

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ : ΑΛΙΚΗ ΜΟΥΖΟΥΛΑ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ

Πάτρα, 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία έχει σαν βασικό της στόχο τον υπολογισμό της ροπής αντοχής των κατακόρυφων μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα και την ανάπτυξη εύχρηστων βοηθητικών πινάκων και διαγραμμάτων, μέσω των οποίων ένας μηχανικός έχοντας στη διάθεση του μία ροπή αντοχής και, αντίστοιχα, μία αξονική δύναμη, να είναι ικανός να αποφασίσει για τα κατακόρυφα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος που θα χρησιμοποιήσει στο οικοδομικό του έργο, την διαστασιολόγηση και τις γεωμετρικές διατάξεις των οπλισμών, έτσι ώστε το έργο αυτό να πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές που απαιτούνται και να ανταπεξέλθει με πλήρη ευστοχία, αποφεύγοντας τυχόν μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής.

Για τη συμβολή στην περάτωση της Πτυχιακής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Διονύσιο Μπισκίνη, η πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, για την επίλυση διαφόρων θεμάτων και την βελτίωση της, αλλά και η συνέπεια του οποίου υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην άψογη συνεργασία μας για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, καθώς επίσης, και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της, και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο.

Θα ήθελα επίσης να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου, οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Όπως προκύπτει από τον τίτλο της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, βασικό θέμα της είναι η έρευνα στο θέμα της διαστασιολόγησης και όπλισης κατακόρυφων μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα, και πιο συγκεκριμένα των υποστυλωμάτων.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μία γενική εισαγωγή στο σκυρόδεμα, περιγράφοντας τη διαδικασία μετάβασης του σε οπλισμένο σκυρόδεμα, παράλληλα αναπτύσσεται η σχέση του σκυροδέματος με το χάλυβα οπλισμού και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα χρήσης οπλισμένου σκυροδέματος σε ένα δομικό σύστημα.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα οπλισμού, καθότι βασική μας απαίτηση από μία φέρουσα κατασκευή είναι να διατηρεί την ακεραιότητά της και να εξασφαλίζεται η ασφάλεια της.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρατίθενται οι αρχές του σχεδιασμού ενός δομικού συστήματος, σύμφωνα με τους σύγχρονους Κανονισμούς σχεδιασμού κατασκευών, καθώς και τις ενέργειες του μηχανικού, έχοντας στόχο να περιορισθεί, με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, σε οικονομικά και κοινωνικά ανεκτά επίπεδα, να γίνει το δομικό σύστημα ή μέρος αυτού, ακατάλληλο για τη χρήση για την οποία προορίζεται, λόγω ότι έπαψε να πληροί μία τουλάχιστον από τις απαιτήσεις ή τα κριτήρια ικανοποιητικής λειτουργίας του.

Στο 4^ο κεφάλαιο εξετάζεται εκτενέστερα η διαστασιολόγηση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με βάση την αντοχή τους σε μεγέθη ορθής έντασης, όπως είναι οι ροπές κάμψης σε συνδυασμό με ορθή αξονική δύναμη. Αποτελεί σημαντικό στάδιο στον υπολογισμό του οπλισμένου σκυροδέματος, καθότι η πλειονότητα των μελών των κατασκευών, και συγκεκριμένα των υποστυλωμάτων, καταπονούνται κυρίως σε συνδυασμό ροπών κάμψης και αξονικής δύναμης.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά οι κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και όπλισης των υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, εξηγούνται οι λόγοι και οι συνθήκες που λαμβάνονται υπ' όψιν για την επιλογή τους.

Στο 6^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται απλές σχέσεις υπολογισμού της ροπής και της καμπυλότητας, στη διαρροή και στην αστοχία, για μέλη ορθογωνικής διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα της ροπής αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος C25/30 και C30/37 για προκαθορισμένες διατομές υποστυλωμάτων. Καθώς επίσης, αναπτύσσονται και οι αντίστοιχοι βοηθητικοί πίνακες για τις δύο από τις παραπάνω περιπτώσεις οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίοι επίσης, αναφέρονται σε προκαθορισμένες διατομές υποστυλωμάτων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα στα πλαίσια της Εργασίας συνοψίζονται στο 7^ο κεφάλαιο.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας:

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

Η σπουδάστρια:

Αλίκη Μούζουλα

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
1.1 Σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα.....	21
1.1.1 Σχέση σκυροδέματος – χάλυβα.....	21
1.2 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα οπλισμένου σκυροδέματος.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	
2.1 Μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.....	23
2.1.1 Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	23
2.1.2 Συμβατική αντοχή σκυροδέματος.....	24
2.1.3 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος.....	24
2.1.4 Κατηγορίες σκυροδέματος και πεδίο εφαρμογής τους.....	25
2.1.5 Μέση αντοχή σκυροδέματος.....	26
2.1.6 Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.....	26
2.1.7 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.....	27
2.1.8 Σχέση $\sigma - \epsilon$ και Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος σε βραχυχρόνια μονοαξονική θλίψη.....	27
2.1.9 Συμπεριφορά σε πολυαξονική ένταση.....	31
2.1.10 Περισφιγμένο σκυρόδεμα.....	33
2.1.11 Χρόνιες παραμορφώσεις του σκυροδέματος.....	36
2.1.12 Συστολή ξήρανσης.....	36
2.1.13 Ερπυσμός.....	38
2.2 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού.....	40

2.2.1 Ονομαστική και χαρακτηριστική τιμή – τάση διαρροής.....	40
2.2.2 Εφελκυστική αντοχή και συνολική μήκυνση στη μέγιστη τάση.....	42
2.2.3 Κατηγορίες χαλύβων οπλισμού στον Ελλαδικό χώρο.....	43
2.2.4 Υπολογιστικά διαγράμματα $\sigma - \epsilon$ χάλυβα κατά τον Ευρωκώδικα 2.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΟΙ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Οριακές καταστάσεις.....	45
3.3 Η πιθανοτική φύση φορτίων και αντοχών και οι συντελεστές ασφαλείας.....	46
3.4 Ονομαστικές τιμές δράσεων.....	52
3.5 Συνδυασμοί δράσεων για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας.....	54
3.6 Συνδυασμοί δράσεων για την οριακή κατάσταση στατικής ισορροπίας.....	57
3.7 Συνδυασμοί δράσεων για τις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας.....	58
3.8 Δυσμενείς φορτίσεις.....	59
3.9 Υπολογισμός της έντασης σχεδιασμού.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ

4.1 Εισαγωγή.....	61
4.2 Οι βασικές αρχές της διαστασιολόγησης σε κάμψη.....	61
4.3 Μέθοδοι και κριτήρια αστοχίας διατομών σε κάμψη.....	64
4.4 Σχεδιασμός ορθογωνικών διατομών με απλό οπλισμό σε μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη μεγάλης εκκεντρότητας.....	67
4.5 Ορθογωνικές διατομές με ασύμμετρο διπλό οπλισμό σε απλή κάμψη με ορθή δύναμη.....	72
4.6 Αναλυτικές σχέσεις για τη δημιουργία διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης $m_d - \nu_d$ ορθογωνικών διατομών με συμμετρικό οπλισμό σε μονοαξονική κάμψη.....	74
4.7 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπής-αξονικής δύναμης για ορθογωνικές διατομές με συμμετρικό οπλισμό σε μονοαξονική κάμψη.....	76
4.8 Διατομές με τυχαίο σχήμα σε έκκεντρο εφελκυσμό.....	84
4.9 Ορθογωνικές διατομές σε διπλή (ή λοξή ή διαξονική) κάμψη με ορθή δύναμη.....	85
4.10 Προσεγγιστικός υπολογισμός οπλισμού ορθογωνικών διατομών για διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη μέσω διαγραμμάτων ή εξισώσεων.....	95
4.11 Επιρροή της ορθής δύναμης στην πλαστιμότητα.....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΚΑΝΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΜΕΛΩΝ

5.1 Εισαγωγή : Τα δομικά στοιχεία του σκελετού του κτιρίου.....	97
5.2 Ελάχιστες αποστάσεις ράβδων.....	98
5.3 Ελάχιστη επικάλυψη οπλισμών με σκυρόδεμα.....	100
5.4 Επικάλυψη οπλισμού υποστυλωμάτων.....	102
5.5 Κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και λεπτομερειών υποστυλωμάτων.....	103
5.5.1 Εισαγωγή.....	103
5.5.2 Κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και όπλισης υποστυλωμάτων.....	108
5.5.2.1 Ρόλος, στατική λειτουργία και κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων.....	108
5.5.2.2 Γεωμετρικές διατάξεις για υποστυλώματα.....	110
5.5.2.3 Κανόνες για τους διαμήκεις κατακόρυφους οπλισμούς των υποστυλωμάτων (Πιν.5.4).....	111
5.5.2.4 Κανόνες για τους εγκάρσιους οπλισμούς των υποστυλωμάτων (Πιν.5.5).....	113
5.5.2.5 Αρμοί διακοπής εργασίας στα υποστυλώματα.....	117
5.6 Βιομηχανοποιημένοι συνδετήρες - κλωβοί.....	118
5.7 Εικόνες όπλισης υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος.....	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° : ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΕΛΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή	126
6.2 Ροπή και καμπυλότητα στη διαρροή.....	126
6.3 Ροπή αντοχής και καμπυλότητα στην αστοχία.....	127
6.3.1 Ορισμοί και βασικές παραδοχές.....	127
6.3.2 Αστοχία της πλήρους διατομής λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού πριν την αποφλοιώση του σκυροδέματος της επικάλυψης.....	128
6.3.3 Καμπυλότητα κατά τη θραύση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος της επικάλυψης... ..	129
6.3.4 Καμπυλότητα αστοχίας του περισφιγμένου πυρήνα, μετά την αποφλοιώση της διατομής.....	132
6.3.5 Υπολογισμός ροπής αντοχής M_{Rc} και ροπής αντίστασης διατομής μετά την αποφλοιώση M_{Ro} , μελών ορθογωνικής διατομής.....	132
6.4 Διαγράμματα ροπής αντοχής M_u	134
6.5 Ανάπτυξη βοηθητικών πινάκων υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος.....	174

6.5.1 Εισαγωγή.....	174
6.5.2 Ανάπτυξη βοηθητικών πινάκων οπλισμένου σκυροδέματος C25/30 σε συγκεκριμένες διατομές υποστυλωμάτων για προσδιορισμένες τιμές αξονικής δύναμης N_{sd} και αντίστοιχες προσδιορισμένες τιμές καμπτικής ροπής M_{sd}	174
6.5.3 Ανάπτυξη βοηθητικών πινάκων οπλισμένου σκυροδέματος C30/37 σε συγκεκριμένες διατομές υποστυλωμάτων για προσδιορισμένες τιμές αξονικής δύναμης N_{sd} και αντίστοιχες προσδιορισμένες τιμές καμπτικής ροπής M_{sd}	188
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	206
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	207

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες σκυροδέματος κατά Ευρωκώδικα 2.

Πίνακας 2.2 Τελικές τιμές του συντελεστή ερπυσμού, $\varphi(t_{\infty}, t_0)$, και της συστολής ξήρανσης, $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$, σκυροδέματος.

Πίνακας 2.3 Απαιτήσεις Ευρωκώδικα 8 για χάλυβα κύριων στοιχείων.

Πίνακας 3.1 Αντιστοιχία δείκτη αξιοπιστίας και πιθανότητα αστοχίας^{3,6}.

Πίνακας 3.2 Επιβαλλόμενα φορτία σε δάπεδα, μπαλκόνια και σκάλες κτιρίων.

Πίνακας 4.1 Γενικός πίνακας διαστασιολόγησης διατομών με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη και απλό οπλισμό, σε μονοαξονική κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη.

Πίνακας 4.2 Ασύμμετρος διπλός οπλισμός ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για χάλυβα S500.

Πίνακας 5.1 Κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον και ελάχιστη κατηγορία σκυροδέματος.

Πίνακας 5.2 Ελάχιστη επικάλυψη c_{min} (mm) για ανθεκτικότητα σε διάρκεια.

Πίνακας 5.3 Συνιστώμενη τροποποίηση κατηγορίας κατασκευών για ανθεκτικότητα σε διάρκεια.

Πίνακας 5.4 Κατασκευαστικοί κανόνες Ευρωκώδικα 2 και 8 για τους κατακόρυφους οπλισμούς υποστυλωμάτων.

Πίνακας 5.5 Κατασκευαστικοί κανόνες κατά τους Ευρωκώδικες 2 και 8 για συνδετήρες υποστυλωμάτων.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Επιβατικό Μέτρο Ελαστικότητας E_{cm} , διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.5) & (2.6).

Σχήμα 2.2 Παραβολικό ορθογωνικό διάγραμμα $\sigma_c - \epsilon_c$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη για τη διαστασιολόγηση κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.7) & (2.8).

Σχήμα 2.3 Απλοποιημένο διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη για τη διαστασιολόγηση κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.9) & (2.10).

Σχήμα 2.4 Περιβάλλουσα αντοχής σκυροδέματος σε διαξονική ένταση .

Σχήμα 2.5 Περίσφιγμένο σκυρόδεμα σε τριαξονική ένταση και επιρροή περίσφιγξης μονοαξονικό διάγραμμα $\sigma - \epsilon$.

Σχήμα 2.6 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής με συγκράτηση σε γωνία συνδετήρα : a) μία ενδιάμεσης ράβδου ανά πλευρά, b) δύο ενδιάμεσων ράβδων με ενδιάμεσους ορθογωνικούς συνδετήρες, c) δύο ενδιάμεσων ράβδων με οκταγωνικό συνδετήρα, d) τριών ενδιάμεσων ράβδων με συνδυασμό ορθογωνικών και ρομβοειδών συνδετήρων ή σιγμοειδών ράβδων.

Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων $\sigma - \epsilon$ χάλυβα οπλισμού κατά τον Ευρωκώδικα 2 .

Σχήμα 3.1 Γεωμετρική ερμηνεία πιθανότητας αστοχίας.

Σχήμα 3.2 Παράδειγμα συνδυασμού δράσεων για έλεγχο στατικής ισορροπίας τοίχου αντιστήριξης.

Σχήμα 3.3 Δυσμενείς φορτίσεις δοκού δύο ανοιγμάτων.

Σχήμα 4.1 Κρίσιμες σε κάμψη διατομές.

Σχήμα 4.2 Ιδεατές κατανομές τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη διατομής.

Σχήμα 4.3 Γεωμετρία και εσωτερικές δυνάμεις διατομής σε κάμψη με ορθή δύναμη.

Σχήμα 4.4 Καμπυλότητα μέλους.

Σχήμα 4.5 Τυπικά διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων σε καθαρή κάμψη.

Σχήμα 4.6 (α) Καμπτική αστοχία με διαρροή χάλυβα, (β) με θραύση του σκυροδέματος.

Σχήμα 4.7 Δύναμη θλίψης σκυροδέματος στη διατομή.

Σχήμα 4.8 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$.

Σχήμα 4.9 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη για $f_{ck} = 90\text{MPa}$.

Σχήμα 4.10 Διατομή σε έκκεντρο εφέλκυσμό.

Σχήμα 4.11 Επιφάνεια αλληλεπίδρασης M_y - M_z - N .

Σχήμα 4.12 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (σημειακή κατανομή οπλισμού, $d/h=0.05$).

Σχήμα 4.13 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (σημειακή κατανομή οπλισμού, $d/h=0.10$).

Σχήμα 4.14 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (σημειακή κατανομή οπλισμού, $d/h=0.15$).

Σχήμα 4.15 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (σημειακή κατανομή οπλισμού, $d/h=0.20$).

Σχήμα 4.16 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκατανεμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.05$).

Σχήμα 4.17 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκατανεμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.10$).

Σχήμα 4.18 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκατανεμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.15$).

Σχήμα 4.19 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκατανεμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.20$).

Σχήμα 4.20 Διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας για διάφορες τιμές της αξονικής κάμψης.

Σχήμα 5.1 Τυπικές διατομές υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος.

Σχήμα 5.2 Καθαρές αποστάσεις μεταξύ παράλληλων ράβδων.

Σχήμα 5.3 Δέσμες ράβδων.

Σχήμα 5.4 Επικάλυψη ράβδων με σκυρόδεμα.

Σχήμα 5.5 Παράδειγμα επικάλυψης οπλισμού υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής.

Σχήμα 5.6 Τυπικά διαγράμματα ροπών κάμψης 6-ορόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μονίμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$.

Σχήμα 5.7 Τυπικά διαγράμματα τεμνουσών 6-ορόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μονίμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$.

Σχήμα 5.8 Τυπικά διαγράμματα αξονικών δυνάμεων 6-ορόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μονίμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$.

Σχήμα 5.9 Επιρροή διάταξης και αποστάσεις συνδετήρων στο συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης.

Σχήμα 5.10 Διάταξη κλειστών συνδετήρων σε διάφορες διατομές υποστυλωμάτων.

Σχήμα 5.11 Μορφές κλειστών συνδετήρων.

Σχήμα 5.12 Παράδειγμα τοποθέτησης συνδετήρων σε υποστυλώμα τετραγωνικής διατομής $300 \times 300\text{mm}$.

Σχήμα 5.13 Όπλιση υποστυλώματος τετραγωνικής διατομής $400 \times 400\text{mm}$.

Σχήμα 5.14 Όπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $300 \times 300\text{mm}$ με κρίσιμες και μη περιοχές.

Σχήμα 5.15 Όπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $300 \times 300\text{mm}$ με κρίσιμο όλο το ύψος.

Σχήμα 5.16 Όπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $400 \times 400\text{mm}$ με κρίσιμο όλο το ύψος.

Σχήμα 5.17 Όπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $500 \times 500\text{mm}$ με κρίσιμο όλο το ύψος.

Σχήμα 6.1 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.2 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.3 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.4 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.5 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.6 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.7 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.8 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.9 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.10 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.11 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.12 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

Σχήμα 6.13 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 6.1 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ14.

Διάγραμμα 6.2 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ16.

Διάγραμμα 6.3 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ18.

Διάγραμμα 6.4 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ20.

Διάγραμμα 6.5 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ14.

Διάγραμμα 6.6 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ16.

Διάγραμμα 6.47 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ18.

Διάγραμμα 6.48 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 8Φ20.

Διάγραμμα 6.49 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ14.

Διάγραμμα 6.50 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ16.

Διάγραμμα 6.51 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ18.

Διάγραμμα 6.52 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ20.

Διάγραμμα 6.53 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ14.

Διάγραμμα 6.54 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ16.

Διάγραμμα 6.55 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ18.

Διάγραμμα 6.56 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ20.

Διάγραμμα 6.57 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ14.

Διάγραμμα 6.58 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ16.

Διάγραμμα 6.59 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ18.

Διάγραμμα 6.99 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ18.

Διάγραμμα 6.100 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ20.

Διάγραμμα 6.101 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ14.

Διάγραμμα 6.102 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ16.

Διάγραμμα 6.103 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ18.

Διάγραμμα 6.104 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ20.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκυρόδεμα χαρακτηρίζουμε ένα τεχνητό λίθο που προκύπτει από την ανάμειξη τσιμέντου, ύδατος, αδρανών υλικών(αμμοχάλικα) και ενδεχομένως από διάφορα άλλα πρόσμικτα υλικά,. Οι αναλογίες τσιμέντου, αδρανών και ύδατος αναμιγνύονται, δίνοντας ένα νωπό σκυρόδεμα που συμπακνώνεται και συντηρείται μέχρι την τελική του μορφή (στερεό σώμα) και μέχρι να αποκτήσει τις προδιαγεγραμμένες ιδιότητες αντοχής και ανθεκτικότητας.

Η διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος από την παρατεταμένη νωπή και μεταβατική κατάσταση του πριν τη σκλήρυνση του, αποτελεί επανάληψη της αρχικής δημιουργίας του γήινου φλοιού και τεχνητή προέκταση στις κατασκευές από σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από αυξημένη αντοχή σε συμπίεση, αυξημένη θλιπτική αντοχή και αμελητέα ικανότητα τάνυσης, αμελητέα εφελκυστική αντοχή. Στην πρώτη φάση δημιουργίας του εμφανίζει μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο.

Το σκυρόδεμα σαν τεχνητός λίθος μπορεί να συμπιεστεί, να θλιβεί αλλά δεν μπορεί να εκταθεί, να εφελκυστεί. Η εφελκυστική ικανότητα του είναι αμελητέα και συγκεκριμένα μικρότερη από το 1/10 της θλιπτικής ικανότητας του. Για την εφαρμογή του σε οριζόντιους καμπτόμενους φορείς το σκυρόδεμα οπλίζεται με το χάλυβα, ένα υλικό με μεγάλη εφελκυστική αντοχή, ο οποίος ενσωματώνεται στις εφελκυσόμενες περιοχές του φορέα με τη μορφή ράβδων και το σκυρόδεμα μεταλλάσσεται σε **οπλισμένο σκυρόδεμα**. Η ενσωμάτωση του χάλυβα γίνεται κατά τη νωπή φάση και πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι ράβδοι θα κολλήσουν στο σκυρόδεμα ώστε να παρακολουθήσουν την έκταση του και να ενταθούν. Η κόλληση αυτή, η συνάφεια, σκυροδέματος με χάλυβα επιτυγχάνεται με την παρουσία τσιμεντοπολτού γύρω από τις ράβδους.

1.1.1 ΣΧΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΧΑΛΥΒΑ

Η αποτελεσματική συνεργασία των δύο υλικών είναι αναγκαία προϋπόθεση για την ασφαλή παραλαβή των εντατικών μεγεθών και την αλληλοσυμπλήρωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. **Η επιτυχής συνεργασία των δυο υλικών εξασφαλίζεται μέσω:**

- **της Συνάφειας :** Κατά μήκος των ράβδων οπλισμού, που βρίσκονται μέσα στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος, αναπτύσσονται δυνάμεις συνάφειας, τριβής, έτσι ώστε να μην είναι δυνατή η σχετική μετατόπιση μεταξύ των δύο υλικών. Με αποτέλεσμα για μια τυχαία παραμόρφωση του χάλυβα, προκαλείται η ίδια και στο γειτονικό σκυρόδεμα, γεγονός που αποτελεί **προϋπόθεση για να λειτουργήσει ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των δύο υλικών.**
- **της Θερμικής Διαστολής :** Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου ίδιος και στα δύο υλικά, δηλαδή $\alpha_T \approx 10 \cdot 10^{-6} / K^{-1}$. Με αποτέλεσμα τα δύο υλικά να έχουν τις ίδιες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σε αντίθετη περίπτωση, όπως είναι αυτή της καταπόνησης με υψηλές θερμοκρασίες (>600⁰, περίπτωση πυρκαγιάς), μειώνεται η συνάφεια στην προσπάθεια της να εμποδίσει την παραμόρφωση των δυο υλικών.
- **της Φυσικής Προστασίας Χάλυβα :** Ο οπλισμός καλύπτεται με αρκετό τσιμεντοπολτό για να αποκτήσει μια διαχρονική φυσική προστασία ενάντια στην οξείδωση, διάβρωση του χάλυβα.

1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει καταξιωθεί στην πράξη ως βιομηχανικό υλικό, ενώ είναι σχετικά νέο υλικό περίπου 150 ετών και βρίσκεται συνεχώς στην 'κατηγορία' ως συνυπεύθυνου για την "τσιμεντοποίηση" των πόλεων.

- **Τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι :**

Μεγάλη Θλιπτική αντοχή : Το σκυρόδεμα έχει σχετικά μεγάλη θλιπτική αντοχή και είναι 4-5 φορές φθηνότερο από το χάλυβα στην παραλαβή της θλιπτικής δύναμης. Το μικρό του κόστος οφείλεται και στις σχετικά φθηνές πρώτες ύλες.

Μορφοποίηση : Το σκυρόδεμα είναι ικανό να πάρει τη μορφή του ξυλότυπου, 'καλουπιού', μέσα στο οποίο διαστρώνεται. Επίσης έχει την δυνατότητα να σκληραίνει στον αέρα και μέσα στο νερό (σε αντίθεση π.χ. με τον ασβέστη στην τοιχοποιία)

Ανθεκτικότητα : Σύμφωνα με τον κανονισμό τεχνολογίας σκυροδέματος, το σκυρόδεμα αποτελεί ένα διαχρονικό υλικό και δεν προσβάλλεται από μικροοργανισμούς όπως το ξύλο, ή χημικές ουσίες, υπό τον όρο ότι έχει παρασκευασθεί ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα. Επίσης η συμπεριφορά του ως υλικό είναι καλή σε περιπτώσεις πυρκαγιάς.

- **Τα βασικά μειονεκτήματά του είναι :**

Ίδιο βάρος : Το κανονικό οπλισμένο σκυρόδεμα έχει σημαντικό ίδιο βάρος (υπολογιστικά λαμβάνεται 25 kN/m^3), ώστε το μεγάλο νεκρό φορτίο του ίδιου βάρους είναι δαπανηρό για γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη δημιουργία φορέων που μεταβιβάζουν μέρος του φορτίου διαμέσου θλιπτικών τάσεων π.χ. κελύφη, ή με προένταση, ή με προκατασκευασμένα στοιχεία, που οι διατομές είναι μικρότερες λόγω των υψηλών ελεγχόμενων αντοχών.

Διακρίνεται ανάλογα με το ίδιο βάρος σε :

ελαφροσκυρόδεμα $\rho(=\gamma) \leq 2,0 \text{ kg/dm}^3 = 20 \text{ kN/m}^3$

κανονικό σκυρόδεμα $\rho(=\gamma) = 25 \text{ kN/m}^3$

βαρύ σκυρόδεμα $\rho(=\gamma) > 26 \text{ kN/m}^3$

Θερμομόνωση : Το σκυρόδεμα δε διαθέτει θερμομονωτική ικανότητα και απαιτεί ειδική θερμομόνωση.

Ηχομόνωση : Το σκυρόδεμα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ως προς την ικανότητα ηχομόνωσης, δηλαδή έχει αρκετή ηχομονωτική ικανότητα σε αερόφερτους θορύβους λόγω του σχετικά μεγάλου βάρους του και διότι τα ηχητικά κύματα δεν είναι σε θέση να θέσουν σε ταλάντωση τη μάζα του σκυροδέματος. Σε αντίθεση με θορύβους από κτυπογενείς ήχους που μεταδίδονται δια του στερεού σώματος, απαιτείται πρόσθετη ηχομόνωση του σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Η βασική μας απαίτηση από μία φέρουσα κατασκευή είναι να διατηρεί την ακεραιότητα της υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται αν το υλικό της κατασκευής έχει επαρκή αντοχή. Γενικά στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, το σκυρόδεμα, όπου δεν έχει ρηγματωθεί λόγω εφελκυσμού, είναι περίπου σε μονοαξονική θλίψη, για το λόγο αυτό η μονοαξονική θλιπτική αντοχή είναι το κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος του σκυροδέματος. Επιπλέον, αυτή η αντοχή είναι γενικό μέτρο της ποιότητας του υλικού, γιατί όλες σχεδόν οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα σε διάρκεια και δυσμενείς χημικές επιδράσεις, κ.λ.π.), βελτιώνονται με αύξηση της θλιπτικής αντοχής, επειδή βελτιώνονται με μείωση του πορώδους και των κενών του σκυροδέματος, όπως ακριβώς και η αντοχή.

Τα αποτελέσματα της δοκιμασίας αντοχής σε θλίψη επηρεάζονται από το σχήμα του δοκιμίου, και συγκεκριμένα το λόγο ύψους προς διάσταση βάσης, το μέγεθος του δοκιμίου και την ηλικία του δοκιμίου. Η επίδραση των παραγόντων αυτών στο αποτέλεσμα της δοκιμής εξετάζεται παρακάτω :

- Επίδραση λόγου ύψους προς βάση: Κατά τη δοκιμή θλίψης το δοκίμιο τείνει να διογκωθεί πλευρικά (κατά Poisson). Στις επιφάνειες επαφής με τις άκαμπτες πλάκες της μηχανής φόρτισης, η εγκάρσια παραμόρφωση εμποδίζεται από δυνάμεις τριβής με διεύθυνση προς το κέντρο της επιφάνειας επαφής. Ο πλευρικός περιορισμός (περίσφιγξη) αυξάνει όμως την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, γιατί επιβραδύνει την παράλληλα με την τάση θλίψης επέκταση των μικρορωγμών. Όσο πιο κοντόχονδρο είναι το δοκίμιο αυξάνεται η επίδραση στο αποτέλεσμα της δοκιμής θλίψης, γιατί ο εγκάρσιος ο περιορισμός των ακραίων διατομών επηρεάζει μόνο την αντοχή των ακραίων περιοχών του δοκιμίου. Έτσι εμφανίζεται μεγαλύτερη αντοχή στα κυβικά δοκίμια απ' ότι στα κυλινδρικά με λόγο ύψους προς διάσταση βάσης 2:1 ή μεγαλύτερο. Για λόγο 2:1, είναι αμελητέα η επίδραση των συνοριακών συνθηκών στις ακραίες διατομές πάνω στις εσωτερικές τάσεις στο μέσο του ύψους. Γι' αυτό σε κυλινδρικά δοκίμια με λόγο ύψους προς βάση τουλάχιστον 2:1 δίνεται περίπου η **πραγματική** θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.
- Το μέγεθος του δοκιμίου: Όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο μικρότερη είναι η αντοχή, γιατί με το μέγεθος του δοκιμίου αυξάνεται η πιθανότητα να βρεθεί ένα αδύνατο σημείο απ' όπου θα αρχίσει η αστοχία. Επίσης ένα μικρό δοκίμιο επηρεάζεται περισσότερο από τη συντήρηση του δοκιμίου σε σχέση με ένα μεγάλο, ενώ ακόμη και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και εσωτερικού του δοκιμίου λόγω θερμότητας ενυδάτωσης είναι μεγαλύτερη και προκαλεί πιο έντονη ρηγμάτωση της επιφάνειας όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα, κύβοι πλευράς 150mm έχουν αντοχή κατά μέσο όρο 5% μεγαλύτερη απ' αυτήν κύβων πλευράς 200mm, ενώ κύβοι πλευράς 300mm έχουν κατά μέσο όρο αντοχή ίση με το 90% περίπου αυτής των κύβων 200mm.
- Η ηλικία : Η αντοχή αυξάνεται με το χρόνο, επειδή για πάρα πολλά χρόνια μετά τη σκυροδέτηση συνεχίζεται η ενυδάτωση του τσιμέντου. Παίρνοντας ως βάση αναφοράς την αντοχή στις 28 μέρες για το κοινό ή καθαρό τσιμέντο Portland κανονικής ανάπτυξης αντοχής, η αντοχή του σκυροδέματος στις 7 μέρες είναι περίπου το 70%-75% της αντοχής σε 28 μέρες, και στις 14 μέρες το 80%. Στους 3 μήνες η αντοχή ξεπερνά την αντοχή των

28 ημερών κατά 15-20%, σε 1 χρόνο κατά 25-40% και σε 3 χρόνια κατά 50% περίπου. Στους υπολογισμούς για το σχεδιασμό νέων κατασκευών όμως, δε λαμβάνεται υπόψη αυτή η αύξηση της αντοχής, γιατί θεωρείται πως η κατασκευή πρέπει να φέρει όλα τα φορτία σχεδιασμού της σε ηλικία 28 ημερών. Τα τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχής δίνουν σε 7 μέρες την αντοχή που τα κοινά τσιμέντα δίνουν σε 14 και σε 14 μέρες την αντοχή που δίνουν τα τελευταία σε 28 μέρες. Σ' ένα χρόνο όμως τα τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχής δίνουν περίπου την ίδια αντοχή όπως και τα κοινά, η τελική τους δε αντοχή μπορεί να είναι μικρότερη.

Κατά την εξίδρωση λόγω χειρότερης συντήρησης, δυσκολότερης συμπύκνωσης και αύξησης του ποσοστού του νερού στο πάνω μέρος μελών με μεγάλο ύψος (υποστυλώματα, τοιχώματα, υψίκορμες δοκοί) έχει παρατηρηθεί ότι το σκυρόδεμα στο έργο έχει το 80-90% της αντοχής δοκιμίων της ίδιας ηλικίας και σύνθεσης, τα οποία συμπυκνώνονται και διατηρούνται στο εργαστήριο. Δηλαδή, **η μέση αντοχή του σκυροδέματος στο έργο είναι έως και 15% μικρότερη από την αντοχή εργαστηριακών δοκιμίων από το ίδιο υλικό.**

2.1.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι κανονισμοί ορίζουν τη **συμβατική αντοχή** σαν αρχή για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος, δηλαδή αυτή που εκτιμάται με δοκίμια τυποποιημένης μορφής και διαστάσεων, τα οποία παρασκευάζονται από το νωπό σκυρόδεμα λίγο πριν τη διάστρωσή του, συντηρούνται με καθορισμένο τρόπο και δοκιμάζονται σε θλίψη σε ορισμένη ηλικία με αυστηρά τυποποιημένο τρόπο.

Ως συμβατικά δοκίμια ορίζονται από τους περισσότερους Κανονισμούς ο κύλινδρος ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm και ο κύβος πλευράς 150mm. Το κυλινδρικό δοκίμιο προτιμάται για δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό από διάρρηξη και για τη μέτρηση της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων ή του Μέτρου Ελαστικότητας και δίνει αποτελέσματα πλησιέστερα στην πραγματική μονοαξονική αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Τα μειονεκτήματα του είναι η μικρή επιφάνεια διατομής του, που είναι ευαίσθητη σε συγκεντρώσεις σκύρων, οδηγώντας σε μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων δοκιμής, και κυρίως η απαίτηση καπελώματος της πάνω επιφάνειας του πριν τη δοκιμή, με τσιμεντοκονία ή λιωμένο θειάφι, για τη δημιουργία ομαλής και επίπεδης επιφάνειας για την εφαρμογή του φορτίου θλίψης. Αντίθετα στα κυβικά δοκίμια η θλίψη εφαρμόζεται σε δύο απέναντι πλευρές που σκυροδετούνται σε επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας, επομένως είναι από κατασκευής ομαλές, επίπεδες, παράλληλες και δεν χρειάζεται καπέλωμα. Επιπλέον ο κύβος των 150mm είναι πιο εύχρηστος και οικονομικός λόγω ότι έχει μικρότερο όγκο και βάρος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συχνότερα.

Επειδή η μετατροπή της αντοχής από μία μορφή δοκιμίου σε άλλη είναι εντελώς εμπειρική, πρέπει για τους ελέγχους συμμόρφωσης ενός έργου, να χρησιμοποιούνται δοκίμια με την ίδια μορφή και διαστάσεις όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη σύνθεσης, ώστε να αποφεύγεται η μετατροπή αντοχής από μία μορφή δοκιμίου σε άλλη, για την κατάταξη του σκυροδέματος σε κάποια κατηγορία.

2.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα από τη φύση του είναι ένα ανομοιογενές υλικό. Αυτή η ανομοιογένεια οφείλεται σε μικρές διαφορές στη ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μείγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, αναμεικτήρα, κ.λ.π.) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση της κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή

εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, κορυφή ή βάση ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος, κ.λ.π.). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής, η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ένα σημείο της κατασκευής f_c , θεωρείται ως τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλαδή από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο, f_{cm} , τυπική απόκλιση, s , κ.λ.π.

Για την ασφάλεια μιας κατασκευής παίζουν καθοριστικό ρόλο τα αδύνατα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_{cm} , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη **χαρακτηριστική αντοχή**, f_{ck} . Γενικώς αποδεκτή σήμερα σύμβαση, ως χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος. Δηλαδή αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το $\rho=5\%$ των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από τη χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95% θα ήταν πάνω από αυτήν. Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την Κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή f_{cm} και τυπική απόκλιση s , είναι:

$$f_{ck} \approx f_{cm} - 1,645s \quad (2.1)$$

όπου ο συντελεστής $-1,645$ αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%.

2.1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥΣ

Ο Ευρωκώδικας 2 ορίζει κατηγορίες σκυροδέματος με βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλίνδρου f_{ck} . Οι κατηγορίες σκυροδέματος, ανάλογα με τη χαρακτηριστική τιμή της συμβατικής θλιπτικής αντοχής σε MPa κυλίνδρου διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm ή κύβου πλευράς 150mm είναι : C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105. Δηλαδή το σκυρόδεμα C16/20 (όπου το γράμμα C προέρχεται από το Concrete δηλώνοντας το είδος του υλικού και οι δύο δείκτες, που αναφέρονται στην κυλινδρική και κυβική αντοχή του σκυροδέματος, $C_{f_{ck,cyl}}/f_{ck,cube}$) έχει χαρακτηριστική τιμή συμβατικής αντοχής, $f_{ck,cyl}$ 16MPa και $f_{ck,cube}$ 20MPa.

Η χρήση δύο συμβατικών αντοχών για το χαρακτηρισμό της κατηγορίας σκυροδέματος δίνει τη δυνατότητα επιλογής είτε κυλινδρικών συμβατικών δοκιμίων ή κυβικών 150mm για την εργαστηριακή μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος. Εκτενέστερα, κατά πόσον ένα σκυρόδεμα ανήκει ή όχι στην κατηγορία που προδιαγράφηκε, γίνεται εργαστηριακός έλεγχος από εκείνον που είναι υπεύθυνος για τη μελέτη σύνθεσης, ο οποίος έλεγχος πρέπει να γίνεται με τον τύπο συμβατικών δοκιμίων στον οποίο στηρίχθηκε η μελέτη σύνθεσης. Για το έτοιμο σκυρόδεμα πρέπει να προδιαγράφεται όχι μόνον η κατηγορία σκυροδέματος αλλά και ο τύπος συμβατικού δοκιμίου, κυλινδρικό ή κυβικό, με τον οποίο θα ελεγχθεί η ποιότητα του σκυροδέματος. Πρέπει να αποφεύγεται για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος να γίνονται εργαστηριακοί έλεγχοι σε δοκίμια του ενός συμβατικού τύπου και να ελέγχεται η συμμόρφωση ή όχι με βάση τη χαρακτηριστική αντοχή για τον άλλο τύπο συμβατικού δοκιμίου, μετά από μετατροπής της αντοχής από τον ένα τύπο δοκιμίου στον άλλο.

Η κατηγορία C12/15 επιτρέπεται μόνο για μικρά έργα, χωρίς απαιτήσεις αντισεισμικότητας. Ενώ, η κατηγορία C16/20 επιτρέπεται συνήθως για κτίρια με αυξημένες απαιτήσεις αντισεισμικότητας, με τρεις το πολύ ορόφους.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 σε κτίρια Κατηγορίας Πλαστιμότητας Μέσης (ΚΠ Μ) επιτρέπεται η κατηγορία από C16/20 και πάνω και για Κατηγορία Πλαστιμότητας Υψηλή (ΚΠ Υ) από C20/25 και πάνω.

2.1.5 ΜΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κατά τον Ευρωκώδικα 2, η μέση αντοχή σκυροδέματος, f_{cm} , λαμβάνεται ίση με τη χαρακτηριστική αντοχή του κυλίνδρου συν 8MPa :

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Οι Εξ. (2.1) και (2.2) δείχνουν ότι η τυπική απόκλιση s της κυλινδρικής αντοχής λαμβάνεται ίση με 5MPa. Η τιμή αυτή φαίνεται όντως να ανταποκρίνεται στη φυσική διασπορά της αντοχής του σκυροδέματος.

2.1.6 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι μικρή. Γι' αυτό το σκυρόδεμα στις κατασκευές είναι συνήθως ρηγματωμένο όπου τα φορτία λειτουργίας ή η παρεμπόδιση της συστολής του σκυροδέματος λόγω ξήρανσης ή θερμοκρασιακών μεταβολών προκαλούν εφελκυστικές τάσεις. Μας ενδιαφέρει μερικές φορές (όπως π.χ. για τον υπολογισμό του φορτίου που προκαλεί τη ρηγμάτωση) να ξέρουμε το μέγεθος της αντοχής του σε εφελκυσμό, παρ' όλο που δεν εμπιστευόμαστε τη μικρή εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και αναθέτουμε την ανάληψη του συνόλου των εφελκυστικών δυνάμεων στον οπλισμό.

Πειραματικά είναι δύσκολη η άμεση μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, γιατί απαιτείται ή η χρήση δοκιμίων ειδικής μορφής με ειδικές αρπάγες εφαρμογής της εφελκυστικής δύναμης, ή πρισματικά δοκίμια κολλημένα σε χαλύβδινες πλάκες εφαρμογής της δύναμης. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, η αξονική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος δίνεται από τη σχέση :

$$f_{ct} = 4 \cdot F_u / (d^2 \cdot \pi), \quad F_u = \text{φορτίο θραύσης}$$

η τιμή της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού f_{ctd} ορίζεται από τη σχέση:

$$f_{ctd} = a_{ct} \cdot \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c}$$

όπου γ_c = μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα

a_{ct} = συντελεστής αντίστοιχος του a_{cc} που λαμβάνει υπόψη τις μακροχρόνιες επιδράσεις στην αντοχή σε εφελκυσμό και δυσμενείς επιρροές από τον τρόπο επιβολής του φορτίου. Η τιμή του a_{ct} προς χρήση σε μία χώρα παρατίθεται στο Εθνικό Προσάρτημα, $a_{ct} = 1$.

και η **μέση** τιμή της εφελκυστικής αντοχής f_{ctm} σχετίζεται με την χαρακτηριστική κυλινδρική αντοχή f_{ck} μέσω της προσεγγιστικής σχέσης :

$$f_{ctm} \approx \frac{F}{A_c} \approx 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \text{ [N/mm}^2\text{=MPa]} \quad (2.3)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}, \quad \text{για } C \leq 50/60$$

Λόγω της μεγάλης διασποράς των εφελκυστικών αντοχών ως προς τη μέση τιμή f_{ctm} της Εξ. (2.3), οι κανονισμοί δίνουν κατώτερη χαρακτηριστική εφελκυστική τιμή με πιθανότητα υποσκέλισης 5% , η οποία είναι $f_{ctk0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm}$ και ανώτερη χαρακτηριστική εφελκυστική τιμή με πιθανότητα υπερσκέλισης 95% , η οποία είναι $f_{ctk0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm}$. Ο Πιν. (2.1) δίνει τις τιμές των f_{cm} , f_{ctm} , $f_{ctk0,05}$ και $f_{ctk0,95}$ για τις διάφορες κατηγορίες σκυροδέματος του Ευρωκώδικα 2.

2.1.7 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο εργαστήριο που προσδιορίζεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος έχει απόκλιση από την αντίστοιχη πραγματική του αντοχή στο φορέα. Αυτό αιτιολογείται από:

- Τις μακροχρόνιες επιδράσεις και του τρόπου επιβολής του φορτίου
- Τις διαφορετικές συνθήκες προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής στο εργαστήριο, αξονική θλιπτική αντοχή.

Για τους λόγους αυτούς η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού ορίζεται από τη σχέση :

$$f_{cd} = a_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

όπου γ_c = μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα

a_{cc} = συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τις μακροχρόνιες επιδράσεις στη θλιπτική αντοχή, όπως επίσης και τον τρόπο επιβολής του φορτίου.

Ο ΕΚΩΣ και το Εθνικό Προσάρτημα της Γερμανικής Επιτροπής σκυροδέματος για την εφαρμογή του EC2 προβλέπουν μείωση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με συντελεστή $a_{cc} = 0,85$. Ο EC2 δε δέχεται μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος θέτοντας $a_{cc} = 1,00$.

2.1.8 ΣΧΕΣΗ σ - ϵ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Οι εντάσεις που προκαλούνται από τη δράση ενός εντατικού μεγέθους σε μία διατομή, δεν είναι δυνατόν άμεσα να μετρηθούν, αλλά έμμεσα από τις παραμορφώσεις που θα προκληθούν. Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής τάσης από την παραμόρφωση πρέπει να γνωρίζουμε τον νόμο που συνδέει τα δύο μεγέθη. Ο Hooke (1678) όρισε το νόμο της Ελαστικότητας :

$$\sigma_c = E_c \cdot \epsilon_c$$

που προϋποθέτει ότι το μέτρο Ελαστικότητας E_c παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε τάση.

Για το σκυρόδεμα ο νόμος του Hooke ισχύει μόνο για μικρές καταπονήσεις, για τάσεις μέχρι και 40% της αντίστοιχης θλιπτικής, όριο που αντιστοιχεί σε καταπόνηση από φορτία λειτουργικότητας. Για αυτή τη τάση $\sigma_c = 0,4 \cdot f_c$ λαμβάνεται περίπου αναλογική και ελαστική παραμόρφωση με σταθερό μέτρο ελαστικότητας. (βλ. σχήμα 2.1) Για $\sigma_c > 0,4 f_c$ εμφανίζονται και πλαστικές παραμορφώσεις εκτός των ελαστικών, που η επίδρασή τους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην κατανομή των τάσεων. Το μέτρο Ελαστικότητας εξαρτάται από την κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος, καθώς επίσης και από τα αδρανή του σκυροδέματος.

Η παραμόρφωση ϵ του σκυροδέματος που προκαλείται από ορισμένη θλιπτική τάση σ είναι συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή η παραμόρφωση του σκυροδέματος αυξάνεται με το χρόνο για σταθερή τάση. Το φαινόμενο αυτό που λέγεται ερπυσμός και θα μας απασχολήσει σε άλλη παράγραφο, επηρεάζει πάρα πολύ τις παραμορφώσεις των κατασκευών (βέλη κάμψης κ.λ.π.) αλλά έχει γενικώς μικρή επιρροή στην αντοχή τους. Εδώ θα αναλύσουμε τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων για βραχυχρόνια φόρτιση, που είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το χρόνο.

Η μορφή του διαγράμματος σ - ϵ για φόρτιση μικρής διάρκειας φαίνεται στο Σχ. (2.1). Στο σημείο όπου η τάση είναι μέγιστη και ίση με τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή f_c , το

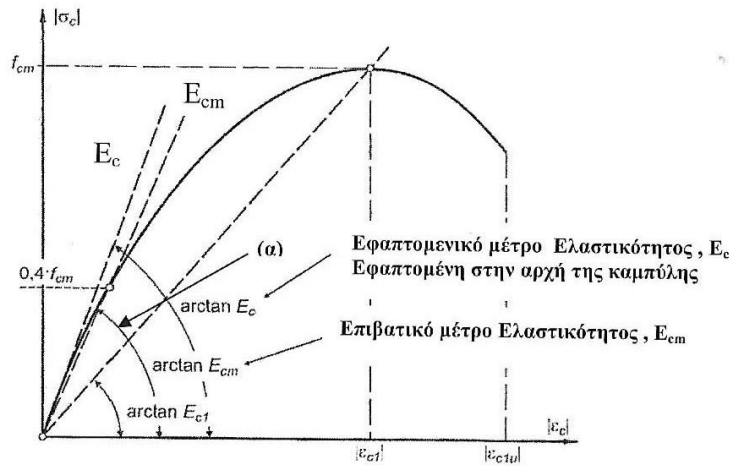
διάγραμμα έχει οριζόντια εφαπτομένη. Ο κατερχόμενος κλάδος του διαγράμματος μετά τη μέγιστη τάση ενδείκνυται για εφαρμογή μόνον όταν επιβάλλεται στο υλικό συνεχώς αυξανόμενη παραμόρφωση αντί συνεχούς αυξανόμενης τάσης, οπότε το σκυρόδεμα σπάει στην κορυφή του διαγράμματος σ - ϵ . Η τιμή της τελικής παραμόρφωσης αστοχίας, ϵ_{cu} , με την κατάλληλη φόρτιση μπορεί να φθάσει μέχρι και το 10%.

Στη μέγιστη τάση η τιμή της παραμόρφωσης, ϵ_{c1} , συνήθως ποικίλει μεταξύ 0,2% και 0,25% και στη θραύση η τιμή της παραμόρφωσης ϵ_{c2} ποικίλλει μεταξύ 0,35% και 0,7% . Στον Πιν. (2.1) δίνεται η τιμή της ϵ_{c1} και ϵ_{c2} , σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, για τις διάφορες κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος.

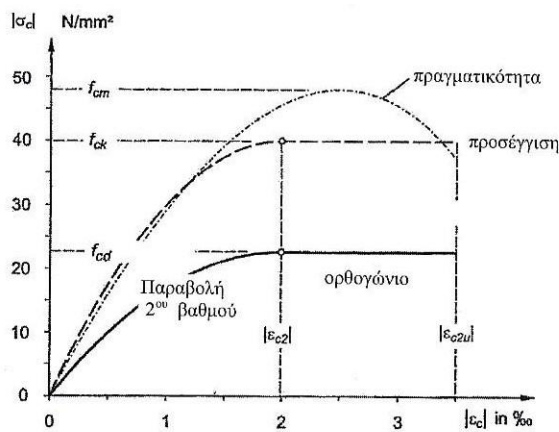
Πίνακας 2.1 Ιδιότητες σκυροδέματος κατά Ευρωκώδικα 2

Κατηγορίες Σκυροδέματος														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

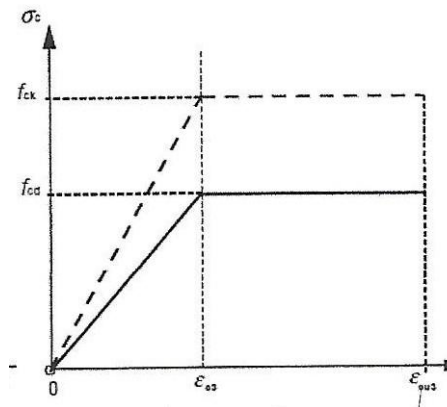
Πίνακας 2.1 Ιδιότητες σκυροδέματος κατά τον Ευρωκώδικα 2. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 2.1 Επιβατικό Μέτρο Ελαστικότητας E_{cm} , διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.5) & (2.6). (Πηγή: "ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ κατά Ευρωκώδικα E C 2, ΕΚΩΣ", Θεοφάνης Α. Γεωργόπουλος)



Σχήμα 2.2 Παραβολικό ορθογωνικό διάγραμμα $\sigma_c - \epsilon_c$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη για τη διαστασιολόγηση κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.7) & (2.8). (Πηγή: "ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ κατά Ευρωκώδικα E C 2, ΕΚΩΣ", Θεοφάνης Α. Γεωργόπουλος)



Σχήμα 2.3 Απλοποιημένο διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη για τη διαστασιολόγηση κατά τον Ευρωκώδικα 2, Εξ. (2.9) & (2.10). (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 οι μέσες τιμές του Επιβατικού Μέτρου Ελαστικότητας, E_{cm} , στα 40% της αντοχής f_c , που αναφέρονται επίσης στον Πίν. (2.1), δίνονται από τη σχέση :

$$E_{cm} = 11000(f_{ck} + 8)^{0.3} \quad (2.4)$$

όπου E_{cm} και f_{ck} είναι σε MPa

$f_{ck}+8$ θεωρείται ότι είναι η μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής f_{cm} , (δες εξίσωση 2.2).

Η διασπορά των τιμών του Επιβατικού Μέτρου Ελαστικότητας γύρω από τη μέση τιμή E_{cm} είναι τέτοια ώστε το 90% των τιμών να είναι μεταξύ $0,7E_{cm}$ και $1,3E_{cm}$. Το αρχικό εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας είναι κατά 5% μεγαλύτερο από το επιβατικό στα 40% της αντοχής, δηλαδή η μέση τιμή του ισούται με $1.05 E_{cm}$. Η γωνία α μεταβάλλεται συνεχώς, επομένως το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, E_c , εξαρτάται από την θλιπτική τάση. Το επιβατικό μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση της ευθείας που διέρχεται από την προβολή της τιμής στα 40% της αντοχής του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων με $\tan \alpha = E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c}$.

Κατά τον Ευρωκώδικα 2 η σχέση σ - ε του Σχ. (2.1) μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από την παρακάτω εξίσωση :

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \frac{k - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}}{1 + (k-2)\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}} \quad (2.5)$$

$$\text{όπου } k = 1.05E_{cm} \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad (2.6)$$

Για $k \approx 2$, η Εξ. (2.6) είναι κατά προσέγγιση παραβολή με οριζόντια εφαπτόμενη στο σημείο (f_c, ε_{c1}) και αρχική κλίση $1.05E_{cm}$. Στον Πίν. (2.1) δίνεται η Εξ. (2.5) που ισχύει μέχρι παραμόρφωση ίση με τη συμβατική παραμόρφωση θραύσης ε_{cu1} .

Στη διαστασιολόγηση μελών οπλισμένου σκυροδέματος και στους υπολογισμούς αντοχής γίνεται χρήση **ιδεατών διαγραμμάτων σ - ε** μορφής ανεξάρτητης της τιμής της αντοχής f_c . Στον Ευρωκώδικα 2 χρησιμοποιείται το παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα του Σχ.(2.2). Η υπολογιστική αντοχή είναι ίση με αf_{ck} , όπου ο συντελεστής α μπορεί να λαμβάνει υπόψη μειωτικές επιδράσεις στην αντοχή. Ο κατερχόμενος κλάδος έχει αντικατασταθεί με οριζόντιο. Η βράχυνση, ε_{c2} , έχει αντικαταστήσει την ε_{c1} και η ε_{cu2} την ε_{cu1} , οι τιμές των οποίων δίνονται στον Πίν. (2.1). Τα σκυροδέματα από C12/15 έως και C50/60 παρουσιάζουν το ίδιο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, έχουν "**συγγενική**" συμπεριφορά, με σταθερές οριακές βραχύνσεις στη μέγιστη τιμή :

$$\varepsilon_{cu2} = 0.0035 \quad (2.7)$$

Ενώ, η βράχυνση στο μέγιστο φορτίο όσο αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος τόσο μειώνεται, αγγίζοντας την τιμή :

$$\varepsilon_{c2} = 0.002 - 0.0026 \quad (2.8)$$

Ο Ευρωκώδικας 2 επιτρέπει τη χρήση ακόμα πιο απλοποιημένης μορφής του διαγράμματος σ - ε για τη διαστασιολόγηση, συγκεκριμένα το γραμμικό-ορθογωνικό του Σχ. (2.3), με παραμέτρους ε_{c3} και ε_{cu3} , οι τιμές των οποίων δίνονται επίσης στον Πιν. (2.1) και για κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος έως και C50/60 είναι σταθερές :

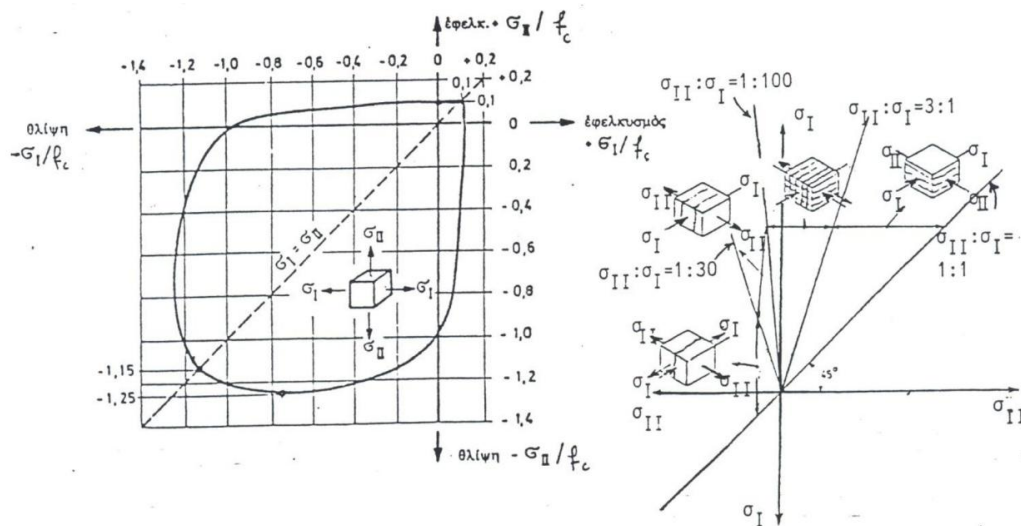
$$\varepsilon_{c3} = 0.00175 - 0.0023 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{cu3} = 0.0035 \quad (2.10)$$

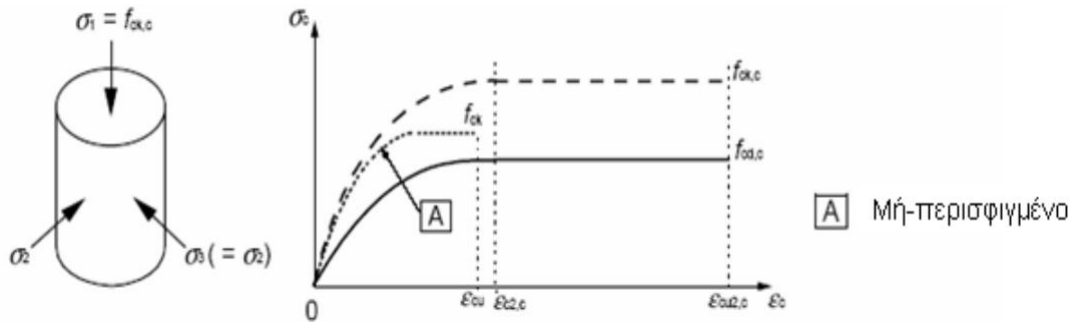
2.1.9 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΠΟΛΥΑΞΟΝΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ

Το σκυρόδεμα συχνά καταπονείται από συνδυασμό ορθών και διατμητικών τάσεων. Σύμφωνα με την Αντοχή των Υλικών, ο συνδυασμός αυτός των τάσεων μπορεί να μετασχηματιστεί σε **τρεις κύριες τάσεις**, που δρουν σε τρεις ορθογωνικές **κύριες** διευθύνσεις. Στα επίπεδα των κύριων τάσεων οι διατμητικές τάσεις είναι μηδέν.

Στην περίπτωση που η μία από τις τρεις κύριες τάσεις είναι μηδέν, τότε έχουμε **διαξονική** εντατική κατάσταση, όπως π.χ. σε πλάκες που κάμπτονται σε δύο διευθύνσεις, σε δοκούς που καταπονούνται σε κάμψη και διάτμηση, σε κελύφη, κ.λ.π. Στο Σχ. (2.4) φαίνεται η "περιβάλλουσα αντοχής" του σκυροδέματος υπό διαξονικές κύριες τάσεις σ_I και σ_{II} με το ίδιο ή διαφορετικό πρόσημο. Η μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής λόγω της ταυτόχρονης δράσης θλιπτικής ορθής τάσης στην κάθετη διεύθυνση, οφείλεται στον εγκάρσιο περιορισμό των μικρορωγμών του σκυροδέματος, που επιβραδύνει την εξάπλωση και τον σχηματισμό τους. Το Σχ. (2.4) δείχνει τον τρόπο θραύσης που επηρεάζεται από το λόγο και τα πρόσημα των δύο κύριων τάσεων. Γενικά, όταν και οι δύο τάσεις είναι θλιπτικές η θραύση συνοδεύεται από πλήθος μικρορωγμών κάθετων στη τρίτη αφόρτιστη διεύθυνση. Αν μία τουλάχιστον από τις δύο κύριες τάσεις είναι εφελκυστική, τότε η θραύση παίρνει γενικά της μορφή μίας μεγάλης ρωγμής, κάθετα στην αλγεβρικά μεγαλύτερη, δηλαδή την εφελκυστική από τις δύο τάσεις.



Σχήμα 2.4 Περιβάλλουσα αντοχή σκυροδέματος σε διαξονική ένταση. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 2.5 Περισφιγμένο σκυρόδεμα σε τριαξονική ένταση και επιρροή περίσφιγξης μονοαξονικό διάγραμμα $\sigma - \epsilon$. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Γ", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Κάποιες φορές το σκυρόδεμα καταπονείται σε **τριαξονική** θλίψη. Πειραματικά έχει μελετηθεί κατά κύριο λόγο η περίπτωση που η μία από τις κύριες τάσεις (σ_1 , δεξ σχήμα 2.5) είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις άλλες και οι άλλες δύο τάσεις είναι ίσες μεταξύ τους (πρβλ. με την εντατική κατάσταση υποστυλωμάτων με πυκνούς συνδετήρες σε κεντρική θλίψη). Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν πως η αντοχή στη διεύθυνση της μεγαλύτερης από τις τρεις τάσεις είναι :

$$f_{c,c} = K f_c \quad (2.11)$$

όπου ο συντελεστής K ισούται κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 2010 της fib :

$$K = 1 + 3.5 \left(\frac{p}{f_c}\right)^{3/4} \quad (2.12)$$

Κατά τον Ευρωκώδικα 2, η ανωτέρω μη-γραμμική σχέση μπορεί να προσεγγισθεί με δύο ευθείες ως εξής :

$$\beta \approx \min\left(1 + 5 \frac{p}{f_c}, 1.125 + 2.5 \frac{p}{f_c}\right) \quad (2.13)$$

Οι Εξ. (2.12) και (2.13) δείχνουν πως ο περιορισμός της εγκάρσιας διόγκωσης του σκυροδέματος από την πλευρική πίεση p αυξάνει σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του. Η θραύση δημιουργείται με τον ίδιο μηχανισμό όπως και σε μονοαξονική θλίψη, δηλαδή με πλήθος μικρορωγμών παράλληλων στην μεγαλύτερη κύρια τάση θλίψης σ_1 . Η πλευρική πίεση p αυξάνει την αντοχή, εμποδίζοντας την πλευρική διόγκωση που συνοδεύει τη θραύση και περιορίζοντας την εξάπλωση των εσωτερικών μικρορωγμών κατά τη διεύθυνση της σ_1 .

Το σύνολο του διαγράμματος σ - ϵ του σκυροδέματος επηρεάζεται από την εγκάρσια θλίψη, η οποία αυξάνει όχι μόνο τις τεταγμένες του σ αλλά και τις τετμημένες ϵ . Τοιουτοτρόπως κατά τον Πρότυπο Κανονισμό 2010 της fib η παραμόρφωση στην κορυφή του διαγράμματος αυξάνεται με την εγκάρσια θλίψη p από ϵ_{c2} σε :

$$\epsilon_{c2,c} = \epsilon_{c2}(1 + 5K) \quad (2.14)$$

όπου το K δίνεται από την Εξ. (2.12). Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 είναι :

$$\varepsilon_{c2,c} \approx \beta^2 \varepsilon_{c2} \quad (2.15)$$

όπου το β δίνεται από την Εξ. (2.13). Έτσι, επεκτείνεται όλος περίπου ο παραβολικός ανερχόμενος κλάδος προς τα πάνω και δεξιά. Το ίδιο συμβαίνει και με τον φθιτό κλάδο μετά την κορυφή και μέχρι την τελική αστοχία. Ο φθιτός κλάδος είναι περίπου ευθύγραμμος μεταξύ της κορυφής και του σημείου όπου η τάση έχει μειωθεί στο $0,85f_c$ *, και όπου κρίνεται ότι συμβαίνει η αστοχία. Η παραμόρφωση στο σημείο αυτό συμβολίζεται με ε_{cu} και ισούται κατά τον Ευρωκώδικα 2 με :

$$\varepsilon_{cu,2,c} = \varepsilon_{cu,2} + 0.2 \frac{p}{f_c} \quad (2.16)$$

2.1.10 ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Για τα θλιβόμενα στοιχεία σκυροδέματος, όπως είναι τα υποστυλώματα, στην πράξη είναι σημαντικότερη η βελτίωση της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη μέσω της τριαξονικότητας της εντατικής κατάστασης. Στα στοιχεία αυτά η εγκάρσια θλίψη και τα αποτελέσματα της λόγω της δημιουργίας τριαξονικής εντατικής κατάστασης, πραγματοποιούνται μέσω της περίσφιγξης του σκυροδέματος από το πλέγμα των εγκαρσίων (στον άξονα του υποστυλώματος) και των διαμήκων ράβδων. Για το λόγο αυτό οι εγκάρσιοι οπλισμοί χρειάζεται να έχουν τη μορφή πυκνών κλειστών "συνδετήρων", κατά προτίμηση κυκλικών, ή ακόμα καλύτερα ελικοειδούς σπείρας. Οι εγκάρσιες, λόγω Poisson, παραμορφώσεις του σκυροδέματος, που αυξάνονται ταχύτερα όσο το σκυρόδεμα πλησιάζει την αστοχία (ο λόγος Poisson αυξάνεται από 0,15 σε τιμές πάνω από το 0,5, λόγω εντονότερης εσωτερικής μικρορηγμάτωσης παράλληλα στη μεγαλύτερη θλιπτική τάση σ_1), αναγκάζουν τους κλειστούς συνδετήρες να μηκυνθούν, αναπτύσσοντας εφελκυστικές τάσεις. Η ενεργοποίηση των συνδετήρων γίνεται μέσω θλιπτικών δυνάμεων επαφής από το σκυρόδεμα προς αυτούς και αντιστρόφως, δράση = αντίδραση. Αυτές οι θλιπτικές δυνάμεις διαρρέονται στο σκυρόδεμα σαν εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις $\sigma_{II} = \sigma_{III} = p$, το μέγεθος των οποίων μπορεί να συνδεθεί με αυτό των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στους συνδετήρες σ_s , ως εξής :

Αρχικά θεωρούμε κλειστούς κυκλικούς ή σπειροειδούς συνδετήρες με ακτίνα R , διατομή A_{sw} και απόσταση από συνδετήρα σε συνδετήρα ή βήμα της ελικοειδούς σπείρας s . Η ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα στοιχειώδες μήκος $dI = R \cdot d\theta$ της περιμέτρου του συνδετήρα, δίνει με προβολή στη διεύθυνση της ακτίνας :

$$\sigma_s A_{sw} d\theta = (ps) dI \dots \text{δηλ.}, \dots p = \frac{A_{sw} \sigma_s}{sR}$$

Η διαρροή του συνδετήρα $\sigma_s = f_y$, καθορίζει τη μέγιστη τιμή της εγκάρσιας θλίψης p . Για αυτή τη μέγιστη τιμή είναι λοιπόν :

$$\frac{p}{f_c} = 0.5 \frac{(2\pi R) A_{sw}}{\pi R^2 s} \cdot \frac{f_y}{f_c} = 0.5 \rho_w \frac{f_y}{f_c} = 0.5 \omega_w \quad (2.17)$$

όπου $\rho_w =$ το "ογκομετρικό ποσοστό" συνδετήρων, δηλαδή ο λόγος το όγκου των συνδετήρων (διατομή συνδετήρα επί διάμετρο) προς τον αντίστοιχο όγκο του περισφιγμένου σκυροδέματος (επιφάνεια σκυροδέματος μέσα από του συνδετήρες επί απόσταση συνδετήρων).

$\omega_w =$ το "μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό" συνδετήρων (ποσοστό όγκου σκυροδέματος που είναι μηχανικά, δηλαδή από απόψεως αντοχής, ισοδύναμο με το χάλυβα των συνδετήρων).

Σε στοιχεία με ορθογωνική διατομή τοποθετούνται συνήθως κλειστοί ορθογωνικοί συνδετήρες. Αν σε ορθογωνική διατομή με διαστάσεις περισφιγμένου σκυροδέματος b_o και h_o υπάρχουν n_b σκέλη συνδετήρων κάθετα στην πλευρά b και n_h σκέλη κάθετα στην πλευρά h , τότε η ανάπτυξη τάσης $\sigma_s = f_y$ στα n_b σκέλη τα κάθετα στην πλευρά b ισοδυναμεί με συνολική δύναμη $n_b A_{sw} f_y$, η οποία μεταφράζεται σε περίπου ομοιόμορφη τάση θλίψης στο περισφιγμένο σκυροδέμα με διεύθυνση κάθετη στην πλευρά b και μέγεθος $\sigma_{II} = n_b A_{sw} f_y / s b_o = \rho_b f_y$, όπου $\rho_b = n_b A_{sw} / s b_o$ το γεωμετρικό ποσοστό συνδετήρων σε τομή παράλληλη στην πλευρά b . Ομοίως αναπτύσσεται θλιπτική τάση $\sigma_{III} = n_h A_{sw} f_y / s h_o = \rho_h f_y$ κάθετα στην πλευρά h , όπου $\rho_h = n_h A_{sw} / s h_o$ το γεωμετρικό ποσοστό συνδετήρων σε τομή παράλληλη στην πλευρά μήκους h . Τα ποσοστά ρ_b και ρ_h πρέπει να έχουν παρόμοιο μέγεθος, οπότε οι σ_{II} και σ_{III} θα είναι παρόμοιες και μπορούμε να θεωρήσουμε ομοιόμορφη εγκάρσια θλίψη στο εσωτερικό του σκυροδέματος ίση με:

$$p \approx 0.5(\sigma_{II} + \sigma_{III}) \approx 0.5(\rho_b + \rho_h) f_y$$

οπότε:

$$\frac{p}{f_c} \approx 0.5(\rho_b + \rho_h) \frac{f_y}{f_c} \equiv 0.5\omega_w \quad (2.18)$$

όπου $\rho_b + \rho_h = (n_b/b_o + n_h/h_o) A_{sw}/s$ θεωρείται ως το ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων.

Στο σκυροδέμα ασκούνται από τους ορθογωνικούς συνδετήρες συγκεντρωμένες δυνάμεις εγκιβωτισμού στις γωνίες τους, όπου οι συνδετήρες αγκαλιάζουν κατά κανόνα μία διαμήκη ράβδο. Αυτές οι συγκεντρωμένες δυνάμεις έχουν διεύθυνση κάθετη στην περίμετρο και διασκορπίζονται προς το εσωτερικό περίπου ανάμεσα σε δύο παραβολές που ορίζονται με βάσεις μήκους a τις διαδοχικές αποστάσεις των γωνιών συνδετήρων πάνω στην περίμετρο και με εφαπτόμενες στις θέσεις των γωνιών αυτών υπό 45° ως προς την περίμετρο (δες Σχήμα 2.6). Το τμήμα μεταξύ μίας τέτοιας παραβολής και του συνδετήρα δεν είναι περισφιγμένο. Για το λόγο ότι οι κατά 45° εφαπτόμενες στα άκρα της βάσης της παραβολής τέμνονται σε απόσταση από αυτήν $a/2$ και η κορυφή της παραβολής βρίσκεται στη μεσαπόσταση του ανωτέρω σημείου τομής και του συνδετήρα, δηλαδή σε απόσταση από το συνδετήρα $a/4$, η επιφάνεια του μη-περισφιγμένου τμήματος μεταξύ παραβολής και συνδετήρα ισούται με $2/3 \times (\text{βάση}) \times (\text{ύψος}) = a^2/6$. Ιδιαίτερα, για το λόγο ότι $a = u_o/n$, όπου $u_o = 2(b_o + h_o)$ η περίμετρος του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής και n ο συνολικός αριθμός ράβδων σε γωνία συνδετήρα κατά μήκος της περιμέτρου, το ποσοστό του εντός του συνδετήρα τμήματος της διατομής που περισφίγγεται ισούται με :

$$\alpha_n = 1 - \frac{n \frac{a^2}{6}}{b_o h_o} = 1 - \frac{2(b_o + h_o)^2}{3 b_o h_o n} \quad (2.19)$$

Για τετραγωνική διατομή με $b_o = h_o$ είναι :

$$\alpha_n = 1 - \frac{8}{3n} \quad (2.20)$$

Επομένως για διατομές με $n=4$ γωνιακές ράβδου είναι $\alpha_n=1/3$, ενώ για $n=8$ είναι $\alpha_n=2/3$.

Για κυκλικούς ή σπειροειδείς συνδετήρες, όλος ο πυρήνας είναι περισφιγμένος (δες Σχήμα 2.7), άρα :

$$\alpha_n = 1$$

Τα ανωτέρω ισχύουν μέσα στο επίπεδο του συνδετήρα. Σε μηκοτομή του στοιχείου, δηλαδή του υποστυλώματος, οι συνδετήρες ασκούν συγκεντρωμένες δυνάμεις περίσφιγξης μέσα στο επίπεδό τους, οι οποίες διασκορπίζονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος πάλι μέσα σε παραβολές με βάση την απόσταση s διαδοχικών συνδετήρων και με εφαπτόμενες στα άκρα της βάσης τους που σχηματίζουν γωνία περίπου 45° ως προς τα επίπεδα των συνδετήρων. Οι κορυφές αυτών των παραβολών βρίσκονται στις διατομές του υποστυλώματος στη μεσαπόσταση των συνδετήρων και απέχουν κατά $1/2 \times s/2 = s/4$ από την επιφάνεια του περισφιγμένου πυρήνα που ορίζεται από τους συνδετήρες. Οι διατομές αυτές είναι οι λιγότερο περισφιγμένες. Σε αυτές το περισφιγμένο τμήμα του πυρήνα ισούται με το εξής κλάσμα της διατομής του πυρήνα :

$$\alpha_s = \frac{(b_o - 2\frac{s}{4})(h_o - 2\frac{s}{4})}{b_o h_o} = \left(1 - \frac{s}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_o}\right) \quad (2.22)$$

Συντηρητικά το ελάχιστο ποσοστό του πυρήνα του στοιχείου, δηλαδή του υποστυλώματος, μέσα από τους συνδετήρες το οποίο είναι περισφιγμένο λαμβάνεται ίσο με :

$$\alpha = \alpha_s \alpha_n \quad (2.23)$$

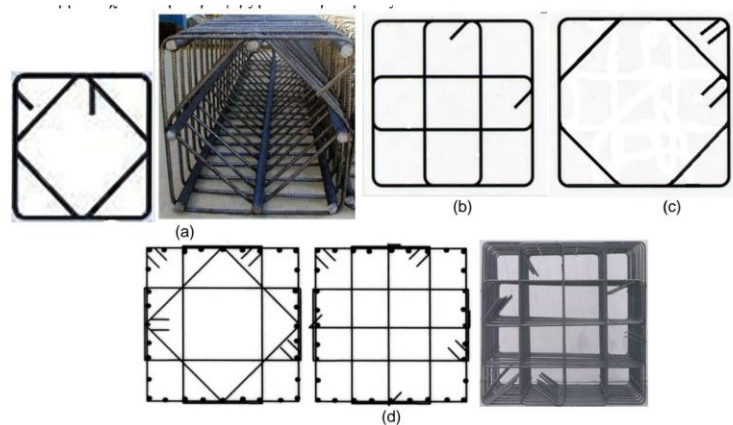
όπου α_s και α_n λαμβάνονται αντίστοιχα από την Εξ. (2.23) ανεξαρτήτως διατομής (για κυκλική διατομή λαμβάνεται απλώς $b_o = h_o = D$, όπου D η διάμετρος του συνδετήρα και ειδικά για σπειροειδή οπλισμό λαμβάνεται $\alpha_s = 1 - s/2D$) και τις Εξ. (2.19) ή (2.20) για ορθογωνικές ή τετραγωνικές διατομές ή την Εξ. (2.21) για κυκλικούς συνδετήρες.

Ο συντελεστής α της Εξ. (2.23) ονομάζεται "συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης" και το α_w είναι το "ενεργό μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού". Ακριβώς αυτό το "ενεργό" ποσοστό χρησιμοποιείται στις Εξ. (2.17) και (2.18) αντί του ω_w , για τον υπολογισμό της λόγω περίσφιγξης εγκάρσιας θλιπτικής τάσης, p .

Ο σπειροειδής οπλισμός αυξάνει την αντοχή, αλλά κυρίως βελτιώνει την πλαστιμότητα του σκυροδέματος, επιτρέποντας του να διατηρήσει μέρος της φέρουσας ικανότητάς του μετά τη μέγιστη τάση (πλάστιμο υλικό). Οι ορθογωνικοί συνδετήρες δεν περισφίγγουν το σκυρόδεμα τόσο αποτελεσματικά όσο οι κυκλικοί ή ο σπειροειδής οπλισμός, γιατί υπό την πίεση της πλευρικής διόγκωσης του σκυροδέματος οι πλευρές τους κάμπτονται προς τα έξω και επομένως ασκούν στο σκυρόδεμα εγκάρσιες δυνάμεις περίσφιγξης μόνο στις γωνίες τους.

Συμπερασματικά, πιο αποτελεσματικοί για τη μέσω περίσφιγξης αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας του σκυροδέματος σε θλίψη, είναι οι κλειστοί κυκλικοί συνδετήρες ή ο

σπειροειδής οπλισμός. Οι ορθογωνικοί συνδετήρες προσφέρουν σημαντική περίσφιγξη του σκυροδέματος μόνον όταν είναι κλειστοί και πυκνοί και σχηματίζουν μαζί με τις διαμήκειες ράβδους, δηλαδή τις παράλληλες στον άξονα του μέλους, ένα κλωβό με αμετακίνητους κόμβους σε αποστάσεις πάνω στην περίμετρο της διατομής το πολύ 200mm για Κατηγορία Πλαστιμότητας Μέση (ΚΠ Μ) κατά τον Ευρωκώδικα 8 ή 150mm για Κατηγορία Πλαστιμότητας Υψηλή (ΚΠ Υ). Δηλαδή το πολύ κάθε 200mm ή 150mm κατά μήκος της περιμέτρου πρέπει να υπάρχει μία διαμήκης ράβδος σταθεροποιημένη εγκάρσια σε γωνία ή άγκιστρο συνδετήρα ή με δέσιμο δύο διαμήκων ράβδων σε απέναντι πλευρές της διατομής με "σιγμοειδή" οπλισμό μορφής S με άγκιστρα στα άκρα που αγκαλιάζουν τις διαμήκειες ράβδους ή με "πολύτμητους" συνδετήρες, όπως στο Σχ. (2.6). Έτσι, όχι μόνο σταθεροποιούνται οι πλευρές του συνδετήρα ώστε να μην κάμπτονται υπό την επίδραση της τάσης του σκυροδέματος για εγκάρσια διόγκωση, αλλά και αναγκάζονται οι διαμήκειες ράβδοι να συμμετάσχουν στην περίσφιγξη του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.6 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής με συγκράτηση σε γωνία συνδετήρα : a) μία ενδιάμεσης ράβδου ανά πλευρά, b) δύο ενδιάμεσων ράβδων με ενδιάμεσους ορθογωνικούς συνδετήρες, c) δύο ενδιάμεσων ράβδων με οκταγωνικό συνδετήρα, d) τριών ενδιάμεσων ράβδων με συνδυασμό ορθογωνικών και ρομβοειδών συνδετηρών ή σιγμοειδών ράβδων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

2.1.11 ΧΡΟΝΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα αποτελεί ζωντανό υλικό. Με την πάροδο του χρόνου, όχι μόνον αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος, αλλά επιπλέον οι παραμορφώσεις του μεταβάλλονται, παρόλο που οι τάσεις είναι σταθερές ή και μηδέν.

Οι χρόνιες παραμορφώσεις του σκυροδέματος χωρίζονται σε δύο είδη :

1. τη συστολή ξήρανσης, η οποία είναι ανεξάρτητη από την τάση του σκυροδέματος και
2. τον ερπυσμό, που εξαρτάται από την τάση και είναι μάλιστα περίπου ανάλογος με αυτήν.

2.1.12 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Κατά την ξήρανση του σκυροδέματος αποβάλλεται ένα μέρος του νερού, το οποίο είναι χημικά αδέσμευτο, με αποτέλεσμα τη **μείωση** του όγκου του. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως **συστολή ξηράνσεως**. Η συστολή ξήρανσης είναι ανεξάρτητη από την εξωτερικά επιβεβλημένη τάση και είναι ομοιόμορφη και προς τις τρεις διευθύνσεις, όπως ακριβώς και η

συστολή λόγω πτώσης της θερμοκρασίας. Οφείλεται στη βαθμιαία απομάκρυνση από τους πόρους του πηγματος μορίων νερού που δεν είναι χημικά συνδεδεμένα με το τσιμέντο.

Η συστολή ξηράνσεως μειώνεται με : 1) αύξηση του συνολικού όγκου των αδρανών και μείωση του όγκου του τσιμεντοπολτού, διότι μόνο ο τσιμεντοπολτός συστέλλεται, 2) αύξηση του πάχους των στοιχείων, καθώς η απομάκρυνση του νερού γίνεται πιο εύκολα και σύντομα όσο πιο λεπτό είναι το δομικό στοιχείο και 3) αύξηση της υγρασίας του περιβάλλοντος, επειδή έτσι μειώνεται η διαφορά πίεσης των υδρατμών, η οποία ωθεί τα μόρια του νερού από το εσωτερικό του σκυροδέματος προς το περιβάλλον.

Η τελική τιμή της συστολής ξηράνσεως $\epsilon_{cs\infty}$ σε χρόνο $t=\infty$ (πρακτικά είναι 70 χρόνια) μετά τη σκυροδέτηση δίνεται από τον Ευρωκώδικα 2, συναρτήσει του ισοδύναμου ή ιδεατού πάχους του στοιχείου, $h_0=2A/u$, όπου A και u είναι η επιφάνεια και η περίμετρος αντίστοιχα της διατομής του στοιχείου και της σχετικής υγρασίας RH του άμεσου περιβάλλοντος του. Συνήθως μας ενδιαφέρει η διαφορά της συστολής ξήρανσης μεταξύ δύο χρονικών στιγμών και όχι η τελική τιμή της συστολής ξήρανσης $\epsilon_{cs\infty}$, π.χ. από την έναρξη της ξήρανσης κατά το ξεκαλούπωμα μέχρι το τέλος της ζωής της κατασκευής. Στο παράρτημα Β του Ευρωκώδικα 2 δίνεται για το σκοπό αυτό, η συστολή ξήρανσης μεταξύ δύο χρονικών στιγμών, δηλαδή ηλικιών του σκυροδέματος από τη σκυροδέτηση, αρχική τιμή t_0 και τελική τιμή t , ως εξής :

$$E_{cs} = -1,45 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right] \frac{(t-t_0)}{(t-t_0)+0.04h_0^{3/2}} (2 + a_{ds1}) \exp \left(-a_{ds2} \frac{f_{cm}}{10} \right) \times 10^{-6} + 2.5(f_{ck} - 10)(1 - \exp(-0.2\sqrt{t})) \times 10^{-6} \quad (2.24)$$

Στην Εξ. (2.24) τα h_0 και $(t-t_0)$ είναι σε mm και ημέρες αντίστοιχα, αντίστοιχα, η μέση αντοχή 28 ημερών, f_{cm} , είναι σε MPa και υπολογίζεται σαν $f_{ck}+8$, και οι συντελεστές a_{ds1} , a_{ds2} εκφράζουν την ταχύτητα ανάπτυξης αντοχής του τσιμέντου. Για τσιμέντα κατηγορίας S, βραδείας ανάπτυξης της αντοχής, όπως τα ποζολανικά, τα a_{ds1} και a_{ds2} ισούνται με 3 και 0.13 αντίστοιχα, για τσιμέντα κατηγορίας R, ταχείας ανάπτυξης της αντοχής, το a_{ds1} ισούται με 6 και το a_{ds2} ισούται με 0.11, ενώ για τσιμέντο κατηγορίας N Portland, κανονικής ανάπτυξης της αντοχής, το a_{ds1} ισούται με 4 και το a_{ds2} ισούται με 0.12.

Συνήθως μας ενδιαφέρει η διαφορά της συστολής ξηράνσεως μεταξύ δύο στοιχείων σε κάποιο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διαφορά μεταξύ : α) της τελικής συστολής ξήρανσης της πλάκας οροφής υπογείου που ξεκαλουπώνεται, π.χ. σε ηλικία $t_0=4$ ημέρες και β) της τελικής συστολής ξήρανσης των περιμετρικών τοιχωμάτων του υπογείου, με χρονική αφετηρία της ηλικία τους κατά το χρόνο ξεκαλουπώματος της πλάκας. Σε αυτή την περίπτωση θα υπολογισθούν ξεχωριστά οι δύο συστολές ξήρανσης των επιμέρους στοιχείων χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα ισοδύναμα πάχη h_0 , μέσες σχετικές υγρασίες RH και ηλικίες t_0 κατά το ξεκαλούπωμα της πλάκας και θα αφαιρεθεί η μία από την άλλη. Αν το πάχος της πλάκας h_0 είναι μικρότερο αυτού των περιμετρικών τοιχωμάτων, αν η μέση σχετική υγρασία του περιβάλλοντος τους είναι μικρότερη και αν έχει παρέλθει μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ της σκυροδέτησης των δύο ανωτέρω στοιχείων, τότε η τελική συστολή ξήρανσης της πλάκας θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των περιμετρικών τοιχωμάτων και η πλάκα θα αναπτύξει εφελκυστικές τάσεις και στις δύο διευθύνσεις ίσες με την διαφορική συστολή ξήρανσης επί το μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος και πιθανόν να ρηγματωθεί, λόγω της παρεμπόδισης της ανωτέρω διαφορικής συστολής ξήρανσης της από τα δύσκαμπα περιμετρικά τοιχώματα.

$\varphi(t_{\infty}, t_0)$						
Ηλικία t_0 τη στιγμή της φόρτισης (ημέρες)	Ιδεατό μέγεθος $2 \cdot A_c / u$ σε mm					
	50	150	600	50	150	600
	Ξηρές ατμοσφαιρικές συνθήκες εσωτερικού χώρου (RH=50%)			Υγρές ατμοσφαιρικές συνθήκες υπαίθρου (RH=80%)		
1	5.50	4.60	3.70	3.60	3.20	2.90
7	3.90	3.10	2.60	2.60	2.30	2.00
28	3.00	2.50	2.00	1.90	1.70	1.50
90	2.40	2.00	1.60	1.50	1.40	1.20
365	1.80	1.50	1.20	1.10	1.00	1.00

$\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0) \cdot 10^3$			
Θέση του στοιχείου	Σχετική υγρασία (%)	Ιδεατό μέγεθος $2 \cdot A_c / u$ σε mm	
		≤ 150	≥ 600
Εσωτερικός χώρος	50	-0.60	-0.50
Υπαίθριος	80	-0.33	-0.28

Πίνακας 2.2 Τελικές τιμές του συντελεστή ερπυσμού, $\varphi(t_{\infty}, t_0)$, και της συστολής ξήρανσης, $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$, σκυροδέματος. (Πηγή: "ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ κατά Ευρωκώδικα E C 2, ΕΚΩΣ", Θεοφάνης Α. Γεωργόπουλος)

Στον Πίν. (2.2) η σχετική υγρασία συμβολίζεται με RH, A_c , είναι το εμβαδόν της διατομής του στοιχείου, και u , είναι η περίμετρος της διατομής σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Στην περίπτωση κιβωτοειδούς διατομής ή διατομής με διάκενα, της οποίας το εσωτερικό συγκοινωνεί με την ελεύθερη ατμόσφαιρα, το u θα περιλαμβάνει και την εσωτερική περίμετρο. Για ενδιάμεσες καταστάσεις, μεταξύ 150 και 600mm, μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή στις τιμές του πίνακα.

2.1.13 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Η αύξηση των παραμορφώσεων του σκυροδέματος υπό σταθερή πίεση χαρακτηρίζεται ως ερπυσμός. Οφείλεται κυρίως στη μετακίνηση των μορίων του νερού από θέσεις υψηλής πίεσης στους πόρους του πήγματος, προς θέσεις μικρότερης πίεσης, δηλαδή από πόρους περίπου κάθετους στη διεύθυνση της θλιπτικής τάσης, προς πόρους παράλληλους σε αυτήν ή προς εσωτερικά κενά και τριχοειδείς πόρους μεγάλης διαμέτρου και από εκεί προς το περιβάλλον.

Αντιθέτως με τη συστολή ξήρανσης, που γίνεται ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις, οι ερπυστικές παραμορφώσεις γίνονται στην ίδια διεύθυνση με τις ελαστικές, δηλαδή στη διεύθυνση της θλιπτικής τάσης, ενώ οι εγκάρσιες αυξάνονται με σταθερό λόγο Poisson, ίσο με αυτό των ελαστικών παραμορφώσεων $\nu=1/6 - 1/5$. Οι ερπυστικές παραμορφώσεις για θλιπτικές τάσεις μέχρι το 40-50% της αντοχής είναι ανάλογες προς τις τάσεις και ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή ερπυστικές παραμορφώσεις που οφείλονται σε τάσεις που εφαρμόζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, προστίθενται.

Το συνολικό μέγεθος και η ταχύτητα του ερπυσμού μειώνονται :1) με αύξηση της ποσότητας αδρανών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος και της σκληρότητάς τους, επειδή τα αδρανή δεν έρπουν και επιπλέον αντιστέκονται στην τάση του τσιμεντοπολλτού για παραμόρφωση, 2) με μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο $\omega=N/T$ και της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο, επειδή μειώνεται ο όγκος του τσιμεντοπολλτού, 3) με αύξηση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος, επειδή μειώνεται η διαφορά πιέσεων υδρατμών μεταξύ εσωτερικού του στοιχείου και περιβάλλοντος, 4) με αύξηση του πάχους του στοιχείου, επειδή η συνολική διαδρομή που πρέπει να διανύσουν τα μόρια του νερού αυξάνεται και 5) με το βαθμό σκλήρυνσης και την αντοχή του σκυροδέματος τη στιγμή της φόρτισης. Τα μόρια του νερού που έχουν συνδεθεί ήδη με το τσιμέντο χάνουν την κινητικότητά τους και δεν μετακινούνται υπό της πίεση της εξωτερικής τάσης. Επιπλέον, ο στέρεος ιστός του τσιμεντοπολλτού κατά τη φόρτιση, όσο πυκνότερος και μεγαλύτερης αντοχής είναι, τόσο λιγότερο συστέλλεται με την απομάκρυνση του νερού από τους πόρους.

Η συνολική παραμόρφωση ε_{tot} σε ηλικία t με αφετηρία το χρόνο σκυροδέτησης, που οφείλεται σε σταθερή τάση, $\sigma_o \leq 0,45f_c$, που επιβλήθηκε σε ηλικία t_o , ισούται με την αρχικής ελαστική παραμόρφωση κατά τη χρονική στιγμή t_o συν την ερπυστική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_{tot}(t, t_o) = \left(\frac{1}{E_t(t_o)} + \frac{\Phi(t, t_o)}{E_{c28}} \right) \sigma_o \quad (2.25)$$

όπου $E_c(t_o)$ = αρχική τιμή του εφαπτόμενου Μέτρου Ελαστικότητας σε ηλικία t_o , που αντιστοιχεί μόνο στην παραμόρφωση που αναπτύσσεται στις πρώτες στιγμές (<1min) εφαρμογής του φορτίου. Είναι :

$$E_c(t_o) \approx 1,05E_{cm}(t_o) = 1,05 \times 11000(f_{ck} + 8)^{0,3} \quad (2.26)$$

$$E_{c28} = \text{Μέτρο Ελαστικότητας σε ηλικία 28 ημερών}, E_{c28} \approx 1,05 \times 11000(f_{ck} + 8)^{0,3}$$

$\Phi(t, t_o)$ = αδιάστατος ερπυστικός συντελεστής, που δίνει πόσες φορές μεγαλύτερη από την ελαστική παραμόρφωση είναι περίπου η ερπυστική.

Κατά τον Ευρωκώδικα 2 δίνεται η τελική τιμή του ερπυστικού συντελεστή $\Phi(t, t_o)$ σε ηλικία $t=70$ χρόνια για διάφορες τιμές της ηλικίας του t_o κατά τη φόρτιση του ενεργού ή ισοδύναμου πάχους, h_o , και της σχετικής υγρασίας, RH . Αν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η επιρροή και άλλων παραμέτρων, όπως της ηλικίας t κατά τη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρεται ο υπολογισμός των ερπυστικών παραμορφώσεων, κ.α., τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πλήρης τύπος υπολογισμού του Παραρτήματος του Ευρωκώδικα 2 :

$$\Phi(t, t_o) = \frac{\alpha_2 \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} (1 + \alpha_1 \frac{1 - RH}{0,1 h_o^{1/3}})}{(0,1 + t_o^{0,2}) [1 + \frac{\min[1500\alpha_3, 250\alpha_3 + 1,5h_o(1 + 0,012RH)^{18}]}{t - t_o}]^{0,3}} \quad (2.27)$$

Η σχετική υγρασία στην Εξ. (2.27) εκφράζεται σαν %, το πάχος h_o μετριέται σε mm και η μέση αντοχή $f_{cm} = f_{ck} + 8$ σε MPa. Οι συντελεστές $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ισούνται με 1,0 για $f_{cm} \leq 35$ MPa, ενώ για $f_{cm} > 35$ MPa είναι :

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7} \leq 1 \quad (2.28^a)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2} \leq 1 \quad (2.28^b)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \leq 1 \quad (2.28^c)$$

Οι ηλικίες t και t_0 εκφράζονται σε ημέρες και αναφέρονται σε σκυρόδεμα θερμοκρασίας 20°C , κατασκευασμένο με κοινό τσιμέντο Portland ή απλώς τσιμέντο ταχείας ανάπτυξης της αντοχής, π.χ. τύπου I/35. Αν η θερμοκρασία διαφέρει ουσιωδώς από τους 20°C , οι ανωτέρω χρόνοι πρέπει να διορθωθούν για το γεγονός ότι το σκυρόδεμα "ωριμάζει", δηλαδή σκληρύνεται ταχύτερα για θερμοκρασίες $T > 20^\circ\text{C}$ και πιο αργά για $T < 20^\circ\text{C}$. Έτσι, ως ηλικία t_0 χρησιμοποιείται στην Εξ. (2.27) η ενεργός ηλικία t_0' :

$$t_0' = \int_0^{t_0} e^{-\left(\frac{4000}{273+T} - 13,65\right)} dt \quad (2.29)$$

όπου η θερμοκρασία T μετριέται σε $^\circ\text{C}$ και θεωρείται ως συνάρτηση του χρόνου από τη σκυροδέτηση $t=0$ μέχρι τη φόρτιση $t=t_0$. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία του σκυροδέματος είναι 10°C αντί 20°C στο διάστημα αυτό, η ενεργός ηλικία του είναι μειωμένη περίπου κατά 38%, ενώ αν η μέση θερμοκρασία είναι 30°C , τότε η ενεργός ηλικία αυξάνεται περίπου κατά 57% σε σχέση με αυτή των 20°C . Επίσης, η διόρθωση του χρόνου t λόγω θερμοκρασίας είναι και αυτή ανάλογη. Με αυτό τον τρόπο, στην Εξ. (2.27) πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι διορθωμένοι λόγω θερμοκρασίας ενεργοί χρόνοι t' και t_0' . Εκτενέστερα, αν έχει χρησιμοποιηθεί άλλο τσιμέντο από κοινό Portland ή απλώς ταχείας ανάπτυξης αντοχής, όπως το I/35, η ηλικία t_0' πρέπει να διορθωθεί μόνο στον 1^ο όρο του παρανομαστή της Εξ. (2.27) σε t_0'' ως εξής:

$$t_0'' = t_0' \left[\frac{9}{2+(t_0')^{1,2}} + 1 \right]^a \geq 0,5 \quad (2.30)$$

όπου ο εκθέτης a ισούται με -1 για τσιμέντο S βραδείας ανάπτυξης της αντοχής με 0 για τα κανονικής τύπου N ή με 1 για τα υψηλής και ταχείας ανάπτυξης αντοχής τύπου R. Στην 1^η περίπτωση η ενεργός ηλικία μειώνεται από 7 πραγματικές ημέρες σε 4 και από 28 σε 24, ενώ στην 3^η περίπτωση αυξάνεται κατά 7 πραγματικές ημέρες σε 12 και από 28 σε 32. Για μεγάλες ηλικίες η επιρροή του τύπου του τσιμέντου είναι αμελητέα, για το λόγο αυτό και η διόρθωση κατά την εξ.2.30 αφορά μόνο το t_0' στον 1^ο όρο του παρανομαστή της Εξ. (2.27) και όχι το t' στο 2^ο.

2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

2.2.1 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ – ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Με δεδομένο ότι ο χάλυβας χρησιμοποιείται στο οπλισμένο σκυρόδεμα υπό μορφή ράβδων κυκλικής διατομής, μας ενδιαφέρει μόνον η μηχανική συμπεριφορά του σε μονοαξονικές τάσεις και ιδιαίτερα εφελκυστικές. Το διάγραμμα σ - ϵ είναι αρχικά ευθύγραμμο με Μέτρο Ελαστικότητας $E_s=200\text{GPa}$. Στη συνέχεια το ευθύγραμμο τμήμα ακολουθείται από τη διαρροή του υλικού (δες σχήμα 2.7). Οι χάλυβες οπλισμού χαρακτηρίζονται από την ονομαστική ή ελάχιστη εγγυημένη τιμή του ορίου διαρροής, f_y , η οποία αναγράφεται σε MPa μετά το συμβολισμό S του χάλυβα. Στους χάλυβες θερμής κατεργασίας το όριο διαρροής ξεχωρίζει σαφώς, ακολουθείται δε από πλατώ διαρροής, όπου η παραμόρφωση αυξάνεται υπό σταθερή τάση. Το διάγραμμα σ - ϵ των χάλυβων ψυχρής κατεργασίας, π.χ. κάποιων τύπων χάλυβα κατηγορίας S500 και B500C, καμπυλώνεται βαθμιαία χωρίς βεβαίως καθορισμένο όριο διαρροής. Για τέτοιους χάλυβες ορίζεται το συμβατικό όριο διαρροής, $f_{0,2}$, ως η τάση που αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση, δηλαδή πλαστική 0,2% (δες σχήμα 2.7).

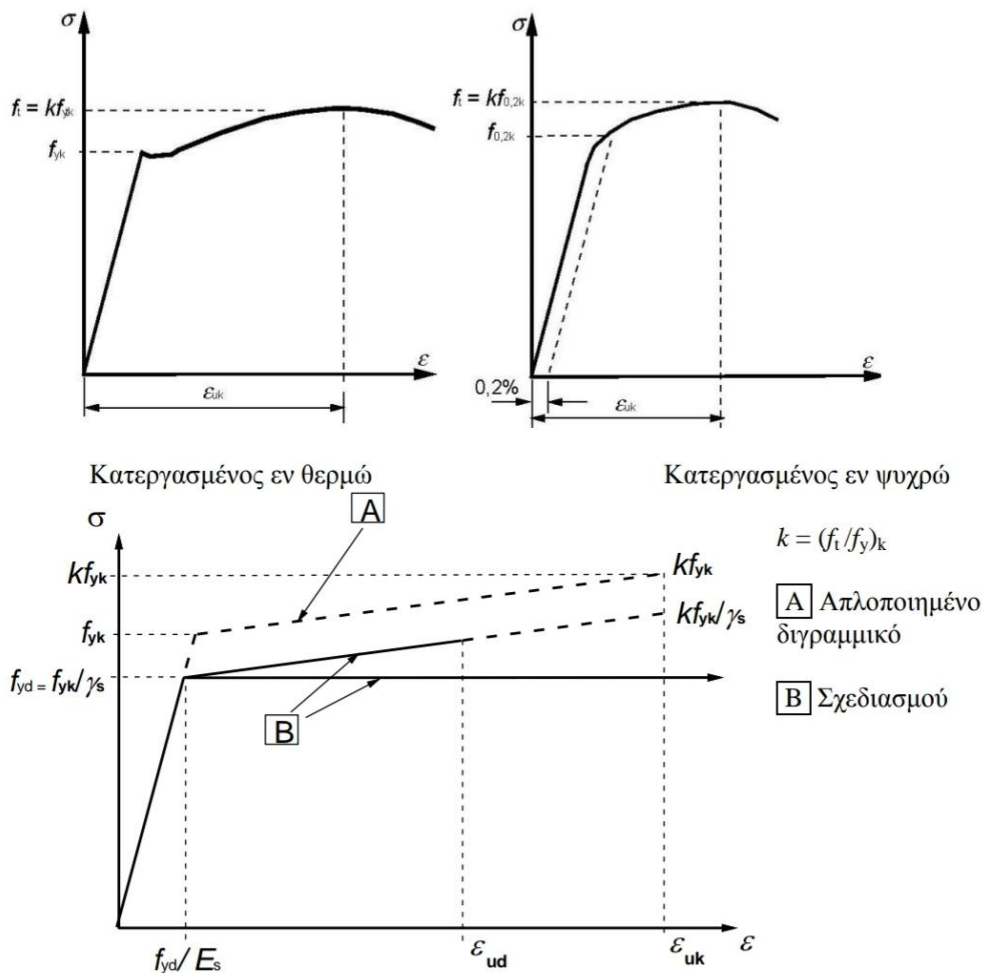
Εξαιτίας της μεταβλητότητας της παραγωγής των χαλυβουργείων ως προς την ποιότητα του υλικού και την πραγματική διάμετρο των ράβδων, δηλαδή οι υπολογισμοί στηρίζονται στην ονομαστική τιμή της διαμέτρου αλλά η πραγματική διάμετρος μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική, υπάρχει σημαντική διασπορά των ιδιοτήτων αντοχής του χάλυβα από ράβδο

σε ράβδο μίας παρτίδας υλικού, από παρτίδα σε παρτίδα και από χαλυβουργείο σε χαλυβουργείο. Η μέση τιμή του πραγματικού ορίου διαρροής f_{ym} είναι περίπου $1,15f_y$, όπου f_y συμβολίζει το ονομαστικό, δηλαδή το "εγγυημένο" όριο διαρροής για τη συγκεκριμένη κατηγορία χάλυβα και η τυπική απόκλιση της κατανομής του πραγματικού ορίου διαρροής είναι περίπου $0,09f_y$. Επομένως η τιμή του ορίου διαρροής από την οποία είναι μικρότερο μόνο το 5% του συνόλου των αντοχών και η οποία ορίζεται σαν **χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής**, f_{yk} , ισούται με :

$$f_{yk} \approx 1,15f_y - 1,645 \times 0,09f_y \approx f_y \quad (2.31)$$

Διεξοδικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η ονομαστική "ελάχιστη εγγυημένη" τιμή του ορίου διαρροής ισούται περίπου με τη χαρακτηριστική τιμή f_{yk} με ποσοστό υποαντοχής 5% και ότι η μέση τιμή της τάσης διαρροής, f_{ym} , ισούται περίπου με $1,15 f_y$.

Η τιμή του ορίου διαρροής αναφέρεται γενικά σε στατική, δηλαδή πολύ αργή φόρτιση. Η τάση διαρροής αυξάνεται με την ταχύτητα παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων $\sigma - \epsilon$ χάλυβα οπλισμού κατά τον Ευρωκώδικα 2. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

2.2.2 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΗΚΥΝΣΗ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ

Στο διάγραμμα σ - ϵ του χάλυβα μετά τω πλάτω διαρροής ή το συμβατικό όριο διαρροής, $f_{0,2}$, ακολουθεί η περιοχή **κράτυνσης**, δηλαδή η περιοχή που η τάση αυξάνεται με την παραμόρφωση, καταλήγοντας στην κορυφή του διαγράμματος, δηλαδή στην **εφελκυστική αντοχή ή όριο θραύσης f_t και στη μήκυνση, ϵ_u , στη μέγιστη τάση.**

Ο λόγος f_t/f_y αποτελεί μέτρο της κράτυνσης του χάλυβα μετά τη διαρροή, η δε τιμή της συνολικής, δηλαδή παραμένουσας συν ελαστικής μήκυνσης στη μέγιστη τάση, ϵ_u , η οποία συχνά καλείται και ομοιόμορφη παραμόρφωση, είναι μέτρο της ολκιμότητάς του.

Κατά κανόνα παίζει καθοριστικό ρόλο ο χάλυβας των οπλισμών στην αντοχή των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Σε αυτή την περίπτωση η κράτυνση του χάλυβα επιτρέπει την αύξηση της αντοχής του στοιχείου πέραν από την τιμή που αντιστοιχεί στη διαρροή του οπλισμού και η οποία λαμβάνεται υπόψη μόνο στους υπολογισμούς. Άρα, όσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα κράτυνσης του χάλυβα, δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος f_t/f_y , τόσο υψηλότερο είναι το περιθώριο αντοχής και ασφάλειας των στοιχείων πέραν της αντοχής υπολογισμού. Σαφώς, αυτό ισχύει αν στα στοιχεία επιβάλλονται καθορισμένες δυνάμεις, όπως οι δυνάμεις βαρύτητας π.χ. ίδιο βάρος, φορτία ανθρώπων ή οχημάτων λόγω χρήσης της κατασκευής, κ.λ.π., οπότε είναι καθοριστικός ο ρόλος της αντοχής τους στην αστοχία ή όχι των στοιχείων. Αντιθέτως, εάν, τα στοιχεία των κατασκευών υποβάλλονται σε επιβεβλημένες παραμορφώσεις, όπως π.χ. στην περίπτωση του σεισμού, τότε καθορίζεται η αστοχία ή όχι των στοιχείων από την παραμόρφωση θραύσης των επιμέρους υλικών, δηλαδή του σκυροδέματος και του χάλυβα. Για να μην αστοχήσει το στοιχείο λόγω θραύσης των ράβδων οπλισμού, πρέπει ο χάλυβας των τελευταίων να είναι ολκιμος, δηλαδή συνολική παραμόρφωση στη μέγιστη τάση, ϵ_u , να είναι μεγάλη. Κατά κανόνα η παραμόρφωση θραύσης είναι υψηλότερη της ϵ_u μέχρι και κατά 100%, ανάλογα με τον τύπο χάλυβα.

Κατηγορία Πλαστιμότητας (ΚΠ)	ΚΠ X (Χαμηλή) ή M (Μέση) και δευτερεύοντα στοιχεία	ΚΠ Y (Υψηλή)
Ποσοστμόριο 5% τάσης διαρροής, f_{yk}	400 - 600 MPa	
Ποσοστμόριο 95% πραγματικής τάσης διαρροής $f_{yk,0.95}$		$f_{yk,0.95} \leq 1.25f_{yk}$
Ποσοστμόριο 10% του λόγου εφελκυστικής αντοχής προς την τάσης διαρροής, $(f_t/f_y)_{k,0.10}$	≥ 1.08	≥ 1.15 ≤ 1.35
Ποσοστμόριο 10% μήκυνσης στη μέγιστη τάση (εφελκυστική αντοχή), $\epsilon_{su,k,0.10}$	$\geq 5\%$	$\geq 7.5\%$

Πίνακας 2.3 Απαιτήσεις Ευρωκώδικα 8 για χάλυβα κυρίων στοιχείων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Η παραμόρφωση θραύσης του χάλυβα είναι επίσης καθοριστική της δυνατότητας κάμψης των ράβδων του οπλισμού, για τη μόνωση συνδετήρων κ.α., μη-ευθύγραμμων ράβδων. Αν το καμπτόμενο μέλος είναι μία ράβδος οπλισμού με διάμετρο Φ και διάμετρο τυμπάνου καμπύλωσης D , τότε στην ακραία εφελκυστική τάση είναι $y=\Phi/2$, επομένως η μέγιστη μήκυνση εκεί ισούται με $y/R=\Phi/2R=\Phi/D$. Άρα, για να καμπυλωθεί η ράβδος σε διάμετρο D , πρέπει η παραμόρφωση θραύσης της να είναι τουλάχιστον ίση με D/Φ .

Ο Ευρωκώδικας 8, ο οποίος περιλαμβάνει τρεις Κατηγορίες Πλαστιμότητας κατασκευών, τη Χαμηλή, τη Μέση και την Υψηλή, επιβάλλει τα όρια του Πίν. (2.3) για τους χάλυβες οπλισμού.

Οι νευροχάλυβες τύπου Temcore με ονομαστική τάση διαρροής 500 που παράγονται και χρησιμοποιούνται ευρύτατα σήμερα σε σεισμικές περιοχές της Ευρώπης, περιλαμβανομένης και της Ελλάδας, διαθέτουν ικανοποιητικά χαρακτηριστικά που ικανοποιούν όλες σχεδόν τις ανωτέρω απαιτήσεις Κατηγορίας Υψηλής Πλαστιμότητας.

2.2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

1. Νευροχάλυβας ή χάλυβας υψηλής συνάφειας B500C. Παράγεται με θερμή εξέλαση και οφείλει την αντοχή του στη χημική του σύνθεση, δηλαδή στα μεγάλα ποσοστά Mn και V, όπως δηλαδή και ο S220. Έχει τη μορφή ευθύγραμμων ράβδων με νευρώσεις στην επιφάνεια για λόγους συνάφειας με το σκυρόδεμα. Έρχεται στο εμπόριο συνήθως σε μήκη 14m ο εγχώριος ή 12m ο εισαγόμενος και σε διαμέτρους από 8mm έως 25mm. Οι ονομαστικές διαμέτρου είναι 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 και 32mm, αλλά γενικώς στην Ελλάδα είναι διαθέσιμες οι διαμέτρου από 8 έως 20mm. Στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι σπανιότερες οι διαμέτρου 18, 22 και 28mm, χρησιμοποιούνται συχνά οι Φ25, Φ32 και Φ40. Η ονομαστική τάση διαρροής είναι 500MPa. Ο χάλυβας S500s, που παράγεται σήμερα και στην Ελλάδα, είναι "συγκολλησίμος χωρίς προϋποθέσεις" και είναι τύπου Temcore, δηλαδή διαθέτει υψηλότερη αντοχή λόγω της ειδικής θερμικής κατεργασίας μετά τη θερμή εξέλασή του. Η κατεργασία αυτή δημιουργεί στη ράβδο ένα εξωτερικό στρώμα πολύ υψηλότερης αντοχής από τον πυρήνα, εξαιτίας του οποίου βελτιώνεται η μέση αντοχή της διατομής της ράβδου.

2. Συγκολλητά δομικά πλέγματα χάλυβα B500 (παραδοσιακή ονομασία: χάλυβας κατηγορίας IVb ή StIVb) . Έχει ονομαστική τάση διαρροής 500MPa. Η αυξημένη αντοχή του οφείλεται σε ψυχρή κατεργασία, η οποία ονομάζεται όλκηση –συρματοποίηση. Έρχεται στο εμπόριο με τη μορφή πλέγματος, δηλαδή εσχάρας ράβδων μικρής διαμέτρου με ή συνήθως χωρίς νευρώσεις, συνήθων διαστάσεων 2,15m×5,0m. Οι ράβδοι της κάθε διεύθυνσης είναι ηλεκτροσυγκολλημένες στις εγκάρσιες και έχουν την ίδια ή διαφορετική απόσταση και στις δύο διευθύνσεις, δημιουργώντας αντίστοιχα τετραγωνικά ή ορθογωνικά ανοίγματα.

Στην Ελλάδα τα συγκολλητά δομικά πλέγματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφρά οπλισμένα δάπεδα που εδράζονται στο έδαφος, σε οδοστρώματα, δεξαμενές, προκατασκευασμένους σωλήνες, τοίχους αντιστήριξης και περιμετρικά τοιχώματα υπογείων, σε πλάκες οικοδομών, κ.α. Έχουν υψηλότερο κόστος υλικού αλλά επιτρέπουν σημαντική οικονομία σε εργατικά τοποθέτησης. Για το λόγο αυτό στις περισσότερες οικονομικά αναπτυγμένες χώρες τα πλέγματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα σαν οπλισμός πλακών, παρόλο που απαιτείται έτσι μεγαλύτερη ποσότητα χάλυβα ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος. Ο τύπος 0 είναι "ορθογωνικός", δηλαδή έχει διαφορετική διατομή και αποστάσεις ράβδων στις δύο διευθύνσεις. Ο αριθμός που χαρακτηρίζει το κάθε πλέγμα είναι η διατομή του οπλισμού στη διαμήκη διεύθυνση, δηλαδή αυτήν με τον περισσότερο οπλισμό, σε mm²/m.

2.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ σ-ε ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2

Για τη διαστασιολόγηση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα και τους υπολογισμούς της αντοχής, λαμβάνει ο Ευρωκώδικας 2 για το χάλυβα ένα απλοποιημένο ελαστοπλαστικό διάγραμμα σ-ε με ευθύγραμμο κλάδο μετά τη χαρακτηριστική τάση διαρροής f_{yk} , ο οποίος τερματίζεται στην παραμόρφωση ϵ_{uk} στην μέγιστη τάση που λαμβάνεται ως όριο αστοχίας

του χάλυβα. Διαφορετικά ο Ευρωκώδικας 2 ενστερνίζεται ένα λιγότερο απλό διγραμμικό διάγραμμα με κρατυνόμενο κλάδο που ενώνει το σημείο διαρροής, σε τάση και παραμόρφωση f_{yk} και f_{yk}/E_s αντίστοιχα και το σημείο της μέγιστης τάσης f_{tk} σε παραμόρφωση ϵ_{tk} . Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται στο Σχ. (2.7).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΟΙ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 ορίζεται ότι ο σχεδιασμός κάθε κατασκευής θα πρέπει να βασίζεται στη σύνθεση ενός σαφούς δομικού συστήματος, το οποίο θα πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές στην αντοχή και τη λειτουργικότητα, τόσο στα επιμέρους δομικά στοιχεία, όσο και στο σύνολο του. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός ενός δομικού συστήματος περιλαμβάνει τα εξής στάδια :

1. Την αρχική σύλληψη του συστήματος, δηλαδή την επιλογή του τύπου και της μορφής του και τον προκαθορισμό των διαστάσεων των μελών του.
2. Την ανάλυση του συστήματος, δηλαδή τον υπολογισμό της έντασης που προκαλούν οι εξωτερικές δράσεις.
3. Τη διαστασιολόγηση των μελών του συστήματος. Στην περίπτωση των κατασκευών σκυροδέματος, τον έλεγχο της επάρκειας των διαστάσεων σκυροδέματος και τον υπολογισμό των απαιτούμενων οπλισμών.
4. Τα κατασκευαστικά σχέδια, συμπεριλαμβανομένων των λεπτομερειών όπλισης.

3.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι σύγχρονοι Κανονισμοί σχεδιασμού κατασκευών, καθώς και οι ενέργειες του μηχανικού στα επιμέρους στάδια σύνθεσης ενός δομικού συστήματος, έχουν σαν βασικό στόχο να περιορισθεί, με το μικρότερο δυνατό κόστος, η πιθανότητα να γίνει το δομικό σύστημα ή ένα μέρος αυτού ακατάλληλο για τη χρήση για την οποία προορίζεται, τόσο σε οικονομικά όσο και σε κοινωνικά αποδεκτά επίπεδα. Σε περίπτωση, που πάψει να πληροί μία τουλάχιστον από τις απαιτήσεις ή τα ικανοποιητικά κριτήρια λειτουργίας του, θεωρούμε πως στο δομικό σύστημα ή σε ένα μέρος του έχει επέλθει η **οριακή κατάσταση**.

Για την εξασφάλιση μια κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα εξετάζονται δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων:

- 1. Οριακές καταστάσεις αστοχίας :** Αντιστοιχούν στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα και αφορά την ασφάλεια των ανθρώπων και των κτιρίων. Δηλαδή εκτιμάται πως το δομικό σύστημα ή ένα μέρος του έχει χάσει την ικανότητα να δέχεται τα εξωτερικά επιβεβλημένα φορτία, με αποτέλεσμα να μην είναι ασφαλές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι : η απώλεια στατικής ισορροπίας ενός στοιχείου ή όλου του συνόλου της κατασκευής και η ανατροπή, η απώλεια φέρουσας ικανότητας μελών λόγω μηχανικής αστοχίας των υλικών τους, η μετατροπή του δομικού συστήματος ή μέρους του σε μηχανισμό και η κατάρρευσή του, κ.λ.π.
- 2. Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας :** Συνδέονται με τα κριτήρια που διέπουν την κανονική χρήση και ανθεκτικότητα και αφορά τη λειτουργικότητα της κατασκευής, την άνεση των ανθρώπων και την εμφάνιση των κατασκευαστικών έργων. Δηλαδή εκτιμάται πως το δομικό σύστημα ή μέρος του έχει πάψει να αποτελεί κατάλληλο για κανονική χρήση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι : η παραμόρφωση ή η ρηγμάτωση σε απαράδεκτο βαθμό από άποψη εμφάνισης, αισθήματος ασφάλειας, επακόλουθων βλαβών στα μη-φέροντα στοιχεία, προστασίας του οπλισμού έναντι διάβρωσης, κ.λ.π. , οι ταλαντώσεις από λειτουργία μηχανών, κυκλοφορία οχημάτων και άνεμο, που προκαλούν αίσθημα κινδύνου ή άλλες ενοχλήσεις. Στην περίπτωση των οριακών καταστάσεων

λειτουργικότητας δεν δημιουργείται κίνδυνος ανθρώπινων απωλειών και είναι εφικτή η πιθανότητα να συμβούν κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του έργου, ενώ στις οριακές καταστάσεις αστοχίας δεν γίνεται αποδεκτή μία τέτοια πιθανότητα.

Συνήθως στη διαδικασία σχεδιασμού κατασκευών σκυροδέματος τα μέλη γενικώς διαστασιολογούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται έναντι των οριακών καταστάσεων αστοχίας και στη συνέχεια γίνεται έλεγχος αν ικανοποιούν από άποψη οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας. Ο τελευταίος αυτός έλεγχος είναι είτε άμεσος με υπολογισμό π.χ. των βελών κάμψης και του πλάτους των ρωγμών και σύγκριση με τις επιτρεπόμενες τιμές, είτε έμμεσος με σύγκριση π.χ. της λυγηρότητας, δηλαδή του λόγου μήκους προς ύψος διατομής του μέλους, ή της διαμέτρου των ράβδων με τα αντίστοιχα όρια. Η σειρά αυτή των υπολογισμών ακολουθείται γιατί, γενικώς ο βασικός σκοπός, που πρέπει να πληρούν οι κατασκευές, είναι αυτός της ασφάλειας. Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις, όπως είναι αυτή της στεγανότητας, που είναι βασική απαίτηση από μία δεξαμενή νερού. Γι' αυτό στην περίπτωση αυτή η διαστασιολόγηση μπορεί να αρχίσει από την εξασφάλιση απουσίας ρωγμών και να καταλήξει στον έλεγχο της οριακής κατάστασης αστοχίας.

Αν και οι οριακές καταστάσεις αστοχίας κάνουν αναφορά ουσιαστικά σε ολόκληρο το δομικό σύστημα ή σε μέρος του που αποτελείται από περισσότερα από ένα μέλη, για πιο απλά αλλά και πιο συντηρητικά, ο έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας αναβιβάζεται συνηθέστερα σε έλεγχο αυτής της οριακής κατάστασης ορισμένων διατομών, περιλαμβανομένων των κρίσιμων περιοχών των μελών ή των συνδέσεων των μελών. Διακρίνονται σε: 1) οριακές καταστάσεις αστοχίας έναντι μεγεθών ορθής έντασης (ροπής κάμψης και αξονικής δύναμης) ή 2) οριακές καταστάσεις αστοχίας έναντι μεγεθών διατμητικής έντασης (τέμνουσας δύναμης, στρέψης, διάτρησης, συνάφειας).

Ο έλεγχος των οριακών καταστάσεων δίνεται από τον τύπο :

$$E_d \leq R_d \quad (3.1)$$

όπου E παριστάνει την τιμή του εντατικού μεγέθους (ροπής κάμψης M , τέμνουσας δύναμης V , ορθής δύναμης N ή ροπής στρέψης T) που προκύπτει από την ανάλυση της κατασκευής για τις εξωτερικές **δράσεις**, δηλαδή φορτίσεις και R το αντίστοιχο εντατικό μέγεθος **αντοχής**. Ο δείκτης d σημαίνει πως οι τιμές των E και R είναι **τιμές σχεδιασμού**.

3.3 Η ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Σκοπός του σχεδιασμού των κατασκευών είναι ο περιορισμός της πιθανότητας να συμβεί μια οριακή κατάσταση στη διάρκεια της ζωής του σχεδιασμού της κατασκευής, σε τιμές κοινωνικά και οικονομικά αποδεκτές. Στη γλώσσα της Θεωρίας της Ασφάλειας των Κατασκευών ορίζεται η πιθανότητα αυτή ως **πιθανότητα αστοχίας**, P_f , και το συμπλήρωμα της $1 - P_f$, ως **αξιοπιστία** της κατασκευής. Για την επιλογή μιας αποδεκτής τιμής της πιθανότητας αστοχίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψη οι κοινωνικές συνέπειες της αστοχίας π.χ. τραυματισμοί, θάνατοι, κ.λ.π. και οι οικονομικές π.χ. κόστος αποκατάστασης βλαβών, υλικές ζημιές, διακοπή κοινωνικής και παραγωγικής λειτουργίας, κ.λ.π., όπως επίσης και το κόστος της αύξησης της αξιοπιστίας της κατασκευής, διότι μια ασφαλέστερη κατασκευή είναι γενικώς και ακριβότερη.

Η πιθανοτική φύση των εξωτερικών δράσεων (φορτίων) και των αντοχών κάνει πρακτικά αδύνατη την απόλυτη ασφάλεια και μας αναγκάζει να μιλάμε για πιθανότητες αστοχίας. Οι αιτίες για την αβεβαιότητα στο μέγεθος της έντασης λόγω φορτίων είναι:

1. Τα εξωτερικά φορτία ή αλλιώς οι εξωτερικές δράσεις δεν είναι σταθερά εκ φύσεως, αλλά μεταβλητά κατά πιθανοτικό τρόπο, δηλαδή παρουσιάζουν στατιστική κανονικότητα. Για παράδειγμα η σεισμική φόρτιση που μπορεί να καταπονήσει μια κατασκευή στη διάρκεια της ζωής της, είναι αδύνατον να προβλεφθεί στη φάση του σχεδιασμού της κατασκευής, ούτε σε γενικές γραμμές, π.χ. η επιτάχυνση του εδάφους, ούτε στις λεπτομέρειές της, δηλαδή τα πλήρη επιταχυνσιογραφήματα στις δύο οριζόντιες και την κατακόρυφη διεύθυνση, ακόμα και αν υπάρχουν πλήρη και μακροχρόνια στατιστικά στοιχεία για τη σεισμική δράση στην ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Για τη μέγιστη ανεμοπίεση ισχύει το ίδιο καθώς και για τα κατακόρυφα φορτία χρήσης, δηλαδή "κινητά". Ουσιαστικά, τα μέγιστα φορτία στα οποία θα υποβληθεί μία κατασκευή στη διάρκεια της ζωής σχεδιασμού της ακολουθούν μια πιθανοτική κατανομή. Επιπλέον, η μέθοδος που θα συνδυασθούν τα εξωτερικά φορτία χρονικά είναι και αυτός πιθανοτικός. Υπάρχει π.χ. αβεβαιότητα ως προς το μέγεθος των κινητών φορτίων κατά τη χρονική στιγμή που θα συμβεί ένας πολύ ισχυρός σεισμός ή μια χιονοθύελλα, ή ως προς την πιθανότητα να συμβούν ταυτόχρονα μία μεγάλη ανεμοφόρτιση και ένας σεισμός. Αβεβαιότητες τέτοιου τύπου, που δεν μειώνονται όσα στατιστικά στοιχεία και αν έχουμε, ονομάζονται πιθανοτικές αβεβαιότητες.
2. Κατά κανόνα, και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, δεν υπάρχουν αρκετά στατιστικά στοιχεία για τον ακριβή προσδιορισμό της πιθανοτικής κατανομής κάθε εξωτερικού φορτίου για μία συγκεκριμένη γεωγραφική θέση και κατηγορία κατασκευής. Για παράδειγμα δεν υπάρχουν τα πλήρη και μακροχρόνια σεισμολογικά, μετεωρολογικά, κ.λ.π. στοιχεία που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της πιθανοτικής κατανομής της σεισμικής έντασης, της μέγιστης ανεμοφόρτισης, της φόρτισης από χιόνι, κ.λ.π. Επίσης, είναι σχεδόν ανύπαρκτα για τη χώρα μας στατιστικά στοιχεία για τα φορτία χρήσης γραφείων, κατοικιών, κ.λ.π. ή για τα φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες. Για το λόγο αυτό ενστερνιζόμαστε είτε αυθαίρετα ονομαστικά φορτία, ή φορτία που βασίζονται σε στατιστικά στοιχεία άλλων χωρών. Αβεβαιότητα τέτοιας μορφής ονομάζεται στατιστική αβεβαιότητα και μπορεί να μειωθεί ή και να εξαφανισθεί με συλλογή στατιστικών στοιχείων.
3. Η προσομοίωση του δομικού συστήματος για την ανάλυση είναι αναπόφευκτα προσεγγιστική και η μέθοδος ανάλυσης έχει κάποιες ανακρίβειες λόγω των υποθέσεων στις οποίες στηρίζεται, με αποτέλεσμα τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση σε κάθε κρίσιμη διατομή ή γενικά θέση του δομικού συστήματος, απέχουν από τα πραγματικά που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη φόρτιση που θεωρήσαμε για την ανάλυση. Το μέγεθος της απόκλισης των αποτελεσμάτων από την πραγματικότητα είναι αβέβαιο. Αβεβαιότητες τέτοιου είδους ονομάζονται αβεβαιότητες λόγω προσομοίωσης.

Η εκτίμηση της αντοχής της κρίσιμης διατομής ή του μέλους γίνεται επίσης με σημαντική αβεβαιότητα. Οι αιτίες είναι οι εξής :

1. Οι ιδιότητες και κυρίως οι αντοχές των επιμέρους υλικών, δηλαδή του χάλυβα και του οπλισμένου σκυροδέματος, έχουν σημαντική διασπορά. Δοκίμια από το ίδιο ουσιαστικά υλικό π.χ. το σκυρόδεμα μίας ορισμένης προδιαγραμμένης αντοχής και πιθανόν μίας ορισμένης σύνθεσης, που παράγεται για ένα συγκεκριμένο έργο, ή οι ράβδοι οπλισμού από ένα συγκεκριμένο χαλυβουργείο, έχουν μία πιθανοτική κατανομή αντοχών. Για τις γεωμετρικές διαστάσεις ισχύει το ίδιο π.χ. για την απόσταση των ράβδων οπλισμού από την επιφάνεια του στοιχείου. Πρόκειται πάλι για πιθανοτική αβεβαιότητα.

2. Οι πιθανοτικές κατανομές των αντοχών των υλικών δεν είναι γνωστές λόγω έλλειψης στατιστικών στοιχείων. Όπως για παράδειγμα πόσο ακριβώς είναι το μέσο ή το χαρακτηριστικό όριο διαρροής του νευροχάλυβα που παράγεται ή εισάγεται στην Ελλάδα ή πόσο κοντά στην προδιαγραφμένη μέση αντοχή, π.χ. των $16+1,64\sigma=24\text{MPa}$ βρίσκεται η μέση αντοχή του προϊόντος που ένα τυχόν εργοστάσιο έτοιμου σκυροδέματος παραδίδει ως C16/20. Αυτή η αβεβαιότητα είναι πάλι στατιστικής φύσης, δηλαδή μπορεί να μειωθεί με τη συλλογή στατιστικών στοιχείων.
3. Ο υπολογισμός της αντοχής μίας διατομής, για δοσμένες αντοχές υλικών και γεωμετρικά στοιχεία, βασίζεται σε ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές, όπως η επιπεδότητα των διατομών, τα ιδεατά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών. Η πραγματική αντοχή, που μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά για ένα συγκεκριμένο μέλος, διαφέρει από την υπολογιστική τιμή κατά ένα ποσό που είναι άγνωστο, δηλαδή αβέβαιο, αν δε γίνει το πείραμα για τη μέτρηση της συγκεκριμένης αντοχής. Πρόκειται πάλι για αβεβαιότητα λόγω μηχανικού προσομοιώματος, αλλά αυτή τη φορά σε επίπεδο διατομής.

Λόγω της αβεβαιότητας στα φορτία και στις αντοχές των διατομών, είναι απαραίτητο ένα σημαντικό περιθώριο ασφαλείας μεταξύ της μέσης τιμής E_m των εν λόγω φορτίων εντατικών μεγεθών στην κρίσιμη διατομή και της μέσης αντοχής, R_m , της διατομής :

$$R_m > E_m \quad (3.2)$$

δηλαδή απαιτείται ένας **κεντρικός συντελεστής ασφαλείας** :

$$\bar{\gamma} = \frac{R_m}{E_m} > 1 \quad (3.3)$$

Το μέγεθος του συντελεστή ασφαλείας εξαρτάται από την ανεκτή πιθανότητα αστοχίας, P_f , και την αβεβαιότητα των τιμών της αντοχής R και της έντασης E , που εκφράζονται με τις αντίστοιχες αποκλίσεις σ_R και σ_E ή τους συντελεστές μεταβλητότητας $\nu_R = \sigma_R/R_m$ και $\nu_E = \sigma_E/R_m$. Η πιθανότητα αστοχίας μπορεί να υπολογισθεί ως εξής :

$$P_f = P[R < E] = P[R - E < 0] \quad (3.4)$$

Εάν υποθέσουμε ότι τα R και S ακολουθούν την κανονική πιθανοτική κατανομή "κατανομή Gauss", το περιθώριο ασφαλείας $R-S$ έχει κανονική κατανομή με μέση τιμή $R_m - S_m$ και τυπική απόκλιση $\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}$. Επομένως, η βοηθητική μεταβλητή :

$$u = \frac{(R-E) - (R_m - E_m)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1.^{3,6} Επομένως, η Εξ. (3.4) διατυπώνεται :

$$P_f = P[R - E < 0] = P \left[\frac{(R-E) - (R_m - E_m)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} < -\frac{(R_m - E_m)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \right] = P[u < -\beta] \quad (3.5)$$

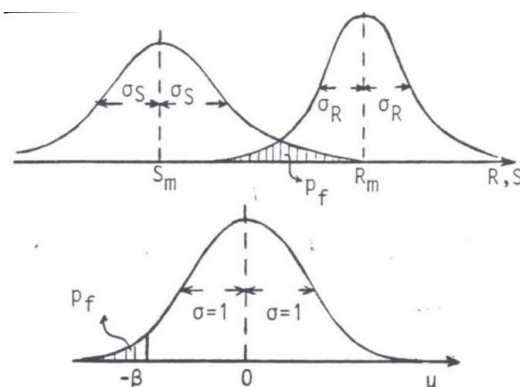
όπου ο δείκτης αξιοπιστίας β ορίζεται ως :

$$\beta \equiv \frac{(R_m - E_m)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (3.6)$$

Δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας P_f εκφράζει το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της πιθανοτικής κατανομής του u προς τα αριστερά της τιμής $-\beta$ (δες σχήμα 3.1). Το β ονομάζεται δείκτης αξιοπιστίας, διότι, όσο μεγαλώνει το β τόσο μικραίνει η πιθανότητα αστοχίας P_f (δες πίνακα 3.1).

β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f
0,25	0,40	1,25	0,11	2,25	$1,2 \times 10^{-2}$	3,25	5×10^{-4}	4,27	10^{-5}
0,50	0,31	1,50	0,07	2,50	6×10^{-3}	3,50	$2,3 \times 10^{-4}$	4,50	$3,5 \times 10^{-6}$
0,75	0,23	1,75	0,04	2,75	3×10^{-3}	3,72	10^{-4}	4,75	10^{-6}
1,00	0,16	2,00	$2,3 \times 10^{-2}$	3,00	$1,3 \times 10^{-3}$	4,00	3×10^{-5}	5,00	3×10^{-7}

Πίνακας 3.1 Αντιστοιχία δείκτη αξιοπιστίας και πιθανότητας αστοχίας^{3,6}. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 3.1 Γεωμετρική ερμηνεία πιθανότητας αστοχίας. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Σε περίπτωση που καθορισθεί η ανεκτή πιθανότητα αστοχίας, τότε η τιμή του β είναι γνωστή και η Εξ. (3.6) δίνει:

$$R_m = E_m + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2} \quad (3.7)$$

Για τον προσδιορισμό του κεντρικού συντελεστή ασφαλείας, κάνουμε την εξής προσέγγιση, που δίνει λάθος μέχρι 6% για $1/3 \leq \sigma_R/\sigma_E \leq 3$:

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2} \approx 0,75(\sigma_R + \sigma_E) \quad (3.8)$$

Τότε η Εξ. (3.7) δίνει:

$$(R_m - 0,75\beta\sigma_R) \approx (E_m + 0,75\beta\sigma_E)$$

ή

$$R_m(1 - 0,75\beta\nu_R) \approx E_m(1 + 0,75\beta\nu_E)$$

Δηλαδή
$$\bar{\gamma} = \frac{R_m}{E_m} \approx \frac{1 + 0,75\beta\nu_E}{1 - 0,75\beta\nu_R} \quad (3.9)$$

Η Εξ. (3.9) εκφράζει τη σχέση μεταξύ κεντρικού συντελεστή ασφαλείας γ και δείκτη αξιοπιστίας β , δηλαδή πιθανότητας αστοχίας.

Στους υπολογισμούς συνήθως χρησιμοποιούμε τις **χαρακτηριστικές ή ονομαστικές** τιμές των αντοχών και των φορτίων. Για την αντοχή R , η οποία είναι περίπου ανάλογη προς την αντοχή του υλικού που αστοχεί (του χάλυβα ή του σκυροδέματος), χρησιμοποιούμε την χαρακτηριστική αντοχή, R_k , για την οποία ισχύει :

$$R_k = R_m - k\sigma_R = R_m(1 - k\nu_R) \quad (3.10)$$

όπου αν είναι $k \approx 1,645$, για κανονική κατανομή της αντοχής R η τιμή R_k υπερβαίνει μόνο το 5% των αντοχών. Επίσης, τα εντατικά μεγέθη E αντιστοιχούν στις ονομαστικές τιμές των φορτίων που δίνουν οι Κανονισμοί Φορτίσεων. Οι ονομαστικές αυτές τιμές των εντατικών μεγεθών θεωρούνται σαν χαρακτηριστικές και συμβολίζονται με E_k , είναι όμως $E_k > E_m$. Ορίζεται λοιπόν ο **χαρακτηριστικός συντελεστής ασφαλείας** :

$$\gamma_k = \frac{R_k}{E_k} = \frac{R_k}{R_m} \cdot \frac{E_m}{E_k} \bar{\gamma} \approx \frac{R_k}{R_m} \cdot \frac{E_m}{E_k} \cdot \frac{1 + 0,75\beta\nu_E}{1 - 0,75\beta\nu_R} \quad (3.11)$$

Η χρήση των χαρακτηριστικών τιμών αντί των μέσων έχει την εξής σκοπιμότητα: η εισαγωγή της χαρακτηριστικής αντοχής $R_k < R_m$ δημιουργεί την εντύπωση πως μικρότερες τιμές αντοχής από τη χαρακτηριστική σημαίνουν ακατάλληλο υλικό και ανάγκη βελτίωσης του ελέγχου ποιότητας. Στην περίπτωση που ενδιαφερόμαστε μόνο για το μέσο όρο στη δειγματοληψία, τότε τυχόν μεμονωμένες χαμηλές αντοχές δεν θα δημιουργούσαν ψυχολογική πίεση για βελτίωση του υλικού. Επίσης, ο μηχανικός τείνει να πάρει "τοις μετρητοίς" τα ονομαστικά φορτία, θεωρώντας τα σαν αναμενόμενα μέσα φορτία στη διάρκεια ζωής της κατασκευής, ενώ στην πραγματικότητα είναι μεγαλύτερα από τα μέσα. Τέλος ο χαρακτηριστικός συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος είναι σημαντικά μικρότερος από τον κεντρικό, δημιουργεί μια πλασματική εικόνα της πραγματικής ασφάλειας, ωθώντας το μηχανικό προς την κατεύθυνση αύξησης της ασφάλειας. Ας υποθέσουμε π.χ. τις εξής περιπτώσεις, για ανεκτή πιθανότητα αστοχίας στην 50χρονη διάρκεια ζωής της κατασκευής $P_f = 10^{-4}$, που αντιστοιχεί σε $\beta = 3,72$.

1. Χάλυβας \rightarrow το υλικό που αστοχεί, οπότε $R_k/R_m \approx f_{yk}/f_{ym} \approx 1/1,15$, $\nu_R \approx 0,09$. Φόρτιση:
 - i. μόνο μόνιμα φορτία: $\nu_E \approx 0,10$, $E_k/E_m \approx 1/1,05^{3,9}$ Τότε $\bar{\gamma} \approx 1,7$, $\gamma_k \approx 1,55$
 - ii. μόνο φορτία χρήσης ή "ωφέλιμα" φορτία: $\nu_E \approx 0,4$, $E_k/E_m \approx 1/1,4^{3,9,3,10}$
Τότε $\bar{\gamma} \approx 2,8$, $\gamma_k \approx 1,75$
2. Σκυρόδεμα \rightarrow το υλικό που αστοχεί, οπότε $R_k/R_m \approx f_{ck}/f_{cm} \approx 1/1,3$, $\nu_R \approx 0,18$ (για C25/30, με $s = 5\text{MPa}$, $f_{cm} = 33\text{MPa}$). Φόρτιση:
 - i. μόνο μόνιμα φορτία: $\bar{\gamma} \approx 2,55$, $\gamma_k \approx 2,1$
 - ii. μόνο φορτία χρήσης ή "ωφέλιμα" φορτία: $\bar{\gamma} \approx 4,25$, $\gamma_k \approx 2,35$

Είναι αναγκαίο να ξεχωρίσουμε τα μεγέθη που αναφέρονται στις αντοχές από αυτά που αφορούν την ένταση και να γράψουμε την Εξ. (3.9) ως εξής :

$$R_k \frac{R_m}{R_k} (1 - 0,75\beta\nu_R) = E_k \frac{E_m}{E_k} (1 + 0,75\beta\nu_E)$$

ή

$$R_d \equiv \frac{R_k}{\gamma_m} = \gamma_F E_k \equiv E_d \quad (3.12)$$

όπου R_d, S_d είναι η αντοχή και το εντατικό μέγεθος **σχεδιασμού** και γ_m, γ_f είναι οι **επί μέρους συντελεστές ασφαλείας**. Συγκεκριμένα, γ_m , είναι ο **συντελεστής υλικού**, ο οποίος αναφέρεται σε εκείνο το υλικό που καθορίζει την αντοχή της διατομής, π.χ. το σκυρόδεμα σε ένα υποστύλωμα και το χάλυβα σε μία δοκό ή πλάκα και δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_m \equiv \frac{f_k}{f_m} = \frac{1}{1-0,75\beta\nu_R} \quad (3.13)$$

όπου $f_k/f_m \approx f_{ck}/f_{cm}$ για το σκυρόδεμα ή f_{yk}/f_{ym} για το χάλυβα. Ο **συντελεστής φορτίου**, γ_F , δίνεται από τη σχέση :

$$\gamma_F \equiv \frac{E_m}{E_k} (1 + 0,75\beta\nu_E) \quad (3.14)$$

Οι συντελεστές υλικού γ_m εφαρμόζονται απ' ευθείας στις αντοχές των υλικών, που είναι και οι βασικές πηγές αβεβαιότητας της αντοχής των διατομών R. Έτσι, η εξίσωση ελέγχου της οριακής κατάστασης αστοχίας γίνεται :

$$R_d = R_d(f_{yd}, f_{cd}) \geq E_d = \gamma_F E_k \quad (3.15)$$

όπου: $f_{yd}=f_{yk}/\gamma_s=$ **αντοχή σχεδιασμού για το χάλυβα** (3.16α)

$f_{cd}=f_{ck}/\gamma_c=$ **αντοχή σχεδιασμού για το σκυρόδεμα** (3.16β)

Η Εξ. (3.15) αποτελεί τη βασική μορφή **ελέγχου των οριακών καταστάσεων αστοχίας** σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς. Η μορφή αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι: πρώτον εφαρμόζει ξεχωριστό συντελεστή ασφαλείας στην πηγή κάθε αβεβαιότητας, ανάλογα με το μέγεθος αυτής της αβεβαιότητας και δεύτερον δίνει σχετικά ομοιόμορφη τιμή της πιθανότητας αστοχίας β , για αστοχία του χάλυβα ή του σκυροδέματος και για οποιαδήποτε σχεδόν αναλογία των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν από τις εξωτερικές δράσεις-φορτία. Οι κατάλληλες τιμές των συντελεστών ασφαλείας γ_c, γ_s και γ_F μπορούν να υπολογισθούν ως εξής :

Αν θέσουμε $\beta=3,72$, δηλαδή $P_f=10^{-4}$, είναι για το σκυρόδεμα με $f_{cm}/f_{ck} \approx 1,3$ και $\nu_R \approx 0,18$:

$$\gamma_c = \frac{f_{ck}}{f_{cm}} \frac{1}{1-0,75\beta\nu_R} \approx \frac{1}{1,3} \cdot \frac{1}{1-0,75 \times 3,72 \times 0,18} \approx 1,50$$

και για το χάλυβα :

$$\gamma_s = \frac{f_{yk}}{f_{ym}} \frac{1}{1-0,75\beta\nu_R} \approx \frac{1}{1,15} \cdot \frac{1}{1-0,75 \times 3,72 \times 0,09} \approx 1,15$$

Για τα μόνιμα φορτία που συμβολίζονται με G:

$$\gamma_F = \gamma_g = \frac{E_m}{E_k} (1 + 0,75\beta\nu_E) \approx 1,05(1 + 0,75 \times 3,72 \times 0,10) \approx 1,35$$

Για τα μεταβλητά φορτία χρήσης –οφέλιμα φορτία και για τις ονομαστικές τιμές φορτίων κατά τον Ευρωκώδικα 1 EN1991-1 :

$$\gamma_F = \gamma_q = \frac{E_m}{E_k} (1 + 0,75\beta v_E) \approx \frac{1}{1,4} (1 + 0,75 \times 3,72 \times 0,4) \approx 1,50$$

Για τον καθορισμό των συντελεστών φορτίου γ_F για εκείνες τις δράσεις που εξαρτώνται σημαντικά από τη γεωγραφική θέση (σεισμός, χιόνι, άνεμος), χρειάζονται οι συγκεκριμένες τιμές των E_m/E_k και v_E . Γενικώς, οι δράσεις που έχουν μεγάλη μεταβλητότητα, έχουν και σχετικά μεγάλο συντελεστή φορτίου, γ_F .

Πρέπει να τονίσουμε ότι οι τιμές της πιθανότητας αστοχίας των κρίσιμων διατομών στη διάρκεια ζωής της κατασκευής που υπολογίζονται από το δείκτη αξιοπιστίας β δεν περιλαμβάνονται στην περίπτωση αστοχίας λόγω ανθρώπινων λαθών στο σχεδιασμό και την κατασκευή, π.χ. φάσεις αρχικής σύλληψης, ανάλυσης, διαστασιολόγησης των μελών και καθορισμό των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Από την εμπειρία φαίνεται ότι οι περισσότερες αστοχίες οφείλονται σε τέτοια ακριβώς σφάλματα και η πραγματική πιθανότητα αστοχίας στη συμβατική διάρκεια ζωής της κατασκευής είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη σχεδόν από το 10^{-4} που εξασφαλίζουν οι σύγχρονες μέθοδοι υπολογισμού και η προσεκτική κατασκευή. Γι' αυτό οι τιμές των β και P_f έχουν μόνο σχετική αξία, δηλαδή χρησιμεύουν κυρίως για συγκρίσεις μεταξύ διαφόρων τρόπων υπολογισμού, κ.λ.π.

3.4 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΔΡΑΣΕΩΝ

Δράσεις ονομάζονται τα εξωτερικά σύνολα επιβαλλόμενων φορτίων ή παραμορφώσεων με κοινή προέλευση, τα οποία διακρίνονται στους υπολογισμούς. Οι δράσεις μπορεί να είναι δυναμικές ή στατικές, ανάλογα με το αν προκαλούν ή όχι σημαντικές επιταχύνσεις της κατασκευής. Επιπροσθέτως, μπορεί να είναι άμεσες, δηλαδή συγκεντρωμένες ή κατανομημένες δυνάμεις, όπως π.χ. ίδιο βάρος στοιχείου, ωφέλιμο φορτίο κ.λ.π., ή έμμεσες δηλαδή επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, όπως π.χ. θερμοκρασιακή μεταβολή, υποχωρήσεις στηρίξεων, συστολή ξήρανσης, ερπυσμός, σεισμός κ.λ.π. Γενικά οι δράσεις, ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης τους κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής και τη μεταβολή τους στο χρόνο, διακρίνονται σε μόνιμες, μεταβλητές και τυχηματικές.

Οι **μόνιμες** δράσεις αποτελούν αυτές που το μέγεθος τους μεταβάλλεται σπάνια ή πολύ λίγο, σε σχέση με την μέση τιμή τους. Έχουν αντιπροσωπευτική τιμή G_K και περιλαμβάνουν:

- Το ίδιο βάρος της φέρουσας κατασκευής, που καθορίζεται από τις ονομαστικές διαστάσεις και τη μέση τιμή του ειδικού βάρους του οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο ισούται με 25kN/m^3 .
- Το βάρος των μη-φερόντων τμημάτων της φέρουσας κατασκευής, όπως επικαλύψεις πατωμάτων, τοιχοποιίες, κ.λ.π. Για τον υπολογισμό του βάρους αυτών των κατασκευών, γίνεται χρήση των τιμών του Ευρωκώδικα EN1991-1-1 για τις δράσεις.
- Τις υδροστατικές πιέσεις νερού με καθορισμένη μέγιστη στάθμη.

Γενικά ο μηχανικός έχει την τάση να υποτιμάει το βάρος των μη-φερόντων στοιχείων, για το λόγο αυτό, η μέση τιμή των μόνιμων δράσεων εκτιμάται σαν 5% μεγαλύτερη της ονομαστικής, δηλαδή για μόνιμες δράσεις $E_m/E_k=1.05$. Ισοδύναμα μπορεί να θεωρηθεί ότι $E_m = E_k$ και λαμβάνουμε επιπλέον συντελεστή ασφαλείας προσομοιώματος, δηλαδή υπολογισμού της έντασης, $\gamma_{sd}=1.05$. Ο συντελεστής μεταβλητότητας των μόνιμων δράσεων, v_E , είναι περίπου 0,10.

Οι **μεταβλητές** δράσεις αποτελούν αυτές που το μέγεθος τους μεταβάλλεται συχνά ή συνεχώς και ιδιαίτερος σημαντικά σε σχέση με τη μέση τιμή τους. Έχουν αντιπροσωπευτική τιμή, Q_k , και αποτελούνται από :

- Τα κατακόρυφα ωφέλιμα ή κινητά φορτία χρήσης, που περιλαμβάνουν το βάρος των ανθρώπων, συσκευών, επίπλων, κινητών χωρισμάτων, εμπορευμάτων, οχημάτων, αναλόγως της χρήσης των οριζόντιων επιφανειών της κατασκευής, καθώς επίσης και οι πλευρικές ωθήσεις γαιών.
- Δράσεις που προέρχονται γενικά από το φυσικό περιβάλλον ή από φυσικά φαινόμενα, όπως π.χ. το χιόνι, ο άνεμος, η θερμοκρασία ή ακόμα και ο σεισμός, κ.λ.π.

Οι **τυχηματικές** δράσεις αποτελούν αυτές που έχουν πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισής στις διάρκεια ζωής της φέρουσας κατασκευής. Έχουν αντιπροσωπευτική τιμή, F_k , και περιλαμβάνουν :

- Σεισμό μεγάλης έντασης, ο οποίος είναι η πιο σημαντική τυχηματική δράση στον Ελληνικό χώρο και για τον οποίο ο σχεδιασμός στοχεύει στην αποφυγή κατάρρευσης του συνολικού δομήματος.
- Εκρήξεις, προσκρούσεις οχημάτων, πυρκαγιές, κατολισθήσεις, τυφώνες, ανεμοστρόβιλοι, κ.λπ.

Στο σχεδιασμό λαμβάνονται υπ' όψη μόνον εκείνες οι τυχηματικές δράσεις που η πιθανότητας εμφάνισής τους στη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της κατασκευής δεν είναι αμελητέα μικρή.

Κατηγορίες επιφανειών	Χρήση	Παράδειγμα	q_k [kN/m ²]
A	Χώροι διαμονής	Δωμάτια σε κτήρια κατοικιών. Θάλαμοι και πτέρυγες σε νοσοκομεία. Υποδωμάτια σε ξενοδοχεία και ξενώνες, κουζίνες και τουαλέτες	Δάπεδα: 2.0 Σκάλες: 3.5
			Μπαλκόνια: 5.0
B	Χώροι γραφείων	C1: Χώροι με τραπέζια κλπ. (σχολικοί χώροι, νηπιαγωγεία, καφενεία, εστιατόρια, αίθουσες φαγητού, αναγνωστήρια, χώροι υποδοχής).	3.0
		C2: Χώροι με σταθερά καθίσματα (χώροι σε εκκλησίες, θέατρα ή κινηματογράφους, αίθουσες συνεδριάσεων, αίθουσες ομιλίας, αίθουσες συγκεντρώσεων, χώροι αναμονής, χώροι αναμονής σε σιδηροδρομικούς σταθμούς).	5.0
		C3: Χώροι χωρίς εμπόδια στη διακίνηση του κοινού (χώροι σε μουσεία, εκθεσιακοί χώροι, κλπ. και χώροι πρόσβασης σε δημόσια και διοικητικά κτήρια, ξενοδοχεία και νοσοκομεία. Προαύλια σιδηροδρομικών σταθμών).	5.0
		C4: Χώροι για πιθανές σωματικές δραστηριότητες (αίθουσες χορού, αίθουσες γυμναστικής και θεατρικές σκηνές)	5.0
		C5: Χώροι επιρρεπείς σε μεγάλα πλήθη (για δημόσιες εκδηλώσεις όπως αίθουσες συναυλιών, κλειστά γήπεδα, εξέδρες γηπέδων, εξώστες και χώροι πρόσβασης, πλατφόρμες σιδηροδρόμων).	7.5
D	Χώροι με εμπορικά καταστήματα	D1: Χώροι σε καταστήματα λιανικής πώλησης, γενικά.	5.0
		D2: Χώροι σε πολυκαταστήματα	

Πίνακας 3.2 Επιβαλλόμενα φορτία σε δάπεδα, μπαλκόνια και σκάλες κτιρίων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Οι Κανονισμοί Φορτίσεων ορίζουν τις **ονομαστικές τιμές** των μεταβλητών δράσεων. Αυτές οι ονομαστικές τιμές θεωρούνται ότι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε η πιθανότητα υπέρβασης τους να είναι περίπου 10% μία τουλάχιστον φορά στη διάρκεια **ζωής σχεδιασμού** της κατασκευής, που καθορίζεται ως το χρονικό διάστημα που αναμένεται να ζήσει η κατασκευή με συνήθη συντήρηση και χωρίς σημαντικές επισκευές και λαμβάνεται ίση με 50 χρόνια για συνήθη κτίρια, όπως π.χ. οι ονομαστικές τιμές των φορτίων χρήσης αντιστοιχούν σε ασυνήθη υπερφόρτιση λόγω συνάθροισης πολλών ατόμων, προσωρινής αποθήκευσης αντικειμένων ή υλικών μεγάλου βάρους, εργασιών επισκευών, κλπ. Αν οι ονομαστικές τιμές των μεταβλητών δράσεων έχουν προκύψει από συστηματική ανάλυση στατιστικών στοιχείων με βάση την παραπάνω πιθανότητα υπέρβασης, τότε ονομάζονται **χαρακτηριστικές τιμές**. Ενώ, σε αντίθετη περίπτωση οι ονομαστικές τιμές χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς σαν να ήταν χαρακτηριστικές.

Οι ονομαστικές τιμές των φορτίων χρήσης κατά τον Ευρωκώδικα 1 δίνονται από τον Πιν. (3.2).

Οι ονομαστικές τιμές των δράσεων προερχόμενες από το περιβάλλον ή από φυσικά φαινόμενα εξαρτώνται γενικώς από τη γεωγραφική θέση της κατασκευής. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα Νο.1^{3.3} η Ελλάδα χωρίζεται σε δύο ζώνες : τη Δυτική Ελλάδα, την Πελοπόννησο και τα νησιά, όπου η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού είναι $0,22\text{kN/m}^2$ έως το υψόμετρο 100m από τη θάλασσα , $0,27\text{kN/m}^2$ από 100m έως 200m, κ.ο.κ. , με αύξηση κατά 20% για κάθε 100m ύψους από τη θάλασσα και τη λοιπή Ελλάδα συν τις περιοχές με υψόμετρο πάνω από 600m, όπου οι χαρακτηριστικές τιμές είναι $0,44\text{kN/m}^2$ για τα πρώτα 100m, $0,52\text{kN/m}^2$ για τα επόμενα και με αύξηση κατά 20% για κάθε 100m περαιτέρω. Επίσης ο Ευρωκώδικας αυτός ορίζει τη βασική ταχύτητα ανέμου v_{ref} για την Ελλάδα σε 36m/sec για τα νησιά και τις παραλιακές περιοχές έως 10km από τη θάλασσα και σε 30m/sec στην υπόλοιπη χώρα. Η βασική τιμή της ανεμοπίεσης ισούται με $0,625 \times 10^{-3} v_{ref}^2$ σε kN/m^2 , δηλαδή $0,81\text{kN/m}^2$ στις πρώτες περιοχές και $0,56\text{kN/m}^2$ στις άλλες. Κατά ένα περίπλοκο τρόπο, με βάση τη γεωμετρία της κατασκευής και τη βασική τιμή ορίζεται η πραγματική κατανομή των ανεμοπιέσεων.

3.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Όταν η κατασκευή ή μέρος της πρόκειται να καταπονηθεί στη διάρκεια της ζωής της από τα μόνιμα φορτία και από μίαν μόνο μεταβλητή δράση, π.χ. από τα κατακόρυφα φορτία χρήσης, τότε προφανώς μας ενδιαφέρει για τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων αστοχίας μόνον ο συνδυασμός των μόνιμων φορτίων G και της μέγιστης τιμής του μεταβλητού φορτίου κατά τη συμβατή διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Τότε, η ένταση E αποτελείται από ένα τμήμα G λόγω μόνιμων φορτίων και από ένα άλλο Q λόγω κινητών :

$$E = G + Q \quad (3.17^a)$$

Οπότε στην Εξ. (3.7) έχουμε :

$$E_m = G_m + Q_m \quad (3.17^b)$$

$$\sigma_E^2 = \sigma_G^2 + \sigma_Q^2 \quad (3.17^c)$$

και κατ' επέκταση της Εξ. (3.8) για $1/3 \leq \sigma_G/\sigma_Q \leq 3$:

$$\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2} \approx 0,75(\sigma_G + \sigma_Q) \quad (3.17^d)$$

Οπότε η Εξ. (3.7) γίνεται με $v_G = \sigma_G / G_m$ και $v_Q = \sigma_Q / Q_m$:

$$R_m(1 - 0,75\beta v_R) = G_m(1 + 0,75^2\beta v_G) + Q_m(1 + 0,75^2\beta v_Q)$$

Επειδή όμως δεν ισχύει πάντοτε η συνθήκη: $1/3 \leq \sigma_G / \sigma_Q \leq 3$, είναι πιο σωστή η κατωτέρω τροποποίηση της Εξ. (3.7):

$$R_d = R_m(1 - 0,75\beta v_R) = E_d = G_m + Q_m + 0,75\beta \frac{(\sigma_G^2 + \sigma_Q^2)}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} =$$

$$G_m \left(1 - 0,75\beta v_G \frac{\sigma_G}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} \right) + Q_m \left(1 - 0,75\beta v_Q \frac{\sigma_Q}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} \right)$$

Είναι όμως:

$$\frac{\sigma_G}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_Q}{v_G}\right)^2 \left(\frac{Q_m}{G_m}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_Q}{v_G}\right)^2 \left(\frac{Q_k Q_m G_k}{G_k Q_k G_m}\right)^2}}$$

$$\frac{\sigma_Q}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_G}{v_Q}\right)^2 \left(\frac{G_k Q_k G_m}{Q_k Q_m G_k}\right)^2}}$$

Προκύπτουν έτσι συντελεστές φορτίου για τις μόνιμες δράσεις και τα κινητά φορτία, οι οποίοι εξαρτώνται από το λόγο της έντασης λόγω κινητών προς την λόγω μόνιμων Q_k / G_k :

$$\gamma_g = \frac{G_m}{G_k} \left(1 + \frac{0,75\beta v_G}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_Q}{v_G}\right)^2 \left(\frac{Q_k Q_m G_k}{G_k Q_k G_m}\right)^2}} \right) \quad (3.18^a)$$

και
$$\gamma_q = \frac{Q_m}{Q_k} \left(1 + \frac{0,75\beta v_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_G}{v_Q}\right)^2 \left(\frac{G_k Q_k G_m}{Q_k Q_m G_k}\right)^2}} \right) \quad (3.18^b)$$

Στην παράγραφο (3.2) για τον υπολογισμό των γ_G και γ_Q είχε ληφθεί $G_m / G_k = 1,05$, $Q_m / Q_k = 1/1,4$, $v_G = 0,1$ και $v_Q = 0,4$, οπότε οι ανωτέρω σχέσεις δίνουν για $P_f = 10^{-4}$, δηλαδή για $\beta = 3,72$:

$$\gamma_g = 1,05 \left(1 + \frac{0,279}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_k}{0,375 G_k}\right)^2}} \right) \quad (3.19^a)$$

και
$$\gamma_q = \frac{1}{1,4} \left(1 + \frac{1,116}{\sqrt{1 + \left(0,375 \frac{G_k}{Q_k}\right)^2}} \right) \quad (3.19^b)$$

Άρα, αν θέλουμε να επιτυγχάνεται για οποιοδήποτε λόγο μόνιμων προς κινητά φορτία G_k / Q_k ο ίδιος βαθμός ασφαλείας που επιτυγχάνεται μόνο για μόνιμες δράσεις με $\gamma_g = 1,35$ και μόνο για κινητά φορτία με $\gamma_q = 1,5$, δηλαδή $P_f = 10^{-4}$, πρέπει οι συντελεστές φορτίου να αλλάζουν από θέση σε θέση της κατασκευής σύμφωνα με τις Εξ. (3.18^a), (3.18^b) ή (3.19^a), (3.19^b), ανάλογα με το λόγο της έντασης λόγω μόνιμων προς την λόγω κινητών G_k / Q_k .

Σε περίπτωση που θεωρήσουμε για παράδειγμα πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος, που χρησιμοποιούνται ως πατώματα κτιρίων συνήθους χρήσης, η ένταση λόγω μόνιμων δράσεων, δηλαδή η ροπή κάμψης είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη από την λόγω κινητών φορτίων,

δηλαδή ωφελίμων φορτίων : $G_k/Q_k \approx 2,5$. Τότε, οι Εξ. (3.19^α) και (3.19^β) δίνουν: $\gamma_g=1,25$, $\gamma_q=1,3$. Αντιθέτως στα κατακόρυφα στοιχεία και τις δοκούς κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος ο λόγος G_k/Q_k είναι της τάξεως του 4, οπότε οι Εξ. (3.19^α) και (3.19^β) δίνουν : $\gamma_g=1,3$, $\gamma_q=1,15$.

Οι Εξ. (3.18^α) και (3.18^β) δίνουν πάντα $\gamma_g \approx 1,25$, $\gamma_q \approx 1,3$.

Χάριν απλότητας και υπέρ της ασφαλείας, ο Ευρωκώδικας EN1990 επιτρέπει να λαμβάνεται πάντα $\gamma_g=1,35$, $\gamma_q=1,5$ στο συνδυασμό μόνιμων δράσεων και κινητών φορτίων. Δίνει όμως, σαν εναλλακτικό του συνδυασμού $\gamma_g=1,25$, $\gamma_q=1,3$, δηλαδή του :

$$E_d = 1,35G + 1,5Q \quad (3.20)$$

$$\text{τον εξής : } E_d = \max(1,15G + 1,5Q, 1,35G + 1,5\psi_0Q) \quad (3.21)$$

όπου ο συντελεστής συνδυασμού, ψ_0 , παίρνει γενικά την τιμή, $\psi_0=0,7$.

Είναι εύκολο να επαληθευθεί αριθμητικά ότι στις δύο ανωτέρω χαρακτηριστικές περιπτώσεις τιμών του G_k/Q_k η Εξ. (3.21) δίνει τελική τιμή της έντασης σχεδιασμού : $E_d=\gamma_g G_k+\gamma_q Q_k$ παρόμοια με αυτή που προκύπτει από τις Εξ. (3.19^α), (3.19^β) και 10% περίπου μικρότερη της έντασης που δίνει η Εξ. (3.20), έτσι για τις συνήθεις τιμές του G_k/Q_k , η Εξ. (3.20) δίνει μία διαφορά 10% περίπου εις βάρος του κόστους που μεταφράζεται σε μεγάλη διαφορά υπέρ της ασφαλείας, δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας, P_f , μειώνεται από τη στοχευόμενη τιμή του 10^{-4} σε $P_f \approx 10^{-6}-10^{-7}$. Το φυσικό νόημα αυτών των διαφορών και των μειωμένων συντελεστών φορτίου είναι ότι όταν συνυπάρχουν οι μόνιμες δράσεις και κινητά φορτία χρήσης είναι απίθανο να έχουμε ταυτόχρονα τις δύο ακραίες και ελάχιστα πιθανές υπερφορτίσεις, που αντικατοπτρίζονται στο 1,35G και στο 1,5Q.

Γενικώς, στην κατασκευή μπορεί να δράσουν ταυτόχρονα περισσότερες από μία μεταβλητές δράσεις. Με εξαίρεση τα κινητά φορτία, οι μεταβλητές και οι τυχηματικές δράσεις δρουν σχετικά σπάνια και έχουν πολύ μικρή χρονική διάρκεια, π.χ. ο σεισμός, ο άνεμος σημαντικής έντασης, το χιόνι, κ.λ.π. Λόγω της μικρής διάρκειας αυτών των δράσεων, οι οριακές καταστάσεις αστοχίας δεν χρειάζεται να ελεγχθούν για το άθροισμα των μεγίστων των επιμέρους δράσεων. Η εφαρμογή της θεωρίας των στοχαστικών διαδικασιών στο πρόβλημα του συνδυασμού των δράσεων, έχει δείξει μάλιστα πως ένα εντατικό μέγεθος, E , που επηρεάζεται από πολλές δράσεις γίνεται γενικά μέγιστο όταν μία από τις μεταβλητές δράσεις πάρει τη μέγιστη τιμή της, ενώ οι άλλες μεταβλητές δράσεις έχουν τις συνηθισμένες ή συχνές τιμές τους π.χ. σεισμός μεγάλης έντασης σε συνδυασμό με τη μακροχρόνια τιμή των κατακόρυφων κινητών φορτίων ή η μέγιστη τιμή των κινητών φορτίων στα 50 χρόνια ταυτόχρονα με άνεμο μικρής έντασης, κ.λ.π. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί με την εμπειρία ότι οι κατασκευές αστοχούν συνήθως όταν μία από όλες τις δράσεις φθάσει σε εξαιρετικά μεγάλη τιμή. Για το λόγο αυτό οι σύγχρονοι κανονισμοί θεωρούν συνδυασμούς μεταβλητών δράσεων σε καθέναν από τους οποίους **μία μεταβλητή δράση** θεωρείται ως **βασική** και μπαίνει στον υπολογισμό με τη χαρακτηριστική ή ονομαστική τιμή της Q_k , ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές δράσεις μπαίνουν με τις **τιμές συνδυασμού** τους $\psi_0 Q_k$, που είναι ένα ποσοστό $\psi_0 < 1$ της ονομαστικής τους τιμής. Ο συντελεστής φορτίου γ_F εφαρμόζεται τόσο στη βασική δράση όσο και στις υπόλοιπες του συνδυασμού. Άρα, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN1990 ο σχεδιασμός με βάση την **οριακή κατάσταση αστοχίας** γίνεται με τους εξής συνδυασμούς μεταβλητών δράσεων :

$$E_d = \max(\gamma_g G_k + \gamma_q Q_{ki} + \sum_{j \neq 1} \gamma_{qj} \psi_{0j} Q_{kj}) \quad (3.22)$$

όπου οι δείκτες i και $j=1,2,\dots$ αναφέρονται στις μεταβλητές δράσεις. Γενικά κάθε μεταβλητή δράση πρέπει να λαμβάνεται διαδοχικά ως βασική Q_{ki} στην εξ.3.22. Έτσι, στη γενική περίπτωση που οι μεταβλητές δράσεις είναι τρεις, τα κινητά φορτία Q , ο άνεμος W και το χιόνι S , κάθε μία από αυτές θα ληφθεί με τη σειρά ως βασική στην εξ.3.22.

$\gamma_g = 1,35$, αν οι μόνιμες δράσεις έχουν δυσμενή επιρροή στο υπόψη εντατικό μέγεθος ή $\gamma_g=1,0$ αν έχουν ευμενή, δηλαδή ανακουφιστική. (κατά τον Ευρωκώδικα EN1990)

$\gamma_q = 1,50$, αν η εν λόγω μεταβλητή δράση έχει δυσμενή επιρροή στο υπόψη εντατικό μέγεθος ή $\gamma_q=0$ αν έχουν ευμενή, δηλαδή ανακουφιστική. (κατά τον Ευρωκώδικα EN1990)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN1990 ο συντελεστής ψ_0 ισούται με 0,7 για οποιαδήποτε ωφέλιμα φορτία εκτός των χώρων αποθήκευσης όπου ισούται με 1,0. Επίσης, ο συντελεστής συνδυασμού ψ_0 ισούται με 0,6 όταν εφαρμόζεται στον άνεμο ή στις τυχόν θερμοκρασιακές μεταβολές και με 0,5 για χιόνι μέχρι υψόμετρο 1000m, ενώ για μεγαλύτερο υψόμετρο με 0,7. Οι τιμές του ψ_0 προκύπτουν από την απαίτηση η συνολική τιμή $\gamma_q\psi_0Q_k$ να έχει πιθανότητα υπέρβασης στη ζωή της κατασκευής περίπου 10%, δηλαδή να ισούται περίπου με $Q_m(1+1,28v_q)/(1+0,75v_q)\approx 0,66$ για $v_q=0,4$.

Κατά τη διάρκεια της ζωής σχεδιασμού της κατασκευής η πιθανότητα εμφάνισης των τυχηματικών δράσεων σχεδιασμού είναι τόσο μικρή, που να δικαιολογείται η υπόθεση ότι κατά την εμφάνιση τους δρουν ταυτόχρονα μόνο τα μόνιμα φορτία G και η κατά κάποιο τρόπο μόνιμη τιμή ψ_2Q_k των μεταβλητών δράσεων. Έτσι, αν η τιμή σχεδιασμού της τυχηματικής δράσης είναι A_d , ο αντίστοιχος συνδυασμός δράσεων για τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων αστοχίας είναι :

$$E_d = G + A_d + \psi_2 Q_k \quad (3.23)$$

Ως μακροχρόνια τιμή ψ_2Q_k μίας μεταβλητής δράσης λαμβάνεται η μέση τιμή της στη διάρκεια της ζωής σχεδιασμού της κατασκευής ή η τιμή με πιθανότητα υπέρβασης 50% στο διάστημα αυτό. Κατά τον Ευρωκώδικα EN1990 η τιμή του ψ_2 για τα ωφέλιμα φορτία χρήσης κτιρίων ισούται με 0,3 πλην των χώρων συνάθροισης κοινού και καταστημάτων, όπου ισούται με 0,6 και των χώρων αποθήκευσης, όπου ισούται με 0,8. Επίσης, ισούται με 0,6 για χώρους στάθμευσης και με 0 για άνεμο, χιόνι για υψόμετρο μέχρι 1000m ή θερμοκρασία.

Για κατασκευές στον Ελλαδικό χώρο η Εξ.(3.23) εφαρμόζεται μόνο για τη σεισμική δράση σχεδιασμού, δηλαδή για $A_d=E$. Αυτό σημαίνει ότι η σεισμική δράση σχεδιασμού θεωρείται ότι δρα συγχρόνως με τα μόνιμα φορτία G και το κλάσμα ψ_2 των κινητών. Οι μάζες m_i και η συνολική μάζα M της κατασκευής με βάση τις οποίες υπολογίζονται οι σεισμικές δυνάμεις και η τέμνουσα βάση, υπολογίζονται από τα φορτία $G+\psi_2Q$. Άλλες μεταβλητές δράσεις, π.χ. ο άνεμος δεν λαμβάνονται υπόψη σε συνδυασμό με το σεισμό.

3.6 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Μία ειδική περίπτωση οριακής κατάστασης αστοχίας είναι η **απώλεια στατικής ισορροπίας** της κατασκευής ως στερεό σώμα, δηλαδή άκαμπτο. Παραδείγματα είναι η ανατροπή ή η ολίσθηση λόγω πλευρικών ωθήσεων γαιών, η ανύψωση π.χ. πλευση υπόγειας ή ημιυπόγειας κατασκευής λόγω άνωσης, κ.λ.π. Στην ευστάθεια της κατασκευής συμβάλλουν οι μόνιμες δράσεις G_1 και G_2 , ενώ αυτές που δεν συμβάλλουν είναι οι μεταβλητές δράσεις Q_{ki} και Q_{kj} . Επομένως, η ευστάθεια της κατασκευής πρέπει να ελέγχεται για το συνδυασμό :

$$E_d = \gamma_{g1}G_1 - \gamma_{g2}G_2 - 1,5(Q_{ki} + \sum_{j \neq 1} \psi_{0j} Q_{kj}) \quad (3.24)$$

όπου $\gamma_{g1} = 0,9$ κατά τον Ευρωκώδικα EN1990

$\gamma_{g2} = 1,35$ κατά τον Ευρωκώδικα EN1990

Ως παράδειγμα εφαρμογής του συνδυασμού της Εξ. (3.21), ο τοίχος αντιστήριξης του Σχ. (3.2) πρέπει να ελεγχθεί σε ολίσθηση και ανατροπή για το συνδυασμό του βάρους του τοίχου και των χωμάτων πάνω από τη φτέρνα του πέλματος επί $\gamma_{g1}=0,9$ και της ώθησης γαιών επί 1,5 .

3.7 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για τον έλεγχο των **οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας**, μας ενδιαφέρουν ο "χαρακτηριστικός" και ο "συχνός" συνδυασμός.

Ο "χαρακτηριστικός" συνδυασμός είναι :

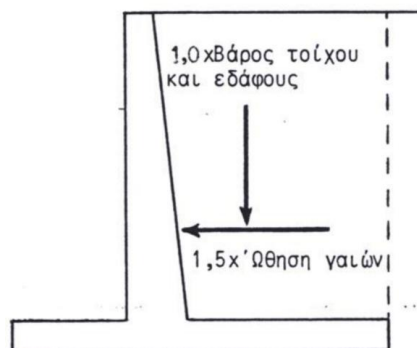
$$E_d = G_k + Q_{ki} + \sum_{j \neq 1} \psi_{0j} Q_{kj} \quad (3.25)$$

και ο "συχνός" :

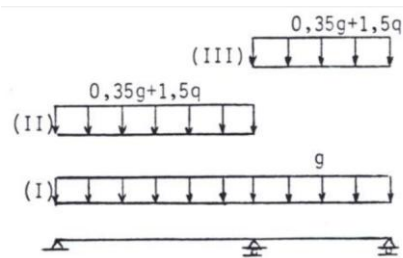
$$E_d = G_k + \psi_{1i} Q_{ki} + \sum_{j \neq 1} \psi_{2j} Q_{kj} \quad (3.26)$$

όπου οι δείκτες i και j αναφέρονται στις μεταβλητές δράσεις και κάθε μεταβλητή δράση λαμβάνεται με τη σειρά της σαν βασική Q_{ki} . Για το συντελεστή συνδυασμού ψ_0 ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω σε σχέση με την Εξ. (3.22) και για το συντελεστή ψ_2 αυτά που αναφέρθηκαν στην Εξ. (3.23). Η συχνή τιμή $\psi_1 Q_k$ των μεταβλητών δράσεων είναι αυτή που ξεπερνιέται κατά το 5% της διάρκειας ζωής της κατασκευής. Η τιμή του ψ_1 λαμβάνεται κατά τον Ευρωκώδικα λίγο μικρότερη : ίση με 0,5 για κτίρια κατοικιών ή γραφείων, με 0,7 για χώρους συνάθροισης κοινού ή καταστήματα, με 0,9 για χώρους αποθήκευσης, με 0,5 για θερμοκρασία και με 0,2 για άνεμο ή χιόνι.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα ο έλεγχος του ανοίγματος ρωγμών αναφέρεται στο "χαρακτηριστικό" συνδυασμό της Εξ. (3.25), ενώ ο υπολογισμός των παραμορφώσεων γίνεται για το "συχνό" συνδυασμό της Εξ. (3.26).



Σχήμα 3.2 Παράδειγμα συνδυασμού δράσεων για έλεγχο στατικής ισορροπίας τοίχου αντιστήριξης. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 3.3 Δυσμενείς φορτίσεις δοκού δύο ανοιγμάτων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

3.8 ΔΥΣΜΕΝΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Οι μεταβλητές δράσεις εξετάζονται μόνο εφόσον έχουν δυσμενή επίδραση στο μέγεθος έντασης ή παραμόρφωσης που υπολογίζεται. Αντιθέτως, αν έχουν ευνοϊκή επίδραση αγνοούνται. Επιπροσθέτως, το κινητό φορτίο, Q , θεωρείται ότι δρα μόνο στο τμήμα εκείνο των οριζόντιων επιφανειών χρήσης, η φόρτιση του οποίου δίνει δυσμενές αποτέλεσμα για το αναφερόμενο εντατικό μέγεθος. Παρομοίως, λαμβάνεται πολλαπλασιασμένο επί $\gamma_g > 1$ μόνο το τμήμα εκείνο του μόνιμου φορτίου, G , που δίνει δυσμενή επίδραση για το αναφερόμενο μέγεθος. Το υπόλοιπο λαμβάνεται πολλαπλασιασμένο επί $\gamma_g = 1,0$. Δηλαδή, για το συνδυασμό της Εξ. (3.20), το $0,35G+1,5Q$ θεωρείται ότι φορτίζει το τμήμα εκείνο της οριζόντιας επιφάνειας χρήσης για το οποίο προκύπτει δυσμέμεια για το αναφερόμενο εντατικό μέγεθος. Άρα, στη συνεχή δοκό δύο ανοιγμάτων του Σχ. (3.3), οι συνδυασμοί της Εξ. (3.20) για τις δράσεις, G και Q , αναλύονται στις εξής τρεις φορτίσεις :

- I. Φόρτιση και των δύο ανοιγμάτων με το μόνιμο φορτίο G .
- II. Φόρτιση του αριστερά ανοίγματος με την αντίστοιχη τιμή του $0,35G+1,5Q$.
- III. Φόρτιση του δεξιά ανοίγματος με την αντίστοιχη τιμή του $0,35G+1,5Q$.

Για μέγιστη κατά απόλυτη τιμή ροπή στήριξης, επαλληλίζονται οι φορτίσεις I, II και III, ενώ για μέγιστη θετική ροπή στο αριστερά άνοιγμα, επαλληλίζονται οι φορτίσεις I και II και για μέγιστη θετική ροπή του δεξιά ανοίγματος οι I και III. Για τον έλεγχο της ίδιας συνεχούς δοκού κατά τον συνδυασμό λειτουργικότητας της Εξ. (3.25), οι φορτίσεις II και III αντικαθίστανται με φόρτιση του αριστερά ή του δεξιά ανοίγματος αντίστοιχα με την τιμή του Q . Παρομοίως, για το συνδυασμό της Εξ. (3.26), όπου όμως, οι φορτίσεις II και III γίνονται με το $\psi_1 Q$. Πρακτικά, οι έλεγχοι κατά τις Εξ. (3.20), (3.25) διευκολύνονται αν η δοκός του Σχ. (3.3) αναλυθεί δύο φορές, μία για μοναδιαία φόρτιση στο αριστερό άνοιγμα και μία για μοναδιαία στο δεξιό. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών πολλαπλασιάζονται με τις αντίστοιχες τιμές του G , του $0,35G+1,5Q$, του Q και του $\psi_1 Q$ και επαλληλίζονται κατάλληλα για να προκύψουν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη για τον έλεγχο κατά τις Εξ. (3.20), (3.25).

3.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Οι τιμές σχεδιασμού των εντατικών μεγεθών, E_d , για τον έλεγχο των οριακών καταστάσεων κατά την Εξ. (3.1), προσδιορίζονται από την ανάλυση του δομικού συστήματος για τους αντίστοιχους συνδυασμούς δράσεων, δηλαδή αυτούς των παραγράφων 3.4 και 3.7.

Το δομικό σύστημα που θεωρείται στην ανάλυση είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο του πραγματικού. Ο βαθμός απλοποίησης επιλέγεται από το μελετητή Μηχανικό, ανάλογα με την εμπειρία και τις γνώσεις του, τα υπολογιστικά μέσα που διαθέτει, τη σημασία της κατασκευής και τη μορφολογία του πραγματικού δομικού συστήματος, κ.λ.π. αλλά πάντα μέσα στα όρια

που επιτρέπουν οι Κανονισμοί και οι τυχόν ειδικές διατάξεις που ισχύουν κατά περίπτωση. Ο μελετητής πρέπει να λαμβάνει πάντα υπόψη του ότι αν οι απλοποιήσεις στην προσομοίωση (μοντέλο) του πραγματικού δομικού συστήματος είναι υπερβολικές, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να είναι πολύ αναξιόπιστα, σε βαθμό τέτοιο που να οδηγούν σε επικίνδυνη μείωση της ασφάλειας της κατασκευής, δηλαδή σε απαράδεκτα μεγάλη πιθανότητα αστοχίας. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην προσομοίωση δομικών συστημάτων με δύσκολη ή προβληματική μορφολογία. Παραδείγματα τέτοιας μορφολογίας είναι οι πλάκες χωρίς δοκούς (μηκυτοειδείς), η θεμελίωση των κατακόρυφων στοιχείων σε διαφορετική στάθμη, η στήριξη υποστυλωμάτων σε δοκούς ("φυτευτά" υποστυλώματα) ή κύριων δοκών σε άλλες δοκούς ("έμμεσες" στηρίξεις δοκών), οι μεγάλες εκκεντρότητες μεταξύ των αξόνων δοκών και υποστυλωμάτων στους κόμβους, η στήριξη κλιμάκων στο ενδιάμεσο του ύψους υποστυλωμάτων μεταξύ ορόφων μέσω κεκλιμένων δοκών ή απευθείας, οι κεκλιμένες στέγες, ιδίως οι τετράρριχτες, οι πυρήνες τοιχωμάτων σύνθετης διατομής κ.α.

Κατά κανόνα η ανάλυση είναι **γραμμική – ελαστική**, δηλαδή βασίζεται στις αρχές της Θεωρίας Ελαστικότητας συμπληρωμένες για γραμμικά στοιχεία με τις παραδοχές της Τεχνικής Θεωρίας της Κάμψης (επιπεδότητα διατομών). Ο Ευρωκώδικας 2 επιτρέπει για τον προσδιορισμό της έντασης σχεδιασμού των οριακών καταστάσεων αστοχίας οριζοντίων στοιχείων (δοκών, πλακών), να λαμβάνεται υπόψη **μερική ανακατανομή** των ροπών κάμψης που προκύπτουν από τη γραμμική-ελαστική ανάλυση, από τις διατομές όπου η καμπτική ένταση είναι μέγιστη προς τις λιγότερο επιβαρυνμένες, κατά τρόπο που να διατηρεί την ισορροπία. Αυτή η ανακατανομή της έντασης επιτρέπεται μέσα σε ορισμένα ποσοστιαία όρια, που εξαρτώνται από την πλαστιμότητα των διατομών όπου η ροπή είναι μέγιστη, δηλαδή από την ικανότητα τους να παραμορφώνονται χωρίς θραύση υπό περίπου σταθερή ροπή. Για τον εκ των υστέρων έλεγχο υφισταμένων κατασκευών, ο Ευρωκώδικας 2 επιτρέπει να εφαρμόζονται και μέθοδοι πλαστικής ανάλυσης π.χ. μέθοδος πλαστικών αρθρώσεων για πλαίσια γραμμικών μελών, μέθοδος γραμμών διαρροής για πλάκες, κ.λ.π. .

Πρακτικά, για την εκτίμηση της έντασης και των παραμορφώσεων του δομικού συστήματος, απαιτείται από τον Ευρωκώδικα 8 να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και της παρουσίας του διαμήκους οπλισμού στη δυσκαμψία των μελών. Αν $E_{cm}I_c$, είναι η δυσκαμψία της ονομαστικής διατομής σκυροδέματος με θεώρηση του σκυροδέματος σαν γραμμικού-ελαστικού και ομοιογενούς υλικού, η δυσκαμψία που ορίζει ο Ευρωκώδικας 8 για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος είναι το 50% της ρηγμάτωσης.

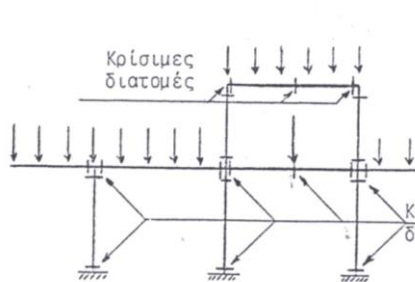
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ

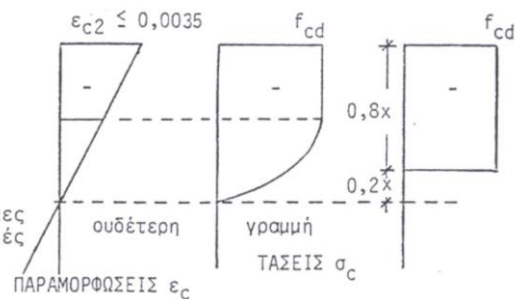
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σημαντικότερο κεφάλαιο στον υπολογισμό του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί η διαστασιολόγηση των μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με βάση την αντοχή τους σε μεγέθη ορθής έντασης, δηλαδή ροπές κάμψης σε συνδυασμό με ορθή αξονική δύναμη, διότι η πληθώρα των μελών των κατασκευών (δοκοί, πλάκες, υποστυλώματα) καταπονούνται κυρίως σε συνδυασμό αξονικής δύναμης και ροπών κάμψης. Η αντοχή σε κάμψη ελέγχεται σε επίπεδο διατομής και περιορίζεται συνήθως σε ορισμένες **κρίσιμες** διατομές των μελών, που ταυτίζονται γενικά με τις θέσεις όπου οι ροπές κάμψης παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο. Στις θέσεις αυτές ανήκουν οι ακραίες διατομές των δοκών και των υποστυλωμάτων, οι στηρίξεις των πλακών στις δοκούς, ενδιάμεσες διατομές πλακών και δοκών που φέρουν ενδιάμεσα εγκάρσια φορτία κ.λ.π.

Η βασική αρχή της διαστασιολόγησης προσδιορίζεται ως εξής : Τα μεγέθη ορθής έντασης (M_x , M_y , N) δημιουργούν εσωτερικές τάσεις στα μέλη, με διεύθυνση κάθετη στη διατομή, δηλαδή ορθές τάσεις. **Στόχος** της διαστασιολόγησης είναι να διασφαλίσει πως το **σκυρόδεμα** δεν θα αστοχήσει υπό τις ορθές τάσεις **θλίψης**, δηλαδή δε θα φθάσει τη βράχυνση αστοχίας του και ότι ο **χάλυβας** είναι ικανός να παραλάβει το **σύνολο των εφελκυστικών τάσεων** της διατομής, χωρίς να φθάσει την οριακή μήκυνση αστοχίας του. Έχοντας δεδομένο ότι ο χάλυβας αναλαμβάνει εξ' ολοκλήρου τις εφελκυστικές εσωτερικές τάσεις, οι ράβδοι του οπλισμού τοποθετούνται στην πλευρά της διατομής όπου ο συνδυασμός της αξονικής δύναμης και των ροπών κάμψης προκαλεί εφελκυσμό. Πολύ συχνά προκαλείται εφελκυσμός στην μία πλευρά της διατομής από συνδυασμό δράσεων, όπου από έναν άλλο δημιουργείται θλίψη, και το αντίθετο. Σε αυτή την περίπτωση ασφαλώς χρειάζεται να τοποθετηθεί οπλισμός και στις δύο πλευρές.



Σχ. 4.1 Κρίσιμες σε κάμψη διατομές



Σχ. 4.2 Ιδεατές κατανομές τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη διατομής

(Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

4.2 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Η διαστασιολόγηση των διατομών και ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη με ορθή δύναμη στηρίζεται στα εξής :

1. Κινηματικές Παραδοχές

- i. Οι διατομές παραμένουν επίπεδες κατά την παραμόρφωση. (Υπόθεση Navier- Bernoulli). Η παραδοχή αυτή επαληθεύεται πειραματικά για μέλη οπλισμένου σκυροδέματος με λόγο μήκους (δηλαδή πιο συγκεκριμένα απόστασης των σημείων μηδενισμού της ροπής) προς ύψος διατομής, l/h μεγαλύτερο από 2, συνεπάγεται όμως πως οι παραμορφώσεις ϵ κατά την έννοια του άξονα, κατανέμονται γραμμικά καθ' ύψος της διατομής.
- ii. Η σχετική ολίσθηση χάλυβα-σκυροδέματος είναι μηδέν, δηλαδή στοιχεία χάλυβα και σκυροδέματος έχουν την ίδια παραμόρφωση ϵ στην ίδια απόσταση από την ουδέτερη γραμμή. Γενικά για τον εφελκόμενο οπλισμό αυτή η παραδοχή δεν ισχύει, αλλά συναντάται στις θέσεις όπου το σκυροδέμα είναι ρηγματωμένο κάθετα στον άξονα του μέλους, όπως π.χ. εκεί όπου η ροπή κάμψης είναι μέγιστη, δηλαδή στην κρίσιμη διατομή.

2. Διαγράμματα σ - ϵ χάλυβα και σκυροδέματος κατά του Κανονισμού.

- i. **Σκυρόδεμα** : Υποθέτουμε ότι η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκισμό είναι μηδέν, δηλαδή εξετάζουμε μια διατομή σε θέση ρωγμής. Ως σχέση τάσεων-παραμορφώσεων σε θλίψη χρησιμοποιούμε το απλοποιημένο παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα του Σχ. (2.3) με μέγιστη τάση ίση με : $f_{cd} = \alpha f_{ck} / \gamma_c$

όπου $\gamma_c = 1,5$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας υλικού για το σκυρόδεμα

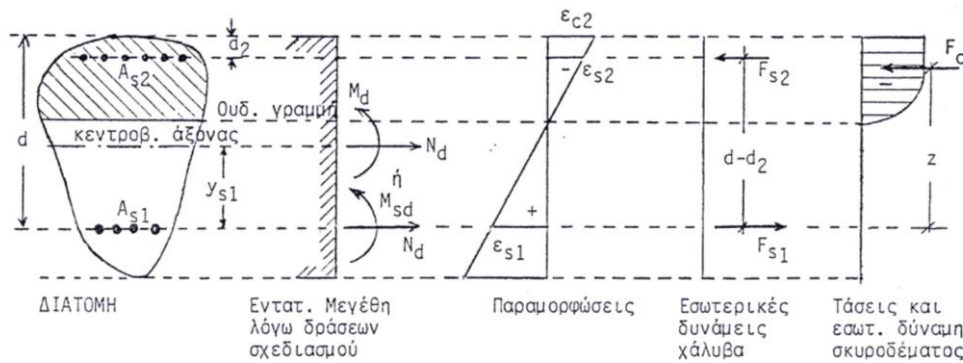
$\alpha = 1$ είναι μειωτικός συντελεστής, λαμβάνοντας την συνιστώμενη τιμή κατά τον Ευρωκώδικα 2, ενώ λαμβάνεται ίσος με $\alpha=0,85$ κατά το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 2 μόνο για τη διαστασιολόγηση με βάση την οριακή κατάσταση αστοχίας σε κάμψη με ορθή δύναμη. Για όλες τις άλλες χρήσεις, εφαρμογές και εντατικές καταστάσεις $\alpha=1$.

Στην μεγαλύτερη θλιβόμενη ίνα η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ισούται με ϵ_{cu2} ή με ϵ_{c2} σε τμήματα της διατομής που έχουν σχεδόν ομοιόμορφη θλιπτική παραμόρφωση, όπως π.χ. στο θλιβόμενο πέλμα κιβωτιοειδών διατομών.

Σε περίπτωση που η διατομή δεν είναι ολόκληρη σε θλίψη, δηλαδή αν η ουδέτερη γραμμή είναι μέσα στη διατομή, τότε επιτρέπεται να γίνει χρήση μίας απλοποιημένης κατανομής τάσεων θλίψης στο σκυρόδεμα, η οποία για f_{ck} μέχρι 50MPa έχει τάση μηδέν στο κάτω 20% του ύψους της θλιβόμενης ζώνης, ενώ στο υπόλοιπο 80% έχει σταθερή τάση ίση με f_{cd} ή με $0,9f_{cd}$ αν το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης ελαττώνεται σε $(1.25-f_{ck}/200)f_{cd}$ και ασκείται στο πάνω $0.8(1.1- f_{ck}/200)$ της θλιβόμενης ζώνης.

- ii. **Χάλυβας** : Γίνεται χρήση του ιδεατού ελαστο-πλαστικού διαγράμματος σ - ϵ του Σχ. (2.7) με Μέτρο Ελαστικότητας, $E_s=200\text{GPa}$, στο αρχικό του τμήμα και τάση διαρροής ίση με $f_{yd}=f_{yk}/\gamma_s$, όπου $\gamma_s=1,15$ είναι ο συντελεστής υλικού για το χάλυβα. Στη μήκυνση του χάλυβα δεν τοποθετείται κάποιο όριο από τον Ευρωκώδικα 2 που να μπορεί να χαρακτηριστεί σαν αστοχία.

3. Ισοδυναμία εσωτερικών τάσεων και εντατικών μεγεθών M και N : Σε κάθε επίπεδη κατανομή των παραμορφώσεων ϵ στην επιφάνεια της διατομής, αντιστοιχεί μία κατανομή των εσωτερικών τάσεων σ , που προσδιορίζεται με βάση τις σχέσεις σ - ϵ του σκυροδέματος και του χάλυβα. Αν η συνισταμένη των τάσεων θλίψης του σκυροδέματος συμβολισθεί με F_c , η θλιπτική δύναμη του χάλυβα που βρίσκεται κοντά στο μεγαλύτερο θλιβόμενο πέλμα με F_{s2} και η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα που είναι πλησιέστερα στο μεγαλύτερο εφελκόμενο ή αλλιώς λιγότερο θλιβόμενο πέλμα με F_{s1} , τότε οι εξισώσεις ισοδυναμίας είναι :



Σχήμα 4.3 Γεωμετρία και εσωτερικές δυνάμεις διατομής σε κάμψη με ορθή δύναμη. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

$$N_d = F_{s1} - F_c = F_{s2} \quad (4.1)$$

και

$$M_{sd} \equiv M_d - y_{s1} N_d = F_c z + F_{s2} (d - d_2) \quad (4.2)$$

όπου M_d , N_d = συνισταμένη ροπή και αξονική δύναμη σχεδιασμού της διατομής ως προς τον κεντροβαρικό της άξονα,

M_{sd} = συνισταμένη ροπή σχεδιασμού της διατομής ως προς τη στάθμη του κέντρου βάρους του εφελκόμενου ή λιγότερο θλιβόμενου χάλυβα,

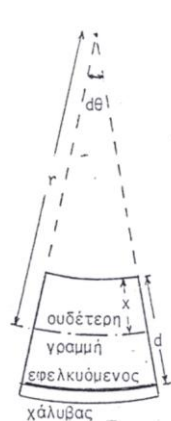
z = μοχλοβραχίονας της συνισταμένης των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος F_c ως προς τη στάθμη του κέντρου βάρους του εφελκόμενου χάλυβα, μετρημένος κάθετα στο διάνυσμα των M_d , M_{sd} , (δες σχήμα 4.3),

d = "στατικό ύψος" της διατομής, δηλαδή απόσταση του εφελκόμενου χάλυβα από την μεγαλύτερη θλιβόμενη ίνα, μετρημένη κάθετα στο διάνυσμα της M_d , (δες σχήμα 4.3),

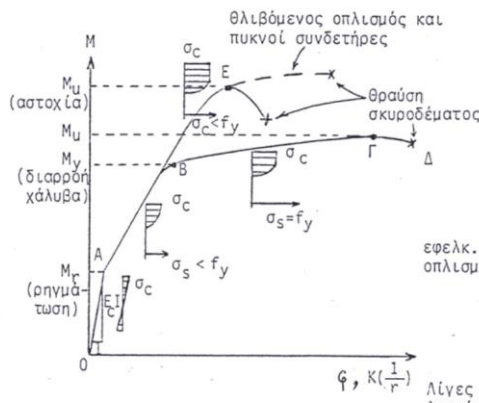
d_2 = απόσταση του μεγαλύτερου θλιβόμενου ή λιγότερο εφελκόμενου χάλυβα από την μεγαλύτερη θλιβόμενη ή λιγότερο εφελκόμενη ίνα, μετρημένη κάθετα στο διάνυσμα της M_d , (δες σχήμα 4.3) και

y_{s1} = απόσταση του μεγαλύτερου εφελκόμενου ή λιγότερο θλιβόμενου χάλυβα από το σημείο αναφοράς των εντατικών μεγεθών σχεδιασμού, M_d και N_d , μετρημένη κάθετα στο διάνυσμα της M_d .

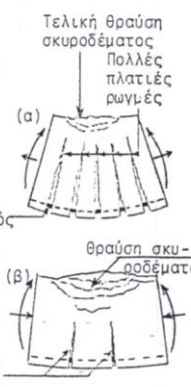
Αν η διατομή και ο οπλισμός της χαρακτηρίζεται από συμμετρία ως προς τον άξονα Oy κάθετο στο διάνυσμα της συνισταμένης ροπής, M_d , τότε έχουμε **μονοαξονική κάμψη**, δηλαδή ο ουδέτερος άξονας είναι παράλληλος στο διάνυσμα της M_d και η συνθήκη ισοδυναμίας εσωτερικών τάσεων με τη μηδενική ροπή, M_y ως προς τον άξονα Oy ικανοποιείται ως ταυτότητα. Διαφορετικά έχουμε **διαξονική κάμψη**, δηλαδή ο ουδέτερος άξονας δεν είναι παράλληλος στο διάνυσμα της συνισταμένης ροπής και η εξίσωση ισοδυναμίας τάσεων με την κάθετη μηδενική συνιστώσα της ροπής δεν αποτελεί ταυτότητα και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατανομής των τάσεων και των παραμορφώσεων στη διατομή.



Σχ. 4.4 Καμπυλότητα μέλους



Σχ. 4.5 Τυπικά διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων σε καθαρή κάμψη



Σχ. 4.6 (α) Καμπτική αστοχία με διαρροή χάλυβα, (β) με θραύση του σκυροδέματος

(Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Σε μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη μέχρι την τελική αστοχία, η συμπεριφορά μίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να αποδοθεί λεπτομερειακώς με τη βοήθεια του διαγράμματος ροπών M -καμπυλοτήτων φ ή K , το οποίο είναι για την καμπτόμενη διατομή ότι το διάγραμμα σ - ϵ για ένα υλικό. Η καμπυλότητα φ ή K , που είναι το αντίστροφο της καμπυλότητας r , ισούται με την πρώτη παράγωγο της γωνίας κλίσης του άξονα του μέλους $d\theta/dx$, (δες σχήμα 4.4). Από την απλή γεωμετρία προκύπτει ότι :

$$\varphi \text{ (ή } K) \equiv \frac{1}{r} \equiv \frac{d\theta}{dx} = \frac{\epsilon_{c2} + \epsilon_{s1}}{d} = \frac{\epsilon_{c2}}{x} \quad (4.3)$$

όπου ϵ_{c2} = βράχυνση της περισσότερο θλιβόμενης ή λιγότερο εφελκόμενης ίνας,

ϵ_{s1} = μήκυνση του περισσότερο εφελκόμενου ή λιγότερο θλιβόμενου οπλισμού,

d = απόσταση του περισσότερο εφελκόμενου από την περισσότερο θλιβόμενη ή λιγότερο εφελκόμενη ίνα και

x = απόσταση της περισσότερο θλιβόμενης ίνας από την ουδέτερη γραμμή, (δες σχήμα 4.4).

Στο Σχ. (4.5) παρουσιάζονται χαρακτηριστικά διαγράμματα, M - φ , για σταθερές τιμές της αξονικής δύναμης, N . Αν η αξονική δύναμη είναι είτε θλιπτική είτε εφελκυστική αλλά μικρού μεγέθους, τότε το σκυρόδεμα είναι αρχικά αρηγματώτο και η κλίση του διαγράμματος, M - φ , ισούται με την ελαστική ακαμψία $E_c I$, όπου E_c είναι το Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος και I η ροπή αδράνειας της αρηγματώτης διατομής. Μόλις η τάση σ_{c1} της περισσότερο εφελκόμενης ίνας σκυροδέματος φθάσει την αντοχή του σκυροδέματος σε καμπτικό εφελκυσμό, $f_{ct,fl}$, τότε το σκυρόδεμα ρηγματώνεται σχεδόν μέχρι την ουδέτερη γραμμή και η δυσκαμψία, δηλαδή η κλίση του διαγράμματος M - φ , γίνεται ίση με αυτή της ρηγματωμένης διατομής, δηλαδή μέρος του διαγράμματος μετά το σημείο A στο Σχ. (4.5). Με την πιο πέρα αύξηση της ροπής και την παρεπόμενη αύξηση των παραμορφώσεων του σκυροδέματος, η κατανομή των θλιπτικών τάσεων σκυροδέματος σ_c καθ' ύψος της θλιβόμενης ζώνης καμπλώνεται σε έντονο βαθμό. Αναλόγως την ποσότητα του

εφελκόμενου χάλυβα και το μέγεθος της αξονικής δύναμης, ενδέχεται να συμβεί μία από τις δύο πιθανότητες :

1. Αστοχία με διαρροή του χάλυβα : Αν το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού είναι σχετικά μικρό και ο συνδυασμός των M και N είναι τέτοιος ώστε η ουδέτερη γραμμή να είναι σχετικά υψηλά στη διατομή, τότε ο χάλυβας της εφελκόμενης ζώνης θα φθάσει την τάση διαρροής, f_y , πριν προλάβει να αστοχήσει το σκυρόδεμα σε θλίψη, δηλαδή στο σημείο B του διαγράμματος στο Σχ. (4.5). Μετά τη διαρροή η παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα θα αυξηθεί πολύ, ενώ η δύναμη του F_{s1} θα παραμείνει σταθερή και ίση με $A_{s1}f_y$, όπου A_{s1} είναι η συνολική διατομή του εφελκόμενου οπλισμού. Λόγω της επιπεδότητας των διατομών, η αύξηση της παραμόρφωσης του εφελκόμενου χάλυβα υπό σταθερή τάση f_y θα προκαλέσει αύξηση των παραμορφώσεων ϵ_c του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, με αποτέλεσμα η κατανομή των τάσεων σκυροδέματος καθ' ύψος της θλιβόμενης ζώνης να γίνει έντονα μη-γραμμική και η μέση τάση του σκυροδέματος να αυξηθεί. Επειδή όμως η εφελκυστική δύναμη F_{s1} του χάλυβα δεν άλλαξε, η ουδέτερη γραμμή θα ανέβει, ώστε να παραμείνει η συνολική θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος F_c σταθερή και να εξακολουθήσει να ισχύει η ισορροπία των δυνάμεων. Στην Εξ. (4.2) έχει υποθεθεί το N_d σταθερό, η δε συμβολή της δύναμης, F_{s2} , του θλιβόμενου χάλυβα είναι γενικά μικρή, οπότε οι μεταβολές της δεν αλλάζουν τη γενική εικόνα. Η άνοδος της ουδέτερης γραμμής θα αυξήσει λίγο το μοχλοβραχίονα z (δες σχήμα 4.3) και επομένως η ροπή M θα αυξηθεί λίγο (δες κλάδος ΒΓ του διαγράμματος $M-\varphi$ στο σχήμα 4.5) Η μέγιστη ροπή θα επιτευχθεί όταν η βράχυνση της περισσότερο θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος ϵ_{c2} , φθάσει την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος, ϵ_{cu2} . Οι μεγάλες παραμορφώσεις του μέλους, δηλαδή βέλη κάμψης, και οι βαθιές και πλατιές ρωγμές που ακολουθούν τη διαρροή του χάλυβα (δες σχήμα 4.6^α), μας "προειδοποιούν" για την τελική αστοχία του μέλους. Επιπλέον, αν η διατομή ανήκει σε ένα υπερστατικό σύστημα και/ή η ένταση δεν προκαλείται από εξωτερικά επιβεβλημένες δυνάμεις αλλά από επιβεβλημένες μετακινήσεις (π.χ. σεισμός), το μεγάλο μήκος του κλάδου ΒΓ δίνει τη δυνατότητα αποφυγής της αστοχίας λόγω ανακατανομής της έντασης σε άλλες διατομές, κ.λ.π. Λόγω όλων των παραπάνω, η αστοχία που αρχίζει με διαρροή του χάλυβα και καταλήγει σε θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος, είναι ο πιο επιθυμητός τρόπος καμπτικής αστοχίας.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 δεν εισάγεται κάποιο κριτήριο αστοχίας του χάλυβα σε εφελκυσμό και θεωρείται ότι η παραμόρφωση ϵ_{s1} μπορεί να αυξηθεί επ' άπειρον, μέχρις ότου αστοχήσει το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης σε θλίψη, δηλαδή μέχρι τη μέγιστη ροπή που μπορεί να αντέξει η διατομή.

2. Αστοχία χωρίς διαρροή του χάλυβα: Για μεγάλα ποσοστά εφελκόμενου οπλισμού ή για συνδυασμό M και N τέτοιο ώστε η ουδέτερη γραμμή να είναι χαμηλά ή έξω από τη διατομή, το σκυρόδεμα θα φθάσει την παραμόρφωση αστοχίας του $\epsilon_{cu2}=0,0035$, πριν διαρρεύσει ο εφελκόμενος χάλυβας (δες σημείο E του διαγράμματος $M-\varphi$ στο σχήμα 4.5). Αν δεν υπάρχει θλιβόμενος οπλισμός, δηλαδή αν τα A_{s2} και F_{s2} στο Σχ. (4.3) είναι μηδέν και αν το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης δεν περισφίγγεται από πυκνούς κλειστούς συνδετήρες εγκάρσιους στη διεύθυνση των ορθών τάσεων, η θραύση του σκυροδέματος θα είναι ψαθυρή, δηλαδή απότομη. Λόγω ότι τα βέλη κάμψης του μέλους και τα πλάτη των ρωγμών είναι ανάλογα της μήκυνσης του εφελκόμενου χάλυβα ϵ_{s1} , που σε αυτόν τον τρόπο αστοχίας είναι μικρή, η θραύση γίνεται "χωρίς προειδοποίηση". Επιπροσθέτως, η απότομη αστοχία σε μικρές παραμορφώσεις δε δίνει τη δυνατότητα ανακατανομής της έντασης σε άλλες διατομές. Για τους λόγους αυτούς, είναι ανεπιθύμητος αυτός ο τρόπος αστοχίας.

Για το λόγο ότι η βράχυνση διαρροής του χάλυβα, περίπου 0,25% για S500, είναι σημαντικά μικρότερη από τη βράχυνση αστοχίας του σκυροδέματος που είναι 0,35%, ο θλιβόμενος οπλισμός που βρίσκεται κοντά στις περισσότερο θλιβόμενες ίνες του σκυροδέματος, θα διαρρεύσει πριν την τελική αστοχία του τελευταίου. Πολλές φορές, λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης μεταξύ των συνδετήρων και της εγκάρσιας προς τη διεύθυνση της θλίψης διόγκωσης του σκυροδέματος κατά Poisson, οι ράβδοι του θλιβόμενου οπλισμού λυγίζουν.

Ανάμεσα στους δύο παραπάνω τρόπους αστοχίας καθορίζεται ποιος από αυτούς θα συμβεί, από τη θέση της ουδέτερης γραμμής στην αστοχία, σε σύγκριση με αυτήν που αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα, $\varepsilon_{s1}=f_{yd}/E_s \approx 0,217\%$ για χάλυβα S500, και αστοχία της περισσότερο θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος σε θλίψη, $\varepsilon_{cu2}=0,35\%$. Αυτή η θέση βρίσκεται από τη γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων ε καθ' ύψος της διατομής (δες σχήμα 4.7) και τα όμοια τρίγωνα :

$$\xi_{lim} \equiv \frac{x_{lim}}{d} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \frac{f_{yd}}{E_s}} = 0,617 \text{ για S500} \quad (4.4)$$

Όταν λοιπόν η τιμή του $\xi=x/d$ είναι μεγαλύτερη από τις παραπάνω οριακές τιμές, τότε η αστοχία θα συμβεί με θραύση του σκυροδέματος. Όταν η αξονική δύναμη, N , είναι θλιπτική και σχετικά μεγάλη, δηλαδή όταν η ανηγμένη εκκεντρότητα, M/N_d , είναι μικρή, δεν μπορούμε να κάνουμε τίποτα για να αποφύγουμε αυτόν τον ανεπιθύμητο τρόπο αστοχίας. Για καθαρή κάμψη όμως, δηλαδή για $N=0$, είναι εύκολο να πετύχουμε τον επιθυμητό τρόπο αστοχίας που αρχίζει με διαρροή του χάλυβα, με το να επιλέξουμε τέτοιες διαστάσεις διατομής ώστε, για δοσμένη ροπή κάμψης, M_{sd} , να περιορίσουμε το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού κάτω από αυτό της "ισοζυγισμένης διατομής", δηλαδή εκείνης στην οποία συμβαίνει ταυτόχρονα διαρροή του χάλυβα και αστοχία του σκυροδέματος. Ο Αμερικάνικος Κανονισμός κατασκευών σκυροδέματος ACI 318 απαγορεύει, μάλιστα, για καθαρή κάμψη ποσοστό εφελκόμενου χάλυβα μεγαλύτερο από το 75% αυτού της ισοζυγισμένης διατομής. Με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο ψαθυρός τρόπος θραύσης, ακόμα και αν το πραγματικό όριο διαρροής του χάλυβα, λόγω στατιστικής διασποράς, είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τη χαρακτηριστική τιμή, f_{yk} .

Οφείλουμε να αναφέρουμε και έναν τρίτο, σπάνιο μεν, τρόπο αστοχίας, αλλά καταστροφικό στις συνέπειές του γιατί είναι εξαιρετικά ψαθυρός. Πολλές φορές, για π.χ. αρχιτεκτονικούς λόγους, οι διαστάσεις της διατομής είναι πολύ μεγαλύτερες απ' όσο χρειάζεται για λόγους αντοχής. Τότε μπορεί το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού να είναι τόσο χαμηλό, που η ροπή θραύσης, M_u , της διατομής να είναι μικρότερη από τη ροπή ρηγμάτωσης, M_r , του σκυροδέματος (δες σχήμα 4.5). Σε αυτή την περίπτωση, αν η εξωτερική φόρτιση, πιθανόν σε συνδυασμό με τυχόν εφελκυστικές τάσεις λόγω παρεμπόδισης παραμορφώσεων από θερμοκρασία ή συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος, προκαλέσει τη ρηγμάτωση της διατομής, η εφελκυστική δύναμη που απελευθερώνεται από το σκυροδέμα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που μπορεί να αντέξει ο λίγος οπλισμός. Με άλλα λόγια, η πρώτη ρωγμή που θα συμβεί οδηγεί σε **απότομη θραύση** του οπλισμού χωρίς καμία προειδοποίηση.

Για να αποφύγουμε αυτόν τον εξαιρετικά επικίνδυνο τρόπο αστοχίας, απαιτείται ένα **ελάχιστο ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού**, ρ_{min} , τέτοιο ώστε ο οπλισμός αυτός να είναι σε θέση να παραλάβει την εφελκυστική δύναμη που ελευθερώνεται με τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Δηλαδή πρέπει να προβλέπεται ελάχιστος οπλισμός, $A_{s,min}$, τέτοιος ώστε η τιμή σχεδιασμού της δύναμης διαρροής του, $A_{s,min}f_{yd}$, να ξεπερνά τη συνισταμένη των εφελκυστικών τάσεων του σκυροδέματος στην εφελκόμενη ζώνη πριν τη ρηγμάτωση.

Δεδομένου ότι μέχρι και τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής είναι γραμμική με μέγιστη τάση στην ακραία εφελκόμενη ίνα το πολύ ίση με τη μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, f_{ctm} , η συνολική εφελκυστική δύναμη που ελευθερώνεται κατά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος ισούται με $f_{ctm}b(h-x)_I/z$, όπου $(h-x)_I$ είναι το ύψος της εφελκόμενης ζώνης πριν τη ρηγμάτωση. Σε ορθογωνική διατομή είναι $(h-x)_I=h/2$, οπότε χρειάζεται $A_{s,min}f_{yd} \geq 0,5f_{ctm}bh/2=0,25 f_{ctm}bh$. Η συνθήκη αυτή δίνει για το ελάχιστο γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού ρ_{min} , ανηγμένο στον στατικό ύψος d της διατομής :

$\rho_{min}=A_{s,min}/bd \geq 0,25(f_{ctm}/f_{yd})(h/d)$, δηλαδή για $d/h \approx 0,90$ περίπου το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού πλακών κατά Ευρωκώδικα 2, που είναι :

$$\rho_{min} = \frac{A_{s,min}}{bd} = 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \geq 0.0013 \quad (4.5)$$

4.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΑΠΛΟ ΟΠΛΙΣΜΟ, ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΑΣ

Οι πλάκες και οι δοκοί καταπονούνται κατά κανόνα σε μονοαξονική κάμψη με μικρή ή και μηδενική αξονική δύναμη. Έτσι στα καμπτόμενα αυτά στοιχεία η κάμψη, σε συνδυασμό με την τυχόν αξονική δύναμη, προκαλεί εφελκυσμό στη μία πλευρά της διατομής και θλίψη στην απέναντι. Στην εφελκόμενη πλευρά ή πέλμα της διατομής τοποθετείται οπλισμός, ενώ στην αντίθετη δεν είναι απαραίτητος. Στην περίπτωση που τοποθετείται οπλισμός και στη θλιβόμενη πλευρά της διατομής, π.χ. για κατασκευαστικούς λόγους, ή επειδή από κάποιο άλλο συνδυασμό δράσεων προκαλείται και στην πλευρά αυτή εφελκυσμός, ο οπλισμός αυτός, σε πρώτη και συντηρητική προσέγγιση, αγνοείται, όταν διαστασιολογείται ο εφελκόμενος οπλισμός της πρώτης πλευράς.

Στη διαδικασία διαστασιολόγησης ορθογωνικών διατομών σε κάμψη με αξονική δύναμη, είναι συνήθως δοσμένα το πλάτος b και τα ύψη d ("στατικό ύψος") και συνολικό ύψος h και ζητείται ο εφελκόμενος οπλισμός, A_{s1} , ή απλώς A_s , εφόσον δεν θεωρείται ότι υπάρχει θλιβόμενος οπλισμός. Οι εξισώσεις ισοδυναμίας, Εξ. (4.1) και (4.2), γίνονται :

$$N_d = F_{s1} - F_c \quad (4.6)$$

$$M_{sd} \equiv M_d - y_{s1}N_d = F_c z \quad (4.7)$$

Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος είναι :

$$F_c = \int_0^x b \sigma_c dy = b \int_0^x \sigma_c dy \equiv \alpha b x f_{cd} \quad (4.8)$$

όπου y = απόσταση της θλιβόμενης ίνας από την ουδέτερη γραμμή,

σ_c = τάση θλίψης του σκυροδέματος στην ίνα y , συνάρτηση της παραμόρφωσης ϵ_c στη θέση αυτή, η οποία ισούται με : $\epsilon_c=(y/x)\epsilon_{c2}$,

α = "συντελεστής πληρότητας", που ισούται με το λόγο της μέσης τάσης σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη προς τη μέγιστη τάση θλίψης στη ζώνη αυτή, δηλαδή προς το f_{cd} :

$$a = \frac{1}{x} \int_0^x \frac{\sigma_c dy}{f_{cd}} = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \quad (4.9)$$

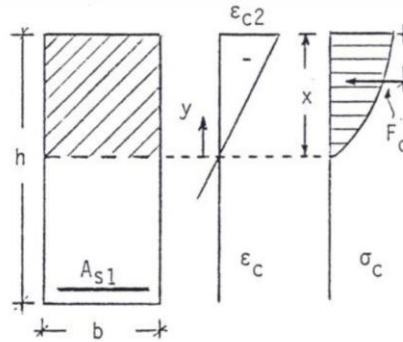
Αν αντί του παραβολικού-ορθογωνικού διαγράμματος, σ - ε , για το σκυρόδεμα, χρησιμοποιηθεί το απλοποιημένο ορθογωνικό διάγραμμα του Σχ. (4.2), τότε η τιμή του a ισούται με 0,80 και είναι σχεδόν ίση με την τιμή $a=0,81$ που προκύπτει από την Εξ. (4.9) για $\varepsilon_{cu2}=0,0035$.

Η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα είναι:

$$F_{s1} = A_{s1}\sigma_{s1} = A_{s1}f_{yd} \text{ εφόσον } \varepsilon_{s1} > \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (4.10)$$

Τέλος η θέση της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος ορίζεται από την απόσταση της από την περισσότερο θλιβόμενη ίνα a , που ισούται με :

$$a \equiv kx \equiv \left(1 - \frac{\int_0^x y\sigma_y dy}{x \int_0^x \sigma_y dy}\right) x \quad (4.11)$$



Σχήμα 4.7 Δύναμη θλίψης σκυροδέματος στη διατομή. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Ο συντελεστής θέσης k , δίνεται από την Εξ. (4.12) :

$$k \equiv \frac{1 - 2 \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{4\varepsilon_{cu2}}\right)}{2 \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}\right)} \quad (4.12)$$

Η Εξ. (4.12) ισχύει για το παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα σ - ε του σκυροδέματος. Αν αντί αυτού χρησιμοποιηθεί το απλοποιημένο ορθογωνικό διάγραμμα του Σχ. (4.2), τότε η τιμή του k είναι ανεξάρτητη από το ε_{cu2} και ίση με 0,40. Η τιμή αυτή διαφέρει ελάχιστα από την τιμή $k=0,416$ που δίνει η Εξ. (4.12) για $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$, οπότε $\varepsilon_{c2} = 0,002$, $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$.

Ο μοχλοβραχίονας της F_c ως προς τη στάθμη του εφελκυσμένου χάλυβα είναι :

$$z = d - a = d - kx = d - k\xi d = (1 - k\xi)d \equiv \zeta d \quad (4.13)$$

$$\text{όπου } \zeta \equiv 1 - k\xi \quad (4.14)$$

Συνδυάζοντας τις ανωτέρω σχέσεις βρίσκουμε:

$$M_{sd} = \alpha b \xi d (f_{cd}) (1 - k\xi) d \quad (4.15)$$

$$\text{ή } \mu_{sd} \equiv M_{sd} / b d^2 f_{cd} = \alpha \xi (1 - k\xi) d = \alpha \xi \zeta \quad (4.16)$$

Επίσης, οι Εξ. (4.6), (4.7) και (4.10) δίνουν :

$$A_{s1}f_{yd} = F_c + N_d = (M_{sd}/z) + N_d \quad (4.17)$$

$$\eta \quad \rho_1 \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \frac{\mu_{sd}}{\zeta} + v_d \quad (4.18)$$

όπου $\mu_{sd} \equiv M_{sd}/bd^2f_{cd}$ και $v_d \equiv N_d/bdf_{cd}$ είναι η ανηγμένη αδιάστατη ροπή και η αξονική δύναμη αντίστοιχα.

$\rho_1 = A_{s1}/bd$ είναι το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού.

Η διαδικασία διαστασιολόγησης απλοποιείται εφόσον το μοναδικό κριτήριο αστοχίας είναι η οριακή βράχυνση του σκυροδέματος, που για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ ισούται με $\epsilon_{cu2} = 0,0035$ και δεν τίθεται περιορισμός στο μέγεθος της ϵ_{s1} . Τότε για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ είναι $\alpha = 0,81$ και $k = 0,416$, οπότε η Εξ. (4.16) δίνει:

$$\frac{\mu_{sd}}{\zeta} = \alpha \xi = 0,81 \xi \quad (4.16^a)$$

Ενώ, η Εξ. (4.18) δίνει :

$$\frac{\mu_{sd}}{\zeta} = \omega_1 - v_d \quad (4.18^a)$$

$$\text{όπου } \omega_1 = \rho_1 \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (4.19)$$

Το **μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου χάλυβα** , δηλαδή το ποσοστό της διατομής σκυροδέματος που αντιστοιχεί στην ίδια αντοχή με το εφελκόμενο χάλυβα. Οι Εξ. (4.16^a) και (4.18^b) δίνουν το ξ για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$:

$$\xi = (\omega_1 - v_d)/0,81$$

οπότε η Εξ. (4.18^a), με $\zeta = 1 - k\xi = 1 - 0,416\xi$, δίνει για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$:

$$\mu_{sd} = (\omega_1 - v_d)(1 - 0,514(\omega_1 - v_d)) \quad (4.20)$$

Η Εξ. (4.20) είναι δευτεροβάθμια ως προς $(\omega_1 - v_d)$ και δίνει για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ την σχέση :

$$\omega_1 = 0,973 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\mu_{sd}}{0,973}} \right) + v_d \quad (4.21)$$

Στην πιο γενικευμένη περίπτωση χωρίς τον περιορισμό $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$, είναι :

$$\omega_1 = \frac{\alpha}{2k} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4k}{\alpha} \mu_{sd}} \right) + v_d \quad (4.21^a)$$

όπου τα α και k δίνονται από τις Εξ. (4.9) και (4.12) αντίστοιχα.

Αν, αντί του ακριβέστερου παραβολικού-ορθογωνικού διαγράμματος σ - ϵ του σκυροδέματος και της αντίστοιχης κατανομής τάσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, ληφθεί το απλοποιημένο ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων στο πάνω 80% της θλιβόμενης ζώνης κατά το Σχ. (4.2), τότε ο συντελεστής 0,973 στην Εξ. (4.21) αντικαθίσταται με 1,0 :

$$\omega_1 = 1 - \sqrt{1 - \mu_{sd}} + v_d \quad (4.21^b)$$

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού δεν ισχύει για κεντρικό ή έκκεντρο εφελκυσμό και για έκκεντρη θλίψη με θλιπτικές τάσεις σε όλο το ύψος της διατομής. Επιπλέον, όταν στην αστοχία της διατομής είναι $\varepsilon_{s1} < f_{yd}/E_s$, τοποθετούμε πάντα διπλό οπλισμό, δηλαδή είναι $A_{s2} \neq 0$. Για χάλυβα S500 και $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$, το όριο τοποθέτησης διπλού οπλισμού είναι :

$$\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s = 500/(1,15 \times 200000) = 0,00217 \quad (4.22)$$

$$\xi > \xi_{lim} = \varepsilon_{cu,2}/(\varepsilon_{cu,2} + \varepsilon_{yd}) = 0,0035/(0,0035 + 0,00217) = 0,617 \quad (4.23)$$

$$\zeta > \zeta_{lim} = 1 - 0,416\xi_{lim} = 0,743 \quad (4.24)$$

$$\mu_{sd} > \mu_{sd,lim} = 0,81\zeta_{lim}\xi_{lim} = 0,371 \quad (4.25)$$

μ_{sd}	Παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα σ-ε				Σταθερή τάση σκυροδέματος στο 0.8x			
	$\varepsilon_{s1}(\%)$	$\xi=x/d$	$\zeta=z/d$	ω_1-v_d	$\varepsilon_{s1}(\%)$	$\xi=x/d$	$\zeta=z/d$	ω_1-v_d
0,04	6,585	0,050	0,979	0,041	6,507	0,051	0,980	0,041
0,05	5,167	0,063	0,974	0,051	5,106	0,064	0,974	0,051
0,06	4,222	0,077	0,968	0,062	4,172	0,077	0,969	0,062
0,07	3,546	0,090	0,963	0,073	3,505	0,091	0,964	0,073
0,08	3,040	0,103	0,957	0,084	3,004	0,104	0,958	0,083
0,09	2,645	0,117	0,951	0,095	2,614	0,118	0,953	0,094
0,1	2,329	0,131	0,946	0,106	2,302	0,132	0,947	0,106
0,11	2,071	0,145	0,940	0,117	2,047	0,146	0,942	0,117
0,12	1,855	0,159	0,934	0,128	1,834	0,160	0,936	0,128
0,13	1,673	0,173	0,928	0,140	1,653	0,175	0,930	0,140
0,14	1,516	0,188	0,922	0,152	1,499	0,189	0,924	0,151
0,15	1,380	0,202	0,916	0,164	1,364	0,204	0,918	0,163
0,16	1,261	0,217	0,910	0,176	1,247	0,219	0,912	0,175
0,17	1,155	0,232	0,903	0,188	1,143	0,234	0,906	0,188
0,18	1,062	0,248	0,897	0,201	1,050	0,250	0,900	0,200
0,19	0,978	0,264	0,890	0,213	0,967	0,266	0,894	0,213
0,2	0,902	0,280	0,884	0,226	0,892	0,282	0,887	0,225
0,21	0,833	0,296	0,877	0,239	0,824	0,298	0,881	0,238
0,22	0,771	0,312	0,870	0,253	0,763	0,315	0,874	0,252
0,23	0,713	0,329	0,863	0,266	0,706	0,331	0,867	0,265
0,24	0,660	0,346	0,856	0,280	0,654	0,349	0,861	0,279
0,25	0,612	0,364	0,849	0,295	0,606	0,366	0,854	0,293
0,26	0,567	0,382	0,841	0,309	0,562	0,384	0,846	0,307
0,27	0,525	0,400	0,834	0,324	0,520	0,402	0,839	0,322
0,28	0,486	0,419	0,826	0,339	0,482	0,421	0,832	0,337
0,29	0,449	0,438	0,818	0,355	0,446	0,440	0,824	0,352
0,3	0,415	0,458	0,810	0,371	0,412	0,459	0,816	0,368
0,31	0,382	0,478	0,801	0,387	0,380	0,479	0,808	0,384
0,32	0,352	0,499	0,793	0,404	0,350	0,500	0,800	0,400
0,33	0,323	0,520	0,784	0,421	0,322	0,521	0,792	0,417
0,34	0,295	0,542	0,774	0,439	0,295	0,543	0,783	0,434
0,35	0,269	0,565	0,765	0,458	0,269	0,565	0,774	0,452
0,36	0,244	0,589	0,755	0,477	0,245	0,589	0,765	0,471
0,37	0,220	0,614	0,745	0,497	0,221	0,613	0,755	0,490

Πίνακας 4.1 Γενικός πίνακας διαστασιολόγησης διατομών με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη και απλό οπλισμό σε μονοαξονική κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Στις περιπτώσεις που χρειάζεται μόνον απλός οπλισμός, δηλαδή εφελκυσμένος, για $0 \leq \mu_{sd} \leq \mu_{sd,lim}$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο γενικός πίνακας διαστασιολόγησης, Πιν. (4.1). Οι στήλες 2 μέχρι 5 αφορούν τη χρήση του παραβολικού-ορθογωνικού διαγράμματος σ-ε κατά το Σχ. (2.2) και οι στήλες 6 με 9 την ορθογωνική κατανομή τάσεων στο πάνω 80% της

θλιβόμενης ζώνης. Ο Πιν. (4.1) δίνει στην 5^η στήλη απευθείας τη διαφορά του μηχανικού ποσοστού οπλισμού, ω_1 , δηλαδή του γινομένου του γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού επί f_{yd}/f_{cd} , μείον το $v_d=N_d/bdf_{cd}$ ($N_d>0$ για εφελκυσμό) από την Εξ. (4.21), ενώ η στήλη 9 δίνει την αντίστοιχη τιμή από την Εξ. (4.21^α). Έτσι η συνολική απαιτούμενη ποσότητα οπλισμού, A_{s1} , είναι :

$$A_{s1} = \omega bd(f_{cd}/f_{yd}) \quad (4.26)$$

Από την άποψη πρακτικής χρησιμότητας, η πιο σημαντική πληροφορία που δίνει ο Πιν. (4.1) είναι η αντιστοιχία μεταξύ ανηγμένης ροπής σχεδιασμού, μ_{sd} , και μηχανικού ποσοστού εφελκυσμένου οπλισμού, ω_1 , που απαιτείται για να μην παραβιασθεί το κριτήριο αστοχίας του σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu2}=0,35\%$.

Στον Πιν. (4.1) δίνονται πρόσθετες πληροφορίες για την κατάσταση της διατομής στην οριακή κατάσταση αστοχίας, όπως η παραμόρφωση, ε_{s1} , του εφελκυσμένου οπλισμού, το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ , και ο ανηγμένος μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, ζ .

Οι τιμές της μ_{sd} για τις οποίες συμβαίνει ταυτόχρονη διαρροή χάλυβα και θραύση σκυροδέματος, δηλαδή οι τιμές της $\mu_{sd,lim}$ υπολογίστηκαν με την υπόθεση ότι ο χάλυβας διαρρέει σε τάση σ_{s1} ίση με f_{yd} , που είναι 30% περίπου μικρότερη από τη μέση τάση διαρροής, f_{ym} .

Σαφώς, αντίστοιχο και μάλιστα μεγαλύτερο περιθώριο υπάρχει και μεταξύ f_{cd} και $f_{cm}=f_{ck}+8$ (MPa). Επειδή όμως, η αντοχή του σκυροδέματος έχει πολύ μεγαλύτερη φυσική και στατιστική διασπορά από αυτήν του χάλυβα, σε μια πραγματική διατομή υπάρχει το ενδεχόμενο να αστοχήσει το σκυρόδεμα πριν τη διαρροή του χάλυβα για μία τιμή της ανηγμένης ροπής μ_{sd} σημαντικά μικρότερη από την $\mu_{sd,lim}$. Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αυτό, θεμιτό είναι να τηρείται ένα σημαντικό περιθώριο ασφαλείας μεταξύ μ_{sd} και $\mu_{sd,lim}$. Πιο συγκεκριμένα, για την ικανοποιητική πλαστιμότητα της διατομής πρέπει να εκλέγεται το στατικό ύψος d τέτοιο ώστε το $\mu_{sd} = M_{sd}/bd^2f_{cd}$ ή ισοδύναμα το $\xi=x/d$ και το ω , να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Η απαίτηση του Αμερικάνικου Κανονισμού κατασκευών από σκυρόδεμα ACI-318 να περιορίζεται το ποσοστό οπλισμού ω σε 75% της τιμής που αντιστοιχεί στο $\mu_{sd,lim}$, αντιστοιχεί σε μικρότερες τιμές της οριακής ανηγμένης ροπής. Συνιστάται, λοιπόν, να επιλέγεται στατικό ύψος d έτσι ώστε να τηρείται το μ_{sd} αρκετά μικρότερο από την ανωτέρω οριακή τιμή $\mu_{sd,lim}$. Αν αυτό δεν είναι εφικτό χρειάζεται να τοποθετείται θλιβόμενος οπλισμός. Προς την κατεύθυνση αυτή λειτουργεί όμως η ανώτατη τιμή του ποσοστού οπλισμού που θέτουν οι Κανονισμοί.

Κλείνοντας την ανάπτυξη του σημαντικού θέματος της διαστασιολόγησης ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη, με απλό (μόνο εφελκυσμένο) οπλισμό, κρίνεται αναγκαίο να τονισθεί το φυσικό νόημα του βασικού αποτελέσματος της πιο πάνω ανάπτυξης, εστιάζοντας στην απλούστερη, αλλά και πρακτικά στην πιο συνηθισμένη περίπτωση της καθαρής κάμψης, δηλαδή της κάμψης χωρίς αξονική δύναμη ($N_d=0$, $v_d=0$) : Το βασικό ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του εφελκυσμένου οπλισμού που απαιτείται για να μπορεί να αναλάβει η διατομή τη δοσμένη ροπή σχεδιασμού, M_{sd} , ή την αδιάστατη μ_{sd} , χωρίς αστοχία των υλικών, δηλαδή χωρίς να ξεπερασθεί η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος, $\varepsilon_{cu2}=0,35\%$. Η αποδοχή της, M_{sd} , γίνεται με ζεύγος δύο ίσων και αντιθέτων εσωτερικών δυνάμεων, της εφελκυστικής δύναμης, $A_{s1}f_{yd}$, του χάλυβα σε αδιάστατη μορφή δύναμης, $\omega_1=(A_{s1}/bd)(f_{yd}/f_{cd})$, ίσης και αντίθετης θλιπτικής του σκυροδέματος. Το μέγεθος του μοχλοβραχίονα, z , δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στο μέγεθος της M_{sd} . Το z κυμαίνεται για τις συνηθεις τιμές της μ_{sd} γύρω στον $0,85d$ ($\zeta \approx 0,85$), με ακραίες τιμές γύρω στο $0,8d$ όταν

η ροπή είναι μεγάλη, δηλαδή $\mu_{sd}=0,31$ και συνηθέστερες γύρω στο $0,9d$ όταν $\mu_{sd}=0,175$. Έτσι το ω_1 μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά ως μ_{sd}/ζ με $\zeta \approx 0,85$ ή $0,9$ (ισοδύναμα το A_{s1} ως $M_{sd}/z f_{yd}$ με $z \approx 0,85d$ ή $0,9d$), ή ακριβώς κατά τις Εξ. (4.21) και (4.21^α) που λαμβάνουν υπόψη το ότι όσο αυξάνεται η μ_{sd} μειώνεται ο ανηγμένος μοχλοβραχίονας ζ , επειδή αυξάνεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης για να μπορέσει το σκυρόδεμα να αναπτύξει δύναμη ίση και αντίθετη με την $A_{s1} f_{yd}$, δηλαδή αδιάστατα ίση με ω_1 . Επισημαίνεται ότι επειδή η ανηγμένη θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος ισούται με ω_1 , το ω_1 εκτός από το μηχανικά ισοδύναμο με το χάλυβα, από άποψης αντοχής, κλάσμα της διατομής του σκυροδέματος και το ποσοστό του στατικού ύψους d που χρειάζεται να ενεργοποιηθεί σε θλίψη με ομοιόμορφη τάση, f_{cd} , για να γίνει αποδοχή της ανηγμένης ροπής μ_{sd} . Υπενθυμίζεται ότι επειδή $\omega_1=0,81\zeta$, το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης ισούται με $\xi=1,236\omega_1$. Από αυτή τη ματιά, είναι προφανές ότι μεγάλες τιμές του ω_1 δεν είναι ανεκτές από απόψεως επάρκειας του σκυροδέματος της διατομής, καθώς οδηγούν σε μη-ρεαλιστικό ύψος της θλιβόμενης ζώνης.

4.5 ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕ ΑΣΥΜΜΕΤΡΟ ΔΙΠΛΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΣΕ ΑΠΛΗ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ

Με στόχο να βοηθήσει το σκυρόδεμα στη ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων, από οικονομικής πλευράς, δεν συνιστάται η τοποθέτηση οπλισμού στη θλιβόμενη ζώνη, γιατί για την ανάληψη της ίδιας θλιπτικής δύναμης, ο χάλυβας είναι τρεις φορές περίπου ακριβότερος από το σκυρόδεμα. Γι' αυτό συμφέρει καλύτερα να αυξηθεί το ύψος της διατομής, παρά να χρησιμοποιηθεί θλιβόμενος οπλισμός. Άρα, ο θλιβόμενος οπλισμός πέρα από τη συμβολή του στην αντοχή της θλιβόμενης ζώνης, προφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, αυξάνει την πλαστιμότητα της διατομής με το να συμβάλλει στην περισφιγξη του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης και με το να μειώνει το ύψος x της τελευταίας, επειδή η δύναμη θλίψης, F_c , του σκυροδέματος μειώνεται με την παρουσία του θλιβόμενου οπλισμού, γεγονός που αυξάνει την καμπυλότητα στη θραύση, φ_u , η οποία ισούται με $\varphi_u = \varepsilon_{cu}/x = 0,0035/x$ (δες εξίσωση 4.3). Επίσης, ο θλιβόμενος οπλισμός μειώνει τα βέλη κάμψης υπό τα φορτία λειτουργίας με το να αυξάνει τη δυσκαμψία της διατομής.

Σε διατομές με μεγάλη εκκεντρότητα αξονικής δύναμης τοποθετείται σχεδόν πάντα θλιβόμενος οπλισμός, όπως π.χ. ο κατασκευαστικός οπλισμός στο πάνω πέλμα στο άνοιγμα δοκών, ο οπλισμός κάτω πέλματος στις ενδιάμεσες στηρίξεις συνεχών ανοιγμάτων δοκών, ο διπλός οπλισμός στα ζυγώματα πλαισίων για την περίπτωση αλλαγής πρόσημου της ροπής λόγω αλλαγής διεύθυνσης των οριζοντίων φορτίων, κ.λ.π. Ωστόσο και επί το ασφαλέστερον, ο θλιβόμενος οπλισμός αγνοείται κατά κανόνα στον υπολογισμό του εφελκόμενου, εκτός αν ο θλιβόμενος οπλισμός είναι απαραίτητος, δηλαδή αν χωρίς το συνυπολογισμό του θλιβόμενου οπλισμού η διατομή δεν έχει επαρκή αντοχή.

Ο υπολογισμός του θλιβόμενου οπλισμού A_{s2} του απαιτούμενου θλιβόμενου οπλισμού γίνεται ως εξής: η ροπή, M_{sd} , ή μ_{sd} , αναλαμβάνεται από ζεύγος που σχηματίζει ο εφελκόμενος χάλυβας με τη θλιβόμενη ζώνη, στην οποία επιπλέον, υπάρχει και θλιβόμενος χάλυβας: Αρχικά εκλέγεται η οριακή τιμή της ανηγμένης ροπής πέραν από την οποία τοποθετείται θλιβόμενος οπλισμός. Η τιμή αυτή πρέπει να είναι μικρότερη από την $\mu_{sd,lim}$ που προκαλεί ταυτόχρονη διαρροή χάλυβα και θραύση του σκυροδέματος. Όταν, λοιπόν, είναι $\mu_{sd} > \mu_{sd,lim}$, αναθέτουμε την ανάληψη της ανηγμένης ροπής $\mu_{sd,lim}$ στο σκυρόδεμα με $\varepsilon_{cu2}=0,35\%$, ύψος θλιβόμενης ζώνης ξ_{limd} και μοχλοβραχίονα εσωτερικών δυνάμεων, ζ_{limd} , όπου τα ξ_{lim} και ζ_{lim} δίνονται από τις Εξ.(4.23) και (4.24) για χάλυβα S500 και τον εφελκόμενο χάλυβα με $\sigma_{s1}=f_{yd}$. Η υπόλοιπη ανοιγμένη ροπή ίση με $\Delta\mu_{sd} = \mu_{sd} - \mu_{sd,lim}$, παραλαμβάνεται από το ζεύγος εσωτερικών δυνάμεων που σχηματίζεται από τη δύναμη του θλιβόμενου χάλυβα

$F_{s2}=A_{s2}\sigma_{s2}$ και τη δύναμη του υπολοίπου εφελκόμενου, που ισούται με $\Delta F_{s1}= \Delta A_{s1}\sigma_{s1} = F_{s2}$. Ο μοχλοβραχίονας αυτού του ζεύγους είναι $d-d_2$. Επομένως :

$$A_{s1} = \frac{1}{f_{yd}} \left(\frac{\mu_{sd,lim} b d^2 f_{cd}}{\zeta_{lim} d} + \frac{\Delta \mu_{sd} b d^2 f_{cd}}{d-d_2} + N_d \right) = \frac{b d f_{cd}}{f_{yd}} \left(\frac{\mu_{sd,lim}}{\zeta_{lim}} + \frac{\Delta \mu_{sd}}{1-\frac{d_2}{d}} + v_d \right) \quad (4.27)$$

$$\text{και} \quad A_{s2} = \frac{b d f_{cd}}{\sigma_{s2}} \frac{\Delta \mu_{sd}}{1-\frac{d_2}{d}} \quad (4.28)$$

όπου η τάση, σ_{s2} , του θλιβόμενου χάλυβα βρίσκεται από την τιμή του ε_{s2} που δίνει το γενικό διάγραμμα διαστασιολόγησης για τα συγκεκριμένα $\mu_{sd,lim}$ και d_2/d . Για συνήθεις συνδυασμούς τιμών $\mu_{sd,lim}$ και d_2/d είναι $\sigma_{s2}= f_{yd}$. Ο λόγος $\mu_{sd,lim}/\zeta_{lim}$ ισούται με την τιμή $(\omega_1 - v_d)_{lim}$ του $(\omega_1 - v_d)$, που αντιστοιχεί στην οριακή τιμή του μ_{sd} πέρα από την οποία τοποθετείται θλιβόμενος οπλισμός. Η τιμή αυτή ισούται με 0,371 για χάλυβα S500.

Σε αδιάστατη μορφή οι Εξ. (4.27) και (4.28) γράφονται :

$$\omega_1 = (\omega_1 - v_d)_{lim} + \frac{\mu_{sd} - \mu_{sd,lim}}{1-\frac{d_2}{d}} + v_d \quad (4.27^a)$$

$$\omega_2 = \frac{\mu_{sd} - \mu_{sd,lim}}{1-\frac{d_2}{d}} \quad (4.28^a)$$

Κατά κανόνα η τιμή του λόγου, d_2/d , είναι μικρή και η τιμή του, $1- d_2/d$, είναι μεγαλύτερη αυτής του ζ_{lim} , που ισούται με 0,743 για χάλυβα S500. Έτσι, προκύπτει ότι η τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού μειώνει το ω_1 , δηλαδή την ποσότητα του εφελκόμενου χάλυβα, επειδή το ζεύγος που σχηματίζει ο θλιβόμενος χάλυβας με το αντίστοιχο τμήμα του εφελκόμενου λειτουργεί με μεγαλύτερο μοχλοβραχίονα από αυτόν που σχηματίζει το σκυρόδεμα με το υπόλοιπο του εφελκόμενου οπλισμού. Κατ' επέκταση, αν υπάρχει ούτως ή άλλως θλιβόμενος οπλισμός για κατασκευαστικούς λόγους, όπως π.χ. σε δοκούς, τότε μπορεί να συμφέρει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του εφελκόμενου οπλισμού η παρουσία του θλιβόμενου. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση αυτή μπορεί να αφαιρεθεί από το μ_{sd} η ροπή που αναλαμβάνεται από το ζεύγος του θλιβόμενου οπλισμού ω_2 και ίσου τμήματος του εφελκόμενου και να υπολογισθεί ο συνολικά απαιτούμενος εφελκόμενος οπλισμός ως εξής:

$$\omega_1 = \omega_2 + 0,973 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2}{0,973} (\mu_{sd} - \omega_2 \left(1 - \frac{d_2}{d} \right))} \right) + v_d \quad (4.29)$$

Ο Πιν. (4.2) δίνει απ' ευθείας το διπλό οπλισμό κατά τις Εξ. (4.27^a) και (4.28^a) για χάλυβα S500.

Πρακτικά, η σημασία των Πιν. (4.1), (4.2) για τον υπολογισμό του οπλισμού είναι μικρή, λόγω της απλότητας των Εξ. (4.27^a), (4.28^a) όπως και των Εξ. (4.21), (4.21^a). Αυτοί οι πίνακες, όμως, δίνουν μία συνολική εικόνα της μεταβολής του απαιτούμενου οπλισμού με τις διάφορες παραμέτρους, με το μ_{sd} , το d_2/d , κ.λ.π. Δείχνουν π.χ. ότι για την ίδια τιμή του, μ_{sd} , η τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού μειώνει τον εφελκόμενο.

Δεν συνιστάται η τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού περισσότερο από τον εφελκόμενο. Για το λόγο αυτό αν προκύψει $A_{s2} > A_{s1}$ τοποθετείται συμμετρικός οπλισμός, δηλαδή $A_{s2} = A_{s1}$ και ο υπολογισμός περιγράφεται παρακάτω πως γίνεται.

μ_{sd}	$d_2/d=0,05$		$d_2/d=0,10$		$d_2/d=0,15$		$d_2/d=0,20$		$d_2/d=0,25$	
	ω_2	ω_1-v_d	ω_2	ω_1-v_d	ω_2	ω_1-v_d	ω_2	ω_1-v_d	ω_2	ω_1-v_d
0,38	0,009	0,509	0,010	0,509	0,010	0,510	0,011	0,510	0,012	0,511
0,39	0,020	0,519	0,021	0,520	0,022	0,521	0,023	0,523	0,025	0,524
0,4	0,030	0,530	0,032	0,531	0,034	0,533	0,036	0,535	0,038	0,538
0,41	0,041	0,540	0,043	0,542	0,046	0,545	0,048	0,548	0,052	0,551
0,42	0,051	0,551	0,054	0,554	0,057	0,557	0,061	0,560	0,065	0,564
0,43	0,062	0,561	0,065	0,565	0,069	0,569	0,073	0,573	0,078	0,578
0,44	0,072	0,572	0,076	0,576	0,081	0,580	0,086	0,585	0,092	0,591
0,45	0,083	0,582	0,088	0,587	0,093	0,592	0,098	0,598	0,105	0,604
0,46	0,093	0,593	0,099	0,598	0,104	0,604	0,111	0,610	0,118	0,618
0,47	0,104	0,603	0,110	0,609	0,116	0,616	0,123	0,623	0,132	0,631
0,48	0,115	0,614	0,121	0,620	0,128	0,627	0,136	0,635	0,145	0,644
0,49	0,125	0,624	0,132	0,631	0,140	0,639	0,148	0,648	0,158	0,658
0,5	0,136	0,635	0,143	0,642	0,152	0,651	0,161	0,660	0,172	0,671
0,51	0,146	0,645	0,154	0,654	0,163	0,663	0,173	0,673	0,185	0,684
0,52	0,157	0,656	0,165	0,665	0,175	0,674	0,186	0,685	0,198	0,698
0,53	0,167	0,666	0,176	0,676	0,187	0,686	0,198	0,698	0,212	0,711
0,54	0,178	0,677	0,188	0,687	0,199	0,698	0,211	0,710	0,225	0,724
0,55	0,188	0,688	0,199	0,698	0,210	0,710	0,223	0,723	0,238	0,738
0,56	0,199	0,698	0,210	0,709	0,222	0,721	0,236	0,735	0,252	0,751
0,57	0,209	0,709	0,221	0,720	0,234	0,733	0,248	0,748	0,265	0,764
0,58	0,220	0,719	0,232	0,731	0,246	0,745	0,261	0,760	0,278	0,778
0,59	0,230	0,730	0,243	0,742	0,257	0,757	0,273	0,773	0,292	0,791
0,6	0,241	0,740	0,254	0,754	0,269	0,769	0,286	0,785	0,305	0,804
0,61	0,251	0,751	0,265	0,765	0,281	0,780	0,298	0,798	0,318	0,818
0,62	0,262	0,761	0,276	0,776	0,293	0,792	0,311	0,810	0,332	0,831
0,63	0,272	0,772	0,288	0,787	0,304	0,804	0,323	0,823	0,345	0,844
0,64	0,283	0,782	0,299	0,798	0,316	0,816	0,336	0,835	0,358	0,858
0,65	0,293	0,793	0,310	0,809	0,328	0,827	0,348	0,848	0,372	0,871

Πίνακας 4.2 Ασύμμετρος διπλός οπλισμός ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για χάλυβα S500. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Εφαρμόζεται για $\mu_{sd} > \mu_{sd,lim}=0,371$. Είναι $\xi=0,417$, $\zeta=0,743$, $\varepsilon_{cu2}=0,35\%$ και $\varepsilon_{s1}=0,217\%$.

4.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ μ_d-v_d ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΜΕ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ

Παρακάτω δίνονται αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του συνολικού μηχανικού ποσοστού, ω_{tot} , ισοκατανεμημένου στις πλευρές της διατομής τις παράλληλες στο διάνυσμα της ροπής κάμψης, M_d , συναρτήσεων των ανηγμένων εντατικών μεγεθών μ_d και v_d και του λόγου d_1/h . Πρακτικά, αυτές οι σχέσεις καλύπτουν το συνηθέστερο διάστημα τιμών της v_d , δηλαδή τις τιμές κάτω από το σημείο "b" της ισοζυγισμένης διατομής, "γόνατο" του διαγράμματος, μέχρι λίγο πάνω από τον άξονα, $v_d=0$.

Στη συνέχεια δίνονται σχέσεις και αλγόριθμοι υπολογισμού της ποσότητας συμμετρικού οπλισμού σε ορθογωνική διατομή πλάτους b και στατικού ύψους d . Η διατομή οπλισμού $A_{s1}=A_{s2}$, που τοποθετείται παράλληλα στις πλευρές μήκους b αντιστοιχεί σε μηχανικό ποσοστό οπλισμού :

$$\omega_1 d = A_{s1} / (bd) \cdot (fyd / fcd),$$

του οποίου υπολογίζεται η απαιτούμενη τιμή για μονοαξονική ροπή, M , και αξονική δύναμη, N . Το στατικό ύψος d είναι κάθετο στο διάνυσμα της ροπής, M . Οι ράβδοι με διατομή A_{s1} βρίσκεται σε απόσταση d_1 από την πλευρά μήκους, b . Τα μεγέθη M, N και d_1 αδιαστατοποιούνται ως εξής :

$$\mu_d = M/(bd^2 f_{cd}), \quad v_d = N/(bdf_{cd}), \quad \delta_1 = d_1/d \quad (4.30)$$

Εφαρμόζεται ισορροπία και η επιπεδότητα της διατομής, καθώς και οι νόμοι των υλικών κατά τον Ευρωκώδικα 2 :

- Ελαστοπλαστικό διάγραμμα για το χάλυβα με τάση διαρροής f_{yd} και απεριόριστη μήκυνση,
- Παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα σ - ε για το σκυρόδεμα με αντοχή, f_{cd} , σε βράχυνση, ε_{c2} , και παραμόρφωση αστοχίας, ε_{cu2} , για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$, $\varepsilon_{c2} = 0,002$ και $\varepsilon_{cu2} = 0,0035$.

Αναλόγως την τιμή της ανηγμένης αξονικής, v_d , χωρίζονται σε τρεις περιπτώσεις:

a) Η συνηθέστερη περίπτωση είναι να βρίσκονται ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός σε διαρροή. Αυτό συμβαίνει αν :

$$\delta_1 \frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}/3}{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{yd}} \equiv v_2 \leq v_d < v_1 \equiv \frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}/3}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{yd}} \quad (4.31^a)$$

όπου Αν $\varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$, τότε το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x ανηγμένο στο d ως $\xi = x/d$, προκύπτει από ισορροπία δυνάμεων ίσο με :

$$\xi = \frac{v_d}{1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}} \quad (4.32^a)$$

Η τιμή του ξ αντικαθιστάται στην παρακάτω σχέση, που προκύπτει από ισορροπία ροπών στη διατομή και η οποία λύνεται ως προς το άγνωστο ω_{1d} :

$$(1 - \delta_1)\omega_{1d} = \mu_d - \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{3\varepsilon_{c2}}{4\varepsilon_{cu2}} \xi \right) \right] \quad (4.33^a)$$

b) Η δεύτερη περίπτωση είναι να βρίσκεται ο εφελκόμενος οπλισμός σε διαρροή και ο θλιβόμενος να είναι ελαστικός. Αυτό συμβαίνει αν η ανηγμένη αξονική v_d είναι μικρότερη από το v_2 , που δίνεται από το αριστερό σκέλος της εξ. 31^a :

$$v_d \leq \delta_1 \frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}/3}{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{yd}} \equiv v_2 \quad (4.31^b)$$

Στην περίπτωση αυτή τα ξ και ω_{1d} συνδέονται με την ανηγμένη αξονική και την ανηγμένη ροπή μέσω των παρακάτω σχέσεων :

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \right] \xi^2 - \left[v_d + \omega_{1d} \left(1 - \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}} \right) \right] \xi - \omega_{1d} \frac{\varepsilon_{cu2} \delta_1}{\varepsilon_{yd}} = 0 \quad (4.32^b)$$

$$\omega_{1d} \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(1 + \frac{\xi - \delta_1}{\xi} \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}} \right) = \mu_d - \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{c2}}{4\varepsilon_{cu2}} \xi \right) \right] \quad (4.33^b)$$

Αντικαθιστώντας το ω_{1d} από την Εξ. (4.33^b) στην (4.32^b) προκύπτει μία μη-γραμμική εξίσωση για το ξ , που λύνεται με επαναληπτικές δοκιμές. Κατόπιν το ω_{1d} προκύπτει από την Εξ. (4.33^b).

c) Η σπανιότερη και πλέον ανεπιθύμητη περίπτωση από άποψη συμπεριφοράς είναι να βρίσκεται ο θλιβόμενος οπλισμός σε διαρροή και ο εφελκόμενος να είναι ελαστικός.

Αυτό συμβαίνει όταν η τιμή της v_d ξεπερνά το v_1 , που δίνεται από το δεξί σκέλος της Εξ. (4.31^α):

$$v_1 \equiv \frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}/3}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{yd}} \leq v_d \quad (4.31^y)$$

Τότε τα ξ και ω_1 συνδέονται με τα v_d , μ_d μέσω των εξής σχέσεων:

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}\right] \xi^2 - \left[v_d - \omega_{1d} \left(1 + \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}}\right)\right] \xi - \omega_{1d} \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}} = 0 \quad (4.32^y)$$

$$\omega_{1d} \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(1 + \frac{1-\xi}{\xi} \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{yd}}\right) = \mu_d - \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{3\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{c2}}{4\varepsilon_{cu2}} \xi\right)\right] \quad (4.33^y)$$

Αντικαθιστώντας το ω_{1d} στην Εξ. (4.32^γ) από την Εξ. (4.33^γ), προκύπτει μία μη-γραμμική σχέση για το ξ , που λύνεται με επαναληπτικές δοκιμές. Κατόπιν το ω_{1d} προκύπτει από την Εξ. (4.33^γ).

4.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΟΠΗΣ –ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ ΟΠΛΙΣΜΟ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ

Όταν όλη ή περίπου όλη η διατομή καλύπτεται από την θλιβόμενη ζώνη, δηλαδή η αξονική δύναμη έχει μεσαία ή μικρή εκκεντρότητα, $M_d/N_d h$, είναι πιο οικονομικός ο συμμετρικός οπλισμός, $A_{s2}=A_{s1}$. Ο συμμετρικό οπλισμός εισάγεται επίσης σε στοιχεία, τα οποία καταπονούνται από ορθή δύναμη με μικρή ή μεσαία εκκεντρότητα, δηλαδή σε υποστυλώματα όταν είναι πιθανότερη η αλλαγή πρόσημου της ροπής, M , επειδή αυτή οφείλεται σε οριζόντιες δράσεις, δηλαδή σε σεισμό ή άνεμο.

Σε αυτή την περίπτωση ο πιο απλός τρόπος διαστασιολόγησης είναι με τη βοήθεια διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης M-N. Αυτά τα διαγράμματα δίνουν για κάθε συνδυασμό των ανηγμένων εντατικών μεγεθών σχεδιασμού :

$$\mu_d \equiv M_d/A_c h f_{cd} \quad \text{και} \quad v_d \equiv N_d/A_c f_{cd} \quad (4.34)$$

το απαιτούμενο **συνολικό μηχανικό ποσοστό οπλισμού** :

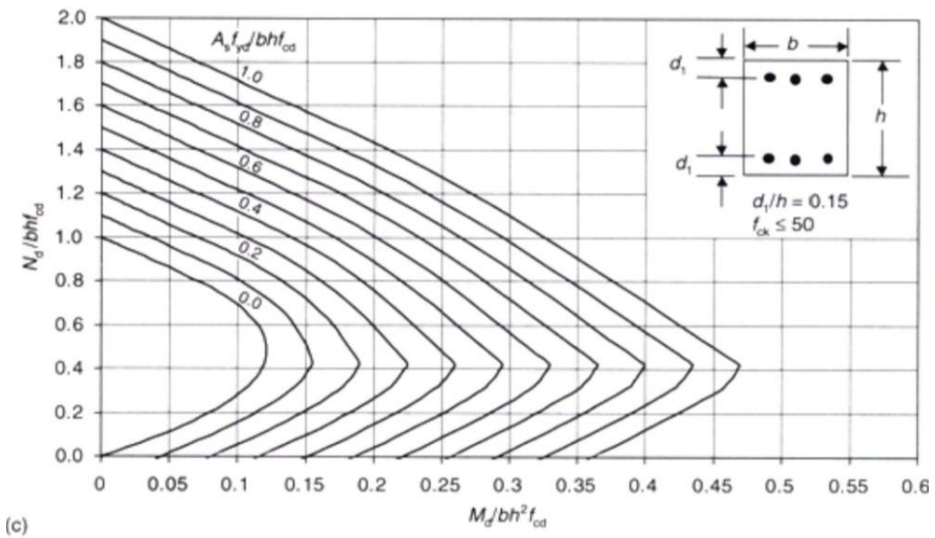
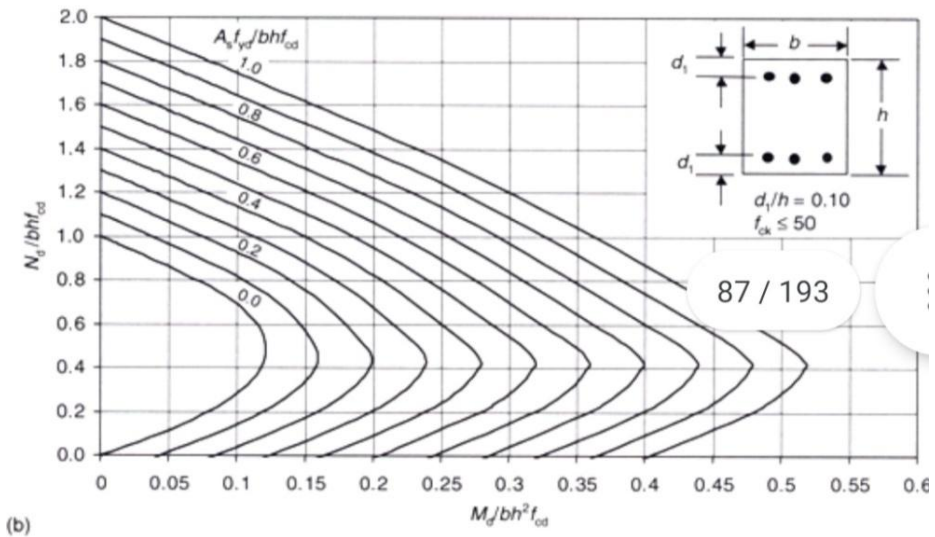
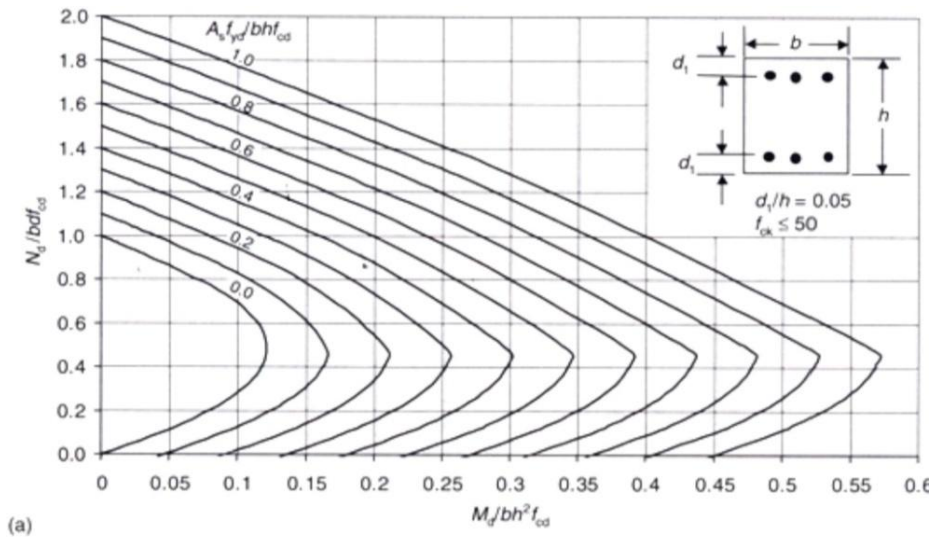
$$\omega_{tot} = \omega_1 + \omega_2, \text{ όπου } \omega_1 \equiv (A_{s1}/A_c)(f_{yd}/f_{cd}) = \omega_2 \equiv (A_{s2}/A_c)(f_{yd}/f_{cd}) \quad (4.35)$$

Στις Εξ. (4.34), (4.35) είναι $A_c=bh$ και χρησιμοποιείται το συνολικό ύψος h , της διατομής αντί το στατικό ύψος d .

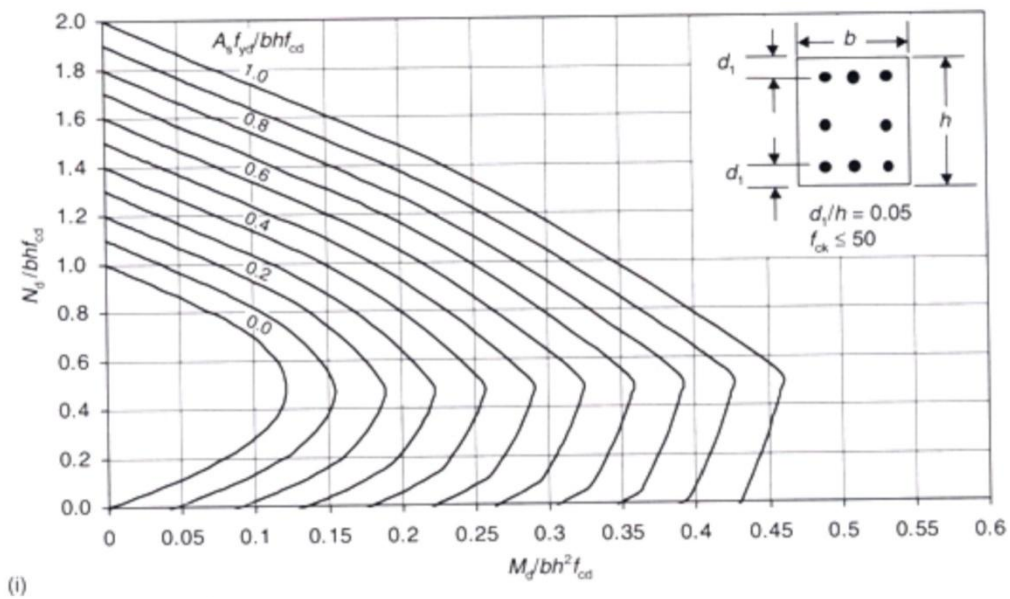
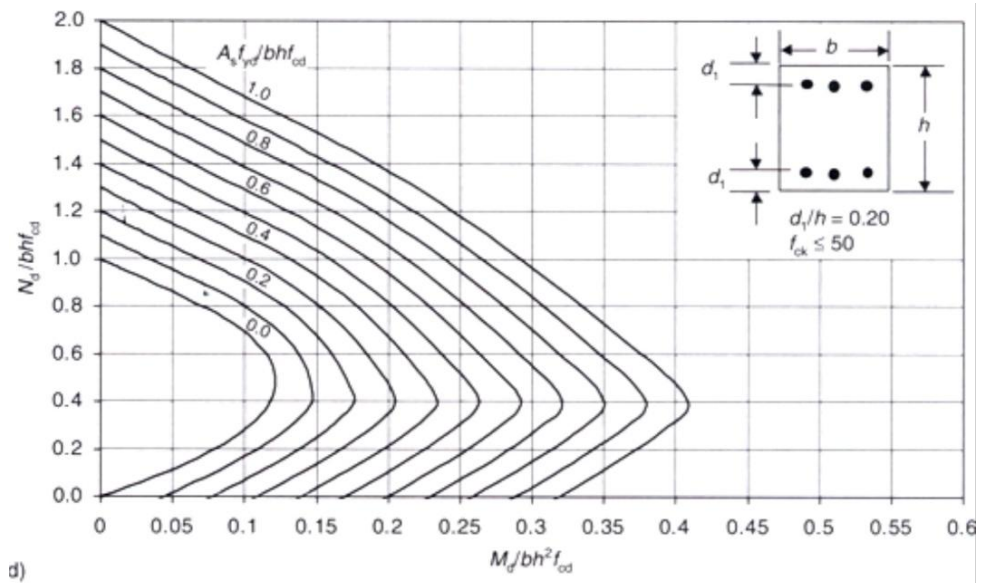
Τα διαγράμματα είναι πολύ γενικά, επειδή καλύπτουν όλες τις δυνατές τιμές της ανηγμένης εκκεντρότητας, $\mu_{sd}/v_d=M_{sd}/N_d h$, από μηδέν μέχρι άπειρο και όλες τις περιπτώσεις καταπόνησης, δηλαδή κεντρικό εφελκυσμό, έκκεντρο εφελκυσμό, κάμψη με ορθή δύναμη, κεντρική θλίψη και έκκεντρο θλίψη. Στα Σχ. (4.8) δίνονται διαγράμματα αλληλεπίδρασης για ορθογωνικές διατομές με $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ και στα Σχ. (4.9) για $f_{ck}=90 \text{MPa}$ (γραμμική παρεμβολή για f_{ck} μεταξύ 50 και 90MPa). Η ταυτόχρονη διαρροή χάλυβα και αστοχία του σκυροδέματος αντιστοιχεί στο "γόνατο" των διαγραμμάτων. Το σημείο αυτό, που η τιμή της ανηγμένης θλιπτικής δύναμης συμβολίζεται με v_b , η αντοχή σε κάμψη ελαττώνεται όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο και η αστοχία οφείλεται σε θραύση του σκυροδέματος χωρίς διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού.

Η περιοχή των διαγραμμάτων κάτω από το "γόνατο", στην οποία υπάρχει ταυτόχρονη διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα και θραύση του σκυροδέματος, αντιστοιχεί σε αστοχία με

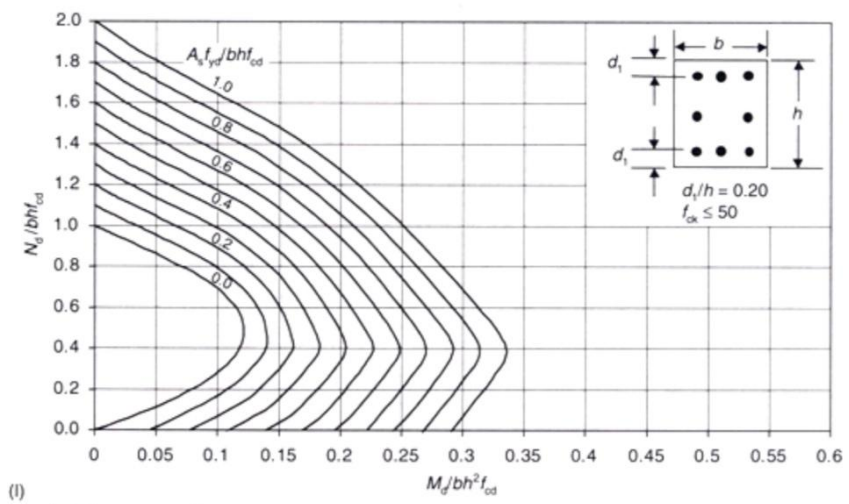
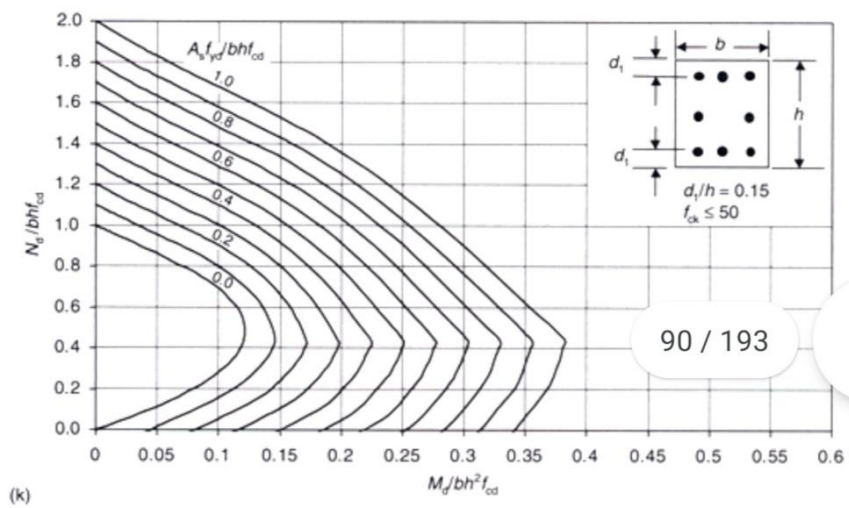
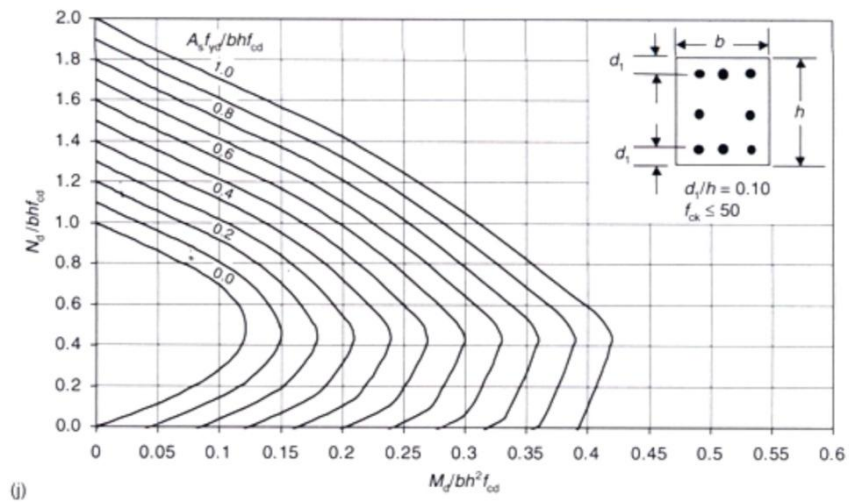
διαρροή του χάλυβα. Η παρουσία του θλιβόμενου χάλυβα σε ποσότητα ίση με τον εφελκόμενο, για τέτοιους συνδυασμούς, μ_d και ν_d , είναι κάπως δαπανηρή.



Σχήμα 4.8 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.8 Συνέχεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.8 Συνέχεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

(a) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.05$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

(b) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.10$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

(c) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.15$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

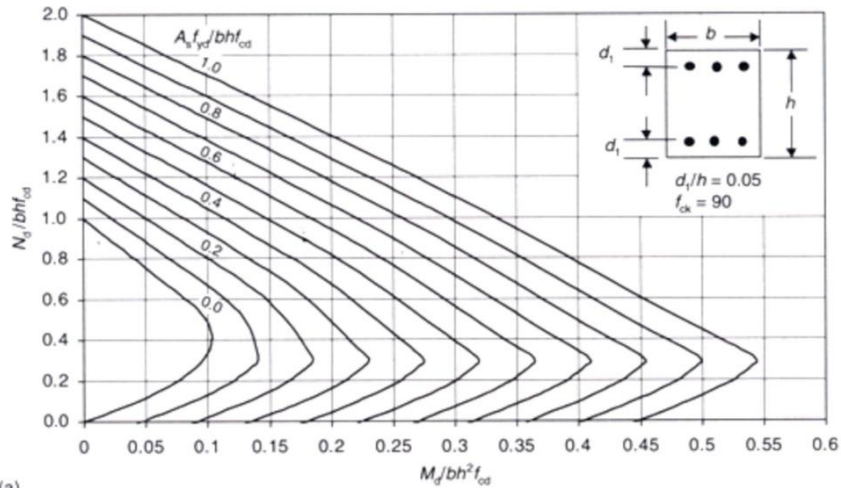
(d) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.20$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

(i) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.05$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

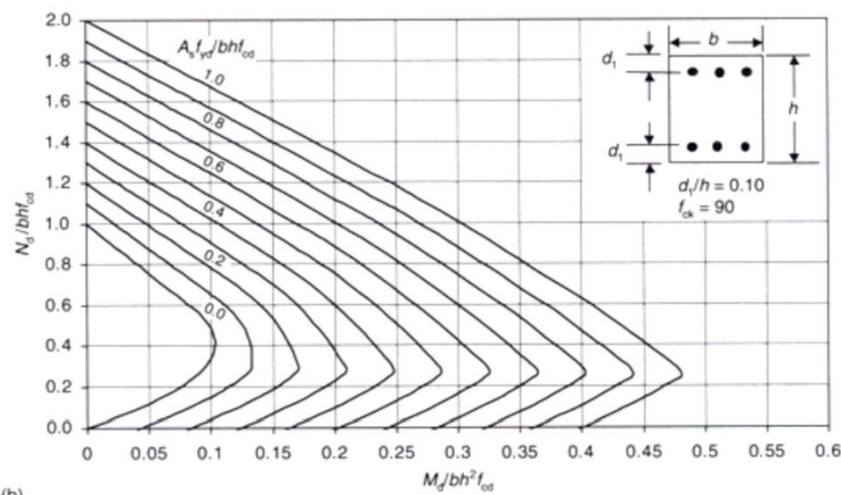
(j) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.10$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

(k) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.15$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)

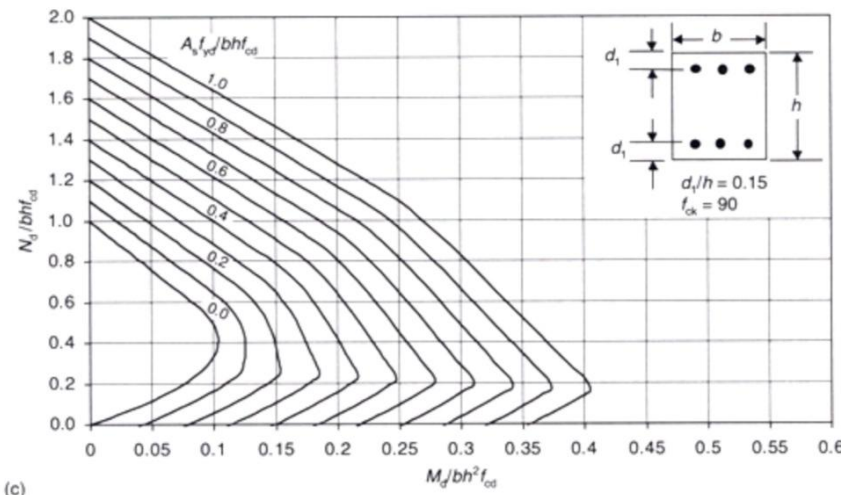
(l) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.20$, $f_{ck}\leq 50\text{MPa}$)



(a)

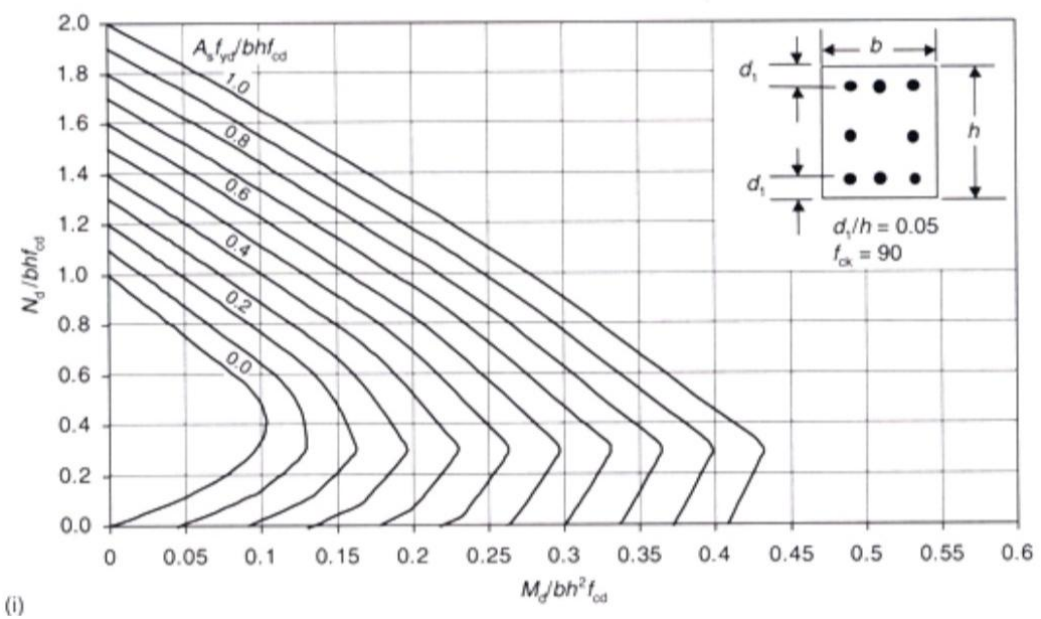
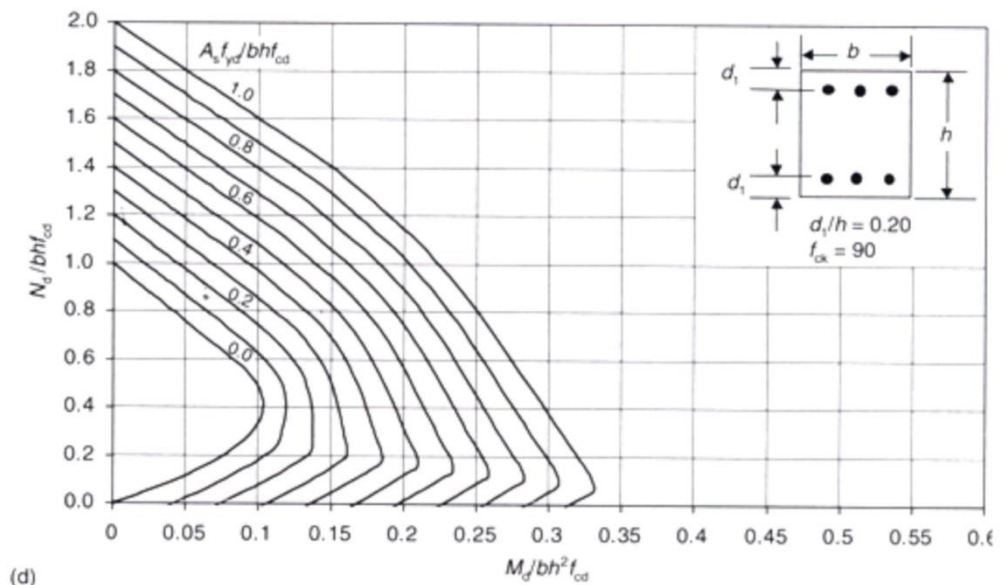


(b)

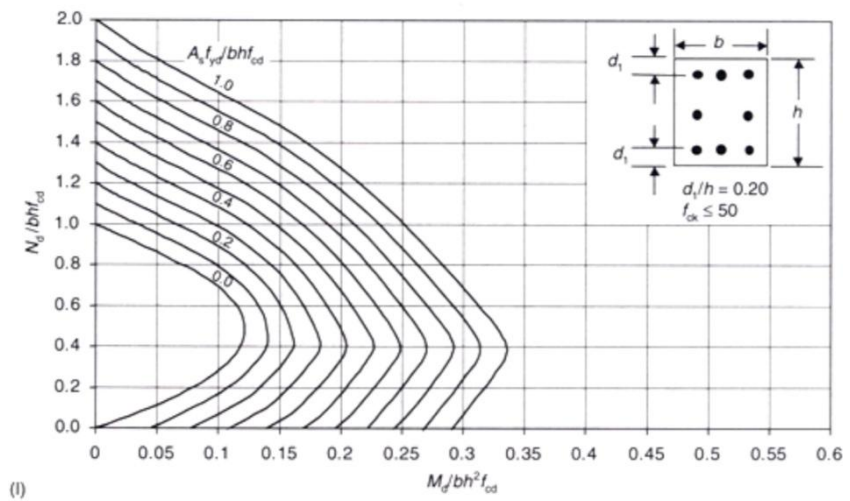
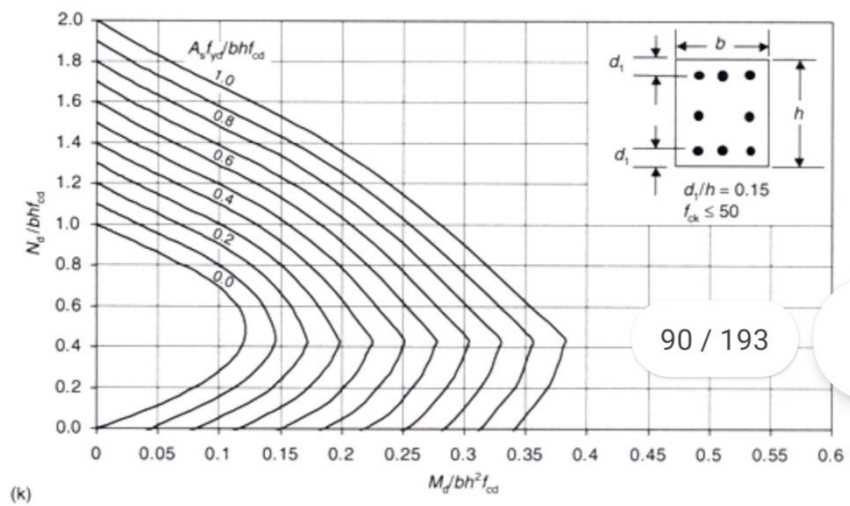
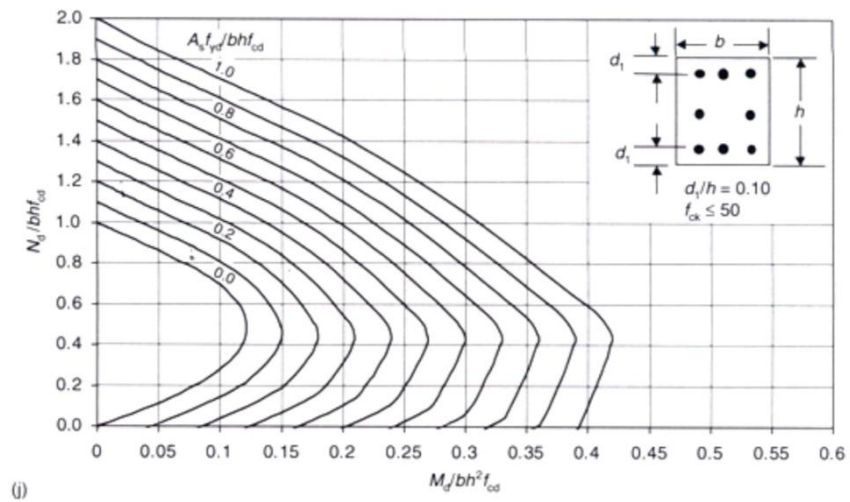


(c)

Σχήμα 4.9 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών σε μονοαξονική κάμψη για $f_{ck}=90\text{MPa}$. (Πηγή: "Μαθήματα σπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.9 Συνέχεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.9 Συνέχεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

(a) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.05$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(b) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.10$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(c) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.15$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(d) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός στις παράλληλες προς τον άξονα κάμψης πλευρές, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.20$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(i) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.05$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(j) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.10$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(k) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.15$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

(l) = Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για συμμετρικά οπλισμένη ορθογωνική διατομή (οπλισμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περίμετρο της διατομής, σκυρόδεμα \leq C50/60, B500C, $d_1/h=0.20$, $f_{ck}=90\text{MPa}$)

Στα Σχ. (4.8), (4.9) δίνονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών για διάφορους λόγους $d_1/h=d_2/h$ και τρεις διατάξεις οπλισμού :

α) συγκέντρωση παράλληλα στις δύο πλευρές μήκους b που είναι παράλληλες στο διάνυσμα της ροπής M ((a)-(d)),

β) ισοκατανομή στις τέσσερις πλευρές ((i)-(l)).

Τονίζεται ότι τα διαγράμματα των Σχ. (4.8), (4.9) έχουν ενσωματωμένο το συντελεστή, $\alpha=0.85$, ο οποίος πολλαπλασιάζει το $f_{ck}/\gamma_c=f_{ck}/1.5$ για να δώσει το f_{cd} . Με αποτέλεσμα το f_{cd} σε αυτά είναι απλώς το f_{ck}/γ_c . Αντιθέτως σε όλες τις προηγούμενες παραγράφους το f_{cd} ισούται με $\alpha f_{ck}/\gamma_c$ και περιλαμβάνει το α , για το οποίο ο Ευρωκώδικας 2 εισάγει την τιμή $\alpha=1$, ενώ το Ελληνικό Εθνικό του Προσάρτημα υιοθετεί $\alpha=0.85$.

4.8 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕ ΤΥΧΑΙΟ ΣΧΗΜΑ ΣΕ ΕΚΚΕΝΤΡΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Στην σπάνια περίπτωση που η διατομή δέχεται καταπόνηση από εφελκυστική ορθή δύναμη, η οποία ασκείται **μέσα στον πυρήνα** της συνολικής διατομής σκυροδέματος, τότε ολόκληρη η διατομή βρίσκεται σε εφελκυσμό. Επειδή αγνοείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, ολόκληρη η αξονική δύναμη N_d παραλαμβάνεται από το χάλυβα, ο οποίος πρέπει να κατανεμηθεί στη διατομή έτσι ώστε το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με το σημείο εφαρμογής της αξονικής δύναμης. Στην περίπτωση που συγκεντρώνεται ο οπλισμός

κοντά στις ακραίες ίνες της διατομής, τότε η απαιτούμενη διατομή του χάλυβα υπολογίζεται ως εξής, (δες σχήμα 4.11):

Η ισοδυναμία ροπών εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων ως προς τη στάθμη του περισσότερο εφελκόμενου χάλυβα δίνει :

$$F_{s2}(y_{s1} + y_{s2}) = N_d(y_{s1} - e)$$

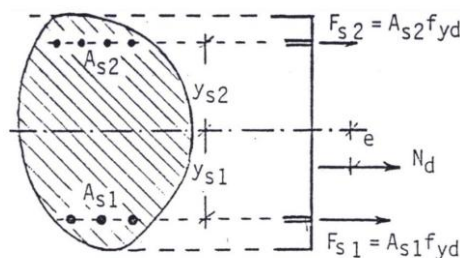
δηλαδή
$$A_{s2} = \frac{N_d (y_{s1} - e)}{f_{yd} (y_{s1} + y_{s2})} \quad (4.36)$$

Αντίστοιχα από ισοδυναμία ροπών ως προς τη στάθμη A_{s2} :

$$A_{s1} = \frac{N_d (y_{s2} - e)}{f_{yd} (y_{s1} + y_{s2})} \quad (4.37)$$

Για $e=0$ και $y_{s1}=y_{s2}$ έχουμε κεντρικό εφελκυσμό και είναι $A_{s1}=A_{s2}=N_d/2f_{yd}$.

Αν ο συνολικός οπλισμός κατανεμηθεί σύμφωνα με τις Εξ. (4.36) και (4.37), τότε συμβαίνει ταυτόχρονη αστοχία του οπλισμού σ' ολόκληρη τη διατομή. Η αντοχή της διατομής δεν θα αυξηθεί από τυχόν μονόπλευρη αύξηση του ενός μόνον από τους δύο οπλισμούς. Πιο συγκεκριμένα, ο οπλισμός αυτός θα υποαποσχολείται όταν ο άλλος που είναι και καθοριστικός του φορτίου αστοχίας, θα διαρρέει.

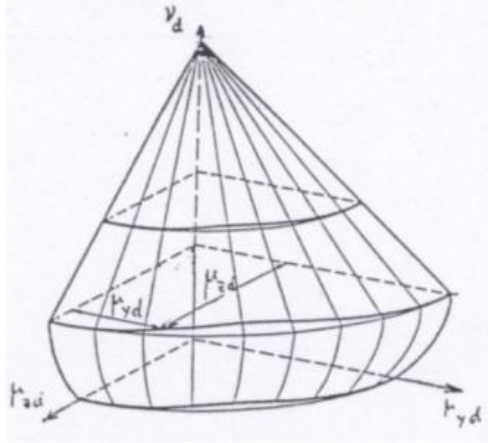


Σχήμα 4.10 Διατομή σε έκκεντρο εφελκυσμό. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

4.9 ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΣΕ ΔΙΠΛΗ (Ή ΛΟΞΗ Ή ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ) ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ

Τα υποστυλώματα καταπονούνται πολύ συχνά σε συνδυασμό ορθής δύναμης και ροπών ως προς δύο κύριους άξονες, δηλαδή διαξονική ή διπλή ή λοξή κάμψη. Για τη διαστασιολόγηση ορθογωνικών διατομών σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη, χρησιμοποιούνται συνήθως επιφάνειες αλληλεπίδρασης M_y - M_z - N , οι οποίες δίνουν το **συνολικό** μηχανικό ποσοστό οπλισμού.

Η γενική μορφή των επιφανειών αλληλεπίδρασης φαίνεται στο Σχ. (4.11). Όπως και στην περίπτωση της μονοαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη, κάτω από μία τιμή της ανηγμένης ορθής δύναμης που αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη διαρροή του χάλυβα και αστοχία του σκυροδέματος, η αστοχία συνοδεύεται από διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και οι ροπές αστοχίας μειώνονται με την αξονική δύναμη.



Σχήμα 4.11 Επιφάνεια αλληλεπίδρασης M_y - M_z - N . (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ορθογωνικών διατομών σε διπλή κάμψη με ορθή δύναμη για δύο διατάξεις οπλισμού γύρω από την περίμετρο, ισοκατανεμημένο, δηλαδή κατά το $\frac{1}{4}$ στις τέσσερις πλευρές ή συγκεντρωμένο στις τέσσερις γωνίες, δίνονται στα Σχ. (4.12) - (4.19) με τη μορφή "ισοϋψών" για ορισμένες τιμές της ανηγμένης ορθής δύναμης n .

$$\omega_{tot} = \frac{A_{s,tot} f_{yk}}{A_c f_{ck}} \quad (4.38)$$

ως συνάρτηση της ανηγμένης ορθής δύναμης

$$n = \frac{N_d}{A_c f_{ck}} \quad (4.39^a)$$

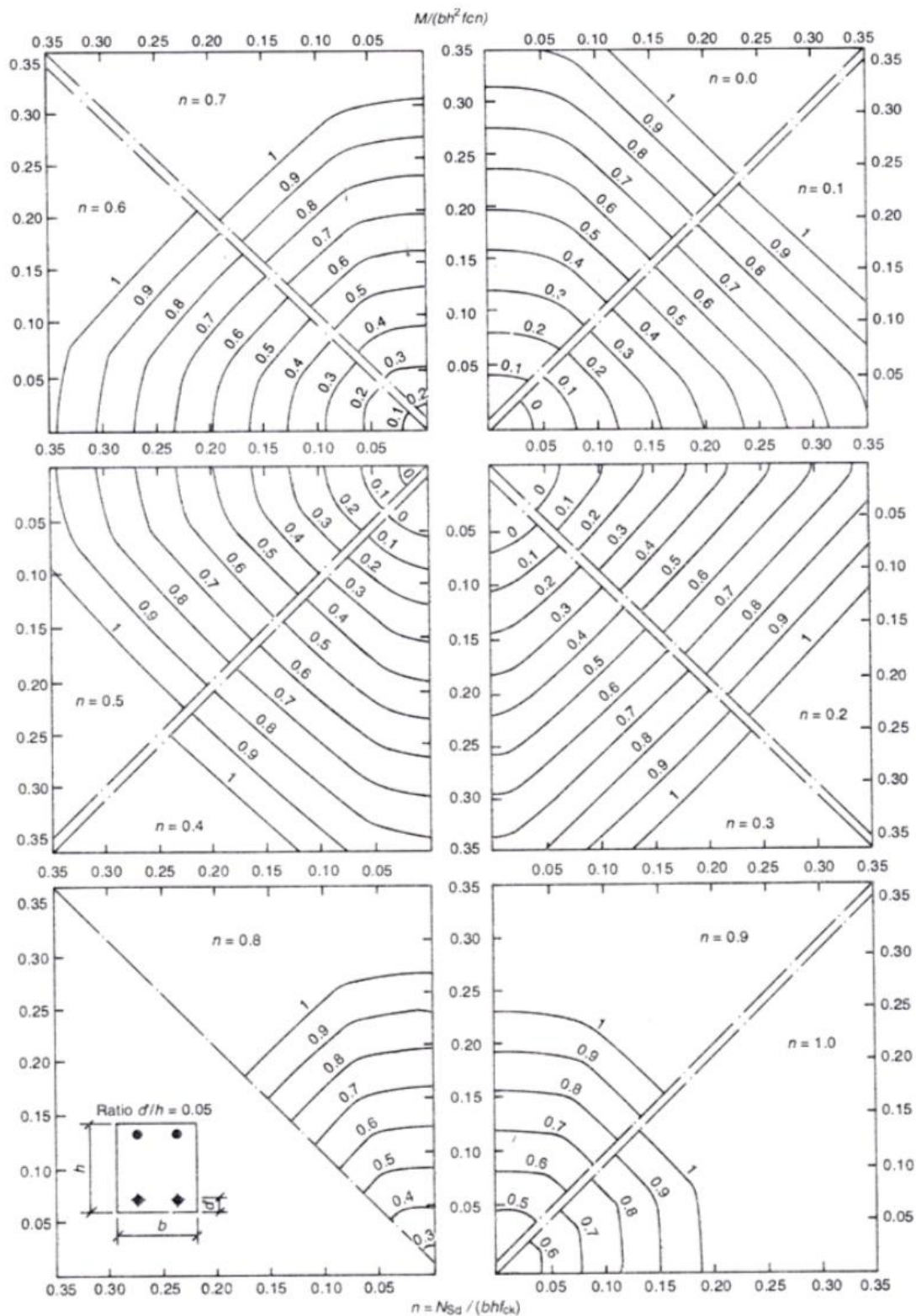
και των ανηγμένων ροπών :

$$\mu_{yd} = \frac{M_{yd}}{A_c h f_{ck}} \quad \mu_{zd} = \frac{M_{zd}}{A_c b f_{ck}} \quad \text{με } A_c = bh \quad (4.39^b)$$

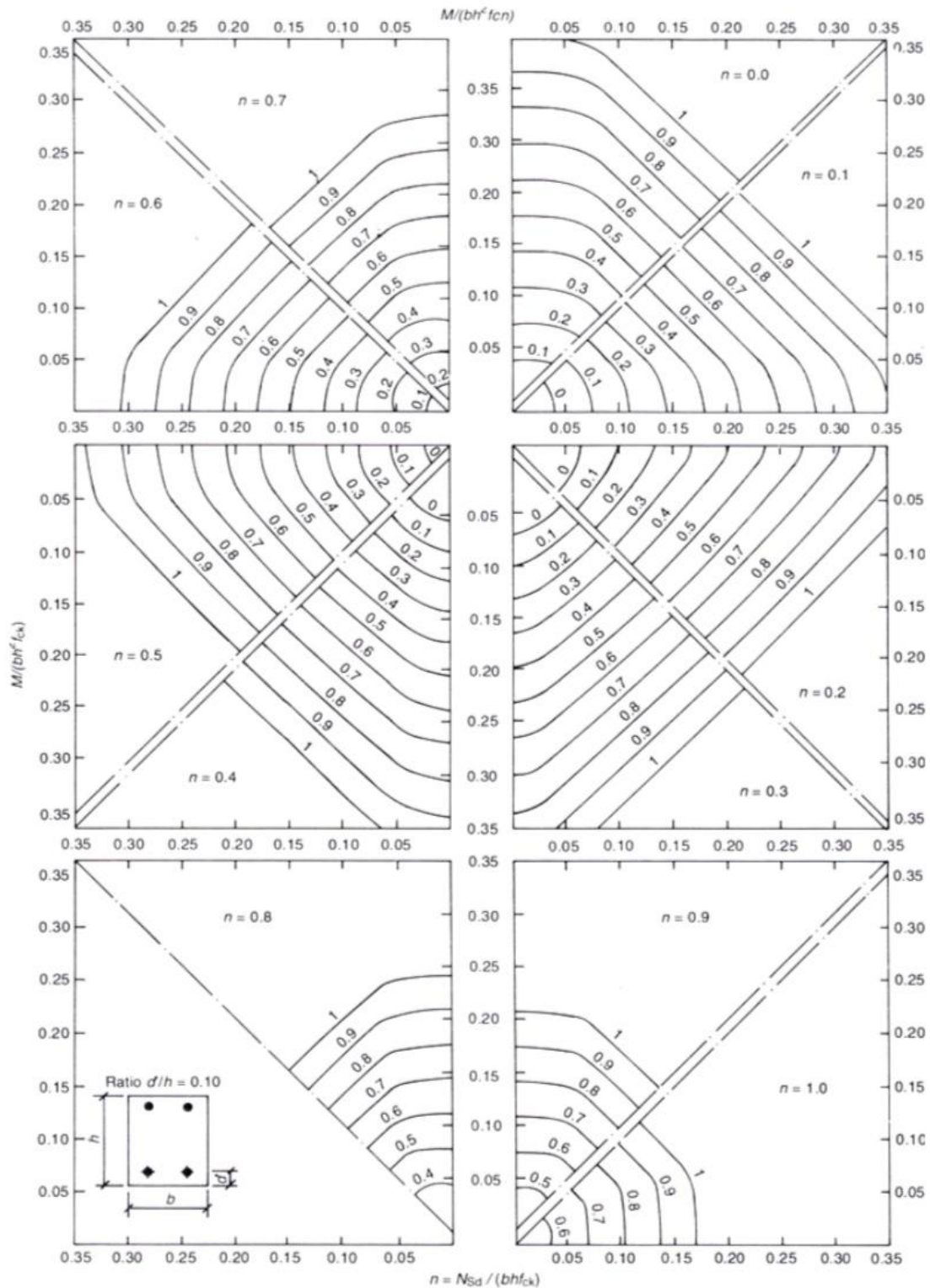
όπου b = διάσταση της πλευράς της παράλληλης στο διάνυσμα M_{yd} και

h = διάσταση της πλευράς στο διάνυσμα της M_{zd}

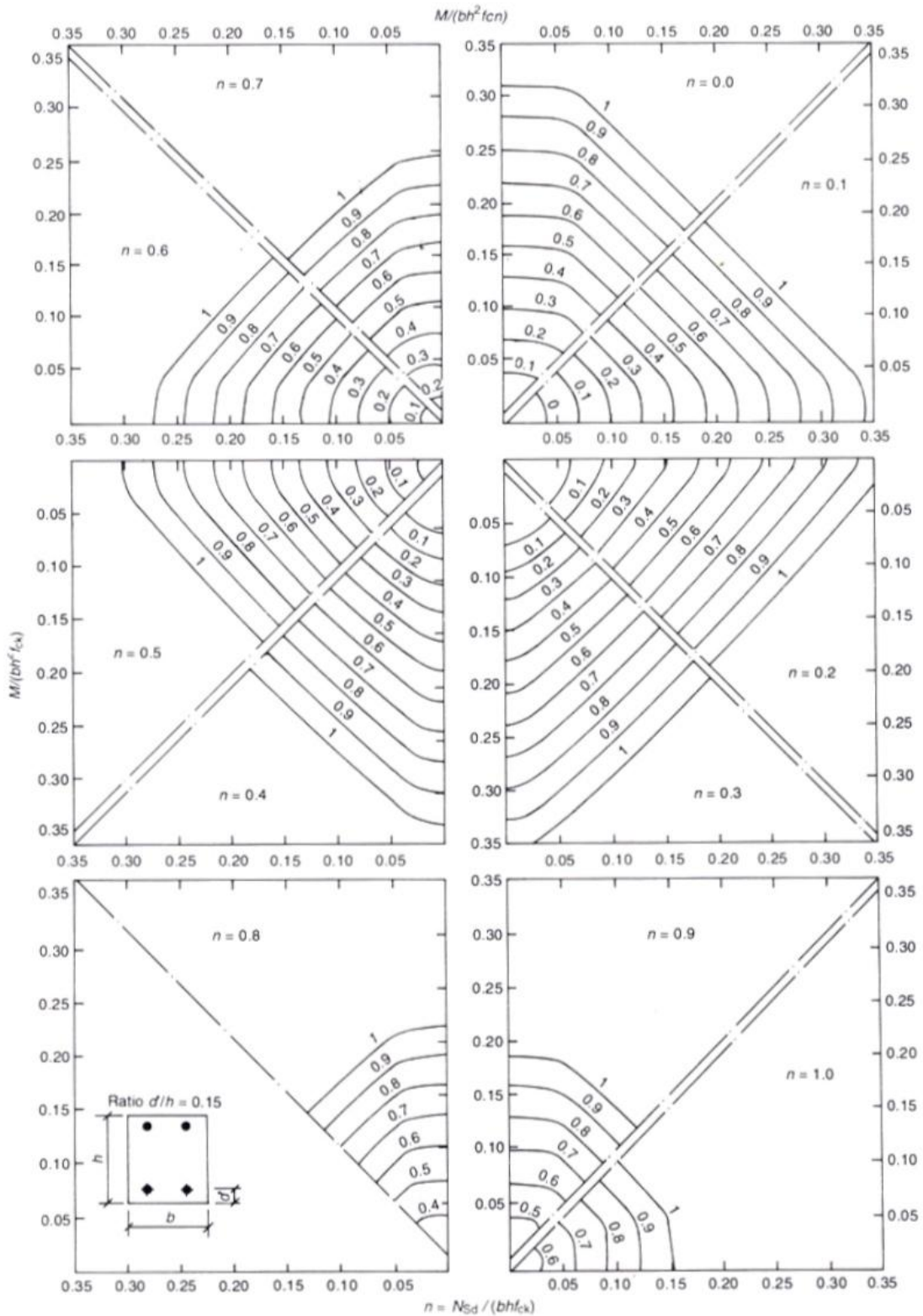
Τα διαγράμματα των Σχ. (4.12) - (4.19) δίνονται με συνάρτησι των f_{yk} , f_{ck} , έχουν όμως ενσωματωμένους τους συντελεστές ασφαλείας, $\gamma_s=1,15$ και $\gamma_c=1,5$. Επιπροσθέτως, ενσωματώνουν το συντελεστή $\alpha=0,85$ που πολλαπλασιάζει το f_{ck}/γ_c για να δώσει το $f_{cd}=\alpha f_{ck}/\gamma_c$.



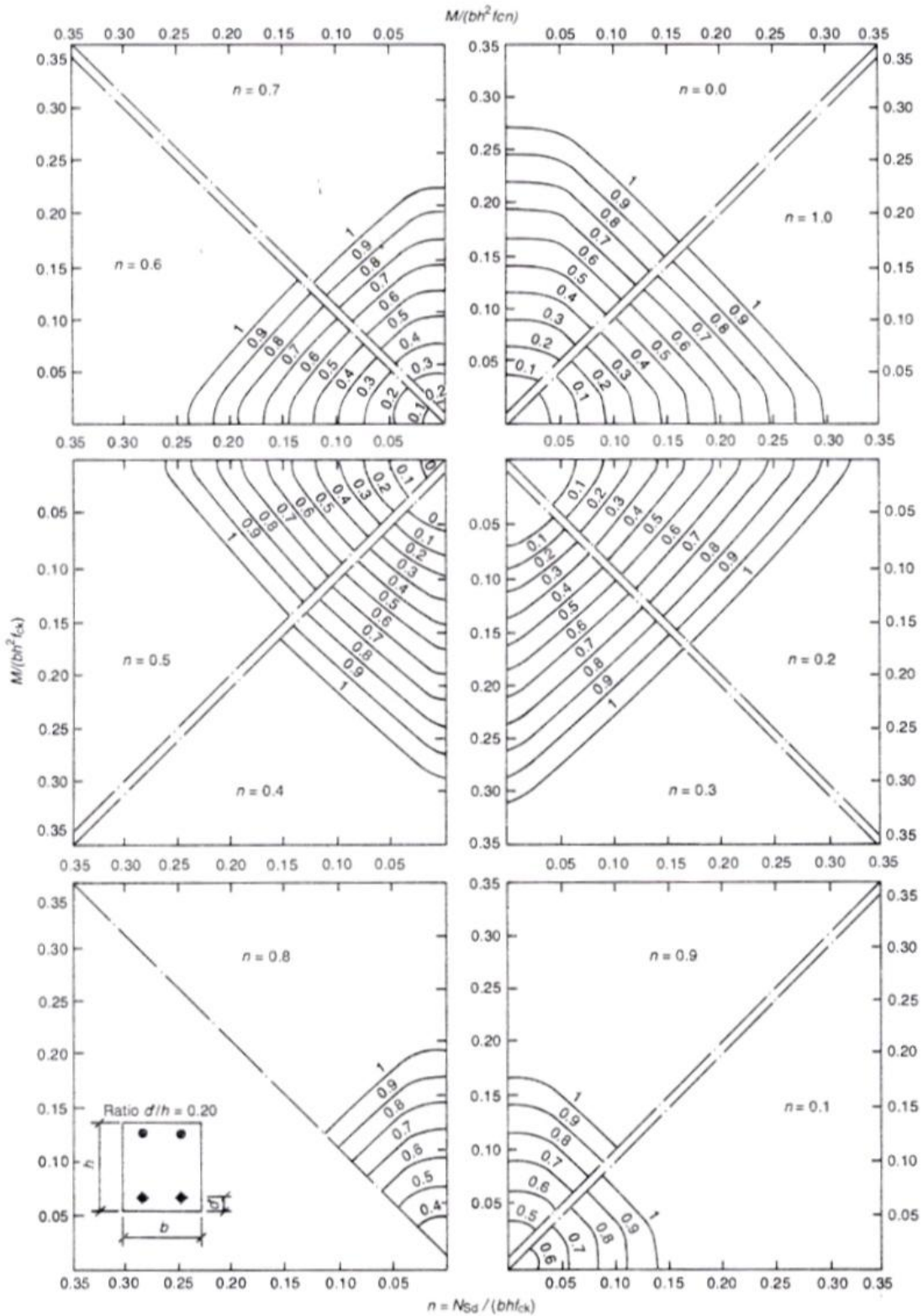
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ (σημειακή κατανομή σπλισμού, $d/h=0.05$). (Πηγή: "Μαθήματα σπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



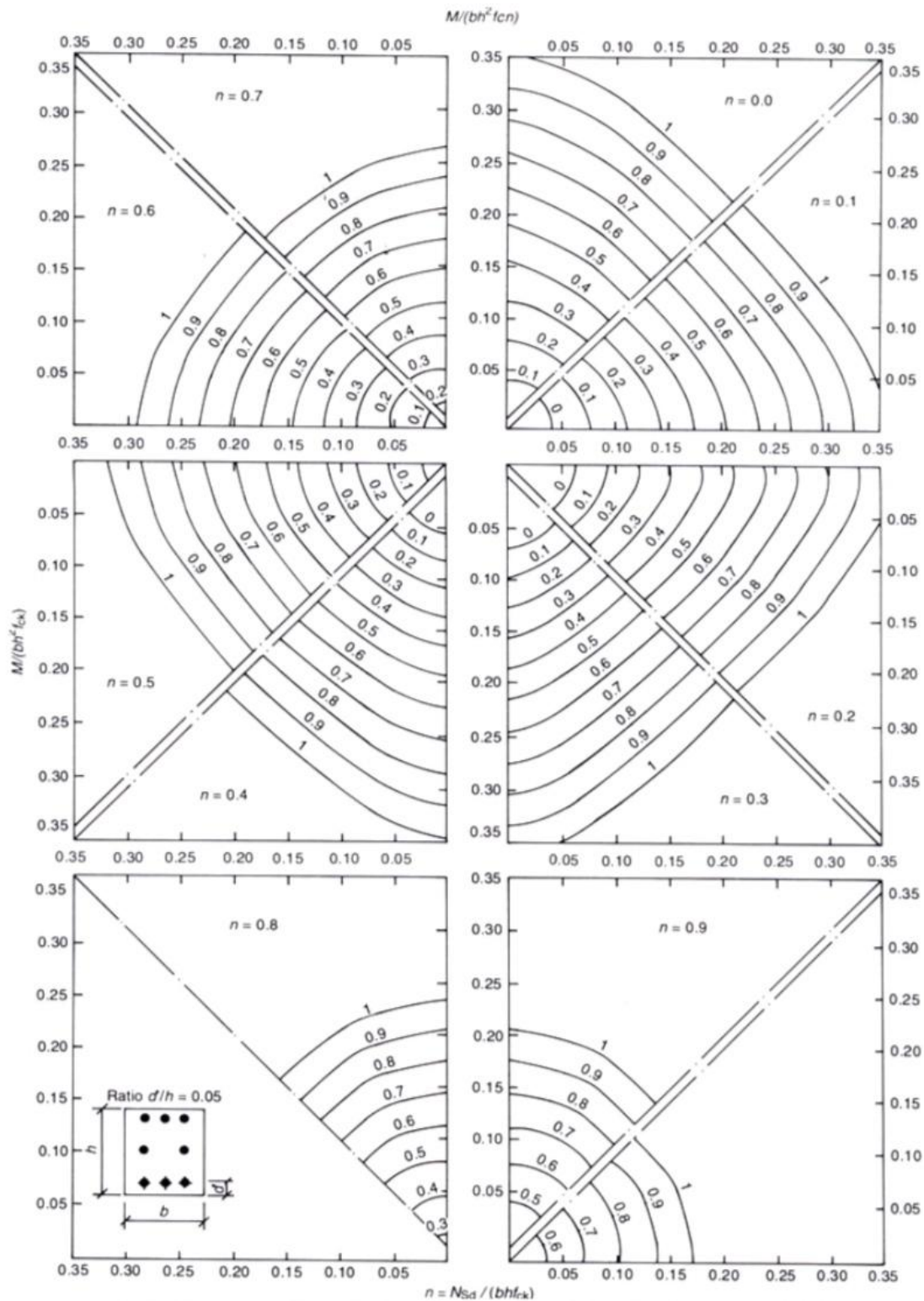
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (σημειακή κατανομή σπλισμού, $d/h=0.10$). (Πηγή: "Μαθήματα σπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



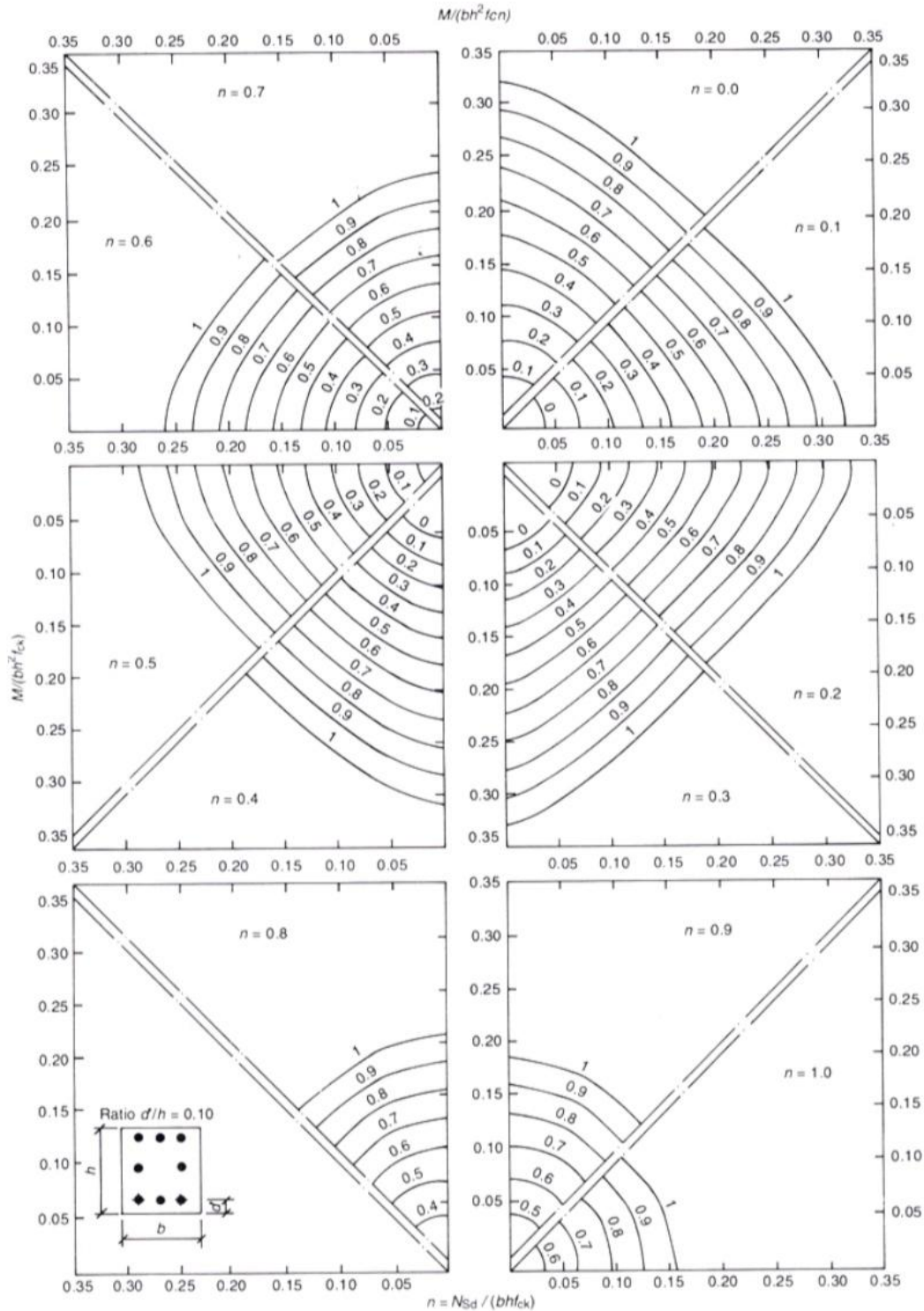
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (σημειακή κατανομή οπλισμού, $d/h=0.15$). (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



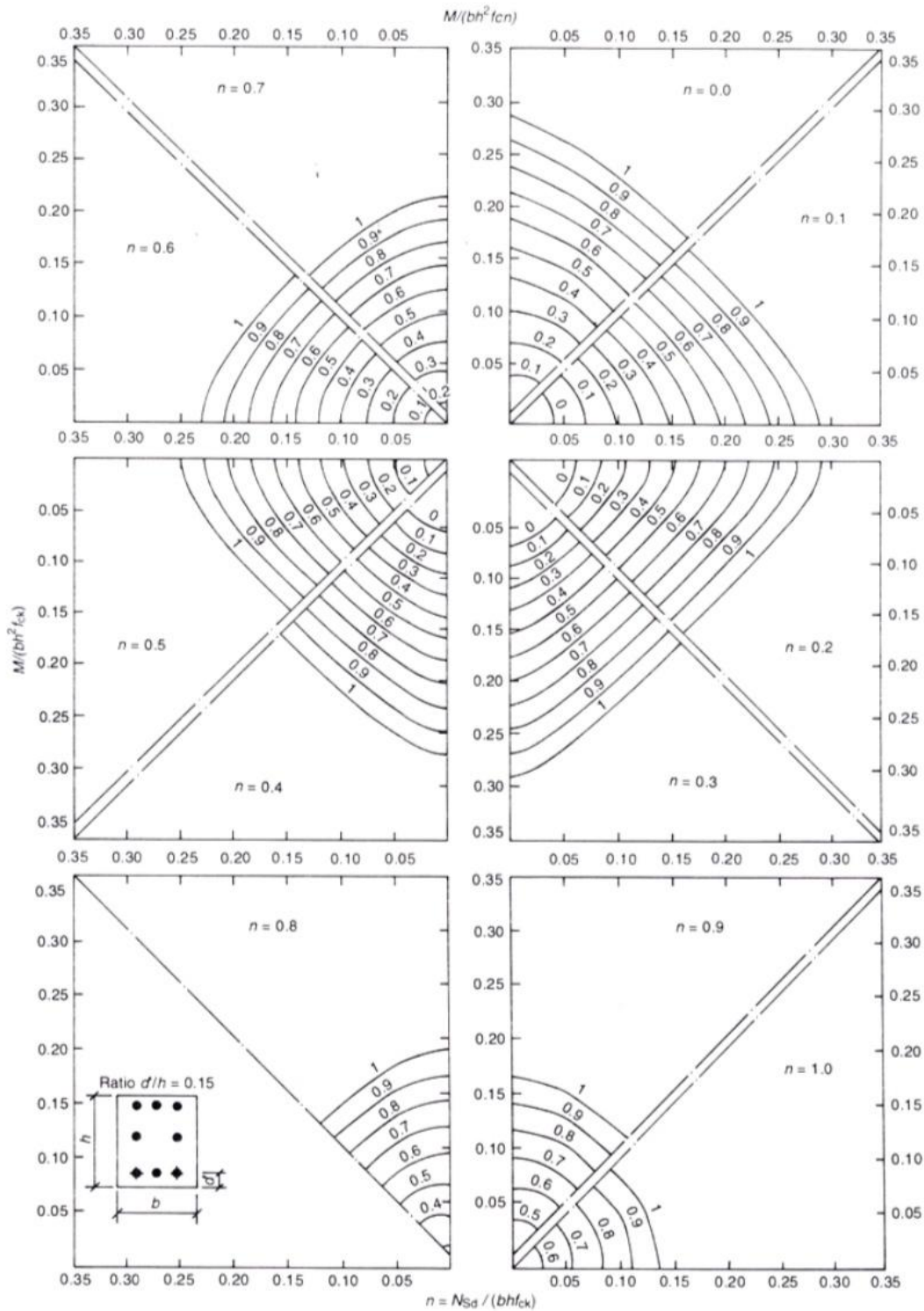
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με τέσσερις γωνιακές ράβδους σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (σημειακή κατανομή σπλισμού, $d/h=0.20$). (Πηγή: "Μαθήματα σπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



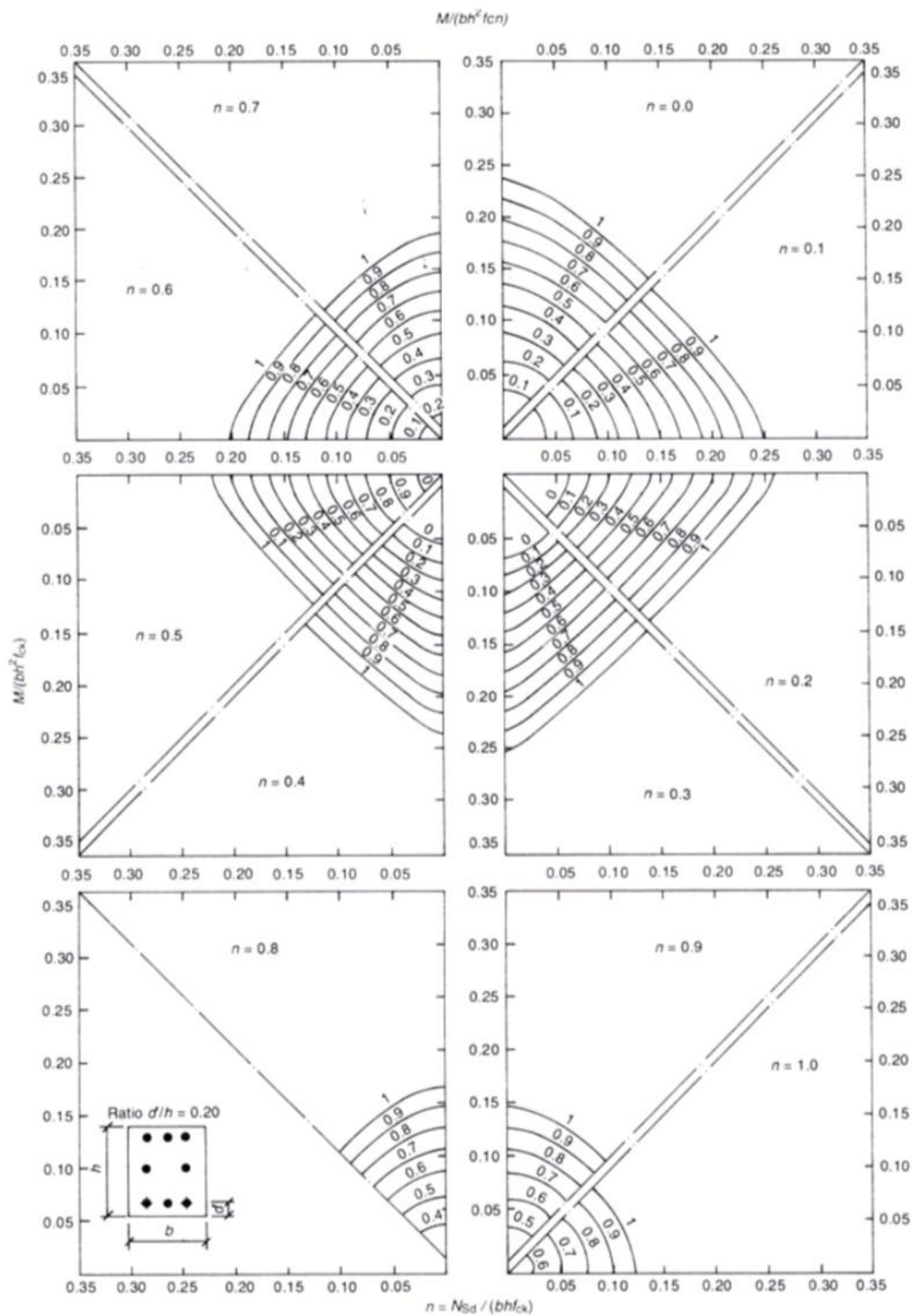
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με σπλισμό ισοκατανομημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή σπλισμού, $d/h=0.05$). (Πηγή: "Μαθήματα σπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκατανεμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.10$). (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκαταναμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.15$). (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής με οπλισμό ισοκαταναμημένο στις τέσσερις πλευρές σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη για $f_{ck} \leq 50 \text{MPa}$ (διανεμημένη κατανομή οπλισμού, $d/h=0.20$) (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

4.10 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΟΡΘΗ ΔΥΝΑΜΗ ΜΕΣΩ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ Ή ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Μια ορθογωνική διατομή μπορεί να διαστασιολογηθεί για ένα αριθμό τριάδων ανηγμένων εντατικών μεγεθών $\mu_{xd} - \mu_{yd} - \nu_d$, με τον εξής προσεγγιστικό τρόπο :

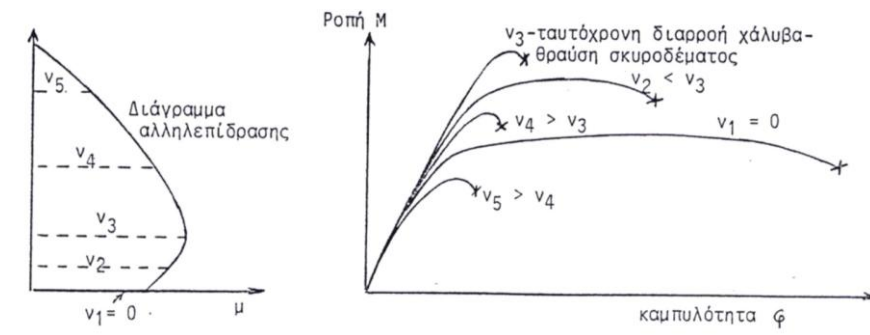
Κατ' αρχήν, θεωρούμε όλα τα ζεύγη εντατικών μεγεθών $\mu_{xd} - \nu_d$ και αγνοούμε την ν_d , υπολογίζουμε το συνολικό μηχανικό ποσοστό, ω_x , για οπλισμό ισοκαταμεμημένο στις δύο πλευρές τις παράλληλες στο διάνυσμα της μ_{xd} . Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης μονοαξονικής κάμψης με ορθή δύναμη $\mu_d - \nu_d$, για οπλισμό μόνο παράλληλα στις πλευρές αυτές ή μέσω των αντίστοιχων αναλυτικών σχέσεων της παραγράφου (4.6) που δίνουν το ω_{tot} (ω_x) συναρτήσεως των μ_d, ν_d . Είναι προφανές, συνήθως, ποιος συνδυασμός δίνει το μέγιστο, ω_x , π.χ. αυτός με τη μέγιστη μ_{xd} , εκτός αν το αντίστοιχο ν_d είναι μεγάλο, οπότε μπορεί κάποιος συνδυασμός με λίγο μικρότερη μ_{xd} και μικρό ν_d να είναι δυσμενέστερος. Διαφορετικά χρειάζεται να υπολογισθεί το ω_x για όλους ή για τους περισσότερους συνδυασμούς και να επιλεγεί το μέγιστο. Στη συνέχεια κάνουμε το ίδιο με τα ζεύγη $\mu_{yd} - \nu_d$ και υπολογίζουμε το συνολικό μηχανικό ποσοστό ω_y για οπλισμό ομοιόμορφα καταμεμημένα στις πλευρές τις παράλληλες στο διάνυσμα μ_{yd} . Μετατρέπουμε κατόπιν τα ω_x και ω_y σε διατομές χάλυβα A_{sx} και A_{sy} πολλαπλασιάζοντας επί $A_c f_{cd}/f_{yd}$ και τις υλοποιούμε μοιράζοντας τις κατά $A_{sx}/2$, $A_{sy}/2$ στις αντίστοιχες πλευρές, προσμετρώντας μάλιστα τις γωνιακές ράβδους τόσο στο A_{sx} όσο και στο A_{sy} . Έτσι, προκύπτει μία άνιση κατανομή οπλισμού, η οποία συνήθως, είναι επαρκής και για ταυτόχρονη διαξονική κάμψη της διατομής από τους πλήρεις συνδυασμούς $\mu_{xd} - \mu_{yd} - \nu_d$.

Η ανωτέρω διαδικασία δίνει ικανοποιητικά, και μάλιστα, συντηρητικά αποτελέσματα ακόμα και για μη-ορθογωνικές διατομές, όπως π.χ. για διατομές Γ, Τ, κ.α., αρκεί τα διαγράμματα ή οι αναλυτικές σχέσεις που ισχύουν για ορθογωνικές διατομές να χρησιμοποιούνται με ν_d, μ_{yd} και μ_{zd} που υπολογίζονται από την Εξ. (4.34), χρησιμοποιώντας σε αυτές ως A_c την πραγματική συνολική επιφάνεια της διατομής, ως M_{yd} και M_{zd} τις ροπές με διάνυσμα παράλληλο στις πλευρές, σκέλη της διατομής και ως h και b τις μέγιστες διαστάσεις της διατομής κάθετα στο διάνυσμα της M_{yd} ή της M_{zd} αντίστοιχα, δηλαδή τις αποστάσεις ακραίας εφελκόμενης από ακραία θλιβόμενη ίνα για κάμψη λόγω M_{yd} ή M_{zd} . Τα μηχανικά ποσοστά οπλισμού ω_x και ω_y που υπολογίζονται από τους δύο χωριστούς μονοαξονικούς υπολογισμούς, μετατρέπονται κατόπιν σε ράβδους με πολλαπλασιασμό επί $A_c f_{cd}/f_{yd}$ και τοποθετούνται κοντά στις αντίστοιχες ακραίες εφελκόμενες ή θλιβόμενες ίνες της διατομής.

4.11 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΟΡΘΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ

Στο Σχ. (4.20) φαίνεται η επίδραση της ορθής δύναμης, N , στην ικανότητα της διατομής να παραμορφώνεται πριν τη θραύση, δηλαδή την **πλαστιμότητα**. Όσο αυξάνει το μέγεθος της θλιπτικής δύναμης, τόσο μειώνεται η πλαστιμότητα. Παρά τη μείωση της πλαστιμότητας σε σχέση με αυτήν που αντιστοιχεί σε μηδενικό αξονικό φορτίο, αν η ανηγμένη ορθή δύναμη είναι μικρότερη από τη ν_b που αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη διαρροή χάλυβα και αστοχία του σκυροδέματος, η πλαστιμότητα είναι αρκετά ικανοποιητική, γιατί η αστοχία συνοδεύεται από διαρροή του χάλυβα. Για μεγαλύτερες τιμές της αξονικής δύναμης, όμως, η αστοχία

οφείλεται σε θραύση του σκυροδέματος χωρίς διαρροή του χάλυβα και η πλαστιμότητα είναι πολύ μικρή (δες σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.20 Διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας για διάφορες τιμές της αξονικής δύναμης. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΚΑΝΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΜΕΛΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ : ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Τα κατακόρυφα φέροντα στοιχεία του σκελετού ενός κτιρίου αναφέρονται πολλές φορές με ένα ενιαίο όνομα ως **κολόνες**. Λόγω όμως, του διαφορετικού τρόπου λειτουργίας, του διαφορετικού τρόπου υπολογισμού, αλλά κυρίως του διαφορετικού τρόπου όπλισης, χωρίζονται σε 3 μεγάλες κατηγορίες: **Υποστυλώματα**, **Τοιχεία** και **Σύνθετα Στοιχεία**. Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία θα αναφερθούμε, αποκλειστικά και μόνο, στα υποστυλώματα, καθώς αποτελούν το βασικό στοιχείο στην ανάπτυξη της.

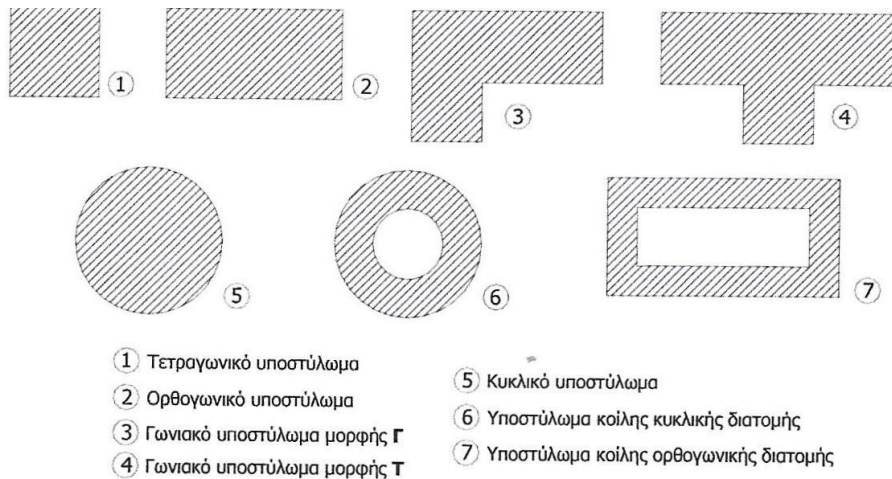
Υποστυλώματα είναι τα ορθογώνια στοιχεία που ο λόγος των πλευρών τους είναι μικρότερος από 4, π.χ. οι διατομές 400/400, 400/600, 250/900, κ.λ.π. (οι διαστάσεις είναι σε mm).

Στην κατηγορία των υποστυλωμάτων εντάσσονται και οι κυκλικές διατομές, π.χ. $D=500\text{mm}$, καθώς και οι τετράπλευρες, π.χ. 500/600 με εγγεγραμμένη γωνία 60° . Στην συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία δεν θα μας απασχολήσουν οι κυκλικές διατομές, καθώς και τα στοιχεία μορφής γάμα (Γ), ή ταυ (Τα) ή ζήτα (Ζ). Παρόλα αυτά στην κατηγορία των υποστυλωμάτων μπορούν να ενταχθούν και τα στοιχεία αυτά, (Γ) ή (Τ) ή (Ζ), που ο λόγος των πλευρών των ορθογωνικών τμημάτων τους είναι μικρότερος από 4, π.χ. η διατομή γάμα (Γ) 400/800/250/250, η διατομή ταυ (Τ) 700/500/250/250 και η ζήτα (Ζ) διατομή 600/700/900/250, κ.λ.π.

Όπως είναι αυτονόητο, τα υποστυλώματα είναι τα στοιχεία αυτά που είναι ιδιαίτερα κρίσιμα για τη συνολική στατική επάρκεια μίας κατασκευής, σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία της ανωδομής (δοκοί και πλάκες). Έντονες βλάβες σε υποστυλώματα έχουν μεγάλη πιθανότητα να οδηγήσουν σε μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σεισμικών δράσεων. Για το λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαστασιολόγηση και την κατασκευή τους.

Επιπλέον, το υποστυλώμα είναι το κυριότερο αντισεισμικό δομικό στοιχείο σε ένα κτίριο-κατασκευή και τα τσέρκια (διαφορετική ονομασία για τους συνδετήρες) το κρίσιμότερο στοιχείο του υποστυλώματος. Σε κάθε υποστυλώμα διακρίνουμε τις κρίσιμες (σε σεισμό) περιοχές, την ενδιάμεση περιοχή και την περιοχή του κόμβου, δηλαδή την κοινή περιοχή υποστυλώματος και δοκού. Στην παράγραφο 5.7 αναφέρονται παραδείγματα οπλισμών υποστυλωμάτων, στα οποία παρουσιάζονται και αναλύονται εκτενέστερα οι περιοχές αυτές.

Στο Σχ. (5.1) παρουσιάζονται διάφορες τυπικές μορφές υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Οι κοίλες διατομές είναι εξαιρετικά σπάνιες στα συνήθη οικοδομικά έργα, εμφανίζονται όμως πολύ συχνά σε γέφυρες.



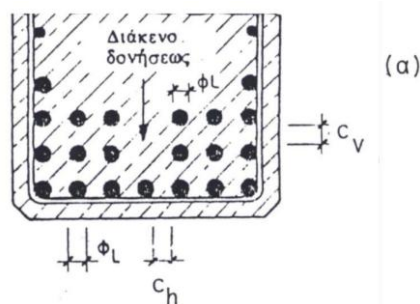
Σχήμα 5.1 Τυπικές διατομές υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος. (Πηγή: "Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος Ι", Παναγόπουλος Γεώργιος & Κίρτας Εμμανουήλ)

5.2 ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΡΑΒΔΩΝ

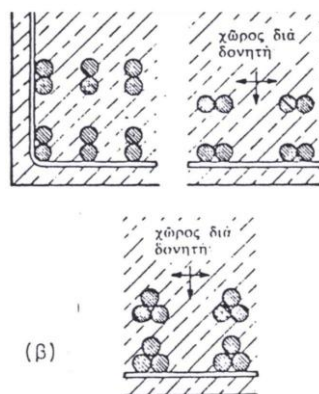
Μεταξύ παράλληλων μεμονωμένων ράβδων οπλισμού πρέπει να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη ελεύθερη, δηλαδή καθαρή απόσταση, ώστε να είναι δυνατή η διάστρωση του σκυροδέματος γύρω από αυτές. Αν οι παράλληλες ράβδοι είναι σε πολύ μικρές αποστάσεις, τότε οι κόκκοι των αδρανών δυσκολεύονται να περάσουν ανάμεσά τους, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών κάτω από ή μεταξύ των ράβδων και τη μείωση της συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος. Επιπροσθέτως, με δεδομένο ότι οι ράβδοι τοποθετούνται κατά κανόνα κοντά στην περίμετρο της διατομής και το σκυρόδεμα χυτεύεται εσωτερικά, αν οι αποστάσεις μεταξύ των ράβδων είναι πολύ μικρές το σκυρόδεμα δεν μπορεί να περάσει ανάμεσά τους, δηλαδή από τον πυρήνα του στοιχείου όπου και χυτεύεται προς τα έξω, με αποτέλεσμα η στρώση του σκυροδέματος μεταξύ ράβδων και επιφάνειας του στοιχείου, δηλαδή εσωτερικής επιφάνειας των ξυλοτύπων, να έχει κενά ή να είναι φτωχή σε χονδρόκοκκα αδρανή.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, οι ελάχιστες οριζόντιες ή κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ ράβδων συνίστανται να είναι :

$$c_v, c_h \geq \max(20\text{mm}, \text{διάμετρος μεγαλύτερης ράβδου } \Phi_L, \text{μέγιστος κόκκος αδρανών} + 5\text{mm}) \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.2 Καθαρές αποστάσεις μεταξύ παράλληλων ράβδων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 5.3 Δέσμες ράβδων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

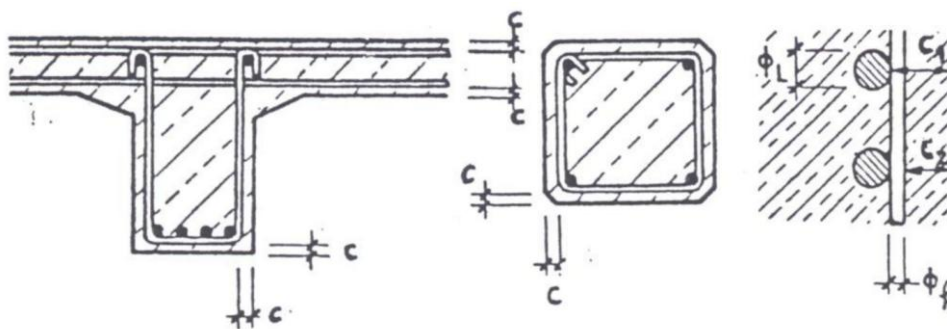
Αν σε ένα στοιχείο μπαίνει ο οπλισμός σε περισσότερες από μία στρώσεις ή σειρές, πρέπει οι ράβδοι της κάθε στρώσης ή σειράς να είναι ακριβώς από πάνω ή από κάτω ή πίσω από τις αντίστοιχες ράβδους των άλλων στρώσεων ή σειρών, δηλαδή στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο (δες σχήμα 5.2).

Σε υποστυλώματα μεγάλων διαστάσεων με μεγάλο αριθμό ράβδων, συμφέρει μερικές φορές να τοποθετούνται περισσότερες από μία παράλληλες ράβδοι της ίδιας κατηγορίας σε επαφή, αποτελώντας μία **δέσμη** ράβδων. Δεν επιτρέπονται περισσότερες από δύο ράβδους σε επαφή κατά τη διεύθυνση μίας διαμέτρου. Με αυτό τον τρόπο μία δέσμη μπορεί να έχει δύο (δες σχήμα 5.3^α), τρεις (σε διάταξη τριγωνική, δες σχήμα 5.3^β, ή Γ), ή τέσσερις (σε διάταξη τετραγωνική) ράβδους. Δέσμες τεσσάρων ράβδων επιτρέπονται μόνο σε υποστυλώματα.

Στους υπολογισμούς οι ράβδοι μίας δέσμης θεωρούνται ως μία ιδεατή ή ισοδύναμη ράβδος με διάμετρο Φ_n που έχει την ίδια συνολική διατομή. Αν η δέσμη έχει n ράβδους με την ίδια διάμετρο Φ , τότε είναι :

$$\Phi_n = \Phi \sqrt{n} \quad (5.2)$$

Από την Εξ. (5.1) δίνονται οι ελάχιστες καθαρές οριζόντιες ή κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ δεσμών ράβδων, μόνο που αντί της διαμέτρου Φ_L χρησιμοποιείται η ισοδύναμη διάμετρος Φ_n . Γενικά, έτσι προκύπτει σημαντική εξοικονόμηση χώρου, που επιτρέπει την τοποθέτηση περισσότερων ράβδων σε ένα δοσμένο πάχος ή πλάτος στοιχείου. Η διάταξη όμως ράβδων σε δέσμες, όπως και η χρήση ράβδων μεγάλης διαμέτρου, αυξάνει το πλάτος των ρωγμών αυξάνοντας την απόσταση τους, προκαλώντας προβλήματα λειτουργικότητας.



Σχήμα 5.4 Επικάλυψη ράβδων με σκυρόδεμα. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

5.3 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΜΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Για την προστασία των ράβδων του οπλισμού από διάβρωση και πυρκαγιά και για την εξασφάλιση της μεταφοράς δυνάμεων από τη ράβδο στο σκυρόδεμα με συνάφεια, πρέπει να υπάρχει μία **ελάχιστη επικάλυψη** των ράβδων με σκυρόδεμα. Κατά τον Ευρωκώδικα 2 ορίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη επικάλυψη ράβδων με σκυρόδεμα σε συνάρτηση της διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος, της ποιότητας του σκυροδέματος, επειδή σκυρόδεμα μεγαλύτερης αντοχής έχει πυκνότερο ιστό και μικρότερο πορώδες και προστατεύει καλύτερα τους οπλισμούς και της διαμέτρου της ράβδου. Οι επιβαλλόμενες απαιτήσεις συνεργασίας των δύο υλικών μέσω συνάφειας για την εξασφάλιση πλήρους και επαρκούς περιβολής της ράβδου με σκυρόδεμα ορίζουν ότι η επικάλυψη δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη διάμετρο της ράβδου ή της ισοδύναμης ράβδου, Φ_n , της δέσμης. Επιπλέον, για λόγους προστασίας της ράβδου από διάβρωση, η επικάλυψη δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από τα όρια του (Πιν.5.2), ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης σε συνθήκες περιβάλλοντος κατά τον Πιν. (5.1).

Σύμφωνα με τον Πιν. (5.2) η ελάχιστη επικάλυψη ορίζεται ανάλογα με την κατηγορία του φορέα, διακρίνοντας 6 κατηγορίες από S1 μέχρι S6. Κατά τον Ευρωκώδικα 2 συνίσταται η κατηγορία S4 εφόσον η διάρκεια ζωής του έργου σύμφωνα με το σχεδιασμό του είναι 50 χρόνια και εφόσον πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις κατηγορίας αντοχής στην τελευταία στήλη του Πιν. (5.1). Το Εθνικό Προσάρτημα του Ευρωκώδικα 2 υιοθετεί τις συστάσεις αυτές καθώς και την τροποποίηση της κατηγοριοποίησης κατά τον Πιν. (5.3). Από την τελική κατηγορία φορέα που προκύπτει μετά την τροποποίηση, διαβάζει κανείς την ελάχιστη επικάλυψη από τον Πιν. (5.2).

Η ελάχιστη επικάλυψη των ράβδων με σκυρόδεμα επιτυγχάνεται μέσω παρεμβλημάτων ή αποστατήρων μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του ξυλότυπου και των ράβδων, π.χ. αποθεμάτων, αν πρόκειται για οριζόντιες κάτω ράβδους δοκών ή πλακών. Με δεδομένο ότι οι ράβδοι οπλισμού δένονται και συναρμολογούνται σε ένα σταθερό πλέγμα μετά την τοποθέτησή τους μέσα στους ξυλότυπους, αρκούν λίγα παρεμβλήματα για το σκοπό αυτό, π.χ. ένα παρέμβλημα ανά m για κάθε διεύθυνση του ξυλότυπου. Για το σκοπό αυτό υπάρχουν στο εμπόριο ειδικοί πλαστικοί αποστατήρες με υποδοχή για να "καθίσει" μία οριζόντια ράβδος, καθώς και πλαστικές ροδέλες που προσαρμόζονται εύκολα γύρω από τη ράβδο εξασφαλίζοντας την επιθυμητή απόσταση από την κατακόρυφη επιφάνεια ξυλότυπων. Τα βοηθήματα αυτά έρχονται σε διαστάσεις που αντιστοιχούν σε επικάλυψη 15, 20, 25, 30 κ.λ.π. mm και που ταιριάζουν στο σύννηθες φάσμα διαμέτρων ράβδων. Τα τεμάχια ράβδων οπλισμού μήκους μερικών cm μπορούν να παίξουν τον ρόλο παρεμβλημάτων.

Για την εξασφάλιση παντού της ελάχιστης επικάλυψης με σκυρόδεμα c_{min} , πρέπει ο σχεδιασμός και η κατασκευή μέσω των παρεμβλημάτων να στοχεύει σε μεγαλύτερη μέση επικάλυψη των ράβδων. Έτσι, κατά τον Ευρωκώδικα 2 ορίζεται ότι η **ονομαστική επικάλυψη** των ράβδων με σκυρόδεμα c_{nom} στην οποία πρέπει να στοχεύει ο σχεδιασμός και να προσαρμόζονται οι διαστάσεις των παρεμβλημάτων, χρειάζεται να ξεπερνά την ελάχιστη κατά 10mm τουλάχιστον.

$$c_{nom} = c_{min} + 10mm \quad (5.3)$$

Αυτά τα τουλάχιστον 10mm παίζουν το ρόλο του "συντελεστή ασφαλείας" και η ελάχιστη τιμή επικάλυψης, c_{min} , παίζει το ρόλο χαρακτηριστικής τιμής. Έτσι, π.χ. με την τοποθέτηση υποθεμάτων ύψους ίσου με την ονομαστική επικάλυψη περίπου κάθε 1m κάτω από οριζόντιες κάτω ράβδους, εξασφαλίζεται ότι και στο ενδιάμεσο διάστημα, όπου η ράβδος κάμπτεται λόγω τους βάρους της, η επικάλυψη δεν υπολείπεται της ελάχιστης τιμής.

Στους υπολογισμούς η τιμή της επικάλυψης για τη διαστασιολόγηση των μελών, πρέπει να λαμβάνεται ίση με την ονομαστική, c_{nom} , και όχι με την ελάχιστη. Επιπλέον, στα κατασκευαστικά σχέδια πρέπει να αναγράφεται η ονομαστική τιμή της επικάλυψης.

Πίνακας 5.1: Κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον και ελάχιστη κατηγορία σκυροδέματος

	Περιβάλλον (Παραδείγματα)	Σκυρόδεμα
1 Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής		
X0	Σκυρόδεμα άοπλο ή χωρίς ενσωματωμένο μέταλλο: όλες οι συνθήκες έκθεσης πλην επιφανειακής τριβής, ψύξης-απόψυξης, χημικής προσβολής Οπλισμένο σκυρόδεμα: πολύ ξηρό (Εσωτερικό κτιρίων με πολύ χαμηλή σχετική υγρασία)	$\geq C12/15$
2 Διάβρωση από ενανθράκωση		
XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό (Εσωτερικό κτιρίων με μέτρια ή υψηλή σχετική υγρασία. Σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο σε νερό)	$\geq C20/25$
XC2	Υγρό, σπανίως ξηρό (Επιφάνειες σκυροδέματος σε μακροχρόνια επαφή με νερό. Θεμελιώσεις)	$\geq C25/30$
XC3	Μέτρια υγρασία (Εσωτερικό κτιρίων με πολύ χαμηλή σχετική υγρασία. Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βροχή)	
XC4	Περιοδικά υγρό και ξηρό (Σε επαφή με νερό, όχι XC2)	C30/37
3 Διάβρωση από χλωριόντα		
XD1	Μέτρια υγρασία (Έκθεση σε αερομεταφερόμενα χλωριόντα)	$\geq C30/37$
XD2	Υγρό, σπανίως ξηρό (Πισίνες. Έκθεση σε βιομηχανικά απόβλητα με χλωριόντα)	$\geq C32/40$
XD3	Περιοδικά υγρό και ξηρό (Τμήματα γεφυρών με έκθεση σε χλωριόντα. Πεζοδρόμια. Πλάκες χώρων στάθμευσης)	$\geq C35/45$
4 Διάβρωση από χλωριόντα θαλασσινού νερού		
XS1	Εκτεθειμένο σε αερομεταφερόμενα άλατα θαλάσσης, χωρίς άμεση επαφή με θαλασσινό νερό (Κατασκευές κοντά σε ακτή)	$\geq C26/32$ για τσιμέντο II, III, ή IV πλην B/LL
XS2	Μόνιμα βυθισμένο σε θαλασσινό νερό (Τμήμα λιμενικών έργων)	$\geq C30/37$ για τσιμέντο I ή II+B/LL
XS3	Ζώνες παλίρροιας, παφλασμού και πιτσιλίσματος (Τμήματα λιμενικών έργων)	$\geq C30/37$ για τσιμέντο II, III, ή IV πλην B/LL $\geq C35/45$ για τσιμέντο I ή II+B/LL
5. Προσβολή ψύξης / απόψυξης		
XF1	Μέτριος κορεσμός με νερό χωρίς υλικά τήξης πάγου (κατακόρυφες επιφάνειες με έκθεση σε βροχή/ πάγο)	$\geq C28/35$
XF2	Μέτριος κορεσμός με νερό με υλικά τήξης πάγου (κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος έργων οδοποιίας με έκθεση σε ψύξη και σε αερομεταφερόμενα υλικά τήξης πάγου)	$\geq C32/40$ χωρίς αέρα $\geq C25/30$ με $\geq 4\%$ αέρα
XF3	Υψηλός κορεσμός με νερό χωρίς υλικά τήξης πάγου (Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος με έκθεση σε βροχή και πάγο)	$\geq C35/45$ χωρίς αέρα $\geq C25/30$ με $\geq 4\%$ αέρα
XF4	Υψηλός κορεσμός με νερό με υλικά τήξης πάγου ή θαλασσινό (Έκθεση σε υλικά τήξης πάγου: ψεκασμός, καταστρώματα οδών ή γεφυρών. Ζώνη παφλασμού σε λιμενικά με έκθεση σε πάγο)	$\geq C30/37$ με $\geq 4\%$ αέρα
6. Χημική προσβολή		
XA1	Ελαφρώς επιθετικό χημικό περιβάλλον κατά EN206-1 (Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα)	$\geq C28/35$

	Περιβάλλον (Παραδείγματα)	Σκυρόδεμα
XA2	Μετρίως επιθετικό χημικό περιβάλλον κατά EN206-1 (Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα)	$\geq C30/37$
XA3	Ιδιαίτερος επιθετικό χημικό περιβάλλον κατά EN206-1 (Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα)	$\geq C35/45$

Πίνακας 5.1 Κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον και ελάχιστη κατηγορία σκυροδέματος. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Κατηγορία Φορέα	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1						
	X0	XC1	XC2	XC3, XC4	XD1	XD2, XS1, XS2	XD3, XS3
S1 (ελάχιστη)	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Πίνακας 5.2 Ελάχιστη επικάλυψη c_{min} (mm) για ανθεκτικότητα σε διάρκεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Κριτήριο	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1			
	X0, XC1	XC2, XC3	XC4, XD1, XD2, XS1	XD3, XS2, XS3
Σχεδιασμός για 100 χρόνια ζωή	Δύο κατηγορίες πάνω (π.χ., από S4 σε S6)			
Κατηγορία αντοχής	≥ C30/37 Μία κατηγορία κάτω	≥ C35/45 Μία κατηγορία κάτω	≥ C40/50 Μία κατηγορία κάτω (π.χ., από S4 σε S3)	≥ C45/55 Μία κατηγορία κάτω
Πλάκες (θέση οπλισμού δεν επηρεάζεται από διαδικασία κατασκευής)	Μία κατηγορία κάτω (π.χ., από S4 σε S3)			
Ειδικός έλεγχος ποιότητας παραγωγής σκυροδέματος	Μία κατηγορία κάτω (π.χ., από S4 σε S3)			

Πίνακας 5.3 Συνιστώμενη τροποποίηση κατηγορίας κατασκευών για ανθεκτικότητα σε διάρκεια. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

5.4 ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Η ελάχιστη επικάλυψη που πρέπει να εξασφαλίζεται για τους οπλισμούς των υποστυλωμάτων, συνήθως, κυμαίνεται από 25 έως 35 mm ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος λειτουργίας του κτιρίου. Τα 25mm αντιστοιχούν σε ξηρό κλίμα και τα 35mm σε παραθαλάσσια περιοχή.

Η εξασφάλιση της επικάλυψης των οπλισμών των υποστυλωμάτων είναι απλή. Για παράδειγμα, αρκούν τέσσερα μεμονωμένα στηρίγματα στην κορυφή του υποστυλώματος, καθώς στη βάση οι ράβδοι εξασφαλίζονται με δέσιμο στις αναμονές.

Ειδικότερα, για τα υποστυλώματα, η χρησιμοποίηση στηριγμάτων για την εξασφάλιση της επικάλυψης των οπλισμών επιτυγχάνει και την ορθοκέντρωση των κατακόρυφων ράβδων, ώστε όταν ο τεχνίτης κληθεί να σιδερώσει τον επάνω όροφο, οι ράβδοι θα είναι στη θέση τους και δε θα χρειαστεί να καταβάλει σημαντικό κόπο, που σημαίνει και πρόσθετο κόστος, για να τις φέρει στη σωστή θέση.

Η επικάλυψη μπορεί να εξασφαλιστεί, είτε με ροδέλες στην κορυφή των ράβδων (σε αυτές τις θέσεις δεν υπάρχει πρόβλημα να παρασυρθούν από το σκυρόδεμα), είτε με κατακόρυφες ροδέλες αγκυρωμένες πάνω στους συνδετήρες, είτε με κομμάτια πλαστικής βέργας τοποθετημένης κατακόρυφα πάνω στον ξυλότυπο.

Σε κάθε περίπτωση, η τοποθέτηση των αποστατήρων γίνεται μετά την τοποθέτηση του κλωβού των συνδετήρων, ώστε με αυτό τον τρόπο αφενός να γίνει εύκολα η τοποθέτηση του κλωβού και αφετέρου να ορθοκεντρωθούν οι ράβδοι με επιμέλεια.



Σχήμα 5.5 Παράδειγμα επικάλυψης οπλισμού υποστυλωμάτων τετραγωνικής διατομής. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)

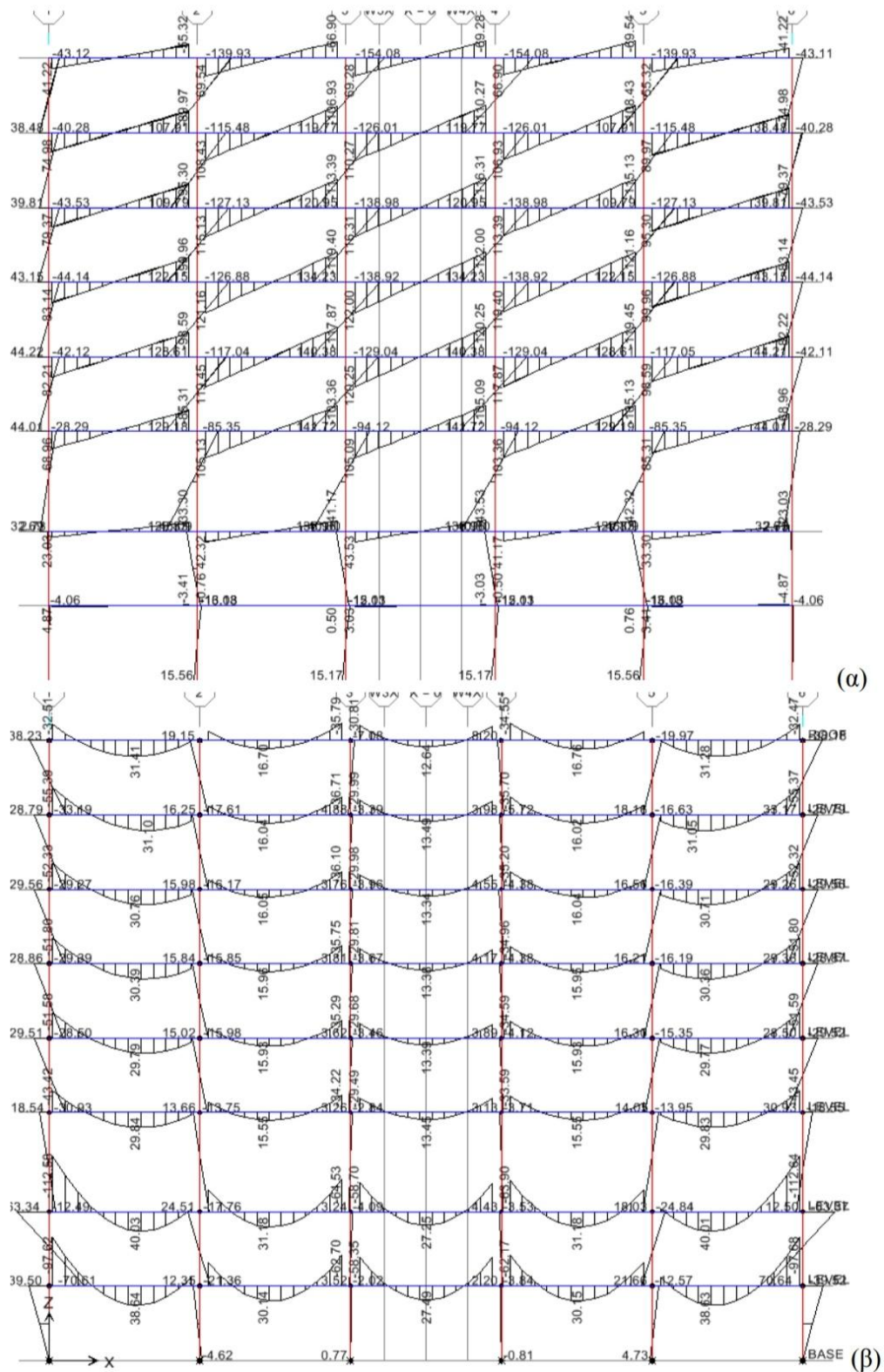
5.5 ΚΑΝΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

5.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

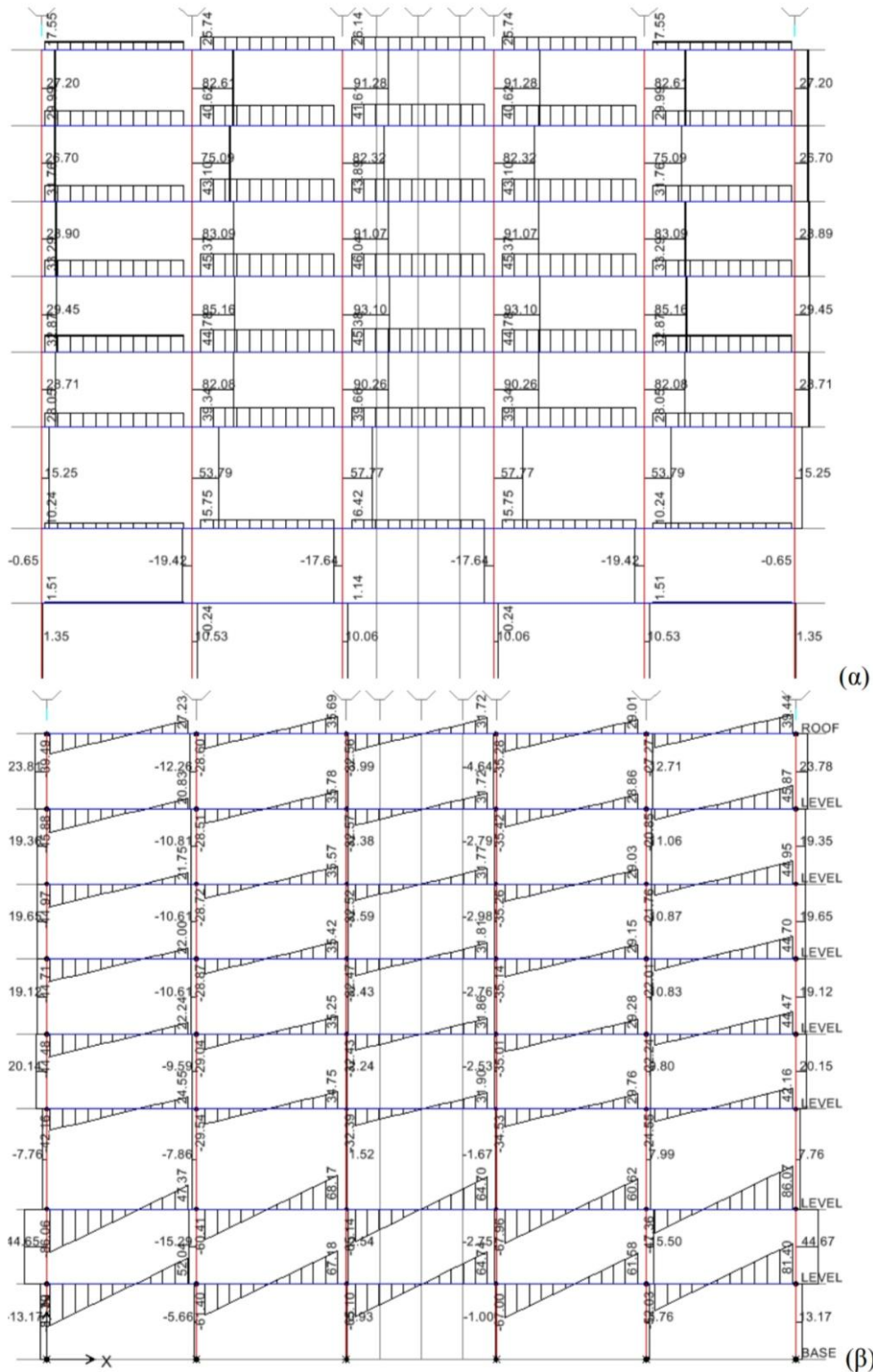
Ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει για τα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος τρεις κατηγορίες πλαστιμότητας (ΚΠ) : (X) τη Χαμηλή, (M) τη Μέση και (Y) την Υψηλή. Στην ΚΠ X χρησιμοποιείται $q=1,5$ και τα κτίρια διαστασιολογούνται και διαμορφώνονται κατασκευαστικά, όπως για τις συνήθεις μη-σεισμικές δράσεις, δηλαδή το συνδυασμό των κατακόρυφων δράσεων $1,35G+1,5Q$. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα μέλη διαστασιολογούνται σε κάμψη και διάτμηση για τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση για το σεισμικό συνδυασμό $G+\psi_2Q+E$ και όχι κατά τους ειδικούς κανόνες του "Ικανοτικού Σχεδιασμού" και ότι δεν ακολουθούν ειδικούς κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης, όπλισης και λεπτομερειών. Με άλλα λόγια, αν το σύνολο της κατασκευής σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στο σεισμό σχεδιασμού ουσιαστικά ελαστικά, δεν υπάρχουν για τα μέλη **απαιτήσεις πλαστιμότητας** έναντι σεισμού, απαιτήσεις που θα υπήρχαν αν το σύνολο της κατασκευής και τα επιμέρους μέλη καλούνταν να ανταπεξέλθουν στο σεισμό σχεδιασμού με ανελαστική συμπεριφορά. Αντιθέτως, αν ο αντισεισμικός σχεδιασμός βασίζεται σε τιμές του δείκτη συμπεριφοράς q μεγαλύτερες του 1,5, δηλαδή στις ΚΠ M και ΚΠ Y, πρέπει τα μέλη της κατασκευής να διαμορφώνονται κατασκευαστικά και να οπλίζονται έτσι ώστε το σύνολο της κατασκευής να μπορεί να αναπτύξει ανελαστικές μετακινήσεις αντίστοιχες με την τιμή του δείκτη q που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό (το οποίο σημαίνει ολικές μετακινήσεις κτιρίου τουλάχιστον q -φορές τις ελαστικές κατά την ανάλυση). Στην περίπτωση αυτή για τα μέλη υπάρχουν **απαιτήσεις πλαστιμότητας**, οι οποίες συνίστανται: α) σε ειδικούς κανόνες για τη γεωμετρία των μελών και για την όπλιση τους, οι οποίοι εξασφαλίζουν ικανότητα μεγάλης μετελαστικής παραμόρφωσης και β) σε ειδικούς κανόνες "Ικανοτικού Σχεδιασμού" ορισμένων μελών ή περιοχών τους, που εξασφαλίζουν ότι τα μέλη ή οι περιοχές αυτές θα παραμείνουν ελαστικά κατά την ανταπόκριση στο σεισμό σχεδιασμού.

Η βασική ιδέα των ειδικών κανόνων για την κατασκευαστική διαμόρφωση και όπλιση με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας είναι η εξής : Από τα δύο υλικά που συνθέτουν το οπλισμένο σκυρόδεμα, το ένα είναι ο χάλυβας και είναι όλκιμο, κυρίως σε εφελκυσμό και λιγότερο σε θλίψη, όπου υπάρχει το ενδεχόμενο λυγισμού των ράβδων, ενώ το άλλο είναι το σκυρόδεμα και είναι ψαθυρό. Η βελτίωση της πλαστιμότητας του συνόλου επιτυγχάνεται συνθετικά της ανελαστικής συμπεριφοράς μετά τη διαρροή του μέλους είναι ο χάλυβας σε εφελκυσμό και όχι το σκυρόδεμα σε θλίψη, και αν περιορισθεί η ψαθυρότητα των δύο υλικών σε θλίψη, δηλαδή του σκυροδέματος με τη βοήθεια περίσφιγξης με συνδετήρες και των θλιβόμενων ράβδων με μείωση του μήκους λυγισμού τους μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων. Στην ανελαστική συμπεριφορά καθοριστικό ρόλο παίζει ο εφελκυσμένος χάλυβας, αν αυτός διαρρέει και αναπτύσσει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις πριν το σκυρόδεμα φθάσει την αντοχή του και πλησιάσει την παραμόρφωση θραύσης του. Αυτό επιτυγχάνεται με περιορισμό της ποσότητας του εφελκυσμένου χάλυβα, βεβαίως μέχρι ενός κάτω ορίου και αύξηση της ποσότητας, δηλαδή των διαστάσεων του σκυροδέματος. Δηλαδή, αν το ένα από τα δύο υλικά έχει ικανοποιητική όλκιμη συμπεριφορά και το άλλο ψαθυρή, για να έχει ο συνδυασμός τους ικανοποιητική πλάστιμη συμπεριφορά, πρέπει να περιορίσουμε την ποσότητα του πρώτου, δηλαδή του "καλού" υλικού και να αυξήσουμε αυτήν του δεύτερου, δηλαδή του "κακού" υλικού, ώστε το δεύτερο να μην είναι καθοριστικό της συνολικής συμπεριφοράς. Με άλλα λόγια, η υπερόπλιση υποστυλωμάτων στη διαμήκη διεύθυνση, συνήθως δεν είναι προς όφελος του συγκεκριμένου μέλους, αλλά ούτε και του συνόλου της κατασκευής. Παρόμοια σκέψη εφαρμόζεται μέσω των κανόνων "Ικανοτικού Σχεδιασμού" και σε επίπεδο δομικού συστήματος, όπου και πάλι χρειάζεται να περιορισθεί η αντοχή εκείνων των μελών και τρόπων αστοχίας που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πλαστιμότητα και να αυξηθεί η αντοχή των πιο ψαθυρών, δηλαδή των υποστυλωμάτων σε κάμψη και γενικά όλων των στοιχείων σε διάτμηση, έτσι ώστε καθοριστικά της ανελαστικής συμπεριφοράς να είναι τα πρώτα.

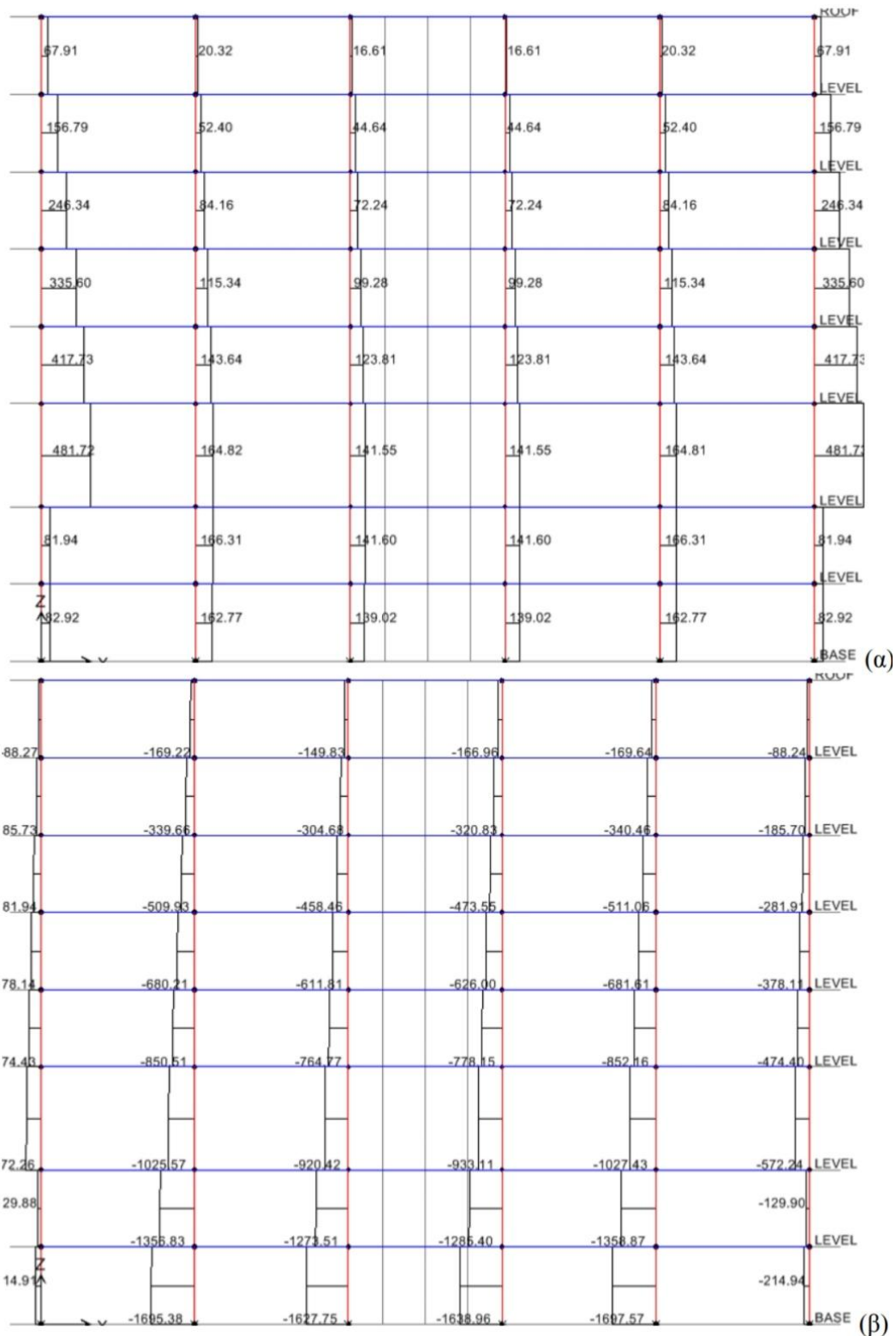
Οι κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και όπλισης εκτός από την αύξηση της τοπικής διαθέσιμης πλαστιμότητας, στοχεύουν στην αποφυγή προβλημάτων και βλαβών που παρατηρήθηκαν με μεγάλη συχνότητα σε σεισμούς του παρελθόντος και στην κάλυψη από ενδεχόμενα και εντατικές καταστάσεις που είναι εκτός των προβλέψεων των υπολογισμών. Υπενθυμίζεται ότι η ανάλυση της κατασκευής για τις σεισμικές δράσεις γίνεται με βάση ένα εξαιρετικά απλοποιημένο προσομοίωμα της δράσης, δηλαδή το εξαιρετικά περίπλοκο φαινόμενο της μη-γραμμικής δυναμικής απόκρισης της κατασκευής σε σεισμό μεγάλης έντασης, που θεωρείται στον υπολογισμό ως το αποτέλεσμα "ισοδύναμων" οριζόντιων στατικών σεισμικών δυνάμεων με καθορισμένη κατανομή και ένταση από τον Ευρωκώδικα 8 ή προσομοιώνεται με ελαστική ταλάντωση λόγω σεισμικής δράσης υποπολλαπλάσιας έντασης και της κατασκευής (αγνοείται ή λαμβάνεται υπόψη κατά χο9νδροειδή τρόπο η επίδραση στην ένταση των τοιχοποιϊών πλήρωσης, της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος, του εδάφους θεμελίωσης, κ.λ.π.). Επιπλέον το μέγεθος της σεισμικής δράσης, δηλαδή η ένταση του σεισμού στον οποίο θα κληθεί ενδεχομένως να ανταπεξέλθει η κατασκευή στη διάρκεια της ζωής της, χαρακτηρίζεται από αυξημένη αβεβαιότητα σε σύγκριση με τις άλλες δράσεις, εγγονός που σημαίνει ότι οι μέγιστες απαιτήσεις ανελαστικών παραμορφώσεων στις οποίες θα εκτεθούν τα μέλη ενδέχεται να είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές για τις οποίες έχουν υπολογισθεί. Εξαιτίας των ανωτέρω λόγων, οι οποίοι αναφέρονται ειδικά στο σχεδιασμό έναντι σεισμού, αλλά και επιπλέον επειδή υπάρχει πάντοτε το ενδεχόμενο ανθρωπίνων σφαλμάτων, η διαστασιολόγηση και η όπλιση των μελών δεν μπορεί να στηρίζεται αποκλειστικά στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Έτσι οι κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης σκοπεύουν μεταξύ άλλων να προσδώσουν στα μέλη μία ελάχιστη στάθμη αντοχής και ασφάλειας έναντι ενδεχομένων που είναι εκτός από τους υπολογισμούς.



Σχήμα 5.6 Τυπικά διαγράμματα ροπών κάμψης 6-ορόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μόνιμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 5.7 Τυπικά διαγράμματα τεμνουσών 6-ρόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μόνιμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 5.8 Τυπικά διαγράμματα αξονικών δυνάμεων 6-ορόφου πλαισίου με 2 υπόγεια (α) λόγω σεισμού, (β) λόγω οιονεί-μόνιμων κατακόρυφων φορτίων $G+\psi_2Q$. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

5.5.2 ΚΑΝΟΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

5.5.2.1 ΡΟΛΟΣ, ΣΤΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Τα υποστυλώματα είναι κατακόρυφα γραμμικά μέλη στα οποία η μεγαλύτερη και η μικρότερη διάσταση της διατομής τους έχουν την ίδια τάξη μεγέθους: συμβατικά, κατακόρυφα στοιχεία με λόγο μεγαλύτερης προς μικρότερη διάσταση διατομής μεγαλύτερο από 4.0 ορίζονται ως τοιχώματα. Δηλαδή τα τοιχώματα έχουν στη μία διεύθυνση δυσκαμψία και αντοχή πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στην άλλη, ενώ τα υποστυλώματα έχουν παρόμοια. Η ουσιαστική όμως, διάκριση υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων είναι ότι τα υποστυλώματα ως μέλη ενός δομικού συστήματος έχουν διαστάσεις διατομής και δυσκαμψία της ίδιας τάξης μεγέθους όπως οι δοκοί, ενώ τα τοιχώματα έχουν πολύ μεγαλύτερες. Ως αποτέλεσμα, για φόρτιση της κατασκευής με οριζόντιες δράσεις, όπως ο σεισμός ή ο άνεμος, τα μεν υποστυλώματα αποτελούν με τις δοκούς πλαίσια, στα οποία οι ροπές δοκών και υποστυλωμάτων έχουν παρόμοιο μέγεθος και γενικά αντίθετο πρόσημο στα δύο άκρα κάθε μέλους, ενώ τα τοιχώματα "αισθάνονται" ελάχιστα την παρουσία και τη δυσκαμψία των δοκών, λειτουργώντας σχεδόν σαν κατακόρυφοι πρόβολοι και αναπτύσσοντας ομόσημες ροπές σε όλο σχεδόν το ύψος τους με μέγιστη τιμή στη βάση της κατασκευής.

Ο βασικός ρόλος των υποστυλωμάτων είναι να παραλαμβάνουν τα κατακόρυφα φορτία από τις οριζόντιες επιφάνειες χρήσης της κατασκευής, δηλαδή τις πλάκες, άμεσα ή πιο συχνά έμμεσα μέσω των δοκών και να τα μεταφέρουν στα στοιχεία θεμελίωσης. Έντονες βλάβες σε υποστυλώματα έχουν μεγάλη πιθανότητα να οδηγήσουν στην μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σεισμικών δράσεων. Έτσι αποτελούν το πιο σημαντικό, μετά τα στοιχεία θεμελίωσης, τμήμα του φέροντα οργανισμού, έχοντας για το λόγο αυτό την απαίτηση ιδιαίτερης φροντίδας για τη διαστασιολόγηση, την κατασκευαστική διαμόρφωση και την όπλισή τους.

Τα υποστυλώματα ή γενικότερα τα κατακόρυφα στοιχεία σε συνδυασμό με τις δοκούς, με τις οποίες συνδέονται μονολιθικά δημιουργώντας πλαίσια σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις αναλαμβάνουν επίσης τις οριζόντιες δράσεις, όπως ο σεισμός και ο άνεμος και τις μεταφέρουν στο έδαφος. Αυτή η μεταφορά γίνεται μέσω των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα κατακόρυφα στοιχεία: σε κάθε όροφο μίας πολυώροφης κατασκευής το άθροισμα των παράλληλων προς μία οριζόντια διεύθυνση τεμνουσών των κατακόρυφων στοιχείων ισούται με τη συνολική εξωτερική οριζόντια δύναμη που ασκείται σε όλους τους υπερκείμενους ορόφους εξαιτίας της οριζόντιας δράσης. Έτσι το άθροισμα των τεμνουσών των κατακόρυφων στοιχείων, αλλά και η τέμνουσα καθενός από αυτά, γενικά αυξάνεται από όροφο σε όροφο από την κορυφή προς τη βάση της κατασκευής, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στην αμέσως πιο πάνω από τη θεμελίωση όροφο, όπου τυχόν υπόγειοι όροφοι με περιμετρικά τοιχώματα που αναλαμβάνουν το σύνολο σχεδόν της οριζόντιας δράσης του ορόφου θεωρούνται τμήμα της θεμελίωσης. Σε περίπτωση, όμως, που το κτίριο έχει τοιχώματα δυσκαμψίας, όπως αυτό στο οποίο ανήκει το 6-όροφο πλαίσιο με 2 υπόγεια του Σχ.(5.6) - (5.8), τότε στα μεν τοιχώματα παρουσιάζεται σημαντική αύξηση της τέμνουσας από όροφο σε όροφο από την κορυφή προς τη βάση, αλλά στα υποστυλώματα μειώνεται η τέμνουσα.

Για το λόγο ότι οι οριζόντιες δράσεις κατά κανόνα προσομοιώνονται με οριζόντιες δυνάμεις που δρουν στις στάθμες των ορόφων, όπως επίσης στη δυναμική ανάλυση για σεισμική δράση, οι μάζες, οι οποίες δημιουργούν τις αδρανειακές δυνάμεις, θεωρούνται συγκεντρωμένες στις στάθμες των ορόφων, οι τέμνουσες των υποστυλωμάτων και

γενικότερα των κατακόρυφων στοιχείων έχουν σταθερή τιμή μέσα σε κάθε όροφο και προκαλούν γραμμικό διάγραμμα αντίστοιχων ροπών κάμψης, η κλίση του οποίου, δηλαδή η διαφορά των ροπών κάμψης κορυφής και βάσης του στοιχείου δια του ύψους του ορόφου ισούται με την τέμνουσα του στοιχείου. (δες σχήμα 5.6^α). Δηλαδή για οριζόντιες δράσεις, π.χ. σεισμικές, οι ροπές κάμψης των υποστυλωμάτων, οι οποίες συνήθως είναι το κυριότερο μέγεθος για τη διαστασιολόγηση και τη σεισμική συμπεριφορά τους, είναι κατά βάση το δευτερογενές αποτέλεσμα των τεμνουσών τους, δηλαδή αναπτύσσονται έτσι ώστε με την κλίση του διαγράμματος τους να δώσουν την τέμνουσα δύναμη που είναι απαραίτητη για τη μεταφορά της οριζόντιας δράσης στη θεμελίωση. Άρα, αντίθετα με το τι συμβαίνει με τις τέμνουσες των κατακόρυφων στοιχείων, το άθροισμα των οποίων στον όροφο δίνει τη συνισταμένη εξωτερική οριζόντια δύναμη από την υπόψη στάθμη και πάνω, οι ροπές κάμψης τους δεν αποτελούν το κύριο μέσο μεταφοράς στο έδαφος της ως προς οριζόντιο άξονα ροπής της οριζόντιας δράσης. Αυτή η ροπή, η οποία ονομάζεται "ροπή ανατροπής" και στη στάθμη της θεμελίωσης ισούται περίπου με τη συνολική οριζόντια εξωτερική δύναμη επί $2H_{\text{tot}}/3$ αν πρόκειται για σεισμική δράση, όπου H_{tot} είναι το συνολικό ύψος της κατασκευής πάνω από τη θεμελίωση, μεταφέρεται στο έδαφος κυρίως μέσω των αξονικών δυνάμεων των κατακόρυφων στοιχείων: προκαλεί αξονικές δυνάμεις θλίψης στο μισό της κάτοψης και εφελκυσμό στο άλλο μισό με μέγιστες τιμές στα κατακόρυφα στοιχεία με τη μεγαλύτερη απόσταση από το κέντρο της κάτοψης κατά τη διεύθυνση της οριζόντιας δράσης (δες σχήμα 5.8^α). Το άθροισμα των ροπών των αξονικών δυνάμεων ως προς οριζόντιο κεντροβαρικό άξονα στη στάθμη της βάσης κάθετο στη διεύθυνση της οριζόντιας δράσης συν το άθροισμα των ροπών κάμψης των κατακόρυφων στοιχείων στη βάση του κατώτατου ορόφου τους, δίνει τη συνολική ροπή ανατροπής.

Ο Ευρωκώδικας 8 επιτρέπει το αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών για ουσιαστικά ελαστική συμπεριφορά, δηλαδή για $q=1,5$, οπότε τα μέλη τους διαστασιολογούνται για τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση και όχι με βάση τους Κανόνες "Ικανοτικού Σχεδιασμού" και διαμορφώνονται κατασκευαστικά χωρίς απαιτήσεις πλαστιμότητας. Αν όμως ο αντισεισμικός σχεδιασμός γίνεται με υψηλότερες τιμές του δείκτη συμπεριφοράς q , τότε για όλα τα κατακόρυφα στοιχεία πλην αυτών υπογείων ορόφων με ισχυρά περιμετρικά τοιχώματα στη περίμετρο, ικανά να παραλάβουν το σύνολο της σεισμικής δράσης, υπάρχουν απαιτήσεις πλαστιμότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξαιρετικά μεγάλη σημασία των υποστυλωμάτων για την ακεραιότητα του συνόλου της κατασκευής, οι ακραίες περιοχές υποστυλωμάτων με απαιτήσεις πλαστιμότητας διαμορφώνονται κατασκευαστικά έτσι ώστε να μπορούν να αναπτύξουν αξιόλογη τοπική πλαστιμότητα αν σχηματιστούν εκεί πλαστικές αρθρώσεις. Αυτά τα κατασκευαστικά μέτρα αφορούν τμήματα του ύψους του υποστυλώματος, τα οποία χαρακτηρίζονται ως "κρίσιμες περιοχές". Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, ως τέτοιες ορίζονται οι ακραίες περιοχές κάθε υποστυλώματος μέχρι απόσταση από την παρειά του κόμβου που αναγράφεται στην 1^η γραμμή του Πιν. (5.5), όπου h_c , b_c είναι πλευρές της διατομής και H_{c1} , το καθαρό ύψος του ορόφου από παρειά σε παρειά στήριξης. Αυτό το μήκος υπερκαλύπτει την έκταση της πλαστικοποίησης στα άκρα του υποστυλώματος, αν αυτή συμβεί.

Αν ένα υποστυλώμα με απαιτήσεις πλαστιμότητας είναι σε επαφή με τοίχο, διαχωριστικό ή εξωτερικό και ένας από τους τοίχους με τους οποίους εφάπτεται το υποστυλώμα διακόπτεται σε κάποιο σημείο του ύψους του υποστυλώματος, τότε ως κρίσιμο θεωρείται ολόκληρο το ύψος του υποστυλώματος, για τους εξής λόγους : Τοίχος μερικού ύψους σε επαφή με το υποστυλώμα μειώνει το ενεργό ελεύθερο ύψος του υποστυλώματος, επειδή περιορίζει ή και εμποδίζει την οριζόντια μετακίνηση του στο ύψος αυτό. Με αυτό τον τρόπο

αυξάνει την ενεργό δυσκαμψία του υποστυλώματος στην οριζόντια διεύθυνση σε σύγκριση με τη δυσκαμψία, η οποία θεωρήθηκε στην ανάλυση καθώς και με τη δυσκαμψία των υπολοίπων υποστυλωμάτων του ορόφου. Έτσι το υποστύλωμα αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής τέμνουσας ορόφου από τα λοιπά και από ότι ελήφθη υπόψη στον υπολογισμό, με αποτέλεσμα να οδηγείται σε ενδεχόμενη πρόωρη αστοχία του. Στην αστοχία αυτή συμβάλλει ο μικρός λόγος διάτμησης, M/Vh_c , του υποστυλώματος, ο οποίος ισούται περίπου με το μισό του λόγου του ελεύθερου ύψους του προς την πλευρά της διατομής. Υποστυλώματα με μικρό λόγο διάτμησης, π.χ. κάτω του 2,0 δηλαδή "κοντά υποστυλώματα" είναι ιδιαίτερα τρωτά σε διάτμηση. Για τον ίδιο λόγο κρίσιμο χαρακτηρίζεται ολόκληρο το ύψος ενός υποστυλώματος αν το υποστύλωμα συνδέεται μονολιθικά σε μέρος του ύψους του με τοίχωμα οπλισμένου σκυροδέματος, π.χ. περίπτωση περιμετρικών τοιχωμάτων (ημι)υπογείων ορόφων, τα οποία δεν καταλαμβάνουν ολόκληρο το ύψος του ορόφου. Όπως θα δούμε παρακάτω, στο κρίσιμο ύψος ενός υποστυλώματος αυξάνεται η πυκνότητα των συνδετήρων, γεγονός που βελτιώνει όχι μόνον την περίσφιγξη του σκυροδέματος αλλά και τη διατμητική αντοχή του υποστυλώματος, μειώνοντας έτσι το ενδεχόμενο διατμητικής αστοχίας τύπου "κοντού" υποστυλώματος.

5.5.2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΓΙΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Για διευκόλυνση της σκυροδέτησης και της συμπίκνωσης του σκυροδέματος, για αποφυγή εγκάρσιου λυγισμού του θλιβόμενου πέλματος, αλλά και για τον περιορισμό της ανηγμένης θλιπτική δύναμης, $v_d = N_d / A_c f_{cd}$, σε χαμηλές τιμές, ο Ευρωκώδικας 2 θέτει τα 200mm ως ελάχιστη πλευρά υποστυλώματος. Αν ένα υποστύλωμα έχει διατομή Γ αντί ορθογωνική το κάθε σκέλος του Γ χρειάζεται να έχει πάχος τουλάχιστον 200mm.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.1, ένα κατακόρυφο στοιχείο ορθογωνικής διατομής θεωρείται υποστύλωμα αν ο λόγος πλευρών της διατομής του δεν υπερβαίνει το 4,0. Διαφορετικά θεωρείται τοίχωμα. Αν το κατακόρυφο στοιχείο έχει διατομή που αποτελείται από περισσότερα ορθογώνια π.χ. T, Γ, Z, κ.λ.π., τότε για να θεωρείται υποστύλωμα πρέπει όλα τα επιμέρους ορθογώνια να έχουν λόγο πλευρών το πολύ 4,0.

Η διαθέσιμη πλαστιμότητα διατομών οπλισμένου σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της αξονικής θλίψης. Ιδιαίτερα για ανηγμένη αξονική θλίψη v_d μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην "ισοζυγισμένη" διατομή και στο γόνατο του διαγράμματος αλληλεπίδρασης $\mu_d - v_d$, το υποστύλωμα ουσιαστικά δεν διαθέτει πλαστιμότητα, καθώς το σκυρόδεμα αστοχεί σε θλίψη προτού ο εφελκόμενος χάλυβας διαρρεύσει. Επειδή ο Ευρωκώδικας 8 απαιτεί η επιφάνεια A_c της διατομής του σκυροδέματος υποστυλωμάτων με απαιτήσεις πλαστιμότητας, να είναι τέτοια ώστε για τη μέγιστη αξονική δύναμη θλίψης που μπορεί να προκύψει από την ανάλυση για τους σεισμικούς συνδυασμούς $G + \psi_2 Q + E$, η τιμή της ανηγμένης αξονικής θλίψης να μην υπερβαίνει το :

$$\max_{v_d} = \frac{\max_{N_d, G + \psi_2 Q + E}}{A_c f_{cd}} \leq 0,65 \text{ για } KΠ M \text{ (Μέση)}, \leq 0,55 \text{ για } KΠ Y \text{ (Υψηλή)} \quad (5.4)$$

Αυτή η ανωτέρω οριακή τιμή του v_d είναι υψηλή και γι' αυτό σπάνια στην πράξη είναι η Εξ. (5.4) καθοριστική των διαστάσεων της διατομής σκυροδέματος. Πάντως η Εξ. (5.4) είναι κρισιμότερη στα περιμετρικά υποστυλώματα πολυώροφων κτιρίων με μικρές διαστάσεις σε κάτοψη, δηλαδή με μεγάλο λόγο ύψους προς οριζόντια διάσταση, επειδή σε αυτά η ροπή ανατροπής προκαλεί μεγάλη διακύμανση της λόγω σεισμού αξονικής δύναμης.

Κατηγορία Πλαστιμότητας	ΚΠ Υ	ΚΠ Μ	ΚΠ Χ
$\rho_{\min} = A_{s,\min}/A_c$	1%		$0.1N_d/A_c f_{yd}$, 0.2% ⁽¹⁾
$\rho_{\max} = A_{s,\max}/A_c$	4%		4% ⁽¹⁾
διάμετρος ράβδων, d_{bL}	≥8mm		
αριθμός ράβδων ανά πλευρά	≥3		≥2
απόσταση κατά την περίμετρο μεταξύ ράβδων που συγκρατούνται σε γωνία συνδετήρα	≤150mm	≤200mm	-
απόσταση κατά την περίμετρο ράβδου που δεν συγκρατείται σε γωνία συνδετήρα από την πλησιέστερη που συγκρατείται	≤150mm		

Πίνακας 5.4 Κατασκευαστικοί κανόνες Ευρωκώδικα 2 και 8 για τους κατακόρυφους οπλισμούς υποστυλωμάτων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

(1) Εθνικά Προσδιορίσιμη Παράμετρος (ΕΠΠ) κατά Ευρωκώδικα 2.

5.5.2.3 ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ (ΠΙΝ. 5.4)

Οι διαφορές μεταξύ υποστυλωμάτων και δοκών, όσων αφορά την εξάρτηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας από τις παραμέτρους όπλισης, κ.λ.π. του στοιχείου, συνίστανται στην ύπαρξη της αξονικής δύναμης και στη συμμετρική διάταξη του οπλισμού ($\rho_1=\rho_2$) στα υποστυλώματα.

Με εξαίρεση την περίπτωση αστοχίας από θραύση του εφελκόμενου χάλυβα, ενδεχόμενο που είναι εντελώς απίθανο σε υποστυλώματα ιδιαίτερα για τους σχετικά όλκιμους χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, για το λόγο αυτό η διαθέσιμη πλαστιμότητα εξαρτάται από τη διαφορά $\rho_1-\rho_2$ ή το λόγο ρ_2/ρ_1 , η ποσότητα του διαμήκους χάλυβα δεν είναι καθοριστική για την τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων. Με αυτό τον τρόπο οι κατασκευαστικοί κανόνες για τον κατακόρυφο οπλισμό που αφορούν την αύξηση της πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων αναφέρονται κυρίως στη διάταξη του στη διατομή, με σκοπό τη βελτίωση της περίσφιγξης του σκυροδέματος.

Ο Ευρωκώδικας 2 καθορίζει ως ελάχιστη διάμετρο διαμήκων ράβδων τα 12mm. Σε κάθε γωνία της διατομής απαιτείται μια διαμήκης ράβδος, που να συγκρατείται σε εσωτερική γωνία συνδετήρα ή σιγμοειδούς ράβδου ή στη διασταύρωση συνδετήρων. Για τη δημιουργία του πλέγματος διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών που απαιτείται για την περίσφιγξη του σκυροδέματος, πρέπει να υπάρχει μία διαμήκης ράβδος σε γωνία συνδετήρα κάθε 200mm το πολύ κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής για υποστυλώματα Κατηγορίας Πλαστιμότητας Μέση (ΚΠ Μ) ή κάθε 150mm για υποστυλώματα Κατηγορίας Πλαστιμότητας Υψηλή (ΚΠ Υ). Κατ' εξαίρεση, σε πλευρές υποστυλωμάτων με απαιτήσεις πλαστιμότητας δεν αρκούν δύο διαμήκεις ράβδοι ανά πλευρά, δηλαδή μία σε κάθε γωνία, αλλά πρέπει να τοποθετείται και μία ενδιάμεση ράβδος. Σε κυκλικές διατομές απαιτούνται τουλάχιστον 6 ράβδοι ισοκατανεμημένες στην περίμετρο στο εσωτερικό του κυκλικού συνδετήρα.

Ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει το ελάχιστο συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού ίσο με 1%. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, στο σύνολο της διατομής το μέγιστο ποσοστό διαμήκους χάλυβα είναι 4%. Στις θέσεις, όπου επικαλύπτονται τα άκρα των ράβδων υποστυλωμάτων διαφορετικών ορόφων, το μέγιστο ποσοστό στην πραγματικότητα είναι 8%. Συνήθως το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό οπλισμού είναι καθοριστικό του μεγέθους της διατομής του

υποστυλώματος. Δηλαδή, υπέρβαση του μέγιστου ποσοστού σημαίνει ανάγκη αύξησης των διαστάσεων της διατομής.

Κατά την καταπόνηση της διατομής σε διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, οι ράβδοι στις εξωτερικές γωνίες της διατομής του υποστυλώματος είναι πλήρως ενεργές και συνεισφέρουν πιο αποτελεσματικά στην ροπή αντοχής της διατομής και στις δύο διευθύνσεις της κάμψη, σε σύγκριση με ράβδους κοντά στα μέσα των πλευρών ή ακόμα περισσότερο στις εισέχουσες γωνίες σύνθετων διατομών Γ,Τ, κ.λ.π. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται συχνά ράβδοι μεγαλύτερης διαμέτρου στις εξωτερικές γωνίες της διατομής και κοντά σε αυτές π.χ. Φ20 και μικρότερης π.χ. Φ14 στο ενδιάμεσο, εκεί δηλαδή όπου οι ράβδοι είναι κατασκευαστικά απαραίτητες για την τήρηση της μέγιστης απόστασης των 150mm ή 200mm μεταξύ ράβδων που συγκρατούνται σε γωνία συνδετήρα.

Σε ένα υποστύλωμα η ποσότητα των κατακόρυφων οπλισμών καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια της οριακής κατάστασης αστοχίας σε μεγέθη ορθής έντασης, δηλαδή σε διαξονική κάμψη με ορθή δύναμη στις διατομές παρειάς στην κορυφή και στη βάση του υποστυλώματος, εκεί δηλαδή όπου οι ροπές κάμψης είναι μέγιστες. Στη βάση η διατομή παρειάς συμπίπτει με την πάνω επιφάνεια της πλάκας ή με την κορυφή του στοιχείου θεμελίωσης, αν πρόκειται για τον κατώτατο όροφο του υποστυλώματος. Στην κορυφή η ακριβής θέση της διατομής παρειάς εξαρτάται από το μέγεθος των διαστάσεων της διατομής σε σύγκριση με τα πλάτη των δοκών που συντρέχουν στον κόμβο της κορυφής. Αν τα πλάτη των δοκών είναι λίγο μικρότερα από τις διαστάσεις του υποστυλώματος, τότε ως διατομή παρειάς στην κορυφή λαμβάνεται αυτή που είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με το κάτω πέλμα της δοκού με το μικρότερο ύψος. Είναι προτιμότερο και ασφαλέστερο να λαμβάνεται η διατομή παρειάς στην κάτω επιφάνεια της πλάκας, σε περιπτώσεις που τα πλάτη των δοκών είναι πολύ μικρότερα από τις διαστάσεις της διατομής του υποστυλώματος ή συντρέχουν στον κόμβο της κορυφής δοκοί μόνο σε μία διεύθυνση. Βεβαίως αν οι δοκοί που συντρέχουν στους κόμβους κορυφής και βάσης είναι ανεστραμμένες, δηλαδή έχουν την πλάκα στο κάτω πέλμα, τότε τα παραπάνω για την παρειά της κορυφής ισχύουν για την παρειά της βάσης και αντίστροφα.

Η διατομή κορυφής του υποστυλώματος κάτω από έναν κόμβο και αυτή της βάσης του υπερκείμενου, καλύπτονται από τους ίδιους κατακόρυφους οπλισμούς. Οι οπλισμοί αυτοί καθορίζονται από τη δυσμενέστερη, δηλαδή την περισσότερο απαιτητική σε οπλισμό, από τις δύο αυτές διατομές και πρέπει να εκτείνονται από λίγο κάτω από το μέσο του ύψους του υποκείμενου ορόφου μέχρι λίγο πάνω από το μέσο του ύψους του υπερκείμενου. Με αυτό τον τρόπο οι ενώσεις των ράβδων διαφορετικών ορόφων με παράθεση των άκρων τους πρέπει να γίνονται κανονικά κοντά στο μέσο του ορόφου, δηλαδή έξω από τις ακραίες και ενδεχομένως κρίσιμες περιοχές των άκρων του υποστυλώματος και στην περιοχή όπου συνήθως οι σεισμικές ροπές είναι ελάχιστες. Για το λόγο όμως, ότι η σκυροδέτηση κάθε ορόφου του υποστυλώματος γίνεται ενιαία, οι ράβδοι που καλύπτουν τις διατομές πάνω και κάτω από τον κόμβο κορυφής συνηθίζεται να εκτείνονται προς τα κάτω μέχρι τη διατομή της βάσης του ορόφου, όπου και στηρίζονται στέρεα στην πάνω επιφάνεια της ήδη σκυροδετημένης πλάκας. Αυτή η πρακτική είναι κατασκευαστικά ευκολότερη από τη στερέωση των ράβδων αυτών στον ξυλότυπο στη μέση περίπου του ύψους του ορόφου. Πρακτικά, έτσι οι διατομές πάνω και κάτω από τον κόμβο κορυφής καλύπτονται από τις ίδιες κατακόρυφες ράβδους, οι οποίες φθάνουν προς τα κάτω μέχρι τη βάση του ορόφου απλώς για λόγους στήριξης και ενώνονται με τις ράβδους του υποκείμενου ορόφου με παράθεση των άκρων τους μέσα στην πιθανή κρίσιμη περιοχή του κάτω άκρου του υποστυλώματος.

5.5.2.4 ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΓΚΑΡΣΙΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥΣ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ (ΠΙΝ. 5.5)

Ο ρόλος των συνδετήρων είναι η εξασφάλιση επαρκούς διατμητικής αντοχής και επιπλέον στην περίπτωση αυξημένων απαιτήσεων πλαστιμότητας, η βελτίωση της τοπικής πλαστιμότητας μέσω παρεμπόδισης του λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων και περίσφιγξης του σκυροδέματος.

Σε υποστυλώματα χωρίς απαιτήσεις πλαστιμότητας, αλλά και στο ενδιάμεσο διάστημα μεταξύ κρίσιμων περιοχών των άκρων υποστυλωμάτων με απαιτήσεις πλαστιμότητας, αρκούν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 συνδετήρες μικρότερης διαμέτρου και με μεγαλύτερες μέγιστες αποστάσεις από ότι στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων Κατηγορίας Πλαστιμότητας Μ ή Υ.

	ΚΠ Υ	ΚΠ Μ	ΚΠ Χ
Μήκος κρίσιμης περιοχής ⁽¹⁾ ≥	1.5h _c , 1.5b _c , 0.6m, H _{cl} /5	h _c , b _c , 0.45m, H _{cl} /6	h _c , b _c ,
<i>Εκτός κρίσιμων περιοχών</i>			
διάμετρος, d _{bw} ≥	6mm, d _{bl} /4		
απόσταση, s _w ≤	20d _{bl} , h _c , b _c , 400mm		
d _{bl} > 14mm, s _w ≤	12d _{bl} , 0.6h _c , 0.6b _c , 240mm		
<i>Στις κρίσιμες περιοχές⁽²⁾</i>			
διάμετρος, d _{bw} ≥ ⁽³⁾	6mm, 0.4√(f _{yd} /f _{ywd})d _{bl}	6mm, d _{bl} /4	
απόσταση, s _w ≤ ^{(3), (4)}	6d _{bl} , b _o /3, 125mm	8d _{bl} , b _o /2, 175mm	όπως εκτός κρίσιμων περιοχών
μηχανικό ποσοστό ω _{wd} ≥ ⁽⁵⁾	0.08	-	
ενεργό μηχανικό ποσοστό αω _{wd} ≥ ^{(4), (5), (6), (7)}	30μ _φ * ν _d ε _{yd} b _c /b _o - 0.035	-	
<i>Στην κρίσιμη περιοχή στη βάση της κολώνας στο κτίριο (σύνδεση με θεμελίωση)</i>			
μηχανικό ποσοστό ω _{wd} ≥	0.12	0.08	-
ενεργό μηχανικό ποσοστό αω _{wd} ≥ ^{(4), (5), (6), (8), (9)}	30μ _φ ν _d ε _{yd} b _c /b _o - 0.035		-

Πίνακας 5.5 Κατασκευαστικοί Κανόνες κατά τους Ευρωκώδικες 2 και 8 για συνδετήρες υποστυλωμάτων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

- 1) h_c, b_c, h_{cl} : διαστάσεις διατομής και καθαρό ύψος κολώνας
- 2) Για ΚΠ Μ : Αν q ≤ 2 στο σχεδιασμό, τότε για τους συνδετήρες υποστυλωμάτων που έχουν ν_d ≤ 0,2 μπορεί να εφαρμοσθούν οι κατασκευαστικές διατάξεις της ΚΠ Χ.
- 3) Για ΚΠ Υ : Στους δύο κατώτατους ορόφους οι κανόνες για τα d_{bw}, s_w εφαρμόζονται στο κρίσιμο ύψος του υποστυλώματος αυξημένο κατά 50%.
- 4) Ο δείκτης αναφέρεται στην πλήρη διατομή ο ο στον περισφιγμένο πυρήνα της b_o είναι η μικρότερη διάσταση του πυρήνα.
- 5) ω_{wd} : ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων στον περισφιγμένο πυρήνα επί f_{ywd}/f_{cd}.
- 6) α = (1-s/b_o)(1-s/2h_o)(1-{b_o/[(n_h-1)h_o]+h_o/[(n_b-1)/b_o]} / 3) : συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιγξης συνδετήρων με αποστάσεις s, n_b σκέλη παράλληλα στην πλευρά μήκους b_o και n_h σκέλη παράλληλα στην πλευρά h_o.
- 7) Για ΚΠ Υ : Στα άκρα υποστυλωμάτων όπου ισχύει ο κανόνας ικανοτικού σχεδιασμού, μ_φ είναι ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων που αντιστοιχεί στα 2/3 του q_o. Στα άλλα άκρα το μ_φ ισούται με την πλήρη τιμή του μ_φ : ε_{yd}=f_{yd}/E_s.
- 8) μ_φ : δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων που αντιστοιχεί στην τιμή του q_o.

9) Για ΚΠ Υ : Η ίδια απαίτηση ισχύει και στις κρίσιμες περιοχές εκείνων των υποστυλωμάτων, όπου δεν επιβάλλεται ικανοτικός σχεδιασμός χάριν των εξαιρέσεων από τον κανόνα.

Η απόσταση κατά κανόνα είναι πιο καθοριστική ως πολλαπλάσιο της διαμέτρου των κατακόρυφων ράβδων, η οποία έχει σκοπό την αποφυγή λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, στις **κρίσιμες περιοχές** υποστυλωμάτων **με απαιτήσεις πλαστιμότητας**, οι διατάξεις για τους συνδετήρες είναι αυστηρότερες. Η ελάχιστη διάμετρος προκύπτει από την απαίτηση να έχει επαρκή διατομή ο συνδετήρας, ώστε να συγκρατήσει εγκάρσια μία διαμήκη ράβδο έναντι λυγισμού.

Οι απαιτήσεις του Πίν. (5.5) με εξαίρεση αυτές των τριών τελευταίων γραμμών, αφορούν όλα ανεξαιρέτως τα υποστυλώματα και στοχεύουν στην εξασφάλιση μίας ελάχιστης τοπικής πλαστιμότητας για το ενδεχόμενο να αναπτυχθούν σε αυτά πλαστικές αρθρώσεις. Οι απαιτήσεις όμως, του Ευρωκώδικα 8 για τους συνδετήρες στη βάση των υποστυλωμάτων, όπου το ενδεχόμενο αυτό είναι πολύ πιθανό, είναι αυστηρότερες. Ο κανόνας της τελευταίας γραμμής του Πιν. (5.5) έχει στόχο να εξασφαλίσει στη βάση το δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων που αντιστοιχεί στο συντελεστή συμπεριφοράς με τον οποίο σχεδιάζεται το κτίριο.

Για την εφαρμογή αυτού του κανόνα επισημαίνονται τα εξής :

- i. Το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων υπολογίζεται ως το γινόμενο του γεωμετρικού ογκομετρικού ποσοστού, ρ_w , επί το λόγο των τιμών σχεδιασμού των αντοχών f_{yd}/f_{cd} , εξ' ου και ο δείκτης d στο ω_{wd} .
- ii. Σε ορθογωνικές διατομές πρέπει να επιδιώκεται ομοιόμορφη περίσφιγξη και στις δύο διευθύνσεις $\rho_b = \rho_h$, όπου $\rho_b = (n_b/b_o)A_{sw}/s$ και $\rho_h = (n_h/h_o)A_{sw}/s$, με n_b και n_h τον αριθμό των σκελών συνδετήρων των κάθετων στις πλευρές b και h της διατομής και $b_o = b - 2(c + \Phi_h + \Phi_L/2)$, $h_o = h - 2(c + \Phi_h + \Phi_L/2)$ τις πλευρές του περισφιγμένου πυρήνα μέχρι τα κέντρα των διαμήκων ράβδων. Για το λόγο αυτό σε διατομές με διαφορετικά ρ_b και ρ_h ο Ευρωκώδικας ορίζει να λαμβάνεται το γεωμετρικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων ίσο με $2\min(\rho_b, \rho_h)$.
- iii. Ο συντελεστής, α_s , υπολογίζεται για περίσφιγξη από διακριτούς συνδετήρες από την Εξ. (2.22) και για περίσφιγξη από κυκλική σπείρα από την :

$$\alpha_s = 1 - \frac{s}{2b_o} \quad (5.5)$$

όπου b_o = η ελάχιστη πλευρά του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής και

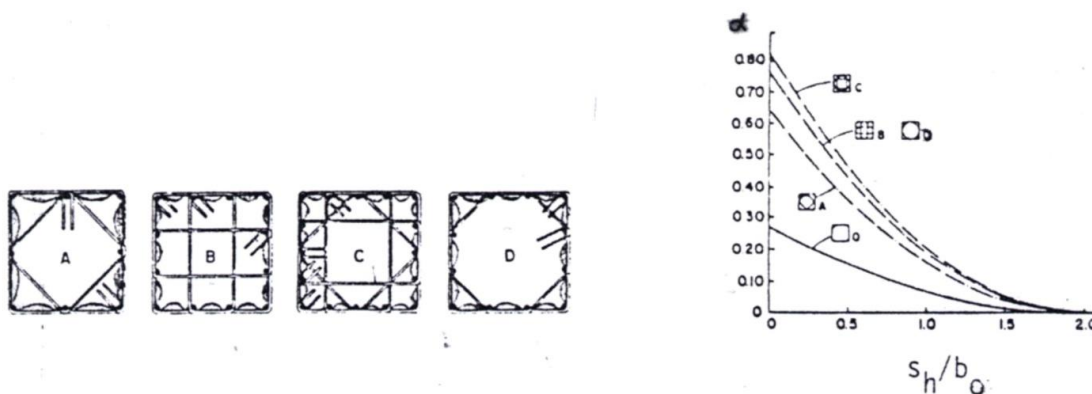
s = η απόσταση διαδοχικών συνδετήρων

Ο συντελεστής α_n καθορίζεται από την Εξ. (2.19) – (2.21) και το α υπολογίζεται ως $\alpha = \alpha_n \alpha_s$.

- iv. Το απαιτούμενο ενεργό μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης στις σύνθετες διατομές που αποτελούνται από πολλά ορθογώνια, π.χ. διατομές Γ, Τ, κ.α., υπολογίζεται για το σύνολο της διατομής και στη συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα A_{sw}/s των συνδετήρων, έτσι ώστε σε καθ' ένα από τα επιμέρους ορθογωνικά τμήματα της διατομής να εξασφαλίζεται η ανωτέρω απαιτούμενη τιμή ογκομετρικού μηχανικού ποσοστού.
- v. Η τιμή του v_d που χρησιμοποιείται είναι αυτή που προκύπτει από τη μέγιστη αξονική θλιπτική δύναμη που καταπονεί τη διατομή του υποστυλώματος για το συνδυασμό $G + \psi_2 Q + E$.

vi. Ο λόγος b_s/b_o είναι αυτός του πλάτους της πλήρους διατομής σκυροδέματος προς αυτόν του περισφιγμένου πυρήνα.

Σε υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής ή με σύνθετη διατομή που αποτελείται από ορθογώνια τμήματα, π.χ. διατομή Γ,Τ και Ζ, η περίσφιγξη επιτυγχάνεται μέσω ενός κλωβού που αποτελείται από τους συνδετήρες και διαμήκεις ράβδους στη περίμετρο της διατομής, οι οποίες συγκρατούνται εγκάρσια σε γωνία ή άγκιστρο ενός συνδετήρα. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν ήδη στο Κεφάλαιο 2, σχετικά με την Εξ. (2.19), στην περίπτωση αυτή η περίσφιγξη πραγματοποιείται με τη μορφή συγκεντρωμένων δυνάμεων στις θέσεις των διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται, οι οποίες διαχέονται σαν τάσεις στον εγκιβωτισμένο πυρήνα, με εξαίρεση το τμήμα του πυρήνα μεταξύ του περιμετρικού συνδετήρα και παραβολικών τόξων που ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται ως άνω (δεξ σχήμα 5.9). Κατά τον Ευρωκώδικα το απερίσφικτο τμήμα του πυρήνα για να ελαχιστοποιηθεί επιβάλλονται αποστάσεις των διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται εγκάρσια σε γωνία ή άγκιστρο συνδετήρα το πολύ 200mm για υποστυλώματα Κατηγορίας Πλαστιμότητας Μ και 150mm για υποστυλώματα Κατηγορίας Πλαστιμότητας Υ.



Σχήμα 5.9 Επιρροή διάταξης και απόστασης συνδετήρων στο συντελεστή αποδοτικότητα της περίσφιγξης. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

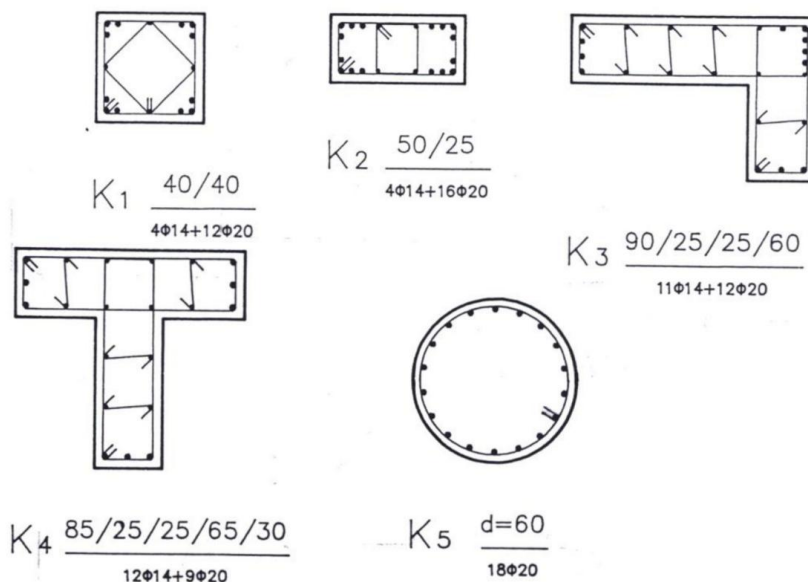
Στο Σχ. (5.9) φαίνονται ενδεικτικά εναλλακτικές διατάξεις συνδετήρων περίσφιγξης σε τετραγωνικές διατομές. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης, $\alpha = \alpha_n \alpha_s$, ως συνάρτηση του λόγου s_h/b_o για τις εναλλακτικές διατάξεις συνδετήρων. Από τη σύγκριση των απαιτούμενων ποσοτήτων χάλυβα για ορισμένη τιμή του α , προκύπτει πως η διάταξη D του Σχ. (5.9) με έναν οκταγωνικό συνδετήρα επιπλέον του εξωτερικού ορθογωνικού και με τέσσερις ράβδους σε κάθε πλευρά, είναι όχι μόνον κατασκευαστικά εύκολη αλλά και οικονομικότερη από τις διατάξεις A, B και C. Από οικονομικής άποψης ακολουθεί η διάταξη B με ορθογωνικούς πολύτμητους συνδετήρες και τον ίδιο αριθμό διαμήκων ράβδων, που πλεονεκτεί όμως της D ως προς την καλύτερη συμβολή των εσωτερικών συνδετήρων στην παραλαβή τέμνουσας δύναμης. Οι διατάξεις A και C είναι ισοδύναμες από πλευράς απαιτούμενης ποσότητας οπλισμού για την ίδια περίσφιγξη, αλλά υστερούν κάπως των δύο άλλων.

Σε υποστυλώματα με επιμήκη ορθογωνική διατομή ή με σύνθετη διατομή από πολλά τέτοια ορθογώνια, η περίσφιγξη του κάθε ορθογώνιου μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι μέσω ενός μεγάλου περιμετρικού συνδετήρα που συγκρατεί τις γωνιακές ράβδους και ενδιάμεσων σιγμοειδών ράβδων, οι οποίες συγκρατούν με άγκιστρα ζευγάρια απέναντι διαμήκων ράβδων στο ενδιάμεσο των μεγάλων πλευρών του ορθογωνίου. Καλύτερος τρόπος είναι με ένα μεγάλο περιμετρικό ορθογωνικό συνδετήρα και μικρότερους

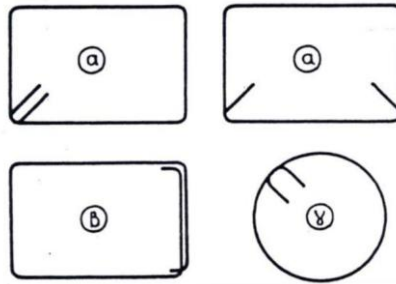
ορθογωνικούς στο ενδιάμεσο, οι οποίοι συγκρατούν στις γωνίες τους δύο γειτονικά ζευγάρια ενδιάμεσων διαμήκων ράβδων στις απέναντι επιμήκεις πλευρές. Παραλλαγή του τρόπου αυτού είναι η αντικατάσταση του περιμετρικού και των ενδιάμεσων μικρών συνδετήρων με έναν αριθμό ορθογωνικών συνδετήρων, ο καθένας από τους οποίους συγκρατεί μη-γειτονικά ζευγάρια ράβδων και επικαλύπτεται στο ακραίο τμήμα του με κάποιον από τους λοιπούς. Βεβαίως η ιδανικότερη λύση είναι και η πιο δύσκολη κατασκευαστικά : ένας μονοκόμματος συνδετήρας, ο οποίος κάμπτεται κατά 90° προς την ίδια φορά των δεικτών του ρολογιού, τόσες φορές όσος είναι ο αριθμός των διαμήκων ράβδων που χρειάζεται να συγκρατηθούν. Αυτή η λύση είναι ακόμα καλύτερη αν ο συνεχής συνδετήρας κατασκευάζεται υπό μορφή σπείρας με άκρα προς αγκύρωση μόνο στα δύο άκρα του υποστυλώματος στους κόμβους.

Σε υποστυλώματα με σύνθετη διατομή από πολλά ορθογώνια, οι εξωτερικοί συνδετήρες του κάθε ορθογώνιου τμήματος επικαλύπτονται με αυτούς ενός άλλου στο κοινό τμήμα των δύο ορθογωνίων, απαιτώντας για το λόγο αυτό τέσσερις ράβδους στις γωνίες αυτού του κοινού τμήματος (δες σχήμα 5.10).

Σύμφωνα με τα Σχ. (5.10) και (5.11^α), τα δύο άκρα ενός εξωτερικού συνδετήρα, ο οποίος διατρέχει το σύνολο ή τμήμα της περιμέτρου ενός ορθογωνικού υποστυλώματος ή ενός ορθογωνίου μίας σύνθετης διατομής, πρέπει να κάμπτονται προς το εσωτερικό του περισφιγμένου πυρήνα με γωνία 135° περίπου. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται να ανοίξει ο συνδετήρας με αποτίναξη της επικάλυψης σκυροδέματος και ευθυγράμμιση της καμπύλης του άκρου του. Σύμφωνα με το Σχ. (5.11^β), ο τερματισμός του συνδετήρα με κάμψη των άκρων του κατά 90° αφορά μόνο εσωτερικούς συνδετήρες, οι οποίοι συγκρατούν μόνο ενδιάμεσες ράβδους της περιμέτρου, επειδή στην περίπτωση αυτή η κατά 90° κάμψη στο άκρο είναι προς το εσωτερικό του πυρήνα. Κατά τα Σχ. (5.10) και (5.11^α) η κάμψη των άκρων προς τα μέσα είναι σαφώς δύσκολη κατασκευαστικά. Τονίζεται όμως, ότι οι συνδετήρες που δεν είναι κλειστοί δεν είναι κατάλληλοι για εγκιβωτισμό του σκυροδέματος, ούτε συγκρατούν εγκάρσια τις ράβδους έναντι λυγισμού. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό να ακολουθούνται οι λεπτομέρειες του Σχ. (5.10) στα άκρα των συνδετήρων. Σε κυκλικούς συνδετήρες τα άγκιστρα των άκρων μπορεί να είναι κατά 90° προς τα μέσα και να απέχουν μεταξύ τους πάνω στην περίμετρο απόσταση ίση με το μήκος της υπερκάλυψης l_0 .



Σχήμα 5.10 Διάταξη κλειστών συνδετήρων σε διάφορες διατομές υποστυλωμάτων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)



Σχήμα 5.11 Μορφές κλειστών συνδετήρων. (Πηγή: "Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι", Μιχαήλ Ν. Φαρδής)

Πρακτικά, σαν εξωτερικούς συνδετήρες ορθογωνικών υποστυλωμάτων εφαρμόζονται συχνά τα λεγόμενα "τσερκοπλέγματα". Αυτά συνίστανται σε ορθογωνικά πλέγματα λεπτών ράβδων που κόβονται στη "μάνδρα" σε διαστάσεις περίπου ίσες με το ύψος του υποστυλώματος στη μία διεύθυνση και με την περίμετρο του στην άλλη και κάμπτονται πριν μεταφερθούν στο εργοτάξιο σε τέσσερις γωνίες, επιχειρώντας να σχηματίσουν τον εξωτερικό κλωβό εγκάρσιου εγκιβωτισμού του υποστυλώματος. Οι ράβδοι παράλληλες στην περίμετρο της διατομής έχουν μικρές αποστάσεις, που να ικανοποιούν τους περιορισμούς του Ευρωκώδικα 8 και μικρή διάμετρο μέχρι 8mm το πολύ, ενώ οι παράλληλες στον άξονα του υποστυλώματος είναι πολύ πιο λεπτές και αραιές και στοχεύουν απλώς στη σύνδεση των ράβδων της εγκάρσιας διεύθυνσης. Ανεξάρτητα από το εξωτερικό "τσερκόπλεγμα", οι εσωτερικοί συνδετήρες συγκράτησης των ενδιάμεσων ράβδων των πλευρών της διατομής κόβονται και τοποθετούνται ο καθένας χωριστά.

5.5.2.5 ΑΡΜΟΙ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Τα υποστυλώματα συνήθως έχουν δύο αρμούς διακοπής σκυροδέτησης, ένα στη βάση στην επιφάνεια της πλάκας και ένα στη στάθμη του κάτω πέλματος της δοκού. Για το λόγο ότι οι αρμοί είναι στις ακραίες και πιθανόν κρίσιμες περιοχές του υποστυλώματος, πρέπει να λαμβάνονται τα παρακάτω μέτρα :

1. Λίγο μετά τη σκυροδέτηση να αφαιρείται με συρματόβουρτσα μια στρώση νωπού εξιδρωμένου ή ασυμπύκνωτου σκυροδέματος από την επιφάνεια και να αποκαλύπτονται οι κόκκοι αδρανών.
2. Πριν τη νέα σκυροδέτηση και μετά την σκλήρυνση, να καθαρίζεται η επιφάνεια του παλιού σκυροδέματος με νερό υπό πίεση. Κατά τη νέα σκυροδέτηση πρέπει οι αρμοί να είναι κορεσμένοι, χωρίς όμως ελεύθερο νερό στις κοιλότητες της επιφάνειάς τους.

Για το λόγο ότι οι αρμοί διακοπής εργασίας αποτελούν τα αδύνατα σημεία του υποστυλώματος και οι θέσεις τους συμπίπτουν με τις κρίσιμες διατομές του υποστυλώματος, δηλαδή τις θέσεις μέγιστης ροπής κάμψης, επισημαίνεται ότι καλό είναι να ελαχιστοποιείται ο αριθμός τους, δηλαδή να καταργείται ο αρμός διακοπής στην κορυφή του υποστυλώματος και να παραμένει μόνο αυτός στη βάση του. Επισημαίνεται εν λόγω ότι έχει διαπιστωθεί με επί τόπου μετρήσεις ότι στην κορυφή του υποστυλώματος η αντοχή του σκυροδέματος είναι μικρότερη απ' ό,τι στη βάση, πιθανότατα λόγω χειρότερης συμπίκνωσης. Αυτός είναι ένας πρόσθετος λόγος αποφυγής του αρμού διακοπής στην κορυφή, αλλά για να αποφευχθεί ο αρμός αυτός, πρέπει τα υποστυλώματα να σκυροδετούνται ταυτόχρονα με τις δοκούς και τις πλάκες του ορόφου που στηρίζουν, γεγονός που απαιτεί και ενιαίους ξυλοτύπους. Η ενιαία κατασκευή του ξυλότυπου πλάκας, δοκών και υποστυλωμάτων έχει τις εξής οικονομικές επιπτώσεις : α) Απαιτεί να κόβονται οι τάβλες των ξυλοτύπων των υποστυλωμάτων ακριβώς μέχρι το κάτω πέλμα των δοκών ή τη στάθμη της πλάκας, γεγονός που σημαίνει απώλεια

ξυλείας. Αντιθέτως, αν τα κατακόρυφα στοιχεία σκυροδετούνται πριν την πλάκα και τις δοκούς, οι τάβλες του ξυλοτύπου τους μπορούν να τερματίζονται σε οποιοδήποτε ύψος πάνω από την παρειά κορυφής και τη θέση διακοπής σκυροδέτησης. β) Απαιτεί μεγαλύτερη συνολική ποσότητα ξυλείας ξυλοτύπων. γ) Απαιτεί πρόσθετα μέτρα για τη σταθερότητα του ξυλοτύπου της πλάκας έναντι οριζοντίων δυνάμεων, π.χ. σεισμού ή ανέμου ή κραδασμών, κ.λ.π. κατά την κατασκευή. Τα μέτρα αυτά συνιστώνται σε χιαστί στοιχεία στερέωσης των κριωμάτων και του ξυλοτύπου της πλάκας και σύνδεσης τους με τον υποκείμενο όροφο. Βεβαίως, αν τα κατακόρυφα στοιχεία έχουν σκυροδετηθεί πριν από τα οριζόντια, τότε με τη στοιχειώδη αντοχή των πρώτων ημερών μετά τη σκυροδέτηση τους, αποτελούν μια σταθερή στην οριζόντια διεύθυνση βάση στήριξης του ξυλοτύπου της πλάκας και των δοκών. Σαφώς, όλα τα ανωτέρω οικονομικά μειονεκτήματα της ενιαίας κατασκευής οριζοντίων και κατακόρυφων στοιχείων του ορόφου, έρχεται να αντισταθμίσει η αποφυγή του αρμού διακοπής στην παρειά κορυφής του υποστυλώματος.

5.6 ΒΙΟΜΗΧΑΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ – ΚΛΩΒΟΙ

Το πιο πολύπλοκο, δύσκολο και χρονοβόρο κομμάτι της συναρμολόγησης του οπλισμού, είναι η τοποθέτηση των συνδετήρων. Στην εργασία αυτή δαπανάται ο περισσότερος χρόνος και γίνονται τα μεγαλύτερα λάθη.

Σε μία τόσο σύνθετη και ποικίλη εργασία που εκ παραδόσεως κατασκευαζόταν στο χέρι, ήταν πολύ δύσκολη η βιομηχανοποίηση. Την προηγούμενη δεκαετία, το θέμα αντιμετωπίστηκε στην αρχή με τη βιομηχανική παραγωγή απλών συνδετήρων και στη συνέχεια πολυμορφικών.

Σύμφωνα με τα όσα αναγράφονται στην ιστοσελίδα της π-SYSTEMS International AE, στην Ελληνική αγορά, καθοριστικής σημασίας για τη βιομηχανία ήταν η παραγωγή των πολυμορφικών σπειροειδών συνδετήρων από την π-SYSTEMS, που με την ονομασία Αντισεισμικοί Θώρακες εμφάνισαν την πρώτη βιομηχανική λύση. Αυτό έδινε λύση στην κατασκευή και των πλέον πολύπλοκων συνδετήρων, κυρίως όμως, έλυναν το πρόβλημα της συνεπούς, και με ακρίβεια, εφαρμογής της μελέτης. Η βιομηχανοποίηση στην Ελληνική αγορά συνεχίστηκε από την εταιρεία ΜΠΗΤΡΟΣ.

Παράλληλα με τους θώρακες εξελίχθηκαν και οι λεγόμενες τσερκομηχανές με το γενικό όρο robot, οι οποίες άρχισαν να παράγουν σε μεγάλη κλίμακα σύνθετους πολυμορφικούς συνδετήρες μισού ή ενός βήματος. Η επόμενη φάση της βιομηχανοποίησης ήταν και εξακολουθεί να είναι η δημιουργία κλωβών με επάλληλους πολυμορφικούς συνδετήρες. Η ανάπτυξη βιοτεχνικών συγκολλητικών μηχανών, έδωσε τη δυνατότητα δημιουργίας κλωβών κάθε τύπου πολυμορφικών συνδετήρων, σε διάφορες πυκνότητες.

Η ευρείας κλίμακα βιομηχανικής παραγωγής κλωβών ξεκίνησε από τη ΣΙΑΕΝΟΡ και αμέσως μετά από τη Χαλυβουργία Ελλάδος. Οι βιομηχανίες αυτές, δημιουργούν αντισεισμικούς κλωβούς σε ευρεία βιομηχανική κλίμακα, με τον πρακτικό περιορισμό των συγκεκριμένων διαστάσεων διατομών και της συγκεκριμένης πυκνότητας συνδετήρων. Παρά τους περιορισμούς όμως έχουν καταφέρει να καλύπτουν μεγάλο ποσοστό των αναγκών της αγοράς σε συνδετήρες.

Σε παγκόσμιο επίπεδο μία ιδανική λύση από άποψη πλήρους βιομηχανοποίησης αντισεισμικών κλωβών, είναι οι κυψελοειδείς συνδετήρες, οι οποίοι αναπτύσσονται σήμερα από την π-SYSTEMS σε πειραματικό επίπεδο. Οι κυψελοειδείς συνδετήρες είναι η επέκταση της ιδέας του κρίκου και με τα σημερινά δεδομένα της βιομηχανίας, σε πρώτη φάση είναι

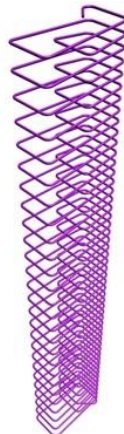
προϊόν που προέρχεται από την εγκάρσια τμήση σε φέτες χαλύβδινων σωλήνων και σε δεύτερη φάση σύνθετων (composite) σωλήνων.

Στην Ελληνική αγορά, σήμερα, οι τύποι των συνδετήρων που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

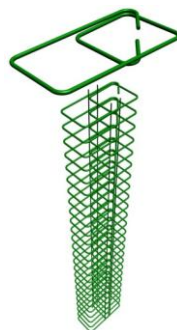
- **Συνήθεις** συνδετήρες : κατασκευάζονται στο χέρι, επομένως δεν έχουν όριο εφαρμογής, δηλαδή πρακτικά υποστηρίζουν κάθε τύπο και κάθε διάσταση υποστυλώματος.



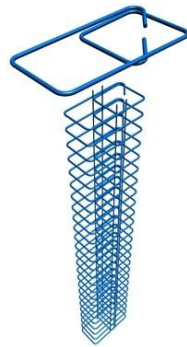
- **Σπειροειδείς / ΘΩΡΑΚΕΣ** συνδετήρες: είναι συνδετήρες που δημιουργούνται με ειδικές CNC μηχανές και μπορούν να καλύψουν το μεγαλύτερο φάσμα τύπων και διαστάσεων υποστυλωμάτων. Πρακτικά, το όριο χρησιμοποίησής τους είναι η δυνατότητα του μεγαλύτερου μήκους πλευράς που έχουν αυτές οι μηχανές.



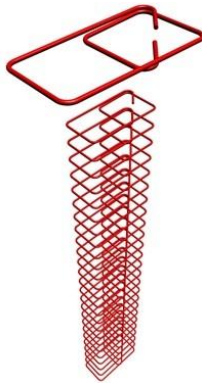
- **SIDEFOR** συνδετήρες: κατασκευάζονται ως ενιαίοι κλωβοί συνδετήρων, έτοιμοι για να τοποθετηθούν οι διαμήκεις ράβδοι του οπλισμού. Αποτελούνται από συνδετήρες μίας πλήρους στρώσης (στροφής) και συνδέονται με βοηθητικές ράβδους διαμέτρου Φ5.5 . Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι η βιομηχανική παραγωγή και για το λόγο αυτό υπάρχουν ετοιμοπαράδοτοι, μόνο, σε συγκεκριμένες διατομές.



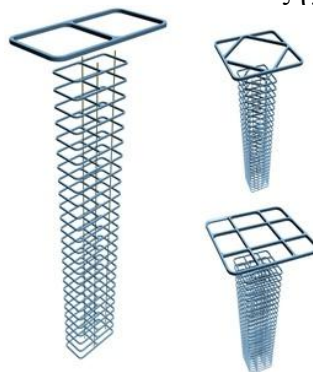
- **FORSTEEL** συνδετήρες: ισχύει ότι ακριβώς και για τους συνδετήρες τύπου SIDEFOR, με τη μόνη διαφορά ότι οι βοηθητικές ράβδοι έχουν διάμετρο $\Phi 6$.



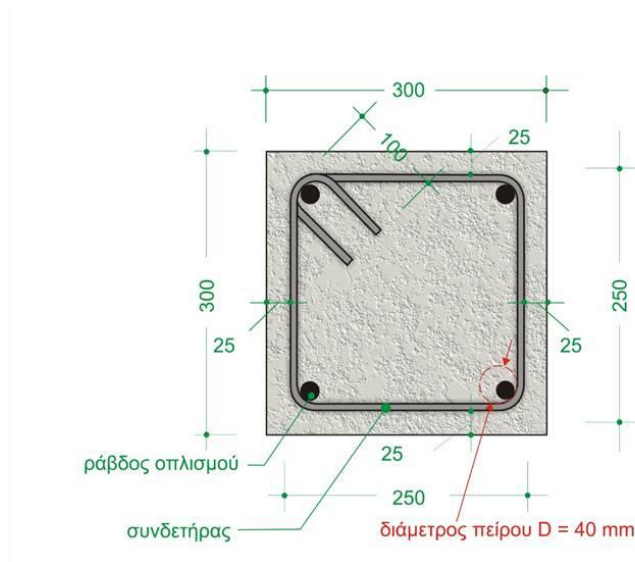
- **Robot** συνδετήρες: δημιουργούνται από CNC μηχανές παρόμοιες με αυτές των σπειροειδών, μόνο που ο κάθε συνδετήρας αποτελεί μόνο μία πλήρη στρώση (στροφή).



- **Κυψελοειδείς** συνδετήρες : είναι κλειστής διατομής συνδετήρες, πολλών απλών κυψελών, ή μίας σύνθετης κυψέλης. Συναρμολογούνται είτε βιομηχανικά, με τη χρήση διαμήκων συνδετικών ράβδων, είτε χειρονακτικά, σαν κοινοί συνδετήρες. Σήμερα, οι κυψελοειδείς συνδετήρες βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο ανάπτυξης.

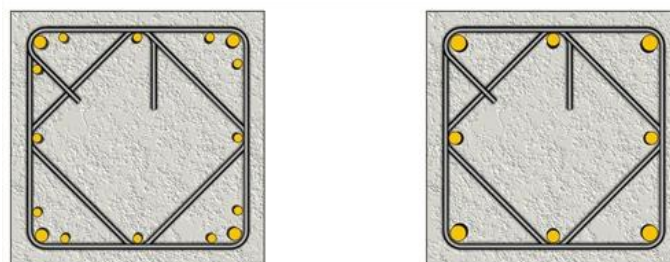


5.7 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΠΛΙΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



Σχήμα 5.12 Παράδειγμα τοποθέτησης συνδετήρων σε υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 300×300mm. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)

Το υποστύλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.12 είναι πρακτικά το μικρότερο αντισεισμικό υποστύλωμα που συναντάται. Το υποστύλωμα αυτό, παρόλο που δεν χρησιμοποιείται συχνά, είναι το απλούστερο που επιτρέπεται να χρησιμοποιείται, με ένα συνδετήρα και 4 ράβδους. Το υποστύλωμα έχει ύψος κορμιού 2,70m και ύψος κόμβου, ίσο με το ύψος της συντρέχουσας δοκού, 0,50m. Ο εγκάρσιος οπλισμός είναι συνήθης συνδετήρας, διαμέτρου Φ10. Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από 4 ράβδους διαμέτρου Φ20, οι οποίες αποκαλούνται και **κολονοσίδερα**. Η επικάλυψη των συνδετήρων είναι 25mm.

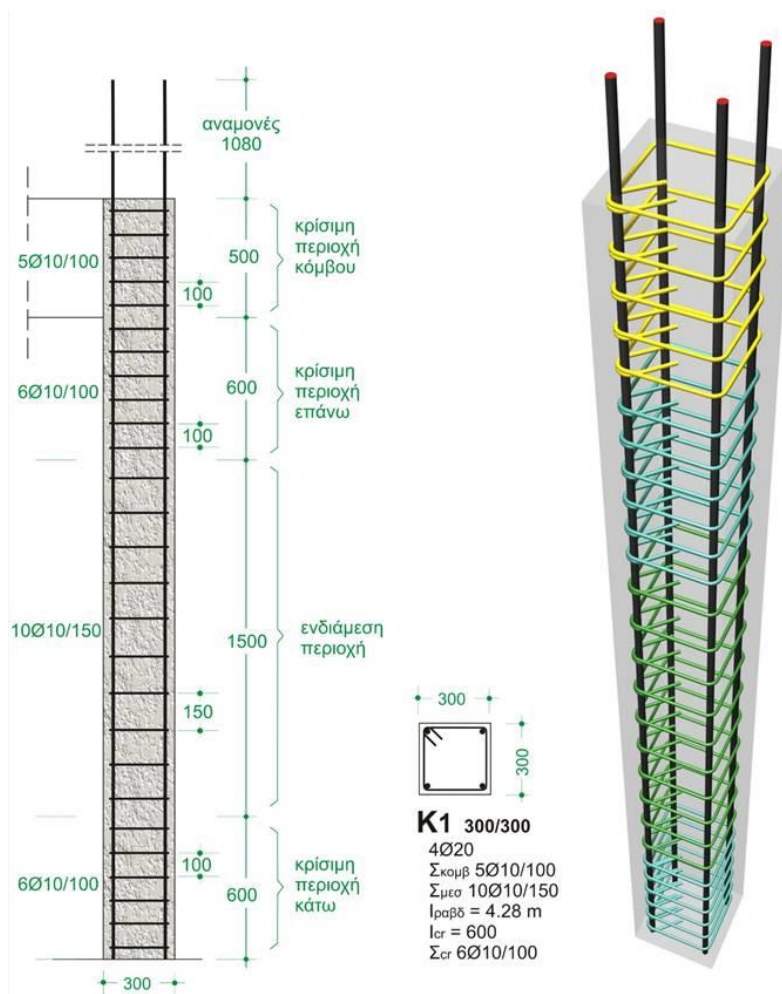


όπλιση με **16** ράβδους 4Φ20+12Φ14

ισοδύναμη όπλιση με **8** ράβδους, 4Φ25+4Φ20

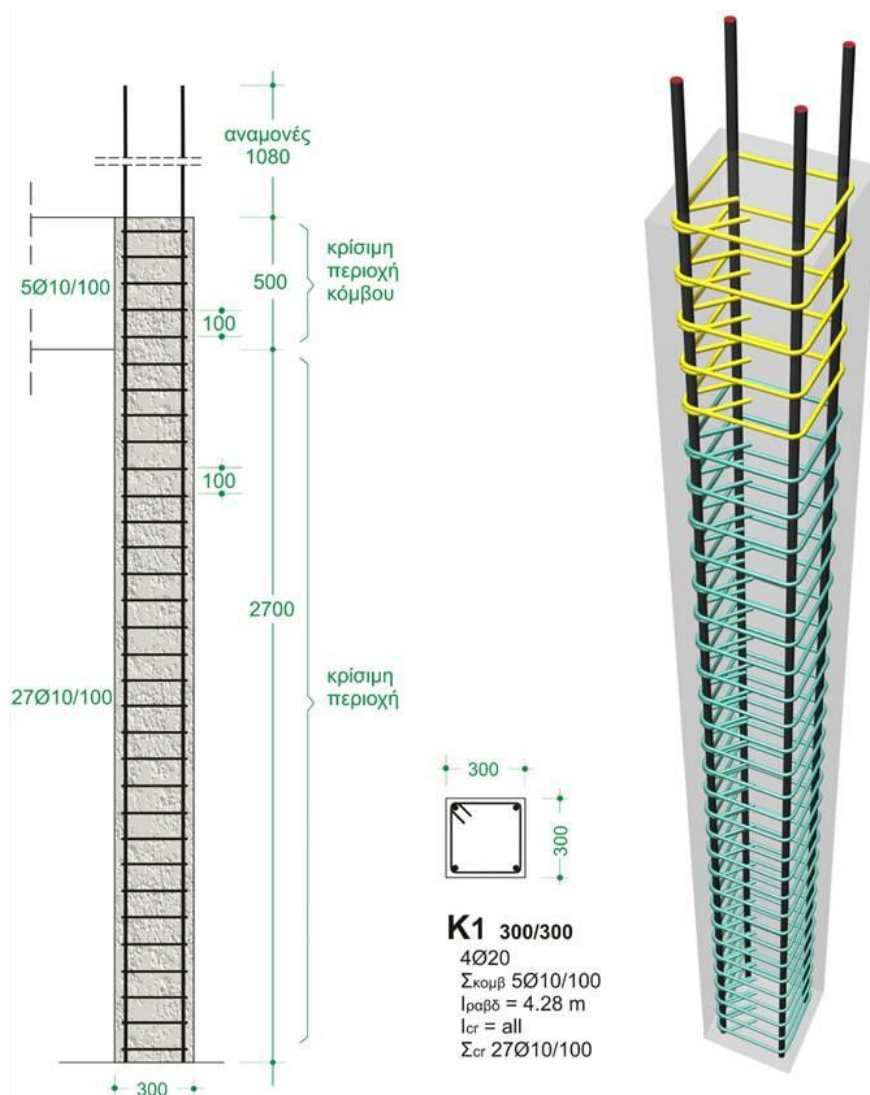
Σχήμα 5.13 Όπλιση υποστυλώματος τετραγωνικής διατομής 400×400mm. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)

Στο Σχήμα 5.13 φαίνονται υποστυλώματα τετραγωνικής διατομής 400×400mm, με ρομβοειδή διάταξη συνδετήρων, δηλαδή έχει 4+4 γωνίες, για αναγκαίο οπλισμό 3000mm² με χρήση ράβδων έως Φ20, μία συνηθισμένη όπλιση είναι τα 4Φ20+12Φ14. Με χρήση ράβδων έως Φ25, η καλύτερη επιλογή είναι 4Φ25+4Φ20.



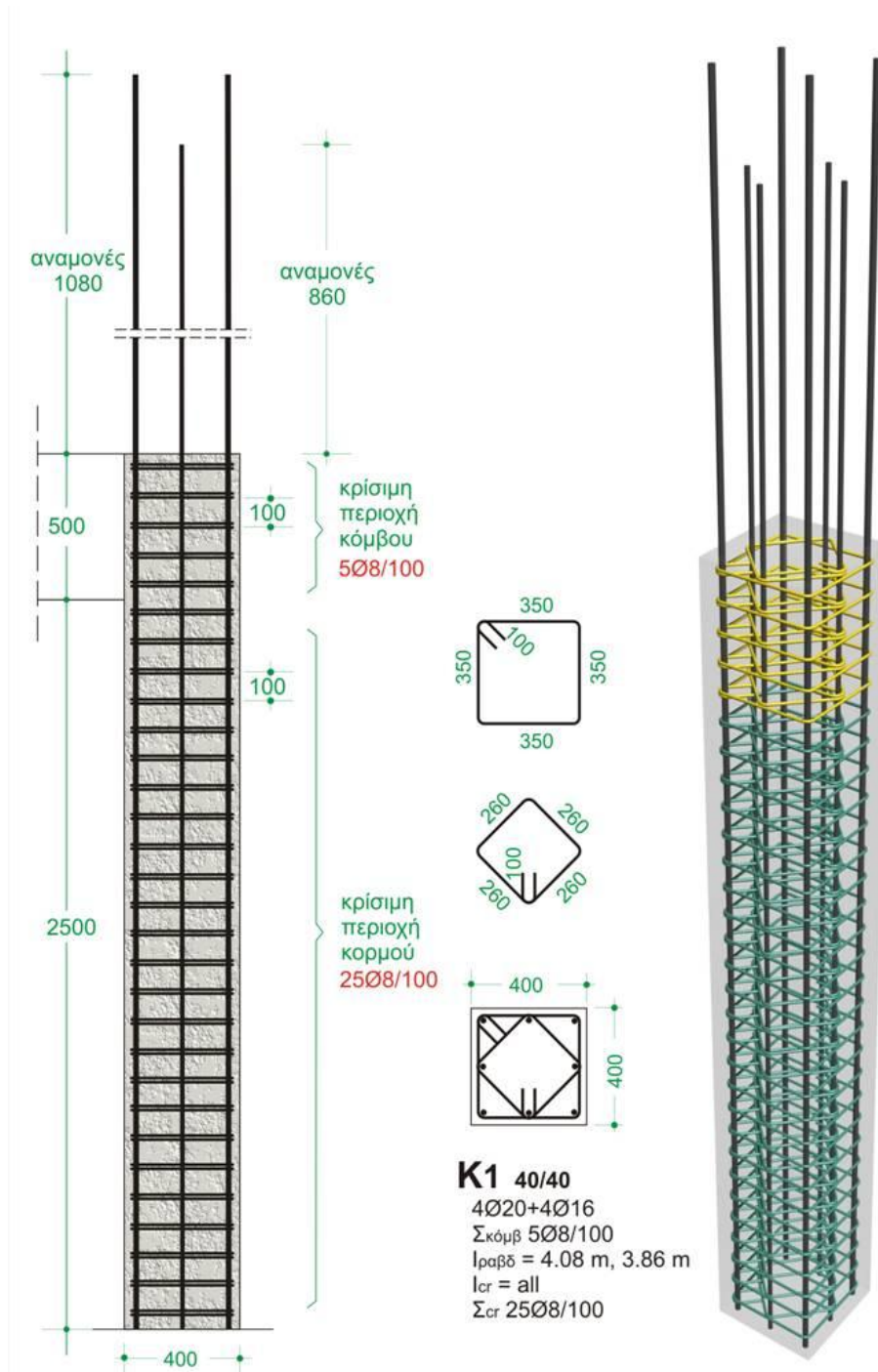
Σχήμα 5.14 Οπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος 300×300mm με κρίσιμες και μη περιοχές. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)

Στην ενδιάμεση περιοχή της πρώτης αυτής εκδοχής όπλισης του υποστυλώματος, έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες διαμέτρου $\Phi 10$ ανά 150 mm. Στο ύψος του 1,50 m αυτής της περιοχής, ο αριθμός των συνδετήρων είναι 10 γι' αυτό και οι συνδετήρες σε αυτή την περιοχή συμβολίζονται ως 10 $\Phi 10/150$. Στην κάθε κρίσιμη περιοχή, έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες $\Phi 10/100$, ο συνολικός αριθμός των συνδετήρων είναι 6 γι' αυτό και οι συνδετήρες σε αυτή την περιοχή συμβολίζονται ως 6 $\Phi 10/100$. Στην περιοχή του κόμβου, έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες $\Phi 10/100$, ο συνολικός αριθμός των συνδετήρων είναι 5 γι' αυτό και οι συνδετήρες σε αυτή την περιοχή συμβολίζονται ως 5 $\Phi 10/100$. Στην ταμπέλα της λεπτομέρειας της κολόνας, αναγράφονται ακριβώς αυτά τα στοιχεία, με τα οποία ο σιδεράς μπορεί να την οπλίσει σωστά.

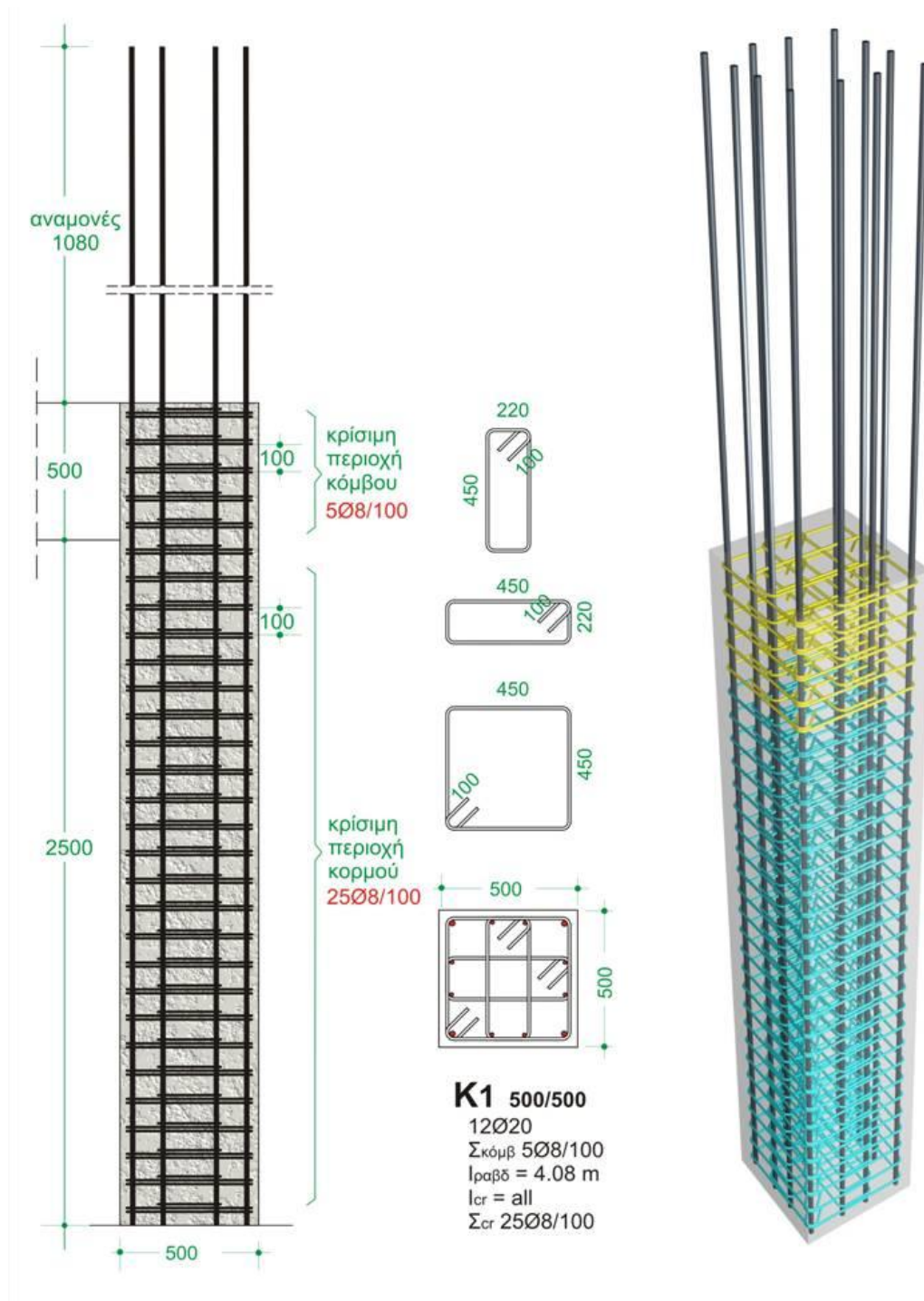


Σχήμα 5.15 Οπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος 300×300mm με κρίσιμο όλο το ύψος. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης).

Στη δεύτερη αυτή εκδοχή όπλισης, όλο το ύψος του υποστυλώματος έχει θεωρηθεί κρίσιμο και έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες διαμέτρου Φ10 ανά 100 mm. Στο ύψος των 2,70 m, ο αριθμός των συνδετήρων είναι 27, γι' αυτό και οι συνδετήρες σε αυτή την περιοχή συμβολίζονται ως 27Φ10/100. Στην περιοχή του κόμβου, έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες Φ10/100, ο συνολικός αριθμός των συνδετήρων είναι 5 γι' αυτό και οι συνδετήρες σε αυτή την περιοχή συμβολίζονται ως 5Φ10/100.



Σχήμα 5.16 Οπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστρώματος 400×400mm με κρίσιμο όλο το ύψος. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)



Σχήμα 5.17 Οπλισμός τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος 500×500mm με κρίσιμο όλο το ύψος. (Πηγή: "Η τέχνη της κατασκευής και η μελέτη εφαρμογής", Τόμος Α', Απόστολος Κ. Κωνσταντινίδης)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Ο σωστός τρόπος όπλισης επιβάλλει, η θέση των αγκίστρων των συνδετήρων, να αλλάζει σε κάθε στρώση, αλλά με τον βιομηχανικό τρόπο που κατασκευάζονται οι περισσότεροι κλωβοί των συνδετήρων, αυτό δεν είναι εφικτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΕΛΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται απλές σχέσεις υπολογισμού της ροπής και της καμπυλότητας για ορθογωνικές διατομές. Οι σχέσεις που εξάγονται αφορούν τον υπολογισμό της ροπής και της καμπυλότητας στη διαρροή, στη μέγιστη αντοχή, δηλαδή όπως ορίζεται συμβατικά για θραύση του σκυροδέματος της επικάλυψης και στην αστοχία, είτε για θραύση του περισιφισμένου πυρήνα σκυροδέματος, είτε για θραύση του ακραίου εφελκόμενου οπλισμού.

6.2. ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Οι Παναγιωτάκος 1998 και Panagiotakos και Fardis 2001 ανέπτυξαν απλές εξισώσεις κλειστού τύπου για τον υπολογισμό της ροπής και της καμπυλότητας στη διαρροή για μέλη ορθογωνικής διατομής, βασισμένες στις εξής παραδοχές :

- Ισχύς της υπόθεσης Navier – Bernoulli για επιπεδότητα διατομών.
- Γραμμική σχέση σ - ϵ των υλικών μέχρι τη διαρροή και για το χάλυβα και το σκυρόδεμα.
- Κριτήριο διαρροής :

α) εξάντληση της τάσης διαρροής του χάλυβα, f_y , ή

β) βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας $\epsilon_c=1,8f_c/E_c$, ανάλογα με το ποιο από τα α) και β) συμβαίνει πρώτα.

Κατά κανόνα η "διαρροή" της διατομής οφείλεται στη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού σε τάση $\sigma_{s1}=f_y$ και παραμόρφωση χάλυβα $\epsilon_s=f_y/E_s$ και συμβαίνει σε τιμή της καμπυλότητας που δίνεται από την εξίσωση:

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d} \quad (6.1)$$

με ανηγμένο (στο στατικό ύψος d) ύψος της θλιβόμενης ζώνης ίσο με :

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A \quad (6.2)$$

όπου για ορθογωνική διατομή με πλάτος b και στατικό ύψος d :

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5\rho_v(1 + \delta_1) + \frac{N}{bdf_y} \quad (6.3)$$

Στην Εξ.(6.3) τα ρ_1 , ρ_2 και ρ_v είναι αντίστοιχα τα ανηγμένα bd ποσοστά του οπλισμού του εφελκόμενου πέλματος, του θλιβόμενου πέλματος και του οπλισμού στον κορμό, ο οποίος θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένος στο τμήμα του ύψους μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού. Η απόσταση του εφελκόμενου ή του θλιβόμενου οπλισμού από το αντίστοιχο πέλμα συμβολίζεται με d_1 , και ως δ_1 ορίζεται ο λόγος d_1/d . Η αξονική δύναμη N αν είναι θλιπτική λαμβάνεται θετική, ενώ $\alpha=E_s/E_c$ είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Σε περίπτωση που το ποσοστό ρ_1 είναι πολύ μεγάλο και τα ρ_2 , ρ_v μικρά ή η μέση θλιπτική τάση N/bd είναι υψηλή, τότε η σχέση M- φ μπορεί να καμπυλωθεί με τα κοίλα προς

τα κάτω όχι λόγω διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού αλλά λόγω εισόδου του σκυροδέματος στο έντονα μη-γραμμικό τμήμα του διαγράμματος σ-ε σε θλίψη. Πειραματικά αποτελέσματα και δοκιμές διαφόρων εναλλακτικών τρόπων δείχνουν ότι, για βέλτιστη μέση προσέγγιση, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει, αν η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας ξεπεράσει μία τιμή ε_c της τάξεως του $\varepsilon_c \approx 1,8f_c/E_c$, και αντιστοιχεί σε καμπυλότητα "διαρροής" :

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d} \quad (6.4)$$

όπου το (ανηγμένο στο d) ύψος της θλιβόμενης ζώνης δίνεται πάλι από την εξ.6.2 με :

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v - \frac{N}{\varepsilon_c E_s b d} \approx \rho_1 + \rho_2 + \rho_v - \frac{N}{1,8 a b d f_c}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) \quad (6.5)$$

Αν η Εξ. (6.4) σε συνδυασμό με τις Εξ. (6.2) και (6.5), δίνει μικρότερη τιμή για την φ_y απ' ό τι ο συνδυασμός των Εξ. (6.1), (6.2) και (6.3), τότε καθοριστικό της "διαρροής" είναι το σκυρόδεμα.

Κατόπιν, η ροπή διαρροής υπολογίζεται από την :

$$\frac{M_y}{b d^3} = \varphi_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0,5(1 + \delta_1) - \frac{\xi_y}{3} \right) + \frac{E_s}{2} \left[(1 - \xi_y) \rho_1 + (\xi_y - \delta_1) \rho_2 + \frac{\rho_v}{6} (1 - \delta_1) \right] (1 - \delta_1) \right\} \quad (6.6)$$

6.3 ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

6.3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής, M_u , και της καμπυλότητας στη αστοχία, φ_u , μπορεί να βασιστεί στις ίδιες αρχές με τον υπολογισμό της ροπής και καμπυλότητας διαρροής, M_y και φ_y , δηλαδή στην υπόθεση επιπεδότητας των διατομών και στην εξίσωση των εσωτερικών και εξωτερικών αξονικών δυνάμεων με τους κατάλληλους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων, σ-ε, των υλικών.

Η κρίσιμη διατομή με αύξηση της παραμόρφωσης πέρα από το όριο διαρροής έχει ως αποτέλεσμα να φθάσει σε οριακή κατάσταση κάτω από ένα από τα δύο παρακάτω ενδεχόμενα :

Α. Θραύση του εφελκόμενου οπλισμού όταν εξαντλείται η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα, ε_{su} . Η καμπυλότητα στην αστοχία υπολογίζεται ως :

$$\varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su1}}{(1 - \xi_{su}) d} \quad (6.7)$$

όπου ξ_{su} είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ανηγμένο στο d, κατά τη θραύση του εφελκόμενου οπλισμού.

Β. Αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης η οποία λαμβάνει χώρα όταν η ακραία θλιβόμενη ίνα φθάνει τη μέγιστη παραμόρφωση, ε_{cu} . Η καμπυλότητα στην αστοχία υπολογίζεται τότε από την εξίσωση:

$$\varphi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu} d} \quad (6.8)$$

Αυτοί οι δύο τρόποι αστοχίας μπορούν να συμβούν σε ένα από τα δύο παρακάτω στάδια :

1. πριν ή κατά τη διάρκεια της αποφλοίωσης του απερίσφιγκτου σκυροδέματος της επικάλυψης, δηλαδή σε επίπεδο της πλήρους διατομής με τις πλήρεις διαστάσεις b, h, d ή
2. σε επίπεδο διατομής του περισφιγμένου πυρήνα μετά την αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης. Σε αυτή την περίπτωση οι διαστάσεις της πλήρους διατομής b, h, d θα πρέπει να αντικαθίστανται από τις διαστάσεις του πυρήνα b_c, h_c, d_c , το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ , θα πρέπει να είναι ανηγμένο στο d_c και η μέγιστη παραμόρφωση σκυροδέματος, ε_{cu} , αντικαθίστανται από τη μέγιστη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος $\varepsilon_{cu,c}$.

Για τους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών, σ - ε , γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- i. Ο νόμος σ - ε του απερίσφιγκτου σκυροδέματος είναι παραβολή μέχρι παραμόρφωση ίση με ε_{co} και μετά οριζόντιος μέχρι παραμόρφωση $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$ (θεώρηση η οποία γίνεται συνήθως στους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς). Με τη θεώρηση αυτή το σκυρόδεμα συνεισφέρει στην αξονική δύναμη θλίψης με δύναμη ίση με $\xi(bdf_c)(1 - \varepsilon_{co}/3 \varepsilon_c)$.
- ii. Ο νόμος σ - ε του χάλυβα οπλισμού είναι ελαστικός-πλήρως πλαστικός για μικρές παραμορφώσεις όπως αυτές που συναντώνται σε αστοχία της θλιβόμενης ζώνης (περίπτωση Β πιο πάνω). Για μεγάλες παραμορφώσεις, όπως αυτές που συναντώνται σε αστοχία λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού (περίπτωση Α πιο πάνω), ο οριζόντιος κλάδος διαρροής με τάση f_y για παραμόρφωση, ε_{sh} , στο τέλος του οριζόντιου κλάδου διαρροής, στη μέγιστη τάση f_t που αντιστοιχεί στην οριακή παραμόρφωση, ε_{su} . Στα παρακάτω οι παράμετροι του νόμου σ - ε ($f_y, \varepsilon_y=f_y/E_s, \varepsilon_{sh}, f_t, \varepsilon_{su}$) του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του οπλισμού του κορμού, σημειώνονται με 1, 2 ή v , αντίστοιχα.

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του ύψους της θλιβόμενης ζώνης, ξ , για χρήση στις Εξ. (6.7) και (6.8).

6.3.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΛΟΓΩ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ

Αστοχία της πλήρους διατομής λόγω θραύσης του εφελκόμενου χάλυβα σε παραμόρφωση ίση με τη μέγιστη παραμόρφωση χάλυβα σε εφελκυσμό, ε_{su} , συμβαίνει πριν την αποφλοίωση της διατομής, δηλαδή για παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας μικρότερη από την παραμόρφωση θραύσης του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, ε_{cu} , όταν το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ , ανηγμένο στο d , είναι: $\xi < \varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})$. Η αστοχία μπορεί να συμβεί πριν ακόμα διαρρεύσει ο θλιβόμενος οπλισμός, εάν ισχύει η ανίσωση: $\xi < (\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{su} \delta_1)/(\varepsilon_{y2} + \varepsilon_{su})$. Δηλαδή η πλήρης διατομή μπορεί να αστοχήσει λόγω θραύσης του εφελκόμενου χάλυβα μετά τη διαρροή του θλιβόμενου οπλισμού όταν:

$$\delta_1 \leq \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} \quad (6.9)$$

όπου $\delta_1 = d_1/d$ είναι η απόσταση του θλιβόμενου οπλισμού από την ακραία θλιβόμενη ίνα, ανηγμένη στο d , και ε_{co} είναι παραμόρφωση σκυροδέματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση απερίσφιγκτου σκυροδέματος με βάση το νόμο σ - ε που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο ($\varepsilon_{co} \approx 0,002$).

Αν ισχύει η Εξ. (6.9) και το ανηγμένο αξονικό φορτίο, $v = N/bdf_c$ (θετικό για θλίψη), πληροί την παρακάτω ανίσωση:

$$\frac{\delta_1 \varepsilon_{su1} + \varepsilon_{y2} - (1 - \delta_1) \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{su1} + \varepsilon_{y2}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} - \frac{\omega_v}{\varepsilon_{su1} + \varepsilon_{y2}} \left[\varepsilon_{su1} - \varepsilon_{y2} + \frac{1}{2} (\varepsilon_{su1} - \varepsilon_{shv}) \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \right) \right] \equiv$$

$$v_{s,y2} \leq v \leq v_{s,c} \equiv \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su1}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} - \frac{\omega_v}{(1 - \delta_1)(\varepsilon_{su1} + \varepsilon_{cu})} [\delta_1 (\varepsilon_{su1} + \varepsilon_{cu}) - (\varepsilon_{su1} - \varepsilon_{cu}) +$$

$$\frac{1}{2} (\varepsilon_{su1} - \varepsilon_{shv}) \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \right)] \quad (6.10)$$

όπου $\omega_1 = \rho_1 f_{y1} / f_c$, $\omega_2 = \rho_2 f_{y2} / f_c$, $\omega_v = \rho_v f_{yv} / f_c$ είναι το μηχανικό ποσοστό του εφελκυσμένου, του θλιβόμενου και του οπλισμού του κορμού, με τα ανηγμένα ρ_1 , ρ_2 , ρ_v στο b , τότε η αστοχία λόγω θραύσης του εφελκυσμένου χάλυβα συμβαίνει με το θλιβόμενο οπλισμό ήδη σε διαρροή. Τότε η υπόθεση επιπεδότητας των διατομών και η εξίσωση των δυνάμεων στη διατομή, δίνουν την παρακάτω σχέση προς χρήση στην Εξ. (6.7) :

$$\xi_{su} \approx \frac{(1 - \delta_1) \left(v + \omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{su1}} \right) (1 + \delta_1 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \right)) \omega_v}{(1 - \delta_1) \left(1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{su1}} \right) + \left(2 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \right) \right) \omega_v} \quad (6.11)$$

Αν ισχύει η Εξ. (6.9), αλλά το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , είναι μικρότερο από το όριο $v_{s,y2}$ όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.10), τότε η πλήρης διατομή αστοχεί λόγω θραύσης του εφελκυσμένου οπλισμού πριν την αποφλοίωση και πριν διαρρεύσει ο θλιβόμενος οπλισμός. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της ξ_{su} για χρήση στην Εξ. (6.7) είναι η θετική ρίζα της δευτεροβάθμιας εξίσωσης :

$$\left[1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{su1}} + \frac{\omega_v}{2(1 - \delta_1)} \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) + \frac{\varepsilon_{shv} - 3 \varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} - \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{yv}} \right) \right] \xi^2 - \left[1 + v + \frac{2 \varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{su}} + \omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} + \right.$$

$$\left. \omega_2 \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v}{1 - \delta_1} \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) + \frac{\varepsilon_{shv} - 3 \varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} - \delta_1 \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{yv}} \right) \right] \xi +$$

$$\left[v + \frac{\varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{su}} + \omega_1 \frac{f_{tv}}{f_{yv}} + \omega_2 \delta_1 \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v}{2(1 - \delta_1)} \left(1 + \frac{f_{tv}}{f_{yv}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) + \frac{\varepsilon_{shv} - 3 \varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} - \delta_1 \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{yv}} \right) \right] = 0 \quad (6.12)$$

Αν ισχύει η Εξ. (6.9) και το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , ξεπερνά το όριο της $v_{s,c}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.10), τότε θα συμβεί αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης σε παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας ίση με ε_{cu} , πριν τη θραύση του εφελκυσμένου χάλυβα, με το θλιβόμενο χάλυβα ήδη σε διαρροή. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ακολουθείται η διαδικασία της παραγράφου 6.3.3.

Στην περίπτωση που δεν πληρούται η Εξ. (6.9) η τιμή της $v_{s,y2}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.10), είναι μεγαλύτερη της τιμής της $v_{s,c}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της ίδιας εξίσωσης. Ο θλιβόμενος οπλισμός θα έχει διαρρεύσει ήδη αν συμβεί θραύση του εφελκυσμένου οπλισμού πριν την αποφλοίωση της διατομής. Στην περίπτωση αυτή αν το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , είναι μικρότερο από την τιμή της $v_{s,c}$, στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.10), η τιμή της ξ_{su} για χρήση στην Εξ. (6.9) είναι πάλι η θετική ρίζα της Εξ. (6.12). Αν το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , ξεπερνά την τιμή της $v_{s,c}$, τότε θα συμβεί θραύση του σκυροδέματος της επικάλυψης σε παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας ίση με ε_{cu} , πριν τη θραύση του εφελκυσμένου οπλισμού, με το θλιβόμενο οπλισμό ήδη σε διαρροή. Θα πρέπει να ακολουθείται σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία της παραγράφου 6.3.3.

6.3.3 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ ΤΟΥ ΑΠΕΡΙΣΦΙΓΚΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ

Η αντοχή σε κάμψη της διατομής μειώνεται όταν το σκυρόδεμα της επικάλυψης θραυσθεί, λόγω της εξάντλησης της μέγιστης παραμόρφωσης του απερίσφιγκτου

σκυροδέματος, ϵ_{cu} . Οι ακόλουθες ροπές αντίστασης πρέπει να υπολογισθούν προκειμένου να προσδιορισθεί τι συμβαίνει μετά την αποφλοιώση της διατομής :

- Η ροπή της αντίστασης της πλήρους διατομής πριν την αποφλοιώση, αγνοώντας την επιρροή της περίσφιγξης στις ιδιότητες του σκυροδέματος, M_{Rc} ,
- Η ροπή αντίστασης του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής ορισμένου συμβατικά από το κέντρο της ράβδου του συνδετήρα, μετά τη θραύση της επικάλυψης, M_{Ro} .

Η ροπή αντίστασης περισφιγμένου πυρήνα, M_{Ro} , υπολογίζεται με βάση την αντοχή f_{cc} και τη μέγιστη παραμόρφωση $\epsilon_{cu,c}$ του περισφιγμένου σκυροδέματος και τις διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα b_c , d_c , d_{c1} (τα d_c και d_{c1} προκύπτουν αφαιρώντας από τα d και d_1 , αντίστοιχα, το άθροισμα της επικάλυψης και της μισής διαμέτρου του εγκάρσιου οπλισμού, ενώ το b_c προκύπτει από το b αφαιρώντας το διπλάσιο του παραπάνω αθροίσματος).

- $$A_n : \quad M_{Ro} \leq 0,8M_{Rc} \quad (6.13)$$

τότε η αποφλοιώση της διατομής θεωρείται ως η οριακή κατάσταση αστοχίας και η καμπυλότητα στην αστοχία υπολογίζεται από την Εξ. (6.8), όπου η τιμή της θλιβόμενης ζώνης ξ_{cu} (ανοιγμένη στο d) πρέπει να λαμβάνεται από τις ακόλουθε Εξ. (6.14)-(6.21).

Αν $\xi < \epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} + \epsilon_{y1})$, τότε ο εφελκόμενος χάλυβας θα έχει ήδη διαρρεύσει κατά τη θραύση των ακραίων θλιβόμενων ιών της επικάλυψης, σε παραμόρφωση ίση με την παραμόρφωση θραύσης του απερίσφιγτου σκυροδέματος ϵ_{cu} .

Κατά τη θραύση του απερίσφιγτου σκυροδέματος σε παραμόρφωση ίση με ϵ_{cu} , ο θλιβόμενος οπλισμός θα είναι ακόμα ελαστικός αν $\xi < \delta_1 \epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} - \epsilon_{y2})$. Αντιθέτως, αν $\xi > \delta_1 \epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} - \epsilon_{y2})$, τότε ο θλιβόμενος οπλισμός θα έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής κατά την εξάντληση της παραμόρφωσης ϵ_{cu} . Επομένως, υπάρχει ένα εύρος τιμών του ύψους της θλιβόμενης ζώνης, ξ , για τις οποίες τόσο ο εφελκόμενος όσο και ο θλιβόμενος οπλισμός έχουν διαρρεύσει πριν τη θραύση του απερίσφιγτου σκυροδέματος, με την προϋπόθεση ότι $\epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} + \epsilon_{y1}) > \delta_1 \epsilon_{cu}/(\epsilon_{cu} - \epsilon_{y2})$, δηλαδή :

$$\delta_1 \leq \frac{\epsilon_{cu} - \epsilon_{y2}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{y1}} \quad (6.14)$$

Αν δεν ισχύει η Εξ. (6.14), τότε δεν μπορεί να υπάρξει τιμή του ξ για την οποία και ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός θα έχει διαρρεύσει πριν τη θραύση του απερίσφιγτου σκυροδέματος. Υπάρχει όμως περιοχή τιμών του ξ για την οποία τόσο ο εφελκόμενος όσο και ο θλιβόμενος οπλισμός θα είναι ακόμα στην ελαστική περιοχή όταν εξαντλείται η μέγιστη παραμόρφωση απερίσφιγτου σκυροδέματος, ϵ_{cu} , στην ακραία θλιβόμενη ίνα. Η περίπτωση αυτή οδηγεί σε μη-πλάστιμη μορφή αστοχίας.

Αρα, εξετάζονται δύο περιπτώσεις :

- Η περίπτωση που ισχύει η Εξ. (6.14), και
- Η περίπτωση που ισχύει η ανισότητα :

$$\delta_1 > \frac{\epsilon_{cu} - \epsilon_{y2}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{y1}} \quad (6.15)$$

Η περίπτωση i είναι πιο επιθυμητή, αλλά και συχνότερη στην πράξη και εξετάζεται πρώτη.

Τιμές της ξ μεταξύ $\xi = \varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y1})$ και $\xi = \delta_1 \varepsilon_{cu}/(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2})$ ισοδυναμούν με το ακόλουθο εύρος τιμών για το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v :

$$\omega_2 - \omega_1 + \frac{\omega_v}{1 - \delta_1} \left(\delta_1 \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}} - 1 \right) + \delta_1 \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y2}} \equiv v_{c,y2} \leq v < v_{c,y1} \equiv \omega_2 - \omega_1 + \frac{\omega_v}{1 - \delta_1} \left(\frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y1}} - \delta_1 \right) + \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y1}} \quad (6.16)$$

Όταν ισχύει η εξίσωση αυτή, η τιμή της ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξ. (6.8) λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\xi_{cu} = \frac{(1 - \delta_1)(v + \omega_1 - \omega_2) + (1 + \delta_1)\omega_v}{(1 - \delta_1)\left(1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}}\right) + 2\omega_v} \quad (6.17)$$

Για τιμές της v μεγαλύτερες από την οριακή $v_{c,y1}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.16), οι ακραίες θλιβόμενες ίνες θα φθάσουν την παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, ε_{cu} , μετά τη διαρροή του θλιβόμενου οπλισμού, αλλά με τον εφελκόμενο οπλισμό ελαστικό. Η τιμή της ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξ. (6.8) υπολογίζεται ως η θετική ρίζα της εξίσωσης :

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} - \frac{\omega_v}{2(1 - \delta_1)} \frac{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{yv})^2}{\varepsilon_{cu}\varepsilon_{yv}} \right] \xi^2 + \left[\omega_2 + \omega_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{y1}} - v + \frac{\omega_v}{1 - \delta_1} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{yv}} - \delta_1 \right) \right] \xi - \left[\frac{\omega_1}{\varepsilon_{y1}} + \frac{\omega_v}{2(1 - \delta_1)\varepsilon_{yv}} \right] \varepsilon_{cu} = 0 \quad (6.18)$$

Στην περίπτωση που η v είναι μικρότερη από την τιμή $v_{c,y2}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.16), η θραύση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος της ακραίας θλιβόμενης ίνας σε παραμόρφωση ε_{cu} , θα συμβεί με τον εφελκόμενο οπλισμό σε διαρροή και τον θλιβόμενο ελαστικό. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξ. (6.8) είναι η θετική ρίζα της εξίσωσης:

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} - \frac{\omega_v}{2(1 - \delta_1)} \frac{(\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{yv})^2}{\varepsilon_{cu}\varepsilon_{yv}} \right] \xi^2 + \left[v + \omega_1 - \omega_2 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v}{1 - \delta_1} \left(1 + \frac{\varepsilon_{cu}\delta_1}{\varepsilon_{yv}} \right) \right] \xi - \left[\frac{\omega_2}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v\delta_1}{2(1 - \delta_1)\varepsilon_{yv}} \right] \varepsilon_{cu}\delta_1 = 0 \quad (6.19)$$

Η περίπτωση ii, όπου πληρούται η Εξ. (6.15), είναι μη- επιθυμητή και εντυχώς αρκετά σπάνια. Όταν πληρούται η Εξ. (6.15) και το ανηγμένο αξονικό φορτίο βρίσκεται μεταξύ των ορίων της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{\omega_2}{\varepsilon_{y2}} \left((1 - \delta_1)\varepsilon_{cu} - \delta_1\varepsilon_{y1} \right) - \omega_1 + \frac{\omega_v}{2\varepsilon_{yv}} \left(\varepsilon_{cu} - \frac{1 + \delta_1}{1 - \delta_1} \right) + \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y1}} \equiv \bar{v}_{c,y1} \leq v < \bar{v}_{c,y2} \equiv \omega_2 - \frac{\omega_1}{\varepsilon_{y1}} \frac{(1 - \delta_1)\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}}{\delta_1} + \frac{\omega_v}{\delta_1\varepsilon_{yv}} \left(\frac{1 + \delta_1}{1 - \delta_1} \varepsilon_{y2} - \varepsilon_{cu} \right) + \delta_1 \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}} \quad (6.20)$$

τότε και ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή κατά τη θραύση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος της ακραίας ίνας σε παραμόρφωση σκυροδέματος ε_{cu} . Όταν πληρείται η εξίσωση αυτή, τότε η ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξ. (6.8) είναι η θετική ρίζα της εξίσωσης :

$$\left[1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} \right] \xi^2 - \left[v - \left(\frac{\omega_1}{\varepsilon_{y1}} + \frac{\omega_2}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v}{(1 - \delta_1)\varepsilon_{yv}} \right) \varepsilon_{cu} \right] \xi - \left(\frac{\omega_1}{\varepsilon_{y1}} + \frac{\delta_1\omega_2}{\varepsilon_{y2}} + \frac{\omega_v(1 + \delta_1)}{2(1 - \delta_1)\varepsilon_{yv}} \right) \varepsilon_{cu} = 0 \quad (6.21)$$

Για τιμές της v μεγαλύτερες από την οριακή τιμή $\bar{v}_{c,y2}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.20), η θραύση των ακραίων θλιβόμενων ινών του απερίσφιγκτου σκυροδέματος θα γίνει αφού πρώτα διαρρεύσει ο θλιβόμενος οπλισμός, αλλά με τον εφελκόμενο οπλισμό στην ελαστική περιοχή. Η τιμή της ξ_{cu} που θα χρησιμοποιηθεί στην Εξ. (6.8), είναι η θετική ρίζα της παραπάνω Εξ. (6.18). Αντιθέτως, αν η v είναι μικρότερη από την τιμή $\bar{v}_{c,y1}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.20), η θραύση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος θα συμβεί μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα, αλλά με τον θλιβόμενο στην ελαστική περιοχή. Στην περίπτωση αυτή η ξ_{cu} που γίνεται χρήση στην Εξ. (6.8), είναι η θετική ρίζα της παραπάνω Εξ. (6.19).

6.3.4 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΠΥΡΗΝΑ , ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

- $A_v : \quad MR_o > 0,8MR_c \quad (6.22)$

τότε η αντοχή της αποφλοιωμένης διατομής είναι αρκετή ώστε να συνεχίσει η παραμόρφωση της διατομής χωρίς σημαντική πτώση της ροπής αντίστασης. Η τελική αστοχία θα συμβεί είτε λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού, είτε λόγω αποδιοργάνωσης του περισφιγμένου πυρήνα σκυροδέματος.

Ο υπολογισμός του ύψους της θλιβόμενης ζώνης, ξ , και της καμπυλότητας στην αστοχία, ϕ_u , της αποφλοιωμένης διατομής, πραγματοποιείται ακολουθώντας την ανάλυση των βημάτων στις παραγράφους 6.3.1-6.3.3 με τις εξής τροποποιήσεις :

- Οι διαστάσεις b , d και d_1 αντικαθίστανται με b_c (ίση με την b , μείον δύο φορές την επικάλυψη και μία διάμετρο του εγκάρσιου οπλισμού), d_c (ίση με d , μείον μία φορά την επικάλυψη και μισή διάμετρο του εγκάρσιου οπλισμού) και d_{c1} (ίση με μισή διάμετρο εγκάρσιου οπλισμού συν μισή διάμετρο διαμήκους οπλισμού).
 - Τα μεγέθη N , ρ_1 , ρ_2 , ρ_v είναι ανηγμένα στο $b_c d_c$, αντί του bd , και
 - Τα μεγέθη σ - ϵ του περισφιγμένου σκυροδέματος, f_{cc} , $\epsilon_{cu,c}$, χρησιμοποιούνται αντί των f_c , ϵ_{cu} .
- Το d_{c1} είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το d_1 , και για το λόγο αυτό οι Εξ. (6.9) και (6.14) ισχύουν πάντα για τον περισφιγμένου πυρήνα. Με αυτό τον τρόπο, μόνον οι Εξ. (6.10)-(6.12), (6.16) - (6.19), των παραγράφων 6.3.2 και 6.3.3 χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της καμπυλότητας αστοχίας του περισφιγμένου πυρήνα.

6.3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ M_{RC} ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ M_{RO} , ΜΕΛΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Οι εξισώσεις υπολογισμού της ροπής αντίστασης της πλήρους, μη-αποφλοιωμένης διατομής, M_{RC} , παρουσιάζονται παρακάτω. Κατά κανόνα η τιμή αυτή είναι η μέγιστη τιμή της ροπής αντίστασης, δηλαδή ροπής αντοχής, διότι η αποφλοίωση της διατομής συνεπάγεται πτώσης της αντίστασης της διατομής. Ο υπολογισμός της ροπής αντίστασης της αποφλοιωμένης διατομής, M_{RO} , που θα χρησιμοποιηθεί στις Εξ. (6.13) και (6.22), μπορεί να υπολογίζεται με τις ίδιες εξισώσεις, χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία του περισφιγμένου πυρήνα, b_c , d_c και d_{c1} , και τις χαρακτηριστικές τιμές του διαγράμματος του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} , $\epsilon_{cu,c}$.

Για αστοχία της διατομής λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού, δηλαδή όταν το ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , είναι μικρότερο από τις τιμές $v_{s,y2}$, $v_{s,c}$ της Εξ. (6.10), εξετάζεται

πρώτα η περίπτωση όπου η Εξ. (6.9) πληρείται. Όταν η v είναι μικρότερη από τη $v_{s,y2}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.10), τότε ο θλιβόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή ενώ ο εφελκόμενος έχει φθάσει στη μέγιστη αντοχή του. Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ , (ανηγμένο στο d) δίνεται από την Εξ. (6.12) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \frac{M_{RC}}{bd^2f_c} = & (1 - \xi) \left[\frac{\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su1}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{su1}} (1 - \xi) \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(\omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} + \omega_2 \frac{\xi - \delta_1}{1 - \xi} \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{y2}} \right) + \\ & \frac{\omega_v}{6(1-\delta_1)} \left\{ \left[1 - \delta_1 + \xi \left(1 - \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \right] \left[1 + \frac{\varepsilon_{su1}}{\varepsilon_{yv}} \left(\frac{\xi - \delta_1}{1 - \xi} \right) \right] \left[\frac{1 - \delta_1}{2} - (1 - \xi) \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} \right] + \left[\frac{2(1-\delta_1)}{3} - \right. \right. \\ & \left. \left. \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) (1 - \xi) \right] \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \left(\frac{f_{tv}}{f_{yv}} - 1 \right) (1 - \xi) \right\} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Αντιθέτως, αν το v πληροί την Εξ. (6.10), τότε ο θλιβόμενος οπλισμός έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής, αλλά δεν έχει προχωρήσει στην κράτυνση. Έτσι το ξ υπολογίζεται από την Εξ. (6.11) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση :

$$\begin{aligned} \frac{M_{RC}}{bd^2f_c} = & (1 - \xi) \left[\frac{\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su1}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{su1}} (1 - \xi) \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(\omega_1 \frac{f_{t1}}{f_{y1}} + \omega_2 \right) + \frac{\omega_v}{1-\delta_1} \left\{ (\xi - \right. \\ & \left. \delta_1)(1 - \xi) - \frac{1}{3} \left(\frac{(1-\xi)\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{su1}} \right)^2 + \left[\frac{(1-\delta_1)}{4} - \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \frac{1-\xi}{6} \right] \left(1 - \frac{\varepsilon_{shv}}{\varepsilon_{su1}} \right) \left(\frac{f_{t1}}{f_{y1}} - 1 \right) (1 - \xi) \right\} \end{aligned} \quad (6.24)$$

Αν δεν πληρείται η Εξ. (6.9), αλλά η v είναι μικρότερη από τη $v_{s,c}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.10), τότε ο θλιβόμενος οπλισμός βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, ενώ ο εφελκόμενος έχει φθάσει στη μέγιστη αντοχή του, η ροπή αντίστασης δίνεται πάλι από την Εξ. (6.23) με ξ από την Εξ. (6.12).

Στην περίπτωση αστοχίας λόγω θραύσης του σκυροδέματος (ανηγμένο αξονικό φορτίο, v , μεγαλύτερο από τα $v_{s,y2}$, $\bar{v}_{c,y1}$, όπως καθορίζονται στο 1^ο μέλος των Εξ. (6.16) και (6.20) αντίστοιχα), εξετάζουμε πρώτα τη συνήθη περίπτωση όπου πληρείται η Εξ. (6.14). Σε αυτό το σημείο αν η v είναι μικρότερη από την τιμή $v_{s,y2}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.16), τότε ο θλιβόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή, ενώ ο εφελκόμενος έχει διαρρεύσει αλλά δεν έχει μπει ακόμα στη κράτυνση. Στην περίπτωση αυτή το ξ δίνεται από την Εξ. (6.19) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση :

$$\begin{aligned} \frac{M_{RC}}{bd^2f_c} = & \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{cu}} \xi \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(\omega_1 + \omega_2 \frac{\xi - \delta_1}{\xi} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{y2}} \right) + \frac{\omega_v}{4(1-\delta_1)} \left[\xi \left(1 + \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{cu}} \right) - \right. \\ & \left. \delta_1 \right] \left[1 + \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{yv}} \left(\frac{\xi - \delta_1}{\xi} \right) \right] \left[1 - \frac{\delta_1}{3} - \frac{2}{3} \xi \left(1 + \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right] \end{aligned} \quad (6.25)$$

Αν η v πληροί την Εξ. (6.16), τότε και ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός βρίσκονται σε διαρροή αλλά όχι στην κράτυνση, το ξ δίνεται από την Εξ. (6.17) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση :

$$\frac{M_{RC}}{bd^2f_c} = \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{cu}} \xi \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)(\omega_1 + \omega_2)}{2} + \frac{\omega_v}{1-\delta_1} \left[(\xi - \delta_1)(1 - \xi) - \frac{1}{3} \left(\frac{\xi \varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{cu}} \right)^2 \right]$$

$$(6.26)$$

Αντιθέτως, αν η v είναι μεγαλύτερη από τη $v_{s,y1}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.16), τότε ο εφελκόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή ενώ ο θλιβόμενος οπλισμός έχει διαρρεύσει αλλά δεν έχει εισέλθει στην κράτυνση. Το ξ υπολογίζεται από την Εξ. (6.18) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση:

$$\frac{M_{Rc}}{bd^2f_c} = \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{cu}} \xi \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)}{2} \left(\omega_1 \frac{1-\xi}{\xi} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{y1}} + \omega_2 \right) + \frac{\omega_v}{4(1-\delta_1)} \left[1 - \xi \left(1 - \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right] \left[1 + \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{yv}} \left(\frac{1-\xi}{\xi} \right) \right] \left[\frac{1}{3} - \delta_1 + \frac{2}{3} \xi \left(1 - \frac{\varepsilon_{yv}}{\varepsilon_{cu}} \right) \right] \quad (6.27)$$

Στη συνέχεια εξετάζεται η σπάνια περίπτωση όπου πληρείται η Εξ. (6.22). Εάν η v είναι μικρότερη από τη $\bar{v}_{c,y1}$, όπως καθορίζεται στο 1^ο μέλος της Εξ. (6.20), τότε ο θλιβόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή και ο εφελκόμενος έχει διαρρεύσει αλλά δεν έχει μπει στην κράτυνση. Η ροπή αντίστασης δίνεται από την Εξ. (6.25), με ξ από την Εξ. (6.19). Σε περίπτωση που η v πληροί την Εξ. (6.20), τότε και ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος οπλισμός είναι στην ελαστική περιοχή, το ξ υπολογίζεται από την Εξ. (6.21) και η ροπή αντίστασης από την εξίσωση:

$$\frac{M_{Rc}}{bd^2f_c} = \xi \left[\frac{1-\xi}{2} - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}} \left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{\varepsilon_{co}}{4\varepsilon_{cu}} \xi \right) \right] + \frac{(1-\delta_1)\varepsilon_{cu}}{2\xi} \left((1-\xi) \frac{\omega_1}{\varepsilon_{y1}} + (\xi - \delta_1) \frac{\omega_2}{\varepsilon_{y2}} \right) + \frac{\omega_v(1-\delta_1)^2}{12\xi} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{yv}} \quad (6.28)$$

Στην περίπτωση όπου η v είναι μεγαλύτερη από τη $\bar{v}_{c,y2}$, όπως καθορίζεται στο 2^ο μέλος της Εξ. (6.20), τότε ο εφελκόμενος οπλισμός είναι ελαστικός και ο θλιβόμενος σε διαρροή αλλά πριν την κράτυνση. Η ροπή αντίστασης υπολογίζεται από την Εξ. (6.27), με ξ από την Εξ. (6.21).

6.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ M_U

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης (αξονικής δύναμης – ροπής αντοχής) που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν εξαχθεί για δύο διαφορετικές κατηγορίες σκυροδέματος, πιο συγκεκριμένα για σκυρόδεμα C25/30 και για σκυρόδεμα C30/37, καθώς επίσης, και για 13 διαφορετικές περιπτώσεις διατομών. Στη συνέχεια για τις διατομές αυτές, και των δύο κατηγοριών σκυροδέματος, έχουν δοθεί 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής, δηλαδή συνολικά εξετάστηκαν 104 περιπτώσεις διαφορετικών υποστυλωμάτων μαζί με τον τοποθετούμενο οπλισμό για τις δύο κατηγορίες σκυροδέματος αντίστοιχα. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι εξετάστηκαν υποστυλώματα τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής.

Όπως φαίνεται παρακάτω παρουσιάζονται οι 13 περιπτώσεις διατομών των υποστυλωμάτων αυτών, για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί τα συγκεκριμένα κατωτέρω διαγράμματα:

1. Τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $350 \times 350 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



Σχήμα 6.1 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

2. Τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $400 \times 400 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



Σχήμα 6.2 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

3. Τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $450 \times 450 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



Σχήμα 6.3 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

4. Τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $500 \times 500 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $12\Phi 14$, $12\Phi 16$, $12\Phi 18$ και $12\Phi 20$.



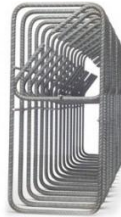
Σχήμα 6.4 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

5. Τετραγωνικής διατομής υποστυλώματος $600 \times 600 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $12\Phi 14$, $12\Phi 16$, $12\Phi 18$ και $12\Phi 20$.



Σχήμα 6.5 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

6. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $250 \times 450 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε 8Φ14, 8Φ16, 8Φ18 και 8Φ20.



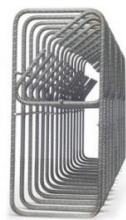
Σχήμα 6.6 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

7. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $250 \times 500 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε 8Φ14, 8Φ16, 8Φ18 και 8Φ20.



Σχήμα 6.7 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

8. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $300 \times 500 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε 8Φ14, 8Φ16, 8Φ18 και 8Φ20.



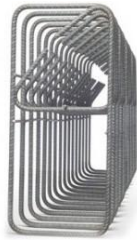
Σχήμα 6.8 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

9. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $250 \times 600 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε 10Φ14, 10Φ16, 10Φ18 και 10Φ20.



Σχήμα 6.9 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

10. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $450 \times 250 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



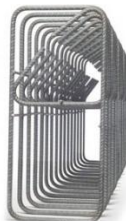
Σχήμα 6.10 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

11. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $500 \times 250 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



Σχήμα 6.11 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

12. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $500 \times 300 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $8\Phi 14$, $8\Phi 16$, $8\Phi 18$ και $8\Phi 20$.



Σχήμα 6.12 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

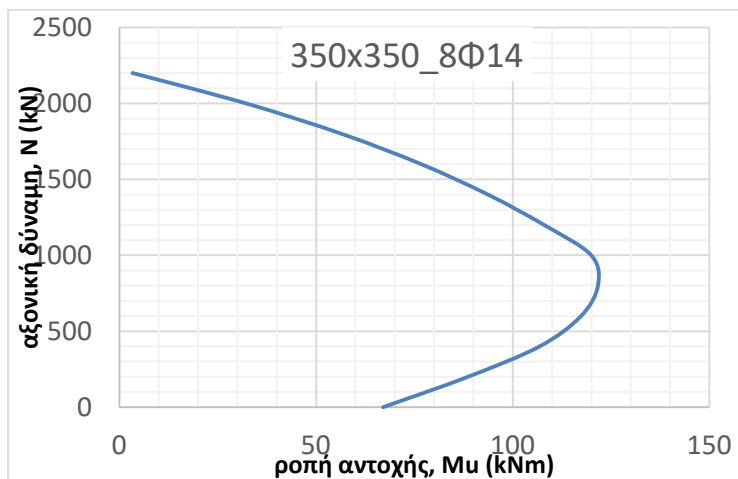
13. Ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος $600 \times 250 \text{mm}$ με 4 διαφορετικές μορφές οπλισμού, δηλαδή έχουμε $10\Phi 14$, $10\Phi 16$, $10\Phi 18$ και $10\Phi 20$.



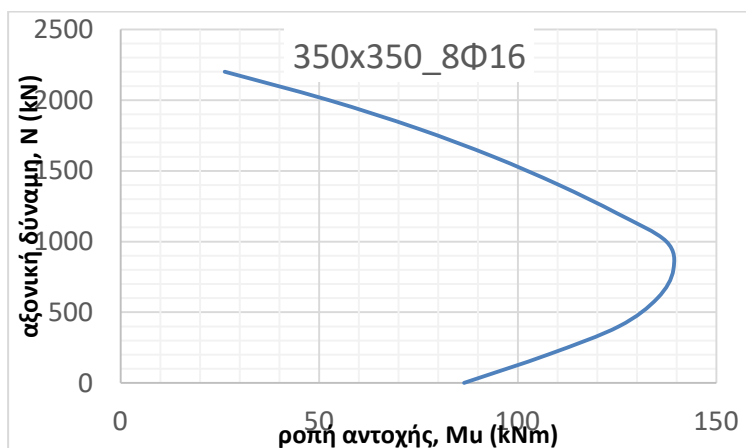
Σχήμα 6.13 Συνδετήρες του κλωβού FORSTEEL (Πηγή: "Χαλυβουργία Ελλάδος")

Η ροπή αντοχής M_u του σκυροδέματος έχει υπολογιστεί από τις εξισώσεις της παραγράφου 6.3. Σε αυτό το σημείο επιβάλλεται να τονιστεί η πρακτική αξία των διαγραμμάτων, διότι μέσω αυτών μπορεί κάποιος να βρει γρήγορα την ροπή αντοχής των υποστύλωματων με συνήθεις διατομές, που χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη, για δεδομένη αξονική δύναμη. Αντίστοιχα, μπορεί κάποιος γρήγορα να επιλέξει την κατάλληλη διατομή και όπλιση για δεδομένη αξονική δύναμη και ροπή σχεδιασμού. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι για αυτό το σκοπό, η χρήση των πινάκων που ακολουθούν στην παράγραφο 6.5, είναι ακόμα πιο πρακτική.

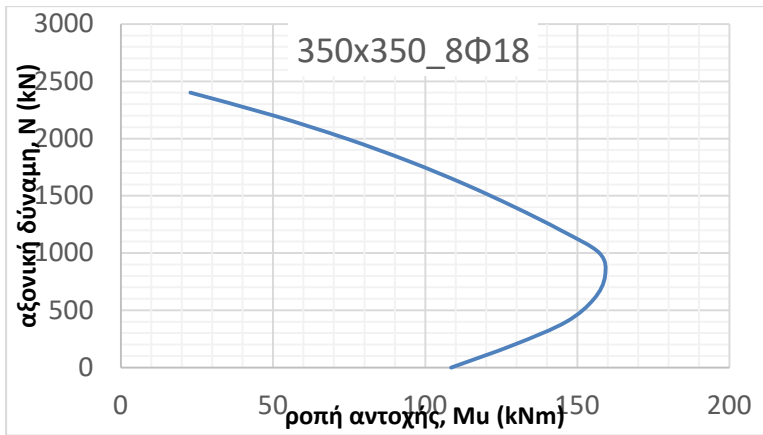
- **ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30**



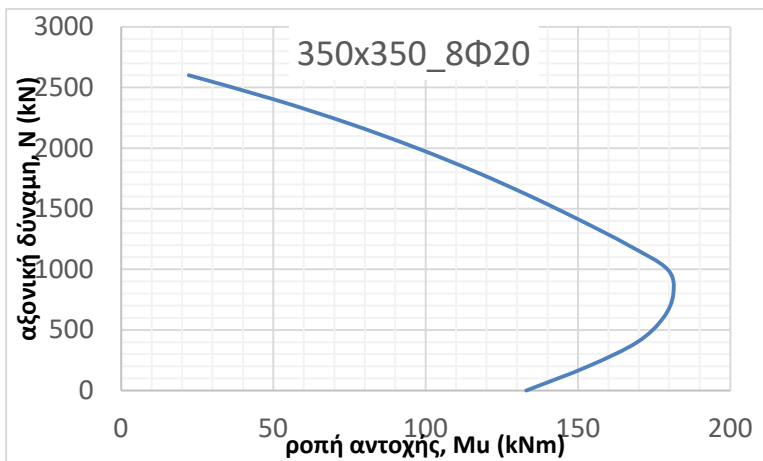
Διάγραμμα 6.1 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσεως της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ14.



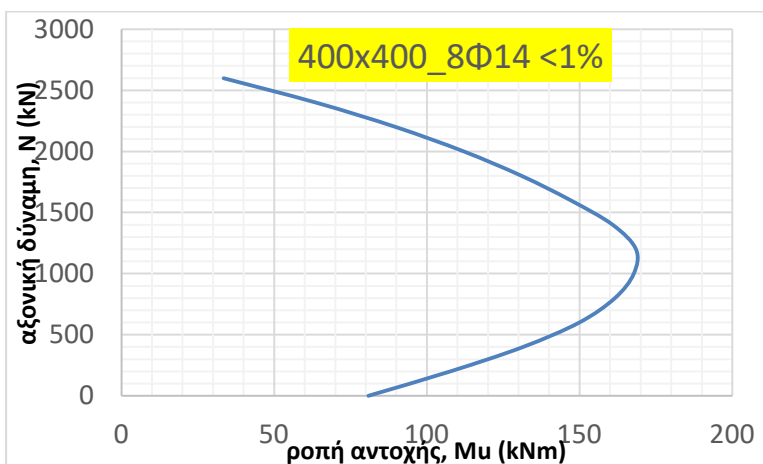
Διάγραμμα 6.2 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσεως της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ16.



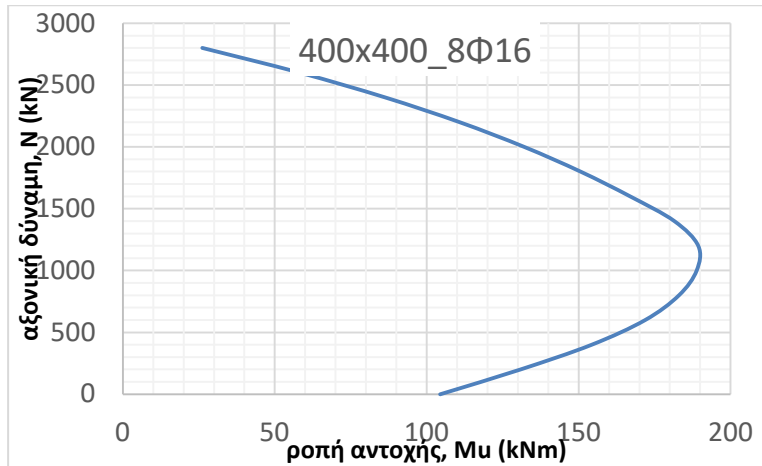
Διάγραμμα 6.3 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ18.



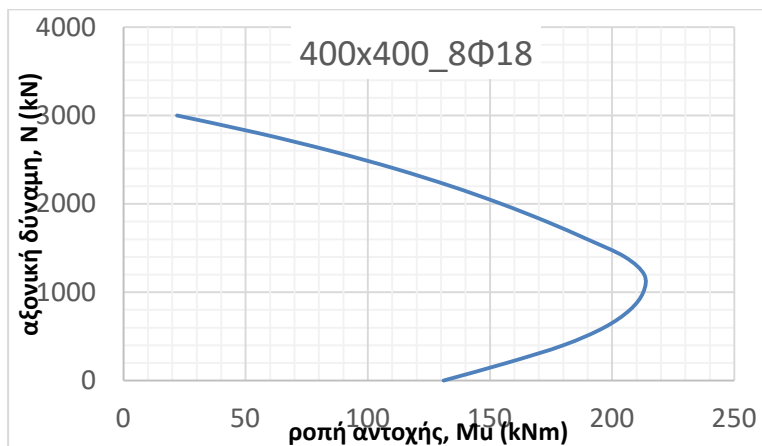
Διάγραμμα 6.4 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ20.



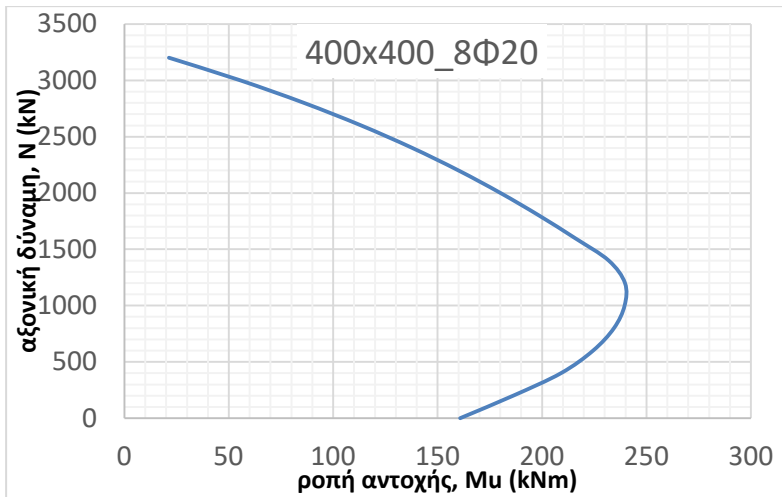
Διάγραμμα 6.5 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ14.



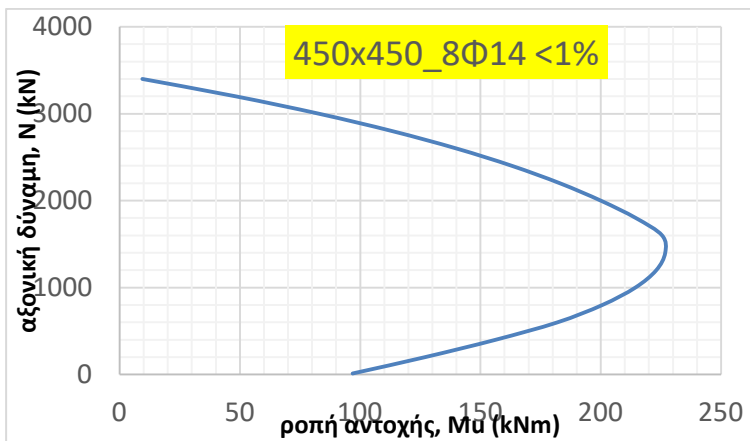
Διάγραμμα 6.6 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ16.



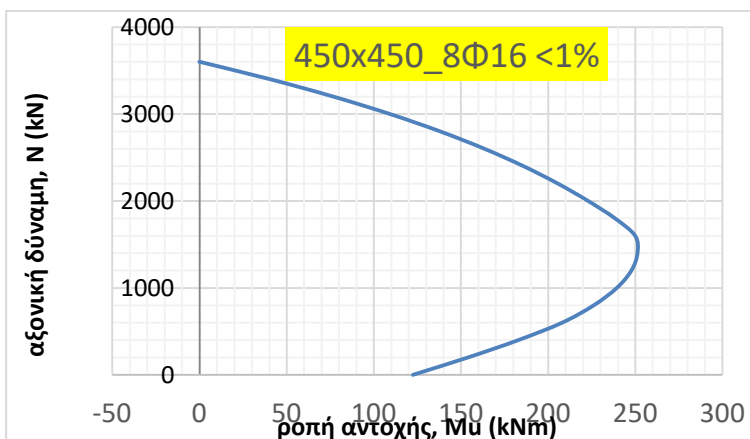
Διάγραμμα 6.7 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ18.



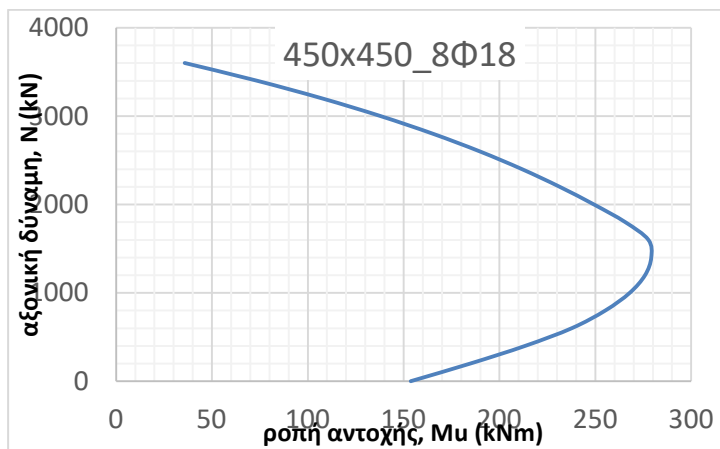
Διάγραμμα 6.8 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ20.



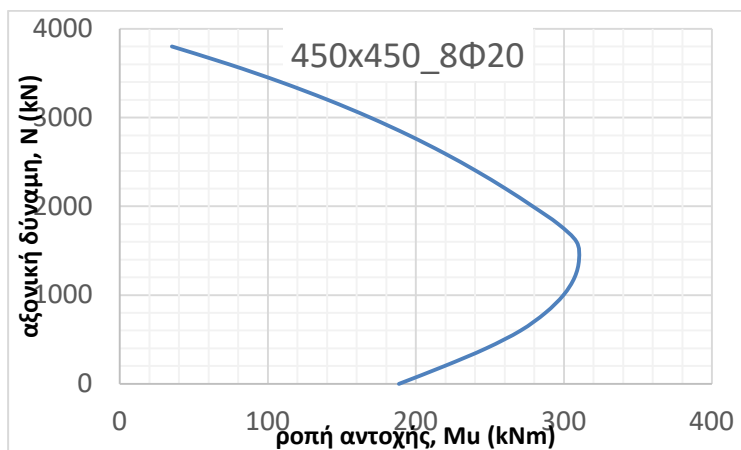
Διάγραμμα 6.9 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ14.



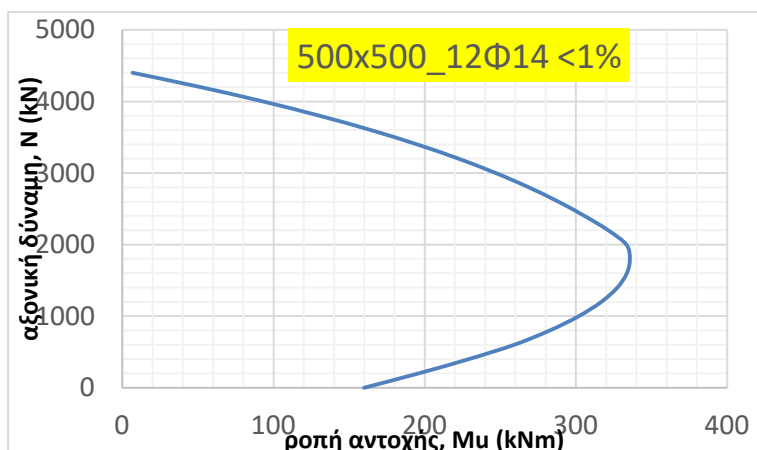
Διάγραμμα 6.10 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ16.



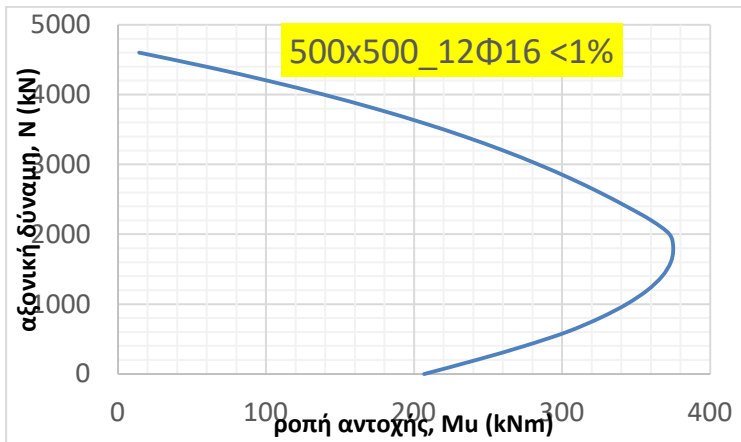
Διάγραμμα 6.11 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ18.



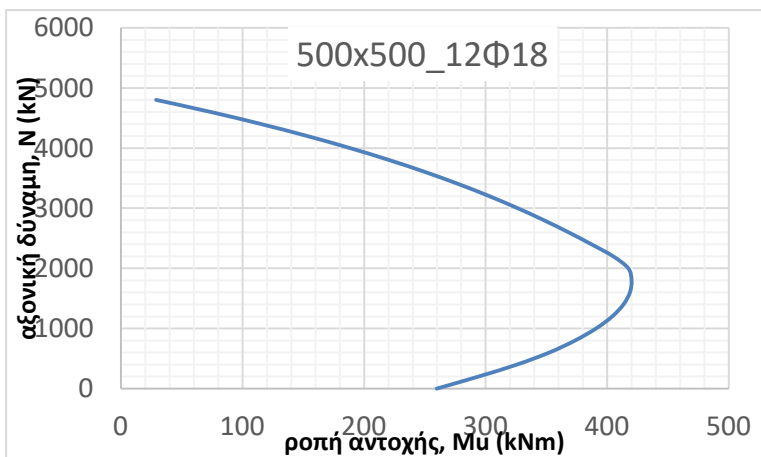
Διάγραμμα 6.12 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ20.



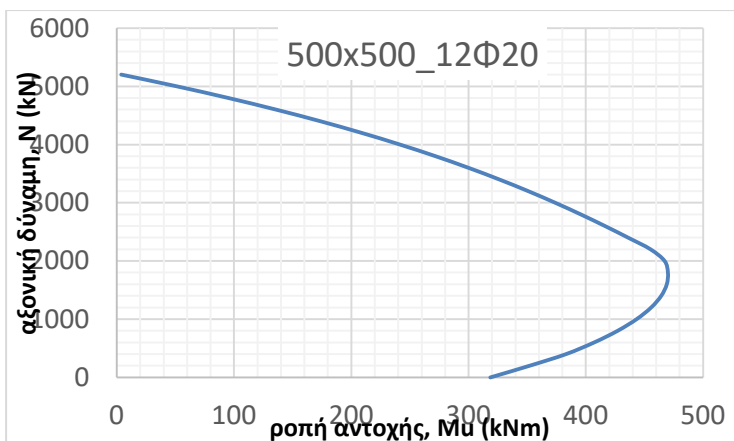
Διάγραμμα 6.13 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ14.



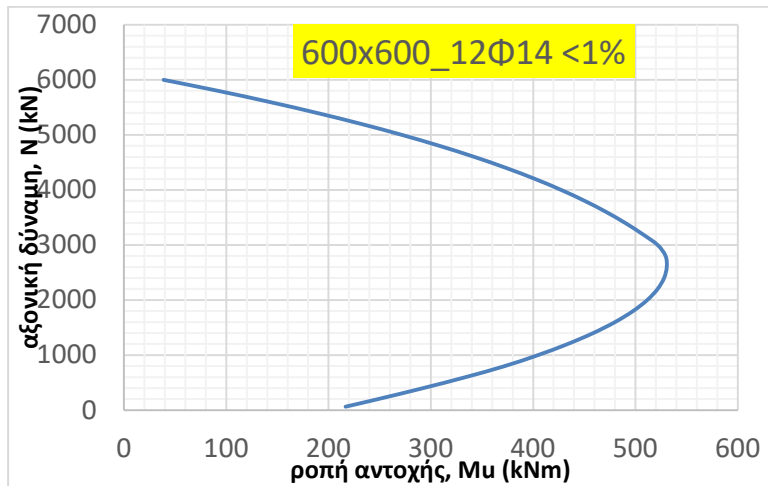
Διάγραμμα 6.14 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ16.



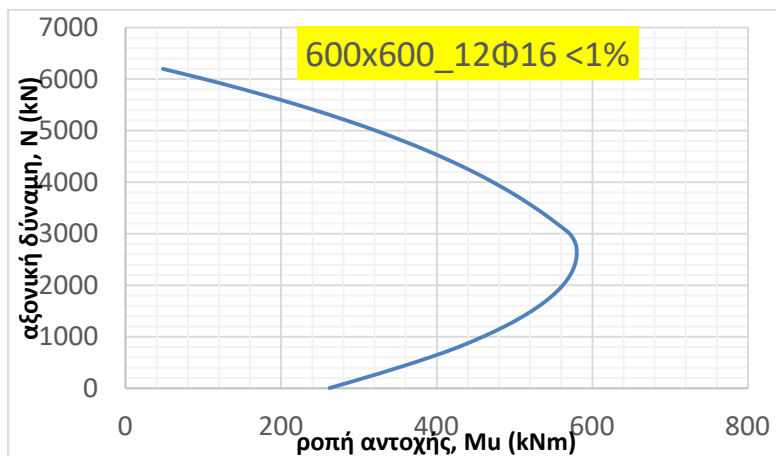
Διάγραμμα 6.15 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ18.



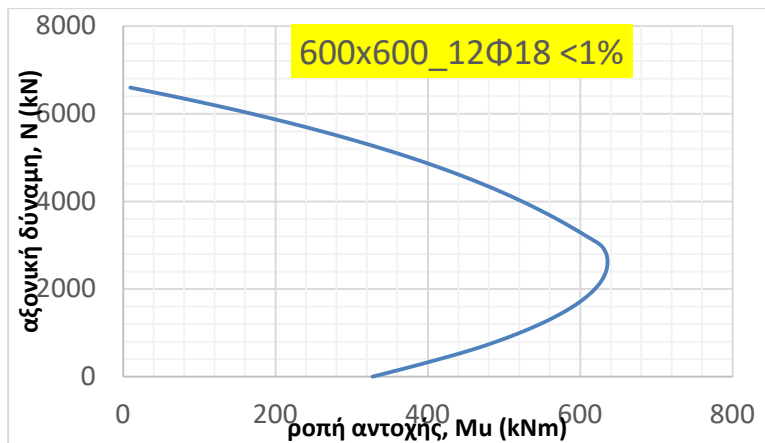
Διάγραμμα 6.16 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ20.



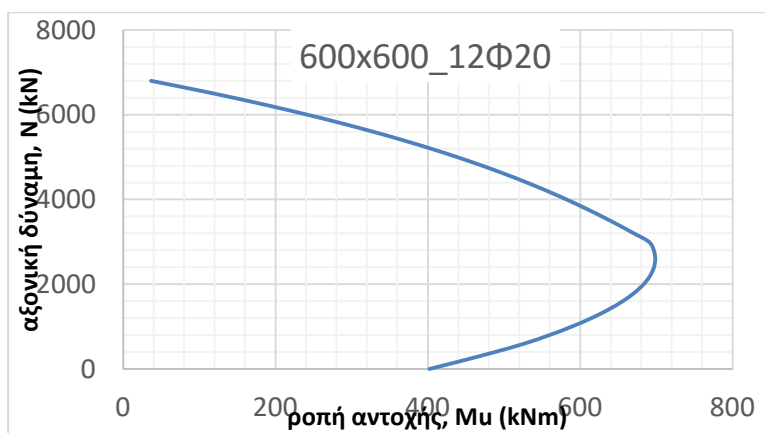
Διάγραμμα 6.17 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ14.



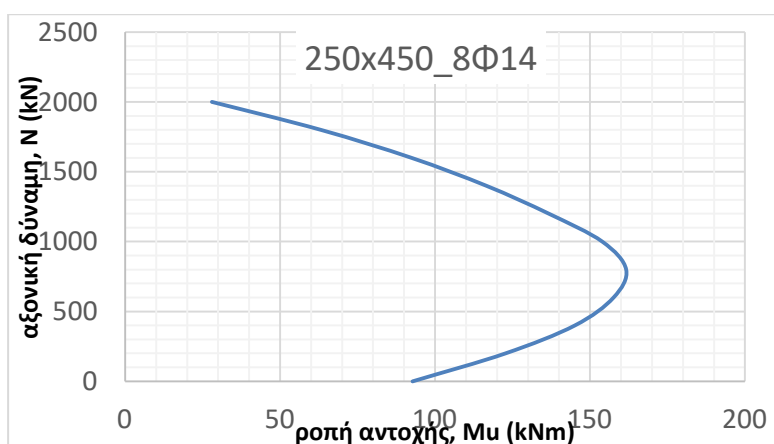
Διάγραμμα 6.18 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ16.



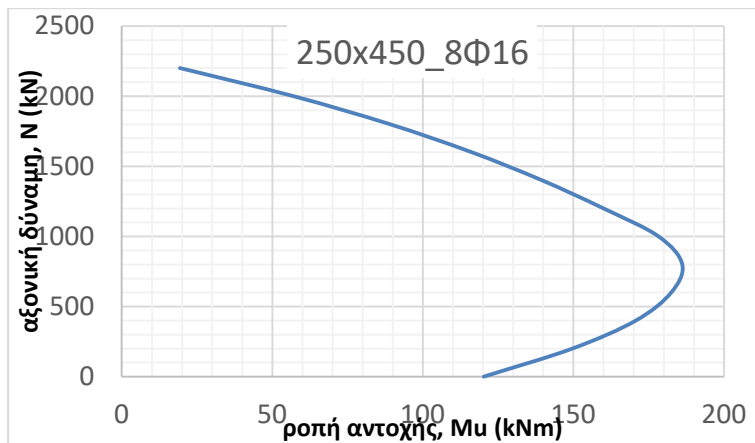
Διάγραμμα 6.19 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ18.



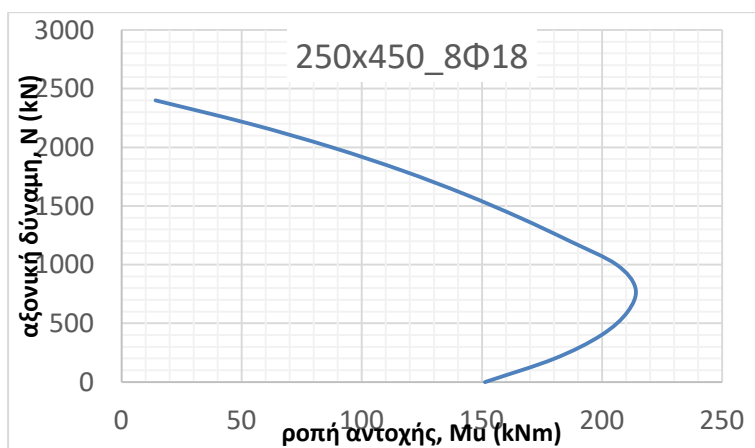
Διάγραμμα 6.20 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ20.



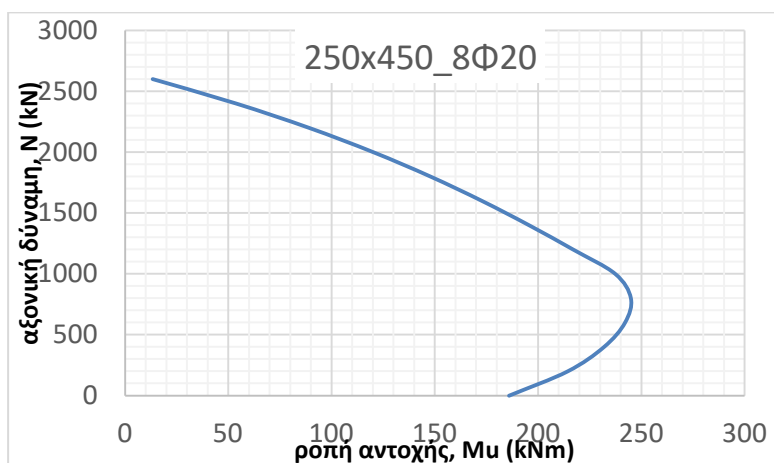
Διάγραμμα 6.21 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ14.



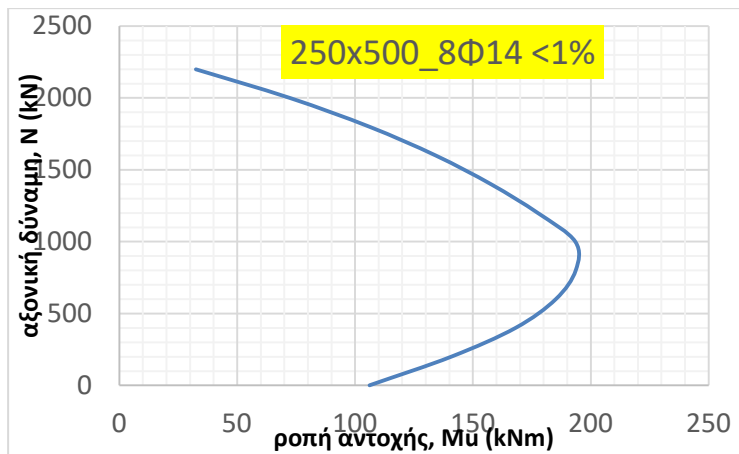
Διάγραμμα 6.22 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×400mm με οπλισμό 8Φ16.



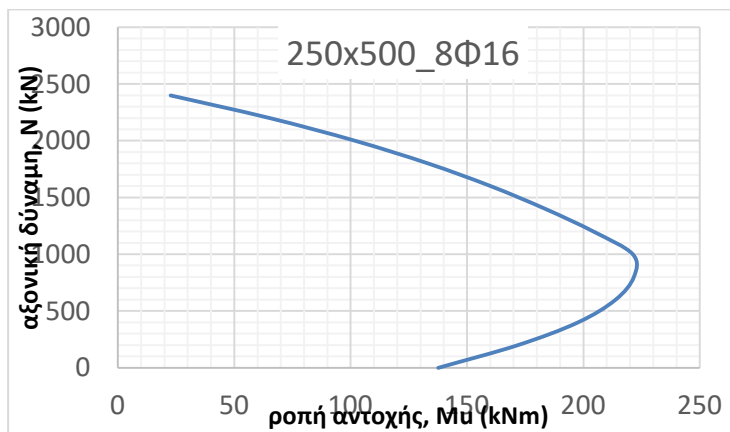
Διάγραμμα 6.23 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ18.



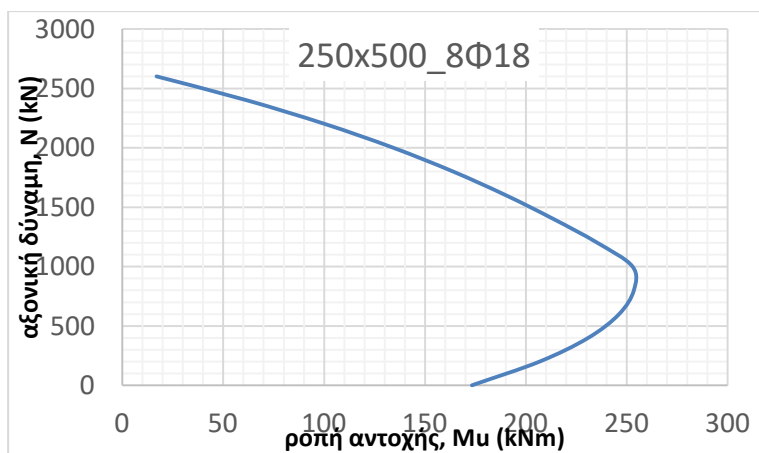
Διάγραμμα 6.24 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ20.



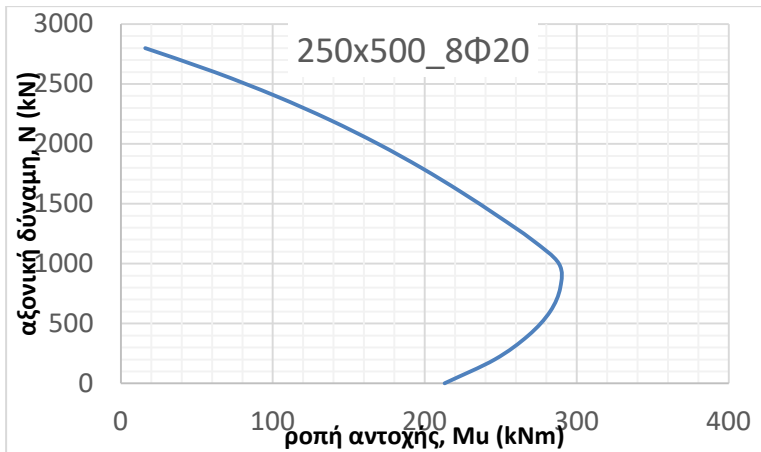
Διάγραμμα 6.25 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ14.



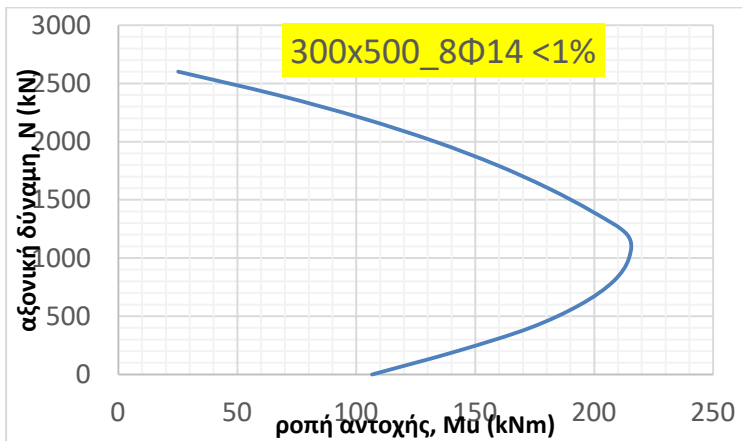
Διάγραμμα 6.26 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ16.



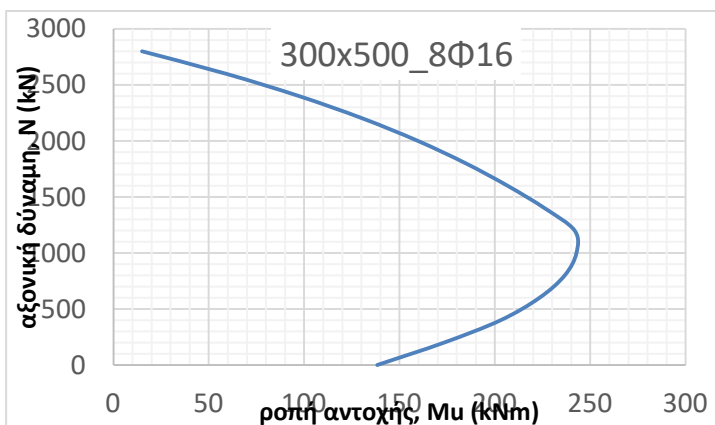
Διάγραμμα 6.27 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ18.



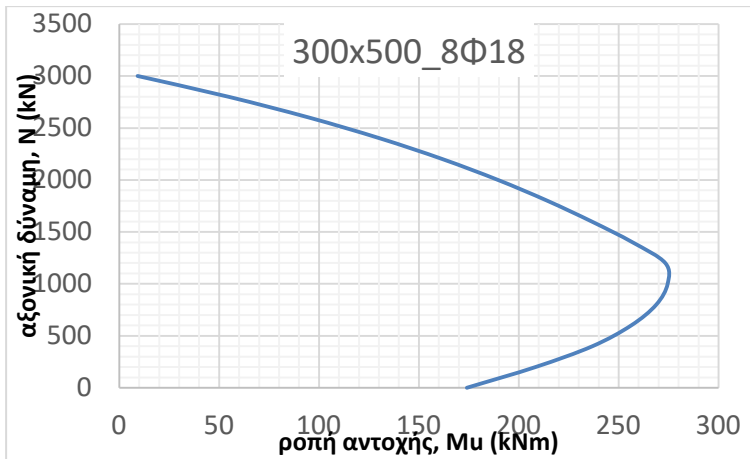
Διάγραμμα 6.28 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ20.



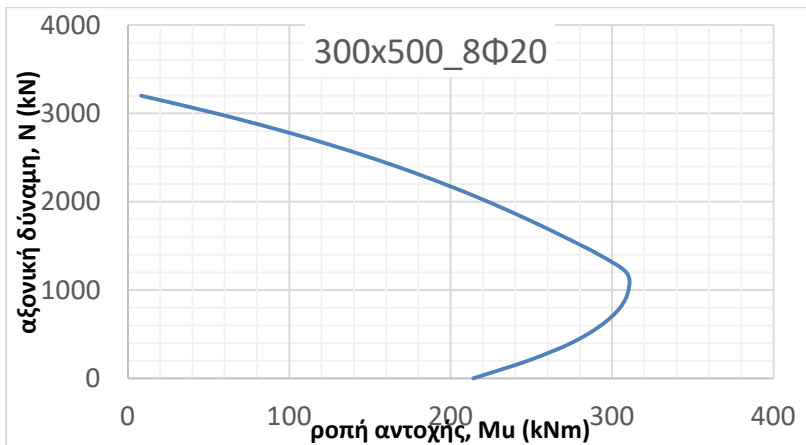
Διάγραμμα 6.29 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ14.



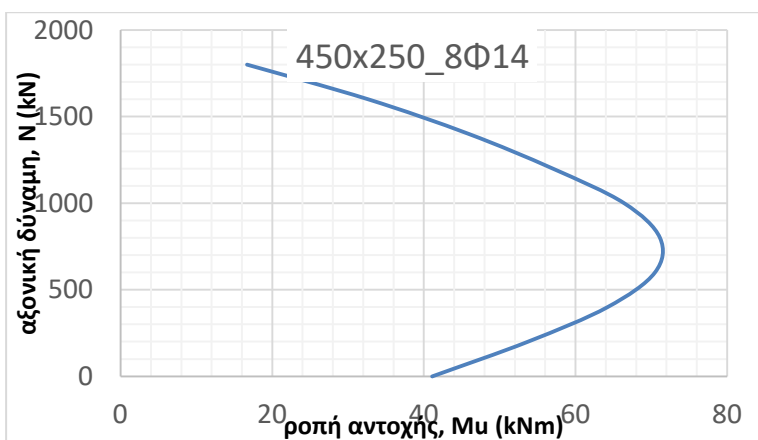
Διάγραμμα 6.30 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ16.



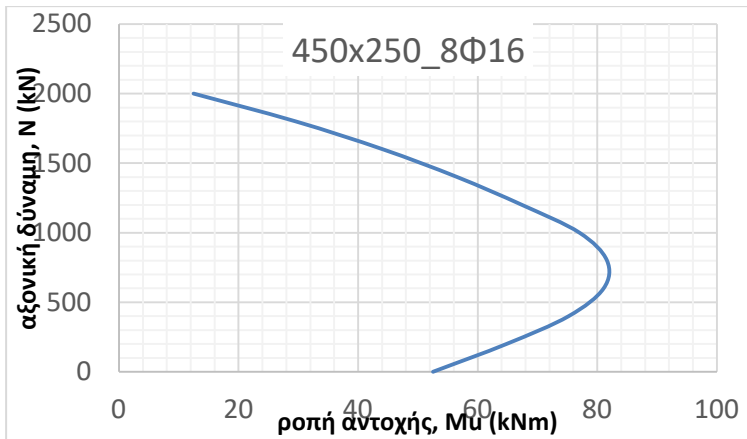
Διάγραμμα 6.31 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ18.



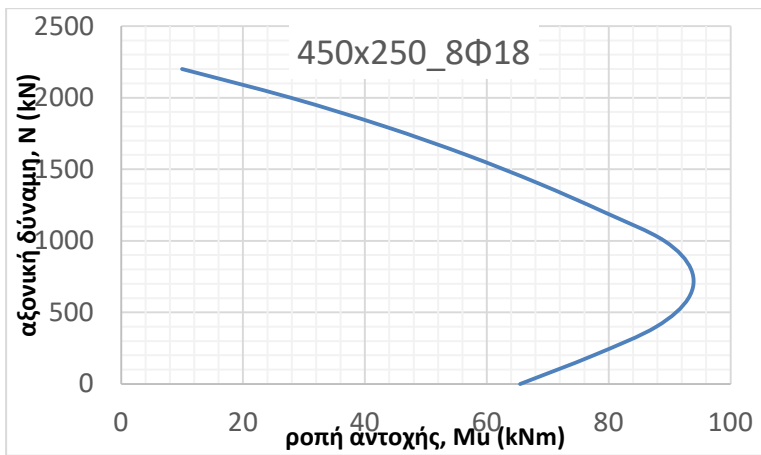
Διάγραμμα 6.32 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ20.



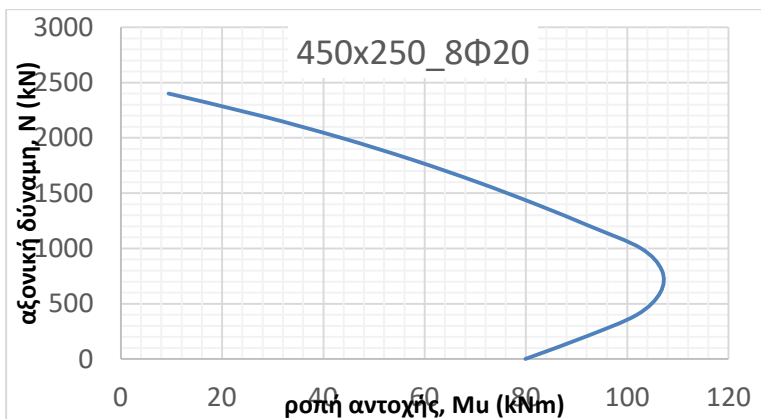
Διάγραμμα 6.33 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ14.



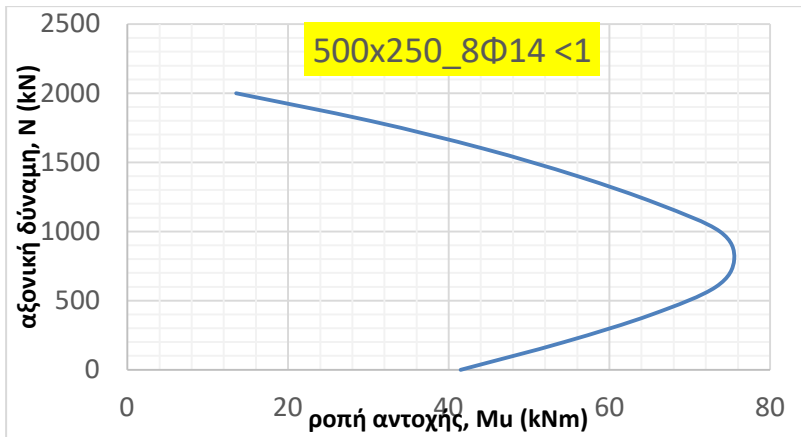
Διάγραμμα 6.34 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ16.



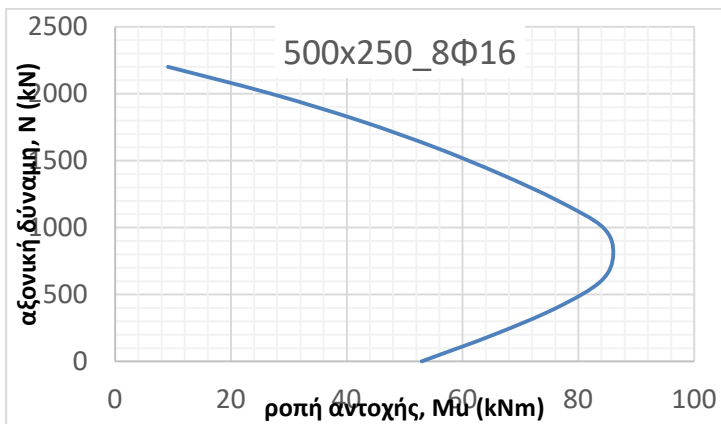
Διάγραμμα 6.35 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ18.



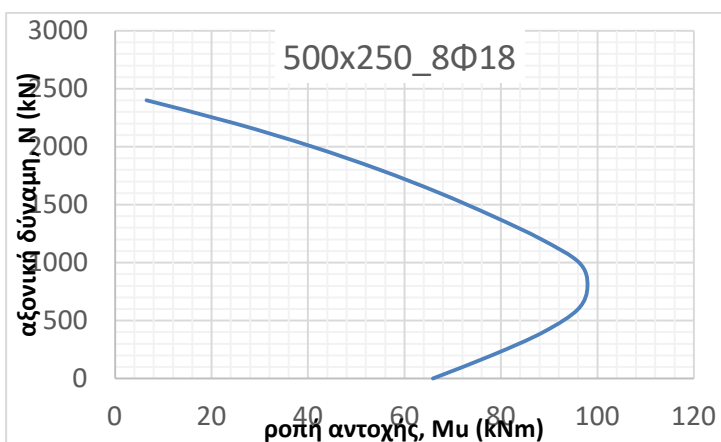
Διάγραμμα 6.36 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ20.



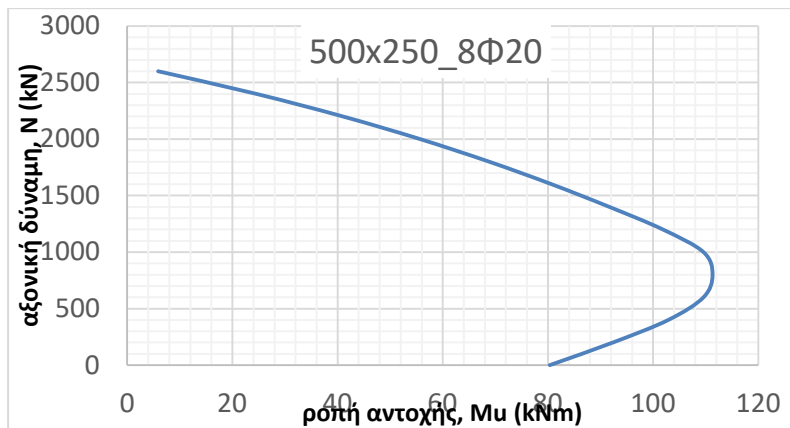
Διάγραμμα 6.37 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ14.



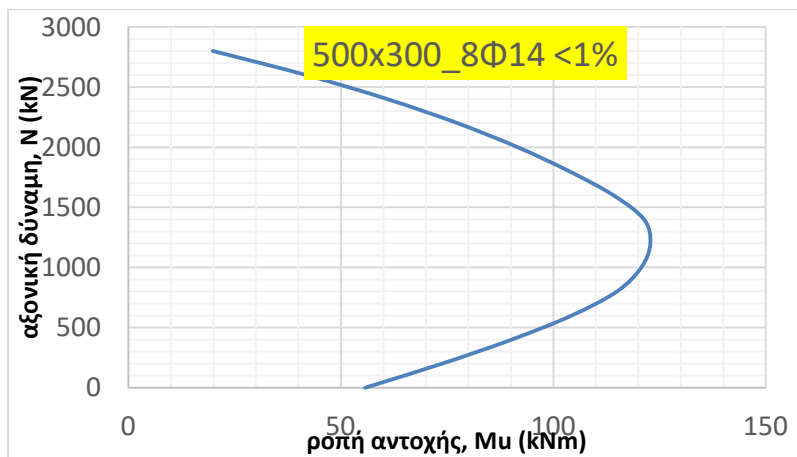
Διάγραμμα 6.38 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ16.



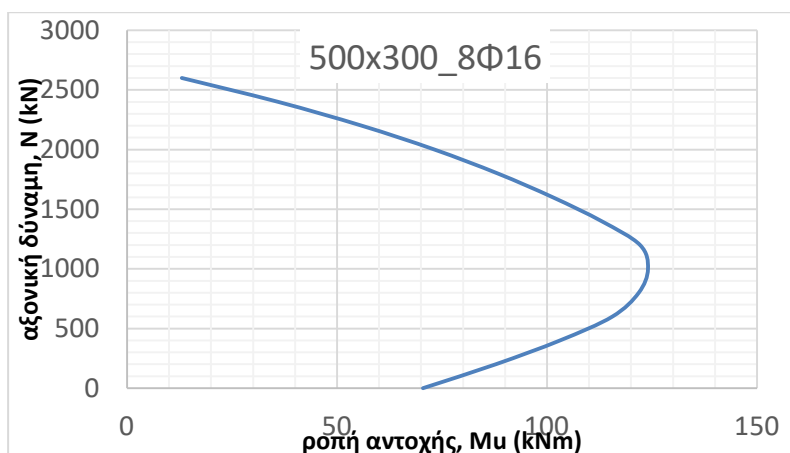
Διάγραμμα 6.39 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ18.



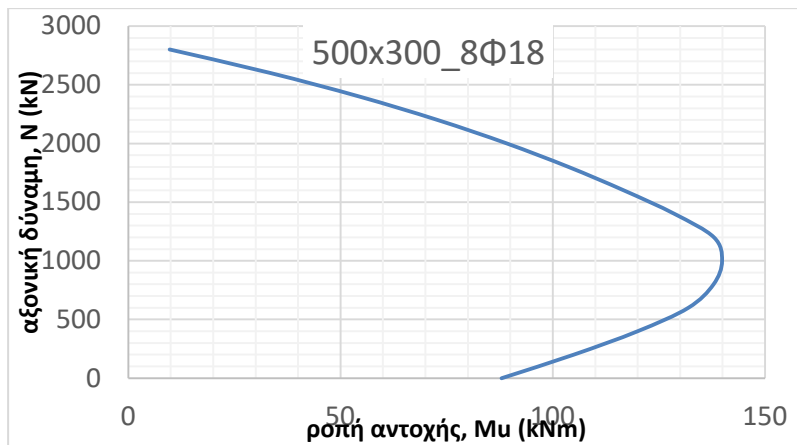
Διάγραμμα 6.40 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ20.



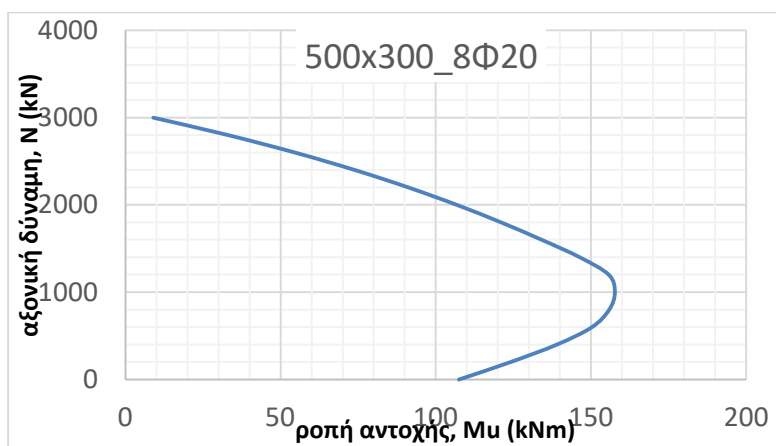
Διάγραμμα 6.41 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ14.



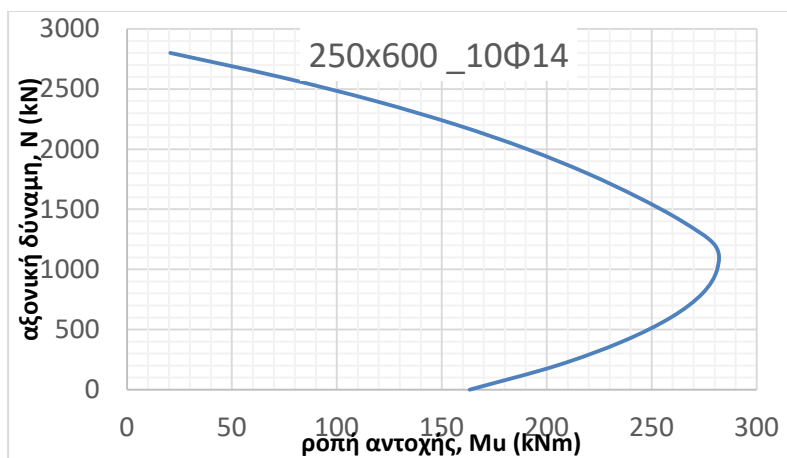
Διάγραμμα 6.42 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ16.



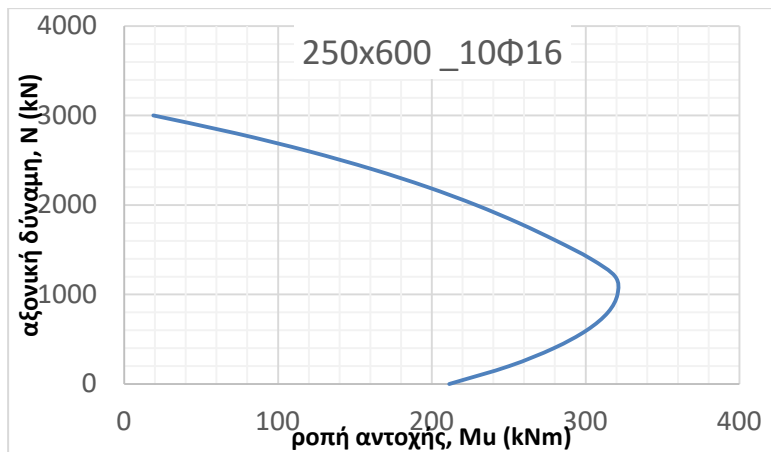
Διάγραμμα 6.43 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ18.



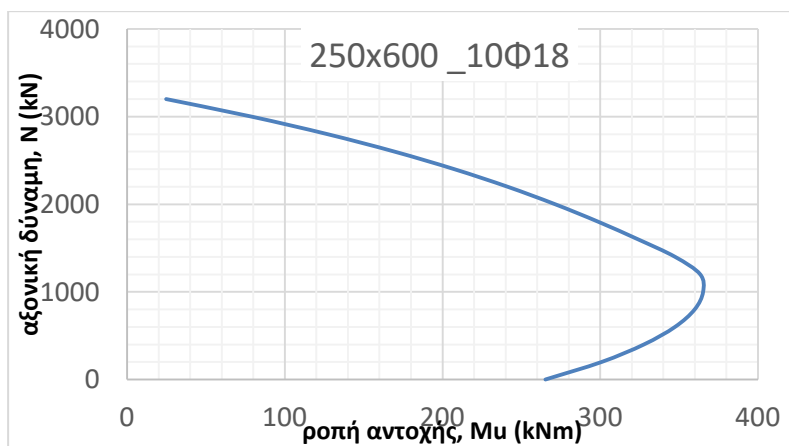
Διάγραμμα 6.44 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ20.



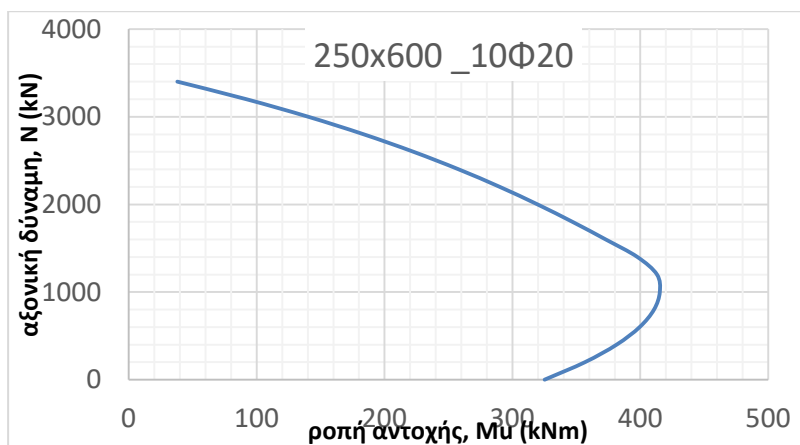
Διάγραμμα 6.45 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ14.



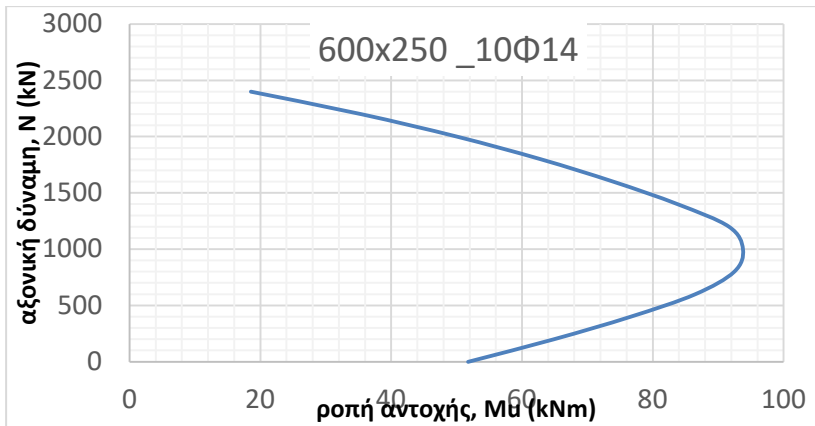
Διάγραμμα 6.46 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ16.



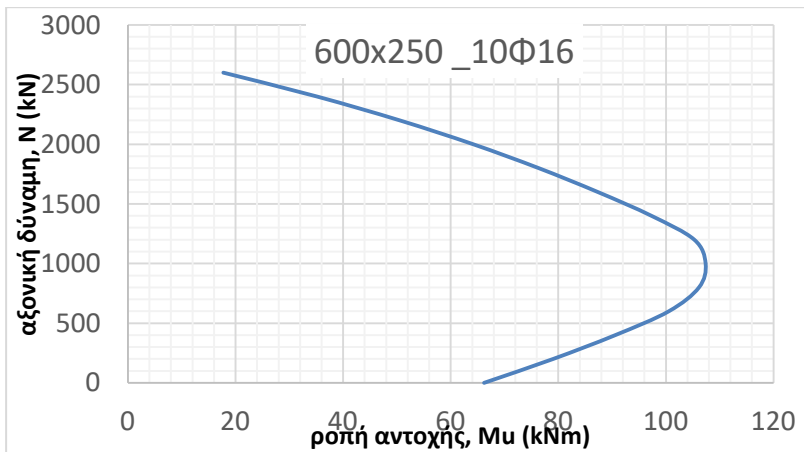
Διάγραμμα 6.47 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ18.



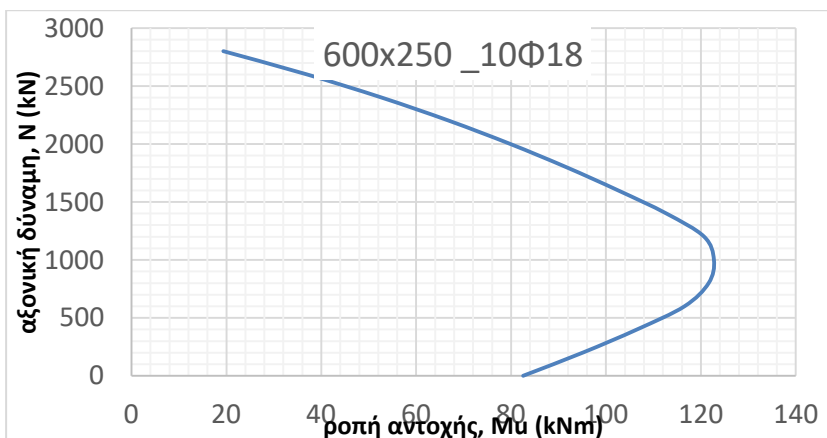
Διάγραμμα 6.48 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ20.



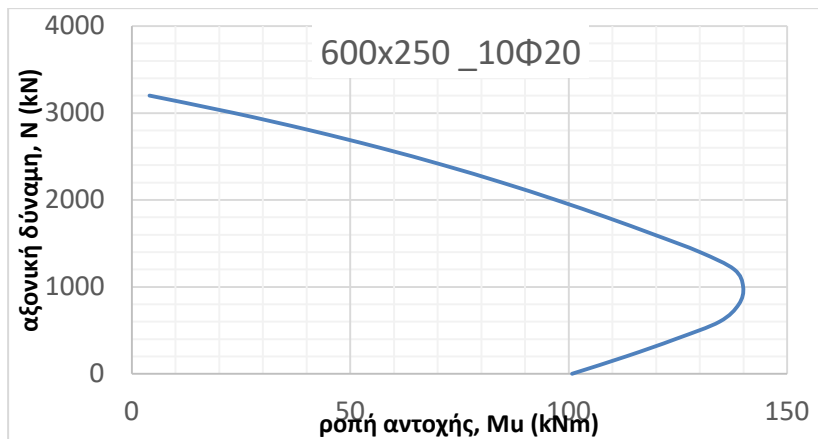
Διάγραμμα 6.49 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ14.



Διάγραμμα 6.50 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ16.



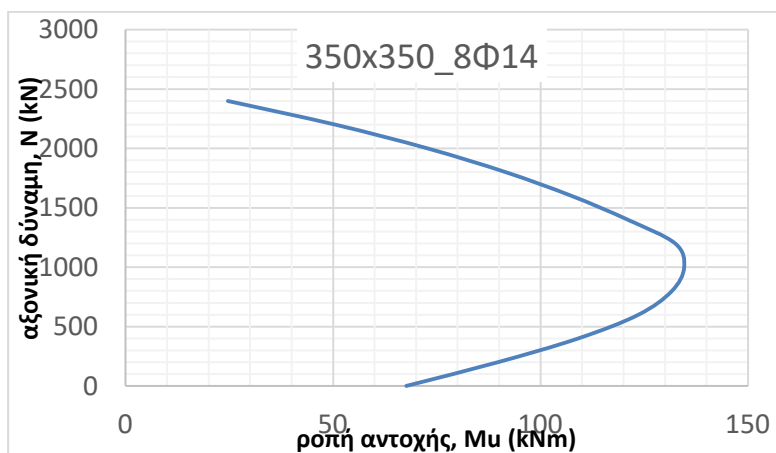
Διάγραμμα 6.51 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ18.



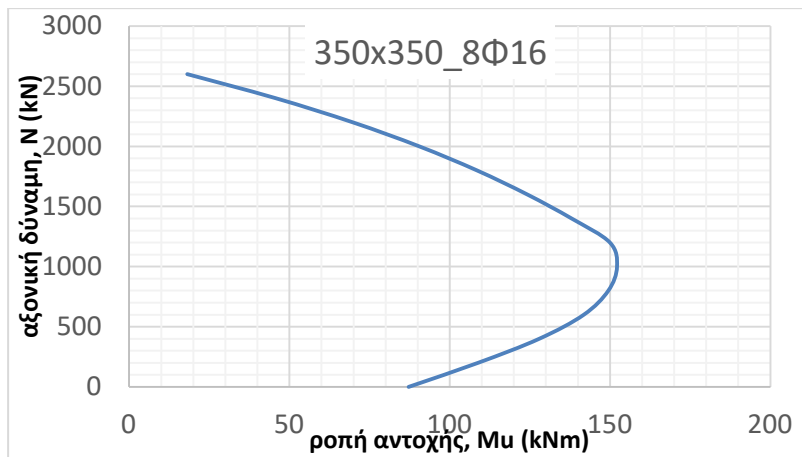
Διάγραμμα 6.52 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C25/30 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ20.

Στα ανωτέρω διαγράμματα υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος C25/30 υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις διατομών, οι οποίες έχουν επισημανθεί με κίτρινο χρώμα, επειδή έχουν ποσοστό χαμηλότερο από το ελάχιστο επιτρεπόμενο, ωστόσο εξετάστηκαν για να φανεί καλύτερα η επίδραση της αύξησης του οπλισμού στην αύξηση της ροπής αντοχής M_u .

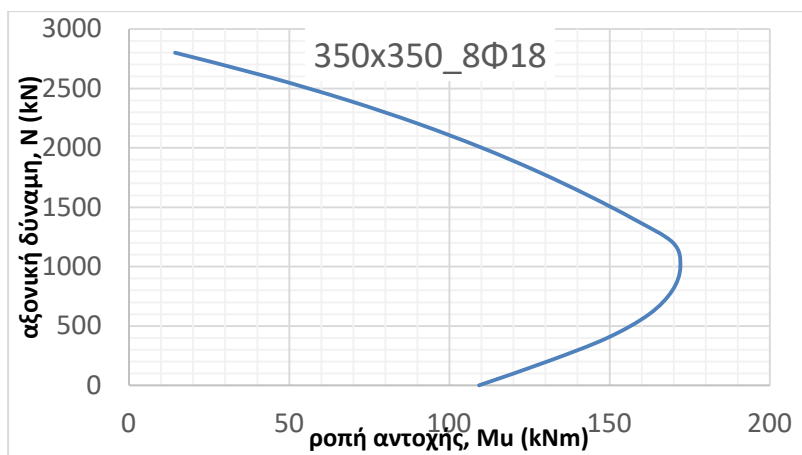
- **ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C30/37**



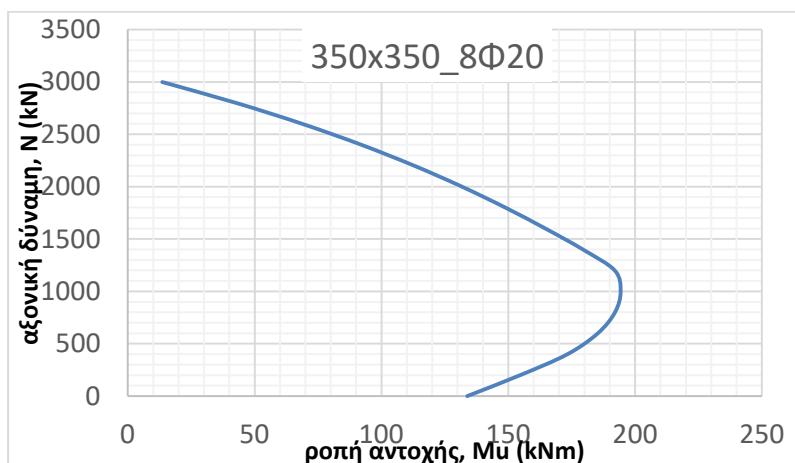
Διάγραμμα 6.53 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ14.



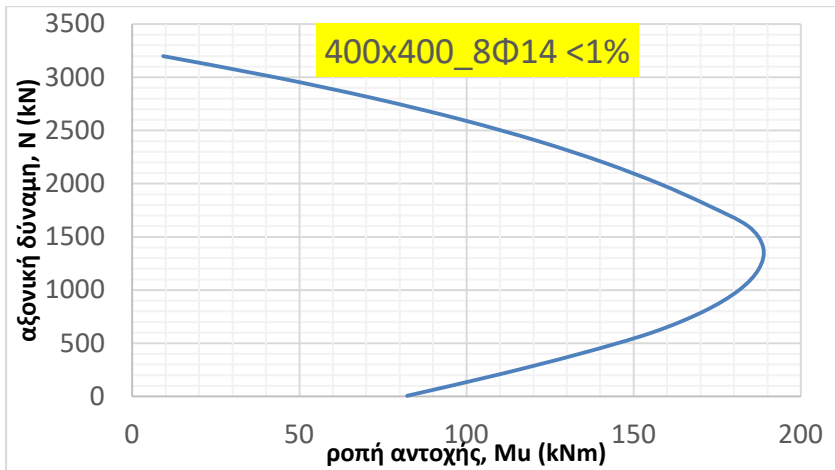
Διάγραμμα 6.54 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ16.



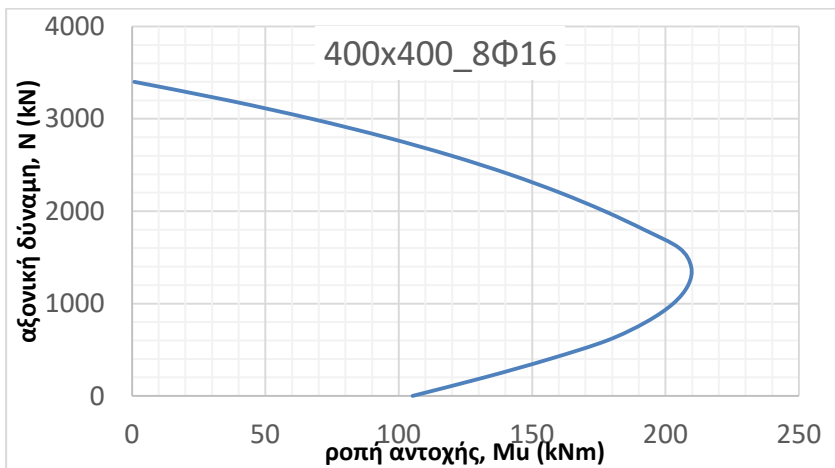
Διάγραμμα 6.55 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ18.



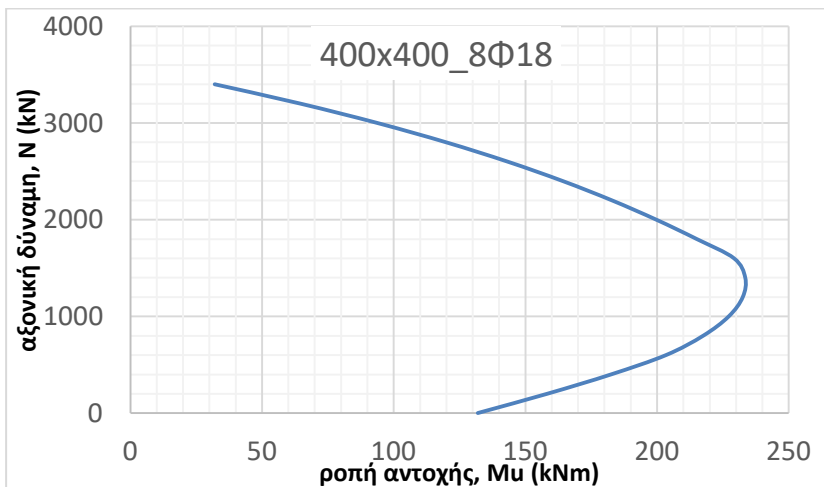
Διάγραμμα 6.56 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 350×350mm με οπλισμό 8Φ20.



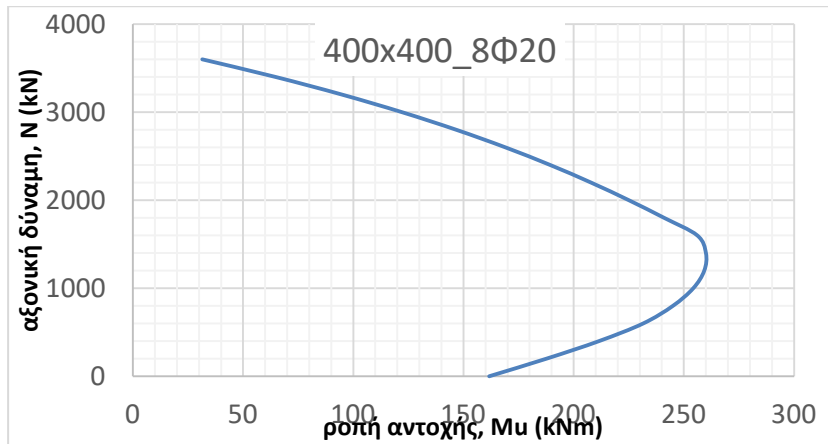
Διάγραμμα 6.57 Η ροπή αντοχής, Mu (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ14.



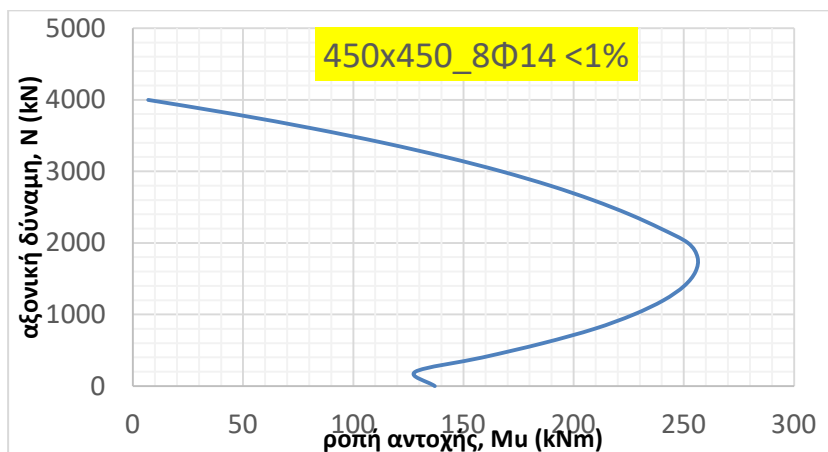
Διάγραμμα 6.58 Η ροπή αντοχής, Mu (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ16.



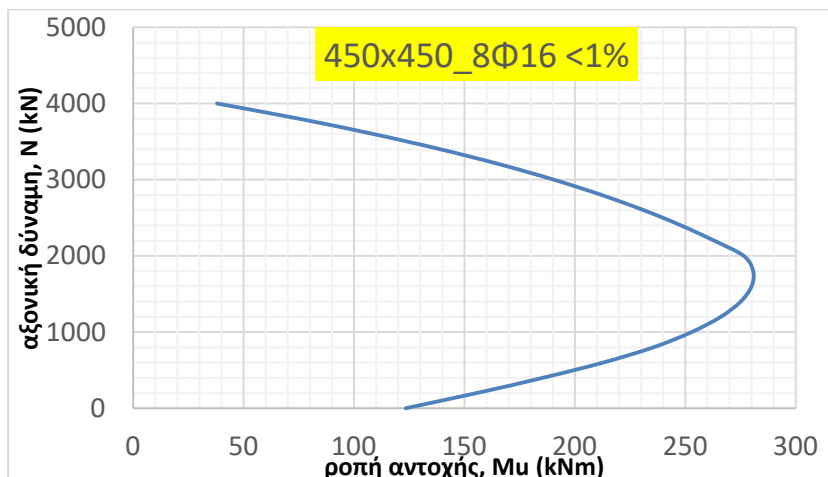
Διάγραμμα 6.59 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ18.



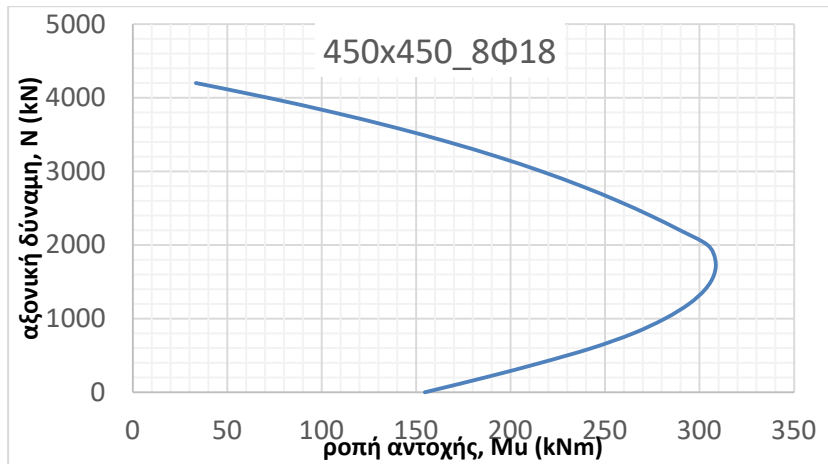
Διάγραμμα 6.60 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 400×400mm με οπλισμό 8Φ20.



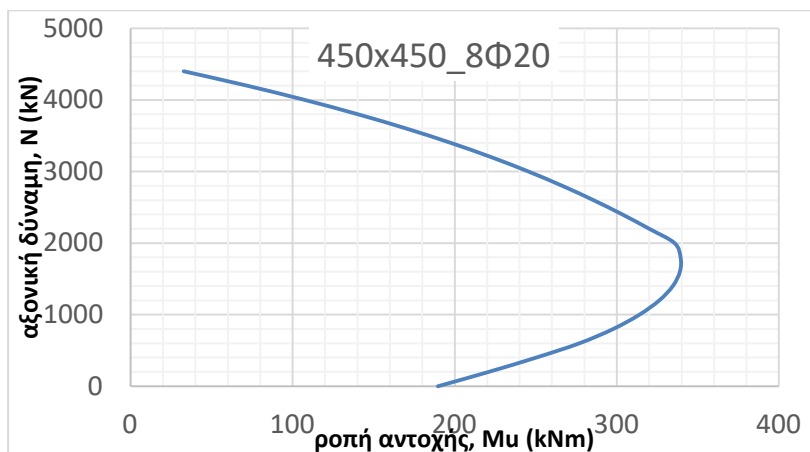
Διάγραμμα 6.61 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ14.



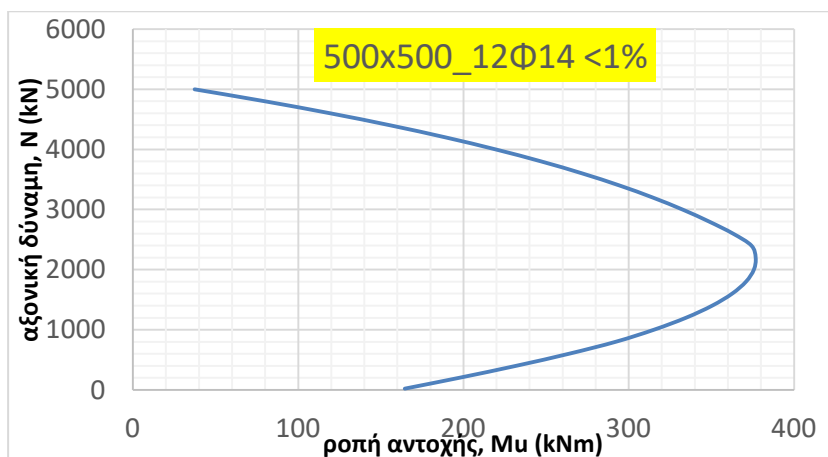
Διάγραμμα 6.62 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ16.



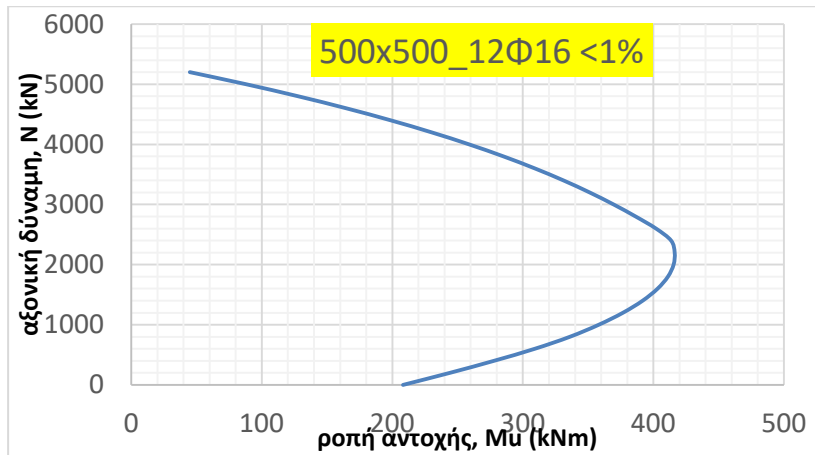
Διάγραμμα 6.63 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ18.



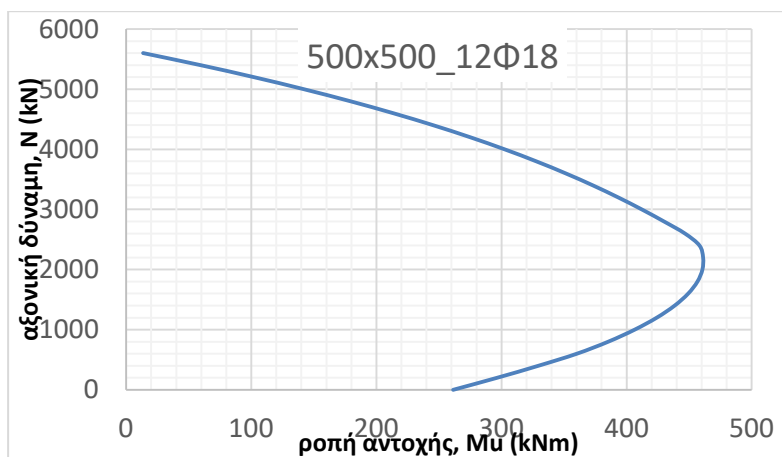
Διάγραμμα 6.64 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 450×450mm με οπλισμό 8Φ20.



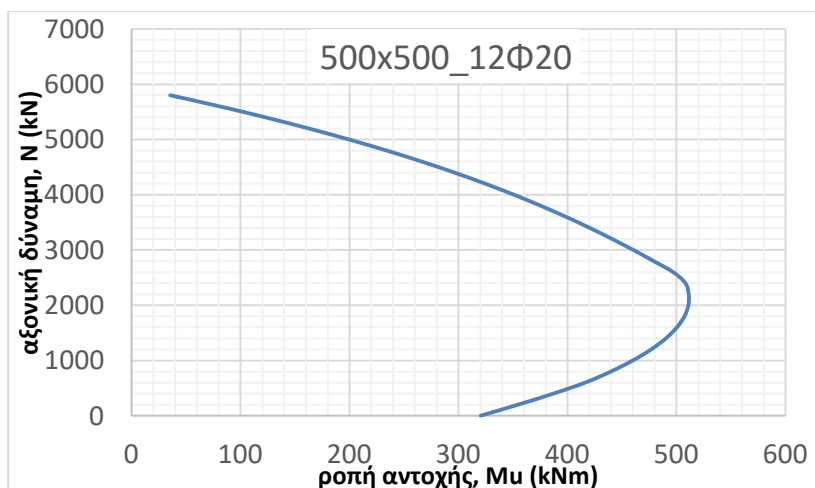
Διάγραμμα 6.65 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ14.



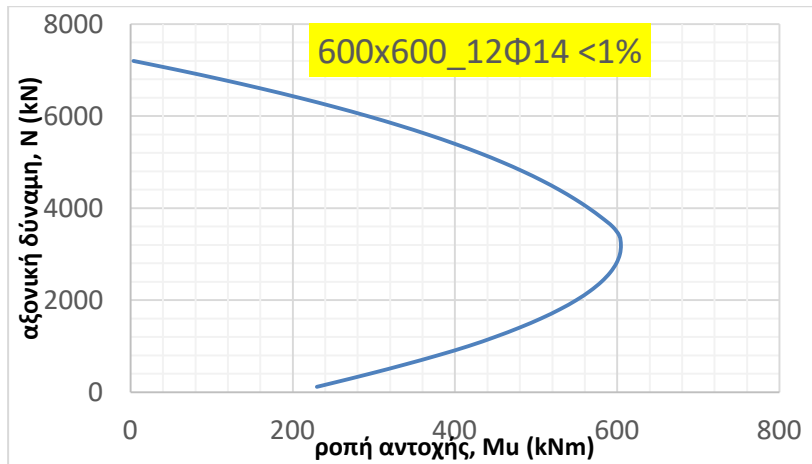
Διάγραμμα 6.66 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ16.



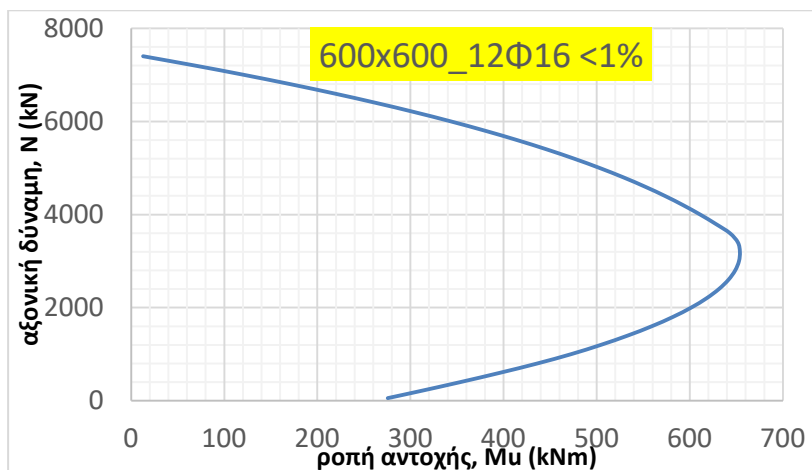
Διάγραμμα 6.67 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ18.



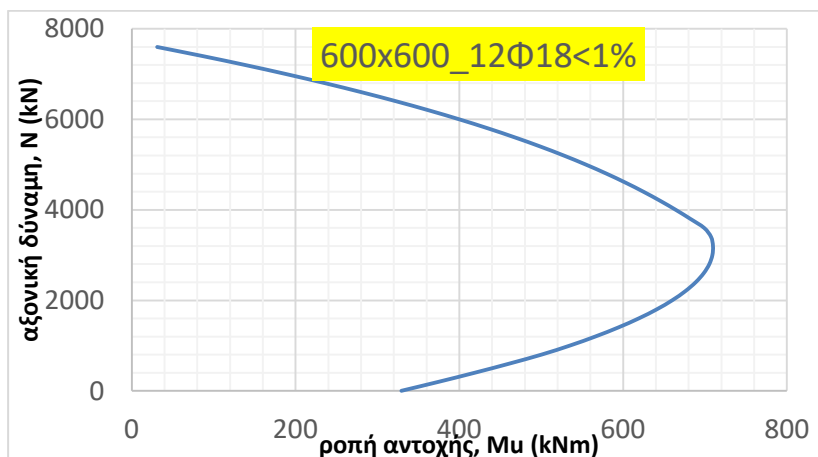
Διάγραμμα 6.68 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×500mm με οπλισμό 12Φ20.



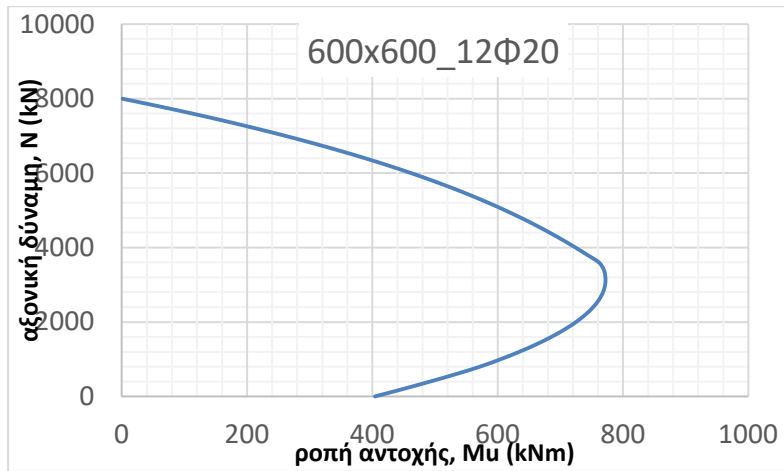
Διάγραμμα 6.69 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ14.



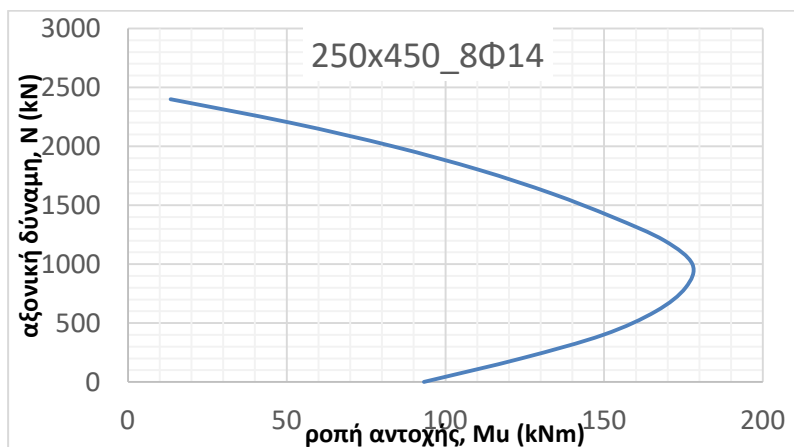
Διάγραμμα 6.70 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ16.



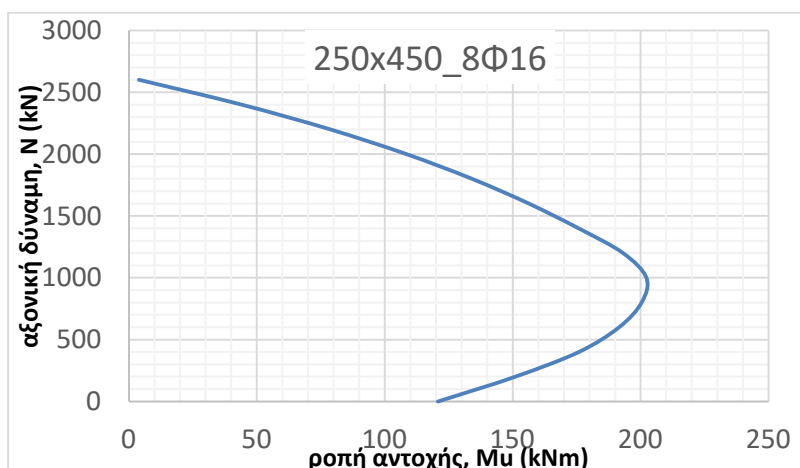
Διάγραμμα 6.71 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ18.



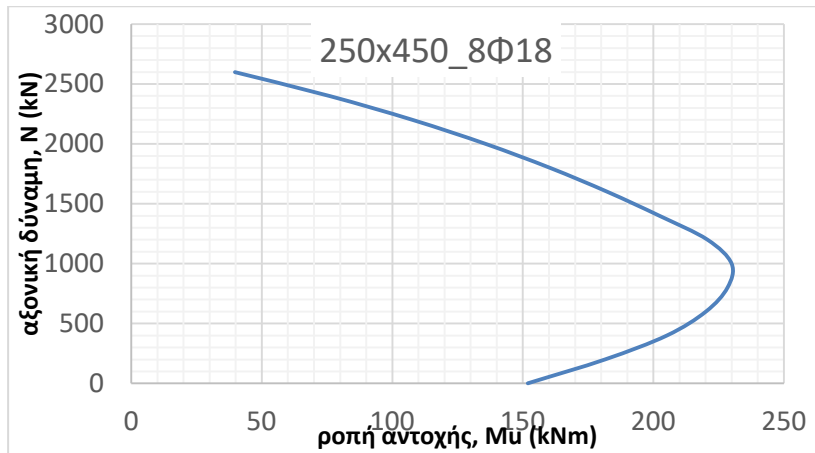
Διάγραμμα 6.72 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 600×600mm με οπλισμό 12Φ20.



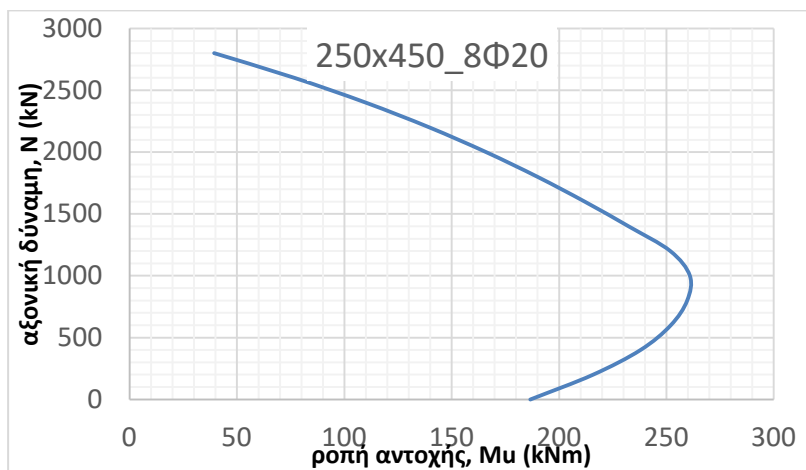
Διάγραμμα 6.73 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ14.



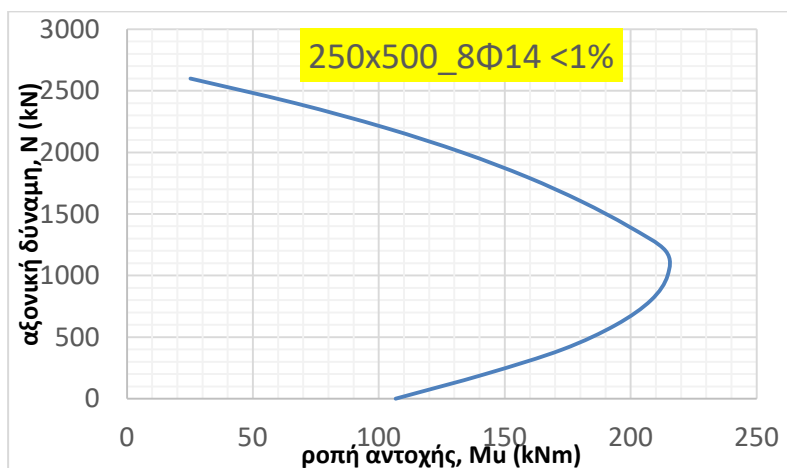
Διάγραμμα 6.74 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ16.



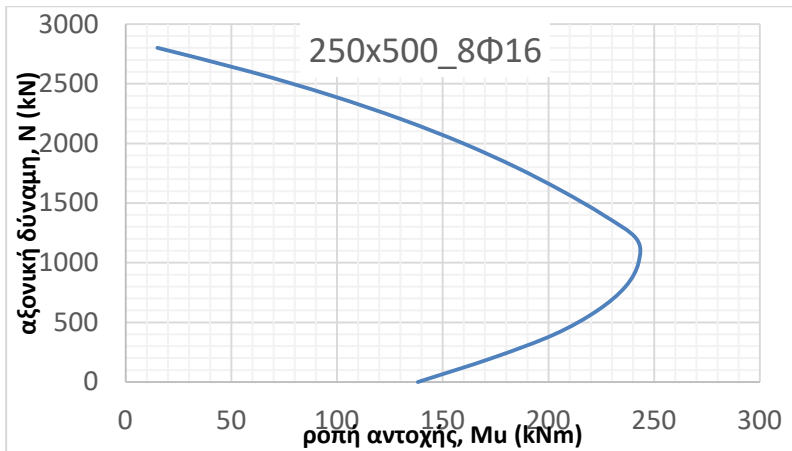
Διάγραμμα 6.75 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ18.



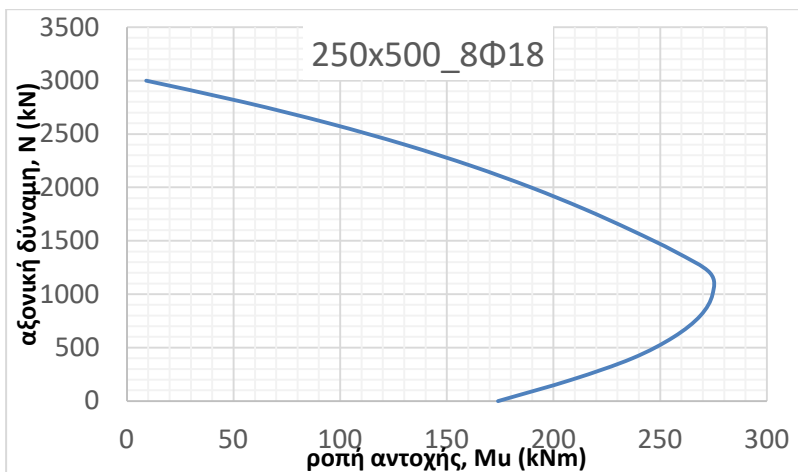
Διάγραμμα 6.76 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×450mm με οπλισμό 8Φ20.



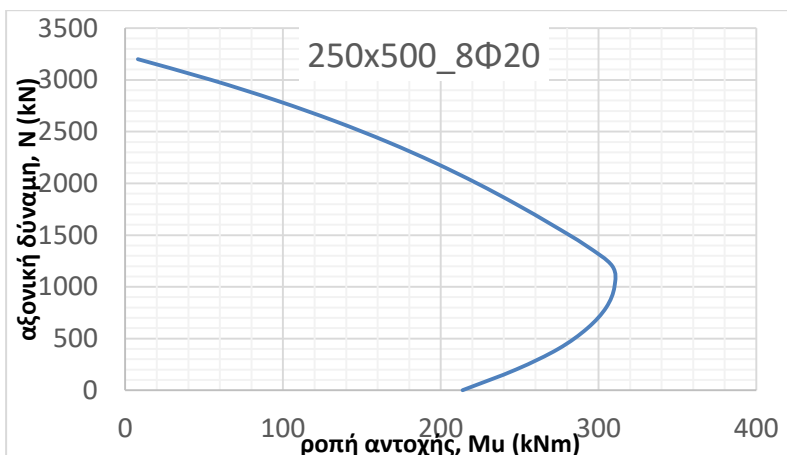
Διάγραμμα 6.77 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ14.



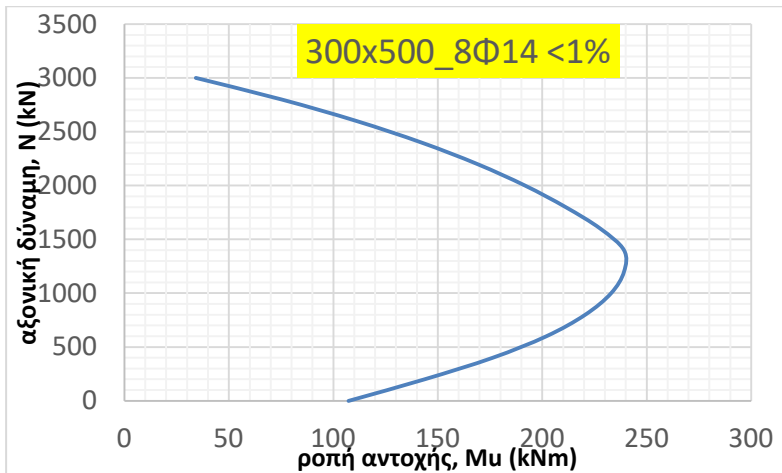
Διάγραμμα 6.78 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ16.



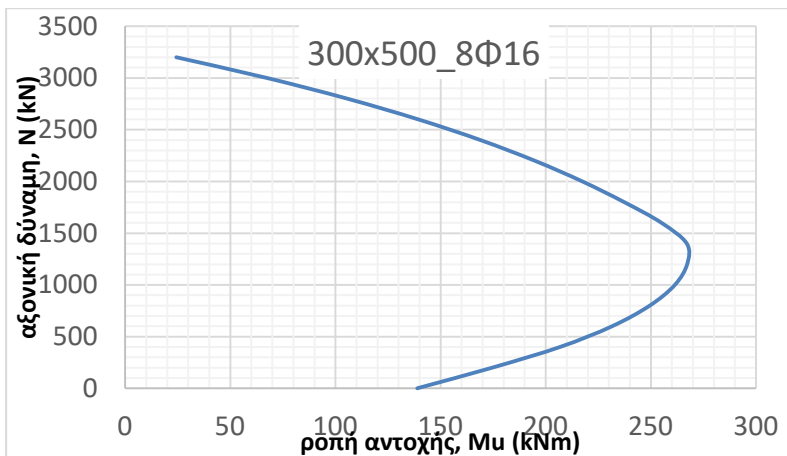
Διάγραμμα 6.79 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ18.



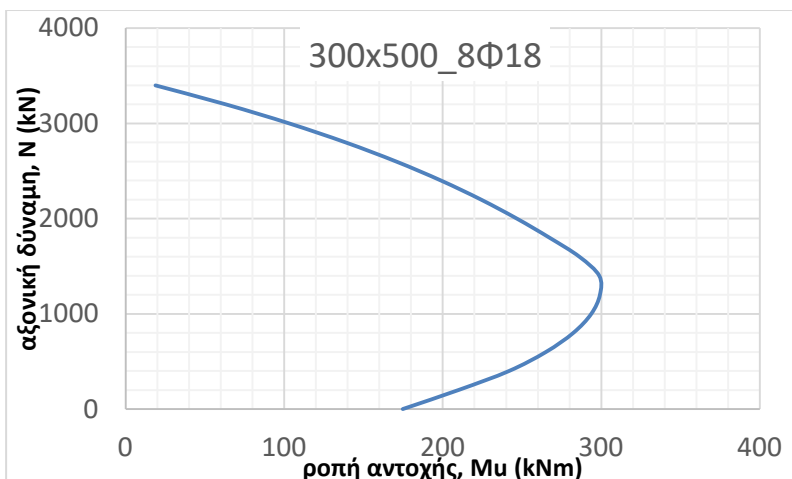
Διάγραμμα 6.80 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×500mm με οπλισμό 8Φ20.



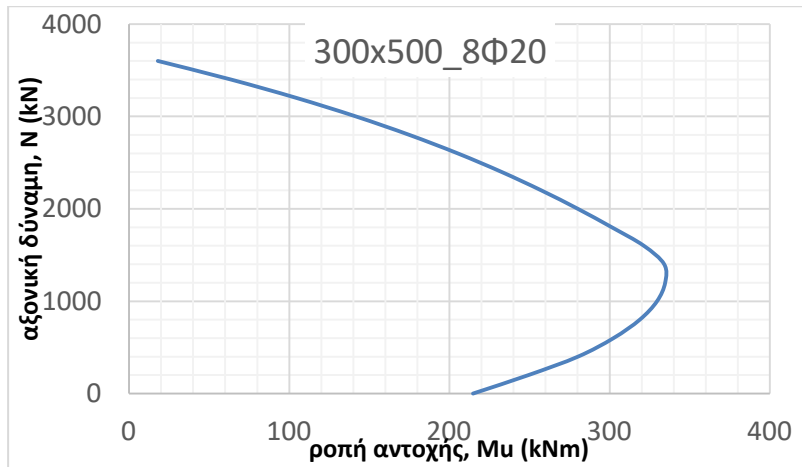
Διάγραμμα 6.81 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ14.



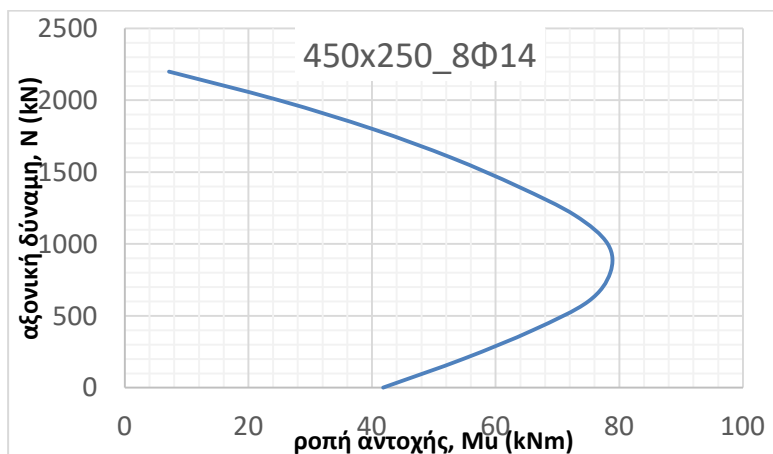
Διάγραμμα 6.82 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ16.



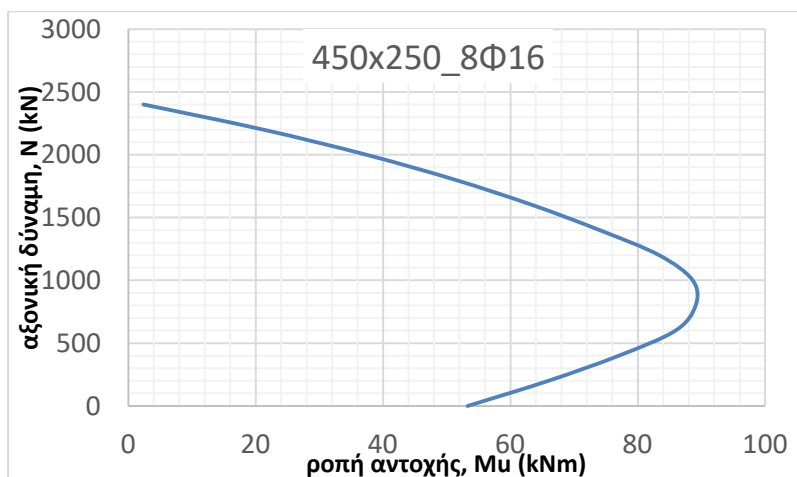
Διάγραμμα 6.83 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ18.



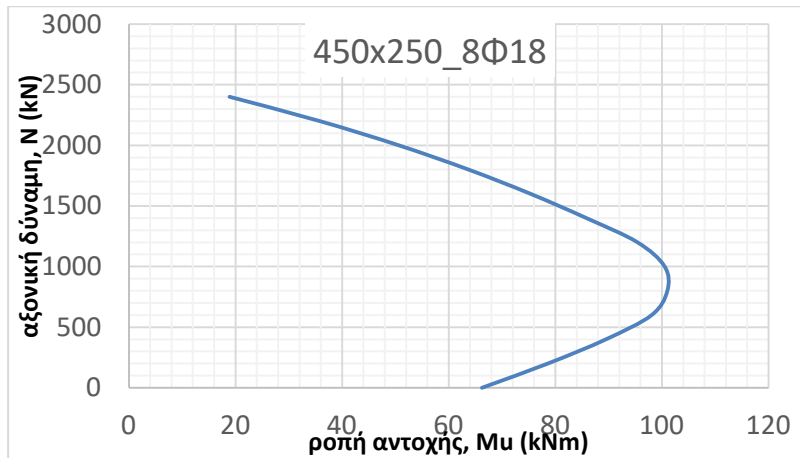
Διάγραμμα 6.84 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 300×500mm με οπλισμό 8Φ20.



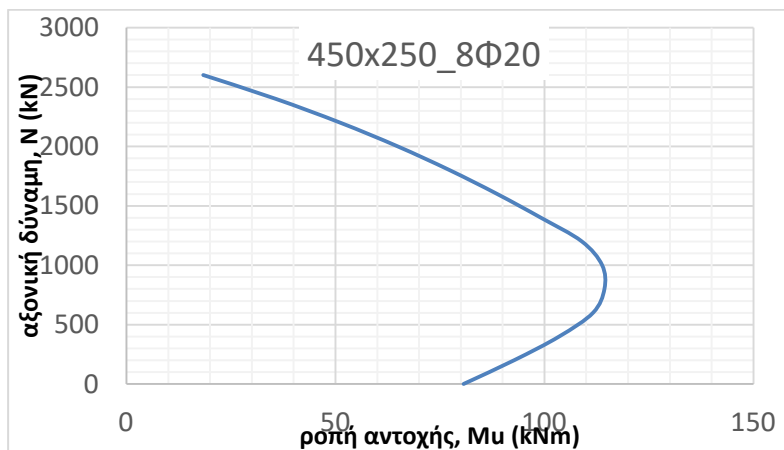
Διάγραμμα 6.85 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ16.



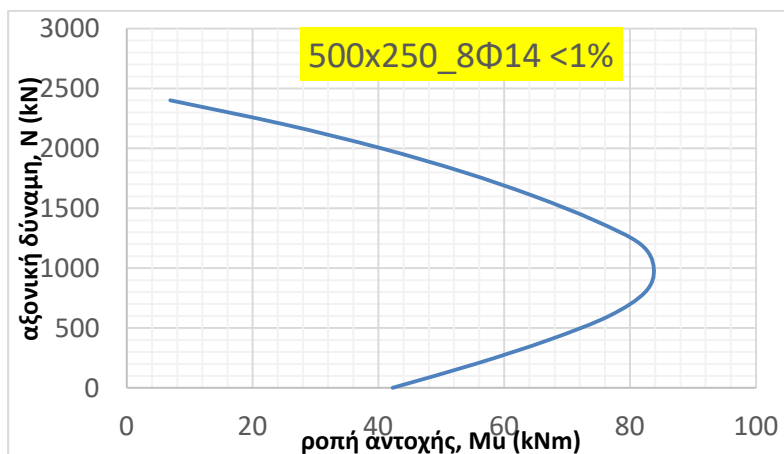
Διάγραμμα 6.86 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστίλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ16.



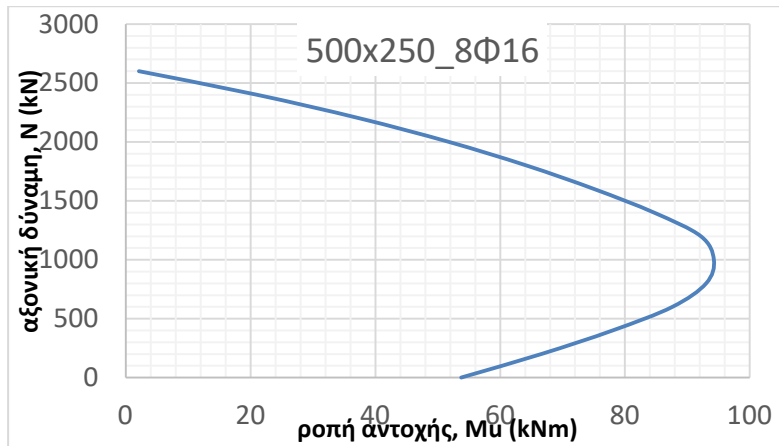
Διάγραμμα 6.87 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστίλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ18.



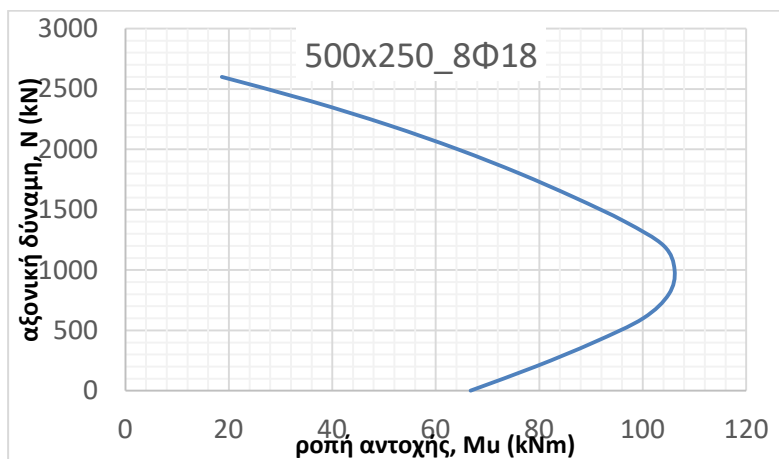
Διάγραμμα 6.88 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστίλωμα ορθογωνικής διατομής 450×250mm με οπλισμό 8Φ20.



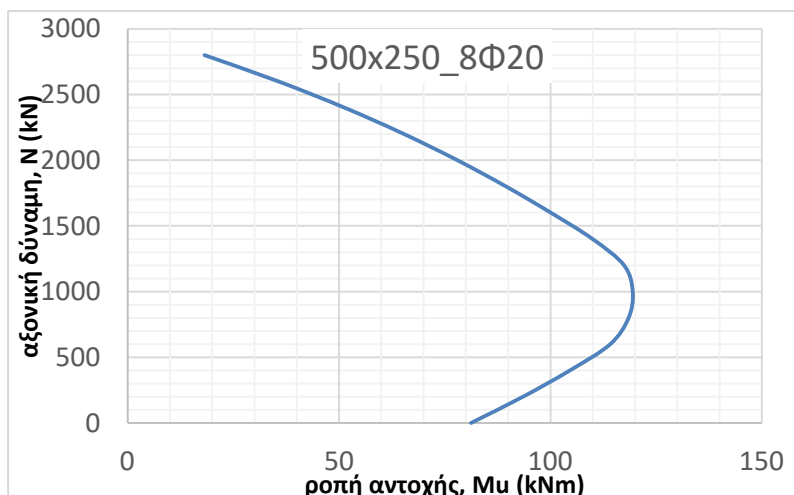
Διάγραμμα 6.89 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ14.



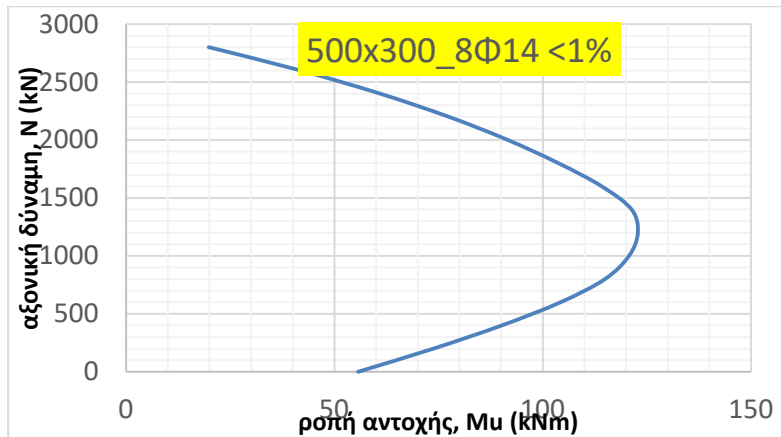
Διάγραμμα 6.90 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ16.



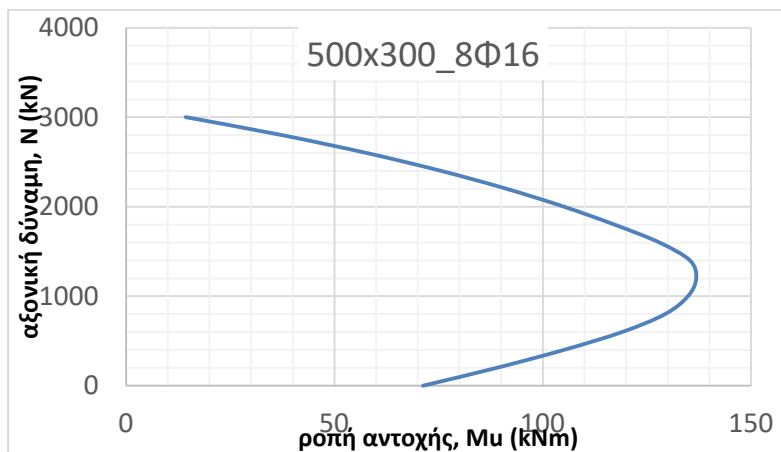
Διάγραμμα 6.91 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ18.



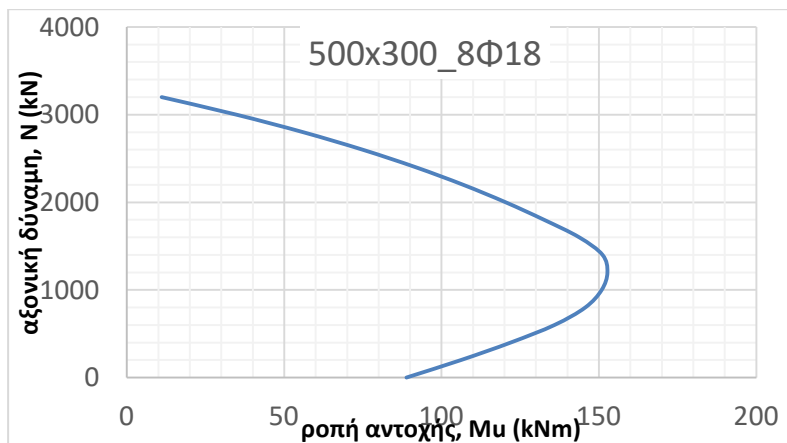
Διάγραμμα 6.92 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής 500×250mm με οπλισμό 8Φ20.



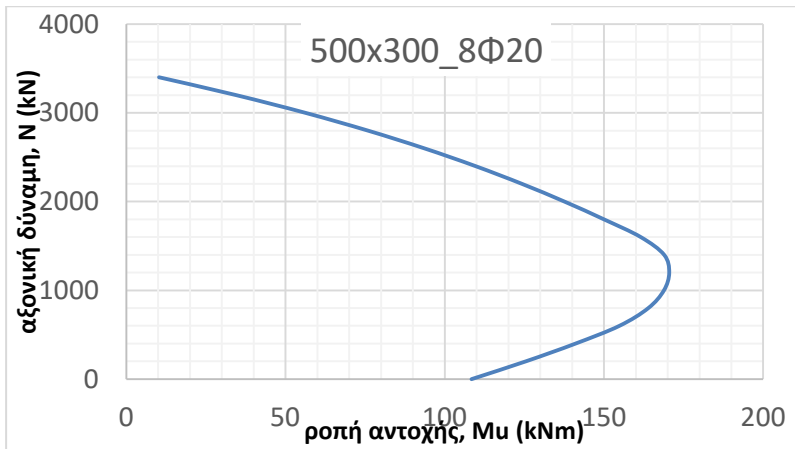
Διάγραμμα 6.93 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ14.



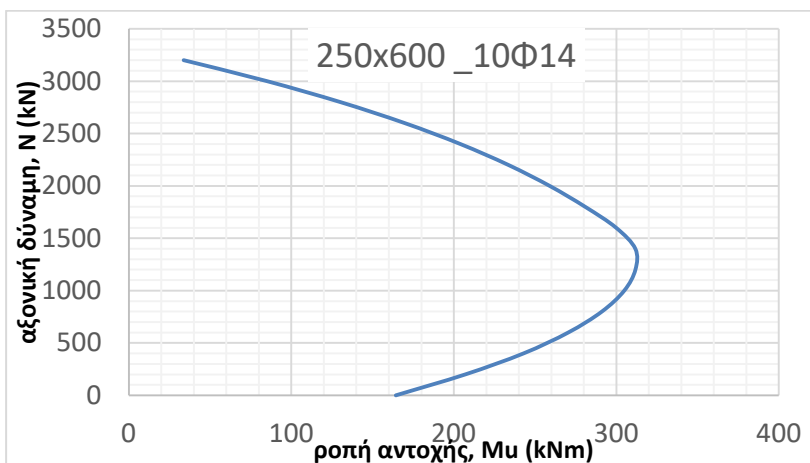
Διάγραμμα 6.94 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ16.



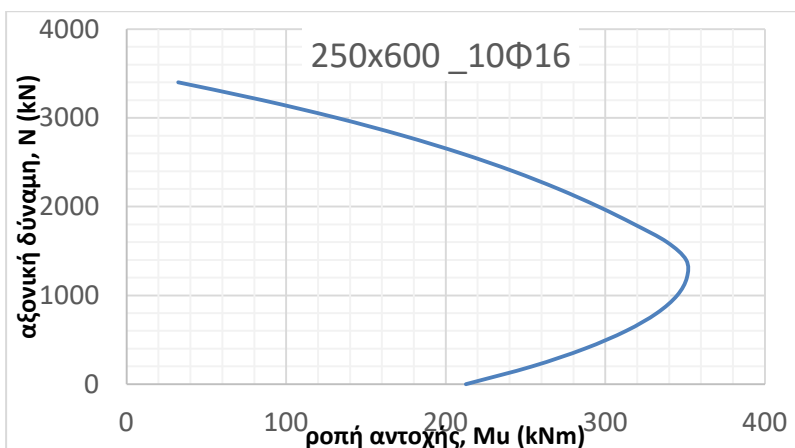
Διάγραμμα 6.95 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ18.



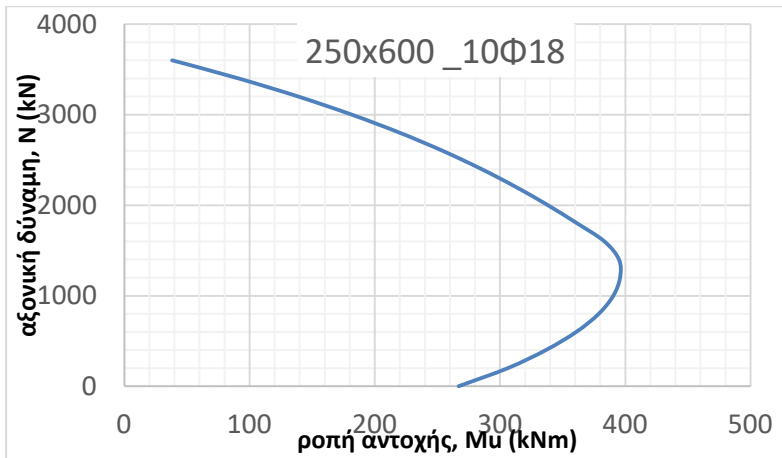
Διάγραμμα 6.96 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 500×300mm με οπλισμό 8Φ20.



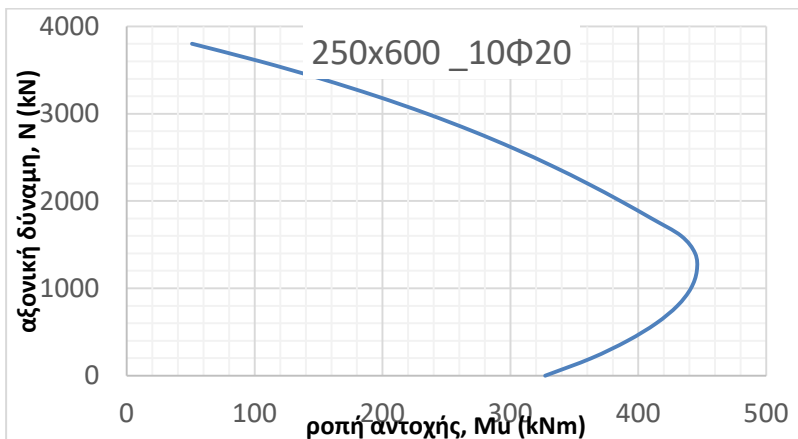
Διάγραμμα 6.97 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ14.



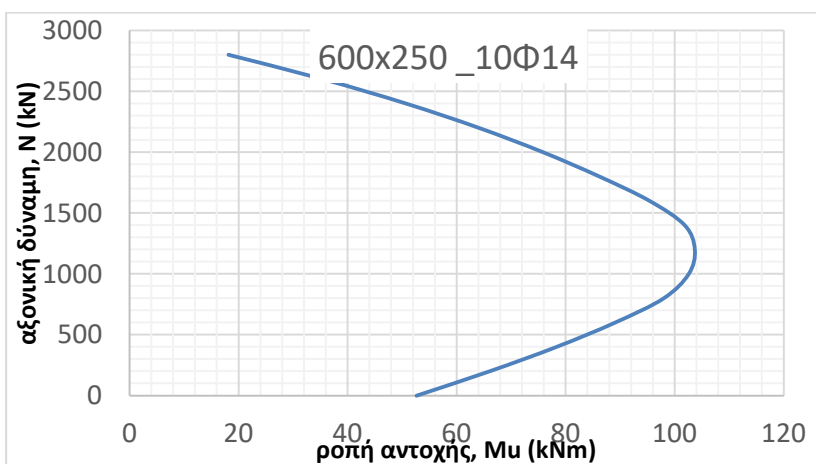
Διάγραμμα 6.98 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ16.



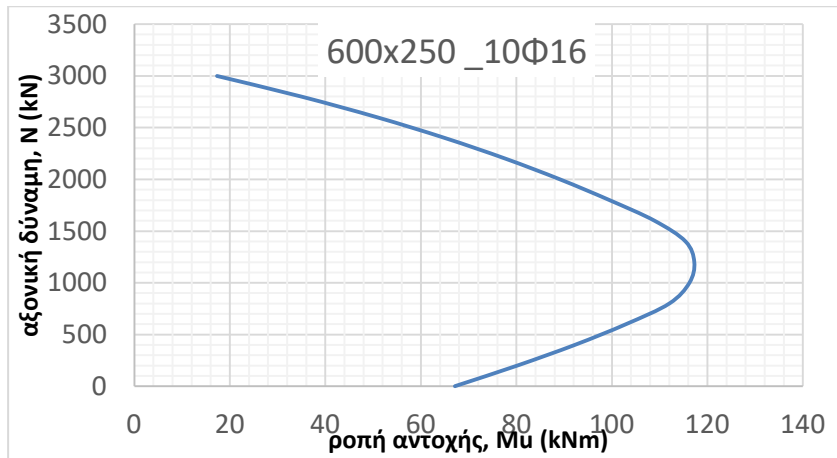
Διάγραμμα 6.99 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ18.



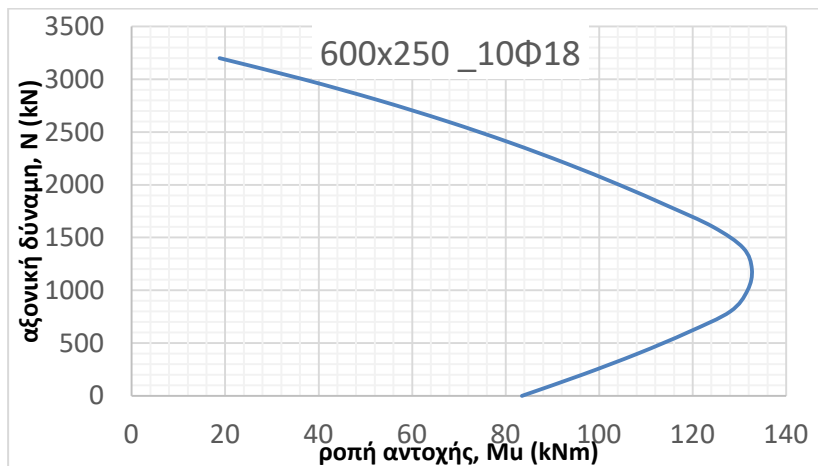
Διάγραμμα 6.100 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 250×600mm με οπλισμό 10Φ20.



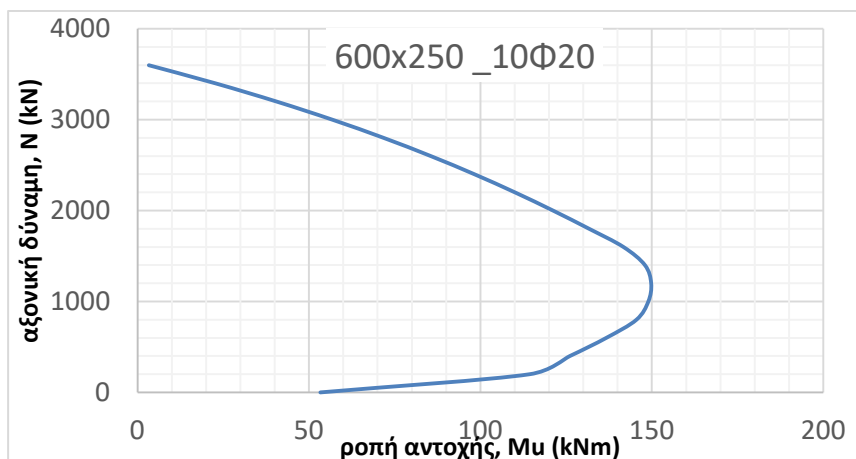
Διάγραμμα 6.101 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ14.



Διάγραμμα 6.102 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ16.



Διάγραμμα 6.103 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ18.



Διάγραμμα 6.104 Η ροπή αντοχής, M_u (σε kNm), συναρτήσει της αξονικής δύναμης N (σε kN) για οπλισμένο σκυρόδεμα C30/37 και υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής 600×250mm με οπλισμό 10Φ20.

Στα ανωτέρω διαγράμματα υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος C30/37 υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις διατομών, οι οποίες έχουν επισημανθεί με κίτρινο χρώμα, επειδή έχουν ποσοστό χαμηλότερο από το ελάχιστο επιτρεπόμενο, ωστόσο εξετάστηκαν για να φανεί καλύτερα η επίδραση της αύξησης του οπλισμού στην αύξηση της ροπής αντοχής M_u .

6.5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται οι βοηθητικοί πίνακες για προσδιορισμένες τιμές της αξονικής δύναμης N_{sd} (μετρημένες σε kN) με τις αντίστοιχες σε αυτές προσδιορισμένες τιμές της καμπτικής ροπής σχεδιασμού M_{sd} (μετρημένες σε kNm). Από τους πίνακες αυτούς μπορεί να επιλεγεί η κατάλληλη διατομή υποστυλώματος για δεδομένη ροπή σχεδιασμού και αξονική δύναμη με γρήγορο και πρακτικό τρόπο. Εξετάστηκαν υποστυλώματα τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής. Πιο συγκεκριμένα, οι διατομές αυτές των υποστυλωμάτων και οι διατάξεις οπλισμού για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί οι συγκεκριμένοι κατωτέρω πίνακες χωρίζονται σε συνολικά 104 περιπτώσεις διαφορετικών υποστυλωμάτων.

6.5.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C25/30 ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΡΟΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ N_{SD} ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΡΟΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ M_{SD}

C25/30, $N_{sd} = 0$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ16	10Φ16
80	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ18	10Φ18
100	8Φ18	8Φ16	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	10Φ20
120	8Φ20	8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
140		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ20	12Φ16	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
180			8Φ20	12Φ16	12Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ20	10Φ16				
200				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
220				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
240				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
260				12Φ20	12Φ16				10Φ18				
280				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
300				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
320					12Φ18				10Φ20				
340					12Φ20								
360					12Φ20								
380					12Φ20								
400					12Φ20								

C25/30, $N_{sd} = 200kN$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ16	10Φ18

100	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
120	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
140	8Φ20	8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
180		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
200			8Φ20	12Φ16	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
220			8Φ20	12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
240				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
260				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
280				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
300				12Φ20	12Φ16				10Φ18				
320				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
340				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
360					12Φ18								
380					12Φ20								
400					12Φ20								
420					12Φ20								
440					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ14	8Φ16
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ16	8Φ18
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	8Φ20
140	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
220			8Φ20	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
240			8Φ20	12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
260				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
280				12Φ18	12Φ14				10Φ16				
300				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
320				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
340				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
360				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
380				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
400					12Φ18								
420					12Φ20								
440					12Φ20								
460					12Φ20								
480					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ14	10Φ16
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ20	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
260			8Φ20	12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
280				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
300				12Φ16	12Φ14				10Φ16				
320				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
360				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
380				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
400				12Φ20	12Φ18								
420					12Φ18								
440					12Φ18								

460					12Φ20								
480					12Φ20								
500					12Φ20								
520					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ14	10Φ16
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ16	10Φ18
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180	8Φ20	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
260			8Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ18	10Φ14				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
300				12Φ16	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
380				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
400				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
420				12Φ20	12Φ16								
440					12Φ18								
460					12Φ18								
480					12Φ18								
500					12Φ20								
520					12Φ20								
540					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 1000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ14	10Φ16
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ18	10Φ14				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
300				12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320				12Φ16	12Φ14				10Φ16				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
400				12Φ20	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ20	12Φ16								
440				12Φ20	12Φ16								
460					12Φ18								
480					12Φ18								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ20								
560					12Φ20								
580					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 1200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250

40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ16
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ16	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
300			8Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
400				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ16								
460					12Φ16								
480					12Φ16								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ20								
580					12Φ20								
600					12Φ20								

C25/30, N_{sd} = 1400kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ14	10Φ14
100	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
120	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ20
140	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ16	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
300			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ16				
320				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
380				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ16								
480					12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ20								
600					12Φ20								
620					12Φ20								

C25/30, N_{sd} = 1600kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
80	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ16
100	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18

120	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
140		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
220			8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
240			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ16				
300			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
320				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
360				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480					12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ16								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ20								
620					12Φ20								
640					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 1800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14
60	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14
80	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
100	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ20
120		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
140		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
180		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
200			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
220			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
300				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
320				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
360				12Φ16	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ16								
520					12Φ16								
540					12Φ16								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 2000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
60	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
80	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ20

100		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
120		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14				
140		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
180			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
200			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
220			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
260			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
280				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
300				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
320				12Φ14	12Φ14								
340				12Φ16	12Φ14								
360				12Φ16	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ16								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C25/30, $N_{sd} = 2200kN$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ16
60	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
80		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ20	10Φ20
100		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
120		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
140		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
160			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
180			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
200			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
220			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
240			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
260			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
280				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
300				12Φ14	12Φ14								
320				12Φ14	12Φ14								
340				12Φ16	12Φ14								
360				12Φ16	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C25/30, $N_{sd} = 2400kN$													
M_{sd}	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250

(kNm)													
40	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ18
60		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ20
80		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14			8Φ20	
100		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
120		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
140			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
160			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
180			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
200			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
220			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
240			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ14	12Φ14								
320				12Φ16	12Φ14								
340				12Φ16	12Φ14								
360				12Φ18	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ20	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 2600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14			8Φ14	10Φ20
60		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14			8Φ20	
80		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
100		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
120			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
140			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
160			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
180			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
200			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
220				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ16	12Φ14								
320				12Φ16	12Φ14								
340				12Φ18	12Φ14								
360				12Φ18	12Φ14								
380				12Φ20	12Φ14								
400				12Φ20	12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								

680					12Φ20								
-----	--	--	--	--	-------	--	--	--	--	--	--	--	--

C25/30, N _{sd} = 2800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				10Φ20
60		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
80		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
100			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
120			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
140			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
160			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
180			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ16	12Φ14								
300				12Φ16	12Φ14								
320				12Φ18	12Φ14								
340				12Φ18	12Φ14								
360				12Φ20	12Φ14								
380				12Φ20	12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 3000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
60			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
80			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
100			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
120			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
140			8Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
160			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ16	12Φ14								
280				12Φ16	12Φ14								
300				12Φ18	12Φ14								
320				12Φ18	12Φ14								
340				12Φ20	12Φ14								
360				12Φ20	12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								

600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 3200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
60			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
80			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
100			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
120			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
140			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ16	12Φ14								
260				12Φ16	12Φ14								
280				12Φ18	12Φ14								
300				12Φ18	12Φ14								
320				12Φ20	12Φ14								
340				12Φ20	12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ16								
540					12Φ16								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 3400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ16	12Φ14	12Φ14								
60			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
80			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
100			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ16	12Φ14								
220				12Φ16	12Φ14								
240				12Φ18	12Φ14								
260				12Φ18	12Φ14								
280				12Φ20	12Φ14								
300				12Φ20	12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ16								
520					12Φ16								

540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ20								
620					12Φ20								
640					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 3600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
60			8Φ20	12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ16	12Φ14								
200				12Φ16	12Φ14								
220				12Φ18	12Φ14								
240				12Φ18	12Φ14								
260				12Φ20	12Φ14								
280				12Φ20	12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ20								
600					12Φ20								
620					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 3800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ16	12Φ14								
160				12Φ16	12Φ14								
180				12Φ18	12Φ14								
200				12Φ18	12Φ14								
220				12Φ18	12Φ14								
240				12Φ20	12Φ14								
260				12Φ20	12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ16								
480					12Φ16								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ20								

580					12Φ20								
600					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 4000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ16	12Φ14								
120				12Φ16	12Φ14								
140				12Φ18	12Φ14								
160				12Φ18	12Φ14								
180				12Φ18	12Φ14								
200				12Φ20	12Φ14								
220				12Φ20	12Φ14								
240				12Φ20	12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ16								
460					12Φ16								
480					12Φ18								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ20								
560					12Φ20								
580					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 4200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ16	12Φ14								
80				12Φ16	12Φ14								
100				12Φ16	12Φ14								
120				12Φ18	12Φ14								
140				12Φ18	12Φ14								
160				12Φ20	12Φ14								
180				12Φ20	12Φ14								
200				12Φ20	12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ16								
440					12Φ16								
460					12Φ18								
480					12Φ18								
500					12Φ20								
520					12Φ20								
540					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 4400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ16	12Φ14								
60				12Φ18	12Φ14								

80				12Φ18	12Φ14								
100				12Φ18	12Φ14								
120				12Φ20	12Φ14								
140				12Φ20	12Φ14								
160				12Φ20	12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ16								
400					12Φ16								
420					12Φ18								
440					12Φ18								
460					12Φ18								
480					12Φ20								
500					12Φ20								
520					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 4600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ18	12Φ14								
60				12Φ18	12Φ14								
80				12Φ20	12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ16								
380					12Φ16								
400					12Φ18								
420					12Φ18								
440					12Φ18								
460					12Φ20								
480					12Φ20								
500					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 4800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ20	12Φ14								
60				12Φ20	12Φ14								
80				12Φ20	12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ16								

340					12Φ16								
360					12Φ18								
380					12Φ18								
400					12Φ18								
420					12Φ20								
440					12Φ20								
460					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 5000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ20	12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ16								
300					12Φ16								
320					12Φ16								
340					12Φ18								
360					12Φ18								
380					12Φ20								
400					12Φ20								
420					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 5200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ16								
260					12Φ16								
280					12Φ16								
300					12Φ18								
320					12Φ18								
340					12Φ18								
360					12Φ20								
380					12Φ20								
400					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 5400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ16								
220					12Φ16								
240					12Φ16								
260					12Φ18								

280					12Φ18								
300					12Φ18								
320					12Φ20								
340					12Φ20								
360					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 5600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ16								
180					12Φ16								
200					12Φ18								
220					12Φ18								
240					12Φ18								
260					12Φ18								
280					12Φ20								
300					12Φ20								
320					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 5800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ16								
120					12Φ16								
140					12Φ16								
160					12Φ18								
180					12Φ18								
200					12Φ18								
220					12Φ20								
240					12Φ20								
260					12Φ20								
280					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 6000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ16								
60					12Φ16								
80					12Φ16								
100					12Φ16								
120					12Φ18								
140					12Φ18								
160					12Φ18								
180					12Φ20								
200					12Φ20								
220					12Φ20								
240					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 6200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ16								
60					12Φ18								
80					12Φ18								
100					12Φ18								
120					12Φ20								
140					12Φ20								
160					12Φ20								
180					12Φ20								

C25/30, N _{sd} = 6400kN													
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ18								
60					12Φ18								
80					12Φ20								
100					12Φ20								
120					12Φ20								
140					12Φ20								

C25/30, $N_{sd} = 6600kN$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ20								
60					12Φ20								
80					12Φ20								

6.5.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C30/37 ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ N_{SD} ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ M_{SD}

C30/37, $N_{sd} = 0kN$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ16	10Φ16
80	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ18	10Φ18
100	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
120	8Φ20	8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
140		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ20	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
180			8Φ20	12Φ16	12Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ20	10Φ16				
200				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
220				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
240				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
260				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
280				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
300				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
320				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
340					12Φ20								
360					12Φ20								
380					12Φ20								
400					12Φ20								

C30/37, $N_{sd} = 200kN$													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ16	10Φ16
100	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
120	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
140	8Φ20	8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
180		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
200			8Φ20	12Φ16	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
220			8Φ20	12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
240				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
260				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
280				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
300				12Φ20	12Φ16				10Φ18				
320				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
340				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
360					12Φ20				10Φ20				
380					12Φ20								
400					12Φ20								
420					12Φ20								
440					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ14	10Φ16
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ20	8Φ16	10Φ16
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
140	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ20	8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
220			8Φ20	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
240			8Φ20	12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
260				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
280				12Φ18	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
300				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
320				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
340				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
360				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
380				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
400					12Φ18								
420					12Φ20								
440					12Φ20								
460					12Φ20								
480					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ16	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ16
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
140	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160	8Φ18	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
180	8Φ20	8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ18	10Φ14				
260			8Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
280				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				
300				12Φ16	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
360				12Φ18	12Φ16				10Φ18				
380				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
400				12Φ20	12Φ18				10Φ20				
420					12Φ18								
440					12Φ18								
460					12Φ18								
480					12Φ20								
500					12Φ20								
520					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ14	10Φ16
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ16	10Φ16
140	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
160	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
180	8Φ20	8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ18	10Φ14				
280			8Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
300				12Φ16	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ16				

320				12Φ16	12Φ14					10Φ16			
340				12Φ18	12Φ14					10Φ18			
360				12Φ18	12Φ14					10Φ18			
380				12Φ18	12Φ16					10Φ20			
400				12Φ20	12Φ16					10Φ20			
420				12Φ20	12Φ16					10Φ20			
440					12Φ18								
460					12Φ18								
480					12Φ18								
500					12Φ18								
520					12Φ20								
540					12Φ20								
560					12Φ20								

C30/37, $N_{sd} = 1000kN$

M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ18	8Φ14	10Φ14
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
140	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
160	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
180	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ16	10Φ14				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
300			12Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ14				
320				12Φ16	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ16				
360				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
400				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
440				12Φ20	12Φ16				10Φ20				
460					12Φ16								
480					12Φ18								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ20								
560					12Φ20								
580					12Φ20								
600					12Φ20								

C30/37, $N_{sd} = 1200kN$

M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
140	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
160	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
180	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ16	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
300			12Φ20	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ20	10Φ14				
320			12Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
340				12Φ16	12Φ14				10Φ16				
360				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ18	12Φ14				10Φ18				
400				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
440				12Φ20	12Φ14				10Φ20				
460				12Φ20	12Φ16								

480					12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ20								
600					12Φ20								
620					12Φ20								

C30/37, N_{sd}=1400kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14
120	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
160	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
180		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ16	10Φ14				
260		8Φ20	8Φ16	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
300			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
320			12Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
340				12Φ14	12Φ14				10Φ16				
360				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
400				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
440				12Φ20	12Φ14				10Φ20				
460				12Φ20	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ16								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ20								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 1600kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
100	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ16
120	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ16	10Φ16
140	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
160	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
180		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
260			8Φ16	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
300			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320			12Φ20	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
340				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ16	12Φ14				10Φ18				
400				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ18	12Φ14				10Φ20				
440				12Φ18	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500				12Φ20	12Φ14								

520					12Φ16								
540					12Φ16								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 1800kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14
80	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14
100	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
120	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
140	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
160		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
240		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
260			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
280			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
300			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
320			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
360				12Φ14	12Φ14				10Φ18				
380				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
400				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ18	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500				12Φ20	12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ16								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ18								
660					12Φ20								
680					12Φ20								
700					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 2000kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14
60	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
80	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
100	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ16	10Φ16
120	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
140		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
220		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ18	10Φ14				
240			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
260			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
300			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
320			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
340				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
360				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
380				12Φ16	12Φ14				10Φ20				
400				12Φ16	12Φ14								
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ18	12Φ14								

460				12Φ18	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500				12Φ20	12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ16								
580					12Φ16								
600					12Φ16								
620					12Φ18								
640					12Φ18								
660					12Φ20								
680					12Φ20								
700					12Φ20								
720					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 2200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ14	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ14	8Φ14	8Φ14	10Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14
60	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14
80	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ16	10Φ16
100	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ20
120		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
140		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
180		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
200		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
220			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
240			8Φ16	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
260			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ16				
280			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
300			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
320				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
340				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
360				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
380				12Φ16	12Φ14								
400				12Φ16	12Φ14								
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ18	12Φ14								
460				12Φ18	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500				12Φ20	12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ16								
600					12Φ16								
620					12Φ18								
640					12Φ18								
660					12Φ18								
680					12Φ20								
700					12Φ20								
720					12Φ20								
740					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 2400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ16	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ16	8Φ14	8Φ14	10Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14
60	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ18	8Φ14	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
80	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ16
100		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ20	
120		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14				
140		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14				
160		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
180		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
200			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ14				
220			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
240			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ16				
260			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
280			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
300			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				

320				12Φ14	12Φ14					10Φ20			
340				12Φ14	12Φ14								
360				12Φ14	12Φ14								
380				12Φ16	12Φ14								
400				12Φ16	12Φ14								
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ18	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500				12Φ20	12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ16								
620					12Φ16								
640					12Φ18								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ20								
720					12Φ20								
740					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 2600kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ18	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ16	8Φ14	10Φ14			8Φ14	10Φ16
60	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14	8Φ20	8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ16
80		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ20	10Φ20
100		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14				
120		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
140		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
160		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
180			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
200			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
220			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
240			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
260			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
280			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
300				12Φ14	12Φ14				10Φ20				
320				12Φ14	12Φ14								
340				12Φ14	12Φ14								
360				12Φ14	12Φ14								
380				12Φ16	12Φ14								
400				12Φ16	12Φ14								
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ18	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480				12Φ20	12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ16								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ20								
720					12Φ20								
740					12Φ20								
760					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 2800kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40	8Φ20	8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ18	8Φ14	10Φ14			8Φ18	10Φ16
60		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ14	10Φ14			8Φ20	10Φ20
80		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14				
100		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ16	10Φ14				
120		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				

140		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
160			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
180			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
200			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
220			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
240			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
260			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ14	12Φ14								
320				12Φ14	12Φ14								
340				12Φ14	12Φ14								
360				12Φ16	12Φ14								
380				12Φ16	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ18	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ16								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ18								
720					12Φ20								
740					12Φ20								
760					12Φ20								
C30/37, N_{sd} = 3000kN													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ14	8Φ14	12Φ14	12Φ14		8Φ20	8Φ16	10Φ14			8Φ20	10Φ20
60		8Φ16	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ16	10Φ14				
80		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ14				
100		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
120		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
140			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
160			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
180			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
200			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
220			12Φ20	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
240			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ14	12Φ14								
320				12Φ14	12Φ14								
340				12Φ16	12Φ14								
360				12Φ16	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ18	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460				12Φ20	12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ14								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ18								
720					12Φ20								
740					12Φ20								

760					12Φ20								
-----	--	--	--	--	-------	--	--	--	--	--	--	--	--

C30/37, N_{sd} = 3200kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				10Φ20
60		8Φ18	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ18	10Φ16				
80		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ16				
100			8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
120			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
140			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
160			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
180			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
200			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
220			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ14	12Φ14								
320				12Φ16	12Φ14								
340				12Φ16	12Φ14								
360				12Φ18	12Φ14								
380				12Φ18	12Φ14								
400				12Φ20	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440				12Φ20	12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ14								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ18								
720					12Φ20								
740					12Φ20								
760					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 3400kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
60		8Φ20	8Φ14	12Φ14	12Φ14			8Φ20	10Φ18				
80			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ18				
100			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
120			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
140			8Φ18	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
160			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
180			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ14	12Φ14								
300				12Φ16	12Φ14								
320				12Φ16	12Φ14								
340				12Φ18	12Φ14								
360				12Φ18	12Φ14								
380				12Φ20	12Φ14								
400				12Φ20	12Φ14								
420				12Φ20	12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								

560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ14								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ18								
720					12Φ20								
740					12Φ20								
760					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 3600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
60			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
80			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
100			8Φ16	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
120			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
140			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
160			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ14	12Φ14								
280				12Φ16	12Φ14								
300				12Φ16	12Φ14								
320				12Φ18	12Φ14								
340				12Φ18	12Φ14								
360				12Φ20	12Φ14								
380				12Φ20	12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ16								
620					12Φ16								
640					12Φ16								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ20								
720					12Φ20								
740					12Φ20								
760					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 3800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ14	12Φ14	12Φ14				10Φ20				
60			8Φ16	12Φ14	12Φ14								
80			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
100			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
120			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
140			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ14	12Φ14								
240				12Φ14	12Φ14								
260				12Φ16	12Φ14								
280				12Φ16	12Φ14								
300				12Φ18	12Φ14								
320				12Φ18	12Φ14								
340				12Φ20	12Φ14								

360				12Φ20	12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ14								
600					12Φ16								
620					12Φ16								
640					12Φ18								
660					12Φ18								
680					12Φ18								
700					12Φ20								
720					12Φ20								
740					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 4000kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
60			8Φ18	12Φ14	12Φ14								
80			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
100			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ14	12Φ14								
220				12Φ16	12Φ14								
240				12Φ16	12Φ14								
260				12Φ18	12Φ14								
280				12Φ18	12Φ14								
300				12Φ18	12Φ14								
320				12Φ20	12Φ14								
340				12Φ20	12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ14								
580					12Φ16								
600					12Φ16								
620					12Φ18								
640					12Φ18								
660					12Φ18								
680					12Φ20								
700					12Φ20								
720					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 4200kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
60			12Φ20	12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ14	12Φ14								
160				12Φ14	12Φ14								
180				12Φ14	12Φ14								
200				12Φ16	12Φ14								

220				12Φ16	12Φ14								
240				12Φ18	12Φ14								
260				12Φ18	12Φ14								
280				12Φ20	12Φ14								
300				12Φ20	12Φ14								
320				12Φ20	12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ14								
560					12Φ16								
580					12Φ16								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ18								
660					12Φ20								
680					12Φ20								
700					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 4400kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ14	12Φ14								
120				12Φ14	12Φ14								
140				12Φ14	12Φ14								
160				12Φ16	12Φ14								
180				12Φ16	12Φ14								
200				12Φ18	12Φ14								
220				12Φ18	12Φ14								
240				12Φ18	12Φ14								
260				12Φ20	12Φ14								
280				12Φ20	12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ14								
540					12Φ16								
560					12Φ16								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ18								
640					12Φ20								
660					12Φ20								
680					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 4600kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ14	12Φ14								
120				12Φ16	12Φ14								
140				12Φ16	12Φ14								

160				12Φ16	12Φ14								
180				12Φ18	12Φ14								
200				12Φ18	12Φ14								
220				12Φ20	12Φ14								
240				12Φ20	12Φ14								
260				12Φ20	12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ14								
520					12Φ16								
540					12Φ16								
560					12Φ18								
580					12Φ18								
600					12Φ18								
620					12Φ20								
640					12Φ20								
660					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 4800kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ14	12Φ14								
60				12Φ14	12Φ14								
80				12Φ14	12Φ14								
100				12Φ16	12Φ14								
120				12Φ16	12Φ14								
140				12Φ18	12Φ14								
160				12Φ18	12Φ14								
180				12Φ20	12Φ14								
200				12Φ20	12Φ14								
220				12Φ20	12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ14								
480					12Φ14								
500					12Φ16								
520					12Φ16								
540					12Φ18								
560					12Φ18								
580					12Φ20								
600					12Φ20								
620					12Φ20								

C30/37, N_{sd} =5000kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ16	12Φ14								
60				12Φ16	12Φ14								
80				12Φ16	12Φ14								
100				12Φ18	12Φ14								
120				12Φ18	12Φ14								
140				12Φ18	12Φ14								
160				12Φ20	12Φ14								
180				12Φ20	12Φ14								

200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ14								
460					12Φ16								
480					12Φ16								
500					12Φ16								
520					12Φ18								
540					12Φ18								
560					12Φ20								
580					12Φ20								
600					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 5200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ16	12Φ14								
60				12Φ18	12Φ14								
80				12Φ18	12Φ14								
100				12Φ18	12Φ14								
120				12Φ20	12Φ14								
140				12Φ20	12Φ14								
160				12Φ20	12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ14								
420					12Φ14								
440					12Φ16								
460					12Φ16								
480					12Φ18								
500					12Φ18								
520					12Φ18								
540					12Φ20								
560					12Φ20								
580					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 5400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ18	12Φ14								
60				12Φ20	12Φ14								
80				12Φ20	12Φ14								
100				12Φ20	12Φ14								
120				12Φ20	12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								

340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ14								
400					12Φ16								
420					12Φ16								
440					12Φ16								
460					12Φ18								
480					12Φ18								
500					12Φ20								
520					12Φ20								
540					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 5600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40				12Φ20	12Φ14								
60				12Φ20	12Φ14								
80				12Φ20	12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ14								
360					12Φ14								
380					12Φ16								
400					12Φ16								
420					12Φ18								
440					12Φ18								
460					12Φ18								
480					12Φ20								
500					12Φ20								
520					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 5800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ14								
320					12Φ14								
340					12Φ16								
360					12Φ16								
380					12Φ16								
400					12Φ18								
420					12Φ18								
440					12Φ20								
460					12Φ20								
480					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 6000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								

80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ14								
280					12Φ14								
300					12Φ16								
320					12Φ16								
340					12Φ16								
360					12Φ18								
380					12Φ18								
400					12Φ20								
420					12Φ20								
440					12Φ20								
460					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 6200kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ14								
240					12Φ14								
260					12Φ16								
280					12Φ16								
300					12Φ16								
320					12Φ18								
340					12Φ18								
360					12Φ18								
380					12Φ20								
400					12Φ20								
420					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 6400kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ14								
180					12Φ14								
200					12Φ14								
220					12Φ16								
240					12Φ16								
260					12Φ16								
280					12Φ18								
300					12Φ18								
320					12Φ18								
340					12Φ20								
360					12Φ20								
380					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 6600kN

M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								

100					12Φ14								
120					12Φ14								
140					12Φ14								
160					12Φ16								
180					12Φ16								
200					12Φ16								
220					12Φ18								
240					12Φ18								
260					12Φ18								
280					12Φ18								
300					12Φ20								
320					12Φ20								
340					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 6800kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ14								
80					12Φ14								
100					12Φ14								
120					12Φ16								
140					12Φ16								
160					12Φ16								
180					12Φ18								
200					12Φ18								
220					12Φ18								
240					12Φ20								
260					12Φ20								
280					12Φ20								
300					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 7000kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ14								
60					12Φ16								
80					12Φ16								
100					12Φ16								
120					12Φ16								
140					12Φ18								
160					12Φ18								
180					12Φ18								
200					12Φ20								
220					12Φ20								
240					12Φ20								
260					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 7200kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ16								
60					12Φ16								
80					12Φ18								
100					12Φ18								
120					12Φ18								
140					12Φ20								
160					12Φ20								
180					12Φ20								
200					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 7400kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ18								
60					12Φ18								
80					12Φ18								
100					12Φ20								
120					12Φ20								
140					12Φ20								
160					12Φ20								

C30/37, N _{sd} = 7600kN													
M _{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ18								
60					12Φ18								
80					12Φ18								
100					12Φ20								
120					12Φ20								
140					12Φ20								
160					12Φ20								

40					12Φ20								
60					12Φ20								
80					12Φ20								
100					12Φ20								

C30/37, N_{sd} = 7800kN													
M_{sd} (kNm)	350x350	400x400	450x450	500x500	600x600	250x450	250x500	300x500	250x600	450x250	500x250	500x300	600x250
40					12Φ20								

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η οικοδομική τεχνολογία υποχρεωτικά ακολουθεί την πορεία των ραγδαίων ρυθμών της καθημερινότητας και την επιτακτική ανάγκη του ανθρώπου για οικοδομήματα ογκώδη, ασφαλή, υψηλής αντοχής και με το ελάχιστο δυνατό κόστος, σε οικονομικά και κοινωνικά ανεκτά επίπεδα της κατασκευής.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και παρουσιάστηκαν οι κανόνες κατασκευαστικής διαμόρφωσης και οι γεωμετρικές διατάξεις των οπλισμών των κατακόρυφων μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με έμφαση στα υποστυλώματα. Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας και την πρακτική εφαρμογή των κανόνων διαστασιολόγησης προκύπτουν ενδιαφέροντα και χρήσιμα συμπεράσματα.

Πλέον είναι διαθέσιμες στο μηχανικό πολλές τεχνικές και διαφορετικά υλικά για την κατασκευή υποστυλωμάτων υφιστάμενων κατασκευών. Η επιλογή των βιομηχανοποιημένων συνδετήρων – κλωβών κάθε τύπου πολυμορφικών συνδετήρων, αποτέλεσε την ιδανική λύση ενός μηχανικού για τον οπλισμό των υποστυλωμάτων με στόχο την συνεπή και με ακρίβεια εφαρμογή της μελέτης.

Επιπροσθέτως παρουσιάστηκαν απλές σχέσεις υπολογισμού της ροπής και της καμπυλότητας, στη διαρροή και στην αστοχία, για μέλη ορθογωνικής διατομής από οπλισμένο σκυρόδεμα και παρατέθηκαν αναλυτικά διαγράμματα αλληλεπίδρασης καμπτικής ροπής – αξονικής δύναμης για προκαθορισμένες, συνήθεις, διατομές υποστυλωμάτων και για κατηγορία σκυροδέματος C25/30 και C30/37.

Τέλος, παρουσιάζονται αντίστοιχοι βοηθητικοί πίνακες για τις δύο ως άνω κατηγορίες σκυροδέματος και για τις προκαθορισμένες διατομές υποστυλωμάτων που εξετάστηκαν στην παρούσα πτυχιακή (104 διαφορετικές περιπτώσεις). Μέσω των βοηθητικών πινάκων μπορεί να επιλεγεί με γρήγορο και πρακτικό τρόπο η κατάλληλη διατομή υποστυλώματος για δεδομένη ροπή σχεδιασμού και αξονική δύναμη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δρ. Διονύσιος Μπισκίνης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών (2007) "ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ"
2. Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών (2015) "ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΡΟΣ Ι"
3. Δρ. Θεοφάνης Α. Γεωργόπουλος, Πολυτεχνείου Μονάχου (2015), Τόμος Α', "ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΤΑ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ Ε C 2, ΕΚΩΣ"
4. Γεώργιος Παναγόπουλος & Εμμανουήλ Κίρτας, Τμήμα Δομικών Έργων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών (2005) "ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ Ι"
5. Απόστολος Κωνσταντινίδης, Τόμος Α', " ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ "
6. Panagiotakos, T.B., and Fardis, M.N., "Deformations of RC Members at Yielding and Ultimate", ACI Structural Journal, Vol. 98, No.2, March-April (2001)
7. Ιστοσελίδα

[ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε. _files\ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε..html](#)

8. Ιστοσελίδα

[ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε. _files\ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε. - Παραγωγή Χάλυβα \(σιδήρου\).html](#)

9. Ιστοσελίδα

[ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε. _files\Βιομηχανοποιημένοι Συνδετήρες - Κλωβοί.html](#)

10. Ιστοσελίδα

[ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε. _files\pi-Systems International.html](#)