

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός του πάχους των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων γίνεται σήμερα, όπως και ο υπολογισμός των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, με συνδυασμό αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού και εμπειρίας από τη συμπεριφορά υπαρχόντων οδοστρωμάτων. Σε όσες χώρες υπάρχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των υπαρχόντων οδοστρωμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας, κλίματος, εδαφολογικών χαρακτηριστικών και κατασκευαστικών λεπτομερειών (βλήτρα, υλικά υποβάσεως, είδος ερείσματος κ.α.) ο υπολογισμός κατ' αρχήν βασίζεται στην εμπειρία αυτή και η ανάλυση χρησιμοποιείται για την εισαγωγή νέων δεδομένων όπως πχ βαρύτερα φορτία, μεγαλύτερη κυκλοφορία, νέα υλικά στην υπόβαση, διαφορετική αντοχή σκυροδέματος από εκείνη που εχρησιμοποιείτο μέχρι τότε κλπ. (Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Μ. Βρετανίας.) Σε όσες χώρες δεν υπάρχουν πληροφορίες από οδοστρώματα σε χρήση, ο αναλυτικός υπολογισμός είναι αναγκαίος και συνδυάζεται με προσεκτική επιλογή πληροφοριών από άλλες χώρες με εμπειρία.

Στη χώρα μας δεν έχουμε εμπειρία από τη συμπεριφορά οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Υπάρχει μόνο ένα δοκιμαστικό τμήμα στην αρχή της οδού Σχιστού – Σκαρμαγκακά, μήκους 3 χιλιομέτρων, που κατασκευάστηκε το 1963 και ετέθη ουσιαστικά εκτός χρήσεως στις αρχές της δεκαετίας 1980 με τη νέα χάραξη της οδού αυτής. Η εργασία συντηρήσεως όλα αυτά τα χρόνια παράλληλα τη βαρύτερη κυκλοφορία και τις λαθεμένες επεμβάσεις που κατά καιρούς υπέστη κυρίως για την κατασκευή των έργων μεταφοράς λυμάτων στο κέντρο Σχιστού. Με δεδομένο λοιπόν την έλλειψη πληροφοριών από οδοστρώματα από σκυρόδεμα είμαστε υποχρεωμένοι να βασιστούμε σε αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού.

Ο αναλυτικός υπολογισμός όλων γενικά των οδοστρωμάτων, συνίσταται στην ακόλουθη διαδικασία:

α. Καθορισμός του μηχανικού προσομοιώματος που παριστά το οδόστρωμα.

β. Καθορισμός του είδους, της έντασης και της διάρκειας των επιπονήσεων που προβλέπεται να υποστεί το οδόστρωμα. Η διαδικασία αυτή συνίσταται κυρίως στον καθορισμό της φόρτισης από τα φορτία της κυκλοφορίας και στην εκτίμηση των επιπονήσεων που προκαλούνται από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. (πχ θερμοκρασιακές τάσεις, επιρροή της μεταβολής της φέρουσας ικανότητας της στρώσεως εδράσεως από τις κλιματολογικές και υδρολογικές μεταβολές κλπ.).

γ. Εκτίμηση του πάχους των διαφόρων στρώσεων του οδοστρώματος και εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων που είναι απαραίτητα για την ανάλυση του προσομοιώματος (συνήθως του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου του Poisson των υλικών των στρώσεων).

δ. Ανάλυση της εντατικής καταστάσεως (τάσεις, παραμορφώσεις, υποχωρήσεις) που αναπτύσσεται στο οδόστρωμα υπό την επενέργεια των επιπονήσεων που καθορίστηκαν στο βήμα β.

ε. Έλεγχος της επάρκειας του οδοστρώματος (που συναρτάται με τα εκλεγμένα πάχη, το είδος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά στρώσεων του οδοστρώματος) έτσι ώστε να μην παρουσιαστεί αστοχία κατά τη διάρκεια την προβλεπόμενης χρήσεως σε καμία στρώση του οδοστρώματος και στη στρώση έδρασης. Για τον καθορισμό αυτό, είναι απαραίτητο να είναι γνωστοί οι νόμοι που προσδιορίζουν την αστοχία των υλικών υπό την προβλεπόμενη επιπόνηση. Το κυριότερο χαρακτηριστικό της φόρτισης των οδοστρωμάτων είναι η επαναλαμβανόμενη μορφή επιπόνησης που επιβάλλον τα φορτία της κυκλοφορίας και γι'

αυτό οι νόμοι κόπωσης των υλικών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων. Άλλοι απαραίτητοι νόμοι είναι i) ο νόμος αστοχίας της στρώσης έδρασης που εξασφαλίζει το οδόστρωμα από απώλεια στηρίξεως και από υπερβολική παραμόρφωση, ii) ο νόμος αστοχίας των υλικών υποβάσεως δύσκαμπτων οδοστρωμάτων τα οποία υφίστανται διάβρωση από ταχύτατη κίνηση του νερού στην επιφάνειά τους και iii) ο νόμος που καθορίζει την μόνιμη παραμόρφωση των ασφαλομιγμάτων και των ασύνδετων υλικών βάσεως και υποβάσεως. Εφόσον στον έλεγχο αυτό αποδειχθεί, ότι σε κάποιο κρίσιμο σημείο προβλέπεται αστοχία, τότε αναπροσαρμόζονται κατάλληλα τα πάχη ή τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος ( με αναβάθμιση της ποιότητάς τους) έτσι ώστε στον επανέλεγχο που θα ακολουθήσει να μην παρουσιάζεται αστοχία.

(Για τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα απαιτείται ειδικότερα η γνώση του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος και ο νόμος αστοχίας των υλικών υποβάσεως από διάβρωση (ii). Ο νόμος αστοχίας της στρώσης έδρασης συνήθως δεν απαιτείται διότι οι τάσεις που μεταβιβάζονται κάτω από την πλάκα του σκυροδέματος είναι πολύ μικρές για να προκαλέσουν αστοχία.)

Η διαδικασία αυτή, που δε διαφέρει σημαντικά από την αρχή υπολογισμού των συνήθων κατασκευών, καθορίζει τους προσωρινούς περιορισμούς αλλά και τις απεριόριστες, μελλοντικά, δυνατότητες των αναλυτικών μεθόδων.

Η εύρεση των νόμων αστοχίας, για τα διάφορα υλικά οδοστρωσίας, γίνεται με διεξαγωγή πειραμάτων στο εργαστήριο τα οποία δεν είναι πάντοτε δυνατόν να γίνουν υπό συνθήκες τελείως όμοιες με τις συνθήκες που επικρατούν στο πραγματικό οδόστρωμα. Η επιβολή π.χ. Επίπεδης εντατικής κατάστασης αντί τριαξονικής – φορτίου σταθερής έντασης αντί φορτίου με τυχαία μεταβαλλόμενη ένταση – ανάπαυλας στις φορτίσεις – σταθερής θερμοκρασίας ή/και υγρασίας είναι μερικές από τις σημαντικότερες διαφορές. Η ανάλυση της εντατικής καταστάσεως δοκιμαστικών οδοστρωμάτων ή οδοστρωμάτων που βρίσκονται σε λειτουργία και η συσχέτιση των εντατικών μεγεθών με τη συμπεριφορά του οδοστρώματος παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την αναθεώρηση και την συνεχή προσαρμογή των αναλυτικών μεθόδων, έτσι ώστε να βελτιώνεται συνεχώς η προβλεψιμότητα των νόμων αστοχίας και επομένως και η ακρίβεια του υπολογισμού.

## 2. ΟΡΙΣΜΟΙ

Στο Σχ. 1 φαίνονται οι τρεις κατηγορίες οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα, δηλ. εύκαμπτα (στρώσεις από ασφαλτόμιγμα και μη κατεργασμένα αμμοχάλικα), δύσκαμπτα (στρώση από σκυρόδεμα που εδράζεται σε στρώση από κατεργασμένο ή μη αμμοχάλικο) και η ενδιάμεση κατηγορία τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα (στρώση από ασφαλτόμιγμα και στρώσεις από κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες αμμοχάλικα).

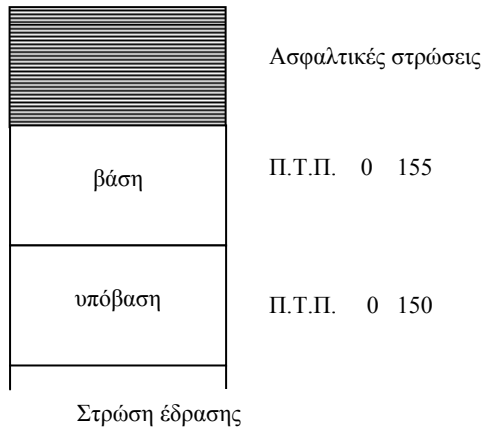
Στο Σχ. 2 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της δεύτερης στρώσης σε ένα σύστημα ελαστικών επάλληλων στρώσεων στο οποίο μεταβάλλεται ο λόγος  $E1/E2$  των μέτρων ελαστικότητας των δύο στρώσεων. Είναι φανερό από το Σχ. 2 ότι στο προσομοίωμα του οδοστρώματος του σχήματος αυτού οι τάσεις που μεταβιβάζονται στην επιφάνεια της δεύτερης στρώσης εξαρτώνται από το λόγο  $E1/E2$  δηλ. από το πόσο πιο μεγάλο είναι το  $E1$  σε σχέση με το  $E2$ .

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος κυμαίνεται από 25000 MPa έως 35000 MPa των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών από 3000 MPa έως 10000 MPa, των κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες αμμοχαλικωδών υλικών από 10000 MPa έως 20000 MPa, των ασφαλομιγμάτων από 2000 MPa έως 10000 MPa (μέτρο δύσκαμψιας) και των μη κατεργασμένων θραυστών αμμοχαλικών (ΠΤΠ 0 155 ή 150) από 100 MPa έως 800 MPa. Από τις τιμές αυτές και με τη βοήθεια του σχήματος 2 γίνεται φανερό ότι (για σταθερό πάχος της πρώτης στρώσεως) οι τάσεις που μεταβιβάζονται στην υποκείμενη στρώση όταν η υπερκείμενη είναι από σκυρόδεμα είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που μεταβιβάζονται όταν η υπερκείμενη στρώση είναι από ασφαλτόμιγμα (ίσου πάχους) και ακόμη μικρότερες όταν η στρώση είναι από μη κατεργασμένο θραυστό ή συλλεκτό αμμοχάλικο. Οι τιμές των μεταβιβαζόμενων τάσεων σε περίπτωση κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες αμμοχαλικών

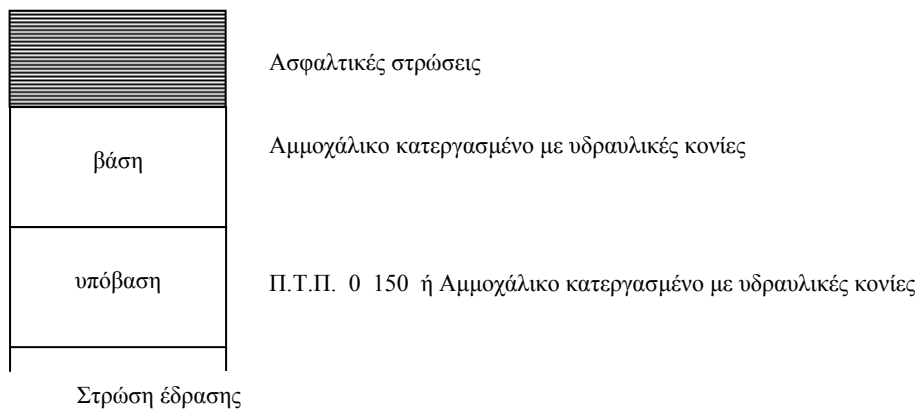
ή των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών έχουν ενδιάμεσες τιμές με εκείνες των περιπτώσεων σκυροδέματος και αμμοχάλικων ή ασφαλτομιγμάτων.

Στην περίπτωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων η πλάκα του σκυροδέματος αναλαμβάνει το ρόλο της στρώσεως κυκλοφορίας και της βάσεως (δηλ. της στρώσεως που κυρίως φέρει τα φορτία) και γι' αυτό η στρώση μεταξύ της πλάκας και της στρώσης έδρασης ονομάζεται συνήθως υπόβαση.

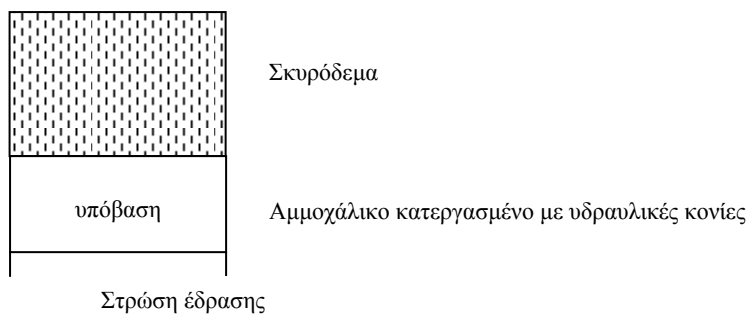
#### Εύκαμπτο οδόστρωμα



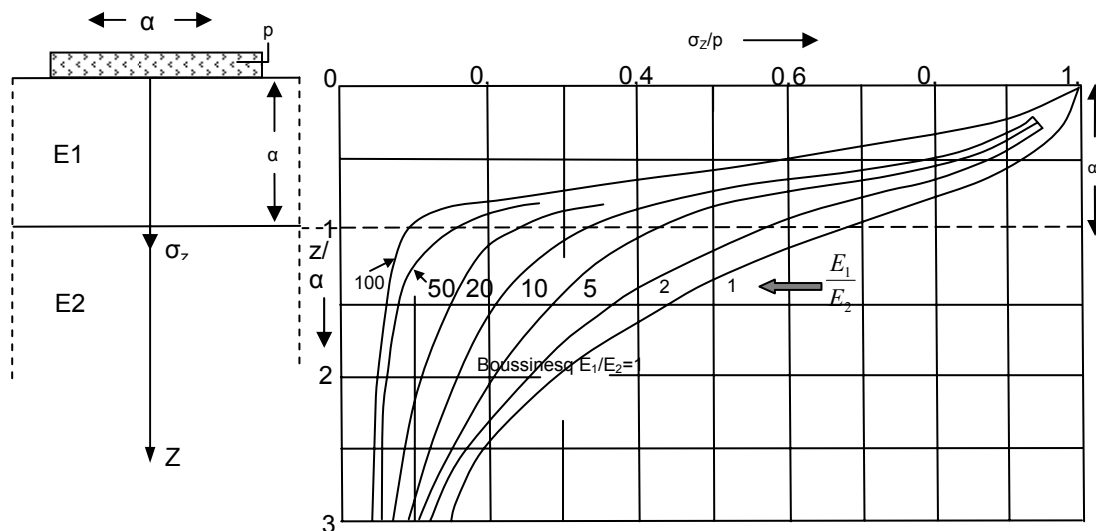
#### Ημιδύσκαμπτο οδόστρωμα



#### Δύσκαμπτο οδόστρωμα

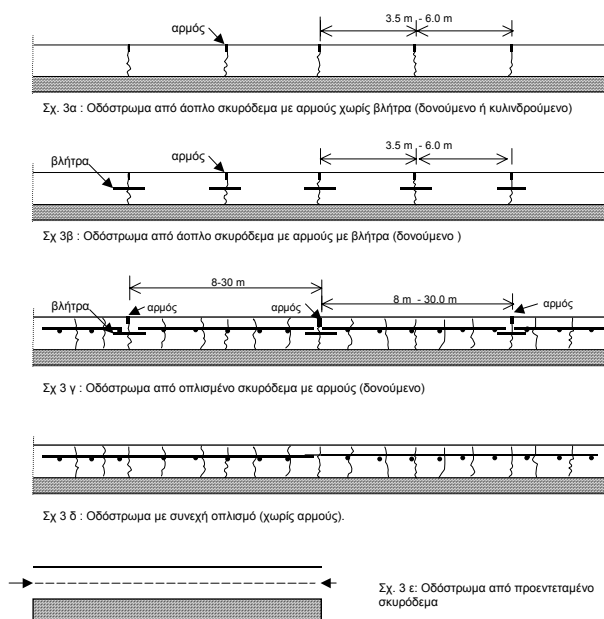


Σχ. 1 Είδη οδοστρωμάτων



Σχ. 2 Επίδραση το λόγου  $E_1/E_2$  στις κατακόρυφες τάσεις  $\sigma_z$  σε σύστημα δύο ελαστικών επάλληλων στρώσεων (Burmister)

Τα κυριότερα είδη οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα είναι Σχ. 3:



Σχ. 3 Διάφορα είδη οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

1. τα οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς, Σχ. 3α και Σχ. 3β
2. τα οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς, Σχ. 3γ
3. τα οδοστρώματα χωρίς αρμούς με συνεχή οπλισμό, Σχ. 3δ
4. τα οδοστρώματα από προεντεταμένο σκυρόδεμα, Σχ. 3ε
5. τα οδοστρώματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. (Η συμπύκνωση γίνεται με οδοστρωτήρες αντί της συμπυκνώσεως με δονητές μάζας)

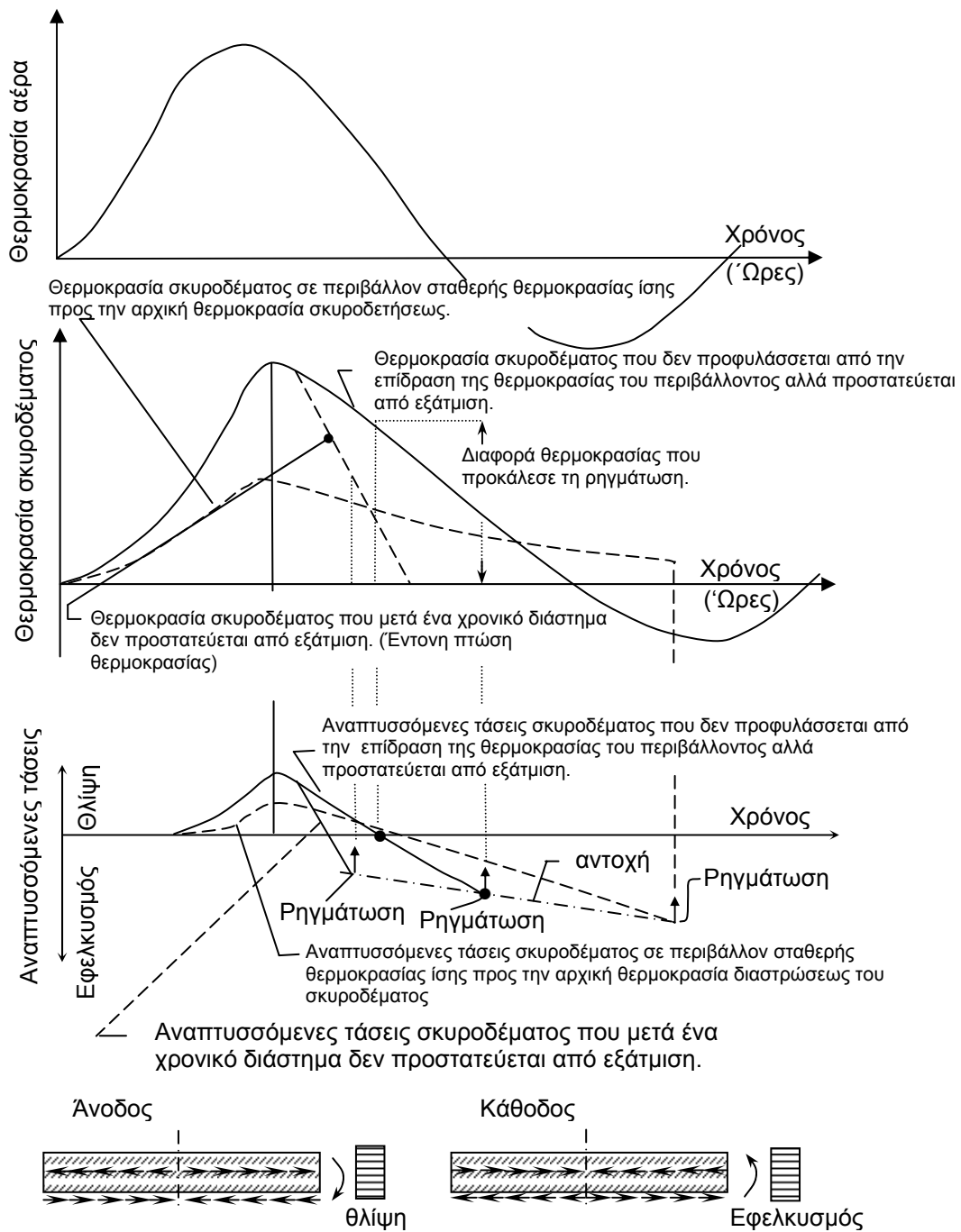
Έμφαση θα δοθεί στην ανάπτυξη των οδοστρωμάτων από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς γιατί αυτό το είδος φαίνεται ότι είναι σήμερα το οικονομικότερο από άποψη αρχικού κόστους και έχει διεθνώς την ευρύτερη εφαρμογή. Άλλωστε, οι αρχές υπολογισμού των οδοστρωμάτων αυτών έχουν εφαρμογή, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις, και στα άλλα είδη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

### 3. ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΗ ΗΛΙΚΙΑ

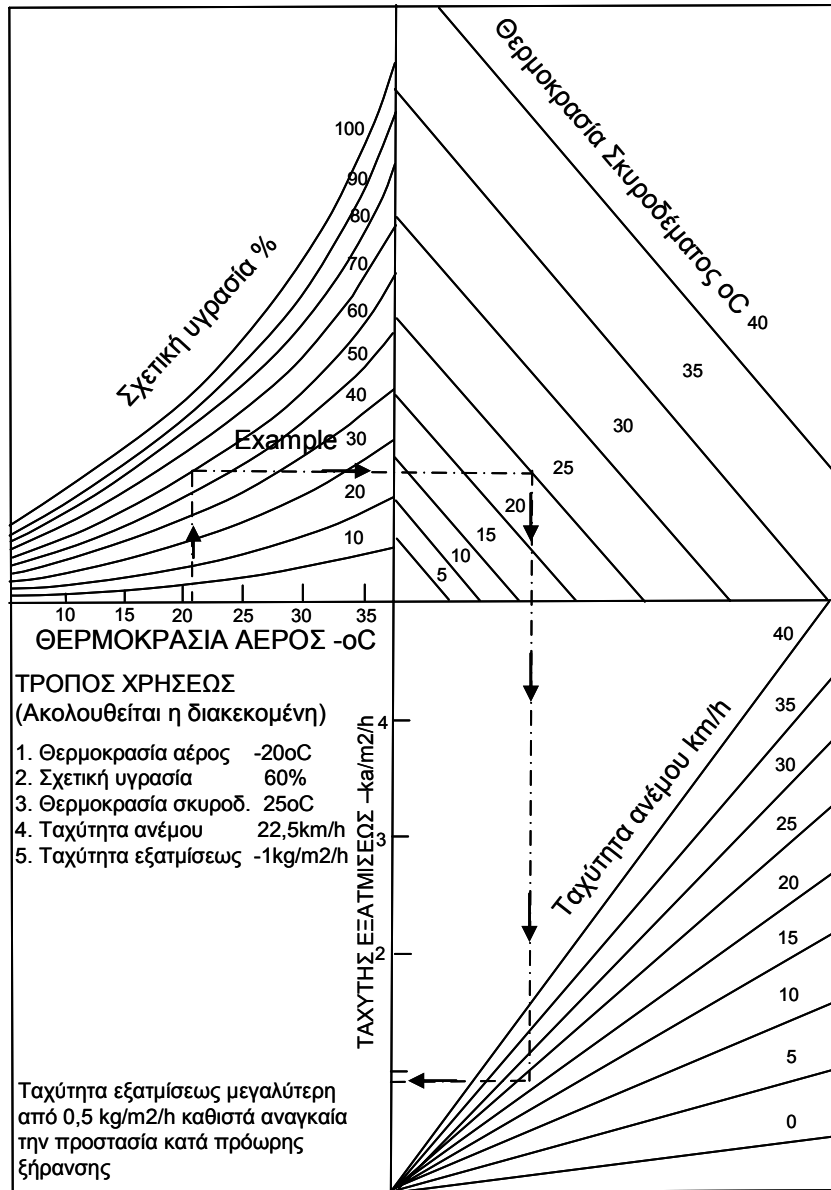
Το σκυρόδεμα μετά τη διάστρωσή του και ενώ είναι ακόμη μικρής ηλικίας, υφίσταται επιπονήσεις που οφείλονται στην παρεμπόδιση (λόγω τριβής και ίδιου βάρους) της μετακινήσεώς του, που προκαλείται από θερμοκρασιακές μεταβολές και από συστολή κατά την πήξη. Το φαινόμενο είναι πολύπλοκο γιατί εκτός από την επίδραση της θερμότητας ενυδατώσεως, το σκυρόδεμα υφίσταται και την επιρροή της θερμότητας του περιβάλλοντος με αποτέλεσμα να προκαλούνται μεταβολές της θερμοκρασίας της μάζας του και επομένως συστολοδιαστολές (όχι κατ' ανάγκη ομοιόμορφες), που παρεμποδίζονται από την τριβή στην έδραση της πλάκας. Επιπλέον το σκυρόδεμα υφίσταται και συστολή από πήξη. Κατά το διάστημα αυτό η αντοχή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί αρκετά ώστε να παραλάβει τις τάσεις που αναπτύσσονται από την παρεμπόδιση των μετακινήσεων αυτών και το σκυρόδεμα ρηγματώνεται.

Μια απλουστευμένη εικόνα του φαινομένου αυτού παρέχει το Σχ. 4. Παρατηρείται ότι μετά την πήξη, αρχικά αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα τάσεις θλίψεως οι οποίες με την πάροδο του χρόνου και την πτώση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μηδενίζονται και μετατρέπονται σε τάσεις εφελκυσμού. Οι τάσεις εφελκυσμού αυτές αυξάνουν με την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος και σε κάποια χρονική στιγμή υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του οπότε επέρχεται ρηγμάτωση. Όσο ταχύτερη είναι η μείωση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη θερμοκρασιακή συστολή υφίσταται το σκυρόδεμα και τόσο ταχύτερα αυξάνουν οι τάσεις εφελκυσμού.

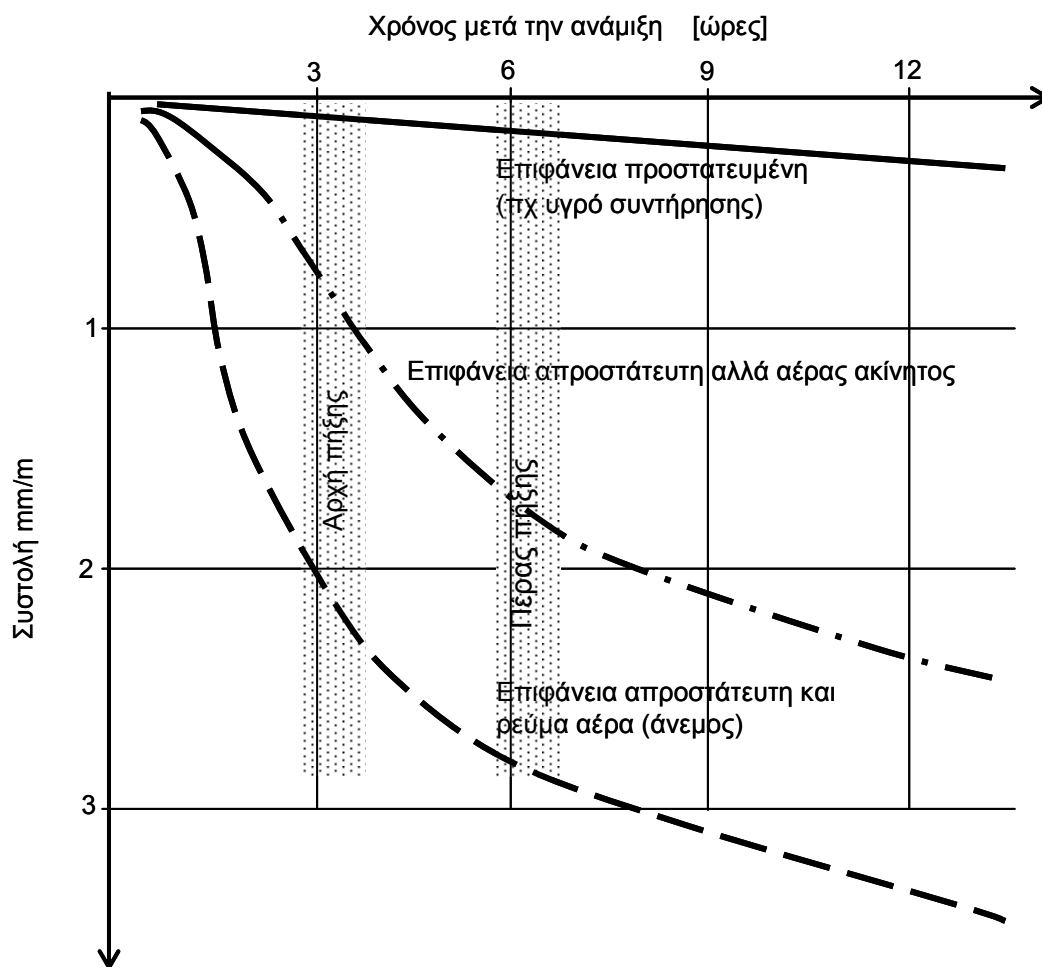
Άλλος παράγων που επηρεάζει τη συστολή του σκυροδέματος είναι η εξάτμιση του νερού από την επιφάνειά του. Όσο η εξάτμιση είναι μεγαλύτερη τόσο η συστολή του αυξάνει και η ανάπτυξη των τάσεων εφελκυσμού γίνεται δυσμενέστερη. Η εξάτμιση του νερού από το σκυρόδεμα εξαρτάται κυρίως από το αν η επιφάνειά του έχει καλυφθεί ή όχι με αδιάβροχα πλαστικά φύλλα ή «χημικό υγρό συντηρήσεως» αλλά και από την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία και σχετική υγρασία του περιβάλλοντος και από τη θερμοκρασία του σκυροδέματος Σχ. 5. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επιδρούν στην ταχύτητα αυξήσεως των εφελκυστικών τάσεων και επομένως στην ταχύτητα εμφανίσεως και τον αριθμό των ρηγματώσεων.



Σχ. 4 Επιπονήσεις του σκυροδέματος τις πρώτες 24 ώρες μετά τη διάστρωσή του.



Σχήμα 5<sup>ο</sup>: Επίδραση της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα, της ταχύτητας του ανέμου και της θερμοκρασίας του σκυροδέματος στην ταχύτητα εξατμίσεως του νερού από την επιφάνεια του σκυροδέματος.



Σχήμα 5β: Η συστολή του σκυροδέματος είναι:

- (1) μικρή όταν η επιφάνειά του έχει καλυφθεί με υγρό συντηρήσεως
- (2) μεγαλύτερη όταν είναι απροστάτευτη χωρίς ρεύμα αέρος και
- (3) σημαντικά μεγαλύτερη όταν είναι απροστάτευτη και υπάρχει ρεύμα αέρος

Σχ. 5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα εξατμίσεως του νερού και το μέγεθος της συστολής του σκυροδέματος.

Για να μειωθεί στο ελάχιστο ο παράγων της συστολής λόγω εξατμίσεως του νερού, η επιφάνεια του σκυροδέματος κατά κανόνα προστατεύεται από εξατίμηση με κάλυψη με χημικό υγρό συντηρήσεως ή με πλαστικά φύλλα.

Ενώ ο παράγων της εξατμίσεως του νερού μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ή ακόμη και να μηδενισθεί, εντούτοις η χημική και ιδιαίτερα η θερμοκρασιακή συστολή του σκυροδέματος δεν μπορεί πρακτικά να εξαληφθεί και το σκυρόδεμα τελικά θα ρηγματωθεί. Για να αντιμετωπισθεί η εμφάνιση ακονόνιστων (ανεξέλεγκτων) ρωγμών στο σκυρόδεμα κατασκευάζονται οι αρμοί.

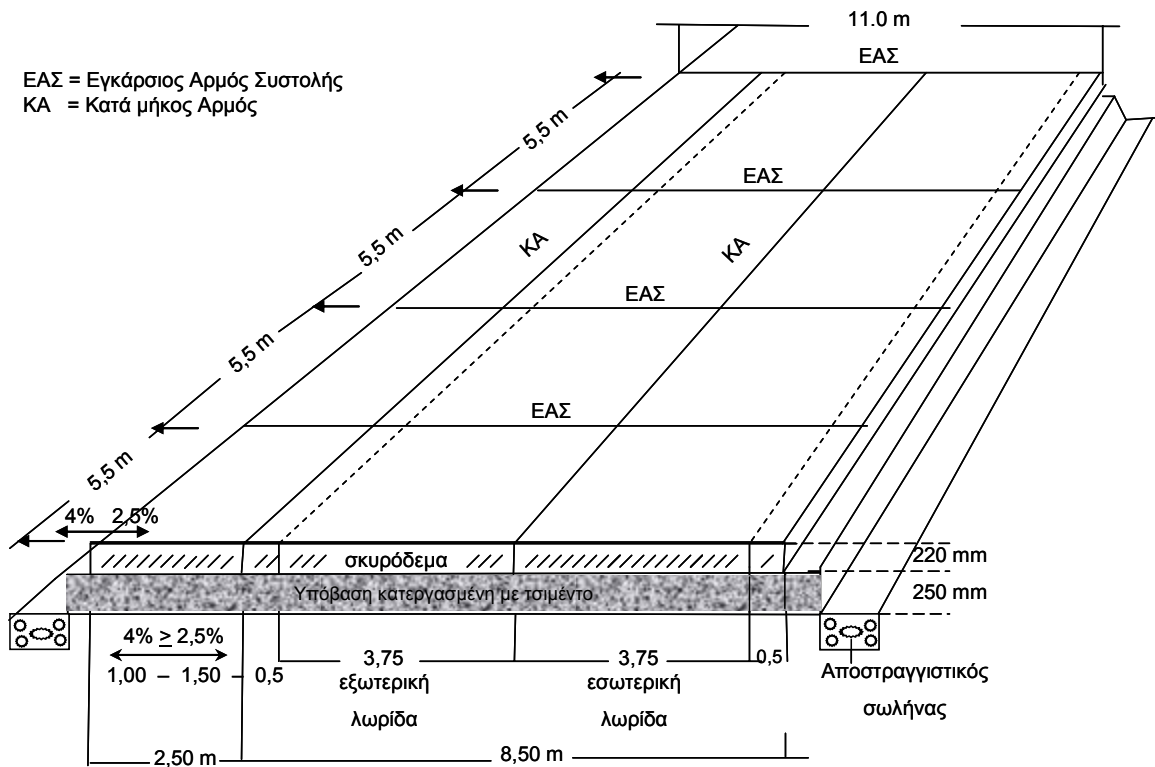
Οι αρμοί κατασκευάζονται στο νεαρό σκυρόδεμα, την κατάλληλη χρονική στιγμή (8-24ωρ), με τη δημιουργία σε προκαθορισμένες αποστάσεις μείωσης της εγκάρσιας διατομής του σκυροδέματος, έτσι ώστε η ρηγμάτωση του σκυροδέματος να γίνει στις προκαθορισμένες θέσεις και να παρουσιάζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος ευθύγραμμη και ομοιόμορφου εύρους. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η σφράγιση (στεγανοποίηση) των ρωγμών αυτών και παρέχεται η δυνατότητα τοποθέτησης ή κατασκευής στις θέσεις αυτές ορισμένων διατάξεων που εξασφαλίζουν, έως ένα βαθμό, τη συνεργασία των δύο τμημάτων του σκυροδέματος που χωρίζει η ρωγή (τοποθέτηση βλήτρων, ή κατασκευή τόρμου και εντορμίας).



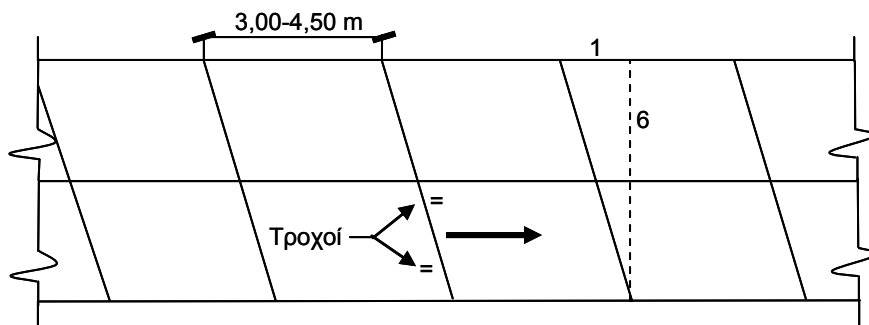
Οι αρμοί διακρίνονται Σχ. 6 σε:

1. κατά μήκος αρμούς, που κατασκευάζονται παράλληλα προς τον άξονα της οδού σε περιπτώσεις που το πλάτος του οδοστρώματος υπερβαίνει τα 4,5m έως 5,5m
2. εγκάρσιους αρμούς (συστολής ή διαστολής), που κατασκευάζονται κάθετα Σχ. 6 ή με ελαφριά κλίση (1:6) Σχ. 7 προς τον άξονα της οδού ανά αποστάσεις συνήθως 3,5m έως 6m στα οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα και ανά 8m έως 30m στα οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι αρμοί διαστολής δεν κατασκευάζονται παρά μόνο πριν από τεχνικά έργα (γέφυρες) ή άλλα εμπόδια. Στο Σχ. 6 παρουσιάζεται τυπική διάταξη αρμών σε οδόστρωμα γερμανικού αυτοκινητοδρόμου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση και στο Σχ. 8 παρουσιάζονται τυπικές τομές διαφόρων τύπων αρμών.
3. αρμούς διακοπής εργασίας, που κατασκευάζονται, για την περίπτωση διάστρωσης λωρίδων σε διαφορετικό χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχ. 8α και για την περίπτωση διακοπής εργασίας όπως φαίνεται στο Σχ. 8δ.

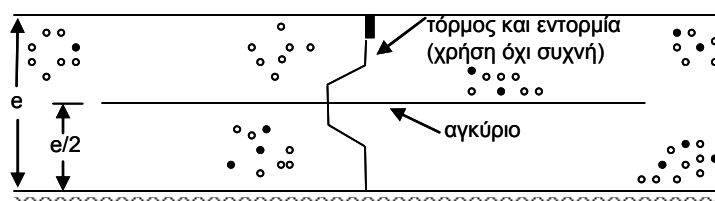
Σε ορισμένες περιπτώσεις (βαριά κυκλοφορία, δυσμενές κλίμα, διαβρώσιμη υπόβαση), οι εγκάρσιοι αρμοί εφοδιάζονται με βλήτρα (λείες ράβδοι Φ25mm, μήκους 500mm ανά αποστάσεις 0.3m έως 0.6m Σχ. 8β, γ, δ) για την υποβοήθηση της μεταβίβασης φορτίου από τη μία πλάκα στην άλλη και επομένως τη μείωση των τάσεων αλλά κυρίως των υποχωρήσεων που συνεπάγεται η φόρτιση της πλάκας στην ακμή του αρμού (βλ. παρ. 5.2). Για να αποφευχθεί το άνοιγμα των κατά μήκος αρμών (δηλ. η απομάκρυνση των χειλέων της ρωγμής) και η μείωση της αποτελεσματικότητας (στεγανότητα) του υλικού σφραγίσεως, οι αρμοί αυτοί εφοδιάζονται με ράβδους αγκυρώσεως (ράβδοι με νευρώσεις πχ. Φ12mm μήκους 0.8m έως 1.0m ανά 1.0m ή λείες ράβδοι με άγκυστρα). Στο Σχ. 9 παρουσιάζεται η διάταξη των βλήτρων και των ράβδων αγκυρώσεως σε Ισπανικό αυτοκινητόδρομο. Παρατηρείται ότι στη λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας η διάταξη των βλήτρων είναι πυκνότερη από την αντίστοιχη διάταξη της εσωτερικής λωρίδας στην οποία η κυκλοφορία φορτηγών αυτοκινήτων είναι σημαντικά μειωμένη. Ανάλογη διάταξη αρμών προδιαγράφεται και στη Γερμανία όπου η τοποθέτηση βλήτρων στους αρμούς



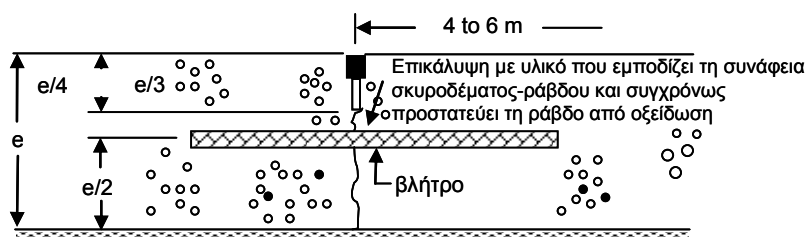
Σχ. 6 Τυπική διάταξη αρμών σε γερμανικό αυτοκινητόδρομο



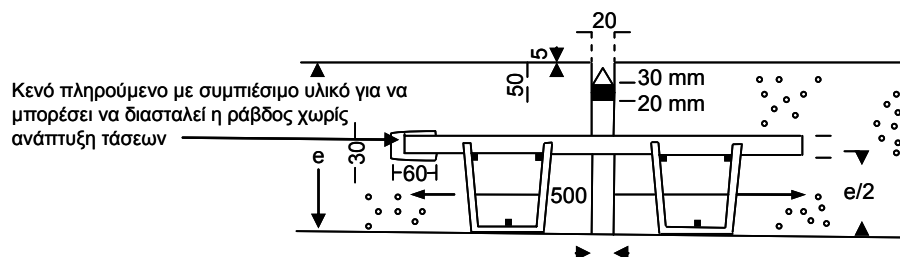
Σχ. 7 Διάταξη εγκάρσιων αρμών με κλίση 1:6 σε οδό δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση.



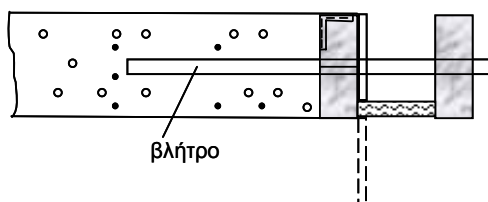
α. Κατά μήκος αρμός



β. Αρμός συστολής

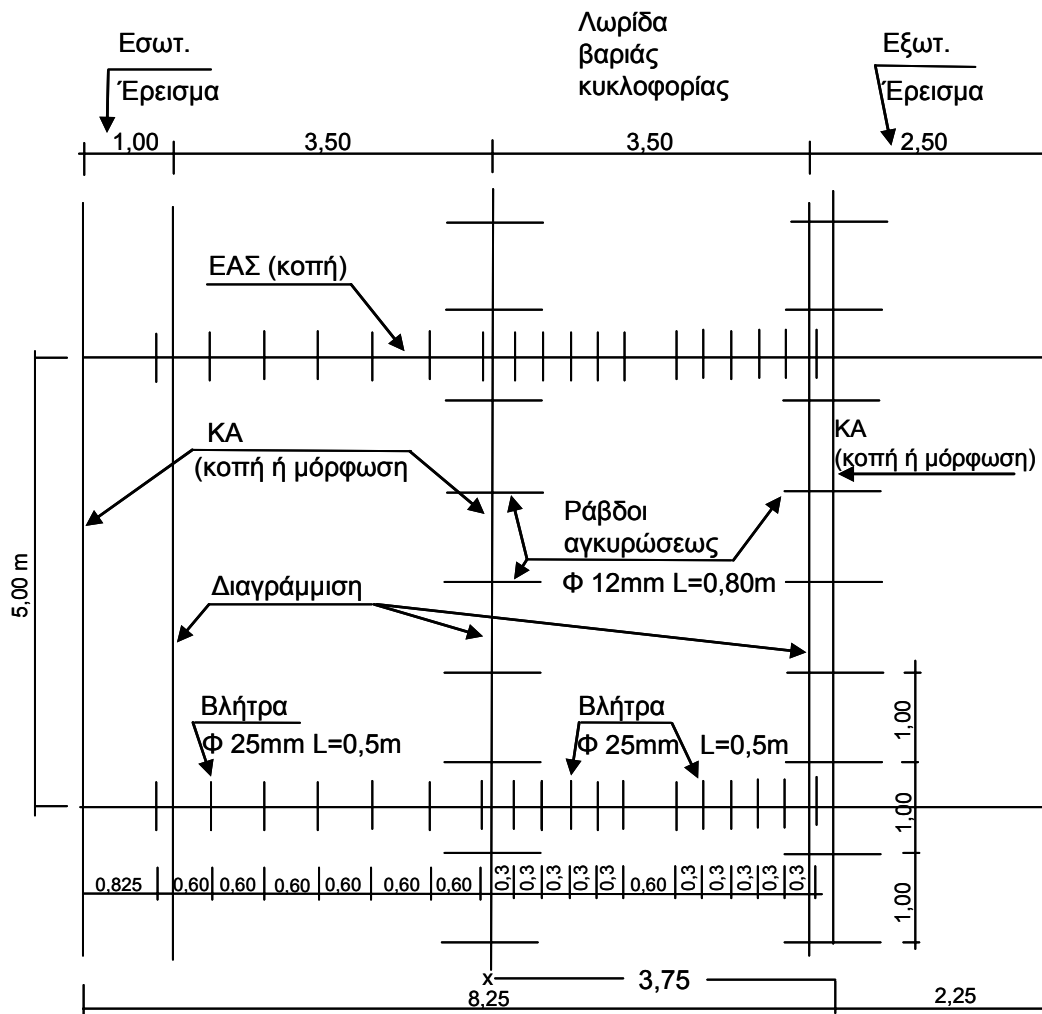


γ. Αρμός διαστολής



δ. Εγκάρσιος αρμός διακοπής εργασίας.  
(Συνήθως πάντοτε προδιαγράφεται με βλήτρο)

Σχ. 8 Τυπικά παραδείγματα αρμών



ΕΑΣ Εγκάρσιος αρμός συστολής  
ΚΑ Καταμήκος αρμός

Σχ. 9 Τυπική διάταξη αρμών και οπλισμού (βλήτρων, αγκυρίων) σε Ισπανικό αυτοκινητόδρομο με έρεισμα από σκυρόδεμα. (Στους Ισπανικούς αυτοκινητόδρομους υπάρχει έρεισμα και στην εσωτερική λωρίδα).

είναι υποχρεωτική.

Η περιγραφή των μεθόδων και των μηχανημάτων κατασκευής οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα εκφεύγει των ορίων του παρόντος αλλά ο ενδιαφερόμενος μπορεί να ανατρέξει στις «Σημειώσεις επί των μέσων εκμηχανίσεως των δομικών έργων» Χ.Ι. Εφραιμίδη (Κεφ. 7).

#### 4. ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Δύο είναι οι κυριότερες μορφές αστοχίας των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα: αστοχία από κόπωση και αστοχία από κακή λειτουργία των αρμών.

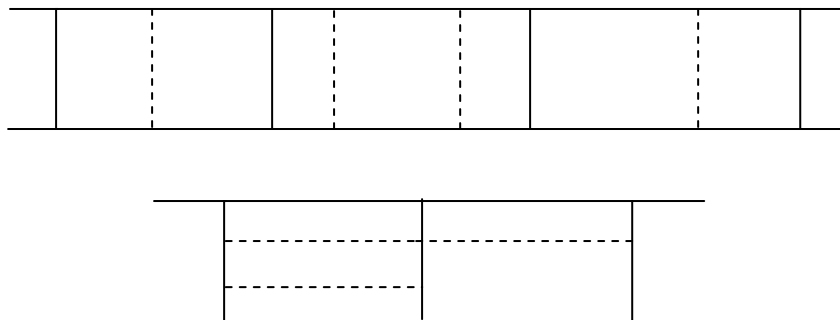
Η αστοχία από κόπωση οφείλεται σε δυσμενή συνδυασμό έντασης αναπτυσσόμενων τάσεων και αριθμού επιβολής αυτών των τάσεων και εκδηλώνεται με εμφάνιση ρωγμών στην πλάκα του σκυροδέματος Σχ. 10. Η αστοχία των αρμών μπορεί να συμβεί και σε οδοστρώματα που έχουν διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να μην παρουσιασθεί κόπωση και οφείλεται σε διάφορους λόγους οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι λαθεμένος σχεδιασμός ή κατασκευή, και η ανάπτυξη του φαινομένου της άντλησης (pumping). Η αστοχία αυτή παρουσιάζεται περισσότερο ως αστοχία λειτουργικότητας του οδοστρώματος και μπορεί να καταλήξει σε σημαντική ρηγμάτωση ή και απόσπαση τεμαχίων σκυροδέματος από την επιφάνεια της

πλάκας στην περιοχή του αρμού. Στο Σχ. 11 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη αστοχίας των αρμών. Η σημαντικότερη αστοχία του τύπου αυτού είναι η ανισοσταθμία που δημιουργείται στους αρμούς για την οποία θα γίνει λεπτομερέστερη αναφορά στην παρ. 5.2.

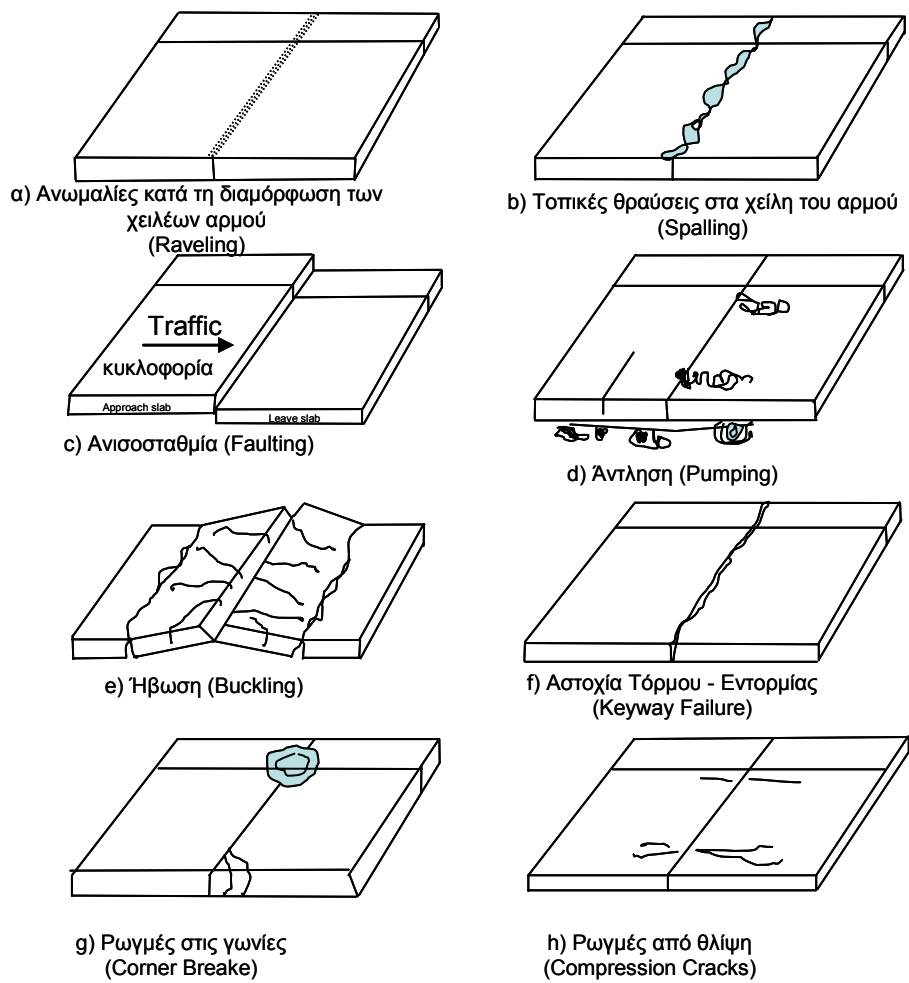
Οι τάσεις που αναπτύσσονται στα οδοστρώματα από σκυρόδεμα οφείλονται α) στη διέλευση των φορηγών αυτοκινήτων (επιπόνηση από φορτία) και β) σε μεταβολές της θερμοκρασιακής ή/και υγρομετρικής καταστάσεως της πλάκας του σκυροδέματος.

#### 4.1 Επιπόνηση από φορτία

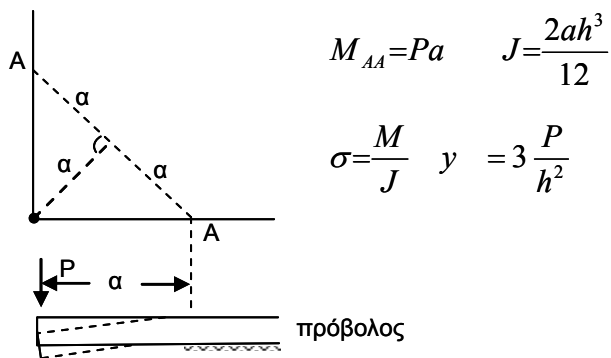
Η πρώτη, ίσως, προσπάθεια υπολογισμού του πάχους πλάκας από σκυρόδεμα, που εδράζεται στο έδαφος, ανήκει στον Golberg, 1919, ο οποίος υπολόγισε τις τάσεις που αναπτύσσονται στη γωνία με την (χονδροειδή) παραδοχή ότι η πλάκα δεν ευρίσκεται σε επαφή με το έδαφος (πρόβολος) μέχρι την ευθεία AA, Σχ. 12. Το 1926, ο Westergaard παρουσίασε τις πρώτες του εξισώσεις υπολογισμού των τάσεων στη γωνία, στην ακμή και στο μέσον (μακριά από τα άκρα) τις οποίες βελτίωσε το 1929 και το 1947. Οι εξισώσεις Westergaard υπέστησαν ορισμένες τροποποιήσεις από τους Teller και Sutherland (1936-43) μετά από εκτεταμένα πειράματα σε πλάκες κατασκευασμένες στο έδαφος για να ληφθεί υπόψη, με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα πειράματα, το γεγονός ότι οι πλάκες συνήθως δεν βρίσκονται καθ' όλη την επιφάνειά τους σε πλήρη επαφή με το έδαφος. Έκτοτε υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εξισώσεων που αποδίδονται στον Westergaard ή τροποποιημένων εξισώσεων Westergaard. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορεί να έχουν γίνει σε μία προσπάθεια αυξήσεως της ακρίβειας ή απλώς



Σχ. 10 Ρωγμές οφειλόμενες σε υπέρβαση της αντοχής σε κόπωση του σκυροδέματος.



Σχ. 11 Διάφορα είδη αστοχίας αρμών με την αγγλική ορολογία



Σχ. 12 Εξίσωση τάσεων στη γωνία κατά Goldberg, 1919

για αλλαγή μονάδων επειδή οι αρχικές τροποποιημένες εξισώσεις από τους Teller και Sutherland περιείχαν εμπειρικούς όρους σε αγγλοσαξονικές μονάδες. Πρόσφατα το θέμα αυτό ήταν αντικείμενο ιδιαίτερης έρευνας (Ioannides et al).

Οι εξισώσεις που θεωρούνται σήμερα ως οι πλέον ακριβείς για περιπτώσεις φορτίσεως στη γωνία, στην ακμή και στο μέσον (μακριά από τα άκρα) με φορτίο ενός τροχού με κυκλική επιφάνεια επαφής (βλ. Σχ. 13) είναι:

Τάση στο μέσον (δηλ. μακριά από τα άκρα)

$$\sigma_{\mu} = \left[ 0.275 \frac{Q(1 + \mu)}{h^2} \right] \left[ \log \left\{ \frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right\} - 0.436 \right] \quad \text{N/mm}^2$$

Τάση στην ακμή

(Westergaard – Teller and Sutherland – Eisenmann)

$$\sigma_a = \frac{0.529 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + 0.54\mu) \cdot \left[ 1g \cdot \frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} + 1g \frac{b}{1 - \mu^2} - 2.484 \right]$$

Westergaard – Losberg

$$\sigma_a = (6Q/h^2)(1 + 0.5 \mu) [0.489 \log(a/1) - 0.012 - 0.063(a/1)]$$

Τάση στη γωνία

$$\sigma_{\gamma} = \frac{3 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{12(1 - \mu^2) \cdot k}{E \cdot h^3} \right)^{0.3} \right] \cdot (a\sqrt{2})^{1.2}$$

Οι υποχωρήσεις της πλάκας στον άξονα του φορτίου για τις παραπάνω περιπτώσεις φορτίσεων είναι:

Φόρτιση στο μέσον με ομοιόμορφα καταμεμημένο φορτίο

(Υποχώρηση κάτω από το κέντρο του φορτίου)

$$Y = \frac{g}{8kl^2} \left[ 1 + \left( 0,3665 \log \left( \frac{a}{\ell} \right) - 0,2174 \right) \cdot \left( \frac{a}{\ell} \right)^2 \right] \quad [\text{mm}]$$

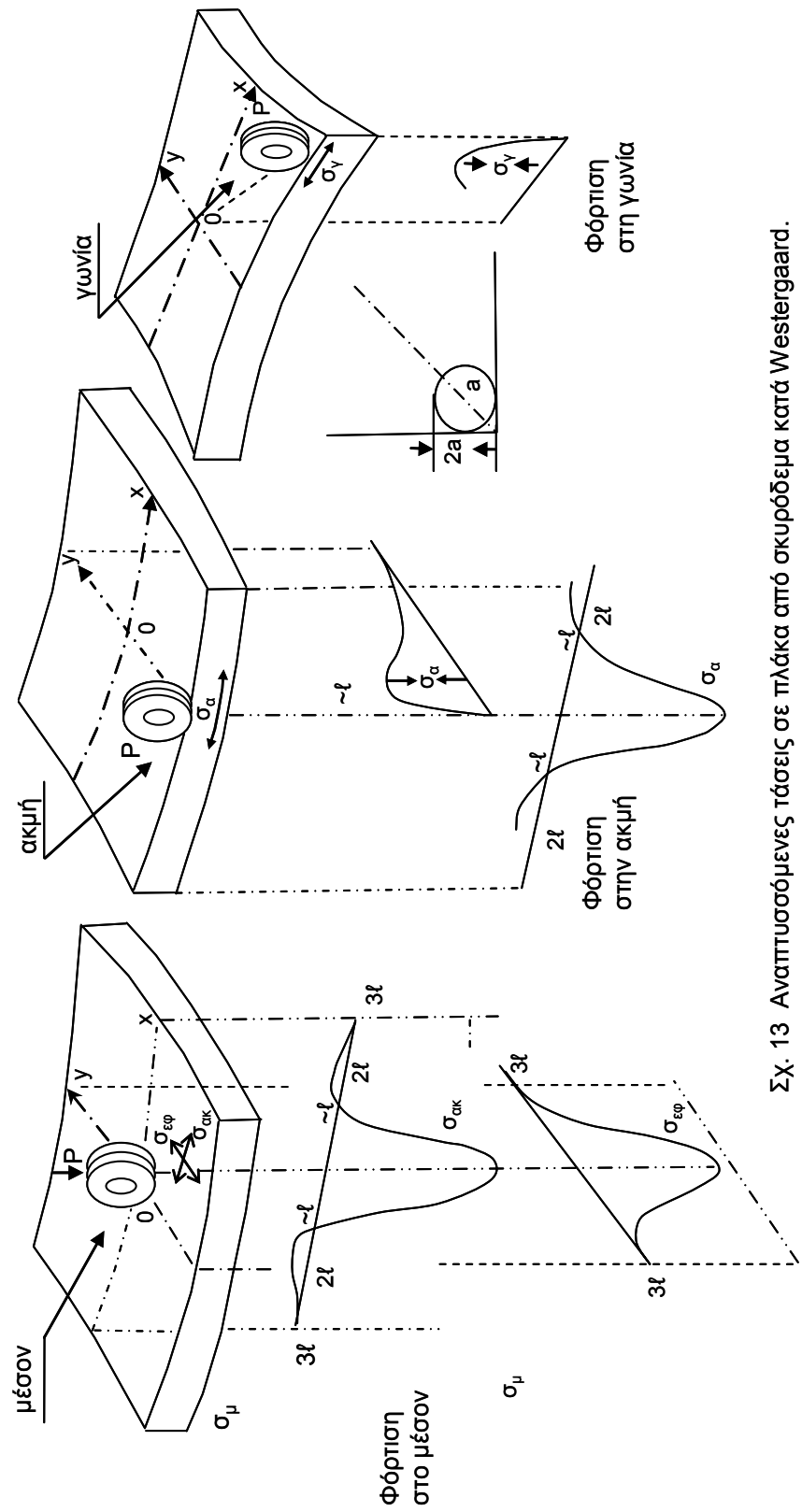
Φόρτιση στην ακμή με συγκεντρωμένο φορτίο

$$Y = \frac{1}{\sqrt{6}} (1 + 0,4 \mu) \frac{g}{kl^2}$$

Στο κέντρο του κύκλου επαφής  $\sigma_{ακ} = \sigma_{εφ} = \sigma_{μ}$        $b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + h^2} - 0,675 \cdot h$       [mm] για  $\alpha < 1,724 \cdot h$        $a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot \rho}}$

$$\sigma_{\mu} = \frac{0,275 \cdot P}{h^2} (1 + \mu) \cdot \left[ 1g \left( \frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) - 0,436 \right] \quad [N/mm^2] \quad \sigma_{\alpha} = \frac{0,529 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + 0,54\mu) \cdot \left[ 1g \left( \frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) + 1g \left( \frac{b}{1 - \mu^2} \right) - 2,484 \right] \quad [N/mm^2]$$

$$\sigma_{\gamma} = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left[ \frac{12(1 - \mu^2)k}{Eh^3} \right]^{0,15} \left[ a\sqrt{2} \right]^{p,6} \right\} \quad \ell = \left( \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2) \cdot k} \right)^{0,25}$$



ΣΧ. 13 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard.

όπου:

Q είναι το φορτίο του τροχού σε N

$\mu$  είναι ο λόγος του poisson του σκυροδέματος

E είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος σε Mpa η N/mm<sup>2</sup>

K είναι το μέτρο αντιστάσεως της στρώσεως έδρασης της πλάκας από

Σκυρόδεμα σε N/mm<sup>3</sup>

a είναι η ακτίνα επαφής του τροχού σε mm που λαμβάνεται ίση προς

$$a = (Q / p\pi)^{1/2}$$

b είναι διορθωμένη ακτίνα επαφής φορτίου με τιμή

b = a όταν  $a > 1,724 h$  και

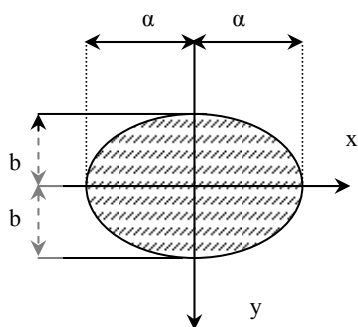
$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h \text{ όταν } a < 1,724 h \quad [\text{mm}]$$

είναι ακτίνα σχετικής ακαμψίας (η ελαστικό μήκος) και βρίσκεται από τη

$$\text{σχέση: } = \{E h^3 / [12 k(1 - \mu^2)]\}^{1/4}$$

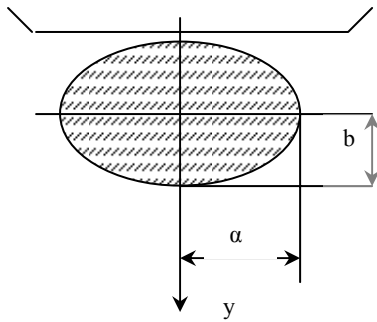
Από τις σχέσεις που παρέχουν τις τάσεις εκείνη που παρέχει την τάση στο μέσο έχει την καλύτερη ακρίβεια ενώ εκείνη για τη γωνία έχει τη μικρότερη ακρίβεια.

Ο Westergaard παρουσίασε το 1947 ανάλογες σχέσεις που παρέχουν τις τάσεις για ελλειπτική επιφάνεια επαφής που πλησιάζει περισσότερο τις επιφάνειες επαφής των ελαστικών ορισμένων αεροπλάνων. Οι σχέσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

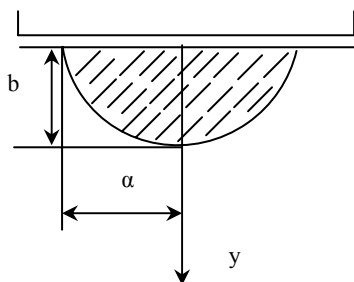


$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{3P}{8\pi h^2} \left[ (1 + \mu) 1\eta \frac{Eh^3}{\left(\frac{a+b}{2}\right)^4} = 2(1 - \mu) \frac{a-b}{a+b} \right]$$





$$\sigma_r = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[ 1\eta \frac{Eh^2}{100k \left(\frac{a+b}{2}\right)^4} + 1.84 - \frac{4}{3}\mu + (1+\mu)\frac{a-b}{a+b} + 2(1-\mu) \frac{ab}{(a+b)^2} + 1.18(1+2\mu)\frac{b}{l} \right]$$



$$\sigma_f = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[ 1\eta \frac{Eh^3}{100C \left(\frac{a+b}{2}\right)^4} + 3.84 - \frac{4}{3}\mu - (1-\mu)\frac{a-b}{a+b} + 0.5(1+2\mu)\frac{b}{l} \right]$$

όπου:

P είναι το φορτίο του τροχού εκτός από την Τρίτη σχέση που αφορά φόρτιση με μισή επιφάνεια επαφής στην ακμή οπότε P είναι το ήμισυ του φορτίου του τροχού.

Η στατική ανάλυση των τάσεων και των υποχωρήσεων που παρουσίασε ο Westergaard βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

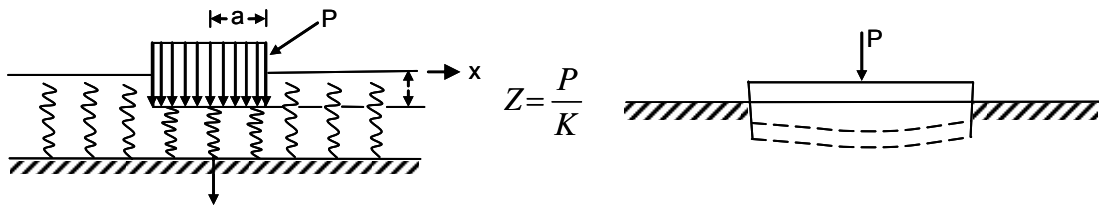
- Η πλάκα του σκυροδέματος είναι ελαστική ομογενής και ισότροπη.

- Οι αντιδράσεις της στρώσης στην οποία εδράζεται η πλάκα είναι μόνον κατακόρυφες (δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις) και είναι ανάλογες των υποχωρήσεων. Οι παραδοχές αυτές (ισοδυναμούν με έδραση της πλάκας σε μία σειρά απείρων ελατηρίων (έδαφος τύπου Winkler). Η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά των συμπυκνωμένων εδαφικών υλικών, βλ. Σχ. 14, αλλά θεωρείται ότι στις εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν επιφέρει σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα.

- Οι υποχωρήσεις της πλάκας και του εδάφους είναι συμβιβαστές, η πλάκα βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το έδαφος. Η παραδοχή αυτή, αντίθετα με την προηγούμενη, είναι δυνατόν να επιφέρει σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα γιατί έχει διαπιστωθεί ότι η πλάκα, λόγω κυρίως θερμοκρασιακών διαφορών (αλλά και υγρομετρικών), δεν βρίσκεται σε επαφή με την υποκείμενη για ένα σημαντικό ποσοστό του 24ώρου. Αυτός είναι και ο λόγος των διαφόρων τροποποιήσεων των εξισώσεων Westergaard που προαναφέρθηκαν.

Οι Hogg και Hall παρουσίασαν λύσεις του προβλήματος πλάκας εδραζόμενης σε ελαστικό ημίχωρο και οι Pickett και Ray επεξεργάζονταν τις εργασίες των Westergaard και Hogg και παρουσίασαν τις γνωστές επιφάνειες επιρροής για τον υπολογισμό των τάσεων και των υποχωρήσεων για φόρτιση στο μέσον και στην ακμή από ομάδες φορτίων ή φορτίων με οποιαδήποτε επιφάνεια επαφής για έδαφος έδρασης τύπου Winkler, Σχ. 15-17, και για ελαστικό ημίχωρο, Σχ. 18. Οι Jeuffroy και Bachelez παρουσίασαν λύσεις του προβλήματος πλάκας εδραζόμενης σε δύο ελαστικές στρώσεις (η κατώτερη ελαστικός ημίχωρος) αλλά δεν έδωσαν διαγράμματα υπολογισμού των τάσεων στην περίπτωση φορτίσεως στην ακμή της πλάκας. (Άλλωστε, θα πρέπει να τονισθεί, ότι όταν το μαθηματικό προσομοίωμα αποτελείται από περισσότερες από δύο επάλληλες στρώσεις ή πλάκες, αποκτά τόσες πολλές παραμέτρους που η παρουσίαση λύσεων υπό μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων δεν είναι πια πρακτική).

Η ανάλυση της εντατικής καταστάσεως με τη βοήθεια των προγραμμάτων H/Y, που βασίζονται στην ακριβέστερη θεωρία των ελαστικών επάλληλων στρώσεων (Burmister) όπως πχ. ELSYM, BISAR, CHEVRON, ALIZE III κλπ., παρέχει επιπλέον τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό η ύπαρξη πολλών στρώσεων κάτω από τη στρώση του σκυροδέματος. Εντούτοις, τα προγράμματα αυτά δεν έχουν γενική εφαρμογή στην περίπτωση των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα διότι δεν παρέχεται η δυνατότητα ανάλυσεως στις περιπτώσεις φορτίσεως στα άκρα (ακμή) που είναι και η δυσμενέστερη συνήθως περίπτωση φορτίσεως. Μία μέθοδος παρακάμψεως αυτής της δυσκολίας θα μπορούσε να είναι ο υπολογισμός της τάσεως στο μέσον της πλάκας με τη βοήθεια της θεωρίας των ελαστικών επάλληλων στρώσεων (προγράμματα H/Y) και η εκτίμηση της τάσεως στην ακμή εάν ο λόγος  $\sigma_a/\sigma_\mu$  ήταν σταθερός. Ο λόγος όμως αυτός εξαρτάται από το ελαστικό μήκος (δηλ. από τα  $h$ ,  $k$ ,  $E$  και  $\mu$ ) και την ακτίνα επαφής  $b$  του τροχού και έχει τιμές για συνήθεις περιπτώσεις δρόμων από 1,30 μέχρι 1,40 περίπου.



Έδαφος τύπου Winkler



Ελαστικός ημίχωρος

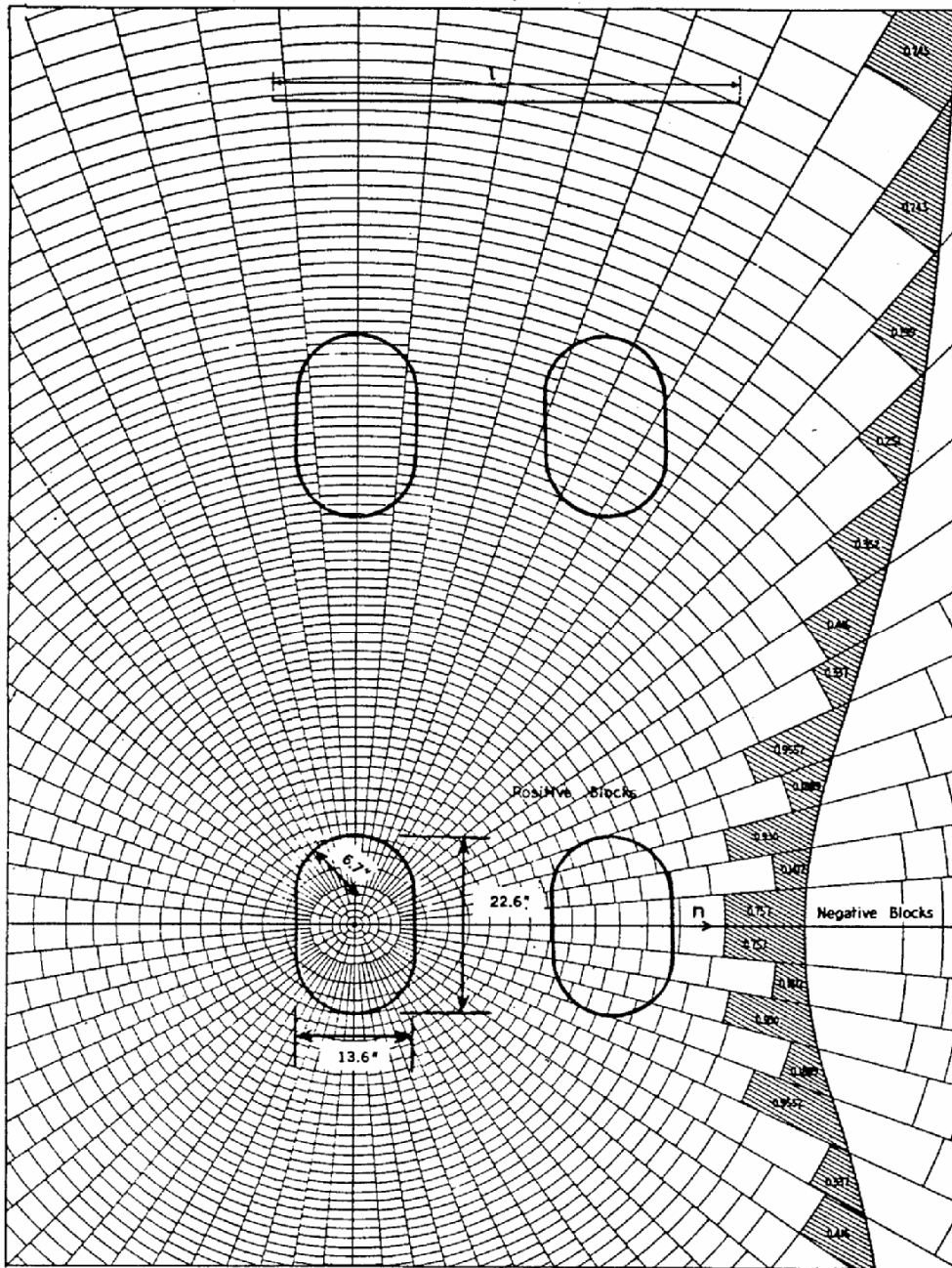
Σχ. 14 Έδαφος τύπου Winkler και ελαστικός ημίχωρος

$$M = \frac{pl^2 N}{10,000}$$

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

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

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}$$



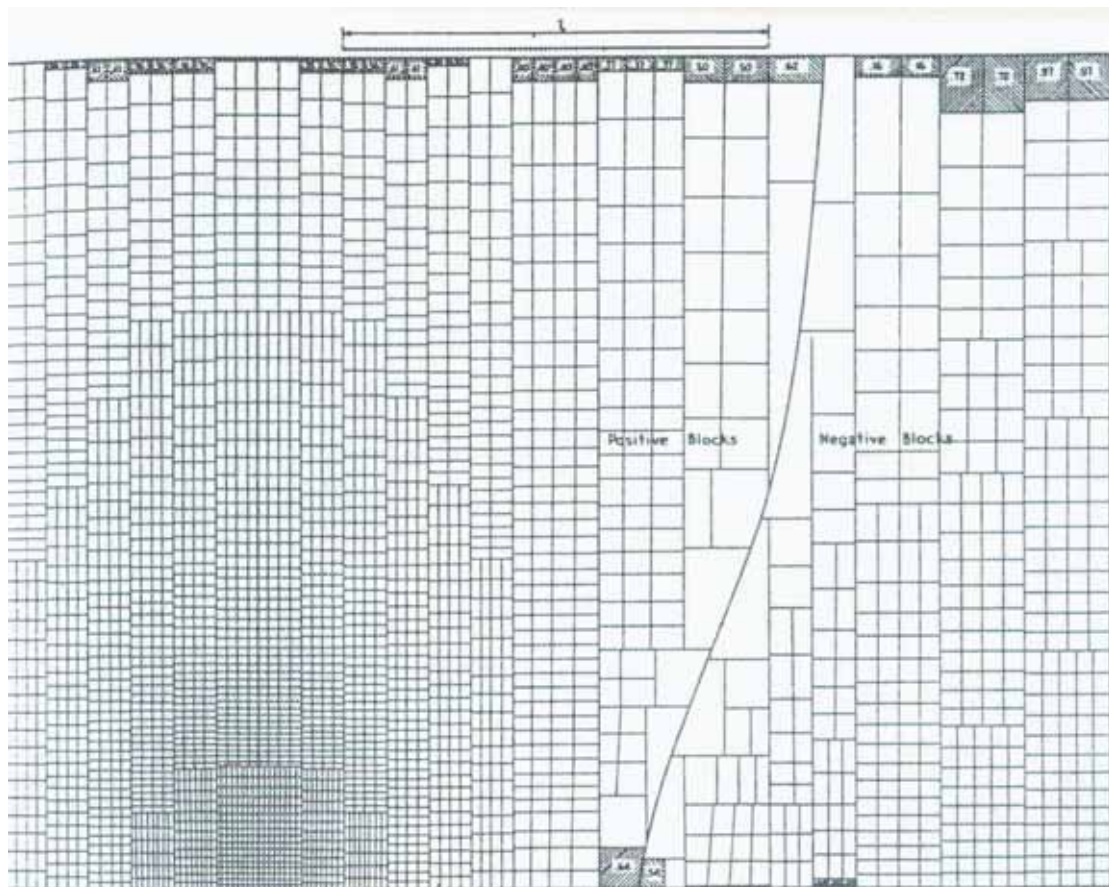
Σχ. 15 Επιφάνεια επιρροής Pickett και Ray για φόρτιση μακριά από τα άκρα. Υπολογισμός τάσεως στο σημείο A. Έδαφος Winkler.

$$M = \frac{pl^2N}{10,000}$$

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

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

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}$$



Σχ. 16 Επιφάνεια επιρροής Pickett και Ray για υπολογισμό τάσεως για φόρτιση στην ακμή (σημείο 0). Έδαφος Winkler.

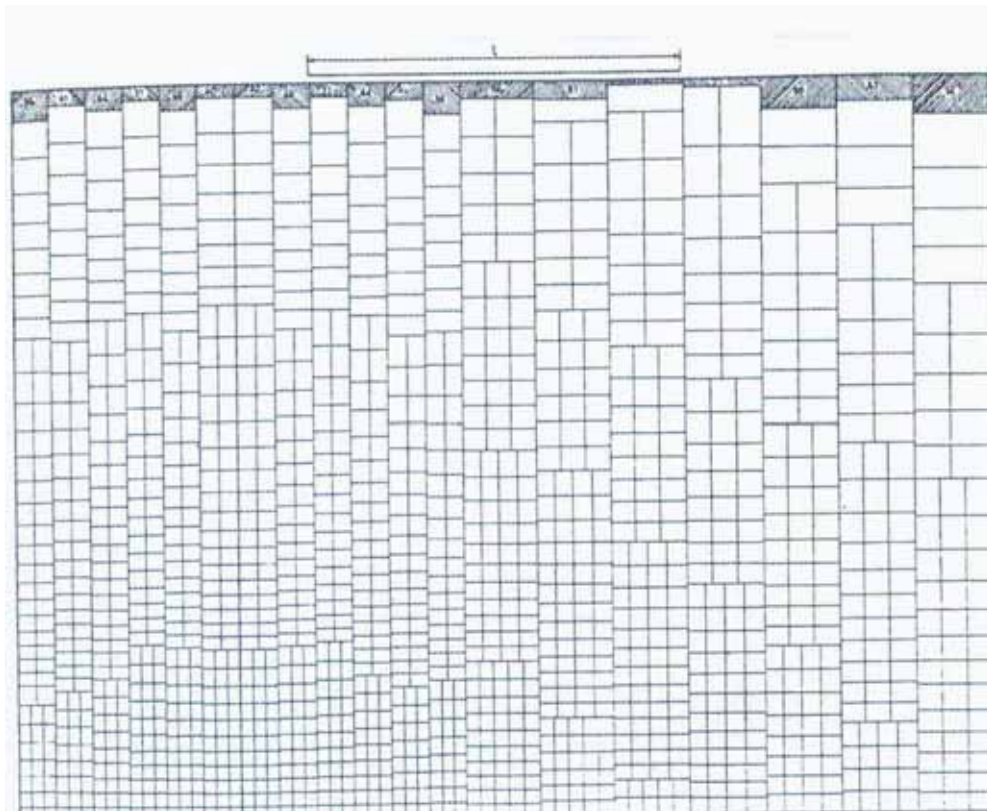
$$W = \frac{0.0005pl^4N}{D}$$

$$M = \frac{pl^2N}{10,000}$$

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

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

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}$$



Σχ. 17 Επιφάνεια επιρροής Pickett και Ray για υπολογισμό υποχώρησης στην ακμή. Έδαφος Winkler.

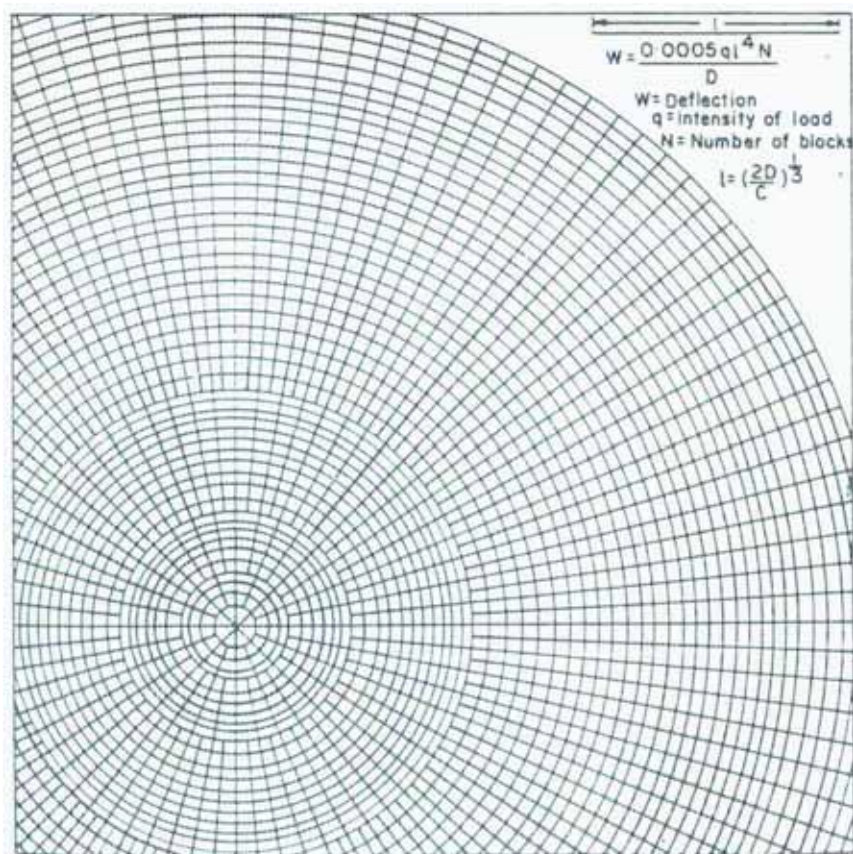
$$W = \frac{0.0005 pl^4 N}{D}$$

$$M = \frac{pl^2 N}{10,000}$$

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

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

$$\sigma = \frac{6M}{h^2}$$



Σχ. 18 Επιφάνεια επιρροής Pickett και Ray για υπολογισμό υποχωρήσεων. Έδαφος: Ελαστικός Ημίχωρος.



Τα μαθηματικά προσομοιώματα πλάκας εδραζόμενης σε ελαστική στρώση (ελαστικό ημίχωρο) ή πλάκας εδραζόμενης σε έδαφος τύπου Winkler (άπειρα ελατήρια), αλλά και εκείνα των ελαστικών επάλληλων στρώσεων έχουν γενικά το μειονέκτημα ότι προϋποθέτουν πλήρη επαφή των στρώσεων μεταξύ τους, γεγονός που (όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως) δεν ανταποκρίνεται προς την πραγματική συμπεριφορά της πλάκας από σκυρόδεμα.

Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί μηχανικά προσομοιώματα πλακών εδραζόμενων σε μία ή περισσότερες στρώσεις με πεπερασμένα στοιχεία (πχ. Tabatabaie και Huang και Wang) και «συζευγμένα» προσομοιώματα (coupled models) με συνδυασμό προσομοιωμάτων από πεπερασμένα στοιχεία και από επάλληλες ελαστικές στρώσεις (Majidzadeh et al) με τα οποία είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη ποικιλία στοιχείων όπως, η ύπαρξη συνεργασίας μεταξύ πλακών μέσω βλήτρων ή τórμου και εντορμίας, η αλληλεπίδραση των γειτονικών πλακών, τυχόν κενά κάτω από τμήμα της πλάκας, διαφορές θερμοκρασίας κ.α. Τα προγράμματα αυτά δεν είναι ευρύτερα διαθέσιμα και δεν χρησιμοποιούνται ακόμα στην πράξη αλλά για ερευνητικούς περισσότερο σκοπούς.

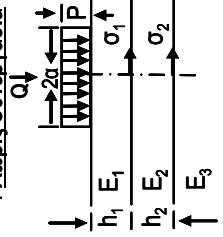
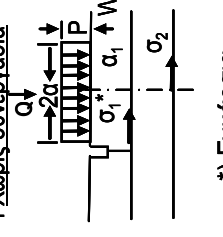
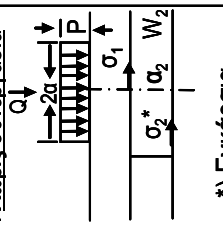
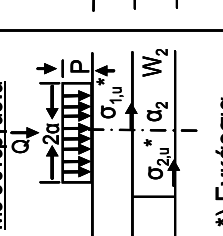
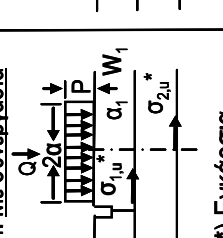
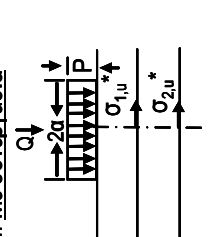
Η μέθοδος Eisenmann, που συνοψίζεται στον Πίνακα 1, παρέχει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη, κατά προσεγγιστικό τρόπο, η ύπαρξη στρώσεως υποβάσεως κάτω από την πλάκα και μάλιστα για τις περιπτώσεις πλήρους συνεργασίας και μηδενικής συνεργασίας μεταξύ των δύο στρώσεων (πλήρης και μηδενική συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων). Επίσης είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη και η ύπαρξη ρωγμής στην υπόβαση ή αρμού στην πλάκα. Θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της πρακτικής και απλής μεθόδου με τα αποτελέσματα των ακριβέστερων και πολυπλοκότερων μεθόδων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Ο υπολογισμός των τάσεων και των υποχωρήσεων για φόρτιση με δύο ή περισσότερα φορτία μπορεί να γίνει με τη βοήθεια είτε των επιφανειών επιρροής των Pickett and Ray, που ήδη αναφέρθηκαν, είτε των γραμμών επιρροής που δίνονται στο Σχ. 19.

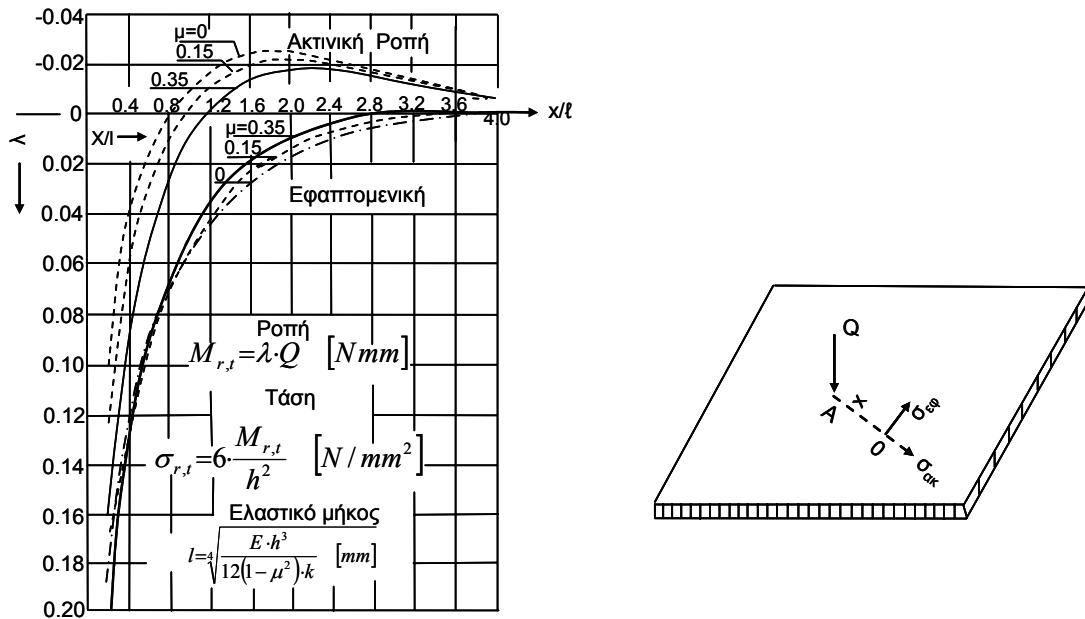
(Σχετικά παραδείγματα υπολογισμού δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ1.)



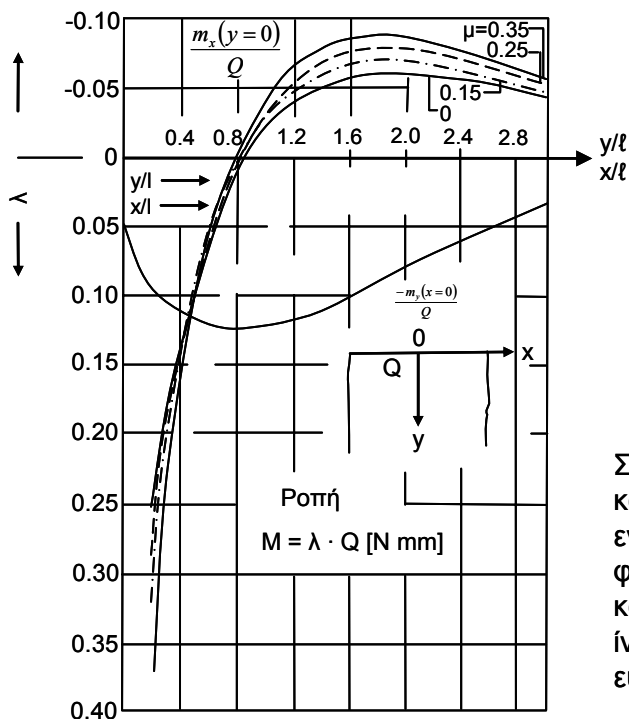
Πίνακας 1. Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού τάσεων σε σύστημα πλάκας, από σκυρόδεμα, υποβάσειως και ελαστικού ημίσφαιρου, κατά Eisenbaum.

$\alpha_1 E_1 \geq E_2 \gg E_3$ $E_1 \geq \alpha_2 E_2 \gg E_3$ $E_1 \cdot h_1^3 > 0,4 \cdot \alpha \cdot E_2 \cdot h_2^3$	I Χωρίς συνενεργασία 	I Χωρίς συνενεργασία 	I Χωρίς συνενεργασία 	II Με συνενεργασία 	II Με συνενεργασία 	II Με συνενεργασία 
Φόρτιση	*) Εγκάρσια -Μέσον πλάκας 1η Στρώση	*) Εγκάρσια -Μέσον πλάκας 2η Στρώση με διαμετρική ρωγμή	*) Εγκάρσια -Μέσον πλάκας 2η Στρώση	*) Εγκάρσια -Μέσον πλάκας 1η Στρώση	*) Εγκάρσια -Μέσον πλάκας 1η Στρώση	ρωγμή
$k = E_3 / h^*$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}}$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_2}{E_3}}}$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_2}{E_3}}}$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_1 + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}}{E_3}}$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_1 + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}}{E_3}}$	$h^* = 0,83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}}$
Μέτρο E του ισοδύναμου συστήματος	$\alpha \cdot E_1$	$E_1$	$E_1$	$\alpha \cdot E_1$	$\alpha \cdot E_1$	$E_1$
Πάχος του ισοδύναμου συστήματος	$h_1 = \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{\alpha \cdot E_1}}$	$h_1 = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}}$	$h_{II} = h_1 + 0,9 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_2}{E_1}}$	$h_{II} = h_1 + 0,9 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{a \cdot E_2}{E_1}}$	$h_{II} = h_1 + 0,9 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}$	$h_{II} = h_1 + 0,9 \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}$
Φορτίο για την ακμή συστήματος	$Q \cdot [1 - W/200]$	$Q \cdot [1 - W/200]$	$Q \cdot [1 - W/200]$	$Q \cdot [1 - W/200]$	$Q \cdot [1 - W/200]$	$Q \cdot [1 - W/200]$
Ροπή	$M_1 = M_f \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$	$M_1 = M_f \cdot \frac{a \cdot E_1 \cdot h_1^3}{a \cdot E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$	$M_1 = M_f \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + a \cdot E_2 \cdot h_2^3}$	$M_1 = M_f \cdot \frac{E_2 \cdot h_2^3}{\alpha \cdot E_1}$	$M_1 = M_f \cdot \frac{E_2}{\alpha \cdot E_1}$	$M_1 = M_f \cdot \frac{E_2}{E_1}$
Τάση	$M_2 = M_f \cdot \frac{E_2 \cdot h_2^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$	$M_2 = M_f \cdot \frac{E_2 \cdot h_2^3}{a \cdot E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}$	$M_2 = M_f \cdot \frac{a \cdot E_2 \cdot h_2^3}{E_1 \cdot h_1^3 + a \cdot E_2 \cdot h_2^3}$	$\sigma_{1,\mu} = \frac{M_{II}}{J} (h_1 - e_0)$ $\sigma_{2,\mu} = \kappa \cdot \frac{M_{II}}{J} \cdot e_u$	$\sigma_{1,\mu} = \frac{M_{II}}{J} (h_1 - e_0)$ $\sigma_{2,\mu} = \kappa \cdot \frac{M_{II}}{J} \cdot e_u$	$\sigma_{1,\mu} = \frac{M_{II}}{J} (h_1 - e_0)$ $\sigma_{2,\mu} = \kappa \cdot \frac{M_{II}}{J} \cdot e_u$

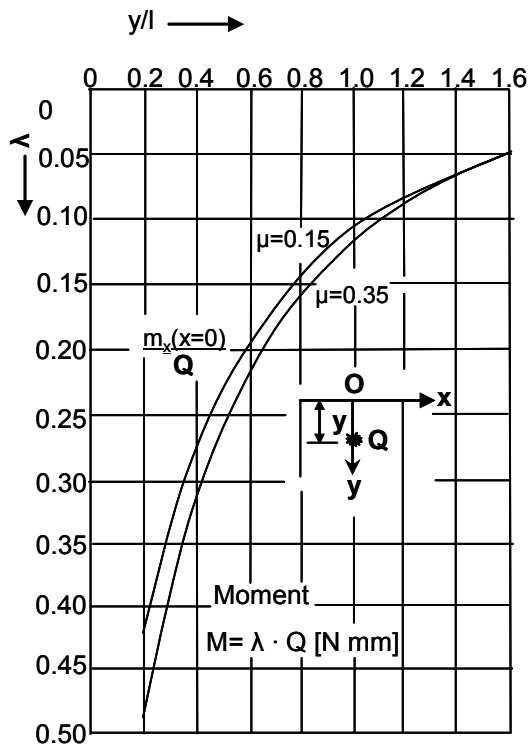
$W =$  Βαθμός συνενεργασίας στη ρωγμή %  
 $C = \begin{cases} 0,83 & \text{Κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες υλικά} \\ 0,90 & \text{ασφραλιστομίγματα} \end{cases}$



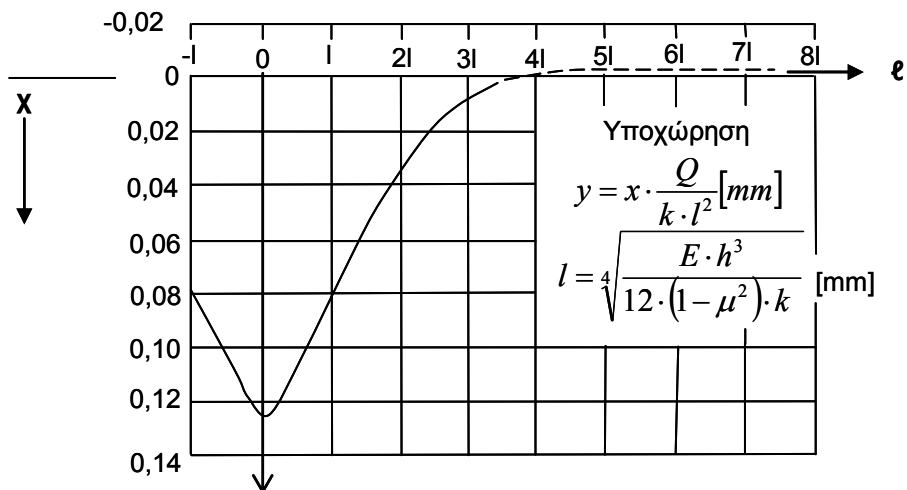
Σχ. 19α Γραμμή επιρροής για υπολογισμό τάσεως στο μέσον.



Σχ. 19β Διαγράμματα ροπών (τάσεων) κατά τη διεύθυνση της ακμής (X) και εγκάρσια προς αυτή (Y) για σημειακή φόρτιση στο O κατά Gnad. Η ροπή κατά τη διεύθυνση Y εφελκύει την άνω ίνα της πλάκας. (Για λόγους ευκρίνειας σχεδιάστηκε η-η<sub>γ</sub>)



Σχ. 19γ. Γραμμή επιρροής της ροπής κάμψεως κατά τη διεύθυνση της ακμής (X) για φορτίο μετακινούμενο κατά τη διεύθυνση Y κατά Grad. Είναι φανερό ότι οι τάσεις εφελκυσμού στον πυθμένα της πλάκας μειώνονται σημαντικά όσο το φορτίο απομακρύνεται από την ακμή.



Σχ. 19δ Γραμμή επιρροής για υπολογισμό υποχώρησης στο μέσον

#### 4.2 Επιπόνηση από θερμοκρασιακές μεταβολές

Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας μπορεί να αναλυθεί σε «ομοιόμορφη» (ορθογωνική) , «τριγωνική» και «καμπυλόγραμμη» (Σχ. 20). Οι ευθύγραμμες κατανομές θερμοκρασίας (ομοιόμορφη και τριγωνική) δεν προκαλούν ανάπτυξη τάσεων παρά μόνο όταν οι παραμορφώσεις (μετακινήσεις) που προκαλούνται από την συστολοδιαστολή του σκυροδέματος παρεμποδίζονται (βλ. παράδειγμα 1). Παρεμπόδιση μετακίνησης μπορεί να προκληθεί από διάφορους λόγους όπως από την τριβή μεταξύ πλάκας και υποστρώματος, από το ίδιο βάρος κτλ.

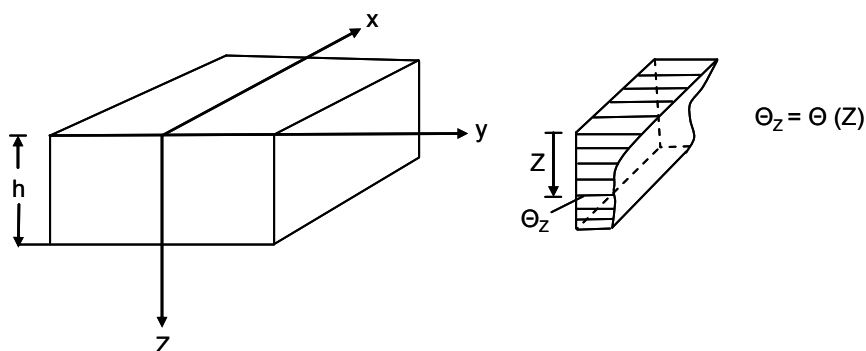
Η «καμπυλόγραμμη» κατανομή της θερμοκρασίας προκαλεί ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων (αυτεντατική κατάσταση) όπως φαίνεται στο Σχ. 21 (βλ. παράδειγμα2).

Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι τάσεις που προκαλούνται από παρεμποδιζόμενη, λόγω ίδιου βάρους, μετακίνηση (ανύψωση) της πλάκας από «τριγωνική» κατανομή θερμοκρασίας.

Παρατηρείται ότι στην κάτω ίνα της πλάκας (που αναπτύσσονται οι μέγιστες καμπτικές τάσεις από φορτία) η επαλληλία των τάσεων από ευθύγραμμη και από καμπυλόγραμμη κατανομή των θερμοκρασιών είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ευνοϊκή. Πράγματι στις τρεις πρώτες περιπτώσεις οι τάσεις είναι είτε ετερόσημες (1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup>), είτε θλιπτικές (3<sup>η</sup>) και μόνο στην 4<sup>η</sup> περίπτωση (κυρτή κατανομή με  $\theta$  μέσον  $>$   $\theta$  άνω  $>$   $\theta$  κάτω) αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις κύρτωσης και εφελκυστικές εσωτερικές τάσεις (αυτεντατική κατάσταση λόγω καμπυλόγραμμης κατανομής). Η περίπτωση αυτή της κατανομής αναπτύσσεται συνήθως όταν η επιφάνεια της πλάκας ψυχθεί σχετικά απότομα (πχ. απογευματινή βροχή σε επιφανειακά θερμή αρχικώς πλάκα) γεγονός που δεν είναι συχνό. Για το λόγο αυτό, αλλά και επειδή γενικά δεν παρουσιάζονται έντονα καμπυλόγραμμες κατανομές, οι τάσεις αυτές συνήθως παραλείπονται «επί το δυσμενέστερον».

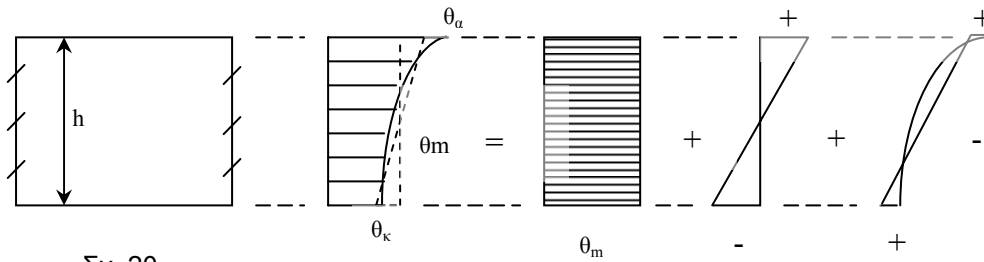
Ο υπολογισμός της επιπόνησης από θερμοκρασιακές τάσεις συνήθως περιορίζεται στον υπολογισμό των τάσεων από ευθύγραμμη κατανομή της θερμοκρασίας.

Εφ' όσον οι μετακινήσεις δεν παρεμποδίζονται, οι θερμοκρασιακές τάσεις σε μία πλάκα της οποίας η θερμοκρασία μεταβάλλεται μόνο κατά την έννοια του πάχους, Σχ. 22 =  $\theta_z = \theta(Z)$ , δίνονται (Timosenko) από την σχέση:



Σχ. 22

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{Ea}{1-\mu} \left[ \theta(Z) - \frac{1}{h} \int_0^h \theta(Z) dZ - \frac{12(h/2 - Z)}{h^3} \int_0^h (h/2 - Z) \theta(Z) dZ \right]$$



Σχ. 20

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΤΑΣΕΙΣ	
	εσωτερικές (καμπυλόγραμμη κατανομή)	κύρτωσης (ευθύγραμμη κατανομή παρεμποδιζόμενη μετακίνηση)

Εσωτερικές τάσεις: Αναπτύσσονται λόγω καμπυλόγραμμης κατανομής θερμοκρασίας ανεξάρτητα από το αν παρεμποδίζεται ή όχι η παραμόρφωση (αυτεντατική κατάσταση).

Τάσεις κύρτωσης: Αναπτύσσονται μόνο όταν παρεμποδίζεται η παραμόρφωση της πλάκας. (Το ίδιο βάρος παρεμποδίζει την παραμόρφωση).

Σχ. 21 Τάσεις από «καμπυλόγραμμη» και από «τριγωνική» κατανομή θερμοκρασιών.

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής διαστολής του υλικού.

Αν η αρχή των συντεταγμένων μεταφερθεί στο «μέσο επίπεδο» της πλάκας η σχέση αυτή γίνεται:

$$\sigma_x = \sigma_y = -\frac{E\alpha}{1-\mu} \left[ \theta(Z) - \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(Z) dZ - \frac{12Z}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \theta(Z) Z dZ \right]$$

### Παράδειγμα 1

Ευθύγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας.  $\theta_z = \theta_0 k z$

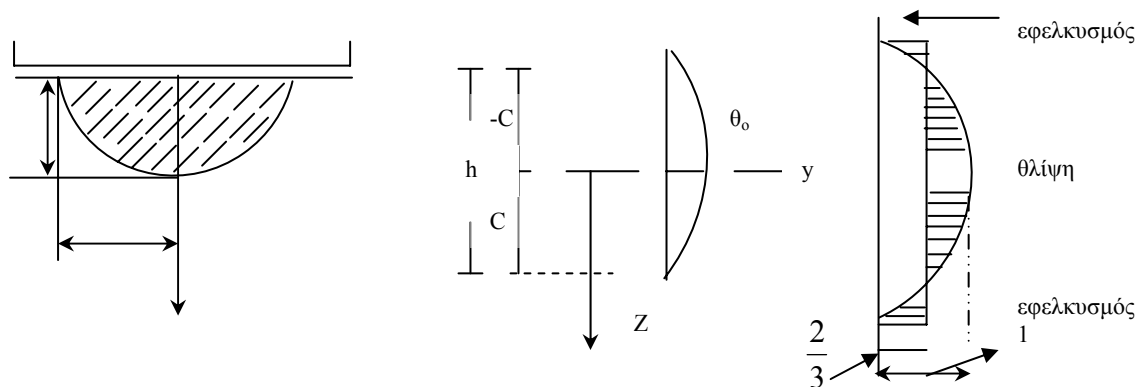
$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= -\frac{E\alpha\theta_0 k}{1-\mu} \left[ Z - \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} Z dZ - \frac{12Z}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} Z^2 d^2 \right] \\ &= - \left[ Z - \frac{1}{h} \left[ \frac{Z^2}{2} \right]_{-h/2}^{h/2} - \frac{12Z}{h^3} \left[ \frac{Z^3}{3} \right]_{-h/2}^{h/2} \right] \\ &= [Z - 0 - Z] = 0 \end{aligned}$$

Αποδεικνύεται έτσι και θεωρητικά, ότι η ευθύγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας δεν προκαλεί τάσεις σε πλάκα που οι μετακινήσεις της δεν παρεμποδίζονται.

### Παράδειγμα 2

Καμπυλόγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Κατανομή παραβολική:  $\theta_z = \theta_0 (1 - z^2/c^2)$  όπου  $c = h/2$



$$\begin{aligned}
6_x = 6_y &= -\frac{E_a \Theta_o}{1-\mu} \left[ 1 - \frac{Z^2}{C^2} - \frac{1}{2C} \int_{-c}^c \left( 1 - \frac{Z^2}{6^2} \right) dZ - \frac{3 \cdot z}{2 C^3} \int_{-c}^c \left( 1 - \frac{Z^2}{C^2} \right) z dZ \right] \\
&= -\frac{Ea\theta o}{1-\mu} \left[ 1 - \frac{Z^2}{C^2} - \frac{1}{2C} \left( 2C - \frac{2C^3}{3C^2} \right) - o \right] \\
&= \frac{Ea\theta o}{1-\mu} \left\{ \frac{2}{3} - \left( 1 - \frac{Z^2}{C^2} \right) \right\}
\end{aligned}$$

#### 4.2.1 Τάσεις από ομοιόμορφη θερμοκρασία

Αν η κατανομή της θερμοκρασίας είναι ομοιόμορφη κατά τη διεύθυνση του πάχους της πλάκας και παρεμποδίζεται η μετακίνηση κατά τους άξονες «X» και «Y» ενώ δεν παρεμποδίζεται η μετακίνηση κατά «Z» (Σχ. 24) οι αναπτυσσόμενες τάσεις βρίσκονται από τις γενικές σχέσεις:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)]$$

θέτοντας  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -a \cdot \Delta\Theta$  και  $\sigma_z = 0$

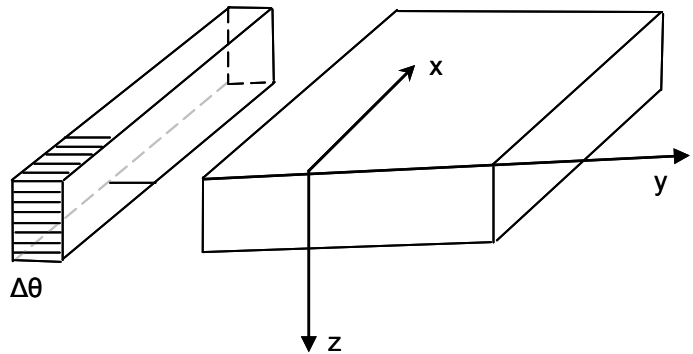
οπότε

$$-E a \cdot \Delta\Theta = \sigma_x - \mu \sigma_y$$

Σχ. 24

$$\left. \begin{array}{l} -E a \cdot \Delta\Theta = \sigma_x - \mu \sigma_y \\ -E a \cdot \Delta\Theta = \sigma_y - \mu \sigma_x \end{array} \right\} \sigma_x = \sigma_y = \frac{-1}{1-\mu} E \cdot a \cdot \Delta\Theta$$

$$-E a \cdot \Delta\Theta = \sigma_y - \mu \sigma_x$$



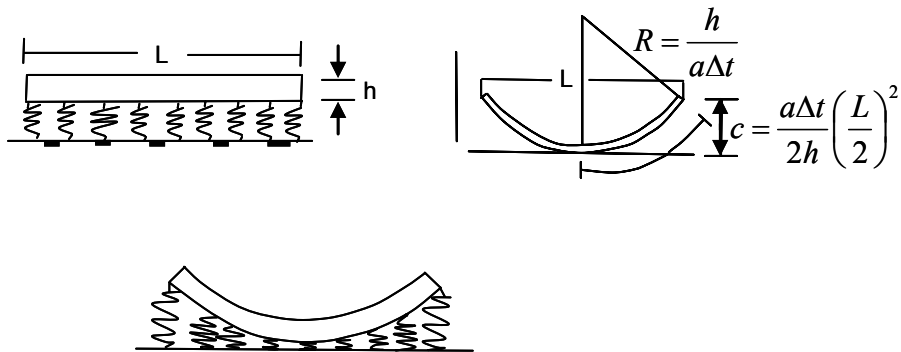
Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 δίνονται παραδείγματα υπολογισμού τάσεων για αύξηση και για μείωση της μέσης θερμοκρασίας.

#### 4.2.2 Τάσεις από τριγωνική μεταβολή της θερμοκρασίας

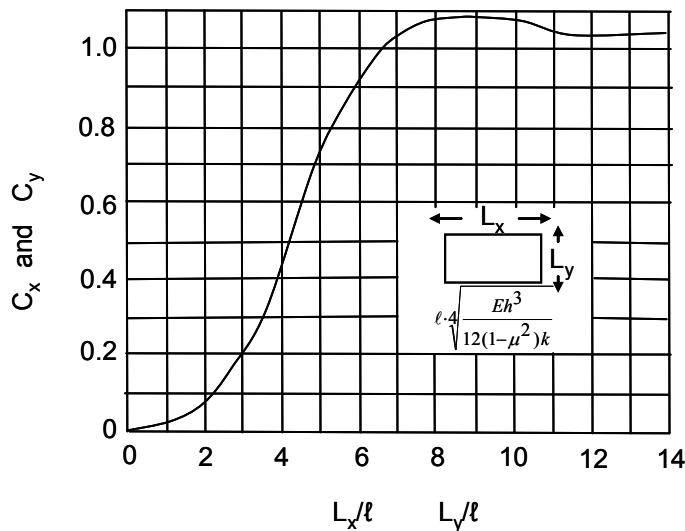
Ο Westergaard παρουσίασε εξισώσεις που δίνουν τις θερμοκρασιακές τάσεις, σε αβαρή πλάκα εδραζόμενη συνεχώς επί ελατηρίων (έδαφος Winkler) για την περίπτωση ευθύγραμμης μεταβολής της θερμοκρασίας, κατά την έννοια του πάχους της πλάκας για θερμοκρασία επιφάνειας μικρότερη της θερμοκρασίας του πυθμένα (Σχ. 25). Ο υπολογισμός διευκολύνεται με τη χρήση συντελεστών  $C_x$ ,  $C_y$ , και  $C$  που δίνονται στο Σχ. 26 (Bradbury).

Θα πρέπει όμως να παρατηρηθεί ότι η περίπτωση που η θερμοκρασία της επιφάνειας της πλάκας είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του πυθμένα, αφορά κυρίως τις νυχτερινές ώρες, που συνήθως η κυκλοφορία είναι μικρότερη. Επίσης η ανά μονάδα πάχους διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta t = (\theta_a - \theta_k) / h$ ) είναι πολύ μικρότερη (περίπου κατά 50%) κατά τις νυχτερινές ώρες από εκείνες της ημέρας. Επίσης η παραδοχή ότι η πλάκα βρίσκεται σε επαφή συνεχώς με το έδαφος τύπου Winkler δηλ. με τα «ελατήρια», σημαίνει ότι τα τμήματα της πλάκας τα οποία λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς κυρτώνονται προς τα πάνω (ανασηκώνονται), υφίστανται ελκτική προς τα κάτω δύναμη που εξασκείται από τα ελατήρια. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη με το μέγεθος της προς τα πάνω μετακίνησης. Η εντατική αυτή κατάσταση διαφέρει σημαντικά από την πραγματική.

Η προσεγγιστική μέθοδος Eisenmann, που θα αναπτυχθεί, παρ' όλες τις προσεγγιστικές παραδοχές στις οποίες στηρίζεται, χάρις κυρίως στην απλότητά της, έχει ευρύτερη εφαρμογή στη Γερμανία και επίσης σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες.



Σχ. 25 Παραδοχές υπολογισμού θερμοκρασιακών τάσεων κατά Westergaard



Τάσεις στη μέση:

$$\sigma_x = \frac{\alpha E \Delta t}{2} h \cdot \frac{c_x + \mu c_y}{1 - \mu^2}$$

$$\sigma_y = \frac{\alpha E \Delta t}{2} h \cdot \frac{c_y + \mu c_x}{1 - \mu^2}$$



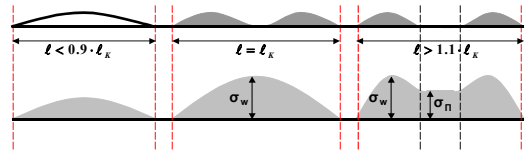
Τάσεις στην ακμή:

$$\sigma_x = c_x \frac{\alpha E \Delta t}{2} h$$

Σχ. 26 Υπολογισμός θερμοκρασιακών τάσεων κατά Bradbury



Πίνακας 2 Βασικές σχέσεις για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών τάσεων κατά Eisenmann. Τάσεις στον πυθμένα της πλάκας μακριά από τα άκρα.

 <b>ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΠΛΑΚΑ</b>	 <b>ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΠΛΑΚΑ</b>	<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Μονάδες: mm, N, N/mm<sup>2</sup></li> <li>• Για τον υπολογισμό των τάσεων στην εγκάρσια έννοια γίνεται αντιστροφή των L και B</li> <li>• Οι τάσεις στην ακμή μπορούν να μειωθούν κατά 15%</li> </ul>
$\frac{L}{B} > 1.2$ ή $\frac{L}{B} < 0.8$	$0.8 \leq \frac{L}{B} \leq 1.2$	
$\ell_k = 200 \cdot h \sqrt{a \cdot \Delta t \cdot E}$	$\ell_k = 228 \cdot h \sqrt{a \cdot \Delta t \cdot E}$	
$L - \frac{2}{3} \cdot C \geq 0.9 \cdot \ell_k$	$\sigma_w = 1.2 \cdot \sigma_{\pi}$	
$L - \frac{2}{3} \cdot C \leq 0.9 \cdot \ell_k$	$\sigma = \left[ \frac{L - \frac{2}{3} \cdot C}{0.9 \cdot \ell_k} \right]^2 \cdot \sigma_{\pi} = \left[ \frac{L - 400}{0.9 \cdot \ell_k} \right]^2 \cdot \sigma_{\pi} \text{ [MPa]}$	
$\sigma_{\pi} = \frac{1}{2(1-\mu)} \cdot a \cdot \Delta t \cdot h \cdot E, \text{ [MPa]}$		
		

Αν η θερμοκρασιακή κατανομή σε μία πλάκα είναι ευθύγραμμη και η θερμοκρασία στην πάνω επιφάνεια είναι μεγαλύτερη εκείνης της κάτω επιφάνειας, η πλάκα θα κυρτωθεί και η περιοχή περί το μέσον του μήκους της θα ανυψωθεί και θα εδράζεται μόνο σε μία περιοχή περί τα άκρα της. Στην μετακίνηση αυτή αντιδρά το ίδιο το βάρος της πλάκας που κάμπτεται την πλάκα, προκαλεί ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στην κάτω ίνα της και δημιουργεί βέλος κάμψεως που τείνει να κατεβάσει την πλάκα στο μέσον της. Αν θεωρηθεί ότι το μήκος της πλάκας μεταβάλλεται, υπάρχει ένα ορισμένο μήκος,  $1k$ , που ονομάζεται «κρίσιμο» για το οποίο η πλάκα θα εφάπτεται με το έδαφος στο μέσον του μήκους της. Αν το μήκος της πλάκας εξακολουθήσει να αυξάνει, τότε μία μεγαλύτερη περιοχή περί το μέσον της θα βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος.

Οι διαδοχικές μορφές της πλάκας φαίνονται στο σχήμα που είναι ένθετο στον Πίνακα 2.

Ο Eisenmann με προσεγγιστικές παραδοχές ως προς την έδραση της πλάκας και ως προς τον τρόπο υπολογισμού των βελών, λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής και λόγω ίδιου βάρους, κατέληξε στις απλές σχέσεις που δίνονται στον Πίνακα 2.

Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με τις σχέσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 ανάλογα με το αν η πλάκα χαρακτηριστεί «ορθογωνική» ή «τετραγωνική». Αρχικά, υπολογίζεται το «κρίσιμο» μήκος  $1k$  και συγκρίνεται με το πραγματικό μήκος της πλάκας μειωμένο κατά τα  $2/3$  το μήκος έδρασης της πλάκας στο έδαφος από κάθε πλευρά. Το μήκος αυτό μπορεί να τεθεί με ικανοποιητική ακρίβεια (κατά τον Eisenmann) για τις συνήθεις περιπτώσεις ίσο προς 600mm. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις από θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ άνω και κάτω επιφάνειας είναι πολλαπλάσια της τάσης που αναπτύσσεται για πλήρη

παρεμπόδιση της μετακίνησης της πλάκας (σχέση 5 του Πίνακα 2). Αν το μήκος  $L$  της πλάκας ικανοποιεί τη σχέση:

$$L - 2/3 C = L - 400 > 0.9 \cdot 1\kappa$$

η αναπτυσσόμενη τάση είναι κατά 20% μεγαλύτερη της τάσης για πλήρη παρεμπόδιση της μετακίνησης (σχέση 3 του Πίνακα 2).

Αν το μήκος της πλάκας ικανοποιεί τη σχέση:

$$L - 2/3 C = L - 400 < 0.9 \cdot 1\kappa$$

η αναπτυσσόμενη τάση δίνεται από τη σχέση 4 του Πίνακα 2.

Στο Παράρτημα 2 δίνεται αναλυτικότερα η μέθοδος υπολογισμού και επίσης παρουσιάζονται παραδείγματα υπολογισμού τάσεων.

## 5. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η διαστασιολόγηση ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος περιλαμβάνει δύο κυρίως διαδικασίες: τον υπολογισμό του πάχους της πλάκας και τον καθορισμό ορισμένων πρόσθετων κατασκευαστικών στοιχείων των οποίων η συμβολή στη συμπεριφορά του οδοστρώματος είναι εξίσου σημαντική.

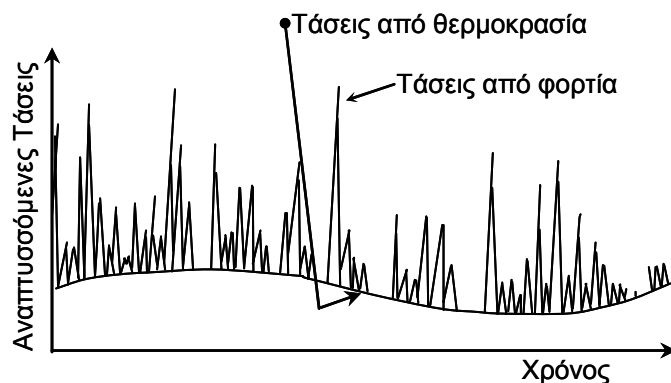
### 5.1 Υπολογισμός πάχους πλάκας

Ο υπολογισμός του πάχους της πλάκας γίνεται θεωρώντας την επαλληλία των τάσεων από ευθύγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ άνω και κάτω επιφάνειας και των τάσεων από τα φορτία της κυκλοφορίας. Οι τάσεις από θερμοκρασία έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια σε σύγκριση με τη διάρκεια των τάσεων από φορτία (ώρες σε σύγκριση με κλάσματα του δευτερολέπτου) και επομένως μπορούν να θεωρηθούν ως μόνιμες κατώτερες, ενώ οι τάσεις από φορτία ως μεταβαλλόμενες μέγιστες, όπως φαίνεται στο Σχ. 27. Το πάχος της πλάκας υπολογίζεται έτσι ώστε να μην επέλθει ρηγματώση του σκυροδέματος από κόπωση. Στο Σχ. 28 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα κόπωσης σκυροδέματος, όπως προκύπτει από εργαστηριακά πειράματα.

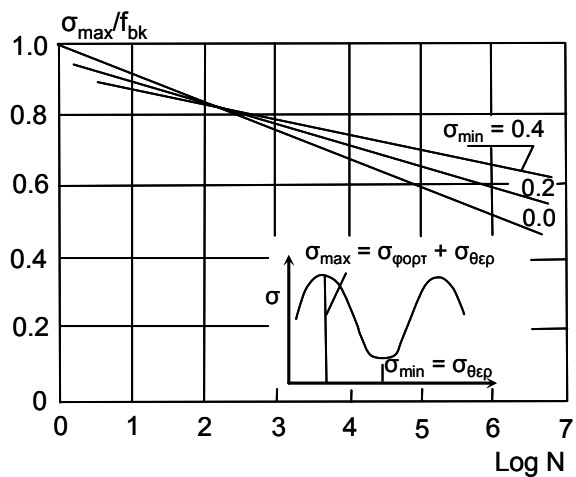
Ανάλογα με την κατανομή της κυκλοφορίας κατά την εγκάρσια έννοια (Σχ. 29), θα καθορισθεί και η περιοχή η οποία παρέχει τη δυσμενέστερη φόρτιση σε συνδυασμό με τις θερμοκρασιακές τάσεις. Συνήθως πρέπει να εξετάζεται η φόρτιση στον εγκάρσιο αρμό, η φόρτιση στην ακμή, και η φόρτιση στο μέσον.

Αν προβλέπονται βλήτρα στους αρμούς, τότε μπορεί να γίνει αποδεκτή μία μείωση του φορτίου (πχ. μέχρι 30%) λόγω συνεργασίας των δύο τμημάτων των πλακών. Αν δεν προβλέπονται βλήτρα τότε συνιστάται να μη γίνεται καμία μείωση του φορτίου.

Η μικτή κυκλοφορία μπορεί να ληφθεί υπόψη με τις ακόλουθες δύο μεθόδους:

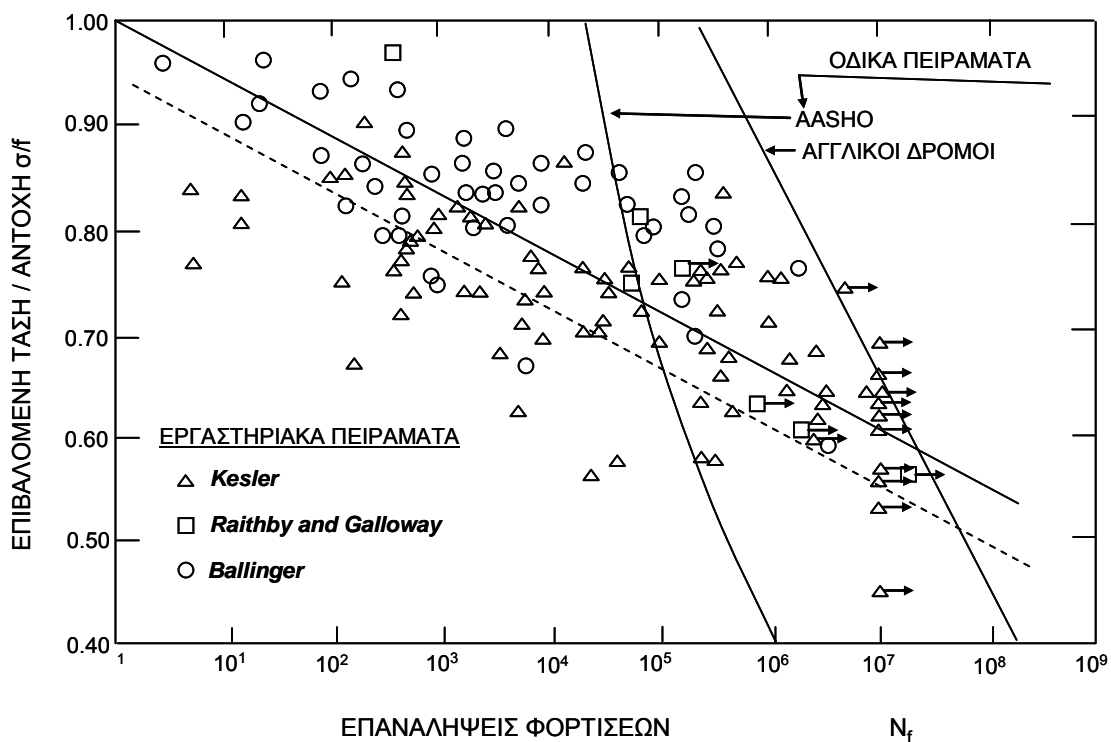


Σχ. 27 Μορφή φορτίσεως οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα



$F_{bk}$  = χαρακτηριστική αντοχή σε κάμψη  
 N = αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων

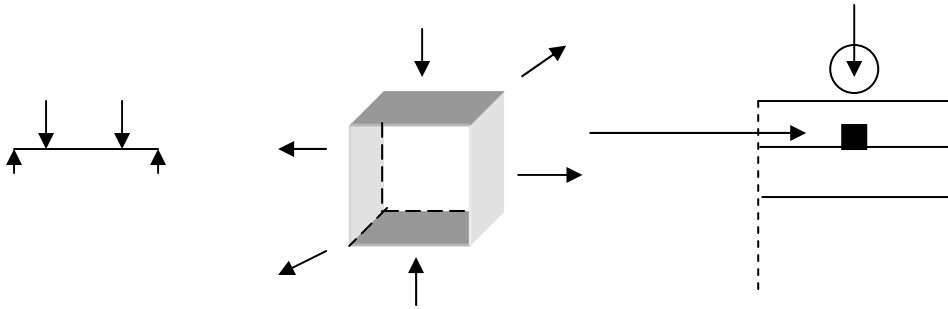
Σχ. 28 Διάγραμμα κοπώσεως σκυροδέματος (Cornelissen and Leewis)



ΔΙΑΦΟΡΕΣ

1. Κριτήρια αστοχίας
2. Επιπόνηση (μονοαξονική, τριαξονική)
3. Χρονικά διαστήματα χωρίς φόρτιση
4. Χρόνος επεκτάσεως ρηγμάτωσης

5. Καιρικές επιδράσεις (θερμοκρασία, υγρασία, κ.α.)



Σχ. 29 Σύγκριση αλγόριθμων αστοχίας οδοστρωμάτων με νόμους κόπωσης από εργαστηριακές δοκιμές.

Αρχή Miner

Σύμφωνα με την αρχή αυτή, η κυκλοφορία φορτηγών αυτοκινήτων χωρίζεται σε ομάδες φορτίων (1, 2,...i) και για κάθε ομάδα υπολογίζεται ο αριθμός  $N_i$  των επιτρεπόμενων φορτίσεων με τη βοήθεια του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος. Αν « $n_i$ » είναι ο προβλεπόμενος αριθμός διελεύσεων για κάθε ομάδα φορτίων αντίστοιχα, τότε για να μην επέλθει ρηγμάτωση του σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$$\eta_1/N_1 + \eta_2/N_2 + \eta_3/N_3 + \dots + \eta_v/N_v \leq 1$$

Η αρχή αυτή θεωρείται ότι έχει γενική εφαρμογή σε πολλά δομικά υλικά όπως μέταλλα, σκυρόδεμα, ασφαλτομίγματα κλπ. και εκφράζει ότι κάθε φόρτιση καταναλώνει από τη ζωή του υλικού ποσοστό ανάλογο με τον αριθμό εφαρμογών (επαναλήψεων) της.

Συντελεστές ισοδυναμίας

Η μικτή κυκλοφορία μετατρέπεται σε ισοδύναμες, από απόψεως φθοράς, διελεύσεις ενός μόνο φορτίου άξονα, του τυπικού αξονικού φορτίου. Οι συντελεστές ισοδυναμίας ( $\Sigma I$ ) δίνονται από τη γενική σχέση:

$$\Sigma I = (P_i/P_T)^a$$

όπου:

$P_i$  είναι το φορτίο της ομάδας  $I$

$P_T$  είναι το τυπικό αξονικό φορτίου (πχ. 8t ή 13t)

$a$  είναι εκθέτης με τιμή 4 περίπου, εφόσον ο νόμος αστοχίας του οδοστρώματος λαμβάνεται από οδικά πειράματα (πχ. AASHO), ή 8 ως 18, εφόσον ως στοιχείο αστοχίας του οδοστρώματος λαμβάνεται η ρηγμάτωση από κόπωση όπως προβλέπεται από εργαστηριακά πειράματα.

Αλγόριθμοι αστοχίας – Νόμοι κόπωσης

Η ανάλυση διαφόρων πειραματικών οδοστρωμάτων (κυρίως του AASHO) έδωσε διάφορους αλγόριθμους που συνδέουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις, με την αντοχή του σκυροδέματος και την τελική κατάσταση αστοχίας του. Η τελική κατάσταση αστοχίας του οδοστρώματος, που οι διάφοροι ερευνητές έλαβαν υπόψη τους κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, αλλά και η μέθοδος υπολογισμού των τάσεων και οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη, ήταν διαφορετικοί για κάθε ερευνητή και επομένως τα αποτελέσματα δύσκολα συγκρίνονται μεταξύ τους. Μερικοί από τους πιο σημαντικούς αλγόριθμους είναι οι ακόλουθοι:

$$N = 225000 * (f/\sigma)^4 \quad (\text{Vesic and Saxena, AASHO, PSI}=2.5)$$

$$N = 23440 * (f/\sigma)^{3.21} \quad (\text{Treybig et al, AASHO, ρηγμάτωση})$$

$$N = 22209 * (f/\sigma)^{4.21} \quad (\text{Ilves and Majidzadeh, AASHO, PSI=2.0})$$

όπου:

N είναι ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων πριν αστοχήσει το οδόστρωμα κατά τον τρόπο που προβλέπει η συγκεκριμένη έρευνα

f είναι η αντοχή του σκυροδέματος

σ είναι η αναπτυσσόμενη τάση στην πλάκα

(κανονικά θα πρέπει να υπολογισθούν οι τάσεις στην ίδια θέση που προβλέπει η συγκεκριμένη μελέτη)

Τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε κόπωση σκυροδέματος ακολουθούν τη γενική σχέση:

$$\sigma_{\max}/f = 1.20 - 0.20R - 0.133(1 - 0.779R)\log N - 0.0503(1 - 0.445R)\log T$$

όπου:

f είναι η αντοχή του σκυροδέματος

$\sigma_{\max}$  είναι η επιβαλλόμενη μέγιστη τάση (άθροισμα των τάσεων από φορτία και από θερμοκρασία)

$$R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$$

$\sigma_{\min}$  είναι η επιβαλλόμενη ελάχιστη τάση (μόνιμη τάση)

N είναι ο επιτρεπόμενος αριθμός φορτίσεων πριν από τη θραύση του δοκιμίου

T είναι η συνολική διάρκεια του κύκλου φορτίσεως σε sec

Για τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται απλούστερες μορφές νόμων κόπωσης όπως:

$$\log N = 12.6 \left[ 1 - \left\{ 0.8 \left( \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{f} \right) \right\} / \left( 0.8 - \frac{\sigma_{\min}}{f} \right) \right]$$

(Cornelisen and Leewis)

$$\log N = 17.61 (1 - \sigma/f) \quad (\text{Darter})$$

$$\log N = 20 (1 - \sigma/f) \quad (\text{Verveca})$$

$$\log N = 11.78 - 12.11 \sigma/f \quad \text{για } 0.5 < \sigma/f < 1 \text{ και}$$

$$N = \text{πρακτικά άπειρος για } \sigma/f < 0.5 \quad (\text{PCA})$$

Τόσο στους αλγόριθμους αστοχίας οδοστρωμάτων όσο και στους νόμους κόπωσης του σκυροδέματος αν ληφθεί υπόψη η μέση καμπύλη τότε στο τέλος της περιόδου υπολογισμού το οδόστρωμα θα έχει αστοχήσει 50%. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του ποσοστού αστοχίας (πχ. 15%, 10%) και αντί της μέσης καμπύλης εκλέγεται με στατιστικές μεθόδους η καμπύλη εκείνη που εξασφαλίζει τα παραπάνω ποσοστά.

Στο Σχ. 29 συγκρίνονται οι νόμοι αστοχίας που προέρχονται από οδικά πειράματα (AASHO, Ilves and Majidzadeh) και από Βρετανικούς δρόμους (Mayhew and Harding) με τους νόμους κόπωσης από εργαστηριακές δοκιμές (Darter από διάφορα εργαστηριακά πειράματα).

Παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο μεθοδολογιών που αποδίδεται στις ακόλουθες κυρίως διαφορές:

A. Οι νόμοι αστοχίας των οδικών πειραμάτων ή οδοστρωμάτων σε λειτουργία στηρίζονται σε κάποιο κριτήριο λειτουργικότητας όπως, πχ. τιμή του δείκτη ρηγμάτωσης, τελικός δείκτης εξυπηρετικότητας (PSI) κ.α. Αντίθετα οι εργαστηριακοί νόμοι κόπωσης έχουν ως κριτήριο αστοχίας την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Είναι όμως φανερό ότι από τη στιγμή της εμφάνισης της πρώτης ρωγμής μέχρις ότου το οδόστρωμα αποκτήσει το δείκτη ρηγμάτωσης ή το δείκτη εξυπηρετικότητας που προβλέπουν οι νόμοι αστοχίας των εν λειτουργία οδοστρωμάτων θα απαιτηθεί πρόσθετος αριθμός φορτίσεων- διελεύσεων.

B. Τα εργαστηριακά πειράματα μέχρι τώρα έχουν γίνει με επιπόνηση που είναι επίπεδη (μονοαξονική θλίψη ή εφελκυσμός ή κάμψη). Αντίθετα η μορφή επιπόνησης στο οδόστρωμα είναι τριαξονική (θλίψη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και εφελκυσμός στο οριζόντιο επίπεδο).

Γ. Οι νόμοι κόπωσης με εργαστηριακές δοκιμές δεν μπορούν να προσομοιάσουν ρεαλιστικά τα διαστήματα ανάπαυλας από φορτίσεις, ούτε τον τυχαίο τρόπο φόρτισης με ποικίλα φορτία σε συνδυασμό με τις ταυτόχρονες μεταβολές της υγρασίας και της θερμοκρασίας, που παρουσιάζεται στην πράξη.

Δ. Για να επεκταθεί η ρηγμάτωση σε βαθμό που προβλέπουν οι αλγόριθμοι συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων απαιτείται ορισμένος αριθμός διελεύσεων που δεν προβλέπεται από τα εργαστηριακά πειράματα.

## 5.2 Καθορισμός κατασκευαστικών στοιχείων

Τα σπουδαιότερα κατασκευαστικά στοιχεία που πρέπει να καθορισθούν είναι:

- A. Διαστάσεις των πλακών (αποστάσεις αρμών)
- B. Πρόβλεψη ή μη βλήτρων στους αρμούς και τρόπος κατασκευής αρμών
- Γ. Είδος και πάχος υλικού υποβάσεως
- Δ. Πρόβλεψη αποστράγγισης

### A. Διαστάσεις πλακών

Η διάταξη των κατά μήκος αρμών συνήθως καθορίζεται έτσι ώστε οι αρμοί να συμπίπτουν με την διαγράμμιση των λωρίδων κυκλοφορίας (3.75m ή 4.20m). Στους δρόμους βαριάς κυκλοφορίας (αυτοκινητόδρομους), τα τελευταία χρόνια, γίνεται επαύξηση του πλάτους κατά 25cm – 50cm (ιδιαίτερα στη λωρίδα βαριάς κυκλοφορίας), όπως φαίνεται στα Σχ. 6 και Σχ. 9, έτσι ώστε οι τροχοί των οχημάτων να διέρχονται μακριά από την ακμή του οδοστρώματος με συνέπεια να επέρχεται σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων (βλ. Σχ. 19γ).

Οι εγκάρσιοι αρμοί διατάσσονται ανά αποστάσεις που δεν πρέπει να υπερβαίνουν το εικοσιπενταπλάσιο του πάχους της πλάκας. Η τάση σήμερα είναι να προβλέπονται αρμοί ανά 4m έως 5m διότι μεγαλύτερες αποστάσεις προκαλούν αύξηση των θερμοκρασιακών τάσεων (βλ. παράρτημα 2) και αύξηση των μετακινήσεων των άκρων των πλακών με αποτέλεσμα να ανοίγουν οι αρμοί περισσότερο, να μειώνεται η συνεργασία μεταξύ τους

(επαύξηση της τάσεως στην ακμή) και να καταστρέφεται νωρίτερα το υλικό σφραγίσεως των αρμών.

Αρμοί διαστολής δεν κατασκευάζονται εκτός μόνο από ειδικές περιπτώσεις (τεχνικά έργα ή άλλα σημεία που πρέπει να παραμένουν αμετακίνητα) διότι έχει αποδειχθεί ότι με το χρόνο κλείνουν οι αρμοί διαστολής και ανοίγουν οι αρμοί συστολής, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο (βλ. Σχ. 30 και παρ. 4.2.1).

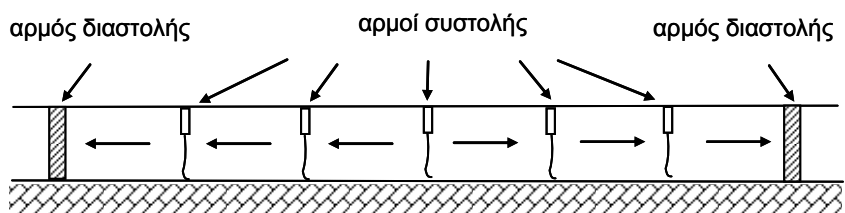
#### B. Πρόβλεψη βλήτρων

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις του Σχήματος 13, οι τάσεις που αναπτύσσονται για φόρτιση στην ακμή είναι μεγαλύτερες κατά 150% περίπου από τις τάσεις για φόρτιση στο μέσον. Επομένως, η φόρτιση στην ακμή κατά τον εγκάρσιο αρμό, θα προκαλέσει μεγάλες τάσεις, αν δεν υπάρχει συνεργασία μεταξύ των δύο άκρων των πλακών. Η συνεργασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

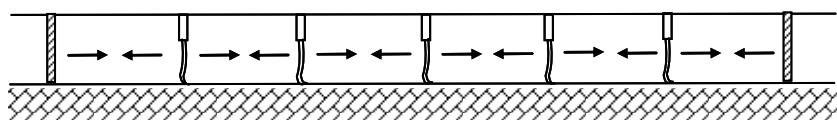
i. Με την ανάπτυξη τριβής στη διεπιφάνεια της ρωγμής (κάτω από την τεχνητή επιφανειακή εγκοπτή του αρμού). Η τριβή αυτή είναι μεγαλύτερη όσο το άνοιγμα του αρμού (απόσταση χειλέων ρωγμής) είναι μικρότερο (βλ. Σχ. 31). Το χειμώνα, λόγω συστολής του σκυροδέματος, το άνοιγμα είναι μεγαλύτερο και η συνεργασία μικρότερη, ενώ το καλοκαίρι και ιδίως όταν δεν υπάρχουν αρμοί συστολής, τα χείλη βρίσκονται σε επαφή (ενδεχομένως υπό πίεση) και επομένως η συνεργασία είναι μεγαλύτερη.

ii. Με κατασκευή τórμου και εντορμίας. Η κατασκευή αυτή σπανίως είχε επιτυχία ακόμη και όταν προβλέπονταν ράβδοι αγκυρώσεως για να κρατούν σε επαφή τις επιφάνειες του αρμού και γ' αυτό έχει εγκαταλειφθεί για οδοστρώματα δρόμων αλλά εξακολουθεί να έχει εφαρμογή για δάπεδα μεγάλου πάχους (αεροδρόμια, λιμάνια).

iii. Με την τοποθέτηση (πριν από τη διάστρωση ή κατά την

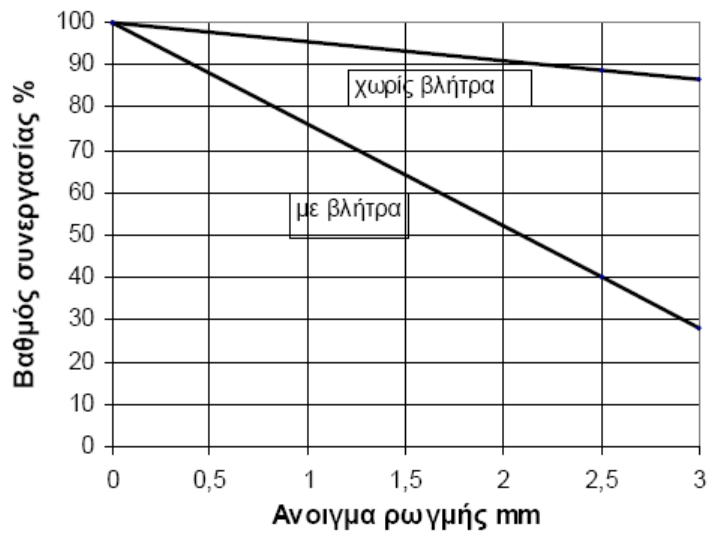


Αύξηση θερμοκρασίας λίγο μετά την κατασκευή



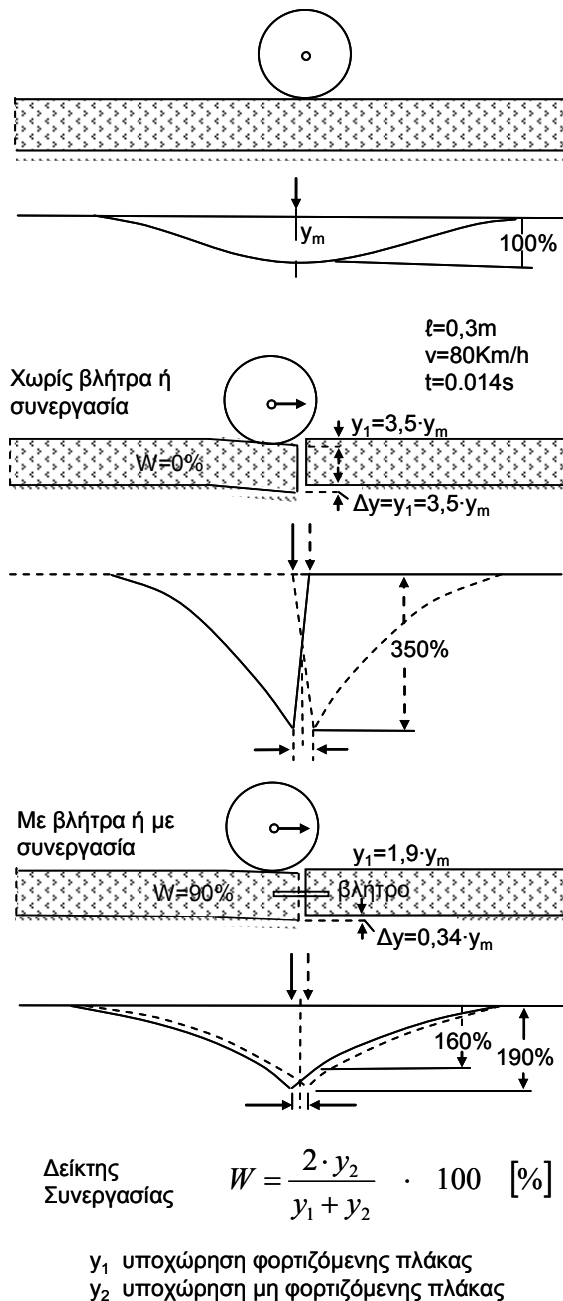
Μετακινήσεις κατά τις μειώσεις της θερμοκρασίας που θα ακολουθήσουν

Σχ. 30 Διαδικασία μείωσης του ανοίγματος των αρμών διαστολής και αύξησης του ανοίγματος των αρμών συστολής.



Σχ. 31 Επίδραση του «ανοίγματος» των αρμών στο δείκτη (βαθμό) συνεργασίας





Σχ. 32 Επίδραση των βλήτρων στις υποχωρήσεις των άκρων των πλακών (Eisenmann)

συμπύκνωση του σκυροδέματος) βλήτρων, δηλ. σιδηρών (πχ. Φ25 μήκους 500mm) οι οποίες μεταφέρουν μέρος του φορτίου από τη μία πλάκα στην άλλη. Στο Σχ. 32 φαίνεται η επίδραση των βλήτρων στις υποχωρήσεις για δείκτη (βαθμό) συνεργασίας  $W$  ίσο 90%. Ως δείκτης συνεργασίας ορίζεται ο λόγος της υποχώρησης της μη φορτιζόμενης πλάκας ( $y_2$ ) προς το ημίθροισμα των υποχωρήσεων των δύο πλακών (βλ. Σχ. 32). Επειδή οι υποχωρήσεις είναι ανάλογες των φορτίων, εύκολα υπολογίζεται ότι για δείκτες συνεργασίας πχ. 90% και 60% προκύπτει μεταβίβαση φορτίου και επομένως μείωση της τάσης της φορτιζόμενης πλάκας, κατά 45% και 30% αντίστοιχα. Αλλά δεν είναι μόνο η μείωση των τάσεων στους αρμούς που επιφέρει η τοποθέτηση βλήτρων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 32 οι υποχωρήσεις μειώνονται σημαντικά. Οι υποχωρήσεις επηρεάζουν σημαντικά το μηχανισμό μετακίνησης νερού κάτω από τους αρμούς και επομένως αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην εξέλιξη του φαινομένου της «άντλησης» (rumping) και της «ανισοσταθμίας», βλ. Σχ. 11c, (stair stepping –

faulting). Ο μηχανισμός του φαινομένου της «άντλησης» παρουσιάζεται στο Σχ. 33 και αποτελεί ένα σημαντικό λόγο αστοχίας των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα.

Γενικά η απόφαση για την τοποθέτηση ή μη βλήτρων πρέπει να εξάγεται μετά από προσεκτική εξέταση τριών κυρίως παραγόντων της κυκλοφορίας (αριθμός φορτηγών αυτοκινήτων, μέγιστο φορτίο άξονα επιτρεπόμενο και πραγματοποιούμενο), του κλίματος (βροχόπτωση, παγετός) και της διαβρωσιμότητας της υποβάσεως.

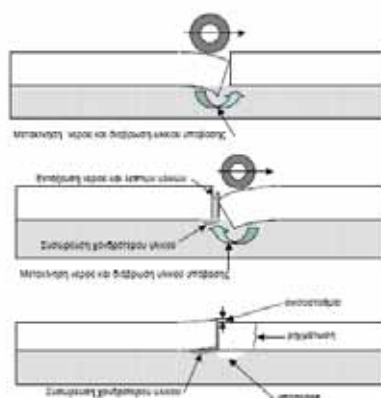
Στο Σχ. 34 παρουσιάζεται κατά σχηματικό τρόπο η αλληλεπίδραση των παραγόντων αυτών και ο διεθνής οργανισμός PIARC έχει προτείνει οριακές τιμές για τους διάφορους παράγοντες που θα βοηθήσουν στη λήψη απόφασης.

#### γ. Είδος και πάχος υλικού υποβάσεως

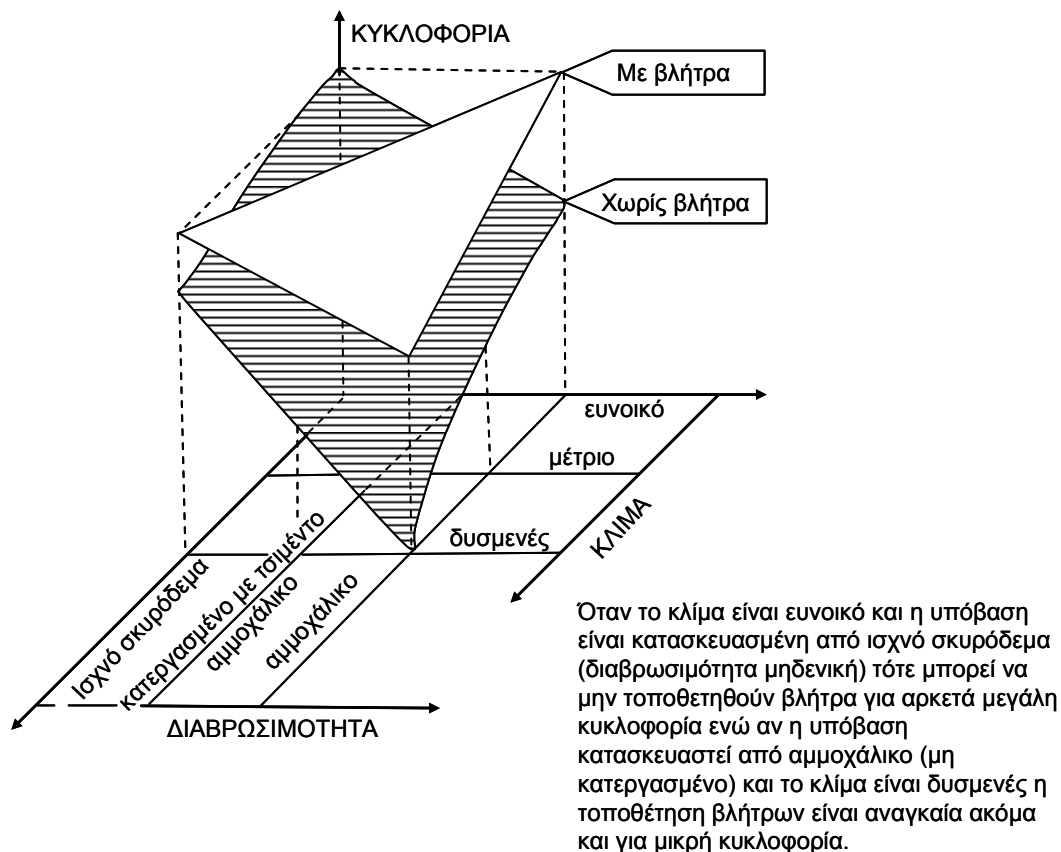
Σήμερα χρησιμοποιούνται για υποβάσεις οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα συνήθως, στρώσεις από κατεργασμένο με σιμέντο αμμοχάλικο (διάστρωση με περαιωτήρα – finisher και συμπύκνωση με οδοστρωτήρες) ή στρώσεις από ισχνό σκυρόδεμα (διάστρωση με περαιωτήρα – finisher και συμπύκνωση με δονητές μάζας). Το πάχος κυμαίνεται από 15cm και καθορίζεται κυρίως με κριτήρια αντοχής της στρώσεως στην κυκλοφορία των αυτοκινήτων κατασκευής. Χρησιμοποιούνται επίσης με επιτυχία και στρώσεις ασφαλτομίγματος 4 – 6 cm πάχους.

Οι στρώσεις αυτές παρέχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις στρώσεις από μη κατεργασμένα αμμοχάλικα:

- i. Μεγαλύτερη και πιο ομοιόμορφη φέρουσα ικανότητα γεγονός που έχει ως συνέπεια τη μείωση των υποχωρήσεων οι οποίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν καθοριστική επίδραση στο φαινόμενο της «άντλησης» και της ανισοσταθμίας.
- ii. Ομοιόμορφο άνοιγμα όλων των εγκάρσιων αρμών σε αντίθεση με τις περιπτώσεις μη κατεργασμένων αμμοχάλικων, όπου έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένοι αρμοί ανοίγουν τις πρώτες ημέρες, ενώ οι άλλοι παραμένουν σχεδόν κλειστοί, με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού συνεργασίας των πρόωρα ανοιγμένων αρμών. Επίσης είναι δυνατόν να



Σχ. 33 Φαινόμενο άντλησης



Σχ. 34 Παράγοντες που επηρεάζουν την πρόβλεψη η μη βλήτρων στους αρμούς (σχηματικά) (M. Ray)

Επιτευχθεί και συγκόλληση των δύο στρώσεων (διαρκής ή προσωρινή) με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων (βλ. Πίνακα 1).

iii. Σημαντική μείωση της διαβρωσιμότητας της στρώσεως, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή, υπό ορισμένες προϋποθέσεις (κυκλοφορία, κλίμα), η αποφυγή τοποθέτησης βλήτρων. Για να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη ανθεκτικότητα σε διάβρωση συνήθως απαιτείται μία ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου (περί τα  $100 \text{ kg/m}^3$ ). Τονίζεται πάντως, η μεγάλη σημασία της ορθής τεχνικής τελικής μόρφωσης της επιφάνειας της στρώσεως αυτής και της προσεκτικής συντηρήσεώς της.

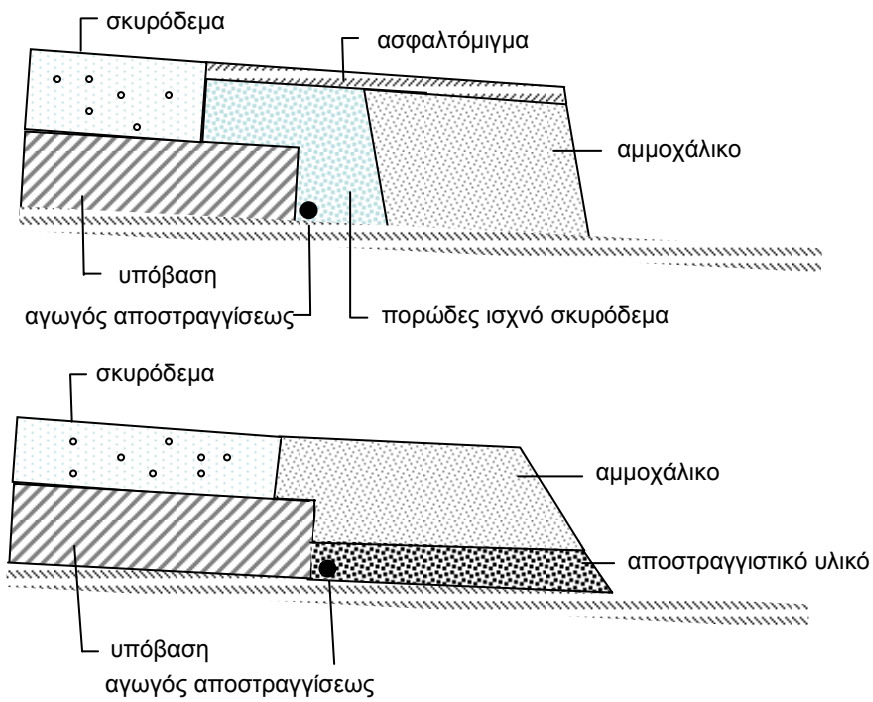
iii. Εξασφάλιση στρώσεως ικανής να φέρει την κυκλοφορία της κατασκευής (φορτηγά, διαστρωτικά μηχανήματα) για όλες τις κλιματολογικές συνθήκες.

Θα πρέπει όμως να αναφερθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν προβλήματα πρόωρης ρηγμάτωσης που αντιμετωπίστηκε με παρεμβολή πλαστικών φύλλων πολυαιθυλενίου μεταξύ επιφάνειας υποβάσεως και πλάκας σκυροδέματος για μείωση της τριβής και αποφυγή συγκόλλησης των δύο στρώσεων, γεγονός που αφαιρεί ορισμένα από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα. Σε άλλες περιπτώσεις έγινε διάνοιξη χαραγής στη νωπή στρώση της υποβάσεως σε προκαθορισμένες θέσεις ώστε η ρηγμάτωσή της να συμπίπτει με τις προβλεπόμενες θέσεις κατά μήκος αρμών των πλακών σκυροδέματος.

#### δ. Αποστράγγιση

Πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για τη γρήγορη αποστράγγιση του νερού που αναπόφευκτα θα εισχωρήσει σε κάποια στιγμή της ζωής του οδοστρώματος μεταξύ πυθμένα πλάκας και επιφάνειας υποβάσεως. Ύπαρξη λιμνάζοντος νερού θα δημιουργήσει τις συνθήκες έναρξης του φαινομένου της άντλησης.

Στο Σχ. 37 παρουσιάζονται ορισμένα τυπικά παραδείγματα αποστράγγισης οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα.



Σχ. 37 Τυπικά παραδείγματα αποστράγγισης οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

1. Υπολογισμός τάσεων με τη βοήθεια των επιφανειών επιρροής Pickett και Ray.  
Τάσεις από ομάδες φορτίων Γραμμές επιρροής.
2. Τάσεις από παρεμπόδιση των μετακινήσεων.  
Συνοπτική ανάπτυξη της προσεγγιστικής μεθόδου Eisenmann για τον υπολογισμό των θερμοκρασιακών τάσεων.
3. Παραδείγματα υπολογισμού θερμοκρασιακών τάσεων.

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

#### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ PICKETT ΚΑΙ RAY

Ο υπολογισμός των τάσεων μπορεί να γίνει και με τη βοήθεια των επιφανειών επιρροής των Pickett και Ray. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν τα φορτία είναι πολλά ή οι επιφάνειες επαφής των φορτίων δεν είναι κυκλικές (αεροδρόμια). Ο υπολογισμός ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογίζεται το «ελαστικό μήκος»  $\ell = \left( \frac{E \hbar^3}{12(1-\mu^2)k} \right)^{1/4}$
2. Σχεδιάζονται οι επιφάνειες επαφής με κλίμακα τη σχέση μεταξύ του μήκους 2 που παρουσιάζεται στις επιφάνειες επαφής και του 2 που υπολογίστηκε στο βήμα 1
3. Μετράται ο αριθμός «η» των μικρών «ορθογώνιων» που περικλείονται από τις επιφάνειες επαφής των φορτίων

4. Υπολογίζεται το άθροισμα  $\sum_{i=1}^{i=n} p_i n_i$

$P_i = \eta$  πίεση στο ορθογώνιο  $i$

Για ομοιόμορφη πίεση  $p$  είναι  $\sum p_i \cdot n_i = p \sum \eta_i$

5. Υπολογίζεται η τάση  $\sigma$  από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{6M}{h^2} = \frac{(\sum p_i \eta_i) \ell^2}{10000} \frac{6}{h^2}$$

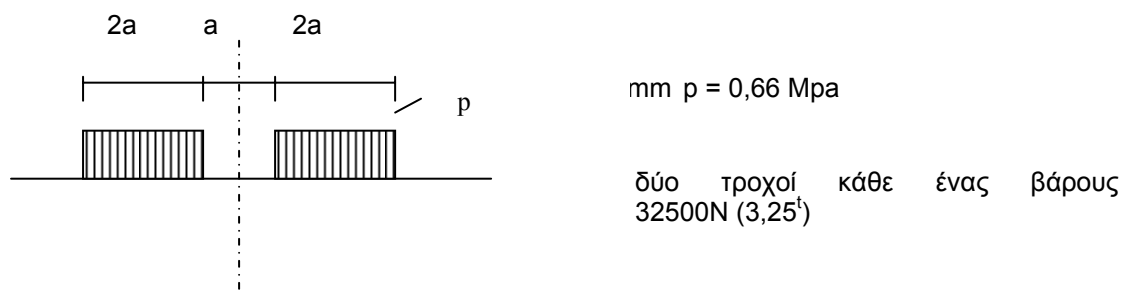
για ομοιόμορφο φορτίο:

$$\sigma = \frac{6p\ell^2 n}{10000 h^2}$$

## Εφαρμογή

Να υπολογιστούν οι τάσεις στην ακμή πλάκας πάχους  $h = 200 \text{ mm}$  που εδράζεται σε στρώση με  $k = 30 \text{ MN/m}^3$  για το ακόλουθο φορτίο:

Αξονικό φορτίο  $13^t$  επί διπλών τροχών (Μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο)



Πλάκα πάχους  $h = 200\text{mm}$   $E = 30.000 \text{ MN/m}^2$   $k$  υπόβασης  $k = 30 \text{ MN/m}^3$

$$\ell = \left[ \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 200^3}{12 (1 - 0,15^2) \cdot 30 \cdot 10^{-3}} \right]^{1/4} = 908,7 \cong 909 \text{ mm}$$

$a = 125 \text{ mm}$  Απόσταση μεταξύ κέντρων επιφανειών φορτίσεως  $x = 3 \times a = 375 \text{ mm}$

$$\ell_{\text{σχεδίου}} = 62,5 \text{ mm}$$

$$\text{Κλίμακα σχεδιάσεως} = \frac{\ell_{\text{σχεδ.}}}{\ell} = \frac{62,5}{909} = 6,87 \cdot 10^{-2}$$

Οι κύκλοι σχεδιάζονται με ακτίνα  $a = 125 \times 6,87 \cdot 10^{-2} = 8,59 \text{ mm}$

Ο πρώτος κύκλος (τροχός) σχεδιάζεται σε επαφή με το σημείο 0 του σχεδίου και ο δεύτερος σε απόσταση

$$x = 375 \times 6,87 \cdot 10^{-2} = 25,78 \text{ mm} \sim 26 \text{ mm}$$

$$x = 375 \times 6,87 \cdot 10^{-2} = 25,78 \text{ mm} \simeq 26 \text{ mm}$$

Ο αριθμός των ορθογωνίων που περικλείει ο πρώτος κύκλος είναι  $\eta_1 = 276$  και ο δεύτερος  $\eta_2 = 89$

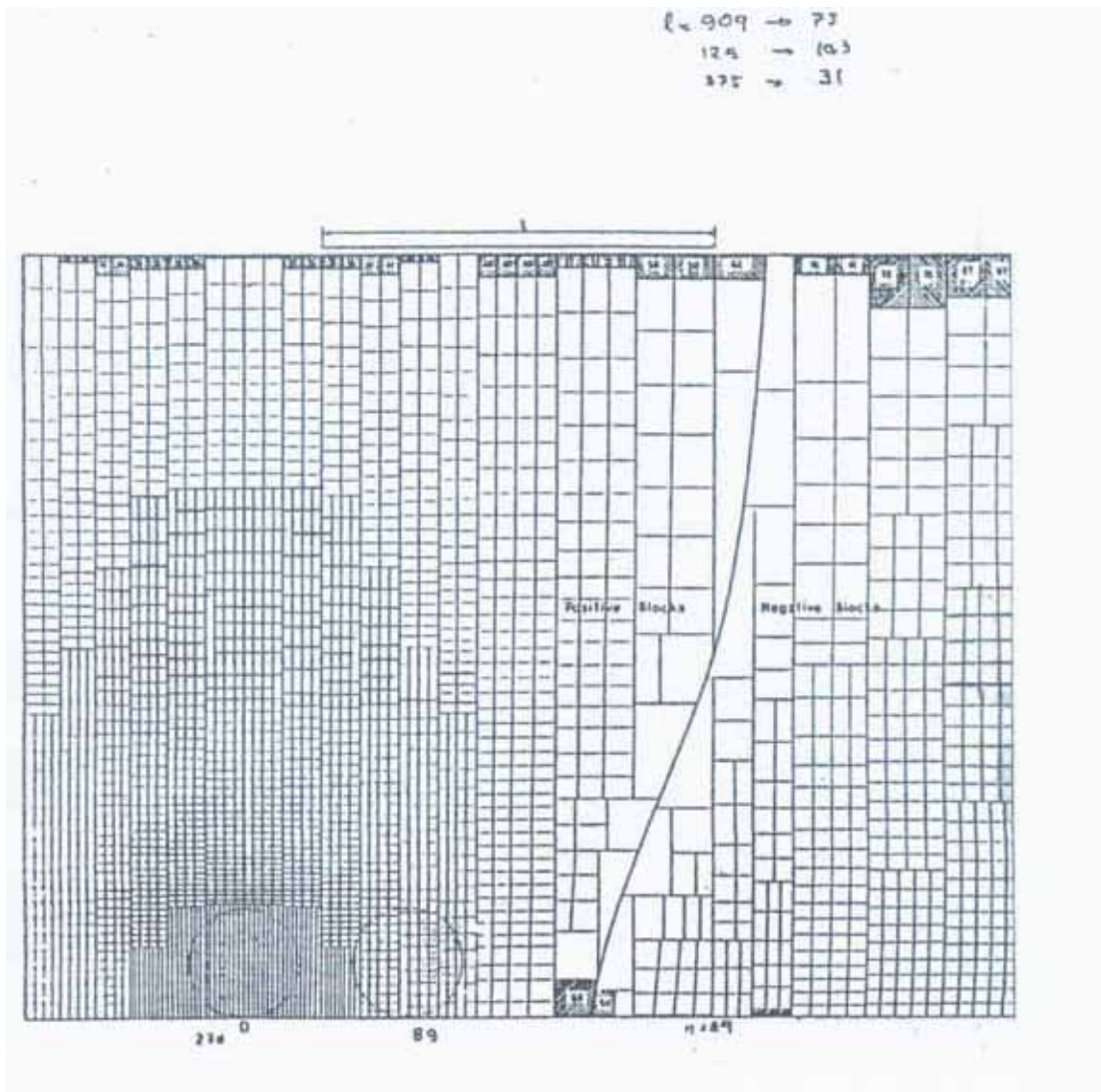
Η τάση στο σημείο 0 από τον

$$\text{πρώτο κύκλο } \sigma_{o1} = \frac{6 \times 0,662 \times 909^2 \times 276}{10.000 \times 200^2} = 2,26 \text{ MPa}$$

$$\text{δεύτερο κύκλο } \sigma_{o2} = \frac{6 \times 0,662 \times 909^2 \times 89}{10.000 \times 200^2} = 0,73 \text{ MPa}$$

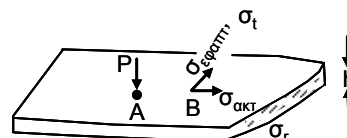
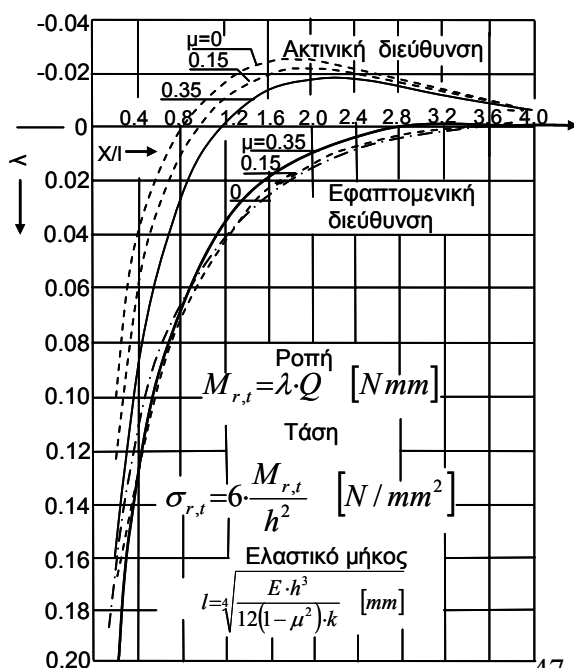
Συνολική τάση  $\sigma_o = 2,99$

$$\simeq 3,00 \text{ Mpa}$$



ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΟΜΑΔΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ

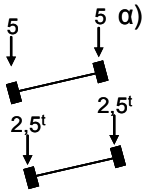
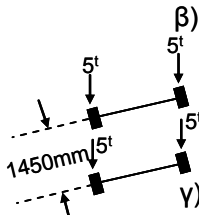
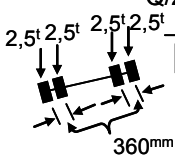
ΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΣΗΜΕΙΑ ΕΚΤΟΣ ΑΞΟΝΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ



Η τάση που αναπτύσσεται κάτω από το σημείο B για φορτίο που εφαρμόζεται στο σημείο A βρίσκεται με τη βοήθεια των γραμμών επιρροής του παραπλευρως σχήματος. Με το ίδιο σχήμα υπολογίζονται και οι τάσεις που οφείλονται σε ομάδες φορτίων

### Εφαρμογή

$E=30.000 \text{ N/mm}^2$ ,  $\mu=0.15$ ,  $k=0.1 \text{ N/mm}^3$ ,  $h=220 \text{ mm}$   
 $Q=50.000 \text{ N}$ ,  $p=0.7 \text{ N/mm}^2$

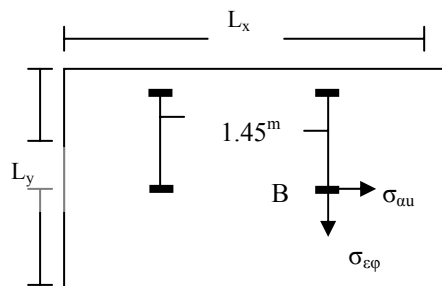
Απλός Τροχός	(Άξονας $2 \times 5 = 10^t$ ή $2 \times 2,5 = 5^t$ )
	Εξισώσεις Westergaard
$Q = 50.000 \text{ N}$	$\sigma_{(Q)} = 1.14 \text{ N/mm}^2$
$Q/2 = 25.000 \text{ N}$	$\sigma_{(Q/Z)} = 0.65 \text{ N/mm}^2$
	$\ell = \left( \frac{3 \cdot 10^4 - 220^3}{12(1 - 0,15^2) \cdot 0,7} \right)^{1/4} = 725 \text{ mm}$
Διπλός άξονας με απλούς τροχούς (απόσταση μεταξύ αξόνων 1450mm)	
	
$Q = 50.000 \text{ N}$ $Q = 50.000 \text{ N}$	$\sigma_{ακτιν} = \sigma_{(Q)} - \frac{6 \cdot 0,020 \cdot Q}{h^2} = 1,02 \text{ N/mm}^2 \quad (-11\%)$
$1450 \text{ mm} = R\ell$	$\sigma_{εφαπτ} = \sigma_{(Q)} + \frac{6 \cdot 0,015 \cdot Q}{h^2} = 1,23 \text{ N/mm}^2 \quad (+8\%)$
Διπλοί τροχοί (απόσταση μεταξύ τροχών 0,36 m)	
	
$Q/2 = 25.000 \text{ N}$ $Q/2 = 25.000 \text{ N}$	$\sigma_{ακτ} = \sigma_{(Q/2)} + \frac{6 \cdot 0,05 \cdot Q/2}{h^2} = 0,80 \text{ N/mm}^2 \quad (-30\%)$
$360 \text{ mm} = 0,5\ell$	$\sigma_{εφ} = \sigma_{(Q/2)} + \frac{6 \cdot 0,11 \cdot Q/2}{h^2} = 0,99 \text{ N/mm}^2 \quad (-13\%)$

### Συμπεράσματα

1. Οι τάσεις που αναπτύσσονται από ένα διπλό άξονα με απόσταση αξόνων 1.45m και συνολικό φορτίο ( $4 \times 5 = 20^t$ ) διπλάσιο από απλό άξονα ( $2 \times 5 = 10^t$ ) είναι:

- Κατά την ακτινική διεύθυνση μικρότερες κατά 11% από τις τάσεις λόγω απλού άξονα.
- Κατά την εφαπτομενική (εγκάρσια) διεύθυνση μεγαλύτερες κατά 8% από τις τάσεις λόγω απλού άξονα.

Δεδομένου ότι οι τάσεις από διαφορά θερμοκρασίας  $\sigma_{\Delta t}$  είναι μικρότερες κατά την εγκάρσια διεύθυνση από εκείνες κατά την κατά μήκος διεύθυνση (κατά κανόνα  $L_y < L_x$ ) η αύξηση της τάσεως κατά την εφαπτομενική διεύθυνση λόγω διπλού άξονα μπορεί να μη λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό του πάχους της πλάκας.





- Όταν το φορτίο του άξονα είναι κατανομημένο σε διπλούς τροχούς ( $4 \times 2,5 = 10^4$  σε σύγκριση με  $2 \times 5 = 10^4$ ) οι τάσεις κατά την ακτινική διεύθυνση είναι μικρότερες κατά 30% κατά την εφαπτομενική διεύθυνση κατά 13% σε σύγκριση με τις τάσεις που αναπτύσσονται από άξονα με το ίδιο φορτίο αλλά με απλούς τροχούς.
- Η απόσταση μεταξύ των δεξιών και αριστερών τροχών του ίδιου άξονα υπερβαίνει συνήθως τα 2,0 m και επομένως για τα συνηθισμένα πάχη πλακών η αλληλεπίδραση τους είναι αμελητέα. (απόσταση  $\approx 3 \ell$ ).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### Συμβολισμοί

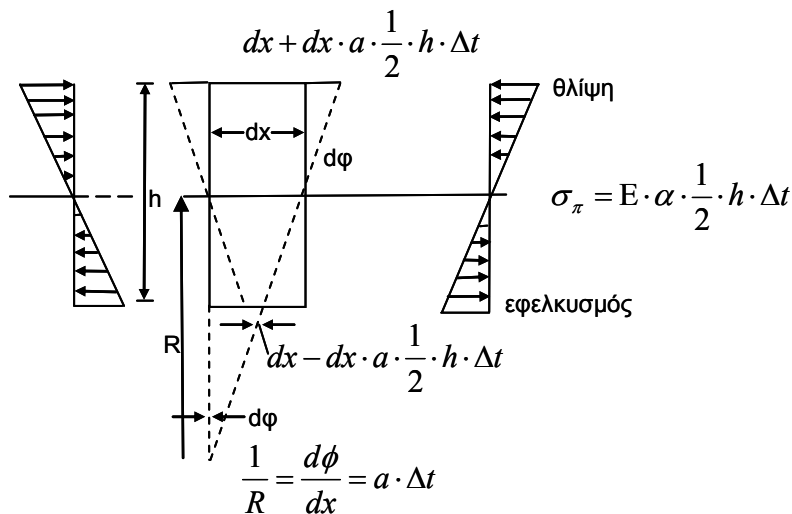
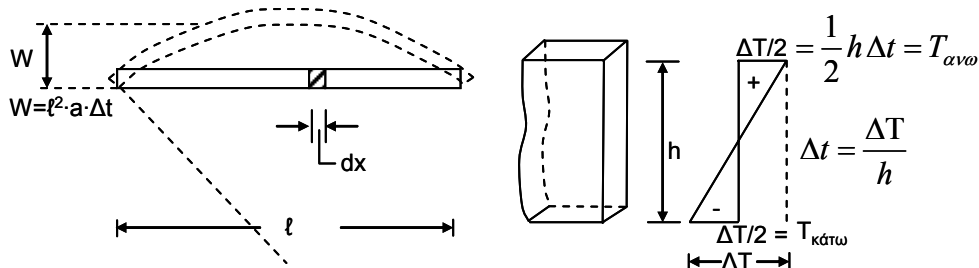
E μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος  
 $\mu$  λόγος του Poisson σκυροδέματος  
 $a$  συντελεστής διαστολής σκυροδέματος

### 1. ΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΛΗΡΗ ΠΑΡΕΜΠΟΔΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

Όταν μία ράβδος υφίσταται την επίδραση ευθύγραμμης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ άνω και κάτω ίνας ίσης προς  $\Delta T$  (δηλ. με κλίση  $\Delta t = \Delta T/h$  [ $^{\circ}\text{C} / \text{mm}$ ] θα προκληθεί παραμόρφωση στην πάνω και κάτω ίνα της ίση προς  $\Delta t$   $a$   $h/2$ .

Αν  $T_a > T_k$  (θερμοκρασία πάνω > θερμοκρασίας κάτω) αρχικό μήκος  $dx$  στοιχειώδους τμήματος  $dx \cdot h$  της ράβδου θα αυξηθεί στην επιφάνεια και θα ελαττωθεί στον πυθμένα κατά το μέγεθος  $dx \cdot a \cdot h/2$  (βλ. Σχ.1) και η ράβδος θα πάρει κυκλικό σχήμα με ανύψωση του κέντρου της κατά  $W = \frac{1}{2} a \Delta t$ .

Στη ράβδο δεν θα έχει αναπτυχθεί καμία τάση διότι οι παραμορφώσεις δεν παρεμποδίζονται.



Αν με μία εξωτερική δύναμη παρεμποδισθεί η παραμόρφωση της ράβδου, για να εξουδετερωθούν οι παραμορφώσεις που προκαλεί η θερμοκρασιακή διαφορά, η δύναμη αυτή θα πρέπει να επιβάλει τάσεις τριγωνικής μορφής, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, με τιμή στην άνω και κάτω ίνα της ράβδου ίση προς  $\sigma = E a \cdot \Delta t h / 2$ . Η τάση αυτή θα είναι θλιπτική στην πάνω ίνα και εφελκυστική στην κάτω.

Επομένως σε μία ράβδο, στην οποία η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του πυθμένα και η παραμόρφωσή της παρεμποδίζεται, θα αναπτυχθούν τάσεις εφελκυσμού στον πυθμένα και θλίψης στην επιφάνεια ίσες προς:

$$\sigma = E a \Delta t h / 2 \quad \text{Τάση για πλήρη παρεμπόδιση μετακίνησης σε ράβδο}$$

Με ανάλογες σκέψεις αποδεικνύεται ότι σε περίπτωση που η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι μικρότερη της θερμοκρασίας του πυθμένα και οι παραμορφώσεις παρεμποδίζονται θα αναπτυχθούν τάσεις εφελκυσμού στην επιφάνεια και τάσεις θλίψης στον πυθμένα.

Τονίζεται ότι η ευθύγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και πυθμένα που δε συνοδεύεται με παρεμπόδιση της μετακίνησης δεν προκαλεί ανάπτυξη τάσεων (βλ. και παραγρ. 4.2 παράδειγμα 1).

Σε περίπτωση πλάκας, αντί ράβδου, η διαξονική εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται, ευρίσκεται από τη μονοαξονική πολλαπλασιάζοντας με  $1/(1-\mu)$  (βλ. και παραγρ. 4.2.1).

$$\sigma = E a \Delta t h / 2(1-\mu) \quad \text{Τάση για πλήρη παρεμπόδιση μετακίνησης σε πλάκα.}$$

## 2. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ EISENMANN ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Υποτίθεται πλάκα ορθογωνική με ευθύγραμμη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ άνω και κάτω ίνας με κλίση

$$\Delta t = \Delta T/h \quad ^\circ\text{C/mm}$$

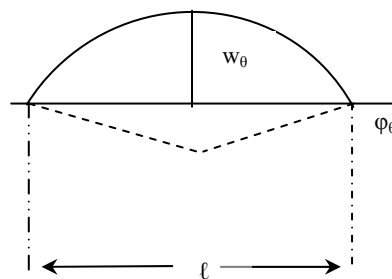
Θεωρείται η επαλληλία δύο επιρροών:

- α. διαφοράς θερμοκρασίας  $\Delta t$
- β. ιδίου βάρους

Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας η πλάκα θα παραμορφωθεί και θα πάρει σχήμα κυκλικό με βέλος στο μέσον  $W_\theta$  και γωνία περιστροφής στο άκρο  $\varphi_\theta$

$$W_\theta = 1^2 a \Delta t / 8(1-\mu)$$

$$\varphi_\theta = a \Delta t \cdot \frac{1}{2}$$

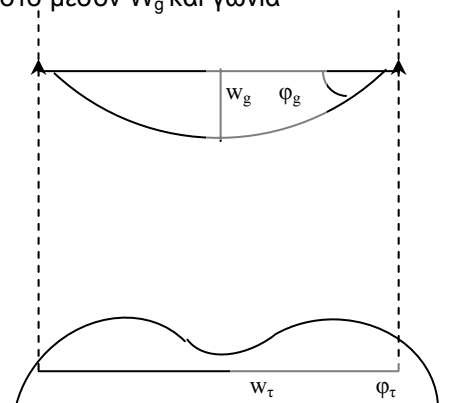


Λόγω ίδιου βάρους η πλάκα θα παραμορφωθεί (παραβολή) με βέλος στο μέσον  $W_g$  και γωνία περιστροφής  $\varphi_g$

$$W_g = (5/384) (gh^4/EJ)$$

Όπου  $g = \text{φαιν. Βάρος σκυ/τος} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^3$

$$J = h^3 / 12 \text{ ροπή αδρανείας}$$



$$\varphi_g = 12 \cdot 10^{-6} \cdot (1^3/Eh^2)$$

Η επαλληλία των δύο επιρροών δίνει:

$$W = W_\theta - W_g \quad \text{και} \quad \varphi = \varphi_\theta - \varphi_g$$

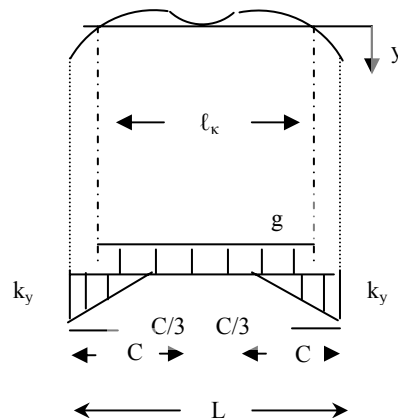
$$W = 1^2 \cdot [ a \Delta t / 8(1-\mu) - (0,144/38400) \cdot 1^2/Eh^2 ]$$

Άρα υπάρχει κάποια τιμή του μήκους  $l = l_k$  (κρίσιμο μήκος) για την οποία  $W = 0$  δηλ. το μέσον της πλάκας δε μετακινείται καθόλου.

Για  $\mu = 0.15$  το μήκος αυτό γίνεται:

$$l_k = 200 \cdot h \cdot ( a \Delta t E )^{1/2} \quad [N, mm]$$

$$\varphi_k = 18.3 h a \Delta t ( a \Delta t E )^{1/2}$$



$$L = l_k + \frac{2}{3} C$$

Ο Eisenmann, στη συνέχεια, κάνει την παραδοχή ότι τα άκρα στην πραγματικότητα θα βυθιστούν κατά  $y$  οπότε για μέτρο αντιστάσεως εδάφους  $k$  και μήκος επαφής με το έδαφος  $C$  η ισορροπία των κατακόρυφων φορτίων δίνει:

$$0.5 g l_k - 0.5 C k y \quad \text{Άρα} \quad C = g l_k / k y$$

$$y = \varphi_k C \quad \text{Άρα} \quad C = (g l_k / k \varphi_k)^{1/2} = 0.01549 ( h/a \Delta t k )^{1/2}$$

Το πραγματικό μήκος της πλάκας είναι  $L = l_k + 2C/3$

Κατά τον Eisenmann το μήκος  $C$  κατά το οποίο η πλάκα εδράζεται στο έδαφος εκατέρωθεν του κέντρου της, μπορεί να θεωρηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις στην πράξη με ικανοποιητική προσέγγιση ίσο προς 600 mm.

$$\text{Επομένως} \quad L = l_k + 400 \quad [mm]$$

Για τετραγωνική πλάκα βρίσκεται:

$$l_k = 228 h ( a \Delta t E )^{1/2}$$

Όταν το μήκος της πλάκας είναι αρκετά μεγαλύτερο του κρίσιμου μήκους θα υπάρχει περιοχή περί το κέντρο της η οποία λόγω του ίδιου βάρους δεν θα ανυψωθεί καθόλου οπότε η αναπτυσσόμενη τάση θα είναι ίση προς την τάση για πλήρη παρεμποδισμό δηλ.:

$$\sigma_p = E a \Delta t h / 2(1-\mu)$$

$$\text{για} \quad \mu = 1/6 \quad \text{και} \quad a = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\sigma_{\pi} = 0.6 h \Delta t E \quad \text{και για } E = 30000 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\pi} = 18 0000 h \Delta t h \quad [ \text{N/mm}^2 ]$$

Το διάγραμμα των τάσεων στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Παρατηρείται ότι στην περιοχή περί το μέσον οι αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν τιμή  $\sigma_{\pi}$  ενώ στα σημεία που απέχουν από τα άκρα  $1_k/2$  παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της τάσης.

Η μέγιστη αυτή τάση, κατά τον Eisenmann, για πλάκα με ελεύθερο μήκος  $L-2C/3 \geq 0.9 \cdot 1_k$  είναι κατά 20% μεγαλύτερη της τάσης πλήρους παρεμπόδισης μετακινήσεων δηλ.

$$\sigma_w = 1.20 \sigma_{\pi}$$

Η ίδια αυξημένη τιμή της τάσεως παρουσιάζεται στο μέσον της πλάκας με  $1 = L-C/3 = 1_k$

Όταν το μήκος της πλάκας  $1 = L - 2C/3 < 0.9 \cdot 1_k$  η αναπτυσσόμενη τάση είναι μικρότερη και έχει τιμή

$$\Sigma = [ (L - 2C/3) / 0.9 \cdot 1_k ]^2 \cdot 2 \sigma_{\pi}$$

Σημειώνεται ότι και στις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν η θερμοκρασία στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας στον πυθμένα, επομένως η πλάκα μόνο από θερμοκρασιακή μεταβολή κυρτώνεται προς τα πάνω στηριζόμενη στο έδαφος σε μια περιοχή περί τα άκρα της. Αν υπήρχε μόνο η επίδραση της θερμοκρασίας, στην πλάκα δεν θα αναπτύσσονταν τάσεις γιατί οι μετακινήσεις θα ήταν ανεμπόδιστες. Στην πραγματικότητα υπάρχει και η επίδραση το ίδιου βάρους της πλάκας που παρεμπυδίζει μερικά (πλάκες μικρού μήκους) ή ολικά (σε μια περιοχή περί το μέσον στις μεγάλου μήκους πλάκες) τη μετακίνηση και γι' αυτό αναπτύσσονται τάσεις. Έχουμε επομένως ένα φορέα καμπυλομένο προς τα πάνω (μορφή κύκλου) στον οποίο δρα το ίδιο βάρος. Άρα θα αναπτυχθούν τάσεις εφελκυσμού στην κάτω ίνα της πλάκας και τάσεις θλίψεως στην επιφάνεια της πλάκας.

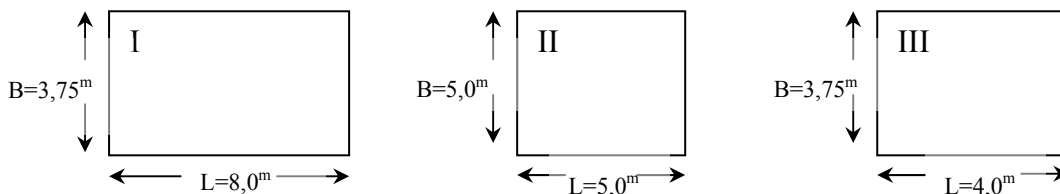
<u>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>	
 <b>ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΠΛΑΚΑ</b>	 <b>ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΠΛΑΚΑ</b>
$\frac{L}{B} > 1.2$ ή $\frac{L}{B} < 0.8$	$0.8 \leq \frac{L}{B} \leq 1.2$
$\ell_k = 200 \cdot h \sqrt{\alpha \cdot \Delta t \cdot E}$	$\ell_k = 228 \cdot h \sqrt{\alpha \cdot \Delta t \cdot E}$
$L - \frac{2}{3} \cdot C \geq 0.9 \cdot \ell_k$ $\sigma_w = 1.2 \cdot \sigma_{\pi}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μονάδες: mm, N, N/mm<sup>2</sup></li> <li>• Για τον υπολογισμό των τάσεων στην εγκάρσια έννοια γίνεται αντιστροφή των L και B</li> <li>• Οι τάσεις στην ακμή μπορούν να μειωθούν κατά 15%</li> <li>• <math>C = 0.01549 \sqrt{\frac{h}{\alpha \cdot \Delta t \cdot k}} \leq 600 \text{ mm}</math></li> <li>• <math>\Delta t = \frac{\Delta T}{h}</math>, <math>\left[ \frac{C^\circ}{\text{mm}} \right]</math> </li> </ul>
$L - \frac{2}{3} \cdot C \leq 0.9 \cdot \ell_k$	
$\sigma = \left[ \frac{L - \frac{2}{3} \cdot C}{0.9 \cdot \ell_k} \right]^2 \cdot \sigma_{\pi} - \left[ \frac{L - 400}{0.9 \cdot \ell_k} \right]^2 \cdot \sigma_{\pi}$ [MPa]	
$\sigma_{\pi} = \frac{1}{2(1-\mu)} \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot h \cdot E$ , [MPa]	

### Εφαρμογή

Να υπολογιστούν οι τάσεις κυρτώσεως στις πλάκες I, II και III του σχήματος για τα εξής δεδομένα:

$$\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \quad E = 30000 \text{ N/mm}^2 \quad \Delta t = 0,09 \text{ }^\circ\text{C/mm} \quad \text{και} \quad \Delta t = 0,06 \text{ }^\circ\text{C/mm}$$

$$\mu = 0,17 \quad h = 240 \text{ mm}$$



Πλάκα I ορθογωνική

$$(6,0/3,75 = 1,6 > 1,2)$$

$$\ell_k = 200 \cdot 240 \sqrt{1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,09 \cdot 30000} = 7.887 \text{ mm} \quad \text{για} \quad \Delta t = 0,09 \text{ }^\circ\text{C/mm}$$

$$\ell_k = 200 \cdot 240 \sqrt{1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,06 \cdot 30000} = 6.440 \text{ mm} \quad \text{για} \quad \Delta t = 0,06 \text{ }^\circ\text{C/mm}$$

$$C \simeq 600 \text{ mm}$$

$$L - \frac{2}{3} C = 8000 - \frac{2}{3} 600 = 7600 > 0,09 \ell_k = 1098 \text{ mm} \quad \text{για } \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L - \frac{2}{3} C = \quad \quad \quad = 7600 > 0,9 \ell_k = 5796 \text{ mm} \quad \text{για } \Delta t = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm} \quad \sigma_w = 1,2 \frac{1}{1-\mu} \frac{10^{-5} \cdot 0,09 \cdot 240 \cdot 30000}{2} = 1,2 \cdot 3,9 = 4,68 \text{ MP}\alpha$$

$$\Delta t = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/mm} \quad \sigma_w = 1,2 \frac{1}{1-0,17} \frac{10^{-5} \cdot 0,06 \cdot 240 \cdot 30000}{2} = 1,2 \cdot 2,6 = 3,12 \text{ MP}\alpha$$

$$\text{Πλάκα II και πλάκα III} \left( \frac{L}{B} = 1 \quad \text{και} \quad \frac{L}{B} = 1,07 \right)$$

Τετραγωνικές

$$\ell_k = 228 \cdot 240 \sqrt{10^{-5} \cdot 0,09 \cdot 30000} = 8991 \text{ mm} \quad \text{για } \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

$$\ell_k = \quad \quad \quad = 7341 \text{ mm} \quad \text{για } \Delta t = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

Για τις πλάκες II και III  $L - 400 < 0,9 \ell_k$

$$\sigma_\pi = \frac{1}{2(1-0,17)} \cdot 10^{-5} \cdot 0,09 \cdot 240 \cdot 30000 = 3,9 \text{ MP}\alpha \quad \text{για } \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

$$\sigma_\pi = \frac{1}{2(1-0,17)} \cdot 10^{-5} \cdot 0,06 \cdot 240 \cdot 30000 = 2,6 \text{ MP}\alpha \quad \text{για } \Delta t = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

Πλάκα II

$$\sigma = \left( \frac{5000 - 400}{0,9 \cdot 8991} \right)^2 \cdot 3,9 = 1,26 \text{ MP}\alpha, \quad \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

$$\sigma = \left( \frac{5000 - 400}{0,9 \cdot 7341} \right)^2 \cdot 2,6 = 1,26 \text{ MP}\alpha, \quad \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

Πλάκα III

$$\sigma = \left( \frac{4000 - 400}{0,9 \cdot 8991} \right)^2 \cdot 3,9 = 0,772 \text{ MP}\alpha, \quad \Delta t = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

$$\sigma = \left( \frac{4000 - 400}{0,9 \cdot 7341} \right)^2 \cdot 2,6 = 0,772 \text{ MP}\alpha, \quad \Delta t = 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$$

### Παρατηρήσεις

1. Πλάκες I, III: Διπλασιασμός του μήκους L (από 4m σε 8m) εξαπλασιάζει την τάση
2. Οι τάσεις που υπολογίζονται από την προσεγγιστική σχέση  $4 \cdot \left[ \frac{L - 400}{0,9l_k} \right]^2 \cdot \sigma_{\pi}$  είναι ανεξάρτητες του Δt.

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

#### Παράδειγμα 1. Αύξηση μέσης θερμοκρασίας

Ας υποτεθεί ότι οδόστρωμα από σκυροδέμα διαστρώνεται χωρίς εγκάρσιους αρμούς και ότι η θερμοκρασία του σκυροδέματος κατά την πήξη είναι 15°C. Ζητείται να υπολογιστούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις αν η μέση θερμοκρασία του σκυροδέματος σε θερμή ημέρα του καλοκαιριού γίνει 55°C.

$$E = 30.000 \text{ MPa} \quad a = 10^{-5} \quad \mu = 0,15$$

Υποθέτοντας ότι λόγω τριβών δε θα λάβει χώρα καμία μετακίνηση

$$\Delta\Theta = 55 - 15 = 40^\circ\text{C}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{1}{1-\mu} a E \Delta\Theta = \frac{1}{1-0,15} \times 10^{-5} \times 30.000 \times 40 = 0,35 \Delta\Theta = 14 \text{ MPa}$$

Η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για οδοστρώματα είναι πολύ μεγαλύτερη από 14 MPa (συνήθως 35 ~ 50 MPa). Άρα δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης του σκυροδέματος αν δεν κατασκευαστούν αρμοί διαστολής. Επιπλέον η ανάπτυξη θλιπτικής τάσεως είναι ευεργετική διότι:

- α) Η ύπαρξη θλιπτικής τάσης μειώνει τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται από τα φορτία των οχημάτων.
- β) Οι αρμοί είναι κλειστοί άρα υπάρχει συνεργασία στις επιφάνειες λόγω τριβής και αυξάνει ο «βαθμός συνεργασίας» των αρμών.

#### Προϋπόθεση

Οι επιφάνειες των αρμών συστολής και των αρμών διακοπής εργασίας πρέπει να είναι κατακόρυφες και να μην υπάρχει δυνατότητα εισχώρησης λίθων στην εγκοπή του αρμού.



#### Παράδειγμα 2. Μείωση της μέσης θερμοκρασίας - Συστολή

$$\left. \begin{array}{l} \text{Έστω} \\ \text{θερμοκρασία σκυροδέματος} : 35^\circ \text{C} \\ \text{ελάχιστη θερμοκρασία χειμώνα: } -5^\circ \text{C} \end{array} \right\} \Delta\Theta = 40^\circ \text{C}$$

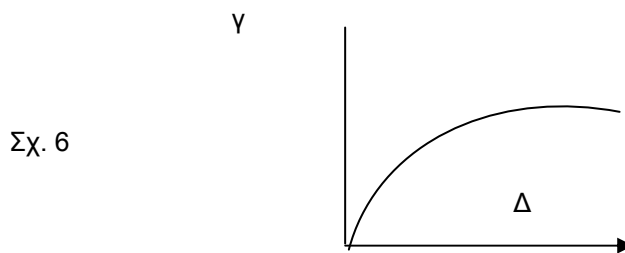
Αν το σκυρόδεμα είχε πολύ μεγάλη αντοχή τότε θα μπορούσε να αναπτυχθεί εφελκυστική τάση σε περίπτωση πλήρους παρεμπόδισης της μετακινήσεως (σχέση 4).

$$\sigma = \frac{1}{1-\mu} E\alpha \Delta\Theta = \frac{1}{1-0,15} 30.000 \times 10^{-5} \times 40 = 0,35 \Delta\Theta = 14 \text{ MP}\alpha$$

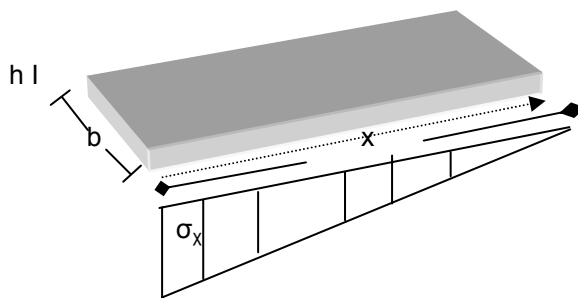
Είναι γνωστό όμως ότι το σκυρόδεμα έχει μικρή αντοχή σε εφελκυστικό (ή κάμψη) και επομένως η πλάκα θα ρηγματωθεί πολύ πιο πριν αναπτυχθεί η τάση αυτή.

Η πλάκα παραμένει αμετακίνητη στο κέντρο της και τείνει να μετακινηθεί στα άκρα της. Στη μετακίνηση αυτή αντιδρούν οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μεταξύ της πλάκας και της στρώσεως επί της οποίας εδράζεται.

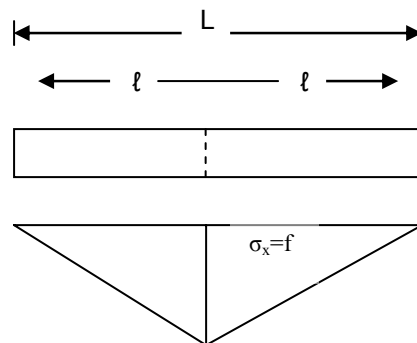
Ο συντελεστής τριβής «γ» δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από τη μετακίνηση Δ όπως φαίνεται στο Σχ. 6.



Με την προϋπόθεση σταθερού συντελεστή τριβής «γ»



Σχ. 7



$$\text{Τριβή} = b \cdot h \cdot g \cdot x \cdot \gamma$$

$$G = \text{φαινόμενο βάρος σκυροδέματος} \\ = 24 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^3$$



Αναπτυσσόμενη συνολική δύναμη = Δύναμη τριβής

$$\sigma_x = g \cdot \gamma \cdot x$$

$$x = \frac{\sigma_x}{g \cdot \gamma}$$

Όταν  $\sigma_x = f_{εφ}$  = αντοχή σε εφελκυσμό η πλάκα θα ρηγματωθεί

$$x = \ell = \frac{f}{g \cdot \gamma} \quad \dot{\eta} \quad L = \frac{2f}{g \cdot \gamma}$$

Για  $\gamma = 1$  ( $\gamma = 0,8 \quad 1,8$ )  $f_{εφ} = 3 \text{ MPa}$

$$x = \frac{3 \text{ N/mm}^2}{1 \times 24 \cdot 10^{-6} \text{ N/mm}^3} = 125 \text{ m}$$