

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΙΟΠ. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΚΑΙ EC8-3 (2022)

ΠΑΠΑΣΤΑΜΑΤΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, up1072182@ac.upatras.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την σύγκριση αποτελεσμάτων για ανοικτές και κλειστές ενισχύσεις, έναντι διάτμησης, σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος κατ' εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ, καθώς και των αντίστοιχων που προκύπτουν με χρήση του EC8-3(σχέδιο 2022).

Η σύγκριση αυτή θα γίνει παραμετροποιώντας τα βασικά μεγέθη που επηρεάζουν την προσφερόμενη αντοχή της ενίσχυσης όπως η κατηγορία σκυροδέματος και χάλυβα, το υλικό των πολυμερών, το πάχος των υλικών και το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης του δομικού στοιχείου.

Με την χρήση λογισμικού θα ληφθούν τιμές της προσφερόμενης αντοχής και με την κατασκευή διαγραμμάτων, θα γίνει η σύγκριση των δύο τρόπων ενίσχυσης με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και των κλειστών ενισχύσεων με τους δυο κανονισμούς.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστοχία σε διάτμηση είναι ένα ψαθυρό φαινόμενο, που μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική κατάρρευση του στοιχείου χωρίς προηγούμενες μεγάλες παραμορφώσεις.

Οι κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να είναι πλάστιμες, δηλαδή κατά την διαρροή να παραμορφώνονται σημαντικά χωρίς να χάνουν ουσιαστική φέρουσα ικανότητα.

Επομένως, πρέπει η διάτμηση να αποφεύγεται ως τρόπος αστοχίας μιας κατασκευής. Επειδή παλαιότερα δεν υπήρχε επαρκής γνώση πάνω στο αντικείμενο, δεν υπήρχαν αυστηρές προδιαγραφές συνδετήρων σε δοκούς και υποστυλώματα, όπου η διάτμηση είναι κρίσιμη κατά τον σεισμό.

Έτσι πολλές από τις παλαιότερες κατασκευές, ειδικά πριν το 1985, απαιτούν κάποιου είδους ενίσχυση σε τέμνουσα.

Οι πιο αποτελεσματικές μορφές ενίσχυσης για τέμνουσα είναι οι «κλειστές» ενισχύσεις με μορφή ολόπλευρων μανδυών που περιβάλλουν ολόκληρη την διατομή του στοιχείου. Λόγω της κατασκευαστικής δυσκολίας αυτής της τεχνικής σε ορισμένα στοιχεία (πχ πλακοδοκοί) ο ΚΑΝ.ΕΠΕ προδιαγράφει «ανοικτού» τύπου ενισχύσεις με μορφή συνεχούς U με επαρκής αγκύρωση και μόνο μέσω εποξειδικής κόλλας.

Τα νέα κείμενα του EC8-3 (σχέδιο 2022) δεν προδιαγράφουν ανοικτού τύπου ενισχύσεις.

Υλικά που χρησιμοποιούνται για τέτοιου είδους ενισχύσεις είναι, είτε ο χάλυβας σε μορφή φύλλων, είτε τα ινοπλισμένα πολυμερή, σε μορφή υφασμάτων.

Το πλέον εφαρμόσιμο υλικό για την διατμητική ενίσχυση, σε κτηριακές κατασκευές, είναι τα πολυμερή υφάσματα. Η μεγάλη εφελκυστική αντοχή τους μας επιτρέπει την χρήση σχετικά μικρών διατομών υφάσματος και η ευκολότερη τοποθέτηση τους καθιστά οικονομική την διαχείριση και την εφαρμογή τους. Το κόστος του ίδιου του υλικού είναι αρκετά υψηλό. Η προστασία ή και η αντικατάσταση που απαιτείται λόγω της ευαισθησίας του σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστά την μέθοδο αντιοικονομική συγκριτικά με την χρήση χάλυβα.

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την σύγκριση αποτελεσμάτων για ανοικτές και κλειστές ενισχύσεις, έναντι διάτμησης, σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος κατ' εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ, καθώς και των αντίστοιχων που προκύπτουν με χρήση του EC8-3(σχέδιο 2022). Σημειώνεται ότι το σχέδιο του EC8-3(σχέδιο 2022) δεν υιοθετεί, προς το παρόν, σχέσεις για ανοικτές ενισχύσεις.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Ένα δομικό στοιχείο απαιτεί ενίσχυση έναντι τέμνουσας, είτε γιατί ο κορμός δεν μπορεί να παραλάβει την λοξή θλίψη, είτε γιατί ο οπλισμός διάτμησης είναι ανεπαρκής.

Στην περίπτωση της αδυναμίας παραλαβής λοξής θλίψης, η πρόσθετη απαιτούμενη αντοχή προσφέρεται με περίσφιξη ή προσθέτοντας περισσότερο σκυρόδεμα, με μορφή μανδύα. Όταν ο οπλισμός διάτμησης δεν είναι επαρκής εφαρμόζονται εξωτερικά στοιχεία χάλυβα ή ινοπλισμένων πολυμερών που παίρνουν την μορφή εξωτερικών συνδετήρων. Σπάνια ένα στοιχείο απαιτεί ενίσχυση σε λοξή θλίψη γιατί αυτό προϋποθέτει επαρκή οπλισμό διάτμησης, κάτι που είναι σπάνιο σε παλαιότερες κατασκευές στην Ελλάδα. Επιπλέον οι σχετικά μεγάλες διατομές, των δοκών, στις παλαιότερες κατασκευές εξασφαλίζουν επαρκή αντοχή σε λοξή θλίψη.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ § Σ8.2.2.2(i) συνιστά την κατασκευή κλειστών ενισχύσεων με την μορφή ολόπλευρων μανδύων σε ολόκληρη την διατομή του στοιχείου. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό απαιτείται η πλήρης αγκύρωση, με ακραία στοιχεία, του οπλισμού ενίσχυσης για την μεταφορά των δυνάμεων στο αρχικό στοιχείο. Κατά παρέκκλιση ο ΚΑΝ.ΕΠΕ επιτρέπει την εφαρμογή ανοικτών ενισχύσεων με αγκύρωση, χωρίς πρόσθετα ακραία στοιχεία υπό τρεις προϋποθέσεις

- α) $h \geq h_j \geq 2 \cdot L_e$
- β) το αρχικό στοιχείο να είναι επαρκές στον συνδυασμό φόρτισης $G + \Psi_2 \cdot Q$
- γ) ο ποιοτικός έλεγχος των εργασιών να είναι υψηλής στάθμης

Στην περίπτωση ενίσχυσης με εξωτερικά στοιχεία, η συνολική τέμνουσα αντοχής του στοιχείου υπολογίζεται ως :

$$V_{Rd,s}^{tot} = V_{Rd,s}^0 + V_{jd} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iii) εξ.8.12})$$

$V_{Rd,s}^0$ είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες του αρχικού στοιχείου και υπολογίζεται εφαρμόζοντας τις σχέσεις του EC2 §6.2.3

V_{jd} είναι η τέμνουσα που θα αναλάβει ο νέος οπλισμός διάτμησης των εξωτερικών στοιχείων και με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ υπολογίζεται ως

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \cdot \rho_j \cdot b_w \cdot h_{j,ef} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin^2 \alpha \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iii) εξ.8.13}) \quad (2.1)$$

Όπου:

σ_{jd} είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του εξωτερικού οπλισμού διάτμησης

ρ_j είναι το γεωμετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού

b_w είναι το πλάτος της διατομής

$h_{j,ef}$ είναι το ενεργό (για την ανάληψη της τέμνουσας) ύψος της ενίσχυσης

θ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του στοιχείου και της διεύθυνσης των αναμενόμενων λοξών ρωγμών την οποία ο ΚΑΝ.ΕΠΕ θεωρεί ίση με 45°

α είναι η γωνία του εξωτερικού οπλισμού ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου

Το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού υπολογίζεται ως

$$\rho_j = \frac{2 \cdot A_j}{s_j \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \text{ ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (Σ8.8)}$$

Όπου $A_j = t_j \cdot w_j$

t_j είναι το πάχος του εξωτερικού οπλισμού

w_j και s_j είναι το πλάτος και η αξονική απόσταση του εξωτερικού οπλισμού

Στην περίπτωση συνεχών φύλλων $t_j = \frac{A_j}{s_j}$, $w_j = S_j$ και για την προτεινόμενη τιμή της διεύθυνσης των λοξών ρωγμών $\theta = 45^\circ$ με γωνία τοποθέτησης του εξωτερικού οπλισμού $\alpha = 90^\circ$ η εξίσωση (2.1) απλοποιείται και γίνεται

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \cdot \rho_j \cdot b_w \cdot h_{j,ef} = \frac{2 \cdot A_j}{s_j} \cdot h_{j,ef} \cdot \sigma_{jd} = 2 \cdot t_j \cdot h_{j,ef} \cdot \sigma_{jd} \text{ ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (Σ8.9) (2.2)}$$

Το $h_{j,ef}$ μπορεί να θεωρηθεί ίσο με τα 2/3 του στατικού ύψους d .

Στην περίπτωση ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή, η γωνία α είναι η γωνία των κύριων ινών του πολυμερούς ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου, όπου επιδιώκεται να είναι 90°

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του εξωτερικού οπλισμού σ_{jd} υπολογίζεται με βάση μια κρίσιμη τιμή της τάσης σ_{jd} του υλικού ενίσχυσης ή της παραμόρφωσης $\epsilon_{j,crit}$, η οποία εξαρτάται από την μορφή αστοχίας. Η τιμή σχεδιασμού σ_{jd} θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τις δύο πιθανές μορφές αστοχίας ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv)

A) Για την αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης

Πρέπει να ισχύει

$$\sigma_{jd} \leq \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk} \text{ ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv) εξ.(8.14) (2.3)}$$

Όπου:

f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής του υλικού και

γ_m είναι ο συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Για την περίπτωση ενίσχυσης με χάλυβα η τιμή του συντελεστή γ_m προσδιορίζεται με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ § 4.5.3.2α και λαμβάνεται $f_{jk} = f_{yk}$

Για την περίπτωση που το υλικό ενίσχυσης είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ § 4.5.3.2β $\gamma_m = \gamma_{IOΠ} = 1,2$ και υπολογίζεται

$$f_{jk} = E_j \cdot \epsilon_{j,crit} \text{ (2.4)}$$

όπου E_j είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης και $\epsilon_{j,crit}$ είναι η κρίσιμη παραμόρφωση.

Όταν χρησιμοποιούνται ΙΟΠ, η αστοχία του υλικού μπορεί να συμβεί σε σημαντικά μικρότερες παραμορφώσεις από την συμβατική παραμόρφωση αστοχίας του υλικού, όπως έχει

προκύπτει από δοκιμές αξονικού εφελκυσμού. Αυτό γίνεται λόγω της τοπικής υπερκαταπόνισης στην θέση όπου το υλικό ενίσχυσης γεφυρώνει το μεγαλύτερο άνοιγμα μιας κρίσιμης διατμητικής ρωγμής.

Έτσι λαμβάνεται :

$$\varepsilon_{j,crit} = k_v \cdot \varepsilon_{j,max} \quad (2.5)$$

Όπου το k_v είναι συντελεστής που εκφράζει την περίπου τριγωνική κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της κρίσιμης λοξής ρωγμής και λαμβάνεται ίσος με 0.5 και

$$\varepsilon_{j,max} = \varepsilon_{ju} \cdot \psi \leq 1.5\% \quad (2.6)$$

Όπου

ε_{ju} είναι η μέγιστη παραμόρφωση του υλικού και

Ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων

$$\psi = k^{-1/4} > 3/k \text{ KAN.ΕΠΕ § 6.2.3} \quad (2.7)$$

Όπου k το πλήθος των στρώσεων εάν $k \geq 4$ αλλιώς $\psi = 1$

Η μέγιστη τιμή $\varepsilon_{j,max} = 1.5\%$ στοχεύει να περιορίσει το άνοιγμα κρίσιμης λοξής ρωγμής, που θα περιορίσει σημαντικά την συμβολή του σκυροδέματος στην διατμητική αντοχή και η αστοχία θα επέλθει πριν την εξάντληση της αντοχής του υλικού ενίσχυσης.

B) Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης των άκρων

Πρέπει να ισχύει

$$\sigma_{jd} \leq \sigma_{j,crit} \cdot \gamma_{rd} \text{ KAN.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv) εξ.(8.15)} \quad (2.8)$$

Όπου γ_{rd} είναι ο κατάλληλος συντελεστής αβεβαιότητας του προσομοιώματος και λαμβάνεται ίσος με 1,2

Η αστοχία αυτή αποφεύγεται στις κλειστού τύπου ενισχύσεις εξασφαλίζοντας την περιμετρική, συνέχεια του στοιχείου ενίσχυσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ΙΟΠ η περιμετρική συνέχεια εξασφαλίζεται με επαρκείς επικάλυψη των άκρων του υφάσματος ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί χάλυβας εξασφαλίζεται μέσω ηλεκτροσυγκολλήσεων όπου ο ΚΑΝ.ΕΠΕ προτείνει να ελεγχθεί η αντοχή της. ΚΑΝ.ΕΠΕ § Σ8.2.2.2 (iv)

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ ελλείπει αξιόπιστων μέσων δεδομένων βιβλιογραφίας προτείνει η τιμή του $\sigma_{j,crit}$ να υπολογίζεται ως εξής

$$\sigma_{j,crit} = k_v \cdot \sigma_{j,max} \quad (2.9)$$

με

$$k_v = 0,40 + 0,25 \cdot \lambda \leq 0,65 \quad (2.10)$$

Όπου

$$\lambda = L_{av}/L_e \quad (2.11)$$

$L_{av} = h_{j,ef}$ είναι το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης όπου θεωρείται ίσο με τα 2/3 του στατικού ύψους d

L_e είναι το ενεργό μήκος αγκύρωσης, δηλαδή το μήκος αγκύρωσης πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη δύναμη από το υλικό ενίσχυσης δεν αυξάνεται

και υπολογίζεται

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (\text{MPa, mm})$$
$$\sigma_{j,max} = \beta \cdot \frac{\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ}}}}{t_j} \cdot L_e \quad \text{ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv) (\Sigma 8.10)} \quad (2.12)$$
$$\tau_b^{\alpha_{\text{ποκ}}} \cong f_{ctm}$$

t_j είναι το πάχος του υλικού ενίσχυσης και στην περίπτωση χρήσης k επάλληλων στρώσεων πάχους t_1 λαμβάνεται

$$t_j = \psi \cdot k \cdot t_1 \quad (2.13)$$

Όπου ψ υπολογίζεται από την σχέση (2.7) για περισσότερες από 3 στρώσεις

$$\beta = \beta_w \cdot \beta_L \quad (2.14)$$

διορθωτικός συντελεστής

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_j}{s_j} \cdot \sin \alpha}{1 + \frac{w_j}{s_j} \cdot \sin \alpha}} \quad (2.15)$$

συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης και για συνεχή φύλλα ή υφάσματα είναι ίσος με $\sqrt{2}/2$

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi \cdot \lambda}{2}\right) \cong \lambda(2 - \lambda) \quad (2.16)$$

συντελεστής επιρροής διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης όταν $\lambda \leq 1$

$$\beta_L = 1 \quad \text{όταν } \lambda \geq 1$$

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ παρέχει σχέσεις και για την ενίσχυση στοιχείων με κυκλική διατομή στην § 8.2.2.2 (v). Όμως παλαιότερες κτηριακές κατασκευές δεν συνηθίζον να έχουν κυκλικά δομικά στοιχεία. Ενίσχυση σε κυκλικό δομικό στοιχείο κατά κύριο λόγο απαιτείται σε βάρθρα γεφυρών. Όμως τέτοιες ενισχύσεις είναι πέρα από τον σκοπό της παρούσας εργασίας

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΕΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΟΥ EC8-3 (σχέδιο 2022)

Στο καινούριο σχέδιο του EC8-3 (2022), η αύξηση της αντοχής ενός στοιχείου έναντι τέμνουσας, με την χρήση χαλύβδινων στοιχείων, προδιαγράφεται μόνο για υποστυλώματα, ενώ με την χρήση ΙΟΠ προδιαγράφεται και για δοκούς και τοιχώματα σε οποιαδήποτε μορφή (ανοιχτές ή κλειστές).

Στην περίπτωση ενίσχυσης υποστυλώματος με χαλύβδινα στοιχεία, η τέμνουσα που αναλαμβάνει ο νέος οπλισμός διάτμησης προσδιορίζεται από την σχέση

$$V_{jd} = 0.5 \cdot \frac{2 \cdot t_j}{s_j} \cdot w_j \cdot h \cdot \sigma_{jd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad [3] \quad (3.1)$$

Όπου ο συντελεστής 0.5 εκφράζει τον βαθμό επιστράτευσης της τάσης διαρροής του χάλυβα

σ_{jd} είναι η τιμή σχεδιασμού της τάσης του εξωτερικού χαλύβδινου οπλισμού διάτμησης και ισούται με την χαρακτηριστική τιμή της αντοχής του

h είναι το ύψος της διατομής

t_j είναι το πάχος του εξωτερικού οπλισμού

w_j και s_j είναι το πλάτος και η αξονική απόσταση του εξωτερικού οπλισμού και στην περίπτωση συνεχών φύλλων $w_j = s_j$

θ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του εξωτερικού οπλισμού και της διεύθυνσης των αναμενόμενων λοξών ρωγμών και θεωρείται ίσο με 45°

α είναι η γωνία του εξωτερικού οπλισμού διάτμησης ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου και λαμβάνεται ίσο με 90° , στην περίπτωση συνεχών φύλλων

έτσι η εξίσωση (3.1) για συνεχή φύλλα μετατρέπεται

$$V_{jd} = 0.5 \cdot 2 \cdot t_j \cdot h \cdot \sigma_{jd} \quad [3] \quad (3.2)$$

Στην περίπτωση ενίσχυσης με ΙΟΠ ο EC8-3 (σχέδιο 2022) παρέχει την σχέση για την προστιθέμενη διατμητική αντοχή στην κρίσιμη περιοχή

$$V_{R,f} = 0.5 \cdot \min\left(1; \frac{R}{R_0}\right) \cdot \left(2 - \min\left(1; \frac{R}{R_0}\right)\right) \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot \sigma_{jd} \cdot \min(z \cdot \cot \theta; l_f) \quad [3] \quad (3.3)$$

η οποία ισχύει μόνο για κλειστές ενισχύσεις.

Στο κείμενο δεν παρέχονται σχέσεις για ανοιχτές ενισχύσεις παρότι επιτρέπει αυτή την μορφή ενίσχυσης.

Ο συντελεστής 0.5 εκφράζει την περίπου τριγωνική κατανομή των τάσεων.

R είναι η ακτίνα εξομάλυνσης

$$R_0 = 50\text{mm}$$

$\rho_f = 2 \cdot t_f / b_w$ το γεωμετρικό ποσοστό του ΙΟΠ

σ_{jd} είναι η τιμή σχεδιασμού της οριακής αντοχής του υλικού ενίσχυσης $f_{u,f}$, διηρημένης με τον συντελεστή ασφαλείας γ_{fd} ο οποίος προτείνεται να είναι ίσος με 1,4

z είναι ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων και λαμβάνεται ίσος με το στατικό ύψος d

θ είναι η γωνία κλίσης του θλιπτήρα ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου και λαμβάνεται ίση με 45°

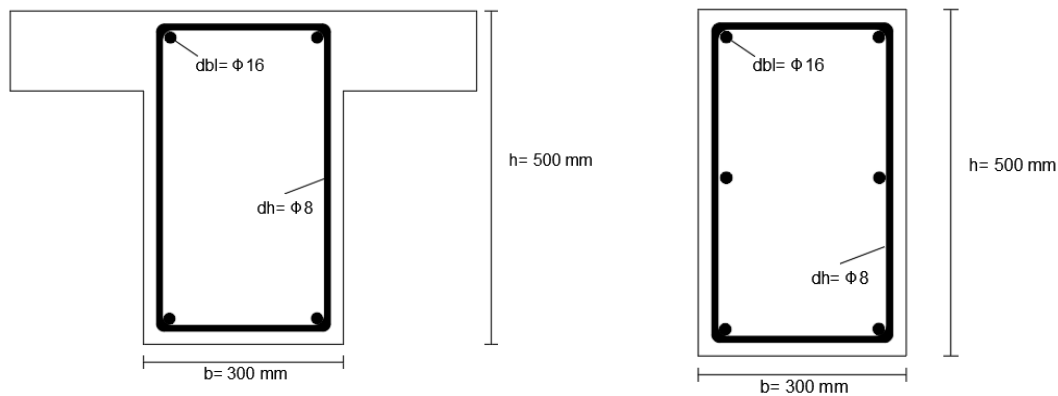
Στο κείμενο του κανονισμού η τιμή του μήκους l_f δεν προσδιορίζεται και δεν είναι εμφανής η επιρροή της γωνίας των ινών ΙΟΠ σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Για αυτό δεδομένου ότι η σχέση αφορά κλειστή ενίσχυση ο όρος αυτός μπορεί να παραληφθεί (Στέφανος Η. Δρίτσος, 2023 [1])

Και η εξ. (3.3) να γραφτεί ως

$$V_{R,f} = 0.5 \cdot \min\left(1; \frac{R}{R_0}\right) \cdot \left(2 - \min\left(1; \frac{R}{R_0}\right)\right) \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot \sigma_{jd} \cdot d \cdot \cot \theta \quad [1] \quad (3.4)$$

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΠΡΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ

Μία τυπική διατομή δοκού που βρίσκουμε σε παλαιότερες κατασκευές έχει συνήθως 4 διαμήκης ράβδους οπλισμού, μία σε κάθε γωνία, με σχετικά μεγάλο ύψος. Παρόμοια διάταξη είχαν και τα υποστυλώματα που μερικές φορές τοποθετούνταν μια ενδιάμεση ράβδος. Το μέλος το οποίο θα μελετηθεί η ενίσχυση, αποτελείται από ράβδους διατομής $\Phi 16$ και συνδετήρες διατομής $\Phi 8$ το στατικό ύψος της οποίας υπολογίστηκε $d = 465\text{mm}$ με $h = 500\text{mm}$ και $b = 300$. Επειδή θα μελετηθεί η προσφερόμενη αντοχή της ενίσχυσης στην δοκό, δεν θα υπολογιστεί η αντοχή του στοιχείου χωρίς την ενίσχυση. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις τυπικές διατομές δοκού και υποστυλώματος αντίστοιχα



Σχήμα 1: διατομή δοκού (αριστερά) διατομή υποστυλώματος (δεξιά)

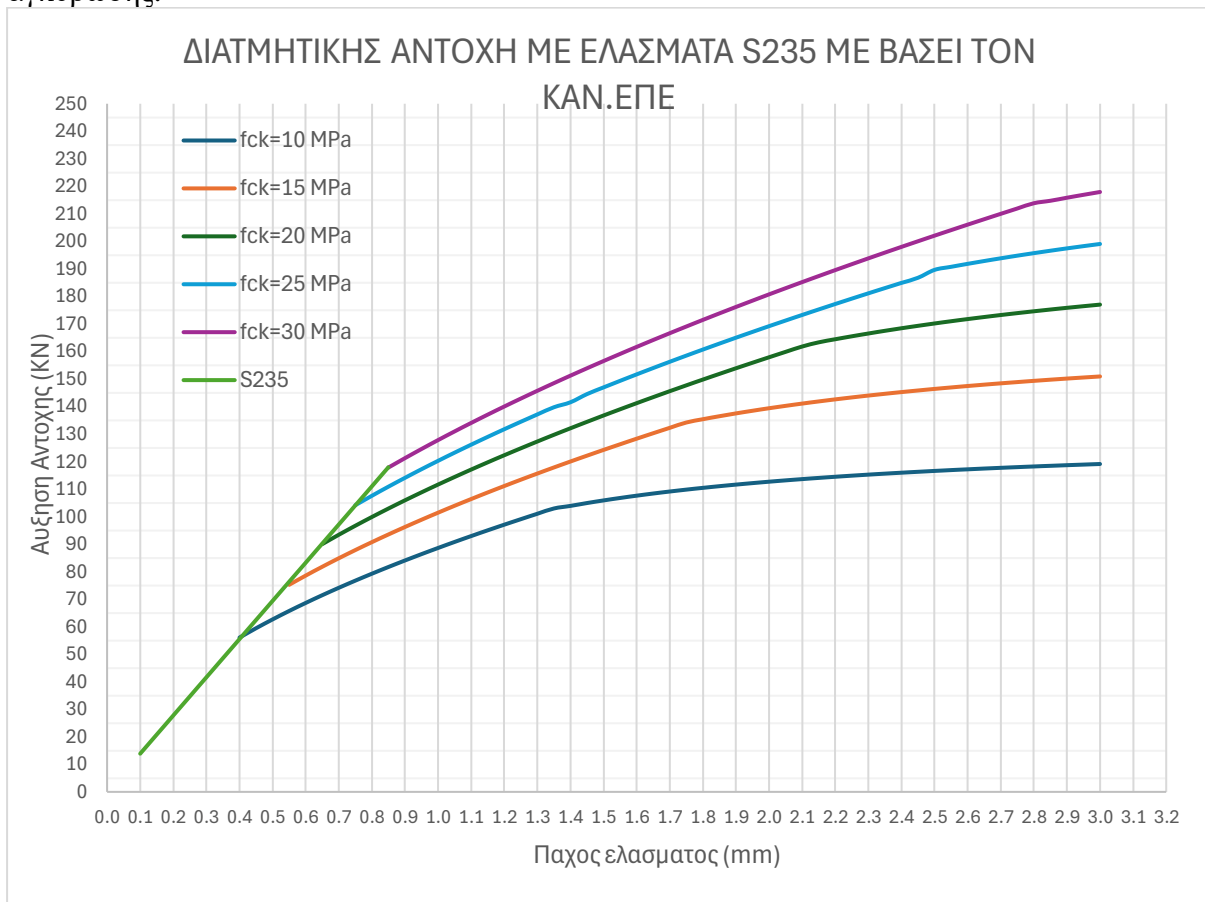
Στις σχέσεις που παρέχει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ για τις κλειστές ενισχύσεις (εξ. 2.2 και 2.3) αυτό που επηρεάζει την προσφερόμενη αντοχή είναι τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης σ_{jd} . Η τάση αυτή εξαρτάται από το πάχος t_j του υλικού, την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας E_j .

Ομοίως στις σχέσεις που παρέχει το σχέδιο EC8-3 (2022) για φύλλα χάλυβα (εξ. 3.1) το πάχος του υλικού ενίσχυσης t_j και η τιμή σχεδιασμού της τάσης του εξωτερικού χαλύβδινου οπλισμού σ_{jd} είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την αντοχή της ενίσχυσης. Στις σχέσεις του EC8-3 (σχέδιο 2022) για την χρήση ΙΟΠ (εξ. 3.4) η ακτίνα εξομάλυνσης του υφιστάμενου δομικού στοιχείου έχει σημαντικό ρόλο στην προσφορά διατμητικής αντοχής.

Για τις ανοιχτές ενισχύσεις όμως, στις εξισώσεις που παρέχει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ εκτός από το πάχος του υλικού ενίσχυσης t_j και το μέτρο ελαστικότητας E_j η ενεργός τάση σχεδιασμού επηρεάζεται από διαφορές παραμέτρους. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ctm} επηρεάζει άμεσα το ενεργό μήκος αγκύρωσης L_e και την μέγιστη τάση $\sigma_{j,max}$ (εξ. 2.12). Επίσης σημαντικό ρόλο στην αντοχή της ενίσχυσης έχει το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης L_{av} (εξ. 2.11). Στην περίπτωση των πολυμερών ινών το μήκος αγκύρωσης το επηρεάζει και το πλήθος στρώσεων υφάσματος που θα χρησιμοποιηθούν (εξ. 2.13 και εξ.2.7)

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΑΝΟΙΧΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όπως ορίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv), καθώς ισχύουν οι προϋποθέσεις § Σ8.2.2.2 (i), ως τιμή σχεδιασμού σ_{jd} θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στην δυσμενέστερη από τους δύο τρόπους αστοχίας που αναφέρει σε αυτή την παράγραφο (αστοχία του ίδιου του υλικού και πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης). Με την χρήση των εξισώσεων (2.3), για την εύρεση της τάσης για την αστοχία του ίδιου του υλικού, και (2.9) έως (2.12), για την εύρεση της τάσης αποκόλλησης, υπολογίστηκε η προσφερόμενη διατμητική αντοχή μέσω της εξίσωσης (2.2). Στα παρακάτω γραφήματα απεικονίζεται η προσφερόμενη αντοχή συναρτήσει του πάχους του υλικού ενίσχυσης, για διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος. Για υλικό ενίσχυσης τον χάλυβα, κατηγορίας S235 (Σχήμα 2) και S275 (Σχήμα 3), και για υφάσματα ΙΟΠ (Σχήμα 4 και Σχήμα 5), αφού έχουμε εξασφαλίσει το απαιτούμενο μήκος ακύρωσης.



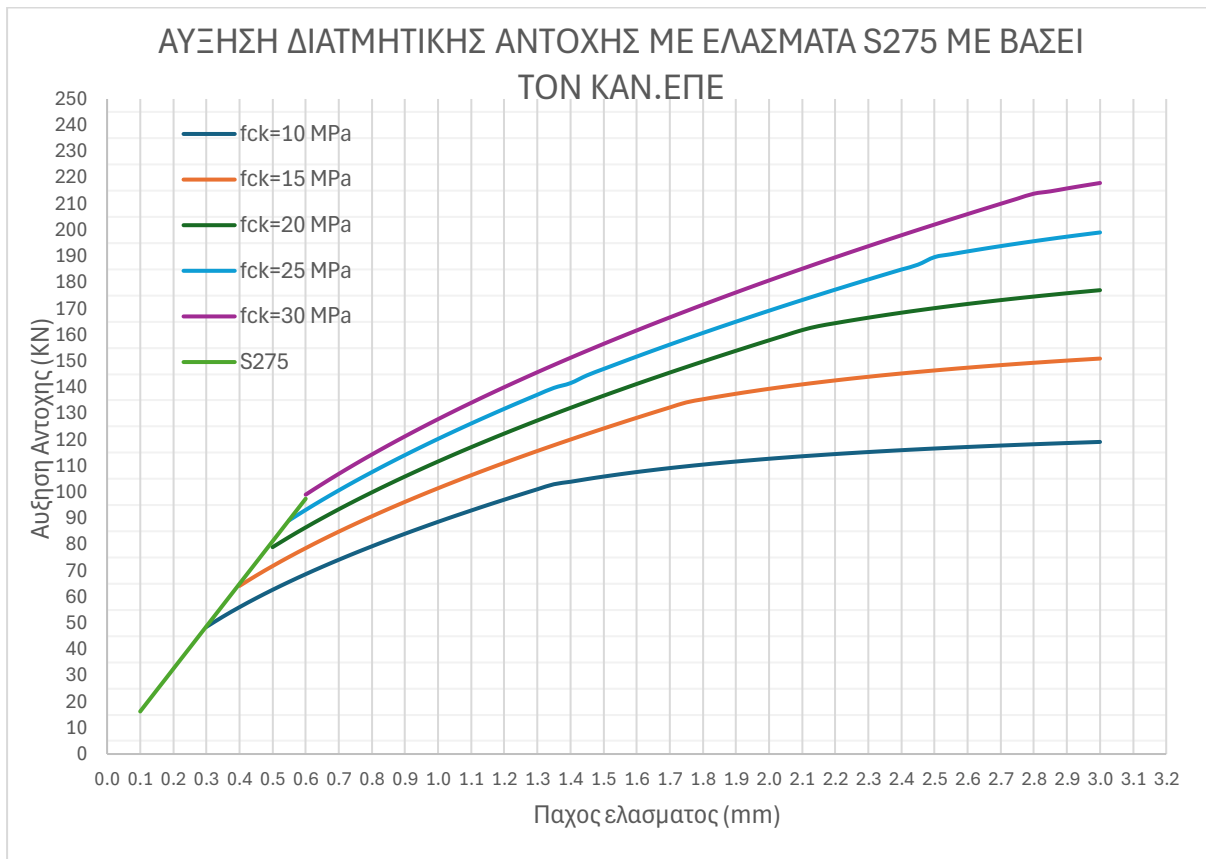
Σχήμα 2 : Προσφερόμενη αντοχή ενίσχυσης συνεχών φύλλων χάλυβα κατηγορίας S235

Η πράσινη γραμμή απεικονίζει τις τιμές στις οποίες αστοχεί το ίδιο το υλικό, ενώ οι υπόλοιπες απεικονίζουν τις τιμές για τις οποίες υπάρχει αποκόλληση, για κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Το μέτρο ελαστικότητας E_j του χάλυβα λήφθηκε ίσο με 200 GPa. Οι τιμές της αντοχής δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες σκυροδέματος, λόγω της αμφιβόλου ποιότητας παραγωγής σκυροδέματος τα παλαιότερα χρόνια και για αυτό ξεκινούν από μικρές τιμές. Οι τιμές του πάχους ελάσματος έχουν μεγάλο εύρος για λόγους σύγκρισης. Κατασκευάσιμες και εφαρμόσιμες διατομές κυμαίνονται κάπου ενδιάμεσα.

Παρατηρείται ότι η αστοχία του ίδιου του υλικού προηγείται της απόσχισης, μόνο σε αρκετά μικρές τιμές του πάχους ενίσχυσης και όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του

υφιστάμενου σκυροδέματος αυξάνεται και το πάχος της ενίσχυσης στο οποίο αρχίζει η αποκόλληση. Για αντοχή $f_{ck} = 10$ MPa προηγείται η απόσχιση για πάχη ενίσχυσης μεγαλύτερα από 0.4 mm ενώ για αντοχή $f_{ck} = 30$ MPa η απόσχιση προηγείται για πάχη ενίσχυσης μεγαλύτερα των 0.85 mm. Αυτό γίνεται γιατί με την αύξηση της κατηγορίας του σκυροδέματος, αυξάνεται και η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας του, που είναι ο κύριος τρόπος μεταφοράς της δύναμης από το σκυρόδεμα στην ενίσχυση.

Παρατηρείται επίσης σε μεγάλες τιμές πάχους της ενίσχυσης, η δημιουργία ενός πλατώ και οι τιμές προσφερόμενης αντοχής να φτάνουν μέχρι κάποια τιμή, περίπου τα 120 KN για $f_{ck} = 10$ MPa και 145 KN για $f_{ck} = 15$ MPa (Σχήμα 2). Αυτό το πλατώ δημιουργείται λόγω του συντελεστή k_v που εκφράζει την κατανομή των τάσεων που όσο μεγαλώνει η διατομή του υλικού ενίσχυσης δεν αξιοποιείται σε όλο της το πάχος (εξ. (2.10)-(2.12))

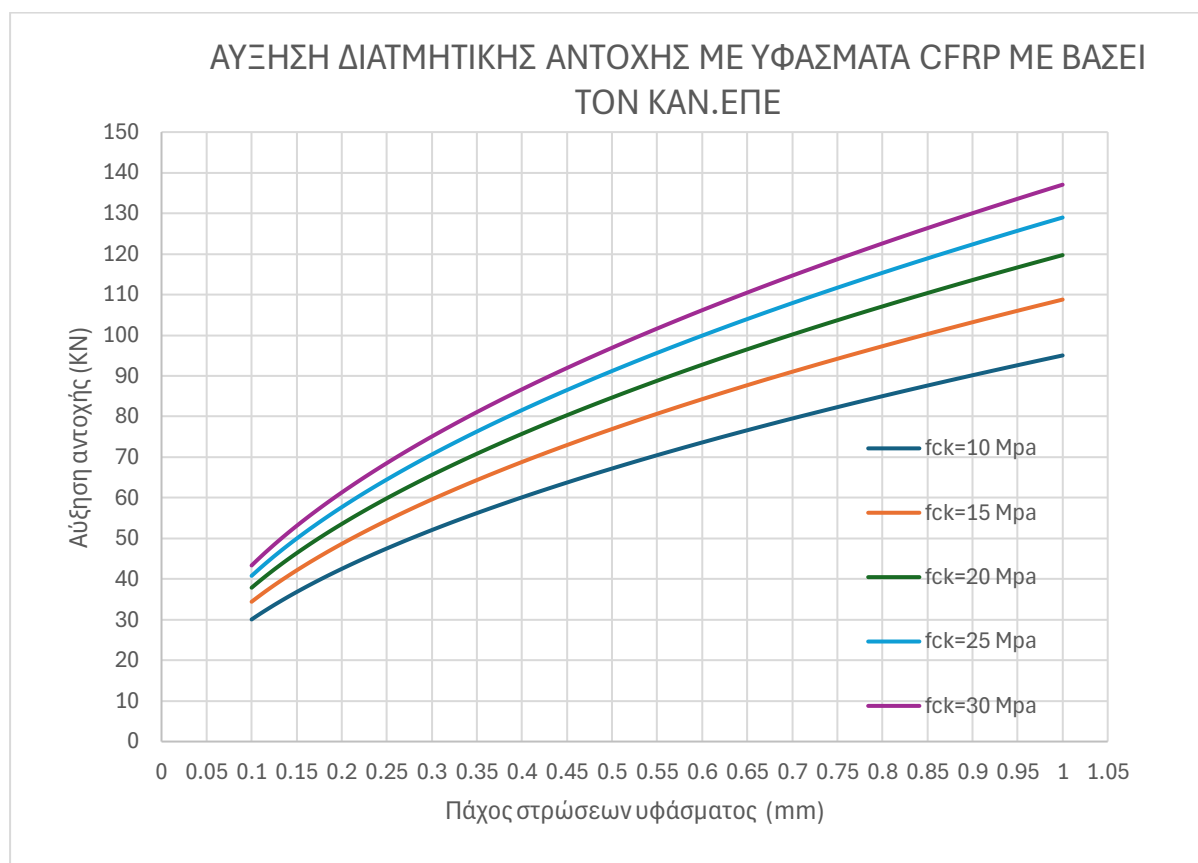


Σχήμα 3: Προσφερόμενη αντοχή ενίσχυσης συνεχών φύλλων χάλυβα κατηγορίας S275

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η κατηγορία του ελάσματος ενίσχυσης, η απόσχιση προηγείται για όλο και μικρότερα πάχη (Σχήμα 3). Για την αντοχή $f_{ck} = 10$ MPa προηγείται η απόσχιση για πάχη μεγαλύτερα των 0.3 mm ενώ για $f_{ck} = 30$ MPa η απόσχιση προηγείται για πάχη ενίσχυσης μεγαλύτερα των 0.6 mm. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται καθαρά στην αύξηση της αντοχής του ελάσματος που επικολλείται, δηλαδή για το ίδιο πάχος της ενίσχυσης απαιτείται μεγαλύτερη τάση για την αστοχία του.

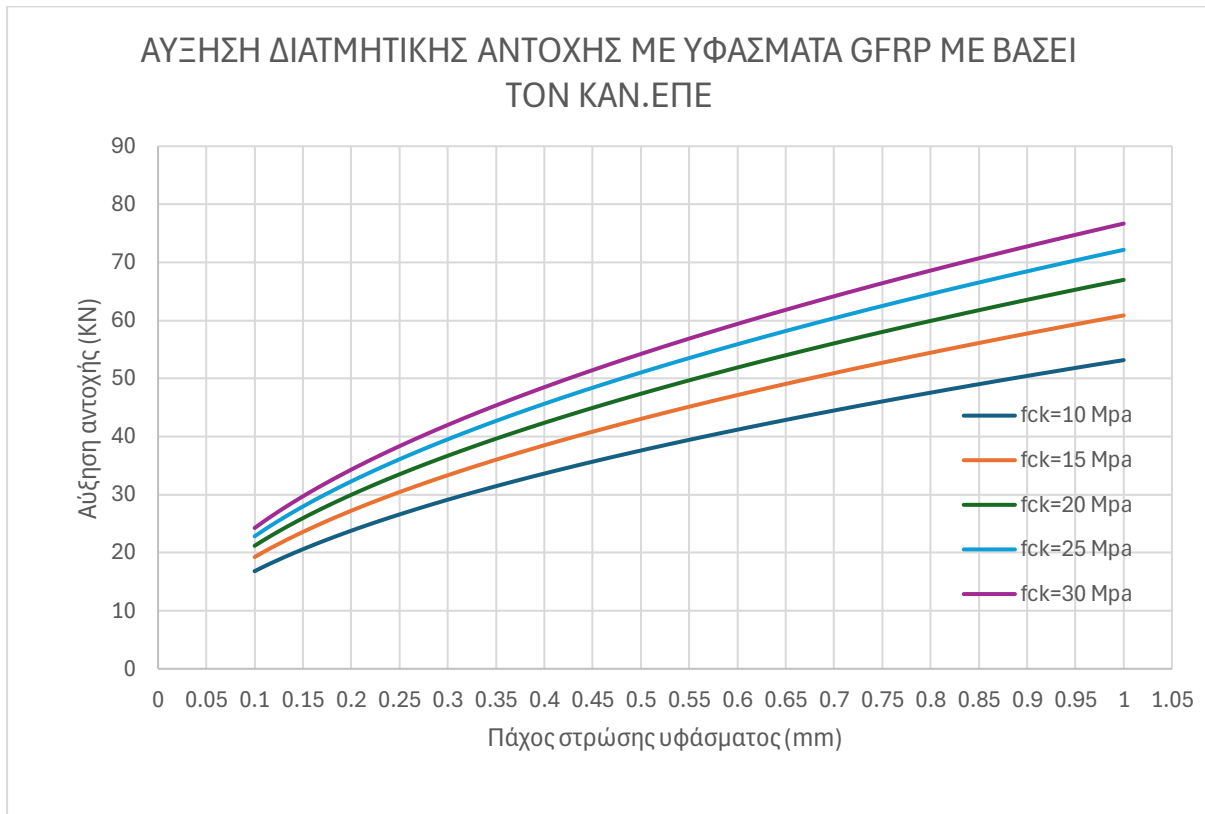
Τα υπόλοιπα σκέλη του διαγράμματος παραμένουν ίδια, με το πλατώ στο διάγραμμα να παραμένει στις ίδιες τιμές αντοχής

Στην περίπτωση που το υλικό ενίσχυσης είναι ΙΟΠ άνθρακα (GFRP) το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε ίσο με $E_j = 230 \text{ GPa}$. Μέσω των (εξ. (2.4) έως εξ. (2.7)) υπολογίστηκε η τιμή της τάσης σχεδιασμού $\sigma_{jd} = 1369$, για την αστοχία του ίδιου του υλικού, με λιγότερες από 4 στρώσεις. Η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από τη σ_{jd} της απόσχισης, για οποιαδήποτε τιμή του t_j . Επομένως για την συγκεκριμένη διατομή που έχει επιλεχθεί, ο κρίσιμος τρόπος αστοχίας θα είναι η απόσχιση για οποιοδήποτε πάχος υφάσματος επιλεχθεί. Η μεγάλη εφελκυστική αντοχή των υφασμάτων, μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε πολύ μικρές διατομές υλικού, χωρίς να προσθέτουν επιπλέον βάρος στην κατασκευή, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την αντοχή των δομικών στοιχείων. Ομοίως με τον χάλυβα η χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής του υπάρχοντος σκυροδέματος, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το πάχος του υλικού που απαιτείται. Για να αυξηθεί η διατμητική αντοχή ενός δομικού στοιχείου κατά 80 kN εάν η αντοχή του σκυροδέματος είναι $f_{ck} = 10 \text{ MPa}$ απαιτούνται συνολικά 0.7 mm υφάσματος ενώ αν $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ απαιτούνται συνολικά 0.55mm υφάσματος (Σχήμα 4), έχοντας σημαντική μείωση του υλικού ενίσχυσης που απαιτείται.



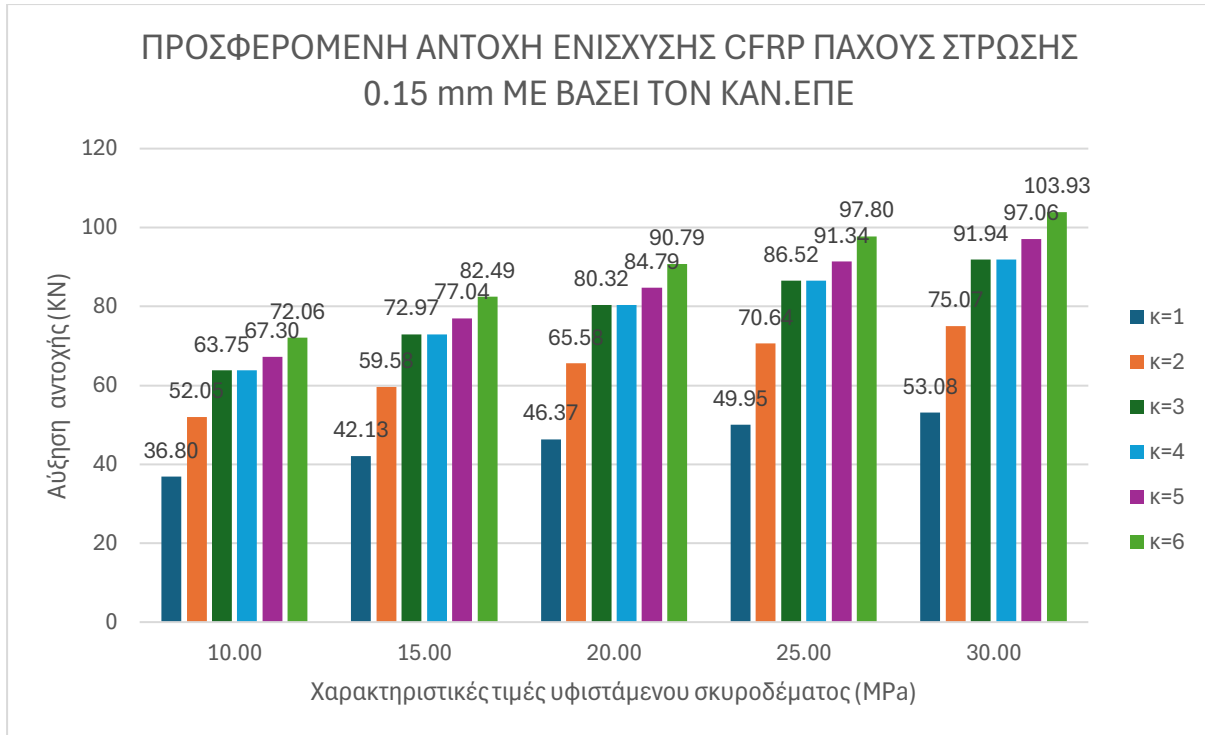
Σχήμα 4: Προσφερόμενη αντοχή ενίσχυσης υφασμάτων CFRP

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η προστιθέμενη αντοχή με την χρήση ΙΟΠ υάλων (GFRP). Τα υφάσματα από νήματα υάλου έχουν μικρό μέτρο ελαστικότητας $E_j = 72\text{GPa}$ και αρκετά μεγάλη παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_{ju} = 2.7\%$. Ομοίως, με τα ΙΟΠ άνθρακα ο κρίσιμος τρόπος αστοχίας θα είναι η απόσχιση του υλικού. Λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας δεν συστήνεται η χρήση ΙΟΠ υάλων για την διατμητική ενίσχυση. Η αντοχή που παρέχουν περιορίζεται σε σχετικά μικρές τιμές, σημαντικά μικρότερες των 100 KN για πάχη ενίσχυσης μέχρι 1mm (Σχήμα 5). Η χρήση ΙΟΠ υάλων συστήνεται κυρίως για τις επεμβάσεις με στόχο την περισφιξη του στοιχείου



Σχήμα 5: προσφερόμενη αντοχή υφασμάτων GFRP

Στο Σχήμα 6 διατυπώνεται η επιρροή που έχουν οι πολλαπλές στρώσεις υφάσματος ΙΟΠ στην προσφερόμενη αντοχή της ενίσχυσης. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ στις εξισώσεις του έχει τον μειωτικό συντελεστή Ψ ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των στρώσεων του υφάσματος για τον υπολογισμό του ενεργού μήκους αγκύρωσης L_e (εξ. 2.12). Θεωρώντας το πάχος μίας στρώσης υφάσματος $t_j = 0.15\text{ mm}$ παρατηρούμε ότι η αντοχή της ενίσχυσης για δύο στρώσεις δεν είναι διπλάσια από την αντοχή της μίας στρώσης για οποιαδήποτε χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος, αντίστοιχα και για τις $\kappa=3$ στρώσεις. Πρακτικά για λιγότερες από $\kappa=4$ στρώσεις οι τιμές είναι ίδιες με αυτές του Σχήματος 4. Για 4 ή περισσότερες στρώσεις, η αύξηση της αντοχής είναι πρακτικά ανύπαρκτη. Η αύξηση από τις 3 στρώσεις (συνολικό πάχος ενίσχυσης 0.45 mm) σε $\kappa=4$ στρώσεις έχει σχεδόν μηδενική διαφορά ενώ η πέμπτη στρώση θα προσφέρει μόλις 6 KN. Πρακτικά ο ΚΑΝ.ΕΠΕ αποτρέπει τον σχεδιασμό ενισχύσεων με πολλές στρώσεις υφάσματος



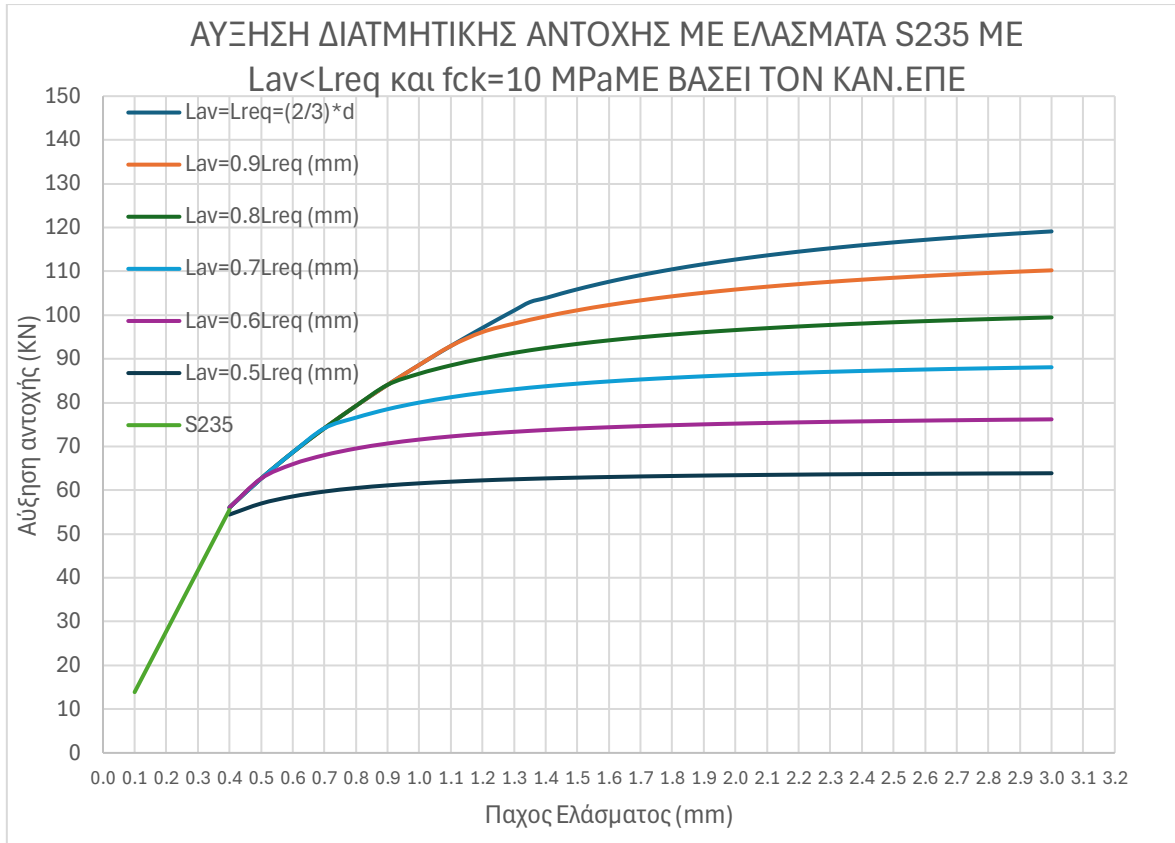
Σχήμα 6 : προσφερόμενη αντοχή ανά στρώμα υφάσματος

Όμως αρκετές φορές σε μια κατασκευή δεν μπορούμε να εξασφαλίσουμε το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης L_{av} . Η μείωση του μήκους αγκύρωσης έχει άμεση επιρροή στον συντελεστή λ (εξ. (2.11)) που ο συντελεστής αυτός με την σειρά του, μέσω της εξ. (2.9) επηρεάζει την $\sigma_{j,crit}$

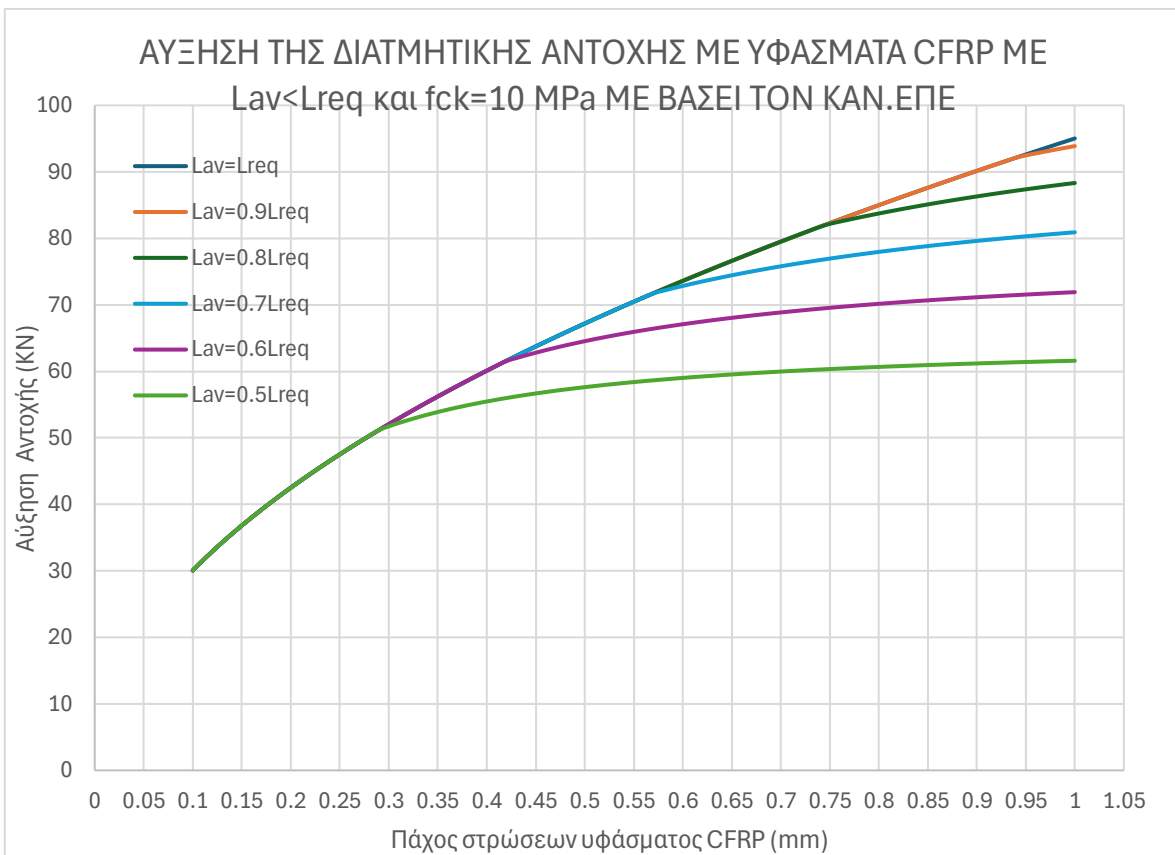
Στα παρακάτω γραφήματα (Σχήμα 7 και 8) διατυπώνεται η επιρροή του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης για την αντοχή της ενίσχυσης, συναρτήσει του πάχους του υλικού.

Στην περίπτωση του χάλυβα, η πράσινη γραμμή απεικονίζει τις τιμές αστοχίας του υλικού ενίσχυσης το οποίο, για συγκεκριμένη τιμή της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος $f_{ck} = 10$, παρέμεινε αμετάβλητο. Το πάχος των φύλλων χάλυβα στο οποίο η κρίσιμη αστοχία γίνεται η απόσχιση μένει ίδιο $t_j = 0.4$ mm. Αυτό που έχει μεταβληθεί σημαντικά είναι το πλατό που δημιουργείται, δηλαδή η μέγιστη διατμητική αντοχή που μπορεί να προσφέρει η ενίσχυση. Φαίνεται από το Σχήμα 7 πως όσο μικρότερο είναι το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης, τόσο μικρότερη η μέγιστη διατμητική αντοχή που μπορεί να αναλάβει η ενίσχυση. Όταν διατίθεται επαρκές μήκος αγκύρωσης ($L_{av} = L_{req}$) το πλατό δημιουργείται περίπου στα 120 KN ενώ με μια μείωση 20% του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης ($L_{av} = 0.8 \cdot L_{req}$) το πλατό δημιουργείται στα 100 KN. Σε ακραία κατάσταση που το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης είναι το μισό από το απαιτούμενο, η αντοχή της ενίσχυσης δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 65 KN.

Ομοίως για τα ΙΟΠ, με την μείωση του διαθέσιμου μήκους αγκύρωσης, το πλατό μεταφέρεται σε χαμηλότερες τιμές προστιθέμενης αντοχής. Για τις ίδιες τιμές που λήφθηκαν και πριν ($L_{av} = L_{req}$) το πλατό δημιουργείται μετά τα 100 KN ενώ για ($L_{av} = 0.8 \cdot L_{req}$) το πλατό δημιουργείται περίπου στα 90 με 100 KN. Παρατηρείται εξίσου μεγάλη απώλεια διατμητικής αντοχής της ενίσχυσης, και στα ΙΟΠ άνθρακα, με την μείωση του μήκους αγκύρωσης



Σχήμα 7: Προσφερόμενη αντοχή για διάφορες τιμές διαθέσιμου μήκους αγκύρωσης για χάλυβα S2



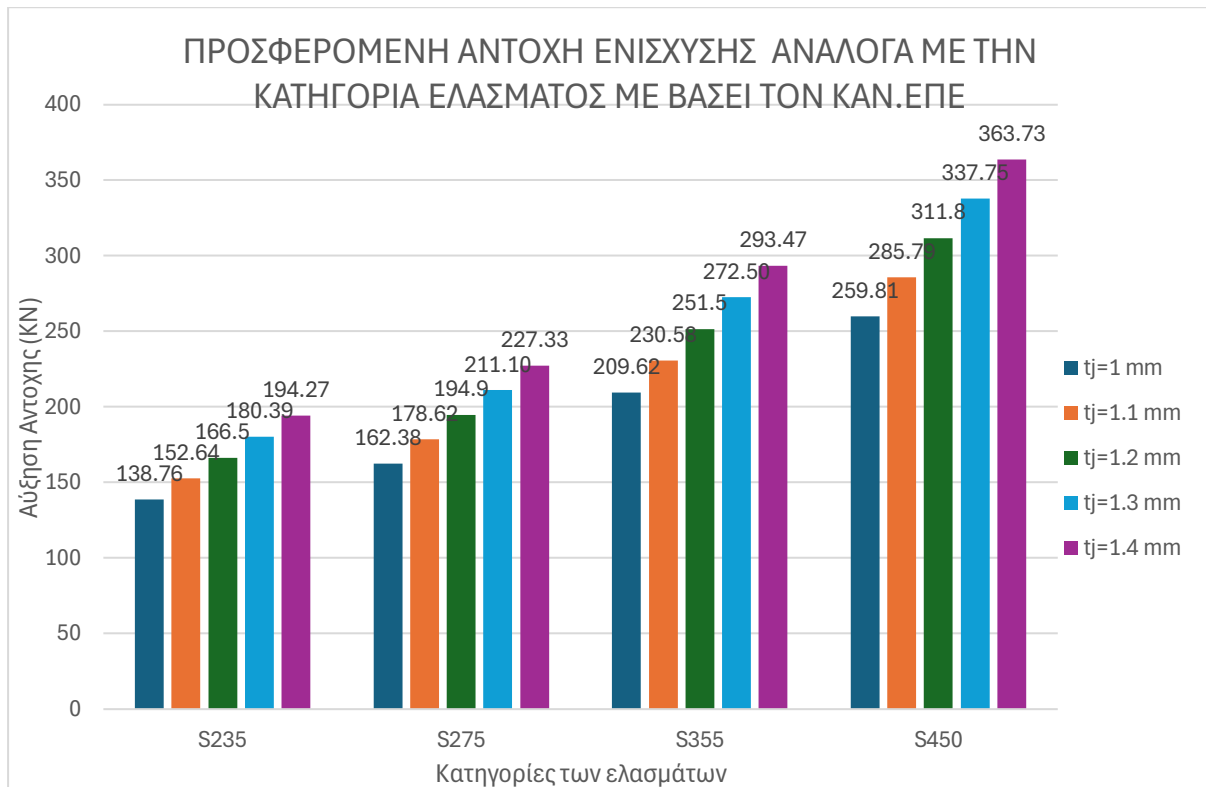
Σχήμα 8: Προσφερόμενη αντοχή για διάφορες τιμές διαθέσιμου μήκους αγκύρωσης για CFRP

6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όπως αναφέρει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ § 8.2.2.2 (iv) στην περίπτωση των κλειστών ενισχύσεων, η αποκόλληση αποφεύγεται μέσω επαρκούς υπερκάλυψης των δυο άκρων του υφάσματος, για ΙΟΠ, και για χάλυβα μέσω ηλεκτροσυγκολλήσεων.

Ως τιμή σχεδιασμού ορίζεται από την εξ. (2.3) με $\gamma_m = 1.05$ για τον χάλυβα και τις εξ. (2.4) έως (2.5) με $\gamma_m = \gamma_{IOP} = 1,2$ για τα ινοπλισμένα πολυμερή. Στις κλειστές ενισχύσεις, όπως προαναφέρθηκε, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή της ενίσχυσης είναι το πάχος, η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης .

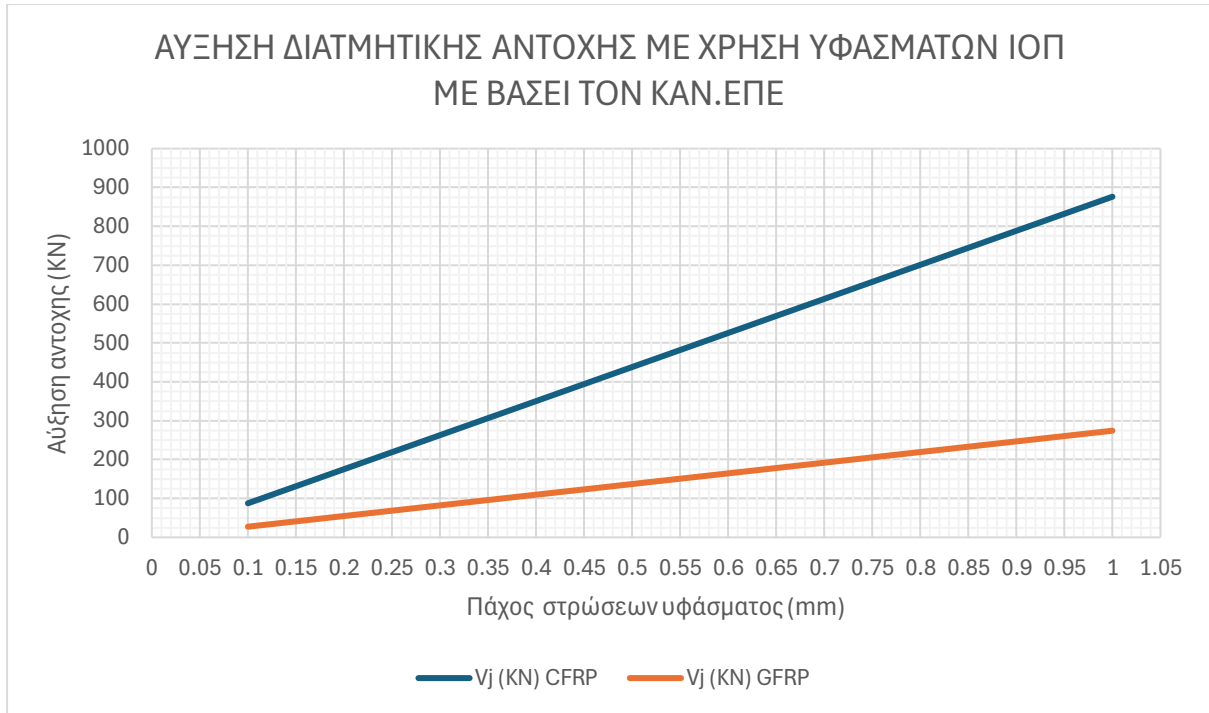
Στο Σχήμα 9 που ακολουθεί εκφράζεται η διατμητική δύναμη της ενίσχυσης για κάποια πάχη ελασματος και κατηγορίες χάλυβα.



Σχήμα 9: προσφερόμενη αντοχή για διάφορα πάχη και κατηγορίες ελασμάτων

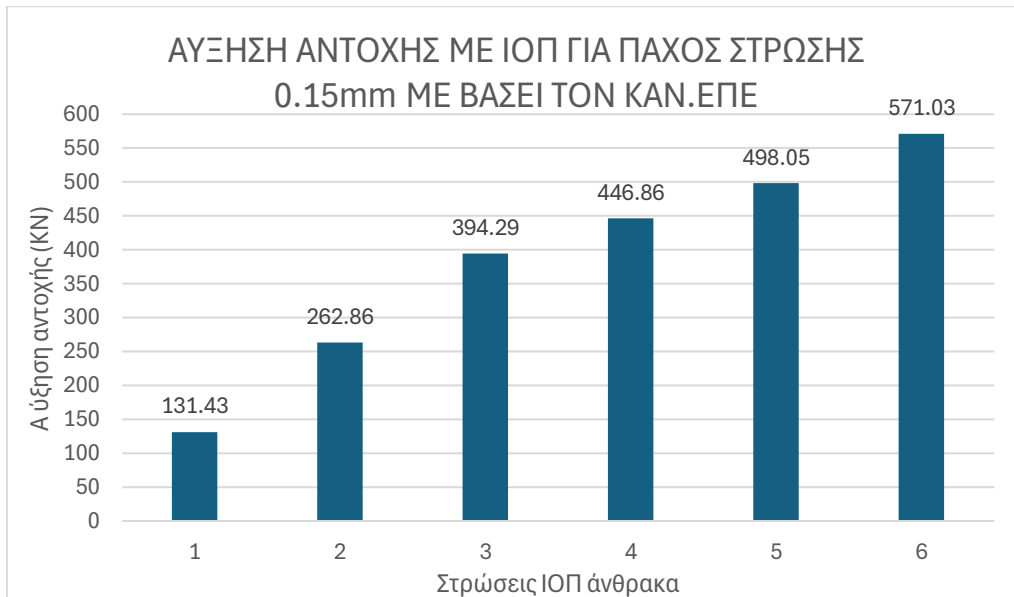
Ετσι , ομοίως για τις χαλύβδινες ενισχύσεις από την εξ.(2.2), προκύπτει αναλογική αύξηση του πάχους ενίσχυσης με αντοχή της. Δηλαδή η διατμητική αντοχή που προσφέρει η ενίσχυση πάχους $t_j = 1.1\text{mm}$ είναι 1.1 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή που προσφέρει η ενίσχυση πάχους $t_j = 1\text{mm}$.

Για την χρήση πολυμερών υφασμάτων, με λιγότερες από 4 στρώσεις, η τιμή της ενεργούς τάσης σχεδιασμού σ_{jd} , για το ίδιο υλικό ενίσχυσης παραμένει ίδια. Ετσι η προσφερόμενη αντοχή της ενίσχυσης αυξάνεται γραμμικά με το πάχος (Σχήμα 10)



Σχήμα 10: Προσφερόμενη αντοχή υφασμάτων ΙΟΠ σε κλειστή ενίσχυση

Όπως και οι ανοιχτές έτσι και οι κλειστές ενισχύσεις επηρεάζονται από τον μειωτικό συντελεστή πολλών στρώσεων Ψ. Για περισσότερες από 3 στρώσεις επηρεάζει άμεσα την κρίσιμη παραμόρφωση του υλικού εξ. (2.4)-(2.6)



Σχήμα 11: Αύξηση της αντοχής με στρώσεις ΙΟΠ άνθρακα CFRP

Για τις πρώτες 3 στρώσεις ισχύει ότι αυξάνονται γραμμικά. Όμως μετά την τρίτη στρώση ξεκινάει και μειώνεται σημαντικά η προσφορά αντοχής της κάθε στρώσης (Σχήμα 11).

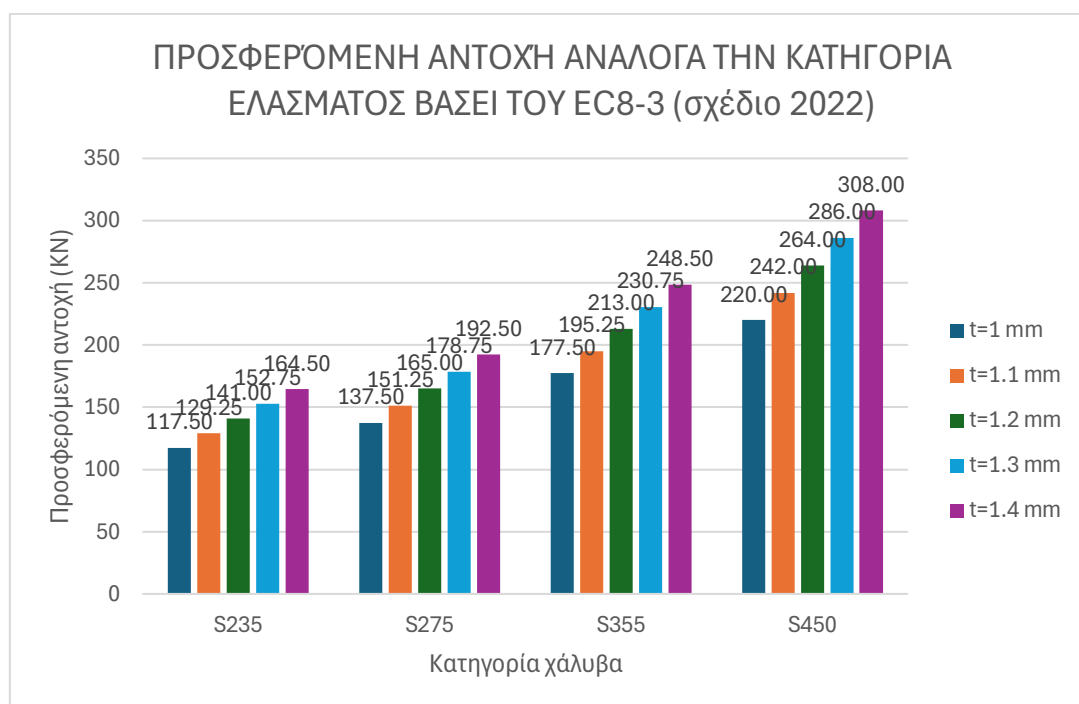
7. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ EC8-3(σχέδιο 2022)

Το σχέδιο του EC8-3, όπως προαναφέρθηκε, παρόλο που επιτρέπει ανοιχτές ενισχύσεις, όπως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ, δεν παρέχει σχέσεις για τον υπολογισμό τους.

Η εξίσωση (3.1) που παρέχει ο EC8-3 (σχέδιο 2022) αναφέρεται για την ενίσχυση υποστυλώματος με χαλύβδινα ελάσματα και είναι ο μόνος τρόπος που επιτρέπει την χρήση τους. Ομοίως με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, επειδή για κάθε κατηγορία υλικού η τιμή σχεδιασμού της τάσης του εξωτερικού χαλύβδινου οπλισμού διάτμησης σ_{jd} παραμένει ίδια, η αύξηση είναι αναλογική. Η διατμητική δύναμη που προσφέρει η ενίσχυση πάχους $t_j = 1.1\text{mm}$ είναι 1.1 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή που προσφέρει η ενίσχυση πάχους $t_j = 1\text{mm}$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12

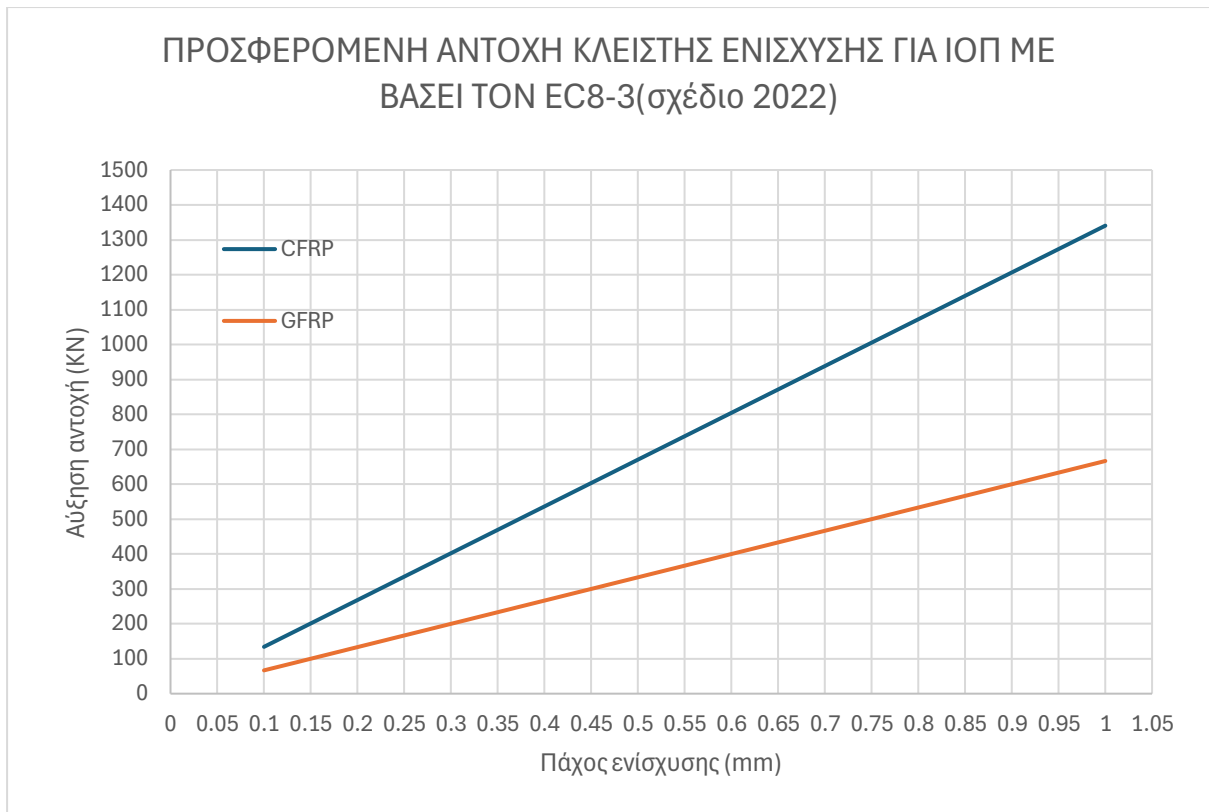
Το σχέδιο του EC8-3, για την χρήση υφασμάτων ΙΟΠ, παρέχει διαφορετικές εξισώσεις για τον υπολογισμό τους, οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν τους την ακτίνα εξομάλυνσης R. Η εξομάλυνση των γωνιών του δομικού στοιχείου απαιτείται, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και να αποφευχθεί η πιθανότητα το ύφασμα να σκιστεί χάνοντας την φέρουσα ικανότητα του.

Θεωρώντας ακτίνα εξομάλυνσης ίση με 50 mm (όσο προορίζει το σχέδιο του EC8-3) η σχέση αντοχής πάχους ενίσχυσης είναι αναλογική (Σχήμα 12)



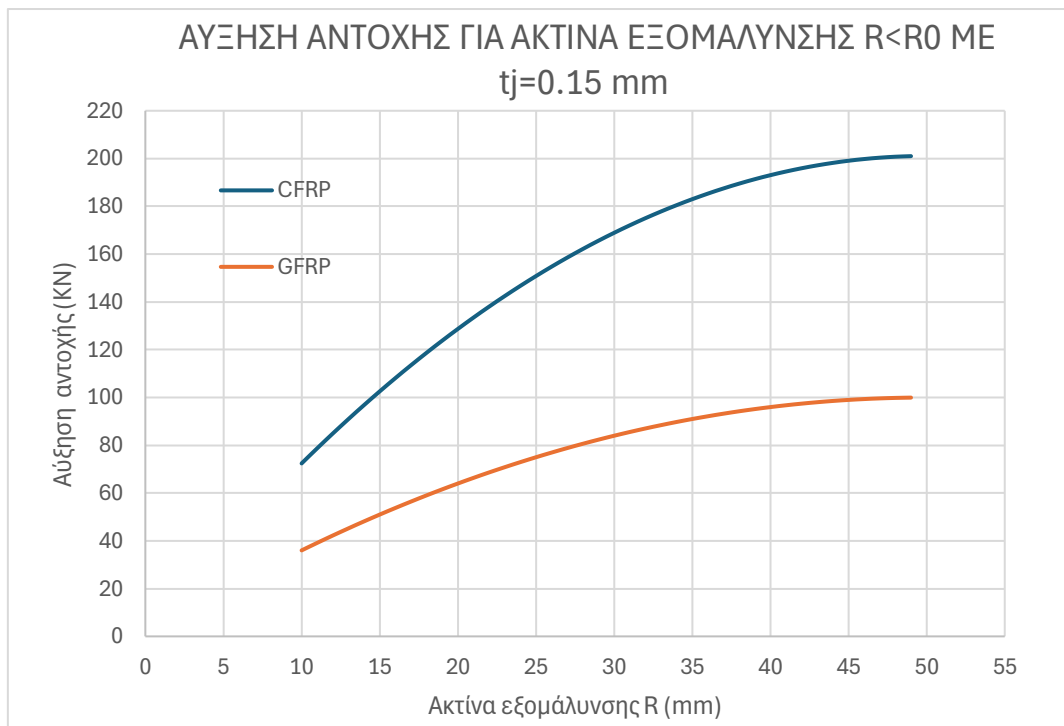
Σχήμα 12: Προσφερόμενη αντοχή ανάλογα την κατηγορία και το πάχος ελάσματος

Για την χρήση πολυμερών υφασμάτων, η τιμή της ενεργούς τάσης σχεδιασμού σ_{jd} , για το ίδιο υλικό ενίσχυσης παραμένει ίδια. Τα σχέδια του EC8-3 δεν λαμβάνουν υπόψιν τον αριθμό στρώσεων του υφάσματος. Έτσι η προσφερόμενη αντοχή της ενίσχυσης αυξάνεται γραμμικά με το πάχος (Σχήμα 13).



Σχήμα 13: προσφερόμενη αντοχή υφασμάτων με ακτίνα εξομάλυνσης ίση με 50mm

Υπάρχει όμως η πιθανότητα να μην είναι εφικτή η εξομάλυνση των γωνιών του δομικού στοιχείου. Αυτό μπορεί να συμβεί κυρίως λόγω ανεπαρκούς επικάλυψης οπλισμών. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ακτίνα εξομάλυνσης θα είναι μικρότερη από 50mm. Για πάχος ενίσχυσης $t_j = 0,15 \text{ mm}$ Προκύπτει το (Σχήμα 14)



Σχήμα 14: αύξηση της αντοχής με την αύξηση της ακτίνας εξομάλυνσης

Λόγω της εξίσωσης (3.4) ακτίνες εξομάλυνσης μεγαλύτερες από 50 mm δεν προσφέρουν καμία επιπλέον αντοχή στο στοιχείο.

8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι κλειστές ενισχύσεις, βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ προσφέρουν πολύ μεγαλύτερες αντοχές με την ίδια ποσότητα υλικού και η αστοχία τους δεν είναι ψαθυρή. Παρατηρείται ότι για το ίδιο πάχος και κατηγορία υλικού ενίσχυσης, η αντοχή που προσφέρεται από τις ανοιχτές ενισχύσεις είναι σημαντικά μικρότερη.

Διαπιστώνεται ότι με την χρήση ελασμάτων χάλυβα κατηγορίας S235 και πάχους 1.4 mm, η κλειστή ενίσχυση αυξάνει την διατμητική αντοχή του δομικού στοιχείου κατά $V_j = 194.27\text{KN}$ για οποιαδήποτε χαρακτηριστική τιμή αντοχής σκυροδέματος (Σχήμα 9).

Η ανοιχτή ενίσχυση αυξάνει την διατμητική αντοχή του δομικού στοιχείου από $V_j = 103.9\text{KN}$, για $f_{ck} = 10$, έως $V_j = 151.22\text{KN}$ για $f_{ck} = 30$, θεωρώντας ότι το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης είναι ίσο με το απαιτούμενο (Σχήμα 2). Ακόμα και για μεγάλες αντοχές σκυροδέματος ($f_{ck} = 30$) η αντοχή που προσφέρει η ανοιχτή ενίσχυση είναι το 78% της αντοχής που προσφέρει η κλειστή.

Για χαμηλότερες αντοχές σκυροδέματος ($f_{ck} = 10$) η προσφερόμενη αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων είναι μειωμένη κατά 47%. Εάν χρησιμοποιηθούν ελάσματα μεγαλύτερης κατηγορίας (S275) στην περίπτωση των κλειστών ενισχύσεων, η αντοχή του δομικού στοιχείου θα αυξηθεί ($V_j = 227.33\text{KN}$, Σχήμα 9) ενώ για την ανοιχτή ενίσχυση θα παραμείνει η ίδια εφόσον η κρίσιμη αστοχία είναι η απόσχιση.

Εάν η ενίσχυση γίνει με ΙΟΠ άνθρακα, για συγκεκριμένο πάχος, η αντοχή που προσφέρει η κλειστή ενίσχυση είναι από 3 μέχρι 4 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή που προσφέρει η ανοιχτή (Σχήμα 4 και Σχήμα 11), ανάλογα την αντοχή του σκυροδέματος του υφιστάμενου δομικού στοιχείου. Ομοίως αν χρησιμοποιηθούν ΙΟΠ υάλου η αντοχή της κλειστής ενίσχυσης είναι 5 μέχρι 7 φορές μεγαλύτερη από αυτή της ανοιχτής ενίσχυσης.

Η αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων έχει ένα άνω όριο το οποίο εξαρτάται από την αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος και το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης. Έτσι καθιστά κάποιες ενισχύσεις μη εφαρμόσιμες. Για αυτό ο ΚΑΝ.ΕΠΕ § Σ8.2.2.2(i), εφόσον η ολόσωμη κλειστή ενίσχυση δεν είναι εφικτή, προτείνει ανοιχτές ενισχύσεις με πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης. Όμως αρκετές φορές ο υπολογισμός των εξωτερικών στοιχείων αυτών είναι δύσκολος και πολλές φορές η τοποθέτηση είναι ανέφικτη.

Οι τιμές που υπολογίστηκαν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής, με υλικό ενίσχυσης τον χάλυβα, για κλειστές ενισχύσεις κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ, δεν διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές που υπολογίστηκαν με τον EC8-3 (σχέδιο 2022). Η διαφορά είναι στο 15% με τον EC8-2 (σχέδιο 2022) να δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα (μικρότερες αντοχές) (Σχήμα 9 και Σχήμα 12)

Οι αντοχές που υπολογίστηκαν για κλειστή ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα CFRP με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και με τον EC8-3 (σχέδιο 2022), για ακτίνα εξομάλυνσης ίση με 50mm, διαφέρουν περίπου 35%, με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ να δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα. (Σχήμα 10 και Σχήμα 13)

Η διαφορά στις αντοχές που δίνουν οι δύο κανονισμοί για κλειστές ενισχύσεις με ΙΟΠ υάλου GFRP είναι ακόμα μεγαλύτερη της τάξης του 59% με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ να δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα (Σχήμα 10 και Σχήμα 13)

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ δεν προσδιορίζει συγκεκριμένη τιμή για την ακτίνα εξομάλυνσης και δεν την χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς, όμως προτείνει να εξομαλυνθούν κατά κάποιο ποσοστό οι γωνίες του δομικού στοιχείου.

Ο EC8-3 (σχέδιο 2022) δεν παρέχει σχέσεις για τον υπολογισμό ανοιχτών ενισχύσεων παρόλο που προβλέπει την κατασκευή τους. Τέλος δεν παρέχει κάποιον τρόπο για τον υπολογισμό I_f και δεν είναι εμφανής η επιρροή της γωνίας των ινών του υφάσματος στην αντοχή.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος έναντι διάτμησης, είναι σκόπιμο (όπου είναι εφικτό) να επιλέγονται κλειστές ενισχύσεις ή ανοιχτές με πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης. Η αντοχή που προσφέρουν, για συγκεκριμένο πάχος υλικού, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που προσφέρουν οι κλειστές ενισχύσεις.

Για χάλυβα S235 η αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων είναι από 22% έως 47% μειωμένη από την αντοχή των κλειστών, για χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής του αρχικού σκυροδέματος $f_{ck} = 30$ έως $f_{ck} = 10$ αντίστοιχα.

Η αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων, όταν είναι κρίσιμη η απόσχιση, δεν εξαρτάται από την κατηγορία χάλυβα της ενίσχυσης.

Για ΙΟΠ άνθρακα η αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων είναι από 3 έως και 4 φορές μικρότερη από αυτή των κλειστών ενισχύσεων, για χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής του αρχικού σκυροδέματος $f_{ck} = 30$ έως $f_{ck} = 10$ αντίστοιχα.

Για ΙΟΠ υάλου, η αντοχή των ανοιχτών ενισχύσεων είναι από 5 έως 7 φορές μικρότερη από αυτή των κλειστών ενισχύσεων, για χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής του αρχικού σκυροδέματος $f_{ck} = 30$ έως $f_{ck} = 10$ αντίστοιχα.

Για τις κατασκευές που δεν είναι εφικτή καμία από τις δύο πρακτικές και η κατά παρέκκλιση ανοιχτές ενισχύσεις είναι η λύση, πρέπει να επιλέγονται σχετικά μικρές διατομές ενίσχυσης ώστε να αποφεύγεται η απόσχιση.

Οι ενισχύσεις που το μήκος αγκύρωσης που διατίθεται είναι μικρότερο από το 75-80 % του απαιτούμενου, προτείνεται να αποφεύγεται η ανοιχτή ενίσχυση, με οποιοδήποτε υλικό. Για συγκεκριμένο πάχος υλικού ενίσχυσης η αντοχή μειώνεται περίπου κατά 20%

Σε περίπτωση που απαιτείται μεγάλη διατμητική αντοχή, με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι σχεδόν απαγορευτική η χρήση περισσότερων από 3 στρώσεων υφάσματος. Μετά την προσθήκη τρίτης στρώσης υφάσματος η αντοχή αυξάνεται περίπου 5 με 7 ΚΝ.

Η καλύτερη επιλογή είναι η χρήση ενός υφάσματος που είναι πιο παχύ το κάθε στρώμα ώστε να μην ξεπεραστούν οι 3 στρώσεις.

Κατά κύριο λόγο, για τις κλειστές ενισχύσεις, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα για ενισχύσεις με ΙΟΠ

Οι αντοχές που υπολογίστηκαν για κλειστή ενίσχυση με ΙΟΠ άνθρακα CFRP με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και με τον EC8-3 (σχέδιο 2022), για ακτίνα εξομάλυνσης ίση με 50mm, διαφέρουν περίπου 35% με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ να δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα

Οι αντοχές που υπολογίστηκαν για κλειστή ενίσχυση με ΙΟΠ υάλου GFRP με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και με τον EC8-3 (σχέδιο 2022), για ακτίνα εξομάλυνσης ίση με 50mm, διαφέρουν περίπου 59% με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ να δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ δεν προσδιορίζει συγκεκριμένη τιμή για την ακτίνα εξομάλυνσης και δεν την χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς, όμως προτείνει να εξομαλυνθούν κατά κάποιο ποσοστό οι γωνίες του δομικού στοιχείου.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Στέφανος Η. Δρίτσος : Ενισχύσεις -Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2023
- [2] ΚΑΝ.ΕΠΕ (Κανονισμός Επεμβάσεων) 3^η Αναθεώρηση 2022
- [3] EC8-3 (σχέδιο 2022)
- [4] <http://www.episkeves2.civil.upatras.gr>
- [5] Μιχαήλ Ν. Φαρδής: Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέρος 1 Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2018
- [6] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου: Δομικά Υλικά Εκδόσεις Gotsis 2017

11. ΕΠΙΒΛΕΨΗ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος (Ακαδ. έτος 2023-2024) Ενισχύσεις - Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Στέφανου Η. Δρίτσου

Ευχαριστίες απευθύνονται στον επιβλέποντα καθηγητή Στέφανο Η. Δρίτσο για την καθοδήγηση που μου προσέφερε