακών, (δ) θρυμματισμός πλακών, και (ε) χρήση ασφαλτομιγμάτων με ελαστομερή άσφαλτο. Επίσης, στην περίπτωση κατά την οποία η ασφαλική επίστρωση πρόκειται να διαστρωθεί πάνω σε δύσκαμπτο οδόστρωμα με αρμούς, η δημιουργία αρμών στην ασφαλική στρώση στις θέσεις που προϋπήρχαν οι αρμοί υποβοηθά στη μη ανάπτυξη πρόωρων ρωγμών ανάκλασης. Η δημιουργία αρμών γίνεται με κόφτη μετά τη διάστρωση του τάπητα. Οι αρμοί πληρούνται με ειδικό ελαστομερές υλικό πλήρωσης αρμών, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, μετά την πιθανή τοπική συντήρηση και πριν τη διάστρωση του ασφαλτοτάπητα, η παλαιά επιφάνεια του σκυροδέματος θα πρέπει να καθαρίζεται και να ψεκάζεται με επαρκή ποσότητα συγκολλητικής στρώσης.

Οι μέθοδοι που θα αναπτυχθούν για τον υπολογισμό του πάχους της ασφαλικής επίστρωσης πάνω σε δύσκαμπτο οδόστρωμα είναι κυρίως αυτές που προτείνονται από το Asphalt Institute, και βασίζονται στη μέθοδο των βυθίσεων και τη μέθοδο του ισοδυνάμου πάχους.

### 3.19.1. Μέθοδος των βυθίσεων κατά Asphalt Institute

Οι μετρήσεις των βυθίσεων γίνονται και πάλι με τη δοκό Benkelman, ή άλλων οργάνων που μετρούν βύθιση, πλην όμως αυτές εκτελούνται πλησίον και εκατέρωθεν των αρμών ή επί των ρηγματωμένων επιφανειών.

Κατά τη διαστασιολόγηση της ασφαλικής επίστρωσης, εξετάζεται η διαφορική βύθιση μεταξύ των πλακών, η οποία δε θα πρέπει να υπερβαίνει κάποια οριακή τιμή. Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνονται μέτρα μείωσης της διαφορικής καθίζησης που συνήθως συνίστανται στη σταθεροποίηση των πλακών (μετά ή άνευ τοπικού θρυμματισμού) ή πλήρωση του κενού κάτω από τις πλάκες.

Ως διαφορική βύθιση ορίζεται η διαφορά των βυθίσεων ( $d_1$  και  $d_2$ ) που λαμβάνονται εκατέρωθεν του αρμού ή της κύριας ρηγματώσης. Στην περίπτωση των οδοστρωμάτων με εγκάρσιους αρμούς η μέγιστη επιτρεπτή διαφορική καθίζηση, μετρούμενη με τη δοκό Benkelman, είναι 0.05mm. Επίσης, η μέση βύθιση σε κάθε ακμή δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 0.36mm. Όταν οι μετρήσεις γίνονται με άλλα όργανα οι αντίστοιχες οριακές τιμές δίνονται στη βιβλιογραφία.

Στην περίπτωση των οπλισμένων οδοστρωμάτων με συνεχή οπλισμό μετράται η μέγιστη βύθιση στη ρηγματωμένη περιοχή, η οποία δε θα πρέπει να υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή των 0.27 mm, μετρούμενη με τη δοκό Benkelman.

Εφ' όσον ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις, το πάχος της ασφαλικής επίστρωσης υπολογίζεται συναρτήσει του μήκους της πλάκας και της διαφοράς θερμοκρασίας της περιοχής, μεταξύ της μέσης μέγιστης και της μέσης ελάχιστης ημερήσιας τιμής του θερμότερου και του ψυχρότερου μήνα, χρησιμοποιώντας τον πίνακα 3.13. Όταν το πάχος της ασφαλικής επίστρωσης που καθορίζεται είναι μεγάλο, μεγαλύτερο των 215-230mm, η ανύψωση της στάθμης του οδοστρώματος μπορεί να επιφέρει διάφορα προβλήματα όπως: εξομάλυνση κλίσεων, αναγκαία υπερύψωση πεζοδρομίων, συμβολή με άλλες οδούς κλπ. Στην περίπτωση αυτή συνιστάται όπως χρησιμοποιούνται δύο πρόσθετες εναλλακτικές λύσεις με σκοπό τη μείωση του πάχους της επίστρωσης. Οι εναλλακτικές αυτές είναι: (α) διάσπαση και βύθιση των ρηγματωμένων πλακών ή (β) θρυμματισμός των πλακών. Και στις δύο περιπτώσεις το συνολικό πάχος κυμαίνεται από 175 έως 225mm.

### 3.19.2. Μέθοδος του ισοδύναμου πάχους

Ο υπολογισμός του πάχους της ασφαλικής επίστρωσης επί δύσκαμπτου οδοστρώματος γίνεται κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην περίπτωση ασφαλικής επίστρωσης επί ευκάμπτου οδοστρώματος. Οι συντελεστές μετατροπής της

στρώσης σκυροδέματος σε οδόστρωμα ολικού πάχους συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα 3.12.

**Πίνακας 3.13.: Υπολογισμός πάχους ασφαλτικής επίστρωσης επί δύσκαμπτου οδοστρώματος**

Μήκος πλάκας (m)	100	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100	100
4.5	100	100	100	100	100	100
6	100	100	100	100	130	140
7.5	100	100	100	130	150	180
9	100	100	130	150	180	200
10.5	100	115	150	180	215	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)
12	100	140	180	200	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)
13.5	115	150	190	230	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)
15	130	180	215	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)
18	150	200	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)	Εναλλακτική λύση (α) ή (β)
	17	22	28	33	39	44

Διαφορά θερμοκρασίας (max-min), °C

### 3.20. Ενισχυτική επίστρωση σκυροδέματος πάνω σε δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα

Ενισχυτική επίστρωση σκυροδέματος πάνω σε δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα δεν είναι συνήθης πρακτική σε αρκετές χώρες. Παρά ταύτα οι τεχνικές που εφαρμόζονται είναι κατά βάση δύο: αυτής της κατασκευής στρώσης μικρού πάχους (50mm-100mm) και αυτής της κατασκευής στρώσης μεγάλου σχετικού πάχους (>150) (περισσότερο συνήθης).

Η πρώτη τεχνική προϋποθέτει, οπωσδήποτε, πολύ καλή σύνδεση (bonding) της νέας στρώσης και συνιστάται μόνο για δύσκαμπτα οδοστρώματα που βρίσκονται σε ικανοποιητική κατάσταση. Η δεύτερη τεχνική δεν έχει αυτή την απαίτηση και χρησιμοποιείται τόσο σε δύσκαμπτα όσο και σε εύκαμπτα οδοστρώματα των οποίων η

επιφάνεια παρουσιάζει αρκετές φθορές αλλά όχι σε σημείο που να απαιτείται ανακατασκευή.

Η καλή σύνδεση, στην περίπτωση κατασκευής λεπτής στρώσης σκυροδέματος, επιτυγχάνεται με επιμελή καθαρισμό της επιφάνειας, χρησιμοποιώντας αμμοβολή ή υπέρθερμο συμπιεσμένο αέρα και λίγο πριν τη διάστρωση (15 λεπτά περίπου) διαβροχή της επιφάνειας με νερό και επίταση αυτής με τσιμέντο. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ρητίνες ως γέφυρες πρόσφυσης μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος. Πριν γίνουν οι παραπάνω εργασίες όλες οι μικροφθορές θα πρέπει να επιδιορθώνονται, όπως και οι αρμοί θα πρέπει να καθαρίζονται σχολαστικά και να επαναπληρούνται με κατάλληλο ελαστομερές υλικό. Οι νέοι αρμοί (και το είδος αυτών) θα πρέπει να δημιουργούνται στις θέσεις που προϋπήρχαν οι παλαιοί αρμοί.

Στην περίπτωση κατασκευής μεγάλου πάχους στρώσης σκυροδέματος (πλάκας), κατά την οποία δεν απαιτείται σύνδεση της νέας στρώσης με την παλαιά επιφάνεια, ο περιορισμός της δημιουργίας νέων αρμών, εφ' όσον διαστρώνεται πάνω σε δύσκαμπτο οδόστρωμα, στις παλαιές θέσεις δεν υπάρχει. Ο μελετητής μπορεί να επιλέξει οποιοδήποτε τύπο σκυροδέματος (άοπλο ή οπλισμένο με συνεχή ή μη συνεχή οπλισμό). Η επιδιόρθωση όμως όλων των φθορών της επιφάνειας, ιδιαίτερα των κάθετων μετακινήσεων των πλακών στα σημεία των αρμών ή των ρωγμών, είναι επιβεβλημένη. Αρκετές φορές μάλιστα αποφασίζεται πλήρης τοπική ανακατασκευή πριν τη διάστρωση της πλάκας. Επίσης συνήθως τακτική είναι η διάστρωση ισοπεδωτικής στρώσης πριν την κατασκευή της πλάκας, για την επιδιόρθωση των επιφανειακών φθορών, κυρίως ανωμαλιών και αποκατάσταση κλίσεων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνική της κατασκευής σχετικά μεγάλου πάχους πλάκας είναι η περισσότερο συνήθης.

### **3.20.1. Διαστασιολόγηση επίστρωσης από σκυρόδεμα επί δύσκαμπτου οδοστρώματος σύμφωνα με τις Βρετανικές προδιαγραφές**

Η προτεινόμενη μεθοδολογία των Βρετανικών προδιαγραφών (HD30/99) για τη διαστασιολόγηση ενισχυτικής επίστρωσης από σκυρόδεμα επί δύσκαμπτων ή ευκάμπτων οδοστρωμάτων είναι η νεώτερη όλων των προταθέντων διεθνώς προδιαγραφών, που ομολογουμένως είναι πολύ λίγες σε αριθμό.

Κατά τη μέθοδο αυτή, είναι δυνατόν να διαστασιολογηθεί ενισχυτική επίστρωση σκυροδέματος όλων των τύπων, δηλαδή άοπλο (ΑΟ) ή οπλισμένο με συνεχή (ΟΣΟ) ή μη-συνεχή οπλισμό (ΟΜΣΟ) ή μικτό δύσκαμπτο με συνεχή οπλισμό

(ΜΔΣΟ), πάνω σε δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα. Η δυνατότητα εκλογής μαζί με τα συνιστώμενα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται δίνονται στον πίνακα 3.14.

**Πίνακας 3.14.: Επιλογή τύπου ενισχυτικής πλάκας επί ευκάμπτων ή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων**

Επί- στρωση	Υφιστάμενο οδόστρωμα			
	Εύκαμπτο ή μικτό εύκαμπτο	Άοπλο (ΑΟ) ή Οπλισμένο με μη- συνεχή οπλισμό (ΟΜΣΟ)	Οπλισμένο με συνεχή οπλισμό (ΟΣΟ)	Μικτό δύσκαμπτο με συνεχή οπλισμό (ΜΔΣΟ)
ΑΟ	2	3	1	2
ΟΜΣΟ	2	3	1	2
ΟΣΟ	1	4	1	1

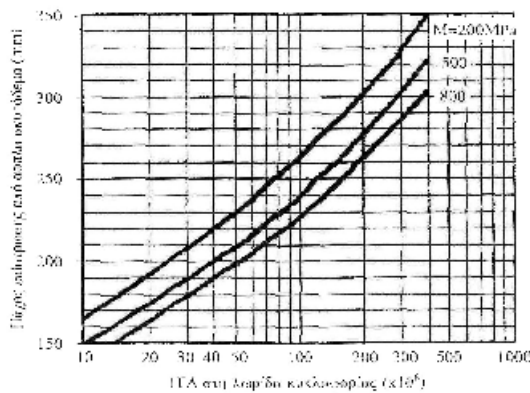
- 1= Καμία ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας δεν απαιτείται πλην των επιδιορθώσεων  
 2= Απαιτείται η χρήση διαχωριστικής μεμβράνης  
 3= Καμία ιδιαίτερη προετοιμασία της επιφάνειας δεν απαιτείται πλην των επιδιορθώσεων αλλά οι νέοι αρμοί να κατασκευάζονται στις ίδιες θέσεις με τους παλιούς  
 4= Δε συνιστάται

Ο καθορισμός του πάχους της πλάκας (σχετικά μεγάλου πάχους μόνο) γίνεται με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που δίνονται στα σχήματα 3.11, 3.12, 3.13 και 3.14. Για τον καθορισμό του πάχους είναι απαραίτητο να είναι γνωστό το Ισοδύναμο Μέτρο Επιφανειακής θεμελίωσης (ΙΜΕΘ),  $M$ , και φυσικά ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος σε ΙΤΑ που πρόκειται να κυκλοφορήσει επί της νέας επίστρωσης. Το αποτέλεσμα που λαμβάνεται στρογγυλοποιείται προς τα πάνω στα πλησιέστερα 10mm.

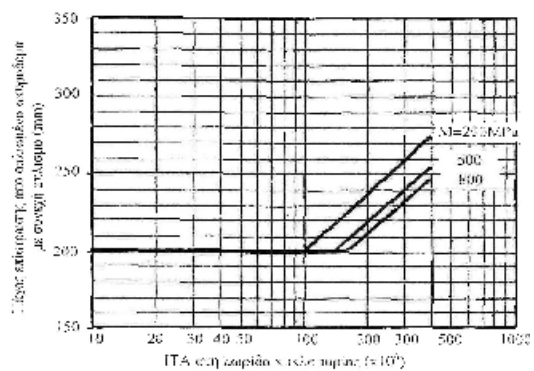
Το ισοδύναμο μέτρο επιφανειακής θεμελίωσης συσχετίζεται με την υπολειμματική αντοχή του παλαιού οδοστρώματος. Το μέτρο αυτό καθορίστηκε από το TRL(22) και ορίζεται ως: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που θα δώσει την ίδια βύθιση για το ίδιο φορτίο που εφαρμόζεται στο υφιστάμενο οδόστρωμα. Το μηχάνημα FWD είναι το πλέον κατάλληλο για τον καθορισμό της επιφανειακής βύθισης του οδοστρώματος, τόσο για δύσκαμπτα όσο και για εύκαμπτα οδοστρώματα. Με βάση το φορτίο και τη βύθιση που επήλθε, το ΙΜΕΘ μπορεί να καθορισθεί και στο εργαστήριο. Το μέτρο ελαστικότητας που καθορίζεται από το FWD είναι κατά κανόνα μεγαλύτερο από αυτό που καθορίζεται στο εργαστήριο και συνεπώς θα πρέπει να διορθώνεται κατάλληλα. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο καθορισμού του ΙΜΕΘ δίνονται στην προαναφερθείσα βιβλιογραφία.

### 3.21. Μέθοδος διαστασιολόγησης ενισχυτικών επιστρώσεων κατά AASHTO

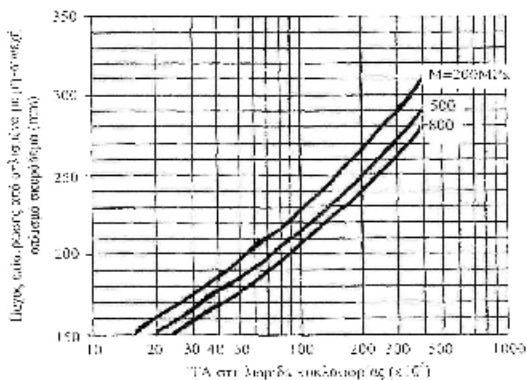
Η μέθοδος διαστασιολόγησης κάθε είδους ενισχυτικών στρώσεων (ασφαλτική ή από σκυρόδεμα) επί ευκάμπτων ή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων βασίζεται στις ίδιες σχεδιαστικές παραμέτρους όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση νέων οδοστρωμάτων. Λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου, απαιτείται εκτεταμένη περιγραφή η οποία είναι αδύνατον να συμπεριληφθεί στα πλαίσια αυτού του βιβλίου. Εάν ο αναγνώστης ήθελε να εφαρμόσει τη μέθοδο αυτή για τη διαστασιολόγηση ενισχυτικής επίστρωσης, συνιστάται να καταφύγει στη σχετική βιβλιογραφία.



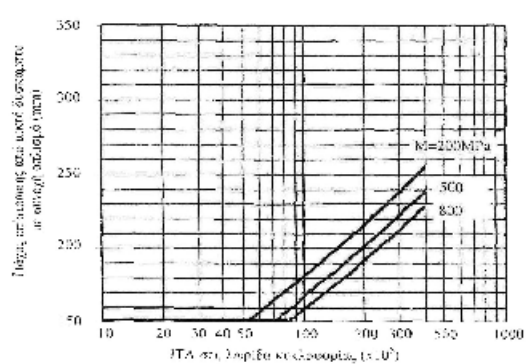
**Σχήμα 3.11.: Διαστασιολόγηση πάχους ενισχυτικής πλάκας από άοπλο σκυρόδεμα πάνω σε δύσκαμπτο ή ευκάμπτο οδόστρωμα**



**Σχήμα 3.12.: Διαστασιολόγηση πάχους ενισχυτικής πλάκας από οπλισμένο σκυρόδεμα με συνεχή οπλισμό σε δύσκαμπτο ή ευκάμπτο οδόστρωμα**



**Σχήμα 3.13.: Διαστασιολόγηση πάχους ενισχυτικής πλάκας από**



**Σχήμα 3.14.: Διαστασιολόγηση πάχους επίστρωσης από μίκτο δύσκαμπτο με**

**οπλισμένο σκυρόδεμα με μη συνεχή οπλισμό οδόστρωμα πάνω σε  
οπλισμό σε δύσκαμπτο ή εύκαμπτο δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα  
οδόστρωμα**



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993
2. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993
3. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993
4. Acum W.E. and Fox L., Computation of load stresses in a three -layer elastic system, Geotechnique, Vol.2(4), London, 1951
5. Ahlvin R.G. and Ulery H.H., Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space, Highway Research Bulletin 342, 1962
6. Asphalt Institute, Asphalt in pavement maintenance, Manual Series No. 16 (MS-16), March 1983 Edition, Lexington, USA
7. Asphalt Institute, Asphalt overlays for highway and street reha-bilitation, Manual Series No. 17 (MS-17), USA, Jan. 2000
8. Asphalt Institute, Computer - Assisted Asphalt Mix Analysis (CAMA), CP-6, Version 2.0, Lexington, USA, 1992
9. Asphalt Institute, The thickness Design, Asphalt pavements for highways & streets, Manual Series No.1 (MS-1), Lexington, USA, 1999
10. ASTM D 1190-97, Standard Specification for Concrete joint sealer, Hot-applied elastic type, 1998
11. ASTM D 1850-74 (1979), Standard specification for Concrete joint sealer, Cold-application type, 1989
12. ASTM D 1854-96, Standard specification for Jet-fuel-resistant concrete joint sealer, Hot-applied elastic type, 1998
13. ASTM D 2628-91 (1998), Standard Specification for Preformed polychloroprene joint seals for concrete pavements, 1998
14. ASTM D 3141-96, Standard specification for Asphalt for under-sealing Portland cement concrete pavements, 1998
15. ASTM D 3406-95, Standard Specifications for Joint Sealant, Hot Applied, Elastomeric-Type, for Portland Cement Concrete Pavements, 1998
16. ASTM D 3569-95, Standard Specifications for Joint Sealant, Hot Applied, Elastomeric, Jet-fuel Resistant-Type, for Portland Cement Concrete Pavements, 1998
17. Boussinesq J.V., Application des potentials a l'edude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques, Gauthier-Villars, Paris 1885
18. Brown S.F and Brunton J.M., An Introduction to the Analytical design of bituminous pavements, 3rd Edition, 1986
19. Brown S.F, An Introduction to the Analytical design of Bituminous Pavements, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1980

20. Brown S.F., Dawson A.R., Two-stage mechanistic approach to asphalt pavement design, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol.1, p. 16, Nottingham, 1992
21. Brown S.F., The Analytical Design of Bituminous Pavements, Nottingham University, 1980
22. BS 2499, Specification for hot applied joint sealants for concrete pavements, British Standards Institution, London, 1993
23. BS 2752, Specification for chloroprene rubber compounds, British Standard Institution, London, 1992
24. BS 5212, Cold applied joint sealant systems for concrete pavements, Part 1: Specifications for joint sealant, British Standard Institution, London, 1991
25. BS 63, Road aggregates, Part 2: Specification for single-sized aggregate for surface dressing, British Standards Institution, London, 1987
26. BS 882, Aggregates from natural sources for concrete, The British Standards Institution, London, 1983
27. Buchta H. and Nievelt G., Stress Absorbing Membranes (SAM) and chip seals for medium maintenance of flexible roads, 4th Eurobitume, p.596, Madrid 1989
28. Burmister D.M., The general theory of stresses and displacements in layered systems, Journal of Applied Physics, Vol. 16, 1945
29. Burmister D.M., Theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways, Proceedings, Highway Research Board 23, 1943
30. Croney D., Croney P., The Design and Performance of Road Pavements, 2nd Edition, Chapt. 15, McGraw-Hill International, London, 1991
31. Croney D., Curren E.W.H., Croney P., The structural design of concrete pavements, Highway and transportation, 34,11, 1987
32. Davis E.H., Pavement design for roads and airfield, Road Research Technical Paper No.20, London HMSO, 1951
33. Department of Environment, Road Research Laboratory, Road Note 29, 3rd Edition, A Guide to the Structural Design of Pavements for New Roads, HMSO, 1970
34. Department of Transport, Structural Design of New Road Pavements, HD14/87, HMSO, London, 1987
35. Foster C.R. and Ahlvin, Stresses and deflections induced by a uniform circular load, Proceedings, Highway Research Board, 1954
36. Hank R.J. and Scrivner F.H., Some numerical solutions of stresses in two - and three - layered systems, Proceedings of Highway Research board, Vol.28, 1948
37. Highway Research Board, The AASHO Road test, Report 5, Pavement Research: Special Report 61F, Washington, 1962
38. Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges, Vol.7: Pavement Design and Maintenance, HD 26/94, TSO, London, Feb. 1998
39. Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges, Vol.7: Pavement design and maintenance, HD 30/99: Structural assessment of road pavements, TSO, London, May 1999
40. Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges, Vol.7: Pavement design and maintenance, HD24/96, TSO, London, Feb. 1996

41. Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges, Vol.7: Pavement design and maintenance, HD25/94, TSO, London, Jan. 1994
42. Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges, Vol.7: Pavement design and maintenance, HD26/94, TSO, London, Feb.1998
43. Highways Agency, The Manual of Contract Documents for Highway Works, Vol. 1: Specification for Highway Works, Series 1000: Road pavements- Concrete and cement bound materials, TSO, London, March 1998
44. Highways Agency, The Manual of Contract Documents for Highway Works, Vol.3: Highway construction details, TSO, London, May 2000
45. Huang Y.H., Computation of equivalent single wheel loads using layered theory, Proceedings, Highway Research Board, 1969
46. Iwanow N.N., Konstruowanije i restschot neschostkich doroschnich odeschd, Verlag Transport, Moskau, 1973
47. Jelinek R. and Ranke A., Berechnung der Spannungsverteilung in einem Zweischichtsystem, Bautechnik, Vol. 47, 1970
48. Jones A., Tables of stresses in three - layer elastic system, Highway Research Board, Bulletin 342, 1962
49. Jones A., The calculation of surface deflection for three - layer elastic systems, Shell Research Ltd., Thornton Research Centre, Chester, England, 1964
50. Kennedy C. K. and Lister N.W., Prediction of pavement performance and the design of overlays, LR 833, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1978
51. Lister N.W. and Maggs M.F., Research and development in the design of concrete pavements, International Symposium on Concrete Roads, ICE, London, 1982
52. May R.W., Witczak N.W., Integrated flexible pavement mix and structural design, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol.], p.141, Nottingham, 1992
53. Mayhew H. C. and Harding H.M., Thickness design of concrete roads, RR 87, TRRL, Crowthorne, 1987
54. Mobil Oil Company, Asphalt pavement design manual for U.K, Mobil Oil Co., Ltd, London, 1985
55. Monismith C.L., Witczak M.W., Moderator's Report, Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol.2, 1983
56. Odemark N., Investigations as to the elastic properties of soils and design of pavements according to the theory of elasticity, Staten Vagininstitut, Mitteilung Nr.77, Stockholm 1949
57. O'Flaherty C. A., Highway Engineering, 3rd Edition, Vol.2, Edward Arnold, London, 1991
58. Peattie K.R., Stress and strain factors for three - layer elastic system, Highway Research Board, Bulletin 342, 1962
59. Pickett G., A study of stresses in the corner of concrete pavement slabs under large corner loads, Portland Cement Association, Chicago, Illinois, 1951
60. Pickett G., Ray G.K., Influence charts for concrete pavements, Trans. ASCE, 116, 1951

61. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C. and Nunn M.E., Report 1 132, The structural design of bituminous roads, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1984
62. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, RStO 86, 1986
63. Road Research Laboratory, Concrete roads-Design and Construction, HMSO, London, 1955
64. Shell International Petroleum Co. Ltd., Shell Pavement Design Manual (Addendum), London, 1985
65. Shell International Petroleum Co., BISAR - PC, London, Dec. 1988
66. Teychenne D.C, Franklin R.E and Erntroy H.C, Design of normal concrete mixes, HMSO, 1975
67. The Highway Research Board, Admixtures in concrete, Special Report 119, Washington DC, 1971
68. Thompson M.R., ILLI-PAVE based conventional flexible pavement design procedure, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol.1, p.318, Nottingham, 1992
69. Transport Research Laboratory, Road Note RN 39, Design guide for road surface dressing, 3rd Edition, Department of Transport, TRL, Crown thorne, 1992
70. Wang S.K., Sargious M.A., Cheung Y.K., Advance analysis of rigid pavements, Transportation Engineering Journal, ASCE, 1972
71. Westergaard H.M., Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements, Public Roads, Vol. 14, No. 10, 1933
72. Westergaard H.M., New formulae for stresses in concrete pavements of airfields, Trans. ASCE, 1948
73. Westergaard H.M., Stress in concrete pavements computed by theoretical analysis, Public Roads, Vol.7, No.2, 1926
74. Westergaard H.M., Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis, Public Roads Vol. 7, 1926
75. Yeates C., An evaluation of the use of a fibre-reinforced membrane to inhibit reflective cracking, 2nd International Symposium on Highway Surfacing, Ulster University, Ulster, Jan. 1994
76. Yoder E.J. and Witczak M.W., Principals of Pavement Design, John Wiley & Sons, Inc., 1975
77. Αθ. Νικολαΐδης, Γ. Τσώχος, Αν. Παπαβασιλείου, Οδηγός Διαστασιολόγησης Οδοστρωμάτων, Εγνατία Οδός Α.Ε., Σεπτ. 1997
78. Αθ. Νικολαΐδης, Εύκαμπτα Οδοστρώματα: Μέθοδος διαστασιολόγησης - Ασφαλτικά μίγματα - Αντιολισθηρές στρώσεις), Εκδόσεις Τριαντάφυλλου, Θεσσαλονίκη, 2002 (Υπό έκδοση)
79. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, ΥΠΕΧΩΔΕ, Απόφαση ΕΔ2α/01/21/Φ.Ν.310/8.3.85, Αθήνα
80. Νικολαΐδης Α., Οικονόμου Ν., Η αναγκαία αντικατάσταση των ασφαλτικών διαλυμάτων με ασφαλτικά γαλακτώματα στα έργα οδοποιίας, Τεχνικά χρονικά Α, Τομ.7, Τευχ. 1, 1987
81. Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας (ΟΣΜΕΟ), Κεφ. 3: Μελέτη Οδών, Παράγραφος 3.8: Οδοστρώματα, Εγνατία Οδός Α.Ε., 1998(2001)

82. Πρότυπος Τεχνική Προδιαγραφή ΠΤΠ Α222, Επάλειψη ασφαλτικής στρώσεως προς χρήση επί ασφαλτικών επιφανειών, Εγκύκλιος Γ-63/1966, ΦΕΚ 113/1967, Υπουργείο Δημοσίων Έργων
83. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση ΕΚ2, Εγκύκλιος ΕΚ2/60417622 Π.Ε./22-1-1987, Χρήση όξινων ασφαλτικών γαλακτωμάτων σε προεπαλείψεις, συγκολλητικές και σφραγιστικές επαλείψεις, Αθήνα, 1987
84. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση Δ14, Εγκύκλιος Δ14β/οικ. 7042/ 707/23-11-90 Τεχνικές οδηγίες που αφορούν τον ποιοτικό και εργαστηριακό έλεγχο αντιολισθηρού λεπτοτάπητα slurry seal, Αθήνα, 1990
85. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση ΔΙ 4, Τεχνικές οδηγίες για την κατασκευή αντιολισθηρής ασφαλτικής στρώσης με την έμπηξη προεπαλειμμένων ψηφίδων, Αθήνα, 1986
86. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση ΕΚ2, Εγκύκλιος Ε96/ΕΚ2/6077/ 643/3-9-87, Τεχνικοί όροι για την κατασκευή λεπτοταπήτων με τη μέθοδο σφραγιστικού ασφαλτοπολτού (slurry seal), Αθήνα, 1987
87. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση ΕΚ2, Εγκύκλιος ΕΚ2/οικ.8532/ 1100/8-11 - 1985, Τεχνικές οδηγίες για την κατασκευή αντιολισθηρών στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα, Αθήνα, 1985
88. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση Α1-Δ3-Δ12, Εγκύκλιος Δ13α/36/6-Ω/30-3-1995, Κατασκευή αντιολισθηρών ασφαλτικών στρώσεων, Αθήνα, 1995
89. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Γ.Γ.Δ.Ε., Δ/νση ΕΚ2, Τεχνική έκθεση, ΕΚ2/6722/ 876/26-11-85, Έλεγχος αντιολισθηρών λεπτοταπήτων (slurry seal) και μετρήσεις αντιολισθηρότητας, Αθήνα, 1985
90. Υπουργείο Συγκοινωνιών & Δημοσίων Έργων, Γενική Δ/νση Δημ. Έργων, Υπηρεσία Συγκοινωνιακών Έργων, Δ/νση Γ2, Τμήμα Α, Εγκύκλιος Γ25460/3357 Οικ./21.7.1961, Εφαρμοστέοι τύποι ευκάμπτων οδοστρωμάτων, Αθήνα, 1961