

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΕΠΑΡΚΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΟ ΟΠΛΙΣΜΟ

ΠΕΠΟΝΗ ΝΕΦΕΛΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Περίληψη

Πολλές είναι οι υφιστάμενες κατασκευές, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τους παλαιότερους αντισεισμικούς κανονισμούς, που παρουσιάζουν ανεπαρκή σεισμική συμπεριφορά. Από τους πιο κρίσιμους παράγοντες οι οποίοι συντελούν στην τρωτότητα αυτή των κατασκευών, είναι είτε η ανεπαρκής πλαστιμότητα είτε η σημαντική διάβρωση του οπλισμού. Στο εν λόγω άρθρο, διερευνάται μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων η χρήση σύνθετων υλικών (ινοπλισμένων πολυμερών) για την ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με διαβρωμένο και μη οπλισμό καθώς και η επιρροή της ενίσχυσης στην τοπική πλαστιμότητα των στοιχείων. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση και σύγκριση των δύο διαθέσιμων κανονισμών, ΚΑΝ.ΕΠΕ. και Ευρωκώδικα, για την ενίσχυση ραβδόμορφων δομικών στοιχείων με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας τους. Σε δεύτερο πλάνο, πραγματοποιείται σύγκριση της προκύπτουσας πλαστιμότητας από τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των δύο προαναφερθέντων κανονισμών, με σκοπό την αποσαφήνιση τυχόν ασαφειών των κανονισμών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές υφιστάμενες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με παλιούς κανονισμούς – ή ακόμα και με απουσία κανονισμού- με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη σεισμική ικανότητα. Ένας από τους κρίσιμότερους παράγοντες που συντελούν στη σεισμική τρωτότητα των κατασκευών αυτών, είναι η ανεπαρκής πλαστιμότητα, η ανεπαρκής ικανότητα δηλαδή του στοιχείου να αναπτύξει παραμένουσες παραμορφώσεις μετά το πέρας της μέγιστης αντοχής του και χωρίς αυτή να αυξάνεται επιπλέον. Επιπροσθέτως, πολλές από αυτές έχουν αναπτύξει σημαντική διάβρωση στον οπλισμό τους λόγω των κατασκευαστικών τους χρόνων ή και της πολύ κοντινής τοποθέτησης του εγκάρσιου οπλισμού τον υποστυλωμάτων στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της διάβρωσης εντείνεται και από την ευρεία χρήση του πιο επιρρεπή σε αυτή, χάλυβα S500.

Η αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας ραβδόμορφων δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται με την επιβολή εξωτερικής περίσφιξης (με τη μορφή κολάρων, μανδύα ή εξωτερικών συνδετήρων), ή με εφαρμογή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον για εξωτερική περίσφιξη είναι είτε χάλυβας είτε σύνθετα υλικά -ινοπλισμένα πολυμερή-. Η αντιμετώπιση της τρωτότητας των διαβρωμένων στοιχείων, πραγματοποιείται επίσης με τη βοήθεια εξωτερικής περίσφιξης, με συνηθέστερη μέθοδο την περίσφιξη με ινοπλισμένα πολυμερή. Στο εν λόγω άρθρο διερευνάται η ενίσχυση βλαμμένων υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκή πλαστιμότητα και διάβρωση του οπλισμού τους με τη χρήση μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών.

Τόσο ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων, ΚΑΝ.ΕΠΕ., όσο και ο Ευρωκώδικας –EC8-3 - προτείνουν μοντέλα για τον καθορισμό της τοπικής πλαστιμότητας σε απερίσφικτα αλλά και περισφιγμένα υποστυλώματα με στρώσεις σύνθετων υλικών. Επιπλέον, έχουν προκύψει μοντέλα από πειραματικά δεδομένα όπως μια εναλλακτική διαδικασία που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα 8 σύμφωνα με ερευνητές όπως ο Μ. Φαρδής. Στο παρόν άρθρο πραγματοποιείται η παρουσίαση των παραπάνω μοντέλων, η εφαρμογή τους σε πειραματικά δεδομένα, η μεταξύ τους σύγκρισή και η αξιολόγηση του καθενός ξεχωριστά. Τέλος, διασαφηνίζονται τυχόν ασάφειες και αδυναμίες στις σχέσεις των προαναφερθέντων μοντέλων.

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΠΕΜΒΑΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο υπολογισμός της τοπικής πλαστιμότητας σε απερίσφιγκτα και περισφιγμένα με ινοπλισμένα πολυμερή ραβδόμορφα δομικά υλικά γίνεται σε όρους στροφής χορδής, $\mu\delta$. Για τον υπολογισμό του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλότητας χρησιμοποιούνται προσεγγιστικοί τύποι του Ελληνικού Κανονισμού Επεμβάσεων, αναλυτικοί τύποι του EC8-3 καθώς και μία εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού του Ευρωκώδικα σύμφωνα με τον Μ. Φαρδής. Τα παραπάνω μοντέλα παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΝ.ΕΠΕ. [1]

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 (§7.2.6.2) ο δείκτης πλαστιμότητας συνολικών μεταθέσεων ισούται με το δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής ($\mu\delta = \mu\theta$). Ο δείκτης πλαστιμότητας μεταθέσεων υπολογίζεται έναν από τους παρακάτω τύπους:

$$\mu\delta = \frac{\mu\varphi+2}{3} \quad \text{ή} \quad \mu\delta = \frac{\mu\varphi+1}{2} \quad (1\alpha,\beta)$$

όπου $\mu\varphi$ ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλότητας, ο οποίος δίνεται από την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$\mu\varphi = \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,2 \varepsilon_{sy} \nu} \quad (2)$$

όπου $\varepsilon_{cu,c}$, η ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος η οποία δίνεται από τις σχέσεις: $\varepsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}}$ για απερίσφιγκτες διατομές και $\varepsilon_{cu,c} = \gamma_{IOP} 0,0035 (f_{cc}/f_c)^2$, όπου $\gamma_{IOP} = 1,0$ ή $2,0$ για CFRP ή GFPR αντίστοιχα, f_{yw} η μέση αντοχή διαρροής των συνδετήρων,

$$f_{cc} = f_c \left(1 + 3,5 \left(\frac{\alpha f \rho_f f_u}{f_c} \right)^{\frac{3}{4}} \right) \quad (3)$$

και τέλος όπου ε_{sy} , η μέση παραμόρφωση διαρροής του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου.

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ [2]

Ο δείκτης πλαστιμότητας στροφής χορδής είναι ο λόγος της οριακής τιμής της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής προς τη στροφή χορδής της διατομής στη διαρροή, δηλαδή $\mu\theta = \theta_u/\theta_y$. Η οριακή τιμή της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής απερίσφικτης διατομής, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = 0,0016 \cdot (0,3\nu) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} \cdot \min \left\{ 9; \frac{L_v}{h} \right\}^{0,35} \cdot 25^{(\alpha_s \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1,25^{100\rho_d}) \quad (4)$$

όπου ν η ανηγμένη αξονική δύναμη (θετική για θλίψη), ω και ω' το μηχανικό ποσοστό οπλισμού (συμπεριλαμβανομένου του οπλισμού κορμού) και του θλιβόμενου διαμήκη οπλισμού αντίστοιχα, f_c και f_{yw} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η μέση αντοχή διαρροής των συνδετήρων αντίστοιχως, L_v ο λόγος ροπής προς διάτμηση στην ακραία διατομή, h το ύψος διατομής, ρ_{sx} και ρ_d το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλου προς την κατεύθυνση x της φόρτισης και το ποσοστό διαγώνιου οπλισμού αντίστοιχα και α_s ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περισφιξης από εγκάρσιο οπλισμό, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\alpha_s = 1 - \frac{b_o^2 + h_o^2}{3b_o h_o} \quad (5)$$

με b_0 και h_0 τις διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα μετρούμενου μέχρι τον άξονα του διαμήκους οπλισμού.

Η οριακή τιμή της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής περισφιγμένης με ινοπλισμένα πολυμερή διατομής, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = 0,0016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} \cdot \min \left\{ 9; \frac{L_v}{h} \right\}^{0,35} \cdot 25^{(\alpha_s \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_f \frac{f_{f,e}}{f_c})} \cdot (1,25^{100} \rho_a) \quad (6)$$

όπου α_f ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης του ινοπλισμένου πολυμερούς ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_f = 1 - \frac{(b-2R)^2 + (h-2R)^2}{3bh} \quad (7)$$

όπου R είναι η ακτίνα της στρογγυλεμένης γωνίας της διατομής και b , h οι πλήρεις διαστάσεις της διατομής,

$\rho_f = 2t_f/b$ το ποσοστό του FRP παράλληλα προς την κατεύθυνση της φόρτισης με t_f το πάχος του FRP και f_{fe} η ενεργή τάση με την οποία τελικά το υλικό περισφίγγει τη διατομή, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{fe} = \min(f_{uf}, \epsilon_{uf} \cdot E_f) (1 - 0,7 \min(f_{uf}, \epsilon_{uf} \cdot E_f) \frac{\rho_f}{f_c}) \quad (8)$$

όπου, το f_{uf} και το E_f είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του FRP και το ϵ_{uf} είναι μία οριακή ανηγμένη παραμόρφωση η οποία –αν δε δίδεται κάτι διαφορετικό– λαμβάνεται ίση με 0,015 για ινοπλισμένα πολυμερή άνθρακα και αραμιδίου (CFRP ή AFRP) και ίση με 0,02 για ινοπλισμένα πολυμερή υάλου (GFRP).

Το γινόμενο $\alpha_f \rho_f \frac{f_{f,e}}{f_c}$ μπορεί να γραφεί και ως:

$$\alpha_f \rho_f \frac{f_{f,e}}{f_c} = \alpha_f \frac{\omega_w}{2} \cdot (1 - 0,35 \omega_w) \quad (9)$$

όπου $\omega_w = \frac{4 t_f f_u}{b f_c}$, το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιξης για τετραγωνική διατομή.

Η στροφή χορδής στη διαρροή προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,0014 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,125 \phi_y \frac{d_b f_y}{f_c} \quad (10)$$

όπου, ϕ_y η καμπυλότητα της διατομής στη διαρροή, $d_b L$ η διάμετρος διαμήκους οπλισμού, z το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα, το οποίο λαμβάνεται ίσο με $d' - d$ σε υποστυλώματα, f_y η μέση αντοχή διαρροής των συνδετήρων και $a_v z$ είναι ο όρος ο οποίος εκφράζει την επιρροή του «μήκους μετάθεσης» των ροπών κάμψης, με $a_v = 1$ αν η τέμνουσα V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $V_{Mu} = My/Ly$, ειδάλλως ισούται με 0.

2.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ

Σύμφωνα με τον Μ. Φαρδή, η τελική στροφή στην αστοχία για απερίσφιγκτα μέλη με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη και λεπτομέρειες όπλισης για αντοχή σε σεισμό (συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ράβδων οπλισμού με νευρώσεις), μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_u = \alpha_{st} (1 - 0,43\alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2}\right) (1 - 0,4 \alpha_{w,r}) \left(1 - \frac{2}{7} \alpha_{w,nr}\right) \cdot (0,3v) \left[\frac{\max(0,01;\omega_2)}{\max(0,01;\omega_1)} f_c \right] 0,225 \cdot \left[\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right)\right] 0,35 25^{\alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c}} (1,25^{100\rho_d}) \quad (11)$$

όπου $\alpha_{st} = 0,0185$ για θερμής κατεργασίας χάλυβα και $\alpha_{st} = 0,0115$ για ψυχρής κατεργασίας χάλυβα, $\alpha_{cy} = 0$ για μονοτονική φόρτιση και $\alpha_{cy} = 1$ για κυκλική φόρτιση, $\alpha_{sl} = 1$ αν υπάρχει ολίσθηση στο διαμήκη οπλισμό και $\alpha_{sl} = 0$ αν δεν υπάρχει, $\alpha_{w,r} = 1$ για ορθογωνικούς τοίχους ειδήλλως $\alpha_{w,r} = 0$ και $\alpha_{w,nr} = 1$ για τοιχώματα διατομής T- H- U ή κοίλης ορθογωνικής διατομής, ειδήλλως ισούται με 0.

Για περισφιγμένα με ινοπλισμένα πολυμερή υποστρώματα, η στοχευόμενη στροφή χορδής στην αστοχία προσδιορίζεται από τον παραπάνω τύπο με τον εκθέτη του όρου 25 να αυξάνεται κατά τον όρο $\alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}$ ο οποίος αναφέρεται στο υλικό περισφιξής.

$$\theta_u = \alpha_{st} (1 - 0,43\alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2}\right) (1 - 0,4 \alpha_{w,r}) \left(1 - \frac{2}{7} \alpha_{w,nr}\right) \cdot (0,3v) \left[\frac{\max(0,01;\omega_2)}{\max(0,01;\omega_1)} f_c \right] 0,225 \cdot \left[\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right)\right] 0,35 25^{\alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}} (1,25^{100\rho_d}) \quad (12)$$

Ο όρος $\alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}$ υπολογίζεται από μία από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$f_u = f_{fe} = \min(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f) \left(1 - \min\left[0,5; 0,7 \min(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f) \frac{\rho_f}{f_c}\right]\right) \quad (12\alpha)$$

$$\left(\alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}\right) = \alpha_f \min\left[1,0; \min(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f) \frac{\rho_f}{f_c}\right] (1 - 0,4 \min\left[1; \min(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f) \frac{\rho_f}{f_c}\right]) \quad (12\beta)$$

όπου $\epsilon_{uf} = 0,015$

$$\left(\alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}\right) = \alpha_f c_f \min\left[0,4; \frac{\rho_f f_{uf,L\&T}}{f_c}\right] \left(1 - 0,5 \min\left[0,4; \frac{\rho_f f_{uf,L\&T}}{f_c}\right]\right) \quad (12\gamma)$$

όπου $f_{uf,L\&T} = E_f \cdot \epsilon_{uf2}$ με ϵ_{uf2} περίπου ίσο με το 60% της ονομαστικής τιμής της παραμόρφωσης αστοχίας και $c_f = 1,80$ για CFRP και $c_f = 0,80$ για GFRP ή AFRP.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ

Για τη σύγκριση των προαναφερθέντων μοντέλων τόσο μεταξύ τους όσο και με πραγματικά δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα που διεξήγαγαν οι Ε. Ν. Μπούσιας, Λ-Α. Ν. Σπαθής, Α. Χ. Τριανταφύλλου και ο Μ. Ν. Φαρδής με τίτλο «Σεισμική ενίσχυση υποστρωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με διαβρωμένο οπλισμό»^{[3][4]}. Στην έρευνα αυτή κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν με φόρτιση 12 δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία είχαν οπλιστεί με υλικά και λεπτομέρειες όπλισης ίδια με αυτά κατασκευών προ του 1980 και είχαν υποστεί διάβρωση στον οπλισμό τους. Πρόκειται δηλαδή για προσομοίωση μη σεισμικά σχεδιασμένων και οπλισμένων στοιχείων τα οποία υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Έξι από τα δώδεκα δοκίμια δεν παρουσίαζαν καμία βλάβη από προηγούμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα μισά από τα εξεταζόμενα δοκίμια δοκιμάστηκαν για φόρτιση επί τον ισχυρό τους άξονα και τα υπόλοιπα μισά για φόρτιση επί τον ασθενή. Τα διαγράμματα δύναμης- μετατόπισης των δοκιμίων αναφοράς της ερευνητικής δημοσίευσης, διγραμμικοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Bilin και κατά αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι τιμές της τέμνουσας δύναμης και μετατόπισης των εξεταζόμενων δοκιμίων κατά τη διαρροή και την αστοχία τους. Με τα στοιχεία που προέκυψαν, υπολογίστηκε ο πειραματικός δείκτης πλαστιμότητας, μ_s .

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα υποστυλώματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ύψος ίσο με το μισό του ύψους τυπικού ορόφου (1.60m) και ορθογωνικές διαστάσεις 250x500 mm (Σχ.1). Ο διαμήκης οπλισμός αποτελείται από 4 γωνιακές ράβδους διατομής Φ18 ενώ ο εγκάρσιος από λείες ράβδους Φ8/200mm. Για τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε έτοιμο σκυρόδεμα C12/15. Ο διαμήκης οπλισμός είχε τάση διαρροής 595,5MPa. Για όλα τα υποστυλώματα θεωρήθηκε $R = 50\text{mm}$ και $c = 20\text{mm}$. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια με ενίσχυση ήταν 2 στρώσεις υφάσματος ανθρακονημάτων με ονομαστικό πάχος στρώσης 0,13mm, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u=3450\text{MPa}$ και $\varepsilon_{ju}=0,015$ και 5 στρώσεις υφάσματος υαλονημάτων ονομαστικού πάχους στρώσης 0,17mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f = 70\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u=2170\text{MPa}$ και $\varepsilon_{ju}=0,031$. Οι ράβδοι του υποστυλώματος θεωρούνται θερμικής κατεργασίας χάλυβα και συνεχής, χωρίς παράθεση. Τέλος, ο λόγος L/h των υποστυλωμάτων είναι ίσος με 3,2 στα στοιχεία που εξετάζονται με φόρτιση στον ισχυρό τους άξονα και ίσος με 6,4 σε αυτά που εξετάζονται στον ασθενή. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των υποστυλωμάτων.

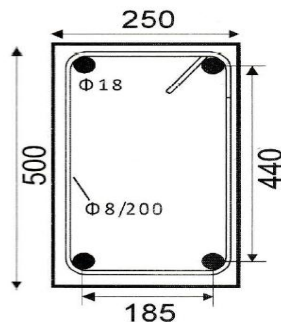
| δοκίμια | U_0S | C_0S | C_C2Sin | C_C2S | C_C5S | C_G5S |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| f_c (Mpa) | 18,3 | 18,3 | 18,1 | 18,1 | 20,4 | 18,7 |
| N (kN) | 190 | 182 | 167 | 190 | 182 | 182 |
| ν | 0,38 | 0,38 | 0,37 | 0,38 | 0,34 | 0,37 |
| υλικό ενίσχυσης | - | - | CFRP | CFRP | CFRP | GFRP |
| στρώσεις ενίσχυσης | 0 | 0 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| άξονας φόρτισης | ισχυρός | ισχυρός | ισχυρός | ισχυρός | ισχυρός | ισχυρός |
| προφόρτιση | όχι | όχι | ναι | όχι | όχι | όχι |
| δu (mm) | 40,41 | 45,76 | 72,75 | 80,16 | 61,48 | 69,39 |
| δy (mm) | 14,66 | 11,50 | 23,25 | 12,70 | 9,29 | 8,40 |

Πίνακας 1. Θλιπτική αντοχή, μέγιστη αξονική δύναμη και ανηγμένη αξονική δύναμη δοκιμίων που εξετάστηκαν κατά τον ισχυρό άξονα

| δοκίμια | U_0W | C_0W | C_C2Win | C_C2W | C_C5W | C_G5W |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| f_c (Mpa) | 17,9 | 18,6 | 18,7 | 18,3 | 18,6 | 20,4 |
| N (kN) | 72 | 65 | 67 | 70 | 67 | 69 |
| ν | 0,38 | 0,35 | 0,35 | 0,37 | 0,37 | 0,34 |
| υλικό ενίσχυσης | - | - | CFRP | CFRP | CFRP | GFRP |
| στρώσεις ενίσχυσης | 0 | 0 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| άξονας φόρτισης | ασθενής | ασθενής | ασθενής | ασθενής | ασθενής | ασθενής |
| προφόρτιση | όχι | όχι | ναι | όχι | όχι | όχι |
| δ_u (mm) | 68,11 | 61,25 | 129,78 | 100,89 | 128,38 | 130,13 |
| δ_y (mm) | 12,17 | 13,07 | 21,13 | 10,19 | 12,41 | 12,65 |

Πίνακας 2. Θλιπτική αντοχή, μέγιστη αξονική δύναμη και ανηγμένη αξονική δύναμη δοκιμίων που εξετάστηκαν κατά τον ασθενή άξονα

Το πρώτο γράμμα του ονόματος κάθε δοκιμίου δείχνει αν το δοκίμιο ήταν (C) ή όχι (U) διαβρωμένο, το δεύτερο και το τρίτο δηλώνουν τις στρώσεις και το υλικό του μανδύα ενίσχυσης (C για ανθρακονήματα και G για υαλονήματα), τα γράμματα S και W δηλώνουν ότι τα δοκίμια δοκιμάστηκαν κατά την ισχυρή διεύθυνση της διατομής και κατά την ασθενή αντίστοιχα ενώ τα τελευταία δηλώνουν αν το δοκίμιο είχε αρχική βλάβη πριν την αποκατάσταση (in).



Σχήμα 1. Διατομή υποστλωμάτων

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ

Ενδεικτικά έγινε εφαρμογή των τύπων στα δοκίμια αρχικά U_0S και τέλος στο C_C2Sin.

3.2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΣΤΟ ΑΠΕΡΙΣΦΙΓΚΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ U_0S

Χαρακτηριστικά:

$$b= 250 \text{ mm}, h= 500 \text{ mm}$$

$$h_0= h- 2*(15,5+ 8/2)= 461 \text{ mm}$$

$$b_0= b- 2*(15,5+ 8/2)= 211 \text{ mm}$$

$$b_i= b- 2*(15,5+ 8+ 18/2)= 185 \text{ mm}$$

$$d_i= 15,5+ 8+ 18/2= 32,5 \text{ mm}$$

$$d= h- d_i= 467,5 \text{ mm}$$

$$a_s= (1- \frac{200}{2*b_0}) * (1- \frac{200}{2*h_0}) = 0,4120$$

$$a_n= 1- \frac{b_0^2+h_0^2}{3*b_0*h_0} = 0,1192$$

$$a= a_s * a_n= 0,0491$$

$$\rho_{sx}= 2 * \frac{A_{sx}}{h_0 * 200} = 2 * \frac{254,34}{461 * 200} = 0,0055$$

$$\omega_v= 2 * \frac{\rho_{sx} * f_{yw}}{f_c} = 2 * \frac{0,0055 * 595,5}{18,3} = 0,3591$$

3.2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

$$f_{cc} = f_c * (1 + 3,5 * (\frac{a \rho_{sx} f_{yw}}{f_c})^{\frac{3}{4}}) = 18,3 * (1 + 3,5 * (\frac{0,0491 * 0,0055 * 595,5}{18,3})^{\frac{3}{4}}) = 20,14 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{c0} = 0,002$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,4 * \frac{a \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}} = 0,004 + 0,4 * \frac{0,0491 * 0,0055 * 595,5}{20,14} = 0,007203$$

$$\epsilon_{sy} = f_y / E_s = 595,5 / 200000 = 0,0029775$$

$$\mu_{\phi} = \frac{\epsilon_{cu,c}}{2,2 * \epsilon_{sy} * \nu} = \frac{0,007203}{2,2 * 0,0029775 * 0,38} = 2,8936$$

$$\mu_{\delta} = \frac{\mu_{\phi} + 2}{3} = \frac{2,8936 + 2}{3} = 1,6312 \quad (1\alpha)$$

$$\mu_{\delta} = \frac{\mu_{\phi} + 1}{2} = \frac{2,8936 + 1}{2} = 1,9468 \quad (1\beta)$$

3.2.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΟΚΩΔΙΚΑ.

$$E_c = 25,8 \text{ GPa}, E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$\alpha = E_s / E_c = 7,752$$

$$\delta = 0,0695, \rho = \rho' = 0,004352, \rho_n = 0, N = 190 \text{ kN}$$

Αν η διαρροή οφείλεται σε διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού:

$$A = \rho + \rho' + \rho_n + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,004352 \cdot 2 + \frac{190}{0,25 \cdot 0,468 \cdot 595,5} = 0,011434606$$

$$B = \rho + \rho' \cdot \delta + 0,5 \cdot \rho_n \cdot (1 + \delta) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,004352 + 0,004352 \cdot 0,0695 + 0,5 \cdot 0 \cdot (1 + 0,0695) + \frac{190}{0,25 \cdot 0,468 \cdot 595,5} = 0,007384833$$

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + \alpha^2 \cdot B^2)^{1/2} - \alpha \cdot A = (7,76^2 \cdot 0,011434606^2 + 7,76^2 \cdot 0,007384833^2)^{1/2} - 7,76 \cdot 0,011434606 = 0,26115$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s \cdot (1 - \xi_y) \cdot d} = \frac{595,5}{200000 \cdot (1 - 0,26115) \cdot 0,468} = 0,008620$$

Αν η διαρροή οφείλεται σε μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος:

$$A = \rho + \rho' + \rho_n - \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,004352 \cdot 2 - \frac{190}{0,25 \cdot 0,468 \cdot 595,5} = 0,008704682$$

$$B = \rho + \rho' \cdot \delta + 0,5 \cdot \rho_n \cdot (1 + \delta) = 0,004352 + 0,004352 \cdot 0,0695 + 0,5 \cdot 0 \cdot (1 + 0,0695) = 0,004654911$$

$$\xi_y = (\alpha^2 \cdot A^2 + \alpha^2 \cdot B^2)^{1/2} - \alpha \cdot A = (7,76^2 \cdot 0,008704682^2 + 7,76^2 \cdot 0,004654911^2)^{1/2} - 7,76 \cdot 0,008704682 = 0,344466369$$

$$\varphi_y = \frac{1,8 \cdot f_c}{E_c \cdot \xi_y \cdot d} = \frac{1,8 \cdot 18,3}{25800 \cdot 0,3445 \cdot 0,468} = 0,007928216$$

Τελικά η καμπυλότητα διαρροής θα είναι η μικρότερη από τις δύο αυτές τιμές, άρα:

$$\varphi_y = \min(0,008620; 0,007928216) = 0,007928216$$

$$\alpha_n = 1, L_s = L_v = 0,8, d_{bl} = 18, z = d - \delta = 468 - 32,5 = 435 \text{ mm}$$

$$\theta_y = \varphi_y \cdot \frac{L_s + \alpha_n \cdot z}{3} + 0,0014 \cdot (1 + 1,5 \cdot \frac{h}{L_s}) + 0,125 \cdot \varphi_y \cdot \frac{d_{bl} \cdot f_y}{f_c}$$

$$= 0,007928 \cdot \frac{0,8 + 1 \cdot 0,468}{3} + 0,0014 \cdot (1 + 1,5 \cdot \frac{1,5 \cdot 0,5}{0,8}) + 0,125 \cdot 0,007928 \cdot \frac{0,018 \cdot 595,5}{18,3}$$

$$= 0,008459$$

$$\theta_{um} = 0,0016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \cdot \min \left[9; \frac{L_v}{h} \right]^{0,35} \cdot 25^{(\alpha_s \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1,25^{100 \rho_d})$$

$$= 0,0016 \cdot (0,3^{0,38}) \left[\frac{\max(0,01; 0,141478)}{\max(0,01; 0,141478)} \cdot 18,3 \right]^{0,225} \cdot \min \left[9; 3,2 \right]^{0,35} \cdot 25^{(0,0491 \cdot 0,005517 \cdot \frac{595,5}{18,3})} \cdot (1,25^{100 \cdot 0})$$

$$= 0,03010 \quad (4)$$

$$\mu\delta = \theta_{um} / \theta_y = 0,03010 / 0,008459 = 3,55840$$

3.2.1.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ.

$v = 0,38$, $\alpha_{st} = 0,0185$ (θερμή κατεργασία), $\alpha_{cy} = 1$, $\alpha_{s1} = 0$, $\alpha_{wr} = 0$, $\alpha_{wn,r} = 0$, $L_s = 0,8$
 $\omega = \omega' = 0,14148$, $f_c = 18,3$, $a = 0,049086$, $\rho_{sx} = 0,00552$,

$$\begin{aligned} \theta_u &= \alpha_{st} (1 - 0,43\alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2}\right) (1 - 0,4 \alpha_{w,r}) \left(1 - \frac{2}{7} \alpha_{w,nr}\right) \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega_2)}{\max(0,01;\omega_1)} f_c \right]^{0,225} \cdot \left[\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right) \right]^{0,35} 25^{\alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c}} (1,25^{100\rho_d}) \\ &= 0,0185 \cdot (1 - 0,43 \cdot 1) \cdot 0,3^{0,38} \cdot \left[\frac{\max(0,01;0,14148)}{\max(0,01;0,14148)} \cdot 18,3 \right]^{0,225} \cdot \left[\min\left(9; 3,2\right) \right]^{0,35} \\ &\quad 25^{0,049086 \cdot 0,00552 \cdot \frac{595,5}{18,3}} \\ &= 0,01984 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\mu\delta = \theta_u / \theta_y = 0,01984 / 0,008459 = 2,34521$$

3.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟ ΔΟΚΙΜΙΟ C_C2Sin

Για την κατανόηση του υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας με τη βοήθεια των εναλλακτικών μοντέλων του Ευρωκώδικα για περισφιγμένα με ινοπλισμένα πολυμερή υποστυλώματα, έγινε η εφαρμογή των σχέσεων 12., 12α., 12β., 12γ. στο δοκίμιο C_C2Sin.

Χαρακτηριστικά:

$v = 0,38$
 $f_c = 18,1$ MPa
 $\alpha_s = 1$, $\alpha_n = 0,51333$, $\alpha_F = 0,51333$
 $\rho_f = 0,00208$
 $\omega_n = 0,136866$

$$\begin{aligned} f_u &= f_{fe} = \min(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f) \left(1 - \min\left[0,5; 0,7 \min\left(f_{u,nom}; \epsilon_{uf} \cdot E_f\right) \frac{\rho_f}{f_c}\right]\right) \\ &= \min(2901,0926; 0,015 \cdot 230000) \left(1 - \min\left[0,5; 0,7 \min(2901,0926; 0,015 \cdot 230000) \frac{0,00208}{18,1}\right]\right) \\ &= 1561,8370 \quad (12\alpha) \end{aligned}$$

$$\bullet \quad \alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c} = 0,51333 \cdot 0,00208 \cdot \frac{1561,8370}{18,3} = 0,18225 \quad (12\beta)$$

$$\begin{aligned} \theta_u &= \alpha_{st} (1 - 0,43\alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2}\right) (1 - 0,4 \alpha_{w,r}) \left(1 - \frac{2}{7} \alpha_{w,nr}\right) \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega_2)}{\max(0,01;\omega_1)} f_c \right]^{0,225} \cdot \left[\min\left(9; \frac{L_v}{h}\right) \right]^{0,35} 25^{\alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c} + \alpha_f \rho_f \frac{f_u}{f_c}} (1,25^{100\rho_d}) \\ &= 0,0185 \cdot (1 - 0,43 \cdot 1) \cdot 0,3^{0,38} \cdot \left[\frac{\max(0,01;0,1430415)}{\max(0,01;0,1430415)} \cdot 18,1 \right]^{0,225} \cdot \left[\min\left(9; 3,2\right) \right]^{0,35} \\ &\quad 25^{0,049086 \cdot 0,00552 \cdot \frac{595,5}{18,1} + 0,18225} \\ &= 0,044157 \quad (12) \end{aligned}$$

$$\theta_y = 0,00789$$

$$\mu_\theta = \theta_u / \theta_y = 0,044157 / 0,00789 = 5,5984$$

$$\bullet \quad \left(a_f \rho_f \frac{f_u}{f_c} \right) = a_f c_f \min \left[0,4 ; \frac{\rho_f f_{uf,L\&T}}{f_c} \right] \left(1 - 0,5 \min \left[0,4 ; \frac{\rho_f f_{uf,L\&T}}{f_c} \right] \right) \quad (12\gamma)$$

$$= 0,51333 * 1,8 * \min \left[0,4 ; \frac{0,00208 * 2070}{18,1} \right] \left(1 - 0,5 \min \left[0,4 ; \frac{0,00208 * 2070}{18,1} \right] \right)$$

$$= 0,193657$$

$$\theta_u = \alpha_{st} (1 - 0,43 \alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{2} \right) (1 - 0,4 \alpha_{w,r}) \left(1 - \frac{2}{7} \alpha_{w,nr} \right) \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega_2)}{\max(0,01; \omega_1)} f_c \right]^{0,225} \cdot$$

$$\left[\min \left(9 ; \frac{L_v}{h} \right) \right]^{0,35} 25^\alpha \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c} + a_f \rho_f \frac{f_u}{f_c} (1,25^{100 \rho_d})$$

$$= 0,0185 * (1 - 0,43 * 1) * 0,3^{0,38} * \left[\frac{\max(0,01; 0,1430415)}{\max(0,01; 0,1430415)} 18,1 \right]^{0,225} * \left[\min \left(9 ; 3,2 \right) \right]^{0,35}$$

$$25^{0,049086 * 0,00552 \frac{595,5}{18,1} + 0,193657}$$

$$= 0,036924 \quad (12)$$

$$\theta_y = 0,00789$$

$$\mu_\theta = \theta_u / \theta_y = 0,036924 / 0,00789 = 4,68137$$

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα δεδομένα που αναφέρονται στην §3.1 εφαρμόστηκαν στα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στους πίνακες 3 και 4.

| Δοκίμια | μ _δ | | | | |
|---------|----------------|--|--|-----------------|---|
| | πειραματικό | προσεγγιστικός KAN.ΕΠΕ. Κατά την εξ.1 ^α | προσεγγιστικός KAN.ΕΠΕ. Κατά την εξ.1 ^β | EC8-3 (εξ.4) | εναλλακτικός EC3-8 κατά την εξ.11 |
| U_0S | 2,7559 | 1,6312 | 1,9602 | 3,5584 | 2,3452 |
| C_0S | 3,9792 | 1,6312 | 1,9468 | 4,0646 | 2,6788 |
| U_0W | 5,5986 | 1,6401 | 1,9602 | 3,1910 | 2,1030 |
| C_0W | 4,6879 | 1,7069 | 2,0603 | 3,2333 | 2,1309 |

Πίνακας 3. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής απερίσφιγκτων δοκιμίων

| δοκίμια | μδ | | | | | | |
|---------------------|-------------|----------------------------|--|-----------------|---------------------------------------|--|--|
| | πειραματικό | προσεγγιστικός KAN.ΕΠΕ. | προσεγγιστικός KAN.ΕΠΕ. Κατά την εξ.1β | EC8-3 (εξ.4) | εναλλακτικός EC3-8 κατά την εξ.12α | εναλλακτικός EC8-3 κατά την εξ.12β | εναλλακτικός EC8-3 κατά την εξ.12γ |
| C_C2S _{in} | 3,1294 | 1,8974 | 2,3461 | 3,8544 | 3,0949 | 5,6662 | 4,7381 |
| C_C2S | 3,1294 | 1,8650 | 2,2975 | 5,6452 | 3,3466 | 5,5984 | 4,6814 |
| C_C5S | 6,6205 | 2,8823 | 3,8235 | 6,8416 | 4,2448 | 5,7654 | 4,5318 |
| C_G5S | 8,2571 | 7,9739 | 11,4608 | 6,2442 | 3,7757 | 5,8037 | 4,4669 |
| C_C2W _{in} | 6,1412 | 1,5868 | 1,8803 | 2,8440 | 2,8884 | 3,3032 | 3,4038 |
| C_C2W | 9,9059 | 1,5469 | 1,8203 | 2,8018 | 2,8730 | 3,2934 | 3,3963 |
| C_C5W | 10,3447 | 1,8675 | 2,3012 | 2,8529 | 3,1538 | 3,8432 | 5,0443 |
| C_G5W | 10,2850 | 2,8227 | 3,7340 | 2,8707 | 2,8864 | 3,3911 | 3,0524 |

Πίνακας 4. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής περισφιγμένων δοκιμίων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι υπάρχουν αποκλίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των μοντέλων. Όσον αφορά τα δοκίμια που εξετάστηκαν κατά τον ισχυρό άξονα, η χρήση των προσεγγιστικών τύπων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα με εξαίρεση την ενίσχυση με GFRP όπου η εξ.1α προσεγγίζει κατά πολύ το δείκτη μθ που προέκυψε από τα πειράματα ενώ η εξ.1β την ξεπερνάει. Από την άλλη, οι τιμές που προέκυψαν από τη βασική σχέση του EC8-3 προσεγγίζουν περισσότερο τις πειραματικές τιμές, με εξαίρεση τα δοκίμια των 5 στρώσεων CFRP και GFRP. Παρατηρούμε ότι η ενίσχυση με 5 στρώσεις GFRP δίνει τιμές μθ σχεδόν ταυτόσημες με αυτές της ενίσχυσης με 2 στρώσεις CFRP. Όσον αφορά τους εναλλακτικούς τύπους του EC8-3, η εξ.12β δίνει ελαφρώς πιο συντηρητικά αποτελέσματα από αυτά που προέκυψαν από την εξ.4 (EC8-3) ενώ οι εξισώσεις 12β και 12γ δίνουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν αρκετά τα πειραματικά.

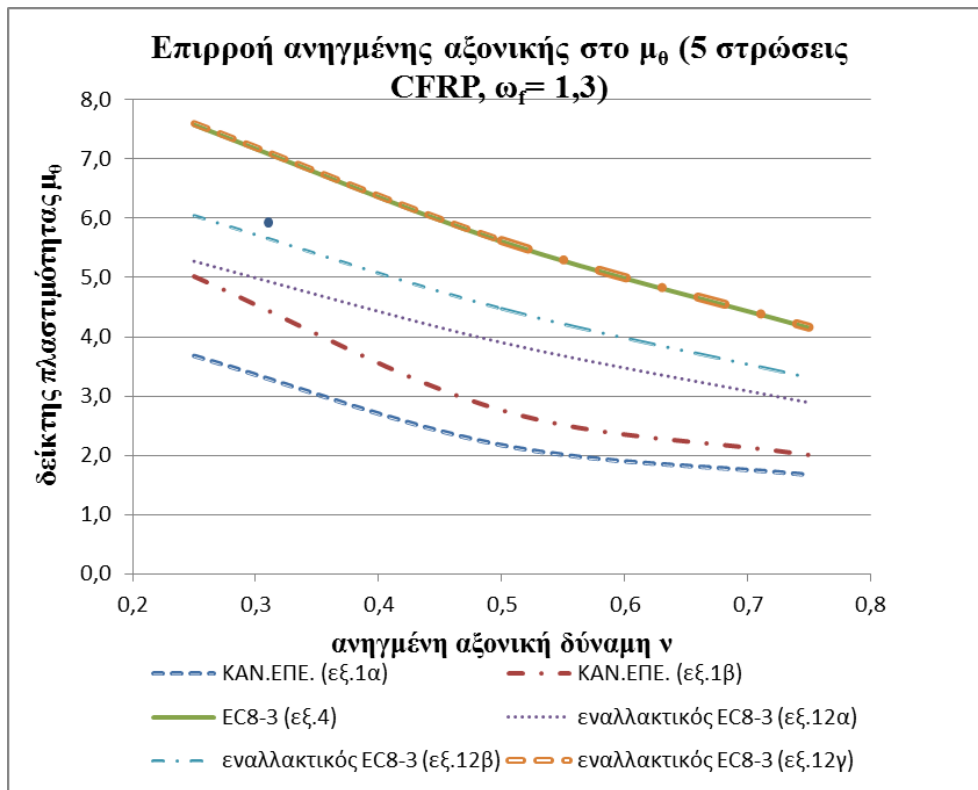
Όσον αφορά τα αποτελέσματα των δοκιμών στον ασθενή άξονα, εντύπωση προκαλεί η μεγάλη τιμή του μθ που προκύπτει από τα πειράματα, η οποία είναι αδύνατον να προκύψει από τα μοντέλα. Η αδυναμία των μοντέλων να αγγίξει τόσο υψηλές τιμές κατά αυτόν τον άξονα μπορεί αν εξηγηθεί αν λάβουμε υπόψη την κατά πολύ μεγαλύτερου πλάτους θλιβόμενη ζώνη των υποστυλωμάτων που εξετάζονται στον ασθενή άξονα, η οποία επιφέρει μικρότερη αποδοτικότητα περισφιξης.

3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ

Για την καλύτερη κατανόηση των μοντέλων, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους για διαφορετικές τιμές αξονικής δύναμης v και σταθερό πάχος ενίσχυσης, αλλά και για σταθερή τιμή ανηγμένης αξονικής και αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης, τόσο με CFRP όσο και με GFRP.

3.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ

Στο Διάγραμμα 1. παρουσιάζονται συγκριτικά τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής μ_{θ} και πώς αυτά επηρεάζονται με τη μεταβολή της ανηγμένης αξονικής δύναμης v . Για τη σύγκριση, χρησιμοποιήθηκαν 5 στρώσεις μανδύα CFRP, ονομαστικού πάχους στρώσης 0,13mm, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u = 3450\text{MPa}$ και $\epsilon_{ju} = 0,015$.



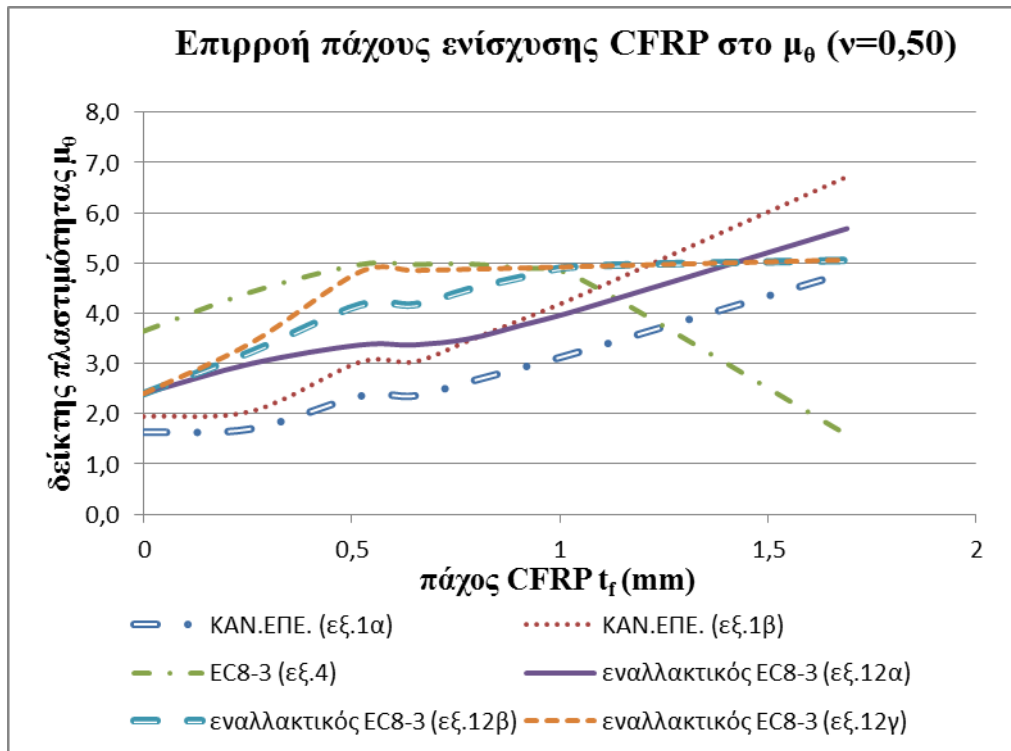
Διάγραμμα 1. Επιρροή της ανηγμένης αξονικής δύναμης στα μοντέλα υπολογισμού του μ_ϕ , με $\omega_f= 1,3$

Στο Διάγραμμα 1 φαίνεται ότι όλα τα μοντέλα επηρεάζονται από τη μεταβολή της ανηγμένης αξονικής δύναμης ν . Αναμενόμενη ήταν η επιρροή της ανηγμένης αξονικής δύναμης στο προσεγγιστικό μοντέλο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (εξ.1α,β) στο οποίο ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλότητας μ_ϕ είναι αντιστρόφως ανάλογος της ανηγμένης αξονικής. Η επιρροή της ν στα λοιπά μοντέλα, μπορεί να αποδοθεί στον όρο $0,3^{\nu}$ που βρίσκεται στις εξισώσεις υπολογισμού της χορδής αστοχίας όλων των μοντέλων. Μάλιστα, σε κλίμακα ανηγμένης αξονικής δύναμης από 0,25- 0,8, ο όρος αυτός δίνει τιμές από 0,74- 0,38, οι οποίες όταν πολλαπλασιαστούν με το υπόλοιπο –σταθερό κατά την αύξηση της ανηγμένης αξονικής δύναμης και σταθερού μανδύα ενίσχυσης- τμήμα της εξίσωσης, δίνουν αποκλίνοντα μεταξύ τους αποτελέσματα.

Αξίζει να σημειωθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων των μοντέλων του EC8-3 (εξ.4) και του εναλλακτικού EC8-3 (εξ.12γ). Στο διάγραμμα μάλιστα, φαίνονται ως μια ίδια γραμμή, καθώς τα αποτελέσματα δείκτη πλαστιμότητας των δύο τύπων, διαφέρουν από το δεύτερο δεκαδικό τους ψηφίο και έπειτα.

Τέλος, η τελεία στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το δείκτη πλαστιμότητας μ_ϕ που έχει προκύψει από τα πειραματικά δεδομένα για ανηγμένη αξονική ίση με 0,34 και μ_ϕ ίσο με 6,62. Παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ πειραματικού αποτελέσματος και προσομοιωμάτων την παρουσιάζει το εναλλακτικό μοντέλο προσομοίωσης του EC8-3 (εξ. 12β).

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής μ_θ και πώς αυτά επηρεάζονται με τη μεταβολή του πάχους στρώσης του μανδύα ενίσχυσης και με σταθερή τιμή ανηγμένης αξονικής δύναμης, $\nu=0,5$. Για τη σύγκριση, χρησιμοποιήθηκαν στρώσεις μανδύα CFRP, ονομαστικού πάχους στρώσης 0,13mm, μέτρο ελαστικότητας $E_f= 230\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u=3450\text{MPa}$ και $\epsilon_{ju}= 0,015$.

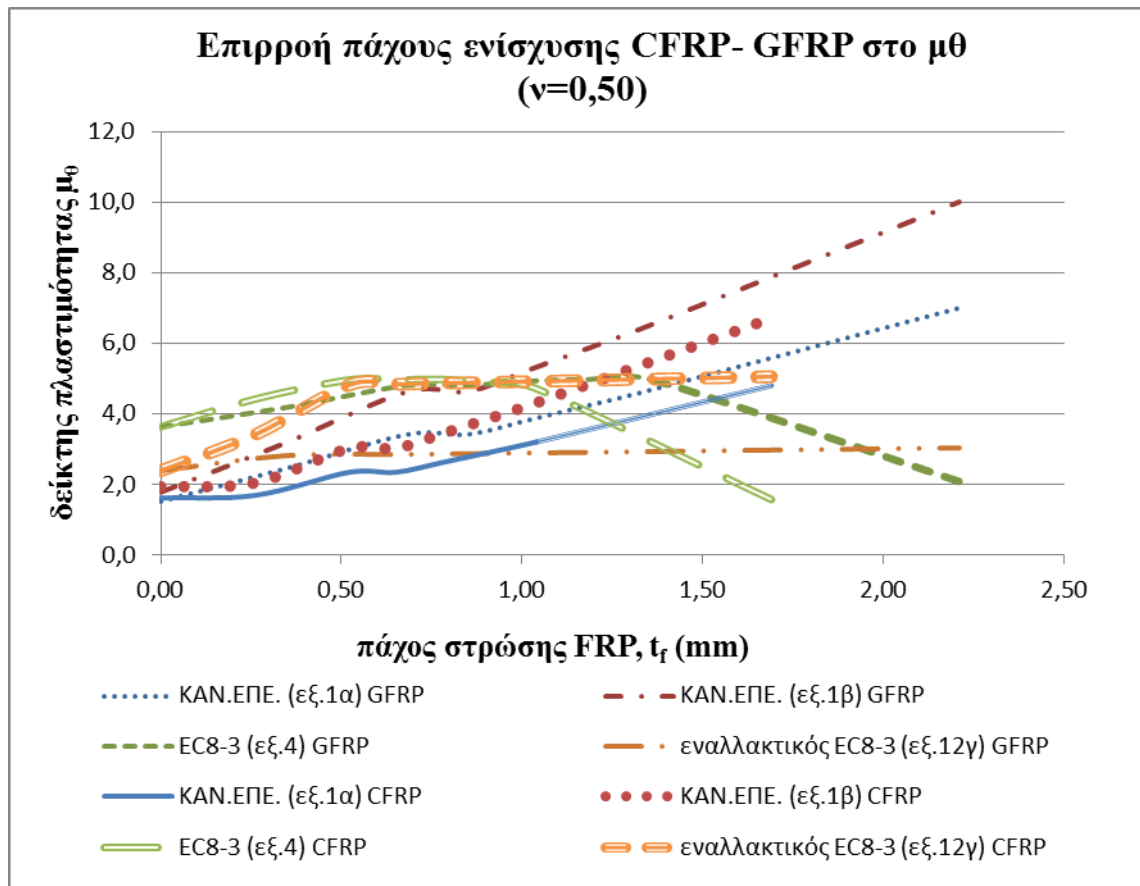


Διάγραμμα 2. Επιρροή της αύξησης της στρώσης ενίσχυσης, με σταθερή ανηγμένη αξονική δύναμη, στα μοντέλα υπολογισμού του μ_{θ}

Στο Διάγραμμα 2. φαίνεται καθαρά πώς το βασικό μοντέλο του EC8-3 ακολουθεί ανοδική τάση μέχρι ενός σημείου, σταθεροποιείται στη συνέχεια και αποκτά μη ρεαλιστικές τιμές από πάχος ενίσχυσης 1mm περίπου κι έπειτα (ογκομετρικό ποσοστό ενίσχυσης 1,6). Οι τιμές του δείκτη πλαστιμότητας που δίνει το μοντέλο για αυξανόμενες τιμές πάχους μανδύα ενίσχυσης από την προαναφερθείσα τιμή κι έπειτα έχουν καθοδική τάση πράγμα το οποίο είναι παράλογο. Τα εναλλακτικά μοντέλα υπολογισμού του EC8-3 (εξ.12α,β,γ) δίνουν εμφανώς βελτιωμένες τιμές δείκτη πλαστιμότητας σε σχέση με το βασικό μοντέλο (εξ.4). Παρατηρείται βέβαια πως δύο από τα εναλλακτικά μοντέλα (εξ.12β,γ) μόλις φτάσουν κάποια τιμή πάχους ενίσχυσης κι έπειτα, διατηρούν σταθερή τιμή δείκτη πλαστιμότητας μ_{θ} . Το γεγονός αυτό υποδεικνύει κάποιο όριο στην αύξηση της πλαστιμότητας με την αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης.

3.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στο Διάγραμμα 3. παρουσιάζονται συγκριτικά τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας στρώσης μ_{θ} και πώς αυτά επηρεάζονται σε σχέση με το υλικό ενίσχυσης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Για τη πραγματοποίηση της σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκαν στρώσεις μανδύα CFRP, ονομαστικού πάχους στρώσης 0,13mm, μέτρο ελαστικότητας $E_f = 230\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u=3450\text{MPa}$ και $\epsilon_{ju}= 0,015$ και στρώσεις μανδύα GFRP ονομαστικού πάχους στρώσης 0,17mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f = 70\text{GPa}$, εφελκυστικής αντοχής $f_u=2170\text{MPa}$ και $\epsilon_{ju}= 0,031$. Η τιμή της ανηγμένης αξονικής δύναμης ήταν σταθερή και ίση με $\nu=0,5$.



Διάγραμμα 3. Επιρροή του τύπου FRP στον υπολογισμό του δείκτη πλαστιμότητας μ_{θ} , για ανηγμένη αξονική 0,5

Από το Διάγραμμα 3. φαίνεται η επιρροή του τύπου του FRP στο δείκτη πλαστιμότητας μ_{θ} . Εξαίρεση αποτελεί το βασικό μοντέλο του EC8-3 το οποίο δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τον τύπο FRP. Τα προσεγγιστικά μοντέλα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρουσιάζουν σχετικά μικρή απόκλιση του δείκτη πλαστιμότητας μεταξύ τους για το ίδιο πάχος στρώσης υλικού, με τις τιμές που προκύπτουν για GFRP να είναι μεγαλύτερες από αυτές του CFRP. Εντύπωση προκαλεί η μεγάλη απόκλιση των τιμών μ_{θ} του εναλλακτικού μοντέλου EC8-3 (εξ.12γ). Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο συντελεστή c_f , ο οποίος μεταβάλλεται από 1,8 για υλικό ενίσχυσης CFRP σε 0,8 για GFRP. Είναι μάλιστα το μοναδικό μοντέλο στο οποίο η ενίσχυση με CFRP υπερτερεί των τιμών μ_{θ} της ενίσχυσης με GFRP.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο έγινε εκτενής ανάλυση και σύγκριση των μοντέλων που αφορούν την ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκή πλαστιμότητα και διάβρωση του οπλισμού τους. Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε ήταν τα εξής:

- Η αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας είναι εφικτή σε υποστυλώματα τα οποία έχουν διαβρωμένο οπλισμό, πράγμα το οποίο αποδίδεται στην αύξηση της παραμορφωσιμότητας του περισιγμένου σκυροδέματος, την παρεμπόδιση λυγισμού του διαμήκους οπλισμού από το μανδύα FRP και τον περιορισμό της διατμητικής επίδρασης.
- Στον ασθενή άξονα των δοκιμών τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας παρουσιάζουν αδυναμία στην προσέγγιση των υψηλών τιμών που προκύπτουν από πειράματα. Η αδυναμία αυτή μπορεί να εξηγηθεί μέσω του μεγαλύτερου πλάτους θλιβόμενης ζώνης των υποστυλωμάτων καθαυτήν τη διεύθυνση και κατ' επέκταση τη μικρότερη αποδοτικότητα περίσφιξης του υλικού ενίσχυσης.

- Όλα τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας επηρεάζονται από τη μεταβολή της ανηγμένης αξονικής δύναμης v . Η επιρροή της ανηγμένης αξονικής δύναμης στο προσεγγιστικό μοντέλο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξηγείται με την αντίστροφη αναλογία $\mu_{\theta} - v$ που τα συνδέει. Η επιρροή της v στο βασικό και τα εναλλακτικά μοντέλα του Ευρωκώδικα, μπορεί να αποδοθεί στον όρο $0,3^v$ που βρίσκεται στις εξισώσεις υπολογισμού της χορδής αστοχίας όλων των μοντέλων. Σκόπιμη θα ήταν η περαιτέρω έρευνα πάνω στον όρο αυτό, ούτως ώστε τα μοντέλα να μην επηρεάζονται από τη μεταβολή της v , παρά μόνο από τη μεταβολή του πάχους στρώσης ενίσχυσης.
- Το βασικό μοντέλο του EC8-3 για τον υπολογισμό του δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής αποκτά μη ρεαλιστικές τιμές από ένα μεγάλο αριθμό στρώσεων κι έπειτα. Το βασικό μοντέλο αποκτά βελτιωμένες τιμές μέσω των εναλλακτικών μοντέλων που προτείνονται από τον Μ.Φαρδή. Παρόλα αυτά, δύο από τα εναλλακτικά μοντέλα παρουσιάζουν κάποιο όριο στην αύξηση της πλαστιμότητας στροφής χορδής με την αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης.
- Όλα τα μοντέλα υπολογισμού του δείκτη πλαστιμότητας στροφής χορδής παρουσιάζουν μια μικρή επιρροή ανάλογα με τον τύπο του υλικού ενίσχυσης (CFRP ή GFRP) που χρησιμοποιείται με μόνη εξαίρεση το βασικό μοντέλο του EC8-3.
- Τέλος, αξίζει να ερευνηθεί περαιτέρω ο συντελεστής c_f του τελευταίου από τα προτεινόμενα εναλλακτικά μοντέλα του EC8-3, καθώς προσδίδει μεγάλη απόκλιση στις τιμές μ_{θ} ανάλογα με τον τύπο ινοπλισμένου πολυμερούς που χρησιμοποιείται (CFRP ή GFRP).

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. «ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013,Κανονισμός Επεμβάσεων», ΟΑΣΠ,ΦΕΚ 2187/Β/05-09-2013
2. EC8-3: Ευρωκώδικας 8:Αντισεισμικός Σχεδιασμός –Μέρος 3:Αποτίμηση φέρουσα ικανότητας και ενίσχυσης κτιρίων,EN1998-3:2005
3. Ε. Ν. Μπούσιας, Λ-Α. Ν. Σπαθής, Α. Χ. Τριανταφύλλου και ο Μ. Ν. Φαρδής. «Σεισμική ενίσχυση υποστλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με διαβρωμένο οπλισμό»,14^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως, Οκτώβριος 2003
4. Stathis N. Bousias, Thanasis C. Trianatfillou, Michael N. Fardis, Loukas Spathis, and Bill A O'Regan(2004), “Fiber- Reinforced Polymer Retrofitting of Rectangular Reinforced Concrete Columns with or without Corrosion”, ACI Structural journal, Vol.101(4),512-520

