



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΡΟΠΩΝ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Διπλωματική Εργασία

Ευνογαλάς Πέτρος
Επιβλέπων: Κ. Τρέζος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ
ΡΟΠΩΝ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ
ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Διπλωματική Εργασία

Ξυνογαλάς Πέτρος
Επιβλέπων: Κ. Τρέζος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα Καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου κ. Κωνσταντίνο Τρέζο, Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, τόσο για την ανάθεση της εργασίας όσο και για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Την οικογένεια μου για τη διαρκή στήριξη που μου προσέφερε και όσους βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο στην δημιουργία της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με βάση όλους τους σύγχρονους κανονισμούς, ο οικονομικός σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμικών δράσεων βασίζεται στην πλαστιμότητα τους. Ο όρος πλαστιμότητα ορίζει την ικανότητα ενός φορέα και επιλεγμένων φερόντων στοιχείων να παραμορφώνονται πέρα από τα ελαστικά όρια χωρίς σημαντική αποδιοργάνωση της αντοχής τους και της ακαμψίας τους. Η μέτρηση της πλαστιμότητας μπορεί να γίνει με όρους μετατοπίσεων, καμπυλοτήτων, βελών ή στροφών. Οι πιο συνηθισμένες και επιθυμητές πηγές ανελαστικών παραμορφώσεων σ' ένα φορέα είναι οι στροφές στις πιθανές πλαστικές αρθρώσεις. Συνεπώς, είναι χρήσιμο να συνδέσουμε την καμπυλότητα (δηλαδή τις στροφές των διατομών ανά μονάδα μήκους) με τις προκαλούσες καμπτικές ροπές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνώνται όλες εκείνες οι παράμετροι που επηρεάζουν διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων, τα οποία έχουν προκύψει από ανάλυση διατομών υποστυλωμάτων. Τέτοιες παράμετροι είναι, η μορφή των διαγραμμάτων τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου και απερίσφικτου σκυροδέματος, όπως έχουν διατυπωθεί από ποικίλα μοντέλα, η μορφή των διαγραμμάτων τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα, το ποσοστό διαμήκους οπλισμού, η θλιπτική αξονική δύναμη, η γεωμετρία της διατομής, η αποφλοιώση της καθώς και η παρεχόμενη παθητική περίσφιγξη (συνδετήρες).

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή των ανωτέρω παραμέτρων σε κατάλληλα παραδείγματα διατομών υποστυλωμάτων, η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων και εν συνεχεία πλαστιμοτήτων μ_{ϕ} με τη βοήθεια του προγράμματος XTRACT, καθώς και η ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση αυτών. Τα επιλεγθέντα παραδείγματα αφορούν τόσο υφιστάμενες, και ενδεχομένως ανεπαρκώς οπλισμένες διατομές υποστυλωμάτων, όσο και διατομές οπλισμένες σύμφωνα με τους ισχύοντες κώδικες οπλισμένου σκυροδέματος.

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα διαρθρωθεί σε 2 βασικά μέρη:

Μέρος Α : Στην αρχή του μέρους Α της εργασίας, θα γίνει αναφορά στον ορισμό αλλά και στη σημασία της περίσφιγξης μιας διατομής.

Στο κεφάλαιο 1 του μέρους Α θα γίνει εκτενής αναφορά σε διάφορα προσομοιώματα τάσεων παραμορφώσεων απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος. Θα χρησιμοποιηθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα - εφαρμογές και θα γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από τη σύγκριση όλων των προσομοιωμάτων που έχουν αναφερθεί σε επίπεδο διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων, ροπών - καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων.

Μέρος Β: Στο Β μέρος της εργασίας θα γίνει διερεύνηση όλων των πιθανών παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα σε επίπεδο ροπών καμπυλοτήτων και κατ' επέκταση πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων διατομών με ποικίλα διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Στην αρχή του μέρους Β της παρούσας εργασίας, θα γίνει αναφορά στις παραδοχές των διερευνήσεων καθώς και στην μέθοδο της διγραμμικοποίησης των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων ώστε να ορίσουμε τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων των διατομών που θα εξετάσουμε.

Στο κεφάλαιο 2, θα διερευνηθεί ο οπλισμός (εγκάρσιος και διαμήκης) μιας διατομής .

Στο κεφάλαιο 3, θα διερευνηθεί η γεωμετρία μιας διατομής (μέγεθος, λόγος πλευρών, επικάλυψη).

Στο κεφάλαιο 4, θα διερευνηθούν οι ποιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται μια διατομή (σκυρόδεμα και χάλυβας).

Στο κεφάλαιο 5, θα συγκριθούν οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων των διατομών όπως προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια, με τις πλαστιμότητες όπως προκύπτουν από τον Ευρωκώδικα 8, μέρος 1.

Στο κεφάλαιο 6, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα των διερευνήσεων του μέρους Β

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ Α ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	1
Κεφάλαιο 1 - Προσομοιώματα απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος	5
1.1 Ευρωκώδικας 8 μέρος 1 (EC8 - 1) ή Ευρωκώδικας 2 (EC2)	6
1.2 Ευρωκώδικας 8 μέρος 3 (EC8 - 3)	11
1.3 Kent & Park και Scott et al (1982)	14
1.4 J.B. Mander και M.J.N. Paulay & Priestley (1988)	18
1.5 Θ. Π. Τάσιος	24
1.6 Δ. Μπισκίνης	36
1.7 Συμπεράσματα	37
ΜΕΡΟΣ Β ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	43
Κεφάλαιο 2 - Οπλισμός διατομής	51
2.1 Εισαγωγή	52
2.2 Διαμήκης οπλισμός	52
2.3 Εγκάρσιος οπλισμός	63
2.2.1 Μορφή συνδετήρα	63
2.2.2 Αποστάσεις συνδετήρων	72
Κεφάλαιο 3 - Γεωμετρία διατομής	87
3.1 Εισαγωγή	88
3.2 Μέγεθος διατομής	88
3.3 Λόγος πλευρών διατομής	97
3.4 Επικάλυψη οπλισμών	110
Κεφάλαιο 4 - Υλικά διατομής	123
4.1 Εισαγωγή	124
4.2 Ποιότητα σκυροδέματος	124
4.3 Κράτυνση χάλυβα	138
Κεφάλαιο 5 - Επίδραση είδους αντιπροσωπευτικής τιμής	145
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα	155

ΜΕΡΟΣ Α

ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

ΜΕΡΟΣ Α

Τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να γίνει μία αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος όταν αυτό υπόκειται σε θλίψη.

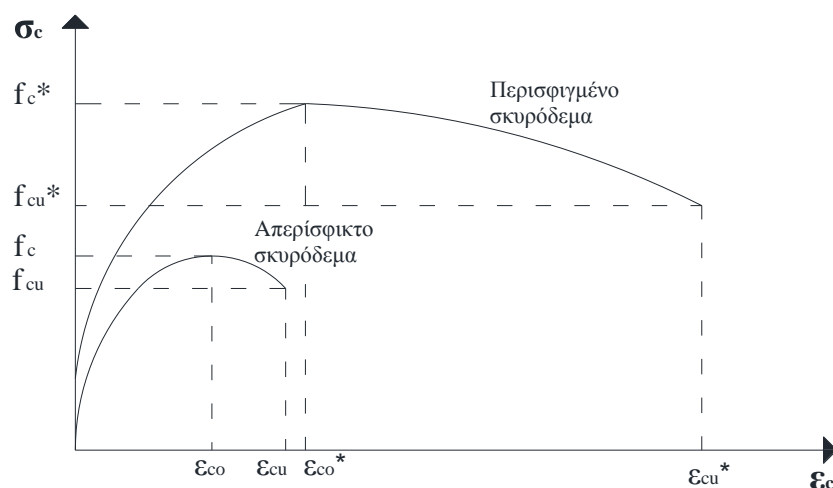
Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c προσδιορίζεται μέσω τυποποιημένων δοκιμών, η οποία βεβαίως διαφέρει από την πραγματική αντοχή και εν γένει συμπεριφορά του σκυροδέματος στην κατασκευή. Παράμετροι στις οποίες οφείλεται αυτή η "αναντιστοιχία" μπορεί να είναι η μορφή και το σχήμα της διατομής, η ταχύτητα και οι κύκλοι φόρτισης, η ηλικία του σκυροδέματος κλπ.

Υπάρχουν πολυάριθμα μοντέλα τα οποία, τόσο μέσω δοκιμών, όσο και μέσω πειραματικών δοκιμών πραγματικών διατομών, προσεγγίζουν την συμπεριφορά του απερίσφικτου και του περισφιγμένου σκυροδέματος, μερικά στα οποία, θα γίνει αναφορά και ανάλυση παρακάτω.

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Τυπική καμπύλη απερίσφικτου σκυροδέματος φαίνεται στο σχήμα (**Σχήμα 1.1**) για κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη. Στα περισσότερα προτεινόμενα μοντέλα, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, έχει τιμή κοντά στο 2 ‰ ενώ η παραμόρφωση αστοχίας στο 85 ‰ της αντοχής του, στο 3-4 ‰.

Το απερίσφικτο σκυρόδεμα, και συγκεκριμένα η οριακή θλιπτική παραμόρφωσή του, αδυνατεί να καλύψει αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμοτήτων διατομών υποστυλωμάτων που φέρουν σημαντικά αξονικά φορτία, ιδιαίτερα σε περιοχές πιθανών πλαστικών αρθρώσεων. Για το λόγο αυτό, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη εγκάρσιου οπλισμού η οποία και θα "αναλάβει" την περισφιγξη του σκυροδέματος. Ωστόσο, και στην τελευταία περίπτωση, υπάρχει ένα ποσοστό της διατομής, το οποίο δεν εσωκλείεται από τον εγκάρσιο οπλισμό (**Σχήμα 1.2**) και συνεπώς συμπεριφέρεται σύμφωνα με τους νόμους απερίσφικτου σκυροδέματος.



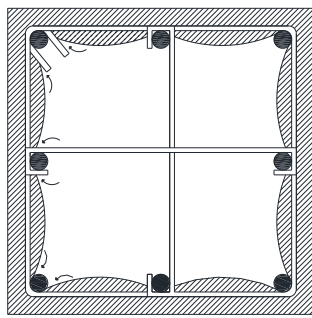
Σχήμα 1.1 Καμπύλες απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος.

Στην παρούσα εργασία, θα γίνει εκτενής αναφορά στη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων για το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα υπό την επίδραση μονοαξονικής τάσης, όπως αυτή έχει διατυπωθεί από τους Ευρωκώδικες 2 (ή 8 - μέρος 1) & 8, από τους Mander και Paulay & Priestley, από το Θ. Π. Τάσιο και από τους Kent & Park.

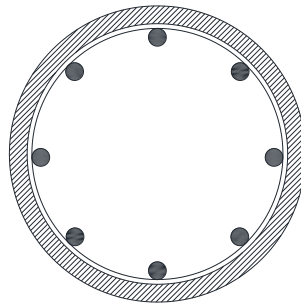
Περισφιγμένο σκυρόδεμα.

Το περισφιγμένο σκυρόδεμα μέσω της αυξημένης θλιπτικής αντοχής του και κυρίως της αυξημένης οριακής θλιπτικής παραμόρφωσής του, είναι δυνατό να καλύψει ενδεχόμενες αυξημένες απαιτήσεις τοπικών πλαστιμοτήτων σε διατομές υποστυλωμάτων. Η ύπαρξη πυκνού εγκάρσιου οπλισμού σε συνδυασμό με αυτή του διαμήκη οπλισμού, περιορίζει την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος, αναγκάζοντάς το να υπόκειται σε τριαξονική και όχι μονοαξονική θλίψη. Η παράπλευρη πίεση που προσφέρουν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα, επιτρέπει στη θλιβόμενη ζώνη του, να αναλάβει υψηλότερες θλιπτικές τάσεις, και το σημαντικότερο, υψηλότερες θλιπτικές παραμορφώσεις πριν την αστοχία (**Σχήμα 1.1**).

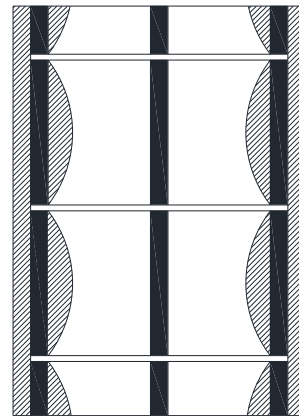
Το σχήμα των συνδετήρων μπορεί να είναι ορθογωνικό ή και κυκλικό. Το σχήμα του σπειροειδούς οπλισμού ή των κλειστών κυκλικών συνδετήρων, επιτρέπει την ανάπτυξη παράπλευρης πίεσης, υπό μορφή συνεχούς γραμμικού φορτίου περίσφιγξης στην περιφέρεια του κύκλου. Αντίθετα, οι κλειστοί ορθογωνικοί συνδετήρες προσφέρουν αντιδράσεις πλήρους περίσφιγξης στις γωνίες τους, επειδή η πίεση του σκυροδέματος πάνω στις πλευρές του συνδετήρα, τείνει να κάμψει τις



α) Τετραγωνική διατομή



β) Κυκλική διατομή



γ) Κατακόρυφη τομή

Σχήμα 1.2 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων μέσω εγκάρσιου και διαμήκους οπλισμού.

πλευρές προς τα έξω (Σχήμα 1.2.α).

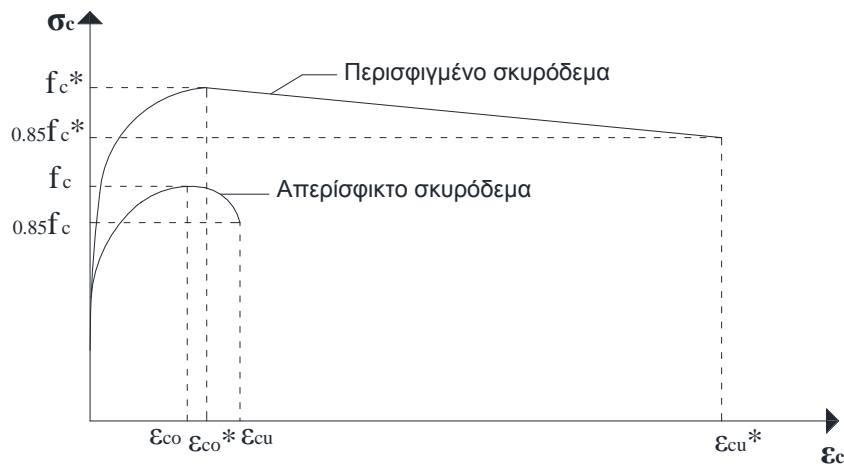
Στην παρούσα εργασία, θα γίνει εκτενής αναφορά στη σχέση τάσεων- παραμορφώσεων για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, όπως αυτή έχει διατυπωθεί από τους Ευρωκώδικες 2 (ή 8 - μέρος 1) & 8, από τους Mander και Paulay & Priestley, από το Δ. Μπισκίνη, από το Θ. Π. Τάσιο (μερική και πλήρης θλίψη) και από τον Kent & Park και Scott et al (1982). Θα γίνει σύγκριση των προσομοιωμάτων περισφιγξης σε επίπεδο διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων για χαρακτηριστικά παραδείγματα διατομών, ενώ θα δοθεί (και σχολιαστεί) συγκεντρωτικό διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων ($M - 1/r$) για όλα τα προαναφερθέντα μοντέλα.

Κεφάλαιο 1

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΑΠΕΡΙΣΦΙΚΤΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

- 1.1 Ευρωκώδικας 8 μέρος 1 (EC8 - 1) ή Ευρωκώδικας 2 (EC2)
- 1.2 Ευρωκώδικας 8 μέρος 3 (EC8 - 3)
- 1.3 Kent & Park και Scott et al (1982)
- 1.4 J.B. Mander και M.J.N. Paulay & Priestley (1988)
- 1.5 Θ. Π. Τάσιος
- 1.6 Δ. Μπισκίνης
- 1.7 Συμπεράσματα

1.1 Ευρωκώδικας 8 μέρος 1 (EC8 - 1) ή Ευρωκώδικας 2 (EC2)



Σχήμα 1.3 Καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου και περισφισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες.

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Ο Ευρωκώδικας 2 για το απερίσφικτο σκυρόδεμα προτείνει παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων τόσο για τον αύξοντα όσο και για το φθίνοντα κλάδο. Η μορφή της καμπύλης σ - ϵ φαίνεται στο (Σχήμα 1.3). Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος f_c , και ορίζεται ως ϵ_{co} , έχει τιμή που μεταβάλλεται ανάλογα με τη χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος. Ο τύπος που δίνει την σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης είναι:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{\frac{\epsilon}{\epsilon_{co}} \left(k - \frac{\epsilon}{\epsilon_{co}} \right)}{1 + (k - 2) \frac{\epsilon}{\epsilon_{co}}} \quad (1.1)$$

όπου: $k = 1.05 E_c \frac{\epsilon_{co}}{f_c}$

με E_c : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που δίνεται από τη σχέση:

$$E_c = 11000 f_c^{0.3} \quad (f_c \text{ σε } MPa)$$

Η εξίσωση (1.1) μπορεί να εφαρμοστεί για $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}$ και για $\varepsilon_c > \varepsilon_{co}$. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση ορίζεται ως ε_{cu} και η τιμή της είναι σταθερή και ίση με 3.5 %.

Περίσφιγμένο σκυρόδεμα

Ο Ευρωκώδικας 2 για το περισφιγμένο σκυρόδεμα προτείνει τη χρήση της ίδιας σχέσης με το απερίσφικτο (εξίσωση (1.1)) κάνοντας αντικατάσταση των: ε_{co} με ε_{co}^* , ε_{cu} με ε_{cu}^* και f_c με f_c^* (f_c^* , ε_{co}^* , ε_{cu}^* : τροποποιημένες τιμές τάσεων-παραμορφώσεων λόγω περισφιγξης). Παρότι η εξίσωση (1.1) μπορεί να εφαρμοστεί και στο φθίνοντα κλάδο της παραβολής κατ' αντιστοιχία με το απερίσφικτο σκυρόδεμα, ωστόσο για μεγάλες θλιπτικές παραμορφώσεις, τις οποίες προσφέρει η περισφιγξη, η καμπύλη σ-ε φθίνει απότομα και συνεπώς, η θλιπτική τάση του σκυροδέματος που αντιστοιχεί στην υπολογισμένη οριακή θλιπτική παραμόρφωση, έχει πολύ μικρή ή και με αντίθετο πρόσημο τιμή

Η σχέση που προτείνει ο Ευρωκώδικας 2, λαμβάνει υπόψη την μείωση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το αρχικό: $E_c = \frac{2f_c^*}{\varepsilon_{co}^*}$, καθώς αυξάνεται παράπλευρη τάση p , αποτέλεσμα της περισφιγξης της διατομής. Οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{και} \quad f_c^* = \beta f_c \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} \beta^2 \quad (1.3)$$

$$\text{όπου:} \quad \beta = \min \left(1 + 5 \frac{p}{f_c}; 1.125 + 2.5 \frac{p}{f_c} \right) \quad (1.4)$$

Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση ε_{cu}^* δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.0035 + 0.2 \frac{p}{f_c} \quad (1.5)$$

Απόδοση περίσφιγξης

Το αποτέλεσμα της τοποθέτησης πυκνού εγκάρσιου οπλισμού, είναι η δημιουργία παράπλευρης τάσης p , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$p = 0.5\alpha\rho_w f_{yw} \quad (1.5A)$$

όπου: $\rho_w = 2 \min(\rho_x, \rho_y) = 2 \min(\sum A_{swx}/b_o; \sum A_{swy}/h_o)/s$

με: $\sum A_{sw}$: Το εμβαδόν των συνδετήρων που κόβει η τομή κατά x ή κατά y αντίστοιχα.

b_o : Η μικρή διάσταση του πυρήνα της διατομής, όπως αυτή ορίζεται από τη γραμμή της περιμέτρου, στο κέντρο της διατομής του εξώτερου συνδετήρα (Σχήμα 1.4).

h_o : Η μεγάλη διάσταση της διατομής κατ' αντιστοιχία με τη b_o (Σχήμα 1.4).

s : Η καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων από κέντρο σε κέντρο διαμέτρου συνδετήρα (Σχήμα 1.4).

f_{yw} : Η τάση διαρροής του χάλυβα από τον οποίο αποτελούνται οι συνδετήρες.

και όπου: $a = a_s a_n \quad (1.6)$

ορίζεται ως αποδοτικότητα της περίσφιγξης. Ο παράγοντας a_n εξαρτάται από τον τύπο του ή των συνδετήρων που θα τοποθετηθούν, και εκφράζει το ενεργώς περισφιγμένο τμήμα της διατομής. Η σχέση από την οποία υπολογίζεται ο a_n είναι:

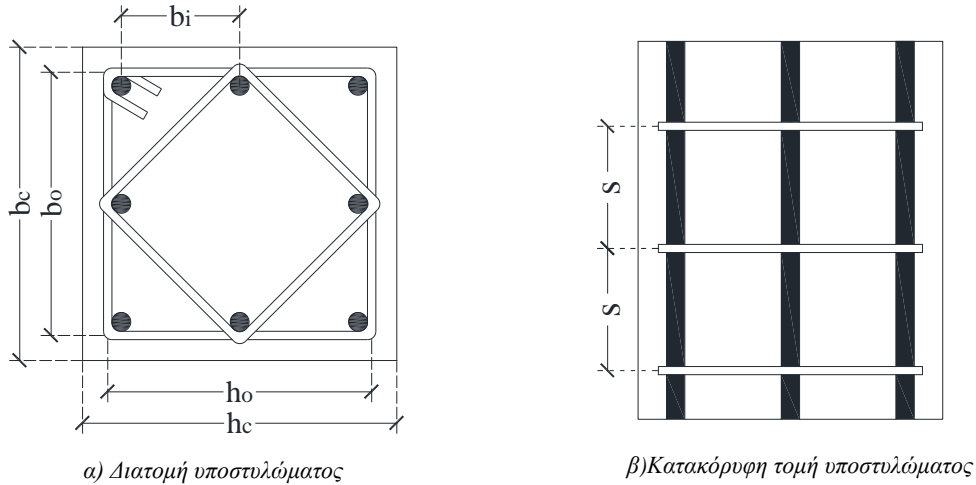
$$a_n = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n b_i^2}{6b_o h_o} \quad (1.7)$$

με: b_i : Η απόσταση από κέντρο σε κέντρο των διαμήκων οπλισμών.

n : Το πλήθος των διαμήκων ράβδων δεμένων με "τσακισμένους" συνδετήρες.

Ο παράγοντας a_s εξαρτάται από την καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων και εκφράζει το ενεργώς καθ' ύψος, περισφιγμένο τμήμα της διατομής (Σχήμα 1.2.γ). Η σχέση από την οποία υπολογίζεται ο a_s είναι:

$$a_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (1.8)$$



Σχήμα 1.4 Γεωμετρικές αποστάσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης.

Παράδειγμα Υπολογισμού

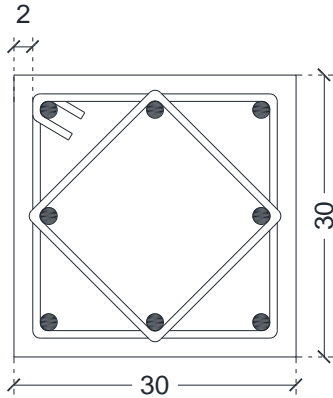
Έστω η διατομή με υλικά $f_c = 20MPa$, $f_y = 500MPa$ και χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον **Πίνακα 2.1**.

Πίνακας 1.1 Πίνακας χαρακτηριστικών διατομής 1.1.

Όνομα	Διαστάσεις (cm × cm)	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
				Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω}
1.1	30 X 30	2.00	8 X Φ18	Φ8/10	3.41	0.1587

Οι παρακάτω παρατηρήσεις αφορούν κάθε πίνακα:

- Φ8/10 → Διάμετρος συνδετήρα σε mm/Αποστάσεις καθ' ύψος (κέντρο σε κέντρο).
- Αριθμός τμήσεων → Αριθμός ενεργών σκελών συνδετήρων σε τομή κατά x και κατά y . Π.χ.
 - τετραγωνικός → 2.00.
 - ρομβοειδής & τετραγωνικός → 3.41.
 - τετραγωνικός & 2 × ορθογωνικοί → 4.67.
- Η επικάλυψη αναφέρεται στον εξώτερο οπλισμό.



$$a_n = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n b_i^2}{6b_o h_o} = 1 - \frac{8 \times 11.3^2}{6 \times 25.2^2} = 0.732$$

$$a_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = \left(1 - \frac{10}{2 \times 25.2}\right)^2 = 0.643$$

$$\frac{\sum A_{swx}}{b_o} = \frac{\sum A_{swy}}{h_o} = \frac{0.503 \times (2 + 2/\sqrt{2})}{0.252} \times 10^{-4} = 6.815 \times 10^{-4} m$$

Σχήμα 1.5 Σχήμα Διατομής 1.1.

$$\rho_w = 2 \min(\rho_x, \rho_y) = 2 \min(\sum A_{swx}/b_o; \sum A_{swy}/h_o) / s = 2 \times 6.815 \times 10^{-4} = 1.363 \times 10^{-2}$$

με:

$$\frac{P}{f_c} = 0.5 \alpha \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c} = 0.5 \times 0.470 \times \frac{500}{20} \times 1.363 \times 10^{-2} = 0.08011$$

με: $a = a_s a_n = 0.732 \times 0.643 = 0.470$, $f_{yw} = 500 MPa$ και $f_c = 20 MPa$

Και άρα οι τροποποιημένες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων με εφαρμογή των σχέσεων (1.2), (1.3), (1.4) υπολογίζονται ως εξής:

$$f_c^* = \beta f_c = 26.506 MPa$$

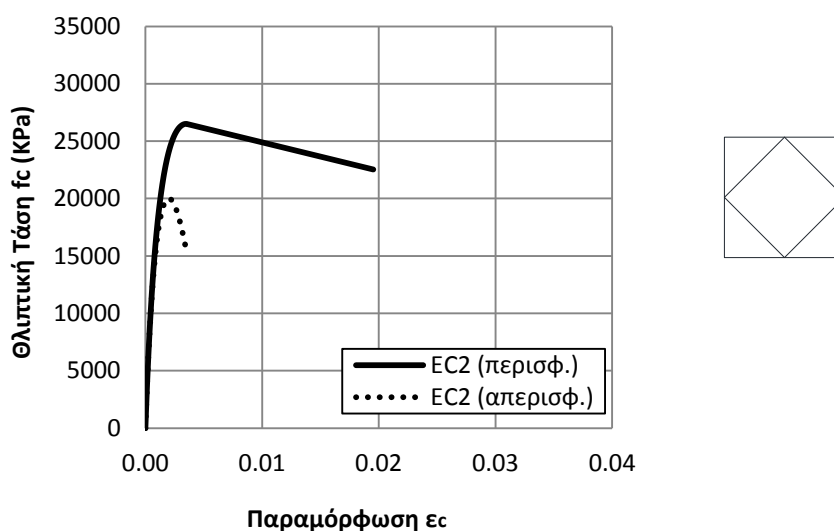
$$\varepsilon_{co}^* = \beta^2 \varepsilon_{co} = 3.51\%$$

με: $\beta = \min\left(1 + 5 \frac{P}{f_c}; 1.125 + 2.5 \frac{P}{f_c}\right) =$
 $= \min(1 + 5 \times 0.08011; 1.125 + 2.5 \times 0.08011) = 1.325$

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.0035 + 0.2 \frac{P}{f_c} = 0.0035 + 0.2 \times 0.08011 = 19.52\%$$

Υποσημείωση: Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι $\varepsilon_{co} = 0.002$ για ποιότητα c20/25, σύμφωνα με τον EC2.

Εφαρμόζοντας τη σχέση (1.1) καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του περισφιγμένου και απερίσφικτου σκυροδέματος:



Σχήμα 1.6 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων EC2 για τη Διατομή 1.1.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων του EC2 για τη συγκεκριμένη διατομή, δηλώνουν αύξηση της μέγιστης θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος κατά 32% και μια πολύ σημαντική αύξηση της οριακής παραμόρφωσης έως και 5 φορές μεγαλύτερη της ϵ_{co} ! Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι στο μοντέλο του EC2 η πτώση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι σχετικά μικρή και φτάνει μέχρι το 85% της f_c^* . Βεβαίως πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διατομή που χρησιμοποιείται και στα υπόλοιπα προσομοιώματα, μπορεί να θεωρηθεί ως μια επαρκώς οπλισμένη διατομή τόσο όσον αφορά τον αριθμό των τμήσεων σε τομή κατά x και y , όσο και την καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων.

1.2 Ευρωκώδικας 8 - μέρος 3 (EC8 - 3)

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Ο Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 3 για το απερίσφικτο σκυρόδεμα προτείνει το ίδιο παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων με τον Ευρωκώδικα 2 όπως αναφέρεται και πιο πάνω (Σχήμα 1.3).

Περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για το περισφιγμένο σκυρόδεμα ο EC8 - 3 προτείνει την ίδια καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων (**Σχήμα 1.3**) με το απερίσφικτο, και κατ' αντιστοιχία με τον EC2 κάνοντας αντικατάσταση των: ε_{co} με ε_{co}^* , ε_{cu} με ε_{cu}^* και f_c με f_c^* .

Η διαφοροποίηση του EC8 - 3 από τον EC2 έγκειται στις τροποποιημένες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων που είναι αποτέλεσμα της περίσφιγξης.

Αναλυτικά:

$$f_c^* = f_c(1 + K) \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co}(1 + 5K) \quad (1.10)$$

όπου:

$$K = 3.7 \left(\frac{P}{f_c} \right)^{0.86} \quad (1.11)$$

Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση ε_{cu}^* δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 + 0.5 \frac{P}{f_c^*} \quad (1.12)$$

όπου:

$$\frac{P}{f_c^*} = 0.5 \alpha \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c^*} \quad (1.13)$$

με: α, ρ_w : όπως ακριβώς έχουν οριστεί και στον EC2, Σχέσεις (1.5) και (1.6)

Υποσημείωση: Οι αποστάσεις και τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης (δηλ. b_o, h_o, b_i και s), υπολογίζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στον EC2 (**Σχήμα 1.4**).

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα στους υπολογισμούς με πριν. Είναι:

$$\frac{P}{f_c} = 0.08011 \text{ και άρα υπολογίζονται:}$$

$$K = 3.7 \left(\frac{P}{f_c} \right)^{0.86} = 3.7 \times (0.08011)^{0.86} = 0.422$$

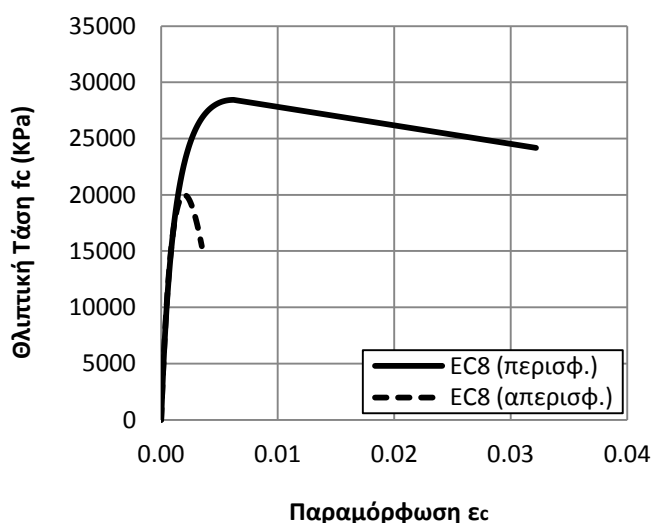
$$f_c^* = f_c(1 + K) = 20 \times (1 + 0.422) = 28.441 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co}(1 + 5K) = 0.002 \times (1 + 5 \times 0.422) = 6.22\%$$

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 + 0.5 \frac{p}{f_c^*} = 0.004 + 0.5 \times \frac{1.6022}{28.441} = 32.17\%$$

με: $f_c = 20\text{MPa}$

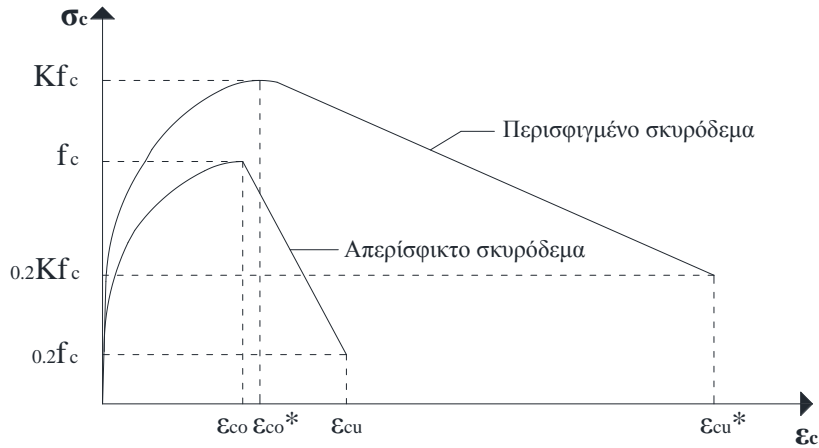
Εφαρμόζοντας τη σχέση (1.1) καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του περισφιγμένου και απερίσφικτου σκυροδέματος:



Σχήμα 1.7 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων EC8 για τη Διατομή 1.1.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο του EC8 μέρος - 3 είναι αρκετά ευνοϊκότερα από αυτά του EC2, γεγονός που οφείλεται στις διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό των τροποποιημένων τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων [(1.9) - (1.12) έναντι των (1.2) - (1.5)]. Εδώ η μέγιστη θλιπτική τάση του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι 42% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση του απερίσφικτου ενώ η οριακή παραμόρφωση έγινε 9 φορές μεγαλύτερη! Αξίζει να σημειωθεί, ότι το απερίσφικτο σκυρόδεμα του EC8, έχει ακριβώς την ίδια μορφή και τις ίδιες τιμές με του EC2, ενώ και εδώ η μείωση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος στο φθίνοντα κλάδο, είναι σχετικά μικρή, με την οριακή παραμόρφωση ε_{cu}^* να αντιστοιχεί στο 85% της f_c^* .

1.3 Kent & Park και Scott et al (1982)



Σχήμα 1.8 Καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Kent & Park και Scott et al (1982).

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Το μοντέλο του Kent & Park για το απερίσφικτο σκυρόδεμα (1971), στηρίχθηκε στην παραβολή δευτέρου βαθμού που πρότεινε ο Hognestad (1951), αντικαθιστώντας το $0.85f_c$ με f_c και το ϵ_{co} με 2‰ (**Σχήμα 1.8**). Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για το φθίνοντα ($\epsilon_c \leq 0.002$) και αύξοντα κλάδο ($\epsilon_c > 0.002$), δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\text{για } \epsilon_c \leq 0.002 \quad \sigma = f_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1.14)$$

$$\text{για } \epsilon_c > 0.002 \quad \sigma = f_c [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_{co})] \quad (1.15)$$

$$\text{όπου:} \quad Z = \frac{0.5}{\epsilon_{50u} - \epsilon_{co}} \quad (1.16)$$

με: ε_{50u} : Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί το 50% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.29 f_c}{145 f_c - 1000} \quad (f_c \text{ σε } MPa)$$

Περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για το περισφιγμένο σκυρόδεμα το μοντέλο του Kent & Park (1971), στηρίχθηκε στις ίδιες εξισώσεις με το απερίσφικτο σκυρόδεμα όσον αφορά τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων. Στην παρούσα εργασία, θα γίνει ανάλυση της τροποποιημένης μορφής του μοντέλου Kent & Park από τον Scott et al (1982). Η σημαντική διαφοροποίηση του μοντέλου Scott et al σε σύγκριση με αυτό του Kent & Park, είναι ότι το τελευταίο, δεν στηρίχθηκε σε μικρής κλίμακας πειραματικά μοντέλα ενώ παράλληλα, τα πειράματα διεξήχθησαν σε υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης προσομοιάζοντας σωστότερα τη σεισμική καταπόνηση. Σαν αποτέλεσμα, ενώ οι σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων του μοντέλου Kent & Park για το απερίσφικτο σκυρόδεμα παραμένουν ίδιες, οι σχέσεις για τις τροποποιημένες τάσεις και παραμορφώσεις για το περισφιγμένο σκυρόδεμα, είναι διαφορετικές, σημαντικά και αναμενόμενα ευνοϊκότερες (**Σχήμα 1.8**). Σύμφωνα λοιπόν, με το μοντέλο του Scott et al, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για το φθίνοντα και αύξοντα κλάδο, δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

Για χαμηλές ταχύτητες παραμόρφωσης:

$$\text{Για } \varepsilon_c \leq 0.002K: \quad \sigma = Kf_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.02K} \right)^2 \right] \quad (1.17)$$

$$\text{Για } \varepsilon_c > 0.002K: \quad \sigma = Kf_c [1 - Z_m(\varepsilon_c - 0.002K)] \quad (1.18)$$

αλλά όχι μικρότερη από $0.2Kf_c$.

$$\text{όπου:} \quad K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c} \quad (1.19)$$

με: f_{yh} : Η τάση διαρροής του χάλυβα από τον οποίο αποτελούνται οι συνδετήρες.

f_c : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.

ρ_s : Ο λόγος του όγκου των τετραγωνικών συνδετήρων, προς τον όγκο του πυρήνα που ορίζεται από την εξώτερη γραμμή του εξώτερου συνδετήρα.

όπου επίσης:
$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f_c}{145f_c-1000} + \frac{3}{4}\rho_s\sqrt{\frac{h_o}{s}} - 0.002K} \quad (1.20)$$

με: f_c : Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (f_c σε MPa).

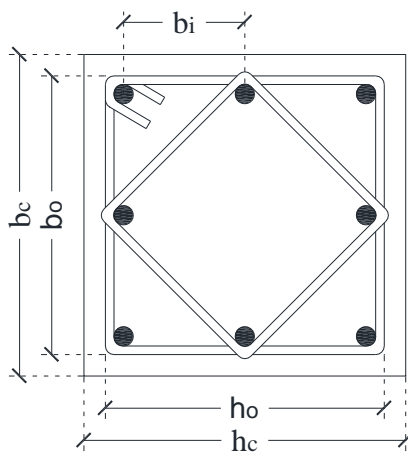
h_o : Πλάτος πυρήνα διατομής μετρούμενο από την εξώτερη γραμμή του εξώτερου συνδετήρα (Σχήμα 1.9).

s : Καθ' ύψος απόσταση συνδετήρων μετρούμενη από κέντρο σε κέντρο συνδετήρα (Σχήμα 1.9).

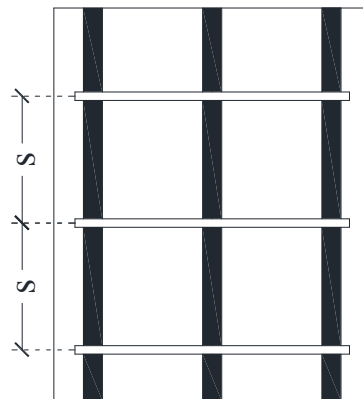
Για υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης οι Σχέσεις (1.19) και (1.20), πολλαπλασιάζονται με 1.25. Είναι δηλαδή:

$$K = 1.25 \left(1 + \frac{\rho_s f_y h}{f_c} \right) \quad (1.21)$$

και:
$$Z_m = \frac{0.625}{\frac{3+0.29f_c}{145f_c-1000} + \frac{3}{4}\rho_s\sqrt{\frac{h_o}{s}} - 0.002K} \quad (1.22)$$



α) Διατομή υποστυλώματος



β) Κατακόρυφη τομή υποστυλώματος

Σχήμα 1.9 Γεωμετρικές αποστάσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης.

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα στους υπολογισμούς με πριν. Είναι:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c} = 1 + \frac{0.01321 \times 500}{20} = 1.33$$

$$\text{με: } \rho_s = \frac{A_{sw} (4b_o + 4b_o/\sqrt{2})}{sb_o^2} = \frac{0.503 \times (4 \times 26 + 4 \times 26/\sqrt{2})}{10 \times 26^2} = 0.01321$$

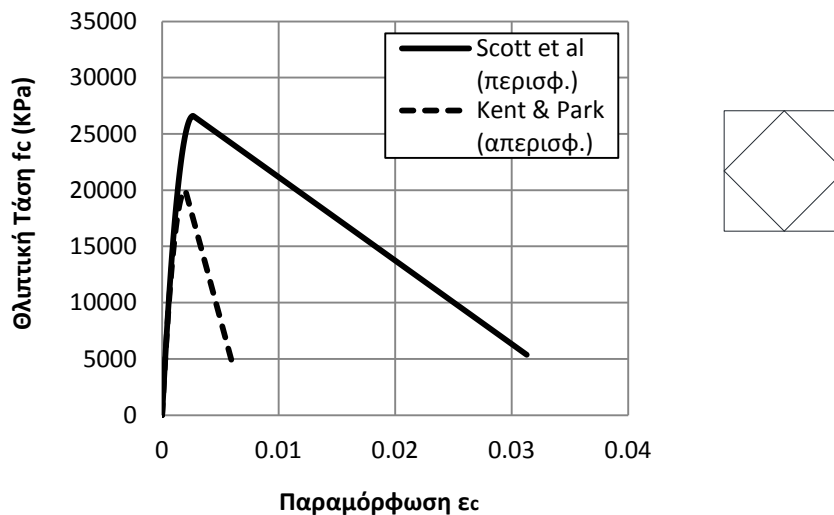
$$f_c^* = Kf_c = 1.33 \times 20 = 26.600 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{co}^* = 0.002K = 0.002 \times 1.33 = 2.66\text{‰}$$

Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση ε_{cu}^* είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε θλιπτική τάση σκυροδέματος ίση με $0.2Kf_c = 5.320 \text{ MPa}$. Επομένως αντικαθιστώντας αυτή την τιμή στη Σχέση (1.18) έχουμε:

$$\varepsilon_{cu}^* = 31.30\text{‰}$$

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (1.14) - (1.15) για το απείρισφικτο και (1.17) - (1.18) για το περισφιγμένο σκυρόδεμα αντίστοιχα, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων:

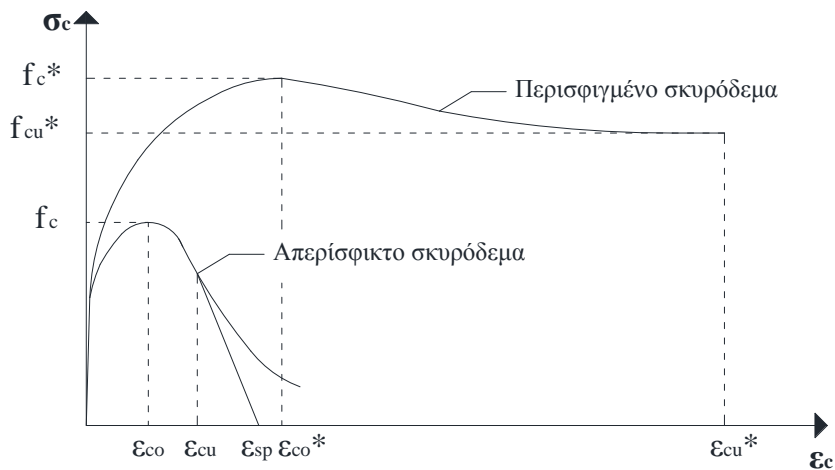


Σχήμα 1.10 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Kent & Park και Scott et al για τη Διατομή 1.1

Σύμφωνα με το προσομοίωμα του Scott et al, η οριακή παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος ε_{cu}^* είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του απείρισφικτου, ενώ παρατηρείται μια αύξηση της τάξης του 33% στην μέγιστη θλιπτική τάση λόγω της περισφιγξης. Βεβαίως θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι στο μοντέλο του Kent & Park, η παραμόρφωση αστοχίας του απείρισφικτου σκυροδέματος

($\approx 6\%$ στο συγκεκριμένο παράδειγμα) έχει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από αυτήν του EC2-8. Ωστόσο η παράμετρος εκείνη που διαφοροποιεί αισθητά το μοντέλο του Kent & Park και Scott et al με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα, είναι η πολύ μεγάλη μείωση της θλιπτικής αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος μέχρι την αστοχία. Συγκεκριμένα η οριακή παραμόρφωση $\varepsilon_{cu}^* = 31.30\%$ αντιστοιχεί σε τάση $f_c = 5.320\text{MPa}$ δηλαδή μόλις το 20% της f_c^* ! Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σε διατομές που καταπονούνται με μεγάλες αξονικές δυνάμεις, η ροπή στην οριακή κατάσταση αστοχίας να είναι αισθητά μειωμένη από τη μέγιστη τιμή της, γεγονός που μειώνει πολύ την πλαστιμότητά της, όταν απαιτούμε επαρκή καμπτική αντοχή και στη αστοχία.

1.4 J.B. Mander και M.J.N. Paulay & Priestley (1988)



Σχήμα 1.11 Καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τους Kent & Park και Scott et al (1982).

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Το μοντέλο του Mander (1988) για το απερίσφικτο σκυρόδεμα (**Σχήμα 1.11**), βασίζεται σε μια σχέση του Popovics (1973) και προτείνει τις παρακάτω σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων:

Για χαμηλές ταχύτητες παραμόρφωσης:

$$\text{Για } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} : \quad \sigma = \frac{f_{crx}}{r - 1 + x^r} \quad (1.23)$$

$$\text{Για } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{sp} : \quad \sigma = f_{cu} + (f_{ep} - f_{cu}) \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_{cu})}{(\varepsilon_{sp} - \varepsilon_{cu})} \quad (1.24)$$

$$\text{όπου:} \quad x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}, \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

$$\text{με:} \quad E_{sec} : \text{ Τέμνων μέτρο ελαστικότητας } \left(E_{sec} = \frac{f_{co}}{e_{co}} \right).$$

E_c : Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος ($E_c = 5000\sqrt{f_c}$).

f_c : Θλιπτική τάση σκυροδέματος (f_c σε Mpa).

ε_{co} : παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση σκυροδέματος
(Συνήθης τιμή $\varepsilon_{co} = 0.002$)

ε_{cu} : παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο τελευταίο σημείο της παραβολής της
του φθίνοντα κλάδου της καμπύλης σ-ε.
(Συνήθης τιμή $\varepsilon_{cu} = 2\varepsilon_{co} = 0.004$)

ε_{sp} : παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε μηδενική θλιπτική τάση
σκυροδέματος.
(Συνήθης τιμή $\varepsilon_{sp} = 0.006$)

Υποσημείωση: Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση διατομών και την εξαγωγή αποτελεσμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, είναι το XTRACT. Στο πρόγραμμα αυτό, μπορεί να γίνει εισαγωγή οποιουδήποτε διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων επιθυμεί ο χρήστης (υπό μορφή σημείων). Το XTRACT μπορεί να υπολογίσει αυτόματα τις τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων σε πρότυπες διατομές, αλλά μόνο σύμφωνα με το μοντέλο του Mander & Priestley. Οι παραπάνω χαρακτηριζόμενες και ως συνήθεις τιμές εντός παρενθέσεως, είναι εύλογες τιμές για το μοντέλο του Mander τις οποίες προτείνει το XTRACT.

Περισφιγμένο Σκυρόδεμα

Οι αντίστοιχες σχέσεις τάσεων -παραμορφώσεων του μοντέλου του Mander, για το περισφιγμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 1.11) είναι οι ακόλουθες:

Για $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}^*$:

$$\sigma = \frac{f_c^* r x}{r - 1 + x^r} \quad (1.25)$$

όπου:

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}^*}, \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (1.26)$$

με: E_c : Όπως ορίστηκε και στο απερίσφικτο σκυρόδεμα.

E_{sec} : τέμνων μέτρο ελαστικότητας, $E_{sec} = \frac{f_{co}^*}{\varepsilon_{co}^*}$

Οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος, ως αποτέλεσμα της περισφιγξης, είναι:

$$f_c^* = f_c(1 + K) \quad (1.27)$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co}(1 + 5K) \quad (1.28)$$

όπου:

$$K = 2.254 \left(\sqrt{1 + 7.94 \frac{p}{f_c}} - 1 \right) - \frac{2p}{f_c}$$

με: p την παράπλευρη τάση που ασκούν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα.

Ο Priestley έκανε μια τροποποίηση στο μοντέλο του Mander, η οποία αφορά την εύρεση της οριακής θλιπτικής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις -όπως και στο πρόγραμμα XTRACT- χρησιμοποιείται το μοντέλο των Mander-Priestley, και όχι μεμονωμένα το μοντέλο του Mander.

Mander:

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + 2\varepsilon_{su, w} \frac{p}{f_c^*} \quad (1.29A)$$

Priestley:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 + 1.4 \rho_s \varepsilon_{su, w} \frac{f_{yh}}{f_c^*} \quad (1.29B)$$

$\varepsilon_{cu, w}$: Η παραμόρφωση στη οποία αστοχεί ο χάλυβας των συνδετήρων.

(Συνήθεις -συντηρητικές- τιμές: $\varepsilon_{cu, w} = 0.10$ κατά XTRACT

$\varepsilon_{cu, w} = 0.15$ κατά Priestley)

f_{yh} : Η τάση διαρροής του χάλυβα από τον οποίο αποτελούνται οι συνδετήρες.

Υποσημείωση: Στην παρούσα εργασία, κάθε εφαρμογή του μοντέλου του Mander θα συνοδεύεται με υπολογισμό της οριακής θλιπτικής παραμόρφωσης ε_{cu}^* κατά Priestley, Σχέση (1.29B).

Υπολογισμός παράπλευρης πίεσης p :

$$p = 0.5\rho_s f_y n k_e \quad (1.30)$$

όπου: $\rho_s = 2 \min(\rho_x, \rho_y) = 2 \min(\sum A_{swx}/b_o; \sum A_{swy}/h_o)/s$

με: $\sum A_{sw}$: Το εμβαδόν των συνδετήρων που κόβει η τομή κατά x ή κατά y αντίστοιχα.

b_o : Η μικρή διάσταση του πυρήνα της διατομής όπως αυτή ορίζεται από τη γραμμή της περιμέτρου, στο κέντρο της διατομής του εξώτερου συνδετήρα.

h_o : Η μεγάλη διάσταση της διατομής κατ' αντιστοιχία με την b_o .

s : Η καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων από κέντρο σε κέντρο διαμέτρου συνδετήρα.

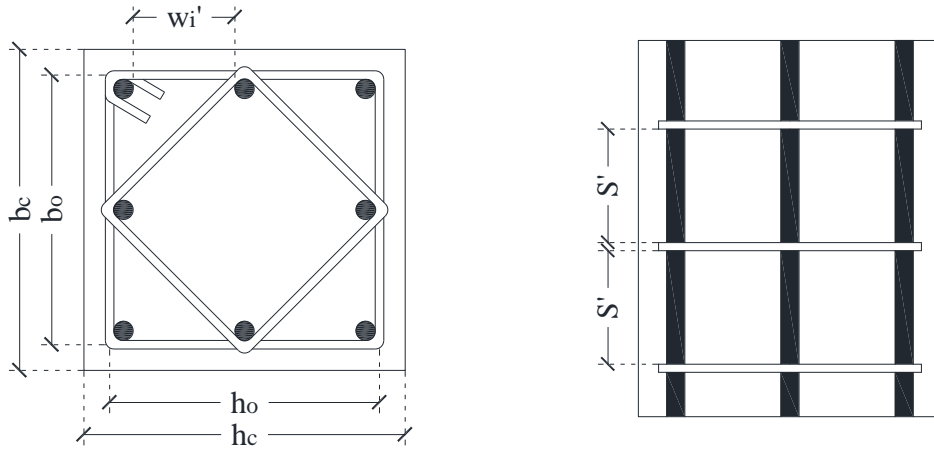
Ο συντελεστής k_e εκφράζει την απόδοση της περίσφιγξης βάσει του εγκάρσιου και διαμήκους οπλισμού και δίνεται από τη σχέση:

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s'}{2h_o}\right)}{(1 - \rho_{cc})}$$

με: w_i' : Η καθαρή απόσταση μεταξύ των διαμήκων οπλισμών.

s' : Η καθαρή απόσταση καθ' ύψος μεταξύ των συνδετήρων.

ρ_{cc} : Ο λόγος του συνολικού εμβαδού των διαμήκων ράβδων, προς το εμβαδόν του πυρήνα της διατομής όπως ορίστηκε από τα b_o , h_o .



α) Διατομή υποστρώματος

β) Κατακόρυφη τομή υποστρώματος

Σχήμα 1.12 Γεωμετρικές αποστάσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης.

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα στους υπολογισμούς με πριν. Είναι:

$$\rho_y = \rho_x = \frac{A_{sx}}{b_o s} = \frac{0.503 \times (2 + 2/\sqrt{2})}{25.2 \times 10} = 6.815 \times 10^{-3}$$

με: $s = 10\text{cm}$, $b_o = 25.2\text{cm}$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b_o h_o}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s'}{2h_o}\right)}{(1 - \rho_{cc})} = \frac{\left(1 - \frac{8 \times 9.5^2}{6 \times 25.2^2}\right) \left(1 - \frac{9.2}{2 \times 25.2}\right)^2}{1 - \frac{8 \times (\pi \times 1.8^2)/4}{25.2^2}} = 0.559$$

με: $w_i' = 0.095\text{m}$, $s' = 0.092\text{m}$

$$p = 0.5 \rho_s f_{yh} k_e = 0.5 \times 1.363 \times 10^{-2} \times 500 \times 0.559 = 1.902\text{Mpa}$$

με: $\rho_s = 2 \times 6.815 \times 10^{-3} = 1.363 \times 10^{-2}$, $f_{yh} = 500\text{Mpa}$

Υπολογισμός τροποποιημένων τάσεων και παραμορφώσεων λόγω περίσφιγξης:

$$f_c^* = f_c (1 + K) = 20 \times (1 + 0.542) = 30.838\text{Mpa}$$

$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} (1 + 5K) = 0.002 \times (1 + 5 \times 0.542) = 7.42\text{‰}$, με:

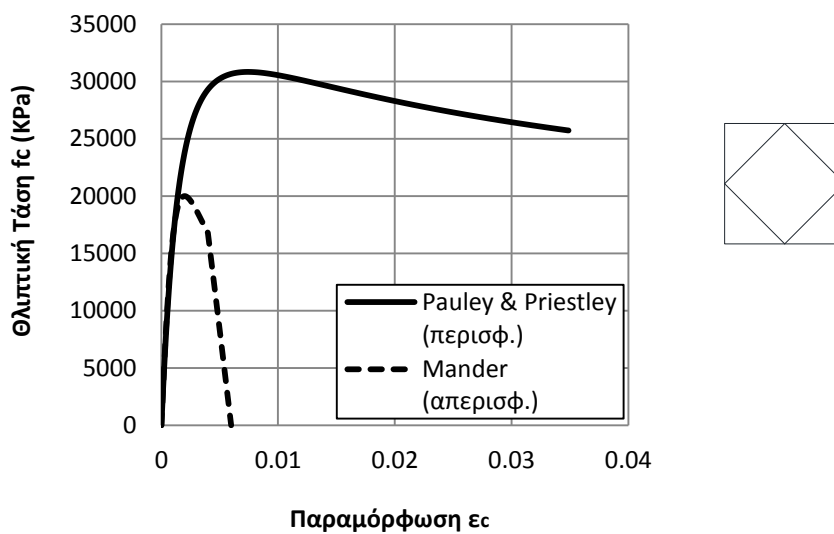
$$K = 2.254 \left(\sqrt{1 + 7.94 \frac{p}{f_c}} - 1 \right) - \frac{2p}{f_c} = 2.254 \left(\sqrt{1 + 7.94 \frac{1.902}{20}} - 1 \right) - 2 \times \frac{1.902}{20} = 0.542$$

Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά το μοντέλο του Priestley:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.004 + 1.4 \rho_s \varepsilon_{su, w} \frac{f_{yh}}{f_c^*} = 0,004 + 1.4 \times 1.363 \times 10^{-2} \times 0.10 \times \frac{500}{30.838} = 34.87\%$$

με: $\varepsilon_{cu, w} = 0.10$

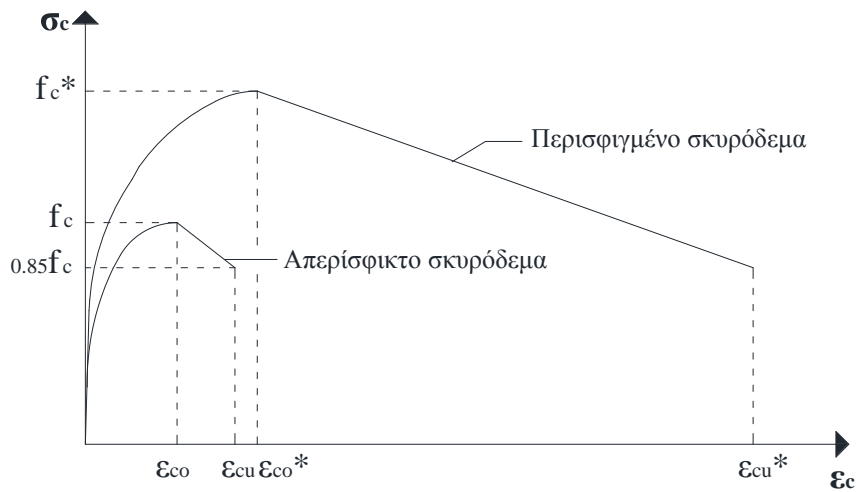
Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (1.23) - (1.24) για το απερίσφικτο και (1.25) για το περισφιγμένο σκυρόδεμα αντίστοιχα, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων:



Σχήμα 1.13 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Mander και Paulay & Priestley για τη Διατομή 1.1.

Το μοντέλο των Mander και Paulay & Priestley παρουσιάζει τα λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα μεταξύ των εξεταζομένων προσομοιωμάτων τόσο όσον αφορά τις τάσεις όσο και τις παραμορφώσεις. Η οριακή παραμόρφωση στο συγκεκριμένο παράδειγμα φτάνει την τιμή $\varepsilon_{cu} = 34.87\%$ (η μεγαλύτερη όλων) ενώ η μέγιστη τάση του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη κατά 54% από την αντίστοιχη του απερίσφικτου. Ο φθίνων κλάδος του διαγράμματος, παρουσιάζει σχετικά ομαλή-μικρή κλίση, με την τάση στην αστοχία να φτάνει περίπου το 85% της μέγιστης τιμής της.

1.4 Θ. Π. Τάσιος



Σχήμα 1.14 Καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου και περισφιγμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τον Θ. Π. Τάσιο.

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Το μοντέλο του Θ. Π. Τάσιου, για το απερίσφικτο σκυρόδεμα, προτείνει παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για τον αύξοντα κλάδο και ευθεία για το φθίνοντα κλάδο μέχρι την αστοχία του σκυροδέματος (**Σχήμα 1.14**) Η τιμή της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος, είναι $\epsilon_{co} = 2\%$, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την αστοχία είναι $\epsilon_{cu} = 3.5\%$. Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Για } \epsilon_c \leq \epsilon_{co} \quad \sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1.31)$$

$$\text{Για } \epsilon_{co} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad \sigma = 0.15 f_c \frac{\epsilon_c - \epsilon_{co}}{\epsilon_{co} - \epsilon_{cu}} + f_c \quad (1.32)$$

Η παραμόρφωση ϵ_{cu} αντιστοιχεί σε τάση ίση με το 85% της μέγιστης θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος.

Περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στον αύξοντα κλάδο της καμπύλης του περισφιγμένου σκυροδέματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (1.31) με

αντικατάσταση των: ε_{co} με ε_{co}^* , και f_c με f_c^* . Για το φθίνοντα κλάδο της καμπύλης η αντίστοιχη σχέση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Για } \varepsilon_{co}^* < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}^* \quad \sigma = \frac{(0.85f_c - f_c^*)(\varepsilon_c - \varepsilon_{co}^*)}{\varepsilon_{cu}^* - \varepsilon_{co}^*} + f_c^* \quad (1.33)$$

Η παραμόρφωση ε_{cu}^* αντιστοιχεί σε τάση ίση με το 85% της μέγιστης θλιπτικής αντοχής του **απερίσφικτου** σκυροδέματος.

Το μοντέλο του Θ. Π. Τάσιου είναι βασισμένο σε πειραματικά αποτελέσματα τα οποία μετά επαληθεύονται και συγκρίνονται με τα θεωρητικώς προβλεπόμενα. Οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του σκυροδέματος λόγω της τριαξονικής έντασης του δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\text{Για } \omega_w < 0.1 \quad f_c^* = f_c(1 + 2.5a\omega_w) \quad (1.34A)$$

$$\text{Για } \omega_w \geq 0.1 \quad f_c^* = f_c(1.125 + 1.25a\omega_w) \quad (1.34B)$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} \left(f_c^* / f_c \right)^2 \quad (1.35)$$

Και η οριακή θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος που αντιστοιχεί στο 85% της θλιπτικής αντοχής του απερίσφικτου σκυροδέματος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + 0.1a\omega_w \quad (1.36A)$$

Η σχέση (1.35) ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι $f_c \leq 50\text{Mpa}$

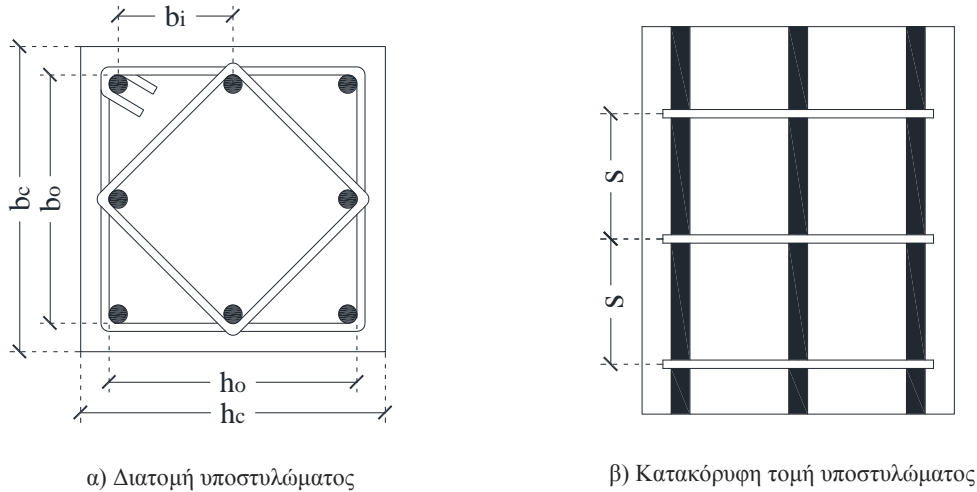
όπου $a = a_s a_n$

$$\text{με: } a_n = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n b_i^2}{6b_o h_o} \quad \text{και} \quad a_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s}{2h_o} \right)$$

Παρότι οι σχέσεις για τον υπολογισμό των a_n και a_s είναι ίδιες με τις (1.7) και (1.8) των EC2 και EC8 οι παράγοντες που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς δεν είναι όλοι ίδιοι. Συγκεκριμένα:

b_o : Η μικρή διάσταση της διατομής του πυρήνα, μετρούμενη από την εσώτερη πλευρά του εξώτερου συνδετήρα.

h_o : Η μεγάλη διάσταση της διατομής κατ' αντιστοιχία με τη b_o .



Σχήμα 1.15 Γεωμετρικές αποστάσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης.

Υποσημείωση: Οι σχέσεις (1.34A), (1.34B), (1.35) και (1.36A) έχουν προκύψει από πειραματικές προβλέψεις, και επιβεβαίωσαν τις παρακάτω θεωρητικώς προβλεπόμενες σχέσεις:

$$f_c^* = f_c \left(1 + k_f \frac{P}{f_c} \right) \text{ με } k_f = 2 \text{ έως } 5 \text{ και } \frac{P}{f_c} = 0.5\omega_w \quad (1.34\Gamma)$$

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + \beta \frac{P}{f_c} = \varepsilon_{cu} + 0.5\beta\omega_w \quad (1.36B)$$

s : Η καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων από κέντρο σε κέντρο διαμέτρου συνδετήρα.

b_i : Η απόσταση από κέντρο σε κέντρο των διαμήκων οπλισμών.

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων που περισφίγγουν τη διατομή}}{\text{όγκος πυρήνα διατομής}} * \frac{f_y}{f_c}$$

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα στους υπολογισμούς με πριν. Είναι:

$$\omega_w = \frac{A_{sw} \left(4b_{\text{συνδ}} + 4b_{\text{συνδ}}/\sqrt{2} \right) f_{yw}}{b_o^2 s f_c} = \frac{0.503 \times \left(4 \times 25.2 + 4 \times 25.2/\sqrt{2} \right) \times \frac{500}{20}}{24.4^2 \times 10} = 0.363$$

$$a_n = 1 - \frac{8}{3 \times 8} = 0.667$$

$$a_s = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) = \left(1 - \frac{10}{2 \times 24.4}\right)^2 = 0.632$$

Υπολογισμός τροποποιημένων τάσεων και παραμορφώσεων λόγω περισφιγξης:

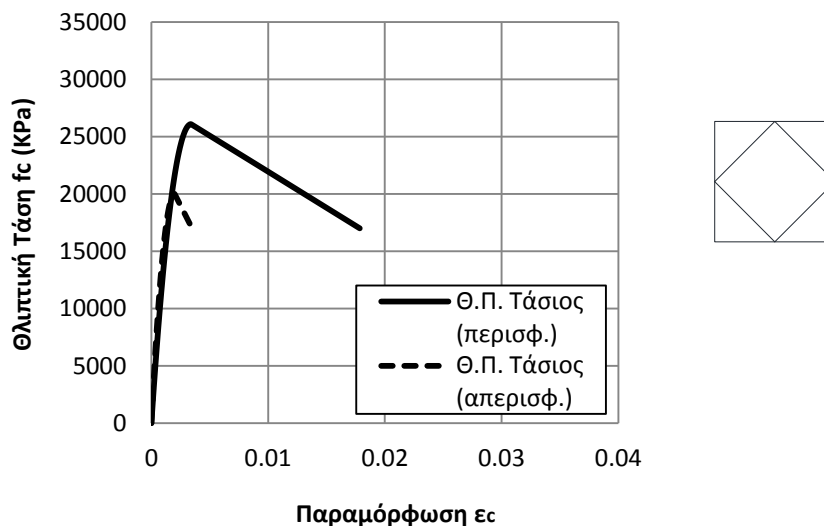
$$f_c^* = f_c(1.125 + 1.25a\omega_w) = 20(1.125 + 1.25 \times 0.632 \times 0.667 \times 0.363) = 26.329 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{co}^* = \varepsilon_{co} \left(f_c^* / f_c\right)^2 = 0.002 (26.329/20)^2 = 3.47\%$$

Η οριακή θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι:

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + 0.1a\omega_w = 0.0035 + .01 \times 0.421 \times 0.363 = 18.82\%$$

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (1.31) - (1.32) για το απερίσφικτο και (1.31) - (1.33) για το περισφιγμένο σκυρόδεμα αντίστοιχα, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων:



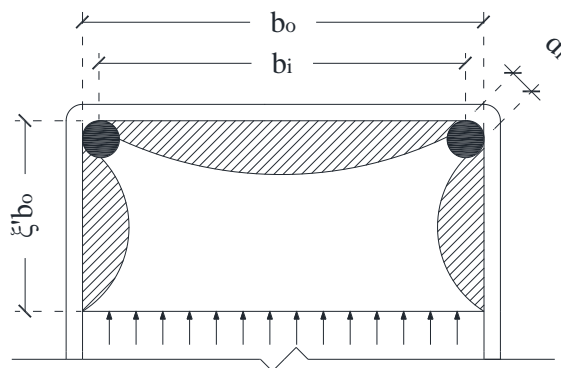
Σχήμα 1.16 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Θ.Π. Τάσιου για τη Διατομή 1.1.

Το προσομοίωμα του Θ.Π. Τάσιου παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με αυτό του EC2 όντας και αυτό αρκετά συντηρητικό. Οι παραμορφώσεις ε_{co}^* και ε_{cu}^* στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουν σχεδόν ίδιες τιμές με αυτές του EC2. Ωστόσο, και ενώ η μέγιστη θλιπτική τάση f_c^* είναι και αυτή με τη σειρά της πανομοιότυπη, η θλιπτική τάση αστοχίας που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ε_{cu}^* έχει την τιμή $0.85f_c$ (17 MPa εδώ) και όχι $0.85f_c^*$. Η παραπάνω διαφορά δεν είναι διόλου

ευκαταφρόνητη και η επιρροή της στα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων, θα φανεί μετέπειτα στην παραμετρική διερεύνηση (μέρος Β).

Μερική θλίψη διατομής

Σε όλες τις παραπάνω θεωρητικές και πειραματικές προσεγγίσεις όσον αφορά την αποδοτικότητα της περίσφιγξης, έγινε η υπόθεση ότι ολόκληρη η διατομή βρίσκεται σε θλίψη. Τόσο όμως στην πραγματικότητα, όσο και σε επίπεδο θεωρητικών υπολογισμών, ένα καμπτόμενο υποστύλωμα το οποίο φέρει αξονικές θλιπτικές δυνάμεις, δεν υπόκειται ολόκληρο σε θλίψη. Ένα ποσοστό της διατομής του εφελκύεται, και συνεπώς η θλιβόμενη περιοχή της διατομής δεν περικλείεται ολόκληρη από κλειστούς συνδετήρες όπως αρχικώς είχαμε υποθέσει. Παρ' όλα αυτά, το ρηγματωθέν εφελκόμενο σκυρόδεμα, αντιδρά και παρεμποδίζει την διόγκωση της θλιβόμενης ζώνης στο οριζόντιο επίπεδο της ουδέτερης γραμμής, υπό μορφή ομοιόμορφης πίεσης και όχι συγκεντρωμένων δυνάμεων (όπως συμβαίνει στους ορθογωνικούς συνδετήρες (**Σχήμα 1.17**)).



Σχήμα 1.17 Αποφλοιωμένη διατομή που υπόκειται σε μερική θλίψη.

Τετραγωνική διατομή

Σύμφωνα με το μοντέλο του Τάσιου στην αποφλοιωμένη πλέον τετραγωνική διατομή, οι σχέσεις για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης τροποποιούνται ως εξής:

$$a_n' = 1 - \frac{1}{6\xi'} \left[\left(1 - \frac{d_l}{b_o} \right)^2 + 2 \left(\xi' - \frac{1}{2} \frac{d_l}{b_o} \right)^2 \right], \quad \text{για } 0.25 \leq \xi' \leq 0.75 \quad (1.37)$$

$$a_s' = \frac{1}{\xi'} \left(\xi' - 0.25 \frac{s}{b_o} \right) \left(1 - 0.50 \frac{s}{b_o} \right) \quad (1.38)$$

με: b_o : Η διάσταση της πλευράς του πυρήνα διατομής, μετρούμενη από την εσωτερή πλευρά του εξώτερου συνδετήρα.

s : Η καθαρή απόσταση καθ' ύψος μεταξύ των συνδετήρων.

$$\xi' = x'/d'$$

Ο παράγοντας ξ' για την οριακή αστοχία της αποφλοιωμένης διατομής μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση του Μ. Ν. Φαρδή:

$$\xi_{cu} = \frac{(1 - \delta_1)(\nu + \omega_1 - \omega_2) + (1 + \delta_1)\omega_\nu}{(1 - \delta_1) \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu}^*}{3\varepsilon_{cu}^*} \right) + 2\omega_\nu} \quad (1.39)$$

όπου:
$$\delta_1 = \frac{d_1'}{d'}, \quad \omega_1 = \frac{A_s}{b_o d'} \frac{f_y}{f_c}, \quad \omega_2 = \frac{A_s'}{b_o d'} \frac{f_y}{f_c}, \quad \omega_\nu = \frac{A_{sv}}{b_o d'} \frac{f_y}{f_c}$$

με: d' : Το στατικό ύψος της αποφλοιωμένης διατομής.P

$$d_1' = b_o - d'$$

$$\nu = N/b_o d' f_c^*$$

ω_1 : Το μηχανικό ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού.

ω_2 : Το μηχανικό ποσοστό του θλιβόμενου διαμήκους οπλισμού.

ω_ν : Το μηχανικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού κοντά στην ουδέτερη γραμμή.

Οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{cu}^* = f_c + 3\sigma_c \quad (1.40)$$

$$\varepsilon_{cu}^* = \varepsilon_{cu} + 0.2 \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (1.41)$$

όπου:
$$\sigma_c = a_s' a_n' \frac{2A_{sw}}{b_o s} f_{yw} \quad \text{ή} \quad \sigma_c = a_s' a_n' \frac{A_{sw} f_{yw}}{(x' - c)s}$$

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα στους υπολογισμούς με πριν.

Μετά από επαναληπτική διαδικασία υπολογίστηκε το ξ_{cu} ως εξής:

Πορεία Υπολογισμού:

Αρχικά υποθέτουμε μια εύλογη τιμή για το f_{cu}^* και ε_{cu}^* , έχοντας υπολογίσει τους παράγοντες δ_1 και dl που είναι σταθεροί ανεξαρτήτως επανάληψης. Έπειτα:

Υπολογισμός $\nu, \omega_1, \omega_2 \rightarrow \xi_{cu}' \rightarrow a_s', a_n' \rightarrow f_c^*, \varepsilon_{co}^* \rightarrow \varepsilon_{cu}^* \rightarrow \nu, \omega_1, \omega_2 \rightarrow \dots$

Στο παραπάνω παράδειγμα μετά από την επαναληπτική διαδικασία υπολογίσαμε ότι:

$$\xi_{cu} = 0.355$$

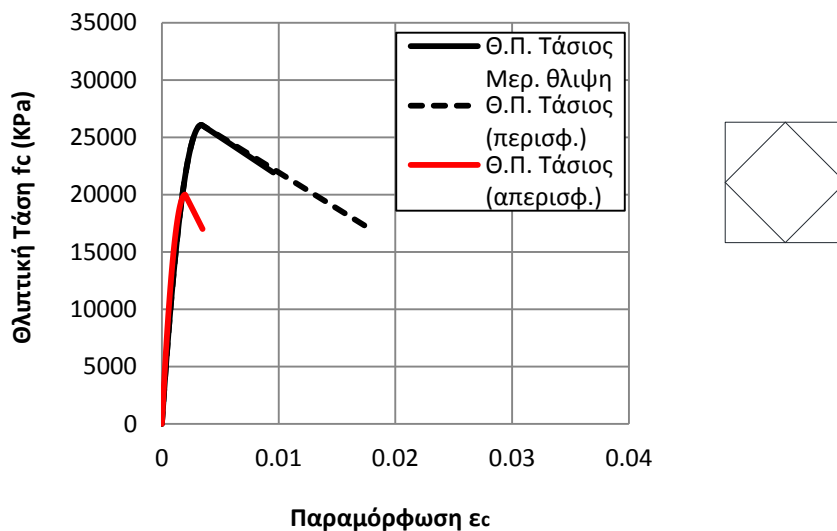
με αρχικά χαρακτηριστικά διατομής:

$$s = 9.2cm, b_o = 24.4cm, d' = 23.5cm, dl = (\pi dl/4) = 1.4cm$$

και τελικώς, οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας είναι:

$$f_{cu}^* = 21.936Mpa \text{ και } \varepsilon_{cu}^* = 9.95\text{‰}$$

Έτσι καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων:



Σχήμα 1.17 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Θ.Π. Τάσιου για τη Διατομή 1.1 όταν υπόκειται σε μερική και πλήρη θλίψη.

Όταν η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη αλλά μόνον ένα μέρος της, αλλάζουν τόσο η αποδοτικότητα της περίσφιξης, όσο και οι τύποι από του οποίους υπολογίζονται οι τροποποιημένες τιμές της τάσης f_{cu}^* και της παραμόρφωσης ε_{cu}^* . Από τα αποτελέσματα προκύπτει μια πολύ σημαντική μείωση κοντά στο 50%

(47.13%) της θλιπτικής οριακής παραμόρφωσης ε_{cu}^* . Αυτό φυσικά έχει μεγάλη επίδραση και στη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων της διατομής η οποία με τη σειρά της θα υποστεί σημαντική μείωση. Όσον αφορά την τιμή της τάσης f_{cu}^* όταν η διατομή υπόκειται σε μερική θλίψη, είναι αναμενόμενα μικρότερη από την αντίστοιχη τάση όταν η διατομή θλίβεται ολόκληρη, κάτι που εξηγείται από την μικρότερη παραμόρφωση ε_{cu}^* στην πρώτη περίπτωση που δεν επιτρέπει στο φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος (Σχήμα 1.17) να "φτάσει" σε πολύ χαμηλές θλιπτικές τάσεις αστοχίας.

Ορθογωνική διατομή

Σύμφωνα με το μοντέλο του Τάσιου, όταν ο λόγος των πλευρών της εξεταζόμενης διατομής είναι μεγαλύτερος της μονάδας, τότε ο συντελεστής α_n' θα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (μέτρια βάθη ουδέτερης ζώνης):

$$\alpha_n' = 1 - \frac{1}{6\xi'} \left[\frac{1}{\lambda} \left(1 - \lambda \frac{d_l}{h_o} \right)^2 + 2\lambda \left(\xi' - \frac{1}{2} \frac{d_l}{h_o} \right)^2 \right], \text{ με } \lambda = \frac{h_o}{b_o} \geq 1 \quad (1.42)$$

Παράδειγμα Υπολογισμού

Έστω η διατομή (Σχήμα 1.18.α) με υλικά $f_c = 20MPa$, $f_y = 500MPa$ και επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.2 Πίνακας χαρακτηριστικών διατομής 1.2.

Όνομα	Διαστάσεις (cm × cm)	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
				Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_w
1.2	40 X 20	2.00	4 X Φ20	Φ8/10	2.00	0.0155

Ο τρόπος υπολογισμού των τροποποιημένων τάσεων και παραμορφώσεων για τη ορθογωνική διατομή στην οριακή κατάσταση αστοχίας, είναι ακριβώς ίδιος με την τετραγωνική διατομή με τη διαφορά ότι εφαρμόζουμε τη σχέση (1.42) αντί της σχέσης (1.37). Επομένως:

$$\xi_{cu} = 0.394$$

με αρχικά χαρακτηριστικά διατομής:

$$s = 9.2cm, b_o = 14.4cm, h_o = 34.4, d' = 33.4cm, d_l = \pi d_l / 4 = 1.6cm, \lambda = 2.4$$

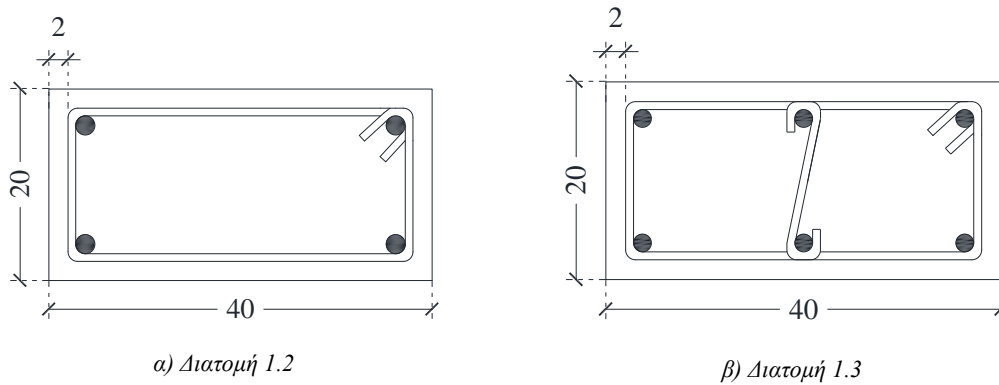
και τελικώς, οι τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του περισιφιγμένου σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας είναι:

$$f_{cu}^* = 23.536MPa \text{ και } \varepsilon_{cu}^* = 15.29\%$$

και όταν η διατομή θλίβεται ολόκληρη οι αντίστοιχες τιμές είναι:

$$f_{cu}^* = 22.717MPa \text{ και } \varepsilon_{cu}^* = 4.37\%$$

Για λόγους άμεσης σύγκρισης τόσο της αποδοτικότητας της περίσφιγξης όσο και των τελικών τιμών τάσεων και παραμορφώσεων, θα χρησιμοποιηθεί παράδειγμα στο οποίο η διατομή θα είναι ορθογωνική, με ίδιο λόγο λ , αλλά με έναν επιπλέον μονότμητο συνδετήρα (Σχήμα 1.18.β), στοιχείο που θα δείξει τη συσχέτιση της αποδοτικότητας της περίσφιγξης με τον τύπο του συνδετήρα όταν η διατομή υπόκειται σε μερική θλίψη. Δηλαδή:

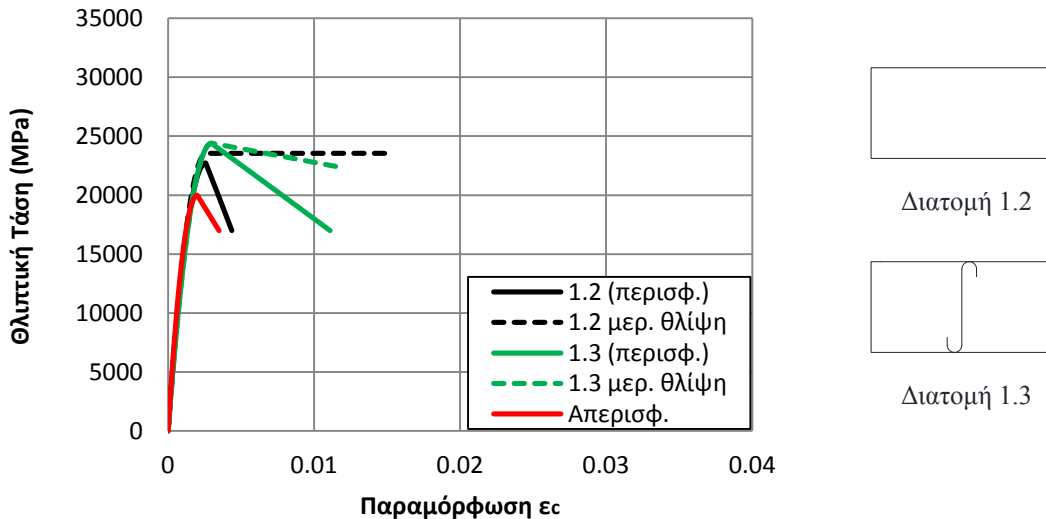


Σχήμα 1.18 Σχήμα Διατομών.

Πίνακας 1.3 Πίνακας χαρακτηριστικών διατομής 1.3.

Όνομα	Διαστάσεις (cm × cm)	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
				Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
1.3	40 X 20	2.00	6 X Φ18	Φ8/10	3.00	0.0720

Μετά από υπολογισμούς όμοιους με τους παραπάνω καταλήγουμε στα παρακάτω διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων:



Σχήμα 1.19 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Θ.Π. Τάσιου για τις Διατομές 1.2 και 1.3 όταν υπόκεινται σε μερική και πλήρη θλίψη.

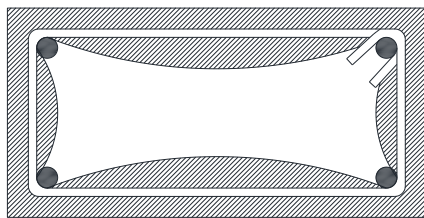
Όταν ο λόγος πλευρών σε μια διατομή είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας, τότε η μερική θλίψη της, επηρεάζει με τελείως διαφορετικό τρόπο τα αποτελέσματα συγκριτικά με την περίπτωση της τετραγωνικής διατομής.

Όσον αφορά την διατομή 1.2, οι τιμές των τροποποιημένων τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος στην αστοχία, είναι πολύ ευνοϊκότερες όταν η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη. Σε αυτή την περίπτωση, η παραμόρφωση αστοχίας έγινε περισσότερο από 3.5 φορές μεγαλύτερη, ενώ και η τάση αστοχίας από $17MPa$ έγινε $23.536MPa$, μεγαλύτερη ακόμα και από την μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος! Το παραπάνω αποτέλεσμα φαινομενικά φαίνεται παράλογο, παρ' όλα αυτά έχει εξήγηση. Η συγκεκριμένη διατομή που χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα, είναι ανεπαρκώς οπλισμένη με ένα μόνον ορθογωνικό συνδετήρα, να συγκρατεί τους οπλισμούς. Όπως φαίνεται άλλωστε και στο **Σχήμα 1.19**, το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ του περισφιγμένου σκυροδέματος, δεν διαφοροποιείται σημαντικά από αυτό του απερίσφικτου (πλήρης θλίψη). Η μερική θλίψη λοιπόν, δρα ευνοϊκά, καθώς το εφελκόμενο σκυρόδεμα μειώνει δραματικά το μήκος της παραβολής d_o της μεγάλης πλευράς της διατομής (**Σχήμα 1.20.α**) και έτσι αυτή είναι αποτελεσματικότερα περισφιγμένη. Όλα τα παραπάνω ισχύουν για μέτριες τιμές του ξ .

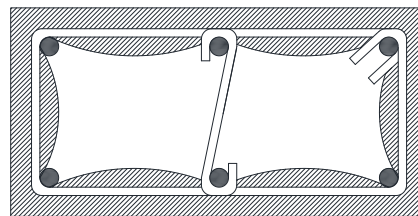
Ο επιπλέον μονότιμος συνδετήρας με τον οποίο είναι οπλισμένη η διατομή 1.3, διαφοροποιεί σημαντικά τα αποτελέσματα. Αρχικά, θεωρώντας τη διατομή να θλίβεται ολόκληρη, η παραμόρφωση αστοχίας ϵ_{cu}^* είναι περισσότερο από 3 φορές

μεγαλύτερη της αντίστοιχης παραμόρφωσης του απερίσφικτου σκυροδέματος (από 3.5 % σε 11.50 %). Με τη θεώρηση της μερικής θλίψης, η παραμόρφωση αστοχίας ε_{cu}^* παραμένει περίπου στο 11 % . Ο μονότμητος συνδετήρας χωρίζει την παραβολή d_o στη μέση εκεί περίπου που αρχίζει και το εφελκόμενο τμήμα της διατομής (**Σχήμα 1.20.β**), με αποτέλεσμα να μην αλλάζει πολύ τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων. Όσον αφορά την θλιπτική τάση αστοχίας, αυτή διαφοροποιείται αισθητά στην περίπτωση της μερικής θλίψης συγκριτικά με την περίπτωση που η διατομή θλίβεται ολόκληρη (μεγαλύτερη στην πρώτη, **Σχήμα 1.19**). Το παραπάνω έχει σχέση περισσότερο, με τη συντηρητική θεώρηση του προσομοιώματος του Τάσιου ότι $f_{cu}^* = 0.85.f_c$ (πλήρης θλίψη της διατομής).

Συμπερασματικά, καταλήγουμε πως η πιο αποτελεσματική περίσφιγξη της διατομής 1.3 οδηγεί σε πιο σταθερά αποτελέσματα στις τροποποιημένες τιμές των τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος, ανεξάρτητα από τη μερική ή μη θλίψη της διατομής. Διαπιστώσαμε επίσης, ότι η εντατική κατάσταση κατά την οποία η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη, είναι ευνοϊκότερη για την ορθογωνική διατομή σε αντίθεση με την τετραγωνική. Ωστόσο λόγω της αβεβαιότητας της τιμής της αξονικής δύναμης σε μια εντατική κατάσταση σεισμού, δεν γνωρίζουμε την ακριβή θέση του βάθους θλιβόμενης ζώνης x , και ως εκ' τούτου, θεωρούμε ότι η διατομή βρίσκεται σε πλήρη θλίψη (που είναι μη ρεαλιστική αλλά πιο συντηρητική παραδοχή).



α) Διατομή 1.2



β) Διατομή 1.3

Σχήμα 1.20 Σχηματισμός θόλων απερίσφικτου σκυροδέματος για τις Διατομές 1.2 και 1.3.

Πως τροποποιείται η παραμόρφωση ε_{co}^* όταν η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη;

Μέχρι στιγμής είδαμε πως αλλάζει η αποδοτικότητα της περίσφιγξης και κατά συνέπεια πως αλλάζουν οι τάσεις και παραμορφώσεις του πυρήνα στην ΟΚΑ, όταν η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη. Εάν όμως η διατομή είναι πολύ καλά περισφιγμένη, με πυκνό εγκάρσιο οπλισμό, τότε μπορεί να αποφλοιωθεί πριν η ακραία θλιβόμενη ίνα του πυρήνα της "φτάσει" σε παραμόρφωση την τιμή ε_{co}^* . Θα χρησιμοποιήσουμε τις

σχέσεις (1.34Γ) και (1.35) με $k_f = 5$ (που ισχύει για μικρές παραμορφώσεις $\varepsilon_{co}^* \ll \varepsilon_{cu}^*$).

Τύπος υπολογισμού του ξ_{co}' (βλέπε Παράρτημα):

$$\xi_{co}' = \left[-A_2 + (A_2^2 - 4A_1A_3)^{1/2} \right] / 2A_1 \quad (1.43)$$

όπου:
$$A_1 = \frac{2}{3} + \frac{0.002835}{\varepsilon_{co}^*} ab$$

$$A_2 = \omega_2 - \omega_1 - \nu + \omega_v \frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}$$

$$A_3 = -0.5\omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) (1 + \delta_1)$$

με: $a = \frac{b_{cov\ er}}{b_{core}}$, $b = \frac{f_c}{f_c^*}$, $\delta_1 = \frac{d_1'}{d'}$, $\nu = \frac{N}{b_0 d' f_c^*}$, $\omega_1, \omega_2, \omega_v$, όπως είχαν οριστεί και

παραπάνω και:

ε_{sy} : Η τάση διαρροής του χάλυβα

Η σχέση (1.43) μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όταν $\varepsilon_{co}^* \geq \varepsilon_{cu}$ ($\varepsilon_{cu} \approx 3.5\%$).

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα της τετραγωνικής διατομής με πριν στους υπολογισμούς. Μετά τον υπολογισμό της σχέσης (1.43) και την εφαρμογή της επαναληπτικής διαδικασίας όπως αυτή διατυπώθηκε πιο πάνω, προέκυψε η τιμή της ε_{co}^* λίγο μεγαλύτερη από 2%, ενώ η αντίστοιχη τιμή για διατομή ολόκληρη σε θλίψη είναι $\approx 3.5\%$. Επομένως η διατομή δεν μπορεί να θεωρηθεί αποφλοιωμένη! Τούτο δικαιολογείται από τη μειωμένη τιμή της f_c^* αποτέλεσμα της σχέσης (1.34Γ). Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η μερική θλίψη μιας διατομής επηρεάζει σημαντικά και ουσιαστικά την θλιπτική οριακή παραμόρφωση του πυρήνα (και κατ' επέκταση και την αντίστοιχη τάση) και όχι το μέγιστο της καμπύλης $\sigma - \varepsilon$ του περισφιγμένου σκυροδέματος. Ωστόσο λίγη σημασία έχει να μιλάμε για τροποποιημένες τιμές των ε_{co}^* και f_c^* , εφόσον έτσι αλλιώς είναι δύσκολο να πληρούται η ανίσωση $\varepsilon_{co}^* \geq \varepsilon_{cu}$ για τη πλειοψηφία των διατομών στο μοντέλο του Τάσιου.

1.6 Δ. Μπισκίνης

Ο Δ. Μπισκίνης, βασιζόμενος στον EC8, έχει διατυπώσει σχέσεις για την εκτίμηση της οριακής θλιπτικής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον τύπο της φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη), όσο και την μερική θλίψη της διατομής όταν πρόκειται για καμπτόμενο μέλος.

Ένας γενικός τύπος είναι ο παρακάτω:

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.0035 + \left(\frac{1}{x_{cu}'} \right)^{3/2} + \frac{1}{3} \frac{p}{f_c^*} \quad (1.44)$$

όπου: x_c το βάθος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής $x_{cu}' = \xi_{cu}' d'$. Ο υπολογισμός του ξ_{cu}' μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη σχέση (1.39) ενώ ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης θα υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$a_x = \left(1 - \frac{s}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{s}{4x_{cu}'} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n b_i^2}{6x_{cu}' b_o} \right) \quad (1.45)$$

με: b_o, h_o, s, b_i όπως έχουν οριστεί στον EC8

Παράδειγμα Υπολογισμού

Θα χρησιμοποιηθεί το ίδιο παράδειγμα της τετραγωνικής διατομής με πριν στους υπολογισμούς. Μετά την εφαρμογή της γνωστής επαναληπτικής διαδικασίας έχουμε:

$$\xi_{cu}' = 0.307 \quad (\text{από σχέση (1.39)})$$

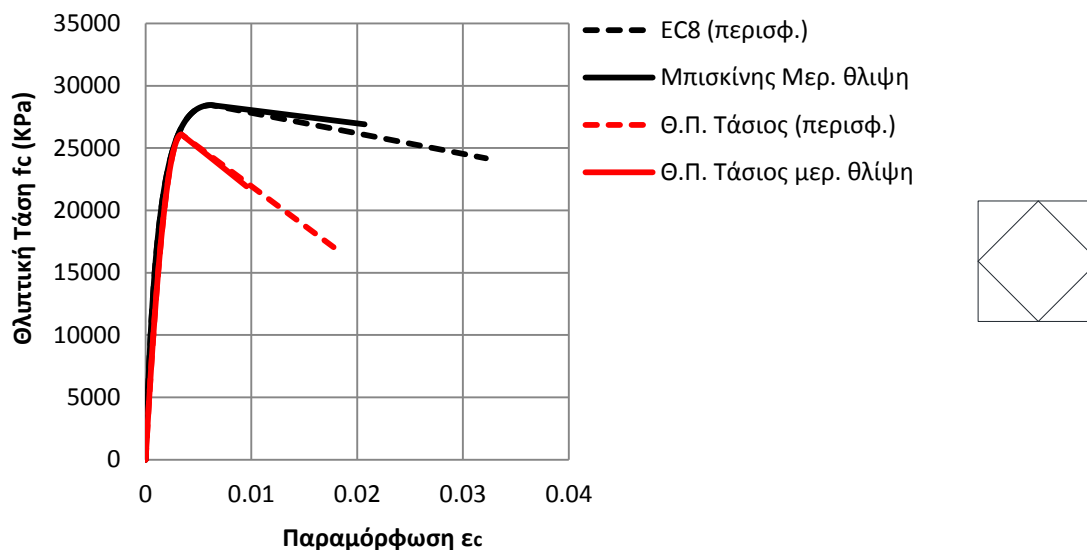
$$a_x = 0.372 \quad (\text{από σχέση (1.45)})$$

και καταλήγουμε με εφαρμογή των σχέσεων του Μπισκίνης (1.44) και του EC8 (1.9)-(1.10) στις παρακάτω τροποποιημένες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων:

$$f_{co}^* = 28.441 \text{ Mpa} \quad \text{και} \quad \varepsilon_{co}^* = 6.22\text{‰} \quad (\text{όπως και πριν})$$

$$\varepsilon_{cu}^* = 20.70\text{‰}$$

Έτσι καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων:



Σχήμα 1.21 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων Μπισκίνη και Τάσιου για τη Διατομή 1.1 (πλήρης και μερική θλίψη).

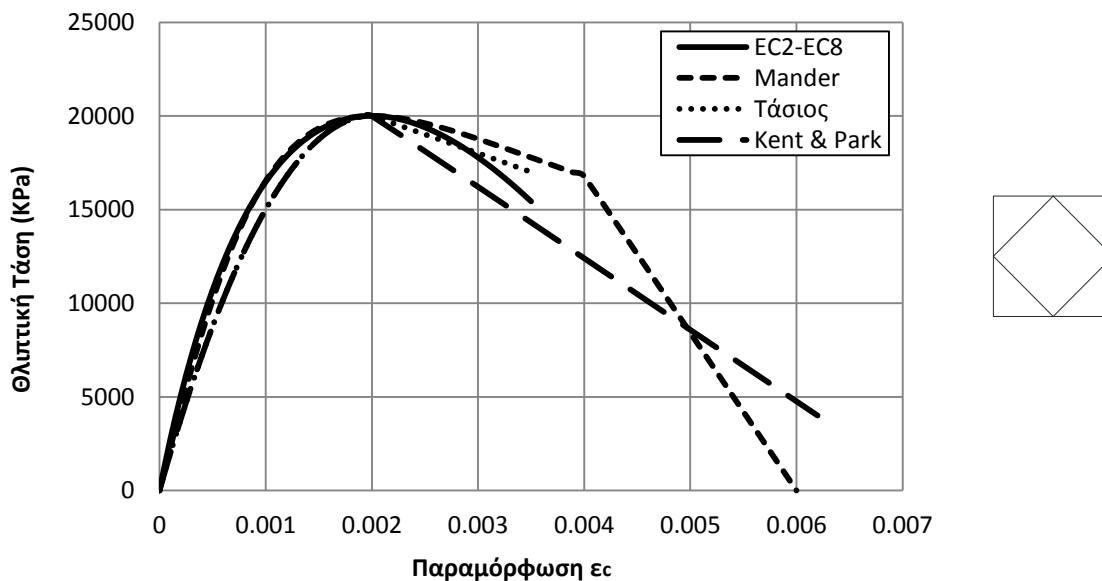
Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την τροποποίηση που έκανε ο Μπισκίνης στο προσομοίωμα του EC8 , δείχνουν και εδώ μια σημαντική μείωση της παραμόρφωσης αστοχίας ϵ_{cu}^* όταν η διατομή δεν θλίβεται ολόκληρη. Παρατηρούμε λοιπόν μια μείωση περίπου 36 % της παραμόρφωσης αστοχίας όταν η διατομή υπόκειται σε μερική θλίψη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη παραμόρφωση του EC8 επιβεβαιώνοντας σε κάθε περίπτωση πως η παραπάνω εντατική κατάσταση είναι δυσμενέστερη για τις τετραγωνικές διατομές.

1.3 Συμπεράσματα

Απερίσφικτο σκυρόδεμα

Για την τετραγωνική διατομή 1.1 που χρησιμοποιήθηκε ως παράδειγμα για όλα τα προσομοιώματα τάσεων - παραμορφώσεων καταλήγουμε στο συγκεντρωτικό διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ για το απερίσφικτο σκυρόδεμα όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.22**. Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος, είναι σχεδόν πανομοιότυπη σε όλα τα μοντέλα και έχει τιμή κοντά στο 2%. Εκεί που εντοπίζονται οι μεγαλύτερες διαφορές είναι στην παραμόρφωση αστοχίας ϵ_{cu} και στην αντίστοιχη τάση f_{cu} . Τα προσομοιώματα του Mander και του Kent & Park είναι τα λιγότερο συντηρητικά αφού οι παραμορφώσεις αστοχίας έχουν

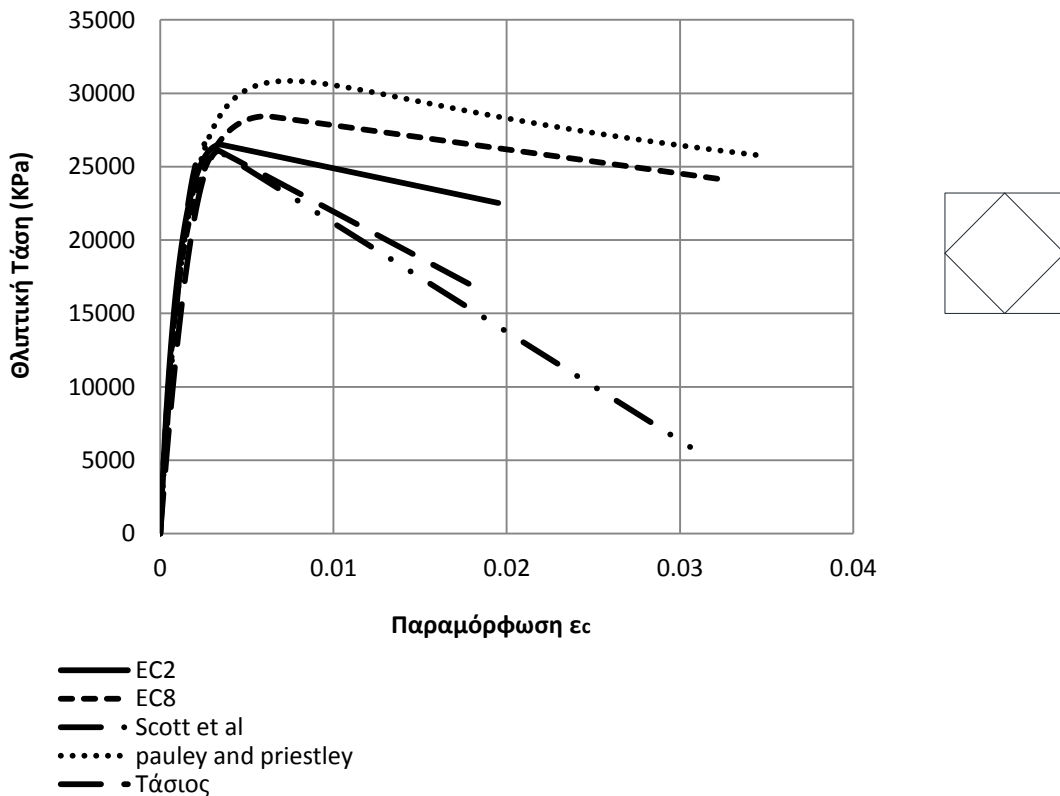
τιμές κοντά στο 6‰ (έναντι 3.5‰ στα υπόλοιπα), με τις αντίστοιχες τάσεις όμως f_{cu} είναι σχεδόν μηδενικές (έναντι $0.85f_c$ στα υπόλοιπα). Ωστόσο, λόγω των μεγάλων συγκριτικά παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος όπως θα δούμε και πιο κάτω μετά την ανάλυση της διατομής, οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμάτων για το απερίσφικτο σκυρόδεμα δεν επηρεάζουν ουσιαστικά και σημαντικά τα αποτελέσματα.



Σχήμα 1.22 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου σκυροδέματος όλων των προσομοιωμάτων για τη Διατομή 1.1.

Περισφιγμένο σκυρόδεμα

Παρότι οι γεωμετρικές αποστάσεις που υπεισέρχονται στις σχέσεις για τον υπολογισμό της παράπλευρης πίεσης p είναι διαφορετικές σε κάθε προσομοίωμα (εκτός του EC2 και EC8), δεν είναι αρκετές για να διαφοροποιήσουν σημαντικά την αποδοτικότητα της περισφιγξης. Οι μεγάλες διαφορές κυρίως στις παραμορφώσεις και δευτερευόντως στις τάσεις, όπως αποτυπώνονται και στο **Σχήμα 1.23**, εξηγούνται από τις διαφορετικές σχέσεις για τον υπολογισμό αυτών. Συμπερασματικά, μεταξύ των συγκρινόμενων μοντέλων, τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα ανήκουν στο προσομοίωμα του Θ.Π. Τάσιου ενώ αντίθετα οι πιο ευνοϊκές τιμές, σε αυτό των Mander & Paulay Priestley. Παρακάτω, μέσω της ανάλυσης της διατομής 1.1 για όλα τα μοντέλα, θα δούμε πως μεταφράζονται αυτές οι διαφορές σε μορφή διαγράμματος ροπών - καμπυλοτήτων (**Σχήμα 1.24**).

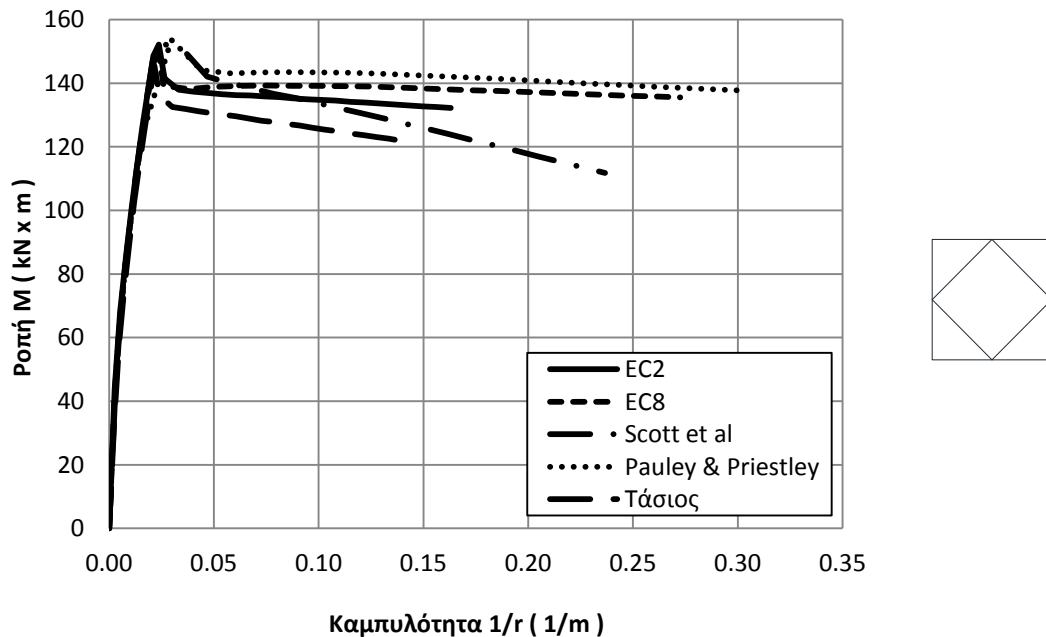


Σχήμα 1.23 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων περισφιγμένου σκυροδέματος όλων των προσομοιωμάτων για τη Διατομή 1.1.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.24** εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα με βάση τις ροπές και καμπυλότητες σε χαρακτηριστικά σημεία:

- Καμπυλότητα αστοχίας $(1/r)_u$

Όπως αναμέναμε, την μεγαλύτερη καμπυλότητα αστοχίας την πετυχαίνει το προσομοίωμα του Mander και Paulay & Priestley, έπειτα αυτό του EC8, έπειτα του Kent & Park και Scott et al, και τέλος το μοντέλο του EC2 με του Τάσιου. Βλέπουμε, ότι οι διαφορές των μοντέλων δεν είναι καθόλου αμελητέες, με την καμπυλότητα $(1/r)_u$ του μοντέλου του Mander να είναι περισσότερο από διπλάσια της αντίστοιχης τιμής του μοντέλου του Τάσιου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα 1.1, παρατηρούμε μια "αντιστοίχιση" της παραμόρφωσης ϵ_{cu}^* του εκάστοτε μοντέλου με την καμπυλότητα $(1/r)_u$, με αποτέλεσμα να αποτυπώνονται χαρακτηριστικά οι διαφορές των προσομοιωμάτων στην αστοχία.



Σχήμα 1.24 Διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων της Διατομής 1.1 με $\nu = 0.4$, για όλα τα προσομοιώματα.

Αυτό συμβαίνει, γιατί παντού αστοχεί το περισφιγμένο σκυρόδεμα πριν αστοχήσει ο εφελκόμενος χάλυβας, όπως προκύπτει από την ανάλυση της διατομής. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το σημαντικό θλιπτικό φορτίο της διατομής ($\nu = 0.4$) επιτρέπει στο βάθος της θλιβόμενης ζώνης x να "κατέβει" αρκετά χαμηλά, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσει ο εφελκόμενος χάλυβας πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και άρα να αστοχεί πρώτος.

- Ροπή αστοχίας M_u

Η ροπή που αντιστοιχεί στην καμπυλότητα αστοχίας της διατομής παίζει και αυτή με τη σειρά της ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο. Κατ' αντιστοιχία με την καμπυλότητα $(1/r)_u$, υπάρχει συσχέτιση της ροπής M_u με το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα με την τάση f_{cu}^* . Παρατηρούμε δηλαδή, ότι τα μοντέλα που παρουσιάζουν μεγάλη πτώση της αντοχής τους στο φθίνοντα κλάδο μέχρι την αστοχία -όπως αυτά του Τάσιου και του Scott et al-, υπάρχει και αντίστοιχη πτώση της καμπτικής αντοχής των διατομών στην αστοχία. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να γίνει ιδιαίτερα έντονο και να μεγεθυνθεί ενδεχομένως, σε

μέτρια περισφιγμένες διατομές ή σε διατομές που καταπονούνται από μεγάλα αξονικά φορτία όπως θα εξετάσουμε στο μέρος Β.

Η μειωμένη ροπή αστοχίας M_u που παρουσιάζουν τα μοντέλα του Scott et al και Τάσιου έναντι των υπολοίπων, επηρεάζει ακολούθως και τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων, αν εμείς επιθυμούμε η διατομή να μην υποστεί μεγάλη μείωση της μέγιστης καμπτικής αντοχής της. Αυτό σημαίνει, ότι η καμπυλότητα αστοχίας που θα υπεισέρχεται στον υπολογισμό της πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, θα ήταν αρκετά μικρότερη από τις τιμές 0.24 και 0.15 (του Scott et al και Τάσιου αντίστοιχα) όπως φαίνονται στο **Σχήμα 1.24**. Ωστόσο, πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές των ροπών αντοχής στην αστοχία όλων των υπόλοιπων μοντέλων, παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση παρά τις σημαντικές διαφορές στις παραμορφώσεις ε_{cu}^* .

- Μέγιστη ροπή (καμπτική αντοχή) M_{max}

Εκείνη η παραμορφωσιακή κατάσταση που επιτρέπει στο απερίσφικτο σκυρόδεμα της διατομής (δηλ. την επικάλυψη) να διατηρεί το μεγαλύτερο ποσοστό της θλιπτικής του αντοχής του και παράλληλα στο περισφιγμένο σκυρόδεμα (δηλ. τον πυρήνα) να "φτάσει" κοντά στην μέγιστη θλιπτική αντοχή του (δηλ. κοντά στην παραμόρφωση ε_{co}^*) ορίζει την μέγιστη καμπτική αντοχή των διατομών. Σε αυτό το στάδιο ο χάλυβας έχει διαρρεύσει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (όπως και στη συγκεκριμένο παράδειγμα 1.1) λόγω των αυξημένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος.

Η απότομη πτώση στη ροπή σε όλα τα προσομοιώματα (**Σχήμα 1.24**), οφείλεται στη αποφλοιώση της διατομής. Όταν το απερίσφικτο σκυρόδεμα χάσει την θλιπτική αντοχή του στη στάθμη περίπου των συνδετήρων, η διατομή μπορεί να θεωρηθεί αποφλοιωμένη και η ροπή "ορίζεται" πλέον από το περισφιγμένο σκυρόδεμα. Η πτώση αυτή διαφέρει σε 2 βασικά σημεία μεταξύ των μοντέλων: **1)** στην κλίση της και **2)** στην τιμή της. Όσον αφορά το **1)**, παρατηρούμε ότι στα προσομοιώματα του Mander και Scott et al, έχουμε μια πολύ πιο ομαλή πτώση σε σχέση με τα υπόλοιπα, κάτι που δικαιολογείται από τη μορφή της καμπύλης τάσεων - παραμορφώσεων του απερίσφικτου σκυροδέματος. Οι καμπύλες αυτές στα 2 προαναφερθέντα μοντέλα, επιτρέπουν στην θλιπτική τάση, τη γραμμική μείωσή της έως σχεδόν τον μηδενισμό της, σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος παραμορφώσεων (**Σχήμα 1.22**) κάτι που δεν συμβαίνει με τα μοντέλα των EC2 - EC8 και Τάσιου στα οποία η τάση μηδενίζεται απότομα μετά το ε_{cu} (στο $0.85 f_c$). Όσον αφορά το **2)**, παρατηρούμε

ότι την μεγαλύτερη πτώση στην τιμή της ροπής, παρουσιάζουν το μοντέλο Τάσιου, λίγο πιο μετά τα μοντέλα των EC2 - EC8 - Mander και τη μικρότερη το μοντέλο του Scott et al. Αυτές οι διαφορές έχουν σχέση με το εμβαδόν του απερίσφικτου ποσοστού της διατομής που το κάθε προσομοίωμα ορίζει. Δηλαδή αναλογικά με τα παραπάνω το μικρότερο ποσοστό απερίσφικτου σκυροδέματος της διατομής 1.1 ανήκει στον Τάσιο, και το μεγαλύτερο στον Scot et al!

ΜΕΡΟΣ Β

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

ΜΕΡΟΣ Β

Στο μέρος Β θα επικεντρωθούμε σε διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων ($M - 1/r$) για διάφορες διατομές, μεταβάλλοντας κάθε φορά διάφορες πιθανές παραμέτρους που μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Τέτοιες παράμετροι μπορεί είναι το ποσοστό του οπλισμού (διαμήκους και εγκάρσιου), οι διαστάσεις των διατομών κλπ. Θα εξεταστεί η επίδραση της κάθε μιας παραμέτρου, ως ενότητα κεφαλαίου, καθώς και η αλληλεπίδραση αυτών. Σε όλες τις επιλύσεις, η τιμή της θλιπτικής αξονικής δύναμης, παίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα της ανάλυσης από το πρόγραμμα XTRACT. Γι' αυτό το λόγο, σε όλες τις περιπτώσεις διερευνήσεων θα υπάρξει ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών αξονικών θλιπτικών φορτίων, δοσμένο είτε σε μορφή ανηγμένης αξονικής δύναμης (ν) είτε σε μορφή συνολικού θλιπτικού φορτίου (N σε kN). Η διάρθρωση του μέρους Β θα είναι η παρακάτω:

- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Στο κεφάλαιο 2 εξετάζεται η επίδραση του οπλισμού μιας διατομής (εγκάρσιου και διαμήκη) τόσο στην παράπλευρη πίεση που προσφέρουν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα όσο και σε επίπεδο αποτελεσμάτων ροπών - καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων μ_ϕ . Ο εγκάρσιος οπλισμός χωρίζεται σε 2 υποενότητες: Η μία αφορά τις καθ' ύψος αποστάσεις s των συνδετήρων και η δεύτερη αφορά τη μορφή τους (υπό την έννοια του αριθμού των ενεργών σκελών των συνδετήρων κατά x και κατά y). Εφαρμόζονται διατομές με διαφορετικά χαρακτηριστικά περισφιγξης η κάθε μία, καταπονούμενες από ένα σημαντικό μεγάλο εύρος θλιπτικών αξονικών δυνάμεων, έτσι ώστε να εξετάσουμε και την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στο κεφάλαιο 3 η εξεταζόμενη παράμετρος είναι η γεωμετρία της διατομής. Οι ενότητες από τις οποίες αποτελείται είναι το μέγεθος της διατομής, ο λόγος των πλευρών της και το πάχος της επικάλυψής της. Και εδώ όπως και στο κεφάλαιο 2 χρησιμοποιούνται ποικίλοι "τύποι" διατομών έτσι ώστε να μπορέσουμε να αποκτήσουμε όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένη εικόνα σε επίπεδο αποτελεσμάτων ροπών - καμπυλοτήτων και κατ' επέκταση πλαστιμοτήτων μ_ϕ .
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Το αντικείμενο της διερεύνησης του κεφαλαίου 4 αφορά τα υλικά από τα οποία αποτελείται μια διατομή. Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου, διερευνάται η επιρροή της ποιότητας του σκυροδέματος με το εύρος τιμής της θλιπτικής αντοχής f_c να κυμαίνεται από $20MPa$ έως $50MPa$. Στη δεύτερη ενότητα, διερευνάται η επιρροή της κράτυνσης του χάλυβα με το λόγο f_s/f_y να παίρνει τιμές από 1.00 έως 1.35.
- ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Στο κεφάλαιο 5 θα γίνει σύνδεση των πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων όπως αυτές προέκυψαν για διάφορες διατομές από τις διερευνήσεις των προηγούμενων κεφαλαίων με τις αντίστοιχες πλαστιμότητες όπως προκύπτουν από την προτεινόμενη σχέση του EC8 μέρος 1.

Η διάρθρωση των ενοτήτων των κεφαλαίων του μέρους Β (δηλαδή της κάθε εξεταζόμενης παραμέτρου) θα έχει την εξής πορεία:

- Πίνακας και σχήματα διατομών που θα χρησιμοποιηθούν για τη συγκεκριμένη διερεύνηση.
- Διαγράμματα αποδοτικότητας της περίσφιγξης συναρτήσει της εξεταζόμενης παραμέτρου συνοδευόμενα από σχολιασμούς.
- Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) όλων των διατομών και σχολιασμός αυτών.
- Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων ($M - 1/r$) μετά από την ανάλυση των διατομών σύμφωνα με το πρόγραμμα XTRACT, μαζί με σχόλια και συμπεράσματα από τα προκύπτοντα αποτελέσματα.
- Αποτελέσματα πλαστιμοτήτων αστοχίας σε μορφή διαγραμμάτων (είτε συναρτήσει της εξεταζόμενης παραμέτρου είτε συναρτήσει του ανηγμένου θλιπτικού αξονικού φορτίου), συνοδευόμενα από σχόλια και συσχετίσεις με τους ισχύοντες κανονισμούς.
- Επιπλέον διαγράμματα στα οποία παρουσιάζονται οι καμπυλότητες αστοχίας ή ο λόγος M_{\max}/M_u , όπου κρίνεται απαραίτητο.

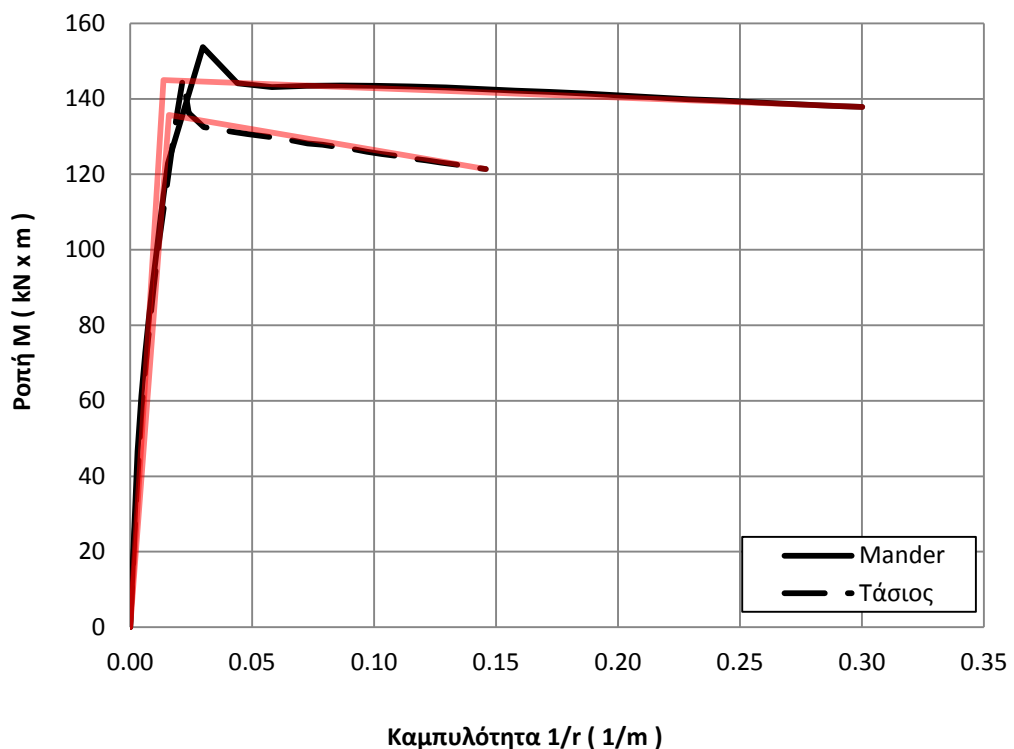
Επιπλέον διευκρινίσεις και παραδοχές:

- Από τα προσομοιώματα περίσφιγξης και τάσεων - παραμορφώσεων που αναφέρθηκαν στο μέρος Α, θα εφαρμοσθούν στο μέρος Β (παραμετρική διερεύνηση) τα παρακάτω:
 - EC2 ή EC8 - μέρος 1
Θα αναφέρεται ως EC2 σε διαγράμματα και σχολιασμούς. Οι 2 "ονοματολογίες" του, δικαιολογούνται ως εξής: ενώ οι νόμοι που διέπουν τις καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων του απείρσιφικτου και περισφιγμένου σκυρόδεματος είναι μέρος του EC2, ο τρόπος υπολογισμού της αποδοτικότητας της περίσφιγξης εμπίπτει στον EC8 - μέρος 1.
 - EC8 - μέρος 3
Θα αναφέρεται σε διαγράμματα και σχολιασμούς ως EC8 - 3 (εκτός αν γίνεται πλήρης αναφορά).
 - Mander και Paulay & Priestley
Όπως αναφέρθηκε και στο μέρος Α, έχει γίνει μια τροποποίηση του μοντέλου του Mander όσον αφορά τον υπολογισμό της οριακής παραμόρφωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος ϵ_{cu}^* από τους Paulay & Priestley. Θα χρησιμοποιηθεί αυτή η "εκδοχή" του προσομοιώματος, αλλά θα αναφέρεται απλουστευτικά σε διαγράμματα και σχολιασμούς ως Mander.
 - Θ. Π. Τάσιος
Θα αναφέρεται σε διαγράμματα και σχολιασμούς ως Τάσιος.

- Ο εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός θα έχει τις παρακάτω τιμές παραμορφώσεων αστοχίας για κάθε προσομοίωμα:
 - EC2 ή EC8 μέρος 1 → $\varepsilon_{su} = 75\%$.
 - EC8 μέρος 3 → $\varepsilon_{su} = 60\%$.
 - Mander και Pauley & Priestley → $\varepsilon_{su} = 100\%$.
 - Θ. Π. Τάσιος → $\varepsilon_{su} = 75\%$.
- Δεν έχουν ληφθεί πουθενά συντελεστές ασφαλείας. Φυσικά αυτό ισχύει και για τις τάσεις χάλυβα και σκυροδέματος (εκτός του **κεφαλαίου 5**).
- Σε πολλά παραδείγματα διατομών που το περισφιγμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ αυξημένες τιμές παραμόρφωσης για διάφορους λόγους (π.χ. πυκνός εγκάρσιος οπλισμός, χαμηλή τιμή θλιπτικού αξονικού φορτίου, μη συντηρητικό προσομοίωμα κλπ.) ενέχει ο κίνδυνος του λυγισμού των διαμήκων ράβδων. Εμείς θα αγνοήσουμε αυτή τη συνέπεια καθ' ότι στην παρούσα εργασία θα διερευνήσουμε την άμεση επιρροή διαφόρων παραμέτρων σε διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων ($M - 1/r$).
- Σε πολλά παραδείγματα διατομών, η διάμετρος των συνδετήρων είναι αρκετά μικρή και ανεπαρκής από τους κανονισμούς, συγκριτικά με τη διάμετρο του διαμήκους οπλισμού. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα στην πράξη, τη θραύση του συνδετήρα από τις μεγάλες δυνάμεις που ασκούν οι συγκρατούμενες διαμήκειες ράβδοι. Έτσι θα χαθεί η περισφιγξη στο σκυρόδεμα σε παραμόρφωση πολύ μικρότερη από την παραμόρφωση αστοχίας ε_{cu}^* που έχουμε υπολογίσει (σύμφωνα με τον EC8 - μέρος 1 πρέπει να ισχύει η σχέση $d_L \leq 3d_w$). Στο πλαίσιο της εργασίας όπως αναφερθήκαμε και πιο πριν, θα αγνοήσουμε την παραπάνω συνέπεια από την "μη ορθή" όπλιση των διατομών μας.
- Σαν συνέχεια των 2 προηγούμενων διευκρινήσεων, θα πρέπει να σημειώσουμε πως δεν έχουν εφαρμοσθεί οι απαιτήσεις των κανονισμών σε όλες τις παραμέτρους διερεύνησης (π.χ. το ποσοστό διαμήκους οπλισμού ρ κυμαίνεται από 1% έως 4% όπως ορίζουν οι Ευρωκώδικες, κάτι που δεν συμβαίνει όμως με τον εγκάρσιο οπλισμό ο οποίος παίρνει πολύ μεγαλύτερο εύρος τιμών από αυτό που ορίζουν οι κανονισμοί). Κινηθήκαμε και εκτός των κανονισμών όπου έπρεπε, για να διαπιστώσουμε με σαφήνεια την επιρροή που έχει η μεταβολή διαφόρων παραμέτρων στην αποδοτικότητα της περισφιγξης και στα αποτελέσματα της ανάλυσης των διατομών.
- Για να βρούμε τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων των διατομών που εξετάζουμε, θα πρέπει πρώτα να κάνουμε διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων έτσι ώστε να ορίσουμε την καμπυλότητα αστοχίας και διαρροής. Η μέθοδος της διγραμμικοποίησης που θα εφαρμόσαμε έχει της εξής παραδοχές:

- Το διγραμμικοποιημένο διάγραμμα και το διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων έχουν κοινό το τελευταίο σημείο της αστοχίας της διατομής (βεβαίως και το πρώτο στην αρχή των αξόνων!).
- Για το σχεδιασμό της διγραμμικοποιημένης καμπύλης μας λείπει εκείνο το σημείο που ορίζει τη μετάβαση από τον ελαστικό στον μετελαστικό κλάδο. Το σημείο αυτό, το βρίσκουμε ως εξής: με παραδοχή ίσων εμβαδών και με αρχή το τελευταίο σημείο της αστοχίας, εκτείνεται ευθεία έως ότου τμήσει την ευθεία που έχει αρχικό σημείο την αρχή των αξόνων και κλίση την τιμή EI της διατομής (ελαστική).

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου, θα δοθούν παραδείγματα διγραμμικοποίησης των καμπυλών ροπών - καμπυλοτήτων της τετραγωνικής διατομής που εφαρμόστηκε στο μέρος 1. Για λόγους ευκρίνειας των καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν 2 μόνον προσομοιώματα, του Θ. Π. Τάσιου και των Mander κ' Paulay & Priestley. Στο παρακάτω διάγραμμα με κόκκινο χρώμα είναι οι καμπύλες όπως προέκυψαν από τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων $M - 1/r$.



Σχήμα 2.1 Διγραμμικοποιημένες καμπύλες ροπών - καμπυλοτήτων παραδειγμάτων μέρους Α.

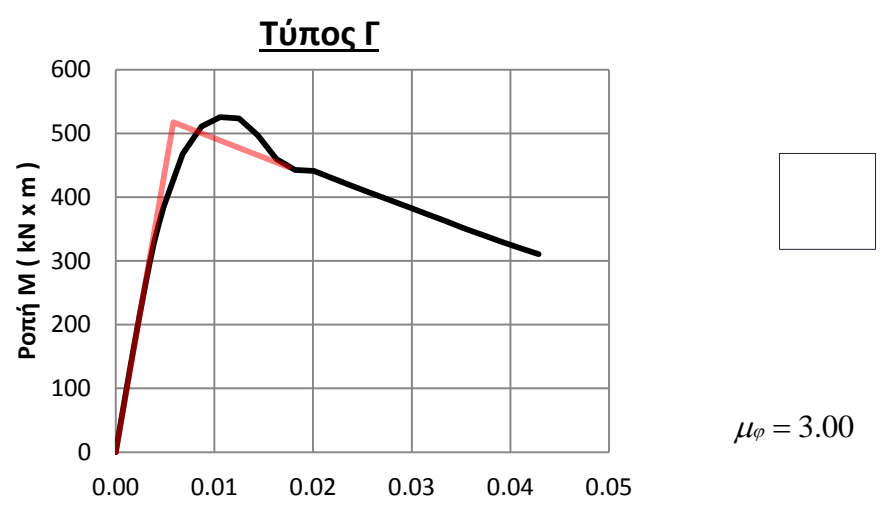
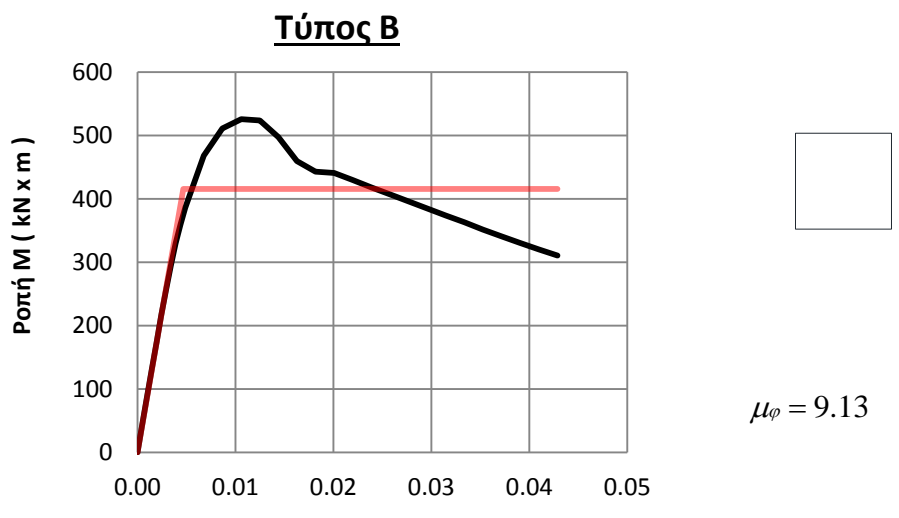
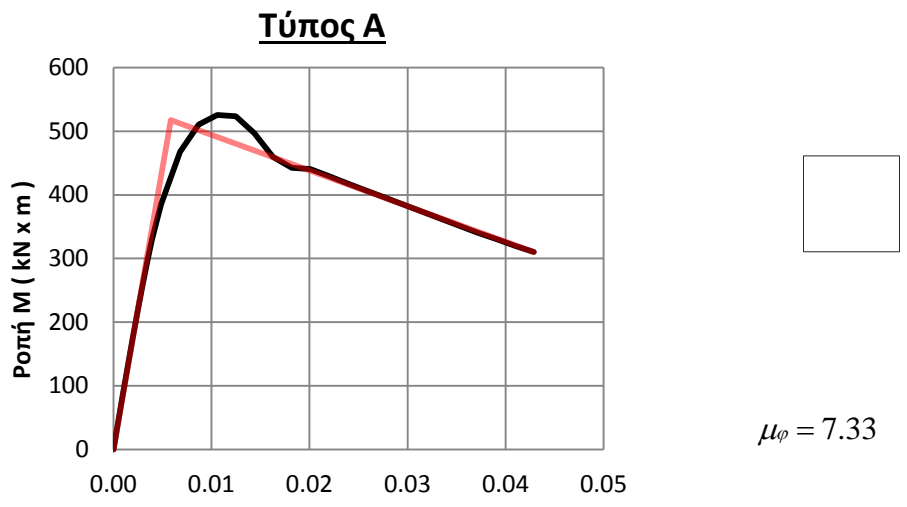
Ωστόσο, η παραπάνω μέθοδος διγραμμικοποίησης παρουσιάζει αδυναμία σε περιπτώσεις κατά τις οποίες οι διατομές παρουσιάζουν πολύ σημαντική πτώση στην τιμή της ροπής στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Στα παρακάτω διαγράμματα (**Σχήμα 2.2**) παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση ανάλυσης, όπου η σημαντική αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου της καμπύλης $M-1/r$, οφείλεται σε χαμηλή αποδοτικότητα περίσφιξης της διατομής σε συνδυασμό με σημαντικό θλιπτικό αξονικό φορτίο. Η ανάλυση γίνεται σύμφωνα με το προσομοίωμα του Mander για ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο $\nu = 0.8$ και διατομή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 2.1 Πίνακας χαρακτηριστικών Διατομής.

Διαστάσεις (cm × cm)	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός	
		Υλοποιούμενος με	Αριθμός τμήσεων	α_{ow}
50 X 50	3.00	8 X Φ28	2	0.0312

Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζονται 3 τύποι διγραμμικοποίησης του ίδιου διαγράμματος ροπών - καμπυλοτήτων για την παραπάνω διατομή. Το κύριο χαρακτηριστικό του διαγράμματος $M-1/r$ όπως προαναφέρθηκε είναι η σημαντική πτώση της τιμής της ροπής στον μετελαστικό κλάδο μέχρι την αστοχία. Αναλυτικά οι 3 τύποι είναι:

- **Τύπος Α:** Στη διγραμμικοποίηση "Τύπου Α" εφαρμόζονται οι παραδοχές που έχουν προαναφερθεί. Είναι εκείνη η μέθοδος της διγραμμικοποίησης που θα εφαρμοσθεί σε όλα τα παραδείγματα των διατομών της διερεύνησης του μέρους Β, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα δόθηκε και στο **Σχήμα 2.1**.
- **Τύπος Β:** Σε αυτή τη μέθοδο διγραμμικοποίησης εφαρμόζονται οι εξής παραδοχές:
 - Το διγραμμικοποιημένο διάγραμμα και το διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων έχουν κοινή παραμόρφωση αστοχίας (όχι όμως και ροπή M_u όπως στον "Τύπο Α").
 - Ο μεταλαστικός κλάδος είναι οριζόντιος.
 - Το σημείο διαρροής του διγραμμικοποιημένου διαγράμματος ορίζεται ως η τομή της ευθείας με κλίση EI (ελαστική) κάνοντας παραδοχή ίσων εμβαδών.
- **Τύπος Γ:** Στη μέθοδο διγραμμικοποίησης "Τύπου Γ" εφαρμόζονται οι εξής παραδοχές:
 - Το σημείο της αστοχίας του διγραμμικοποιημένου διαγράμματος θα πρέπει να ικανοποιεί την απαίτηση $M_u / M_{max} = 0.85$
 - Ο ορισμός του σημείου διαρροής του διαγράμματος είναι ίδιος με αυτόν του "Τύπου Α".



Σχήμα 2.2 Διγραμμικοποιήσεις διαγράμματος $M - 1/r$ με διαφορετικές μεθόδους και παραδοχές.

Όπως παρατηρούμε και στο **Σχήμα 2.2**, τα αποτελέσματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων για κάθε μέθοδο διγραμμικοποίησης του ίδιου διαγράμματος ροπών - καμπυλοτήτων διαφέρουν σημαντικά. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό συμβαίνει κυρίως σε περιπτώσεις διαγραμμάτων $M-1/r$ που παρουσιάζουν σημαντική πτώση στην τιμή της ροπής στον μετελαστικό κλάδο. Εάν εμείς απαιτήσουμε από τη διατομή να διατηρήσει ένα "ικανό" ποσοστό της μέγιστης καμπτικής αντοχής της και στην αστοχία (όπως στη διγραμμικοποίηση "Τύπου Γ"), τότε αναπόφευκτα μειώνουμε δραστικά την καμπυλότητα αστοχίας του διγραμμικοποιημένου διαγράμματος με αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της προσφερόμενης πλαστιμότητας μ_ϕ της διατομής. Στο παράδειγμά μας παρατηρούμε ότι η τιμή της πλαστιμότητας καμπυλοτήτων στην "Τύπου Γ" διγραμμικοποίηση, είναι 2 φορές μικρότερη από την "Τύπου Α" και 3 φορές μικρότερη από την "Τύπου Β".

Παρ' όλα αυτά, ο λόγος M_u / M_{\max} είναι δύσκολο να οριστεί καθώς σε πολλές διατομές το "σκαλοπάτι" που παρουσιάζει το διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων είναι ιδιαίτερα έντονο. Με άλλα λόγια, η τιμή της μέγιστης ροπής της διατομής παρουσιάζεται σε πολύ στενό εύρος τιμών καμπυλοτήτων εκτός του οποίου η τιμή της ροπής διαφέρει σημαντικά. Η "έξαρση" αυτή δηλαδή της ροπής σε κάποιες περιπτώσεις, θα μπορούσε να αγνοηθεί πλήρως, ενέργεια όμως που θα άλλαζε σημαντικά την τιμή της πλαστιμότητας μ_ϕ σε αυτή τη μέθοδο διγραμμικοποίησης. Έτσι λοιπόν θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να θεσπίζουμε μια εύλογη τιμή του λόγου M_u / M_{\max} , με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται δυσκολίες στη στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου όταν πρόκειται για σημαντικό όγκο περιπτώσεων διερεύνησης (όπως στο μέρος Β της παρούσας εργασίας).

Όσον αφορά τη διγραμμικοποίηση "Τύπου Β", αυτή προσφέρει τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα τιμών πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων μιας διατομής. Αυτό εξηγείται λόγω της μικρότερης συγκριτικά με τους άλλους 2 τύπους τιμής της καμπυλότητας διαρροής. Παρ' όλα αυτά, η συγκεκριμένη μέθοδος διγραμμικοποίησης δεν "μεταφράζει" ικανοποιητικά τις διαφορές στην τιμή της ροπής μεταξύ διαρροής και αστοχίας σε επίπεδο πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων.

Κεφάλαιο 2

ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Διαμήκης οπλισμός
- 2.3 Εγκάρσιος οπλισμός
 - 2.2.1 Μορφή συνδετήρα
 - 2.2.2 Αποστάσεις συνδετήρων

2.1 Εισαγωγή

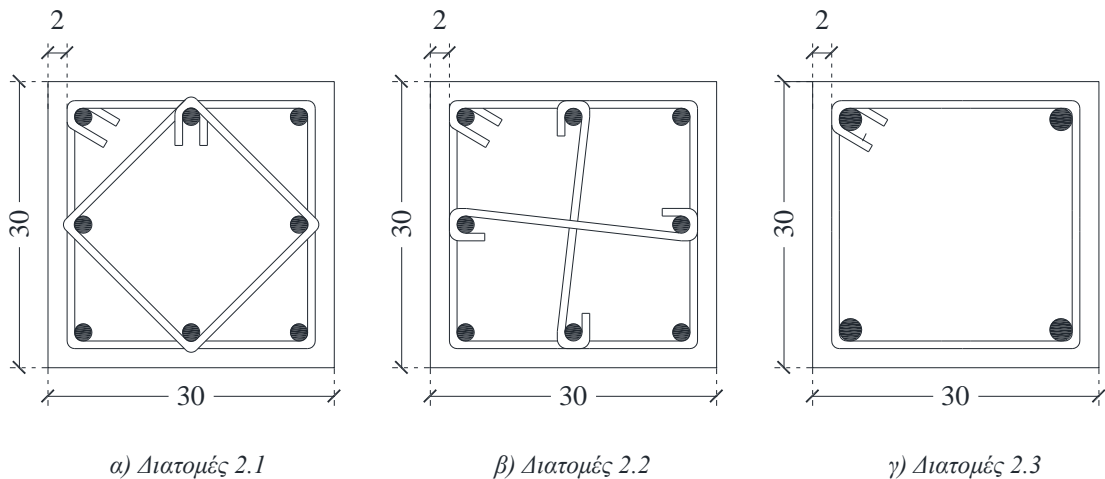
Στο κεφάλαιο 2 θα διερευνήσουμε την επιρροή που έχει ο οπλισμός μιας διατομής στη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων της (μ_ϕ), και με ποιόν τρόπο την επηρεάζει. Ο οπλισμός μια διατομής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε εγκάρσιο και διαμήκη (ενότητα 2.2). Ο εγκάρσιος οπλισμός (δηλ. οι συνδετήρες) είναι "υπεύθυνος" όχι μόνο να περιορίσει την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος αλλά και να προλάβει το λυγισμό του διαμήκους θλιβόμενου οπλισμού. Στην παρούσα εργασία ο εγκάρσιος οπλισμός θα χωριστεί σε 2 ενότητες: **α)** Τη μορφή των συνδετήρων, δηλαδή τον αριθμό των τμήσεων που μπορούμε να πετύχουμε σε τομή κατά x και κατά y σε μια διατομή (ενότητα 2.3) και **β)** τις αποστάσεις μεταξύ των συνδετήρων (ενότητα 2.4). Ο διαμήκης οπλισμός από την άλλη, συνδεδεμένος άμεσα με την καμπτική αντοχή μια διατομής, επηρεάζει και αυτός σημαντικά με τη σειρά του την παρεχόμενη πλαστιμότητα (μ_ϕ) της, όπως θα δούμε.

2.2 Διαμήκης οπλισμός

Για την παραμετρική διερεύνηση του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών, με διαστάσεις: 30 X 30 (cm x cm), επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm, υλικά: $f_c = 20MPa$ και $f_y = 500MPa$ με επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

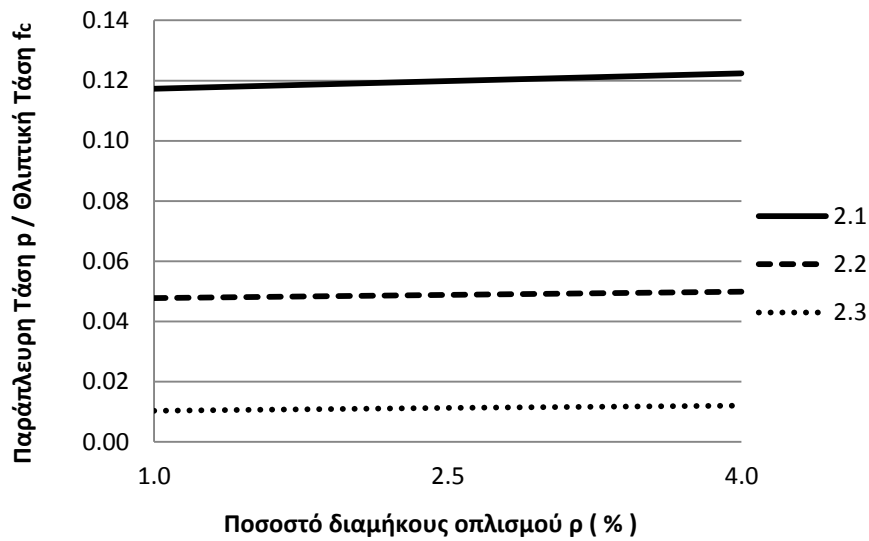
Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 2.1 - 2.2 - 2.3.

Όνομα	Διαμήκης οπλισμός		Εγκάρσιος οπλισμός		
	Ποσοστό (\approx)	Υλοποιούμενο με	Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
2.1.A	1.0%	8 X Φ 12	Φ 8/7.5	3.414	0.2398
2.1.B	2.5%	8 X Φ 18			
2.1.Γ	4.0%	8 X Φ 24			
2.2.A	1.0%	8 X Φ 12	Φ 8/12.5	3	0.0977
2.2.B	2.5%	8 X Φ 18			
2.2.Γ	4.0%	8 X Φ 24			
2.3.A	1.0%	4 X Φ 18	Φ 8/17.5	2	0.0224
2.3.B	2.5%	4 X Φ 26			
2.3.Γ	4.0%	4 X Φ 32			



Σχήμα 2.3 Σχήματα Διατομών 2.1 - 2.3.

Αποδοτικότητα περίσφιξης



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα $p/f_c - \rho$ για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα του **Σχήματος 2.4**, οι διαφορές μεταξύ των διατομών όσον αφορά τον εγκάρσιο οπλισμό, τόσο στη μορφή των συνδετήρων όσο και στις καθ' ύψος αποστάσεις τους, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παρεχόμενη παράπλευρη πίεση στο σκυρόδεμα. Ενδεικτικά, όταν οι αποστάσεις των συνδετήρων μειώθηκαν από 12.5 cm σε 7.5 cm και οι τμήσεις κατά x και y αυξήθηκαν από 3.00 σε 3.41 η παράπλευρη πίεση σχεδόν τριπλασιάστηκε.

Επίσης, παρατηρούμε ότι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού ελάχιστα επηρεάζει την παράπλευρη πίεση p . Αυτό συμβαίνει, επειδή αυξανόμενου του ρ , η μόνη παράμετρος που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς της αποδοτικότητας της περισφιγξης και αλλάζει, είναι το b_i (απόσταση μεταξύ διαμήκων ράβδων "δεμένες" από συνδετήρες), του οποίου έτσι κ αλλιώς η μείωση είναι ανεπαίσθητη.

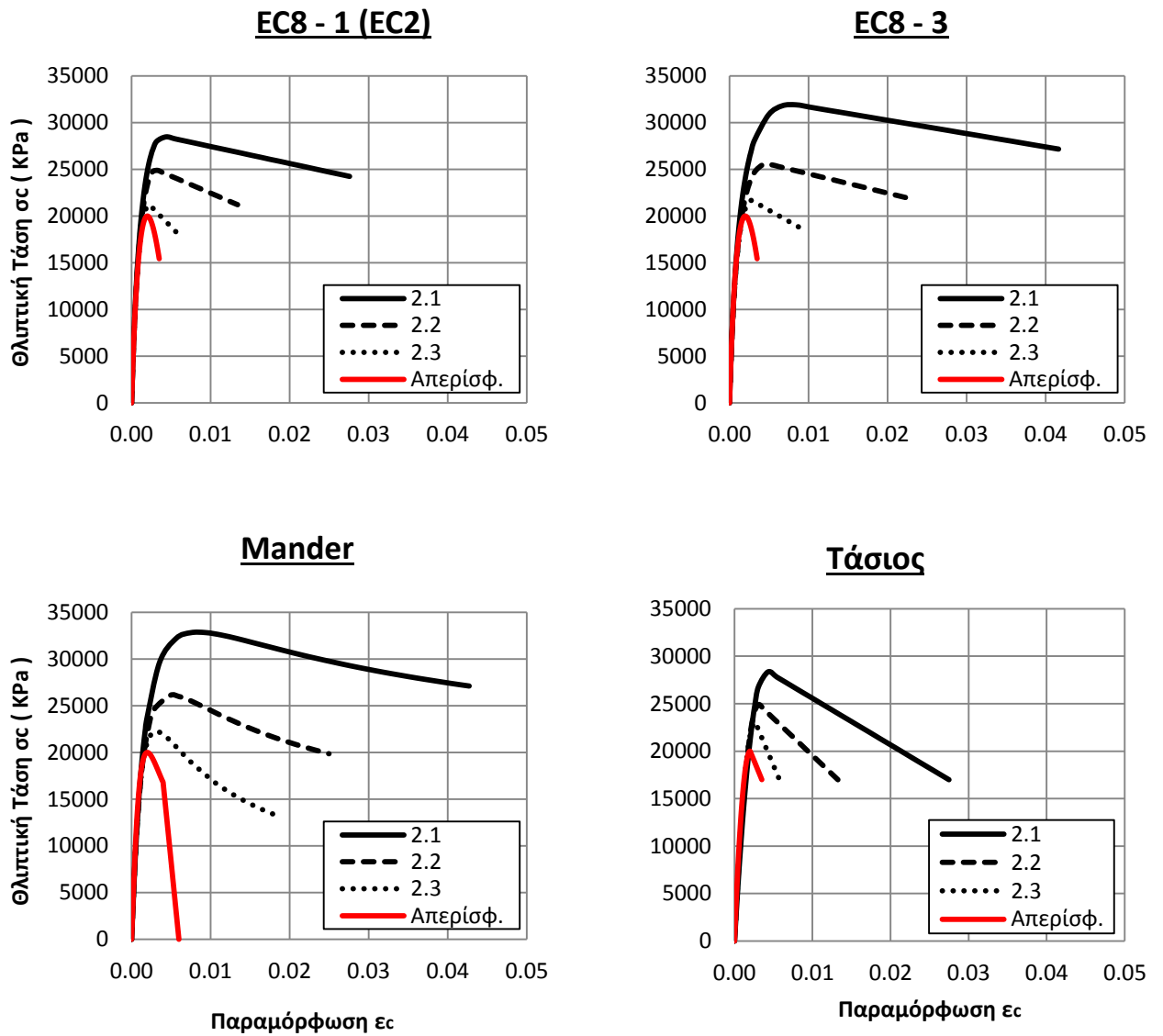
Συνεπώς, θα θεωρήσουμε ότι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού δεν αλλάζει τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων μιας διατομής και ότι αυτά επηρεάζονται μόνον από το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού. Έτσι καταλήγουμε σε 3 διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, ένα για κάθε μορφή εγκάρσιου οπλισμού.

Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \varepsilon$)

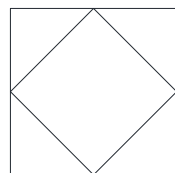
Τα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ όπως αυτά απεικονίζονται στο **Σχήμα 2.5** "μεταφράζουν" την παράπλευρη πίεση που παρέχει το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού της εκάστοτε διατομής στο σκυρόδεμα, σε τροποποιημένες τάσεις και παραμορφώσεις. Επιβεβαιώνουμε και εδώ, πόσο σημαντική είναι η πυκνή διάταξη των συνδετήρων ώστε το σκυρόδεμα να είναι ικανό να παραλάβει υψηλές θλιπτικές παραμορφώσεις. Είναι φανερό, ότι στην ανεπαρκώς οπλισμένη από άποψη συνδετήρων διατομή 2.1, το περισφιγμένο σκυρόδεμα σχεδόν ταυτίζεται με το απερίσφικτο. Αντίθετα, το περισφιγμένο τμήμα της διατομής 2.2 και πολύ περισσότερο της 2.3, εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων συγκριτικά με το απερίσφικτο.

Το στοιχείο εκείνο που μας κάνει εντύπωση, είναι ότι οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμάτων μεγεθύνονται ιδιαίτερα στην περίπτωση διατομών με χαμηλό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού. Για παράδειγμα, η παραμόρφωση αστοχίας ε_{cu}^* της διατομής 2.3, στο προσομοίωμα του Mander, είναι περίπου 3.5 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι σε αυτό του Τάσιου. Αντίθετα η διατομή 2.1 παρουσιάζει μια εν γένει μεγαλύτερη σταθερότητα, με μικρότερες διαφορές μεταξύ των μοντέλων.

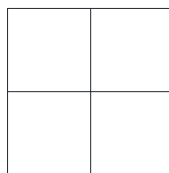
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)



Σχήμα 2.5 Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.



α) Διατομές 2.1

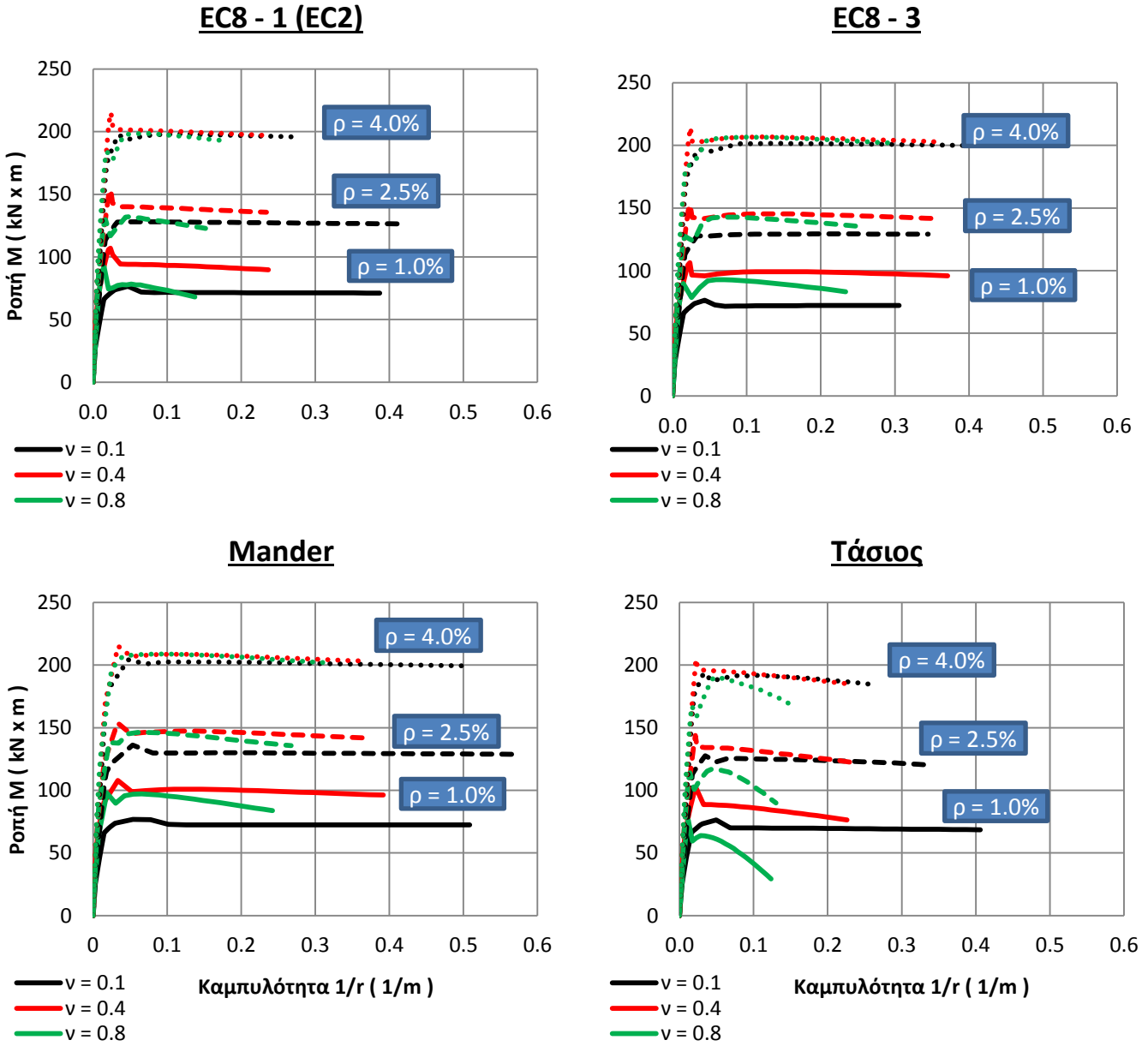


β) Διατομές 2.2

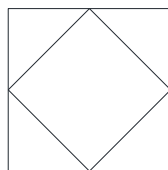


γ) Διατομές 2.3

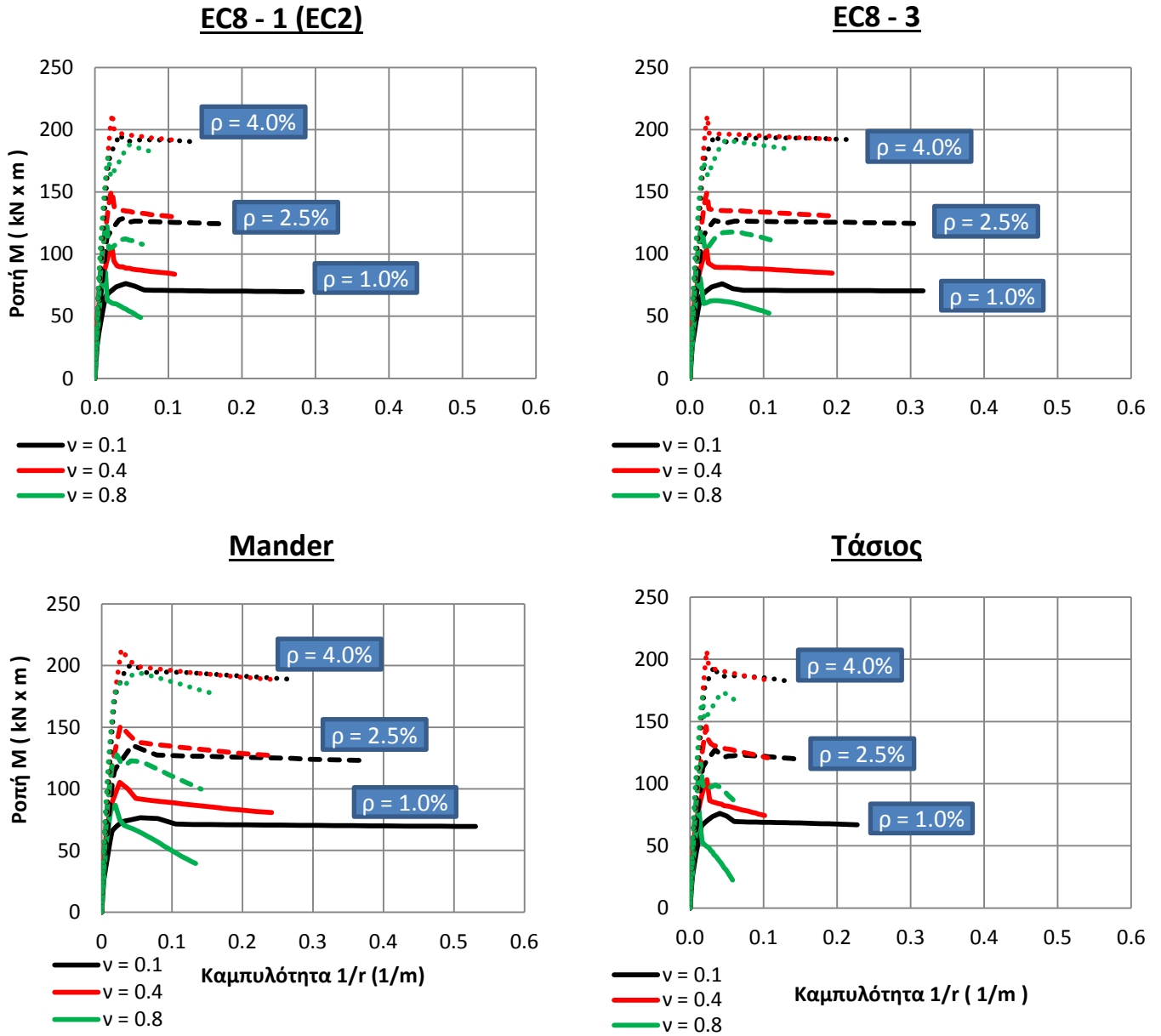
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$



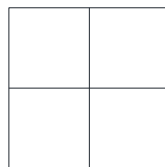
Σχήμα 2.6 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για τις Διατομές 2.1.



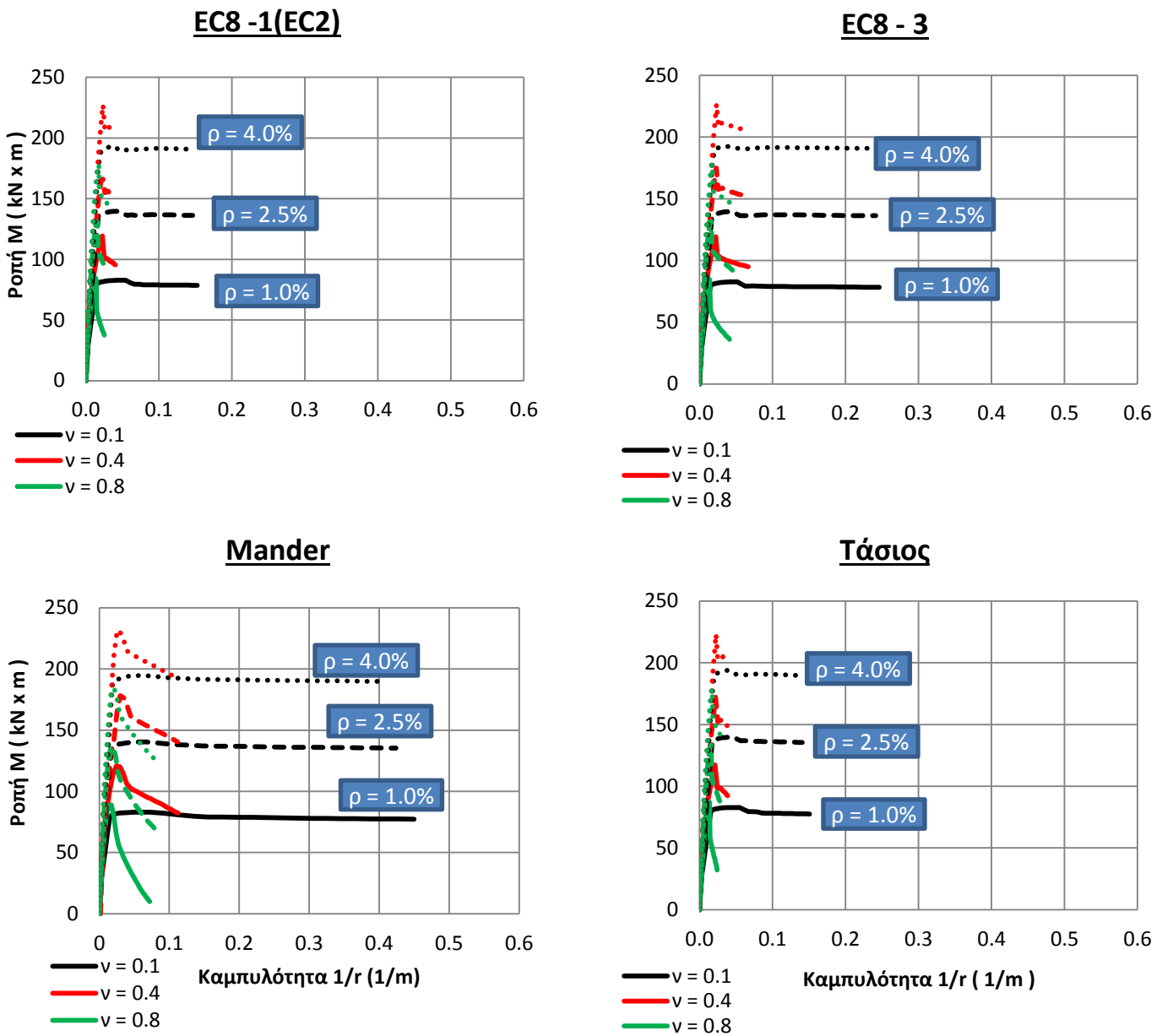
Διατομές 2.1



Σχήμα 2.7 Διαγράμματα ροπών - καμυλοτήτων για τις Διατομές 2.2.



Διατομές 2.2



Σχήμα 2.8 Διαγράμματα ροπών - καμυλοτήτων για τις Διατομές 2.3.



Διατομές 2.3

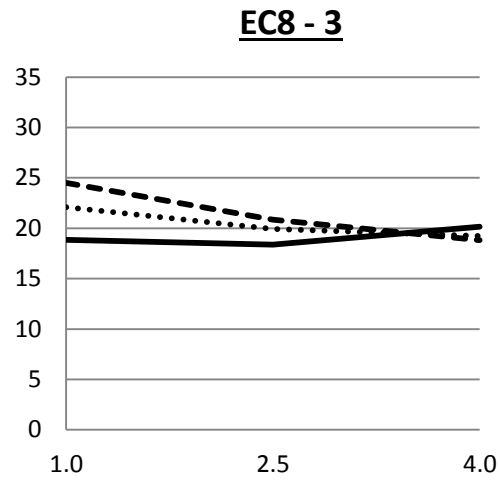
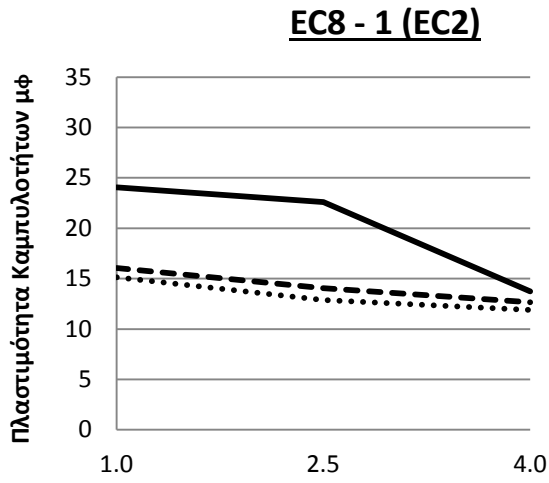
Όπως οι περισσότεροι κανονισμοί, έτσι και οι Ευρωκώδικες, επιβάλλουν ελάχιστα και μέγιστα όρια στα ποσοστά οπλισμού για τα υποστυλώματα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται από τις διατομές να εκδηλώσουν αυξημένη πλαστιμότητα. Στην παρούσα εργασία θα κινηθούμε μέσα στα όρια των κανονισμών του Ευρωκώδικα που προβλέπει $\min \rho = 1\%$ και $\max \rho = 4\%$ σε επίπεδο διατομής.

Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την ανάλυση των διατομών, επιβεβαιώνουν ότι τα αυξημένα ποσοστά οπλισμού σε μια διατομή περιορίζουν σημαντικά τη καμπυλότητα αστοχίας της. Εκείνο που αξίζει να σημειώσουμε, είναι η αλληλεπίδραση του ποσοστού οπλισμού με το μέγεθος του θλιπτικού αξονικού φορτίου καθώς και με την αποδοτικότητα της περίσφιγξης μιας διατομής. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι στη διατομή 2.1 ("ισχυρά" οπλισμένη) και για $\nu = 0.1$ η αύξηση του ποσοστού του οπλισμού δεν επέφερε ιδιαίτερη μείωση στην καμπυλότητα αστοχίας σε αντίθεση με τη διατομή 2.2 ("μετρίως" οπλισμένη), όπου η μείωση έφτασε και το 50% για τα ακραία ρ (μοντέλο Mander). Η εξήγηση του παραπάνω αποτελέσματος έχει σχέση με το υλικό που αστόχησε πρώτο. Για μια καλά περισφιγμένη διατομή (όπως η 2.1) και για πολύ μικρές τιμές αξονικού θλιπτικού φορτίου αστοχεί πρώτα ο εφελκόμενος χάλυβας, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα τις μεταβολές στις καμπυλότητες αστοχίας καθώς μεταβάλλεται το ρ , ιδιαίτερα σε λιγότερα συντηρητικά μοντέλα (όπως αυτό του Mander ή του EC8).

Επιπρόσθετα, παρατηρούμε σε όλα τα προσομοιώματα και σχεδόν για όλα τα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού, ότι οι διαφορές στις καμπυλότητες αστοχίας καθώς μεταβάλλεται το ρ από 1–4%, εκμηδενίζονται καθώς αυξάνεται το θλιπτικό αξονικό φορτίο. Για παράδειγμα για $\nu = 0.8$, τιμή που φυσικά είναι ανεπίτρεπτα μεγάλη από τους κανονισμούς, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού δεν επηρεάζει τις καμπυλότητες αστοχίας.

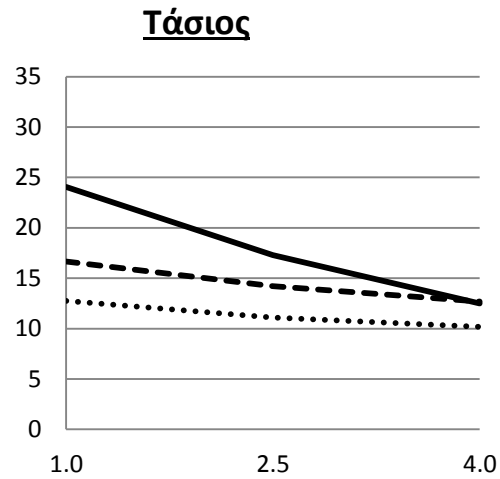
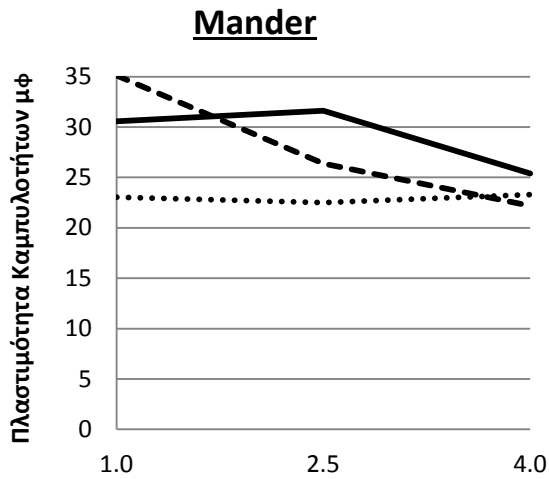
Ωστόσο, και ενώ παρατηρούμε εν γένει ότι όσο μικρότερο είναι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού τόσο αυξάνονται οι καμπυλότητες αστοχίας μιας διατομής, πράγμα θετικό, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι ενδεχόμενος ανεπαρκής διαμήκης οπλισμός, θα επιφέρει άλλου είδους προβλήματα. Σε μια τέτοια περίπτωση, η ροπή ρηγμάτωσης μπορεί να υπερβεί τη καμπτική αντοχή της διατομής και σε συνδυασμό με την εν γένει μείωση των ροπών όσο απομακρυνόμαστε από την κρίσιμη διατομή της πλαστικής άρθρωσης, μπορεί να σχηματιστεί στο σημείο αυτό μια μόνον καμπτική ρωγμή. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, τη συγκέντρωση ανελαστικών παραμορφώσεων σε μειωμένο μήκος πλαστικής άρθρωσης, με αποτέλεσμα να απαιτήσει πολύ υψηλές τιμές πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων. Στην πράξη το παραπάνω μπορεί να μεταφραστεί και με θραύση ακόμα του διαμήκους οπλισμού.

Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων $\mu\phi$



— ν = 0.1
 - - ν = 0.4
 ν = 0.8

— ν = 0.1
 - - ν = 0.4
 ν = 0.8



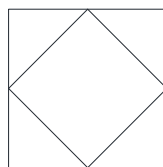
Ποσοστό διαμήκους οπλισμού (ρ%)

— ν = 0.1
 - - ν = 0.4
 ν = 0.8

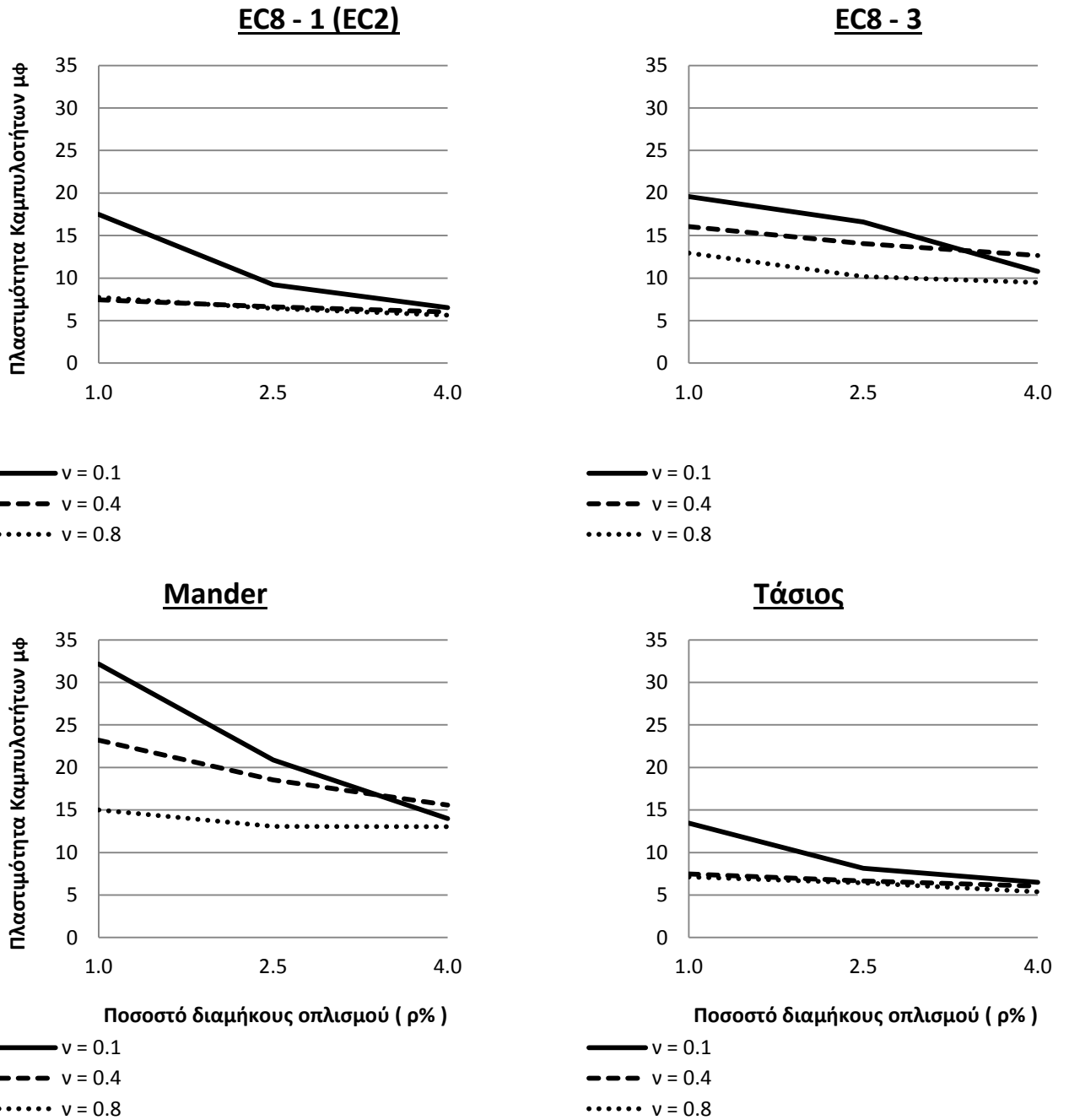
Ποσοστό διαμήκους οπλισμού (ρ%)

— ν = 0.1
 - - ν = 0.4
 ν = 0.8

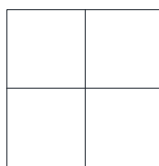
Σχήμα 2.9 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποσοστών οπλισμού για τις Διατομές 2.1.



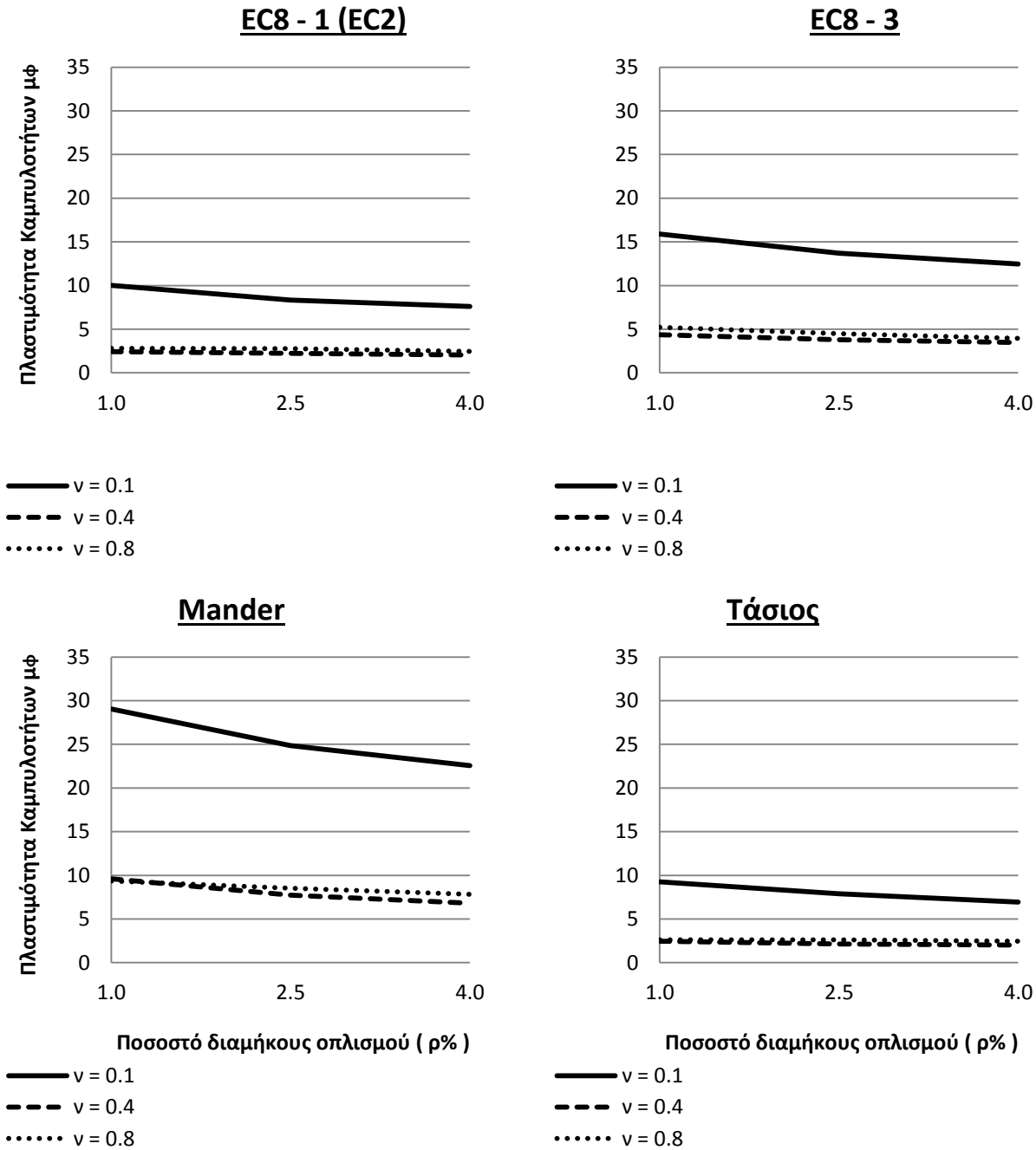
Διατομές 2.1



Σχήμα 2.10 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποσοστών οπλισμού για τις Διατομές 2.2.



Διατομές 2.2



Σχήμα 2.11 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποσοστών οπλισμού για τις Διατομές 2.3.



Διατομές 2.3

Μετά τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων, προέκυψαν τα διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποσοστών οπλισμού, για τις εξεταζόμενες διατομές. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη μείωση πλαστιμοτήτων μ_ϕ , αυξανόμενων των ποσοστών του διαμήκους οπλισμού, συμβαίνει όταν η διατομή παρουσιάζει μεσαίες τιμές καμπυλοτήτων αστοχίας. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.10** (Mander) και **2.9** (Τάσιος), υπάρχει μια παραβολική μείωση των πλαστομοτήτων μ_ϕ συναρτήσει του ρ .

Στη διατομή 2.1 με πυκνό εγκάρσιο οπλισμό παρατηρούμε τις καμπύλες να έχουν θετική κλίση αυξανόμενου του ρ , κυρίως στα λιγότερο συντηρητικά προσομοιώματα (Mander και EC8). Ο λόγος, είναι η πρόωρη αστοχία του εφελκυσμένου χάλυβα έναντι του περισφιγμένου σκυροδέματος για $\rho = 1\%$. Επίσης σε διατομές πολύ ασθενώς περισφιγμένες, όπως η διατομή 2.3 (**Σχήμα 2.11**), ή σε πολύ συντηρητικά προσομοιώματα (Τάσιος - διατομή 2.2, **Σχήμα 2.10**), το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος λίγο διαφέρει από το απερίσφιγκτο, με αποτέλεσμα η μεταβολή του ρ να μην έχει "πολλά περιθώρια" για περαιτέρω μείωση των πλαστιμοτήτων.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση έχει να κάνει με τις διαφορές μεταξύ των προσομοιωμάτων στις παρεχόμενες πλαστιμότητες μ_ϕ . Μεταξύ των λιγότερο και περισσότερο ευνοϊκών μοντέλων, οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μπορεί να διαφέρουν κατά το διπλάσιο ή ακόμα και το τριπλάσιό τους. Το στοιχείο αυτό, έχει φυσικά αντίκτυπο σε μια θεωρητική διαστασιολόγηση διατομών με βάση μια απαιτούμενη ελάχιστη πλαστιμότητα μ_ϕ .

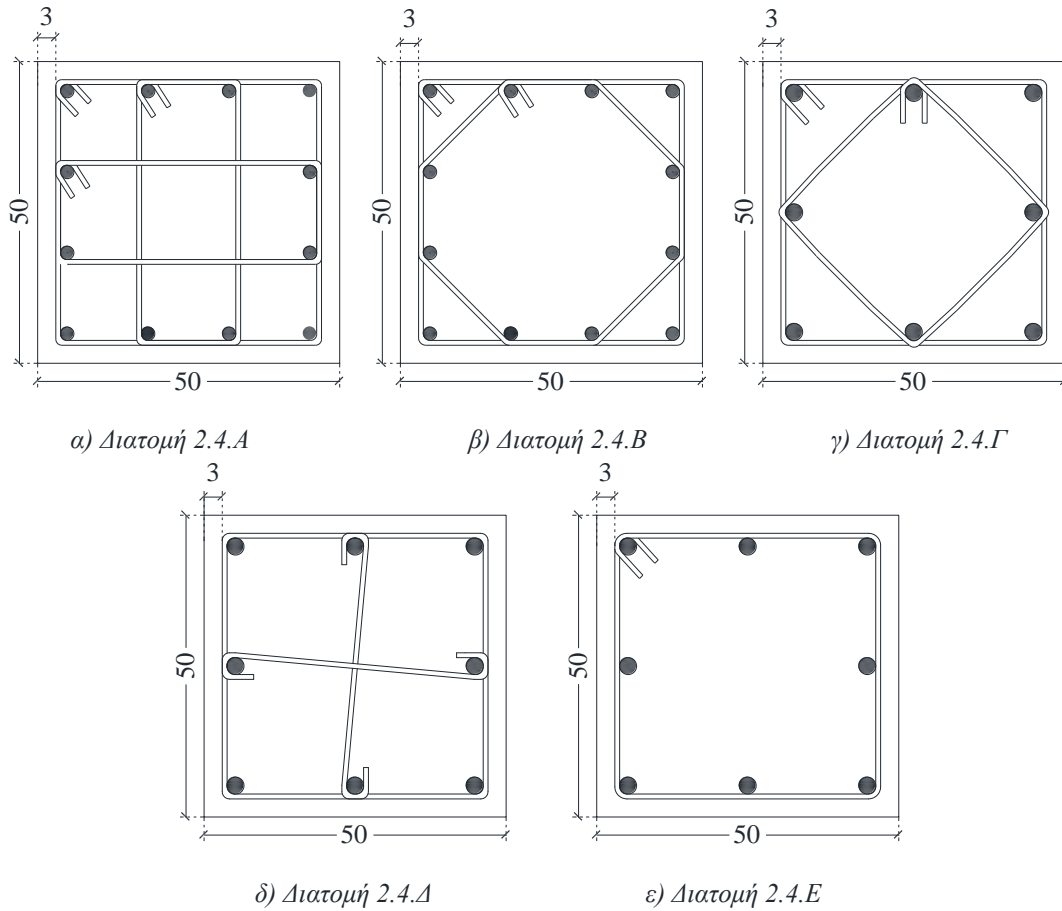
2.2 Εγκάρσιος οπλισμός

2.2.1 Μορφή συνδετήρα

Για την παραμετρική διερεύνηση του τύπου του συνδετήρα θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών, με διαστάσεις: 50 X 50 (cm x cm), επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 3 cm, ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho \approx 2\%$, συνδετήρες: Φ8/12.5 και υλικά: $f_c = 20MPa$ και $f_y = 500MPa$ με επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον **Πίνακα 2.3**.

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 2.4.

Όνομα	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός	
	Υλοποιούμενος με	Αριθμός τμήσεων	$\alpha\omega_w$
2.4.A	12 X Φ22	4.67	0.1288
2.4.B	12 X Φ22	3.66	0.1008
2.4.Γ	8 X Φ28	3.41	0.0835
2.4.Δ	8 X Φ28	3.00	0.0733
2.4.E	8 X Φ28	2.00	0.0312



Σχήμα 2.12 Σχήματα Διατομών 2.4.A - 2.4.Δ.

Η παράπλευρη πίεση που ασκούν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα, έχει την μεγαλύτερη τιμή της στη διατομή 2.4.A δηλ. $p/f_c = 0.064$. Εάν θεωρήσουμε ότι αυτός ο λόγος p/f_c είναι μια απαίτηση και για τις άλλες διατομές (2.4.B - 2.4.E), ο μόνος τρόπος να τον πετύχουμε χωρίς βεβαίως να αλλάξουμε τη μορφή των συνδετήρων (όπως αυτοί φαίνονται στο **Σχήμα 2.12**), είναι να πυκνώσουμε τις καθ' ύψος αποστάσεις τους (**Πίνακας 2.4**). Παρατηρούμε εδώ, ότι στην ακραία περίπτωση

Πίνακας 2.4

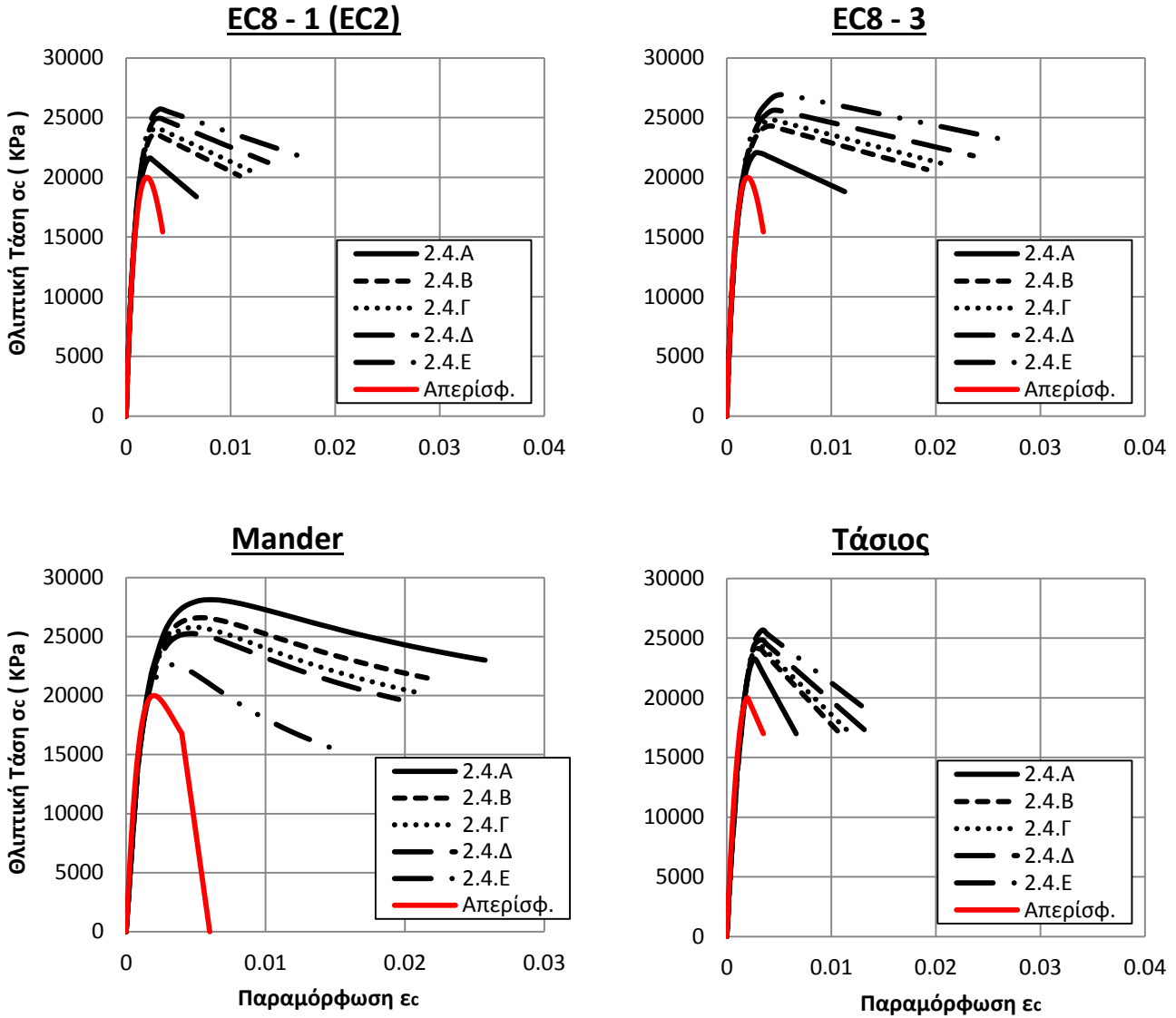
$p/f_c = 0.064$		
Όνομα	Εγκάρσιος οπλισμός	
	Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων
2.4.A	Φ8/12.5	4.67
2.4.B	Φ8/10.5	3.66
2.4.Γ	Φ8/9	3.41
2.4.Δ	Φ8/8	3.00
2.4.E	Φ8/4	2.00

της διατομής 2.4.E (εκτός κανονισμών) πρέπει να τοποθετηθούν συνδετήρες σε αποστάσεις 4cm μεταξύ τους, κάτι που θα είχε πολλές πρακτικές δυσκολίες. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν μετράει μόνον το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού μιας διατομής αυτό κάθε αυτό, αλλά μετράει και ο τρόπος που θα τοποθετήσουμε και θα αξιοποιήσουμε τους συνδετήρες.

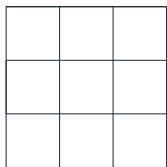
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)

Μέσω των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων, για όλες τις εξεταζόμενες διατομές (**Σχήμα 2.13**), καθώς και του **Πίνακα 2.4**, φαίνεται πόσο σημαντική είναι η επιρροή όχι μόνον του απόλυτου ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού, αλλά και του αριθμού των ενεργών σκελών (ή αλλιώς των τμήσεων κατά x και y) που συμμετέχουν στην περίσφιγξη μιας διατομής. Αυτό είναι λογικό, καθώς όσο αυξάνονται οι γωνίες των τσακισμένων συνδετήρων που συγκρατούν τα διαμήκη σίδερα, τόσο χαμηλώνουν οι θόλοι (ή αλλιώς οι παραβολές) του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, ενώ παράλληλα μεγαλώνει και ο αριθμός των αντιδράσεων πλήρους περίσφιγξης από τον εγκάρσιο οπλισμό.

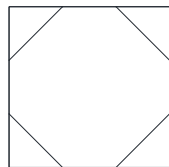
Σε αυτή τη διερεύνηση οι αποστάσεις των συνδετήρων είναι σταθερές ($s = 12.5cm$) οπότε οι όποιες διαφορές είναι αποτέλεσμα μόνον του τύπου των συνδετήρων. Εδώ παρατηρείται σχετικά μεγάλη διαφοροποίηση της διατομής 2.4.E έναντι των υπολοίπων, λόγω της ύπαρξης ενός μονού τετραγωνικού συνδετήρα μέσω του οποίου, περισφίγγεται ολόκληρη η διατομή (διαστάσεις 50X50). Η παραμόρφωση αστοχίας της διατομής 2.4.E είναι από 2 έως και 3 φορές μικρότερη της αντίστοιχης παραμόρφωσης της διατομής 2.4.A, εκτός από το μοντέλο του Mander στο οποίο οι διαφορές είναι (αναμενόμενα) μικρότερες. Αυτό δικαιολογείται από τη σχέση υπολογισμού της τροποποιημένης παραμόρφωσης ϵ_{cu}^* κατά Paulay & Priestley (**Σχέση 1.29B**) η τιμή της οποίας παραμένει επαρκής ακόμα και για μικρή αποδοτικότητα περίσφιγξης.



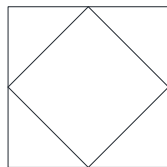
Σχήμα 2.13 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για όλες τις εξεταζόμενες διατομές 2.4.



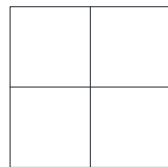
α) Διατομή 2.4.Α



β) Διατομή 2.4.Β



γ) Διατομή 2.4.Γ



δ) Διατομή 2.4.Δ



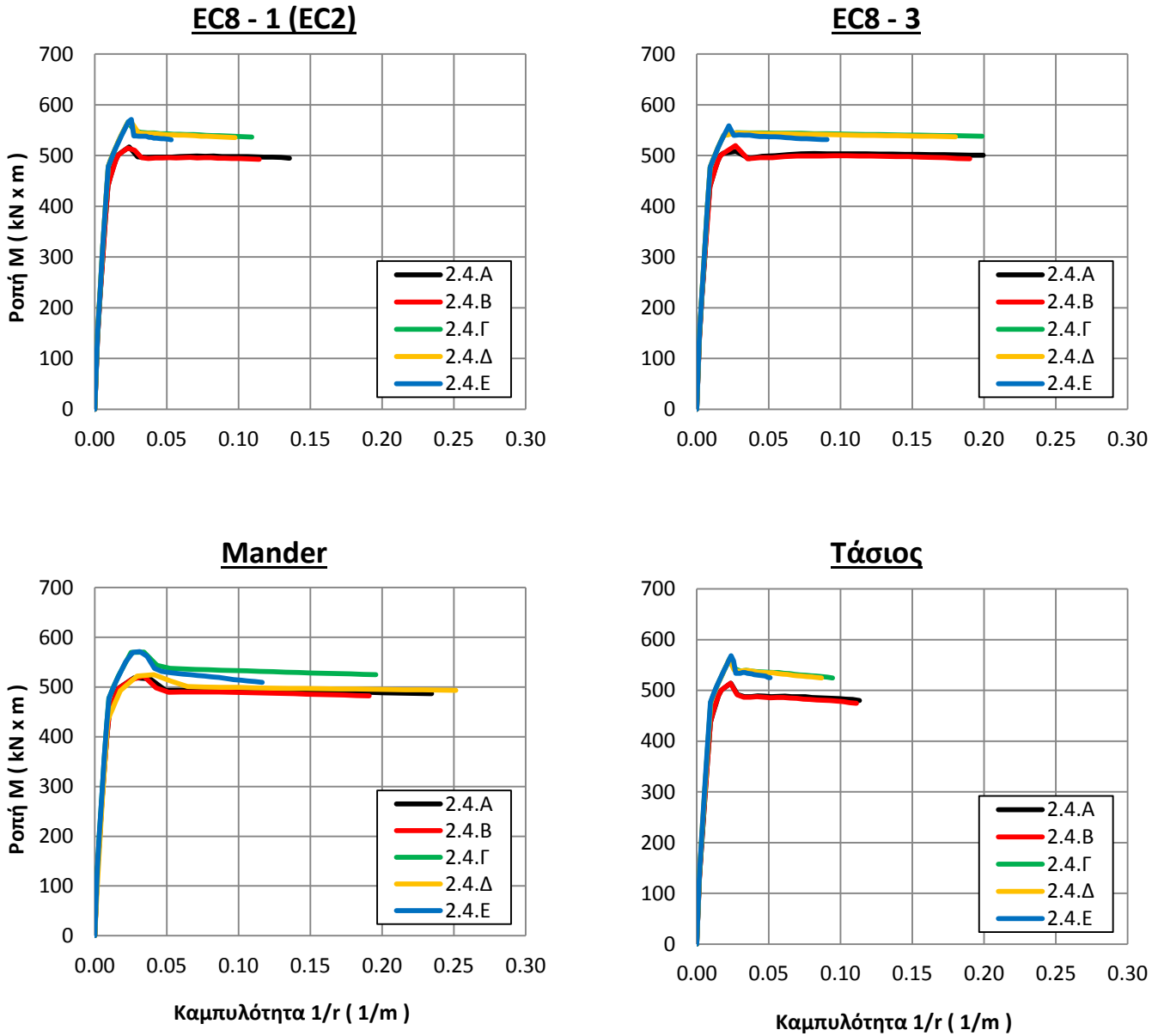
ε) Διατομή 2.4.Ε

Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$

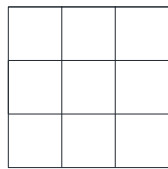
Η περίπτωση που η ανάλυση γίνεται με ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο $\nu = 0.4$, είναι εκείνη που μας δίνει τις πιο σαφείς και διακριτές διαφορές σε επίπεδο διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων, μεταξύ των εξεταζόμενων διατομών. Η συγκεκριμένη αξονική δύναμη "κατατάσσει" τις διατομές όσον αφορά την αποδοτικότητα τους (Σχήμα 2.15), όπως ακριβώς το κάνουν και τα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$. Είναι μια ρεαλιστική τιμή, ενώ παράλληλα επιτρέπεται από τον EC8 - 1, ακόμα και για απαιτήσεις υψηλής πλαστιμότητας. Παρατηρούμε δηλαδή, τον εξής διαχωρισμό μεταξύ των διατομών: Αρχικά, η διατομή 2.4.A παρουσιάζει μια σαφή υπεροχή μεταξύ των υπολοίπων, κάτι που δικαιολογείται από τον εμφανώς μεγαλύτερο αριθμό των ενεργών σκελών της. Από την άλλη, ο ίδιος λόγος έχει σαν αποτέλεσμα τη πολύ μικρή συγκριτικά καμπυλότητα αστοχίας της διατομής 2.4.E. Επιπρόσθετα, η ροπή αστοχίας της τελευταίας, παρουσιάζει μια μεγάλη πτώση σε σχέση με τη μέγιστη καμπτική αντοχή της -ιδιαίτερα στα προσομοιώματα του Mander και Τάσιου-, κάτι που δεν συμβαίνει στις υπόλοιπες διατομές. Το στοιχείο αυτό, μπορεί να έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία σε επίπεδο πλαστιμότητας όπως έχει προαναφερθεί.

Η περίπτωση που η ανάλυση γίνεται με ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο $\nu = 0.1$ δίνει σχετικώς πλασματικά αποτελέσματα, καθώς αφενός μπορεί να θεωρηθεί για τη διατομή 2.4.E -ιδίως σε κάποια μοντέλα- ότι προσφέρει επαρκείς τιμές καμπυλοτήτων αστοχίας (και άρα είναι επαρκώς οπλισμένη), αφετέρου, δεν υπάρχει σαφής διαφοροποίηση μεταξύ των υπόλοιπων διατομών. Στην πρώτη περίπτωση, η αξονική δύναμη δεν έχει επαρκή τιμή για να "απογυμνώσει" τη διατομή και να δείξει τις αδυναμίες της περισφιγξής της. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου οι διατομές 2.4.A έως 2.4.Δ παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές μεταξύ τους, συμβαίνει πρόωρη αστοχία του εφελκόμενου χάλυβα που δεν επιτρέπει στο περισφιγμένο σκυρόδεμα να φτάσει σε παραμόρφωση ϵ_{cu}^* .

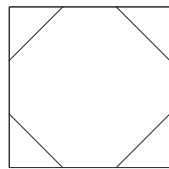
Για $\nu = 0.8$, είναι προφανές ότι η καμπυλότητα αστοχίας των διατομών (ακόμα και της 2.4.A) πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές, ενώ συνδυάζεται και μια σημαντική πτώση της ροπής M_u κυρίως σε μέτρια περισφιγμένες διατομές και σε προσομοιώματα που προβλέπουν μεγάλη πτώση της αντοχής του πυρήνα μέχρι την αστοχία (π.χ. Τάσιος). Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι η διατομή 2.4.E κρίνεται τελείως ακατάλληλη εφόσον ακόμα και στο λιγότερο συντηρητικό μοντέλο του Mander, η πτώση της καμπτικής αντοχής της στον μετελαστικό κλάδο μέχρι την αστοχία είναι πολύ μεγάλη (η ροπή τείνει στο 0).



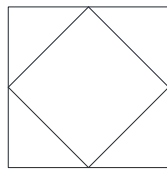
Σχήμα 2.14 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές 2.4 με $\nu=0.1$.



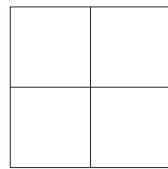
α) Διατομή 2.4.A



β) Διατομή 2.4.B



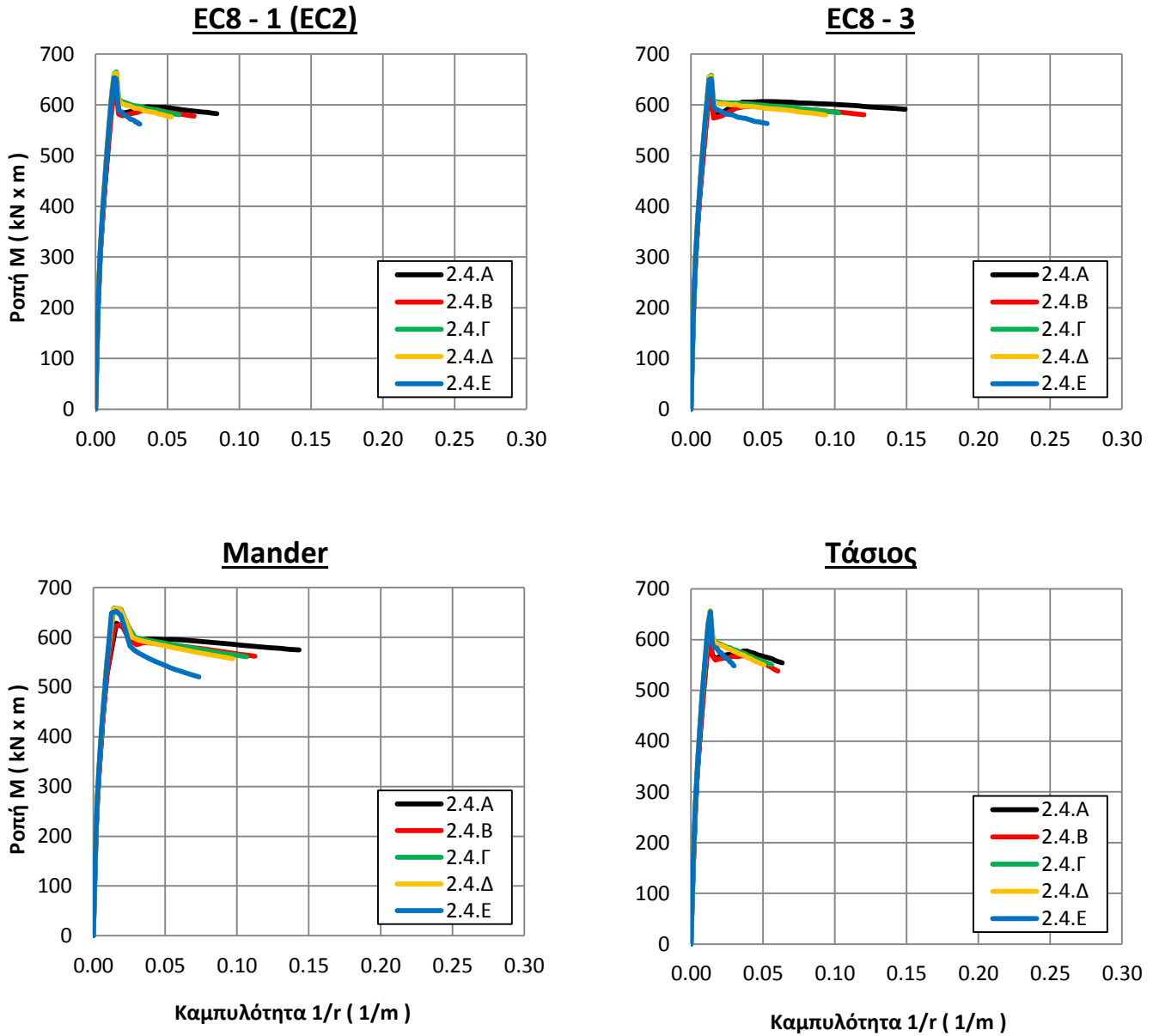
γ) Διατομή 2.4.Γ



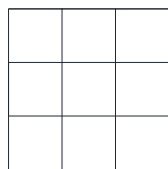
δ) Διατομή 2.4.Δ



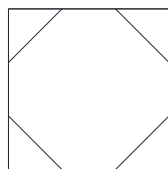
ε) Διατομή 2.4.E



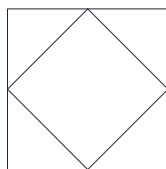
Σχήμα 2.15 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές 2.4 με $\nu=0.4$.



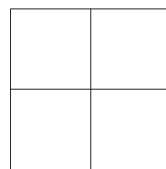
α) Διατομή 2.4.A



β) Διατομή 2.4.B



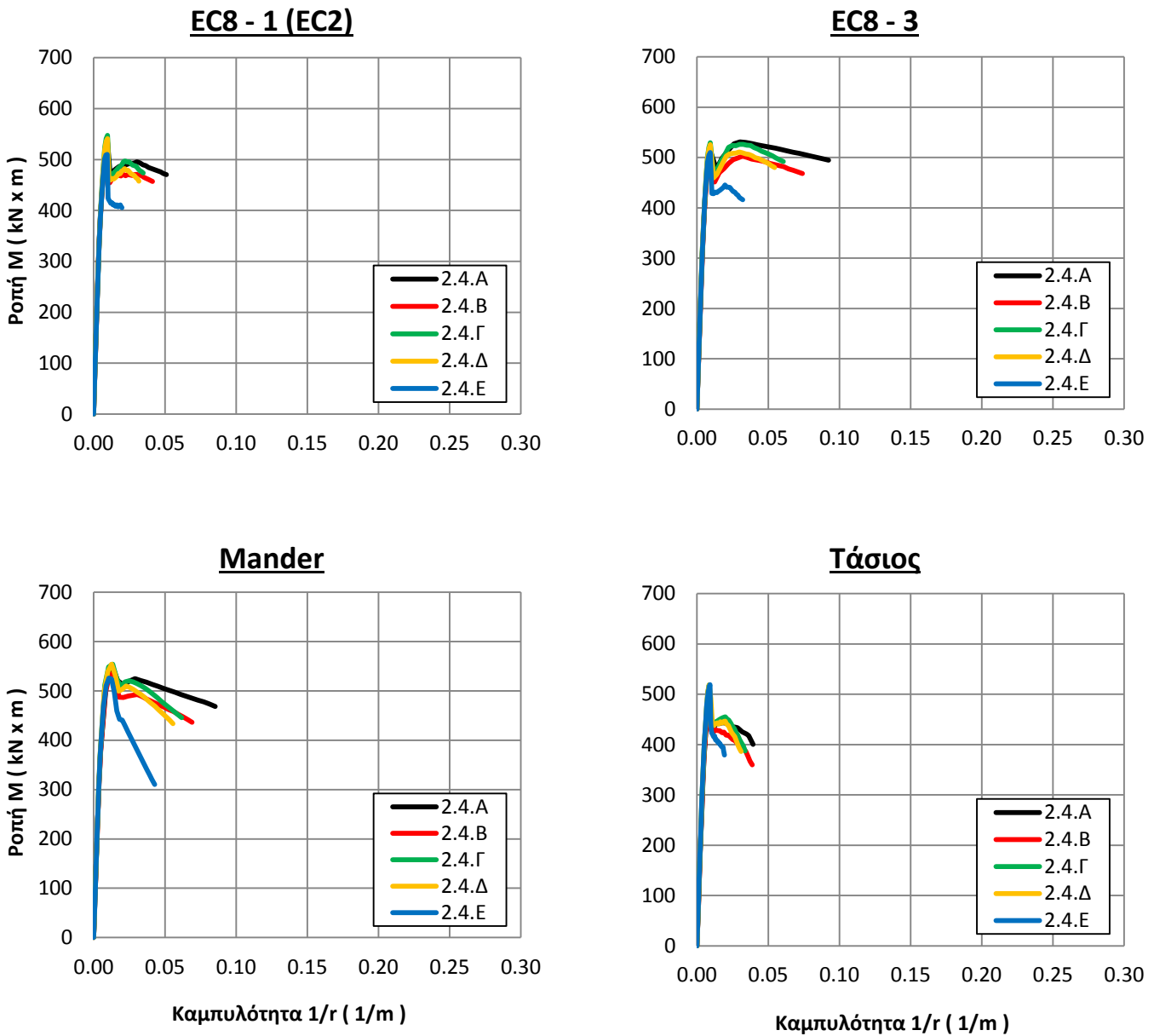
γ) Διατομή 2.4.Γ



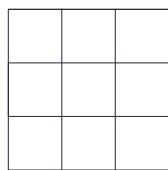
δ) Διατομή 2.4.Δ



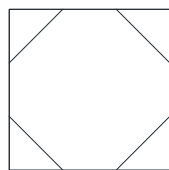
ε) Διατομή 2.4.E



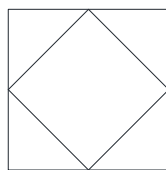
Σχήμα 2.16 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές 2.4 με $\nu=0.8$.



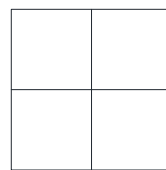
α) Διατομή 2.4.Α



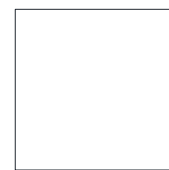
β) Διατομή 2.4.Β



γ) Διατομή 2.4.Γ

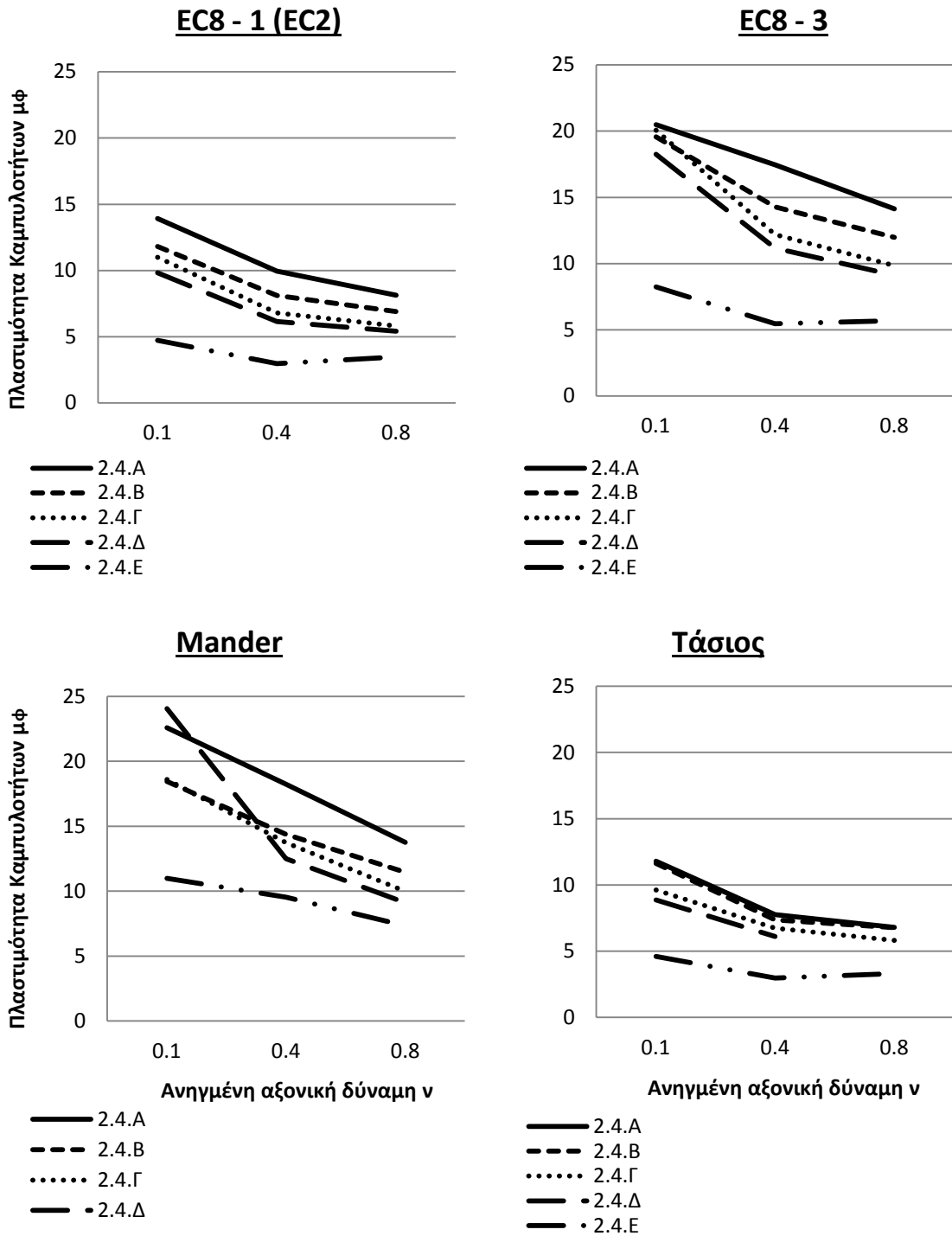


δ) Διατομή 2.4.Δ

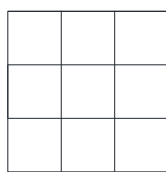


ε) Διατομή 2.4.Ε

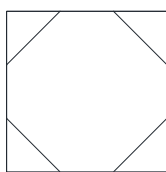
Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων $\mu\phi$



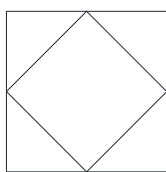
Σχήμα 2.17 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ανηγμένων αξονικών δυνάμεων για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές 2.4.



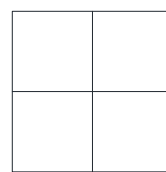
α) Διατομή 2.4.A



β) Διατομή 2.4.B



γ) Διατομή 2.4.G



δ) Διατομή 2.4.D



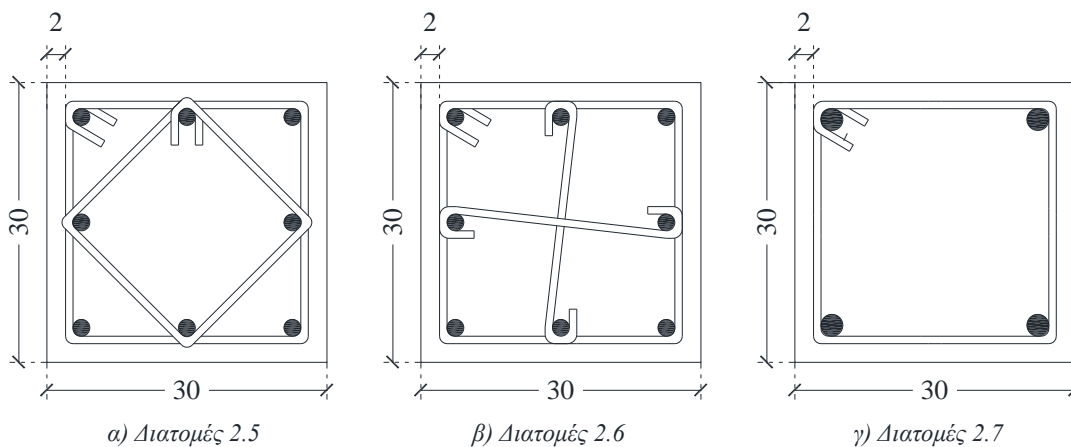
ε) Διατομή 2.4.E

Οι προσφερόμενες πλαστιμότητες καμπυλοτήτων των εξεταζομένων διατομών όπως αυτές φαίνονται στο **Σχήμα 2.17**, επιβεβαιώνουν την εικόνα και τα συμπεράσματα που εξηγάγαμε από τα διαγράμματα $M - (1/r)$. Και εδώ φαίνεται ξεκάθαρα σε επίπεδο πλαστιμότητας μ_φ πλέον, η υπεροχή της διατομής 2.4.A όπως αντίστοιχα και η ανεπάρκεια της 2.4.E. Παρατηρούμε ακόμα, ότι στην περίπτωση τοποθέτησης 2 συνδετήρων, είναι προτιμότερη η διάταξη 2.4.B από την 2.4.Γ, καθώς το σχήμα του οκταγωνικού συνδετήρα προσφέρει τη δυνατότητα τοποθέτησης μεγαλύτερου αριθμού "πιασμένων" διαμήκων ράβδων έναντι του ρομβοειδούς συνδετήρα ενώ παράλληλα μειώνεται και το μήκος των κεκλιμένων τμημάτων του. Αυτό έχει φυσικά ευεργετικά αποτελέσματα στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης καθώς χαμηλώνουν οι θόλοι της παραβολής.

Εάν θελήσουμε η διατομή μας να έχει μια ελάχιστη πλαστιμότητα $\mu_\varphi = 8$ που είναι μια εύλογη τιμή βάση τον EC8 μέρος 1 (για σχεδιασμό), τότε θα δούμε από το διάγραμμα 2.4 του EC2 (ή αλλιώς EC8 μέρος 1) ότι μόνον η διατομή 2.4.A και οριακά η διατομή 2.4.B μπορούν να προσφέρουν αντίστοιχες τιμές, για μέτρια και επιτρεπτά θλιπτικά αξονικά φορτία ($\nu = 0.4$). Βεβαίως, εδώ θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η διγραμμικοποίηση του διαγράμματος $M - (1/r)$, δεν έχει γίνει ακριβώς όπως ορίζει ο EC8 μέρος 1, ούτε βέβαια έχουν ληφθεί υπόψη οι συντελεστές ασφαλείας. Ωστόσο, μέσω των διαγραμμάτων του **Σχήματος 2.17**, έχουμε μια γενική αλλά σαφή εικόνα των λόγων για τους οποίους οι κανονισμοί θέτουν αυστηρά όρια σε αποστάσεις (π.χ. διαμήκων σιδέρων) ή σε λεπτομέρειες όπλισης των διατομών ιδιαίτερα όταν απαιτούμε αυξημένες τιμές πλαστιμότητας μ_φ από αυτές.

2.2.2 Αποστάσεις συνδετήρων

Για την παραμετρική διερεύνηση των αποστάσεων s των συνδετήρων θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών, με διαστάσεις: 30 X 30 (cm x cm), επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm, ποσοστό διαμήκουσ οπλισμού $\rho \approx 2.2\%$ και υλικά: $f_c = 20MPa$ και $f_y = 500MPa$ με τα επιπλέον χαρακτηριστικά τους να φαίνονται στον **Πίνακα 2.5**.

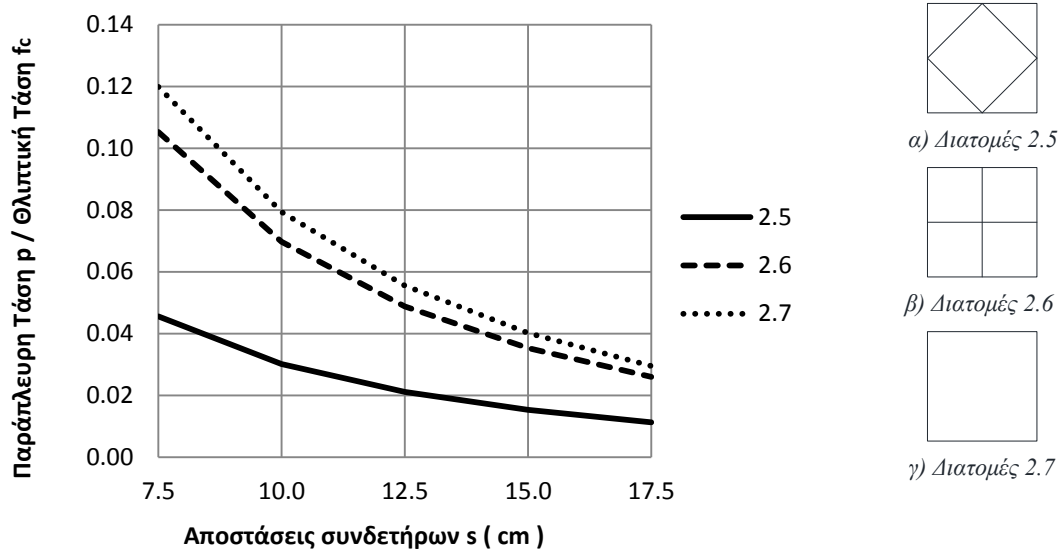


Σχήμα 2.18 Σχήματα Διατομών 2.5 - 2.6.

Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 2.5 - 2.6 - 2.7.

Όνομα	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
	Υλοποιούμενος με	Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
2.5.A	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2398
2.5.B	8 X Φ18	Φ8/10	3.41	0.1587
2.5.Γ	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.41	0.1111
2.5.Δ	8 X Φ18	Φ8/15	3.41	0.0803
2.5.E	8 X Φ18	Φ8/17.5	3.41	0.0590
2.6.A	8 X Φ18	Φ8/7.5	3	0.2107
2.6.B	8 X Φ18	Φ8/10	3	0.1395
2.6.Γ	8 X Φ18	Φ8/12.5	3	0.0977
2.6.Δ	8 X Φ18	Φ8/15	3	0.0706
2.6.E	8 X Φ18	Φ8/17.5	3	0.0519
2.7.A	4 X Φ 25	Φ8/7.5	2	0.0911
2.7.B	4 X Φ 25	Φ8/10	2	0.0603
2.7.Γ	4 X Φ 25	Φ8/12.5	2	0.0422
2.7.Δ	4 X Φ 25	Φ8/15	2	0.0305
2.7.E	4 X Φ 25	Φ8/17.5	2	0.0224

Αποδοτικότητα περίσφιξης



Σχήμα 2.19 Διάγραμμα $p/f_c - s$ για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

Το διάγραμμα $p/f_c - s$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.19**, επιβεβαιώνει τη σημασία που έχει η καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων στην παράπλευρη πίεση p που ασκείται στο σκυρόδεμα. Διαπιστώνουμε μια παραβολική σχέση μεταξύ του λόγου p/f_c και της απόστασης s και για τους 3 τύπους των διατομών. Μια ακόμη παρατήρηση, έχει να κάνει με την πιο απότομη "πτώση" της παραβολής των διατομών 2.5 και 2.6 σε σχέση με τις 2.7, αυξανόμενων των αποστάσεων των συνδετήρων. Δηλαδή, βλέπουμε ότι όσο και αν μειωθούν οι αποστάσεις s , η διατομή 2.7 με τον μονό τετραγωνικό συνδετήρα (2 ενεργά σκέλη) έχει περιορισμένες δυνατότητες στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι η διατομή 2.7.A ($s = 7.5cm$) παρέχει την ίδια παράπλευρη πίεση με τη διατομή 2.5.Δ ($s = 15cm$)!

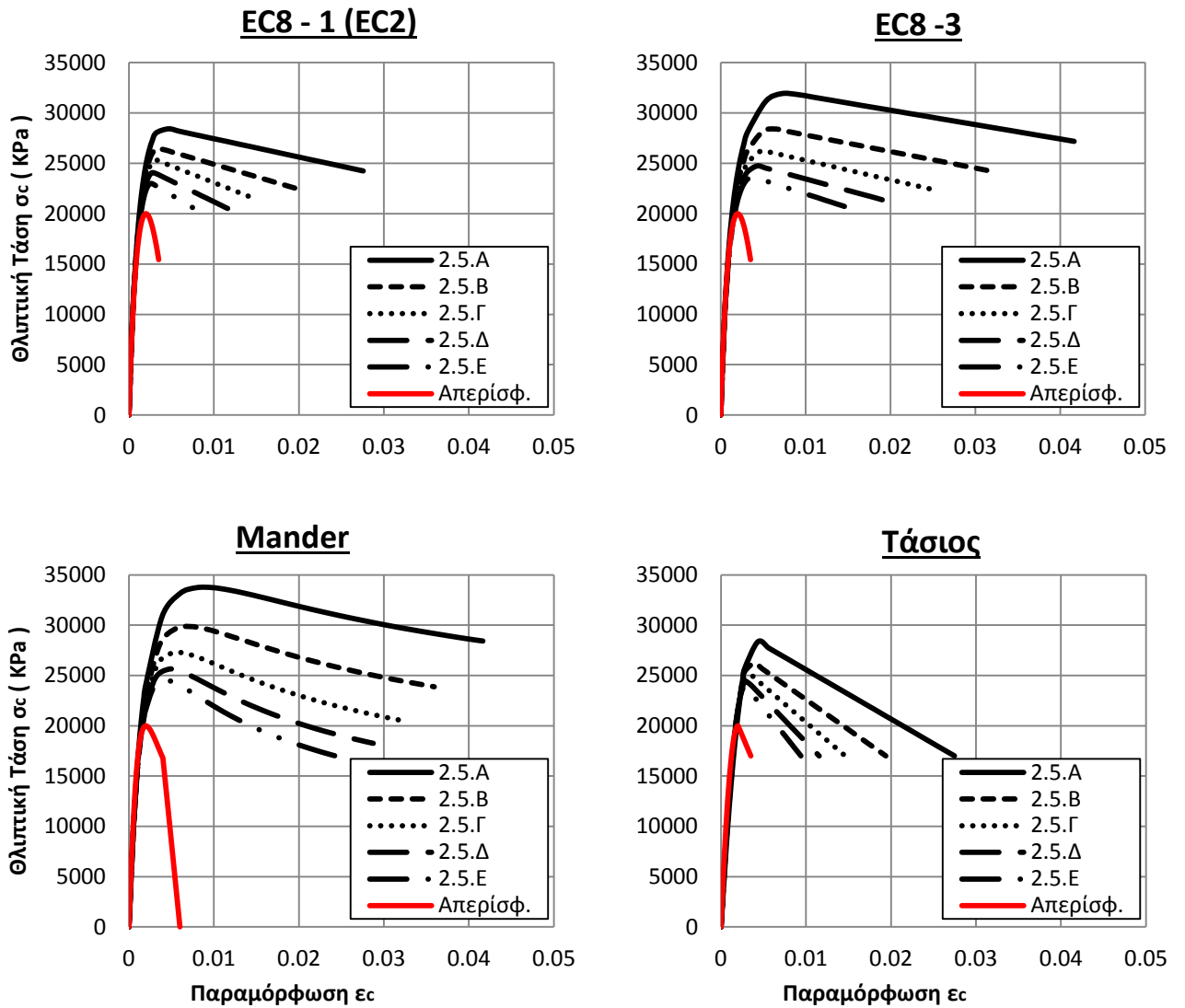
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)

Παρότι οι διατομές 2.5 έχουν αρκετά ικανό αριθμό ενεργών σκελών κατά x και κατά y (3.41) τηρουμένων των εξωτερικών τους διαστάσεων (30 X 30), το μεγάλο εύρος των αποστάσεων στη συγκεκριμένη διερεύνηση, δημιουργεί πολύ σημαντικές διαφορές στα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$ (**Σχήμα 2.20**). Με την σταθερή μείωση των αποστάσεων s παρατηρούμε μια αυξανόμενη αύξηση των τροποποιημένων μέγιστων τάσεων f_c^* και παραμορφώσεων ϵ_{cu}^* . Διαπιστώνουμε ότι η παραμόρφωση αστοχίας της διατομής 2.5.A είναι 2 ή και 3 φορές μεγαλύτερη της αντίστοιχης παραμόρφωσης της 2.5.E (Τα 2 ακραία παραδείγματα των διατομών 2.5) σε όλα τα προσομοιώματα εκτός του Mander -όπως άλλωστε συνέβαινε και στις προηγούμενες διερευνήσεις-.

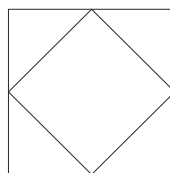
Αναμενόμενα, μικρότερες είναι οι διαφορές που προέκυψαν στα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων μεταξύ των διατομών 2.6 (**Σχήμα 2.21**), απ' ότι πριν. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα τονισμένο στο προσομοίωμα του Τάσιου, όπου οι διαφοροποιήσεις στα μοντέλα είναι σχετικά μικρές όταν το s παίρνει τιμές από 12.5 έως 17.5cm.

Όντας στην ίδια κλίμακα όλα τα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$, μπορούμε με δυσκολία πλέον να διακρίνουμε τις διαφορές μεταξύ των καμπυλών που αφορούν τις διατομές 2.7 (**Σχήμα 2.21**). Ο λόγος γι' αυτό, πρέπει να αναζητηθεί στις μόνον 4 γωνίες του τετραγωνικού συνδετήρα που αδυνατούν να προσφέρουν επαρκείς αντιδράσεις περίσφιγξης ακόμα και με μικρές αποστάσεις s . Κατ' εξαίρεση, στο μοντέλο του Mander υπάρχει μια εμφανής διαφοροποίηση μεταξύ των διατομών 2.7 που οφείλεται στις αρκετά μεγαλύτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων σε σχέση με τα υπόλοιπα προσομοιώματα. Θα πρέπει τονίσουμε ωστόσο, ότι το μοντέλο του Mander είναι ένα γενικά μη συντηρητικό μοντέλο, αλλά και ειδικά, αρκετά ευνοϊκό για μέτρια περισφιγμένες διατομές (όπως οι διατομές 2.7).

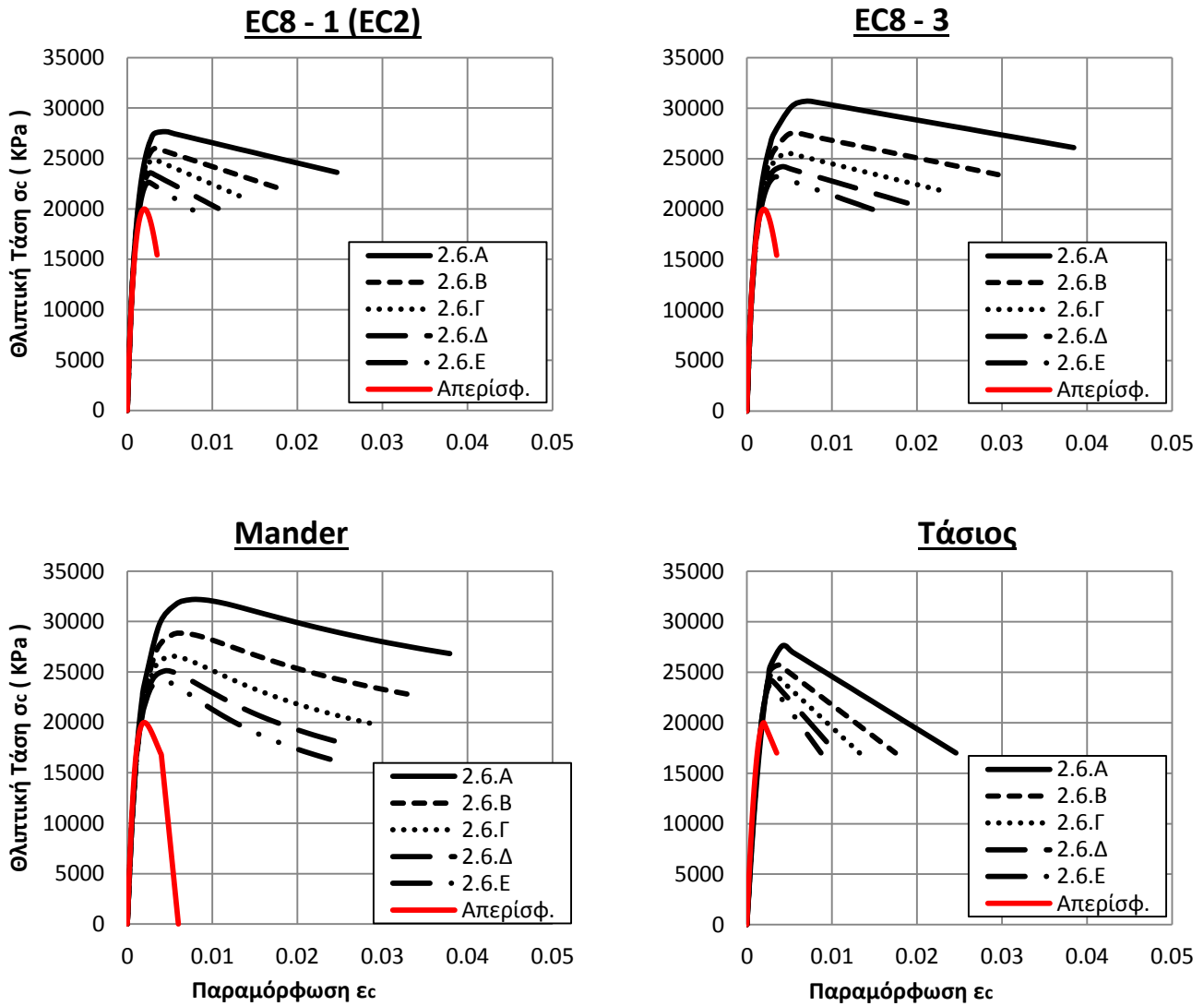
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)



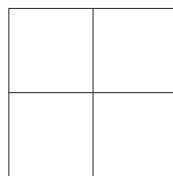
Σχήμα 2.20 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για τις Διατομές 2.5.



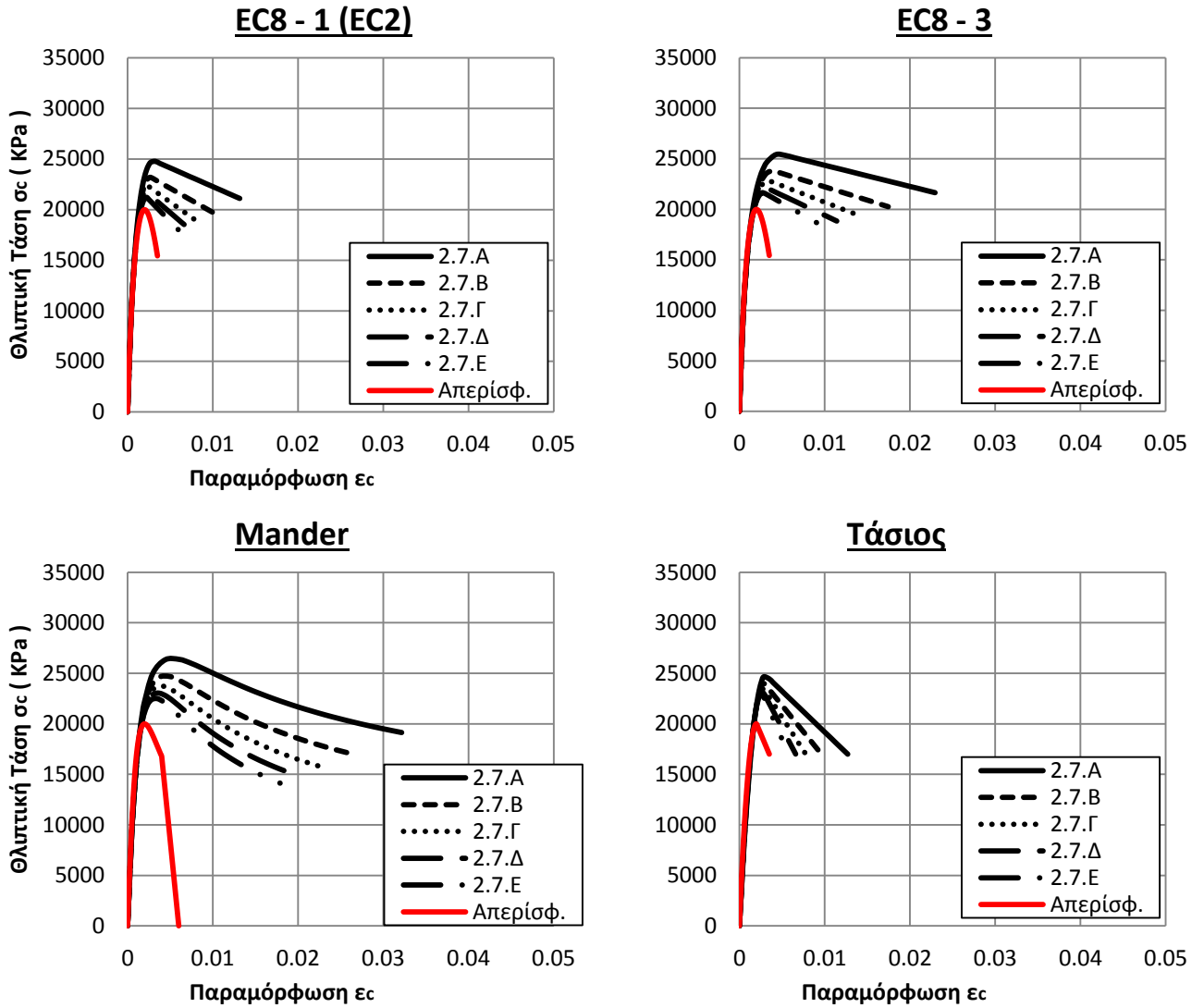
Διατομές 2.5



Σχήμα 2.21 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για τις Διατομές 2.6.



Διατομές 2.6

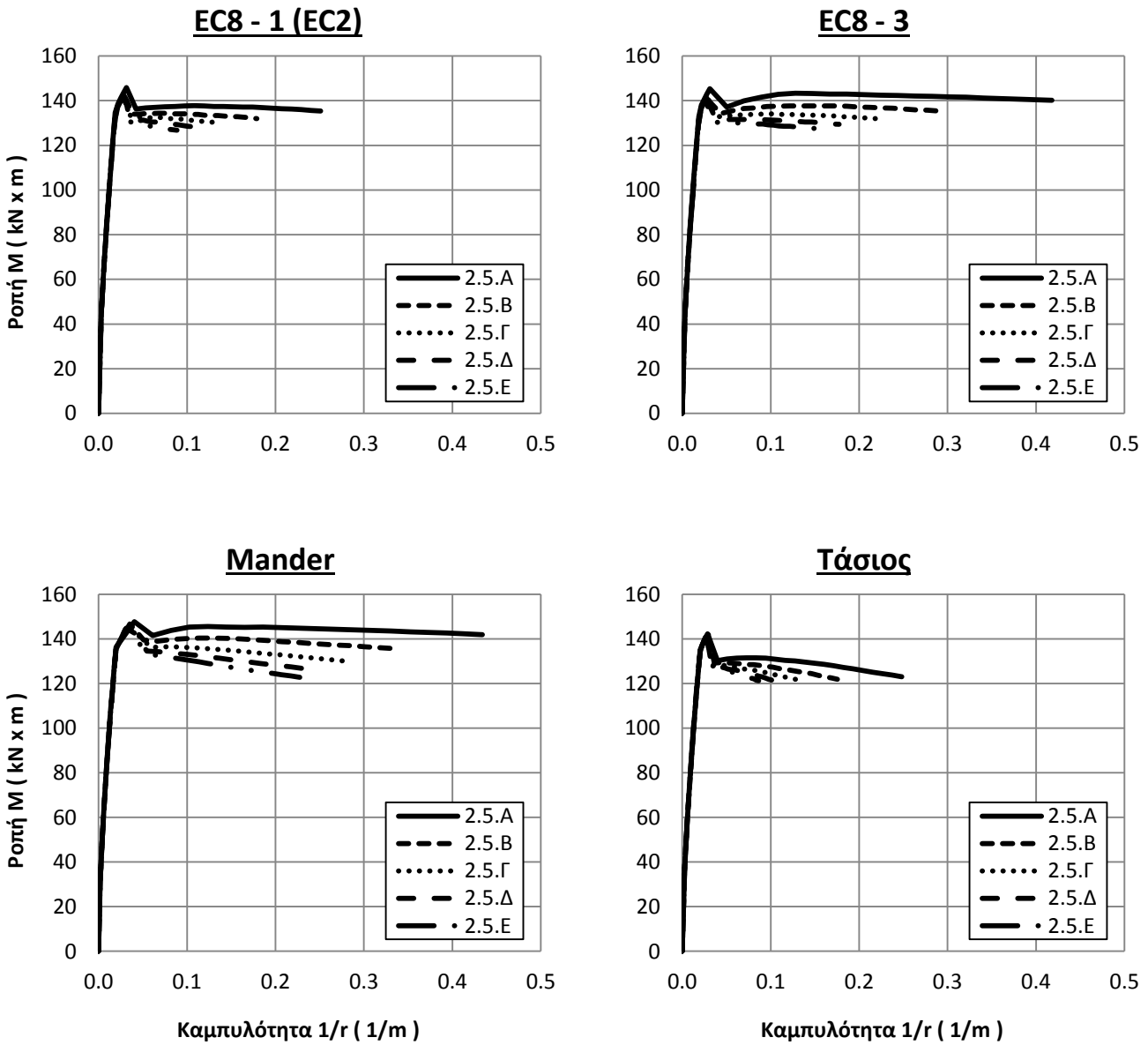


Σχήμα 2.22 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για τις Διατομές 2.7.

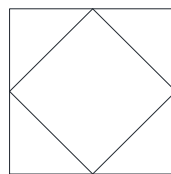


Διατομές 2.7

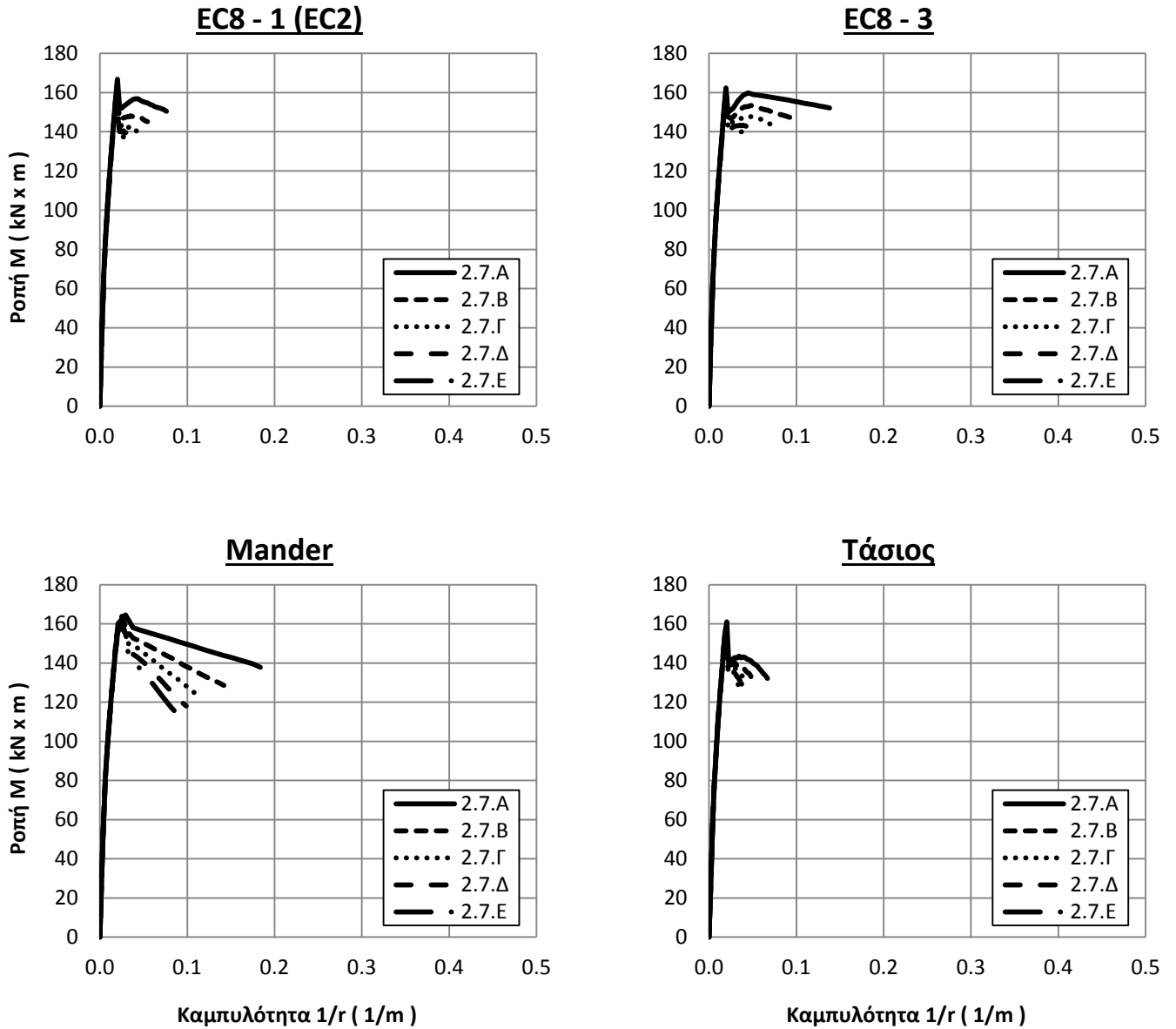
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$



Σχήμα 2.23 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για τις Διατομές 2.5 για $N=500$ kN .



Διατομές 2.5



Σχήμα 2.24 Διαγράμματα ροπών - καμυλοτήτων για τις Διατομές 2.7 για N=1000 kN.



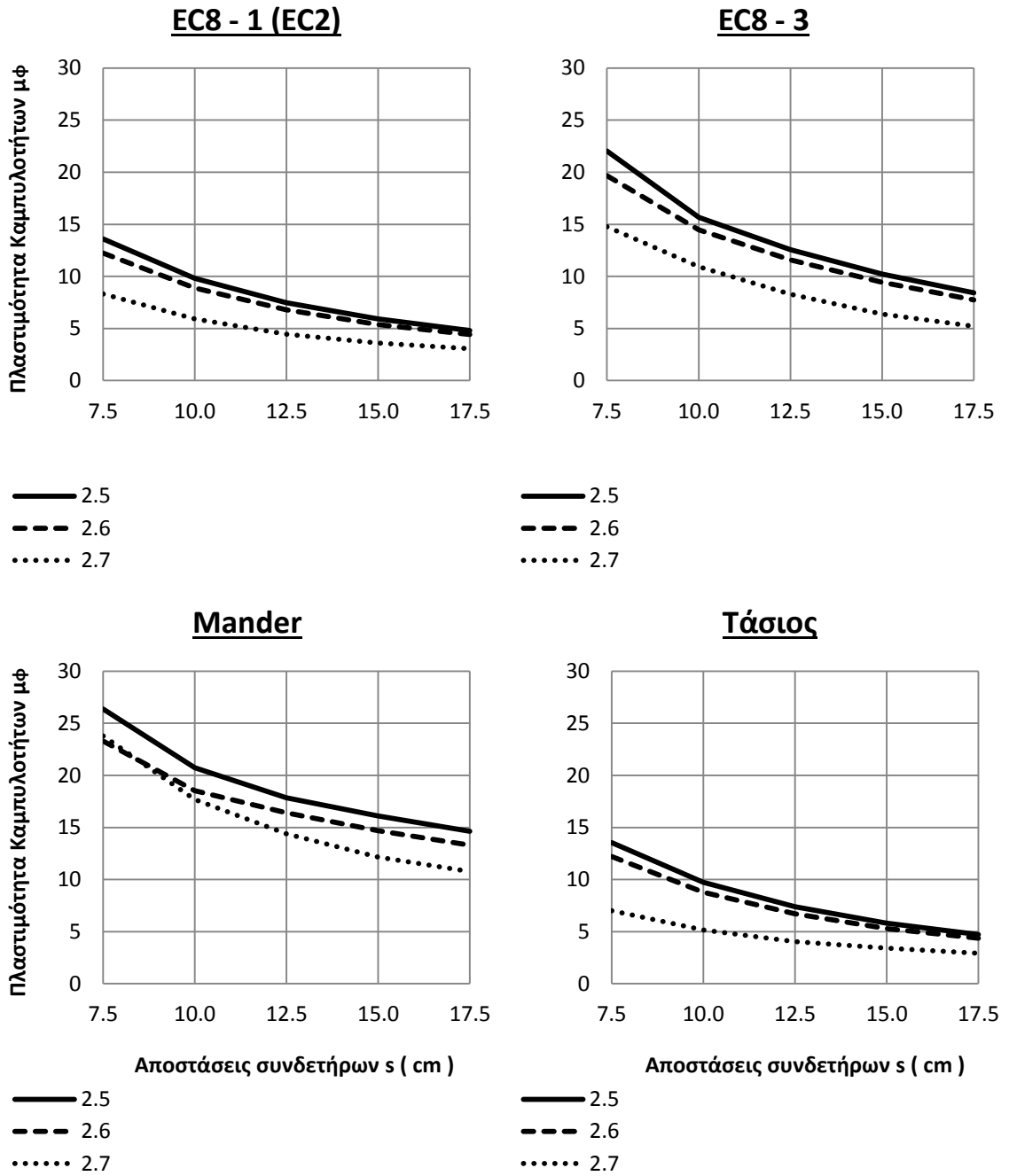
Διατομές 2.7

Στο **Σχήμα 2.23** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις διατομές 2.5 με ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο $\nu = 0.28$, ενώ αντίστοιχα τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων στο **Σχήμα 2.24** αναφέρονται στη διατομή 2.7 με $\nu = 0.55$. Χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα 2 χαρακτηριστικά παραδείγματα, καθώς μεταξύ τους υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις.

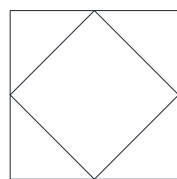
Παρατηρούμε στις διατομές 2.5 την "κλιμακωτή" μείωση των καμπυλοτήτων αστοχίας με τη σταθερή αύξηση των αποστάσεων s , ενώ παράλληλα υπάρχει και μια αισθητή μείωση των ροπών M_u καθώς μεταβαίνουμε από τη διατομή 2.5.A στην 2.5.E. Βεβαίως, τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τα προσομοιώματα του EC8 και Mander, είναι σαφώς πιο ευνοϊκά έναντι των υπολοίπων, με σημαντικές διαφοροποιήσεις (σε ορισμένες περιπτώσεις οι καμπυλότητες αστοχίας είναι περισσότερο από διπλάσιες). Ωστόσο, λόγω του διπλού συνδετήρα με τον οποίο είναι οπλισμένες οι διατομές 2.5 (τετραγωνικός και ρομβοειδής) και φυσικά της σχετικά μικρής τιμής της αξονικής δύναμης (αρκετά μεγάλης πάντως για να μην αστοχεί πρώτα ο εφελκόμενος χάλυβας), ακόμα και όταν το s μεγαλώνει πολύ, οι τιμές των ροπών και καμπυλοτήτων αστοχίας είναι "συγκρατημένα" χαμηλές.

Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με τις διατομές 2.7 σε συνδυασμό τώρα με μια αρκετά μεγαλύτερη, οριακά επιτρεπτή ωστόσο, αξονική δύναμη $N = 1000kN$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα (**Σχήμα 2.24**), διαπιστώνουμε ότι η μείωση των αποστάσεων s δεν είναι "πανάκεια" και δεν καλύπτει τις αδυναμίες που παρουσιάζει η όπλιση των διατομών 2.7. Επιβεβαιώνουμε δηλαδή, ότι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού ως απόλυτη τιμή, δεν πιστοποιεί και την επάρκεια σε αποδοτικότητα περίσφιξης. Όσον αφορά τις διατομές 2.6, όπως είδαμε και στα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$, βρίσκονται κάπου στη μέση σε σχέση με τις 2 παραπάνω, με αναμενόμενα αποτελέσματα και στις τιμές ροπών - καμπυλοτήτων.

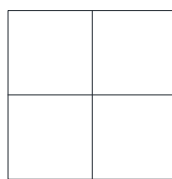
Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μ_ϕ & καμπυλότητες αστοχίας $(1/r)_u$



Σχήμα 2.25 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - αποστάσεων συνδετήρων s για όλες τις εξεταζόμενες διατομές για $N=500$ kN.



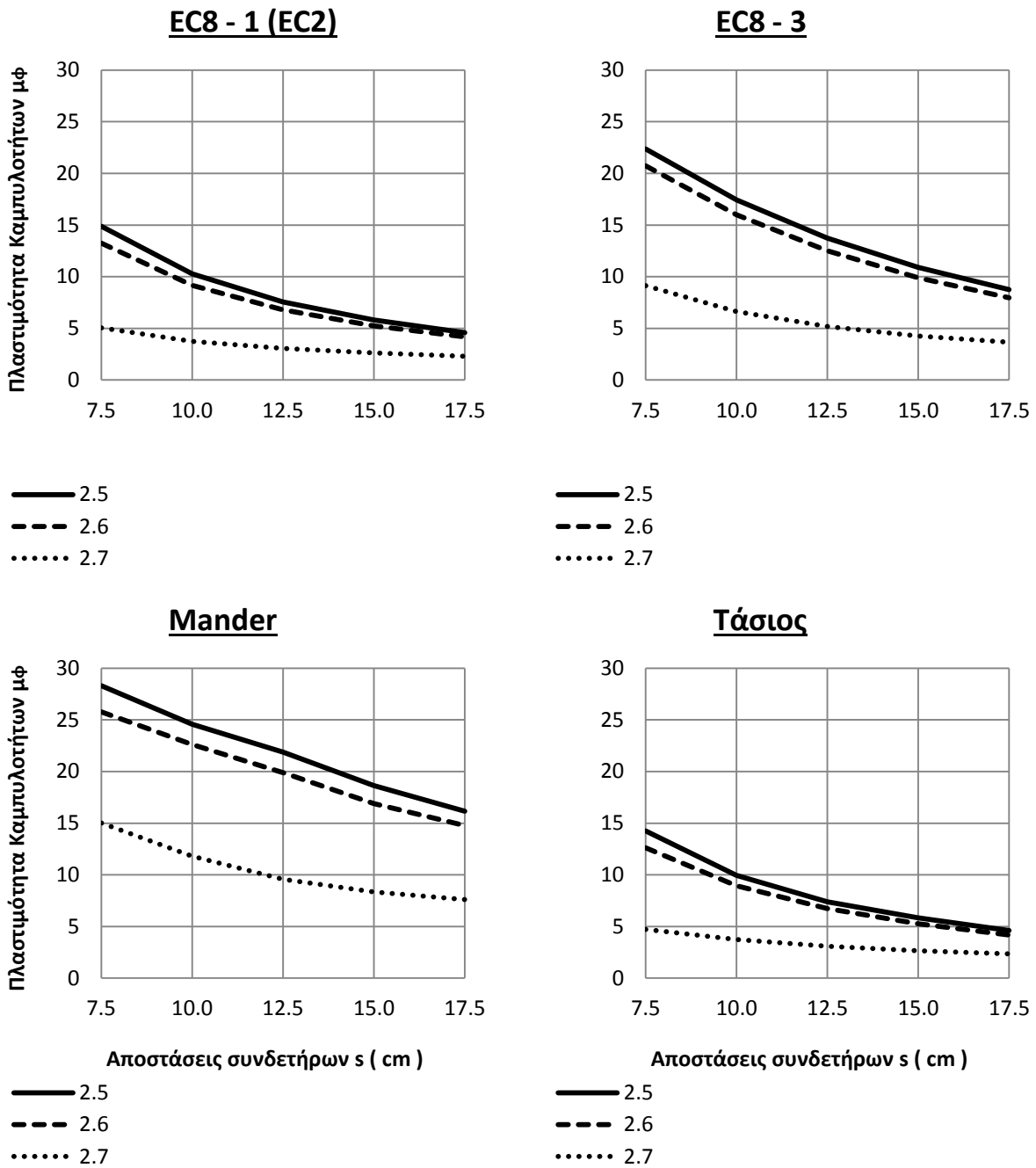
α) Διατομές 2.5



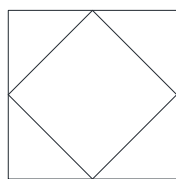
β) Διατομές 2.6



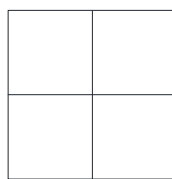
γ) Διατομές 2.7



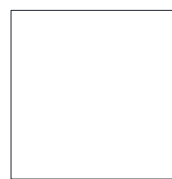
Σχήμα 2.26 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - αποστάσεων συνδετήρων s για όλες τις εξεταζόμενες διατομές για $N=1000$ kN.



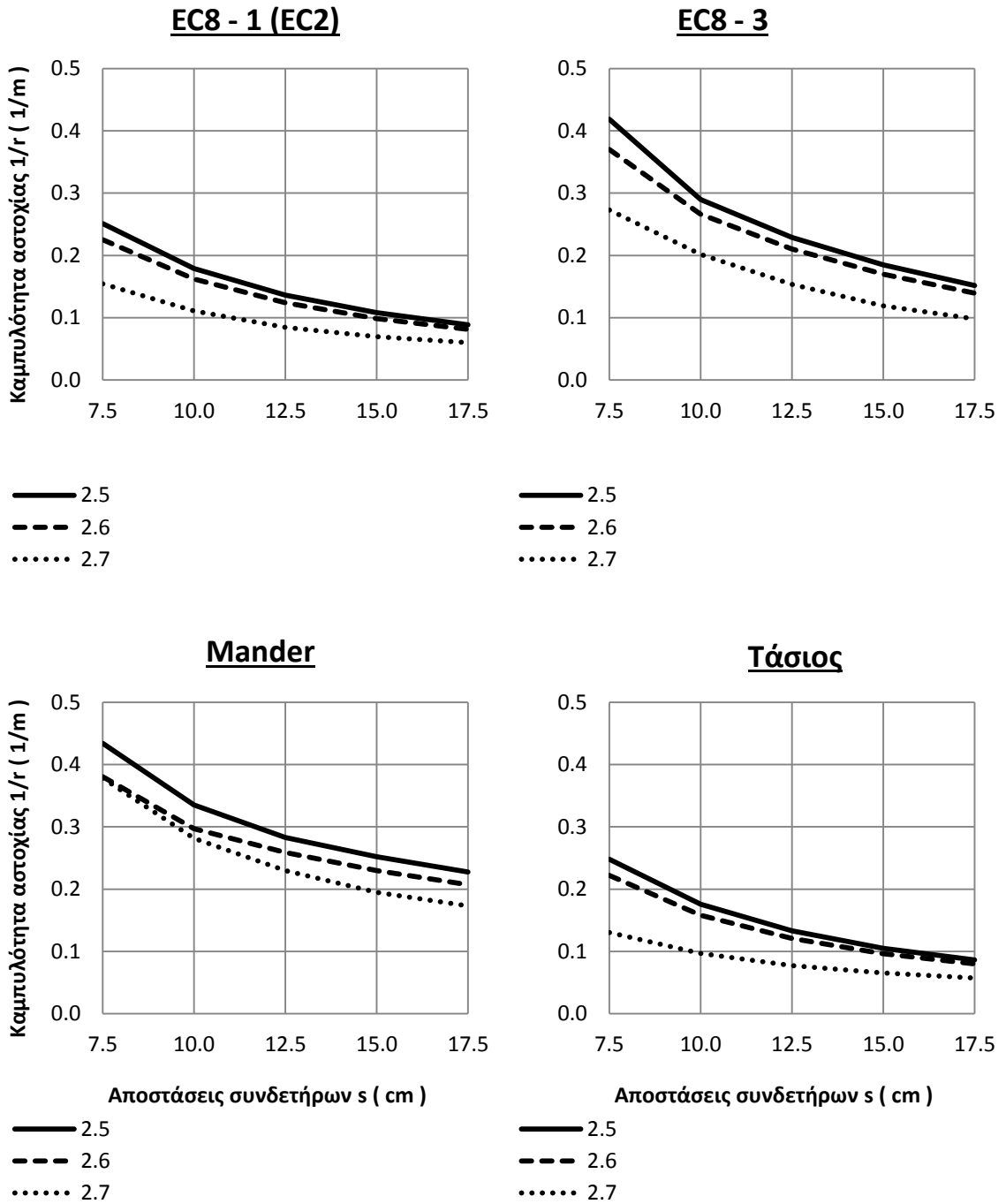
α) Διατομές 2.5



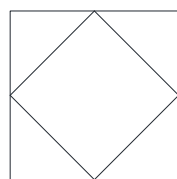
β) Διατομές 2.6



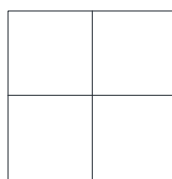
γ) Διατομές 2.7



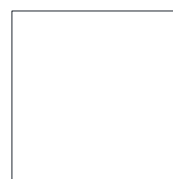
Σχήμα 2.27 Διαγράμματα καμπυλοτήτων αστοχίας - αποστάσεων συνδετήρων s για όλες τις εξεταζόμενες διατομές για $N=500$ kN.



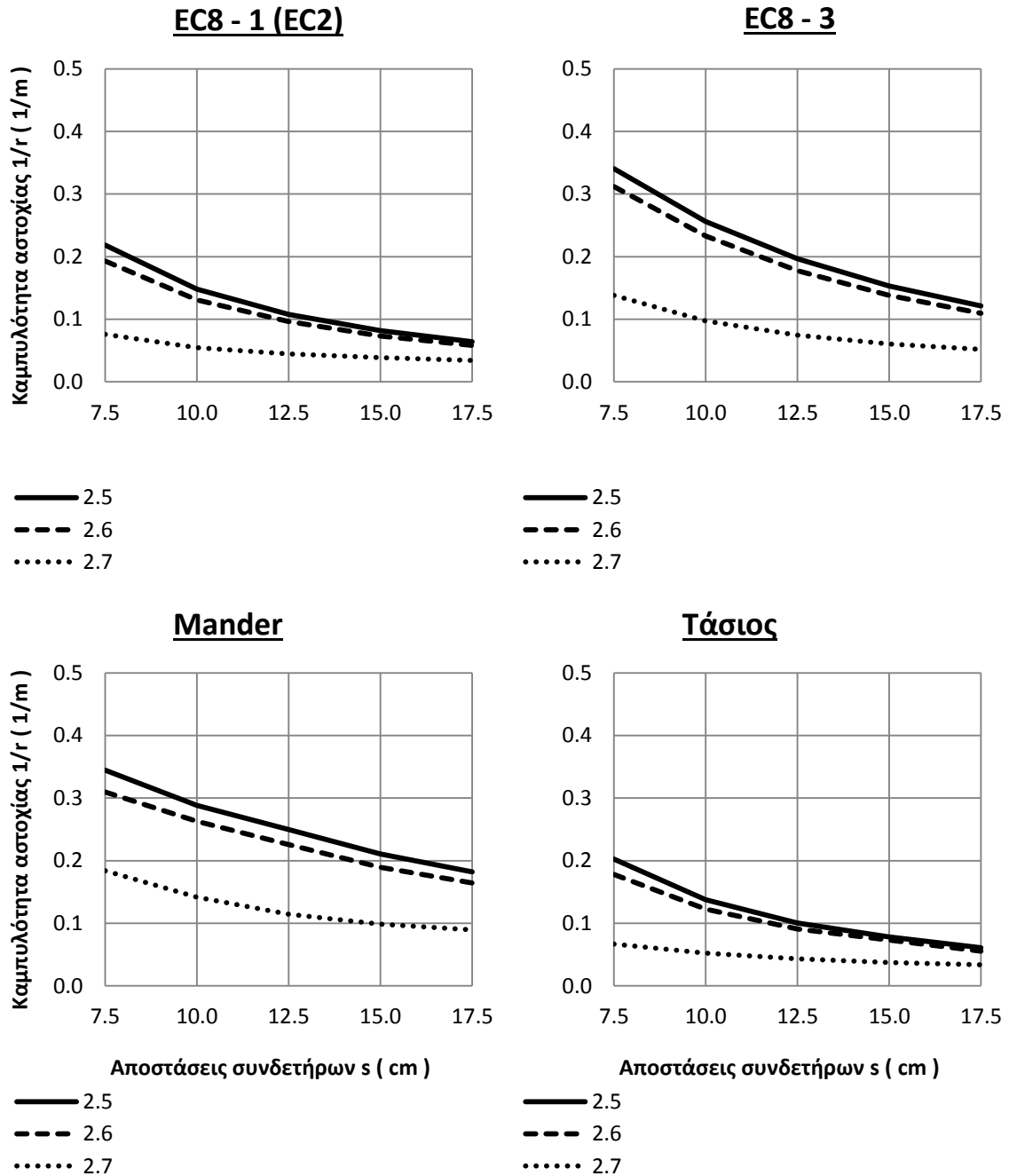
α) Διατομές 2.5



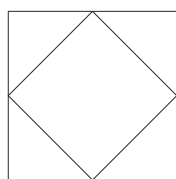
β) Διατομές 2.6



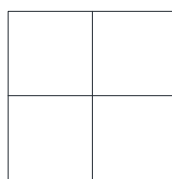
γ) Διατομές 2.7



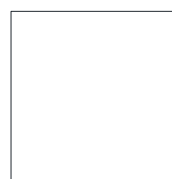
Σχήμα 2.28 Διαγράμματα καμπυλοτήτων αστοχίας - αποστάσεων συνδετήρων s για όλες τις εξεταζόμενες διατομές για $N=1000$ kN.



α) Διατομές 2.5



β) Διατομές 2.6



γ) Διατομές 2.7

Όπως φαίνεται και στα **Σχήματα 2.25** έως **2.28**, τόσο οι πλαστιμότητες μ_ϕ όσο και οι καμπυλότητες αστοχίας, παρουσιάζουν μια παραβολική σχέση με τις καθ' ύψος αποστάσεις s των συνδετήρων. Παρατηρούμε ότι στις διατομές 2.7, οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων επηρεάζονται πολύ έντονα καθώς μεταβάλλεται η τιμή του θλιπτικού αξονικού φορτίου. Βλέπουμε στο **Σχήμα 2.25**, ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στη διατομή 2.7 ($N=1000kN$) διαφοροποιείται εμφανώς από τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες διατομές κάτι που δεν συμβαίνει στην περίπτωση όπου $N=500kN$ (**Σχήμα 2.25**). Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε, ότι η ανηγμένη αξονική δύναμη $\nu=0.55$ είναι επιτρεπτή και στις απαιτήσεις υψηλής πλαστιμότητας από τον EC8. Άρα λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι, όταν μια διατομή είναι εγκάρσια οπλισμένη έτσι ώστε να έχει έναν ικανό αριθμό ενεργών σκελών ενώ παράλληλα οι αποστάσεις καθ' ύψος των συνδετήρων της είναι εύλογες, παρουσιάζει μια σταθερότητα στα αποτελέσματα των $M-(1/r)$ και των πλαστιμοτήτων σε σχέση με το εκάστοτε προσομοίωμα που εφαρμόζουμε και την αξονική με την οποία γίνεται η ανάλυση.

Ενδιαφέρον επίσης, παρουσιάζει η συσχέτιση των απαιτήσεων των κανονισμών (π.χ. EC8 μέρος 1) με τα αποτελέσματα από την παραμετρική διερεύνηση των αποστάσεων των διατομών. Στις κρίσιμες περιοχές των υποστυλωμάτων, ο EC8 μέρος 1, απαιτεί οι συνδετήρες να μην απέχουν καθ' ύψος περισσότερο από $10cm$. Εάν εμείς θελήσουμε η διατομή μας να έχει ελάχιστη τιμή πλαστιμοτήτων $\mu_\phi = 10$, μια τιμή που εύκολα μπορεί να προκύψει από τον EC8 μέρος 1, τότε από τα αποτελέσματα της διερεύνησης θα δούμε ότι: Στο προσομοίωμα του EC2 (δηλ. EC8 μέρος 1) η διατομή που καλύπτει οριακά την απαίτηση (και για τις 2 τιμές αξονικών δυνάμεων) είναι η 2.5.B (ρομβοειδής και τετραγωνικός συνδετήρας) με απόσταση $s=10cm$ όσο ακριβώς ορίζει και ο κανονισμός! Επίσης επαρκεί και η διατομή 2.6.A (τετραγωνικός και επιπλέον μονότμητος κατά x και κατά y , με $s=7.5cm$). Η διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων $M-(1/r)$ μπορεί να μην έχει γίνει ακριβώς όπως ορίζει ο EC8 - μέρος 1, ωστόσο δεν έχουμε μεγάλη πτώση της αντοχής κοντά στην αστοχία στις διατομές αυτές, ώστε να θεωρήσουμε ότι ο διαφορετικός τρόπος διγραμμικοποίησης θα επιφέρει διαφοροποιημένα και ενδεχομένως εσφαλμένα αποτελέσματα.

Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τις διαφορές μεταξύ των παραπάνω προσομοιωμάτων και στην πράξη, αρκεί να βρούμε ποιές από τις εξεταζόμενες διατομές ικανοποιούν την ανωτέρω απαίτηση πλαστιμότητας $\mu_\phi = 10$. Αρχικά βλέπουμε ότι οι διατομές 2.7 είναι ακατάλληλες για την ικανοποίηση της παραπάνω απαίτησης και βεβαίως είναι ιδιαίτερα "επιρρεπείς" στην μεταβολή του θλιπτικού αξονικού φορτίου (το οποίο έτσι κ' αλλιώς δεν είναι στατικό στο σεισμό). Κατ' εξαίρεση, στο μοντέλο του Mander, οι διατομές 2.7 με αποστάσεις $s \leq 10cm$ είναι φαινομενικά επαρκείς. Στην πραγματικότητα όμως, η μεγάλη μείωση της ροπής στο μετελαστικό κλάδο μέχρι την αστοχία στα διαγράμματα $M-(1/r)$ (**Σχήμα 2.24**), θα

συμβάλλει στην περαιτέρω μείωση της "πραγματικής" πλαστιμότητας τους (όταν δηλαδή θέλουμε ο λόγος M_u/M_{max} να έχει μια ελάχιστη τιμή). Όσον αφορά το μοντέλο του Τάσιου, παρουσιάζει σχεδόν ίδια αποτελέσματα με του EC2 (ή EC8 μέρος - 1. Στον EC8 από την άλλη, οι διατομές εκτός της 2.7 ικανοποιούν την απαίτηση για $s \leq 15cm$, ενώ τέλος, σύμφωνα με το προσομοίωμα του Mander όλες οι διατομές 2.5 και 2.6 ικανοποιούν την απαίτηση (δηλ. για $7.5 \leq s \leq 17.5$).

Κεφάλαιο 3

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Μέγεθος διατομής
- 3.3 Λόγος πλευρών διατομής
- 3.4 Επικάλυψη σπλισμών

3.1 Εισαγωγή

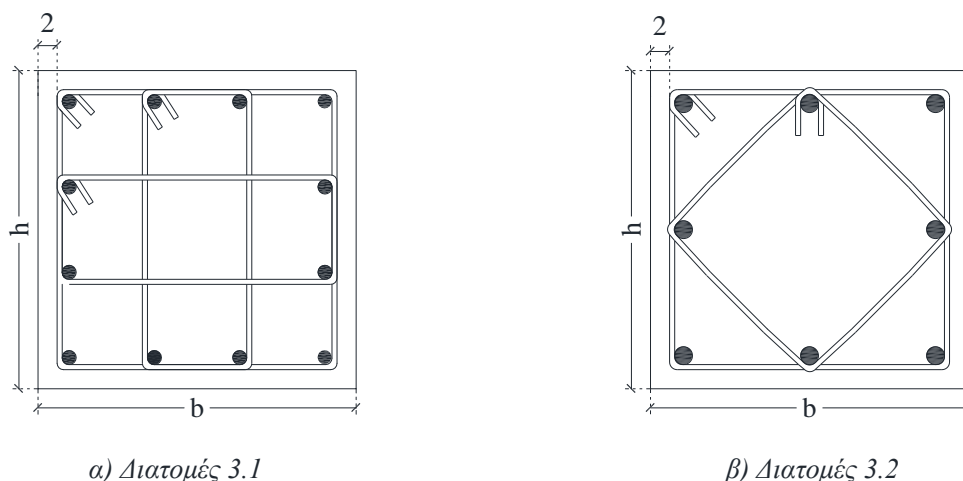
Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων μ_φ μιας διατομής, εκτός από τον οπλισμό της, είναι και η γεωμετρία της. Οι ενότητες **3.2** και **3.3** πραγματεύονται τη μεταβολή των εξωτερικών διαστάσεων μια διατομής, που μπορεί να προέρχεται είτε από την μεταβολή του μεγέθους της (ενότητα **3.2**) είτε από την αλλαγή του λόγου των πλευρών της (ενότητα **3.3**). Στο **κεφάλαιο 3** θα εισάγουμε και την μεταβολή του πάχους της επικάλυψης, σε δεδομένες εξωτερικές διαστάσεις μιας διατομής που επιφέρει όμως αλλαγή στις διαστάσεις του πυρήνα της και άρα στα διαγράμματα $M - (1/r)$. Και εδώ, όπως συνέβη στο **κεφάλαιο 2**, θα κινηθούμε και εντός αλλά και εκτός των κανονισμών, ώστε να εξάγουμε σαφή συμπεράσματα για την επιρροή που έχουν όλες αυτές οι παράμετροι στην απόδοση μια διατομής σε επίπεδο πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων.

3.2 Μέγεθος διατομής

Για την παραμετρική διερεύνηση του μεγέθους της διατομής, θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών, με επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm , ποσοστό διαμήκουσ οπλισμού $\rho \approx 2\%$, συνδετήρες $\Phi 8/12.5$ και υλικά: $f_c = 20\text{MPa}$ και $f_y = 500\text{MPa}$ με χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον **Πίνακα 3.1**.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.1 - 3.2.

Όνομα	Διαστάσεις (b x h) (cm x cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός	
		Υλοποιούμενος με	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
3.1.A	30 X 30	12 X $\Phi 14$	4.67	0.1708
3.1.B	50 X 50	12 X $\Phi 25$	4.67	0.1252
3.1.Γ	70 X 70	12 X $\Phi 36$	4.67	0.0953
3.1.Δ	90 X 90	12 X $\Phi 43$	4.67	0.0762
3.2.A	30 X 30	8 X $\Phi 18$	3.41	0.1111
3.2.B	50 X 50	8 X $\Phi 32$	3.41	0.0814
3.2.Γ	70 X 70	8 X $\Phi 43$	3.41	0.0617
3.2.Δ	90 X 90	8 X $\Phi 57$	3.41	0.0495



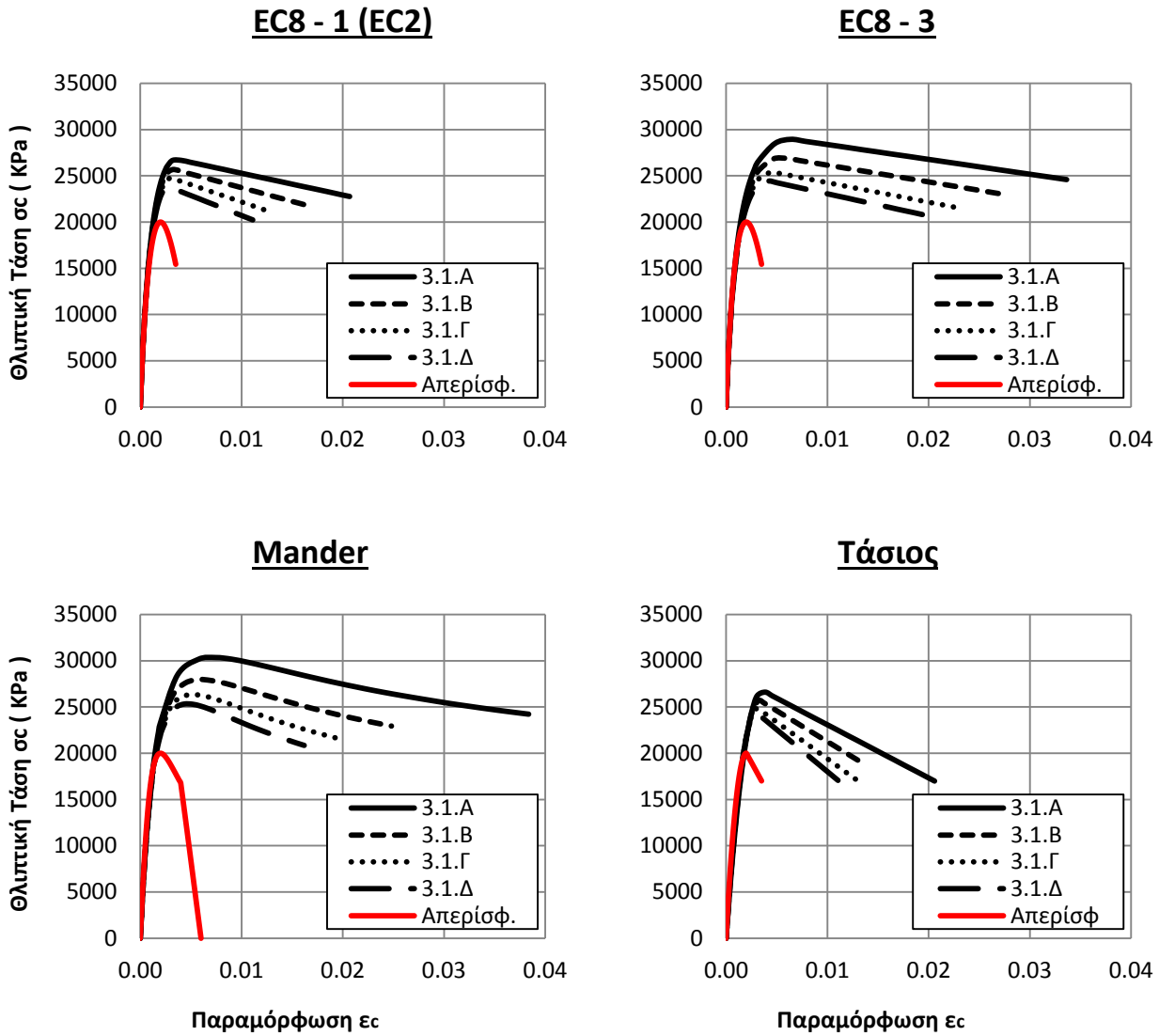
Σχήμα 3.1 Σχήματα Διατομών 3.1 (3.1Α - 3.1Ε) και 3.2 (3.2.Α - 3.2.Ε).

Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \varepsilon$)

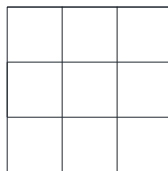
Οι τύποι των συνδετήρων (αριθμός τμήσεων κατά x και y) που θα εφαρμοστούν στη συγκεκριμένη διερεύνηση είναι 2 (**Σχήμα 3.1**), ενώ η μεταβολή του μεγέθους της διατομής γίνεται μέσω της σταθερής αύξησης κατά $20cm$ της κάθε πλευράς της. Καταλαβαίνουμε ότι, όντας ίδια η μορφή των συνδετήρων καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος της διατομής, παραμένει ίδιος και ο αριθμός των γωνιών του συνδετήρα που παρέχει αντιδράσεις πλήρους περισφιγξης στο σκυροδέμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ο ίδιος εγκάρσιος οπλισμός (αλλά όχι και το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό του!), να έχει να περισφίγγει πολύ μεγαλύτερο εμβαδόν σκυροδέματος, με άμεση συνέπεια την μείωση της αποδοτικότητας της περισφιγξης της διατομής.

Αυτό είναι κάτι που μπορούμε να διαπιστώσουμε και στα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ των **Σχημάτων 3.2** και **3.3**. Όσον αφορά τις διατομές 3.1, παρατηρούμε μείωση της παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος περίπου στο μισό σε σχεδόν όλα τα προσομοιώματα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το μοντέλο του Mander, παρότι και εδώ φαίνεται να είναι το λιγότερο συντηρητικό, εντούτοις παρουσιάζει τη μεγαλύτερη -αναλογικά- μείωση στην παραμόρφωση ε_{cu}^* , καθώς αυξάνεται το μέγεθος της διατομής (σε αντίθεση δηλαδή με ότι συνέβαινε στο **κεφάλαιο 2** με τον οπλισμό). Αναμενόμενα, η μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος δεν έχει πολύ μεγάλες διαφοροποιήσεις. Μπορούμε να πούμε μάλιστα, ότι η σταθερή.

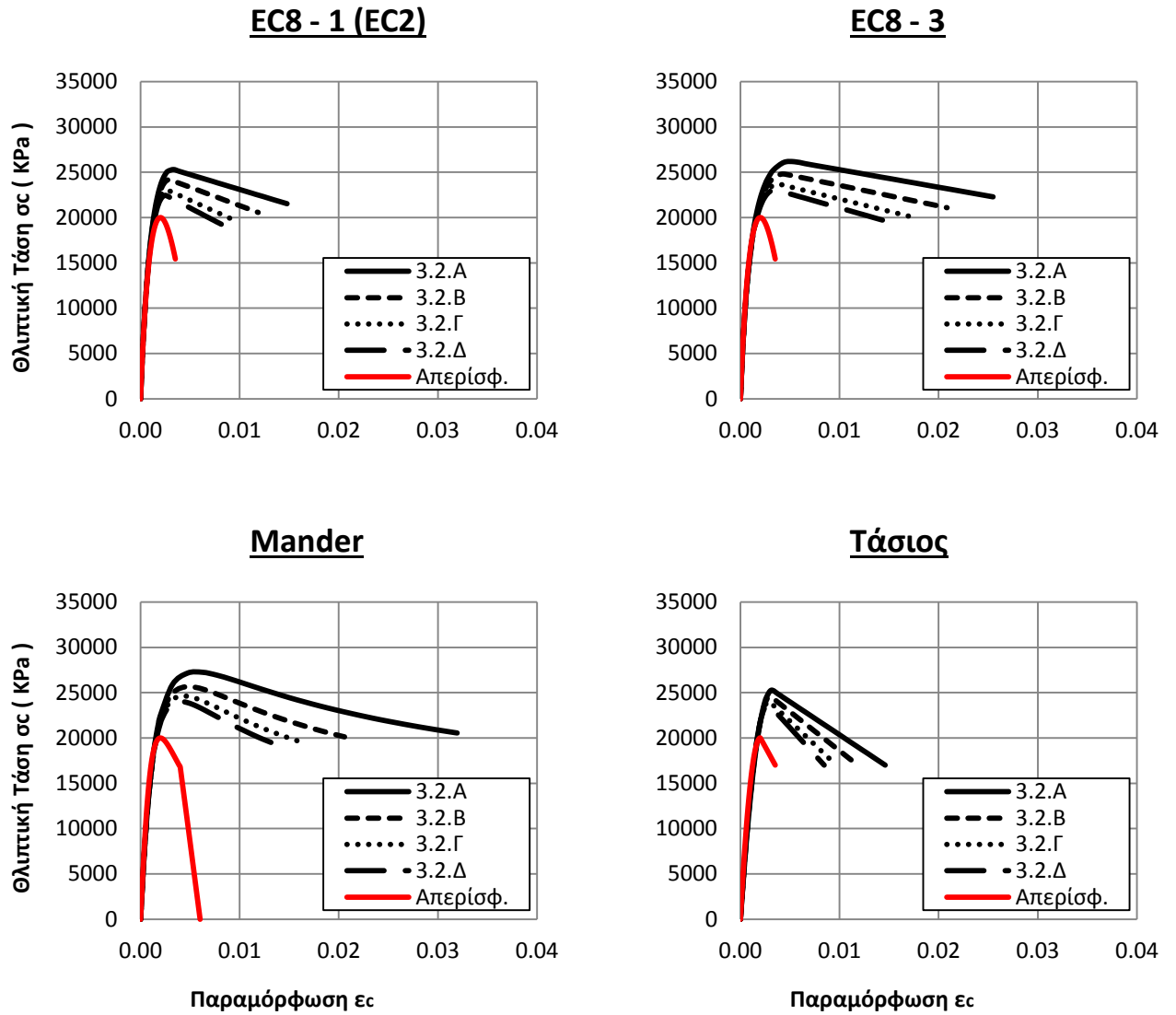
Μια ακόμη παρατήρηση έχει να κάνει με τις σχεδόν ισαπέχουσες αποστάσεις των καμπυλών στα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$, παρότι το ποσοστό αύξησης του μεγέθους της διατομής κάθε φορά δεν είναι ίδιο (δηλ. στη διατομή 3.1.Α είναι μεγαλύτερη η αύξηση μεγέθους συγκριτικά με τη 3.1.Γ). Επίσης διαπιστώνουμε, ότι δεν υπάρχουν ποιοτικές διαφορές στα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ μεταξύ των διατομών 3.1 και 3.2 όποτε τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν και για τους 2 τους τύπους εγκάρσιου οπλισμού.



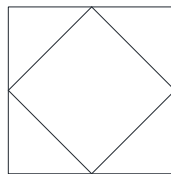
Σχήμα 3.2 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Διατομών 3.1.



Διατομές 3.1

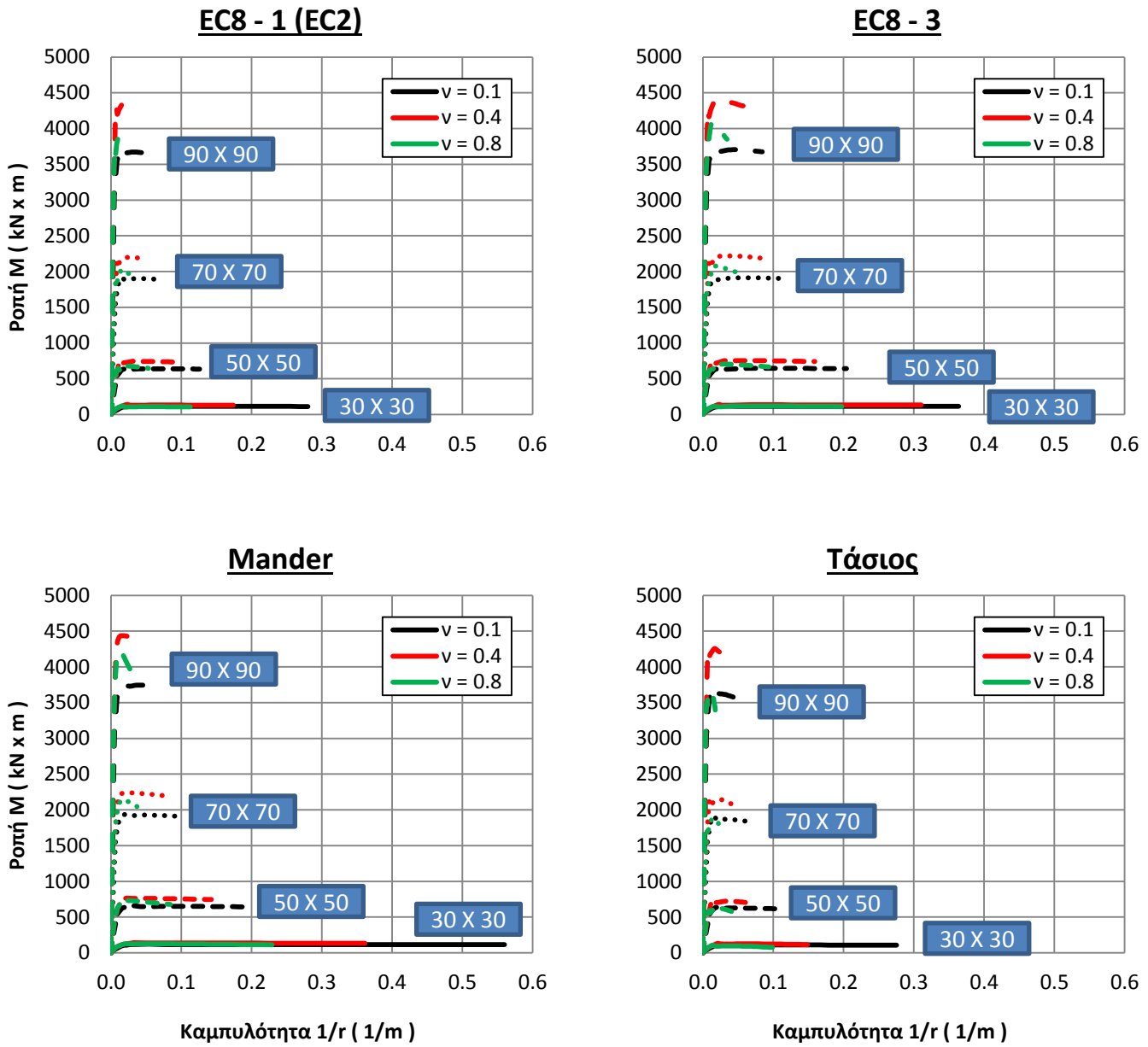


Σχήμα 3.3 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Διατομών 3.2.

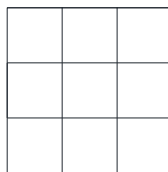


Διατομές 3.2

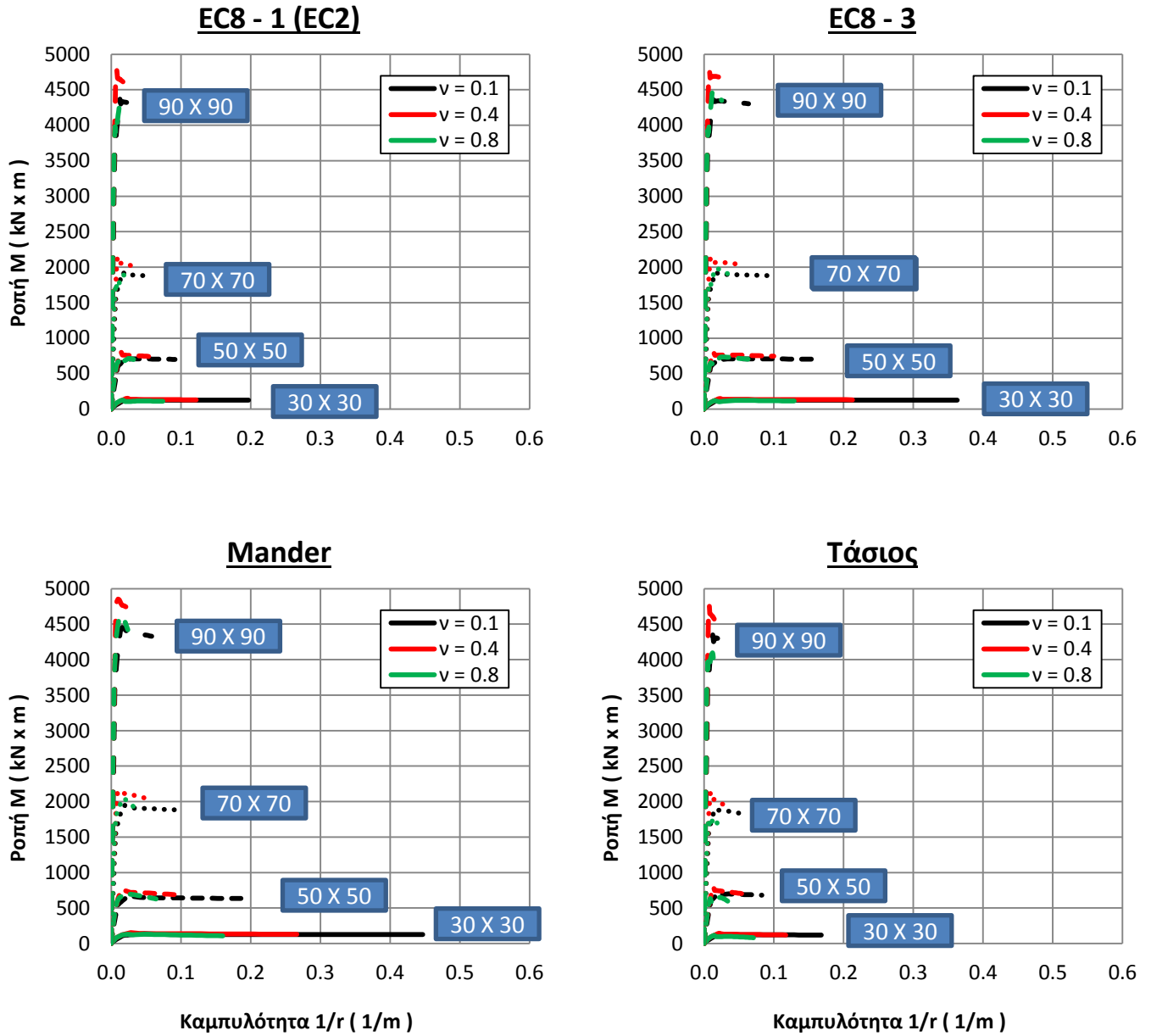
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$



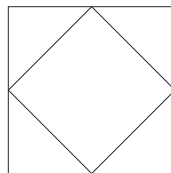
Σχήμα 3.4 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων όλων των Διατομών 3.1.



Διατομές 3.1



Σχήμα 3.5 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.2.



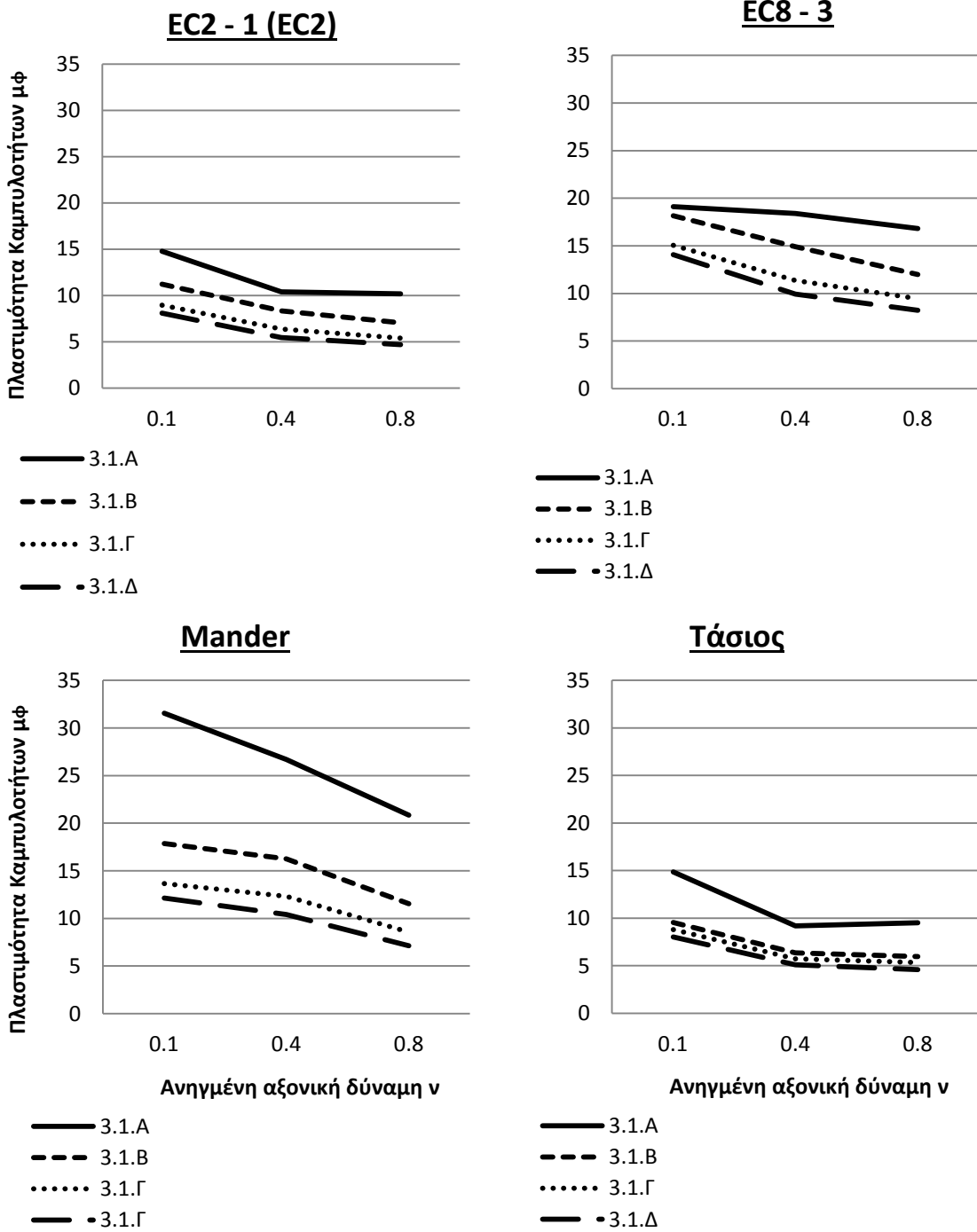
Διατομές 3.2

Η ανάλυση όλων των εξεταζόμενων διατομών έγινε για 3 τιμές ανηγμένου θλιπτικού αξονικού φορτίου, $\nu = 0.1, 0.4$ και 0.8 . Παρατηρούμε στα διαγράμματα $M - (1/r)$, μια δραματική μείωση των καμπυλοτήτων αστοχίας καθώς αυξάνεται το μέγεθος των διατομών, αναντίστοιχη -πολύ μεγαλύτερη- της εικόνας των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων. Κάθε διατομή απέχει από την αμέσως μικρότερη της (δηλ η 3.1.B από την 3.1.A, η 3.1.Γ από την 3.1.B κλπ.) κατά το διπλάσιο σε καμπυλότητα αστοχίας ενώ οι ακραίες διατομές (3.1.A με 3.1.Δ) φτάνουν να έχουν και δεκαπλάσιες διαφορές! Την αιτία θα πρέπει να την αναζητήσουμε όχι τόσο στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης αλλά στον ορισμό της καμπυλότητας $\left(\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_c}{d}\right)$. Καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι το d που είναι η απόσταση των παραμορφώσεων ανάμεσα στον εφελκόμενο χάλυβα και στην ακραία ίνα του περισφιγμένου πλέον σκυροδέματος, αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση των διαστάσεων της διατομής.

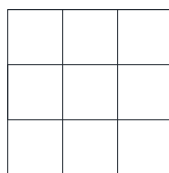
Μια ακόμη παρατήρηση έχει να κάνει με την επιρροή του θλιπτικού αξονικού φορτίου στα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των διατομών. Αναμενόμενα, όταν αυξάνεται η τιμή της ν , μειώνεται σημαντικά και η παραμόρφωση αστοχίας της διατομής. Παρ' όλα αυτά, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση του μεγέθους της διατομής με την αξονική δύναμη. Δηλαδή η αύξηση της ν προκαλεί σχεδόν ίδια -αναλογική- μείωση των καμπυλοτήτων $(1/r)_u$ καθώς μεταβαίνουμε από τη διατομή 3.1.A στην 3.1.Δ και αντίστοιχα από την 3.2.A στην 3.2.Δ. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ιδιαίτερα στις πιο μεγάλων διαστάσεων διατομές, ότι για $\nu = 0.4$ η διατομή παρουσιάζει τη μέγιστη καμπτική αντοχή της (συγκριτικά με τις περιπτώσεις των υπόλοιπων ανηγμένων αξονικών δυνάμεων). Όταν η τιμή της αξονικής δύναμης αυξάνεται πολύ ($\nu = 0.8$) τότε το βάθος της θλιβόμενης ζώνης σε παραμορφώσεις κοντά στο ε_{co}^* μεγαλώνει, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων και άρα η καμπτική αντοχή της διατομής (στην αστοχία).

Τέλος, βλέπουμε ότι ο διαφορετικός αριθμός των ενεργών σκελών μεταξύ των διατομών 3.1 και 3.2, δεν επηρέασε και εδώ, όπως και στα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, τα αποτελέσματα. Δεν υπάρχει κάποια ποιοτική διαφοροποίηση μεταξύ των **Σχημάτων 3.4** και **3.5**, ενώ και οι διαφορές μεταξύ των προσομοιωμάτων εκμηδενίζονται καθώς μεγαλώνει αισθητά το μέγεθος των διατομών. Η μείωση δηλαδή των καμπυλοτήτων αστοχίας λόγω της αυξανόμενης απόστασης d , υποσκελίζει τυχούσες διαφοροποιήσεις μεταξύ των διατομών που προέρχονται από διάφορους λόγους.

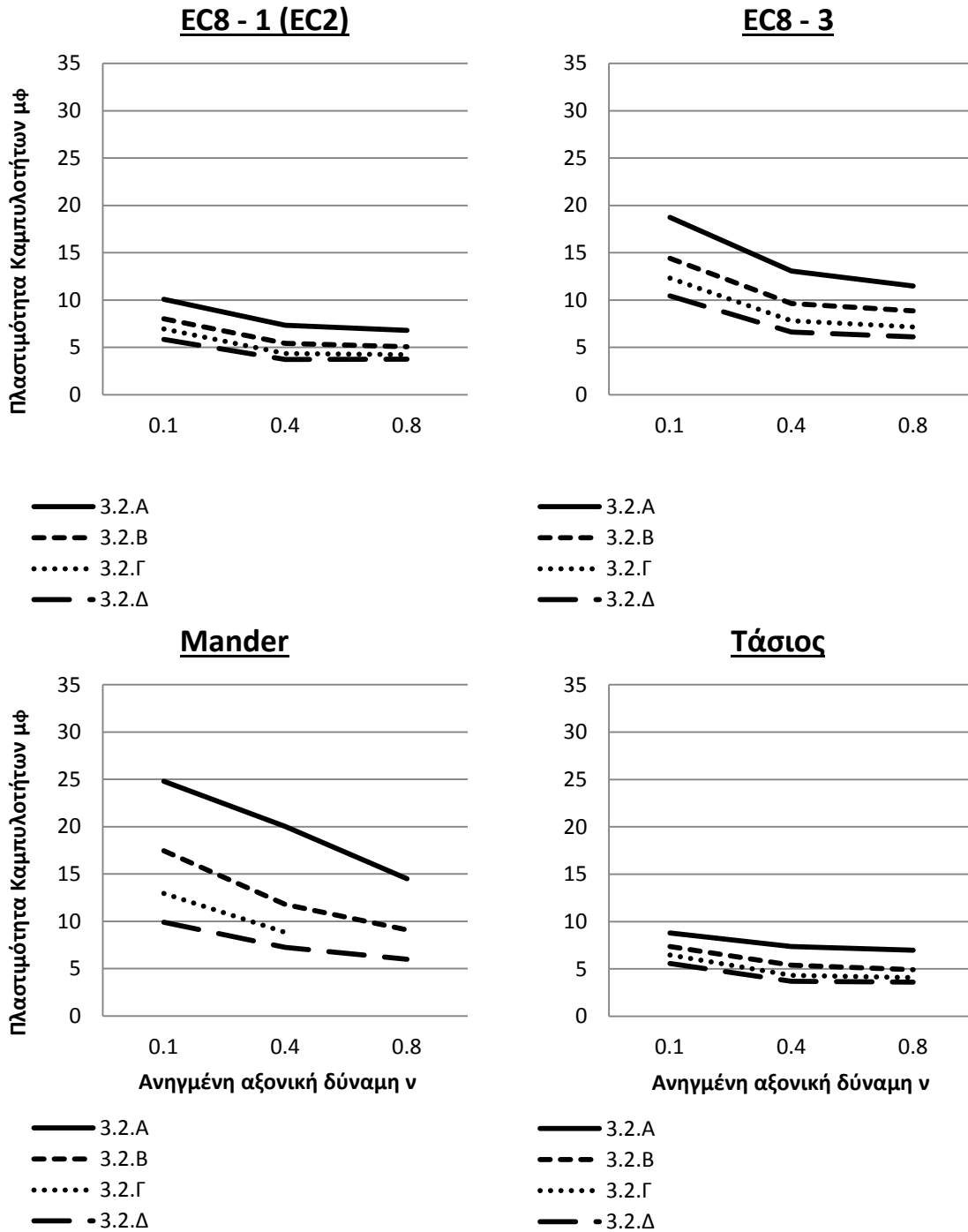
Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων $\mu\phi$



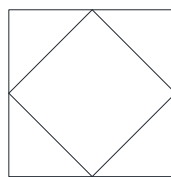
Σχήμα 3.6 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ανηγμένης αξονικής δύναμης όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.1.



Διατομές 3.1



Σχήμα 3.7 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ανηγμένης αξονικής δύναμης όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.2.



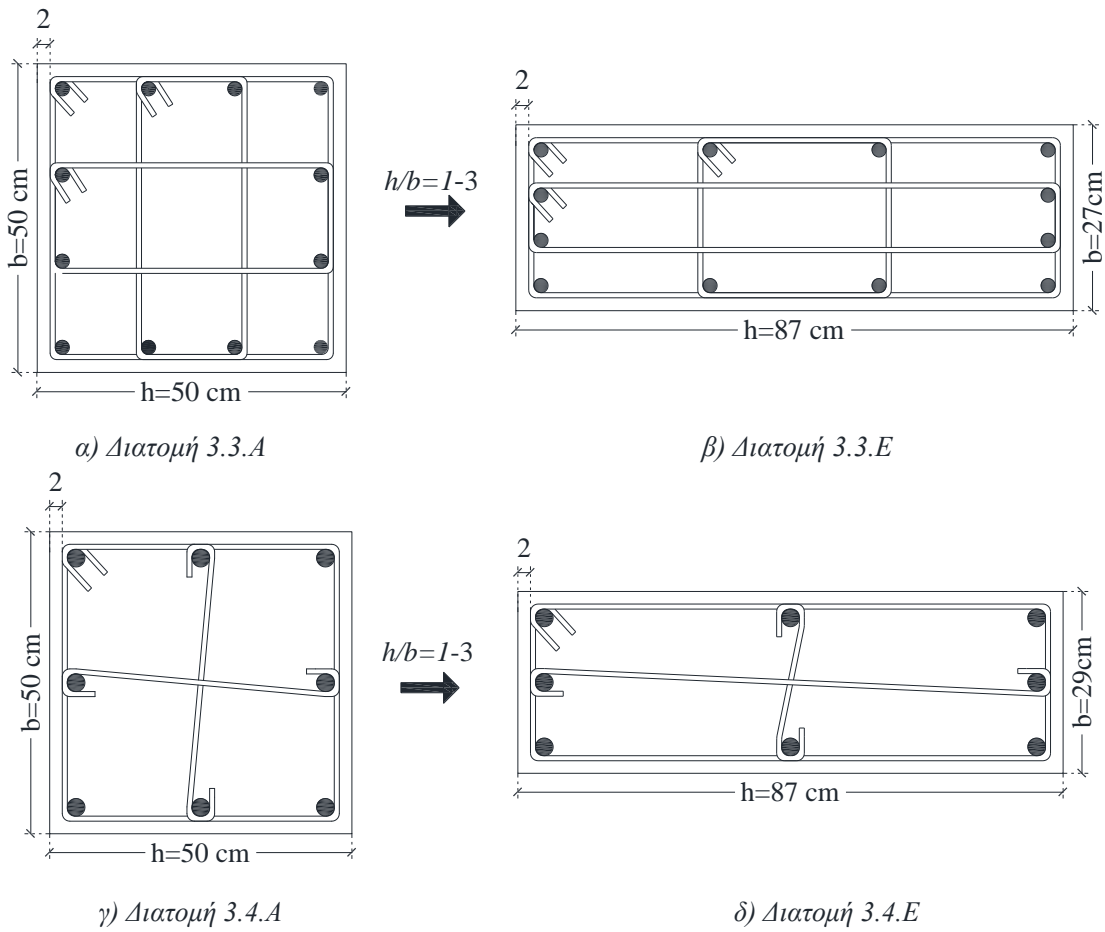
Διατομές 3.2

Τα διαγράμματα των **Σχημάτων 3.6** και **3.7** όπως αυτά προέκυψαν από τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων, δίνουν μια διαφορετική εικόνα για την επιρροή που έχει η μεταβολή του μεγέθους των διατομών στις πλαστιμότητες. Ιδιαίτερα σε πιο συντηρητικά προσομοιώματα (όπως αυτό του EC2 και Τάσιου), παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των πλαστιμοτήτων συναρτήσεως της ανηγμένης αξονικής δύναμης για διαφορετικό μέγεθος διατομών, δεν διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ τους. Η αιτία σε αυτό, πρέπει αναζητηθεί στην καμπυλότητα κατά την οποία η εκάστοτε διατομή παρουσιάζει τη μέγιστη ροπή αντοχής. Για παράδειγμα, η παραπάνω τιμή της καμπυλότητας στη διατομή 30 X 30 (και στους 2 τύπους περίσφιγξης), ξεπερνάει ακόμα και την καμπυλότητα αστοχίας της διατομής 90 x 90 σε τιμές ανηγμένων αξονικών δυνάμεων $\nu = 0.4$ και 0.8 ! Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζεται έντονα η διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ και έτσι λοιπόν να υπάρχουν έντονες "ποιοτικές" διαφορές μεταξύ των πλαστιμοτήτων μ_φ και των καμπυλοτήτων αστοχίας.

Μέσω των διαγραμμάτων $\mu_\varphi - \nu$ μπορούμε να διαπιστώσουμε καλύτερα πως επηρεάζονται οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων και από την αλλαγή του τύπου της εγκάρσιας όπλισης των διατομών. Παρατηρούμε δηλαδή, ότι εάν επιθυμούμε πλαστιμότητες μ_φ με τιμές κοντά στο 8 - 10, τότε οι διαφορές για το ποιο μέγεθος διατομής θα αποδεχτούμε στις μεν και στις δε διατομές (3.1 και 3.2) είναι σημαντικές. Για παράδειγμα, στο προσομοίωμα του EC2 καμία διατομή 3.2 δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή (με την έννοια της επάρκειας όσον αφορά την παραπάνω τιμή της πλαστιμότητας), ενώ αντίθετα η 3.1.A και οριακά η 3.1.B γίνονται αποδεκτές.

3.3 Λόγος πλευρών διατομής

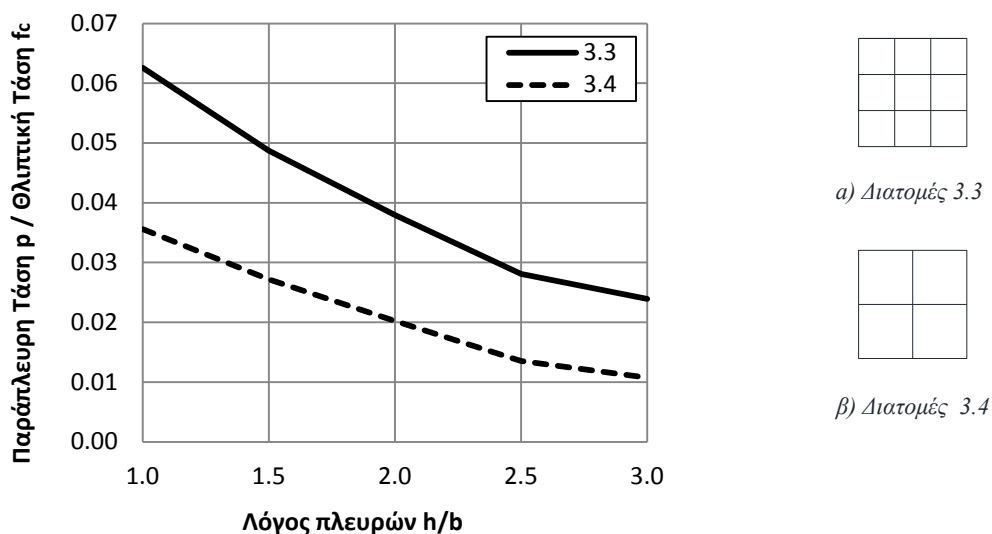
Για την παραμετρική διερεύνηση του λόγου των πλευρών της διατομής, θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα διατομών, με επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm, ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho \approx 2.5\%$, συνδετήρες Φ8/12.5 και υλικά: $f_c = 20MPa$ και $f_y = 500MPa$ με χαρακτηριστικά όπως φαίνονται στον **Πίνακα 3.2**.



Σχήμα 3.8 Σχήματα Διατομών 3.3 (ενδεικτικά 3.4.A και 3.4.E).

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.3 - 3.4.

Όνομα	Διαστάσεις (cm x cm)	Λόγος πλευρών	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός	
			Υλοποιούμενος με	Αριθμός τμήσεων	α_{ow}
3.3.A	50 X 50	1.00	12 X Φ 25	4.67	0.1252
3.3.B	60 X 40	1.50	12 X Φ 25	4.67	0.0974
3.3.Γ	70 X 35	2.00	12 X Φ 25	4.67	0.0759
3.3.Δ	80 X 30	2.50	12 X Φ 25	4.67	0.0562
3.3.E	86.6 X 28.9	3.00	12 X Φ 25	4.67	0.0479
3.4.A	50 X 50	1.00	8 X Φ 30	3	0.0712
3.4.B	60 X 40	1.50	8 X Φ 30	3	0.0544
3.4.Γ	70 X 35	2.00	8 X Φ 30	3	0.0404
3.4.Δ	80 X 30	2.50	8 X Φ 30	3	0.0271
3.4.E	86.6 X 28.9	3.00	8 X Φ 30	3	0.0214

Αποδοτικότητα περίσφιγξης

Σχήμα 3.8 Διάγραμμα $p/f_c - h/b$ για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

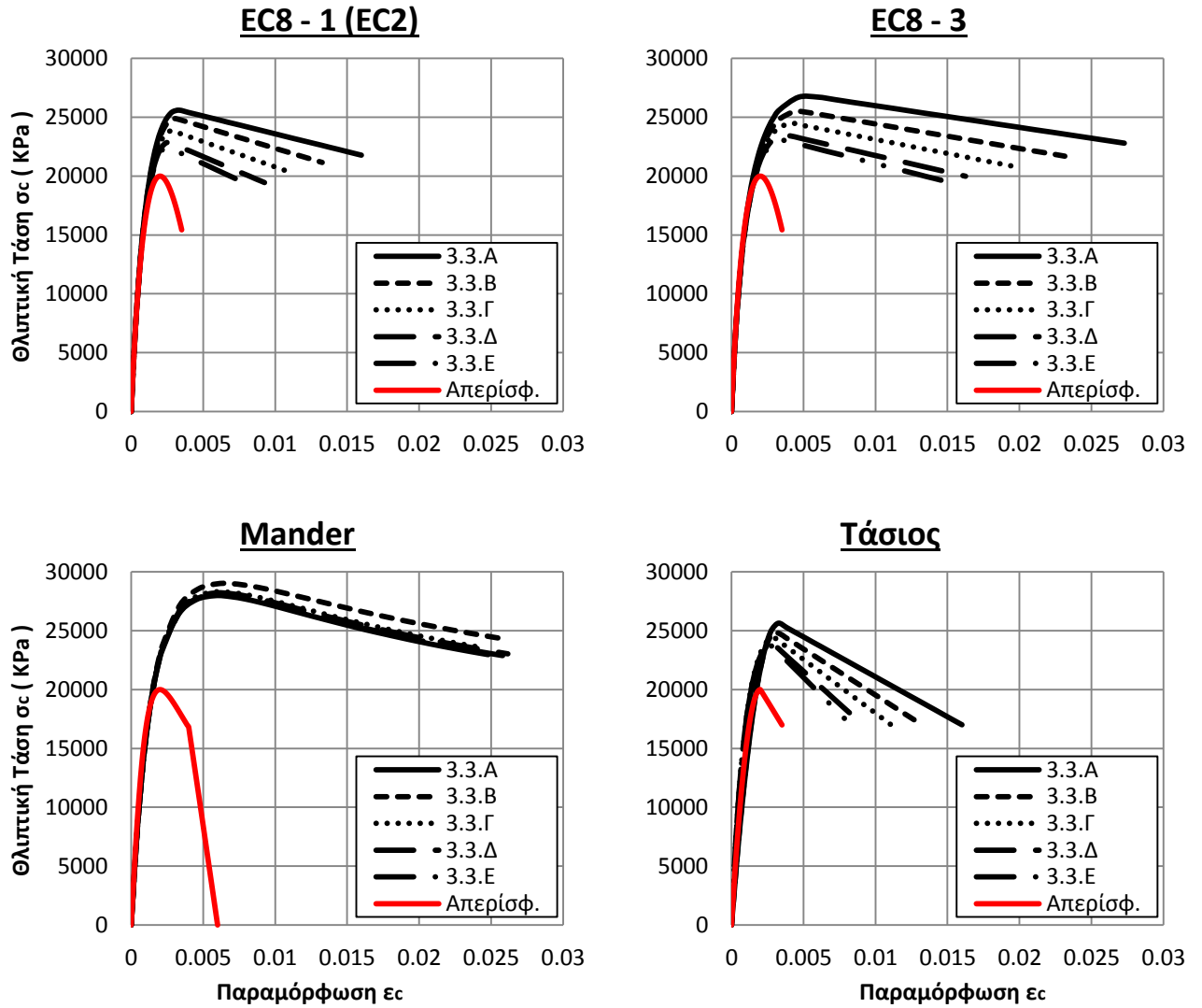
Στην παρούσα διερεύνηση θα εξετάσουμε πως η μεταβολή στο λόγο πλευρών μιας διατομής επηρεάζει την αποδοτικότητά της, για δεδομένες διατάξεις εγκάρσιων και διαμήκων οπλισμών. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.8** υπάρχει μια κατακόρυφη μείωση στην παράπλευρη πίεση που προσφέρει ο εγκάρσιος οπλισμός, όσο ο λόγος των πλευρών της απομακρύνεται από την μονάδα. Οι παράμετροι b_i (αποστάσεις μεταξύ διαμήκων σιδέρων) που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αποδοτικότητας της περίσφιγξης, έχουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση των ορθογωνικών διατομών, σε σχέση με τις τετραγωνικές. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι θα μπορούσαμε να επιτύχουμε σε μια ορθογωνική διατομή (ακόμα και με μεγάλο λόγο πλευρών) ίδια παράπλευρη πίεση p με μια τετραγωνική, αρκεί να κρατήσουμε ίδιες τις αποστάσεις b_i . Αυτό στην πράξη, μπορούμε να το υλοποιήσουμε με ομοιόμορφα κατανεμημένο διαμήκη οπλισμό πιασμένο από μονότμητους συνδετήρες.

Παρατηρούμε ότι η μείωση της παρεχόμενης παράπλευρης πίεσης στο σκυρόδεμα, καθώς μεγαλώνει ο λόγος h/b είναι περίπου ίδια και για τους 2 τύπους των εξεταζόμενων διατομών (2.2 και 2.3). Η παράπλευρη πίεση p έγινε έως και 3 φορές μικρότερη καθώς ο λόγος των πλευρών της διατομής μεταβλήθηκε από το 1 στο 3. Φυσικά πρέπει να αναφερθεί και η διόλου ευκαταφρόνητη διαφορά μεταξύ των 2 τύπων εγκάρσιας περίσφιγξης που φαίνεται -τουλάχιστον σε αυτό το "στάδιο" ότι δεν αλληλεπιδρά με το λόγο πλευρών των διατομών.

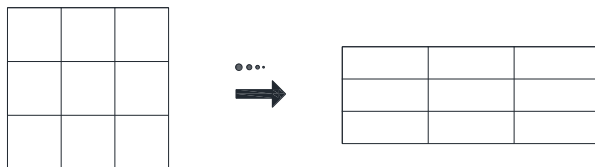
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)

Τα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$ επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα που εξαγάγαμε από το διάγραμμα του **Σχήματος 3.8**, με αναμενόμενες διαφοροποιήσεις στις τροποποιημένες τάσεις και παραμορφώσεις του περισφιγμένου σκυροδέματος καθώς μεταβάλλεται ο λόγος h/b των διατομών. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ωστόσο, πως ο ρυθμός μείωσης της παρεχόμενης παράπλευρης πίεσης p , δεν είναι ίδιος με αυτόν των παραμορφώσεων αστοχίας, αυξανόμενου του λόγου πλευρών των διατομών. Δηλαδή η διατομή 3.3.E έχει περίπου 3 φορές μικρότερη αποδοτικότητα περισφιγξης από την τετραγωνική διατομή 3.3.A αλλά η παραμόρφωση αστοχίας της ϵ_{cu}^* είναι "μόνο" 2 φορές μικρότερη.

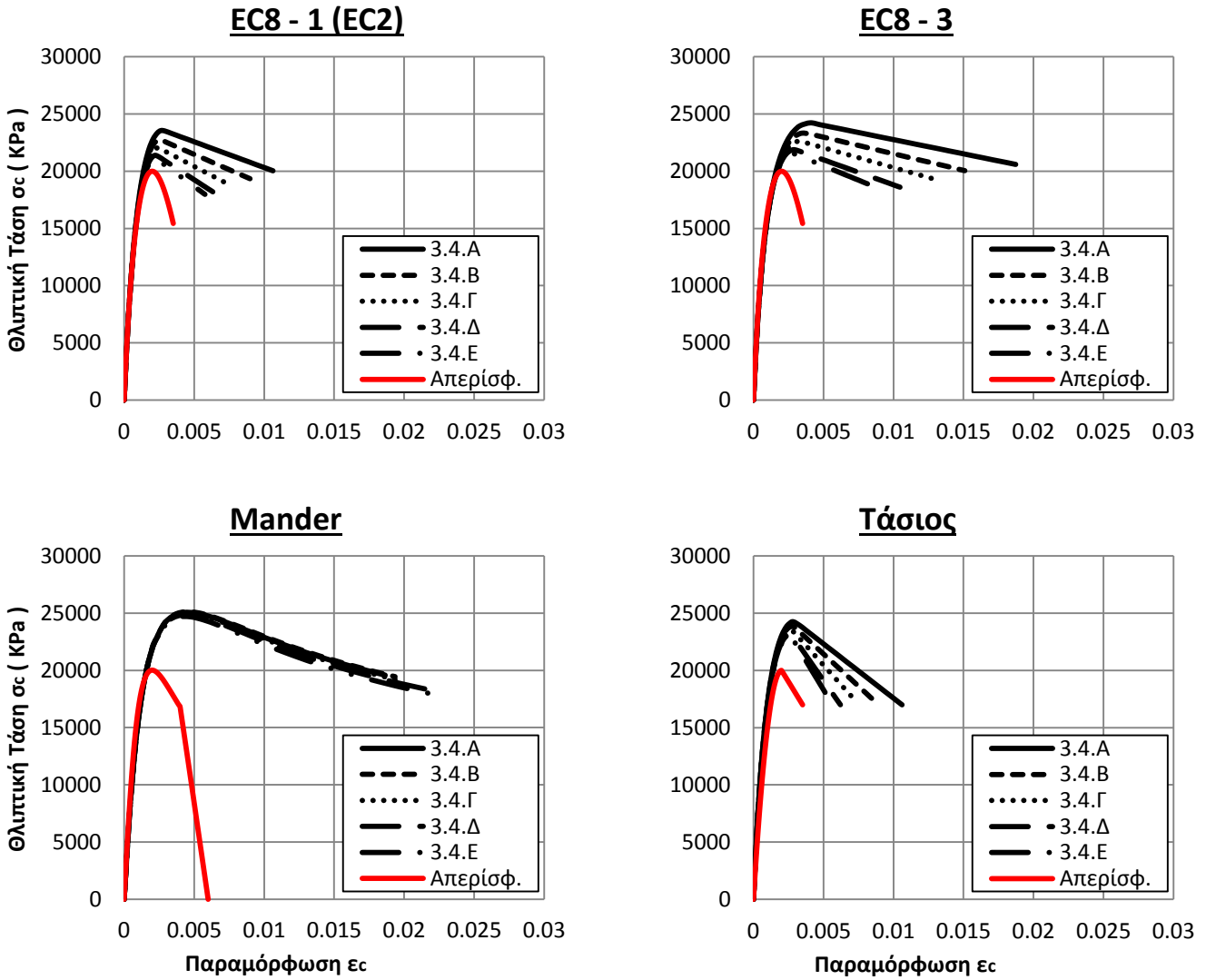
Τα παραπάνω παρατηρούμε ότι ισχύουν για όλα τα προσομοιώματα τάσεων - παραμορφώσεων εκτός του Mander. Τόσο στο **Σχήμα 3.9** όσο και στο **Σχήμα 3.10**, φαίνεται, οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν έναν λόγο πλευρών η κάθε μια, να ταυτίζονται μεταξύ τους. Αυτό εξηγείται, όχι από τον τρόπο υπολογισμού των τροποποιημένων τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά το μοντέλο του Mander, αλλά από τη μέθοδο υπολογισμού αυτών των τιμών κατά το πρόγραμμα XTRACT. Το πρόγραμμα XTRCAT, εισάγει μια μέση τιμή b_i στον τύπο υπολογισμού της αποδοτικότητας της περισφιγξης και δεν υπολογίζει το άθροισμα των τετραγώνων όλων των b_i , με αποτέλεσμα να μην λαμβάνει υπόψη την ανομοιομορφία κατανομής του διαμήκους οπλισμού.



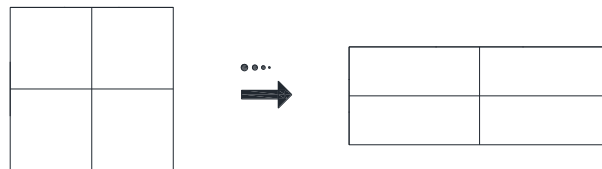
Σχήμα 3.9 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των εξεταζομένων Διατομών 3.3.



Διατομές 3.3

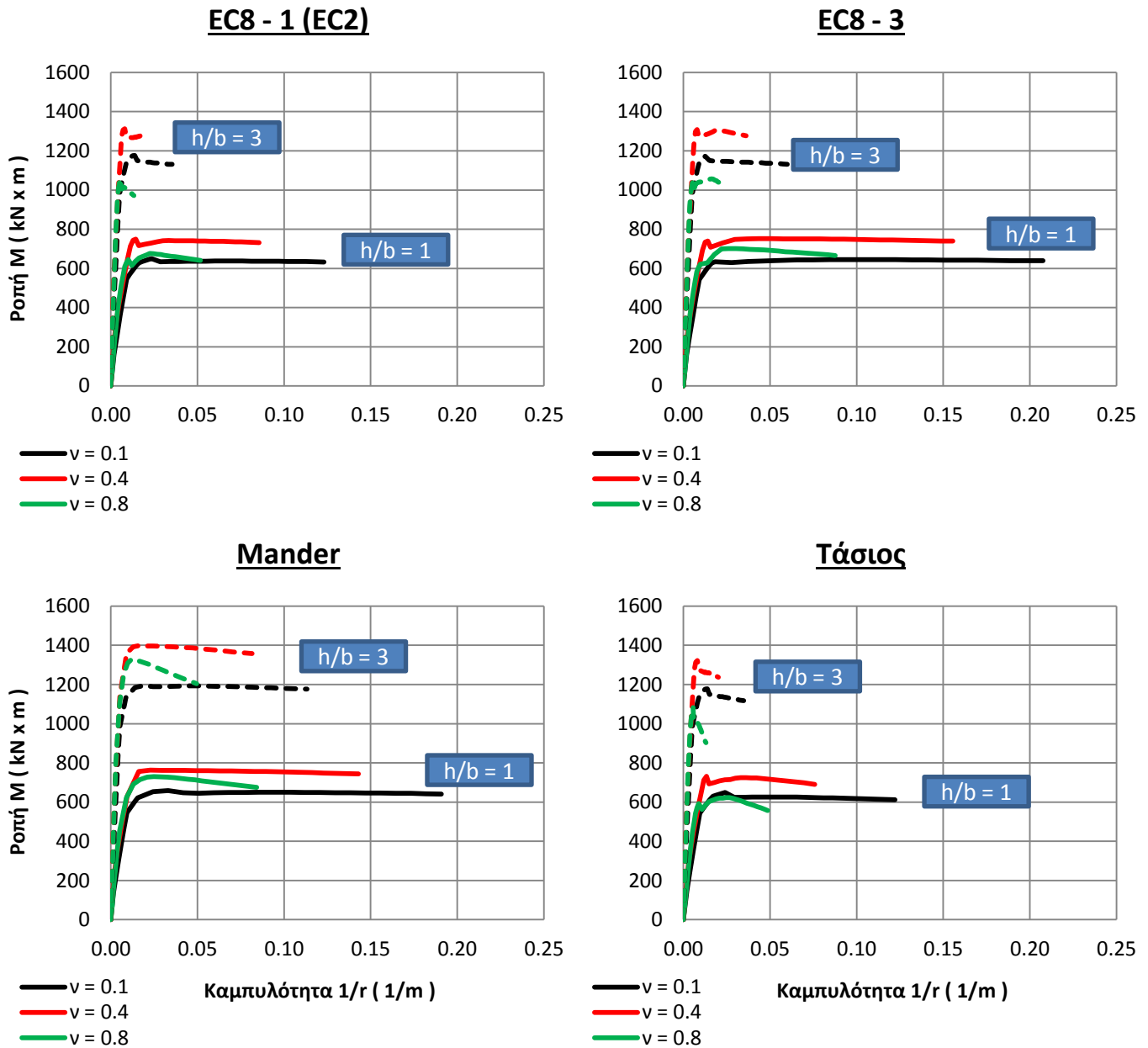


Σχήμα 3.10 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των εξεταζομένων Διατομών 3.4.

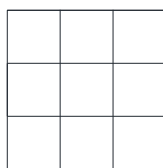


Διατομές 3.4

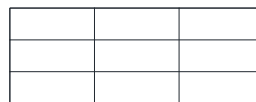
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$



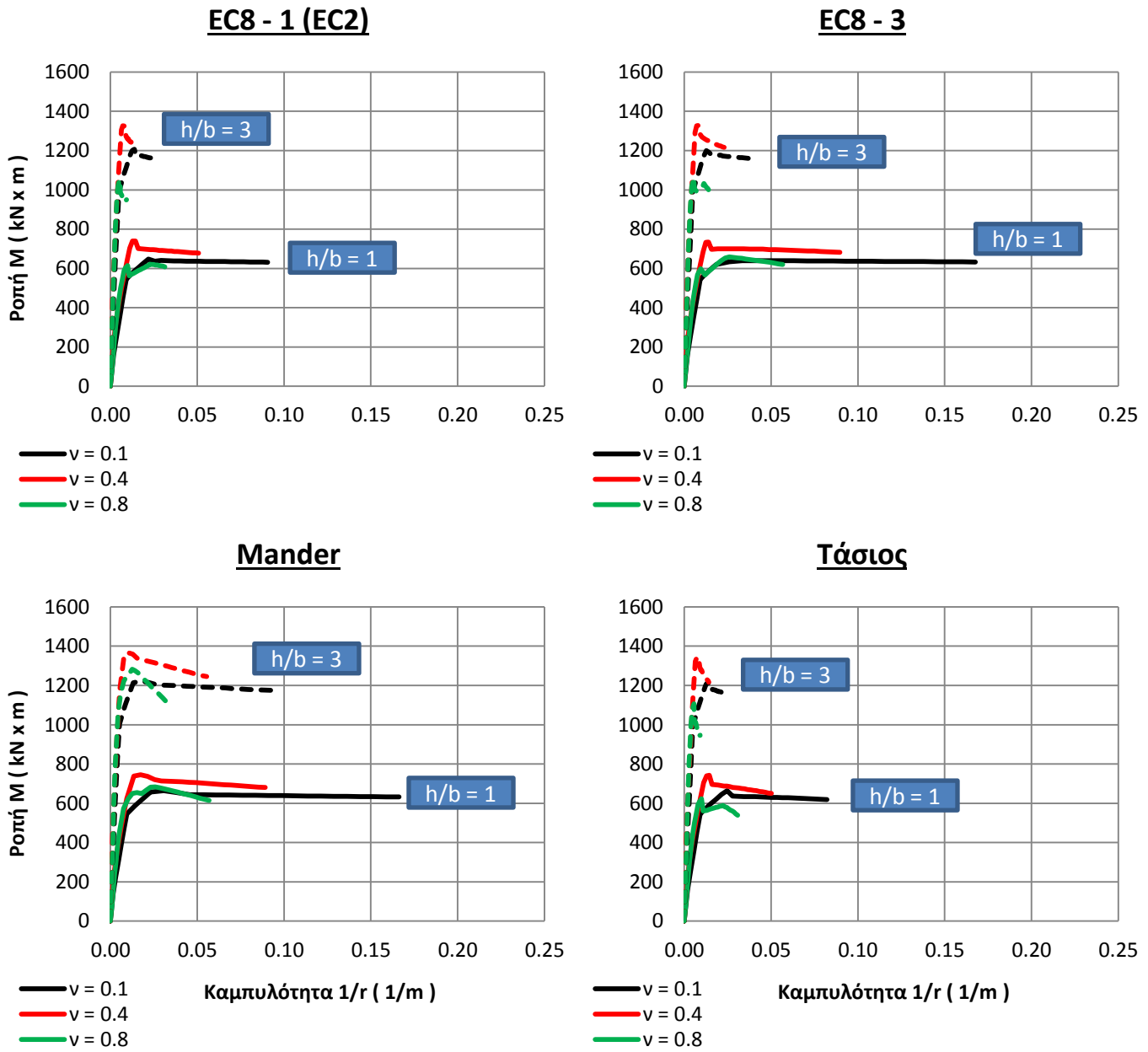
Σχήμα 3.11 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 3.3.A και 3.3.E.



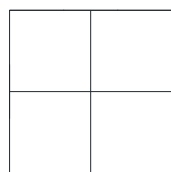
α) Διατομή 3.3.A



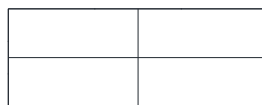
β) Διατομή 3.3.E



Σχήμα 3.12 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 3.4.Α και 3.4.Ε.



α) Διατομή 3.4.Α



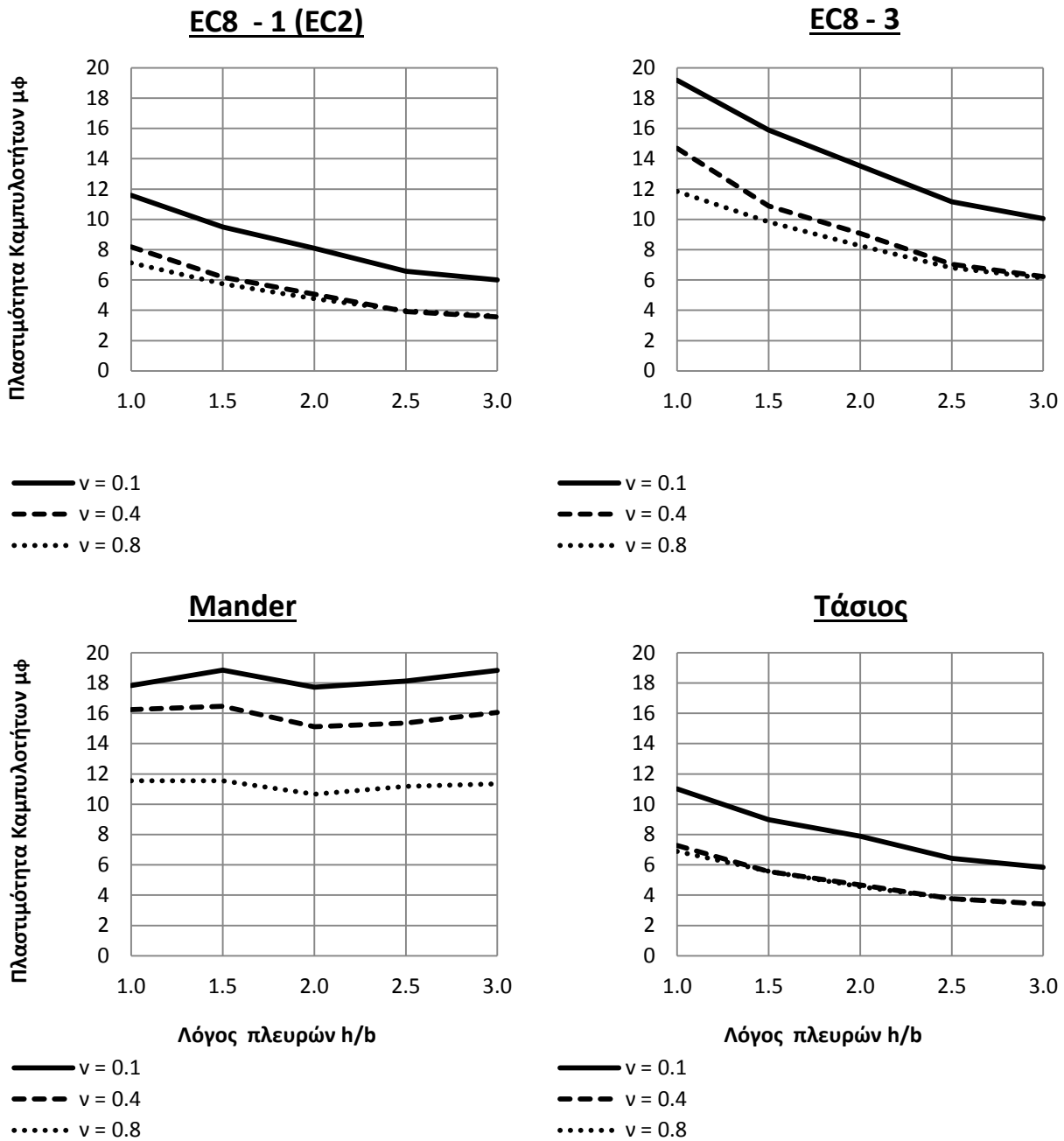
β) Διατομή 3.4.Ε

Παρότι έγινε ανάλυση των διατομών 3.3 και 3.4, στα **Σχήματα 3.11** και **3.12** παρουσιάζονται μόνον τα αποτελέσματα $M - (1/r)$ για τις ακραίες διατομές (δηλ. με $h/b = 1$ και $h/b = 3$) ώστε να είναι πιο ξεκάθαρες και ευκρινείς οι διαφορές. Βλέπουμε σε όλα τα προσομοιώματα εκτός του Mander, ότι οι τετραγωνικές διατομές έχουν μέχρι και 3 φορές μεγαλύτερη καμπυλότητα αστοχίας από τις αντίστοιχες ορθογωνικές με $h/b = 3$, κάτι που οφείλεται κυρίως σε 2 λόγους: Ο πρώτος είναι οι διαφοροποιήσεις στα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων που αναλύθηκαν πιο πριν, και ο δεύτερος έχει να κάνει και εδώ -όπως και πριν με τη διερεύνηση του μεγέθους της διατομής-, με τον ορισμό της καμπυλότητας. Όσο αυξάνεται το στατικό ύψος d της αποφλοιωμένης διατομής, μειώνεται η καμπυλότητα (και ειδικότερα η καμπυλότητα αστοχίας). Για να καταλάβουμε πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η αύξηση του στατικού ύψους d στις καμπυλότητες $(1/r)_u$, αρκεί να δούμε τις διόλου αμελητέες διαφοροποιήσεις μεταξύ των διατομών με διαφορετικό λόγο πλευρών στο μοντέλο του Mander, οι οποίες έχουν προκύψει ουσιαστικά μόνον από τον δεύτερο προαναφερθέντα λόγο.

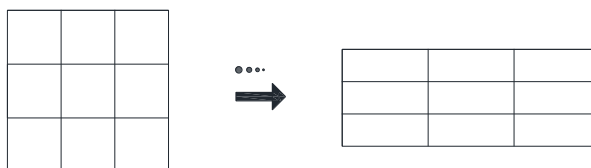
Κατά τ' άλλα, επιβεβαιώνουμε και εδώ τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προηγούμενες διερευνήσεις, για την επιρροή του θλιπτικού αξονικού φορτίου τόσο στις καμπυλότητες $(1/r)_u$, όσο και στις καμπτικές αντοχές M_u των διατομών. Υπάρχει σημαντική μείωση της καμπυλότητας αστοχίας όλων των διατομών καθώς "μεταβαίνουμε" σε μεγαλύτερες τιμές θλιπτικών αξονικών δυνάμεων, η οποία βεβαίως ποικίλει ανάλογα με το προσομοίωμα που εφαρμόζουμε. Και εδώ τίθεται η περίπτωση της πρόωρης αστοχίας του εφελκόμενου χάλυβα για μικρές τιμές ανηγμένων αξονικών δυνάμεων ($\nu = 0.1$) και λιγότερο συντηρητικά μοντέλα (EC8 - 3).

Όσον αφορά τη ροπή, παρατηρείται εμφανής πτώση της τιμής της στο μετελαστικό κλάδο των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ μέχρι την αστοχία για $\nu = 0.8$. Βλέπουμε δηλαδή, ότι όταν βρισκόμαστε σε ένα επιτρεπτό από τους κανονισμούς εύρος αξονικών δυνάμεων (στην περίπτωση μας για $\nu = 0.1$ και 0.4), και η διατομή είναι επαρκώς περισφιγμένη (π.χ. οι τετραγωνικές διατομές 3.3 και 3.4), δεν επηρεάζεται η κλίση του μετελαστικού κλάδου των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων. Αυτό φυσικά έχει θετικό αντίκτυπο και στις παρεχόμενες πλαστιμότητες μ_φ όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες διερευνήσεις.

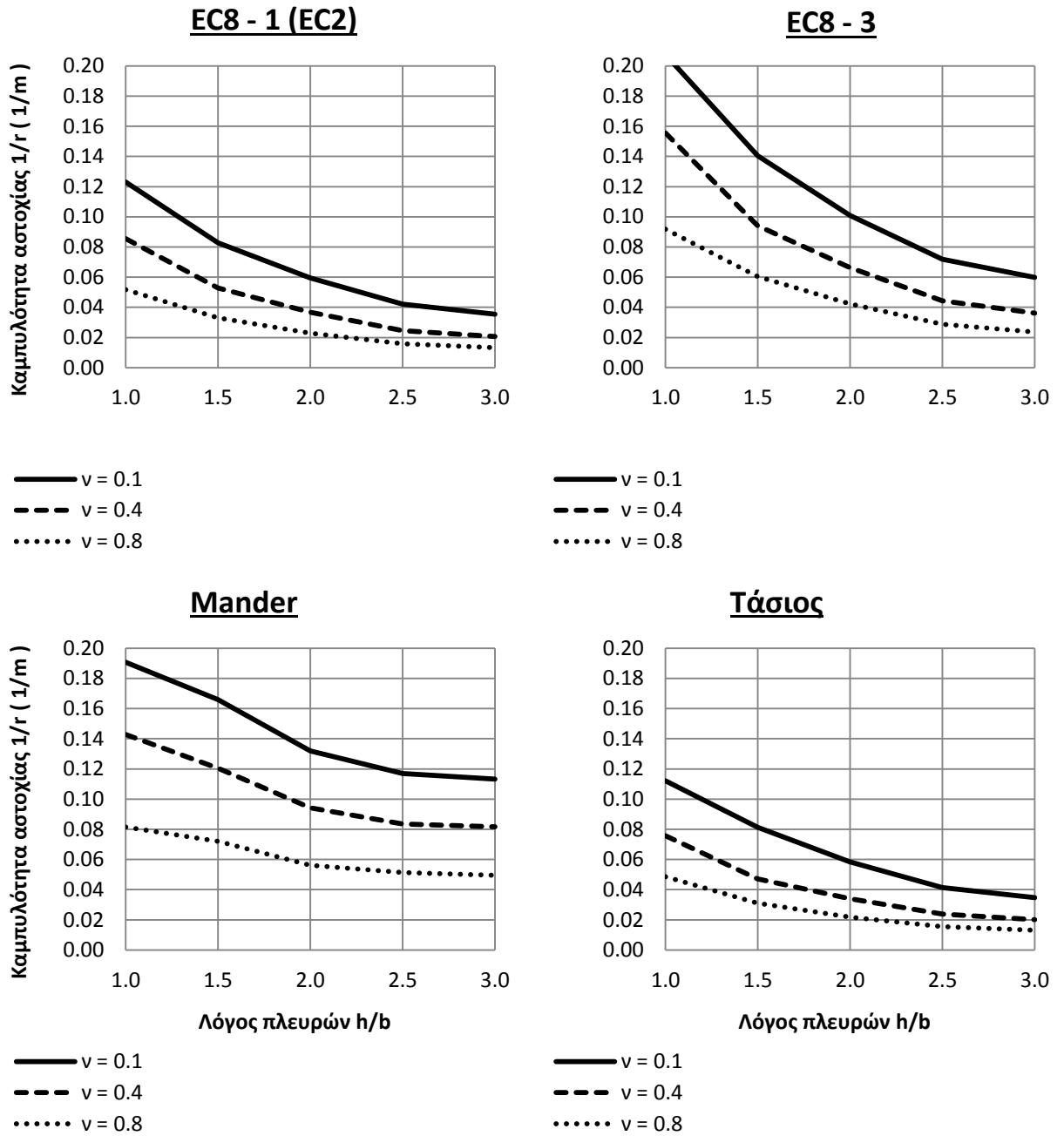
Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μ_ϕ & καμπυλότητες αστοχίας $(1/r)_u$



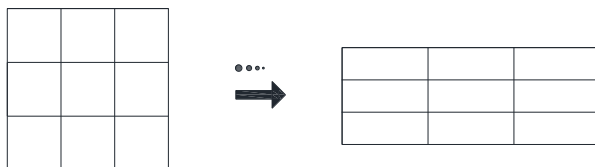
Σχήμα 3.13 Διαγράμματα πλαστιμότητων καμπυλοτήτων - λόγου πλευρών h/b όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.3.



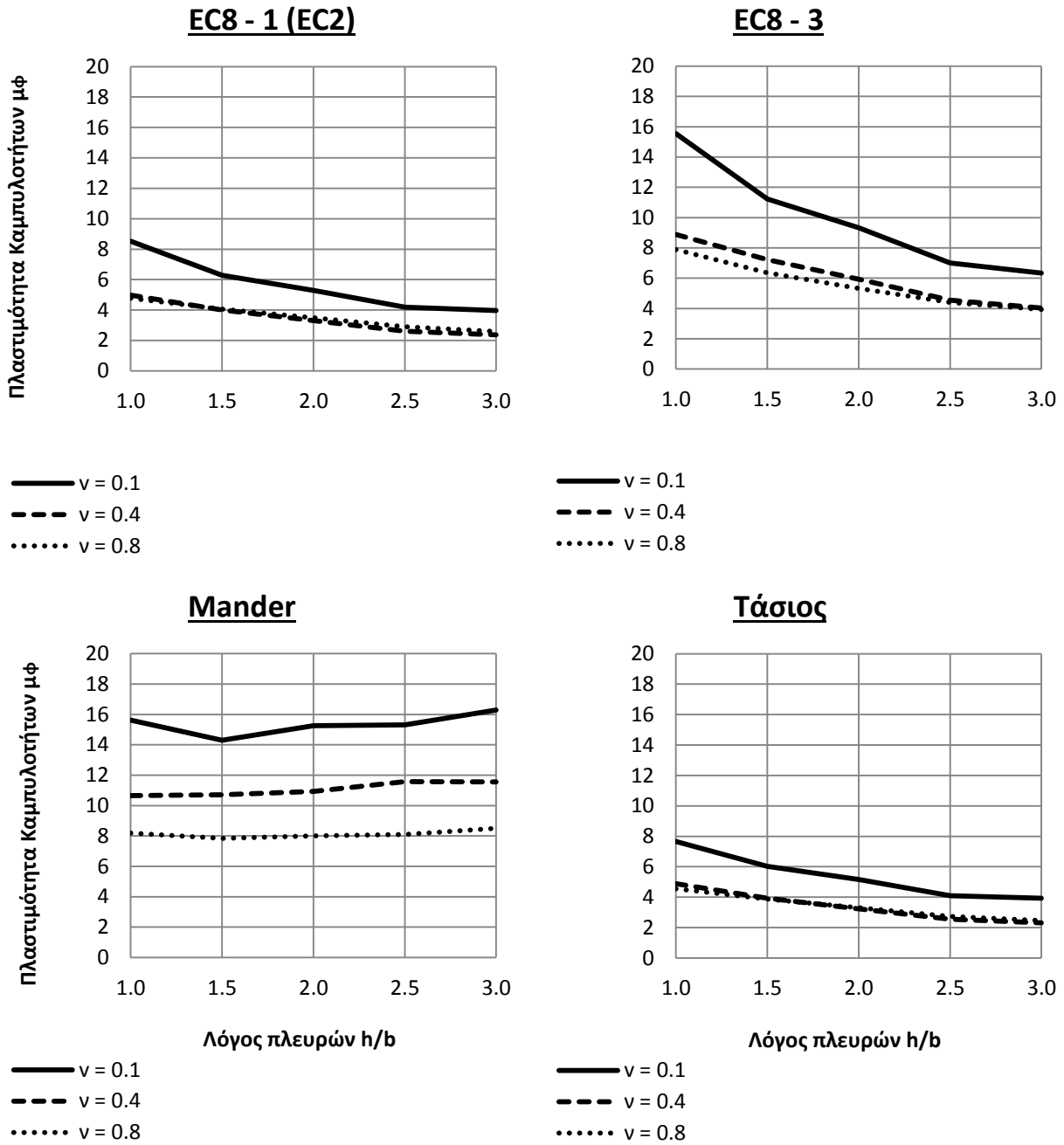
Διατομές 3.3



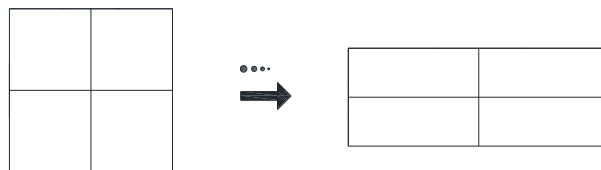
Σχήμα 3.14 Διαγράμματα καμπυλοτήτων αστοχίας - λόγου πλευρών h/b όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.3.



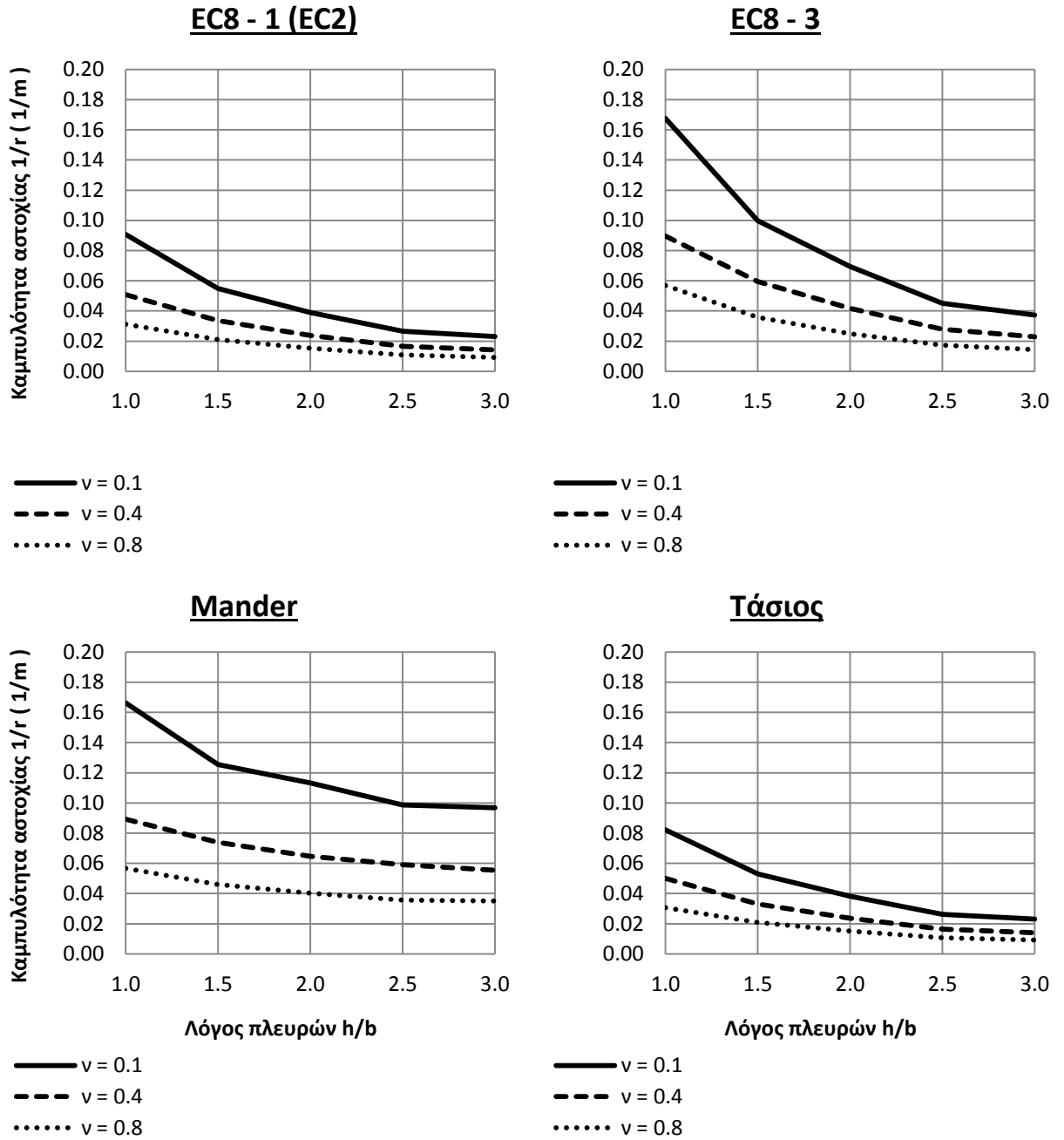
Διατομές 3.3



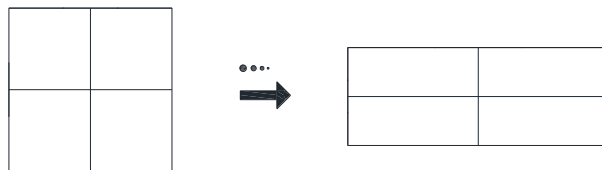
Σχήμα 3.15 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - λόγου πλευρών h/b όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.4.



Διατομές 3.4



Σχήμα 3.16 Διαγράμματα καμπυλοτήτων αστοχίας - λόγου πλευρών h/b όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.4.



Διατομές 3.4

Όπως φαίνεται από τα **Σχήματα 3.13** και **3.15**, υπάρχει μια παραβολική σχέση μεταξύ πλαστιμοτήτων μ_φ και λόγου πλευρών διατομών, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με τις καμπυλότητες αστοχίας (**Σχήματα 3.14** και **3.16**). Παρατηρούμε όμως, ότι οι παραβολές των καμπυλοτήτων $(1/r)_u$ παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη πτώση από τις αντίστοιχες καμπύλες των πλαστιμοτήτων μ_φ , και αυτό εξηγείται αυτό εξηγείται από τον τρόπο με τον οποίο έχει γίνει η διαγραμματικοποίηση των διαγραμμάτων $M - (1/r)$. Η καμπυλότητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη καμπτική αντοχή της εκάστοτε διατομής, μειώνεται αισθητά όσο αυξάνεται ο λόγος h/b , με αποτέλεσμα να επηρεάζονται σημαντικά τα αποτελέσματα πλαστιμοτήτων όπως αυτά παρουσιάζονται στα διαγράμματα των **Σχημάτων 3.13** και **3.15**.

Μια ακόμη παρατήρηση έχει να κάνει με τα προσομοιώματα τα οποία έχουν εφαρμοστεί, τα συντηρητικότερα εκ' των οποίων, παρουσιάζουν πιο ήπια μορφή στις καμπύλες τόσο των πλαστιμοτήτων μ_φ όσο και των καμπυλοτήτων αστοχίας. Εδώ φυσικά, εξαιρείται το μοντέλο του Mander, καθ' ότι δεν απεικονίζει τις πραγματικές διαφορές μεταξύ διατομών που έχουν διαφορετικό λόγο πλευρών (οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν αναφερθεί στην ίδια ενότητα στα "Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$ "). Όσον αφορά το αξονικό θλιπτικό φορτίο, η διακύμανση στην τιμή του, φαίνεται να επηρεάζει λιγότερο τις διατομές με μεγάλο λόγο πλευρών αφού έτσι κ αλλιώς, τα περιθώρια για περαιτέρω μείωση των ήδη μικρών πλαστιμοτήτων είναι μικρό!

Στην πράξη αν θέλουμε εξετάσουμε την επάρκεια όλων των παραπάνω διατομών όσον αφορά την παρεχόμενη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων, θα δούμε, ότι ιδίως στα πιο συντηρητικά προσομοιώματα, μόνον η τετραγωνική διατομή μπορεί να προσφέρει λογικές τιμές γύρω στο 8-10. Αν επιπρόσθετα, θέλουμε να διατηρηθεί αυτή η τιμή και σε ένα επιτρεπτό από τους κανονισμούς εύρος θλιπτικού αξονικού φορτίου, τότε μόνον η διατομή 3.3 μπορεί να ικανοποιήσει αυτή την απαίτηση. Τα αποτελέσματα του EC8 - 3 όντας αναμενόμενα πιο ευνοϊκά, επιτρέπουν και σε διατομές με λόγο πλευρών που ξεφεύγει ελαφρώς από την μονάδα (π.χ. $h/b = 1.5$) να θεωρηθούν σε επίπεδο παρεχόμενων πλαστιμοτήτων μ_φ (έστω και οριακά) επαρκείς.

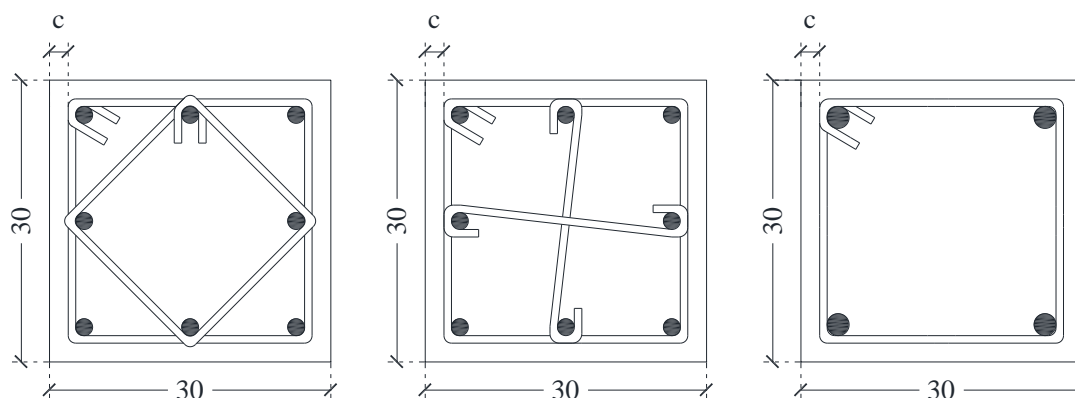
3.4 Επικάλυψη οπλισμών

Για την παραμετρική διερεύνηση της επικάλυψης των οπλισμών, θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών διαστάσεων 30 X 30 (cm x cm), με ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho \approx 2.2\%$ και υλικά: $f_c = 20MPa$ και $f_y = 500MPa$ με επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 3.3**.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 3.5 - 3.6 - 3.7.

Όνομα	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
		Υλοποιούμενος με	Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
3.5.A	1.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2267
3.5.B	2.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2398
3.5.Γ	3.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2542
3.5.Δ	4.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2701
3.5.E	5.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2872
3.6.A	1.00	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.00	0.0946
3.6.B	2.00	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.00	0.0977
3.6.Γ	3.00	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.00	0.1005
3.6.Δ	4.00	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.00	0.1028
3.6.E	5.00	8 X Φ18	Φ8/12.5	3.00	0.1042
3.7.A	1.00	4 X Φ25	Φ8/17.5	2.00	0.0221
3.7.B	2.00	4 X Φ25	Φ8/17.5	2.00	0.0224
3.7.Γ	3.00	4 X Φ25	Φ8/17.5	2.00	0.0226
3.7.Δ	4.00	4 X Φ25	Φ8/17.5	2.00	0.0223
3.7.E	5.00	4 X Φ25	Φ8/17.5	2.00	0.0216

*Η επικάλυψη c αναφέρεται στον εξώτερο οπλισμό

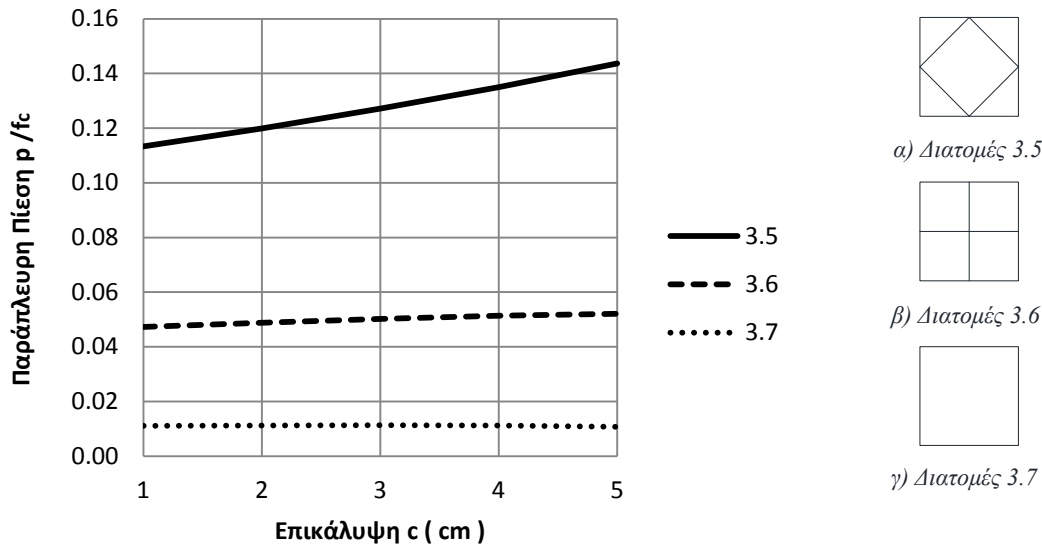


α) Διατομές 3.5

β) Διατομές 3.6

γ) Διατομές 3.7

Σχήμα 3.17 Σχήματα των Διατομών 3.5 - 3.7.

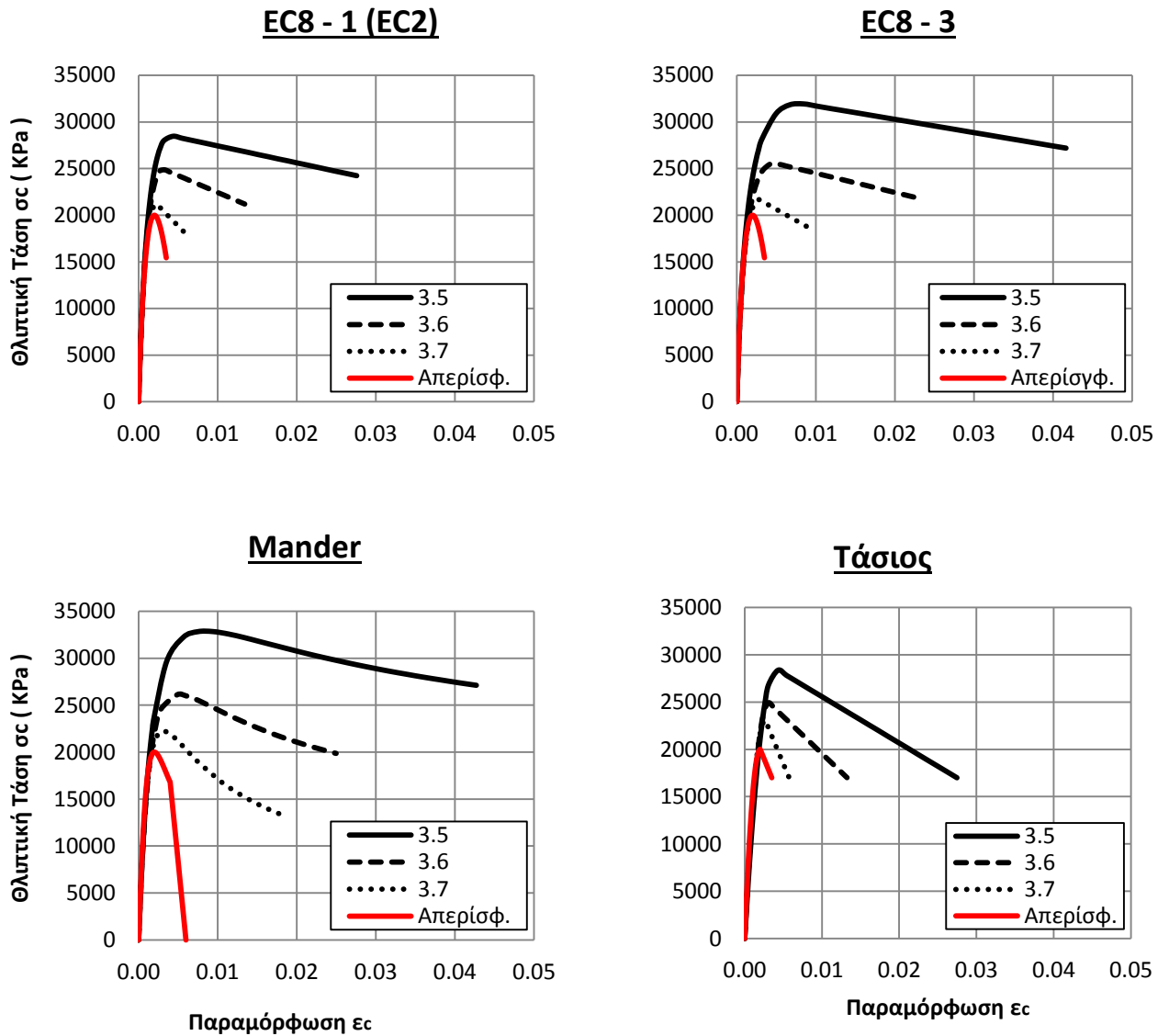
Αποδοτικότητα περίσφιγξης

Σχήμα 3.17 Διάγραμμα $p/f_c - c$ για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

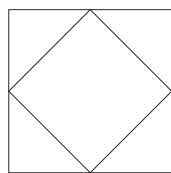
Για τη συγκεκριμένη παραμετρική διερεύνηση, χρησιμοποιήθηκαν 3 "τύποι" διατομών όσον αφορά τον εγκάρσιο οπλισμό, με διαφοροποιήσεις τόσο στην καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων όσο και στον αριθμό των ενεργών σκελών τους (ή αλλιώς τον αριθμό τμήσεων κατά x και κατά y). Χρησιμοποιήθηκαν παραδείγματα διατομών, σχετικά μικρών εξωτερικών διαστάσεων (30 X 30), ώστε να "τονιστεί" η επίδραση της επικάλυψης στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης αλλά και τα αποτελέσματα της ανάλυσης μιας διατομής, καθ' ότι είναι προφανές ότι η ίδια μεταβολή του c θα επηρεάσει πολύ λιγότερο μεγάλα μεγέθη διατομών

Οι σημαντικές διαφοροποιήσεις προέκυψαν αναμενόμενα από την μεταβολή του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού, με τη διατομή 3.7 να φαίνεται αδύναμη να προσφέρει επαρκή παράπλευρη πίεση στο σκυρόδεμα. Όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα του **Σχήματος 3.17**, η παράπλευρη πίεση p παρουσιάζει μια αύξηση καθώς αυξάνεται το πάχος της επικάλυψης c μόνον στην περίπτωση της διατομής 3.5. Ωστόσο η επικάλυψη c φαίνεται εν γένει να μην αλληλεπιδρά σημαντικά με την αποδοτικότητα της περίσφιγξης. Το παράδειγμα της διατομής 3.5 θα μπορούσαμε να το χαρακτηρίσουμε ως εξαίρεση, με τις διαφορές αυτές να οφείλονται στο συνδυασμό του πολύ πυκνού εγκάρσιου οπλισμού της με σχετικά τις μικρές εξωτερικές διαστάσεις της. Συνεπώς, για την ανάλυση της διατομής θα χρησιμοποιήσουμε συνολικά 3 καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων (μια για κάθε "τύπο" διατομής), παίρνοντας για τη διατομή 3.5 μια μέση τιμή παράπλευρης πίεσης.

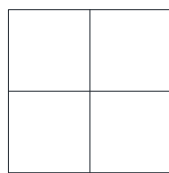
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)



Σχήμα 3.18 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των εξεταζόμενων Διατομών.



α) Διατομές 3.5



β) Διατομές 3.6



γ) Διατομές 3.7

Τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων των εξεταζόμενων διατομών όπως αυτά φαίνονται στο **Σχήμα 3.18**, είναι ακριβώς ίδια με αυτά του Σχήματος 2.3 (διερεύνηση διαμήκους οπλισμού), τα σχόλια και συμπεράσματα των οποίων, βρίσκονται στην ενότητα 2.2.

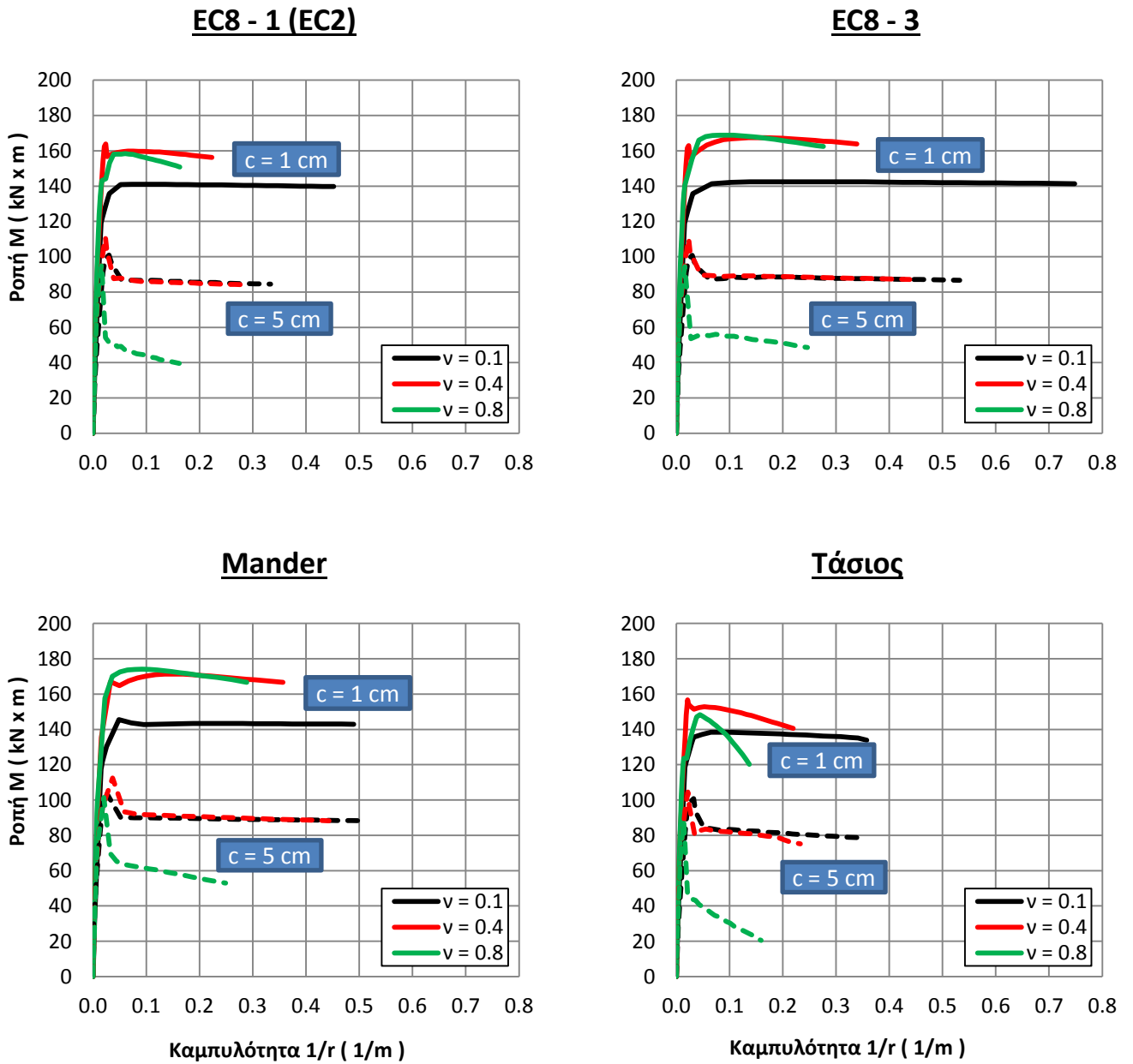
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$

Αρχικά παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους της επικάλυψης όλων των εξεταζόμενων διατομών, δεν επέφερε καμία μεταβολή στις καμπυλότητες αστοχίας τους $(1/r)_u$. Αυτό ήταν ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα βάσει των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων, που όμως από μόνο του, -όπως θα δούμε και μετέπειτα- δεν έχει ιδιαίτερη σημασία. Ωστόσο όπως φαίνεται και στα διαγράμματα $M - (1/r)$ η τιμή της επικάλυψης επηρεάζει καθοριστικά τόσο τη μέγιστη καμπτική αντοχή των διατομών όσο και την τιμή της ροπής στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

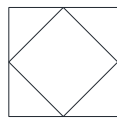
Στα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των **Σχημάτων 3.19** έως **3.21**, παρουσιάζονται οι διατομές με τις ακραίες επικαλύψεις ($c=1$ και $5cm$), ώστε να υπάρχει σαφήνεια και ευκρίνεια στα αποτελέσματα. Όσον αφορά τη μέγιστη καμπτική αντοχή, οι διαφορές μεταξύ των διατομών με διαφορετική επικάλυψη είναι τόσο μεγάλες, σαν να πρόκειται για διατομές με διαφορετικά ποσοστά διαμήκους οπλισμού! Όσο μια διατομή είναι αποτελεσματικότερα περισφιγμένη τόσο η επίδραση της επικάλυψης στην μέγιστη καμπτική αντοχή της είναι εντονότερη. Για παράδειγμα, η διατομή 3.5.A παρουσιάζει περισσότερο από 50% αύξηση στην ροπή M_{max} έναντι της 3.5.E, κάτι που δεν συμβαίνει όμως με τη διατομή 3.7. Οι διαφορές αυτές έχουν να κάνουν τόσο με την τιμή της τάσης f_c^* , όσο και με το ποσοστό της διατομής που είναι περισφιγμένο. Οι πολύ αποτελεσματικά περισφιγμένες διατομές όπου ισχύει $\varepsilon_{cu} < \varepsilon_{co}^*$, αποφλοιώνονται προτού ο πυρήνας τους "πιάσει" τη μέγιστη τάση f_c^* . Σαν αποτέλεσμα, η επικάλυψη που θα αστοχήσει σε κάθε περίπτωση, παίζει καθοριστικό ρόλο στην τιμή της μέγιστης καμπτικής αντοχής της διατομής.

Όσον αφορά τη ροπή αστοχίας των διατομών, παρατηρούμε και εδώ πόσο καθοριστικής σημασίας είναι η μεταβολή της τιμής της επικάλυψης μιας διατομής. Ο μεταλαστικός κλάδος των καμπυλών $M - (1/r)$, παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονη, αρνητική κλίση, στην περίπτωση των διατομών με επικάλυψη $5cm$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, αυτού του "τύπου" οι διατομές, να εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές ροπών αστοχίας (συγκρινόμενες με τις μέγιστες καμπτικές αντοχές τους). Φυσικά και εδώ, όπως και στις προηγούμενες διερευνήσεις, πρέπει να τονιστεί η σημασία και η αλληλεπίδραση της τιμής του θλιπτικού αξονικού φορτίου με όλα τα παραπάνω,. Βλέπουμε δηλαδή, ότι τα προαναφερθέντα προβλήματα, προκύπτουν για μεγάλες τιμές αξονικών δυνάμεων ($\nu = 0.8$), και ότι μέχρι μεσαίες - επιτρεπές τιμές (από

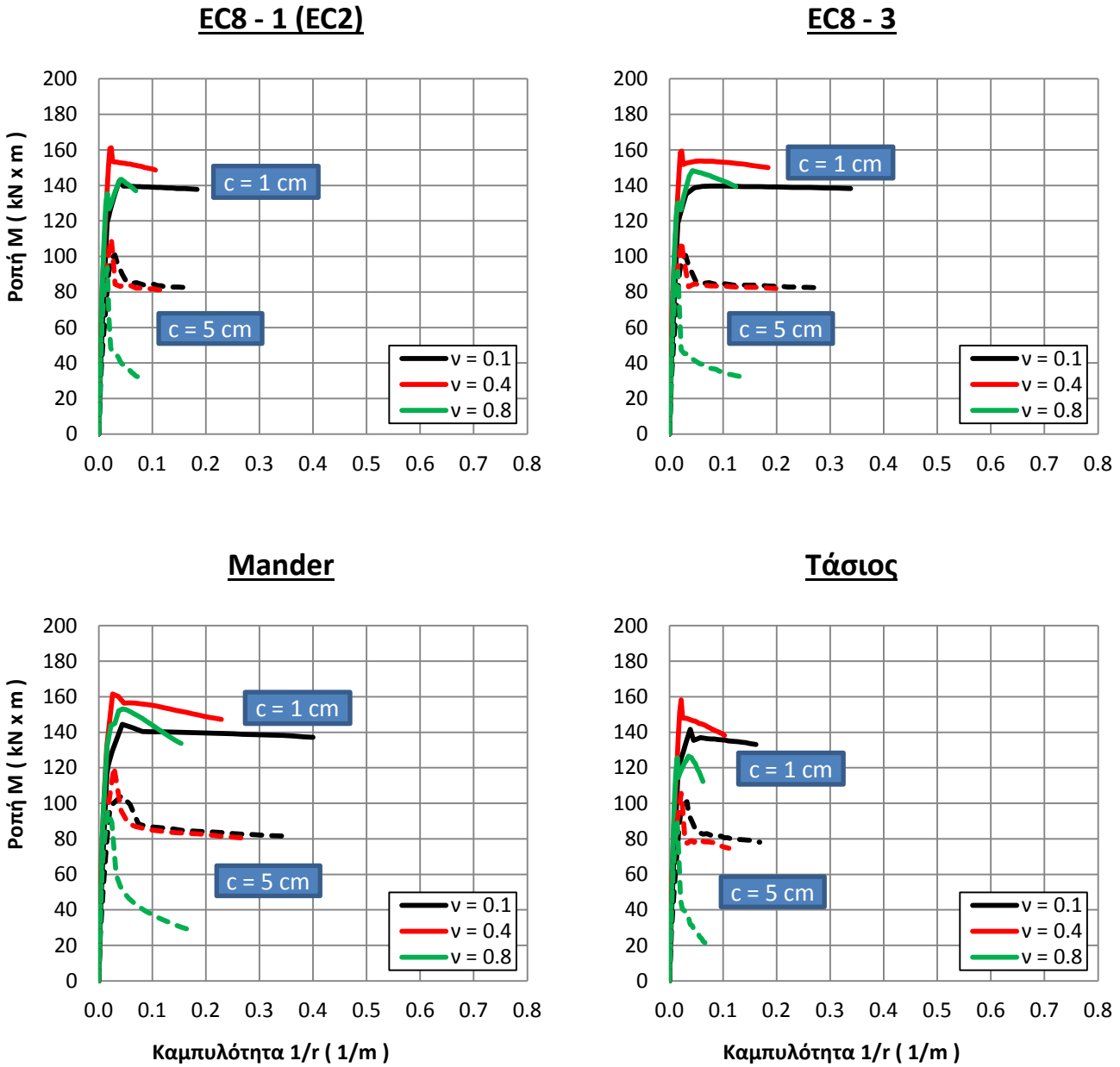
τους κανονισμούς), ο μετελαστικός κλάδος των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ παραμένει οριζόντιος ανεξάρτητα του πάχους της επικάλυψης (αρκεί βέβαια η διατομή να είναι επαρκώς περισφιγμένη...).



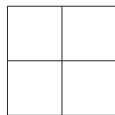
Σχήμα 3.19 Διαγράμματα ροπών - καμυλοτήτων των Διατομών 3.5.Α και 3.5.Ε.



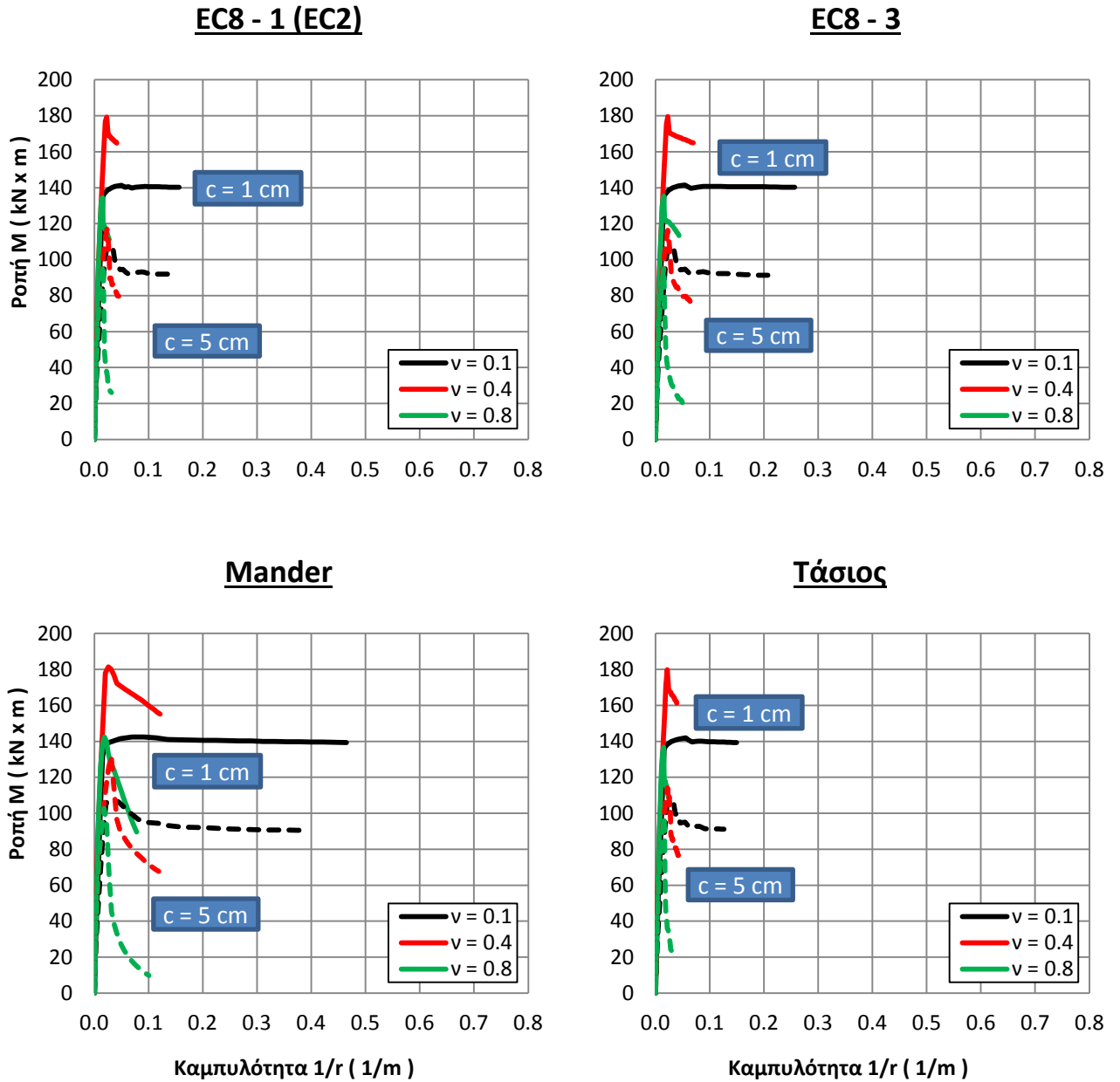
Διατομές 3.5



Σχήμα 3.20 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 3.6.Α και 3.6.Ε.



Διατομές 3.6

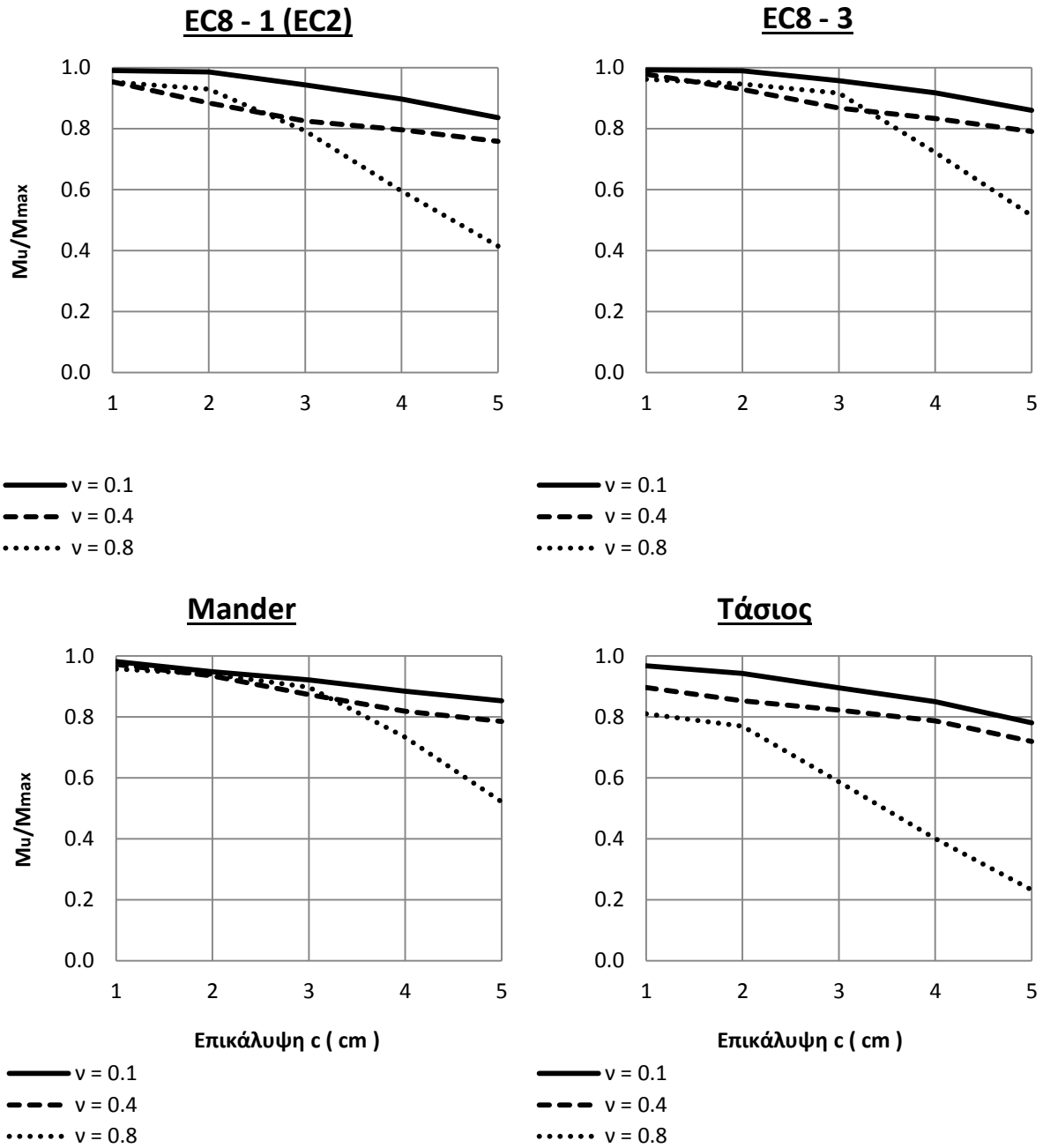


Σχήμα 3.21 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 3.7.A και 3.7.E.

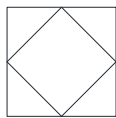


Διατομές 3.7

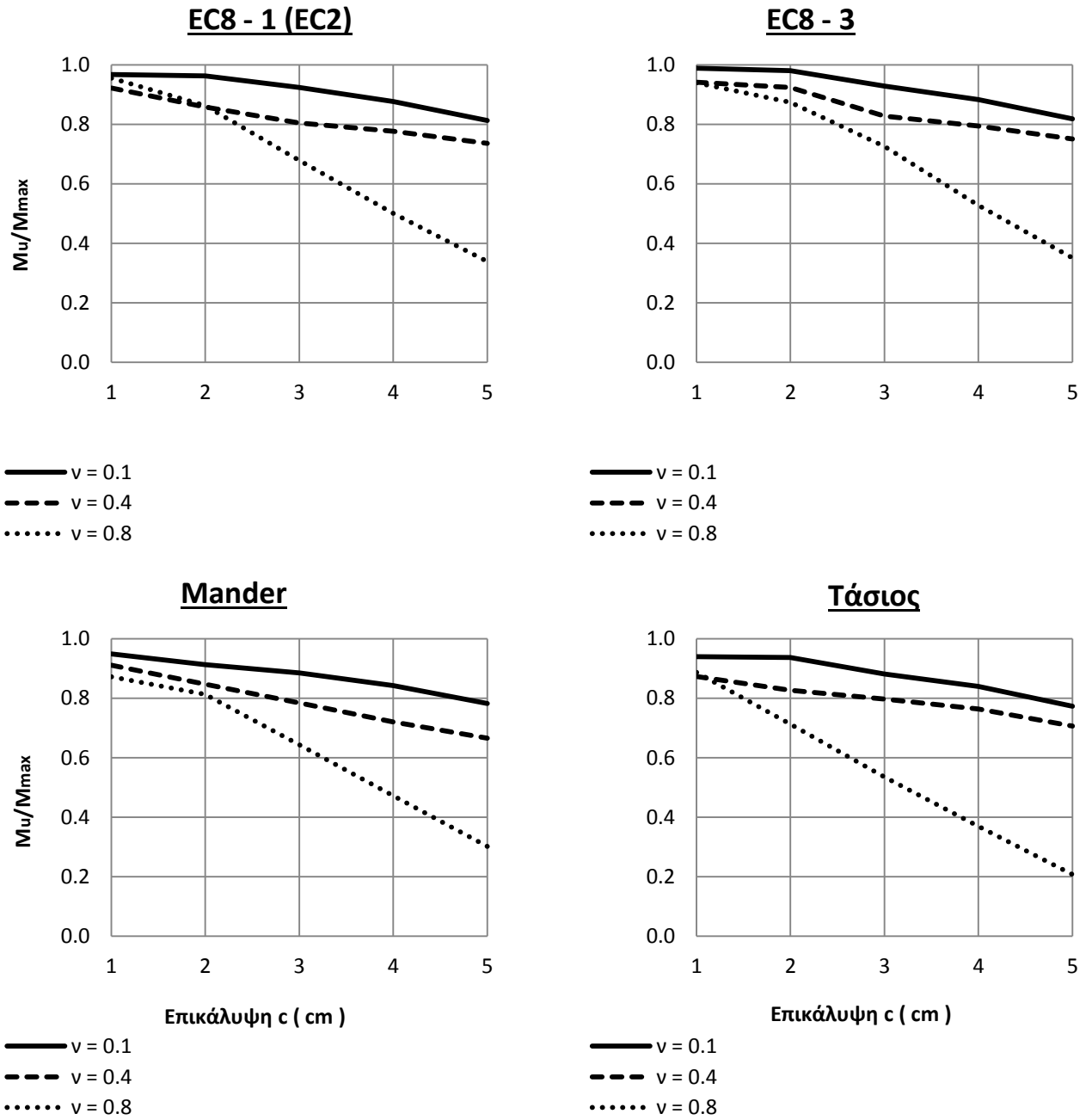
Λόγος M_u/M_{max}



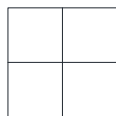
Σχήμα 3.22 Διαγράμματα [ροπή αστοχίας (M_u)]/[μέγιστης ροπής (M_{max})] - επικάλυψης εξωτερου οπλισμού (c), για τις Διατομές 3.5.



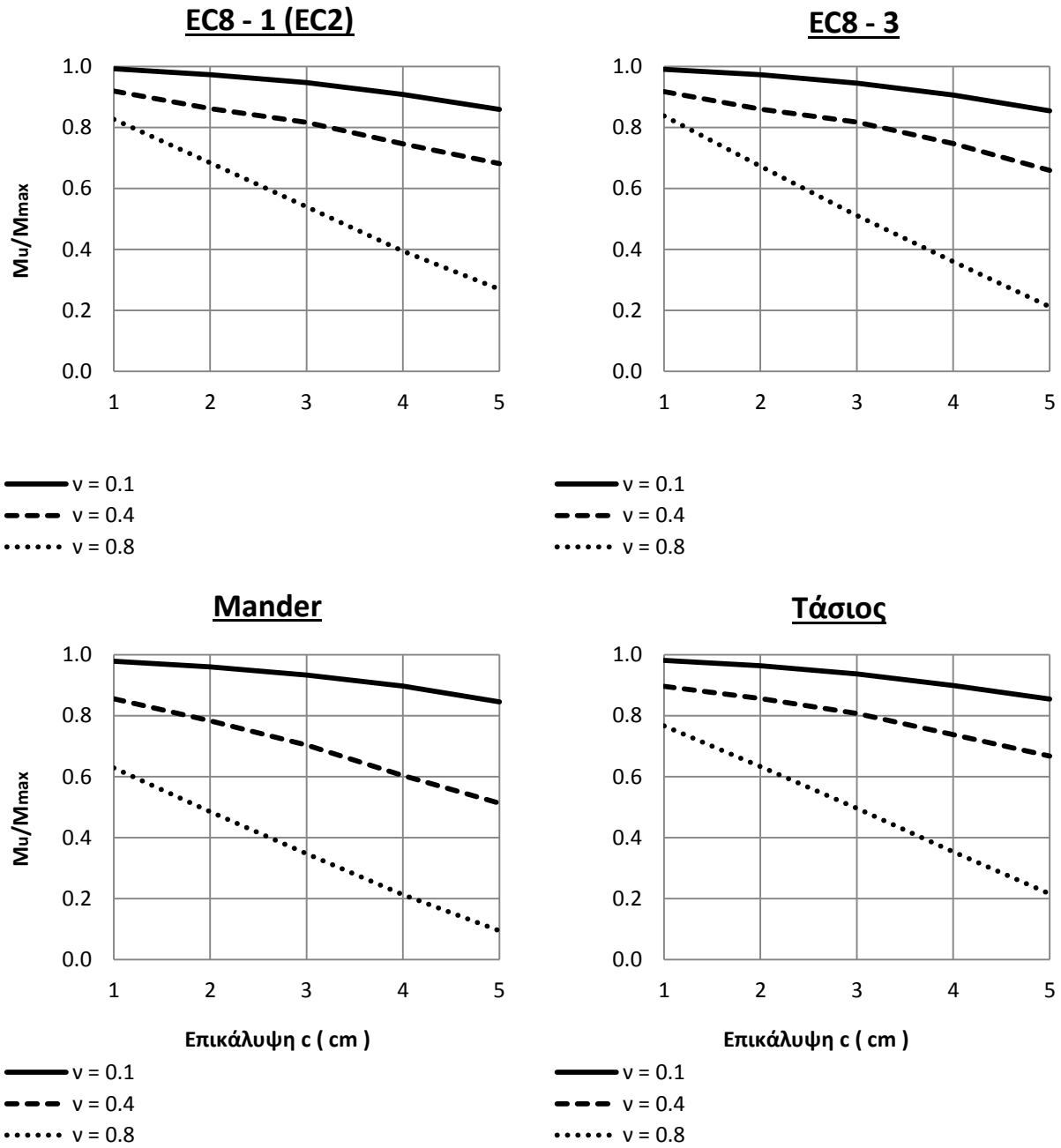
Διατομές 3.5



Σχήμα 3.23 Διαγράμματα [ροπή αστοχίας (M_u)]/[μέγιστης ροπής (M_{max})] - επικάλυψης εξώτερου οπλισμού (c), για τις Διατομές 3.6.



Διατομές 3.6



Σχήμα 3.24 Διαγράμματα [ροπή αστοχίας (M_u)]/[μέγιστης ροπής (M_{max})] - επικάλυψης εξώτερου οπλισμού (c), για τις Διατομές 3.7.



Διατομές 3.7

Όπως είδαμε και πιο πάνω, το πάχος της επικάλυψης ή αλλιώς το ποσοστό της διατομής που είναι απερίσφικτο, επηρεάζει τις ροπές αλλά όχι τις καμπυλότητες αστοχίας. Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τη σχέση του λόγου M_u/M_{max} με την επικάλυψη c . Ο λόγος αυτός είναι καθοριστικός για τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ και συνεπώς για τις τιμές των πλαστιμοτήτων μ_ϕ μιας διατομής. Και αυτό, γιατί σε διατομές που παρουσιάζουν έντονη αρνητική κλίση στο μετελαστικό κλάδο (όπως οι διατομές με επικάλυψη $5cm$), εάν απαιτήσουμε μια ελάχιστη τιμή M_u/M_{max} , τότε θα πρέπει να ορίσουμε μικρότερη καμπυλότητα αστοχίας από την "πραγματική". Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η τιμή της καμπυλότητας να έχει μικρή σημασία όταν αυτή συνοδεύεται από πολύ μικρές ροπές.

Αν απαιτήσουμε εμείς μια ελάχιστη τιμή του λόγου $(M_u/M_{max}) = 0.8$ τότε θα δούμε πως η επικάλυψη $c = 3cm$ σε μια διατομή 30×30 μπορεί να θεωρηθεί σαν ανώτατο όριο, και μάλιστα ανεξάρτητα από το πως είναι περισφιγμένη. Αυτό φυσικά ισχύει για μικρά - μεσαία θλιπτικά αξονικά φορτία $\nu = 0.1$ και 0.4 , καθ' ότι σε μεγάλες (και εκτός κανονισμών) αξονικές δυνάμεις, οι τιμές του παραπάνω λόγου παρουσιάζουν δραστική μείωση ήδη από επικαλύψεις 2 εκατοστών.

Κεφάλαιο 4

ΥΛΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Ποιότητα σκυροδέματος
- 4.3 Κράτυνση χάλυβα

4.1 Εισαγωγή

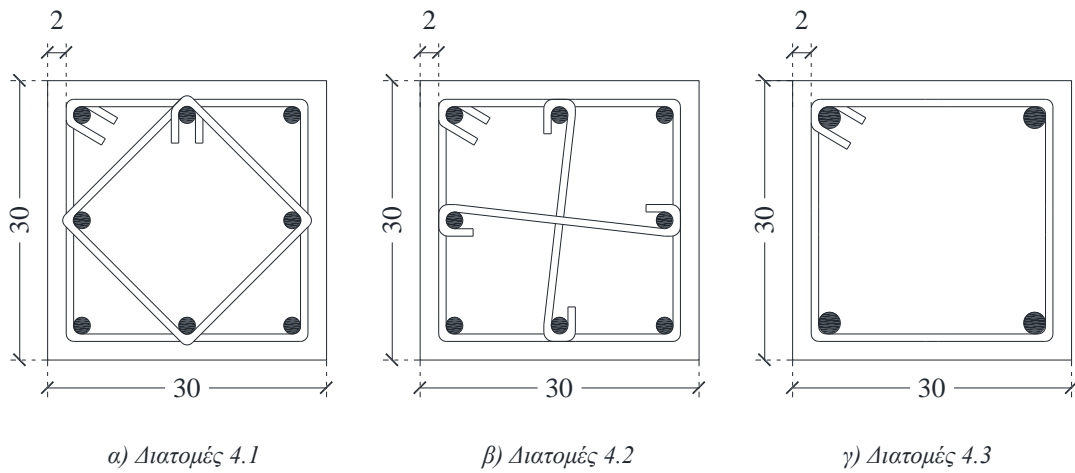
Οι ποιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται μια διατομή παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων σε επίπεδο διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων και κατ' επέκταση πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων. Τα υλικά από τα οποία αποτελείται μια οπλισμένη διατομή είναι το σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Όσον αφορά το σκυρόδεμα, θα μεταβάλουμε την θλιπτική τάση του, σαν να επρόκειτο για διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος. Όσον αφορά το χάλυβα, επειδή τα "περιθώρια" μεταβολής στην ποιότητα του είναι σχετικά μικρά, θα διερευνήσουμε την επιρροή που έχει κράτυνση στα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων και στις πλαστιμότητες μ_{ϕ} διαφόρων διατομών. Όπως έγινε και στα προηγούμενα κεφάλαια, θα σχολιάσουμε και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των διερευνήσεών μας, εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

4.2 Ποιότητα σκυροδέματος

Για την παραμετρική διερεύνηση του μεγέθους της διατομής, θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών 30 X 30, με επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm, ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho \approx 2.2\%$, χάλυβα $f_y = 500\text{MPa}$ και επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

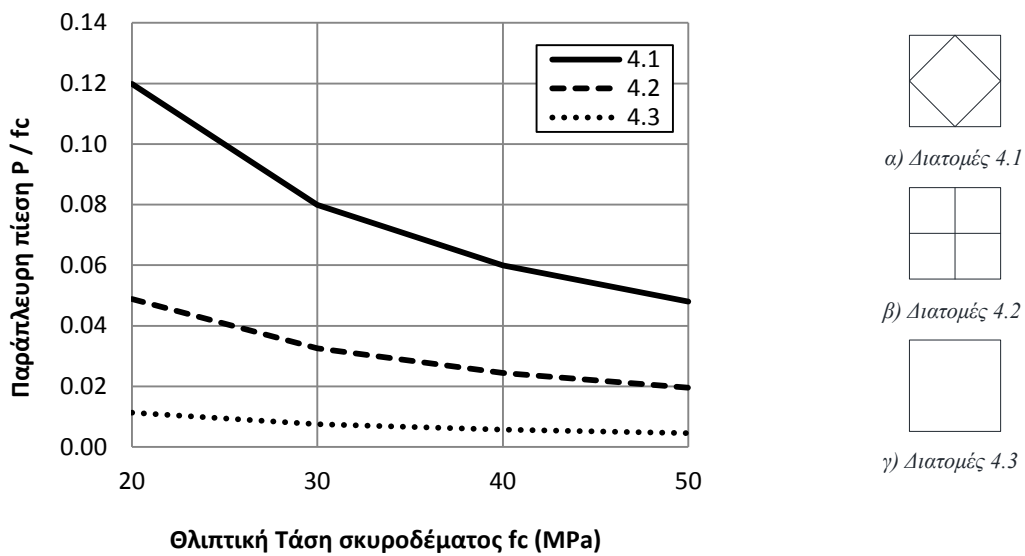
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 4.1 - 4.2 - 4.3.

Όνομα	Σκυρόδεμα (MPa)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
		Υλοποιούμενος με	Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
4.1.A	20	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2398
4.1.B	30	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.1599
4.1.Γ	40	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.1199
4.1.Δ	50	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.0959
4.2.A	20	8 X Φ18	Φ8/12.5	3	0.0977
4.2.B	30	8 X Φ18	Φ8/12.5	3	0.0651
4.2.Γ	40	8 X Φ18	Φ8/12.5	3	0.0488
4.2.Δ	50	8 X Φ18	Φ8/12.5	3	0.0391
4.3.A	20	4 X Φ25	Φ8/17.5	2	0.0224
4.3.B	30	4 X Φ25	Φ8/17.5	2	0.0149
4.3.Γ	40	4 X Φ25	Φ8/17.5	2	0.0112
4.3.Δ	50	4 X Φ25	Φ8/17.5	2	0.0090



Σχήμα 4.1 Σχήματα Διατομών 4.1 - 4.1.

Αποδοτικότητα περίσφιξης



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα $p/f_c - f_c$ για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

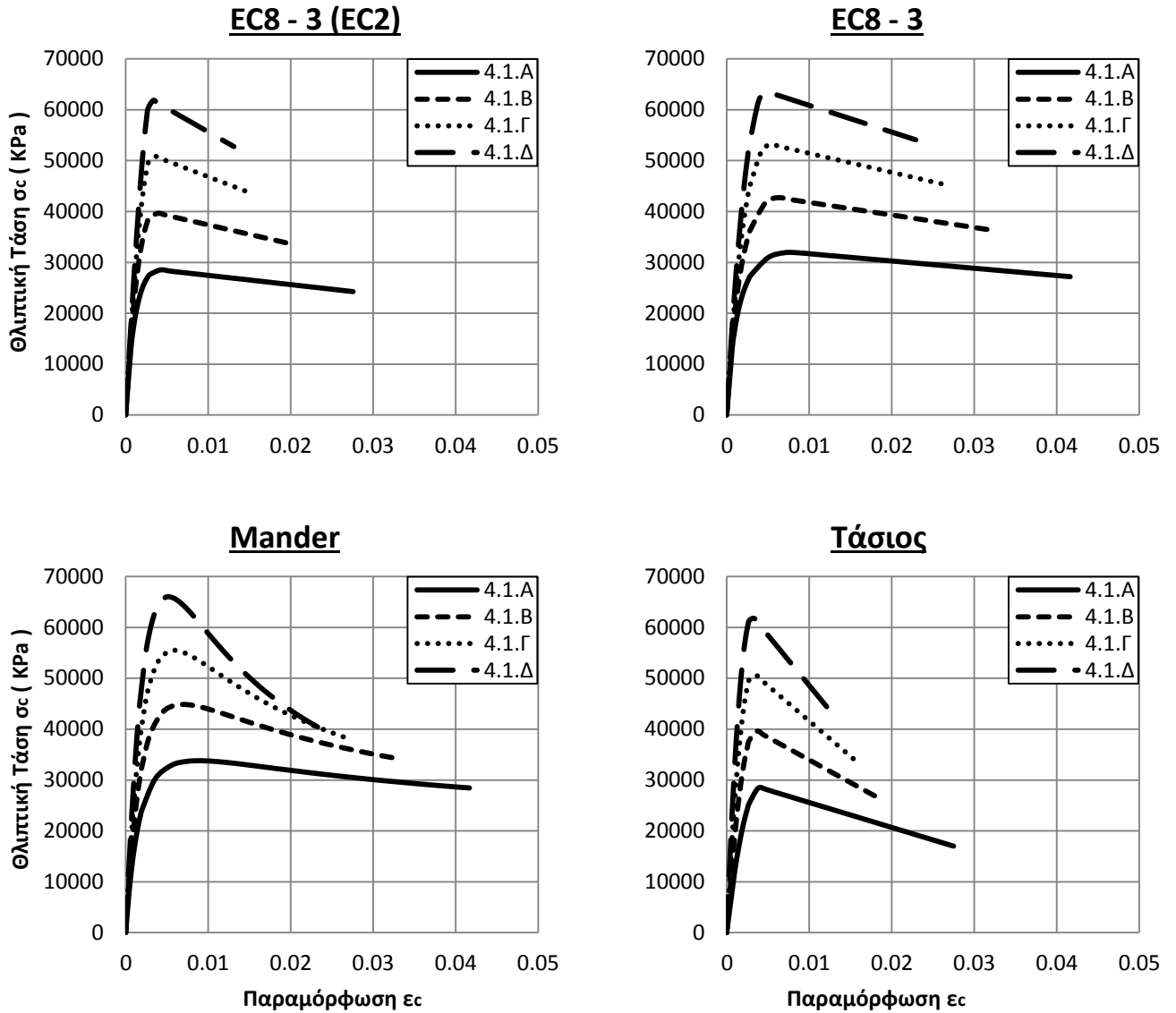
Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα του **Σχήματος 4.2** η επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος στην αποδοτικότητα της περίσφιγξης και κατά συνέπεια στο λόγο p/f_c , είναι ιδιαίτερος σημαντική. Η αύξηση στην τιμή της θλιπτικής αντοχής f_c , συνεπάγεται μια παραβολική μείωση του λόγου p/f_c , η οποία όμως αμβλύνεται όσο μειώνεται το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού σε μια διατομή.

Τα παραπάνω, δεν προκαλούν ιδιαίτερη εντύπωση, αρκεί να ανατρέξουμε στη σχέση υπολογισμού του ογκομετρικού ποσοστού οπλισμού μιας διατομής:

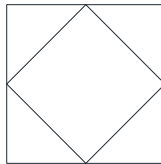
$$\omega_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων που περισφίγγουν τη διατομή}}{\text{όγκος πυρήνα διατομής}} * \frac{f_y}{f_c}$$

Παρατηρούμε ότι η ποσότητα ω_w (επομένως και η ποσότητα p/f_c) είναι αντιστρόφως ανάλογη της θλιπτικής τάσης f_c . Συγκεκριμένα για τις διατομές 4.1, διαπιστώνουμε ότι η τιμή του λόγου p/f_c πέφτει κάτω από το μισό της, καθώς μεταβαίνουμε από αρχική τιμή αντοχής σκυροδέματος $20MPa$ σε τελική $50MPa$. Κάτι αντίστοιχο δεν συμβαίνει και στη διατομή 4.3, όπου τα περιθώρια μείωσης του λόγου p/f_c είναι πιο "στενά" λόγω της χαμηλής αποδοτικότητας περίσφιγξης του σκυροδέματος ως αποτέλεσμα του πολύ αραιού ποσοστού εγκάρσιου οπλισμού της.

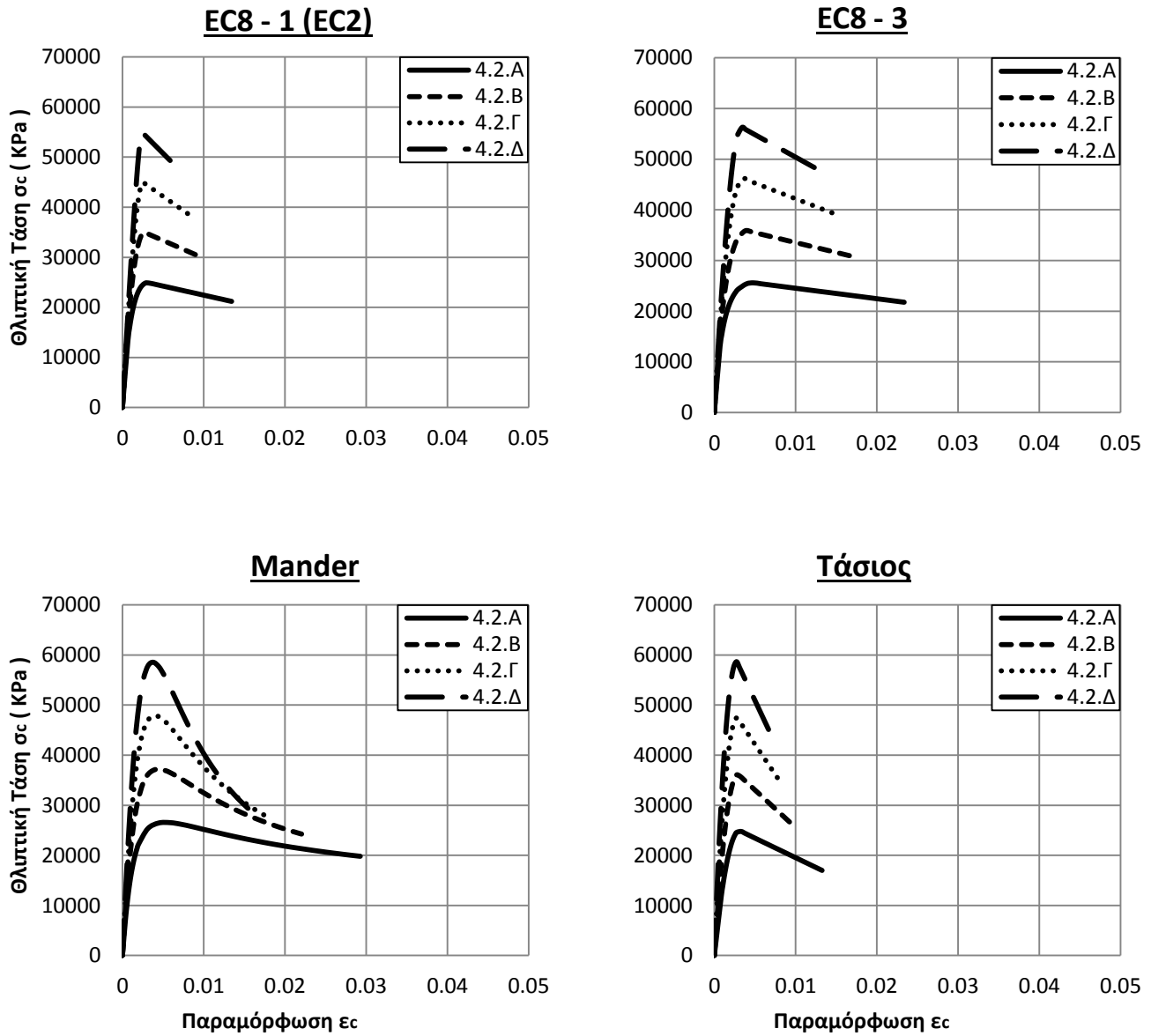
Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)



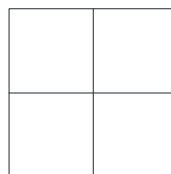
Σχήμα 4.3 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Διατομών 4.1.



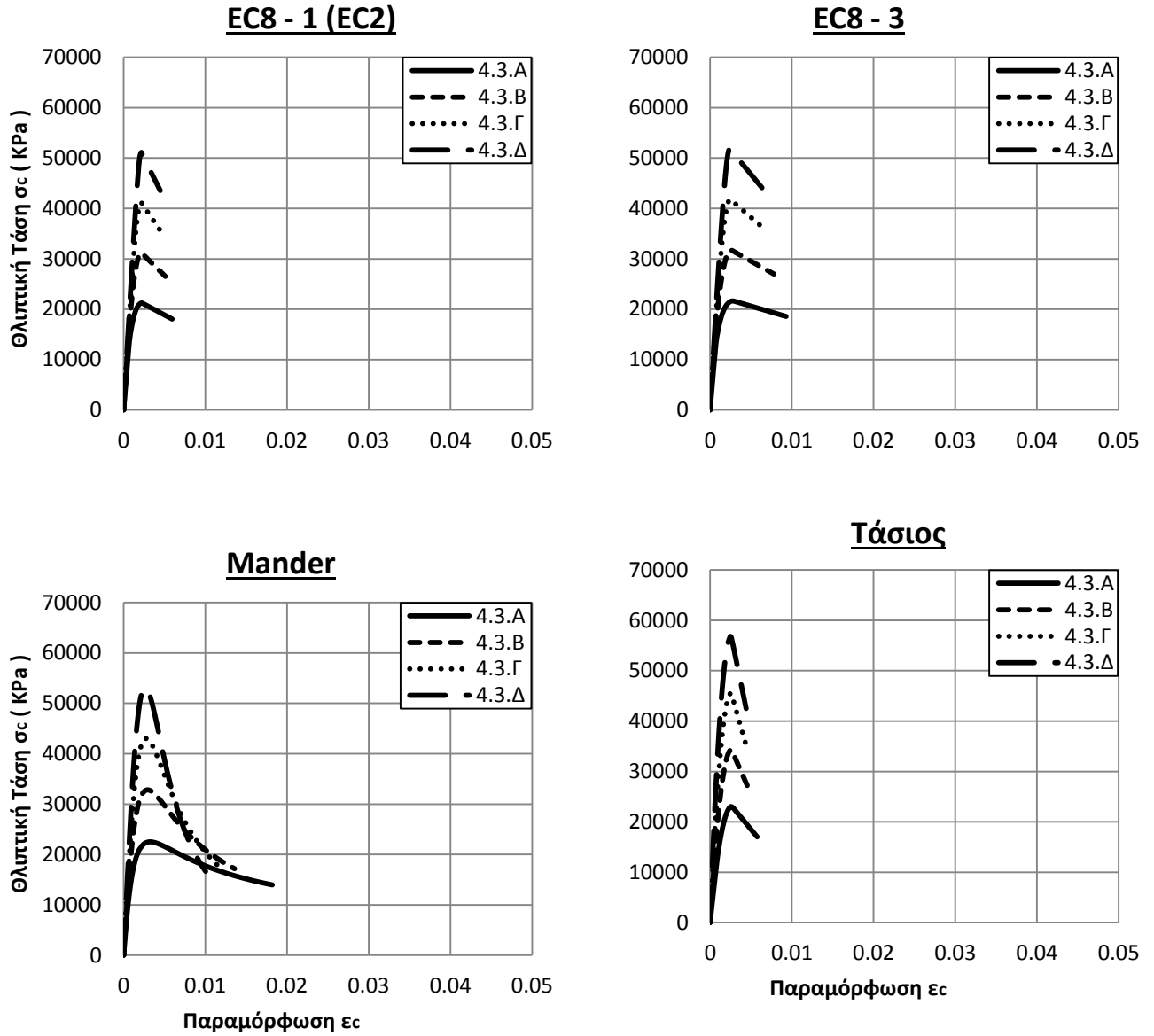
Διατομές 4.1



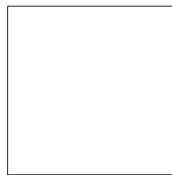
Σχήμα 4.4 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Διατομών 4.2.



Διατομές 4.2



Σχήμα 4.5 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των Διατομών 4.3.



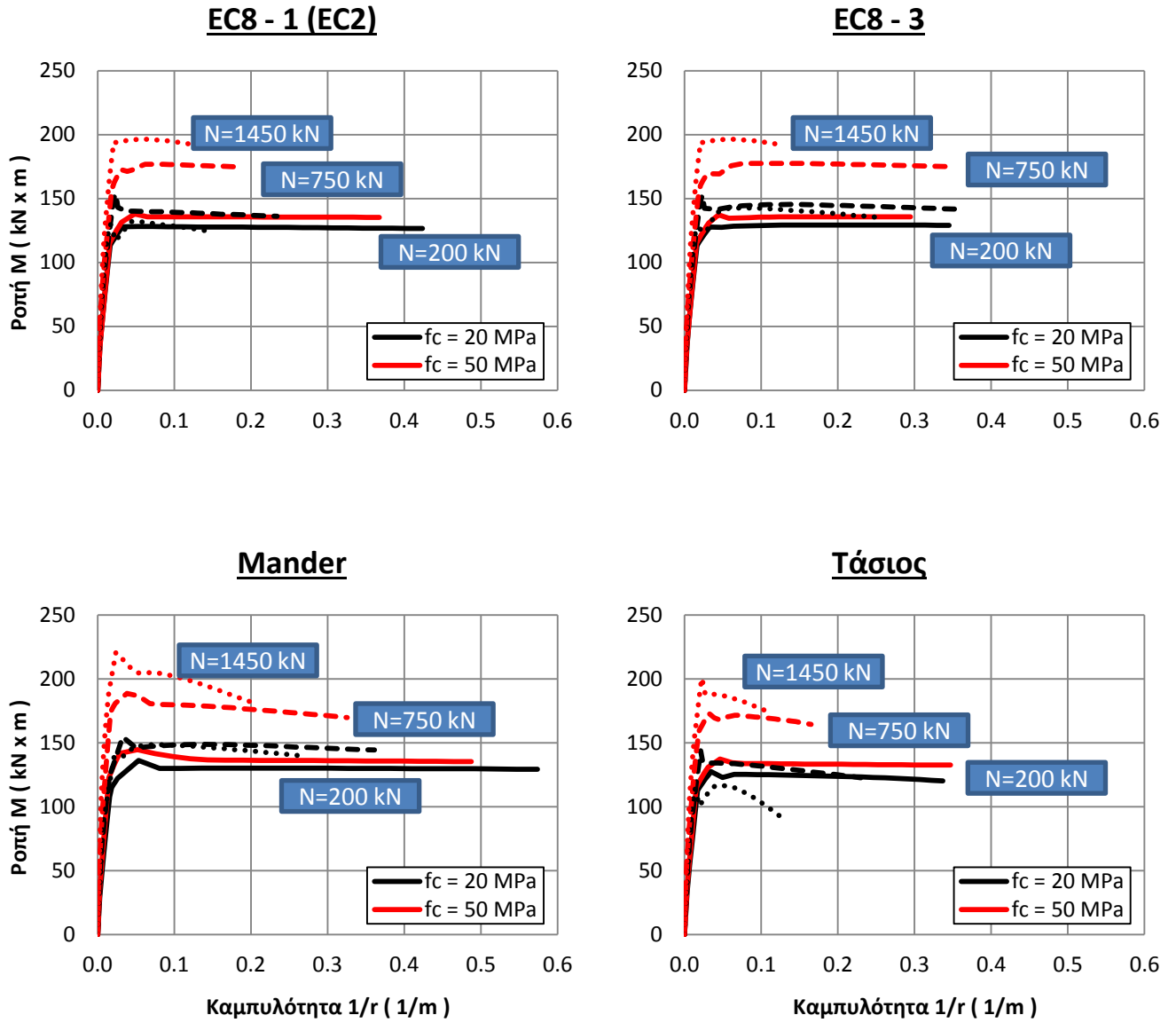
Διατομές 4.3

Τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων όλων των εξεταζόμενων διατομών όπως φαίνονται στα **Σχήματα 4.3** έως **4.5** επιβεβαιώνουν την εικόνα που είχαμε και από το διάγραμμα $p/f_c - f_c$. Όσον αφορά τις διατομές 4.1, διαπιστώνουμε και εδώ τη σαφή επιρροή της μεταβολής της θλιπτικής τάσης f_c στις τιμές των τροποποιημένων παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος. Παρατηρούμε σε όλα τα προσομοιώματα εκτός από αυτό του Mander, μια μείωση περίπου 50% στις παραμορφώσεις αστοχίας ε_{cu}^* , μεταξύ των διατομών 4.1.A (20MPa) και 4.1.Δ (50MPa). Τα ελαφρώς διαφοροποιημένα (πιο ευνοϊκά) αποτελέσματα του μοντέλου του Mander είναι αποτέλεσμα της σχέσης υπολογισμού της παραμέτρου K (δηλ με ποιον τρόπο μετέχει σε αυτήν η θλιπτική τάση f_c).

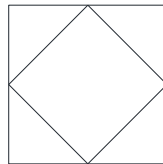
Μια άλλη παρατήρηση έχει να κάνει με την αλληλεπίδραση του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού μιας διατομής με την ποιότητα του σκυροδέματος όσον αφορά τα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$. Αντίθετα με τις διατομές 4.1, βλέπουμε ότι στις διατομές 4.3, οι παραμορφώσεις αστοχίας ε_{cu}^* ταυτίζονται μεταξύ τους και δεν επηρεάζονται από την τιμή της θλιπτικής τάσης f_c (**Σχήμα 4.5**). Αναμενόμενα λοιπόν, οι διατομές 4.2 έχοντας ενδιάμεσα ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού σε σχέση με τις 4.1 και 4.3, παρουσιάζουν και αντίστοιχα ενδιάμεσα αποτελέσματα στην επιρροή που έχει η ποιότητα του σκυροδέματος στα διαγράμματα $\sigma - \varepsilon$ (**Σχήμα 4.4**). Συμπερασματικά, καταλήγουμε πως η αύξηση της τιμής της θλιπτικής αντοχής f_c , επιδρά αρνητικά στις μέγιστες παραμορφώσεις αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος υπό την προϋπόθεση ότι η διατομή έχει ένα "ικανό" ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού.

Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$

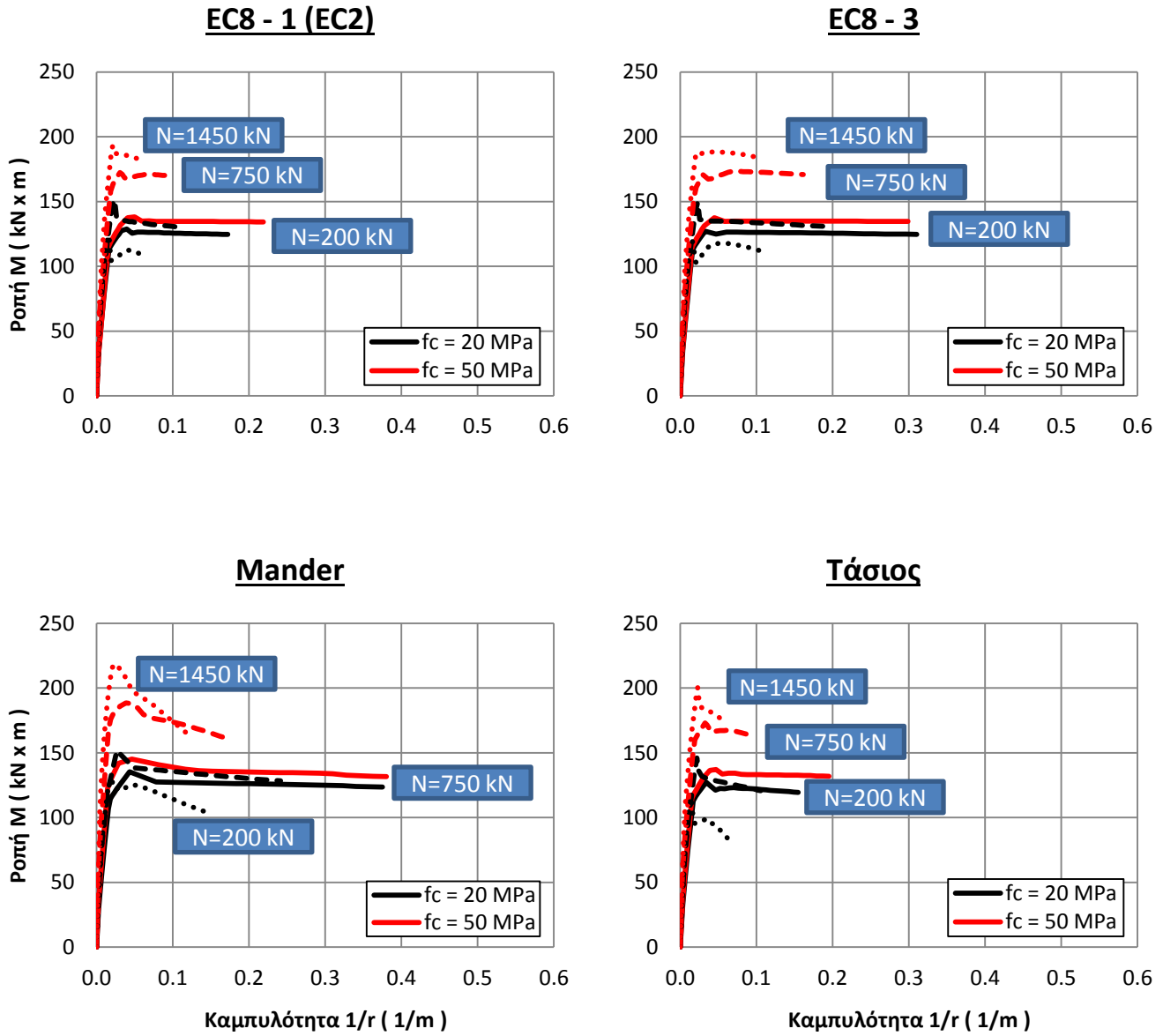
Στα Σχήματα 4.5 έως 4.7 φαίνονται τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των εξεταζόμενων διατομών με $f_c = 20MPa$ και $50MPa$, για θλιπτικό αξονικό φορτίο (όχι ανηγμένο) $N = 200kN, 750kN$ και $1450kN$. Αυτό σημαίνει ότι η ανηγμένη αξονική δύναμη ν έχει πολύ ευνοϊκότερη τιμή στην περίπτωση των διατομών με $f_c = 50MPa$. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις διαφορές, αρκεί να κάνουμε αναγωγή της N στην εκάστοτε διατομή. Για παράδειγμα, το συνολικό φορτίο $N = 1450kN$, ενώ αντιστοιχεί στις διατομές A ($f_c = 20MPa$) σε $\nu = 0.8$, στις Δ ($50MPa$) αντιστοιχεί σε $\nu = 0.32$! Παρ' όλα αυτά, παρατηρούμε ότι οι καμπυλότητες αστοχίας των διατομών 4.1.A και 4.1.Δ δεν διαφέρουν μεταξύ τους για κάθε αξονική N (**Σχήμα 4.5**). Πανομοιότυπη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι διατομές 4.2 και 4.3.



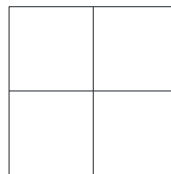
Σχήμα 4.5 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.1.Α και 4.1.Δ.



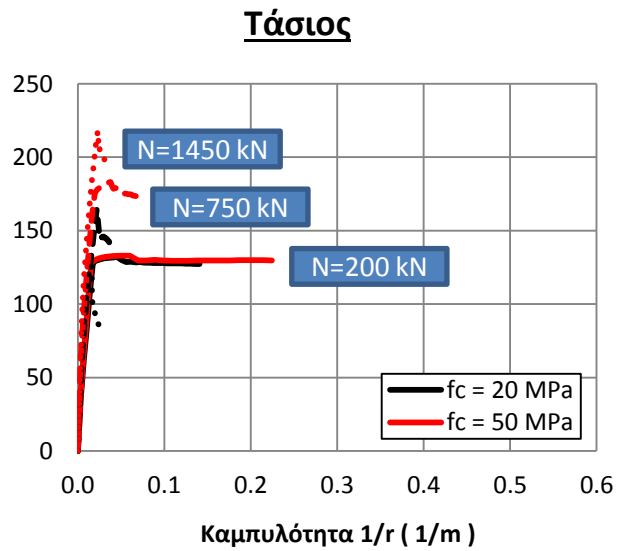
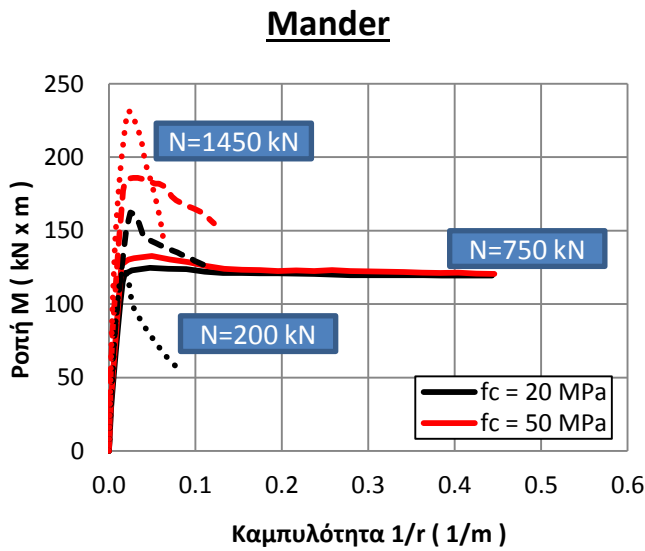
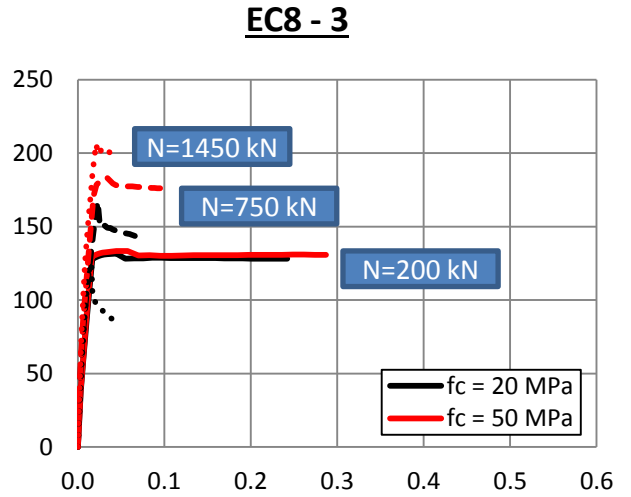
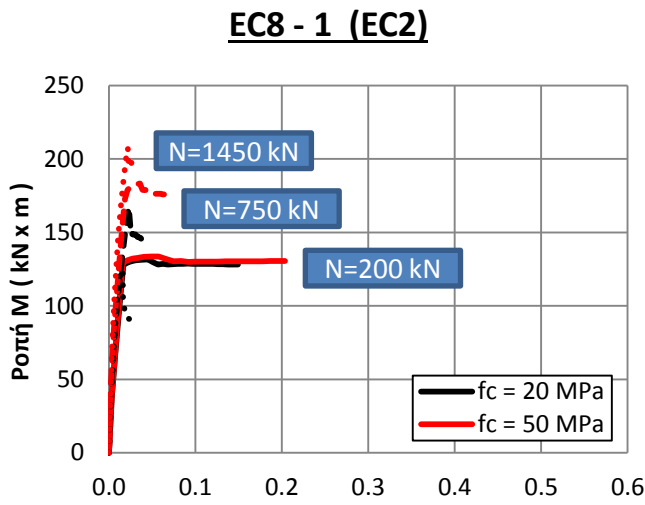
Διατομές 4.1



Σχήμα 4.6 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.2.Α και 4.1.Δ.



Διατομές 4.2



Σχήμα 4.7 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.3.Α και 4.3.Δ.



Διατομές 4.3

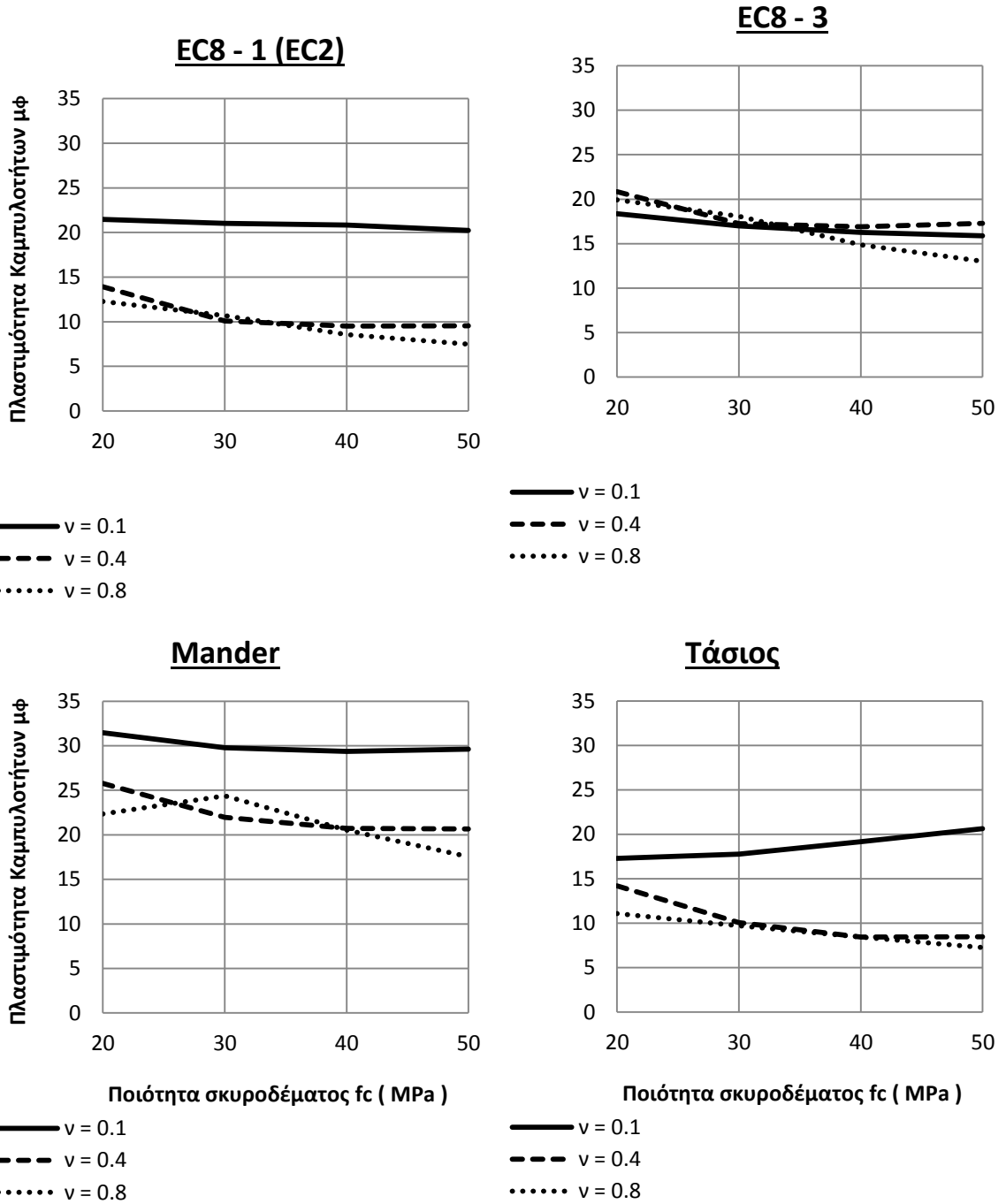
Στην πράξη, τα παραπάνω σημαίνουν ότι εάν έχουμε διαστασιολογήσει με βάση μια ποιότητα σκυροδέματος x , αλλά στην πραγματικότητα το σκυροδέμα έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή, αυτό, δε θα επηρεάσει τις καμπυλότητες αστοχίας με αρνητικό τρόπο. Αυτό συμβαίνει (όπως και στην παρούσα διερεύνηση) υπό την προϋπόθεση ότι το θλιπτικό αξονικό φορτίο είναι δεδομένο.

Εδώ βεβαίως θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και τους συντελεστές ασφαλείας και σε επίπεδο υλικών που υπάρχουν στους κανονισμούς οπλισμένου σκυροδέματος. Εάν από την άλλη, θελήσουμε να αυξήσουμε το θλιπτικό αξονικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει μια διατομή μέσω της βελτίωσης της ποιότητας του σκυροδέματος, τότε καταλαβαίνουμε ότι αυτό θα έχει αρνητική επίδραση στις καμπυλότητες αστοχίας. Θα επιφέρει, ανάλογα με την αποδοτικότητα της περισφιγξης της διατομής (αναφέρθηκε στην ενότητα "Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$)") δραστηκή μείωση στις καμπυλότητες αστοχίας.

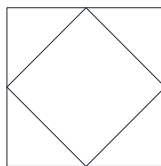
Πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μ_ϕ

Όσον αφορά τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων, βλέπουμε και αυτές κατ' αναλογία με τις καμπυλότητες αστοχίας, να μην επηρεάζονται ιδιαίτερα από την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος για όλους τους τύπους περισφιγξης των διατομών. Παρατηρούμε κάποια "σκαλοπάτια" στα διαγράμματα $\mu_\phi - f_c$, τα οποία θα μπορούσαμε να τα χαρακτηρίσουμε ήσσονος σημασίας καθ' ότι οφείλονται σε "μικροσφάλματα" κατά τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων.

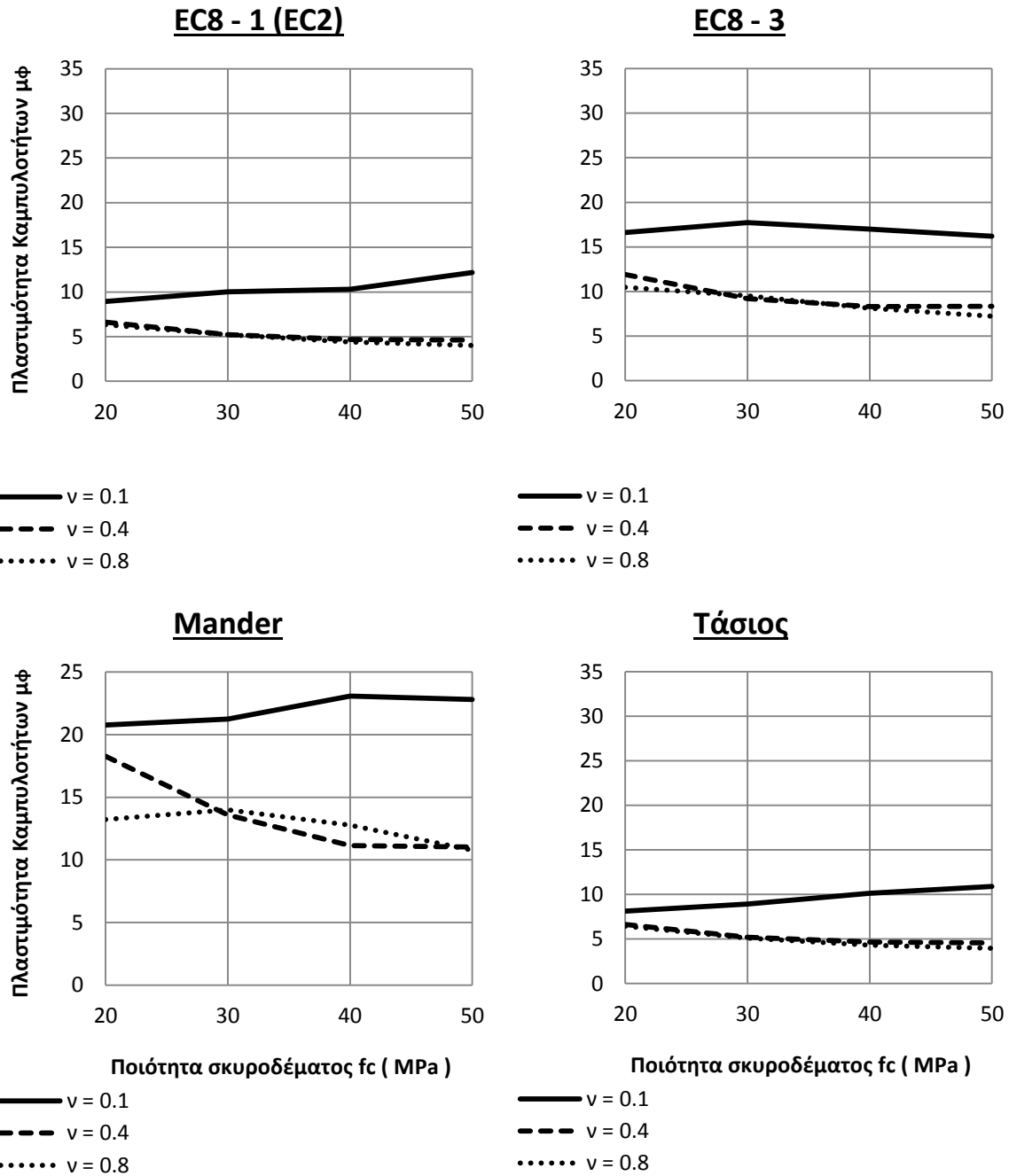
Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από τα διαγράμματα $\mu_\phi - f_c$, των **Σχημάτων 4.8** έως **4.10** είναι πανομοιότυπα με τις προηγούμενες διερευνήσεις. Και εδώ, επιβεβαιώνουμε τη σημασία που έχει ο εγκάρσιος οπλισμός στα αποτελέσματα πλαστιμότητας καμπυλοτήτων. Παρατηρούμε ότι οι διατομές 4.3 αδυνατούν να προσφέρουν επαρκείς τιμές μ_ϕ ήδη από μεσαίες τιμές αξονικών δυνάμεων ($\nu = 0.4$), καθιστώντας τες ακατάλληλες. Βλέπουμε επίσης ότι η οριακή επάρκεια των διατομών 4.2 μπορεί να εξαρτηθεί από το εκάστοτε προσομοίωμα περισφιγξης, όπως και ότι τα αρχικά "σκαλοπάτια" στις καμπύλες που αντιστοιχούν στις διατομές 4.1, οφείλονται στην πρόωρη αστοχία του εφελκόμενου χάλυβα (EC8 και Mander).



Σχήμα 4.8 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποιότητας σκυροδέματος για τις Διατομές 4.1.



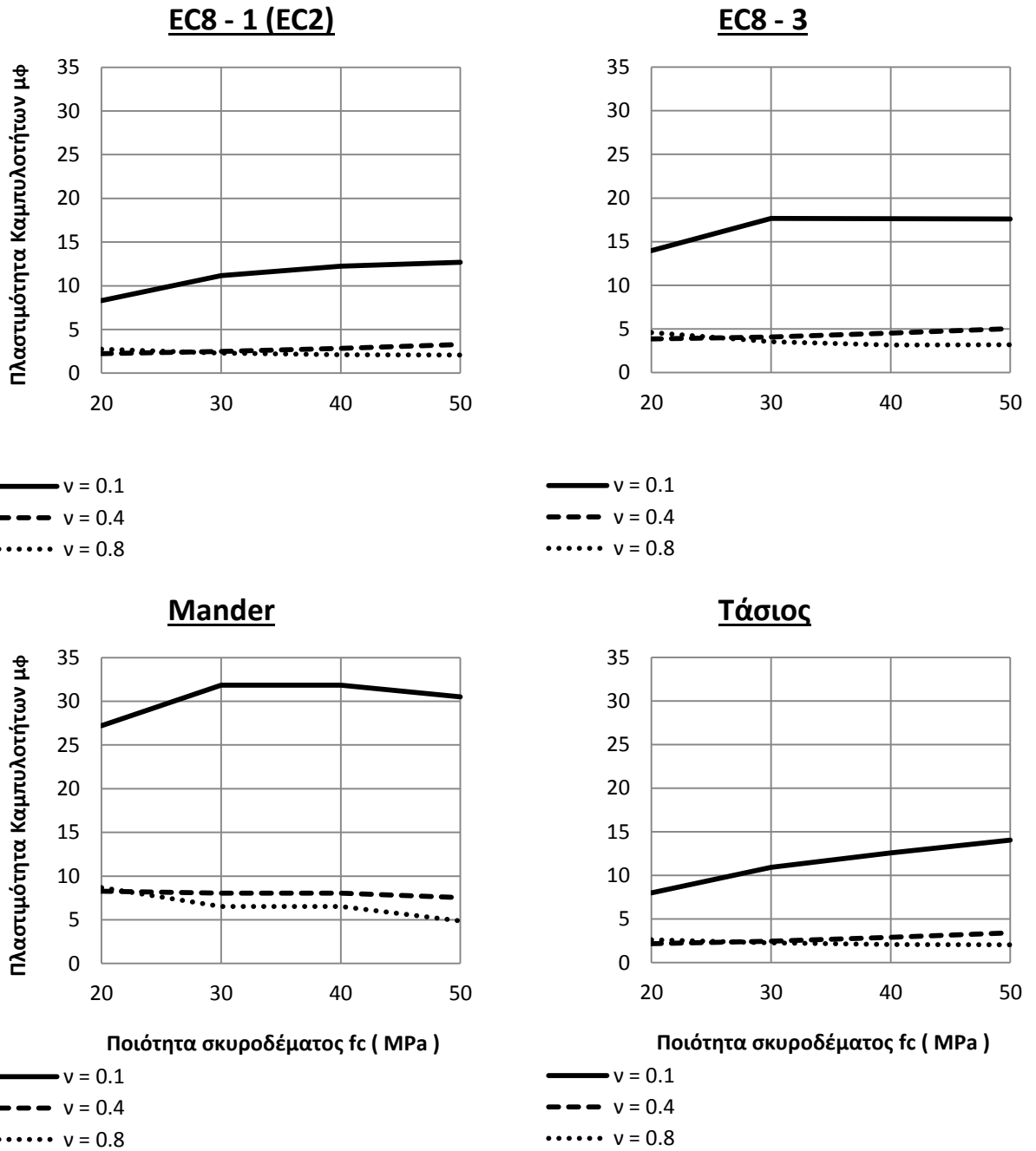
Διατομές 4.1



Σχήμα 4.9 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποιότητας σκυροδέματος για τις Διατομές 4.2.



Διατομές 4.2



Σχήμα 4.10 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων - ποιότητας σκυροδέματος για τις Διατομές 4.3.



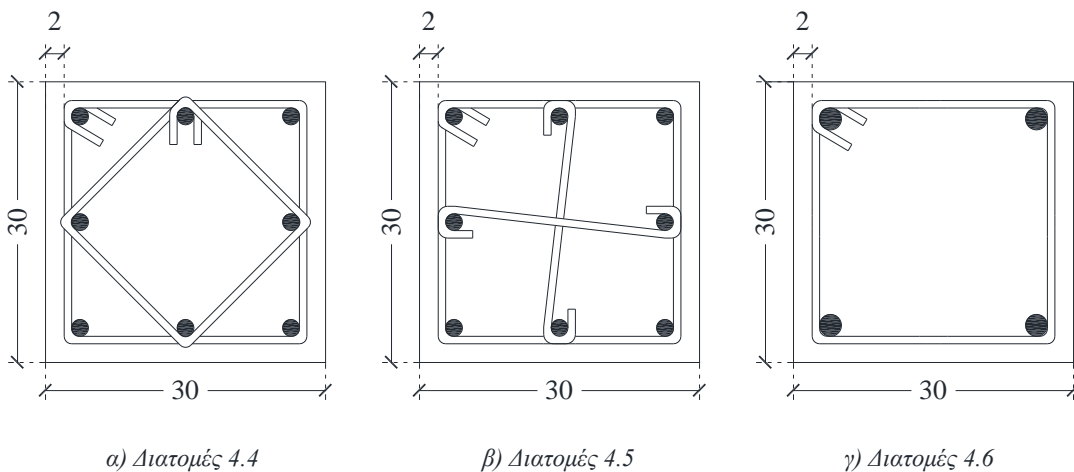
Διατομές 4.3

4.2 Κράτynση χάλυβα

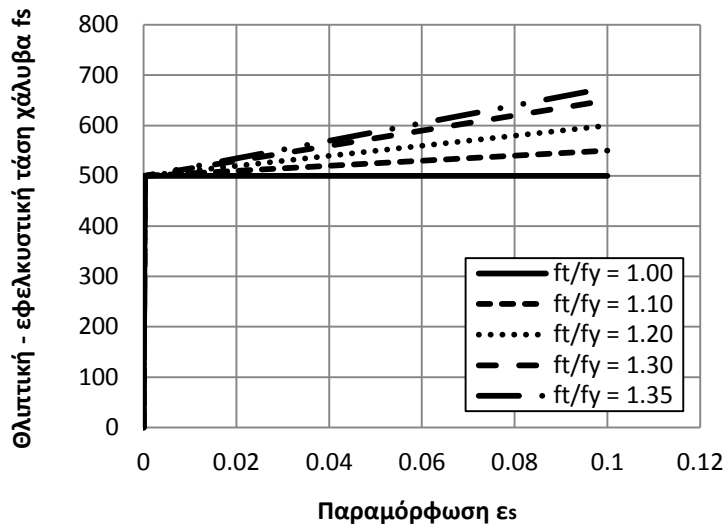
Για την παραμετρική διερεύνηση του μεγέθους της διατομής, θα χρησιμοποιηθούν παραδείγματα τετραγωνικών διατομών 30 X 30, με επικάλυψη εξώτερου οπλισμού (c): 2 cm, υλικά: $f_y = 500MPa$ και $f_c = 20MPa$, ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho \approx 1-4\%$ και επιπλέον χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά όλων των εξεταζόμενων Διατομών 4.4 - 4.5 - 4.6.

Όνομα	Κράτynση χάλυβα	Εγκάρσιος οπλισμός		
		Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω_w}
4.4.A	1.00	Φ8/7.5	3.41	0.2398
4.4.B	1.10	Φ8/7.5	3.41	
4.4.Γ	1.20	Φ8/7.5	3.41	
4.4.Δ	1.30	Φ8/7.5	3.41	
4.4.E	1.35	Φ8/7.5	3.41	
4.5.A	1.00	Φ8/12.5	3.00	0.0977
4.5.B	1.10	Φ8/12.5	3.00	
4.5.Γ	1.20	Φ8/12.5	3.00	
4.5.Δ	1.30	Φ8/12.5	3.00	
4.5.E	1.35	Φ8/12.5	3.00	
4.6.A	1.00	Φ8/17.5	2.00	0.0224
4.6.B	1.10	Φ8/17.5	2.00	
4.6.Γ	1.20	Φ8/17.5	2.00	
4.6.Δ	1.30	Φ8/17.5	2.00	
4.6.E	1.35	Φ8/17.5	2.00	



Σχήμα 4.11 Σχήματα Διατομών 4.4 - 4.6.

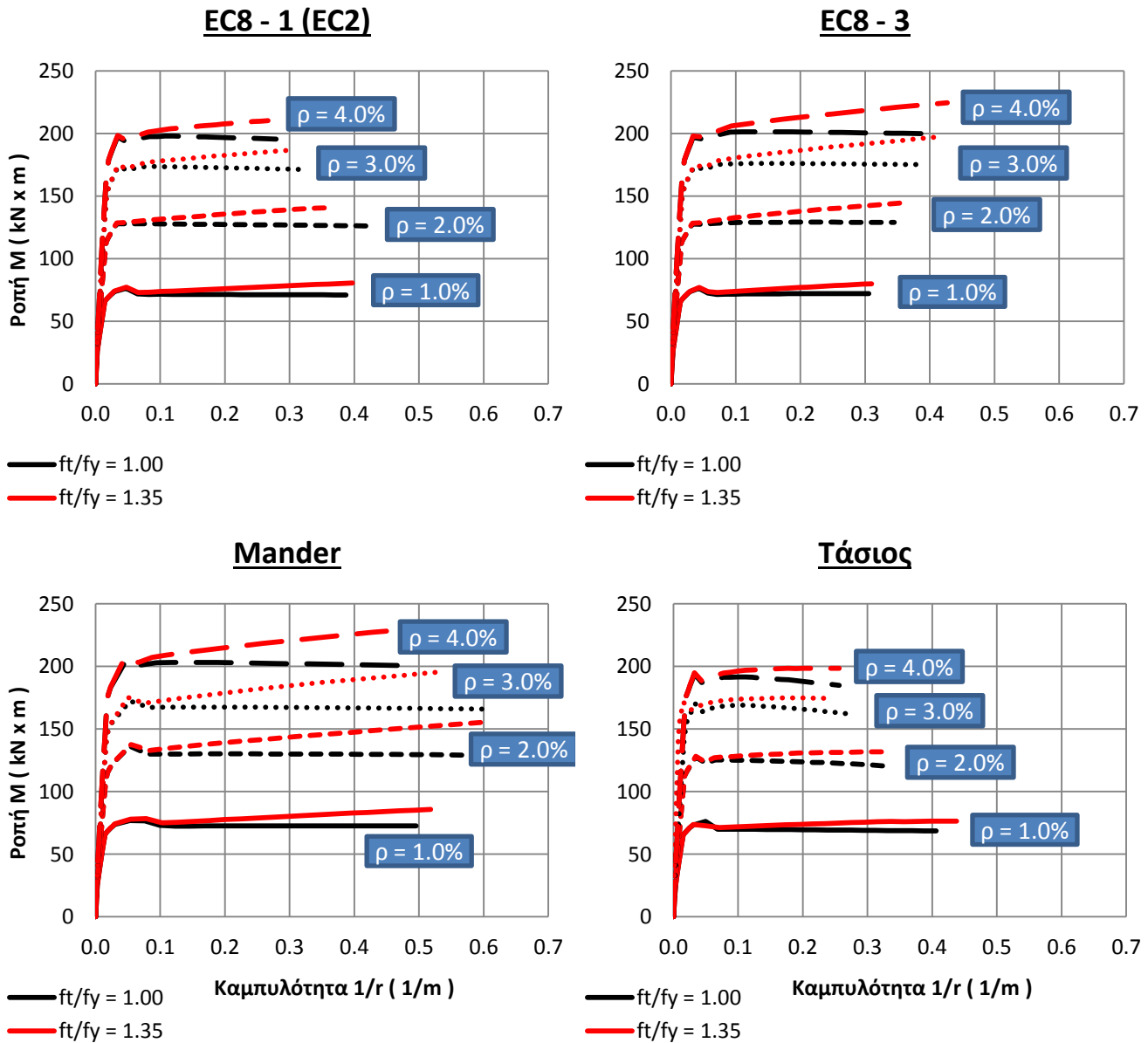


Σχήμα 4.11 Διάγραμμα f_s - ε_s χάλυβα για όλες τις εξεταζόμενες Διατομές.

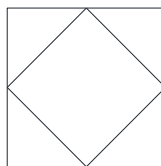
Στο **Σχήμα 4.11** φαίνεται η επιρροή για διάφορες τιμές της κράτυνσης του χάλυβα στις τάσεις, για διάφορες τιμές παραμορφώσεων. Στην παρούσα διερεύνηση, ο λόγος f_t/f_y έχει μέγιστη τιμή 1.35 όσο ακριβώς ορίζουν και οι Ευρωκώδικες. Η αστοχία του χάλυβα σε όλα προσομοιώματα δεν έχει την ίδια τιμή. Στο παραπάνω διάγραμμα, η τιμή $\varepsilon_{su} = 0.1$ αντιστοιχεί στο μοντέλο του Mander, είναι προτεινόμενη κατά το XTRACT, αποτελώντας μια συντηρητική τιμή για την αστοχία του εφελκυσμένου χάλυβα. Στον EC8 η αντίστοιχη τιμή είναι 6% ενώ στον EC2 $\varepsilon_{suk} = 7.5\%$. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η κλίση του διαγράμματος μέχρι την διαρροή του χάλυβα δεν είναι ορατή στο παραπάνω σχήμα αφού αντιστοιχεί σε πολύ μικρή παραμόρφωση συγκριτικά με την αστοχία του $\left(\varepsilon_{sy} = \frac{500}{200000} = 2.50\text{‰} \ll 100\text{‰} \right)$.

Η αποδοτικότητα της περίσφιξης και κατά συνέπεια η παράπλευρη πίεση που προσφέρει ο εγκάρσιος οπλισμός στο σκυρόδεμα, δεν επηρεάζονται από την κράτυνση του χάλυβα καθώς υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μόνον η τιμή της διαρροής του, f_y . Όσον αφορά τα διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων των εξεταζόμενων διατομών, είναι ακριβώς ίδια με αυτά που έχουν προκύψει από τη διερεύνηση στην ενότητα 3.4 (Επικάλυψη διατομής) αλλά και στην ενότητα 4.1 για $f_c = 20\text{MPa}$ (Ποιότητα σκυροδέματος). Τα συμπεράσματα τόσο για την αποδοτικότητα της περίσφιξης όσο και για τα αποτελέσματα των τροποποιημένων τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων έχουν προαναφερθεί στις παραπάνω διερευνήσεις.

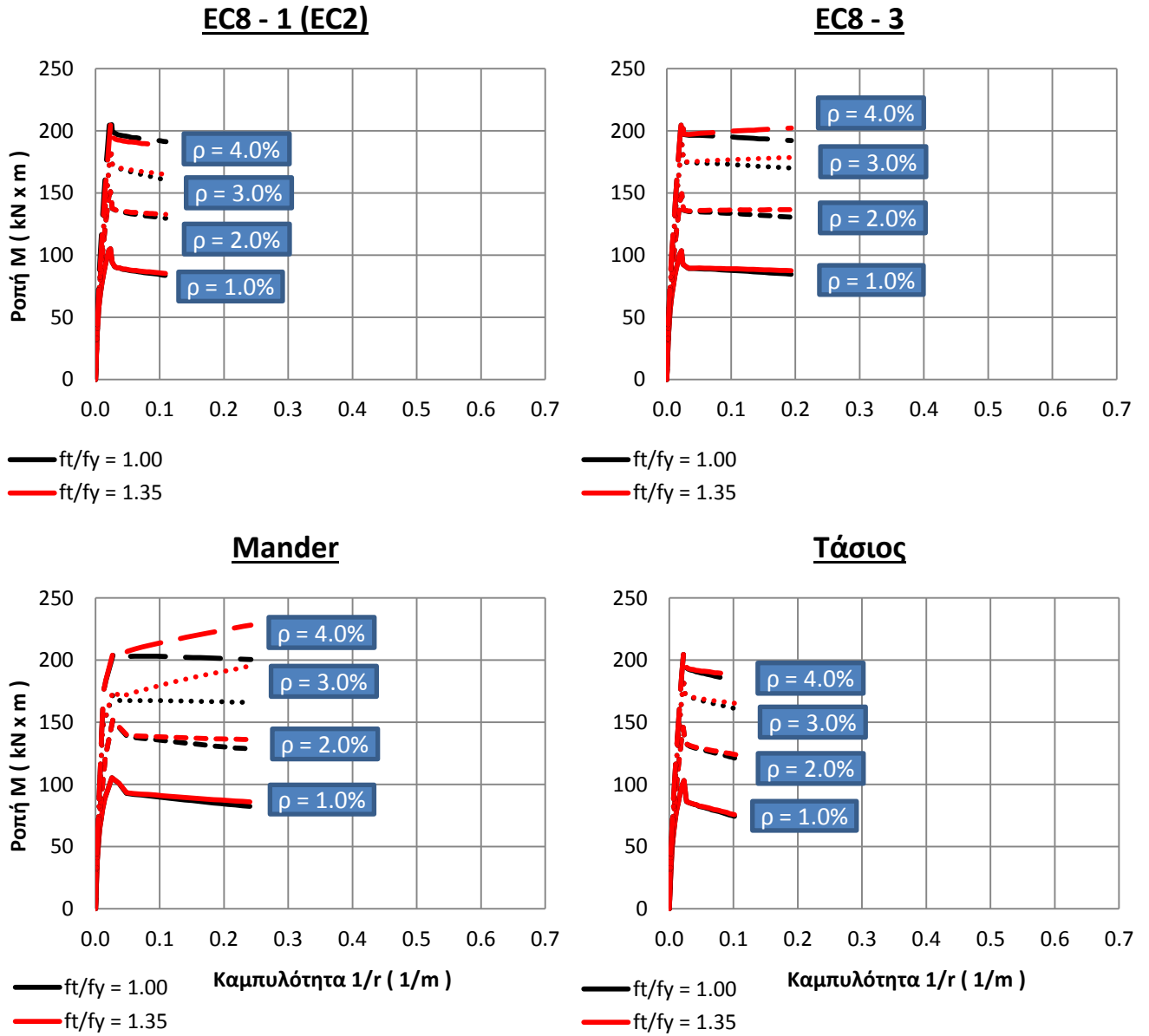
Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων $M - (1/r)$



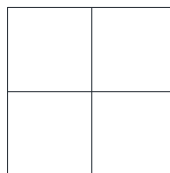
Σχήμα 4.12 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.4 για $\nu = 0.1$.



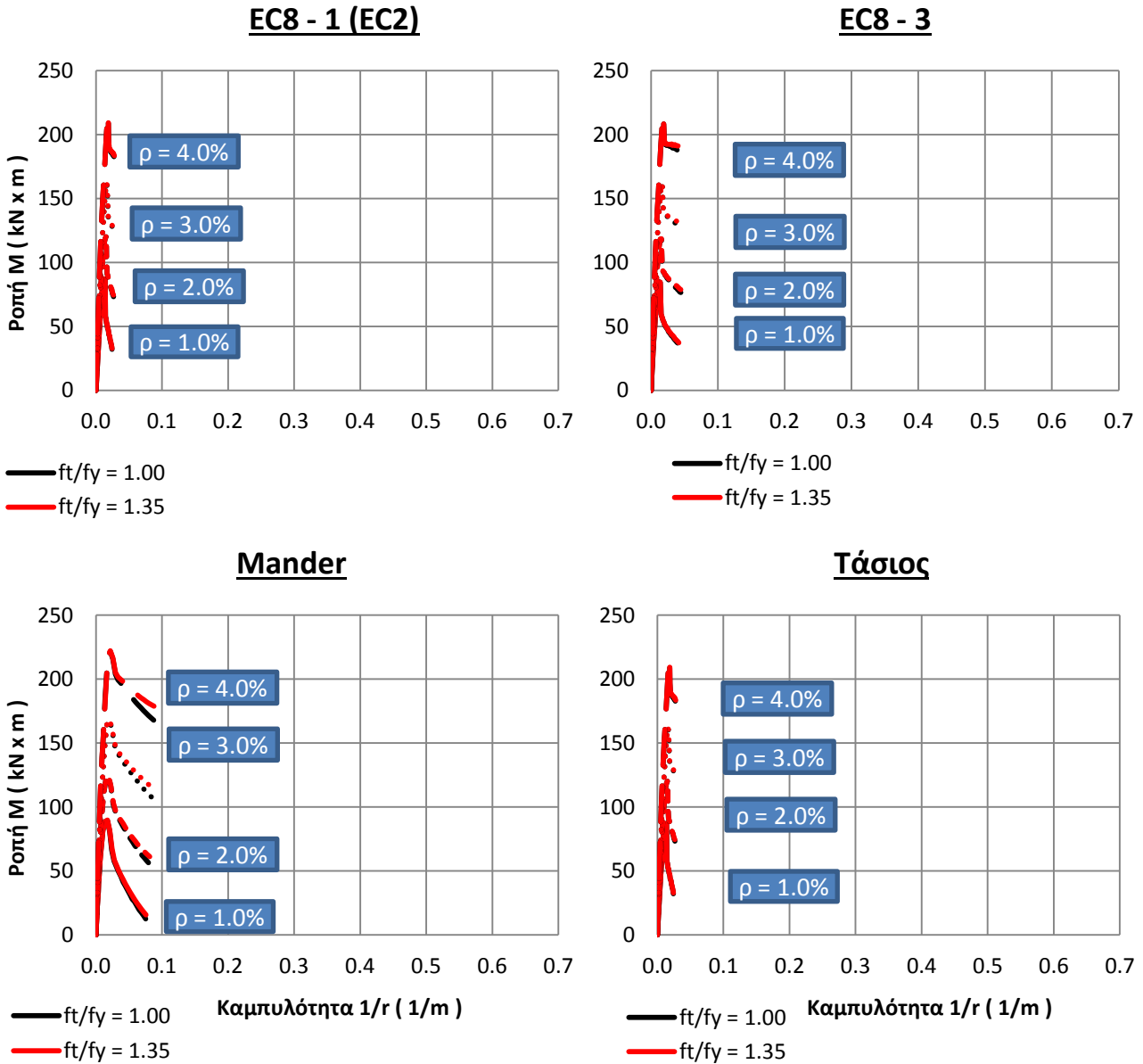
Διατομές 4.1



Σχήμα 4.13 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.5 για $\nu = 0.4$.



Διατομές 4.5



Σχήμα 4.14 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των Διατομών 4.6 για $\nu = 0.8$.



Διατομές 4.6

Στα **Σχήματα 4.12** έως **4.14** φαίνονται τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων για όλες τις εξεταζόμενες διατομές με το λόγο f_i/f_y , να παίρνει τις 2 ακραίες τιμές του, 1.00 και 1.35. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση έχει γίνει για διάφορα ποσοστά διαμήκους οπλισμού ρ καθώς είναι μια παράμετρος που αλληλεπιδρά με την κράτυνση του χάλυβα, κυρίως στις παραμορφώσεις οριακής αστοχίας των διατομών. Τα αξονικά θλιπτικά φορτία, έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να μεγεθύνουν τις διαφορές στα αποτελέσματα ροπών - καμπυλοτήτων μεταξύ των διατομών με διαφορετικά ποσοστά εγκάρσιου οπλισμού.

Αρχικά, παρατηρούμε ότι η καμπυλότητα αστοχίας δεν επηρεάζεται καθόλου από την τιμή του λόγου f_i/f_y όταν η αστοχία της διατομής έχει επέλθει από την αστοχία της ακραίας ίνας του περισφιγμένου σκυροδέματος του πυρήνα της. Στις περιπτώσεις που αστοχεί πρώτα ο εφελκόμενος χάλυβας η αύξηση της τάσης του κοντά στην αστοχία (λόγω της κράτυνσης) επιφέρει και μια μικρή αύξηση στις καμπυλότητες αστοχίας. Τέτοια παραδείγματα είναι οι διατομές 4.4, όπου ο συνδυασμός του πυκνού εγκάρσιου οπλισμού με το χαμηλό θλιπτικό αξονικό φορτίο δεν επιτρέπει στο σκυρόδεμα να αστοχήσει πρώτο (ιδιαίτερα σε λιγότερα συντηρητικά προσομοιώματα όπως ο EC8 και Mander). Επίσης διαπιστώνουμε από τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.12**, ότι αυτές οι διαφορές γίνονται πιο έντονες όταν μια διατομή έχει μεγάλα ποσοστά διαμήκους οπλισμού, καθώς η αύξηση στην τάση του χάλυβα λόγω κράτυνσης μεγεθύνεται καθώς αυξάνεται η τιμή του ρ .

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, η τιμή του λόγου f_i/f_y επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή της ροπής στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Παρατηρούμε μια αύξηση της τιμής της ροπής M_u έως και 20% στις διατομές 4.4 για $\nu = 0.1$ (**Σχήμα 4.12**). Προφανώς εκείνη η παράμετρος που είναι καθοριστική για την επιρροή της κράτυνσης του χάλυβα στις καμπτικές αντοχές στην αστοχία, είναι η τιμή της καμπυλότητας $(1/r)_u$ και συνεπώς όλοι οι παράγοντες που την επηρεάζουν (εγκάρσιος και διαμήκης οπλισμός, θλιπτική αξονική δύναμη κλπ.). Σε όσο μεγαλύτερες καμπυλότητες "φτάνει" μια διατομή (και άρα παραμορφώσεις) τόσο ο χάλυβας αυξάνει την τάση του λόγω της κράτυνσης (στη συγκεκριμένη διερεύνηση έχουμε γραμμική αύξηση). Απόδειξη των παραπάνω είναι οι διατομές 4.6 για $\nu = 0.8$, στις οποίες η αύξηση της τάσης του χάλυβα λόγω της κράτυνσης είναι τόσο μικρή (εξαιτίας των μικρών παραμορφώσεών του) που δεν επηρεάζει τη ροπή αστοχίας M_u .

Η τιμή του λόγου f_i/f_y μπορεί επίσης να επηρεάσει και τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων υπό 2 προϋποθέσεις:

1. Θα πρέπει να διαφοροποιεί αισθητά τα αποτελέσματα των καμπτικών αντοχών αστοχίας των διατομών (όπως στο Σχήμα 4.12) και
2. Θα πρέπει να υπάρχει κάποιο "αυστηρό κριτήριο όσον αφορά τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων $M - (1/r)$, όπως μια ελάχιστη απαίτηση της τιμής του λόγου M_{\max}/M_u .

Κεφάλαιο 5

Επίδραση είδους αντιπροσωπευτικής τιμής

Στην παραμετρική διερεύνηση που προηγήθηκε, ο υπολογισμός της πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των εκάστοτε διατομών, προέκυψε από τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων με τρόπο που αναφέρθηκε στην αρχή του μέρους Β της παρούσας εργασίας. Στο παρών κεφάλαιο, θα συνδέσουμε και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των πλαστιμοτήτων μ_ϕ των διατομών που εξετάσαμε, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα τιμών όπως αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης του EC8 μέρος 1. Ο EC8 - 1 προτείνει τη σχέση (5.1) για τον υπολογισμό της παρεχόμενης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων μιας διατομής σε επίπεδο σχεδιασμού.

$$\alpha\omega_{wd}30\mu_\phi\nu_d\varepsilon_{syd}\frac{b_c}{b_o}-0.0035 \quad (5.1A)$$

$$\text{Λύνοντας ως προς } \mu_\phi \text{ έχουμε: } \mu_\phi = \frac{(\alpha\omega_{wd} + .0035) b_o}{30\nu_d\varepsilon_{syd} b_c} \quad (5.1B)$$

Οι σχέσεις (5.1) εφαρμόζονται μόνο για τιμές σχεδιασμού όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της τιμής μ_ϕ . Θα εξετάσουμε πως τροποποιείται η σχέση (5.1) εάν αντικαταστήσουμε τις τιμές σχεδιασμού σκυροδέματος και χάλυβα (f_{cd} και f_{yd} αντίστοιχα) με τις μέσες τιμές τους (f_{cm} και f_{ym}). Η μέση τιμή ορίζεται ως εξής:

$$f_m = f_k + 1.64\sigma \Leftrightarrow 1 = \frac{f_k}{f_m} + \frac{1.64\sigma}{f_m} \quad (5.2)$$

- Για σκυρόδεμα: $\frac{\sigma}{f_m} = 15\%$.
- Για χάλυβα: $\frac{\sigma}{f_m} = 5\%$.

Με εφαρμογή της σχέσης (5.3) έχουμε:

- Για σκυρόδεμα: $f_{cm} = 1.326 f_{cd} \times \gamma_c \Rightarrow f_{cm} = 1.326 f_{cd} \times 1.50 = 1.989 f_{cd}$.
- Για χάλυβα: $f_{ym} = 1.089 f_{yd} \times \gamma_s \Rightarrow f_{ym} = 1.089 f_{yd} \times 1.15 = 1.252 f_{yd}$.

$$\begin{aligned} \omega_{wm} &= \frac{\text{όγκος συνδετήρων}}{\text{όγκος περισφιγμ. σκυροδέματος}} \frac{f_{ym}}{f_{cm}} = \\ &= \frac{\text{όγκος συνδετήρων}}{\text{όγκος περισφιγμ. σκυροδέματος}} \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \times \frac{1.252}{1.989} \Rightarrow \omega_{wm} = 0.629\omega_{wd} \end{aligned}$$

$$\nu_m = \frac{N}{bh f_{cd}} = \frac{N}{1.989bh f_{cd}} \Rightarrow \nu_m = \frac{\nu_d}{1.989} \quad \text{και} \quad \varepsilon_{sym} = 1.252\varepsilon_{syd}$$

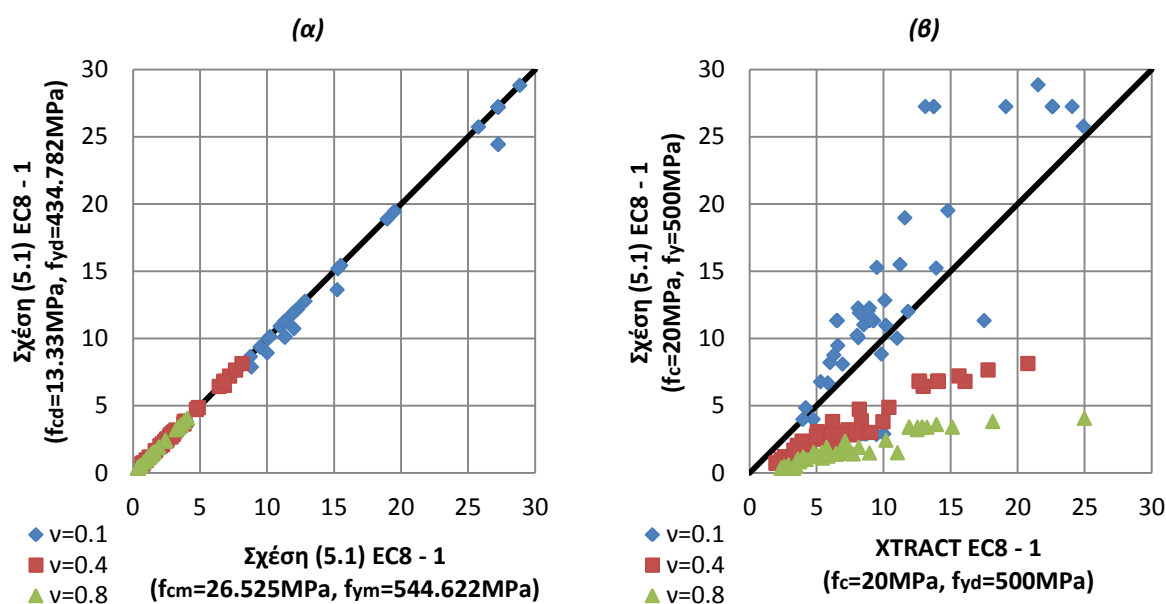
Επομένως η σχέση (5.2.B) γίνεται:

$$\mu_{\phi m} = \frac{(\alpha\omega_{wm} + .0035) b_o}{30\nu_m \varepsilon_{sym} b_c} = \frac{\alpha\omega_{wm} b_o}{30\nu_m \varepsilon_{sym} b_c} + \frac{0.0035 b_o}{30\nu_m \varepsilon_{sym} b_c} = \underbrace{\frac{\alpha\omega_{wd} b_o}{30\nu_d \varepsilon_{syd} b_c}}_A + 1.588 \underbrace{\frac{0.0035 b_o}{30\nu_d \varepsilon_{syd} b_c}}_B$$

Από την τελευταία έκφραση παρατηρούμε ότι ο όρος A παραμένει αμετάβλητος ενώ η αύξηση του όρου B (κατά 1.588) λίγο επηρεάζει την τελική τιμή της πλαστιμότητας μ_{ϕ} εφόσον ο όρος B είναι πολύ μικρότερος του όρου A. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε σύμφωνα με το διάγραμμα του **Σχήματος 5.1.β**. Για ένα σημαντικό αριθμό διατομών με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε περίσφιγξη, διαστάσεις κλπ., τα αποτελέσματα πλαστιμότητων καμπυλοτήτων σύμφωνα με τη σχέση του EC8 - 1 παρέμειναν ουσιαστικά ίδια είτε χρησιμοποιήσαμε μέσες είτε τιμές σχεδιασμού του σκυροδέματος και του χάλυβα.

Σύγκριση αποτελεσμάτων πλαστιμότητων καμπυλοτήτων μέσω XTRACT με αντίστοιχα αποτελέσματα πλαστιμότητων μέσω της εφαρμογής της σχέσης (5.1.B).

Η παραμετρική διερεύνηση του μέρους B έγινε για σκυρόδεμα και χάλυβα με τιμές $f_c = 20\text{MPa}$ και $f_y = 500\text{MPa}$ αντίστοιχα. Με αυτές τις "αυθαίρετες" τιμές που



Σχήμα 5.1 Διαγράμματα πλαστιμότητων μ_{ϕ} επιλεγμένων διατομών μέρους B, για διαφορετικά θλιπτικά αξονικά φορτία ανηγμένα σε τάση $f_c = 20\text{MPa}$.

χρησιμοποιήσαμε, εφαρμόζουμε τη σχέση (5.1.B) έτσι ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των πλαστιμότητων καμπυλοτήτων όπως αυτά προκύπτουν από τη σχέση του EC8 - 1 με τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω του προγράμματος XTRACT.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του **Σχήματος 5.1.α** τα αποτελέσματα πλαστιμοτήτων μ_ϕ όπως προέκυψαν από τη σχέση του EC8 - 1, είναι αρκετά συντηρητικότερα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, από τα αντίστοιχα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση μέσω του προγράμματος XTRACT. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα που αναμέναμε καθ' όσον ο EC8 - 1 αναφέρεται στο σχεδιασμό νέων κατασκευών.

Μια παρατήρηση που αξίζει να σημειώσουμε είναι πως η σχέση (5.1) δεν λαμβάνει υπόψη το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού μιας διατομής. Η διαφοροποίηση του ποσοστού ρ σε μια διατομή, εφ' όσον "κινούμαστε" εντός των επιτρεπτών από τους κανονισμούς (EC8 - 1) ορίων ($\rho = 1 - 4\%$), παρότι δεν επιφέρει δραματικές αλλαγές στις προσφερόμενες πλαστιμότητες μ_ϕ , εν τούτοις, διαφοροποιεί ελαφρώς τα αποτελέσματα όπως διαπιστώσουμε και από τη διερεύνηση που κάναμε στο **κεφάλαιο 2.1**.

Υπάρχουν ωστόσο και κάποιες περιπτώσεις στις οποίες η σχέση (5.1) προφέρει ευνοϊκότερα αποτελέσματα στις τιμές των πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων σε σχέση με το πρόγραμμα XTRACT. Οι περιπτώσεις αυτές αφορούν ως επί το πλείστον διατομές με υψηλά ποσοστά μηχανικού οπλισμού, οι οποίες καταπονούνται από μικρά θλιπτικά αξονικά φορτία, με αποτέλεσμα, το υλικό που καθορίζει την αστοχία τους (δηλ. αστοχεί πρώτο) να είναι ο εφελκόμενος χάλυβας και όχι το περισφιγμένο σκυρόδεμα. Η σχέση (5.1) του EC8 -1, δεν λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση αστοχίας του εφελκόμενου χάλυβα, με αποτέλεσμα, όσο αποτελεσματικότερα περισφιγμένη είναι μια διατομή τόσο μεγαλύτερες τιμές πλαστιμοτήτων μ_ϕ να προσφέρει (κάτι που βέβαια δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις όπως έχουμε δείξει και σε προηγούμενες διερευνήσεις που έχουμε κάνει).

Διαπιστώσαμε ότι η σχέση (5.1) προσφέρει σχεδόν ίδια αποτελέσματα πλαστιμοτήτων μ_ϕ είτε για τιμές σχεδιασμού είτε για μέσες τιμές των υλικών μας. Συμβαίνει όμως κάτι αντίστοιχο, όταν εμείς θελήσουμε να υπολογίσουμε την πλαστιμότητα καμπυλοτήτων μιας διατομής με αναλυτικό τρόπο (στην περίπτωση μας μέσω XTRACT);

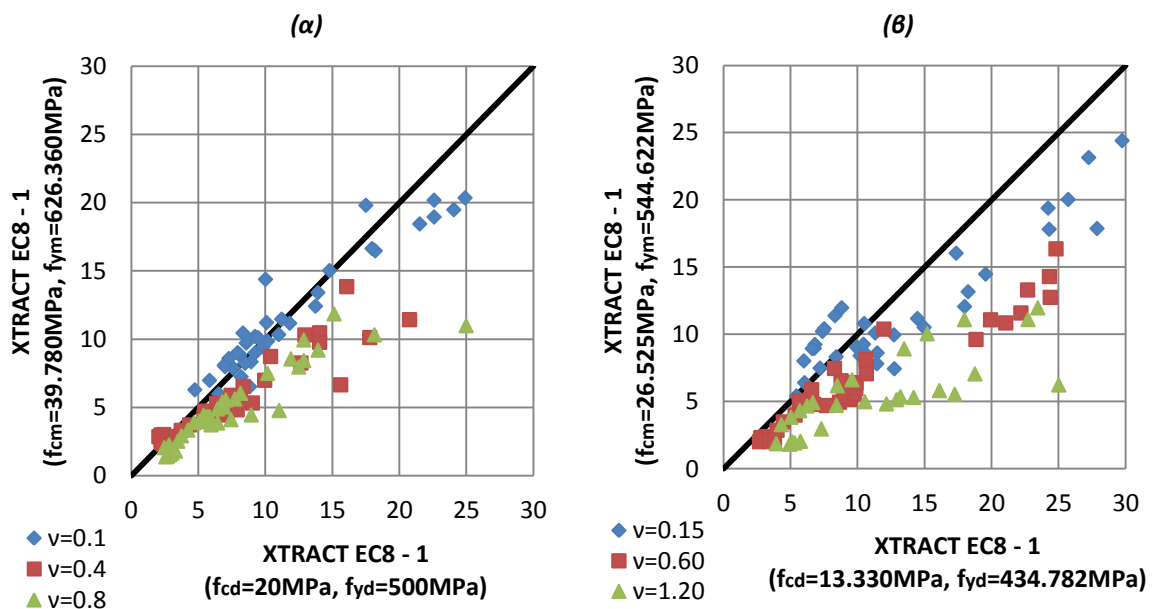
Για να απαντήσουμε στο ερώτημα θα εφαρμόσουμε τις εξής 2 περιπτώσεις:

1. $f_{cd} = 20MPa \rightarrow f_{cm} = 39.780MPa$ (C30/37) και
 $f_{yd} = 500MPa \rightarrow f_{yd} = 626.360MPa$.
2. $f_{cd} = 13.33MPa \rightarrow f_{cm} = 26.525MPa$ (C20/25) και
 $f_{yd} = 434.782MPa \rightarrow f_{ym} = 544.622MPa$.

Όπως βλέπουμε και στο **Σχήμα 5.2**, τα αποτελέσματα των πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων των διατομών για τιμές σχεδιασμού των υλικών, διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα αποτελέσματα για μέσες τιμές των υλικών. Οι τιμές των "πλαστιμοτήτων σχεδιασμού" είναι από λίγο έως σημαντικά μεγαλύτερες από τις

"μέσες πλαστιμότητες". Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε πως το θλιπτικό αξονικό φορτίο παίζει καθοριστικό ρόλο. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η τιμή του, τόσο μεγαλώνει και η διαφορά μεταξύ "πλαστιμοτήτων σχεδιασμού" και "μέσων πλαστιμοτήτων" με τρόπο περίπου παραβολικό.

Εδώ βεβαίως, θα πρέπει να αναφέρουμε πως οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα XTRACT (οι σχέσεις που προτείνει ο EC8 - 1) δεν "ταιριάζουν" απόλυτα με τη χρήση τιμών σχεδιασμού του σκυροδέματος. Αυτή η παρατήρηση όμως, αφορά κυρίως το απερίσφικτο σκυρόδεμα και κατά συνέπεια τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων των διατομών δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα. Οι αποκλίσεις των πλαστιμοτήτων μεταξύ μέσων τιμών και τιμών σχεδιασμού των υλικών, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διαγραμμάτων 5.2.α και 5.2.β. Μπορούμε να θεωρήσουμε ωστόσο, πιο ακριβές και "αξιόπιστο" το διάγραμμα του Σχήματος 5.2.α καθώς η πολύ μικρή θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε συνδυασμό με τις μεγαλύτερες ανηγμένες θλιπτικές αξονικές δυνάμεις της δεύτερης περίπτωσης (Σχήμα 5.2.β), έχουν σαν αποτέλεσμα σχετικά πλασματικές πλαστιμότητες. Αυτό συμβαίνει, λόγω της ευαισθησίας της εφαρμοζόμενης μεθόδου διγραμμικοποίησης όταν ο λόγος M_u/M_{max} παρουσιάζει χαμηλές τιμές (έχει γίνει σχετική αναφορά στην αρχή του μέρους Β). Θα πρέπει να αναφέρουμε ωστόσο, ότι έτσι κ' αλλιώς, η χρήση τόσο χαμηλών ποιοτήτων σκυροδέματος έχει περισσότερο θεωρητική σημασία.



Σχήμα 5.2 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων μ_{ϕ} επιλεγμένων διατομών μέρους Β, για διαφορετικά ανηγμένα θλιπτικά αξονικά φορτία σχεδιασμού.

Εκτίμηση μέσης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων με τη μέθοδο Rosenblueth's και σύγκριση με την πλαστιμότητα καμπυλοτήτων μέσω των τιμών των υλικών μας.

Οι παραπάνω διερευνήσεις έγιναν για μέσες τιμές και τιμές σχεδιασμού του σκυροδέματος και του χάλυβα. Εάν θεωρήσουμε ότι υπάρχει αβεβαιότητα και τυχαιότητα στις μέσες τιμές των υλικών μας, θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο Rosenblueth's έτσι ώστε να εκτιμήσουμε τις μέσες πλαστιμότητες μ_φ , θεωρώντας γνωστές τις τυπικές αποκλίσεις του σκυροδέματος και του χάλυβα (έχουν αναφερθεί πιο πάνω).

Η μέθοδος Rosenblueth's εφαρμόζεται όταν μας ενδιαφέρει να εκτιμήσουμε την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση μιας μεταβλητής Y (στην περίπτωση μας $Y = \mu_\varphi$), η οποία είναι περίπλοκη συνάρτηση $g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ (στην περίπτωση μας $g(x_1, x_2)$) όταν είναι γνωστές οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των X_i (στην περίπτωση μας X_1 : σκυρόδεμα, X_2 : χάλυβας). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης $g()$ σε $2K+1$ σημεία, τα οποία και χρησιμοποιούνται ως πληροφορία για τον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης της συνάρτησης. Η πορεία υπολογισμού είναι η εξής:

1. Δίνονται οι μέσες τιμές (μ_{X_i}) και οι τυπικές αποκλίσεις (σ_{X_i}) για κάθε μια από τις K τυχαίες μεταβλητές (στην περίπτωση μας $f_{cm}, \frac{\sigma}{f_{cm}}$ και $f_{ym}, \frac{\sigma}{f_{ym}}$).

2. Υπολογίζεται η τιμή y_0 της συνάρτησης $g()$ στο σημείο που αντιστοιχεί στις μέσες τιμές των τυχαίων μεταβλητών:

$$y_0 = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_K}) \text{ (στην περίπτωση μας } \mu_\varphi = g(f_{cm}, f_{ym}) \text{)}.$$

3. Για κάθε τυχαία μεταβλητή X_i υπολογίζεται η συνάρτηση $g()$ δύο φορές: τη μία φορά χρησιμοποιείται η τιμή $\mu_{X_i} + \sigma_{X_i}$ και τη δεύτερη φορά χρησιμοποιείται η τιμή $\mu_{X_i} - \sigma_{X_i}$ ενώ για τις υπόλοιπες τυχαίες μεταβλητές χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές τους:

$$y_i^+ = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i} + \sigma_{X_i}, \dots, \mu_{X_K})$$

$$y_i^- = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_i} - \sigma_{X_i}, \dots, \mu_{X_K})$$

Στη περίπτωση μας:

$$\mu_1^+ = g\left(f_{cm} + \frac{\sigma}{f_{cm}}, f_{ym}\right) \quad \text{και} \quad \mu_2^+ = g\left(f_{cm}, f_{ym} + \frac{\sigma}{f_{ym}}\right)$$

$$\mu_1^- = g\left(f_{cm} - \frac{\sigma}{f_{cm}}, f_{ym}\right) \quad \mu_2^- = g\left(f_{cm}, f_{ym} - \frac{\sigma}{f_{ym}}\right)$$

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται συνολικά $2K$ τιμές της συνάρτησης $g()$.

4. Για κάθε μια τυχαία μεταβλητή υπολογίζονται οι ποσότητες:

$$\bar{y}_i = \frac{y_i^+ + y_i^-}{2} \quad \text{και} \quad V_{y_i} = \frac{y_i^+ - y_i^-}{y_i^+ + y_i^-}$$

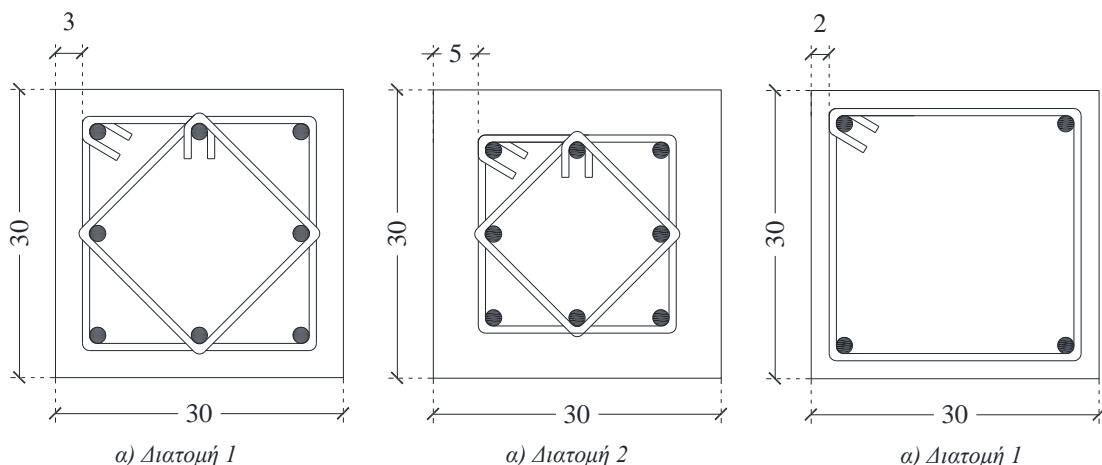
5. Η μέση τιμή (\bar{Y}) και ο συντελεστής διασποράς (V_y) της μεταβλητής Y υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\bar{Y} = y_o \prod_{i=1}^K \left(\frac{y_i}{y_o} \right) \quad \text{και} \quad V_y = \sqrt{\prod_{i=1}^K (1 + V_{y_i}^2) - 1}$$

Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου θα γίνει με $f_{cm} = 26.525 MPa$ (σκυρόδεμα: C20/25) και $f_{ym} = 544.622 MPa$ (χάλυβας: B500C) έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι μέσες πλαστιμότητες καμπυλοτήτων. Ενδεικτικά, θα παρουσιαστούν πιο κάτω (Πίνακας 5.1) κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα ώστε να φανεί η πορεία την οποία ακολουθήσαμε. Τα παραδείγματα που επιλέχθηκαν, παρουσίασαν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στο διάγραμμα του Σχήματος 5.2 αλλά και τις μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου Rosenblueth's.

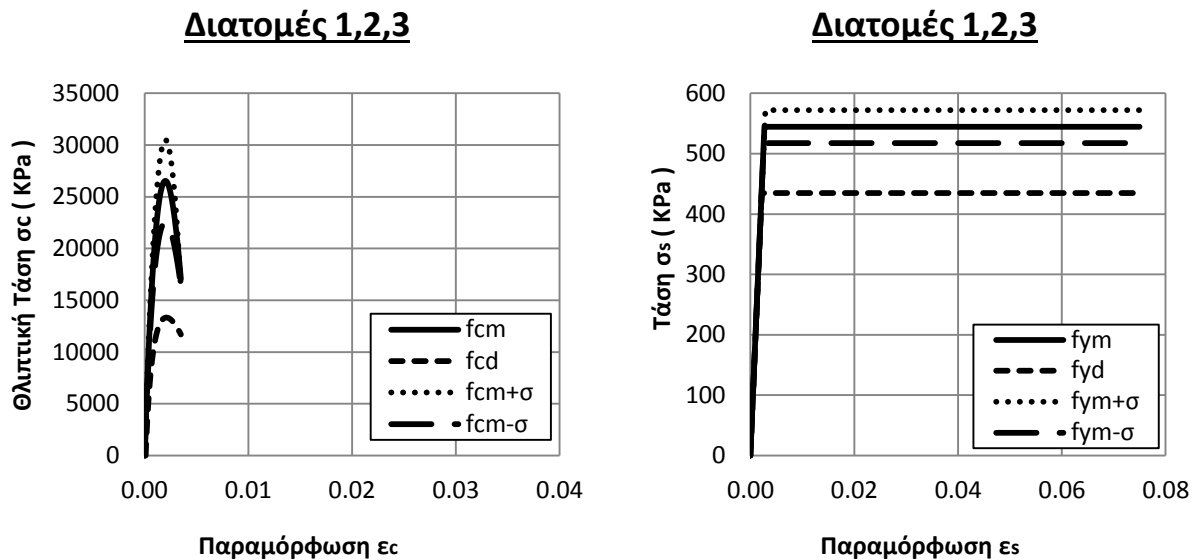
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά διατομών.

Όνομα	Διαστάσεις (cm × cm)	Επικάλυψη (cm)	Διαμήκης οπλισμός	Εγκάρσιος οπλισμός		
				Συνδετήρες	Αριθμός τμήσεων	α_{ω}
1	30 X 30	3.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2542
2	30 X 30	5.00	8 X Φ18	Φ8/7.5	3.41	0.2872
3	30 X 30	2	4 X Φ18	Φ8/17.5	2	0.0224



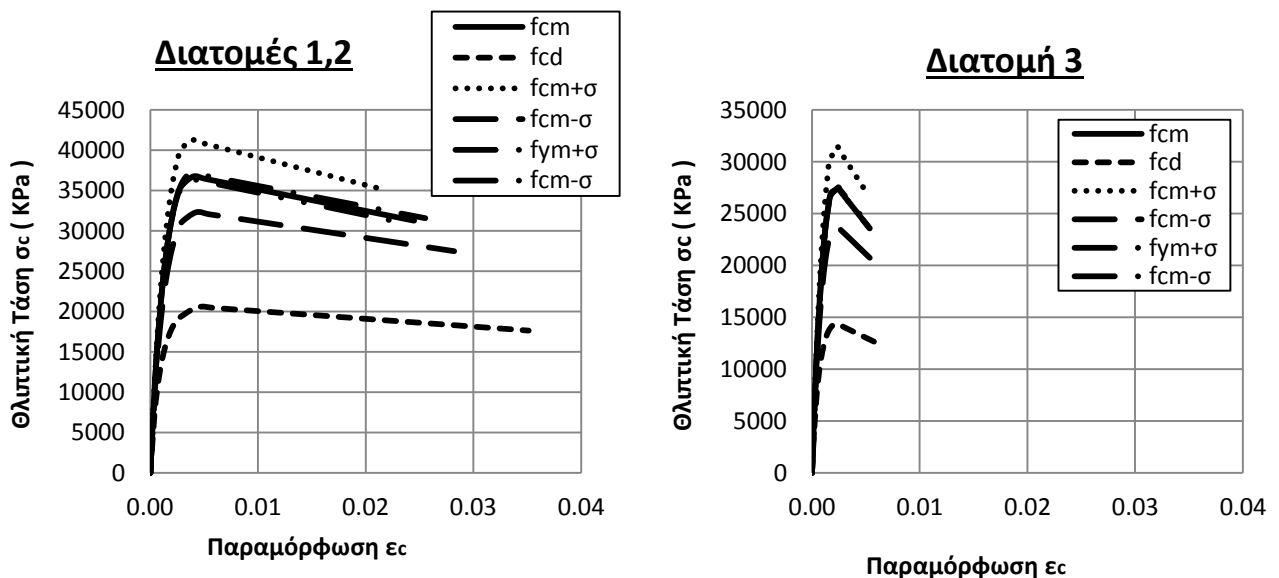
Σχήμα 5.3 Σχήματα Διατομών 1 - 3.

Βήμα 1 : Εισαγωγή των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων του απερίσφικτου σκυροδέματος και του χάλυβα σύμφωνα με τον EC8 - 1 στο XTRACT.



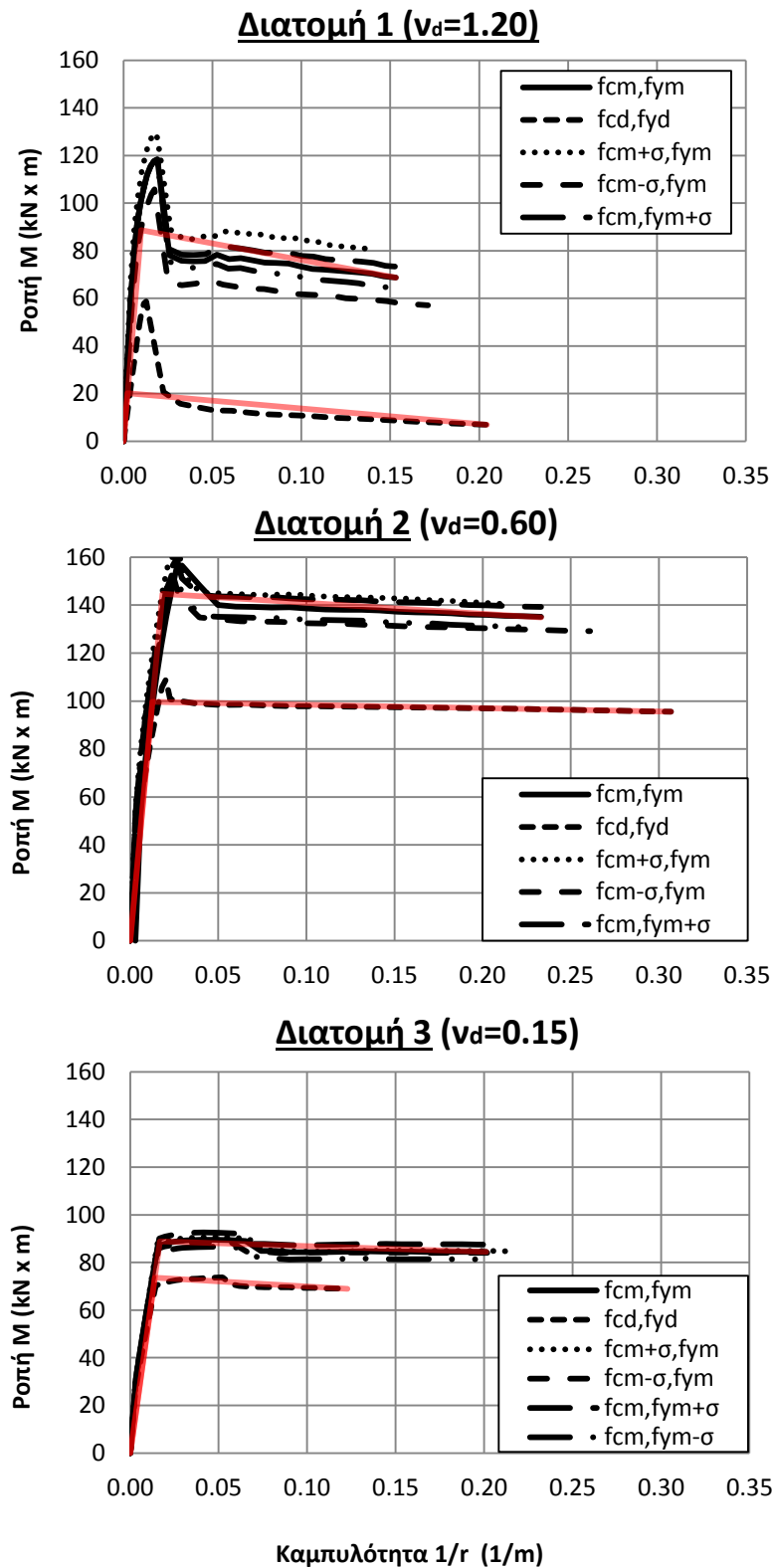
Σχήμα 5.4 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων απερίσφικτου σκυροδέματος και χάλυβα για τις διατομές 1 - 3.

Βήμα 2 : Υπολογισμός αποδοτικότητας περισφιγξης των διατομών και εισαγωγή των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος στο XTRACT.



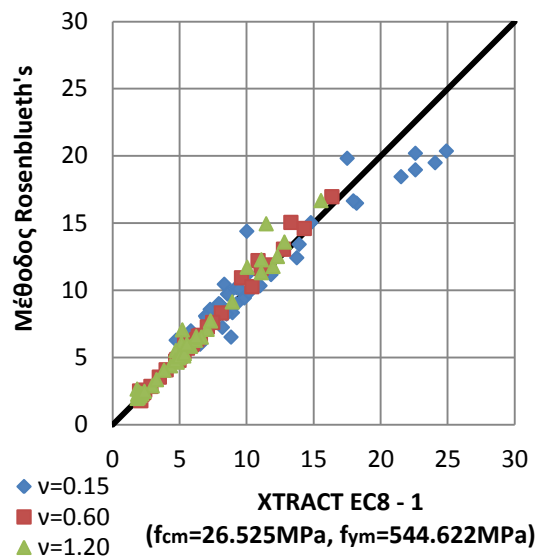
Σχήμα 5.5 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων περισφιγμένου σκυροδέματος και χάλυβα για τις διατομές 1 - 3.

Βήμα 3 : Ανάλυση προγράμματος XTRACT και εν συνεχεία διγραμμικοποίηση διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων σύμφωνα με τη μέθοδο που έχει αναφερθεί στην αρχή του μέρους Β.



Σχήμα 5.6 Διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων και διγραμμικοποιήσεις.

Η παραπάνω πορεία ακολουθήθηκε για όλες τις διατομές της διερεύνησής μας, ενώ τα αποτελέσματα σε επίπεδο πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων φαίνονται στο **Σχήμα 5.7**. Διαπιστώνουμε δηλαδή, ότι η χρήση μέσων τιμών στο σκυρόδεμα και στο χάλυβα για την εύρεση των πλαστιμοτήτων μ_{ϕ} των εκάστοτε διατομών, παρουσιάζει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τις τιμές των πλαστιμοτήτων μ_{ϕ} όπως προέκυψαν από τη μέθοδο Rosenblueth's. Συμπερασματικά, καταλήγουμε πως ορθώς χρησιμοποιήσαμε τις μέσες τιμές των υλικών μας στη διερεύνηση του παρόντος κεφαλαίου, καθώς τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου Roseblueth's δεν έδειξαν έντονη μη γραμμικότητα.



Σχήμα 5.7 Διαγράμματα πλαστιμοτήτων μ_{ϕ} επιλεγμένων διατομών μέρους Β, για διαφορετικά ανηγμένα θλιπτικά αξονικά φορτία σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2Διαμήκης οπλισμός

Όπως έγινε σαφές και από τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού μιας διατομής επηρεάζει άμεσα μόνον την ανάλυσή της σε επίπεδο αποτελεσμάτων ροπών - καμπυλοτήτων και όχι την αποδοτικότητα της περίσφιγξής της. Θα πρέπει να τονίσουμε πως στη διερεύνηση της συγκεκριμένης παραμέτρου, ακολουθήσαμε τα επιτρεπτά από τους κανονισμούς όρια ποσοστών ρ .

Είδαμε πως ενώ η αύξηση του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού επιδρά αρνητικά στις καμπυλότητες αστοχίας μιας διατομής, ωστόσο όσο "κινούμαστε" μέσα σε επιτρεπτά όρια ($\rho = 1\% - 4\%$), η μείωση των τιμών των καμπυλοτήτων $(1/r)_u$ δεν είναι δραματική. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε, τη συσχέτιση των τιμών των ροπών - καμπυλοτήτων μιας διατομής με το μέγεθος του θλιπτικού αξονικού φορτίου από το οποίο καταπονείται, καθώς μεταβάλλεται η παράμετρος ρ . Παρατηρήσαμε από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων $M - (1/r)$, ότι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού επηρεάζει την καμπυλότητα αστοχίας μιας διατομής για μικρές τιμές θλιπτικών αξονικών δυνάμεων (στη διερεύνηση μας $\nu = 0.1$). Όσο αυξάνεται η τιμή της ν (μέχρι και $\nu = 0.8$), τόσο ελαχιστοποιούνται έως και εκμηδενίζονται οι διαφορές μεταξύ διατομών που έχουν διαφορετικά ποσοστά ρ .



Σε επίπεδο πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων των εξεταζόμενων διατομών, τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα βάσει των διαγραμμάτων ροπών - καμπυλοτήτων. Μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι πλαστιμότητες μ_ϕ δεν επηρεάζονται δραματικά από την μεταβολή του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού μιας διατομής, υπό την προϋπόθεση ότι "κινούμαστε" εντός των επιτρεπόμενων από τους κανονισμούς ορίων. Η μεγαλύτερη μείωση σημειώθηκε για μικρές τιμές αξονικών δυνάμεων ($\nu = 0.1$) και για σχετικά ευνοϊκά προσομοιώματα όπως αυτό του Mander.

Εγκάρσιος οπλισμός

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ο εγκάρσιος οπλισμός είναι υπεύθυνος για την τριαξονική θλίψη του σκυροδέματος μιας διατομής. Καταλαβαίνουμε λοιπόν, γιατί οι κανονισμοί θέτουν τόσο αυστηρά όρια για τον εγκάρσιο οπλισμό ενώ μέσω των διερευνήσεών μας επιβεβαιώσαμε τη σημασία αυτών. Το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού μπορεί να αλλάξει τόσο με την μεταβολή των καθ' ύψος αποστάσεων s των συνδετήρων, όσο και με την μεταβολή των ενεργών σκελών τους σε επίπεδο διατομής.

Συμπεράναμε από τα αποτελέσματα της διερεύνησής μας, ότι δεν θα πρέπει να συνδέουμε το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού ως απόλυτο νούμερο με την αποδοτικότητα της περίσφιγξης μιας διατομής. Οι δυνάμεις περίσφιγξης που προσφέρουν οι κλειστοί συνδετήρες στο σκυρόδεμα, εξαρτώνται όχι μόνον από την απόλυτη τιμή του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού, αλλά και από τον τρόπο που

είναι τοποθετημένος σε μια διατομή. Διαπιστώσαμε, ότι πιο σημαντική παράμετρος και από την καθ' ύψος απόσταση των συνδετήρων, είναι ο αριθμός των ενεργών σκελών σε επίπεδο διατομής. Για παράδειγμα, σε μια διατομή 30 X 30 οπλισμένη εγκάρσια με μονό τετραγωνικό συνδετήρα, ακόμη και όταν οι καθ' ύψος αποστάσεις s μειώθηκαν στα 7.5cm, τα αποτελέσματα σε επίπεδο ροπών - καμπυλοτήτων και κατά συνέπεια πλαστιμοτήτων μ_ϕ , ήταν ιδιαίτερα επιρρεπή στην μεταβολή του θλιπτικού αξονικού φορτίου. Κάτι αντίστοιχο όμως, δεν συνέβη σε άλλες διατομές που είχαν μεν ίδιο ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού αλλά είχαν περισσότερα ενεργά σκέλη συνδετήρων. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα διατομής διαστάσεων 50 X 50 δίνεται παρακάτω:

	Συνδετήρες	ω_w	$\alpha \omega_w$
	Φ8/4.0	0.2963	0.1280
	Φ8/12.5	0.1288	0.1280

Παρατηρήσαμε, ότι η μεταβολή του μηχανικού ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού στην ίδιων διαστάσεων διατομή, επηρέασε κάθε στάδιο αποτύπωσης των αποτελεσμάτων $p/f_c \rightarrow \sigma - \varepsilon \rightarrow M - (1/r) \rightarrow \mu_\phi$ με σχεδόν ίδιο τρόπο. Όπως είδαμε και στη διερεύνηση του διαμήκους οπλισμού, η τιμή του θλιπτικού αξονικού φορτίου είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος όσον αφορά τα αποτελέσματα ροπών - καμπυλοτήτων και κατ' επέκταση πλαστιμοτήτων μ_ϕ μιας διατομής. Το ίδιο συμβαίνει και εδώ, αλλά με τελείως διαφορετικό τρόπο. Βλέπουμε δηλαδή, ότι πλέον όσο αυξάνεται η θλιπτική αξονική δύναμη, τόσο "απογυμνώνεται" μια διατομή και φαίνονται έντονα οι αδυναμίες της εγκάρσιας όπλισής της. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειώσουμε και τη σημαντική πτώση της ροπής στον μετελαστικό κλάδο των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ μέχρι και την αστοχία, σε περιπτώσεις συνδυασμών: είτε μεσαίου, επιτρεπτού ($\nu = 0.4$), αξονικού φορτίου με αραιό εγκάρσιο οπλισμό, είτε υψηλού, εκτός κανονισμών ($\nu = 0.8$), αξονικού φορτίου με πυκνό εγκάρσιο οπλισμό. Όπως έχει γίνει αναφορά και στους σχολιασμούς των αποτελεσμάτων του εκάστοτε κεφαλαίου, η πτώση αυτή της τιμής M_u έχει αρνητική επίδραση και στις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μιας διατομής, όταν εμείς απαιτούμε μια ελάχιστη τιμή του λόγου M_u/M_{\max} .

Κατά τον EC8 - μέρος 1 οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές για τον παράγοντα $\alpha\omega_{wd}$ είναι:

- για ΚΠΜ $\alpha\omega_{wd} \geq 0.08$
- για ΚΠΥ $\alpha\omega_{wd} \geq 0.12$

Η θέσπιση κατώτατων ορίων για την τιμή του $\alpha\omega_w$ από τον EC8 μέρος - 1, έχει ιδιαίτερη σημασία. Όπως παρατηρήσαμε και από τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων μ_ϕ στις διερευνήσεις που κάναμε, οι διατομές που έχουν τιμές $\alpha\omega_w > 0.10$, παρουσίασαν σχετική σταθερότητα για αρκετά μεγάλο εύρος θλιπτικών αξονικών δυνάμεων. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού πάντα θα υπάρχει σχετική αβεβαιότητα στην τιμή της N λόγω των σεισμικών δράσεων.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα προσομοιώματα (εκτός δηλ. του EC8 μέρος - 1) οι διαφορές στα αποτελέσματα δεν είναι διόλου ευκαταφρόνητες. Για παράδειγμα σύμφωνα με το προσομοίωμα του Mander, η ίδια τιμή πλαστιμότητας $\mu_\phi = 8$ απαιτεί $\alpha\omega_w > 0.3$ (στην πράξη αυτή η τιμή μεταφράζεται σε μονό τετραγωνικό συνδετήρα με Φ8/15 για διατομή 30 X 30!). Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να σημειώσουμε πως είναι μη ορθός ο υπολογισμός της πλαστιμότητας από σχέση που αντιστοιχεί σε άλλο προσομοίωμα. Οι σχέσεις υπολογισμού τροποποιημένων τάσεων, παραμορφώσεων (λόγω περίσφιγξης), πλαστιμοτήτων κλπ. δεν είναι "κλειστού" τύπου, που σημαίνει πως αλληλεπιδρούν και αλληλοσχετίζονται μεταξύ τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μέγεθος διατομής

Στη συγκεκριμένη διερεύνηση θελήσαμε να δούμε πως επηρεάζει η μεταβολή του μεγέθους της διατομής την αποδοτικότητα της περίσφιγξης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης και κατά συνέπεια τις πλαστιμότητες μ_ϕ . Όλα αυτά, υπό την προϋπόθεση ότι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού παραμένει σταθερό, οι καθ' ύψος αποστάσεις s των συνδετήρων διατηρούνται και αυτές σταθερές και ο τρόπος εγκάρσιας όπλισης της διατομής ίδιος (δηλ. ίδιος αριθμός ενεργών σκελών συνδετήρων σε επίπεδο διατομής).

Όπως διαπιστώθηκε και από τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, οι παραμορφώσεις αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος της διατομής 90 X 90 μειώθηκαν στο μισό σε σχέση με τη διατομή 30 X 30 (τα 2 ακραία παραδείγματα της διερεύνησης μας). Συμπεραίνουμε δηλαδή, ότι ενώ ένας τύπος συνδετήρα σε μια διατομή μικρών διαστάσεων μπορεί να είναι επαρκής σε επίπεδο παράπλευρης πίεσης, ο ίδιος συνδετήρας σε μια διατομή μεγαλύτερου μεγέθους, να μην μπορεί να προσφέρει το ίδιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε, τη δραματική μείωση των καμπυλοτήτων αστοχίας καθώς αυξάνεται το μέγεθος των διατομών, η οποία είναι αναντίστοιχη και πολύ μεγαλύτερη της μείωσης των τιμών

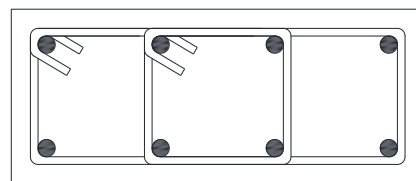
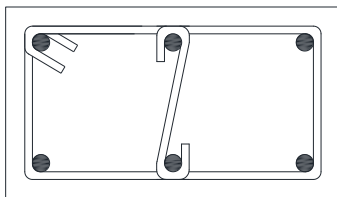
μ_φ όπως προέκυψε από τα αντίστοιχα διαγράμματα πλαστιμοτήτων. Αυτό αποδόθηκε στην πολύ μικρότερη τιμή των καμπυλοτήτων διαρροής των διατομών μεγαλύτερου μεγέθους, γεγονός που επηρέασε καθοριστικά τη διαγραμματικοποίηση των διαγραμμάτων $M - (1/r)$ και άρα τις τελικές τιμές των πλαστιμοτήτων μ_φ των διατομών.

Λόγος πλευρών

Όταν ο λόγος h/b μιας διατομής είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας και δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, τότε η αποδοτικότητα της διατομής σε επίπεδο περίσφιγξης παρουσιάζει σημαντική κάμψη. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στις παρεχόμενες τιμές πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων μιας διατομής. Και εδώ υπάρχει η ίδια "αναντιστοιχία" μεταξύ των διαγραμμάτων ροπών καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων μ_φ , όπως και στη διερεύνηση του μεγέθους της διατομής και οφείλεται στον ίδιο ακριβώς λόγο.

Κρατώντας ίδιο εμβαδόν διατομής, ίδιο ποσοστό διαμήκους οπλισμού και ίδιο ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, το γινόμενο $\alpha\omega_w$ παρουσίασε δραματική μείωση στην αύξηση του λόγου h/b . Συγκεκριμένα, ενώ η τετραγωνική διατομή (με αριθμό ενεργών σκελών 4.67) ικανοποιεί την απαίτηση για $\alpha\omega_w > 0.12$ (ΚΠΥ), όταν ο λόγος των πλευρών της έφτασε την τιμή 3, η αντίστοιχη τιμή του $\alpha\omega_w$ έπεσε ακόμα και κάτω από 0.05! Συνεπώς, καταλήγουμε πως για να επιτύχουμε επαρκή αποδοτικότητα περίσφιγξης σε μια ορθογωνική διατομή, χωρίς να καταφύγουμε σε υπερβολική αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού, πρέπει:

- Να καταναίμουμε ομοιόμορφα τα διαμήκη σίδερα στη διατομή με σκοπό την επίτευξη περίπου ίσων και σχετικά μικρών σε τιμή αποστάσεων b_i (ακόμη και αν η συγκέντρωση του διαμήκους οπλισμού στις 2 μικρές πλευρές της ορθογωνικής διατομής μας έδινε υψηλή ροπή κατά τη μια διεύθυνση).
- Λόγω του ορθογωνικού σχήματος της διατομής, θα πρέπει ο εγκάρσιος οπλισμός της να είναι διαφορετικός κατά τη διεύθυνση x και y (υπό την έννοια του αριθμού των ενεργών σκελών των συνδετήρων σε τομή κατά x και y) έτσι ώστε οι θόλοι του απερίσφικτου σκυροδέματος να είναι χαμηλότεροι και έτσι η περίσφιγξη αποτελεσματικότερη. Παραδείγματα τέτοιας όπλισης φαίνονται πιο κάτω



Επικάλυψη διατομής

Η επικάλυψη των διατομών παίζει και αυτή με σειρά της, σημαντικό ρόλο σε επίπεδο αποτελεσμάτων ροπών - καμπυλοτήτων και κατά συνέπεια πλαστιμοτήτων μ_φ . Από τη διερεύνηση που κάναμε, είδαμε ότι η μεταβολή της τιμής της επικάλυψης μιας διατομής (εδώ αναφερόμαστε σε επικάλυψη εξώτερου οπλισμού), δεν επηρεάζει την αποδοτικότητα της περίσφιγξης της και άρα τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων. Διαπιστώσαμε επίσης από τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων, ότι το πάχος της επικάλυψης επηρεάζει σημαντικά τις ροπές αλλά όχι τις καμπυλότητες αστοχίας μιας διατομής. Η επιρροή αυτή στις τιμές των ροπών, αφορά τόσο τις μέγιστες τιμές τους (M_{max}), όσο και τις τιμές στην αστοχία (M_u). Η μείωση που υφίστανται οι τιμές των ροπών, απόρροια της αύξησης του πάχους της επικάλυψης, είναι τόσο μεγάλη, που σε περιπτώσεις της διερεύνησης μας, φτάνει και το 50%.

Θα πρέπει εδώ να σημειώσουμε, πως η αύξηση του πάχους της επικάλυψης δεν επέφερε απλώς μια μετατόπιση των καμπυλών ροπών - καμπυλοτήτων προς τα κάτω, αλλά επέφερε επιπρόσθετα και δραστική μείωση στην τιμή του λόγου M_{max}/M_u . Το φαινόμενο αυτό, ήταν πιο έντονο σε ασθενέστερα περισφιγμένες διατομές και σε διατομές που καταπονήθηκαν από μεγάλα θλιπτικά αξονικά φορτία. Η μείωση αυτή της τιμής M_{max}/M_u , έχει φυσικά αρνητικό αντίκτυπο και στην πλαστιμότητα καμπυλοτήτων των διατομών όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες διερευνήσεις.

Τελικά, συμπεραίνουμε πως θα πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί στην επιλογή του πάχους της επικάλυψης μιας διατομής, λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές της διαστάσεις. Για παράδειγμα, στη διερεύνηση μας, μια τιμή επικάλυψης κοντά στο 2.5–3.0cm μπορεί να θεωρηθεί ως ανώτατο όριο ώστε η διατομή (30 X 30) να εμφανίζει επαρκείς τιμές του λόγου M_{max}/M_u . Εδώ, θα πρέπει να σημειώσουμε και την αλληλεπίδραση του πάχους της επικάλυψης με το μέγεθος της διατομής. Όσο αυξάνουμε τις εξωτερικές διαστάσεις μιας διατομής τόσο μπορούμε να επιλέξουμε μεγαλύτερες τιμές c χωρίς παράλληλα να μειώνεται σημαντικά η τιμή του λόγου M_{max}/M_u . Παρ' όλα αυτά, στη διερεύνηση μας χρησιμοποιήσαμε μια διατομή σχετικά μικρών εξωτερικών διαστάσεων ώστε να υπερτονίσουμε την επίδραση του πάχους της επικάλυψης στα αποτελέσματα της ανάλυσης μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ποιότητα σκυροδέματος

Από τα αποτελέσματα της διερεύνησης μας είδαμε πως η ποιότητα του σκυροδέματος επιδρά άμεσα στη αποδοτικότητα της περίσφιγξης. ή αλλιώς στην παράπλευρη πίεση που προσφέρουν οι συνδετήρες στο σκυροδέμα. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, οδηγεί σε μείωση των τιμών των τροποποιημένων τάσεων και παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος, φαινόμενο που γίνεται ιδιαίτερα έντονο σε διατομές με πυκνό εγκάρσιο οπλισμό.

Τα διαγράμματα ροπών - καμπυλοτήτων και πλαστιμοτήτων μ_ϕ , δεν έδειξαν τις διαφορές που είδαμε στα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, μεταξύ διατομών που αποτελούνται από διαφορετικής ποιότητας σκυρόδεμα. Η αιτία πρέπει να αναζητηθεί, στην ίδια αξονική δύναμη με την οποία καταπονούνταν όλες οι διατομές και κατά συνέπεια στο διαφορετικό ανηγμένο θλιπτικό αξονικό φορτίο. Όσον αφορά τις καμπυλότητες αστοχίας, δεν υπήρξε καμία διαφοροποίηση μεταξύ ακόμη και των ακραίων τιμών που "πήρε" η τάση f_c (20MPa και 50MPa), ενώ οι ροπές παρουσίασαν μια αναμενόμενη αύξηση, απόρροια της μεγαλύτερης θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Συνεπώς καταλήγουμε στα εξής παρακάτω συμπεράσματα:

- Σε επίπεδο πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων μιας διατομής, τυχούσα αύξηση της ποιότητας του σκυροδέματος για δεδομένο -ίδιο- θλιπτικό αξονικό φορτίο (όχι ανηγμένο) δεν επιφέρει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι εάν ένα υποστύλωμα αποτελείται από σκυρόδεμα υψηλότερης ποιότητας από αυτήν που έχουμε εμείς αρχικά υπολογίσει, δεν θα υπάρξει αρνητική επίπτωση στις παρεχόμενες πλαστιμότητες καμπυλοτήτων από τη διατομή.
- Εάν από την άλλη μεριά, αυξήσουμε την ποιότητα σκυροδέματος σε ένα υποστύλωμα σαν μέτρο παραλαβής μεγαλύτερου θλιπτικού αξονικού φορτίου (αντί για παράδειγμα να αυξήσουμε τις διαστάσεις του), τότε αυτό θα επιδράσει με αρνητικό τρόπο στην πλαστιμότητα καμπυλοτήτων του. Η παράπλευρη πίεση p που παρέχουν οι συνδετήρες στο σκυρόδεμα μειώνεται με τρόπο παραβολικό όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Κράτνση χάλυβα

Η διερεύνηση της κράτνσης του χάλυβα έγινε για εύρος τιμών από 1.00 έως 1.35. Γνωρίζοντας ότι σε όλες τις σχέσεις υπολογισμού της αποδοτικότητας της περίσφιγξης, υπεισέρχεται η τιμή της διαρροής του χάλυβα, συμπεραίνουμε άμεσα ότι η κράτνση του χάλυβα επηρεάζει μόνον τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διατομών.

Η κράτνση του χάλυβα επηρέασε κυρίως τις ροπές στην οριακή κατάσταση αστοχίας της διατομής με τις καμπυλότητες αστοχίας $(1/r)_u$ να παραμένουν ουσιαστικά ανεπηρέαστες. Παρατηρήσαμε επίσης, ότι υπάρχει αλληλεπίδραση της μεταβολής της τιμής f_i/f_y τόσο με το ποσοστό του διαμήκους σπλισμού όσο και με την αποδοτικότητα της περίσφιγξης (έμμεσα). Η κράτνση του χάλυβα επέφερε αύξηση στην τιμή της ροπής κατά την αστοχία της διατομής ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλων ποσοστών ρ και ισχυρά περισφιγμένων διατομών. Η αυξημένη τάση που προσέφερε ο εφελκόμενος χάλυβας στην πρώτη περίπτωση λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού διαμήκους σπλισμού και στη δεύτερη λόγω των μεγάλων τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων ήταν αιτία για τη σχετική διαφοροποίηση στην τιμή της ροπής αστοχίας M_u . Συμπερασματικά ωστόσο καταλήγουμε, πως παρ'

ότι η κράτνση του χάλυβα έχει θετική επιρροή όσον αφορά τις ροπές στην οριακή κατάσταση αστοχίας μιας διατομής, εν τούτοις, η επιρροή της συγκεκριμένης παραμέτρου στα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι λιγότερη σημαντική και καθοριστική συγκριτικά με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες παραμέτρους, μην επηρεάζοντας ουσιαστικά τις τιμές πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων των διατομών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επίδραση είδους αντιπροσωπευτικής τιμής

Στο κεφάλαιο 5 συνδέσαμε τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων όπως αυτές προέκυψαν για διάφορες διατομές από τις διερευνήσεις των προηγούμενων κεφαλαίων με τις αντίστοιχες πλαστιμότητες όπως προέκυψαν από την προτεινόμενη σχέση του EC8 μέρος 1 (Σχέση 6.1):

$$\alpha\omega_{wd} \geq 30\mu_{\phi} \nu_d \varepsilon_{syd} \frac{b_c}{b_o} - 0.0035 \quad (6.1)$$

Σύμφωνα με τον EC8 - 1 η σχέση (6.1) εφαρμόζεται αυστηρά, μόνο για τιμές σχεδιασμού όλων των παραμέτρων. Εμείς αποδείξαμε πως η παραπάνω σχέση βγάζει ουσιαστικά τα ίδια αποτελέσματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων μ_{ϕ} για οποιαδήποτε διατομή, είτε εμείς την εφαρμόσουμε για τιμές σχεδιασμού είτε για μέσες τιμές των υλικών μας.

Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι τα συμπεράσματα που εξαγάγαμε από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των τιμών μ_{ϕ} για διάφορες διατομές όπως αυτά προέκυψαν από τη σχέση (6.1) και από την "αναλυτική" μέθοδο που χρησιμοποιήσαμε με τη βοήθεια του προγράμματος XTRACT. Τα αποτελέσματα πλαστιμοτήτων καμπυλοτήτων από την εφαρμογή της σχέσης του EC8 - 1 ήταν εμφανώς πιο συντηρητικά από τη διερεύνηση μέσω του προγράμματος XTRACT ιδιαίτερα για μεγάλα θλιπτικά αξονικά φορτία. Αυτό ήταν κάτι που αναμέναμε, καθ' ότι δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι ο EC8 - 1 αφορά τον σχεδιασμό νέων κατασκευών.

Επιπρόσθετα, συμπεράναμε μέσω της διερεύνησης που κάναμε με τη βοήθεια του προγράμματος XTRACT, ότι όταν εφαρμόσαμε μέσες τιμές τάσεων σκυροδέματος και χάλυβα για διάφορες ποιότητες υλικών, οι πλαστιμότητες καμπυλοτήτων μειώθηκαν σημαντικά σε σχέση με αντίστοιχες τιμές μ_{ϕ} για τιμές σχεδιασμού των υλικών μας (κάτι που όπως προαναφέραμε δεν συμβαίνει στη σχέση (6.1)) Τέλος, μέσω της μεθόδου Rosenblueth's διαπιστώσαμε ότι δεν είναι έντονη η μη γραμμικότητα στις μέσες τιμές των τιμών της τάσης του χάλυβα και του σκυροδέματος.

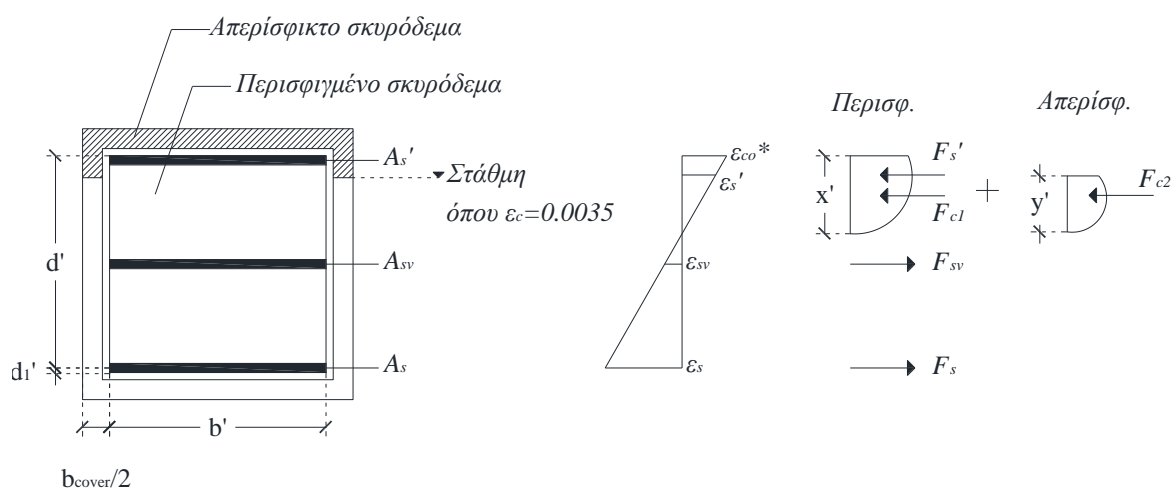
Παράρτημα

Υπολογισμός ξ_{co} αποφλοιωμένης διατομής.

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- Οι αρχικά επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και μετά την κάμψη.
- Υπάρχει πλήρης συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος.
- Αμελείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.
- Το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων εξιδανικεύεται με ελαστοπλαστική προσέγγιση και αμελείται η κράτυνση.
- Ο θλιβόμενος και εφελκύμενος χάλυβας βρίσκονται σε διαρροή.
- Ο ενδιάμεσος χάλυβας εφελκύεται (ελαστικά) με την εξής δικαιολόγηση:
 - Εάν έχω τετραγωνική διατομή (υποστύλωμα) τότε θα έχω συμμετρικό οπλισμό που σημαίνει ότι το βάθος της θλιβόμενης ζώνης x' της αποφλοιωμένης διατομής θα βρίσκεται σε στάθμη ανάμεσα στους θλιβόμενους χάλυβες και στο μέσον της διατομής.
 - Εάν η διατομή είναι από την άλλη ορθογωνική και ασύμμετρα οπλισμένη (δηλαδή $A_s' \neq A_s$), τότε $A_{sv} = 0$.
- Απερίσφικτο σκυρόδεμα:
 - Παραβολικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων μέχρι την παραμόρφωση $\varepsilon_{co} = 0.002$ και αστοχία σε παραμόρφωση $\varepsilon_{cu} = 0.0035$.
- Περισιφισμένο σκυρόδεμα:
 - Μόνον παραβολικό διάγραμμα το οποίο έχει πέρασ το σημείο που ορίζεται από την μέγιστη θλιπτική τάση του περισιφισμένου σκυροδέματος f_c^* και παραμόρφωση ε_{co}^* (δηλ. το ζητούμενο σημείο).

ΕΠΙΛΥΣΗ



Χάλυβας

$F_s = A_s f_y$ (εφελκόμενος) και $F_s' = A_s' f_y$ (θλιβόμενος).

$$\text{Από όμοια τρίγωνα έχουμε: } \frac{\varepsilon_{co}^*}{x'} = \frac{\varepsilon_s}{d' - x'} \Leftrightarrow \varepsilon_s = \frac{(d' - x')}{x'} \varepsilon_{co}^* \quad (1)$$

$$\text{επίσης: } \frac{\varepsilon_{co}^*}{x'} = \frac{\varepsilon_{sv}}{\left(\frac{d' + d_1'}{2}\right) - x'} \Leftrightarrow \varepsilon_{sv} = \frac{\varepsilon_{co}^*}{x'} \left(\frac{d' + d_1'}{2} - x'\right) \quad (2)$$

με: $\left(\frac{d' + d_1'}{2}\right)$ η στάθμη του ενδιάμεσου οπλισμού.

Οπότε η σχέση της δύναμης του χάλυβα που βρίσκεται στην ενδιάμεση στάθμη γίνεται λόγω της (1):

$$F_{sv} = A_{sv} \varepsilon_s E_s = A_{sv} \frac{\varepsilon_{co}^*}{x'} \left(\frac{d' + d_1'}{2} - x'\right) \frac{f_y}{\varepsilon_{sy}} \Rightarrow \quad (\text{και με αντικατάσταση του } E_s = \frac{f_y}{\varepsilon_{sy}})$$

$$\Rightarrow F_{sv} = \frac{A_{sv}}{x'} \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}\right) f_y [0.5(d' + d_1) - x'] \Rightarrow \quad (\text{διαιρώ με } b' d' f_c^*)$$

$$\Rightarrow \frac{F_{sv}}{b' d' f_c^*} = \frac{A_{sv}}{b' d' f_c^*} \frac{f_y}{\varepsilon_{sy}} \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}\right) \left[\frac{0.5(d' + d_1) - x'}{x'}\right]$$

θέτω: $\frac{A_{sv}}{b' d' f_c^*} \frac{f_y}{\varepsilon_{sy}} = \omega_v$ και $x' = \xi' d'$ και η τελευταία σχέση γίνεται:

$$\frac{F_{sv}}{b' d' f_c^*} = \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}\right) \left[\frac{0.5(d' + d_1) - \xi' d'}{\xi' d'}\right] \quad \text{και αντικαθιστώ} \quad \delta_1 = \frac{d_1'}{d'}$$

$$\Rightarrow \frac{F_{sv}}{b' d' f_c^*} = \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}\right) \left[\frac{0.5}{\xi'} (1 + \delta_1) - 1\right] = \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{cu}}\right) \frac{0.5}{\xi'} (1 + \delta_1) - \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}}\right) \quad (3)$$

Σκυρόδεμα

$$F_c = F_{c1} + F_{c2} = \frac{2}{3} b' x' f_c^* + 0.81 b_{cov} y f_c = \frac{2}{3} b' x' f_c^* + 0.002835 b_{cov} \frac{x' f_c}{\varepsilon_{co}^*} \Rightarrow$$

(διαιρώ με $b' d' f_c^*$) και η τελευταία σχέση γίνεται:

$$\Rightarrow \frac{F_c}{b' d' f_c^*} = \frac{2}{3} \xi' + \frac{0.002835 \xi'}{\varepsilon_{co}^*} \left(\frac{b_{cov}}{b'}\right) \left(\frac{f_c}{f_c^*}\right)$$

θέτω: $a = \frac{b_{cov}}{b'}$ και $b = \frac{f_c}{f_c^*}$ και η τελευταία σχέση γίνεται:

$$\Rightarrow \frac{F_c}{b'd'f_c^*} = \frac{2}{3}\xi' + \frac{0.002835}{\varepsilon_{co}^*}\xi'ab \quad (4)$$

Ισοδυναμία δυνάμεων

$$N = F_c + F_s' - F_s - F_{sv} \Rightarrow \quad (\text{διαιρώ με } b'd'f_c^*)$$

$$\Rightarrow \frac{N}{b'd'f_c^*} = \frac{F_c}{b'd'f_c^*} + \frac{F_s'}{b'd'f_c^*} - \frac{F_s}{b'd'f_c^*} - \frac{F_{sv}}{b'd'f_c^*} \quad (5)$$

θέτω: $\nu = \frac{N}{b'd'f_c^*}$, $\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b'd'f_c^*} \frac{f_y}{f_c^*}$ και αντίστοιχα για τα ω_2 και ω_v .

Μετά από την αντικατάσταση των σχέσεων (3), (4) η σχέση (5) γίνεται

$$\nu = \frac{2}{3}\xi' + \frac{0.002835}{\varepsilon_{co}^*}\xi'ab + \omega_2 - \omega_1 - \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) \frac{0.5}{\xi'}(1 + \delta_1) + \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) \Leftrightarrow$$

$$\xi'^2 \left(\frac{2}{3} + \frac{0.002835}{\varepsilon_{co}^*}ab \right) + \xi' \left[\omega_2 - \omega_1 - \nu + \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) \right] - \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) 0.5(1 + \delta_1) = 0$$

Από την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει:

$$\xi_{co}' = \left[-A_2 + (A_2^2 - 4A_1A_3)^{1/2} \right] / 2A_1$$

$$\text{με: } A_1 = \frac{2}{3} + \frac{0.002835}{\varepsilon_{co}^*}ab$$

$$A_2 = \omega_2 - \omega_1 - \nu + \omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right)$$

$$A_3 = -\omega_v \left(\frac{\varepsilon_{co}^*}{\varepsilon_{sy}} \right) 0.5(1 + \delta_1)$$

όπου: $a = \frac{b_{cov}}{b'}$, $b = \frac{f_c}{f_c^*}$, $\delta_1 = \frac{d_1'}{d'}$, $\nu = \frac{N}{b'd'f_c^*}$, $\omega_1 = \frac{A_{s1}}{b'd'f_c^*} \frac{f_y}{f_c^*}$ (αντίστοιχα ορίζονται και

τα ω_2 και ω_v .

Αναφορές

EN 1992-1-1 (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (2004)

EN 1998-1 (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (2004)

EN 1998-3 (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (2005)

Διονύσιος Ε. Μπισκίνης: Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος, με ή χωρίς ενίσχυση

Θ.Π. Τάσιος: Θεωρία σχεδιασμού επισκευών και ενισχύσεων (2014 - 2015)

Θ.Π. Τάσιος, Π. Ι. Γιαννόπουλος, Κ.Γ Τρέζος, Σ.Γ Τσουκαντάς: Ωπλισμένο σκυρόδεμα με βάση τον νέο ελληνικό κανονισμό σκυροδέματος

(2005)ΚΑΝ.ΕΠΕ.2012: Κανονισμός επεμβάσεων

Madhu Karthik Murugesan Reddiar: Stress - strain model of unconfined and confined concrete and stress - block parameters (2009)

Micheal N. Fardis: Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings based on EN - Eurocode 8 (2009)

T. Paulay, M.J.N Priestley, and R. Park, Fellow, ASCE: Theoretical stress - strain model for confined concrete (1988)

T. Paulay, M.J.N Priestley: Seismic Design of Reinforced Concrete and Mansory Buildings (1992)

Κωνσταντίνος Τρέζος: Σημειώσεις για το μάθημα Αξιοπιστία Κατασκευών

Χρήστος Γ. Καραγιάννης: Σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έναντι σεισμού