

ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΚΑΙ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8

ΚΟΥΤΡΟΜΑΝΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

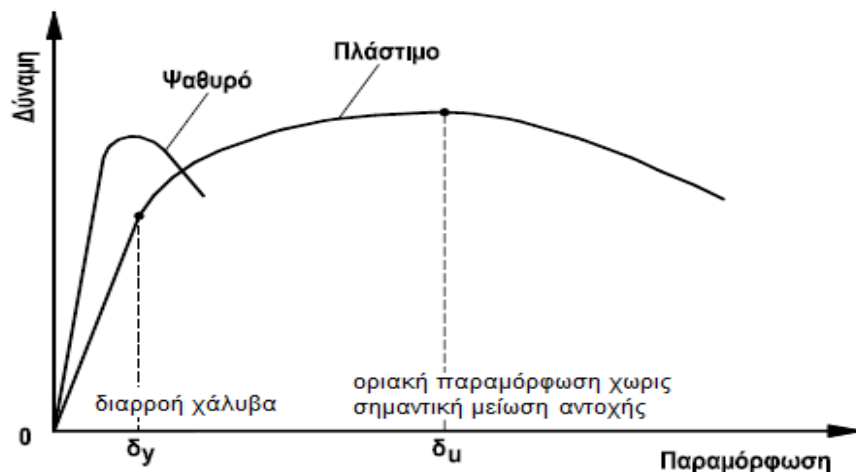
Προπτυχιακή Φοιτήτρια Π.Π., civ7097@upnet.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας υφιστάμενων κατακόρυφων ραβδόμορφων στοιχείων μέσω της χρήσης των δύο διαθέσιμων κανονισμών, ΚΑΝ.ΕΠΕ και Ευρωκώδικα. Παρουσιάζονται οι τρόποι που προτείνονται στους κανονισμούς για την αύξηση της πλαστιμότητας και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο κανονισμών όσον αφορά τα σύνθετα υλικά. Επιπλέον, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τη χρήση των σχέσεων που ισχύουν στο ΚΑΝ.ΕΠΕ (2013) και των υπό δημοσίευση σχέσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ (2016) για να παρατηρηθούν οι τυχόν διαφορές. Όλα τα ανωτέρω πραγματοποιούνται στα υποστρώματα υφιστάμενου κτιρίου κατασκευασμένου το 1975, το οποίο αναλύεται μέσω του προγράμματος SAP 2000, για την εύρεση της καταπόνησής τους. Προσδιορίζεται η υπάρχουσα πλαστιμότητά τους μέσω των κλειστών τύπων του ΚΑΝ.ΕΠΕ και εν τέλει εφαρμόζεται η ενίσχυση όπου απαιτείται.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για μέλη και κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, πλαστιμότητα είναι η ικανότητά τους να παραμορφώνονται πέραν του ορίου διαρροής, δηλαδή να αποκτούν μεγάλες σχετικά παραμορφώσεις, χωρίς μείωση της αντοχής τους. Ένα ψαθυρό υλικό ή μια ψαθυρή κατασκευή αστοχούν απότομα, δηλαδή χωρίς προειδοποίηση της επικείμενης αστοχίας, μόλις αναλάβουν το μέγιστο φορτίο τους.



Σχήμα 1. Τυπικά διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης μελών με πλαστική ή ψαθυρή συμπεριφορά [7]

Στο Σχήμα 1 δ_y είναι η παραμόρφωση διαρροής που αντιστοιχεί στη διαρροή του χάλυβα και δ_u είναι η οριακή παραμόρφωση που αναπτύσσεται χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής. Η δύναμη μπορεί να είναι φορτίο, ροπή ή τάση, ενώ η παραμόρφωση μπορεί να είναι επιμήκυνση, καμπυλότητα, βέλος ή στροφή. Ο πιο συνήθης τρόπος ορισμού-μετρήσεως της πλαστιμότητας είναι ο δείκτης πλαστιμότητας μ , ο οποίος προσδιορίζεται ως ο λόγος της

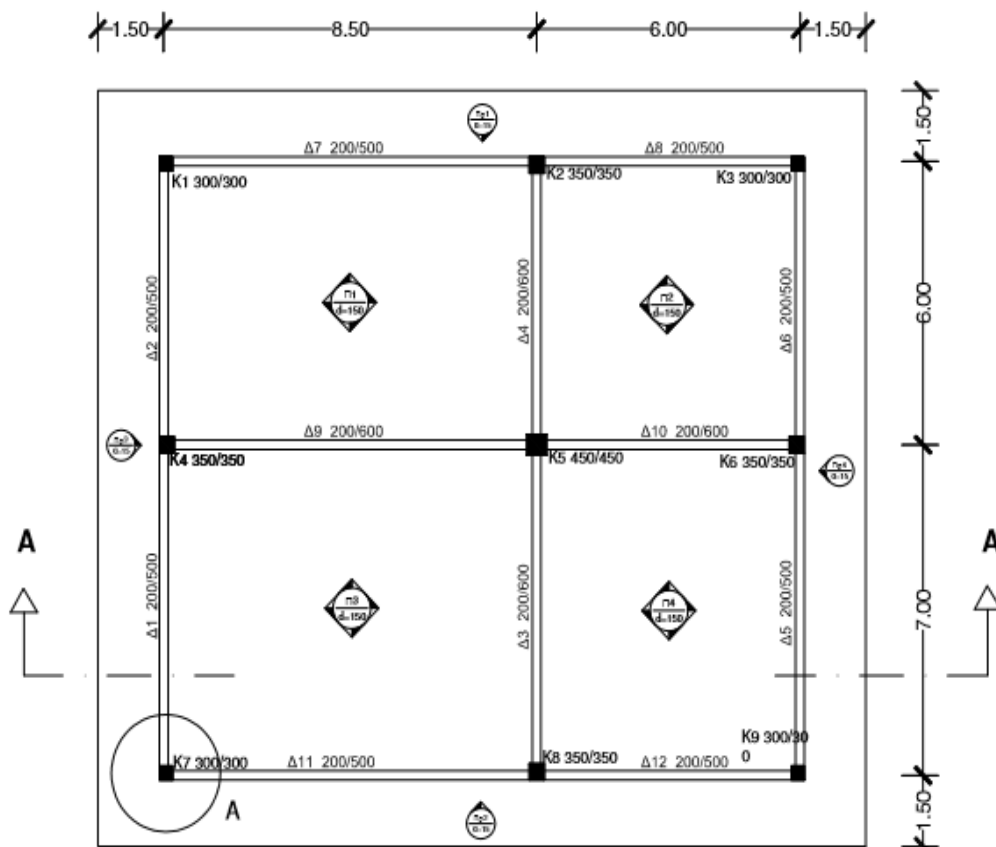
παραμόρφωσης στην αστοχία προς τη παραμόρφωση στη διαρροή. Διάφορες μορφές του είναι οι εξής : $\mu\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$, $\mu\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$, $\mu\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$.

Η σπουδαιότητα της πλαστιμότητας σε μια κατασκευή που υπόκειται σε σεισμικά φορτία είναι προφανής από τη στιγμή που είναι απαραίτητη για την ελαστοπλαστική απόκριση της κατασκευής καθώς και την ανακατανομή των φορτίων, με αποτέλεσμα την αποφυγή της κατάρρευσης αλλά κυρίως τη προστασία της ανθρώπινης ζωής. Η εισαγωγή διατάξεων για την επίτευξη πλαστιμότητας στους ισχύοντες Αντισεισμικούς Κανονισμούς έγινε ουσιαστικά μετά την τροποποίηση των παλαιότερων κανονισμών που ακολούθησε τους καταστρεπτικούς σεισμούς της δεκαετίας του '80. Έτσι λοιπόν υφιστάμενες κατασκευές που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τους παλαιούς κανονισμούς δεν έχουν αυτό το βασικό πλέον στοιχείο, συνεπώς χρήζουν ενίσχυσης έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους. Για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ισχύοντες κανονισμοί, ΚΑΝ.ΕΠΕ (Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων) και Ευρωκώδικας.

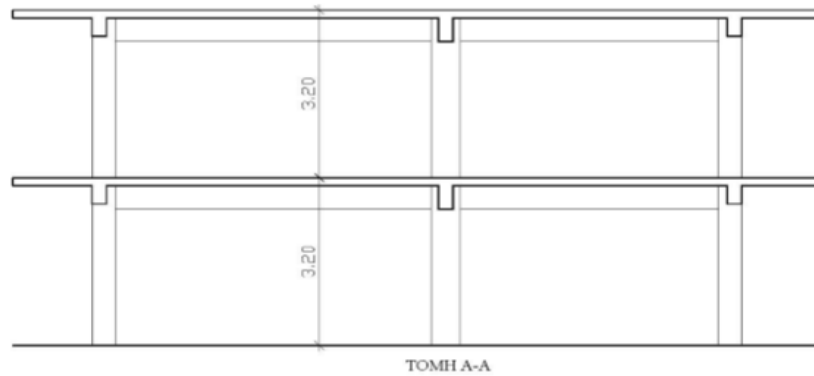
Κατά τους κανονισμούς, η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας ραβδόμορφων στοιχείων επιτυγχάνεται μέσω της περίσφιξης τους με κατάλληλη ποσότητα υλικού. Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ η περίσφιξη μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με χαλύβδινα στοιχεία είτε μέσω σύνθετων υλικών, ενώ ο Ευρωκώδικας καλύπτει μόνο τη χρήση σύνθετων υλικών.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ

Το κτίριο για το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση είναι μια διάφορη οικοδομή κατασκευασμένη το 1975. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η κάτοψη και η τομή του κτιρίου.



Σχήμα 2. Κάτοψη κτιρίου



Σχήμα 3. Τομή κτιρίου

Το κτίριο θεωρείται ότι βρίσκεται σε περιοχή ζώνης σεισμικότητας II, με κατηγορία εδάφους B και σπουδαιότητα συνήθη. Επίσης, θεωρείται σκυρόδεμα με $f_{cm} = 19\text{MPa}$ και $f_{ck} = 14\text{MPa}$, χάλυβας με $E = 200\text{GPa}$, $f_{ym} = 460\text{MPa}$ και $f_{yk} = 410\text{MPa}$ και ότι η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (ΣΑΔ) είναι ικανοποιητική. Οι πλάκες έχουν πάχος $h_f = 150\text{mm}$ και είναι οπλισμένες σε δύο διευθύνσεις με $\Phi 8/150$. Οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων είναι: στα γωνιακά $4\Phi 20$, στα περιμετρικά (που δεν είναι γωνιακά) $4\Phi 18$ και στο κεντρικό $8\Phi 16$. Οι περιμετρικές δοκοί είναι οπλισμένες στο κάτω πέλμα με $4\Phi 14$ στα ανοίγματα, από τα οποία τα μισά κάμπτονται στις στηρίξεις, όπου υπάρχουν επιπλέον $2\Phi 14$. Οι εσωτερικές δοκοί είναι οπλισμένες στο κάτω πέλμα με $4\Phi 16$ στα ανοίγματα, από τα οποία τα μισά κάμπτονται στις στηρίξεις, όπου υπάρχουν επιπλέον $2\Phi 18$. Περιμετρικά σε κάθε όροφο υπάρχει μπατική τοιχοποιία με εκτιμώμενο φαινόμενο βάρος $3,6\text{ kN/m}^2$ επιφάνειας όψης και εσωτερικά δρομική τοιχοποιία με φαινόμενο βάρος $2,1\text{ kN/m}^2$. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μείωση των φορτίων των τοιχοπληρώσεων λόγω των ανοιγμάτων, τα φαινόμενα βάρη θεωρούνται μειωμένα κατά 50% και 35% αντίστοιχα. Επί των περιμετρικών δοκών της οροφής υπάρχει μπατική τοιχοποιία ύψους 1,20m.

Το κτίριο προσομοιώθηκε στο SAP 2000 ως σύστημα δοκών και υποστυλωμάτων. Θεωρήθηκε ότι η επιρροή της τοιχοποιίας μπορεί να αγνοηθεί και ότι μπορεί να εφαρμοστεί ελαστική ανάλυση. Οι δοκοί προσομοιώθηκαν ως πλακοδοκοί (για αναλυτικούς υπολογισμούς βλ. Παράρτημα).

Εισαγωγή φορτίων

Για την κατανομή των κατακόρυφων φορτίων των πλακών στις δοκούς χρησιμοποιήθηκε η λογική των επιφανειών επιρροής, οι οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες περιμετρικής έδρασης της κάθε πλάκας (ενδεικτική εικόνα υπάρχει στον ΕΚΩΣ 2000 §9.1.5 Σχήμα 9.1). Η κατανομημένη φόρτιση που προκύπτει στην κάθε δοκό από τα φορτία της πλάκας έχει τριγωνική ή τραπεζοειδή μορφή (Πάκτωση – πάκτωση ή απλή έδραση – απλή έδραση: $45^\circ - 45^\circ$ και πάκτωση – έδραση: $60^\circ - 30^\circ$). Τα μόνιμα φορτία των πλακών είναι τα εξής:

- I.B. πλακών : $g_{i.p.} = \gamma_{σκ} * 0,15 = 3,75\text{ kN/m}^2$
- Επίστρωσης : $g_{επ} = 1,5\text{ kN/m}^2$

Για τον προσδιορισμό των μεταβλητών δράσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική η κατάταξη του φορέα στην κατάλληλη κατηγορία χρήσης (EC1 §6.3.1.1 Table 6.1). Βάσει των κατηγοριών αυτών, είναι δυνατή η χρήση τιμών για τα επιβαλλόμενα φορτία σε πλάκες (EC1

§6.3.1.2 Table 6.2, λαμβάνοντας υπόψη τις τροποποιήσεις που γίνονται στο Εθνικό Προσάρτημα).

Για χώρους κατοικιών:

- Δάπεδα: $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$
- Μπαλκόνια: $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$

Σημείωση: Οι πλάκες του δώματος είναι μη βατές, οπότε εκεί δεν θα υπάρχουν κινητά φορτία. Οι στηρίξεις μεταξύ των πλακών Π1-Π2 , Π1-Π3 , Π2-Π4 , Π3-Π4 θεωρούνται πακτώσεις λόγω των περίπου ίσων ανοιγμάτων, ενώ οι στηρίξεις όλων των πλακών Π1, Π2, Π3, Π4 στους προβόλους Πρ1, Πρ2, Πρ3, Πρ4 θεωρούνται εδράσεις λόγω της μεγάλης διαφοράς των ανοιγμάτων τους.

Εισαγωγή φάσματος

Για τον φορέα του παραδείγματος λαμβάνεται συντελεστής κάτω ορίου φάσματος $\beta = 0,2$ (EC8 §3.2.2.5(4)P του Εθνικού Προσαρτήματος και συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma_I = 1,0$ για κατηγορία σπουδαιότητας II (συνήθη κτίρια από EC8 §4.2.5 (4) με παραπομπή στο §4.2.5(5)P του Εθνικού Προσαρτήματος). Η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού λαμβάνεται σύμφωνα με τη σχέση: $\alpha_g = \gamma_I \alpha_{Gr}$, όπου η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση για Σεισμική Ζώνη II ισούται με $0,24g$ (EC8 Πίνακας ΕΠ.1 του Εθνικού Προσαρτήματος).

Αποτελέσματα ανάλυσης

StepType	StepNum	Period	Frequency
Text	Unitless	Sec	Cyc/sec
Mode	1	0,334926	2,9857
Mode	2	0,304665	3,2823
Mode	3	0,292849	3,4147
Mode	4	0,106017	9,4325
Mode	5	0,095685	10,451
Mode	6	0,093125	10,738
Mode	7	0,034076	29,347
Mode	8	0,033082	30,228
Mode	9	0,032148	31,106
Mode	10	0,031582	31,664
Mode	11	0,031218	32,033
Mode	12	0,029831	33,522

Πίνακας 1. Ιδιοπερίοδοι/Ιδιοσυχνότητες

TABLE: Element Forces - Frames

Frame	P
Text	KN
2-K7ισ	-517,401
3-K7ορ	-195,197
4-K1ισ	-487,994
5-K1ορ	-185,271
6-K9ισ	-396,944
7-K9ορ	-149,091
8-K3ισ	-348,298
9-K3ορ	-130,092
10-K4ισ	-835,325
11-K4ορ	-321,823
12-K8ισ	-794,119
13-K8ορ	-304,346
14-K6ισ	-645,111
15-K6ορ	-245,896
16-K5ισ	-1064,81
17-K5ορ	-424,201
41-K2ισ	-739,28
42-K2ορ	-285,427

Πίνακας 2. Αξονικά φορτία υποστυλωμάτων

Ιδιοπερίοδος κατασκευής: $T=0,30\text{sec}$ ($2^{\text{η}}$ ιδιομορφή περί x)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το σεισμικό συνδυασμό $G+0,3Q+E_X$ ($q=1$) παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

3. ΔΙΑΤΟΜΗ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Προσδιορισμός διαθέσιμης πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Η διαθέσιμη πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων της κατασκευής προσδιορίζεται μέσω κλειστών τύπων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ο προσδιορισμός γίνεται μέσω του υπολογιστικού φύλλου

Excel Β.Γ.Μώκος [6] και έτσι προκύπτουν οι παρακάτω διαθέσιμες τιμές πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων:

Υποσύλωμα	μθ
K1 (ισογείου)	3,21
K1 (ορόφου)	3,42
K2 (ισογείου)	3,43
K2 (ορόφου)	3,90
K3 (ισογείου)	3,16
K3 (ορόφου)	3,63
K4 (ισογείου)	3,47
K4 (ορόφου)	3,78
K5 (ισογείου)	2,95
K5 (ορόφου)	4,11
K6 (ισογείου)	3,37
K6 (ορόφου)	4,02
K7 (ισογείου)	3,22
K7 (ορόφου)	3,38
K8 (ισογείου)	3,45
K8 (ορόφου)	3,84
K9 (ισογείου)	3,18
K9 (ορόφου)	3,55

Πίνακας 3. Διαθέσιμοι δείκτες πλαστιμότητας υποστυλωμάτων σε όρους γωνιών στροφής χορδής

Σημειώνεται ότι ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους γωνιών στροφής συνδέεται με το δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων με τις εξής σχέσεις (ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.2γ(ii)):

$$\mu_{\theta} = \mu_{\delta} \frac{H_{op}}{H_{tot}} \text{ αν υπάρχει περίπτωση σχηματισμού «μαλακού» ορόφου} \quad (1)$$

$$\mu_{\theta} = \mu_{\delta} \text{ αν δεν υπάρχει περίπτωση σχηματισμού «μαλακού» ορόφου} \quad (2)$$

Η κατασκευή είναι κανονική καθ' ύψος με ομοιόμορφη κατανομή και διασπορά των αντιστάσεων, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει η σχέση (2).

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι ενισχύσεις εφαρμόζονται έτσι ώστε να επιτευχθεί μια στοχευόμενη τιμή ενιαίου (καθολικού) δείκτη συμπεριφοράς q όπως αυτή προβλέπεται από τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του εν λόγω συντελεστή συμπεριφοράς. Εν συνεχεία, προσδιορίζεται ο παράγοντας υπεραντοχής έτσι ώστε να βρεθεί ο απαιτούμενος δείκτης συμπεριφοράς q_{π} . Για την εφαρμογή των ενισχύσεων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων μ_{δ} καθώς και των δεικτών ανεπάρκειας λ των υποστυλωμάτων.

Προσδιορισμός ενιαίου (καθολικού) δείκτη συμπεριφοράς

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής του ενιαίου (καθολικού) συντελεστή συμπεριφοράς q , βάσει του EC8§5.2.2.2, θα πρέπει πρώτα το στατικό σύστημα να κατηγοριοποιηθεί σε έναν από τους τύπους που αναφέρονται στην §5.1.2. Είναι σαφές πως ο φορέας χαρακτηρίζεται ως διπλό σύστημα και στις 2 διευθύνσεις, X και Y. (§5.1.2(1): διπλό σύστημα είναι το στατικό σύστημα όπου τα κατακόρυφα φορτία αναλαμβάνονται κυρίως από ένα χωρικό πλαίσιο και η αντοχή σε οριζόντια φορτία παρέχεται εν μέρει από το

πλαισιωτό σύστημα και εν μέρει από φέροντα τοιχώματα, συζευγμένα ή μη). Η σχέση υπολογισμού του συντελεστή συμπεριφοράς δίνεται ως εξής (EC8§5.2.2.2):

$$q = q_0 k_w \geq 1.5 \quad (3)$$

όπου q_0 : είναι η βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς, που εξαρτάται από το τύπο του στατικού συστήματος και από τη κανονικότητά του σε όψη

k_w : είναι ο συντελεστής που εκφράζει την επικρατούσα μορφή αστοχίας σε στατικά συστήματα με τοιχώματα.

Η τιμή του q_0 λαμβάνεται από τον πίνακα 5.1 του EC8§5.2.2.2(2). Για κατηγορία πλαστιμότητας μέση (ΚΠΜ) του φέροντος οργανισμού μπορεί να ληφθεί ως $q_0 = 3 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$ και για κατηγορία πλαστιμότητας υψηλή (ΚΠΥ) ως $q_0 = 4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$. Το κτίριο ικανοποιεί τα κριτήρια για κανονικότητα σε όψη (EC8§4.2.3.3) και τα κριτήρια της κανονικότητας σε κάτοψη (EC8§4.2.3.2), οπότε από EC8§5.2.2.2(5)α προκύπτει $\frac{\alpha_u}{\alpha_1} = 1.3$ και από EC8§5.2.2.2(11)P $k_w = 1$. Συνεπώς, από τη σχέση (3) για ΚΠΜ ο δείκτης πλαστιμότητας είναι $q = 3.9$ και για ΚΠΥ είναι $q = 5.85$.

Προσδιορισμός του απαιτούμενου δείκτη συμπεριφοράς q_π

Ο ενιαίος δείκτης συμπεριφοράς q ενός δομήματος διαμορφώνεται από το γινόμενο του παράγοντος υπεραντοχής q_v και του παράγοντος πλαστιμότητας q_π (EC8-1) δηλαδή ισχύει:

$$q = q_\pi q_v \quad (4)$$

Ο παράγων υπεραντοχής q_v , που εκφράζεται σε όρους δύναμης, ισούται με το λόγο της σεισμικής δύναμης (τέμνουσας βάσεως) V_u που οδηγεί σε γενικευμένη διαρροή πολλών δομικών στοιχείων (έναρξη μηχανισμού ορόφου, με κίνδυνο γενικής αστάθειας) ως προς τη δύναμη V_1 που οδηγεί στη διαρροή (γενικώς υπό κάμψη) του πρώτου δομικού στοιχείου (οποιοδήποτε, αλλά κυρίως πρωτεύοντος και μάλιστα του «κρίσιμου» ορόφου). Για τους σκοπούς του ΚΑΝ.ΕΠΕ, όταν δε διατίθενται ακριβέστερα στοιχεία είναι δυνατή η χρήση ενός πίνακα, ο οποίος έχει συνταχθεί με βάση τις τιμές που συνιστά ο EC8. Οι τιμές του πίνακα ισχύουν για σύγχρονα κτίρια, οπότε για παλαιά κτίρια απαιτείται κατάλληλη προσαρμογή. Οι τιμές του πίνακα πολλαπλασιάζονται με συντελεστές $\lambda = 1,1$ ή $\lambda = 0,9$ οι οποίοι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των οπλισμών (ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.2§α). Ο συντελεστής q_v λαμβάνεται ίσος με 1,30, ο οποίος αφορά πολύστυλα ή μικτά συστήματα κανονικά σε κάτοψη, και ο διορθωτικός συντελεστής λ ίσος με 0,9. Οπότε, $q_v = 1,3 * 0,9 = 1,17 \geq 1$. Συνεπώς, ο απαιτούμενος δείκτης συμπεριφοράς θα είναι:

$$q_\pi = 3,9 / 1,17 = 3,33 \text{ για ΚΠΜ}$$

$$q_\pi = 5,85 / 1,17 = 5 \text{ για ΚΠΥ}$$

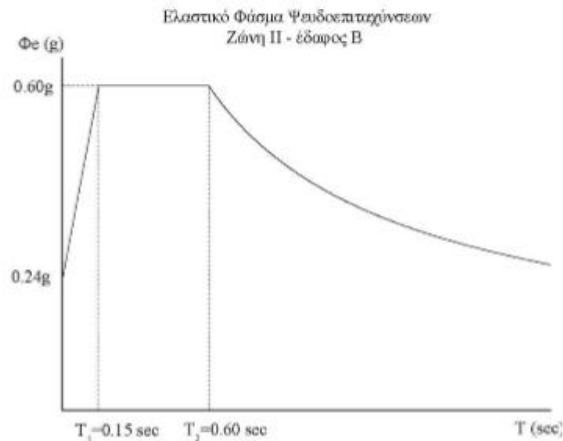
Προσδιορισμός απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων μ_δ

Η σχέση του q_π με το μ_δ μπορεί να εκφραστεί ως εξής (ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.2 §γ(i)):

$$\mu_\delta = 1 + \frac{T_c}{T} (q_\pi - 1) \text{ για } T \leq T_c \quad (5)$$

$$\mu_\delta = q_\pi \text{ για } T \geq T_c, \quad (6)$$

όπου T_c είναι η τιμή της χαρακτηριστικής περιόδου του τέλους της σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και της έναρξης του κατιόντος κλάδου του φάσματος (ελαστικού ή σχεδιασμού) επιταχύνσεων και T η θεμελιώδης ασύζευκτη ιδιοπερίοδος του κτιρίου κατά την εξεταζόμενη κύρια διεύθυνσή του.



Σχήμα 4. Ελαστικό φάσμα ψευδοεπιταχύνσεων κατασκευής

Όπως προέκυψε από την ανάλυση του κτιρίου (Ενότητα 2) η ιδιοπερίοδος της κατασκευής ισούται με $T = 0,30\text{sec} < T_c = 0,60\text{sec}$, οπότε από την (5):

$$\mu_\delta = 1 + \frac{0,60}{0,30} (3,33 - 1) = 5,66 \text{ για ΚΠΜ}$$

$$\mu_\delta = 1 + \frac{0,60}{0,30} (5 - 1) = 9 \text{ για ΚΠΥ}$$

Προσδιορισμός δεικτών ανεπάρκειας λ

Στη περίπτωση κατακόρυφων στοιχείων που καταπονούνται σε διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, ο λόγος λ είναι ευχερέστερο να υπολογίζεται ως ο λόγος του απαιτούμενου διαμήκους οπλισμού που προκύπτει με βάση τις ροπές και τις αξονικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη δράση του σεισμικού συνδυασμού, προς τον αντίστοιχο υπάρχοντα (ΚΑΝ.ΕΠΕ§5.5.1.1). Σημειώνεται ότι η σεισμική δράση λαμβάνεται χωρίς μείωση δηλαδή με $q=1$.

Υπολογισμός μηχανικού ποσοστού οπλισμού διατομών

Η διαθέσιμη αντίσταση υπολογίζεται με βάση τις μέσες τιμές των αντίστοιχων αντοχών των υλικών (ΚΑΝ.ΕΠΕ§5.5.1.1).

$$\omega_{\text{tot}} = \frac{A s_{\text{tot}} f_{ym}}{b h f_{cm}} \quad (7)$$

Για τα υποστυλώματα K_2, K_4, K_6, K_8 , τα οποία είναι οπλισμένα με $4\Phi 18$, προκύπτει: (7) $\rightarrow \omega_{\text{tot}} = 0,179$.

Για τα υποστυλώματα K_1, K_3, K_7, K_9 , τα οποία είναι οπλισμένα με $4\Phi 20$, προκύπτει: (7) $\rightarrow \omega_{\text{tot}} = 0,301$.

Για το υποστυλώμα K_5 , το οποίο είναι οπλισμένο με $8\Phi 16$, προκύπτει: (7) $\rightarrow \omega_{\text{tot}} = 0,343$.

Υπολογισμός απαιτούμενου μηχανικού ποσοστού οπλισμού για ένταση $G+0,3Q+E_X$

Από την ανάλυση για το υποστυλώμα K_7 στο ισόγειο έχει προκύψει: $N = -271.395\text{kN}$, $M_2 = 110,835\text{ kNm}$ και $M_3 = -21,858\text{ kNm}$, οπότε τα ανηγμένα εντατικά μεγέθη είναι $v = \frac{N}{b h f_{cm}} =$

$$0,1587, \mu_2 = \frac{M_2}{b^3 f_{cm}} = 0,216 \text{ και } \mu_3 = \frac{M_3}{b^3 f_{cm}} = 0,04261.$$

$$d = c + \phi_l/2 + \phi_h = (25 + 20/2 + 8) = 43\text{mm}$$

$$d/h = 43/300 = 0,1433$$

Από τα διαγράμματα διαξονικής κάμψης ([4] Κεφάλαιο 4 Σχ.4.13):

Για $d/h = 0,10$ και για $v = 0,10$ προκύπτει $\omega_{\text{tot}} = 0,52$

για $\nu = 0,20$ προκύπτει $\omega_{tot} = 0,505$

οπότε για $\nu=0,1587$, μέσω γραμμικής παρεμβολής προκύπτει $\omega_{tot} = 0,511$.

Για $d/h = 0,15$ και για $\nu = 0,10$ προκύπτει $\omega_{tot} = 0,6$

για $\nu = 0,20$ προκύπτει $\omega_{tot} = 0,58$

οπότε για $\nu = 0,1587$, μέσω γραμμικής παρεμβολής προκύπτει $\omega_{tot} = 0,578$.

Συνεπώς, για $d/h = 0,1433$ προκύπτει $\omega_{tot} = 0,578$.

Δείκτης ανεπάρκειας: $\lambda_{K7\sigma} = \frac{0,578}{0,301} = 1,92$.

Ακολουθείται παρόμοια διαδικασία (βλ. Παράρτημα) για όλα τα υποστυλώματα και προκύπτουν οι εξής δείκτες ανεπάρκειας:

Δείκτης ανεπάρκειας (λ)	
$\lambda_{K1\sigma} = 2,04$	$\lambda_{K5op} = 0,424$
$\lambda_{K1op} = 3,14$	$\lambda_{K6\sigma} = 1,57$
$\lambda_{K2\sigma} = 1,25$	$\lambda_{K6op} = 1,379$
$\lambda_{K2op} = 1,086$	$\lambda_{K7\sigma} = 1,92$
$\lambda_{K3\sigma} = 0,92$	$\lambda_{K7op} = 2,87$
$\lambda_{K3op} = 1,009$	$\lambda_{K8\sigma} = 1,416$
$\lambda_{K4\sigma} = 3,35$	$\lambda_{K8op} = 1,639$
$\lambda_{K4op} = 4,202$	$\lambda_{K9\sigma} = 0,65$
$\lambda_{K5\sigma} = 0,829$	$\lambda_{K9op} = 0,724$

Πίνακας 4. Δείκτες ανεπάρκειας υποστυλωμάτων

Ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων που προσδιορίστηκε προηγουμένως αφορά το πλέον εύτρωτο υποστύλωμα κάθε ορόφου της κατασκευής. Ελέγχεται ότι κάθε όροφος του κτιρίου μπορεί να επιδείξει τον ως άνω δείκτη πλαστιμότητας μ_{δ} , υπολογίζοντας τους αντίστοιχους απαιτούμενους δείκτες $\mu_{\delta i}$ του κάθε πρωτεύοντος στοιχείου εκάστου ορόφου. Προς τούτο, είναι δυνατόν σε κάθε όροφο να εντοπίζεται το πιο εύτρωτο πρωτεύον δομικό μέλος ($\max \lambda$ ορόφου = λ_{max}), το οποίο θα αναδιαστασιολογείται με απαιτούμενο τοπικό δείκτη πλαστιμότητας μ_{δ} ενώ τα υπόλοιπα πρωτεύοντα μέλη του ορόφου “i”, θα απαιτηθεί να επιδεικνύουν τοπικό δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων ο οποίος προσδιορίζεται ως εξής:

$$\mu_{\delta i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_{max}} \mu_{\delta} \quad (8)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι απαιτούμενες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας για κάθε μέλος για τις δύο κατηγορίες πλαστιμότητας που εξετάζονται (ΚΠΜ και ΚΠΥ) καθώς και η σύγκριση των τιμών αυτών με τη διαθέσιμη, όπως αυτή προέκυψε στην ενότητα 3 (Πίνακας 3), για να εξετασθεί αν απαιτείται ενίσχυση.

Υποστύλωμα	$\mu_{\delta i}$	Συμπέρασμα
K1	$3,45 > 3,21$	Απαιτείται ενίσχυση
K2	$2,11 < 3,42$	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K3	$1,55 < 3,16$	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K4	$5,66 > 3,47$	Απαιτείται ενίσχυση
K5	$1,4 < 2,95$	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K6	$2,65 < 3,37$	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K7	$3,24 > 3,22$	Απαιτείται ενίσχυση
K8	$2,39 < 3,45$	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K9	$1,1 < 3,18$	Δεν απαιτείται ενίσχυση

Πίνακας 5. Ισόγειο ΚΠΜ

Υποστύλωμα	$\mu_{\delta i}$	Συμπέρασμα
K1	4,229 > 3,21	Απαιτείται ενίσχυση
K2	1,46 < 3,42	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K3	1,36 < 3,16	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K4	5,66 > 3,47	Απαιτείται ενίσχυση
K5	0,57 < 2,95	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K6	1,86 < 3,37	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K7	3,86 > 3,22	Απαιτείται ενίσχυση
K8	2,21 < 3,45	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K9	0,98 < 3,18	Δεν απαιτείται ενίσχυση

Πίνακας 6. Όροφος ΚΠΜ

Υποστύλωμα	$\mu_{\delta i}$	Συμπέρασμα
K1	5,48 > 3,21	Απαιτείται ενίσχυση
K2	3,36 < 3,42	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K3	2,47 < 3,16	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K4	9 > 3,47	Απαιτείται ενίσχυση
K5	2,23 < 2,95	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K6	4,22 > 3,37	Απαιτείται ενίσχυση
K7	5,16 > 3,22	Απαιτείται ενίσχυση
K8	3,8 > 3,45	Απαιτείται ενίσχυση
K9	1,75 < 3,18	Δεν απαιτείται ενίσχυση

Πίνακας 7. Ισόγειο ΚΠΥ

Υποστύλωμα	$\mu_{\delta i}$	Συμπέρασμα
K1	6,72 > 3,21	Απαιτείται ενίσχυση
K2	2,33 < 3,42	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K3	2,16 < 3,16	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K4	9 > 3,47	Απαιτείται ενίσχυση
K5	0,91 < 2,95	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K6	2,95 < 3,37	Δεν απαιτείται ενίσχυση
K7	6,14 > 3,22	Απαιτείται ενίσχυση
K8	3,51 > 3,45	Απαιτείται ενίσχυση
K9	1,55 < 3,18	Δεν απαιτείται ενίσχυση

Πίνακας 8. Όροφος ΚΠΥ

5. ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που προβλέπεται από τους Κανονισμούς για την εφαρμογή της ενίσχυσης καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής στα υποστυλώματα του κτιρίου.

5.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ / ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Διαδικασία εφαρμογής ενίσχυσης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013)

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ προβλέπει την ενίσχυση για την αύξηση της πλαστιμότητας μέσω περίσφιξης με τη χρήση χαλύβδινου κλωβού και μανδυνών ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ). Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα, είναι δε ευχερής σε στοιχεία με κυκλική διατομή ή ορθογωνική διατομή σχετικά μικρών διαστάσεων, με λόγο πλευρών που δε ξεπερνά το 2:1. (ΚΑΝ.ΕΠΕ§8.2.3α).

Ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.1(6.17 – 6.18)):

$$f_{cd,c} = (1 + 2,5 a\omega_{wd}) f_{cd} \text{ για } a\omega_{wd} \leq 0,10 \quad (9)$$

$$f_{cd,c} = (1,125 + 1,25 a\omega_{wd}) f_{cd} \text{ για } a\omega_{wd} > 0,10 \quad (10)$$

όπου ω_{wd} είναι το ογκομετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού περίσφιξης που υπολογίζεται κατ' αντιστοιχία με τα προβλεπόμενα στον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ,2000) ή στον EC8 (το γινόμενο $a\omega_{wd}$ καλείται ενεργό ποσοστό περίσφιξης).

$$\alpha = \alpha_s \alpha_n \text{ είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης} \quad (11)$$

f_{cd} είναι η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του υφιστάμενου σκυροδέματος όπως προκύπτει μετά από τις διερευνητικές εργασίες και τους κατάλληλους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας ($\gamma_c=1,5$ - ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.1),

$f_{cd,c}$ είναι η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος.

Για το προσδιορισμό του συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιξης α μπορεί να ληφθεί $\alpha_s=0,9$ και α_n μέσω της παρακάτω σχέσης (12). Στον δείκτη αποδοτικότητας συνεκτιμάται η ευεργετική επίδραση της δυσκαμψίας των γωνιακών ελασμάτων μέσω της σχέσης προσδιορισμού του α_n .

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3 A_c} [b_c^2 (1-\beta)^2 + d_c^2 (1-\gamma)^2] \quad (12)$$

όπου $\beta = \frac{2b_p}{b_c}$ (13), $\gamma = \frac{2d_p}{d_c}$ (14), $A_c = b_c d_c$ (15) και b_p, d_p τα μήκη στρογγύλευσης των πλευρών b_c και d_c αντίστοιχα (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.2(Σ6.13)).

Η παραμόρφωση στη κορυφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για απερίσφικτο σκυρόδεμα, δηλαδή η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο $f_{cd,c}$, είναι: $\epsilon_{c2} = 0,002$, ενώ για περισφιγμένο, δηλαδή η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο f_{cd} , λαμβάνεται ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.1(6.19)):

$$\epsilon_{c2,c} = 0.002 (f_{cd,c} / f_{cd})^2 \quad (16)$$

Η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας για απερίσφικτο σκυρόδεμα είναι: $\epsilon_{cu} = 0,0035$. Η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας για περισφιγμένο σκυρόδεμα μπορεί να εκτιμηθεί ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.1(6.20)):

$$\epsilon_{cu,c} = 0.0035 + 0,1 a\omega_{wd} \quad (17)$$

Ενίσχυση μέσω ΙΟΠ

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.3(6.21)):

$$f_{cd,c} = (1,125 + 1,25 a\omega_{wd}) f_{cd} \quad (18)$$

Αντιστοίχως με τη περίπτωση του χαλύβδινου κλωβού για το προσδιορισμό του συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιξης α μπορεί να ληφθεί α_s με βάση μία εκ των σχέσεων (19), (20) και α_n μέσω της σχέσης (6). Στον δείκτη α_n συνεκτιμάται η στρογγύλευση των ακμών b_p, d_p του στοιχείου.

$$\alpha_s = 1 \text{ για περίσφιξη με συνεχή φύλλα (μανδύας)} \quad (19)$$

$$\alpha_s = (1 - \frac{s'}{2b_c}) (1 - \frac{s'}{2d_c}) \text{ για περίσφιξη με κολάρα} \quad (20)$$

Η βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας για του περισφιγμένου πυρήνα μπορεί να εκτιμηθεί ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.3(6.22)):

$$\epsilon_{cu,c} = \epsilon_{c2,c} = \gamma_{\text{ΙΟΠ}} 0.0035 (f_{cd,c} / f_{cd})^2 \quad (21)$$

όπου $\gamma_{\text{ΙΟΠ}} = 1,00$ για ΙΟΠ με ίνες άνθρακα
 2,00 για ΙΟΠ με ίνες υάλου

Για τον υπολογισμό του ω_{wd} από το οποίο προκύπτει η ενεργή τάση περισφίξεως χρησιμοποιείται μειωμένη τιμή $f_{\text{ju, res}}$ της εφελκυστικής αντοχής του ΙΟΠ, λόγω της καμπύλωσης του υλικού στις γωνίες του δομικού στοιχείου. Η απομένουσα διαθέσιμη παραμόρφωση αστοχίας του ΙΟΠ εξαρτάται από την προ-επιβληθείσα παραμόρφωσή του στις θέσεις καμπύλωσης του (ϵ_{jo}) και μπορεί να θεωρηθεί (ΚΑΝ.ΕΠΕ§4.4.3.ε):

$$\epsilon_{\text{ju, res}} = \epsilon_{\text{ju}} - \epsilon_{\text{jo}} \quad (22)$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$f_{\text{ju, res}} = E_j (\epsilon_{\text{ju}} - \epsilon_{\text{jo}}) \quad (23)$$

$$\epsilon_{\text{jo}} = \frac{t}{2R} \quad (24)$$

$$R = \frac{b_p + d_p}{2} \quad (25)$$

όπου ϵ_{ju} η παραμόρφωση αστοχίας του υλικού περισφίξης
 t το πάχος του ΙΟΠ

Αν η επιστροφή του ΙΟΠ γίνεται σε περισσότερες από μία στρώσεις, ως t λαμβάνεται το μέσο πάχος της στρώσης. Επιπλέον, όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, η αποτελεσματικότητα της περισφίξης αυξάνει όσο εξομαλύνονται - στρογγυλεύονται οι γωνίες του στοιχείου δεδομένου ότι όπως προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις η αύξηση του R επιτρέπει μεγαλύτερες ενεργές τάσεις στο υλικό περισφίξης. Εξάλλου στη περίπτωση μεγάλου αριθμού στρώσεων ΙΟΠ η ενεργή τιμή της τάσης περισφίξης μειώνεται περαιτέρω ως εξής (ΚΑΝ.ΕΠΕ§6.2.3(6.22)):

$$f_{\text{ju}} = f_{\text{ju, res}} \psi \quad (26)$$

όπου $\psi \leq 1,0$ ο συντελεστής επιρροής του πλήθους των στρώσεων ο οποίος ελλείπει επαρκών σχετικών στοιχείων, μπορεί να λαμβάνεται:

$$\psi = k^{-\frac{1}{4}} \geq \frac{3}{k} \quad (27)$$

όπου k το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ, όταν $k \geq 4$.

Διαδικασία εφαρμογής ενίσχυσης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται μόνο οι τροποποιήσεις που πρόκειται να γίνουν στο ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013).

Ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται ως:

$$f_{\text{c, c}} = (1 + K) f_c \quad (28)$$

$$\text{όπου } K = 3,5 \Lambda^{3/4} \quad (29)$$

$$\Lambda = \alpha \rho_{\text{sx}} f_{\text{yw}} / f_c \quad (30)$$

$$\rho_{\text{sx}} = A_{\text{sx}} / b_w s_h \quad (31)$$

όπου f_{yw} η μέση τάση διαρροής των συνδετήρων, η οποία προσεγγιστικά μπορεί να προσδιοριστεί ως $f_{\text{yw m}} = 1.15 f_{\text{yw}}$

f_c η μέση αντοχή του υφιστάμενου σκυροδέματος

ρ_{sx} το γεωμετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα προς τη κατεύθυνση x της φόρτισης και

s_h την απόσταση μεταξύ των συνδετήρων.

Οπότε, από τις σχέσεις (28) – (30) προκύπτει:

$$f_{c,c} = (1 + 3,5 (\alpha \rho_{sx} f_{yw} / f_c)^{3/4}) f_c \quad (32)$$

Το διάγραμμα σ-ε του περισφιγμένου μπορεί να λαμβάνεται παραβολικό μέχρι παραμόρφωση $\varepsilon_{co,c}$, που δίνεται από τη σχέση (33), όπου επιτυγχάνεται η αντοχή $f_{c,c}$ και στη συνέχεια ορθογωνικό μέχρι παραμόρφωση $\varepsilon_{cu,c}$.

$$\varepsilon_{co,c} = \varepsilon_{co} (1+5K) \quad (33)$$

Η βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας του περισφιγμένου πυρήνα μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4 \Lambda_c \quad (34)$$

όπου $\varepsilon_{cu} = 0,004$ είναι η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας για απερίσφικτο σκυρόδεμα

$$\Lambda_c = \alpha \rho_{sx} f_{yw} / f_{c,c} \quad (35)$$

Οπότε, από τις σχέσεις (34)-(35) προκύπτει:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4 (\alpha \rho_{sx} f_{yw} / f_{c,c}) \quad (36)$$

Ενίσχυση μέσω ΙΟΠ

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να λαμβάνεται ως:

$$f_{c,c} = (1 + K) f_c \quad (37)$$

$$\text{όπου } K = 3,5 \Lambda^{3/4} \quad (38)$$

$$\Lambda = \alpha \rho_{jx} f_{ju}' / f_c \quad (39)$$

$$\rho_{jx} = A_{jx} / b_w s_h = 2 t_j / b_w \quad (40)$$

με f_{ju}' τη τάση διαρροής του ΙΟΠ και

ρ_{jx} το γεωμετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα προς τη κατεύθυνση x της φόρτισης.

Η βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας του περισφιγμένου πυρήνα μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{co,c} = \gamma_{IOΠ} 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \quad (41)$$

όπου $\gamma_{IOΠ} = 1,00$ για ΙΟΠ με ίνες άνθρακα

2,00 για ΙΟΠ με ίνες υάλου

Προσεγγιστικές σχέσεις ΚΑΝ.ΕΠΕ για συσχέτιση του $\mu_{1/r}$ με χαρακτηριστικά της διατομής

Στο ΚΑΝ.ΕΠΕ§8.2.3β επιτρέπει τη χρήση της παρακάτω προσεγγιστικής έκφρασης για τη συσχέτιση του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων συναρτήσει των χαρακτηριστικών της διατομής, της διαθέσιμης μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος και της αξονικής δύναμης.

$$\varepsilon_{cu,c} = 2,2 \mu_{1/r} \varepsilon_{sy} v \leq 0,0035 \quad (42)$$

Σημειώνεται ότι η ανωτέρω σχέση προϋποθέτει $v > 0,2$ και ότι οι τιμές ε_{sy} και v υπολογίζονται με βάση τις μέσες τιμές αντοχής χάλυβα και σκυροδέματος.

Σε μια πρόσφατη εργασία προτείνεται για ΙΟΠ η σχέση (42) βελτιωμένη ως ([2] - ΚΑΝ.ΕΠΕ 2016):

$$\varepsilon_{cu,c} = (2,6 \frac{f_c}{f_{cc}}) \mu_{1/r} \varepsilon_{sy} v \leq 0,004 \quad (43)$$

Επιπλέον, για κάθε πρωτεύον δομικό στοιχείο υπολογίζεται η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ συναρτήσει του αντιστοίχου $\mu_{\delta i}$, μέσω αξιόπιστων συσχετίσεων. Προς τούτο επιτρέπεται η χρήση της έκφρασης (ΚΑΝ.ΕΠΕ§8.2.3δ(v)):

$$(\mu_{1/r} - 1) : (\mu_{\delta} - 1) = 3 \rightarrow \mu_{1/r} = 3(\mu_{\delta} - 1) + 1 = 3\mu_{\delta} - 2 \quad (44)$$

Περίσφιξη

$$\text{Από ΕΚΩΣ2000}\S 18.4.4.2 \text{ ισχύει η εξίσωση: } \omega_{wd} = \rho_w \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (45)$$

$$\text{όπου } \rho_w = 2 \min(\rho_b, \rho_h) = 2 \min\left(\frac{n_b A_{sw}^{\sigma\kappa}}{b s}, \frac{n_h A_{sw}^{\sigma\kappa}}{h s}\right) = 2 \frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s} \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right) \quad (46)$$

Πιο συγκεκριμένα για ενίσχυση με ΙΟΠ ισχύει η σχέση:

$$t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \quad (47)$$

με f_{cd} τη θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του υφιστάμενου σκυροδέματος όπως προκύπτει μετά από διερευνητικές εργασίες και τους κατάλληλους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας ($\gamma_c=1,5$ - ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.1), και f_{jd} τη μειωμένη εφελκυστική αντοχή του ΙΟΠ ($f_{ju, res}$) διαιρεμένη με το κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας $\gamma_m=1.2$ (ΚΑΝ.ΕΠΕ Παράρτημα 4.1).

Όταν ως οπλισμός περίσφιξης χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα εξωτερικά κολάρια (λωρίδες), η μέγιστη αξονική τους απόσταση ορίζεται ως (ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.3ζ):

$$s_{max} = 100 + w_j \text{ (mm)} \leq 0,5 b_c \quad (48)$$

όπου w_j το πλάτος του κολάρου και b_c η μικρότερη διάσταση της διατομής. Στη περίπτωση του μεταλλικού κλωβού αρκεί η ικανοποίηση της σχέσης $s \leq 0,5 b_c$. (49)

Διαδικασία εφαρμογής ενίσχυσης κατά Ευρωκώδικα

Ο Ευρωκώδικας 8 προβλέπει τη βελτίωση της ικανότητας παραμόρφωσης μέσω της περίσφιξης του σκυροδέματος με μανδύες ΙΟΠ (FRP). Λαμβάνει υπόψη την διαθέσιμη πλαστιμότητα καμπυλότητας $\mu_{\phi,ava}$ μέσω του λόγου $I_x = \frac{\mu_{\phi,tar}}{\mu_{\phi,ava}}$ (50)

,όπου $\mu_{\phi,tar}$ είναι η επιδιωκόμενη πλαστιμότητα καμπυλότητας

Έτσι, το απαραίτητο μέγεθος της πίεσης περίσφιξης που πρέπει να εφαρμοστεί για να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη πλαστιμότητα καμπυλότητας δίνεται από τη σχέση (EC8§A.4.4.3 (A.34)):

$$f_I = 0,4 I_x^2 \frac{f_c \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} \quad (51)$$

όπου f_c είναι η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

ε_{cu} είναι η οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος και είναι η οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του μανδύα ΙΟΠ που λαμβάνεται υπόψη, η οποία είναι χαμηλότερη από την οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ, ε_{ju} .

Για τη περίπτωση των ορθογωνικών διατομών στις οποίες οι γωνίες είναι στρογγυλεμένες έτσι ώστε να επιτρέπουν τη τύλιξη του ΙΟΠ γύρω από αυτές, η πίεση περίσφιξης η οποία εφαρμόζει το ΙΟΠ μπορεί να υπολογίζεται ως (EC8§A.4.4.3 (4)):

$$f_I = k_s f_I \quad (52)$$

$$\text{με } k_s = \frac{2 R_c}{D} \quad (53)$$

$$f_I = \frac{2 E_f \varepsilon_{ju} t_f}{D} \quad (54)$$

όπου D το μεγαλύτερο πλάτος της διατομής.

Από τις σχέσεις (51)-(54) προκύπτει το απαιτούμενο πάχος του ΙΟΠ:

$$t_f = \frac{0,1 I_x^2 f_c \varepsilon_{cu}^2 D^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5} R E_f \varepsilon_{ju}} \quad (55)$$

5.2. ΕΦΑΡΜΟΦΗ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

Προσδιορισμός της απαιτούμενης τιμής του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ (Εξίσωση (44))

Υποστώλιωμα	μ_{di}	$\mu_{1/r}$
K1 _{ισογ,ΚΠΜ}	3,45	8,35
K4 _{ισογ,ΚΠΜ}	5,66	14,98
K7 _{ισογ,ΚΠΜ}	3,24	7,72
K1 _{οροφΚΠΜ}	4,229	10,687
K4 _{οροφΚΠΜ}	5,66	14,98
K7 _{οροφΚΠΜ}	3,86	9,58
K1 _{ισογ,ΚΠΥ}	5,48	14,44
K4 _{ισογ,ΚΠΥ}	9	25
K6 _{ισογ,ΚΠΥ}	4,22	10,66
K7 _{ισογ,ΚΠΥ}	5,16	13,48
K8 _{ισογ,ΚΠΥ}	3,80	9,4
K1 _{οροφΚΠΥ}	6,72	18,16
K4 _{οροφΚΠΥ}	9	25
K7 _{οροφΚΠΥ}	6,14	16,42
K8 _{οροφΚΠΥ}	3,51	8,53

Πίνακας 9. Απαιτούμενες τιμές $\mu_{1/r}$ **Εφαρμογή ενισχύσεων κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013)**

Ενίσχυση υποστυλώματος Κ4 ($b_c = d_c = 350$ mm) ισογείου για ΚΠΜ

Έλεγχος εφαρμογής ενίσχυσης

Ο λόγος των πλευρών του υποστυλώματος b_c / d_c ισούται με $1 < 2$, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική που περιγράφεται στο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Από τη σχέση (42) προσδιορίζεται η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος για τη παραπάνω απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας, λαμβάνοντας υπόψη το ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu = \frac{N}{b h f_{cm}} = 0,3589 > 0,2$, ως: (42) $\rightarrow \varepsilon_{cu,c} = 0,0272 > 0,0035$

Χαλύβδινος κλωβός

Για το μεταλλικό κλωβό θα χρησιμοποιηθούν 4 γωνιακά L50x50x5, τα οποία θα τοποθετηθούν σε όλο το ύψος του υποστυλώματος και ελάσματα, πάχους που θα προσδιοριστεί στη συνέχεια, ανά αποστάσεις s ποιότητας χάλυβα S235 ($f_y = 235$ MPa).

Δηλαδή, έχοντας $b_p = d_p = 50$ mm προκύπτουν τα εξής: (13) $\rightarrow \beta = 0,2857$, (14) $\rightarrow \gamma = 0,2857$, (15) $\rightarrow A_c = 0,1225$ m², (12) $\rightarrow \alpha_n = 0,6598$ και (11) $\rightarrow \alpha = 0,9 \cdot 0,6598 = 0,5939$

Για την εύρεση του ογκομετρικού ποσοστού του οπλισμού περίσφιξης επιλύεται η εξίσωση (17) ως προς ω_{wd} , με γνωστή τη παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας ίση με τη τιμή που προσδιορίστηκε από το προσεγγιστικό τύπο, δηλαδή $\varepsilon_{cu,c} = 0,0272$.

$$(17) \rightarrow \omega_{wd} = \frac{\varepsilon_{cu,c} - 0,0035}{0,1 a} = 0,399, (46) \rightarrow \rho_w = 11,43 \frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s}, (45) \rightarrow \omega_{wd} = 250,22 \frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s}.$$

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της (17) και της (45) προκύπτει: $\frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s} = 0,001595$ m = 1,595 mm.

Θεωρώντας ελάσματα πλάτους 25mm και πάχους 5mm προκύπτει:

$$s = \frac{A_{sw}}{\frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s}} = 78 \text{ mm} < 0,5 b_c = 175 \text{ mm}.$$

Επομένως, τοποθετούνται χαλύβδινα ελάσματα $b_w \times t_w = 25 \times 5$ ανά $s = 78$ mm καθ' ύψος του υποστυλώματος. Βεβαίως υπάρχει και η δυνατότητα αύξησης του πάχους των ελασμάτων έτσι ώστε να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Με την επιλογή χαλύβδινων ελασμάτων $b_w \times t_w = 25 \times 10$ προκύπτει ανά $s = 156$ mm < 175 mm.

Περίσφιξη με επικολλητά υφάσματα ΙΟΠ άνθρακα

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ άνθρακα υψηλής αντοχής με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 235\text{GPa}$, εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800\text{MPa}$, οπότε η παραμόρφωση κατά την αστοχία θα είναι $\varepsilon_u = 2,042\%$.

Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών του υποστυλώματος σε μήκος $b_p = d_p = 50\text{ mm}$. Όπως προαναφέρθηκε η εφαρμογή υφάσματος σε περιοχές γωνιών και ακμών συνεπάγεται τοπική μείωση (ε_{jo}) της διαθέσιμης παραμόρφωσης αστοχίας του προστιθέμενου υλικού οπότε θεωρώντας μέσο πάχος στρώσεων $0,17\text{mm}$ θα έχουμε:

$$(25) \rightarrow R = 50\text{mm}, (24) \rightarrow \varepsilon_{jo} = 0,17\%, (22) \rightarrow \varepsilon_{ju, \text{res}} = 1,87\%, (23) \rightarrow f_{ju, \text{res}} = 4400,5\text{MPa},$$

Ο όρος του συντελεστή αποδοτικότητας α_n προσδιορίζεται όπως και στο χαλύβδινο κλωβό: $(12) \rightarrow \alpha_n = 0,6598$, εφαρμόζεται ολόσωμος μανδύας ΙΟΠ άνθρακα οπότε: $(19) \rightarrow \alpha_s = 1$. Συνεπώς, ο συντελεστής αποδοτικότητας προκύπτει ίσος με α_n . $(11) \rightarrow \alpha = 0,6598$.

Για την εύρεση της αντοχής του περισφιγμένου πυρήνα επιλύεται η εξίσωση (21) ως προς $f_{cd,c}$, με γνωστή τη παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας ίση με τη τιμή που προσδιορίστηκε από το προσεγγιστικό τύπο, δηλαδή $\varepsilon_{cu,c} = 0,0272$.

$$(21) \rightarrow f_{cd,c} = f_{cd} \sqrt{\frac{\varepsilon_{cu,c}}{0,0035}} = 26,021\text{MPa}$$

Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιξης ω_{wd} ευρίσκεται επιλύοντας τη σχέση (18) ως προς το ποσοστό αυτό: $(18) \rightarrow \omega_{wd} = \left(\frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} - 1,125 \right) / (1,25 \alpha) = 2,0161$, $(47) \rightarrow t_{\text{ολ}} = 0,45\text{ mm}$.

Οπότε, μπορούν να τεθούν 3 στρώσεις ινών πάχους $0,15\text{mm}$.

Περίσφιξη με επικολλητά υφάσματα ΙΟΠ υάλου

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ υάλου τύπου S με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 90\text{GPa}$, εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800\text{MPa}$, οπότε η παραμόρφωση κατά την αστοχία θα είναι $\varepsilon_u = 5,334\%$.

Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών του υποστυλώματος σε μήκος $b_p = d_p = 50\text{ mm}$. Όπως προαναφέρθηκε η εφαρμογή υφάσματος σε περιοχές γωνιών και ακμών συνεπάγεται τοπική μείωση (ε_{jo}) της διαθέσιμης παραμόρφωσης αστοχίας του προστιθέμενου υλικού οπότε θεωρώντας μέσο πάχος στρώσεων $0,17\text{mm}$ θα έχουμε: $(25) \rightarrow R = 50\text{mm}$, $(24) \rightarrow \varepsilon_{jo} = 0,17\%$, $(22) \rightarrow \varepsilon_{ju, \text{res}} = 5,164\%$, $(23) \rightarrow f_{ju, \text{res}} = 4647,6\text{MPa}$,

Ο όρος του συντελεστή αποδοτικότητας α_n προσδιορίζεται όπως και στο χαλύβδινο κλωβό: $(12) \rightarrow \alpha_n = 0,6598$, εφαρμόζεται ολόσωμος μανδύας ΙΟΠ υάλου οπότε: $(19) \rightarrow \alpha_s = 1$. Συνεπώς, ο συντελεστής αποδοτικότητας προκύπτει ίσος με α_n . $(11) \rightarrow \alpha = 0,6598$.

Για την εύρεση της αντοχής του περισφιγμένου πυρήνα επιλύεται η εξίσωση (21) ως προς $f_{cd,c}$, με γνωστή τη παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας ίση με τη τιμή που προσδιορίστηκε από το προσεγγιστικό τύπο, δηλαδή $\varepsilon_{cu,c} = 0,0272$.

$$(21) \rightarrow f_{cd,c} = f_{cd} \sqrt{\frac{\varepsilon_{cu,c}}{2 \cdot 0,0035}} = 18,39\text{MPa}$$

Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιξης ω_{wd} ευρίσκεται επιλύοντας τη σχέση (12) ως προς το ποσοστό αυτό.

$(18) \rightarrow \omega_{wd} = \left(\frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} - 1,125 \right) / (1,25 \alpha) = 1,0261$, $(47) \rightarrow t_{\text{ολ}} = 0,216\text{ mm}$. Οπότε, μπορεί να τεθεί 1 στρώση ινών πάχους $0,22\text{mm}$.

Αποτελέσματα απαίτησης ενίσχυσης υποστυλωμάτων

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για όλα τα στοιχεία που χρήζουν ενίσχυσης προκύπτουν τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται πως τα υποστύλωματα του ορόφου καταπονούνται με μικρές τιμές αξονικών φορτίων, με αποτέλεσμα να προκύπτει $v < 0,2$ κατά τους υπολογισμούς ενώ η σχέση (42) ισχύει για $v > 0,2$. Αγνοώντας το περιορισμό αυτό εφαρμόζονται οι σχέσεις και στα υποστύλωματα του ορόφου. Όμως, κατά τη διαδικασία προσδιορισμού των απαιτούμενων ενισχύσεων για ΙΟΠ ελέγχεται ο περιορισμός $\omega_{wd} > 0,1$ εφόσον για τον προσδιορισμό χρησιμοποιείται η σχέση (18). Στις περιπτώσεις που δεν ισχύει, θεωρείται το ογκομετρικό ποσοστό ως $\omega_{wd} = 0,1/\alpha$ και έτσι υπολογίζεται η απαιτούμενη ενίσχυση.

Υποστύλωμα	Χαλ. Κλ. (A_{sw}/s)	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{ol})	ΙΟΠ Υάλου (t_{ol})
K1 (ισόγειο)	0,463mm	0,16mm	0,04mm
K1 (όροφος)	0,128mm	0,037mm	0,026mm
K4 (ισόγειο)	1,595mm	0,45mm	0,22mm
K4 (όροφος)	0,469 mm	0,16mm	0,032mm
K7 (ισόγειο)	0,45mm	0,155mm	0,036mm
K7 (όροφος)	0,11mm	0,097mm	0,032mm

Πίνακας 10. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΜ

Υποστύλωμα	Χαλ. Κλ. (A_{sw}/s)	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{ol})	ΙΟΠ Υάλου (t_{ol})
K1 (ισόγειο)	0,938mm	0,286mm	0,13mm
K1 (όροφος)	0,35mm	0,037mm	0,026mm
K4 (ισόγειο)	2,82mm	0,66mm	0,36mm
K4 (όροφος)	0,94mm	0,09mm	0,16mm
K6 (ισόγειο)	0,77mm	0,13mm	0,09mm
K7 (ισόγειο)	0,93mm	0,22mm	0,17mm
K7 (όροφος)	0,32mm	0,04mm	0,026mm
K8 (ισόγειο)	0,86mm	0,32mm	0,14mm
K8 (όροφος)	0,14mm	0,08mm	0,032mm

Πίνακας 11. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΥ

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων παρατηρείται ότι για τη περίπτωση των σύνθετων υλικών οι απαιτήσεις ενίσχυσης με ΙΟΠ υάλου είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν για ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο συντελεστή $\gamma_{IOΠ}$, ο οποίος υπεισέρχεται στη σχέση προσδιορισμού της βράχυνσης της ακραίας ίνας του περισφιγμένου σκυροδέματος (Σχέση 21) και είναι διπλάσιος για τα ΙΟΠ υάλου. Επίσης, οφείλεται και στη τιμή της εφελκυστικής αντοχής των ΙΟΠ όπως παρατηρείται από τη σχέση προσδιορισμού του πάχους ενίσχυσης (Σχέση 47).

Το συμπέρασμα αυτό αποδεικνύεται από το συνδυασμό των σχέσεων (18) και (21) από τις

οποίες προκύπτει: $\omega_{wd} = \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{cu,c}}{\gamma_{IOΠ}}} - 1.125 \right) / (1.25 \alpha)$

Εισάγοντας την εξίσωση αυτή στη σχέση (47) προκύπτει: $t = \frac{\left(\sqrt{\frac{\epsilon_{cu,c}}{\gamma_{IOΠ}}} - 1.125 \right) / (1.25 \alpha)}{2 \min\left(\frac{\eta_b}{b}, \frac{\eta_h}{h}\right)} * \frac{f_{cd}}{f_{jd}} =$

σταθ * $\frac{\left(\sqrt{\frac{\epsilon_{cu,c}}{\gamma_{IOΠ}}} - 1.125 \right)}{f_{jd}}$.

Εφαρμογή ενισχύσεων κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016)

Ενίσχυση υποστυλώματος K4 ($b_c = d_c = 350$ mm) ισογείου για ΚΠΜ

Έλεγχος εφαρμογής ενίσχυσης

Ο λόγος των πλευρών του υποστυλώματος b_c / d_c ισούται με $1 < 2$, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική που περιγράφεται στο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Υπολογίζεται το ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu = \frac{N}{b h f_{cm}} = 0,3589$.

$$\nu = \frac{N}{b h f_{cm}} = 0,3589.$$

Χαλύβδινος κλωβός

Για το μεταλλικό κλωβό θα χρησιμοποιηθούν 4 γωνιακά L50x50x5, τα οποία θα τοποθετηθούν σε όλο το ύψος του υποστυλώματος και ελάσματα, πάχους που θα προσδιοριστεί στη συνέχεια, ανά αποστάσεις s ποιότητας χάλυβα S235 ($f_y = 235$ MPa). Δηλαδή, έχοντας $b_p = d_p = 50$ mm προκύπτουν τα εξής: (13) $\rightarrow \beta = 0,2857$, (14) $\rightarrow \gamma = 0,2857$, (15) $\rightarrow A_c = 0,1225$ m², (12) $\rightarrow \alpha_n = 0,6598$ και (11) $\rightarrow \alpha = 0,9 \cdot 0,6598 = 0,5939$

Για την εύρεση του απαιτούμενου οπλισμού περίσφιξης επιλύεται το σύστημα τριών εξισώσεων (32), (36) και (42) με το Mathematica ως προς ρ_{sx} , οπότε προκύπτει $\rho_{sx} = 0.011$.

$$(25) \rightarrow \frac{A_{sw} \sigma_k}{s} = 3,81 \text{ mm}$$

Θεωρώντας ελάσματα πλάτους 25mm και πάχους 5mm προκύπτει: $s = \frac{A_{sw} \sigma_k}{\rho_{sx}} = 33 \text{ mm} <$

$$0,5 b_c = 175 \text{ mm}$$

Επομένως, τοποθετούνται χαλύβδινα ελάσματα $b_w \times t_w = 25 \times 5$ ανά $s = 33$ mm καθ' ύψος του υποστυλώματος. Βεβαίως, υπάρχει και η δυνατότητα αύξησης του πάχους των ελασμάτων έτσι ώστε να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Με την επιλογή χαλύβδινων ελασμάτων $b_w \times t_w = 25 \times 10$ προκύπτει ανά $s = 66$ mm < 175 mm.

Περίσφιξη με επικολλητά υφάσματα ΙΟΠ άνθρακα

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ άνθρακα υψηλής αντοχής με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 235$ GPa, εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800$ MPa. Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών όπως και στην επίλυση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), οπότε τελικά θα έχουμε: $f_{ju, res} = 4400,5$ MPa και τον ίδιο συντελεστή αποδοτικότητας $\alpha = 0,6598$.

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων (43), (37), (41) με το Mathematica (βλ. Παράρτημα) ως προς ρ_{jx} , προκύπτει $\rho_{jx} = 0.0014$, (40) $\rightarrow t_j = 0.243$ mm. Οπότε, μπορεί να τεθεί 1 στρώση ινών πάχους 0,243mm.

Περίσφιξη με επικολλητά υφάσματα ΙΟΠ υάλου

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ υάλου τύπου S με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 90$ GPa και εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800$ MPa. Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών όπως και στην επίλυση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), οπότε τελικά θα έχουμε: $f_{ju, res} = 4647,6$ MPa και τον ίδιο συντελεστή αποδοτικότητας $\alpha = 0,6598$.

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων (43), (37), (41) με το Mathematica (βλ. Παράρτημα) ως προς ρ_{jx} , προκύπτει $\rho_{jx} = 0,00067$, (40) $\rightarrow t_j = 0,12$ mm. Οπότε, μπορεί να τεθεί 1 στρώση ινών πάχους 0,12mm.

Αποτελέσματα απαίτησης ενίσχυσης υποστυλωμάτων

Υποστύλωμα	Χαλ. Κλ. (A_{sw}/s)	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{ol})	ΙΟΠ Υάλου (t_{ol})
K1 (ισόγειο)	0,816mm	0,087mm	0,028mm
K1 (όροφος)	0,165mm	0,028mm	0,01mm

K4 (ισόγειο)	3,808mm	0,244mm	0,118mm
K4 (όροφος)	0,792mm	0,091mm	0,025mm
K7 (ισόγειο)	0,788mm	0,085mm	0,027mm
K7 (όροφος)	0,135mm	0,027mm	0,012mm

Πίνακας 12. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΜ

Υποστύλωμα	Χαλ. Κλ. (A_{sw}/s)	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{ol})	ΙΟΠ Υάλου (t_{ol})
K1 (ισόγειο)	1,998mm	0,154mm	0,069mm
K1 (όροφος)	0,579mm	0,068mm	0,018mm
K4 (ισόγειο)	9,107mm	0,365mm	0,196mm
K4 (όροφος)	1,878mm	0,162mm	0,067mm
K6 (ισόγειο)	1,923mm	0,138mm	0,053mm
K7 (ισόγειο)	1,966mm	0,153mm	0,068mm
K7 (όροφος)	0,528mm	0,064mm	0,015mm
K8 (ισόγειο)	1,665mm	0,15mm	0,06mm
K8 (όροφος)	0,18mm	0,032mm	0,022mm

Πίνακας 13. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΥ

Όπως και στη περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) παρατηρείται ότι για τη περίπτωση των σύνθετων υλικών οι απαιτήσεις ενίσχυσης με ΙΟΠ υάλου είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν για ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο συντελεστή $\gamma_{IOΠ}$ και στη τιμή της εφελκυστικής αντοχής των ΙΟΠ όπως αποδεικνύεται παρακάτω.

Από το συνδυασμό των σχέσεων (37) και (41) προκύπτει: $\rho_{jx} = \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_{cu,c}}{\gamma_{IOΠ}}} - 1 \right) f_c / (3.5 a f_{ju})$

$$= \sigma_{\alpha\theta} * \frac{\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_{cu,c}}{\gamma_{IOΠ}}} - 1 \right)}{f_{ju}}$$

Εφαρμογή ενισχύσεων κατά Ευρωκώδικα 8

Ενίσχυση υποστυλώματος K4 ($b_c = d_c = 350$ mm) ισόγειο για ΚΠΜ

Περίσφιξη με επικολητά υφάσματα ΙΟΠ άνθρακα

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ άνθρακα υψηλής αντοχής με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 235$ GPa, εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800$ MPa. Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών όπως και στην επίλυση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), οπότε τελικά θα έχουμε: $f_{ju,res} = 4400,5$ MPa.

Χρησιμοποιείται η σχέση (42) του ΚΑΝ.ΕΠΕ για το προσδιορισμό της διαθέσιμης πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων θεωρώντας $\varepsilon_{cu,c} = 0.0035$. Έτσι, για το K4 προκύπτει η διαθέσιμη πλαστιμότητα καμπυλότητας $\mu_{\phi,ava} = 1.927$ και από τη σχέση (44) ή από το πίνακα 9 έχουμε την απαιτούμενη τιμή $\mu_{\phi,tar} = 14.98$. Οπότε, από τη σχέση (55) προκύπτει το απαιτούμενο πάχος ενίσχυσης: (55) $\rightarrow t_f = 0.3055$ mm. Συνεπώς, μπορούν να τεθούν 2 στρώσεις ινών πάχους 0,153mm.

Περίσφιξη με επικολητά υφάσματα ΙΟΠ υάλου

Επιλέγεται ύφασμα ΙΟΠ υάλου τύπου S με μέτρο ελαστικότητας $E_j = 90$ GPa και εφελκυστική αντοχή $f_{jk} = 4800$ MPa. Για την εφαρμογή της περίσφιξης πραγματοποιείται εξομάλυνση των γωνιών όπως και στην επίλυση κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), οπότε τελικά θα έχουμε: $f_{ju,res} = 4647,6$ MPa.

Οπότε, από τη σχέση (55) προκύπτει το απαιτούμενο πάχος ενίσχυσης: (55) $\rightarrow t_f = 0.063$ mm. Οπότε, μπορεί να τεθεί 1 στρώση ινών πάχους 0,063mm.

Σημειώνεται ότι στη περίπτωση των υποστυλωμάτων του ορόφου για τα οποία $\nu < 0,2$, χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό της διαθέσιμης πλαστιμότητας καμπυλότητας ελλείψει ακριβέστερης σχέσης προσεγγιστικά η σχέση (42).

Υποστύλωμα	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{01})	ΙΟΠ Υάλου (t_{01})
K1 (ισόγειο)	0,044mm	0,009 mm
K1 (όροφος)	0,11mm	0,0021mm
K4 (ισόγειο)	0,305mm	0,063 mm
K4 (όροφος)	0,045mm	0,0937mm
K7 (ισόγειο)	0,04mm	0,0087 mm
K7 (όροφος)	0,0093mm	0,0019mm

Πίνακας 14. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΜ

Υποστύλωμα	ΙΟΠ Άνθρακα (t_{01})	ΙΟΠ Υάλου (t_{01})
K1 (ισόγειο)	0,132mm	0,0273mm
K1 (όροφος)	0,015mm	0,0062mm
K4 (ισόγειο)	0,851mm	0,1759mm
K4 (όροφος)	0,126mm	0,02611mm
K6 (ισόγειο)	0,092mm	0,019mm
K7 (ισόγειο)	0,129mm	0,0267mm
K7 (όροφος)	0,027mm	0,0056mm
K8 (ισόγειο)	0,109mm	0,0225mm
K8 (όροφος)	0,013mm	0,0027mm

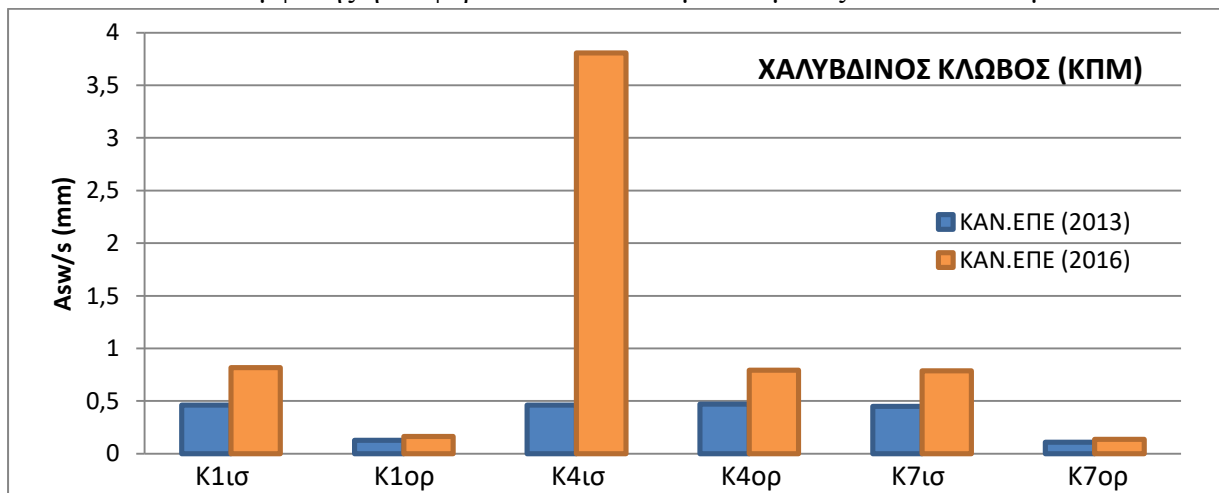
Πίνακας 15. Απαιτήσεις σε ενίσχυση των υποστυλωμάτων για ΚΠΥ

Όπως και στη περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ παρατηρείται ότι για τη περίπτωση των σύνθετων υλικών οι απαιτήσεις ενίσχυσης με ΙΟΠ υάλου είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν για ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στα χαρακτηριστικά αντοχής του σύνθετου υλικού, δηλαδή στο γινόμενο $\epsilon_{ju} * E_f$, όπως παρατηρείται από τη σχέση

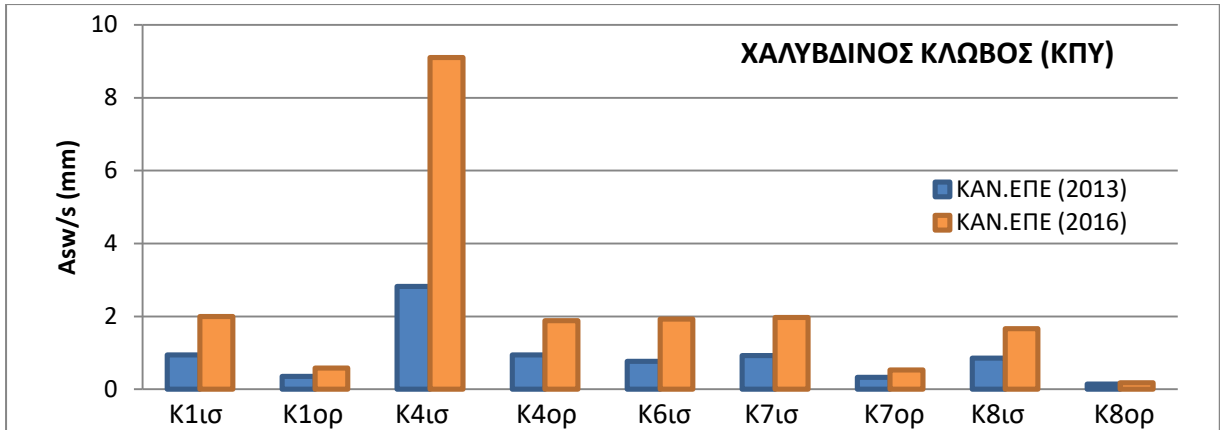
$$(55): t_f = \frac{0,1 I_x^2 f_c \epsilon_{cu}^2 D^2}{\epsilon_{ju}^{1,5} R E_f \epsilon_{ju}} = \text{σταθ} * \frac{1}{\epsilon_{ju}^{1,5} E_f \epsilon_{ju}}$$

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

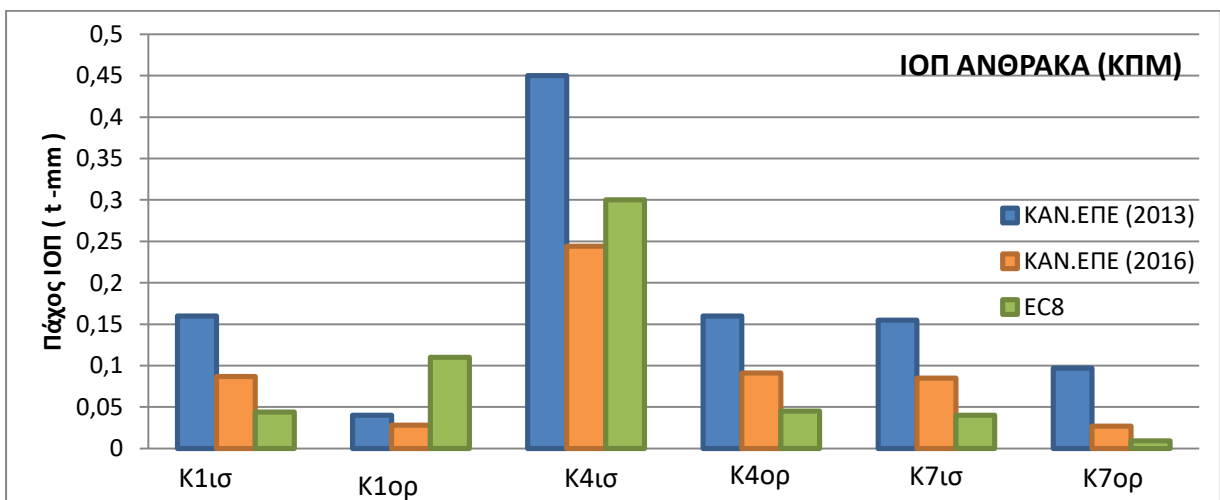
Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πινάκων (10) έως (15), έτσι ώστε να είναι εμφανής η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των κανονισμών.



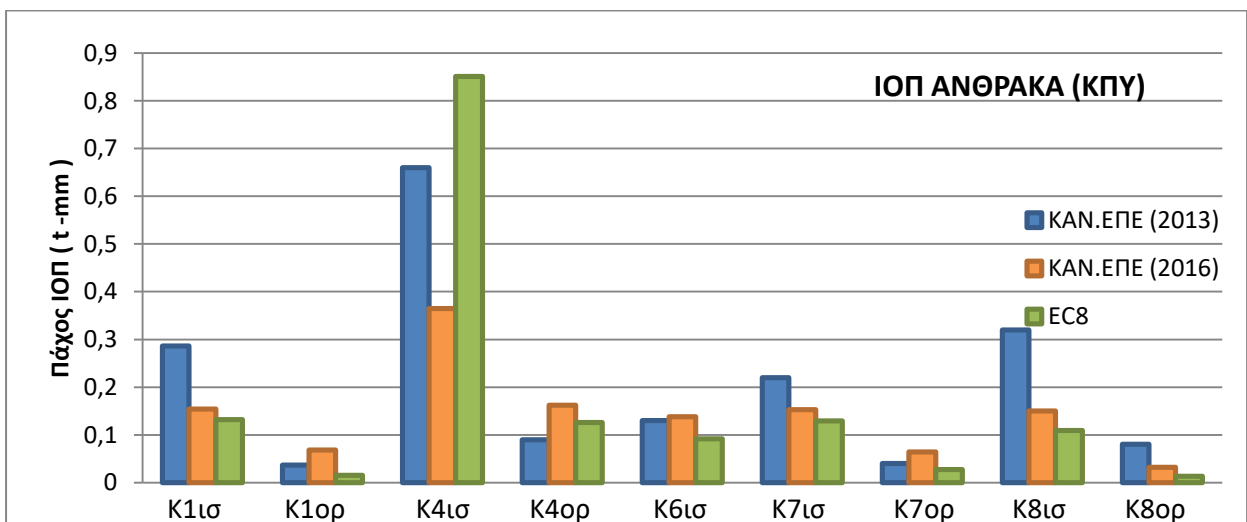
Σχήμα 5. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΜ και ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού



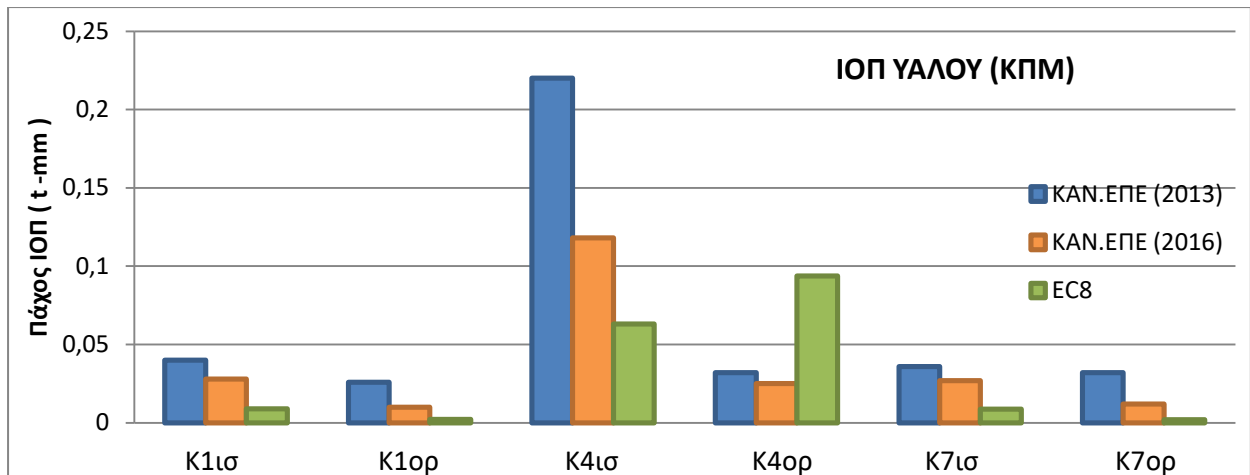
Σχήμα 6. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΥ και ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού



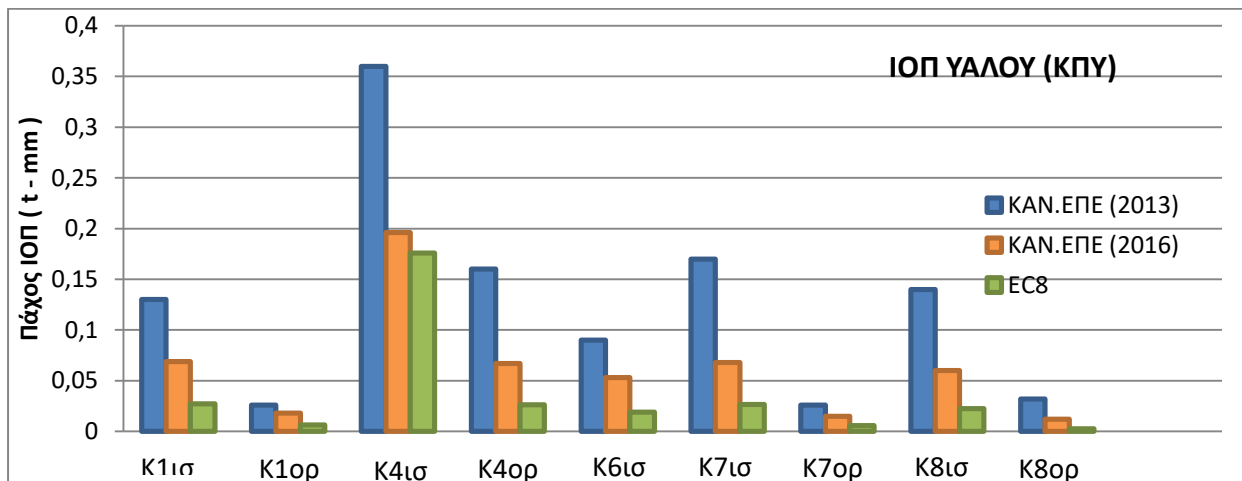
Σχήμα 7. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΜ και ενίσχυση μέσω ΙΟΠ άνθρακα



Σχήμα 8. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΥ και ενίσχυση μέσω ΙΟΠ άνθρακα



Σχήμα 9. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΜ και ενίσχυση μέσω ΙΟΠ υάλου

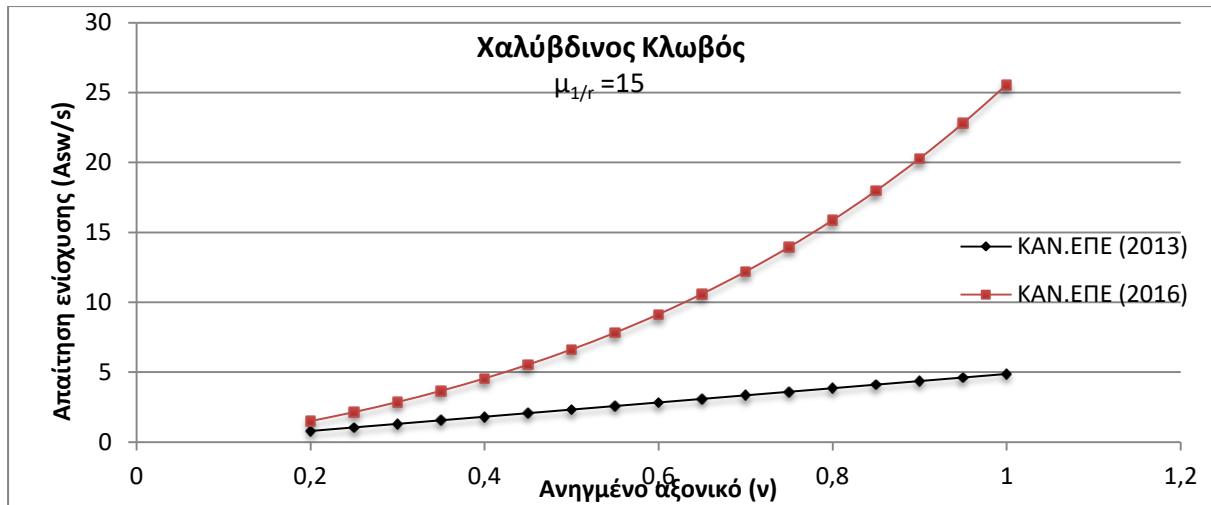


Σχήμα 10. Απαιτήσεις ενίσχυσης υποστυλωμάτων για ΚΠΥ και ενίσχυση μέσω ΙΟΠ υάλου

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής:

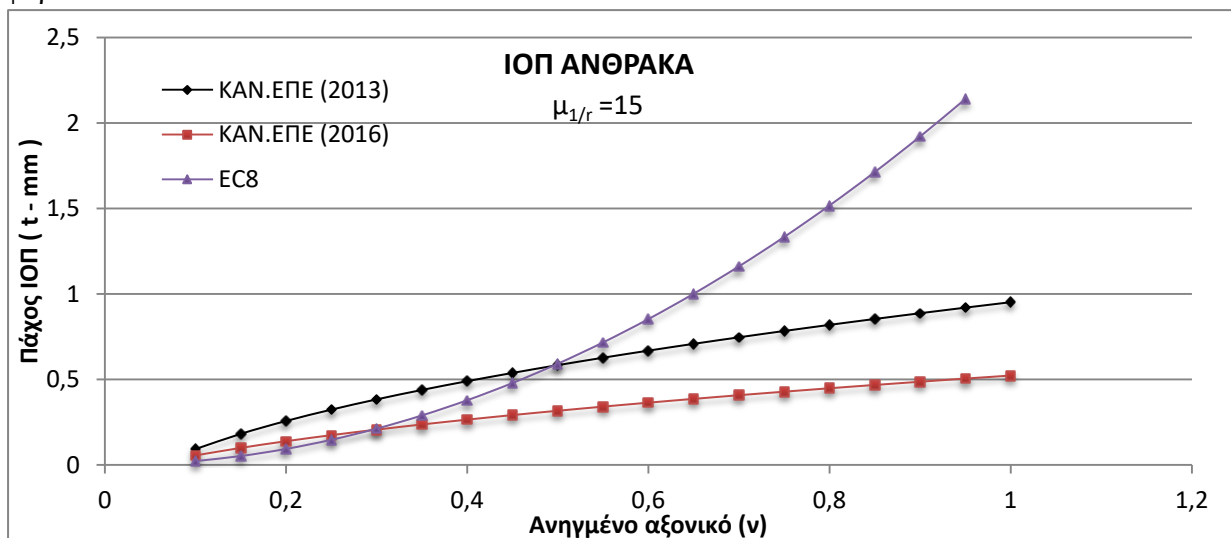
- Στη περίπτωση του χαλύβδινου κλωβού προκύπτουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ενίσχυσης με τις αναθεωρημένες σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016).
- Στη περίπτωση ενισχύσεων μέσω ΙΟΠ υάλου οι απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες για το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) σε σχέση με τις αναθεωρημένες σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016). Όσον αφορά τον Ευρωκώδικα σε σχέση με το ΚΑΝ.ΕΠΕ προκύπτουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ενίσχυσης στη περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.
- Στη περίπτωση ενισχύσεων με ΙΟΠ άνθρακα στη πλειονότητα των υποστυλωμάτων προκύπτουν οι απαιτήσεις όπως και στη περίπτωση ενισχύσεων με ΙΟΠ υάλου. Υπάρχουν βέβαια υποστυλώματα, όπως το υποστυλώμα K4 στο ισόγειο για ΚΠΥ, στο οποίο η απαίτηση σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είναι μεγαλύτερη από την απαίτηση με βάση το ΚΑΝ.ΕΠΕ. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο συνδυασμό του μεγάλου αξονικού φορτίου, το οποίο μειώνει την τιμή της διαθέσιμης πλαστιμότητας του υποστυλώματος, και της μεγάλης απαίτησης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολής της απαίτησης ενίσχυσης για το υποστύλωμα K4 ($b=h=350\text{mm}$) για διάφορες τιμές του αξονικού φορτίου και απαίτηση πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}=14.98$ (ΚΠΜ).



Σχήμα 11. Σύγκριση απαιτήσεων κανονισμών για ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού

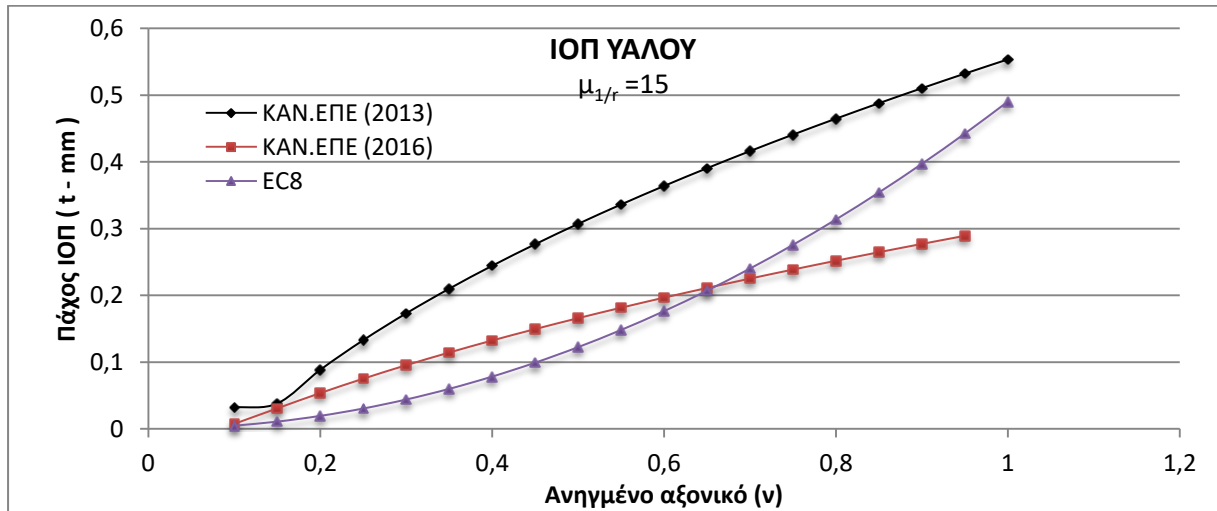
Παρατηρείται ότι στη περίπτωση του χαλύβδινου κλωβού η μεταβολή της απαίτησης κατά το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) μεταβάλλεται περίπου γραμμικά με την αύξηση του αξονικού φορτίου, ενώ κατά το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) μεταβάλλεται παραβολικά. Οι διαφορές στην απαίτηση ενίσχυσης μεταξύ των δύο κανονισμών αυξάνονται με την αύξηση του αξονικού φορτίου.



Σχήμα 12. Σύγκριση απαιτήσεων κανονισμών για ενίσχυση μέσω ΙΟΠ άνθρακα

Παρατηρείται ότι στη περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) και (2016) η απαίτηση μεταβάλλεται περίπου γραμμικά, ενώ κατά τον Ευρωκώδικα 8 παραβολικά. Με το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) προκύπτει μεγαλύτερη απαίτηση ενίσχυσης απ' ό,τι με τις αναθεωρημένες σχέσεις του - ΚΑΝ.ΕΠΕ (2016). Για μικρές τιμές του αξονικού φορτίου ($\nu=0,15$ έως $\nu=0,35$) ο Ευρωκώδικας 8 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) δίνουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα, ενώ όσο αυξάνεται το αξονικό φορτίο ($\nu=0,5$) ο Ευρωκώδικας 8 δίνει περίπου ίδια αποτελέσματα με

το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013). Για τιμές αξονικού $\nu > 0,6$ με βάση τον Ευρωκώδικα προκύπτουν πολύ μεγάλες απαιτήσεις ενίσχυσης.



Σχήμα 13. Σύγκριση απαιτήσεων κανονισμών για ενίσχυση μέσω ΙΟΠ υάλου

Όπως και στη περίπτωση ΙΟΠ άνθρακα η απαίτηση μεταβάλλεται περίπου γραμμικά για το ΚΑΝ.ΕΠΕ και παραβολικά για τον Ευρωκώδικα 8. Με το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) προκύπτει μεγαλύτερη απαίτηση ενίσχυσης απ' ό,τι με τις αναθεωρημένες σχέσεις του - ΚΑΝ.ΕΠΕ (2016). Για μικρές τιμές του αξονικού φορτίου ($\nu=0,15$) ο Ευρωκώδικας 8 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) δίνουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα, για $\nu=0,2$ ο ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016). Για μέσες τιμές του αξονικού φορτίου ($\nu=0,15$ έως $\nu=0,7$) με τον Ευρωκώδικα 8 προκύπτουν μικρότερες απαιτήσεις από το ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) ενώ για $\nu > 0,7$ προκύπτουν μεγαλύτερες αλλά μικρότερες αυτών που προκύπτουν από ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Όσον αφορά την ενίσχυση του κτιρίου εφαρμόζονται τα αποτελέσματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), ο οποίος αποτελεί τον εν ισχύ κανονισμό όσον αφορά τις Επισκευές-Ενισχύσεις στον Ελλαδικό χώρο. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στους πίνακες 10 και 11. Η επιλογή της τεχνικής που θα εφαρμοστεί βασίζεται στο κόστος.
- Για τη περίπτωση των σύνθετων υλικών οι απαιτήσεις ενίσχυσης με ΙΟΠ υάλου είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν για ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στα χαρακτηριστικά αντοχής των σύνθετων υλικών και το συντελεστή $\gamma_{ΙΟΠ}$ όσον αφορά το ΚΑΝ.ΕΠΕ. Έτσι, επιλέγοντας μεταξύ των σύνθετων υλικών οικονομικότερη είναι η ενίσχυση μέσω ΙΟΠ υάλου.
- Συγκρίνοντας τις εν ισχύ σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) με τις αναθεωρημένες ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) για ενίσχυση μέσω σύνθετων υλικών παρατηρείται ότι προκύπτουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ενίσχυσης στη περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013), ενώ για την ενίσχυση μέσω χαλύβδινου κλωβού ο ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) δίνει μικρότερες απαιτήσεις ενίσχυσης.

- Κατά τον Ευρωκώδικα προκύπτουν ελάχιστες απαιτήσεις ενίσχυσης στα υποστυλώματα του ορόφου καθώς ο κανονισμός λαμβάνει υπόψη την υπάρχουσα πλαστιμότητα, το οποίο συνδυάζεται με τη μικρή τιμή του αξονικού φορτίου. Αντιθέτως, στα υποστυλώματα του ισογείου δίνει μικρότερες τιμές αλλά συγκρίσιμες με αυτές του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013).
- Τέλος, όσον αφορά την ενίσχυση μέσω ΙΟΠ άνθρακα με τον Ευρωκώδικα για μικρές τιμές του αξονικού φορτίου (πχ $v < 0.3$) απαιτούνται τιμές συγκρίσιμες με αυτές του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016), ενώ για μεγάλες τιμές του αξονικού (πχ. $v > 0.5$) οι απαιτήσεις ξεπερνούν τις απαιτήσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013). Για ΙΟΠ υάλου οι απαιτήσεις είναι μικρότερες από αυτές του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2013) αλλά μεγαλύτερες του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2016) για μεγάλες τιμές του αξονικού φορτίου (πχ $v > 0.65$).

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013, Κανονισμός Επεμβάσεων», ΟΑΣΠ, ΦΕΚ 2187/Β/05-09-2013
- [2] Δρίτσος Η. Στέφανος, «Ενισχύσεις - Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2016
- [3] Δρίτσος Η. Στέφανος, «Ενισχύσεις - Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2013
- [4] Φαρδής Ν. Μιχαήλ, «Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέρος Ι», Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2015
- [5] Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός – Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων, EN1998-3:2005
- [6] Μώκος Β. Γ., «Προσδιορισμός Παραμορφωσιακής Ικανότητας Υποστυλώματος Ο/Σ κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ», Παρουσίαση & Αρχείο Excel, ΟΑΣΠ, Νοέμβριος 2016
- [7] Γαβριλάκη Αικατερίνη, «Μεταπτυχιακή/ Διπλωματική Εργασία, Ανάπτυξη νομογραφημάτων, πινάκων και άλλων εργαλείων υποστήριξης μελετών ΚΑΝ.ΕΠΕ», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2013
- [8] Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, «Δομικά Υλικά», 10^η Έκδοση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2013