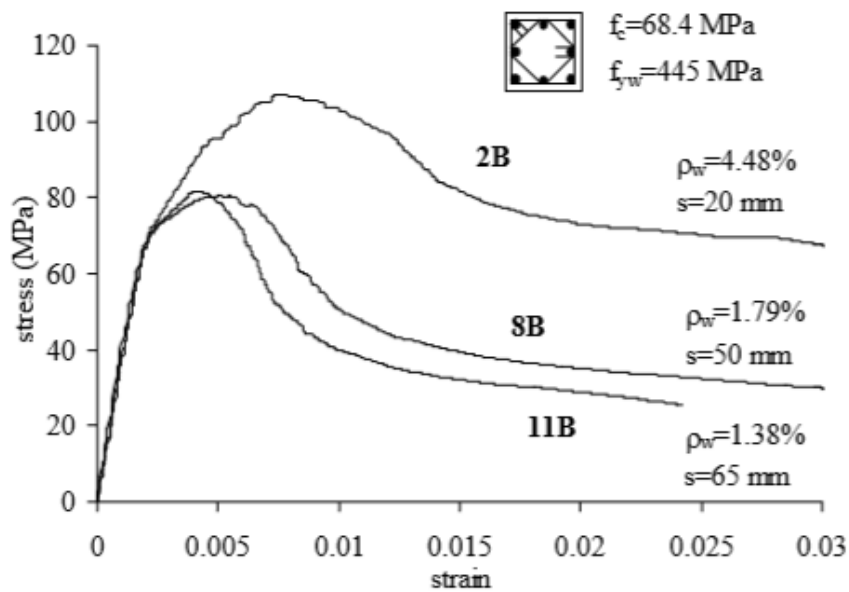




Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ



Σπουδάστρια: Χατζηπέτρον Λουκία  
Α. Μ. :5637

Εποπτεύων Καθηγητής: Δρ. Μπάρος Δημήτριος

Πάτρα, 2018

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν βασικό της στόχο την παρουσίαση της χρησιμότητας της περίσφιγξης σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής, στην εργασία αναφέρονται οι διάφορες μέθοδοι περίσφιγξης οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και παραδείγματα εφαρμογής της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μία αναλυτική μαθηματική μελέτη ενός προσομοιώματος κατασκευής ( υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος), το οποίο μελετάται σύμφωνα με διάφορα μοντέλα περίσφιγξης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Φωτογραφία Εξωφύλλου από Bing et al.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μπάρο Δημήτριο για την βοήθειά του και την αφιέρωση πολύτιμου χρόνου του ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φορέα απασχόλησής μου, για την κατανόηση που έδειξε όσες φορές χρειάστηκε να λείπω για λόγους που αφορούσαν την πτυχιακή εργασία μου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι ευρέως γνωστό , ότι η Ελλάδα αποτελεί μία ιδιαιτέρως σεισμογενή χώρα, όπου έχει στο ιστορικό της αρκετά ισχυρούς και καταστροφικούς σεισμούς. Η επιρροή της περίσφιγξης σε διάφορες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, αποτελεί κυρίαρχη λύση για τις κατασκευές που έχουν υποστεί ζημίες από σεισμούς.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία , θα αναλυθεί η σκοπιμότητα της περίσφιγξης οπλισμένου σκυροδέματος σε διάφορες κατασκευές, έναντι των μη περισφιγμένων. Τα περισφιγμένα στοιχεία, κατασκευάζονται σύμφωνα με διατάξεις και απαιτήσεις από τον Ευρωκώδικα 8, αναλόγως της κατηγορίας της κάθε κατασκευής.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν διαφόρων ειδών βλάβες που υπόκεινται τα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος εξαιτίας των σεισμών. Ανάλογα , λοιπόν, με το είδος της βλάβης χρησιμοποιούνται και αντίστοιχα οι κατάλληλες μέθοδοι περίσφιγξης για την αντιμετώπιση των βλαβών.

Στην εργασία αυτή, περιγράφεται η ιστορική αναδρομή και η εξέλιξη των μοντέλων περίσφιγξης μέσα από διάφορες μελέτες που έγιναν κατά την διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Επίσης, αναφέρονται αναλυτικά δύο μελέτες (Sheikh 2002, Priestley et al 1991,1992,1996) οι οποίες βοήθησαν στην εξέλιξη του φαινομένου.

Τέλος, εξετάζεται η μελέτη υποστυλώματος με την χρήση μοντέλων περίσφιγξης των Mander et al (1988a), Sheikh and Uzumeri (1982) & Model Code 90 CEB/FIP για διάφορες εκδοχές απόστασης συνδετήρων και διαμέτρων οπλισμών. Μέσω της ανάλυσης των μοντέλων αυτών, εξετάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

### **Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας:**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχω δε αναφέρει στην βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Η Σπουδάστρια:

Λουκία Χατζηπέτρου

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας: .....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: .....	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	7
1.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΥ ΑΠΕΡΙΣΦΙΚΤΟΥ .....	8
1.2.1 Γενικά. ....	8
1.2.2 Συμπεριφορά απερίσφικτου σκυροδέματος .....	10
1.2.3 Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	16
2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	16
2.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΔΟΚΩΝ .....	16
2.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ.....	19
2.3.1 Πρόσθετες διατάξεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 για υποστυλώματα μέσης κατηγορίας πλαστιμότητας (ΚΠΜ) .....	20
2.3.2 Πρόσθετες διατάξεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 για υποστυλώματα υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας (ΚΠΥ).....	21
2.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ. ....	23
2.5 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ. ....	24
2.5.1 Ενίσχυση υποστυλωμάτων. ....	24
2.5.2 Επεμβάσεις σε δοκούς. ....	29
2.5.3 Κατασκευαστικές διατάξεις για την εξωτερική περίσφιγξη. ....	32
2.5.4 Οδηγίες για την προετοιμασία της διεπιφάνειας. (ΥΠΕΧΩΔΕ, ΠΕΤΕΠ, ΕΚΔΟΣΗ 2.0, ΜΑΙΟΣ 2008). ....	33
2.6 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	37
3.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ .....	37
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ PRIESTLEY ET AL. (1991,1995,1996) .....	44
3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ SHEIKH (2002). ....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	47
4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ .....	47
4.1.1 Μοντέλο περίσφιγξης κατά Mander et al (1988a) .....	48

4.1.2 Μοντέλο περίσφιξης κατά Sheikh and Uzumeri (1982).....	49
4.1.3 Μοντέλο περίσφιξης κατά Model Code 90 CEB/FIP .....	49
4.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΟΥ ΕΠΙΛΥΕΤΑΙ.....	50
4.2.1 Μεταβλητή απόσταση συνδετήρων .....	51
4.2.2 Μεταβολή της διαμέτρου του εγκάρσιου σπλισμού.....	53
4.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	60
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	61

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

### ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ

#### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως είναι γνωστό η αντοχή καθώς και η ικανότητα του σκυροδέματος να παραμορφώνεται, αυξάνεται σημαντικά όταν αυτό βρίσκεται κάτω από συνθήκες τριαξονικής έντασης. Πρακτικά, όταν η πλευρική διόγκωση ενός μονοαξονικά θλιβόμενου στοιχείου παρεμποδίζεται από τους εγκάρσιους οπλισμούς (κλειστοί συνδετήρες ή σπείρες) δημιουργείται τριαξονική επιπόνηση. Το σκυρόδεμα το οποίο υφίσταται την ευνοϊκή λειτουργία του εγκάρσιου οπλισμού ονομάζεται περισφιγμένο ή εγκιβωτισμένο. Οι διαμήκεις οπλισμοί ενός στοιχείου, όταν αποτελούνται από ράβδους μεγάλης διαμέτρου και είναι διατεταγμένες σε μεγάλες αποστάσεις συνεισφέρουν σε ένα βαθμό στην περίσφιγξη του σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, σε ορισμένες περιπτώσεις η δημιουργία τριαξονικής έντασης συμβάλλει και εκείνη στην περίσφιγξή του. Τέτοιες εντατικές συνθήκες συχνά αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης όταν αυτό πλησιάζει τη θλιπτική αστοχία, υπό την προϋπόθεση ότι περιορίζεται η πλευρική διόγκωση του σκυροδέματος (εγκάρσια στη διεύθυνση της θλίψης) που εκδηλώνεται πάντοτε πριν την αστοχία. Στην κρίσιμη διατομή άκρου μίας δοκού ή βάσης ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος, ο όγκος του σκυροδέματος, μέσα στον οποίο ενσωματώνεται το μέλος που μας ενδιαφέρει, προκαλεί περιορισμό της εγκάρσιας στον άξονα του μέλους διόγκωσης του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης. Παρόμοια λειτουργούν και σε μεγαλύτερη έκταση κατά την διαμήκη έννοια, κλειστοί συνδετήρες ή άλλοι εγκάρσιοι στον άξονα του καμπτόμενου μέλους οπλισμοί όπως επίσης και μανδύες από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πλαστικά- FRP) που μπορεί να τοποθετηθούν περιμετρικά και για λόγους ενίσχυσης. Όταν ο περιορισμός της πλευρικής διόγκωσης επιτυγχάνεται μέσω εγκάρσιων οπλισμών ή μανδύα FRP, μιλάμε για «περίσφιγξη» του σκυροδέματος, ενώ όταν αυτός οφείλεται στον όγκο του περιβάλλοντος σκυροδέματος είναι καταλληλότερος ο όρος «εγκιβωτισμός». (Φαρδής, 2005)

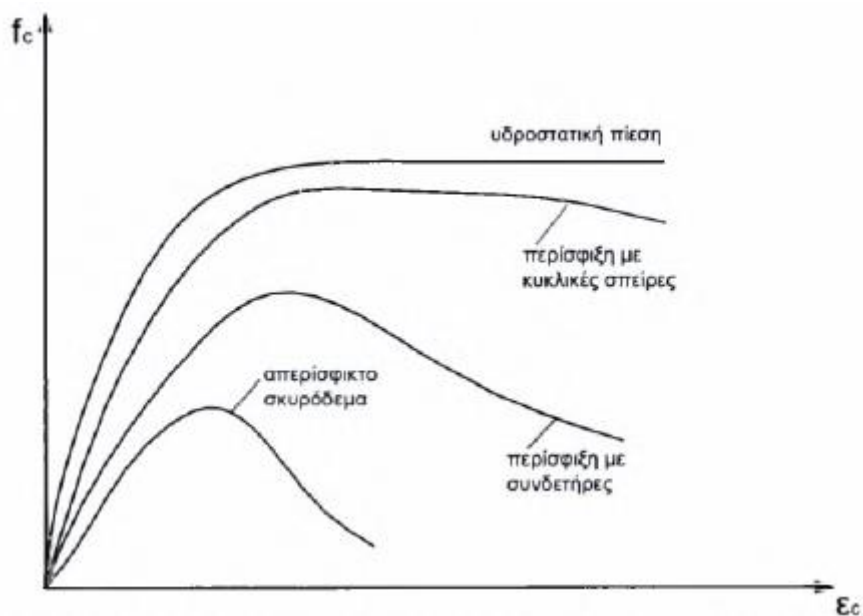
Εξαιρετικά ευνοϊκές είναι οι συνθήκες κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος, όταν σε αυτό δρουν σύνθετα υλικά. Ο μανδύας σύνθετων υλικών που περιβάλλει το σκυρόδεμα, ενεργοποιείται μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες, επιβάλλοντας με αυτό τον τρόπο εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του μέλους μέχρι αυτό να αστοχήσει. Η διαδικασία αυτή είναι αποτέλεσμα της εγκάρσιας διόγκωσης του σκυροδέματος.



## 1.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΥ ΑΠΕΡΙΣΦΙΚΤΟΥ

### 1.2.1 Γενικά.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, οι τάσεις περίσφιξης έχουν ως αποτέλεσμα αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της οριακής παραμόρφωσης του σκυροδέματος. Αυτό κατ' επέκταση οδηγεί στην αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας, βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα, παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμηκών ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων (Τριανταφύλλου, 2006).



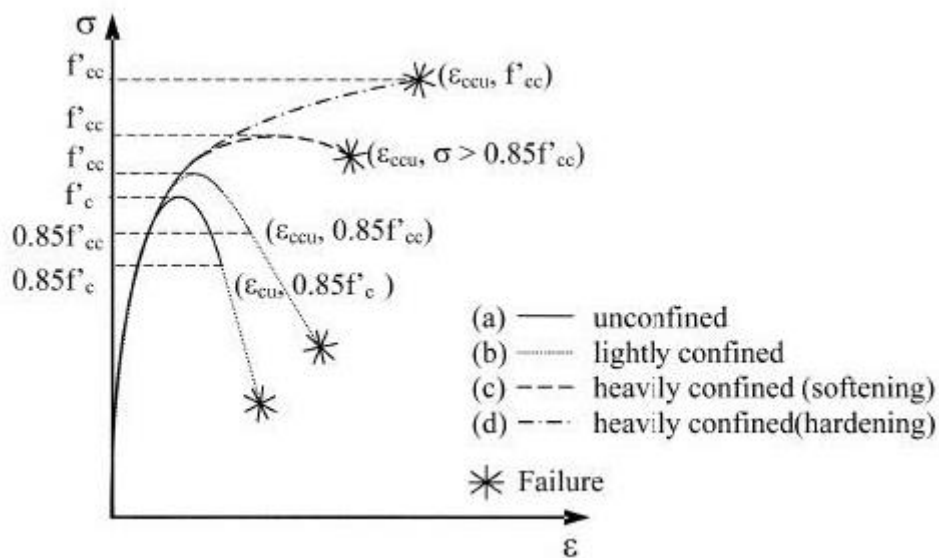
**Σχήμα 1.1:** Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος για διάφορα είδη περίσφιξης. (Κ.Δ. Μέρμηγκας)

Από το Σχήμα 1.2 η καμπύλη του απερίσφικτου σκυροδέματος αποτελείται από τρία τμήματα:

- α) Το πρώτο τμήμα, το οποίο είναι περίπου γραμμικό, βάση του οποίου αναπτύχθηκε η θεωρία των επιτρεπόμενων τάσεων.
- β) Το δεύτερο τμήμα όπου προκύπτει εξαιτίας των ανελαστικών παραμορφώσεων (αντιστοιχία τάσεων ίσων με το 60%-100% της θλιπτικής αντοχής), το οποίο χαρακτηρίζεται από μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού, δηλαδή διαρκής μείωση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας.

γ) Το τρίτο τμήμα, στο οποίο κατά το μήκος του η παραμόρφωση αυξάνεται και η τάση μειώνεται. Η διαφορετική δυσκαμψία των δύο υλικών, καθώς επίσης και οι μικρορωγμές του κονιάματος (που προέρχονται από τις συγκεντρώσεις των τάσεων στην περιοχή των ρωγμών συνάφειας), έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των ρωγμών συνάφειας στη διεπιφάνεια αδρανών- κονιάματος. Επομένως, η φθίνουσα κλίση του τρίτου τμήματος οφείλεται σε αυτές.

Επίσης, στο Σχήμα 1.2 παρατηρείται ότι στο σημείο όπου η εσωτερική ρηγμάτωση προκαλεί διόγκωση του υλικού, η συμπεριφορά του σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την περίσφιγξη. Το πρώτο τμήμα της καμπύλης ( $\sigma_c - \epsilon_c$ ) δεν επηρεάζεται από τους εγκάρσιους οπλισμούς διάτμησης. Αντιθέτως, η περίσφιγξη αρχίζει να επηρεάζει όλο και περισσότερο την καμπύλη όσο φτάνουμε στην θλιπτική αντοχή, ενώ παίζει καθοριστικό ρόλο στο τελευταίο τμήμα.



**Σχήμα 1.2:** Θλιπτική Τάση-Παραμόρφωση για περισφιγμένο σκυρόδεμα με μανδύα σύνθετων υλικών (Rocca et al, 2006).

Από τη μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων αναδεικνύονται τα βασικά σημεία της θετικής επιρροής της περίσφιγξης στη συμπεριφορά του σκυροδέματος. Αναλυτικά αυτά είναι:

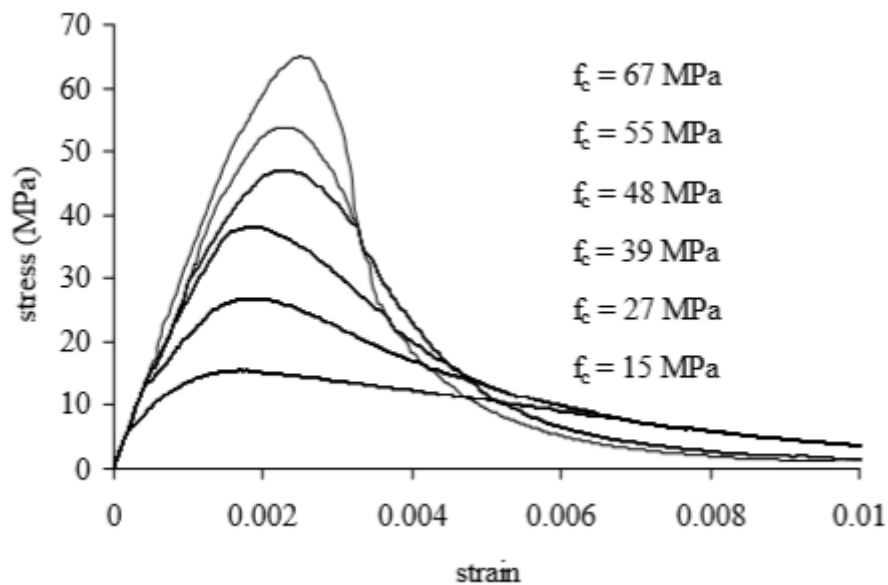
α) Η θραύση του σκυροδέματος της επικάλυψης των οπλισμών των στοιχείων προκαλείται από τις θλιπτικές παραμορφώσεις όταν ξεπερνούν το 4%. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται απώλειες, οι οποίες αναπληρώνονται από την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην περίσφιγξη.

β) Ο σημαντικότερος ρόλος της περίσφιγξης είναι ότι αυξάνει την πλαστιμότητα του σκυροδέματος. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, η περίσφιγξη μειώνει τον φθίνοντα κλάδο

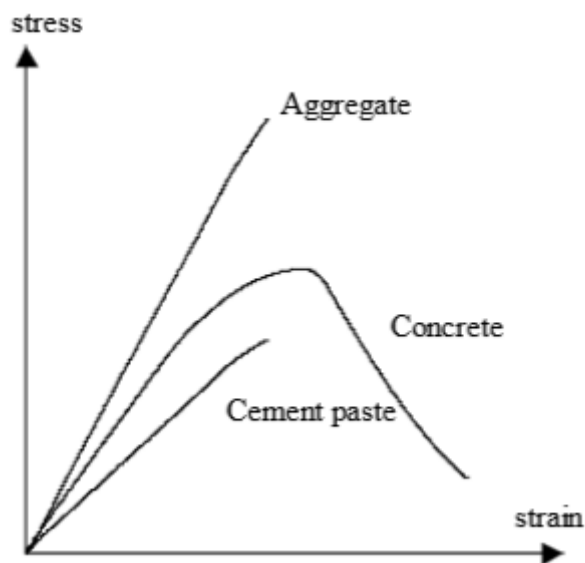
του διαγράμματος ( $\sigma_c - \varepsilon_c$ ), ενώ αυξάνει και την μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{cu}$ , όπου οι τιμές του υπερβαίνουν την τιμή 3,5% που προβλέπουν οι περισσότεροι κανονισμοί.

### 1.2.2 Συμπεριφορά απερίσφικτου σκυροδέματος

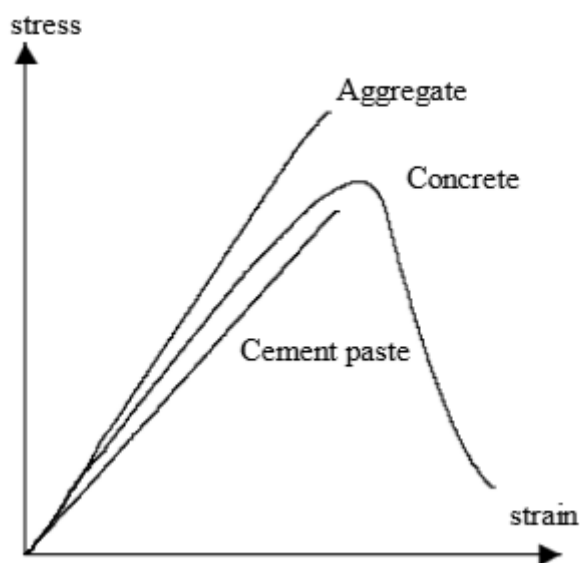
Το Σχήμα 1.3 απεικονίζει τα διαγράμματα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδεμάτων διαφόρων κατηγοριών υπό μονοαξονική θλίψη. Παρατηρείται πως η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος επηρεάζει σημαντικά και τα τρία τμήματα της κάθε καμπύλης  $\sigma_c - \varepsilon_c$ . Για τα σκυροδέματα που έχουν υψηλή αντοχή διακρίνεται πως το πρώτα τμήμα των καμπυλών τους είναι πιο ευθύγραμμο και απότομο για μεγαλύτερο ποσοστό της μέγιστης αντοχής. Η μικρή διαφορά της δυσκαμψίας του τσιμεντοπολτού και των αδρανών μειώνουν την ρηγμάτωση, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 1.4 και 1.5 και σε αυτό οφείλεται η απότομη και ευθύγραμμη κλίση των ανιόντων τμημάτων των διαγραμμάτων. Συμπερασματικά, για τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα το ευθύγραμμο τμήμα των διαγραμμάτων φτάνει έως το 85% της μέγιστης τάσης, σε αντίθεση με τα συνηθισμένα σκυροδέματα όπου φτάνουν έως το 70% αυτής (Δημήτριος Κωνσταντινίδης).



**Σχήμα 1.3:** Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη (Panelis & Kappos)



**Σχήμα 1.4:** Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων τσιμεντοπολτού , αδρανών υλικών και σκυροδέματος συνήθους αντοχής (Δημήτριος Κωνσταντινίδης).



**Σχήμα 1.5:** Διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων τσιμεντοπολτού, αδρανών υλικών και σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας (Δημήτριος Κωνσταντινίδης).

Το δεύτερο τμήμα των καμπυλών χαρακτηρίζεται από την απόκλιση του υλικού από την ελαστική συμπεριφορά, όπου επηρεάζεται από το μικρό μήκος των ρηγματώσεων. Η ταχύτητα απομείωσης του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας είναι μεγαλύτερη για τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής. Αντιθέτως, η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος επηρεάζει και την αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης  $\epsilon_{cl}$ , η οποία αντιστοιχεί με την μέγιστη τάση  $f_c$ . Η μικρή ανακατανομή των τάσεων μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών οφείλεται στην διαφορά που έχουν τα μέτρα ελαστικότητάς τους. Εξαιτίας αυτής

της ανακατανομής των τάσεων δημιουργείται η απότομη κλίση του διαγράμματος  $\sigma_c - \varepsilon_c$  (Σχήμα 1.5).

Τέλος, η αστοχία του σκυροδέματος γίνεται απότομα αποδεικνύοντας ότι τα υλικά υψηλής αντοχής είναι ιδιαίτερα ψαθυρά. Η επιφάνεια αστοχίας δημιουργείται από τη θραύση των αδρανών αλλά και του κονιάματος. Η επιφάνεια αυτή είναι πιο τραχιά σε σύγκριση με τα συνηθισμένα σκυροδέματα, όπου των οποίων οι επιφάνειες αστοχίας καθορίζονται από την επιφάνεια των αδρανών που στην περίπτωση αυτή δεν θραύονται.

### 1.2.3 Συμπεριφορά περισφιγμένου σκυροδέματος

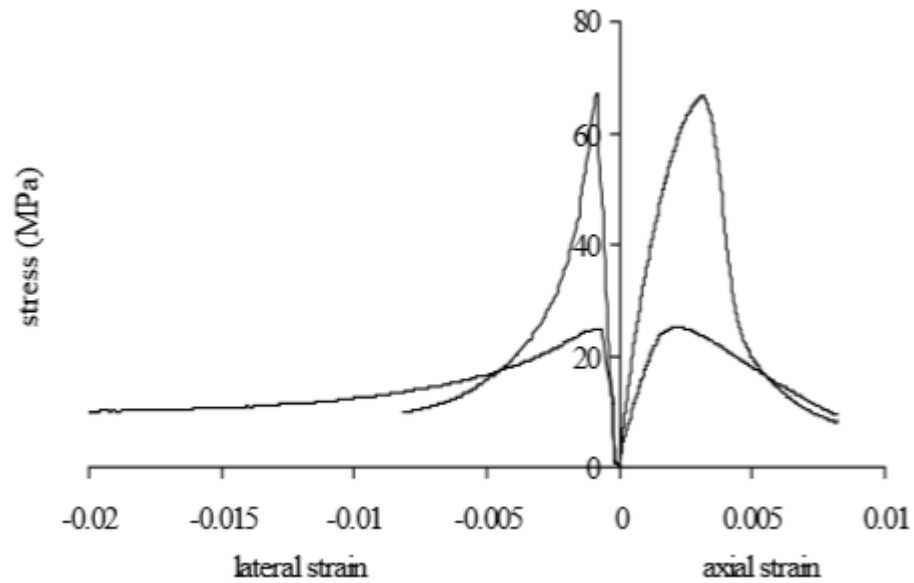
Η σημασία της περισφιγξης, όπου έχει αποδειχτεί τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά, παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας του σκυροδέματος. Για αυτό τον λόγο οι αντισεισμικοί κανονισμοί συμπεριλαμβάνουν διατάξεις για την χρήση οπλισμού περισφιγξης.

Όσον αναφορά τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής, επειδή έχουν μικρότερη εγκάρσια διόγκωση, πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6, πως η εγκάρσια διόγκωση δεν επέρχεται ταυτόχρονα με την ανάπτυξη της μέγιστης τάσης του σκυροδέματος, εκτός και αν είναι καλά περισφιγμένα.

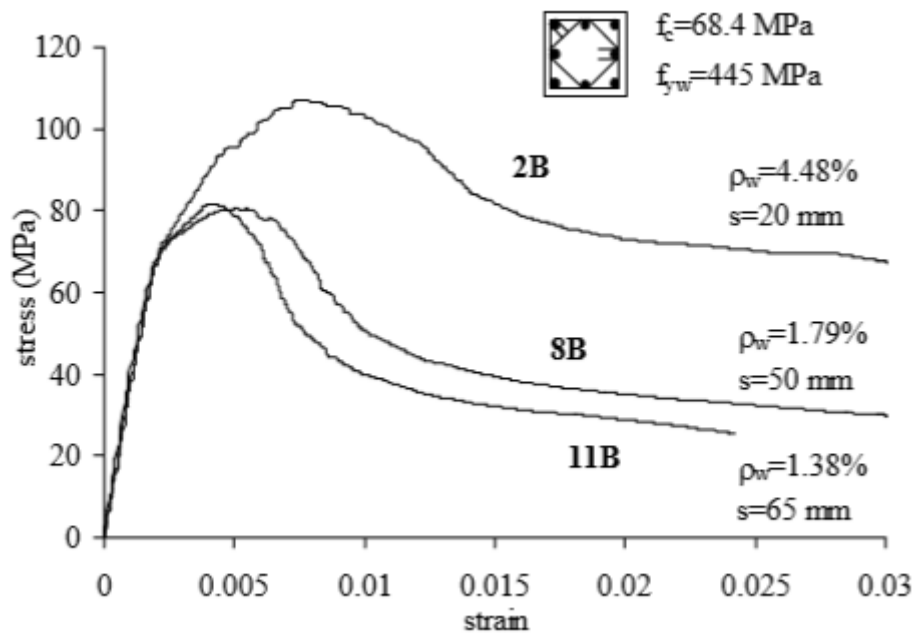
Όταν το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση της πλαστιμότητας και της αντοχής στο περισφιγμένο σκυροδέμα όπως και στα κοινά σκυροδέματα. (Σχήμα 1.7).

Οι δυνάμεις της περισφιγξης μπορούν να αυξηθούν με τους εξής τρόπους:

- Αύξηση ορίου διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού (Σχήμα 1.8)
- Μείωση της απόστασης των συνδετήρων (Σχήμα 1.9)
- Καλή κατανομή του διαμήκους οπλισμού



**Σχήμα 1.6:** Αξονική τάση - Αξονική παραμόρφωση και εγκάρσια παραμόρφωση σκυροδέματος υψηλής αντοχής (Shah)

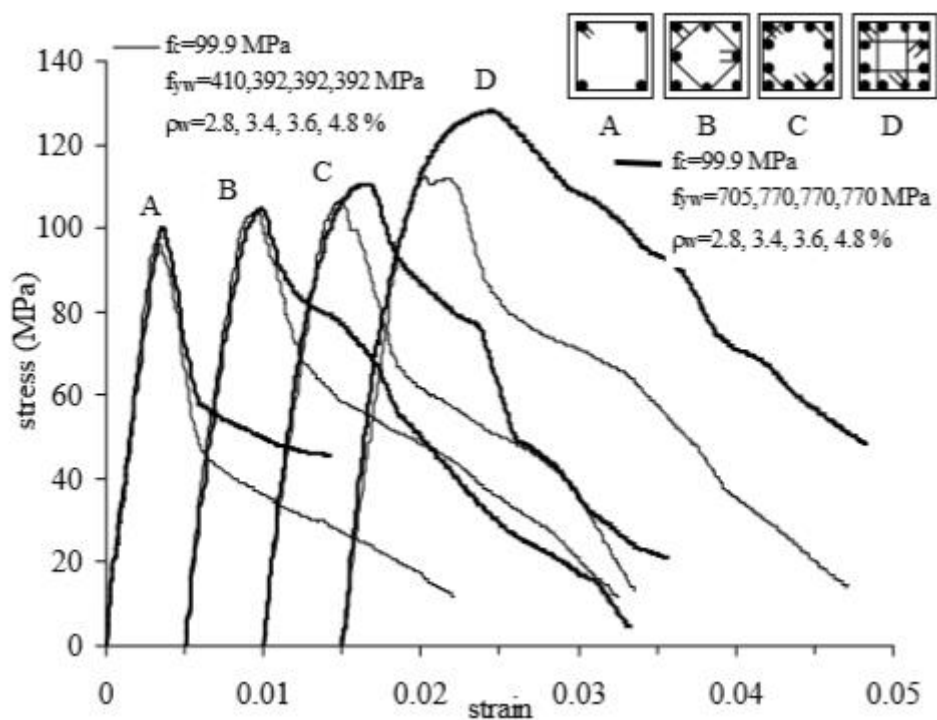


**Σχήμα 1.7:** Επιρροή του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού (Bing et al)

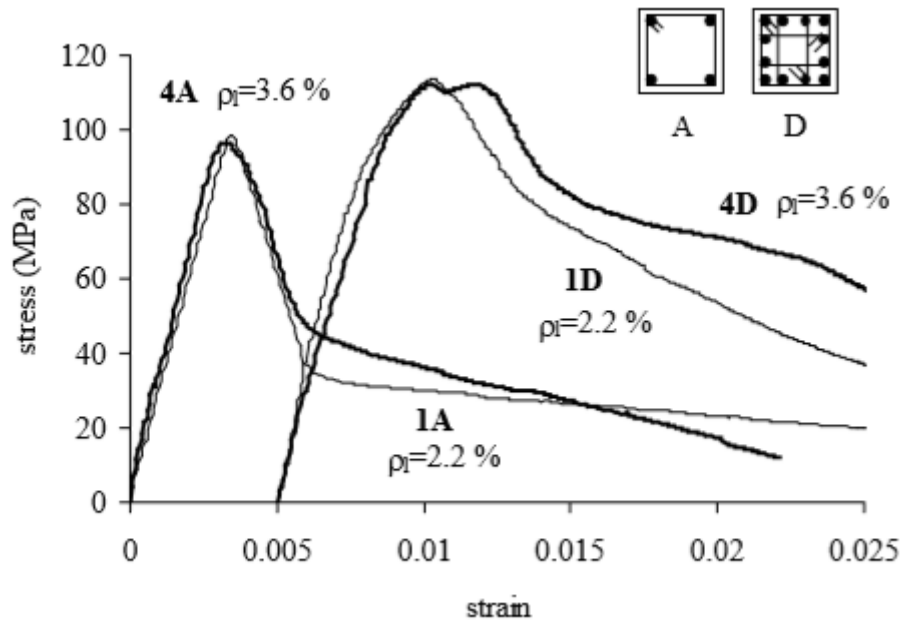
Η αύξηση των δυνάμεων της περίσφιγξης έχει ως αποτέλεσμα και την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας. Για να αποφευχθεί η πυκνή διάταξη των οπλισμών και τα

προβλήματα που προκαλούνται εξαιτίας αυτού η λύση είναι η τοποθέτηση χάλυβα υψηλού ορίου διαρροής.

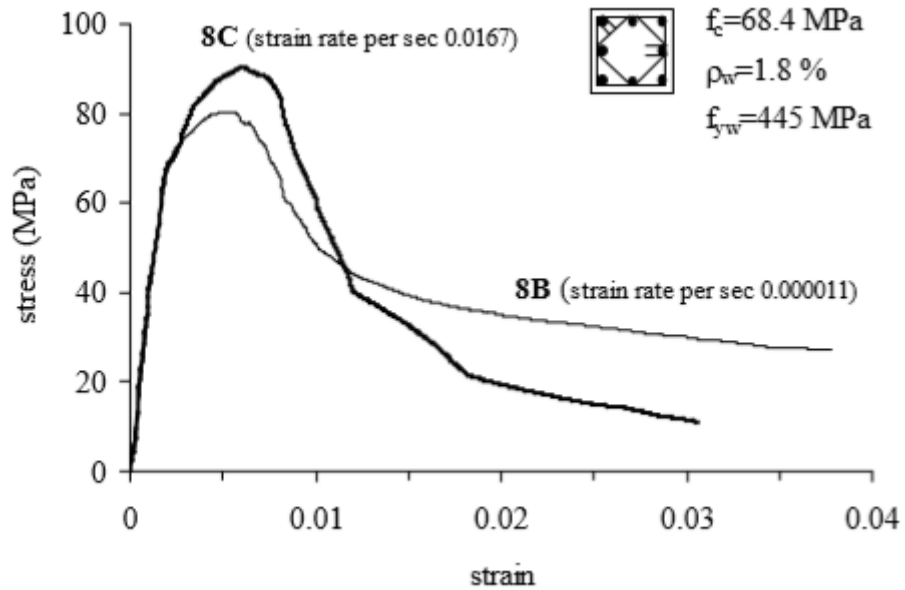
Η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης φαίνεται να έχει θετική επιρροή στην πλαστιμότητα. Επίσης, η μη διαρροή του οπλισμού περίσφιγξης όταν αναπτύσσεται η μέγιστη τάση έχει ως αποτέλεσμα να μην αυξάνεται σημαντικά η αντοχή του σκυροδέματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η εκκεντρότητα της φόρτισης δεν επηρεάζει την αντοχή, αντιθέτως αυξάνει την πλαστιμότητα του σκυροδέματος.



**Σχήμα 1.8:** Επιρροή της ποσότητας και του ορίου διαρροής του εγκάρσιου (Cusson and Paultre)



Σχήμα 1.9: Επιρροή της διάταξης διαμήκους οπλισμού (Cusson and Paultre)



Σχήμα 1.10: Επιρροή της επιβολής της φόρτισης (Bing et al)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥΣ

#### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Δεδομένων των σημαντικών ευεργετικών επιδράσεων της περίσφιγξης στη συμπεριφορά των δομικών μελών από σκυρόδεμα, οι σύγχρονοι κανονισμοί προβλέπουν μέσω διατάξεων την επάρκεια του εγκάρσιου οπλισμού των στοιχείων.

Στις νέες κατασκευές οι προβλέψεις των Ευρωκωδίκων 2 και 8 αφορούν τη σωστή τοποθέτηση και κατασκευαστική διαμόρφωση των συνδετήρων. Σε υφιστάμενες κατασκευές η περίσφιγξη επιβάλλεται με εξωτερικό οπλισμό που επικολλάται κατάλληλα στο υπάρχον μέλος. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται κανονιστικές διατάξεις και κατασκευαστικές πρακτικές που σχετίζονται με κάθε περίπτωση επιβολής περίσφιγξης.

#### 2.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΔΟΚΩΝ

Οι κατασκευαστικές διατάξεις αναφέρονται κυρίως σε δομικά στοιχεία κτιριακών κατασκευών. Οι κανόνες αυτοί εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία της κατασκευής, την απαραίτητη ασφάλεια και την ανθεκτικότητα σε βάθος χρόνου. Για την διασφάλιση των παραπάνω χρησιμοποιούνται ελάχιστοι οπλισμοί δομικών στοιχείων. Με την χρήση των ελάχιστων οπλισμών αποφεύγεται κατά την ρηγμάτωση η ψαθυρή αστοχία κατά συνέπεια, δεν υπάρχει μεγάλο εύρος ρωγμών στην κατασκευή. Τέλος, οι οπλισμοί αυτοί βοηθούν στην απορρόφηση των δυνάμεων που έχουν προκληθεί από καταναγκασμούς, είτε από άλλες δράσεις.

Ράβδοι με νευρώσεις χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τις κρίσιμες περιοχές κυρίων και πρωτεύοντων στοιχείων. Η αυξημένη ολκιμότητα των χαλύβων οπλισμένου σκυροδέματος C και B μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής (Θεωδοροπούλου Α.)

$$\frac{O_{LK} C}{O_{LK} B} \approx \frac{(k\varepsilon_{uk})_C}{(k\varepsilon_{uk})_B} \approx \frac{1,15 \cdot 7,5}{1,08 \cdot 5,0} \approx 1,5$$

Γενικά οι απαιτήσεις για τα υλικά όπως αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 2 συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1

**Πίνακας 2.1:** Απαιτήσεις για τα υλικά κυρίων στοιχείων (Θεωδοροπούλου Α.)

Κατηγορία Πλαστιμότητας (ΚΠ)	ΚΠΧ(Χαμηλή) και δευτερεύοντα στοιχεία	ΚΠΜ(Μέση)	ΚΠΥ(Υψηλή)
Σκυρόδεμα	Βλ. απαιτήσεις ανθεκτικότητας	$\geq C16/20$	$\geq C20/25$
Κατηγορία χάλυβα	B ή C	B ή C	Μόνο C
Διαμήκεις ράβδοι	Με νευρώσεις	Με νευρώσεις	Με νευρώσεις
Υπεραντοχή χάλυβα	-	-	$\alpha c f_{yk,0.95} \leq 1,25 n o m f_{yk}$

Συγκεκριμένα για τον εγκάρσιο οπλισμό των δοκών, οι Κανονισμοί περιλαμβάνουν συγκεκριμένες διατάξεις για διαμήκη απόσταση των συνδετήρων, την εγκάρσια απόσταση των σκελών τους και το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2. Για δοκούς Μέσης και Υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας ο Ευρωκώδικας 8 επιβάλλει αυστηρότερη διαμόρφωση του εγκάρσιου οπλισμού ιδιαίτερα στις κρίσιμες περιοχές, όπου αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις και η πιθανή ανάπτυξη βλαβών (ρηγματώσης) των μελών. (Πίνακας 2.3).

Επιπρόσθετα με τα παραπάνω, θα πρέπει ο πρώτος συνδετήρας να τοποθετείται σε απόσταση  $s \leq 50\text{mm}$  από την ακραία διατομή της δοκού. Θεωρώντας  $f_{yk} = 500\text{MPa}$  προκύπτουν τα ελάχιστα ποσοστά οπλισμού που συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4

**Πίνακας 2.2:** Απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό των συνήθων δοκών (Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Μέγιστη απόσταση κεκαμμένων ράβδων	$s_{b,max} = 0,60d(1 + c o t a)$
Μέγιστη διαμήκης απόσταση εγκάρσιου οπλισμού	$s_{w,max} = 0,75d(1 + c o t a)$
Μέγιστη εγκάρσια απόσταση σκελών συνδετήρα	$s_{t,max} = \min \begin{cases} 0,75d \\ 0,6m \end{cases}$
Ελάχιστο ποσοστό οπλισμού	$\rho_{w,min} = 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$

**Πίνακας 2.3:** Πρόσθετες διατάξεις σύμφωνα με τον EN1998-1:2004 για τις δοκούς μέσης κλάσεως πλαστιμότητας (ΚΠΜ) και υψηλής κλάσεως πλαστιμότητας (ΚΠΥ) (Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Ελάχιστη διάμετρος οπλισμού	$\varnothing_{w,min} = 6mm$
Μέγιστη απόσταση κεκαμμένων ράβδων	$s_{b,max} = 0,60d(1 + cota)$
Μέγιστη διαμήκης απόσταση εγκάρσιου οπλισμού εκτός κρίσιμης περιοχής	$s_{w,max} = 0,75d(1 + cota)$
Μέγιστη διαμήκης απόσταση εγκάρσιου οπλισμού εντός κρίσιμης περιοχής	$s_{w,max} = \min \begin{cases} 8d_{bl} \\ \frac{h_w}{4} \\ 24d_{bw} \\ 225mm \end{cases}$
Μέγιστη εγκάρσια απόσταση σκελών συνδετήρα	$s_{t,max} = \min \begin{cases} 0,75d \\ 0,6m \end{cases}$
Ελάχιστο ποσοστό οπλισμού	$\rho_{w,min} = 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$

**Πίνακας 2.4:** Ελάχιστα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού δοκών ανά κατηγορία σκυροδέματος (Θεωδοροπούλου Α.)

	Ελάχιστα ποσοστά οπλισμού		
	$\rho_{w,min}(\text{‰})$		
	ΚΠΧ	ΚΠΜ	ΚΠΥ
C16	0,64		
C20	0,72		
C25	0,80		
C30	0,88		
C35	0,95		
C40	1,01		
C45	1,07		
C50	1,13		

### 2.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Για τα υποστυλώματα, στα οποία λόγω και της σεισμικής επιβάρυνσης οι απαιτήσεις για περίσφιξη είναι κατά κανόνα αυξημένες, καταρχάς οι Κανονισμοί θεσπίζουν όρια για την ελάχιστη διάμετρο και τη μέγιστη απόσταση των συνδετήρων (Πίνακας 2.5).

**Πίνακας 2.5:** Ελάχιστη διάμετρος και αποστάσεις συνδετήρων υποστυλωμάτων (Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Ελάχιστη διάμετρος συνδετήρων	$\Phi_{w,min} = \max \left\{ \frac{6mm}{4} \right.$
Μέγιστη απόσταση συνδετήρων	$\left. s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20\Phi_{L,min} \\ h_c \\ 400mm \end{array} \right. \right.$

Σχετικά με τη μέγιστη τάση και τις οριακές παραμορφώσεις του περισφιγμένου σκυροδέματος, βάσει των Κανονισμών μπορούν να γίνουν οι ακόλουθοι υπολογισμοί (Θεωδοροπούλου Α.):

$$f_{cd,c} = f_{cd} * \begin{cases} 1,000 + 5,0 \frac{\sigma_{conf}}{f_{cd}} & \text{ισχύει όταν } \sigma_{conf} \leq 0,05f_{cd} \\ 1,125 + 2,5 \frac{\sigma_{conf}}{f_{cd}} & \text{ισχύει όταν } \sigma_{conf} \geq 0,05f_{cd} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} * \left( \frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} \right)^2$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \left( \frac{\sigma_{conf}}{f_{cd}} \right) = \varepsilon_{cu2} + 0,1a\omega_{wd}$$

Όταν  $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$  ισχύει  $\varepsilon_{c2} = 0.2\%$ , καθώς και  $\varepsilon_{cu2} = 0.35\%$

- Υποθέτουμε ότι  $a\omega_{wd} = 0.15$  τότε  $\frac{\sigma_{conf}}{f_{cd}} = 0.15 (> 0.05)$

$$f_{cd,c} \approx 1.3125 \cdot f_{cd}$$

$$\varepsilon_{c2,c} \approx 0.2\% \cdot (1.3125)^2 \approx 0.34\%$$

$$\varepsilon_{cu2,c} \approx 0.35\% + 1.5\% \approx 1.85\%$$

- Έστω ότι  $a\omega_{wd} = 0.30$  άρα  $\frac{\sigma_{conf}}{f_{cd}} = 0,15 (> 0,05)$ :

$$f_{cd,c} \approx 1.5 \cdot f_{cd}$$

$$\varepsilon_{c2,c} \approx 0.2\% \cdot (1.5)^2 \approx 0.45\%$$

$$\varepsilon_{cu2,c} \approx 0.35\% + 3\% \approx 3.35\%$$

Από τους προηγούμενους υπολογισμούς προκύπτει ότι από τις συνολικά βελτιωμένες οριακές τιμές του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του σκυροδέματος, στον Κανονισμό λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεγάλη αύξηση της  $\varepsilon_{cu2}$ .

### 2.3.1 Πρόσθετες διατάξεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 για υποστυλώματα μέσης κατηγορίας πλαστιμότητας (ΚΠΜ)

Τα υποστυλώματα ΚΠΜ σχεδιάζονται για μεγαλύτερη σεισμική καταπόνηση, συνεπώς οι απαιτήσεις για την περίσφιγξη του σκυροδέματος μέσω εγκάρσιου οπλισμού προκύπτουν αυξημένες σύμφωνα με τον Πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2.6:** Απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό υποστυλωμάτων ΚΠΜ (Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Ελάχιστη διάμετρος συνδετήρων	$\Phi_{w,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 6mm \\ \frac{\Phi_{L,max}}{4} \end{array} \right.$
Μέγιστη απόσταση συνδετήρων	$s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20\Phi_{L,min} \\ h_c \\ 400mm \end{array} \right.$ $s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_0}{2} \\ 175mm \end{array} \right.$
Βάση κτιρίου (στις κρίσιμες περιοχές)	$\omega_{wd} \geq 0.08$ $a\omega_{wd} \geq 30\mu_{\phi} \nu_d \varepsilon_{syd} \frac{b_c}{b_0} - 0.035$

Πέραν των αναφερόμενων στον Πίνακα 2.6, λαμβάνονται υπόψιν τα ακόλουθα:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των συνδετήρων  $s$  στις μη κρίσιμες περιοχές θα πρέπει να μειωθεί στο 60% της τιμής που δίνεται παραπάνω:
  - Σε τμήματα του υποστηλώματος μήκους ίσου με τη μεγαλύτερη διάσταση της διατομής πάνω ή κάτω από δοκό ή πλάκα.
  - Σε περιοχές υπερκάλυψης, εφόσον η μέγιστη διάμετρος των διαμήκων ράβδων είναι μεγαλύτερη από 14mm. Απαιτείται να τοποθετούνται κατ' ελάχιστο 3 συνδετήρες ανά ίσες αποστάσεις εντός του μήκους υπερκάλυψης.
- Από τον έλεγχο της ικανοποίησης των ελάχιστων ορίων για τα  $\omega_{wd}$  και  $a\omega_{wd}$  προκύπτουν επίσης ελάχιστες απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό.
- Για ΚΠΜ ο εγκάρσιος οπλισμός κρίσιμων περιοχών μπορεί να υπολογίζεται με κανόνες ΚΠΧ αν  $v_d < 0.2$  και  $q < 2$ .
- Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης ( $\alpha$ ) ορίζεται ως:  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$ .
  - Για ορθογωνική διατομή ισχύει:
 
$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_0h_0}, \quad \alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right)$$
  - Για διατομή κυκλική με κυκλικούς κλειστούς συνδετήρες ισχύει:
 
$$\alpha_n = 1, \quad \alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2D_0}\right)^2$$
  - Για διατομή κυκλική με σπυροειδείς συνδετήρες ισχύει:
 
$$\alpha_n = 1, \quad \alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2D_0}\right)$$

### 2.3.2 Πρόσθετες διατάξεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 για υποστυλώματα υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας (ΚΠΥ)

Τα υποστυλώματα ΚΠΥ αναμένεται να καταπονηθούν έντονα από το σεισμό σχεδιασμού και απαιτείται να μπορούν να «διαχειριστούν» ακόμα και την εμφάνιση βλαβών (ρηγματώσεων κλπ.) στις κρίσιμες περιοχές τους. Συνεπώς οι απαιτήσεις για την περίσφιγξη του σκυροδέματος στα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερα αυστηρές, όπως σημειώνεται στον Πίνακα 2.7.

Επιπλέον των αναφερόμενων στον Πίνακα 2.7:

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των συνδετήρων  $s$  στις μη κρίσιμες περιοχές θα πρέπει να μειωθεί στο 60% της τιμής που δίνεται παραπάνω:
  - Σε τμήματα του υποστυλώματος μήκους ίσου με τη μεγαλύτερη διάσταση της διατομής πάνω ή κάτω από δοκό ή πλάκα.

**Πίνακας 2.7:** Απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό υποστυλωμάτων ΚΠΥ  
(Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Ελάχιστη διάμετρος συνδετήρων	$\Phi_{w,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 6mm \\ 0,4\Phi_{L,max} \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{ydw}}} \end{array} \right.$
Μέγιστη απόσταση συνδετήρων	<p>Εκτός κρίσιμης περιοχής:</p> $s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20\Phi_{L,min} \\ h_c \\ 400mm \end{array} \right.$ <p>Εντός κρίσιμης περιοχής:</p> $s_{max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{b_0}{3} \\ 125mm \\ 6\Phi_{L,min} \end{array} \right.$
Βάση κτιρίου (στις κρίσιμες περιοχές)	$\omega_{wd} \geq 0,12$ $\alpha\omega_{wd} \geq 30\mu_{\varphi}v_d\varepsilon_{syd} \frac{b_c}{b_0} - 0.035$
Υπόλοιπο κτίριο	$\omega_{wd} \geq 0,08$ $\alpha\omega_{wd} \geq 30\mu_{\varphi}v_d\varepsilon_{syd} \frac{b_c}{b_0} - 0.035$

ii. Σε περιοχές υπερκάλυψης, εφόσον η μέγιστη διάμετρος των διαμήκων ραβδών είναι μεγαλύτερη από 14mm. Απαιτείται να τοποθετούνται κατ' ελάχιστο 3 συνδετήρες ανά ίσες αποστάσεις εντός του μήκους υπερκάλυψης.

- Από τον έλεγχο ικανοποίησης των ελάχιστων ορίων για τα  $\omega_{wd}$  και  $\alpha\omega_{wd}$  προκύπτουν επίσης ελάχιστες απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό .
- Για ΚΠΥ στους δύο κατώτατους ορόφους οι απαιτήσεις για  $d_{bw}$  και  $s_w$  εφαρμόζεται σε 1,5 φορά το μήκος της κρίσιμης περιοχής.
- Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης ( $\alpha$ ) ορίζεται ως:  $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$ .

iv. Για ορθογωνική διατομή ισχύει:

$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_0h_0}, \quad a_s = \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right)$$

v. Για διατομή κυκλική με κυκλικούς κλειστούς συνδετήρες ισχύει:

$$\alpha_n = 1, \quad a_s = \left(1 - \frac{s}{2D_0}\right)^2$$

vi. Για διατομή κυκλική με σπυροειδείς συνδετήρες ισχύει:

$$\alpha_n = 1, \quad a_s = \left(1 - \frac{s}{2D_0}\right)$$

## 2.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ.

Στα τοιχώματα απαιτείται η περίσφιγξη των ακραίων περιοχών της διατομής που διαμορφώνονται ως κρυφά υποστυλώματα σύμφωνα με τις διατάξεις που συνοψίζονται στον Πίνακα 2.8.

**Πίνακας 2.8:** Απαιτήσεις για τον εγκάρσιο οπλισμό υποστυλωμάτων των ακραίων περιοχών τοιχωμάτων (Θεωδοροπούλου Α.)

Μέγεθος	Απαιτήσεις
Στην κρίσιμη περιοχή:  Ελάχιστη διάμετρος οπλισμού	$d_{w,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 6mm \\ \frac{d_{bl}}{4} \end{array} \right.$
Στην κρίσιμη περιοχή:  Μέγιστη διάμετρος οπλισμού	$s_{w,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 20d_{bl} \\ b_{w0} \\ 400mm \end{array} \right.$
Λοιπό Ύψος τοιχώματος για Διαμήκης οπλισμούς	Αν $\varepsilon_c > 0,2\%$ τότε $\rho_v \geq 0,5\%$  Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ισχύει $\rho_v \geq 0,2\%$

Επιπλέον, για τοιχώματα ΚΠΜ προβλέπονται τα εξής:

- Στην κρίσιμη περιοχή
  - i. Για την ελάχιστη διάμετρο οπλισμού καθώς και για την μέγιστη διαμήκης απόσταση του οπλισμού ισχύει το παρακάτω:

Αν στο  $A_c = I_c b_w$  είναι  $\rho_l > 2\%$  τότε ισχύει ότι και στην ΚΠΧ (EN1992-1-1) για  $\rho_l > 2\%$ .

- ii.  $\omega_{wd} \geq 0.08$



$$\text{iii. } \alpha\omega_{wd} \geq 30\mu_{\phi}(v_d + \omega_{vd})\varepsilon_{syd} \frac{b_w}{b_0} - 0,035$$

- Για όροφο πάνω από την κρίσιμη περιοχή ισχύει:  
 $\rho_v \geq 0,2\%$  όπου  $\varepsilon_c > 0,2\%$  τότε  $\rho_v \geq 0,5\%$
- Για το υπόλοιπο ύψος του τοιχώματος χρησιμοποιούνται διαμήκεις ράβδοι και ισχύει:

Αν  $\varepsilon_c > 0,2\%$  τότε  $\rho_v \geq 0,5\%$  . Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ισχύει  $\rho_v \geq 0,2\%$ .

Τέλος για την ΚΠΥ ισχύουν και τα παρακάτω:

- Στην κρίσιμη περιοχή
  - i. Για την ελάχιστη διάμετρο οπλισμού ισχύει:  

$$d_{w,min} = 8mm$$
  - ii. Για την μέγιστη διαμήκης απόσταση του οπλισμού ισχύει:  

$$s_{w,max} = \min \left\{ \begin{array}{l} 25d_{bh} \\ 250mm \end{array} \right.$$

$$\text{iii. } \omega_{wd} \geq 0,12$$

$$\text{iv. } \alpha\omega_{wd} \geq 30\mu_{\phi}(v_d + \omega_{vd})\varepsilon_{syd} \frac{b_w}{b_0} - 0,035$$

- Για όροφο πάνω από την κρίσιμη περιοχή ισχύουν οι ίδιες συνθήκες με την κρίσιμη περιοχή , με την διαφορά ότι το  $\omega_{wd}$  και το  $\alpha\omega_{wd}$  είναι μειωμένα στο 50%.
- Για το υπόλοιπο ύψος του τοιχώματος χρησιμοποιούνται διαμήκεις ράβδοι και ισχύει:

Αν  $\varepsilon_c > 0,2\%$  τότε  $\rho_v \geq 0,5\%$  . Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ισχύει  $\rho_v \geq 0,2\%$ .

## 2.5 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ.

### 2.5.1 Ενίσχυση υποστυλωμάτων.

Η ενίσχυση ενός υποστυλώματος , αφορά την διαδικασία επέμβασης με την οποία αυξάνεται η φέρουσα ικανότητά του και γενικότερα βελτιώνεται η συμπεριφορά του. Οι τεχνικές ενίσχυσης των υποστυλωμάτων χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Με αύξηση της διατομής του υποστυλώματος (Μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα)
- Χωρίς αύξηση της διατομής του υποστυλώματος (Περίσφιγξη).

Στην περίπτωση των μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα αυξάνεται η διατομή του υποστυλώματος με νέες στρώσεις σκυροδέματος και οπλισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα

την δημιουργία ενός μανδύα γύρω από το αρχικό μέλος. Η προσθήκη νέων εγκάρσιων οπλισμών οδηγεί στην περίσφιγξη του σκυροδέματος (Σχήμα 2.1).



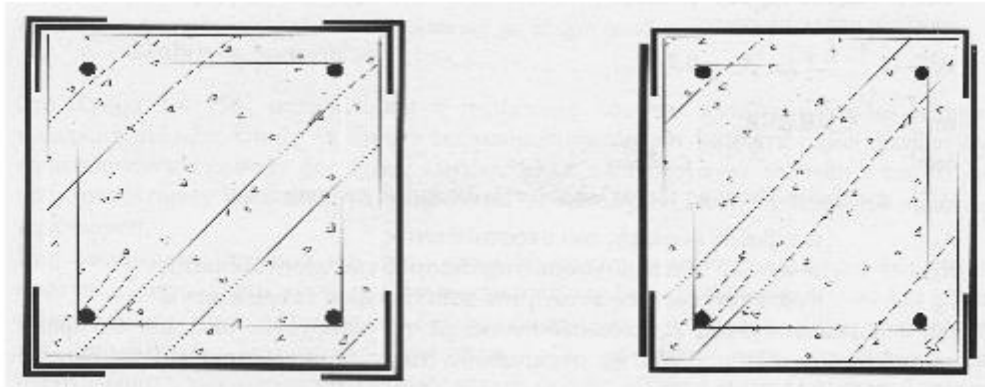
**Σχήμα 2.1:** Τυπικοί κλωβοί οπλισμού για μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος (Παναγόπουλος Γ.)

Στην δεύτερη περίπτωση, η ενίσχυση επιτυγχάνεται με περίσφιγξη του ενεργού μέλους, την οποία θα εξετάσουμε αναλυτικότερα παρακάτω. Η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με την διαδικασία της περίσφιγξης εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Όταν στο συγκεκριμένο υποστύλωμα απαιτείται η αύξηση της πλαστιμότητάς του
- Όταν στο υποστύλωμα απαιτείται αύξηση της διατμητικής του αντοχής
- Όταν μία αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος μέχρι 30% το πολύ είναι επαρκής
- Όταν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των κατακόρυφων οπλισμών του υποστυλώματος στην περιοχή υπερκάλυψής τους.

Η επιβολή της περίσφιγξης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

1. Με χρήση επικολητών κολάρων που μπορεί να είναι μεταλλικά ελάσματα, συνήθους πάχους 1-2mm ή λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs) (Σχήμα 2.2).



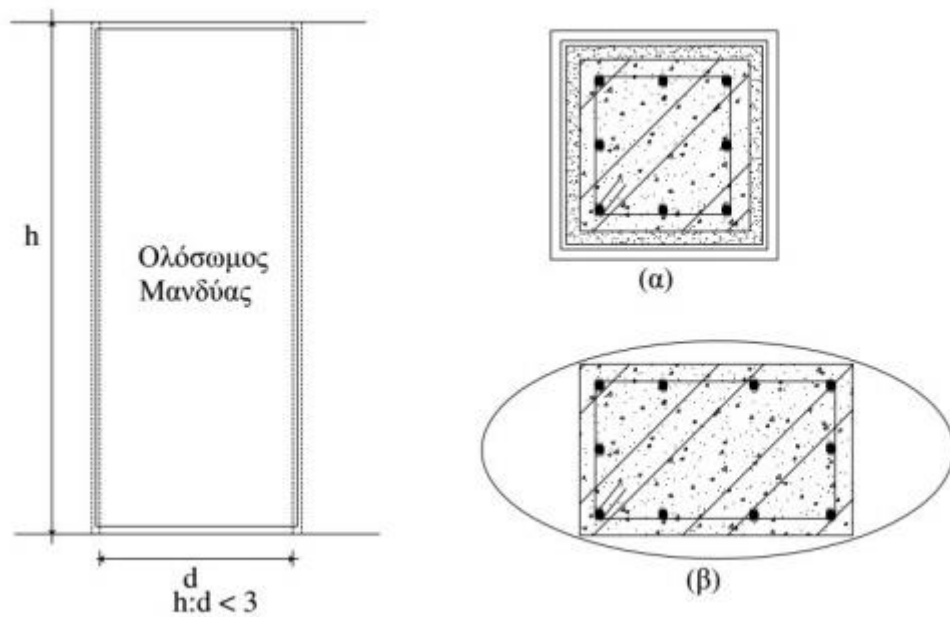
**Σχήμα 2.2:** Περίσφιγξη με μεταλλικά επικολητά ελάσματα (Παναγόπουλος Γ.)

2. Με χρήση σπειροειδή σπλισμού που μπορεί να είναι από μεταλλικό έλασμα ή από ινοπλισμένα πολυμερή (Σχήμα 2.3).



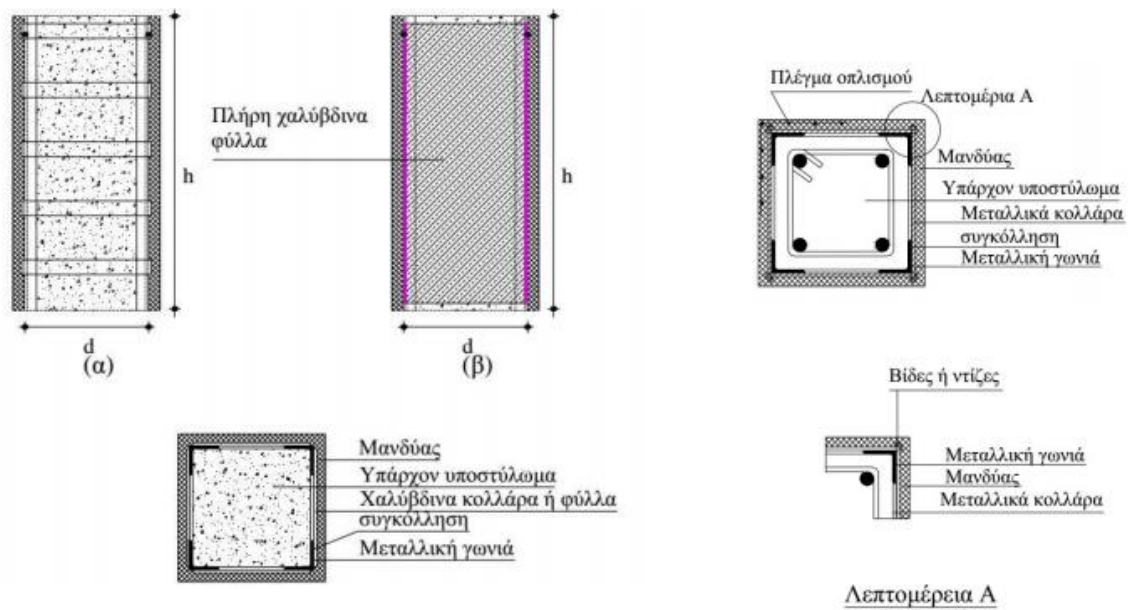
**Σχήμα 2.3:** Περίσφιγξη με σπειροειδή σπλισμό (Παναγόπουλος Γ.)

3. Με χρήση ολόσωμου μεταλλικού μανδύα από φύλλα χάλυβα ή ινοπλισμένο πολυμερές (FRPs), επικολητών επί των πλευρών του υποστυλώματος (Σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.4:** Περίσφιγξη με γενικό μεταλλικό μανδύα (Παναγόπουλος Γ.)

4. Με χρήση μεταλλικού κλωβού που δημιουργείται με κατακόρυφα γωνιακά ελάσματα, είτε οριζόντια μεταλλικά κολάρα , είτε πλήρη χαλύβδινα φύλλα (Σχήμα 2.5).
5. Με χρήση χαλύβδινων λαμών (Σχήμα 2.6).
6. Με Χρήση μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs). Τα φύλλα εφαρμόζονται με τις ίνες τους σε οριζόντια διεύθυνση συμβάλλοντας έτσι ιδιαίτερα στον εγκιβωτισμό του μέλους και στην αύξηση της διατμητικής του αντοχής (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.5: Περίσφιγξη με χρήση μεταλλικού κλωβού (Παναγόπουλος Γ.)



Σχήμα 2.6: Περίσφιγξη με χαλύβδινες λάμες (Παναγόπουλος Γ.)



**Σχήμα 2.7:** Ενίσχυση με μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή (Παναγόπουλος Γ.)

### 2.5.2 Επεμβάσεις σε δοκούς.

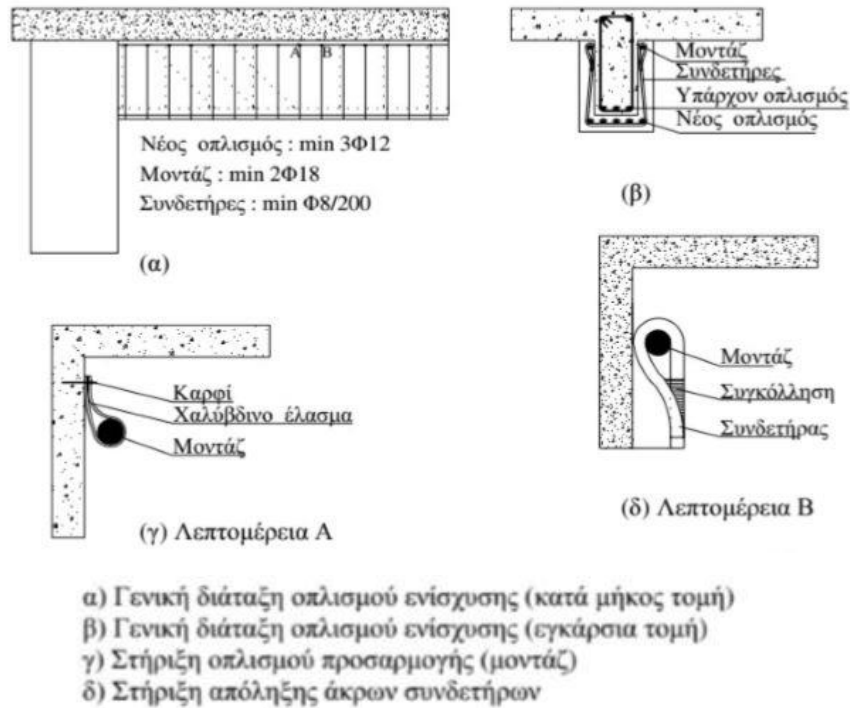
Όπως και στην περίπτωση των υποστυλωμάτων, αντίστοιχα και στην περίπτωση των δοκών και των πλακών η ενίσχυσή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε με εξωτερικό οπλισμό.

Στην περίπτωση των μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα, η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την αύξηση της διατομής της δοκού νέο σκυρόδεμα, νέους διαμήκους οπλισμούς και νέους συνδετήρες περιμετρικά του αρχικού στοιχείου (Σχήματα 2.8 και 2.9). Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται όταν υπάρχει ανάγκη για αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής. Οι νέοι συνδετήρες του μανδύα συμβάλουν στην περίσφιγξη του σκυροδέματος.

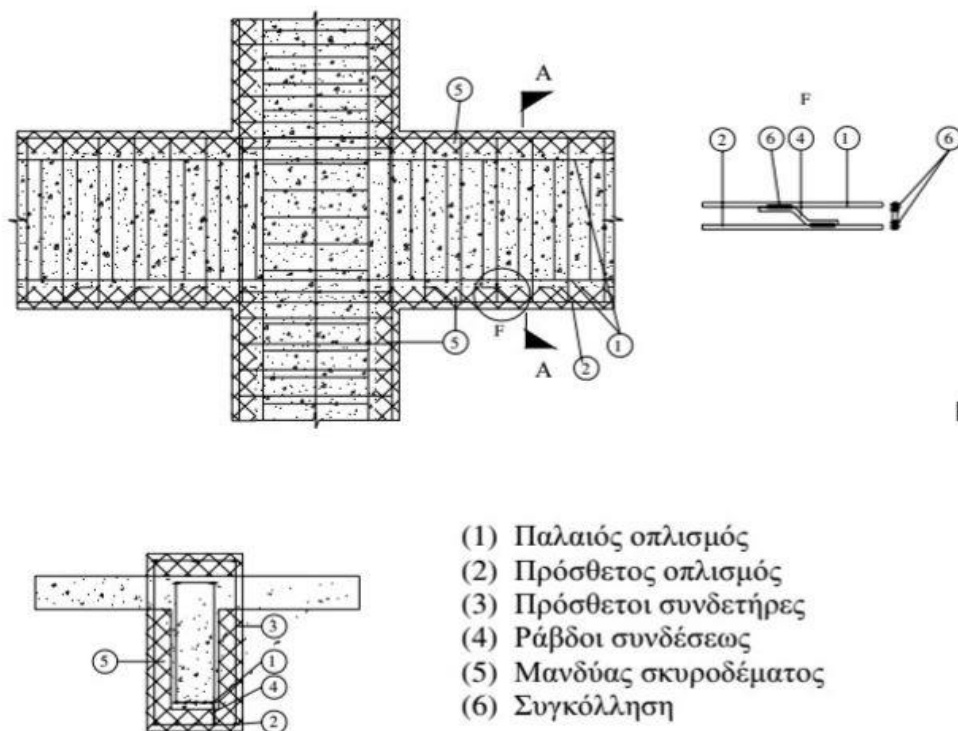
Στην ενίσχυση των δοκών και των πλακών εκτός από την καμπτική αντοχή, σημαντικό ρόλο έχει και η αύξηση της διατμητικής ενίσχυσης του μέλους. Οι τρόποι εφαρμογής διαχωρίζονται ανάλογα με τον στόχο της ενίσχυσης.

Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Το ποσοστό και το όριο διαρροής του εσωτερικού διαμήκους οπλισμού
- Το ποσοστό των εσωτερικών συνδετήρων
- Η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
- Το μήκος των αγκυρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς.



Σχήμα 2.8: Ανοιχτός μανδύας δοκού (Παναγόπουλος Γ.)



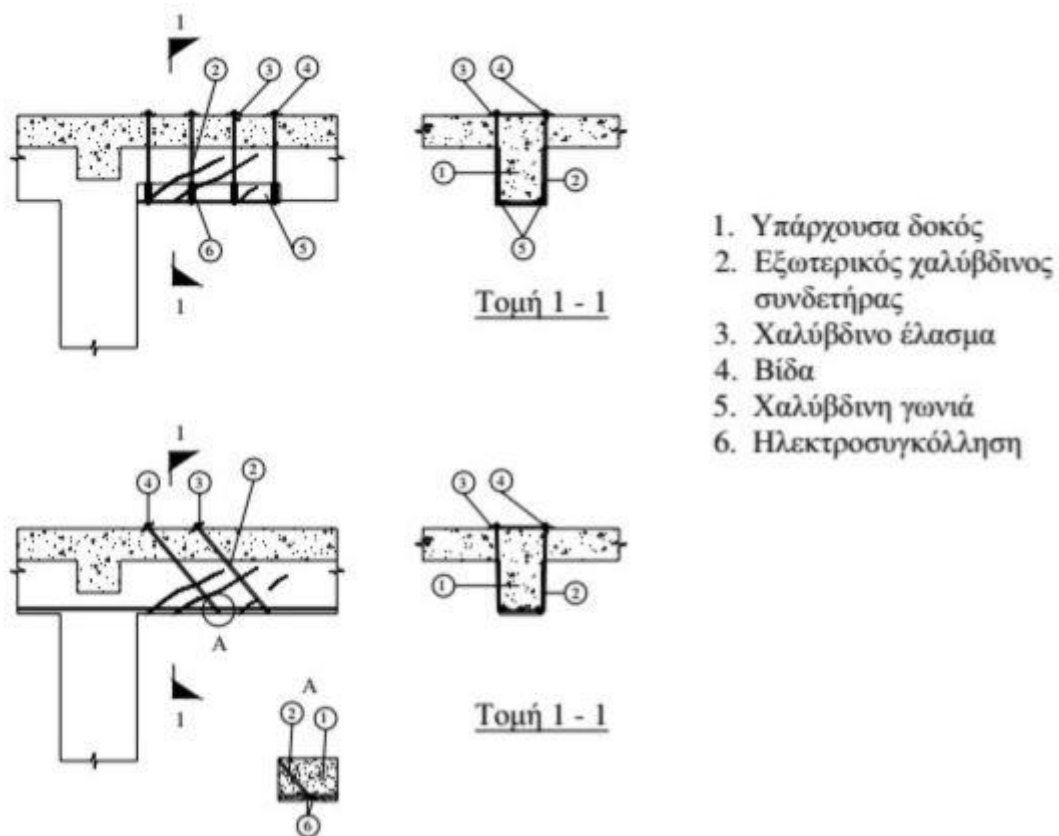
Σχήμα 2.9: Κλειστός μανδύας δοκού (Παναγόπουλος Γ.)

- Η γεωμετρία της διατομής της δοκού
- Ο λόγος διατμήσεως
- Η προετοιμασία της επιφάνειας στην οποία τοποθετείται το υλικό αγκυρώσεως.

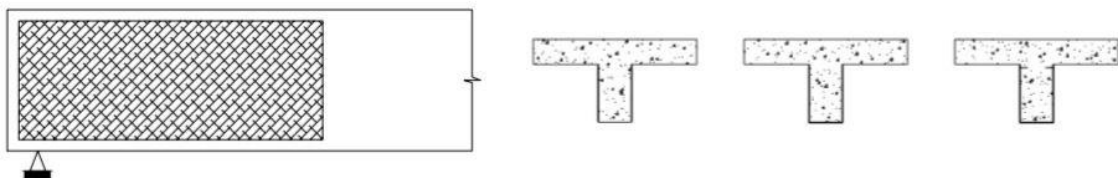
Πέραν από την κατασκευή μανδύων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, και στην περίπτωση των δοκών στην περίσφιγξη μπορεί να συμβάλει η ενίσχυση με εξωτερικά στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή βέβαια κύριος στόχος της επέμβασης είναι η αύξηση της διατμητικής αντοχής του μέλους.

Για την διατμητική ενίσχυση των δοκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν :

- Μεταλλικά στοιχεία που περισφίγγουν την δοκό (Σχήμα 2.10)
- Επικολητικά φύλλα από χάλυβα
- Φύλλα (Σχήμα 2.11) ή μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή (Σχήμα 2.12)



Σχήμα 2.11: Διατμητική ενίσχυση με μεταλλικά στοιχεία (Παναγόπουλος Γ.)



Σχήμα 2.11: Διατμητική ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή (φύλλα) (Παναγόπουλος Γ.)





**Σχήμα 2.12:** Διατμητική ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή (μανδύες(Παναγόπουλος Γ.)

### **2.5.3 Κατασκευαστικές διατάξεις για την εξωτερική περίσφιξη.**

Μία από τις πιο συχνές μεθόδους περίσφιξης γίνεται με την χρήση σύνθετων υλικών. Συγκεντρώνοντας τις κατασκευαστικές διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων , προτείνονται τα εξής:

- Το πάχος των ελασμάτων ενίσχυσης να είναι μικρό , ώστε να αποφεύγεται η πρόωγη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος. Να προτιμάται η χρήση ελασμάτων σε περισσότερες στρώσεις , αντί για ελάσματα μεγάλου πάχους.
- Να μην υπερβαίνει παραπάνω από 3 στρώσεις για ελάσματα και το πλήθος των εύκαμπτων υφασμάτων να μην ξεπερνά το 5, εκτός αν διατίθενται σχετική τεκμηρίωση που επιτρέπει τη χρήση περισσότερων στρώσεων.
- Να αποφεύγονται οι ματίσεις του υλικού ενίσχυσης.

- Η απόσταση του υλικού ενίσχυσης από τις ακμές της διατομής σκυροδέματος να μην υπερβαίνει το πάχος της επικάλυψης της πλησιέστερης προς την ακμή παράλληλης ράβδου του υφιστάμενου οπλισμού.
- Στις περιπτώσεις χρήσης περισσότερων παράλληλων λωρίδων (συνήθως στην περίπτωση των πλακών), η μεταξύ τους απόσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5πλάσιο του πάχους του στοιχείου και του  $0,20 l_0$  (όπου  $l_0$  είναι η απόσταση των σημείων μηδενισμού της ροπής κάμψης κατά μήκος του στοιχείου).
- Η χρησιμοποιούμενη κόλλα σύνδεσης να έχει πλαστική συμπεριφορά . Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται η καλύτερη κατανομή των τάσεων στην περιοχή αγκύρωσης.
- Η αγκύρωση του οπλισμού ενίσχυσης στο μέσο ανοίγματος, το υλικό ενίσχυσης πρέπει να επεκτείνεται και να αγκυρώνεται κοντά στις στηρίξεις. Στην περίπτωση ενίσχυσης πρέπει να επεκτείνεται και να αγκυρώνεται κοντά στις θλιβόμενες περιοχές σε μήκος της τάξεως του 1m εντός αυτών. Η εφαρμογή της τεχνικής δεν συνιστάται σε στηρίξεις δοκών, όπου λόγω εναλλαγής του προσήμου της ροπής, η υπό μόνιμα φορτία εφελκόμενη ζώνη, μπορεί να γίνει και θλιβόμενη.
- Να επιδιώκεται η βελτίωση της αγκύρωσης στα άκρα των ελασμάτων με χρήση εγκάρσιων λωρίδων ή άλλων αγκυριών ειδικού τύπου με τεκμηριωμένη αποτελεσματικότητα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών τα οποία, εν είδει εξωτερικών ανοιχτών συνδετήρων μορφής αντεστραμμένου Π που τα άκρα τους φθάνουν μέχρι την θλιβόμενη ζώνη της διατομής, κατανέμουν τις τάσεις στην πλευρική επιφάνεια της δοκού. Η χρήση των παραπάνω στοιχείων για την εξασφάλιση των άκρων έναντι πρόωρης αποκόλλησης συνιστάται έντονα, ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα των υπολογιστικών ελέγχων.

#### **2.5.4 Οδηγίες για την προετοιμασία της διεπιφάνειας. (ΥΠΕΧΩΔΕ, ΠΕΤΕΠ, ΕΚΔΟΣΗ 2.0, ΜΑΙΟΣ 2008).**

Για τον καθαρισμό της επιφάνειας από ξένα υλικά χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές:

- Ηλεκτροσφύρα
- Ελαφρά αεροσφύρα
- Συρματόβουρτσα
- Υδροβολή
- Αμμοβολή
- Ψεκασμός με απολιπαντή
- Ψεκασμός με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος
- Σμυριδόχαρτο

Η κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένα πεδία εφαρμογής και χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιπτώσεις, οπότε χρειάζεται γνώση αυτών για να γίνει η βέλτιστη επιλογή.

Κατά την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος επιδιώκεται η εκτράχυνση της επιφάνειάς του σε βάθος 0,2-0,5 mm, η εκτράχυνση με εγκοπές σε βάθος 0,5-5 mm και

απόξεση της επιφάνειας σκυροδέματος, με αφαίρεση της επιφανειακής στρώσης σε βάθος όσο απαιτείται για να εμφανιστούν τα χονδρόκοκκα αδρανή και να καταστεί τραχεία. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι με χρήση:

- Ηλεκτροπνευματικής ηλεκτροσφήρας
- Διάφορων τύπων αεροσφύρας
- Αμμοβολής
- Σμυριδόχαρτου
- Υδροβολής

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους έχει συγκεκριμένη χρήση, με αποτέλεσμα να πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος για την κατάλληλη εργασία.

Τέλος, για την επικόλληση των ελασμάτων και των υφασμάτων, δίνονται σαφείς οδηγίες για τις προεργασίες, την εφαρμογή τους, τους μετέπειτα ελέγχους για την επιτυχία της μεθόδου αλλά και οπτικοί, μηχανικοί έλεγχοι και έλεγχοι πρόσφυσης που αφορούν τα χαρακτηριστικά του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί .

## **2.6 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Οι Panelis & Karpos (1997), ανέλυσαν την επιρροή των παραμέτρων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στην αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των περισιγμένων στοιχείων (Σχήμα 2.13):

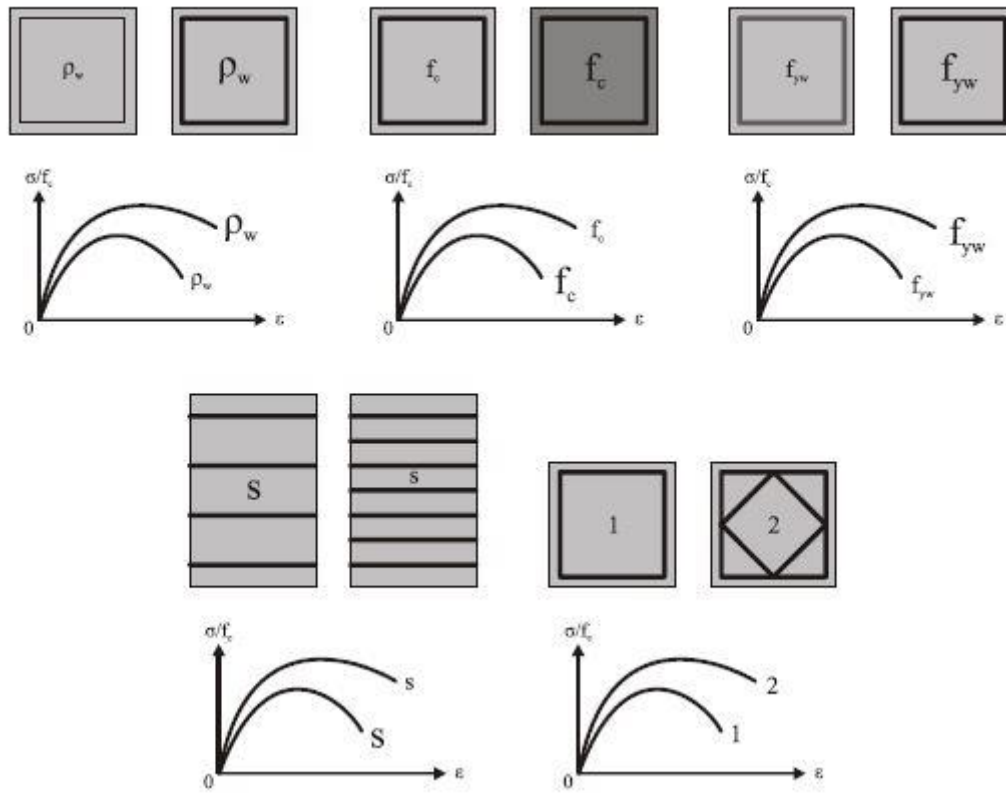
- Τα μεγαλύτερα ογκομετρικά ποσοστά εγκάρσιων οπλισμών ( $\rho_w$ ) έχουν θετική επιρροή στην αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας του περισιγμένου σκυροδέματος. Το ογκομετρικό ποσοστό ορίζεται ως ο όγκος του χάλυβα των εγκάρσιων οπλισμών προς τον όγκο του εγκιβωτισμένου πυρήνα, ο οποίος συνήθως ορίζεται από τον κεντροβαρικό άξονα των παραμετρικών εγκάρσιων οπλισμών.
- Η υψηλή θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_c$ ) έχει μη ευνοϊκή επιρροή. Τα σκυροδέματα υψηλών αντοχών χαρακτηρίζονται από μειωμένη πλαστιμότητα (π.χ. Wee et al., 1996). Αρα, για την ίδια ανηγμένη τιμή αξονικού φορτίου ( $\nu = \frac{N}{A \cdot f_c}$ ), η πλευρική διόγκωση σε ένα σκυρόδεμα υψηλής αντοχής είναι μικρότερη σε σχέση με ένα αντίστοιχο σκυρόδεμα συνηθισμένης αντοχής, οπότε η ενεργοποίηση των εγκάρσιων οπλισμών στην πρώτη περίπτωση είναι περιορισμένη. Δηλαδή, λόγω ότι οι εγκάρσιοι οπλισμοί ουσιαστικά προσφέρουν την δυστένειά τους μέχρι την διαρροή, οι ανηγμένες εγκάρσιες δυνάμεις περίσφιξης (ως προς την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος) που προκύπτουν στην περίπτωση των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές του σκυροδέματος συνηθούς αντοχής, που αφορά την ίδια ποιότητα οπλισμών, οπότε τελικά οδηγούν σε μικρότερες αυξήσεις της αντίστοιχης αντοχής και πλαστιμότητας του στοιχείου.
- Θετική είναι η επιρροή των υψηλότερων ορίων διαρροής των εγκάρσιων οπλισμών ( $f_{yw}$ ). Οι εγκάρσιοι οπλισμοί μεγαλύτερης αντοχής μπορούν να προσφέρουν

μεγαλύτερες , και κατά συνέπεια πιο ισχυρές, εγκάρσιες δυνάμεις περίσφιγξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλότερα επίπεδα αντοχής και πλαστιμότητας.

- Οι μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των εγκάρσιων οπλισμών ( $s$ ) επηρεάζουν θετικά την πλαστιμότητα και την αντοχή του σκυροδέματος. Για συγκεκριμένο ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιων οπλισμών, η περίσφιγξη είναι πιο αποτελεσματική όταν υπάρχουν μικρότερες αποστάσεις μεταξύ εγκάρσιων οπλισμών , εξαιτίας των μικρότερων απερίσφικτων περιοχών που διαμορφώνονται στον ενδιάμεσο χώρο. Οι μικρότερες αποστάσεις επηρεάζουν θετικά επίσης και την πλαστιμότητα, όπου αυξάνονται τα επίπεδά της, επειδή αποτρέπουν τον ανελαστικό λυγισμό των διαμήκων ράβδων μετά την αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης.
- Ευνοϊκή είναι η επιρροή των πυκνότερων διατάξεων των εγκάρσιων οπλισμών. Εξαιτίας των πιο σύνθετων διατάξεων της περίσφιγξης, μειώνεται ο όγκος των απερίσφικτων περιοχών του πυρήνα διατομής , με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υψηλότερα επίπεδα αντοχής και πλαστιμότητας.

Επιπρόσθετα , σημαντικό και ευνοϊκό ρόλο στην αύξηση της πλαστιμότητας και της αντοχής του σκυροδέματος έχουν:

- Οι πυκνότερες διατάξεις των διαμήκων οπλισμών, το οποίο θα εξεταστεί αναλυτικότερα παρακάτω.
- Η αύξηση της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης ( $\epsilon$ ), σε σχέση με την στατική επιπόνηση, προκαλεί αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και μείωση της παραμόρφωσης.
- Η εκκεντρότητα της φόρτισης, περισσότερο αφορά την πλαστιμότητα, δεδομένου ότι τμήμα της διατομής βρίσκεται σε ευμενέστερη εντατική κατάσταση απ' ότι το ακραίο θλιβόμενο τμήμα.



**Σχήμα 2.13:** Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης (Παπανικολάου Β.)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ

#### 3.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

Δεδομένης της σημασίας της περίσφιγξης για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος και των δομικών μελών που κατασκευάζονται από αυτό, το φαινόμενο έχει μελετηθεί εκτεταμένα από πολλές ερευνητικές ομάδες σε όλο τον κόσμο. Οι ερευνητικές εργασίες που βασίζονται σε πειράματα παρουσιάζονται αναλυτικά στην εργασία του Παπανικολάου Βασίλειου από την οποία προέρχονται οι πληροφορίες της ενότητας αυτής.

Η πειραματική έρευνα του φαινομένου της περίσφιγξης σε κατακόρυφα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '40 από τον King (1946). Αργότερα έγιναν πιο αναλυτικές έρευνες όπως των Soliman & Yu (1967). Από την δεκαετία του '70 και έπειτα, σημαντικό ρόλο έπαιξαν οι μελέτες των Vallenias et al. (1977), Sheikh & Uzumeri (1980), Scott et al. (1982), Mander et al (1983), καθώς και πολλές ακόμη. Κύριο αντικείμενο μελέτης στις παραπάνω έρευνες αποτελεί η διενέργεια δοκιμών κεντρικής σύνθλιψης σε υποστυλώματα συμπαγούς κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, περισφιγμένα με διάφορες διατάξεις εγκάρσιων οπλισμών (συνδετήρων ή σπειρών). Οι Sakai & Sheikh (1989) ασχολήθηκαν με την περίσφιγξη των υποστυλωμάτων κατά την διάρκεια της δεκαετίας του '80. Από τα τέλη της δεκαετίας του '80 και μετά περισσότερη βαρύτητα δόθηκε στην περίσφιγξη υποστυλωμάτων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα να αποσαφηνιστούν και να βαθμονομηθούν οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης, η οποία εκφράζεται με την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των περισφιγμένων στοιχείων (π.χ. Yong et al., 1988, Ravzi & Saatcioglu 1966).

Οι πειραματικές έρευνες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αποτέλεσαν τα «θεμέλια» για την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης, όπως επίσης και την εισαγωγή σχετικών διατάξεων ως προς τα απαιτούμενα ποσοστά εγκάρσιων οπλισμών και του τρόπου όπλισης των υποστυλωμάτων. Εν τούτοις, η εφαρμογή των ερευνών αυτών, σε κοίλες διατομές βάρων, είτε απλής κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, είτε σύνθετης μορφής όπως π.χ. πολυκυψελικής, δεν είναι προφανής (Πίνακας 3.1). Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της συμπεριφορά τους σε τριαξονική ένταση λόγω περίσφιγξης, διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη των συμπαγών διατομών.

**Πίνακας 3.1:** Κατάλογος εργασιών με θέμα την πειραματική μελέτη κοίλων διατομών βάρων γεφυρών (Παπανικολάου Β.)

Ερευνητική ομάδα	Τύπος βάρων	Τύπος φόρτισης
Mander <i>et al.</i> (1983)	Κοίλα ορθογωνικά	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη
Morkin & Rumman (1985)	Κοίλα κυκλικά	Οριζόντια μονότονη και ανακυκλιζόμενη
Poston <i>et al.</i> (1986)	Τοιχωματικά Κοίλα ορθογωνικά Κοίλα πολυκυψελικά	Εκκεντρη αξονική
Zahn <i>et al.</i> (1990)	Κοίλα κυκλικά	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη
Taylor <i>et al.</i> (1995)	Κοίλα ορθογωνικά	Εκκεντρη αξονική
Pinto (1996)	Κοίλα ορθογωνικά	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη
Yeh <i>et al.</i> (2001)	Κοίλα κυκλικά	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη
Mo <i>et al.</i> (2003)	Κοίλα ορθογωνικά	Κεντρική αξονική - Οριζόντια ανακυκλιζόμενη
Calvi <i>et al.</i> (2005)	Κοίλα ορθογωνικά	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη

Πιο συγκεκριμένα, από την δεκαετία του '80 έως και σήμερα, παρουσιάστηκαν μοντέλα που αναπτύσσουν την επιρροή της περισφιγξης στην πλαστιμότητα του σκυροδέματος όπως αυτό των Kent & Park (1971), ενώ λίγα χρόνια αργότερα εξετάστηκε και η επιρροή της έναντι στη αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, με γνωστότερα παραδείγματα των Muguruma *et al.* (1980), Sheikh & Uzumeri (1982), Mander *et al.* (1988) (Πίνακας 3.2).

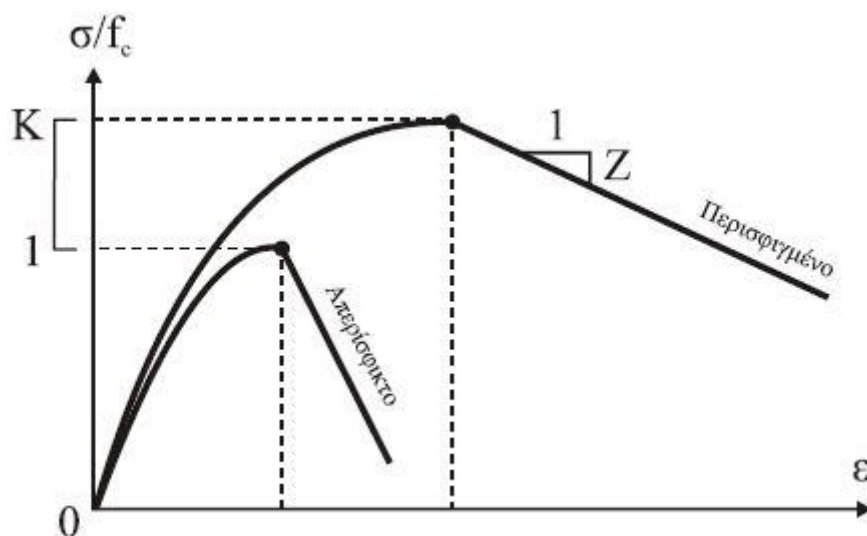
Συγκριτική αξιολόγηση σε διάφορα εμπειρικά μοντέλα εφάρμοσαν οι Sheikh (1982a) και Karros *et al.* (1999), ενώ του δεύτερου περιλαμβάνει και στατιστική αξιολόγηση. Τα παραπάνω μοντέλα έχουν μορφή μονοαξονικών καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, στις οποίες ενσωματώνεται η αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας του υλικού λόγω εγκάρσιων δυνάμεων περισφιγξης.

**Πίνακας 3.2:** Χαρακτηριστικά παραδείγματα μοντέλων (Παπανικολάου Β.)

Ερευνητική ομάδα	Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για περισφιγμένο σκυρόδεμα			Διατομές προς εφαρμογή
	Ανερχόμενος κλάδος	Κατερχόμενος κλάδος	Παραμένουσα τάση	
Muguruma <i>et al.</i> (1980)	$\sigma = E_c \cdot \varepsilon + \frac{f_c - E_c \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_c^2} \cdot \varepsilon^2$ $\sigma = \frac{f_c - f_{cc}}{(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^2} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc})^2 + f_{cc}$	$\sigma = \frac{f_{cc} - f_{cc}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{cc}} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc}) + f_{cc}$	-	Κυκλικές Ορθογωνικές
Park <i>et al.</i> (1982)	$\sigma = K \cdot f_c \cdot \left[ \frac{2 \cdot \varepsilon}{0.002 \cdot K} - \left( \frac{\varepsilon}{0.002 \cdot K} \right)^2 \right]$	$\sigma = K \cdot f_c \cdot [1 - Z \cdot (\varepsilon - 0.002 \cdot K)]$	20 % του $K \cdot f_c$	Ορθογωνικές
Sheikh & Uzumeri (1982)	$\sigma = f_{cc} \cdot \left[ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]$	$\sigma = f_{cc} \cdot [1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_{cc})]$	30 % του $f_{cc}$	Ορθογωνικές
Mander <i>et al.</i> (1988)	$\sigma = \frac{f_{cc} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \cdot r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^r}$	$\sigma = \frac{f_{cc} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \cdot r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^r}$	-	Κυκλικές Ορθογωνικές Τοιχωματικές
Fujii <i>et al.</i> (1988)	$\sigma = E_c \cdot \varepsilon + \frac{f_c - E_c \cdot \varepsilon_c}{\varepsilon_c^2} \cdot \varepsilon^2$ $\sigma = \frac{f_c - f_{cc}}{(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^2} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc})^2 + f_{cc}$	$\sigma = f_{cc} - Z \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc})$	20 % του $f_{cc}$	Κυκλικές Ορθογωνικές
Karpos (1991)	$\sigma = K \cdot f_c \cdot \left[ \frac{2 \cdot \varepsilon}{K^2 \cdot \varepsilon_c} - \left( \frac{\varepsilon}{K^2 \cdot \varepsilon_c} \right)^2 \right]$	$\sigma = K \cdot f_c \cdot [1 - Z \cdot (\varepsilon - K^2 \cdot \varepsilon_c)]$	25 % του $K \cdot f_c$	Ορθογωνικές
Saatcioglu & Ravzi (1992)	$\sigma = f_{cc} \cdot \left[ \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1+2K}}$	$\sigma = f_{cc} \cdot \frac{0.15 \cdot f_{cc}}{(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{cc})} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc})$	20 % του $f_{cc}$	Κυκλικές Ορθογωνικές Τοιχωματικές
Hoshikuma <i>et al.</i> (1997)	$\sigma = E_c \cdot \varepsilon \cdot \left[ 1 - \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right]$	$\sigma = f_{cc} - Z \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{cc})$	50 % του $f_{cc}$	Κυκλικές Ορθογωνικές

Οι μεταβολές που προαναφέρθηκαν εκφράζονται κυρίως με κατάλληλους συντελεστές αποτελεσματικότητας της περισφιγξης ( $K = \frac{f_{cc}}{f_c}$ ) και κλίσης του κατερχόμενου κλάδου ( $Z$ , Σχήμα 3.1), οι οποίοι τροποποιούν κατάλληλα τη αρχική μονοαξονική καμπύλη τάσεων- παραμορφώσεων του άοπλου σκυροδέματος, προσδίδοντας τις ανάλογες αυξήσεις στην αντοχή και την πλαστιμότητα των περισφιγμένων διατομών. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την περισφιγξη, όπως για παράδειγμα η αντοχή του σκυροδέματος και το ογκομετρικό ποσοστό, η διάταξη και η αντοχή των εγκάρσιων οπλισμών.





**Σχήμα 4.1:** Μεταβολή της μονοαξονικής καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων του σκυροδέματος λόγω περίσφιγξης, βάσει των συντελεστών αποτελεσματικότητας ( $K$ ) και κλίσης ( $Z$ ) του κατερχόμενου κλάδου (Παπανικολάου Β.)

Τα μοντέλα που προαναφέρθηκαν εφαρμόζονται κυρίως σε κυκλικές ή ορθογωνικές διατομές, εξαιτίας της βαθμονόμησής τους σε πειραματικά δοκίμια αντίστοιχης διατομής και γεωμετρίας. Άρα, η εφαρμογή τους σε πιο σύνθετες μορφές δεν καθίσταται κατάλληλη. Παρόλαυτα, η πειραματική έρευνα των Mo et al. (2003) που αφορά σύνθετες μορφές, είναι εξαιρετικά περιορισμένη, με αποτέλεσμα να μην είναι αποτελεσματική. Τα διαφορετικά είδη εμπειρικών μοντέλων μας υποδεικνύουν ότι το πεδίο της εφαρμογής τους είναι περιορισμένο. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν βαθμονομηθεί σε περιορισμένο σύνολο πειραματικών δοκιμών, το οποίο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη διάταξη φόρτισης γεωμετρίας, δοκιμών και σύνθεσης σκυροδέματος (Sheikh, 1982b). Τα παραπάνω μοντέλα, συνήθως εφαρμόζονται σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, λόγω του μονοαξονικού τους χαρακτήρα, όπως το μοντέλο των Elnashai et al. 2007. Η χρήση ενός σταθερού συντελεστή αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης ( $K$ ), ο οποίος υπολογίζεται στην κατάσταση διαρροής των εγκάρσιων οπλισμών, παραπέμπει σε συνθήκες ενεργής περίσφιγξης που είναι ανακόλουθες με το φυσικό φαινόμενο. Εξαιτίας αυτού, εφαρμόζονται εμπειρικά μοντέλα μεταβλητού συντελεστή, όπως αυτό των Madas & Elnashai, 1992, στα οποία αναπροσαρμόζεται ο συντελεστής περίσφιγξης κατά την διάρκεια της φόρτισης τους φορές ανάλογα με την αξονική παραμόρφωση του στοιχείου, με στόχο την πιο ρεαλιστική προσομοίωση του παθητικού χαρακτήρα του φαινομένου, και περισσότερο όταν υπάρχουν συνθήκες ανακυκλιζόμενης και δυναμικής φόρτισης.

Οι Karabinis & Kioussis (1966a, 1966b) ανέπτυξαν μία πρωτότυπη μέθοδο που αφορά τη μη γραμμική ανάλυση περισφιγμένων κυκλικών και ορθογωνικών συμπαγών διατομών οπλισμένου σκυροδέματος. Αναπτύχθηκε ένας κατασκευαστικός νόμος για το σκυρόδεμα με βάση τη θεωρία της πλαστικότητας, ο οποίος περιλάμβανε ένα κριτήριο διαρροής Drucker-Prager, ένα μη συσχετισμένο νόμο πλαστικής ροής της ίδιας μορφής, μία συνάρτηση κράτνυσης/χαλάρωσης βασισμένη στο μέτρο του διανύσματος των

πλαστικών παραμορφώσεων και μία κατάλληλη συνάρτηση πλαστιμότητας. Η επίλυση βασίστηκε στην αριθμητική ολοκλήρωση των καταστατικών εξισώσεων, ξεχωριστά για τον περισφιγμένο πυρήνα του σκυροδέματος, τους εγκάρσιους οπλισμούς και το σκυρόδεμα της επικάλυψης. Με την επιβολή του συμβιβαστού των εγκάρσιων παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμών, μέσω μιας κατάλληλης επαναληπτικής διαδικασίας, καταγράφηκαν οι καμπύλες αντίστασης των περισφιγμένων στοιχείων. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν σχετικά ικανοποιητικά.

Η μεγάλη υπολογιστική ανάπτυξη, όπως επίσης και η εξέλιξη καταστατικών νόμων και τεχνικών προσομοίωσης για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, είχε ως αποτέλεσμα την τελευταία δεκαετία η μελέτη της περίσφιγξης να έχει επεκταθεί στην εφαρμογή της μεθόδου μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο. Εξαιτίας αυτού, καταργήθηκαν οι περισσότεροι περιορισμοί που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας της διατομής και των διατάξεων των εγκάρσιων οπλισμών. Αυτό αποτέλεσε στην αντιμετώπιση του προβλήματος με άμεση προσομοίωση της τρισδιάστατης εντατικής κατάστασης του περισφιγμένου στοιχείου και εν γένει χωρίς επεμβάσεις φαινομενολογικού χαρακτήρα στον καταστατικό νόμο του σκυροδέματος.

Σημαντικό ρόλο αποτέλεσε η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο, όσο αναφορά την μελέτη της περίσφιγξης, από τους Abdel-Halim & Abu-Lebdeh (1989). Πιο αναλυτικά, οι Scott et al. (1982), εξέτασαν την συμπεριφορά των πειραματικών συμπαγών ορθογωνικών υποστυλωμάτων με εναλλακτικές αραιές διατάξεις περίσφιγξης υπό κατακόρυφη θλιπτική φόρτιση. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν στερεά οκτάκομπα στοιχεία και για τους οπλισμούς δίκωμα γραμμικά στοιχεία ράβδου με διακριτή μορφή. Στα στοιχεία σκυροδέματος αποδόθηκε ο καταστατικός νόμος μη γραμμικής ελαστικότητας των Cedolin et al. (1977) και στους οπλισμούς ένας μονοαξονικός κρατυνόμενος νόμος χάλυβα. Από αυτή την ανάλυση επιβεβαιώθηκε η θετική επιρροή των υψηλότερων ογκομετρικών ποσοστών και των πυκνότερων διατάξεων των εγκάρσιων οπλισμών στην αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης, δηλαδή την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας. Όμως, δεν πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές εφαρμογές για τις πλήρες αναλυτικές και αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες αντίστασης.

Τα πειραματικά δοκίμια των συμπαγών κυκλικών και ορθογωνικών υποστυλωμάτων των Ravzi & Saatcioglu (1996), τα προσομοίωσαν οι Foster et al. (1998) και Liu & Foster (2000), χρησιμοποιώντας έναν καταστατικό νόμο μικροεπιπέδων (microplane model, Carol et al., 1992) για το σκυρόδεμα και διακριτά στοιχεία ράβδου για τους οπλισμούς. Στη ανάλυση προσομοιώθηκε το φαινόμενο της αποφλοίσωσης του σκυροδέματος επικάλυψης με την χρήση ειδικών πεπερασμένων στοιχείων, στα οποία τίθεται αυτόματα μηδενική δυσκαμψία όταν η εγκάρσια παραμόρφωση στη διεπιφάνεια επικάλυψης-πυρήνα ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή που προσδιορίζεται εμπειρικά.

Παρόμοια έπραξαν και οι Imran & Pantazopoulou (2001) σχετικά με τα κυκλικά υποστυλώματα των Sheikh & Toklucu (1993), με τις παρακάτω διαφορές:

- Χρησιμοποιήθηκε καταστατικός νόμος πλαστικότητας για το σκυρόδεμα
- Η ανάλυση έγινε στο επίπεδο με συνθήκες αξονοσυμμετρικής έντασης

- Οι οπλισμοί προσομοιώθηκαν με κατανεμημένη δομή , κατάσταση που φανερώνει ιδεατή πλήρη περίσφιγξη του πυρήνα, όπως αυτή που προσφέρουν οι χαλύβδινοι σωλήνες ή τα ινοπλισμένα υφάσματα.
- Το φαινόμενο της αποφλοίσωσης του σκυροδέματος προσομοιώθηκε με μία απλοποιημένη θεώρηση σε συνδυασμό δύο αναλύσεων, μίας που περιλάμβανε την επικάλυψη και μία χωρίς αυτήν (Imran, 1994).

Τα πειραματικά δοκίμια των Sheikh & Uzumeri (1980), προσομοίωσαν οι Montoya et al. (2001), χρησιμοποιώντας στερεά πεπερασμένα στοιχεία για το σκυρόδεμα. Στα πεπερασμένα αυτά στοιχεία οι διαμήκεις οπλισμοί ενσωματώθηκαν με κατανεμημένη μορφή και διακριτών γραμμικών στοιχείων ράβδου για τους εγκάρσιους οπλισμούς. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε καταστατικός νόμος μη γραμμικής ελαστικότητας ( τροποποιημένη θεωρία πεδίου, Vecchio & Collins, 1986) και για τους οπλισμούς ένας μονοαξονικός πολυγραμμικός νόμος. Η σύγκριση μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών καμπυλών αντίστασης ήταν ικανοποιητική, ιδιαίτερα με την εισαγωγή στον καταστατικό νόμο σκυροδέματος ενός συντελεστή μείωσης της θλιπτικής αντοχής του υλικού λόγω εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων, ο οποίος βέβαια είχε καθαρά εμπειρικό χαρακτήρα και ήταν βαθμονομημένος με βάση τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την ανάλυση κατακόρυφων ή περισφιγμένων στοιχείων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο, εκτός από αυτή των Faria et al. (2004), όπου αναλύει τις κοίλες διατομές στο επίπεδο με την παραδοχή ισοδύναμης συμπαγούς διατομής. Οι παρακάτω εργασίες έχουν ως κοινό παρονομαστή την ανάλυση της δυνατότητας του λυγισμού των διαμήκων ράβδων των κατακόρυφων στοιχείων. Παρατηρείται λοιπόν, πως η μελέτη της περίσφιγξης κοίλων διατομών με τη μέθοδο της μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων δεν έχει αντιμετωπιστεί ως και σήμερα σε διεθνή βιβλιογραφία.

**Πίνακας 3.3:** Κατάλογος εργασιών με θέμα την προσομοίωση κατακόρυφων περισιγμένων στοιχείων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο (Παπανικολάου Β.)

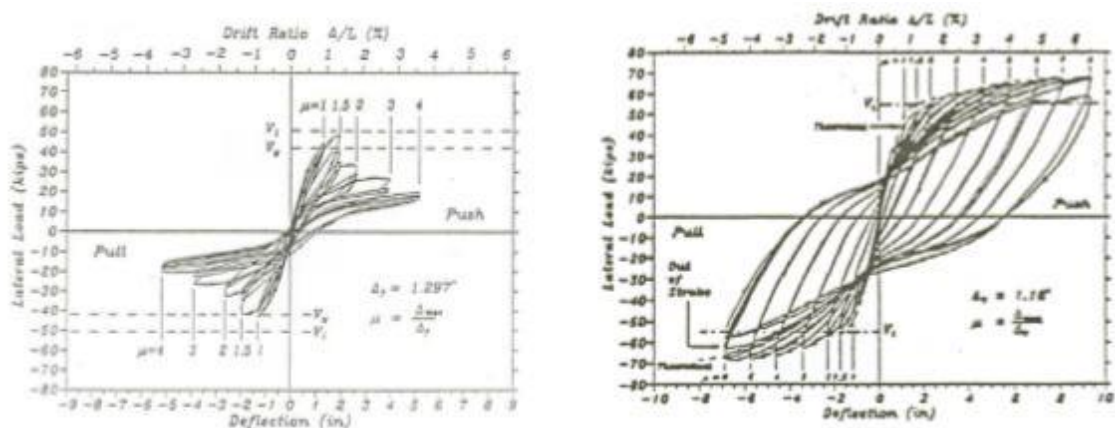
Ερευνητική ομάδα	Τύπος φορέα	Νόμος σκυροδέματος	Προσομοίωση οπλισμών	Τύπος φόρτισης	Τύπος περίσφιξης
Abdel-Halim & Abu-Lebdeh (1989)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Μη γραμμικής ελαστικότητας	Διακριτή	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Barzegar & Maddipudi (1997)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Μη γραμμικής ελαστικότητας	Εμφυτευμένη	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Foster <i>et al.</i> (1998)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Μικροεπιπέδων	Διακριτή αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Kang <i>et al.</i> (2000)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Διακριτή	Οριζόντια μονότονη με αξονικό φορτίο	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Liu & Foster (2000)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Μικροεπιπέδων	Διακριτή	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Barros (2001)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Κατανεμημένη αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Imran & Pantazopoulou (2001)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Κατανεμημένη αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Montoya <i>et al.</i> (2001)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Μη γραμμικής ελαστικότητας (MCFT)	Κατανεμημένοι (διαμήκεις) Διακριτή (εγκάρσιοι)	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Attamejad & Amirebrahimi (2002)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Διακριτή	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Johansson & Åkesson (2002)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Κατανεμημένη αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Χαλύβδινος σωλήνας
Kwon & Spacone (2002)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Μη γραμμικής ελαστικότητας	Διακριτή	Οριζόντια μονότονη με αξονικό φορτίο	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Hu <i>et al.</i> (2003)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Πλαστικότητας	Κατανεμημένη αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Χαλύβδινος σωλήνας
Faria <i>et al.</i> (2004)	Κοίλα ορθογωνικά βάρθρα Ανάλυση στο επίπεδο (2D)	Βλάβης	Διακριτή	Οριζόντια ανακυκλιζόμενη με αξονικό φορτίο	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Luccioni & Rougier (2005)	Συμπαγή κυκλικά υποστυλώματα	Βλάβης-Πλαστικότητας	Κατανεμημένη αξονοσυμμετρική	Κεντρική θλιπτική	Χαλύβδινος σωλήνας
Grassl & Jirásek (2006)	Συμπαγή ορθογωνικά υποστυλώματα	Βλάβης-Πλαστικότητας	Διακριτή	Εκκεντρη θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί
Zergua & Naimi (2006)	Συμπαγή ορθογωνικά και κυκλικά υποστυλώματα	Θραύσης-Πλαστικότητας	Διακριτή	Κεντρική θλιπτική	Εγκάρσιοι οπλισμοί

### 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ PRIESTLEY ET AL. (1991,1995,1996)

Αξίζει να αναφερθεί πιο αναλυτικά η έρευνα που πραγματοποίησαν οι Priestley et al (1991, 1995, 1996) ώστε να διερευνήσουν την τεχνική της περίσφιγξης με μανδύες από σύνθετα υλικά. Μέσω αυτής της έρευνας, εξέτασαν την ικανότητα της αποτροπής αστοχίας των ανεπαρκών παραθέσεων των διαμήκων οπλισμών παλαιών γεφυρών, την θετική επιρροή της σεισμικής συμπεριφοράς στα δομικά στοιχεία, καθώς και την απόδοση των μανδύων από σύνθετα υλικά έναντι των μεταλλικών μανδύων.

Για τον λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια υποστυλωμάτων γεφυρών, σύμφωνα με τα πρότυπα των αντιστοιχών κατά τις δεκαετίες 1950 και 1960. Το πρώτο δοκίμιο υποβλήθηκε σε ισχυρή σεισμική καταπόνηση. Από τις πρώτες επιβολές φόρτισης παρουσίασε αστοχία πρόσφυσης των διαμήκων οπλισμών κατά μήκος της παράθεσης, η οποία οδήγησε σε ραγδαία επιδείνωση των μηχανικών αντισεισμικών ιδιοτήτων του δοκιμίου. Τα υπόλοιπα τέσσερα δοκίμια ενισχύθηκαν είτε με μεταλλικό μανδύα είτε με μανδύα από ανθρακούχα υλικά, ο οποίος περιλάμβανε τόσο ενεργό όσο και παθητική περίσφιγξη και υποβάλλονται σε σεισμική φόρτιση. Για όλα τα ενισχυμένα δοκίμια η σεισμική συμπεριφορά τους ήταν επιτυχής. Συγκριτικά του πρώτου δοκιμίου έναντι με των υπόλοιπων τεσσάρων, οι υστερικοί βρόγχοι των δεύτερων ήταν εξαιρετικά βελτιωμένη (Σχήμα 3.2).

Καταλήγουν λοιπόν στο συμπέρασμα ότι και οι δύο τρόποι ενίσχυσης αποτρέπουν τον κίνδυνο πρόωρης αστοχίας πρόσφυσης στις ανεπαρκείς παραθέσεις των διαμήκων οπλισμών των στύλων. Επίσης, η σεισμική συμπεριφορά και των δύο περιπτώσεων περίσφιγξης των δοκιμίων ήταν παρόμοια.



**Σχήμα 3.2:** Βρόχοι υστέρησης παρθενικού (αριστερά) και ενισχυμένου δοκιμίου (δεξιά) των Priestley et al. (Αντωνιάδης Κ.)

### 3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ SHEIKH (2002).

Τέλος, θα αναφερθεί η πειραματική εργασία του Sheikh (2002), όπου εξέτασε την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης σχετικά με την αντοχή και την πλαστιμότητα, καθώς και την επισκευή των κατεστραμμένων δομικών στοιχείων σκυροδέματος από ινοπλισμένα πολυμερή.

Για την πειραματική έρευνα κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια (σκυροδετημένα υποστυλώματα), τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως πραγματικού μεγέθους με κλίμακα δύο-τρίτα που χρησιμοποιούνται στην πράξη κανονικά (Σχήμα 3.3). Τα υποστυλώματα υποβλήθηκαν σε εγκάρσια αναλυόμενη φόρτιση και ταυτόχρονα σε σταθερή αξονική δύναμη. Ο σχεδιασμός των δοκιμίων στόχευε να εξασφαλίσει ότι η αστοχία θα εμφανιστεί στην πλαστική περιοχή αρθρώσεων του υποστυλώματος με την μείωση της κλίσης της σπείρας προς τα έξω από την περιοχή δοκιμής. Όλα τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν μαζί σε κατακόρυφη θέση.

Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Στην πρώτη ομάδα τα δύο δοκίμια (S-1NT, S-2NT) περιείχαν σπειροειδή οπλισμούς που ικανοποιούσαν τον ACI και τις διατάξεις του Καναδικού κώδικα για την σεισμική αντίσταση, ενώ τα άλλα δύο δοκίμια (S-3NT, S-4NT) περιείχαν πολύ λιγότερο σπειροειδή οπλισμό. Τα δοκίμια αυτά δοκιμάστηκαν μέχρι να αστοχήσουν, ώστε να καθιερωθεί η πρότυπη συμπεριφορά, όπου σύμφωνα με αυτή θα γίνονται συγκρίσεις υποστυλωμάτων με σύνθετα υλικά. Στον τελευταίο κύκλο φόρτισης οι διαμήκης ράβδοι ήρθαν σε λυγισμό, γεγονός που υποδεικνύει την αρχή της αστοχίας. Στο τέλος του πειράματος, στα δύο πρώτα δοκίμια (S-1NT, S-2NT), οι σπείρες του χάλυβα έσπασαν, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα είχαμε στα άλλα δύο (S-3NT, S-4NT), δηλαδή δεν διέρρευσαν.

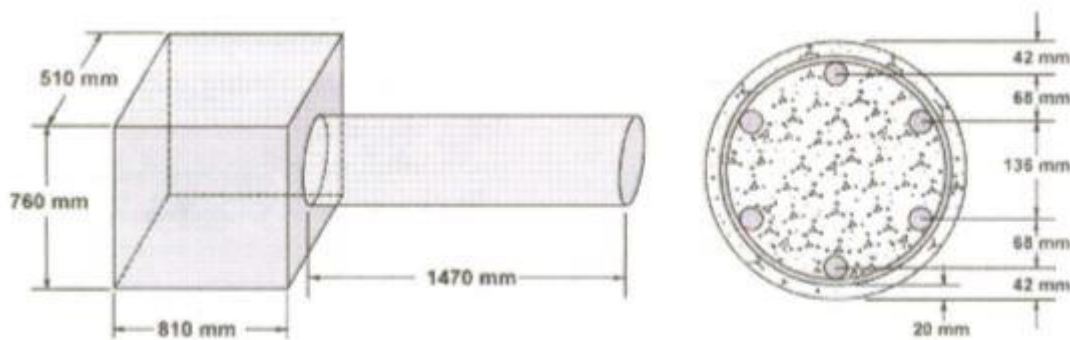
Η δεύτερη ομάδα υποστυλωμάτων από τέσσερα δοκίμια (ST-2NT έως ST-5NT), τα οποία περιείχαν τον ίδιο σπειροειδή οπλισμό με τα S-3NT, S-4NT, αλλά η διαφορά ήταν πως είχαν ενισχυθεί με υαλοϋφάσματα ή ανθρακοϋφάσματα πριν την έναρξη του πειράματος. Κατά την διάρκεια του τέταρτου ή πέμπτου κύκλου φόρτισης υπήρξε θραύση του σκυροδέματος, καθώς και παρατηρήθηκε μια αποκόλληση του υφάσματος από το σκυρόδεμα κατά μήκος της περιφέρειας μέσα στη ζώνη της πλαστικής άρθρωσης, όπως υποδεικνύεται από την αλλαγή χρώματος του ινοπλισμένου πολυμερούς. Όσο αυξανόταν η εφαρμοζόμενη μετατόπιση, είχε ως αποτέλεσμα να επεκτείνεται η αποκόλληση των τυλιγμένων ΙΟΠ.

Σε όλα τα δοκίμια που τυλίχθηκαν με ΙΟΠ, η μεγαλύτερη αστοχία έγινε στα 250-300mm από την επιφάνεια της κεφαλής, η θέση που θεωρήθηκε αυτή της πρώτης θραύσης ινών. Σε όλα τα δοκίμια η αστοχία ήταν καμπτική. Επίσης, σε κανένα δοκίμιο δεν εμφανίστηκε καμία ρωγμή στην κεφαλή του. Η αστοχία πραγματοποιήθηκε σε θέση μικρότερης ροπής μακριά από την κεφαλή, γεγονός που βοήθησε η πρόσθετη περίσφιγξη που παρείχε η κεφαλή με αποτέλεσμα να ενισχυθεί η κρίσιμη διατομή.

Παρατηρήθηκε πως η αύξηση αξονικού φορτίου, οδηγεί στην μείωση της πλαστιμότητας και της παραμορφωσιμότητας του υποστυλώματος. Η ικανότητα διάχυσης

ενέργειας της διατομής υπό χαμηλότερο αξονικό φορτίο ήταν περίπου επτά φορές αυτή της διατομής υπό υψηλό αξονικό φορτίο. Επίσης, η αύξηση στο ποσό του σπειροειδούς οπλισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης περισφιγξης, ενώ η μειωμένη κλίση της σπείρας βελτιώνει την σταθερότητα των διαμήκων ράβδων, με συνέπεια την πιο πλάσטיμη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων.

Από την πειραματική αυτή έρευνα του Sheikh (2002), αποδεικνύεται πως ένα υποστύλωμα που έχει σχεδιαστεί για μη σεισμική απόκριση μπορεί να αναβαθμιστεί με σχετική ευκολία με περιτύλιξη με ΙΟΠ και έχει παρόμοια ή και καλύτερη συμπεριφορά από υποστυλώματα σχεδιασμένα σύμφωνα με αντισεισμικές διατάξεις των κωδίκων. Τέλος, καθίσταται πιο οικονομική λύση για ένα δομικό πρόβλημα αποκατάστασης.



**Σχήμα 3.3:** Διαστάσεις και οπλισμοί των δοκιμίων Sheikh (2002) (Αντωνιάδης Κ.)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ

#### 4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστεί παράδειγμα υποστυλώματος με την εφαρμογή των μοντέλων του Mander et al., Sheikh & Uzumeri και Model Code 90 CEB/FIP. Παρακάτω παραθέτονται αναλυτικά οι υπολογισμοί και οι μαθηματικές αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του περισφιγμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα παραπάνω προσομοιώματα, θα πρέπει να υπολογιστούν αρχικά τα γεωμετρικά στοιχεία τους.

Σε κάθε περίπτωση ως άξονα x λαμβάνεται υπόψιν η μεγαλύτερη πλευρά και ως y η αντίστοιχη μικρότερη.

Άρα, σύμφωνα με το παραπάνω θεωρούμε ότι:

$$b_{xo} = \frac{b_x - 2c - 2\Phi_h}{2}, \quad (1)$$

$$b_{yo} = \frac{b_y - 2c - \Phi_h}{2} \quad (2)$$

Όπου c= επικάλυψη των συνδετήρων με χάλυβα

$\Phi_h$ = διάμετρος των διαμήκη ράβδων

Στην συνέχεια, ανάλογα με τα σκέλη του χάλυβα υπολογίζουμε την συνολική διατομή τους κατά διεύθυνση y ( $A_{swy}$ ). Αντιστοίχως πράττουμε και για την διεύθυνση x για να υπολογίσουμε την συνολική διατομή του χάλυβα ( $A_{swx}$ ). Καθοριστική τιμή της περισφιγξης για τους παρακάτω υπολογισμούς θεωρείται η μικρότερη από τις δύο αυτές τιμές.

Επίσης, θα πρέπει να υπολογίσουμε το γεωμετρικό ποσοστό για κάθε άξονα:

$$\rho_x = \frac{A_{swx}}{b_{yo} * s}, \quad (3)$$

$$\rho_y = \frac{A_{swy}}{b_{xo} * s} \quad (4)$$

Όπου s= οι ανά αποστάσεις κατά τον άξονα του μέλους

Η αποδεκτή τιμή από τις δύο προκύπτει με βάση:  $2 \min(\rho_x, \rho_y)$ .



Άρα το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\omega_w = \frac{2\min(\rho_x, \rho_y)}{f_c} \quad (5)$$

Όπου  $f_c$ = αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης στην διαμήκη έννοια προκύπτει ως εξής:

$$\alpha_s = \left(\frac{1-s}{2b_{xo}}\right) \left(\frac{1-s}{2b_{yo}}\right) \quad (6)$$

Επίσης , υπολογίζουμε τις αποστάσεις των διαδοχικών γωνιών του συνδετήρα στην διεύθυνση x και y αντίστοιχα:

$$\frac{b_{xo}}{n} \quad (7)$$

$$\frac{b_{yo}}{n} \quad (8)$$

Όπου n = ο αριθμός των διαδοχικών γωνιών του συνδετήρα

Η επιφάνεια του περισφιγμένου σκυροδέματος που περικλείεται από την μέση γραμμή του περιμετρικού συνδετήρα υπολογίζεται:

$$\alpha_n = 1 - \frac{\sum \frac{b_i^2}{6}}{b_{xo}b_{yo}} \quad (9)$$

Άρα, καταλήγουμε ότι η συνολική αποδοτικότητα της περισφιγξης ορίζεται ως:

$$\alpha = \alpha_n \alpha_s \quad (10)$$

#### 4.1.1 Μοντέλο περισφιγξης κατά Mander et al (1988a)

Πειραματικά αποτελέσματα φανερώνουν πως η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σε σχέση με την μονοαξονική τιμή στην διεύθυνση της  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$  σε:

$$f_c^* = f_c(1+K) \quad (11)$$

$$\text{Όπου } K = 2.254 \left[ \sqrt{1 + 7.94 \frac{p}{f_c}} - 1 \right] - \frac{2p}{f_c} \quad (12)$$

Το ίδιο συμβαίνει όσο αναφορά την παραμόρφωση, όπου είναι και αυτή αναλογικά μεγαλύτερη :

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co}(1+5K) \quad (13)$$

Κάποια πειραματικά αποτελέσματα φανερώνουν πως η θραύση των συνδετήρων σε εφελκυσμό εξαιτίας της πλευρικής διόγκωσης προκαλεί την αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος. Εξαιτίας αυτού, το προσομοίωμα των Mandel et al (1988a) υιοθετεί την τιμή της βράχυνσης αστοχίας ( $\varepsilon_{cu}^*$ ) τέτοια ώστε η επιπλέον ενέργεια που αποθηκεύεται στην θλιβόμενη περιοχή λόγω περισφιγξης να είναι ίση με την ανά μονάδα όγκου του

μέλους ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στους συνδετήρες μέχρι την θραύση τους. Θεωρώντας πως το διάγραμμα σ-ε του χάλυβα των συνδετήρων είναι οριζόντιο για τάση  $f_{yw}$  και για παραμόρφωση από 0 έως την ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας τους  $\varepsilon_{su,w}$  τότε ισχύει:

$$\rho_w f_{yw} \varepsilon_u \approx f_c^* (\varepsilon_{cu}^* - \varepsilon_{cu})$$

Οπότε ισχύει:

$$\varepsilon_{cu}^* \approx \varepsilon_{cu} + \frac{\omega_w \varepsilon_{su,w}}{(1+K)} \quad (14)$$

#### 4.1.2 Μοντέλο περίσφιγξης κατά Sheikh and Uzumeri (1982)

Στο μοντέλο περίσφιγξης κατά Sheikh and Uzumeri για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος με το μοντέλο κατά Mandel et al. Δηλαδή:

$$f_c^* = f_c (1+K)$$

Όμως για τον προσδιορισμό του K χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$K = a \frac{7(\rho_w f_{yw})^{1/2}}{f_c} \quad (15)$$

Όπου το α υπολογίζεται από τις εξισώσεις 6-10 όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης ( $\varepsilon_{co}^*$ ) καθώς επίσης και της βράχυνσης της αστοχίας  $\varepsilon_{cu}^*$  χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι εξισώσεις 13 & 14.

#### 4.1.3 Μοντέλο περίσφιγξης κατά Model Code 90 CEB/FIP

Το συγκεκριμένο προσομοίωμα μας παρέχει αποτελέσματα τα οποία είναι πιο συντηρητικά και έχουν υιοθετηθεί από τον Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2003b) καθώς επίσης και από τον Ευρωκώδικα 8.

Για λόγους απλότητας η θλιπτική αντοχή γραμμικοποιείται ως προς p.

Άρα η σχέση  $f_c^* = f_c (1+K)$  μετατρέπεται σε :

$$f_c^* = \beta f_c = \min\left(1 + 5 \frac{p}{f_c}, 1.125 + 2.5 \frac{p}{f_c}\right) f_c \quad (16)$$

Στην περίπτωση αυτή για να υπολογίσουμε την τάση p χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις:

$$\frac{p}{f_c} = 0.5 \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c} = 0.5 a \omega_w \quad (17)$$

$$\frac{p}{f_c} \approx \frac{\min(\rho_x, \rho_y) f_{yw}}{f_c} = 0.5 a \omega_w \quad (18)$$

Όπου α χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 6-10 που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Εν συνεχεία, η παραμόρφωση  $\varepsilon_{co}^*$  προκύπτει από τον τύπο:

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} \beta^2 \quad (19)$$

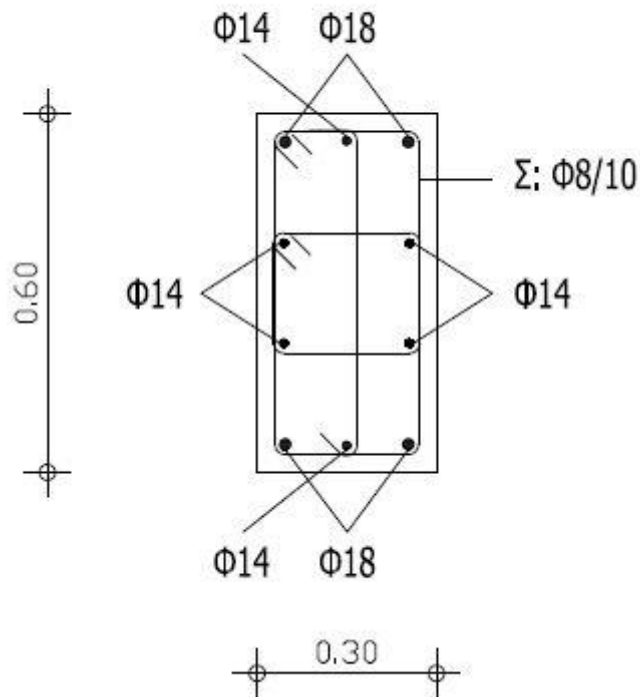
Με  $\varepsilon_{co} = 0,2\%$  και το  $\beta$  προκύπτει από την εξίσωση 15.

Τέλος, για τον υπολογισμό της βράχυνσης αστοχίας χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση που δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα από τα υπόλοιπα προσομοιώματα:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.0035 + 0.1\alpha_n\alpha_s\omega_w \quad (20)$$

## 4.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΟΥ ΕΠΙΛΥΕΤΑΙ

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το υποστύλωμα που θα μελετηθεί και θα αναλυθεί. Το υποστύλωμα έχει διαστάσεις: 0,3m x 0,6m, σκυροδέματος C16/20 και χάλυβα B500C. Οι διαμήκεις ράβδοι στον οπλισμό της περισφιγξης έχουν επικάλυψη των συνδετήρων σκυροδέματος  $c=0.03m$  και ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας  $\varepsilon_{su}=0,0034$ . Η παραμόρφωση του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη είναι  $\varepsilon_{co}=0,2\%$  και βράχυνση αστοχίας  $\varepsilon_{cu}=0,35\%$ . Οι διαμήκεις οπλισμοί κατανέμονται συμμετρικά. Οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών γωνιών κατά τον άξονα x είναι 116mm, ενώ οι αποστάσεις κατά τον άξονα y είναι 177.3mm. Ζητείται να υπολογιστεί (i) το ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό συνδετήρων ( $\rho_w$ ), (ii) ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης ( $\alpha$ ), (iii) η θλιπτική αντοχή ( $f_c^*$ ), (iv) η παραμόρφωση ( $\varepsilon_{co}^*$ ) και τέλος (v) η βράχυνση αστοχίας ( $\varepsilon_{cu}^*$ ) του περισφιγμένου σκυροδέματος.



#### Σχήμα 4.1: Υποστύλωμα του παραδείγματος

Στην ανάλυση του παραδείγματος, το υποστύλωμα θα εξεταστεί σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θα αναλυθεί για διάφορες αποστάσεις των διαμήκων ράβδων κατά τον άξονα του μέλους ( $s$ ), ενώ στην δεύτερη περίπτωση για διαφορετικές διαμέτρους ( $\Phi$ ) των διαμήκων ράβδων.

#### 4.2.1 Μεταβλητή απόσταση συνδετήρων

- Για  $s=50\text{mm}$  και  $\Phi_8$  (δηλαδή  $\Phi_h=0,008\text{m}$ )

Σύμφωνα με τους τύπους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (1-10), θα γίνει ο υπολογισμός των γεωμετρικών στοιχείων του υποστυλώματος.

$b_{x0}$	232	mm
$b_{y0}$	532	mm
$A_{swx}$	201	$\text{mm}^2$
$A_{swy}$	151	$\text{mm}^2$
$\rho_x$	0.00756	-
$\rho_y$	0.01302	-
$\rho_w$	0.01511	-

Παραπάνω υπολογίσαμε το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων, το οποίο είναι το πρώτο μας ζητούμενο. Στη συνέχεια, προχωράμε σε υπολογισμό του συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης :

$\omega_w$	0.31	-
$\alpha_s$	0.85	-
$\alpha_n$	0.9259	-
$\alpha$	0.7873	-

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος είναι:  $f_c=f_{ck}+8=20+8=28$  Mpa, καθώς και το όριο διαρροής του εγκάρσιου σπλισμού:  $f_{yw}=1.15 \cdot f_{ck}=575$  Mpa, τα οποία μεγέθη παραμένουν σταθερά για όλες τις περιπτώσεις που θα αναλυθούν.

Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων παραμέτρων θα χρησιμοποιήσουμε τα μοντέλα περίσφιγξης που αναλύθηκαν παραπάνω.

- i. Για το μοντέλο Mander et al, χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι 11-14 βάση των οποίων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

<b>Μοντέλο Mander et al</b>		
<b>K</b>	0.67	-
$f_c^*$	46.63	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0087	-
$\epsilon_{cu}^*$	0.6699	-

- ii. Για τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sheikh and Uzumeri (1982) χρησιμοποιούνται οι ίδιοι τύποι όπως κατά Mander et al με την διαφοροποίηση στον υπολογισμό του K , όπου γίνεται σύμφωνα με τον τύπο 15.

<b>Μοντέλο Sheikh and Uzumeri</b>		
<b>K</b>	0.68	-
$f_c^*$	46.95	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0081	-

- iii. Στο μοντέλο κατά CEB/FIP Model Code 90 οι υπολογισμοί προέκυψαν από τους τύπους 16-20. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:

<b>Μοντέλο CEB/FIP Model Code 90</b>		
$\beta$	1.4304	-
$f_c^*$	40.05	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0041	-
$\epsilon_{cu}^*$	0.0279	-

- Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε ομοίως και για τις παρακάτω αποστάσεις των διαμήκων ράβδων κατά τον άξονα του μέλους (s) για τον υπολογισμό των ζητηθέντων παραμέτρων.

	<b>S=75mm</b>	<b>S=100mm</b>	<b>S=150mm</b>	<b>S=200mm</b>	<b>S=250mm</b>	<b>S=300mm</b>	
$b_{x0}$	232	232	232	232	232	232	mm
$b_{y0}$	532	532	532	532	532	532	mm

$A_{swx}$	201	201	201	201	201	201	$\text{mm}^2$
$A_{swy}$	151	151	151	151	151	151	$\text{mm}^2$
$\rho_x$	0.00504	0.00378	0.00252	0.00189	0.00151	0.00126	-
$\rho_y$	0.00868	0.00651	0.00434	0.00325	0.00260	0.00217	-
$\rho_w$	0.01008	0.00756	0.00504	0.00378	0.00302	0.00252	-
$\omega_w$	0.21	0.16	0.10	0.08	0.06	0.05	-
$\alpha_s$	0.78	0.71	0.58	0.46	0.35	0.25	-
$\alpha_n$	0.9259	0.9259	0.9259	0.9259	0.9259	0.9259	-
$\alpha$	0.7215	0.6581	0.5382	0.4278	0.3267	0.2350	-

- i. Για το μοντέλο περίσφιξης Mander et al , τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι:

	<b>S=75mm</b>	<b>S=100mm</b>	<b>S=150mm</b>	<b>S=200mm</b>	<b>S=250mm</b>	<b>S=300mm</b>	
K	0.44	0.32	0.18	0.11	0.07	0.04	-
$f_c^*$	40.36	36.85	33.07	31.10	29.92	29.16	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0064	0.0046	0.0038	0.0031	0.0027	0.0024	-
$\epsilon_{cu}^*$	0.4455	0.32	0.1849	0.1145	0.0724	0.0453	-

- ii. Σύμφωνα με το μοντέλο περίσφιξης των Sheikh and Uzumeri (1982), οι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

	<b>S=75mm</b>	<b>S=100mm</b>	<b>S=150mm</b>	<b>S=200mm</b>	<b>S=250mm</b>	<b>S=300mm</b>	
K	0.51	0.40	0.27	0.18	0.13	0.08	-
$f_c^*$	42.18	39.20	35.48	33.15	31.52	30.31	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0060	0.0044	0.0037	0.0031	0.0027	0.0025	-

- iii. Για το μοντέλο CEB/FIP Model Code 90, προέκυψαν οι παρακάτω υπολογισμοί:

	<b>S=75mm</b>	<b>S=100mm</b>	<b>S=150mm</b>	<b>S=200mm</b>	<b>S=250mm</b>	<b>S=300mm</b>	
$\beta$	1.3116	1.2526	1.1392	1.0830	1.0507	1.0304	-
$f_c^*$	36.72	35.07	31.90	30.32	29.42	28.85	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0034	0.0028	0.0026	0.0023	0.0022	0.0021	-
$\epsilon_{cu}^*$	0.0184	0.0137	0.0091	0.0068	0.0055	0.0047	-

#### 4.2.2 Μεταβολή της διαμέτρου του εγκάρσιου οπλισμού.

Και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια , με αυτή της πρώτης περίπτωσης. Όμως, αυτή την φορά παραμένει σταθερή η απόσταση των διαμήκη ράβδων κατά τον άξονα του μέλους ( $s=100\text{mm}$ ) , αλλά διαφοροποιείται η διάμετρος των ράβδων ( $\Phi$ ) από χάλυβα.

Αρχικά υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ώστε να υπολογίσουμε το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων ( $\rho_w$ ) και το συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης ( $\alpha$ ).

	$\Phi_h=0.01\text{mm}$	$\Phi_h=0.012$	$\Phi_h=0.014$	
$b_{x0}$	230	228	226	mm
$b_{y0}$	530	528	526	mm
$A_{swx}$	201	201	201	$\text{mm}^2$
$A_{swy}$	151	151	151	$\text{mm}^2$
$\rho_x$	0.00379	0.00381	0.00382	-
$\rho_y$	0.00657	0.00662	0.00668	-
$\rho_w$	0.00758	0.00761	0.00764	-
$\omega_w$	0.16	0.16	0.16	-
$\alpha_s$	0.71	0.71	0.70	-
$\alpha_h$	0.9262	0.9266	0.9269	-
$\alpha$	0.6565	0.6549	0.6532	-

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι υπόλοιποι παράμετροι που ζητούνται στην εκφώνηση, συγκριτικά με τα τρία μοντέλα περίσφιγξης που αναφέρθηκαν.

- i. Κατά το μοντέλο περίσφιγξης του Mander et al, οι υπολογισμοί αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

	$\Phi_h=0.01\text{mm}$	$\Phi_h=0.012$	$\Phi_h=0.014$	
K	0.32	0.32	0.32	-
$f_c^*$	36.86	36.87	36.88	Mpa
$\varepsilon_{c0}^*$	0.0046	0.0047	0.0047	-
$\varepsilon_{cu}^*$	0.3204	0.3208	0.3212	-

- ii. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν οι υπολογισμοί των παραμέτρων κατά τους τύπους υπολογισμού των Sheikh and Uzumeri (1982)

	$\Phi_h=0.01\text{mm}$	$\Phi_h=0.012$	$\Phi_h=0.014$	
K	0.40	0.40	0.40	-
$f_c^*$	39.21	39.23	39,24	Mpa
$\varepsilon_{c0}^*$	0.0044	0,0044	0,0044	-

- iii. Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί βρίσκονται οι υπολογισμοί από το τελευταίο μοντέλο περισφιγξης που μελετήθηκε, CEB/FIP Model Code 90

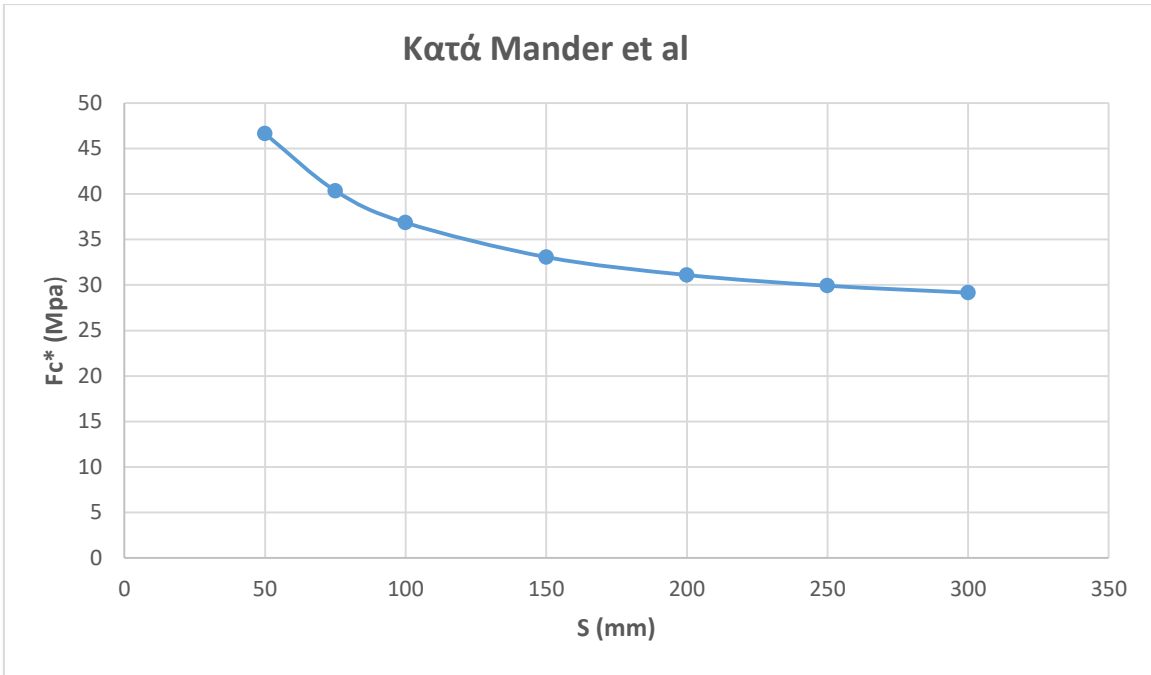
	$\Phi_h=0.01mm$	$\Phi_h=0.012$	$\Phi_h=0.014$	
$\beta$	1.2528	1.2530	1.2532	-
$f_c^*$	35.08	35.08	35.09	Mpa
$\epsilon_{c0}^*$	0.0028	0.0028	0.0028	-
$\epsilon_{cu}^*$	0.0137	0.0137	0.0138	-

#### 4.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.

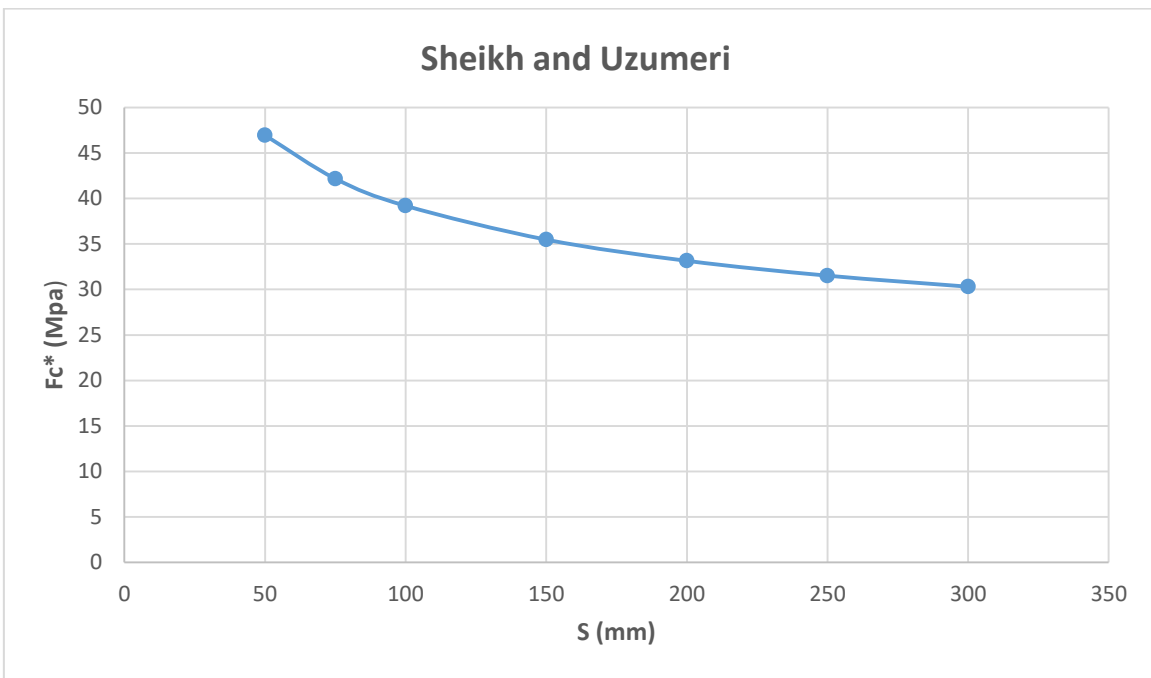
Στην πρώτη περίπτωση, παρατηρούμε λοιπόν πως επηρεάζονται σημαντικά από την απόσταση των διαμήκη ράβδων κατά τον άξονα του μέλους (s), όλοι οι παράμετροι όπου ζητήθηκαν. Όσο αυξάνεται η απόσταση των ράβδων, τόσο μειώνονται τα υπόλοιπα μεγέθη. Αυτό συμβαίνει, διότι όταν μειώνεται η απόσταση των συνδετήρων, μειώνεται και το τμήμα του στοιχείου που παραμένει χωρίς περισφιγξη. Με αυτό τον τρόπο, η μείωση της απόστασης των συνδετήρων αυξάνει την περισφιγξη και βελτιώνει την πλαστιμότητα ενός θλιβόμενου στοιχείου, διότι παρεμποδίζει τον λυγισμό των διαμήκων ράβδων, κυρίως μετά την αποφλοίωσή του.

Όσο πιο υψηλή είναι η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος τόσο επηρεάζει αρνητικά την περισφιγξη. Όμως, όπως παρατηρείται στους παραπάνω υπολογισμούς η απόσταση των συνδετήρων επηρεάζει με την σειρά της αρνητικά την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, δηλαδή όσο αυξάνεται η απόστασή τους, μειώνεται η θλιπτική αντοχή.

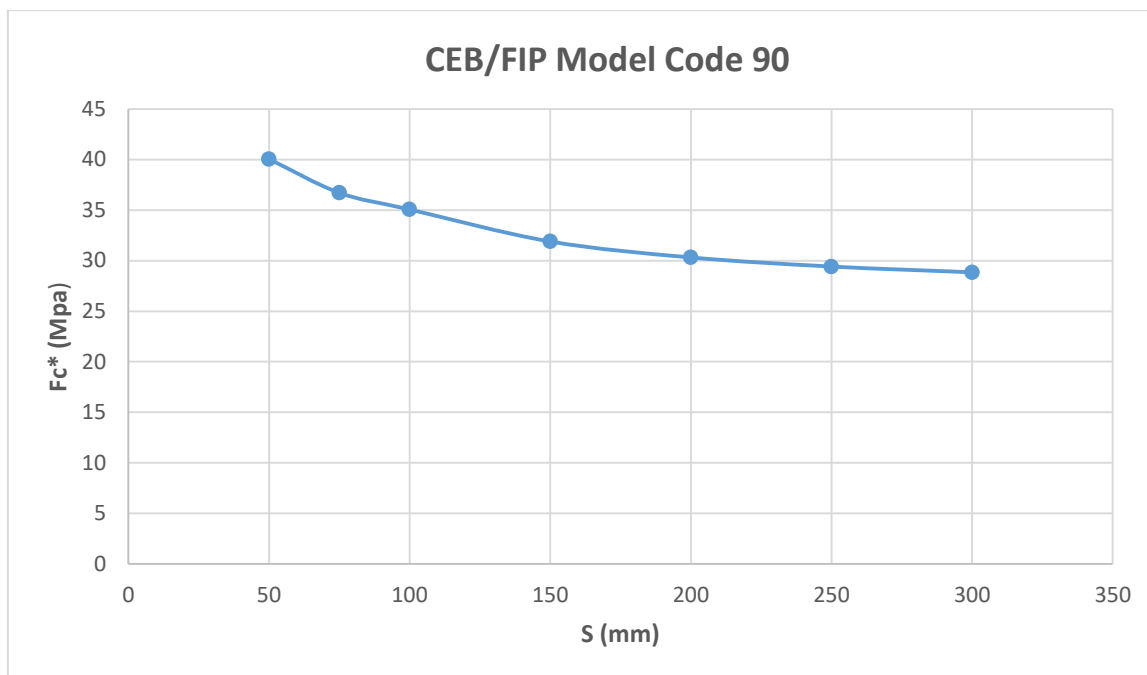




**Σχήμα 4.2:** Διάγραμμα  $f_c^*$ -s από τα αποτελέσματα του μοντέλου των Mander et al.



**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα  $f_c^*$ -s από τα αποτελέσματα του μοντέλου των Sheikh and Uzumeri.

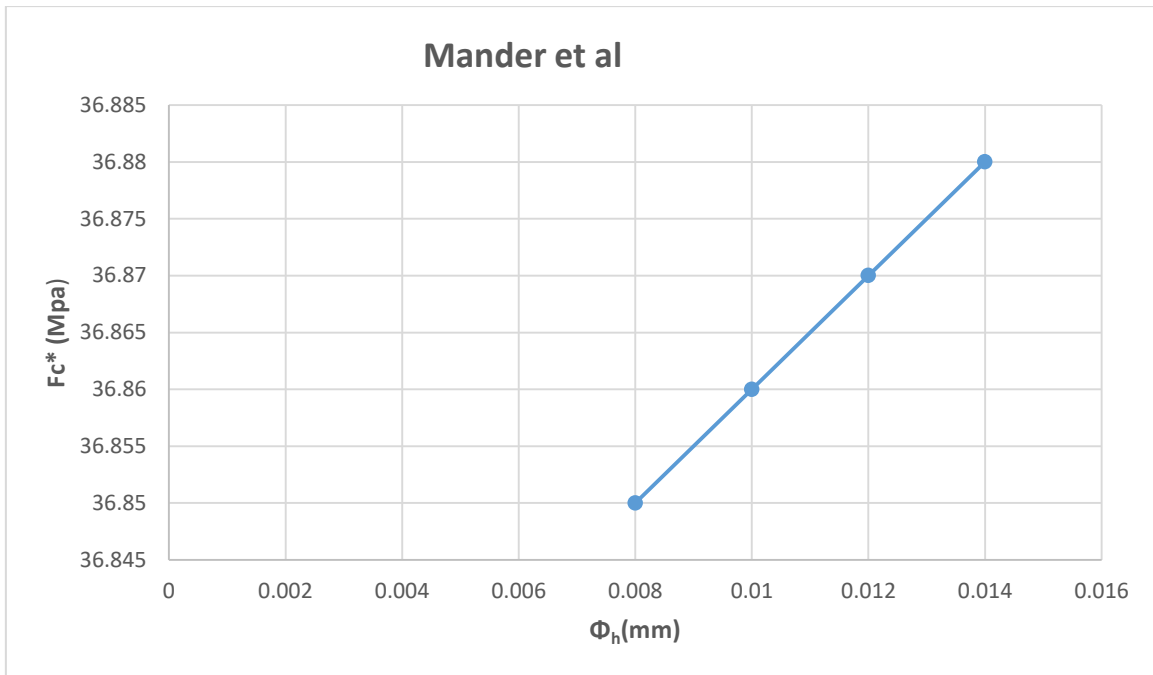


**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα  $f_c^*$ -s από τα αποτελέσματα του μοντέλου CEB/FIP Model Code 90.

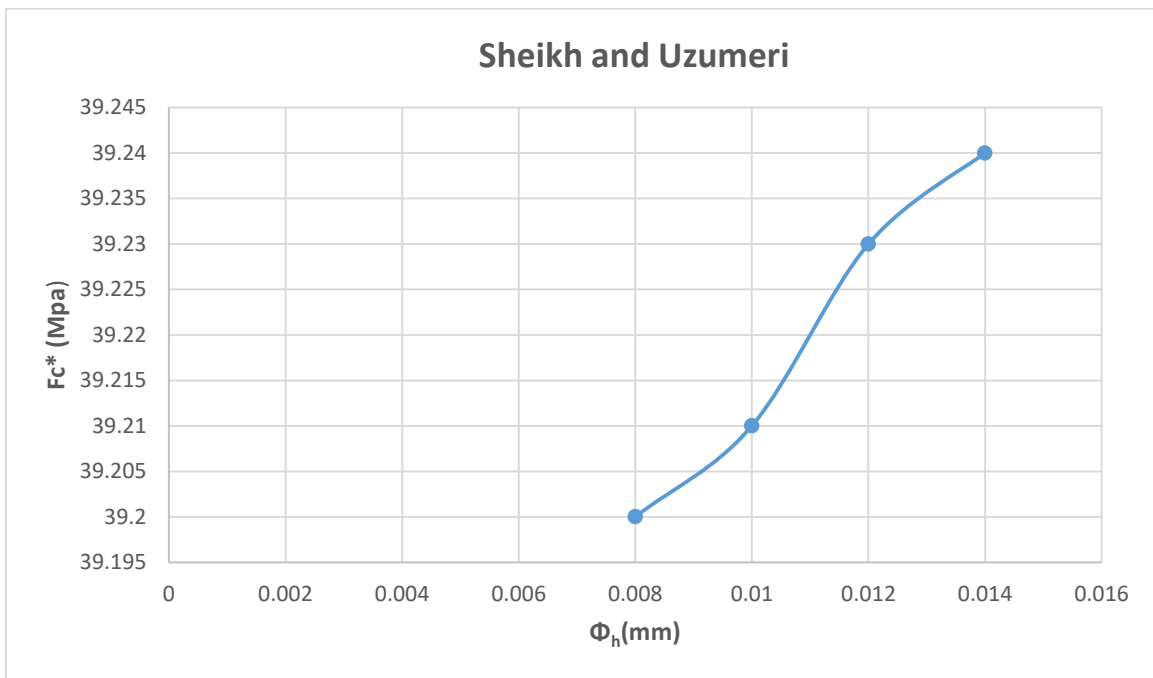
Και τα τρία μοντέλα, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα έχουν παρόμοια καμπύλη. Όμως, είναι φανερό η μείωση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος όταν αυξάνεται η απόσταση των συνδετήρων.

Αντίθετα όμως αποτελέσματα έχει η δεύτερη περίπτωση που διερευνήθηκε. Η διάμετρος των διαμήκη ράβδων, επηρέασε αμελητέα τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν.

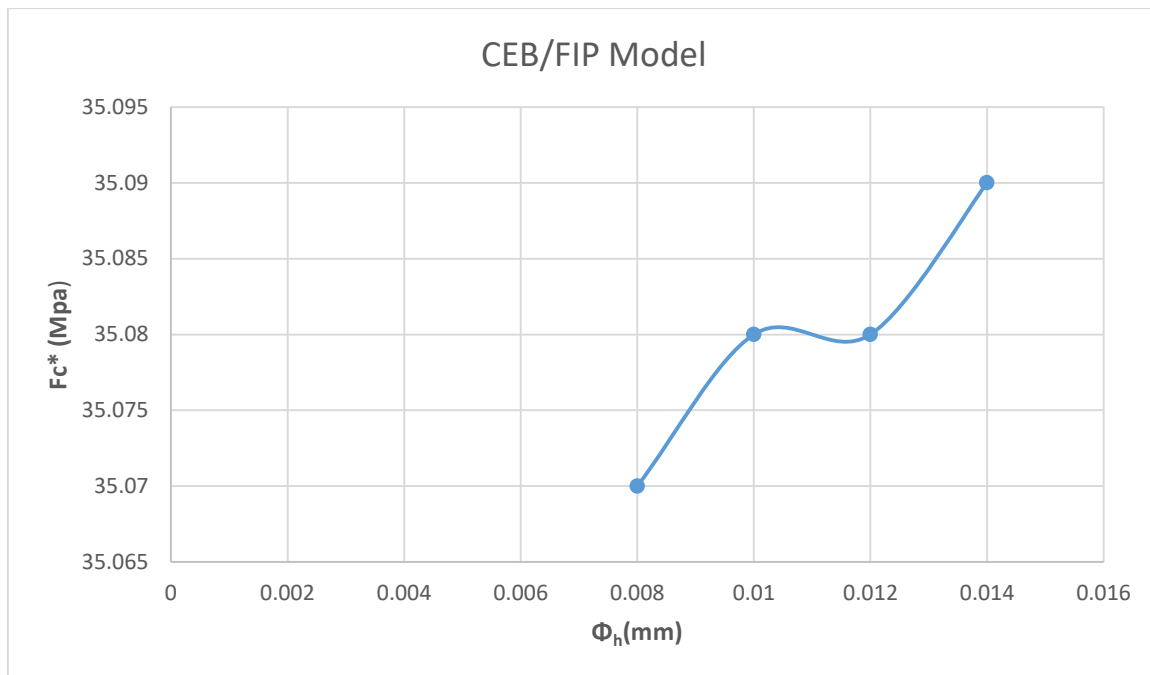
Αξίζει όμως να παρατηρηθούν τα διαγράμματα της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος με την διάμετρο των διαμήκη ράβδων, ξεχωριστά για κάθε μοντέλο που μελετήθηκε.



**Σχήμα 4.5:** Διάγραμμα  $f_c^*$ - $\Phi_h$  κατά το μοντέλο περίσφιγξης Mander et al.



**Σχήμα 4.6:** Διάγραμμα  $f_c^*$ - $\Phi_h$  κατά το μοντέλο περίσφιγξης Sheikh and Uzumeri.



**Σχήμα 4.7:** Διάγραμμα  $f_c^*$  - $\Phi_h$  κατά το μοντέλο περίσφιγξης CEB/FIP Model.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνεται ελάχιστα, όταν αυξάνεται και η διάμετρος των διαμήκη ράβδων.

Όμως, παρατηρείται διαφοροποίηση των διαγραμμάτων μεταξύ των καμπυλών που δημιουργούνται, βάση των αποτελεσμάτων. Το διάγραμμα κατά Mander et al είναι γραμμικό, σε αντίθεση με των Sheikh and Uzumeri και του CEB/FIP Model.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της περίσφιγξης στις ιδιότητες δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τις ανάγκες της διερεύνησης αυτής, πραγματοποιήθηκαν μαθηματικές αναλύσεις προσομοιώματος υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το υποστύλωμα εξετάστηκε για διάφορες αποστάσεις συνδετήρων ( $s$ ) και σε δεύτερο χρόνο για διάφορες διαμέτρους των διαμήκη ράβδων του οπλισμού ( $\Phi_h$ ).

Για την μελέτη των παραπάνω παραμέτρων , το υποστύλωμα αναλύθηκε σύμφωνα με τα Μοντέλα περίσφιγξης των Mander et al (1988a), Sheikh & Uzumeri (1982) και Model Code 90 CEB/FIP. Από την μελέτη προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Η επιρροή της απόστασης μεταξύ των συνδετήρων ( $s$ ) επηρεάζει θετικά το φαινόμενο της περίσφιγξης . Όσο μειώνεται η απόστασή τους, μειώνεται το τμήμα του στοιχείου που παραμένει απερίσφικτο , με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η πλαστιμότητα των θλιβόμενων στοιχείων.
- Η διάμετρος των διαμήκη ράβδων ( $\Phi_h$ ) , όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα , δεν επηρεάζει σημαντικά την θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος ( $f_c^*$ ).
- Τέλος, όσο αναφορά τα τρία μοντέλα που μελετήθηκαν σύμφωνα με τα διαγράμματα που προέκυψαν, στην πρώτη περίπτωση,  $f_c^*$ -s, οι διαφορές των διαγραμμάτων είναι ελάχιστες. Αντιθέτως, στην δεύτερη περίπτωση διαγραμμάτων  $\Phi_h$ -s, παρατηρείται διαφορά. Το μοντέλο Mander et al είναι γραμμικό , συγκριτικά με τα διαγράμματα των μοντέλων Sheikh & Uzumeri και Model Code 90 CEB/FIP τα οποία σχηματίζουν καμπύλη.

Συνοψίζοντας, όπως φαίνεται από την διερεύνηση αλλά και από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν , αποδεικνύεται ότι η περίσφιγξη δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική μέθοδος για την επιδιόρθωση μελών που έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Πηγές:

- <https://pithos.okeanos.grnet.gr/public/n3mbftdah5ittSLChXabD2>
- <http://ikee.lib.auth.gr/record/19056/files/gri-2005-543.pdf>
- [https://www.researchgate.net/profile/Dimitrios\\_Konstantinidis2/publication/264975525\\_Properties\\_and\\_analytical\\_modelling\\_of\\_unconfined\\_and\\_confined\\_high\\_performance\\_concrete/links/53f910f90cf2e3cbf5600a42.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dimitrios_Konstantinidis2/publication/264975525_Properties_and_analytical_modelling_of_unconfined_and_confined_high_performance_concrete/links/53f910f90cf2e3cbf5600a42.pdf)
- <https://pithos.okeanos.grnet.gr/public/h3iXTRDlMrLuVrEVW1pfD4>
- [http://okeanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/381/pol\\_00764.pdf?sequence=1](http://okeanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/381/pol_00764.pdf?sequence=1)
- [www.episkevesold.civil.upatras.gr/Δημοσιεύσεις%20ΣΠΜΕ/338.pdf](http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/Δημοσιεύσεις%20ΣΠΜΕ/338.pdf)
- <http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202008/11%20ΚΑΙΡΗΣ%20ΧΑΤΖΗΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ.pdf>
- [https://eclass.teicrete.gr/modules/document/file.php/TD141/ΜΑΘΗΜΑΤΑ/141029\\_ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ%20ΜΑΘΗΜΑ%206ο.pdf](https://eclass.teicrete.gr/modules/document/file.php/TD141/ΜΑΘΗΜΑΤΑ/141029_ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ%20ΜΑΘΗΜΑ%206ο.pdf)
- <http://www.episkevesold.civil.upatras.gr/ergasies%202009/22%20ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ.pdf>
- Παπανικολάου Βασίλειος Κ.- Αναλυτική μελέτη περισφιγμένων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με την μέθοδο των μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων στο χώρο , Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης ,2007.
- Αντισεισμικός σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα, Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2006.
- Κ. Δ. Μέρμηγκας, Αντοχή και πλαστιμότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε ορθή ένταση, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2002.
- Θεοδωροπούλου Άννα, Διατάξεις μέγιστων/ ελάχιστων και λεπτομέρειες όπλισης δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, κατά του EN1992-1-1:2004 και EN1998-1:2004, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.