



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομικών Κατασκευών – Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος

Κωνσταντίνος Χαλιορής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας

τηλ./fax: 2541079632 – E-mail: chaliori@civil.duth.gr

Σχεδιασμός Φορέων από Σκυρόδεμα με βάση τον Ευρωκώδικα 2

Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας Ρηγματώσεις – Παραμορφώσεις

Κωνσταντίνος Χαλιορής

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Λέκτορας ΔΠΘ

Αλεξανδρούπολη – 10 Οκτωβρίου 2009

ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ με τις διατάξεις του ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2

Serviceability Limit States – EC2

1. Εισαγωγικά

Στις συνήθεις οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας εντάσσονται:

- Περιορισμός τάσεων (EC2: Section 7.2) - (ΕΚΩΣ: Κεφάλαιο 15.4)
- Έλεγχος ρηγματώσεων (EC2: Section 7.3) - (ΕΚΩΣ: Κεφάλαιο 15.5, Παράρτημα Γ)
- Έλεγχος παραμορφώσεων (EC2: Section 7.4) - (ΕΚΩΣ: Κεφάλαιο 16, Παράρτημα Δ)

Άλλες οριακές καταστάσεις (όπως η ταλάντωση) μπορεί να είναι σημαντικές σε ορισμένες κατασκευές αλλά δεν καλύπτονται από τον EC2.

Κατά τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων οι διατομές θεωρούνται ως αρηγμάτωτες με την προϋπόθεση ότι η εφελκυστική τάση λόγω κάμψης δεν υπερβαίνει την εφελκυστική τάση $f_{ct,eff}$, η οποία μπορεί να λαμβάνεται ίση προς τη μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ctm} ή $f_{ctm,fl}$ με την προϋπόθεση ότι ο υπολογισμός του ελάχιστου εφελκυστικού οπλισμού βασίζεται στην ίδια τιμή. Για τον υπολογισμό του εύρους των ρωγμών και της εφελκυστικής συμβολής στη δυσκαμψία πρέπει να χρησιμοποιείται η f_{ctm} .

2. Περιορισμός τάσεων

Η θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα πρέπει να περιορίζεται ώστε να αποφεύγεται η διαμήκης ρηγμάτωση, η μικρο-ρηγμάτωση, ή τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, τα οποία μπορεί να επιφέρουν μη ανεκτές συνέπειες στη λειτουργία της κατασκευής. Σε περίπτωση που οι τάσεις υπερβούν μια κρίσιμη τιμή κάτω από ένα χαρακτηριστικό συνδυασμό επιβαλλόμενων δράσεων, οι επικείμενες ρηγματώσεις είναι πιθανόν να επιφέρουν μείωση της ανθεκτικότητας σε διάρκεια της κατασκευής ή του δομικού στοιχείου. Σε συνθήκες περιβάλλοντος κατηγορίας XD, XF και XS (δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος - κατά ΕΚΩΣ κατηγορίες περιβάλλοντος 3 και 4) και εφόσον δεν έχουν ληφθεί μέτρα αντιμετώπισης, όπως ικανό πάχος επικάλυψης των οπλισμών ή οπλισμός περίσφιξης, προτείνεται το παρακάτω όριο των θλιπτικών τάσεων για το σκυρόδεμα:

$$\sigma_c \leq k_1 \cdot f_{ck} \quad \text{όπου } k_1 = 0.6 \quad (\text{ομοίως στον ΕΚΩΣ, αλλά διευκρινίζεται ότι η σχέση ισχύει για βραχυχρόνιο συνδυασμό δράσεων}).$$

Ειδικά για την περίπτωση οιονει-μόνιμου (μακροχρόνιου) συνδυασμού δράσεων, οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού θεωρούνται σημαντικές (παραδοχή μη-γραμμικού ερπυσμού) όταν οι θλιπτικές τάσεις του σκυροδέματος ξεπεράσουν το παρακάτω όριο:

$$\sigma_c \leq k_2 \cdot f_{ck} \quad \text{όπου } k_2 = 0.45 \quad (\text{ΕΚΩΣ: } \sigma_c \leq 0.50 \cdot f_{ck}).$$

Οι εφελκυστικές τάσεις στον οπλισμό πρέπει να περιορίζονται ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη ανελαστικών παραμορφώσεων και μη ανεκτής ρηγματώσης ή παραμόρφωσης. Για τις τάσεις αυτές, κάτω από έναν χαρακτηριστικό συνδυασμό επιβαλλόμενων δράσεων, προτείνονται τα παρακάτω όρια των εφελκυστικών τάσεων για τον χάλυβα:

$$\sigma_s \leq k_{3,4,5} \cdot f_{yk}$$

όπου: $k_3 = 0.8$ γενικά (ομοίως στον ΕΚΩΣ)
 $k_4 = 1.0$ για επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (ομοίως στον ΕΚΩΣ)
 $k_5 = 0.75$ για χάλυβες προέντασης (ΕΚΩΣ: $\sigma_s \leq 0.65 \cdot f_{yk}$)

3. Έλεγχος ρηγματώσεων

3.1. Υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου εύρους ρωγμών W_{max}

Η ρηγματώση πρέπει να περιορίζεται σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην παρεμποδίζει την ομαλή λειτουργία ή την ανθεκτικότητα σε διάρκεια μιας κατασκευής, ή να οδηγεί σε μη αποδεκτό αισθητικό αποτέλεσμα σε σχέση με την εμφάνισή της. Οι ρηγματώσεις είναι συνήθως στις κατασκευές από σκυρόδεμα που υπόκεινται σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη, ή εφελκυσμό που προέρχεται είτε από άμεση φόρτιση είτε από παρεμπόδιση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Μπορεί να δημιουργηθούν και από άλλες αιτίες, όπως η πλαστική συστολή ξήρανσης ή χημικές αντιδράσεις εντός του σκληρυμένου σκυροδέματος που προκαλούν διόγκωση που μπορεί να μην είναι αποδεκτό, αλλά η αποφυγή και ο έλεγχός τους δεν καλύπτονται από τον EC2.

Η εμφάνιση ρηγματώσεων χωρίς περιορισμό του εύρους τους επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι δεν παρεμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της κατασκευής. Επίσης, καθορίζεται μια υπολογιστική τιμή του ανεκτού εύρους ρήγματος λαμβάνοντας υπ' όψη την προτεινόμενη λειτουργία και τη φύση της κατασκευής καθώς και το κόστος του περιορισμού της ρηγματώσης. Έτσι, στον παρακάτω πίνακα καθορίζεται το μέγιστο αποδεκτό εύρος ρωγμών συναρτήσει της κατηγορίας περιβαλλοντικών συνθηκών για οιονεί-μόνιμους (μακροχρόνιους) και συχνούς (βραχυχρόνιους) συνδυασμούς δράσεων:

Πίνακας 1: Μέγιστο αποδεκτό εύρος ρωγμών σύμφωνα με τον EC2.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	Στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος και προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες χωρίς συνάφεια	Προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες με συνάφεια
	Οιονεί-μόνιμος συνδυασμός δράσεων	Συχνός συνδυασμός δράσεων
X0, XC1	0.4 ¹	0.2
XC2, XC3, XC4	0.3	0.2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Απόθλιψη

Σημείωση 1: Για τις κατηγορίες περιβαλλοντικών συνθηκών X0, XC1, το εύρος της ρωγμής δεν επηρεάζει την ανθεκτικότητα σε διάρκεια, και το σχετικό όριο τίθεται για την εξασφάλιση αποδεκτής αισθητικής εμφάνισης. Εφόσον δεν τίθενται απαιτήσεις αισθητικής, το όριο αυτό μπορεί να αυξηθεί.

Σημείωση 2: Για αυτές τις κατηγορίες περιβαλλοντικών συνθηκών, πρέπει, επιπλέον, να ελέγχεται η απόθλιψη υπό τον οιοει-μόνιμο συνδυασμό δράσεων.

X0	:	Χωρίς καμία τρωτότητα σε διάβρωση
XC1, XC2, XC3, XC4	:	Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης
XD1, XD2, XD3	:	Διάβρωση λόγω χλωριόντων
XS1, XS2, XS3	:	Επιρροή θαλασσινού νερού
XF1, XF2, XF3, XF4	:	Διάβρωση λόγω παγετού
XA1, XA2, XA3	:	Διάβρωση λόγω χημικών δράσεων
XM1, XM2, XM3	:	Απότριψη

Στον ΕΚΩΣ2000 το μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος των ρωγμών ανάλογα την κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος δίνεται από τον πίνακα:

Πίνακας 2: Μέγιστο αποδεκτό εύρος ρωγμών σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ2000.

Κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος	Μέγιστο ανεκτό άνοιγμα - εύρος εγκάρσιας ρωγμής
	W_{max} σε mm
1	0.3 - 0.4
2	0.2
3, 4	0.1

Παρατηρείται ότι οι κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος διαφέρουν αρκετά στον EC2 από τον ΕΚΩΣ και κατ' επέκταση οι τιμές του W_{max} παρ' όλο που έχουν την ίδια τάξη μεγέθους, είναι διαφορετικοί στις περισσότερες περιπτώσεις.

3.2. Ελάχιστος οπλισμός έναντι ρηγματώσεως

Ο ελάχιστος οπλισμός έναντι ρηγματώσεως προβλέπεται με βάση τη σχέση:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s$$

όπου: A_{ct} το εμβαδόν του σκυροδέματος στην εφελκόμενη ζώνη,

σ_s η απόλυτη τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης του οπλισμού αμέσως μετά την εμφάνιση της ρηγματώσεως, η οποία μπορεί να λαμβάνεται ίση προς το όριο, διαρροής του οπλισμού ή να έχει χαμηλότερης τιμή ώστε να ικανοποιούνται τα όρια του εύρους ρωγμής σύμφωνα με τους περιορισμούς στη διάμετρο ή την απόσταση των ράβδων

$$f_{ct,eff} = f_{ctm} \text{ (ή μικρότερο αν η ρηγματώση αναμένεται να συμβεί πριν τις 28 ημέρες),}$$

k συντελεστής ο οποίος επιτρέπει την μείωση των τάσεων λόγω εσωτερικών ανομοιομορφων αυτό-ισοροπουσών τάσεων, λαμβάνει τις τιμές:

$$k = 1.0 \text{ για κορμούς με } h \leq 300mm \text{ ή πέλματα πλακοδοκών με πλάτος } \leq 300 \text{ mm.}$$

$$k = 0.65 \text{ για κορμούς με } h \geq 800mm \text{ ή πέλματα πλακοδοκών με πλάτος } \geq 800 \text{ mm.}$$

k_c συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη φύση της κατανομής των τάσεων σε μία διατομή πριν τη ρηγμάτωση και τη μεταβολή του μοχλοβραχίονα:

– Για καθαρό εφελκυσμό:

$$k_c = 1.0$$

– Για κάμψη με ή χωρίς αξονικό φορτίο:

▪ Για ορθογωνικές διατομές και κορμούς διατομών κιβωτοειδούς μορφής και πλακοδοκούς:

$$k_c = 0.4 \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right] \leq 1$$

▪ Για πέλματα διατομών κυβοτοειδούς μορφής και πλακοδοκούς:

$$k_c = 0.9 \frac{F_{cr}}{A_{ct} f_{ct,eff}} \geq 0.5$$

όπου σ_c η ελάχιστη τάση στην εξεταζόμενη διατομή $\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh}$,

N_{Ed} η αξονική δύναμη στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (θλιπτική δύναμη θεωρείται θετική),

$$h^* \quad h^* = h \leq 1.0m$$

k_1 συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επιρροή των αξονικών δυνάμεων στην κατανομή των τάσεων:

– $k_1 = 1.5$ αν η N_{Ed} είναι θλιπτική

– $k_1 = \frac{2h^*}{3h}$ αν η N_{Ed} είναι εφελκυστική

F_{cr} η απόλυτη τιμή της εφελκυστικής δύναμης στην πλακοδοκό πριν τη ρηγμάτωση, εξαιτίας της ροπής που προκαλεί τη ρηγμάτωση.

Σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ2000:

$$A_s = k \cdot f_{ctm} \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

όπου A_{ct} εφελκυστική ζώνη σκυροδέματος στο στάδιο I,

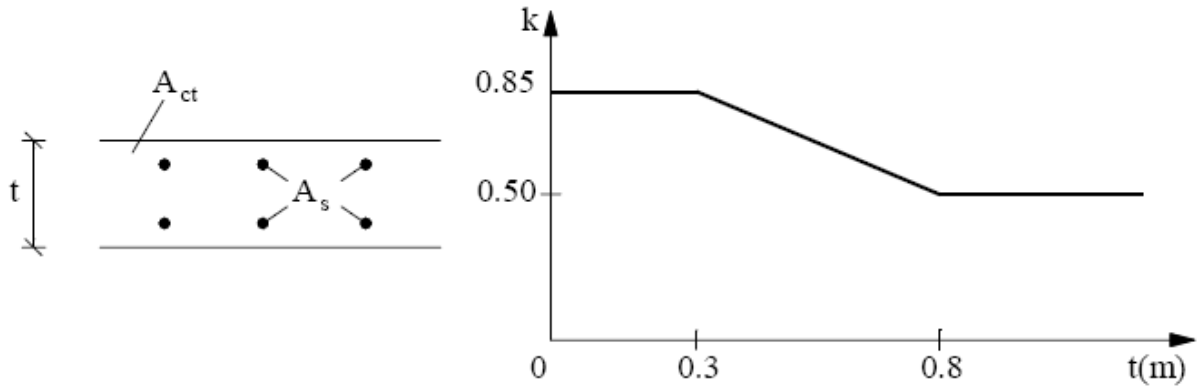
f_{ctm} μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,

σ_s τάση οπλισμού στο στάδιο II, η οποία προκύπτει από τον πίνακα 5 (Πιν. 15.1) συναρτήσει της εκλεγμένης διαμέτρου,

k συντελεστής συναρτήσει της εντατικής κατάστασης του στοιχείου:

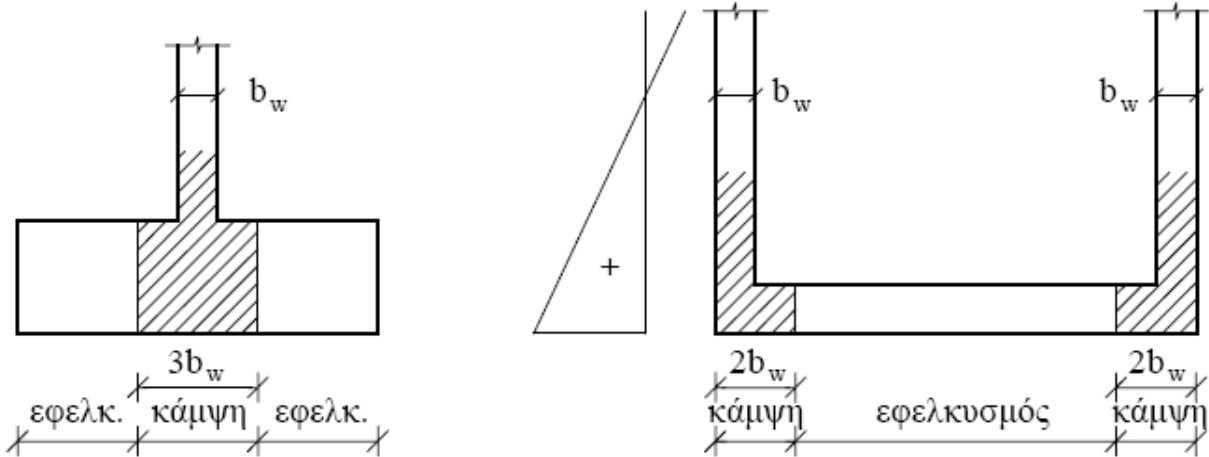
– για κάμψη $k = 0.5$,

– για καθαρό εφελκυσμό και ορθογωνική διατομή οι τιμές δίνονται από το παρακάτω σχήμα.



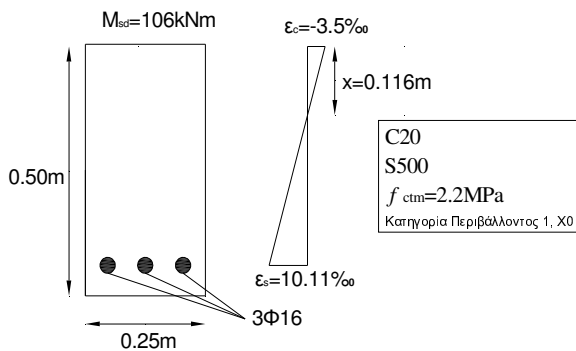
Σχήμα 1: Τιμές του συντελεστή k για καθαρό εφελκυσμό.

- Για εφελκόμενα πέλατα πλακοδοκών, σε πλάτος b_w εκατέρωθεν του κορμού, λαμβάνεται $k=0.5$. Για το υπόλοιπο τμήμα των πελμάτων ισχύουν τιμές όπως στο Σχήμα 20.



Σχήμα 2: Τιμές του k για εφελκόμενα πέλατα.

Παράδειγμα:



EC2:

Κάμψη: $\sigma_c = 0 \Rightarrow k_c = 0.4$

Με γραμμική παρεμβολή

$k = 0.86$

$t = h - x = 0.384m$

$A_{ct} = t \cdot b_w - A_{s1} = 954mm^2$

Για $\Phi 16$, X0: $\sigma_s = 280 MPa$

$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s = 2.58mm^2$

EΚΩΣ:

$t = h - x = 0.384m$

$k = 0.80$

$A_{ct} = t \cdot b_w - A_{s1} = 954mm^2$

Για $\Phi 16$, Κ.Π. 1:

$\sigma_s = 350 MPa$

$A_s = k \cdot f_{ctm} \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 4.80mm^2$

3.3. Έλεγχος ρηγμάτωσης χωρίς υπολογισμούς

Σε οπλισμένες ή προεντεταμένες πλάκες κτιρίων, υπό κάμψη χωρίς σημαντική εφελκυστική δύναμη, δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα για τον περιορισμό της ρηγμάτωσης όταν το συνολικό πάχος των πλακών δεν ξεπερνά τα 200 mm και έχουν τηρηθεί οι σχετικές απαιτήσεις. Όταν τοποθετείται ο ελάχιστος οπλισμός σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, τα εύρη των ρωγμών δεν αναμένεται να είναι υπερβολικά εφόσον:

- για ρηγμάτωση που οφείλεται κυρίως σε παρεμπόδιση των παραμορφώσεων οι διάμετροι των ράβδων δεν υπερβαίνουν τις τιμές του παρακάτω πίνακα, όπου η τάση του χάλυβα είναι η τιμή που υπολογίζεται αμέσως μετά τη ρηγμάτωση.
- για ρηγμάτωση που οφείλεται κυρίως σε φορτία τηρούνται οι απαιτήσεις των παρακάτω πινάκων. Η τάση του χάλυβα πρέπει να υπολογίζεται με παραδοχή ρηγματωμένης διατομής υπό τον κατάλληλο συνδυασμό δράσεων.

Για προεντεταμένο πριν τη διάστρωση σκυρόδεμα, όπου ο περιορισμός της ρηγμάτωσης εξασφαλίζεται κυρίως με τένοντες με άμεση συνάφεια, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω πίνακες λαμβάνοντας μια τάση ίση προς τη συνολική τάση χωρίς την προένταση. Για προεντεταμένο μετά τη σκλήρυνση σκυρόδεμα, όπου ο περιορισμός της ρηγμάτωσης εξασφαλίζεται κυρίως με συνήθη οπλισμό, οι πίνακες χρησιμοποιούνται συνεκτιμώντας την επιρροή της προέντασης στην υπολογιζόμενη για τον οπλισμό αυτόν τάση.

Πίνακας 3: Τιμές μέγιστης διαμέτρου για έλεγχο της ρηγμάτωσης σύμφωνα με τον EC2.

Τάση χάλυβα ² [MPa]	Μέγιστη διάμετρος ράβδων [mm]		
	w _k = 0,4 mm	w _k = 0,3 mm	w _k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Πίνακας 4: Τιμές μέγιστης απόστασης ράβδων για έλεγχο της ρηγμάτωσης σύμφωνα με τον EC2.

Τάση χάλυβα ² [MPa]	Μέγιστη απόσταση ράβδων [mm]		
	w _k =0,4 mm	w _k =0,3 mm	w _k =0,2 mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Σημειώσεις: 1. Οι τιμές του Πίνακα βασίζονται στις εξής παραδοχές:

$$c = 25\text{mm}; f_{ct,eff} = 2,9\text{MPa}; h_{cr} = 0,5; (h-d) = 0,1h; k_1 = 0,8; k_2 = 0,5; k_c = 0,4; k = 1,0;$$

$$k_t = 0,4 \text{ και } k' = 1,0$$

2. Υπό τους κατάλληλους συνδυασμούς δράσεων

Οι αντίστοιχοι πίνακες του ΕΚΩΣ είναι:

Πίνακας 5: Μέγιστες διαμέτροι ράβδων υψηλής συνάφειας για περιορισμό της ρηγμάτωσης σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ.

Τάση χάλυβα σ_s (MPa)	160	200	240	280	350	400	450
Κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 1, 2	36	36	28	25	16	10	6
Κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 3, 4	28	20	16	12	8	6	-

Για λείες ράβδους οι τιμές των διαμέτρων διαιρούνται δια 2.
 Ενδιάμεσες τιμές προσδιορίζονται με γραμμική παρεμβολή.
 Για πάχη δομικών στοιχείων $h > 300\text{mm}$ επιτρέπεται αύξηση των μεγίστων διαμέτρων κατά $h(\text{mm})/300$.

Πίνακας 6: Μέγιστες αποστάσεις ράβδων υψηλής συνάφειας για περιορισμό της ρηγμάτωσης σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ.

Τάση χάλυβα σ_s (MPa)	160	200	240	280	350
Κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 1 ή 2	250	250	250	200	150
Κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 3 ή 4	250	200	150	100	70

Για λείες ράβδους οι τιμές των αποστάσεων διαιρούνται δια 2.

Οι πίνακες των δύο κανονισμών έχουν παρόμοιο σκεπτικό σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού της μέγιστης διαμέτρου οπλισμών και της μέγιστης απόστασης των ράβδων, αλλά τα αποτελέσματα τους διαφέρουν σε αρκετές περιπτώσεις. Στον EC2 οι τιμές προκύπτουν συναρτήσει της τάσης του οπλισμού και της τιμής W_k ($W_k = W_{\max}$). Στον ΕΚΩΣ οι τιμές είναι συναρτήσει της κατηγορίας των συνθηκών περιβάλλοντος και της τάσης του οπλισμού.

Ενδεικτικά για $\sigma_s = 160\text{MPa}$

EC2 : $\max \varnothing = 25 - 40 \text{ mm}$ Απόσταση ράβδων 200 - 300 mm

ΕΚΩΣ : $\max \varnothing = 28 - 36 \text{ mm}$ Απόσταση ράβδων 250 mm

και για $\varnothing 16$ και Κατηγορία περιβάλλοντος X0 (EC2) και 1 (ΕΚΩΣ):

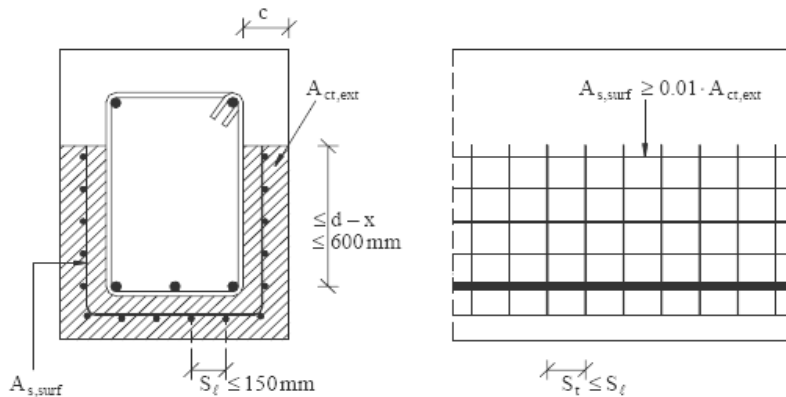
EC2 : $\sigma_s = 280\text{MPa}$

ΕΚΩΣ : $\sigma_s = 350\text{MPa}$

Επιδερμικός οπλισμός

Ο EC2 προβλέπει χρήση επιδερμικού οπλισμού μόνο σε περιπτώσεις διατομών με $h \geq 1000\text{mm}$ (μεγάλες διατομές), στις οποίες ο οπλισμός είναι συγκεντρωμένος σε μικρό τμήμα της διατομής. Η χρήση επιδερμικού οπλισμού ενδείκνυται για τον έλεγχο των ρωγμών. Το εμβαδόν του απαιτούμενου επιδερμικού οπλισμού προκύπτει από τη σχέση $A_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s$ θέτοντας $k = 0.5$ και $\sigma_s = f_{yk}$.

Σε αντίθεση, ο ΕΚΩΣ προβλέπει την τοποθέτηση επιδερμικού οπλισμού ανεξαρτήτως των διαστάσεων της διατομής, αλλά στις περιπτώσεις που το πάχος επικάλυψης του σκυροδέματος είναι $c > 50\text{mm}$. Το απαιτούμενο εμβαδόν πρέπει να είναι $A_{s,surf} \geq 0.01 A_{ct,ext}$, $A_{ct,ext}$ το εμβαδόν της εφελκόμενης επικάλυψης σκυροδέματος. Η διάταξη του επιδερμικού οπλισμού παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3: Επιδερμικός οπλισμός (ΕΚΩΣ).

3.4. Αναλυτικός υπολογισμός του εύρους ρωγμής

Το εύρος ρωγμής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

όπου $s_{r,max}$ μέγιστη απόσταση των ρωγμών,

ε_{sm} η μέση ανηγμένη παραμόρφωση του οπλισμού υπό τον κατάλληλο συνδυασμό δράσεων, περιλαμβάνοντας και την επιρροή των επιβεβλημένων παραμορφώσεων καθώς και της εφελκυστικής συμβολής στη δυσκαμψία. Λαμβάνεται υπόψη μόνο η πρόσθετη τάση εφελκυσμού μετά από την κατάσταση μηδενικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην ίδια στάθμη,

ε_{cm} η μέση παραμόρφωση του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών.

$$\bullet \quad \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + a_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

όπου σ_s η τάση στον εφελκόμενο οπλισμό, η οποία προκύπτει με την παραδοχή ρηγματωμένης διατομής. Σε στοιχεία με προένταση πριν τη διάστρωση μπορεί να αντικαθίσταται από τη μεταβολή της τάσης στους τένοντες προέντασης σε σχέση με την κατάσταση μηδενικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην ίδια στάθμη,

a_e ο λόγος E_s / E_{cm}

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_p}{A_{eff}}$$

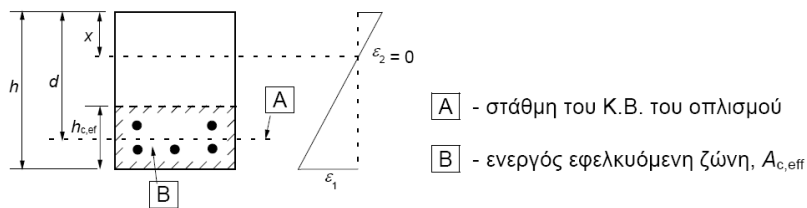
$A_{c,eff}$ η περιοχή η οποία εφελκύεται,

ξ_1 συντελεστής,

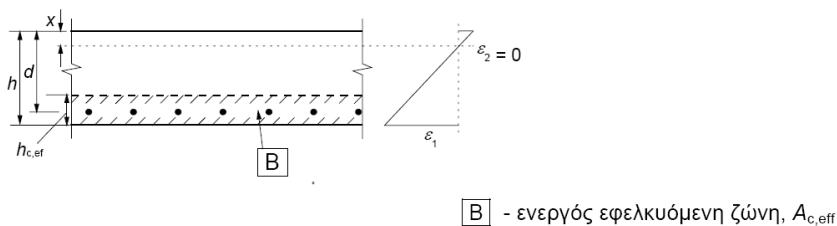
k_t συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από διάρκεια της φόρτισης

- $k_t = 0.6$ για βραχυχρόνια φόρτιση

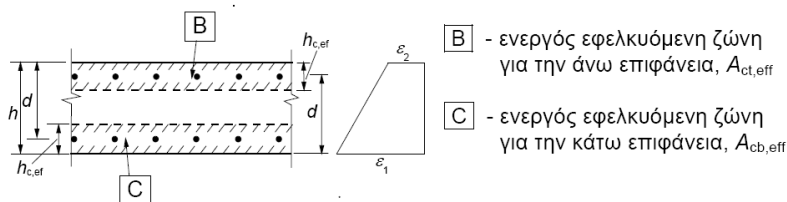
- $k_t = 0.4$ για μακροχρόνια φόρτιση.



a) Δοκός



b) Πλάκα



c) Στοιχείο υπό εφελκισμό

Σχήμα 4: Ενεργός εφελκόμενη περιοχή (τυπικές περιπτώσεις)

- $s_{r,max} = 3.4c + 0.425k_1k_2\phi / \rho_{p,eff}$

όπου: c επικάλυψη της διατομής,

ϕ διάμετρος του οπλισμού,

k_1 συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες του δεσμού των οπλισμών,

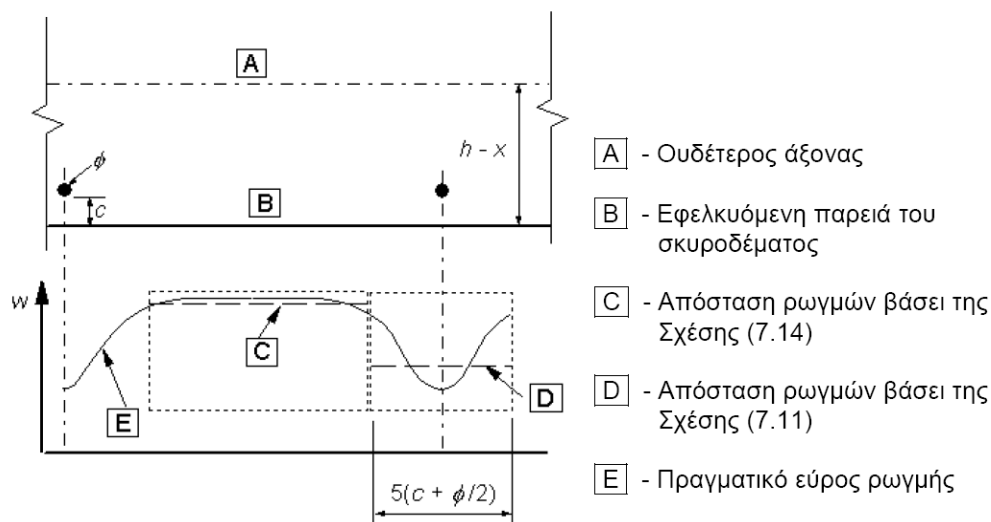
- $k_1 = 0.8$ για ράβδους με νευρώσεις

- $k_1 = 1.6$ για λείες ράβδους

k_2 συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη την κατανομή των τάσεων,

- $k_2 = 0.5$ για κάμψη

- $k_2 = 1.0$ για καθαρό εφελκυσμό.



Σχήμα 5: Εύρος ρωγμής, w , στην επιφάνεια του σκυροδέματος, συναρτήσει της απόστασης από τη ράβδο

Σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ:

$$W_k \cong W_m (1 + \delta \cdot t) \cong 1.75W_m$$

όπου δ η διασπορά, ανηγμένη τυπική απόκλιση ($\delta = s / W_m \cong 0.45$),

t ο συντελεστής κατανομής, για $\rho = 2.05\%$ ($t \cong 1.625$).

Το πιθανό μέσο άνοιγμα, δηλαδή το εύρος της εγκάρσιας ρωγμής στην εξωτερική παρειά, μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$W_m \cong s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm}$$

όπου s_{rm} η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων ρωγμών, δίνεται από τον τύπο:

$$s_{rm} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r}, \quad \rho_r = \frac{A_r}{A_{ct}} \quad \text{για γραμμικά στοιχεία}$$

$$s_{rm} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_r} + 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) \quad \text{για πλάκες}$$

K_1 συντελεστής για τις συνθήκες συνάφειας:

- $K_1 = 0.4$ για ράβδους με νευρώσεις
- $K_1 = 0.8$ για λείες ράβδους

K_2 συντελεστής για τις συνθήκες φόρτισης:

- $K_2 = 1/8$ για καθαρή κάμψη
- $K_2 = 1/4$ για καθαρό εφελκυσμό

ϕ, s η διάμετρος και η απόσταση των ράβδων οπλισμού (σε mm, με $s \leq 15\phi$),

c η επικάλυψη (σε mm),

A_r, ρ_r η διατομή και το ποσοστό του οπλισμού μέσα στη ζώνη ενεργού επιρροής,

A_{ct} το εμβαδόν της διατομής της ζώνης ενεργού επιρροής του εφελκυσμένου οπλισμού,

ε_{sm} η μέση ανηγμένη παραμόρφωση των ράβδων του οπλισμού ανάμεσα σε δύο διαδοχικές εγκάρσιες τομές, υπολογίζεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{sm} \cong \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \zeta, \quad \zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

σ_s η μέση τάση του οπλισμού για ράβδους χωρίς σκυρόδεμα,

ζ συντελεστής βαρύτητας κατανομής, ο οποίος εκφράζει την ανακούφιση που οφείλεται στη συνάφεια και στην συμβολή του εφελκυσμένου σκυροδέματος στην ανάληψη εφελκυστικών τάσεων.

4. Περιορισμός των παραμορφώσεων

4.1. Αρχές

Με τον έλεγχο των παραμορφώσεων εξασφαλίζεται η χρήση για την οποία προβλέπεται το έργο, αποφεύγονται οι βλάβες και προβλέπονται στη φάση της κατασκευής αρνητικά βέλη κάμψης. Γενικά αν δεν ορίζονται αυστηρότερα κριτήρια, ο έλεγχος των παραμορφώσεων περιορίζεται σε έλεγχο των βελών κάμψης.

Η παραμόρφωση ενός στοιχείου ή ενός φορέα δεν πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επηρεάζει δυσμενώς την απρόσκοπτη λειτουργία ή την εμφάνισή του. Πρέπει να καθορίζονται κατάλληλες τιμές για τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση της κατασκευής, των τελειωμάτων, των διαχωριστικών και του τρόπου στερέωσής τους, καθώς

και τη λειτουργία της κατασκευής. Οι παραμορφώσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν εκείνες που μπορεί να αναληφθούν από άλλα στοιχεία συνδεδεμένα με το φορέα, όπως τα διαχωριστικά, οι υαλοπίνακες, οι εξωτερικές επενδύσεις, οι εγκαταστάσεις, και τα τελειώματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χρειάζεται να τεθούν περιορισμοί για την εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας μηχανών ή συσκευών που εδράζονται επί του φορέα, ή για την αποφυγή δημιουργίας λιμναζόντων υδάτων σε επίπεδες στέγες.

Τόσο στον EC2 όσο και στον ΕΚΩΣ τα υπολογιζόμενα βέλη κάμψης οριζόντιων δομικών στοιχείων (δοκού, πλάκας, ή προβόλου) υπό τα οιονεί-μόνιμα φορτία δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1/250 του ανοίγματος (η βύθιση αυτή μετράται ως προς τις στηρίξεις). Για τη μείωση ή και το μηδενισμό των βελών κάμψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη υπερύψωση, αλλά οιαδήποτε προς τα πάνω κλίση που θα δοθεί στον ξυλότυπο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/250 του ανοίγματος. Για τη βύθιση μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής το όριο 1/500 είναι, υπό κανονικές συνθήκες, κατάλληλη τιμή για οιονεί-μόνιμα φορτία. Μπορεί να τεθούν και διαφορετικά όρια, σε συνάρτηση με την ευαισθησία των γειτονικών μερών.

4.2. Απαλλαγή από τον έλεγχο των βελών κάμψης

Ο έλεγχος των βελών κάμψης δεν απαιτείται αν ο λόγος ανοίγματος προς στατικού ύψους l/d δεν υπερβαίνει την παρακάτω οριακή τιμή:

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1.5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3.2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{αν } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1.5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{αν } \rho > \rho_0$$

όπου K συντελεστής που εξαρτάται από το δομικό σύστημα,

ρ_0 ποσοστό οπλισμού αναφοράς: $\rho_0 = \sqrt{f_{ck}} \cdot 10^{-3}$

ρ το απαιτούμενο ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού για την παραλαβή της ροπής λόγω φορτίων σχεδιασμού στο μέσο του ανοίγματος (στη στήριξη σε προβόλους),

ρ' το απαιτούμενο ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού για την παραλαβή της ροπής λόγω φορτίων σχεδιασμού στο μέσο του ανοίγματος (στη στήριξη σε προβόλους),

f_{ck} η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa.

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν προκύψει από την παραδοχή ότι η τάση του χάλυβα σε μία ρηγματωμένη διατομή στο μέσον του ανοίγματος δοκού ή πλάκας είναι 310 MPa (ανταποκρίνεται σε ποιότητα χάλυβα S500). Όταν χρησιμοποιούνται άλλα επίπεδα τάσεων, θα πρέπει οι τιμές να πολλαπλασιάζονται με $310/\sigma_s$, ή πιο συντηρητικά από τη σχέση:

$$310/\sigma_s = 500 / (f_{yk} A_{s,req} / A_{s,prov})$$

όπου σ_s η τάση του εφελκόμενου χάλυβα υπό φορτία σχεδιασμού για ΟΚΛ,

$A_{s,prov}$ το εμβαδόν του οπλισμού που τοποθετείται στη διατομή,

$A_{s,req}$ το εμβαδόν του οπλισμού που απαιτείται στην διατομή (σύμφωνα με την ΟΚΑ).

Σε διατομές με πέλατα, όπου ο λόγος του πλάτους του πέλατατος προς το πάχος του κορμού υπερβαίνει το 3, οι τιμές του l/d πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί 0.8. Επίσης, σε δοκούς ή πλάκες, πλην των μυκητοειδών πλακών, με ανοίγματα πάνω από 7 m, που φέρουν διαχωριστικά ευαίσθητα σε βλάβες από υπερβολική βύθιση, οι τιμές του l/d πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί $7/l_{eff}$ (l_{eff} το θεωρητικό άνοιγμα σε m). Ακόμα, σε μυκητοειδείς πλάκες, των οποίων το άνοιγμα υπερβαίνει τα 8.5 m και οι οποίες φέρουν διαχωριστικά ευαίσθητα σε βλάβες από υπερβολική βύθιση, οι τιμές του l/d πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί $8.5/l_{eff}$.

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται ενδεικτικές τιμές του λόγου l/d για ελαφρώς και βαριά οπλισμένες διατομές όπως φαίνεται στο Πιν.13.

Δομικό σύστημα	K	Σκυρόδεμα υπό υψηλή τάση $\rho = 1,5\%$	Σκυρόδεμα υπό χαμηλή τάση $\rho = 0,5\%$
Αμφιέριστη δοκός ή πλάκα κατά μία ή δύο διευθύνσεις	1,0	14	20
Ακραίο άνοιγμα συνεχούς δοκού ή πλάκας κατά μία διεύθυνση, ή πλάκας κατά δύο διευθύνσεις συνεχούς καταμήκος μιας επιμήκους πλευράς	1,3	18	26
Μεσαίο άνοιγμα δοκού ή πλάκας κατά μία ή δύο διευθύνσεις	1,5	20	30
Πλάκα επί υποστυλωμάτων χωρίς δοκούς (μυκητοειδής) (έλεγχος βάσει του μεγαλύτερου ανοίγματος)	1,2	17	24
Πρόβολος	0,4	6	8

Σημείωση 1: Οι τιμές που δίνονται έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να είναι ενγένη συντηρητικές, και ο υπολογισμός μπορεί συχνά να δείχνει ότι είναι δυνατή η χρήση μικρότερου πάχους στοιχείου.
Σημείωση 2: Σε πλάκες κατά δύο διευθύνσεις ο έλεγχος γίνεται βάσει του μικρότερου ανοίγματος. Σε μυκητοειδείς πλάκες, βάσει του μεγαλύτερου ανοίγματος.
Σημείωση 3: Τα όρια που δίνονται για μυκητοειδείς πλάκες αντιστοιχούν σε περιορισμό λιγότερο αυστηρό από εκείνον της βύθισης κατά 1/250 του ανοίγματος σε σχέση με τα υποστυλώματα. Η εμπειρία δείχνει ότι αυτό είναι ικανοποιητικό.

Πίνακας 7: Βασικές τιμές του λόγου l/d για στοιχεία χωρίς αξονική θλίψη.

Στον ΕΚΩΣ, με παρόμοιο τρόπο, ο έλεγχος των βελών κάμψης δεν είναι απαραίτητος όταν τηρούνται τα παρακάτω όρια για την καμπτική λυγηρότητα $\alpha \cdot l/d$:

- Αμφιέριστες και τετραέριστες πλάκες: $\alpha \cdot l/d \leq 30$ (με νευρώσεις: $\alpha \cdot l/d \leq 25$),
- Δοκοί: $\alpha \cdot l/d \leq 20$,
- Δοκούς και πλάκες με ευαίσθητα διαχωριστικά (εκτός αν λαμβάνονται κατάλληλα κατασκευαστικά μέτρα): $(\alpha \cdot l)^2/d \leq 150$,

όπου α συντελεστής που εξαρτάται από το δομικό σύστημα του φορέα.

4.3. Αναλυτικός υπολογισμός των παραμορφώσεων - έλεγχος

Σε περιπτώσεις που ο υπολογιστικός έλεγχος των παραμορφώσεων κρίνεται απαραίτητος, οι παραμορφώσεις θα υπολογίζονται για συνθήκες φόρτισης κατάλληλες για τον σκοπό του ελέγχου. Στοιχεία τα οποία δεν αναμένεται να υποβληθούν σε μια στάθμη φόρτισης ανώτερη εκείνης που θα προκαλούσε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος σε οποιαδήποτε θέση του στοιχείου θα θεωρούνται αρηγμάτωτα. Στοιχεία τα οποία αναμένεται να ρηγματωθούν, αλλά όχι πλήρως, θα συμπεριφερθούν με έναν τρόπο ενδιάμεσο μεταξύ της αρηγμάτωσης και της ρηγματωμένης κατάστασης και, για στοιχεία που υπόκεινται σε κάμψη, μια επαρκώς ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους δίνεται από τη σχέση:

$$a = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I$$

όπου: α το θεωρούμενο μέγεθος παραμόρφωσης (παραμόρφωση, καμπυλότητα, στροφή),
 α_I, α_{II} οι τιμές του μεγέθους α που υπολογίζονται για αρηγμάτωτες και πλήρως ρηγματωμένες συνθήκες (Στάδια I και II), αντίστοιχα,

ζ συντελεστής κατανομής για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της εφελκυστικής συμβολής στη δυσκαμψία σε μια διατομή και δίνεται από τη σχέση:

$$\zeta = 0 \text{ για } \sigma_s < \sigma_{sr}$$

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \text{ για } \sigma_s < \sigma_{sr}$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

β_1 συντελεστής για τις συνθήκες συνάφειας:

(μόνο στον ΕΚΩΣ)
(μόνο στον ΕΚΩΣ)

- $\beta_1 = 1.0$ για ράβδους με νευρώσεις
- $\beta_1 = 0.5$ για λείες ράβδους

β_2 συντελεστής για τις συνθήκες φόρτισης (β στον EC2):

- $\beta_2 = 1.0$ για μεμονωμένη και βραχυχρόνια φόρτιση
- $\beta_2 = 0.5$ για επαναλαμβανόμενη ή μακροχρόνια φόρτιση

σ_s η τάση των ράβδων του οπλισμού με την παραδοχή ρηγματωμένης διατομής,

σ_{sr} η τάση των ράβδων του οπλισμού με την παραδοχή ρηγματωμένης διατομής για τη φόρτιση που προκαλεί την πρώτη ρηγμάτωση.