

Ενίσχυση Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος για την Αύξηση της Τοπικής Πλαστιμότητας Enhancement of Local Ductility of RC Columns

Σωτηρία ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΥ¹, Στέφανος ΔΡΙΤΣΟΣ²

*Λέξεις κλειδιά: Τοπική πλαστιμότητα, Υποστυλώματα, Ινοπλισμένα Πολυμερή,
Κανονισμοί Επεμβάσεων*

Keywords: Local Ductility, RC columns, Fiber Reinforced Polymers, Eurocode

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την παρουσίαση και τη σύγκριση των προσομοιωμάτων των κανονισμών, ΚΑΝ.ΕΠΕ. και Ευρωκώδικα, για την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας υφιστάμενων υποστυλωμάτων. Σκοπός είναι ο εντοπισμός ασαφειών και αδυναμιών των προσομοιωμάτων αλλά και η κατά περίπτωση βελτίωσή τους, μέσω παρέμβασης στις υπάρχουσες εκφράσεις ή/και οριοθετώντας τις περιοχές εφαρμογής τους. Τα προσομοιώματα συγκρίνονται και με ακριβέστερες λύσεις, όπως προσομοιώματα άλλων ερευνητών καθώς και αναλυτικές διαδικασίες με χρήση προγράμματος ανάλυσης διατομής. Επιπλέον, μέσω μιας παραμετρικής αξιολογικής ανάλυσης διερευνάται η επιρροή των τύπων (ινών) του υλικού περίσφιγξης, του αξονικού φορτίου και των διαστάσεων της διατομής. Από το σύνολο των συγκρίσεων προκύπτει ότι η προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 είναι, εν γένει, πιο συντηρητική από την αντίστοιχη του Ευρωκώδικα καθώς και από άλλες σχετικές εκφράσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων βελτιώνεται όταν χρησιμοποιείται μία αναθεωρημένη έκφραση που έχει προταθεί από τους συγγραφείς και η οποία έχει υιοθετηθεί στην πρόσφατη αναθεώρηση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017. Τέλος, διαπιστώνεται έντονη επιρροή του προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. από τον τύπο του υλικού περίσφιγξης και την τιμή του αξονικού φορτίου.

ABSTRACT: This article evaluates models that are proposed by the Greek Code of Structural Interventions, Eurocode 8 and other researchers for strengthening with the aim of restoring a lack of ductility of RC columns by applying external confinement using fibre reinforced polymers. Through an extensive analytical work, results from different models are compared in order to gain insights and draw

¹Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, sotiria90@gmail.com

²Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, dritsos@upatras.gr

useful conclusions. These models are also compared to more accurate models where analytical expressions or cross sectional analysis programs are used. From the results of the comparisons, it is found that the Greek Code model is the most conservative of all the models with a different behaviour from Eurocode's model. Though this work, a revised expression for this model is proposed to be used in order to improve its behaviour.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στην ικανότητα των κατασκευών να απορροφούν ενέργεια και για τον σκοπό αυτό περιλαμβάνουν ειδικές διατάξεις για την εξασφάλιση της απαραίτητης πλαστιμότητας. Όμως αυτό δεν ισχύει για την πλειονότητα των υφισταμένων κτιρίων, τα οποία έχουν κατασκευαστεί με παλιότερους κανονισμούς ή και χωρίς την εφαρμογή κάποιου αντισεισμικού κανονισμού. Συνεπώς, η πλαστιμότητα των υφισταμένων κτιρίων έχει κεντρικό ρόλο στους κανονισμούς επεμβάσεων, οι οποίοι περιλαμβάνουν ειδικές διατάξεις για την ενίσχυση των κτιρίων προς τον σκοπό αυτό, ενώ υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης. Η πλέον ευρέως διαδεδομένη μέθοδος ενίσχυσης τα τελευταία χρόνια είναι η εξωτερική περίσφιγξη με σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Polymers, FRP) υπό τη μορφή μανδύων. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ίνες που συνήθως, προέρχονται από άνθρακα (CFRP), γυαλί (GFRP) ή αραμιδίδιο (AFRP). Στη βιβλιογραφία, διατίθεται πλήθος προσομοιωμάτων για τη συσχέτιση της επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας με την απαιτούμενη ποσότητα του υλικού περίσφιγξης (FRP). Ορισμένα από αυτά έχουν υιοθετηθεί από κανονισμούς όπως, ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (KAN.ΕΠΕ.) και ο Ευρωκώδικας (EN1998-3), που είναι οι διαθέσιμοι (με παράλληλη εφαρμογή) κανονισμοί στην Ελλάδα. Υπάρχουν βέβαια και άλλα αναλυτικά προσομοιώματα μέσω κλειστών σχέσεων ή προγραμμάτων ανάλυσης διατομής. Οι διαφορές των προσομοιωμάτων αυτών και των προσομοιωμάτων των κανονισμών, οι περιοχές σύγκλισης ή απόκλισής τους καθώς και το αν καταλήγουν σε ρεαλιστικά ή όχι αποτελέσματα είναι ορισμένα από τα θέματα που επιδιώκεται μέσω της εργασίας να αποσαφηνιστούν.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΗ ΜΕ FRP

Για τον προσδιορισμό της πλαστιμότητας που αποκτά ένα στοιχείο περισφιγμένο με μανδύα FRP, χρησιμοποιούνται τα βασικά προσομοιώματα των κανονισμών, ενός προσεγγιστικού του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του προσομοιώματος του Ευρωκώδικα. Σύμφωνα, βέβαια, με Αθανασοπούλου Σ. 2016, μέσω μίας θεωρητικής απόδειξης προκύπτει μία αναμορφωμένη έκφραση για το προσεγγιστικό προσομοίωμα του

ΚΑΝ.ΕΠΕ. Το βελτιωμένο αυτό προσομοίωμα χρησιμοποιείται στην εν λόγω εργασία ενώ μέσω των συνολικών συγκρίσεων ελέγχεται παράλληλα και η ισχύς του. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και πιο αναλυτικά προσομοιώματα όπου η πλαστιμότητα προκύπτει είτε μέσω κλειστών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ως εναλλακτική διαδικασία του ΚΑΝ.ΕΠΕ.) είτε μέσω διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, με χρήση του προγράμματος ανάλυσης διατομής, ΒΙΑΧ. Τα δύο αυτά προσομοιώματα χρησιμοποιούνται αφού προσαρμοστούν κατάλληλα.

Μηχανικά χαρακτηριστικά

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία υιοθετείται στην πρόσφατη αναθεώρηση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017), αλλά και στον Ευρωκώδικα (με μικρές παραλλαγές):

$$f_{cc} = f_c(1 + K) = f_c \left(1 + 3,5 \left(\frac{\alpha \rho_f \psi f_{ju,res}}{f_c} \right)^{3/4} \right) \quad (1)$$

Όπου f_c είναι η μέση αντοχή του σκυροδέματος, α είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης που εν γένει λαμβάνεται $\alpha = \alpha_s \cdot \alpha_n$ αλλά για την περίπτωση συνεχούς μανδύα (όπου $\alpha_s = 1.0$) ισούται με $\alpha = \alpha_n$ όπου α_n προσδιορίζεται, συνεκτιμώντας την ευεργετική επίδραση της στρογγύλευσης των ακμών του στοιχείου, από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b^2(1 - \beta)^2 + h^2(1 - \gamma)^2], \text{ όπου } \beta = \frac{2b_p}{b}, \gamma = \frac{2d_p}{h}, A_c = bh \quad (2)$$

με b_p, d_p τα μήκη στρογγύλευσης των πλευρών b και h αντίστοιχα, $\rho_f = \frac{2t_f}{b}$ είναι το ποσοστό του FRP (στην κατεύθυνση x) με t_f το πάχος του FRP, ψ είναι ο συντελεστής επιρροής του πλήθους, k , των στρώσεων του FRP που εκτιμάται ίσος με $\psi = k^{-1/4} \geq \frac{3}{k}$, όταν $k \geq 4$ (ειδάλλως λαμβάνεται $\psi = 1,0$) και $f_{ju,res}$ η αντοχή του FRP και ισούται με: $f_{ju,res} = E_f(\varepsilon_{ju} - \varepsilon_{jo})$ με E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP, ε_{ju} την παραμόρφωση αστοχίας του υλικού περίσφιξης και $\varepsilon_{jo} = \frac{t_1}{2r}$ με $r = \frac{b_p + d_p}{2}$ όπου t_1 λαμβάνεται το πάχος της μίας στρώσης του FRP. Η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος λαμβάνεται, στην πλέον πρόσφατη και επικαιροποιημένη μορφή της από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017, ως:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035(f_{cc}/f_c)^2 \text{ για FRP με ίνες άνθρακα} \quad (3\alpha)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0070(f_{cc}/f_c)^2 \text{ για FRP με ίνες γυαλιού} \quad (3\beta)$$

Ο μηχανισμός αστοχεί όταν αστοχεί το περισφιγμένο σύνθετο υλικό ενώ ακολουθεί φθιτός κλάδος πολύ μεγάλης κλίσεως, που δε μπορεί να ληφθεί υπόψη. Έτσι ως

παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος λαμβάνεται η $\varepsilon_{cu,c}$ δηλαδή η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αντοχή, f_{cc} .

Δείκτης πλαστιμότητας Περισφιγμένης με FRP διατομής

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα υπό εξέταση προσομοιώματα προσδιορισμού του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων για στοιχεία περισφιγμένα με FRP.

1. ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 - κλειστή προσεγγιστική σχέση

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (§8.2.3.(δ) (Σ8.11)), ο επιτυγχανόμενος δείκτης πλαστιμότητας καμπυλότητας (μ_φ) υπολογίζεται, για $\nu > 0,2$ από τη σχέση:

$$\varepsilon_{cu,c} = 2,2 \mu_\varphi \varepsilon_y \nu \Rightarrow \mu_\varphi = \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,2 \varepsilon_y \nu} \quad (4)$$

με, ε_y την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα ($\varepsilon_y = f_y / E_s$ όπου f_y η μέση αντοχή και $E_s = 200 \text{ GPa}$ το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, αντίστοιχα), ν το ανηγμένο αξονικό φορτίο (υπολογισμένο με χρήση μέσης τιμής του υλικού) και $\varepsilon_{cu,c} > 0,004$.

2. Προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφραση

Η παραπάνω βασική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ., (Εξίσωση 4), είναι μία προσεγγιστική σχέση. Σε μία θεωρητική προσέγγιση του θέματος (Αθανασοπούλου Σ. 2016), η Εξίσωση 4 αναθεωρείται, για την περίπτωση που οι διατομές ενισχύονται με FRP, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Η έκφραση αυτή έχει ήδη υιοθετηθεί στην πρόσφατη αναθεώρηση του κανονισμού, ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017:

$$\mu_\varphi = \frac{f_{cc}}{f_c} \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,6 \nu \varepsilon_y} \quad (5)$$

Παρατηρείται ότι η Εξίσωση 4 προκύπτει αν στην Εξίσωση 5 ληφθεί συντελεστής $\lambda = f_{cc} / 2,6 f_c = 2,2$. Η τιμή αυτή του λ προκύπτει για χαμηλές τιμές περίσφιγξης, που είναι λογικές για την περίπτωση περίσφιγξης με συνδετήρες, όχι όμως για την περίσφιγξη με FRP. Ως εκ τούτου η Εξίσωση 5 είναι αυτή που προτείνεται να ελεγχθεί, συγκρίνοντάς την και με τα άλλα προσομοιώματα, ως μία βελτιωμένη έκφραση της βασικής προσεγγιστικής σχέσης του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

3. Εναλλακτική διαδικασία με προσαρμογή σχέσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017

Εναλλακτικά του βασικού προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Εξίσωση 4), η πλαστιμότητα μπορεί να προσδιοριστεί ως ο λόγος της καμπυλότητας στην αστοχία, φ_u , (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Παράρτημα 7E) προς την καμπυλότητα στη διαρροή, φ_y , (ΚΑΝ.ΕΠΕ.Παράρτημα 7A), όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Η καμπυλότητα στη διαρροή προκύπτει ως η μικρότερη από τις τιμές των ακολούθων εξισώσεων. Οι εξισώσεις αφορούν τη διαρροή διατομής προερχόμενη

από διαρροή εφελκόμενου οπλισμού, ή μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων θλιβόμενου σκυροδέματος (δηλαδή βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του $\varepsilon_c=1,8f_c/E_c$, με E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος), αντίστοιχα.

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d} \quad \text{ή} \quad \varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c\xi_y d} \quad (6), (7)$$

με το ανηγμένο (στο στατικό ύψος d) ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ_y όπως προσδιορίζεται αναλυτικά στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.(Παράρτημα 7Α). Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις η καμπυλότητα φ_y δεν επηρεάζεται καθόλου από την περισφιγξη της διατομής, διατηρώντας σταθερή τιμή πριν και μετά την ενίσχυση. Η καμπυλότητα αστοχίας προσδιορίζεται μέσω των Εξισώσεων 8, 9 από ανάλυση διατομής χωρίς απαίτηση πλήρους διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων. Κατά αντιστοιχία των εξισώσεων, η αστοχία προέρχεται από θραύση του εφελκόμενου οπλισμού (εξάντληση μέγιστης παραμόρφωσης χάλυβα, ε_{su}) ή από αποδιοργάνωση θλιβόμενης ζώνης (η ακραία θλιβόμενη ίνα φθάνει τη μέγιστη παραμόρφωση, $\varepsilon_{cu,c}$).

$$\varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su})d} \quad \text{ή} \quad \varphi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu,c}}{\xi_{cu}d} \quad (8), (9)$$

Για την επιλογή του τρόπου αστοχίας και τον υπολογισμό των εκάστοτε ανηγμένων (στο στατικό ύψος d) υψών της θλιβόμενης ζώνης ξ_{su} , ξ_{cu} , διατίθεται σειρά εξισώσεων (που λόγω εκτεταμένης έκτασης δε παρουσιάζονται), από τις οποίες επιλέγεται η κατάλληλη βάσει των γεωμετρικών, μηχανικών χαρακτηριστικών της διατομής. Για την εφαρμογή των εξισώσεων στην περίπτωση περισφιγξης με FRP γίνονται, κατά την παρούσα εργασία, ορισμένες παραδοχές. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται ότι η αστοχία αφορά πάντα την περισφιγμένη διατομή (ολόκληρη η διατομή είναι ένας πυρήνας) με χαρακτηριστικά περισφιγμένης διατομής (αντοχή f_{cc} και παραμόρφωση $\varepsilon_{cu,c}$) από τις Εξισώσεις 1, 3.

4. Διαγράμματα Ροπών-Καμπυλοτήτων

Για τον υπολογισμό των ακριβών διαγραμμάτων Ροπών-Καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ΒΙΑΧ, με κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να περιλαμβάνει την περίπτωση περισφιγξης με FRP καθώς είναι σχεδιασμένο μόνο για περισφιγξη με χαλύβδινους συνδετήρες. Στο λογισμικό εισάγεται η διατομή χωρίς οπλισμό περισφιγξης αλλά με μηχανικά χαρακτηριστικά περισφιγμένης με FRP διατομής (Εξισώσεις 1, 3).

5. Ευρωκώδικας (EN1998-3)

Κατά τον Ευρωκώδικα (EN1998-3, Α.4.4.4.), προσδιορίζεται πίεση, f_l , που απαιτείται για την επίτευξη επιδιωκόμενης πλαστιμότητας καμπυλότητας μ_φ , προς διαθέσιμη πλαστιμότητα καμπυλότητας $\mu_{\varphi,ava}$ ίση με $I_\chi = \mu_\varphi / \mu_{\varphi,ava}$, ως ακολούθως:

$$f_1 = 0,4 I_x^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} \quad (10)$$

με ε_{cu} η παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος που ισούται με: $\varepsilon_{cu}=0,004$, $\varepsilon_{ju} < \varepsilon_{fu}$ όπου ε_{fu} μία οριακή ανηγμένη παραμόρφωση, ίση με 0.015 για CFRP ή AFRP και 0.02για GFRP. Για την περίπτωση των ορθογωνικών διατομών με στρογγυλεμένες τις γωνίες, η πίεση περισφιγξης που εφαρμόζεται από το φύλλο FRP υπολογίζεται ως: $f_1 = k_s \cdot f_l$ με $k_s = 2R/D$ και $f_l = 2E_f \varepsilon_{ju} t_f / D$, όπου D είναι το μεγαλύτερο πλάτος της διατομής. Συνεπώς για ορθογωνική διατομή η Εξίσωση 10 λαμβάνει τη μορφή:

$$k_s f_1 = 0,4 \left(\frac{\mu_\varphi}{\mu_{\varphi,ava}} \right)^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} \Rightarrow \left(\frac{\mu_\varphi}{\mu_{\varphi,ava}} \right)^2 = \frac{\varepsilon_{ju}^{1,5} \cdot k_s \cdot f_1}{0,4 \cdot f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2} \Rightarrow \frac{\mu_\varphi}{\mu_{\varphi,ava}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{ju}^{1,5} \cdot k_s \cdot 2 \cdot E_f \cdot \varepsilon_{ju} \cdot t_f}{0,4 \cdot f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2 \cdot D}}$$

$$\frac{\mu_\varphi}{\mu_{\varphi,ava}} = \sqrt{\frac{k_s \cdot \varepsilon_{ju}^{2,5} \cdot E_f \cdot t_f}{0,2 \cdot f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2 \cdot D}} \quad (11)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω του k_s ο Ευρωκώδικας λαμβάνει τη μείωση της τάσης του υλικού λόγω συγκέντρωσης τάσεων στις γωνίες αλλά δεν λαμβάνει καμία περαιτέρω μείωση λόγω μεγάλου πλήθους των στρώσεων του FRP, όπως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Τέλος παρατηρείται ότι στην Εξίσωση 11 δεν περιλαμβάνεται καμία παράμετρος για τον διαμήκη οπλισμό της διατομής (όπως θα ανέμενε κανείς) με αποτέλεσμα το προσομοίωμα να μην επηρεάζεται καθόλου από αυτό.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

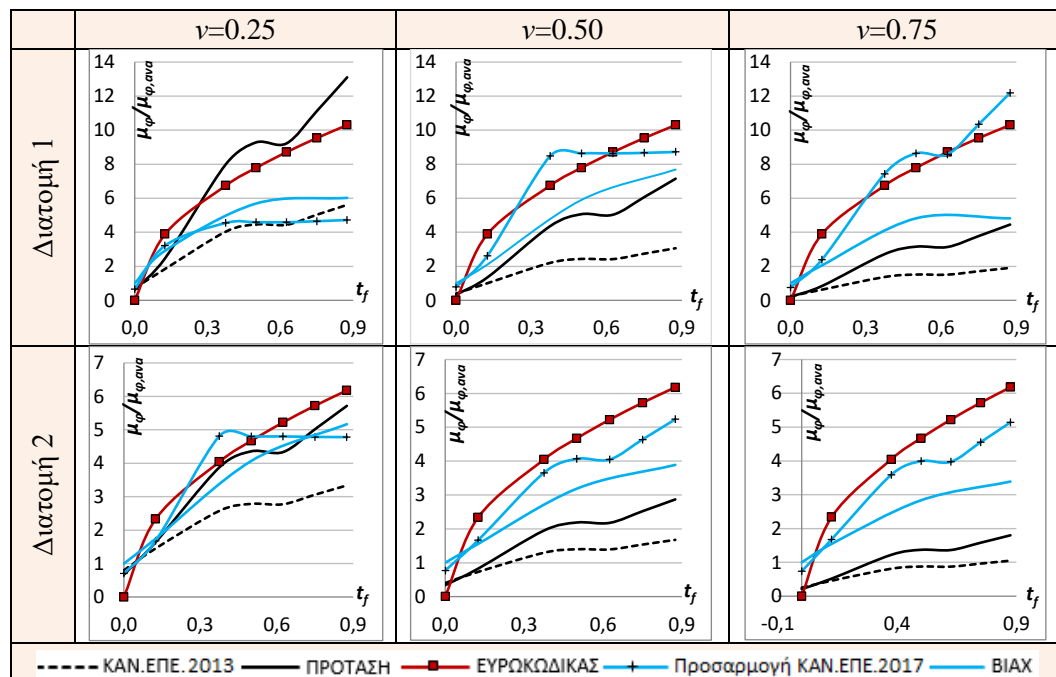
Τα προσομοιώματα της προηγούμενης παραγράφου, εφαρμόζονται σε δύο υποστυλώματα με αντιπροσωπευτικές (συνήθεις για υφιστάμενες κατασκευές) διατομές, Διατομή 1 και Διατομή 2, με σκοπό τη σύγκρισή τους. Η Διατομή 1 έχει διαστάσεις 300x300mm και είναι οπλισμένη με 4Φ20, ενώ η Διατομή 2 έχει διαστάσεις 600x600mm, και είναι οπλισμένη με 8Φ20. Λαμβάνεται σκυρόδεμα μέσης αντοχής, $f_c = 20\text{Mpa}$ και μέτρου ελαστικότητας, $E_c = 25,8\text{Gpa}$ και χάλυβας S500 με μέση τάση διαρροής 575Mpa. Επιλέγεται επικάλυψη ίση με 20mm.

Για να είναι εφικτή η σύγκριση του προσομοιώματος του Ευρωκώδικα με τα υπόλοιπα, οι δείκτες επιτυχανόμενης πλαστιμότητας, διαιρούνται με τον αντίστοιχο δείκτη διαθέσιμης πλαστιμότητας. Για τα προσομοιώματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. ο δείκτης διαθέσιμης πλαστιμότητας έχει προκύψει από κλειστές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ενώ για το προσομοίωμα που περιλαμβάνει το πρόγραμμα BIAx, έχει υπολογιστεί με χρήση του ίδιου του προγράμματος (με μηχανικά χαρακτηριστικά, κανόνες διγραμμικοποίησης και ορισμό σημείου αστοχίας κατά

ΚΑΝ.ΕΠΕ). Σύμφωνα με Αθανασοπούλου Σ. 2016, από τη σύγκριση των δύο προσομοιωμάτων προσδιορισμού της διαθέσιμης πλαστιμότητας (μέσω των κλειστών τύπων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και μέσω των διαγραμμάτων $M-\varphi$ με χρήση του ΒΙΑΧ) προκύπτει ότι για ένα ρεαλιστικό εύρος τιμών ογκομετρικού ποσοστού περίσφιγξης των συνδετήρων (<0.5), τα προσομοιώματα είναι εν γένει κοντά (πιθανές μικρές διαφορές οφείλονται στον προσδιορισμό της καμπυλότητας στη διαρροή). Συνεπώς, ο προσδιορισμός της διαθέσιμης πλαστιμότητας, με όποιον από τους δύο παραπάνω τρόπους, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των συγκρίσεων (ιδίως στην παρούσα εργασία με μηδενικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων).

Σύγκριση προσομοιωμάτων

Για την περίσφιγξη των διατομών λαμβάνεται μανδύας CFRP ονομαστικού πάχους 0,125mm, οριακής παραμόρφωσης $\epsilon_{ju}=1,5\%$, μέτρου ελαστικότητας $E_f=235\text{GPa}$ και αντοχής $f_u=3800\text{MPa}$. Επιλέγεται ακτίνα καμπύλωσης των ακμών των διατομών, $R=50\text{mm}$. Η εφαρμογή των προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε, για διάφορες τιμές αξονικού φορτίου ($\nu=0,25$, $\nu=0,50$ και $\nu=0,75$) και πάχους του μανδύα CFRP (1 έως 7 στρώσεις). Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα σύγκρισης των προσομοιωμάτων για τις τιμές επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας (κανονικοποιημένης ως προς τη διαθέσιμη), συναρτήσει του πάχους του FRP.



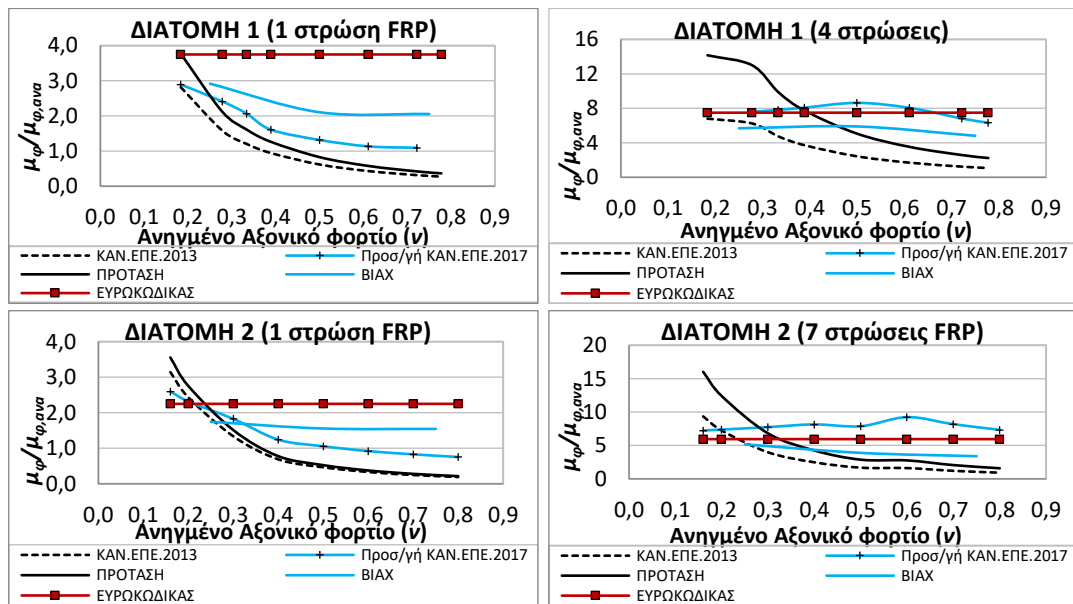
Σχήμα 1. Συγκριτικά διαγράμματα των προσομοιωμάτων, για τη Διατομή 1 και Διατομή 2

Από τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι:

- Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (Εξίσωση 4), είναι το πιο συντηρητικό από όλα δίνοντας τις χαμηλότερες τιμές επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας, οι οποίες είναι και αρκετά μακριά από τις τιμές των υπολοίπων προσομοιωμάτων
- Η απόδοση του προσομοιώματος ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (Εξίσωση 4) βελτιώνεται όταν η βασική του σχέση χρησιμοποιηθεί στην προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφρασή της (Εξίσωση 5), με την καμπύλη αυτού να είναι πολύ πιο κοντά στις καμπύλες των υπολοίπων (άρα και στην καμπύλη του Ευρωκώδικα, Εξίσωση 11). Ειδικότερα για χαμηλές τιμές ανηγμένου αξονικού φορτίου οι καμπύλες είναι ιδιαίτερα κοντά. Το προσομοίωμα αυτό προτείνεται από την παρούσα εργασία να χρησιμοποιείται, για περίπτωση περίσφιγξης με FRP. Επιπλέον παρατηρείται ότι ακόμα και στην αναμορφωμένη έκφραση η μορφή της καμπύλης εξακολουθεί να είναι διαφορετική από τις αντίστοιχες των υπολοίπων προσομοιωμάτων. Οι υπόλοιπες καμπύλες έχουν τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω (που είναι θεμιτό) υποδεικνύοντας ότι μία μικρή αύξηση της ποσότητας του υλικού περίσφιγξης δεν αυξάνει υπερβολικά την τιμή της πλαστιμότητας.
- Η σύγκλιση των προσομοιωμάτων επηρεάζεται από την τιμή του αξονικού φορτίου καθώς για χαμηλές τιμές του ανηγμένου αξονικού οι καμπύλες των προσομοιωμάτων είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη, ενώ απομακρύνονται (ιδίως οι καμπύλες του ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (Εξίσωση 4) και της προτεινόμενης αναμορφωμένης έκφρασής του (Εξίσωση 5) όσο η τιμή του αυξάνεται.
- Τα συμπεράσματα από τη σύγκριση είναι ανάλογα και για τις δύο διατομές, Διατομή 1 και Διατομή 2, πράγμα που προμηνύει ότι η διάσταση της διατομής δεν αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρο για τη σύγκριση των προσομοιωμάτων καθώς δεν φαίνεται να επηρεάζει τη σχετική απόκριση των καμπυλών τους.
- Τα πιο αναλυτικά προσομοιώματα, το προσομοίωμα από το πλήρες Διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων μέσω ΒΙΑΧ και το προσομοίωμα με τις κλειστές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (προσαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017), φαίνεται να αποτελούν μία ενδιάμεση λύση με τις καμπύλες τους να είναι πάντα στο μεσοδιάστημα των καμπυλών των προσομοιωμάτων, ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (Εξίσωση 4) και Ευρωκώδικα (Εξίσωση 11). Τα προσομοιώματα αυτά δίνουν ιδιαίτερα κοντινές τιμές υποδεικνύοντας ότι οι κλειστοί τύποι του ΚΑΝ.ΕΠΕ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν (με τον τρόπο και τις προσαρμογές που αναφέρθηκαν) και στην περίπτωση εξωτερικής περίσφιγξης με FRP, αν και δεν έχουν μελετηθεί γι' αυτό.
- Το προσομοίωμα, προσαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017, είναι το μόνο που αντιλαμβάνεται το γεγονός ότι δεν μπορεί η πλαστιμότητα να αυξάνεται ες αεί, όσο κι αν αυξάνεται η περίσφιγξη με την καμπύλη του να είναι η μόνη που οριζοντιώνεται μετά το πέρας ενός ποσοστού περίσφιγξης. Σε αυτό το σημείο αλλαγής της καμπύλης αλλάζει ουσιαστικά ο τρόπος αστοχίας του υλικού με τον χάλυβα να είναι καθοριστικός της αστοχίας μετά το πέρας αυτού του σημείου. Μέχρι εκείνο το σημείο καθοριστικός της αστοχίας είναι το σκυρόδεμα.

Επιρροή του ανηγμένου αξονικού φορτίου

Παρουσιάζονται ακολούθως διαγράμματα επιρροής των προσομοιωμάτων προσδιορισμού της πλαστιμότητας από το ανηγμένο αξονικό φορτίο, για ενδεικτικές περιπτώσεις περίσφιγξης (με GFRP), της Διατομής 1 και Διατομής 2.



Σχήμα 2. Μεταβολή των προσομοιωμάτων συναρτήσεως του ανηγμένου αξονικού φορτίου

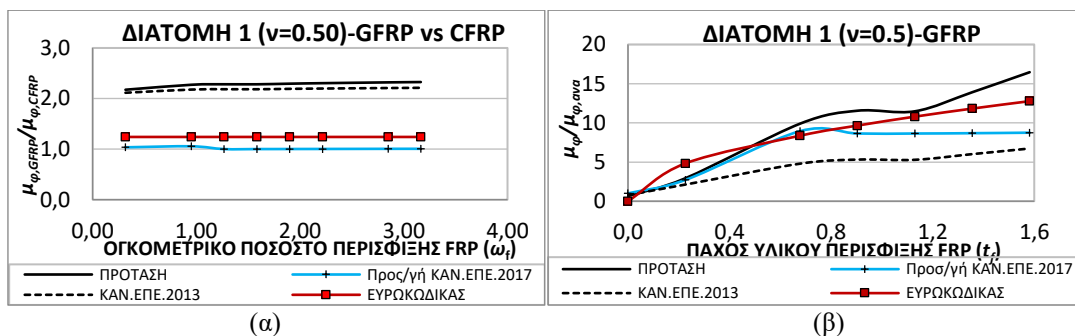
Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι:

- Το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα (Εξίσωση 11) δεν επηρεάζεται καθόλου από το αξονικό φορτίο σε αντίθεση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.-2013 (Εξίσωση 4) και την προτεινόμενη έκφραση (Εξίσωση 5) που εμφανίζουν την πιο έντονη επιρροή από όλα τα προσομοιώματα. Αυτό οφείλεται στην άμεση σύνδεση του αξονικού φορτίου με την πλαστιμότητα, (είναι αντιστρόφως ανάλογο της πλαστιμότητας) κατά τις, Εξίσωση 4 και Εξίσωση 5.
- Τα δύο πιο αναλυτικά προσομοιώματα, προσαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017 και ΒΙΑΧ, έχουν μεταβαλλόμενη επιρροή από το ανηγμένο αξονικό φορτίο η οποία γίνεται ασθενέστερη όσο η περίσφιγξη αυξάνεται (μεγάλο πλήθος στρώσεων).
- Τα προσομοιώματα εν γένει αποκλίνουν για υψηλές τιμές του αξονικού φορτίου.
- Τα συμπεράσματα είναι ανάλογα και για τις δύο διατομές, καθώς η μορφή των αντίστοιχων διαγραμμάτων για τη Διατομή 1 και τη Διατομή 2 είναι ίδια.

Επιρροή του τύπου του υλικού περίσφιγξης

Για τον έλεγχο της επιρροής του τύπου του υλικού του FRP στα προσομοιώματα, η Διατομή 1 και η Διατομή 2 περισιφίγγονται με μανδύα GFRP (αντί CFRP) μέτρου ελαστικότητας $E_f=105\text{GPa}$, ονομαστικού πάχους, $0,226\text{mm}$, αντοχής $f_u=2100\text{MPa}$ και παραμόρφωσης αστοχίας $\varepsilon_{ju}=2,0\%$ ενώ η ακτίνα καμπύλωσης είναι $R=50\text{mm}$. Παρακάτω, παρουσιάζεται διάγραμμα του λόγου της πλαστιμότητας που επιτυγχάνεται μέσω περίσφιγξης με μανδύα GFRP προς την αντίστοιχη μέσω περίσφιγξης με μανδύα CFRP, συναρτήσει του ογκομετρικού ποσοστού περίσφιγξης. Σημειώνεται πως, λόγω διαφορετικών χαρακτηριστικών των υλικών, η σύγκριση των προσομοιωμάτων γίνεται σε όρους ογκομετρικού ποσοστού, ω_f , ($\omega_f = 4 \cdot t_f \cdot f_u / b \cdot f_c$) κι όχι πάχους υλικού περίσφιγξης. Παρουσιάζεται επίσης, διάγραμμα σύγκρισης των προσομοιωμάτων για τις τιμές επιτυγχάνομενης πλαστιμότητας (κανονικοποιημένης ως προς τη διαθέσιμη), συναρτήσει του πάχους του GFRP (για πλήθος στρώσεων 1-7).

Τα διαγράμματα αυτά αφορούν τη Διατομή 1 για μία ενδεικτική τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου, ν , ενώ αντίστοιχα προκύπτουν για τη Διατομή 2.



Σχήμα 3. (α) Σχέση πλαστιμότητας για περίσφιγξη με GFRP ως προς CFRP, (β) σύγκριση προσομοιωμάτων για περίσφιγξη με GFRP

Από το Σχήμα 3α συμπεραίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, η εφαρμογή GFRP δεν τροποποιεί τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συγκρίσεις προσομοιωμάτων με χρήση CFRP. Εξάιρεση αποτελούν τα προσομοιώματα, ΚΑΝ.ΕΠΕ.-2013 (Εξίσωση 4) και η προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφρασή του (Εξίσωση 5), που επηρεάζονται έντονα από την αλλαγή του υλικού, δίνοντας σχεδόν διπλάσιες τιμές επιτυγχάνομενης πλαστιμότητας για περίσφιγξη με την ίδια ποσότητα υλικού. Η μεγάλη αυτή επιρροή οφείλεται στην παραμόρφωση αστοχίας, $\varepsilon_{cu,c}$, η οποία λαμβάνεται από την Εξίσωση 3β αντί της Εξίσωσης 3α που λαμβανόταν για το CFRP. Για την ίδια ποσότητα ογκομετρικού ποσοστού περίσφιγξης, η αντοχή του σκυροδέματος, f_{cc} , είναι σταθερή (βλ. Εξίσωση 1) και

ομοίως ο λόγος f_{cl}/f_c στις Εξισώσεις 3α,3β. Ως εκ τούτου η Εξίσωση 3β που έχει διπλάσιο πολλαπλασιαστικό συντελεστή θα δίνει διπλάσια παραμόρφωση αστοχίας που λόγω της Εξίσωσης 4 ή 5 προκύπτει διπλάσια πλαστιμότητα.

Από το Σχήμα 3β, συμπεραίνεται ότι το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα (Εξίσωση 11) και η προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφραση (Εξίσωση 5), είναι πολύ κοντά για $\nu=0,5$, όταν η περίσφιγξη εφαρμόζεται με GFRP σε αντίθεση με το αποτέλεσμα που προέκυψε από το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 1 για εφαρμογή περίσφιγξης με CFRP. Στο Σχήμα 1 η προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφραση (Εξίσωση 5), έδωσε τιμές για την πλαστιμότητα πολύ κοντά στις τιμές των υπολοίπων προσομοιωμάτων για $\nu=0,25$ αλλά αρκετά χαμηλότερες για $\nu=0,50$ και $\nu=0,75$. Στην περίπτωση εφαρμογής GFRP, το εν λόγω προσομοίωμα δίνει διπλάσιες τιμές πλαστιμότητας από αυτές που προκύπτουν στην περίπτωση εφαρμογής CFRP, ενώ τα υπόλοιπα προσομοιώματα δίνουν τιμές πλαστιμότητας που δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα αν το υλικό περίσφιγξης είναι είτε CFRP, είτε GFRP. Με βάση τα παραπάνω, το μέγεθος της πλαστιμότητας που προκύπτει από την εφαρμογή της προτεινόμενης αναθεωρημένης έκφρασης για την περίπτωση περίσφιγξης με GFRP, αναμένεται να προκύψει μεγαλύτερη από ότι θα προέκυπτε με τη χρήση άλλων προσομοιωμάτων όταν το ανηγμένο αξονικό φορτίο ισούται με $\nu=0,25$, αλλά μικρότερη από αυτά όταν το ανηγμένο αξονικό φορτίο ισούται με $\nu=0,75$.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε μία εκτεταμένη, αναλυτική σύγκριση προσομοιωμάτων των κανονισμών και άλλων αναλυτικών προσομοιωμάτων με κλειστές σχέσεις ή με χρήση προγραμμάτων ανάλυσης διατομής, για τον προσδιορισμό της επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας μέσω της περίσφιγξης με FRP. Βασισμένοι στην παραπάνω έρευνα, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το βασικό προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι αρκετά συντηρητικό, δίνοντας τις χαμηλότερες τιμές επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας από όλα τα προσομοιώματα.
- Η προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφραση του προσεγγιστικού προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. πράγματι βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του ενώ προτείνεται από τους συγγραφείς να χρησιμοποιείται, αντί του προηγούμενου, για τον προσδιορισμό πλαστιμότητας στην περίπτωση περίσφιγξης με σύνθετα υλικά.
- Το προσεγγιστικό προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ακόμα και στην προτεινόμενη αναμορφωμένη έκφρασή του, επηρεάζεται έντονα από το ανηγμένο αξονικό φορτίο και τον τύπο του υλικού περίσφιγξης, ενώ έχει διαφορετική απόκριση από τα υπόλοιπα προσομοιώματα με την καμπύλη του να μην έχει τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω. Εν αντιθέσει με αυτό, οι καμπύλες των υπολοίπων

προσομοιωμάτων έχουν τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω, όπως είναι θεμιτό, υποδεικνύοντας ότι με μία μικρή αύξηση της ποσότητας το υλικού περίσφιγξης δεν αυξάνεται υπερβολικά η τιμή της επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας.

- Το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα δεν επηρεάζεται καθόλου από τον οπλισμό της διατομής και το αξονικό φορτίο (εν αντιθέσει του προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. που επηρεάζεται έντονα από αυτό), ενώ ελάχιστη είναι η επιρροή από τον τύπο του υλικού περίσφιγξης.
- Τα προσομοιώματα, εν γένει, συγκλίνουν για χαμηλά αξονικά φορτία, ν , ενώ όσο το ν αυξάνει (π.χ. για $\nu=0.75$) το προσομοίωμα με την προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. διαφοροποιείται των υπολοίπων δίνοντας αρκετά χαμηλότερες τιμές πλαστιμότητας. Η διάσταση της διατομής δεν επηρεάζει αισθητά τη σύγκλιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

CEN Ευρωκώδικας 8. Αντισεισμικός Σχεδιασμός - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων, EN1998-3, Αθήνα (2005)

CEN Ευρωκώδικας 2. Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα - Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, EN1992-1-1, Αθήνα (2004)

federation international du beton, fib Model Code for Concrete Structures 2010, Lausanne (2010)

Michael N. Fardis, “Seismic design, assessment and retrofitting of Concrete Buildings, based on EN-Eurocode8”, *Springer* (2009)

Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα (2006)

Αθανασοπούλου Σωτηρία, “Συγκρίσεις ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8 για επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας”, του 22^{ου} Φοιτητικού Συνεδρίου στις επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών 2016, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Φεβρουάριος (2016)

Μ. Γ. Σφακιανάκης, “Πρόγραμμα ΒΙΑΧ-οδηγίες χρήσης”, Πάτρα (2015)

ΟΑΣΠ ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013-Κανονισμός Επεμβάσεων, ΦΕΚ 2187/Β/05-09-2013, ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017-Κανονισμός Επεμβάσεων, ΦΕΚ 2984/Β/30-08-2017

Στέφανος Η. Δρίτσος, “Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, γ' αναθεωρημένη έκδοση, *ISBN 9609150500*, Πάτρα (2005)