

ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΚΑΙ ΕΚ-ΜΕΡΟΣ 3 (2019)

ΛΟΥΚΑΣ ΛΙΑΠΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., up1047520@upnet.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία θα γίνει σύγκριση μεταξύ των κανονισμών ΚΑΝ.ΕΠΕ και ΕΚ-μέρος 3 (2019) καθώς και σύγκριση των διαθέσιμων υλικών ή τρόπων ενίσχυσης για στοχευόμενη πλαστιμότητα σε όρους χορδής στροφής μθ. Πρόκειται για μία παραμετρική εργασία με βασικές παραμέτρους το ανηγμένο αξονικό φορτίο, το πάχος ινοπλισμένων πολυμερών και όλα σχετιζόμενα με το συντελεστή πλαστιμότητας μθ. Θα πραγματοποιηθεί αναλυτικό παράδειγμα για ενίσχυση υποστυλώματος ορθογωνικής διατομής σε πλαστιμότητα με τους δύο κανονισμούς. Με χρήση προγραμματιστικού προγράμματος θα ληφθούν τιμές και θα αναπαρασταθούν σε διαγράμματα καταλήγοντας έτσι σε συμπεράσματα μεταξύ των δύο κανονισμών και μεταξύ των υλικών ή τρόπων ενίσχυσης σε πλαστιμότητα. Όλα τα δεδομένα που θα απαιτηθούν για τα διαγράμματα είναι από το παράδειγμα και όποιες τροποποιήσεις θα τονίζονται.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πιο διαδεδομένες μορφές ενισχύσεις για τους ΚΑΝ.ΕΠΕ και ΕΚ-μέρος 3 (2019) είναι τα σύνθετα υλικά και πιο συγκεκριμένα τα ινοπλισμένα πολυμερή. Σύνθετες ίνες που χρησιμοποιούνται είναι του άνθρακα, του γυαλιού και του αραμιδίου (κέβλαρ). Τα πολυμερή αυτά μας δίνουν μεγάλες εφελκυστικές αντοχές με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται για ενισχύσεις δομικών στοιχείων έναντι τέμνουσας, κάμψης, πλαστιμότητας (θα αναλυθεί παρακάτω) και συνδυασμός αυτών.

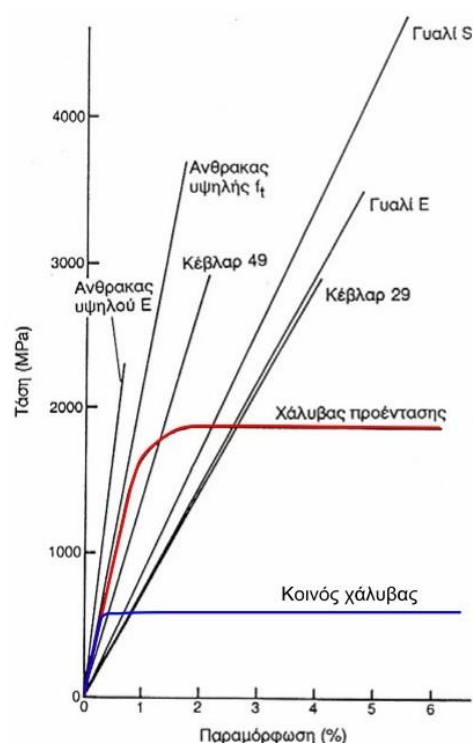
Ιδιαίτερη προσοχή χρήζει η ευαισθησία αυτών των υλικών έναντι ακραίων συνθηκών. Σε πυρκαγιές που οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες από 70-80C τα υλικά αυτά χάνουν μεγάλο ποσοστό της αντοχής τους. Όμως μελέτες και νέες τεχνικές αντιμετωπίζουν τέτοιες καταστάσεις με προβλεπόμενα μέτρα και σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι ρητίνες αν δεν έχουν φτάσει τις καταστροφικές τους θερμοκρασίες μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους μετά την φωτιά εφόσον δηλαδή ξανά στερεοποιηθούν.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ έχει δώσει λύσεις και με βασικό υλικό ενίσχυσης τον χάλυβα. Τέτοιες ενισχύσεις είναι τα προεντεταμένα κολάρα, οι περισφίγξεις με σπειροειδή χαλύβδινο οπλισμό, οι περισφίγξεις με χαλύβδινο μανδύα και οι περισφίγξεις με χαλύβδινο κλωβό. Ακολουθεί διάγραμμα με τις εφελκυστικές τάσεις των υλικών που παρουσιάστηκαν και πίνακας με τις ενδεικτικές ιδιότητές τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται παράδειγμα για την εύρεση απαιτούμενου υλικού ενίσχυσης για την επίτευξη στοχευόμενης πλαστιμότητας σε όρους στροφής χορδής μθ σε ορθογωνικό υποστύλωμα. Επίσης υλοποιείται αναλυτικά και η αντίστροφη διαδικασία. Δηλαδή για ένα δομικό στοιχείο (συγκεκριμένα υποστύλωμα) με μία τυχαία ενίσχυση (πάχος ΙΟΠ ή μεταλλικός κλωβός με τοποθέτηση ελασμάτων σε τυχαία απόσταση s) τι πλαστιμότητα μας δίνει για ποικίλες τιμές ανοιγμένου αξονικού φορτίου.

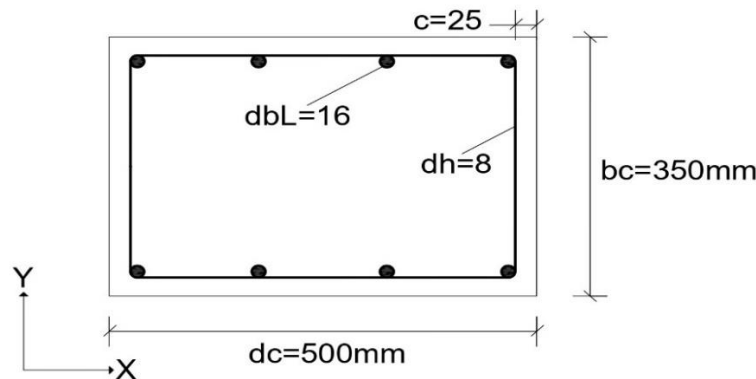
Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (KN/mm ²)	Εφελκυστική αντοχή (N/mm ²)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
Ανθρακας Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ.	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Γυαλί	70-75	1900-3000	3,0-4,5
E	70-75	1900-3000	3,0-4,5
Z	85-90	3500-4800	4,5-5,5
S	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Αραμίδιο Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	115-130	3500-4000	2,5-3,5
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)			

Πίνακας 1:Ενδεικτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών που αναφέρθηκαν.[2]



Σχήμα 1: Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης(MPa)-παραμόρφωσης(%) για τα υλικά ενίσχυσης που αναφέρθηκαν.[2]

2.ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΥΡΕΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΚΑΙ ΕΚ8-3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΑ.[1]



Σχήμα 2: Η Διατομή της Μελέτης[1]

Στο σχήμα2 βλέπουμε τη διατομή του υποστυλώματος με το οποίο υλοποιήθηκαν οι παρακάτω αναλύσεις.Δεδομένων των μεγεθών:

Ορθογωνικό υποστύλωμα ύψους:	$h_{καθ}=3m$
Αξονική δύναμη:	$N=-800KN$
Σκυρόδεμα ποιότητας	$f_{cm}=17MPa$
Χάλυβας ποιότητας	S400. Να ληφθεί $f_{ym}=1,15$
$f_{yk}=460MPa$	
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα	$E_s=200GPa$

➤ Ενίσχυση με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας με βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ

Η τεχνική εφαρμόζεται κυρίως σε κυκλικές διατομές μικρών διαστάσεων ή σε ορθογωνικές με λόγο πλευρών μικρότερο του 2:1.Εδώ $d_c/b_c < 2$.Με προσδιορισμένη τη τιμή επίτευξης πλαστιμότητας σε όρους στροφής μ_θ μπορεί να υπολογιστεί σε όρους καμπυλοτήτων μ_ϕ για την κρίσιμη διατομή μέσω της σχέσης :

$$(\mu_\phi - 1) / (\mu_\theta - 1) = 3 \text{ ΚΑΝ.ΕΠΕ.}\S\S.8.2.3\delta \quad (1)$$

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε τις μέσες τιμές των υλικών,διότι το μ_θ είναι παραμορφωσιακό μέγεθος. Για τον ίδιο λόγο ο συντελεστής γ_m είναι περίπου ίσος με μονάδα ή αυξάνεται λίγο για να ληφθούν υπόψη αβεβαιότητες των υφιστάμενων ή των προστιθέμενων υλικών $\gamma_m=1,10$ (ΚΑΝ.ΕΠΕ.}\S\S.4.5.3.3).

Η παραμόρφωση διαρροής του διαμήκους οπλισμού ισούται με:

$$\epsilon_{sy} = f_y / E_s = (f_{yk} / \gamma_m) / E_s = 0.0021 \quad (2)$$

Η ανηγμένη αξονική δύναμη υπολογίζεται από τη σχέση

$$v = N / (b_c \times d_c \times f_{cm} \times 10^3 / \gamma_m) = 0.296 \quad (3)$$

i. Με χαλύβδινη περίσφιγξη (μεταλλικός κλωβός)

$$\mu_\phi = \mu_{1/r} = \frac{f_{cc}}{f_c} \cdot \frac{(\epsilon_{cu,c} - \frac{\epsilon_{cc}}{3})}{1.75 \cdot v \cdot \epsilon_{sy}} \quad \text{με } \epsilon_{cu,c} \geq 0.004 \text{ ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.}\S\S.8.11\alpha) \quad (4)$$

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = \frac{f_{cc,d}}{f_{c,d}} = 1 + K = 1 + 3.5\Lambda^{\frac{3}{4}} \quad \text{όπου, } \Lambda = \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw} / f_c \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.}\S\S.8.17\alpha) \quad (5)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + 5K) = \epsilon_{co} (1 + 5 \cdot 3.5\Lambda^{\frac{3}{4}}) \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.}\S\S.8.17\beta) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4\Lambda_c \quad \text{όπου } \Lambda_c = \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw} / f_{cc} \quad \text{KAN.ΕΠΕ. (εξ.Σ8.17γ)} \quad (7)$$

Εξισώνοντας Λ και Λ_c προκύπτει $\Lambda_c = \Lambda \cdot \frac{f_c}{f_{cc}}$

$$\text{επομένως } \varepsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4 \cdot \Lambda \cdot \frac{f_c}{f_{cc}} \quad (8)$$

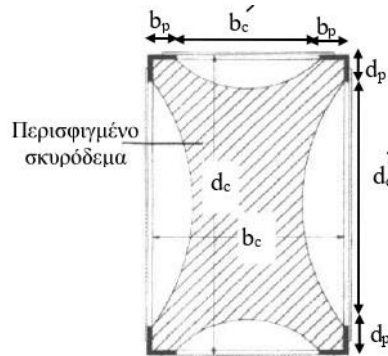
Στην σχέση (4) αν αντικαταστήσω τις σχέσεις (5),(6),(8) θα γίνει

$$\mu_\phi \cdot 1,75 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy} = \frac{f_{cc}}{f_c} \cdot \left(\varepsilon_{cu,c} - \frac{\varepsilon_{cc}}{3} \right) \rightarrow 1 + 3,5\Lambda^{3/4} \cdot [0,004 + 0,4 \cdot \Lambda (1 + 3,5\Lambda^{3/4}) - \varepsilon_{co} (1 + 5 \cdot 3,5\Lambda^{3/4}) / 3] = \mu_\phi \cdot 1,75 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy} \rightarrow \frac{-61,25 \cdot \varepsilon_{co}}{3} \Lambda^{6/4} + 0,4\Lambda + (0,014 - 7\varepsilon_{co})\Lambda^{3/4} = \mu_\phi \cdot 1,75 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy} + \frac{\varepsilon_{co}}{3} - 0,004 \quad (9)$$

Με γνωστά $\varepsilon_{co} = 0,002$, $\varepsilon_{sy} = 0,0021$, $\nu = 0,296$, $\mu_\phi = 11,8$ (για $\mu_\theta = 4,6$)

Αντικαθιστώντας στην (9) παίρνω $\Lambda = 0,024$. Για τον μεταλλικό κλωβό θα χρησιμοποιήσω 4 γωνιακά ελάσματα $L50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ καθ' ύψος του υποστρώματος και μεταλλικά ελάσματα περιμετρικά $b_w \times t_w = 25 \times 5 \text{ mm}$ ανά αποστάσεις s και ποιότητα χάλυβα Fe430 με $f_{ym} = 289 \text{ N/mm}^2$ και $\gamma_m = 1,15$ (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ.4.5.3.3)

Το πάχος t_w των ελασμάτων το λάβαμε με την ελάχιστη τιμή του.



Σχήμα 3: Διατομή Ενίσχυσης με Μεταλλικό Κλωβό[1]

Ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιγξης α προσδιορίζεται ως εξής:

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \quad \text{KAN.ΕΠΕ. (εξ.Σ6.13α)} \quad (10)$$

Όπου βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.Σ6.2.2β) λαμβάνονται: $\beta = \frac{2b_p}{b_c} = 0,286$, $\gamma = \frac{2d_p}{d_c} = 0,2$

$A_c = b_c \times d_c = 0,175 \text{ m}^2$ Αντικαθιστώντας στην (10) παίρνω $\alpha_n = 0,576$.

Λαμβάνω $\alpha_s = 0,9$ οπότε $\alpha = \alpha_n \times \alpha_s = 0,5184$.

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε το απαιτούμενο ποσοστό από τη σχέση (5) λύνοντας ως προς ρ_{sx} . Προκύπτει $\rho_{sx} = 0,00285$

Θα πάρουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση έναντι σεισμού, δηλαδή:

$\rho_s \geq \min(\rho_{sx}, \rho_{sy}) = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} \min\left(\frac{n_{b,x}}{b_y}, \frac{n_{b,y}}{b_x}\right)$. Για εξωτερική περιμετρική περίσφιγξη

χρησιμοποιούνται 2 σκέλη χαλύβδινου κλωβού ανά διεύθυνση, $n_{b,x} = n_{b,y} = 2$. Επομένως $\rho_s =$

$$0,0285 = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} \cdot \frac{2}{b_{max}} \rightarrow \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = 0,713 \text{ mm}$$

$A_{sw} = b_w \times t_w = 25 \times 5 = 125 \text{ mm}^2$ Άρα οι αποστάσεις μεταξύ των ελασμάτων προκύπτουν $s = \frac{A_{sw}}{0,713} = 175 \text{ mm} \leq 0,5b_c$ Απο (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ.8.2.3ζ) στη περίπτωση του μεταλλικού κλωβού

αρκεί η ικανοποίηση της σχέσης $s_{max} \leq 0,5b_c$

Οπότε θα τοποθετήσουμε μεταλλικά ελάσματα $25 \times 5 \text{ mm}$ ανά 175 mm .

ii. Με επικολητά υφάσματα ΙΟΠ άνθρακα

$$\mu_{\varphi} = \mu_{1/r} = \frac{f_{cc}}{f_c} \cdot \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,6 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy}} \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.Σ8.11β)} \quad (11)$$

$$\frac{f_{cc} - f_{cc,d}}{f_c} = 1 + K = 1 + 3,5 \Lambda^{3/4} \quad \text{όπου } \Lambda = \alpha \cdot \rho_{jx} \cdot f'_{ju} / f_c \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.Σ8.18)} \quad (12)$$

για ΙΟΠ με άνθρακα

$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cc} = 0,0035 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} \right)^2 = 0,0035 (1 + K)^2 \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.Σ8.19α)} \quad (13)$$

για ΙΟΠ με ίνες γυαλιού

$$\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cc} = 0,007 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} \right)^2 = 0,007 (1 + K)^2 \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.Σ8.19α)} \quad (14)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (11) τις εξισώσεις (12) και (13) παίρνω:

$$\mu_{\varphi} \cdot 2,6 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy} = (1+K)0,0035(1+K)^2 \rightarrow K = \sqrt[3]{\frac{\mu_{\varphi} \cdot 2,6 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{sy}}{0,0035}} - 1 \quad (15)$$

Με γνωστά $\varepsilon_{sy}=0,0021$, $\nu=0,296$, $\mu_{\varphi}=11,8$ (για $\mu_{\theta}=4,6$), η εξίσωση (15) μας δίνει $K=0,759$. Έπειτα λύνοντας την (12) ως προς Λ παίρνω $\Lambda=0,13$. Για ενίσχυση με ΙΟΠ απαιτείται εξομάλυνση των 4γωνιών της διατομής με μήκος $b_p = d_p = R=50\text{mm}$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4: Διατομή Ενίσχυσης με ΙΟΠ[1]

Ο συντελεστής αποδοτικότητας περισφιγξης με ΙΟΠ προσδιορίζεται με βάση τις §6.2.3 και §6.2.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ ως ακολούθως: $\alpha_n=0,576$ όπως πριν και $\alpha_s=1$ οπότε $\alpha=\alpha_n \times \alpha_s=0,576$. Θα χρησιμοποιηθούν ίνες άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας $E_j=230\text{GPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ju}=3800\text{MPa}$.

Στην περίπτωση μεγάλου πλήθους στρώσεων ΙΟΠ η ενεργή τάση περισφιγξης μειώνεται περαιτέρω ως εξής: $f'_{ju} = f_{ju, res} \psi$, όπου $\psi = k^{-1/4} \geq \frac{3}{k}$ με πλήθος στρώσεων $k \geq 4$, ενώ λαμβάνεται $\psi=1$ όταν $k \leq 3$ και

$$f_{ju, res} = \varepsilon_{ju, res} \times E_j = (\varepsilon_u - \varepsilon_o) E_j = \left(\frac{f_{ju}}{E_j} - \frac{t_1}{2R} \right) E_j \rightarrow f_{ju, res} = \left(f_{ju} - \frac{t_1 \cdot E_j}{2R} \right) \quad (16)$$

Λύνοντας την εξίσωση (12) ως προς ρ_{jx} και εξισώνοντας με τη σχέση $\rho_{jx} = 2t_j/b$ προκύπτει

$$\frac{2t_j}{b} = \frac{\Lambda \cdot f_c}{\alpha \cdot f'_{ju}} \quad (17)$$

Στην εξίσωση (17) αντικαθιστώντας την σχέση (16) και για $t_j = k \cdot t_1$ προκύπτει η τελική μορφή ως εξής:

$$\frac{2kt_1}{b} = \frac{\Lambda \cdot f_c}{\alpha \cdot \left(f_{ju} - \frac{t_1 \cdot E_j}{2R} \right)} \rightarrow (2k \cdot \alpha \cdot f_{ju}) \cdot t_1 - \left(\frac{\alpha \cdot k \cdot E_j}{R} \right) t_1^2 - \Lambda \cdot f_c \cdot b = 0 \quad (18)$$

Θεωρούμε ότι θα χρησιμοποιηθούν 2 στρώσεις ΙΟΠ άρα $k=2$ και το t_1 που θα προκύψει το μέγιστο απαιτούμενο για τις 2 διευθύνσεις του σεισμού αντιστοιχεί σε μια στρώση υφάσματος. Για ένταση σεισμού στη διεύθυνση X, $b=350\text{mm}$ προκύπτει από τη σχέση (18) $t_1=0,1\text{mm}$.

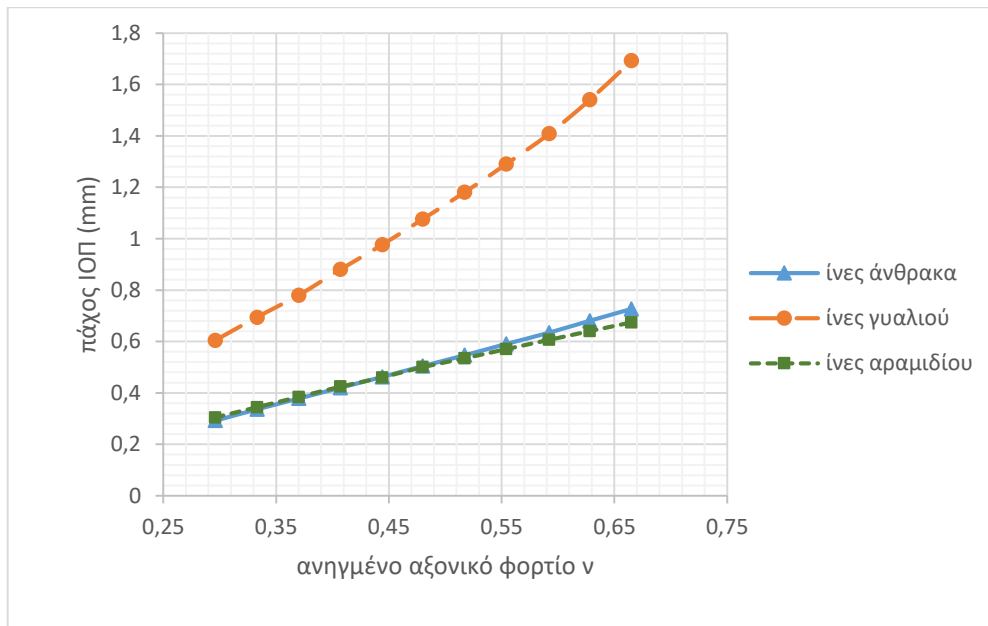
Αντίστοιχα για διεύθυνση Y, $b=500\text{mm}$ προκύπτει $t_1=0,145\text{mm}$. Οπότε θα τοποθετηθούν 2 στρώσεις ΙΟΠ άνθρακος πάχους $t_1=0,145\text{mm}$.

Διάγραμμα ανηγμένου αξονικού φορτίου ν-απαιτούμενο πάχος ΙΟΠ(mm) για στοχευόμενη πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής $\mu\theta=4,6$ με βάσει τα δεδομένα του παραδείγματος και με τιμές των υλικών τις εξής:

Άνθρακας: μέτρο ελαστικότητας $E_j=230\text{GPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ju}=3800\text{MPa}$

Γυαλί: μέτρο ελαστικότητας $E_j=70\text{GPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ju}=1900\text{MPa}$

Κέβλαρ: μέτρο ελαστικότητας $E_j=115\text{GPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ju}=3500\text{MPa}$.



Σχήμα5: Διάγραμμα ν-πάχος ΙΟΠ(mm) για $\mu\theta=4,6$

Από το σχήμα 5 παρατηρούμε ότι ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα και αραμιδίου προσφέρουν την στοχευόμενη πλαστιμότητα με πάχος σχεδόν το μισό από ίνες γυαλιού. Επιβεβαιώνουμε αυτή την παρατήρηση με μια αναζήτηση των υλικών στην αγορά. Βλέπουμε εκεί ότι τα όρια πάχους των ΙΟΠ από γυαλί είναι μεγαλύτερα. Εντύπωση εμφανίζουν οι ίνες άνθρακα και αραμιδίου που έχουν σχεδόν ίδια καμπύλη.

➤ **Ενίσχυση με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας με βάσει το σχέδιο του ΕΚ-Μέρος 3 (2019)**

Ο προσδιορισμός του δείκτη πλαστιμότητας $\mu\theta$ για περισφιγμένο υποστύλωμα με ΙΟΠ προκύπτει από τον ορισμό $\mu\theta=\theta_u/\theta_y$. Ο υπολογισμός των παραμορφωσιακών μεγεθών θ_u & θ_y γίνεται βάσει των §8.6.4.2.1.1 και §8.6.4.2.1.2 του σχεδίου ΕΚ8-3(2019).

$$\mu\theta=\theta_u/\theta_y \text{ όπου } \theta_u=\theta_y+\theta_u^{pl} \text{ σχέδιο.ΕΚ8-3(2019)(εξ.8.5)} \quad (19)$$

$$\mu\theta=\frac{\theta_y+\theta_u^{pl}}{\theta_y} \rightarrow \theta_u^{pl}=(\mu\theta-1)\theta_y \quad (20)$$

Για δύναμη που δρά παράλληλα στην διεύθυνση X

Για ΙΟΠ άνθρακα όπως παραπάνω ισχύουν και εδώ $E_j=230\text{GPa}$ $f_{ju}=3800\text{MPa}$. Ο υπολογισμός του θ_y γίνεται σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στη §8.4.2.2.1 του σχεδίου ΕΚ8-3(2019).

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + \alpha_v z}{3} + 0,0019 \left(1 + \frac{h}{1,6 + L_s}\right) + \frac{\varphi_y d_{bL} f_y}{8\sqrt{f_c}} \text{ σχέδιο.ΕΚ8-3(2019)(εξ.8.1)} \quad (21)$$

$$\text{Όπου } L_s = \frac{h_{καθ}}{2} = 1,5m, h=500mm, d_{bL}=16mm, b=350mm$$

$$d' = d_1 = c + \varphi_h + \varphi_L / 2 = 25 + 8 + 16 / 2 = 41mm \text{ και } d = h - d_1 = 500 - 41 = 459mm$$

$$\text{προκύπτει } z = d - d' = 418mm$$

Ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία για τον υπολογισμό του φ_y και α_v .

$$E_c = 10000(f_c(\text{MPa}))^{1/3} = 24908,76\text{MPa}, \alpha = \frac{E_s}{E_c} = 8,03, \delta' = \frac{d'}{d} = 0,089$$

Θλιβόμενο ποσοστό $\rho = \rho' = A_s / bd = 2\Phi 16 / 350 \cdot 459 = 0,0025$ (όπου A_s το εμβαδό του θλιβόμενου οπλισμού παράλληλα στη πλευρά που είναι κάθετη στη διεύθυνση X).

$\rho_v = A_{sv} / bd = 4\Phi 16 / 350 \cdot 459 = 0,005$ (όπου A_{sv} το εμβαδό του ενδιάμεσου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση X)

Προκύπτει ότι :

I. Αν η διαρροή οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού τότε :

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y} = 0,0219 \quad (22)$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y} = 0,0174 \quad (23)$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0,38 \quad (24)$$

$$\text{Προκύπτει: } \varphi_y = \frac{f_y}{E_s(1 - \xi_y)d} = 0,00735m^{-1} \quad (25)$$

II. Αν η διαρροή οφείλεται σε διαρροή λόγω παραμορφώσεων του σκυροδέματος τότε :

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1,8abdf_y} = -0,0123 \quad (26)$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta') = 0,00545 \quad (27)$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0,41 \quad (28)$$

$$\text{Προκύπτει: } \varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d} = 0,00593m^{-1} \quad (29)$$

Τελικά επιλέγουμε για τιμή της καμπυλότητας διαρροής την ελάχιστη από τις δύο παραπάνω διαρροές, άρα $\varphi_y = 0,00593m^{-1}$

Συνεχίζουμε τους υπολογισμούς για τον υπολογισμό του συντελεστή α_v .

Υπολογισμός ροπής:

$$\frac{M_y}{bd^3} = \varphi_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left[0,5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right] + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\} = 277,24\text{KNm} \quad (30)$$

Υπολογισμός τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7.2.2.):

$$V_{Mu} = \frac{M_y}{L_s} = 151,49\text{KN} \quad (31)$$

Καθώς επίσης και η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7.2.2.):

$$\frac{V_{R,c}}{b_w d} = \max \left[180(100\rho_L)^{1/3}, 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0,2}{d}} f_c^{1/6}} \left(1 + \sqrt{\frac{0,2}{d}} \right) f_c^{1/3} + 0,15 \frac{N}{A_c} \right] = 185,2\text{KN} \quad (32)$$

Αν $V_{Mu} < V_{R,c}$ τότε $\alpha_v = 0$ αλλιώς $\alpha_v = 1$. Εδώ $\alpha_v = 0$.

Τώρα επιστρέφουμε στη σχέση (19) γνωρίζοντας όλα τα μεγέθη και προκύπτει $\theta_y = 0,00652$ rad. (20) $\rightarrow \theta_u^{pl} = 0,0235$ ή 2,35% rad

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην §8.6.4.2.1.2 του σχεδίου ΕΚ8-3(2019) η θ_u^{pl} προκύπτει από την σχέση:

$$\theta_u^{pl} = k_{axial} \cdot k_{rein} \cdot k_{concrete} \cdot k_{shearspan} \cdot k_{confinement} \cdot \theta_{uo}^{pl} \quad (33)$$

Οι παράμετροι της σχέσης αναλύονται παρακάτω σύμφωνα με §8.4.2.2.2 του σχεδίου ΕΚ8-3(2019) ως εξής:

$$\theta_{uo}^{pl} = 0,039, k_{axial} = 0,2^v = 0,621 \text{ για } v = 0,296$$

$$k_{rein} = \left[\frac{\max(0,01, \omega')}{\max(0,01, \omega_{tot} - \omega')} \right]^{0,25} = 0,756 \quad (34)$$

$$\omega' = \frac{A'_s f_y}{bd f_c} - \frac{2\phi 16 \left(\frac{460}{1,10} \right)}{350 \cdot 459 \left(\frac{17}{1,10} \right)} = 0,067 \quad (35)$$

$$\omega_{tot} = \frac{A_{tot} f_y}{bd f_c} = 0,271 \quad (36)$$

$$k_{concrete} = \left[\min \left(2, \frac{f_c (MPa)}{25} \right) \right]^{0,1} = 0,953 \quad (37)$$

$$k_{shearspan} = \left[\frac{1}{25} \min \left(9, \frac{L_s}{h} \right) \right]^{0,35} = 1,066 \quad (38)$$

Έχοντας όμως βρει και το θ_u^{pl} μπορώ να υπολογίσω το $k_{confinement}$ το οποίο προκύπτει $k_{confinement} = 1,26$

Και σύμφωνα με το σχεδίου ΕΚ8-3(2019) §8.6.4.2.1.2 και εφόσον απαιτείται ενίσχυση παίρνω:

$$k_{confinement} = 24 \left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c} \right)^j \rightarrow 1,26 = 24 \left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c} \right)^j \rightarrow \ln(1,26) = \left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c} \right)^j \ln(24) \rightarrow \left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c} \right)^j = 0,073 \quad (39)$$

$$\text{Με } \left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c} \right)^j = \alpha c_j \lambda (1 - 0,5\lambda) \text{ και } \lambda = \min \left(0,4, \frac{k_{efj} \varepsilon_{uj} E_j \rho_{jx}}{f_c} \right) \quad (40)$$

υπολογίζουμε την τιμή του απαιτούμενου ρ_{jx} ως εξής:

προκύπτει το $\lambda = 0,069 < 4$ και έπειτα $\rho_{jx} = 0,00052$ όπου $c_j = 1,9$ για ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακος, συντελεστής περισφιγξης $\alpha = 0,576$ όπως υπολογίσαμε παραπάνω, $k_{efj} = 0,6$ και $\varepsilon_{uj} = \min(0,015, \varepsilon_{ju}) = 1,5\%$

$$\rho_{jx} = \frac{2t_j}{b} \rightarrow t_j = 0,092 \text{ mm} \quad (41)$$

Πραγματοποιήσαμε ίδια διαδικασία για δύναμη που δρα παράλληλα στη διεύθυνση Y και προέκυψε $t_2 = 0,186 \text{ mm}$. Με βάση τον ΕΚ8-3 θα τοποθετήσω μία στρώση ΙΟΠ άνθρακος πάχους $t_2 = 0,186 \text{ mm}$.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Παραμένουν όλα ίδια με το παράδειγμα 1 απλώς τώρα θα δείξουμε πως από δεδομένο υλικό και τρόπο περισφιγξης θα προκύψει $\mu_\theta = 4,6$.

a) Μεταλλικός κλωβός με τοποθετημένα ελάσματα ανά $s = 175 \text{ mm}$ και ανηγμένο αξονικό φορτίο $v = 0,296$

Έλασμα $A_{sw} = b_w \times t_w = 25 \times 5 = 125 \text{ mm}^2$ και $s = 175 \text{ mm}$,

$$\text{προκύπτει από τη σχέση } \rho_s = \frac{A_{sw}^{\sigma\kappa}}{s} \cdot \frac{2}{b_{max}} = 0,00285$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας α υπολογίζεται όπως και παραπάνω $\alpha = 0,5184$. Αντικαθιστώντας στην σχέση $\Lambda = \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw} f_c$ ΚΑΝ.ΕΠΕ.(εξ.Σ8.17α) υπολογίζουμε $\Lambda = 0,024$. Αφού τα έχουμε όλα τώρα θα αντικαταστήσουμε στην σχέση (9) και θα προκύψει $\mu_\varphi = 11,8$. Από τη σχέση (1) προκύπτει ορθά $\mu_\theta = 4,6$.

b) ΙΟΠ άνθρακος 2 στρώσεων με πάχος στρώσης $t_1 = 0,1 \text{ mm}$ και ανηγμένο αξονικό φορτίο $v = 0,296$

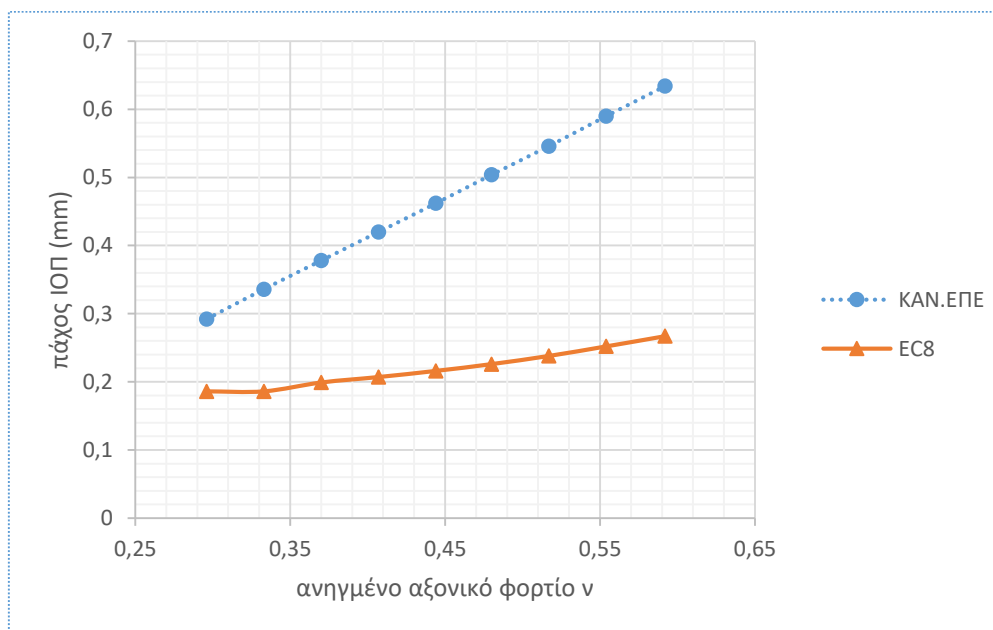
Στη σχέση (18) γνωρίζουμε όλα τα μεγέθη και με $t_1=0,1\text{mm}$ προκύπτει $\Lambda=0,13$. Αντικαθιστούμε στη σχέση (12) προκύπτει $K=0,759$. Επομένως εφαρμόζοντας τη σχέση (15) παίρνουμε $\mu_\varphi=11,8$. Από τη σχέση (1) προκύπτει ορθά $\mu_\theta = 4,6$. Όμως έχει προηγηθεί η παρόμοια διαδικασία για δύναμη που δρα παράλληλα στη διεύθυνση Y με ίδιο πάχος ΙΟΠ και προέκυψε μικρότερο μ_θ . Τελικά κρατάμε $\mu_\theta = 3,2$ που είναι και το μικρότερο.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΕΚ-ΜΕΡΟΣ 3 (2019).

c) ΙΟΠ άνθρακος 1 στρώσης με πάχος στρώσης $t_1=0,1\text{mm}$ και ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu=0,296$

Μετά από διερεύνηση όπως και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ παραπάνω §b) έτσι και εδώ προέκυψε δυσμενέστερη συνθήκη δύναμη που δρα παράλληλα στη διεύθυνση Y. Θα παρουσιάσουμε εν συντομία τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για δύναμη παράλληλα στη διεύθυνση X και παρόμοια ακολουθούμε και για Y. Από τη σχέση (41) προκύπτει ρ_{jx} . Αντικαθιστώντας στην σχέση (40) προκύπτει το $\lambda=0,0765 < 0,4$ και κατά συνέπεια υπολογίζουμε τον εκθέτη της σχέσης (39) βρίσκοντας έτσι το $k_{confinement}=1,2933$. Έχοντας ήδη όλα γνωστά βρίσκω το $\theta_u^{pl}=0,0242\text{rad}$ από τη σχέση (33). Γνωρίζουμε από σχέση (21) την το $\theta_y=0,00652\text{rad}$. Τελικά προκύπτει από (20) $\mu_\theta=4,6$.

Διάγραμμα ν-πάχος ΙΟΠ(άνθρακος) για το υποστύλωμα του παραδείγματος και για στοχευόμενη πλαστιμότητας σε όρους στροφής χορδής $\mu_\theta=4,6$.

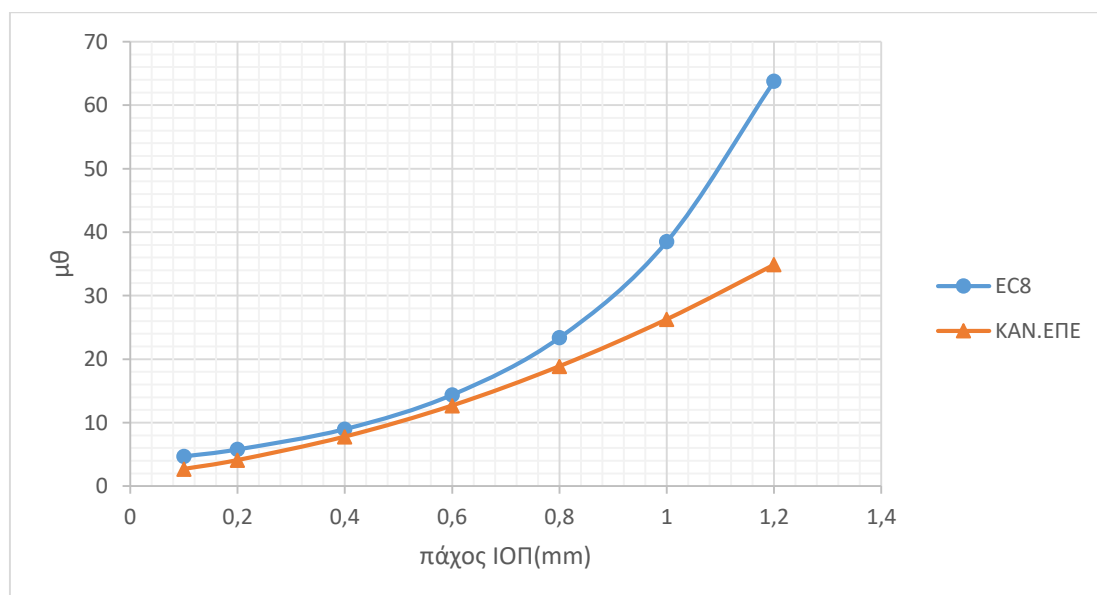


Σχήμα 6: Διάγραμμα ανηγμένου αξονικού φορτίου ν-πάχος στρώσης ΙΟΠ(άνθρακα) για επίτευξη πλαστιμότητας σε όρους στροφής χορδής $\mu_\theta=4,6$ για τους κανονισμούς ΚΑΝ.ΕΠΕ και ΕΚ-μέρος 3 (2019)

Παρατηρούμε στο διάγραμμα του σχήματος 6 ότι το πάχος ΙΟΠ από άνθρακα για τα δεδομένα του παραδείγματος αυξάνεται και με τους δύο κανονισμούς με αύξηση του ανηγμένου αξονικού φορτίου. Επιπλέον κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ φαίνεται μια σχεδόν γραμμική μεταβολή του πάχους στρώσης σε σχέση με το ανηγμένο αξονικό φορτίο. Όμως, εντύπωση προκαλεί η μεγάλη διαφορά του πάχους ΙΟΠ μεταξύ των κανονισμών που για τις περισσότερες τιμές του

ανηγμένου αξονικού φορτίου είναι σχεδόν διπλάσιο. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι αρκετά συντηρητικότερος από τον ΕΚ-μέρος 3 (2019).

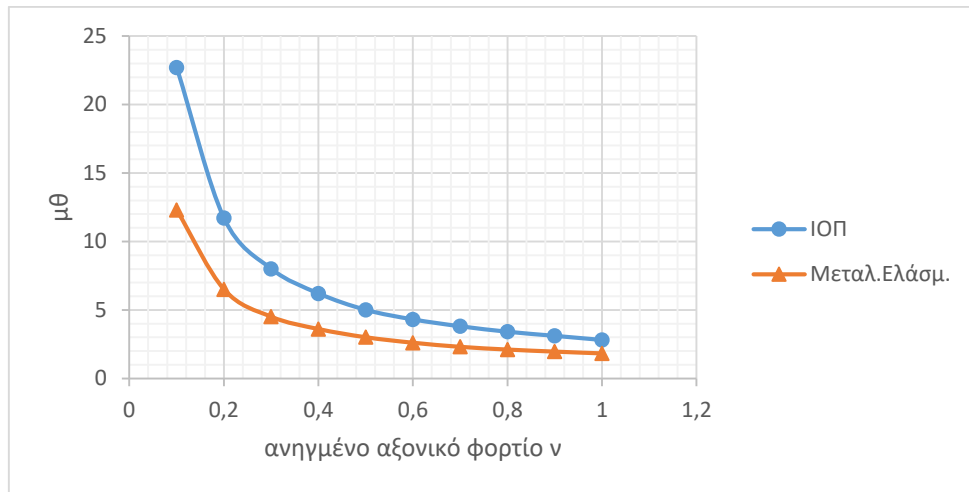
Διάγραμμα πάχος στρώσης ΙΟΠ(άνθρακα)-μθ για τη διατομή και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος του παραπάνω παραδείγματος και ανηγμένο αξονικό φορτίο σταθερό και ίσο με 0,296.



Σχήμα 7: Διάγραμμα πάχος στρώσης ΙΟΠ(άνθρακα)-μθ για τα δεδομένα διατομής και υλικών του παραπάνω παραδείγματος σύμφωνα με τους κανονισμούς ΚΑΝ.ΕΠΕ και ΕΚ-μέρος 3 (2019) για σταθερό ανηγμένο αξονικό φορτίο $v=0,296$.

Παρατηρούμε στο διάγραμμα του σχήματος 7 την πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής $\mu\theta$ που υπολογίζουν οι δύο κανονισμοί για την διατομή του παραδείγματος και για ανηγμένο αξονικό φορτίο $v=0,296$. Και στις δύο αυτές μεθόδους με αύξηση του πάχους ΙΟΠ εμφανίζεται αύξηση της πλαστιμότητας. Για πάχος ΙΟΠ(άνθρακα) έως και 0,8mm η πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής $\mu\theta$ για τους δύο κανονισμούς παραμένει σχεδόν ίδια με μια μικρή αύξηση αυτής του ΕΚ-μέρος 3 (2019). Όμως για πάχη ΙΟΠ μεγαλύτερα του 0,8mm ο ΕΚ-μέρος 3 (2019) τείνει να δίνει σχεδόν διπλάσια $\mu\theta$.

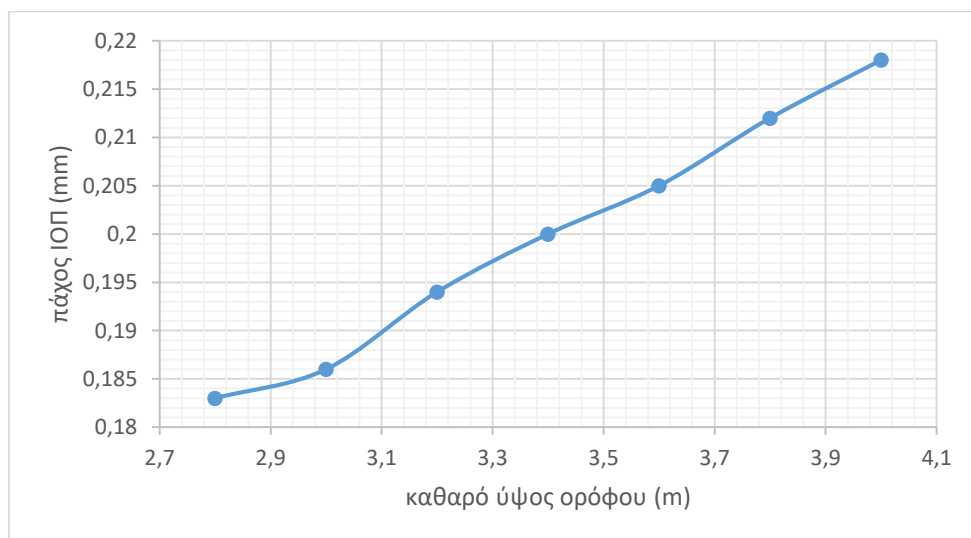
Διάγραμμα v -μθ κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ για ενίσχυση με ΙΟΠ(άνθρακα) πάχος στρώσης 0,8mm και με μεταλλικό κλωβό με ελάσματα διαστάσεων $b_w \times t_w = 25\text{mm} \times 5\text{mm}$ ανά $s=175\text{mm}$. Εφαρμόζεται η διερεύνηση στη διατομή και στα μηχανικά χαρακτηριστικά του παραπάνω παραδείγματος.



Σχήμα 8: Διάγραμμα ν-μθ κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ για μέθοδο ενίσχυσης με ΙΟΠ (άνθρακα) πάχος στρώσης 0,8mm και με μεταλλικό κλωβό με ελάσματα διαστάσεων $b_w \times t_w = 25\text{mm} \times 5\text{mm}$ ανά $s = 175\text{mm}$ για το παραπάνω διάγραμμα

Στο διάγραμμα του σχήματος 8 θέλουμε να δούμε την επηροή που προκαλεί ο τρόπος ενίσχυσης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ στην πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής με αύξηση του ανηγμένου αξονικού φορτίου. Το πάχος στρώσεων και η απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ελασμάτων ήταν τυχαία. Παρατηρούμε ότι για τους δύο τρόπους ενίσχυσης οι καμπύλες μειώνονται με τον ίδιο ρυθμό.

Διάγραμμα $h_{καθ}$ -πάχος στρώσης ΙΟΠ (άνθρακα) για την διατομή και τις ιδιότητες του παραπάνω παραδείγματος. Λαμβάνοντας σταθερά το ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu = 0,296$ και την πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής $\mu\theta = 4,6$.



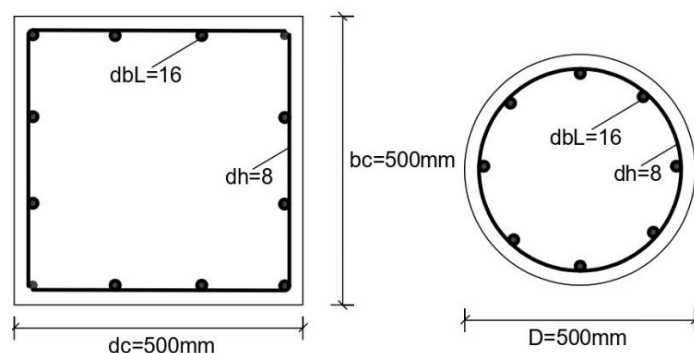
Σχήμα 9: Διάγραμμα $h_{καθ}$ -πάχος στρώσης ΙΟΠ (άνθρακα) για $\nu = 0,296$ & $\mu\theta = 4,6$ κατά ΕΚ-μέρος 3 (2019). Τα υπόλοιπα δεδομένα όπως το παραπάνω παράδειγμα.

Το διάγραμμα του σχήματος 9 παρουσιάζει μία σχεδόν σταθερή αύξηση του πάχους στρώσης ΙΟΠ για ενίσχυση σε πλαστιμότητα με αύξηση του καθαρού ύψους του υποστυλώματος του παραπάνω παραδείγματος. Περιμέναμε τέτοια αύξηση λόγω Poisson που όσο αυξάνεται το ύψος ενός δομικού στοιχείου τόσο μεγαλύτερες είναι οι διογκώσεις του και κατ'έκταση η

ανάγκη του για ενίσχυση σε πλαστιμότητα. Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι μόνο ο ΕΚ-μέρος 3 (2019) λαμβάνει υπόψη το καθαρό ύψος και όχι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Δημιουργήσαμε ένα διάγραμμα ν-μθ για σταθερό πάχος ενίσχυσης ΙΟΠ (άνθρακα) 0,4mm με μέτρο ελαστικότητας $E_j=230\text{GPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ju}=3800\text{MPa}$ για την διατομή του παραπάνω παραδείγματος καθώς και για τις δύο παρακάτω διατομές. Όποια άλλα δεδομένα πάρθηκαν ίδια με του παραδείγματος. Επίσης για την κυκλική διατομή ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης είναι $\alpha=1,0$ καθώς δεν έχω αβεβαιότητες λόγω εξομάλυνσης που έχω στις άλλες διατομές §Σ6.2.2.α) του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ο κανονισμός που εφαρμόστηκε είναι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

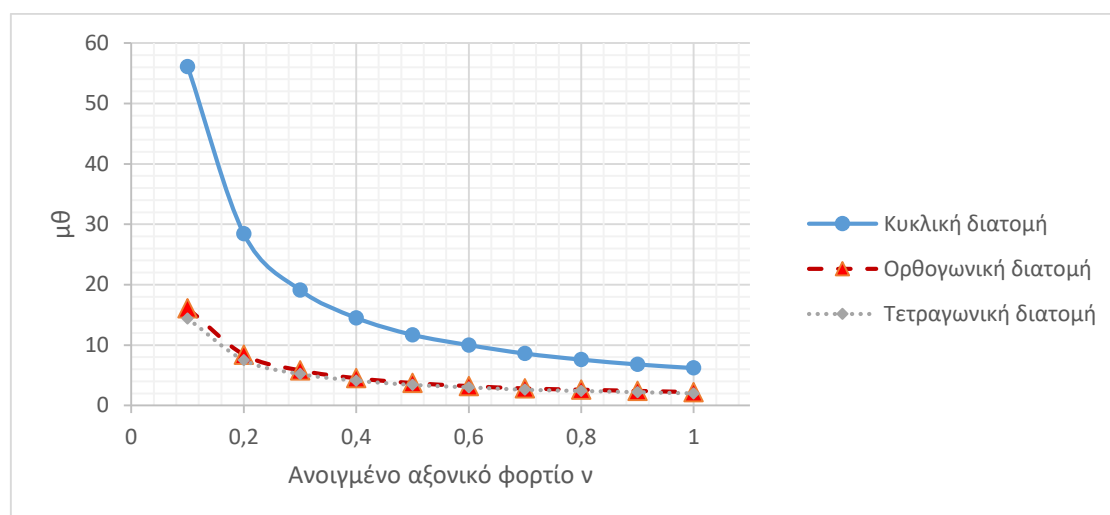
Δίνονται τα αποτελέσματα στον παρακάτω πίνακα και αναπαρίστανται σε διάγραμμα.



Σχήμα 10: Διατομές επιπλέον υποστυλωμάτων

ν	Κυκλική διατομή	Ορθογωνική διατομή	Τετράγωνη διατομή
0,1	56,1	16,1	14,4
0,2	28,4	8,4	7,5
0,3	19,1	5,8	5,2
0,4	14,5	4,5	4,1
0,5	11,7	3,7	3,4
0,6	10	3,2	3
0,7	8,6	2,8	2,6
0,8	7,6	2,6	2,4
0,9	6,8	2,4	2,2
1,0	6,2	2,2	2

Πίνακας 2: Τιμές πλαστιμότητας σε όρους στροφής χορδής μθ για κάθε διατομή από τις παραπάνω ξεχωριστά, με βάση την τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου ν.



Σχήμα 11: Διάγραμμα ν-μθ για τις παραπάνω διατομές με πάχος στρώσης ΙΟΠ (άνθρακα) 0,4mm

Παρατηρούμε πως ανεξαρτήτως διατομής με βάσει τον ΚΑΝ.ΕΠΕ παρουσιάζεται ίδιος ρυθμός μείωσης της πλαστιμότητας με αύξηση του ανηγμένου αξονικού φορτίου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

-Για τη διατομή του παραδείγματος και για στοχευόμενη πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής μθ προέκυψε πάχος ΙΟΠ σχεδόν διπλάσιο κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ σε σχέση με τον ΕΚ-μέρος 3 (2019). Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ με αύξηση του ανηγμένου αξονικού φορτίου ν για στοχευόμενο συντελεστή πλαστιμότητας μθ είναι πιο συντηρητικός.

-Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ προσφέρει μεγαλύτερη επιλογή τρόπων ενίσχυσης με την ίδια αποτελεσματικότητα. Οπότε δίνει και την άνεση στο μηχανικό να αντιμετωπίσει ευκολότερα ένα πρόβλημα και με λιγότερες αβεβαιότητες.

-Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ δε λαμβάνει υπόψιν το καθαρό ύψος του υποστρώματος με συνέπεια να δίνει πιο συντηρητικές λύσεις για μικρές ανάγκες ενίσχυσης. Άρα θα ξεκινήσουμε τη μελέτη μας κατά ΕΚ-μέρος 3 (2019) διότι θα μας δώσει οικονομικότερες λύσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Δρίτσος Σ., «Ενισχύσεις-Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2019

[2] Αθ.Χ. Τριανταφύλλου, «Ενισχύσεις Κατασκευών Σκυροδέματος και Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά», Κεφ.2 «Υλικά και Τεχνικές»

[3] ΟΑΣΠ(2017)

ΚΑΝ.ΕΠΕ.(Κανονισμός Επεμβάσεων), ΦΕΚ 2984/Β'/30-08-2017, 2^η Αναθεώρηση 2017

[4] Eurocode 8 Part 3. Design of Structures for Earthquake Resistance (2019), "Assessment and Retrofitting of Buildings", Final Draft Revision, European Committee for Standardization, CEN/TC250, Portugal:2019-02-25

