

Αύξηση πλαστιμότητας δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με εξωτερική περίσφιγξη

Σωτηρία Ν. Αθανασοπούλου

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός, MSc, sotiria90@gmail.com

Στέφανος Η. Δρίτσος

Καθηγητής τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών, dritsos@upatras.gr

1. Εισαγωγή

Ένα σημαντικό μεγάλο μέρος των παλαιών υφιστάμενων κτιρίων είναι κατασκευασμένο με βάση παλαιούς αντισεισμικούς κανονισμούς (ή ακόμη και απουσία κανονισμού), όπου δεν περιλαμβάνονται η τεχνογνωσία, η τεχνοτροπία και οι μέθοδοι σχεδιασμού που υιοθετούν οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί για τα νέα κτίρια. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα παλαιά κτίρια να εντοπίζονται ορισμένες αδυναμίες ειδικά κατά την απόκρισή τους υπό σεισμικές δράσεις. Μία από τις συνηθέστερες και σημαντικότερες αδυναμίες είναι η έλλειψη πλαστιμότητας στα υφιστάμενα μέλη της κατασκευής με κυριότερα τα υποστυλώματα. Για την αποκατάσταση αυτού του σύνηθες προβλήματος, οι κανονισμοί έχουν συμπεριλάβει ειδικές διατάξεις, ενώ υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης. Μία αποτελεσματική μέθοδος ενίσχυσης (ευρέως διαδεδομένη στο χώρο των επισκευών κι ενισχύσεων τα τελευταία χρόνια) είναι η εξωτερική περίσφιγξη με σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή ή Fiber Reinforced Polymers, FRP) υπό τη μορφή μανδύων. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ίνες που συνήθως, προέρχονται από άνθρακα (CFRP), γυαλί (GFRP) ή αραμίδιο (AFRP). Στη βιβλιογραφία, υπάρχει πλήθος διαθέσιμων 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 (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και ο Ευρωκώδικας (EN1998-3), που είναι οι δύο διαθέσιμοι κανονισμοί τη παρούσα χρονική περίοδο στον Ελλαδικό χώρο (με παράλληλη εφαρμογή). Υπάρχουν βέβαια και άλλα αναλυτικά προσομοιώματα μέσω κλειστών σχέσεων ή προγραμμάτων ανάλυσης διατομής. Ορισμένα θέματα, λοιπόν που τίθενται και που μέσω της εργασίας επιδιώκεται να αποσαφηνιστούν, είναι ποια η διαφορά όλων αυτών των προσομοιωμάτων αλλά και των προσομοιωμάτων των κανονισμών, πότε αυτά συγκλίνουν ή αποκλίνουν μεταξύ τους αλλά και πόσο καταλήγουν σε ρεαλιστικά ή όχι αποτελέσματα.

2. Μηχανικά χαρακτηριστικά υφιστάμενης διατομής

Η διαθέσιμη πλαστιμότητα μπορεί να προσδιοριστεί, σε όρους καμπυλοτήτων, μέσω του πλήρες διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, όπως αυτό προκύπτει από πρόγραμμα ανάλυσης διατομής (BIAX για την εν λόγω εργασία), αλλά και μέσω κλειστών σχέσεων που υιοθετούνται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις προσδιορισμού της πλαστιμότητας αναφέρονται, εξ ορισμού τους, σε πλήρη διατομή περισφιγμένη με εσωτερικούς συνδετήρες, οπότε και στη περίπτωση αυτή προαπαιτείται ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι εσωτερικοί συνδετήρες αγνοούνται, αφενός για να είναι εμφανή η επιρροή της εξωτερικής περίσφιγξης και μόνο αυτής (κι ως εκ τούτου αποτελεσματικότερη η σύγκριση των προσομοιωμάτων

ενίσχυσης) κι αφετέρου γιατί θεωρείται πως αυτό αντικατοπτρίζει τη πραγματική κατάσταση των κατασκευών στον ελλαδικό χώρο (ακόμα και στη περίπτωση που οι συνδετήρες έχουν τοποθετηθεί στη κατασκευή τότε αυτοί βρίσκονται σε χαμηλό ποσοστό ή δεν είναι σωστά κλεισμένοι με άγκιστρο υπό γωνία 45°). Αξίζει να σημειωθεί, ότι με βάσει τις κλειστές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ., η πλαστιμότητα προσδιορίζεται ως ο λόγος της καμπυλότητας στην αστοχία προς την καμπυλότητα στη διαρροή. Για τη μεν, καμπυλότητα στη διαρροή, περιλαμβάνονται ήδη στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 οι κλειστές σχέσεις προσδιορισμού της. Για τη δε, καμπυλότητα στην αστοχία οι κλειστές σχέσεις προσδιορισμού της δεν περιλαμβάνονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 αλλά περιλαμβάνονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016.

2.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών και παραδοχές

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά της υφιστάμενης απερίσφικτης διατομής που απαιτούνται, τόσο για το για το προσδιορισμό της διαθέσιμης πλαστιμότητας, όσο και για το σύνολο της εργασίας.

Όσον αφορά το σκυρόδεμα, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, η βράχυνση αστοχίας της ακραίας θλιβόμενης ίνας του είναι ίση με: $\varepsilon_{cu}=0,004$ (1)

ενώ η παραμόρφωση, ε_{co} , μέχρι την οποία το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, $\sigma-\varepsilon$, είναι παραβολικό, είναι ίση με: $\varepsilon_{co}= 0,002$ (2)

Όσον αφορά τον χάλυβα, σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων, $\sigma-\varepsilon$, ο ελαστικός κλάδος ακολουθείται από ένα πλατό διαρροής με σταθερή τάση διαρροής (υπολογισμένη με τη μέση τιμή της), f_y , το οποίο αρχίζει από τη παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, ε_y , και τελειώνει σε παραμόρφωση: $\varepsilon_{sh}=5\varepsilon_y$, ($\varepsilon_y=f_y/E_s$ με $E_s=200\text{GPa}$) (3)

Έπειτα από τη παραμόρφωση αυτή λαμβάνεται γραμμική σχέση κράτυνσης μέχρι τη μέγιστη τάση, f_t , που αντιστοιχεί στην οριακή παραμόρφωση, ε_{su} . Σημειώνεται πως σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού, ε_{su} , θα πρέπει να λαμβάνεται μειωμένη σε σχέση με την ονομαστική τιμή, $\varepsilon_{su,nominal}$, όπως αυτή προκύπτει από τη κορυφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, $\sigma-\varepsilon$, του χάλυβα κατά την τυποποιημένη δοκιμή ράβδων οπλισμού σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα προτείνεται να λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{su} = (3/8) \varepsilon_{su,nominal} \quad (4\alpha)$$

Για την εργασία αυτή θεωρείται ότι ο χάλυβας που χρησιμοποιείται είναι κατηγορίας πλαστιμότητας Β (όπως είθισται να ισχύει σε παλιές κατασκευές) με χαρακτηριστικές (σύμφωνα με Νέζης Χρ. 2006) τις ακόλουθες τιμές:

$$\text{λόγος μέγιστης αντοχής προς αντοχή διαρροής χάλυβα, } f_t/f_y=1,15 \quad (5\alpha)$$

$$\text{και ονομαστική τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας χάλυβα, } \varepsilon_{su,nominal}=0,09 \quad (5\beta)$$

$$\text{από την οποία προκύπτει οριακή παραμόρφωση του χάλυβα: } \varepsilon_{su} = (3/8)0,09=0,034 \quad (4\beta)$$

2.2. Διαθέσιμη πλαστιμότητα μέσω Διαγραμμάτων Ροπών-καμπυλοτήτων

Ένας πολύ γενικός (ανεξαρτήτως κανονισμών) τρόπος υπολογισμού της διαθέσιμης πλαστιμότητας είναι μέσω των πλήρη διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, για την κατασκευή των οποίων χρησιμοποιείται πρόγραμμα ανάλυσης διατομής. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των διαγραμμάτων στην εν λόγω εργασία είναι το BIAx στο οποίο εισάγονται (πέραν των διαστάσεων, του οπλισμού και της ποιότητας των υλικών της διατομής) τα χαρακτηριστικά μεγέθη των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων, $\sigma-\varepsilon$, του σκυροδέματος και του χάλυβα κατά τις εξ.(1)-

(5). Η εξαγόμενη καμπύλη $M-\varphi$ διγραμμικοποιείται με κατάλληλο πρόγραμμα και με τους κανόνες που ορίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Διγραμμικοποιείται δηλαδή με ελαστοπλαστικό νόμο και με τον κανόνα ίσων εμβαδών κι έχοντας λάβει ως τελικό σημείο της καμπύλης (δηλαδή ως σημείο της αστοχίας), το σημείο όπου ένα από τα δύο υλικά, χάλυβας ή σκυρόδεμα, φτάσουν τις οριακές τους παραμορφώσεις ε_{su} , ε_{cu} , αντίστοιχα, ή όταν η ροπή αστοχίας υπολείπεται της ροπής διαρροής κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 20%.

2.3. Διαθέσιμη πλαστιμότητα κατ' εφαρμογή των κλειστών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η διαθέσιμη πλαστιμότητα κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. ορίζεται ως ο λόγος της καμπυλότητας στην αστοχία προς τη καμπυλότητα στη διαρροή, όπως αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Καμπυλότητα στη διαρροή:

Για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας διαρροής, φ_y , διατομής οπλισμένου σκυροδέματος με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 (Παράρτημα 7Α) υιοθετεί μία αναλυτική διαδικασία, με τους παρακάτω κλειστούς τύπους, (βασισμένοι στην επιπεδότητα διατομών κατά Navier-Bernoulli και στη γραμμική σχέση $\sigma-\varepsilon$ του χάλυβα και του σκυροδέματος μέχρι τη διαρροή). Κριτήριο της διαρροής είναι: η εξάντληση της τάσης διαρροής του χάλυβα, f_y , ή η βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας $\varepsilon_c=1,8f_c/E_c$, όπου f_c και E_c η αντοχή (μέση τιμή) και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Εάν η διαρροή οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, η καμπυλότητα δίνεται από τη

$$\text{σχέση: } \varphi_y = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)d} \quad (6)$$

Εάν η διαρροή οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος (για παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του), η καμπυλότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d} \quad (7)$$

με ανηγμένο (στο στατικό ύψος d) ύψος της θλιβόμενης ζώνης: $\xi_y = (a^2 A^2 + 2aB)^{\frac{1}{2}} - aA$, όπου $a=E_s/E_c$ και A, B παράμετροι που προσδιορίζονται ανάλογα με τον τρόπο διαρροής του στοιχείου. Εάν η διαρροή ελέγχεται από τον εφελκόμενο οπλισμό (διαρροή λόγω χάλυβα), τότε:

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y} \quad (8)$$

ενώ εάν η διαρροή ελέγχεται από το θλιβόμενο σκυρόδεμα (διαρροή λόγω παραμορφώσεων σκυροδέματος), τότε

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v - \frac{N}{1,8abdf_c}, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta + 0,5\rho_v(1 + \delta') \quad (9)$$

όπου ρ_1, ρ_2, ρ_v τα ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους καταναμημένου οπλισμού (ανηγμένα στο bd), $\delta = d'/d$ με d' την απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος, b είναι το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και N είναι το αξονικό φορτίο (θετικό σε θλίψη).

Ως τελική τιμή για την καμπυλότητα αστοχίας επιλέγεται η μικρότερη από τις δύο τιμές των εξ.(6) και εξ.(7) (που έχουν συνδυαστεί αντίστοιχα με τις εξ.(8) και εξ.(9))

Τέλος αναφέρεται πως κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. μπορούν, εναλλακτικά της παραπάνω διαδικασίας, να χρησιμοποιηθούν ορισμένες ημι-εμπειρικές σχέσεις. Σύμφωνα όμως με (Αθανασοπούλου Σ. 2016) οι ημι-εμπειρικές σχέσεις δεν δίνουν πάντοτε κοντινά αποτελέσματα με την αναλυτική διαδικασία που περιγράφεται από τις εξ.(6)-(9), παρά μόνο στη περίπτωση που ο χάλυβας είναι χαμηλής αντοχής και κατά συνεπεία καθοριστικός και της διαρροής. Στη δε, περίπτωση υψηλής ποιότητας χάλυβα δίνουν

κοντινά αποτελέσματα σε συγκεκριμένα εύρη τιμών του ανηγμένου αξονικού φορτίου, ν , (π.χ. για $0 < \nu < 0,18$ όταν $f_c < 20 \text{ Mpa}$ και χάλυβα S500 ή για $0 < \nu < 0,50$ όταν $f_c = 40 \text{ Mpa}$ και χάλυβα S500). Ως εκ τούτου για την εργασία χρησιμοποιείται η αναλυτική διαδικασία που περιγράφεται από τις εξ.(6)-(9) για τις οποίες αξίζει να σημειωθεί ότι δεν επηρεάζονται καθόλου από την περισφιγξη της διατομής, διατηρώντας έτσι την τιμή της καμπυλότητας στη διαρροή σταθερή πριν και μετά την ενίσχυση.

Καμπυλότητα στην αστοχία:

Για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας στην αστοχία, φ_u , ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, υιοθετεί μία αναλυτική διαδικασία με κλειστούς τύπους από ανάλυση διατομής χωρίς να απαιτείται το πλήρες διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων. Ο υπολογισμός της καμπυλότητας στην αστοχία, φ_u , (βασισμένος στις ίδιες αρχές με τον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής, και στους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών που περιγράφονται από εξ.(1)-(2) και εξ.(3)-(5), βασίζεται στις δύο ακόλουθες σχέσεις, ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας.

Για θραύση του εφελκόμενου οπλισμού (εξάντληση της μέγιστης παραμόρφωσης του χάλυβα, ε_{su}), η καμπυλότητα στην αστοχία υπολογίζεται ως:
$$\varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1 - \xi_{su})d} \quad (10)$$

Για Αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης (όταν η ακραία θλιβόμενη ίνα φθάνει τη μέγιστη παραμόρφωση, ε_{cu}), η καμπυλότητα στην αστοχία υπολογίζεται ως:
$$\varphi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu}d} \quad (11)$$

Για την επιλογή του τρόπου αστοχίας και τον υπολογισμό των ανηγμένων (στο στατικό ύψος d) υψών της θλιβόμενης ζώνης ξ_{su} , ξ_{cu} , των εκάστοτε περιπτώσεων αστοχίας, διατίθεται σειρά εξισώσεων, από τις οποίες επιλέγεται κάθε φορά η κατάλληλη βάσει των τιμών των παραμέτρων: d' (ή δ'), ν , $\omega_1 = \rho_1 f_{y1} / f_c$, $\omega_2 = \rho_2 f_{y2} / f_c$, $\omega_v = \rho_v f_{yv} / f_c$ και των χαρακτηριστικών μεγεθών των διαγραμμάτων σ - ε των υλικών. Οι εξισώσεις αυτές δεν παρουσιάζονται στην εργασία λόγω εκτεταμένης έκτασης.

3. Μηχανικά χαρακτηριστικά διατομής, περισφιγμένης με FRP

Για τον προσδιορισμό της πλαστιμότητας που επιτυγχάνεται όταν ένα στοιχείο ενισχύεται μέσω περισφιγξης με μανδύα από σύνθετα υλικά, χρησιμοποιούνται τα βασικά προσομοιώματα των κανονισμών, ενός προσεγγιστικού κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του προσομοιώματος του Ευρωκώδικα. Σύμφωνα, βέβαια, με Αθανασοπούλου Σ. 2016, μέσω μίας θεωρητικής απόδειξης προκύπτει μία βελτιωμένη έκφραση για το προσεγγιστικό προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Το βελτιωμένο αυτό προσομοίωμα χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό της πλαστιμότητας ενώ παράλληλα, μέσω των συνολικών συγκρίσεων της εργασίας ελέγχεται και η ισχύς του. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται και πιο αναλυτικά προσομοιώματα όπου η πλαστιμότητα προκύπτει είτε μέσω κλειστών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ως μία εναλλακτική διαδικασία του ΚΑΝ.ΕΠΕ.) είτε μέσω διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, M - φ , από ανάλυση διατομής με χρήση του προγράμματος ανάλυσης διατομής, ΒΙΑΧ. Τα δύο τελευταία προσομοιώματα χρησιμοποιούνται αφού προσαρμοστούν κατάλληλα ώστε να περιλαμβάνουν την περίπτωση περισφιγξης με FRP, για την οποία δεν είναι μελετημένα. Τέλος, σημειώνεται πως στα περισσότερα από τα παραπάνω προσομοιώματα, προαπαιτείται (πριν τον προσδιορισμό της πλαστιμότητας) ο προσδιορισμός ορισμένων εκ των μηχανικών χαρακτηριστικών της περισφιγμένης με FRP διατομής. Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως προκύπτουν μέσα από τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, παρουσιάζονται αναλυτικά, παρακάτω.

3.1. Μηχανικά χαρακτηριστικά περισφιγμένης διατομής κατ' εφαρμογή των σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η περισφιγξη δομικού στοιχείου μέσω FRP προσδίδει στο σκυρόδεμα διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά από αυτά της απερίσφικτης διατομής που προσδιορίστηκαν στην §2.1. Συγκεκριμένα: Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος δίνεται, κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, από την εξίσωση:

$$f_{cc} = f_c(1 + k) = f_c \left(1 + 3,5 \left(\frac{\alpha \rho_f f_u}{f_c} \right)^{3/4} \right) \quad (12)$$

όπου f_u είναι η αντοχή του FRP (Mpa), $\rho_f = \frac{2 t_f}{b}$ είναι το ποσοστό του FRP παράλληλα προς την κατεύθυνση x με t_f το πάχος του FRP και α είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας περισφιγξης που γενικά ισούται με: $\alpha = \alpha_s \alpha_n$ ενώ λαμβάνεται ίσος με $\alpha = \alpha_n$ για τη περίπτωση συνεχούς μανδύα ($\alpha_s = 1.0$). Ο συντελεστής α_n προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση, συνεκτιμώντας την ευεργετική επίδραση της εξομάλυνσης (στρογγύλευσης) των ακμών του στοιχείου.

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b^2(1 - \beta)^2 + h^2(1 - \gamma)^2], \text{ όπου } \beta = \frac{2b_p}{b}, \gamma = \frac{2d_p}{h}, A_c = bh \quad (13)$$

με b_p, d_p είναι τα μήκη στρογγύλευσης των πλευρών b και h αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, στη περίπτωση περισφιγξης με FRP η παραπάνω τάση f_u αντικαθίσταται από τη μειωμένη τιμή της f_{ju} , λόγω επιρροής του μεγάλου πλήθους των στρώσεων και της συγκέντρωσης τοπικών τάσεων στις γωνίες (ακόμα κι αν είναι καμπυλωμένες), η οποία ισούται με: $f_{ju}^i = f_{ju,res} \cdot \psi$ όπου $\psi \leq 1.0$ είναι ο συντελεστής επιρροής του πλήθους των στρώσεων ο οποίος, με βάση αξιόπιστα βιβλιογραφικά στοιχεία κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. εκτιμάται ότι λαμβάνεται ίσος με:

$\psi = k^{-\frac{1}{4}} \geq \frac{3}{k}$ με k το πλήθος των στρώσεων του FRP, όταν $k \geq 4$ (ειδιάλλως λαμβάνεται $\psi = 1.0$) και $f_{ju,res}$ δίνεται από τη σχέση: $f_{ju,res} = E_f(\varepsilon_{ju} - \varepsilon_{jo})$ με E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP, ε_{ju} τη

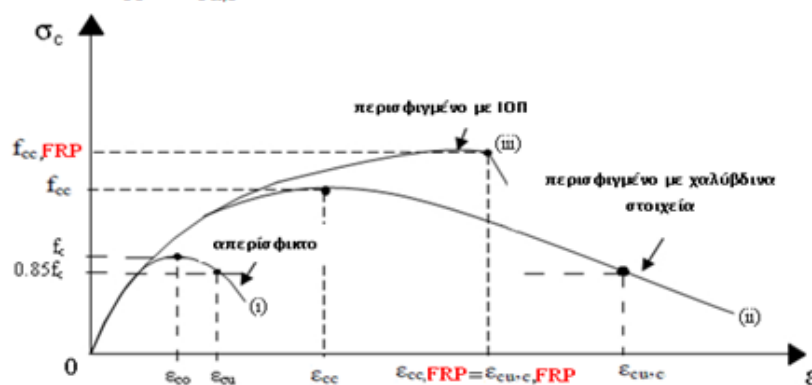
παραμόρφωση αστοχίας του υλικού περισφιγξης και $\varepsilon_{jo} = \frac{t}{2R}$ με $R = \frac{b_p + d_p}{2}$ όπου t λαμβάνεται το μέσο πάχος της μίας στρώσης του FRP.

Η παραμόρφωση αστοχίας δίνεται, κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Σχέδιο 2016, από την εξίσωση:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035(f_{cc}/f_c)^2 \text{ για FRP με ίνες άνθρακα} \quad (14\alpha)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0070(f_{cc}/f_c)^2 \text{ για FRP με ίνες γυαλιού} \quad (14\beta)$$

Ο μηχανισμός (στη περίπτωση περισφιγξης μέσω FRP) αστοχεί όταν αστοχεί το περισφιγγον σύνθετο υλικό ενώ ακολουθεί φθιτός κλάδος πολύ μεγάλης κλίσεως, ο οποίος δε μπορεί να ληφθεί υπόψη. Συνεπώς, ως παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος λαμβάνεται η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} . Όπως φαίνεται και από το ακόλουθο σχήμα ισχύει: $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cu,c}$



Σχ. 1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, σ - ε , διατομής οπλισμένου σκυροδέματος, που είναι: (i) απερίσφικτη, (ii) περισφιγμένη με χαλύβδινους συνδετήρες ή (iii) περισφιγμένη από FRP

3.2. Προσδιορισμός του δείκτη πλαστιμότητας

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα υπό εξέταση προσομοιώματα προσδιορισμού του δείκτη πλαστιμότητας (σε όρους καμπυλοτήτων) για στοιχεία που ενισχύονται μέσω περίσφιγξης με FRP.

3.2.1 ΚΑΝ.ΕΠΕ. - κλειστή προσεγγιστική σχέση

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013 (§8.2.3.(δ) (Σ8.11)), ο επιτυγχανόμενος δείκτης πλαστιμότητας καμπυλότητας (μ_ϕ) επιτρέπεται να υπολογίζεται από την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση, για $\nu > 0.2$.

$$\varepsilon_{cu,c} = 2,2 \mu_\phi \varepsilon_y \nu \Rightarrow \mu_\phi = \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,2 \varepsilon_y \nu} \quad (16)$$

με, ε_y και ν υπολογιζόμενα με χρήση μέσης τιμής του υλικού και $\varepsilon_{cu,c} > 0.004$ να λαμβάνεται από την εξ.(14).

3.2.2 Πρόταση βελτίωσης της κλειστής προσεγγιστικής σχέσης του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η βασική σχέση που συνιστά ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τον προσδιορισμό της πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων είναι η εξ.(16) η οποία είναι μία αρκετά προσεγγιστική σχέση με την τιμή 2.2 στον παρονομαστή να φαίνεται αυθαίρετη. Σύμφωνα με Αθανασοπούλου Σ. 2016, μέσω μια θεωρητικής απόδειξης της σχέσης προκύπτει ότι για τις περιπτώσεις που οι διατομές είναι ενισχυμένες με FRP, ο δείκτης πλαστιμότητας μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu_\phi = \frac{f_{cc} \varepsilon_{cu,c}}{f_c 2,6 \nu \varepsilon_y} \quad (17)$$

Από την παραπάνω σχέση παρατηρείται ότι, η εξ.(16) προκύπτει αν στην εξ.(17) ληφθεί συντελεστής $k = f_{cc}/2,6f_c = 2,2$. Η τιμή αυτή του k 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 εξ.(17) είναι αυτή που προτείνεται να ελεγχθεί, συγκρίνοντας την και με τα άλλα προσομοιώματα, ως μία βελτιωμένη έκφραση της βασικής προσεγγιστικής σχέσης του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

3.2.3 Εναλλακτική διαδικασία-προσαρμογή σχέσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Σχέδιο 2016)

Εναλλακτικά του παραπάνω βασικού προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (βλ. §3.2.1), η πλαστιμότητα θα μπορούσε να προσδιοριστεί μέσω κλειστών σχέσεων (οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί στην §2.3), ως ο λόγος των καμπυλοτήτων στην αστοχία προς τη διαρροή.

Η καμπυλότητα στη διαρροή δεν μεταβάλλεται με τη περίσφιγξη και λαμβάνεται ακριβώς όπως προσδιορίστηκε στην §2.3. Η καμπυλότητα στην αστοχία, προφανώς, μεταβάλλεται με τη περίσφιγξη και η διαδικασία προσδιορισμού της, όταν η περίσφιγξη γίνεται με χαλύβδινα στοιχεία περιγράφεται μέσω μιας σειράς εξισώσεων στο υπό αναθεώρηση Σχέδιο 2016 του ΚΑΝ.ΕΠΕ., όπως παρουσιάστηκε στη προηγούμενη παράγραφο §2.3. Στη παρούσα εργασία επιλέγονται κατάλληλες προσαρμογές για την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας όταν η περίσφιγξη γίνεται με χρήση FRP. Συγκεκριμένα, στη περίπτωση περίσφιγξης με FRP, η αστοχία αφορά πάντα τη περισφιγμένη διατομή (ο πυρήνας της διατομής είναι ολόκληρη η διατομή με τις πλήρεις διαστάσεις), ενώ όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί γίνονται με τις πλήρεις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της περισφιγμένης διατομής (αντοχή f_{cc} και παραμορφώσεις, ε_{cc} και $\varepsilon_{cu,c}$) να προκύπτουν από τις εξ.(12), εξ.(14) και εξ.(15).

3.2.4 Διαγράμματα Ροπών-Καμπυλοτήτων

Για τον υπολογισμό των ακριβών διαγραμμάτων Ροπών-Καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, γίνεται χρήση του προγράμματος ΒΙΑΧ, αφού πρώτα προσαρμοστεί κατάλληλα ώστε να περιλαμβάνει και τη περίπτωση περίσφιξης με FRP για την οποία δεν είναι όμως προμελετημένο. Δεδομένου ότι στο λογισμικό αυτό πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η περίσφιξη με χαλύβδινους συνδετήρες και μόνο, ο προσδιορισμός του διαγράμματος $M-\varphi$, γίνεται θεωρώντας το υλικό χωρίς οπλισμό περίσφιξης αλλά με μηχανικά χαρακτηριστικά αυτά που προκύπτουν από τις εξισώσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για περίσφιξη με εφαρμογή FRP, εξ.(12) και εξ.(14).

3.2.5 Ευρωκώδικας (EN1998-3)

Κατά τον Ευρωκώδικα (EN1998-3, Α.4.4.4.), η βελτίωση της ικανότητας παραμόρφωσης επιτυγχάνεται μέσω της περίσφιξης του σκυροδέματος από μανδύες FRP. Αυτοί εφαρμόζονται γύρω από το στοιχείο το οποίο πρόκειται να ενισχυθεί στην περιοχή της εν δυνάμει πλαστικής άρθρωσης. Το απαραίτητο μέγεθος της πίεσης περίσφιξης η οποία θα πρέπει να εφαρμοστεί εξαρτάται από τον λόγο $I_x = \mu_\varphi / \mu_{\varphi,ava}$ μεταξύ της επιδιωκόμενης πλαστιμότητας καμπυλότητας μ_φ και της διαθέσιμης πλαστιμότητας καμπυλότητας $\mu_{\varphi,ava}$ και μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f_1 = 0,4 I_x^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} \quad (18)$$

με, f_c να προκύπτει απευθείας ως μέση τιμή από επί τόπου δοκιμές, και από πρόσθετες πηγές πληροφόρησης, διαιρεμένες κατάλληλα με τους συντελεστές εμπιστοσύνης, (λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο αποκτηθείσας γνώσης), ε_{cu} να λαμβάνεται από την εξ.(1) και $\varepsilon_{ju} < \varepsilon_{fu}$ όπου ε_{fu} μία οριακή ανηγμένη παραμόρφωση, ίση με 0.015 για CFRP ή AFRP και 0.02 για GFRP

Για την περίπτωση των ορθογωνικών διατομών στις οποίες οι γωνίες είναι στρογγυλεμένες έτσι ώστε να επιτρέπουν την τύλιξη του FRP γύρω από αυτές, η πίεση περίσφιξης η οποία εφαρμόζεται από το φύλλο FRP υπολογίζεται ως: $f_1 = k_s \cdot f_1$ με $k_s = 2R/D$ και $f_1 = 2E_f \varepsilon_{ju} t_f / D$, όπου D είναι το μεγαλύτερο πλάτος της διατομής.

Κατά συνέπεια η κύρια σχέση εξ.(18), για την περίπτωση ορθογωνικής διατομής, μπορεί να λάβει την παρακάτω τελική μορφή:

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

$$\mu_\varphi = \mu_{\varphi,ava} \sqrt{\frac{k_s \cdot \varepsilon_{ju}^{2,5} \cdot E_f \cdot t_f}{0,2 \cdot f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2 \cdot D}} \quad (19)$$

και την αδιάστατη μορφή:

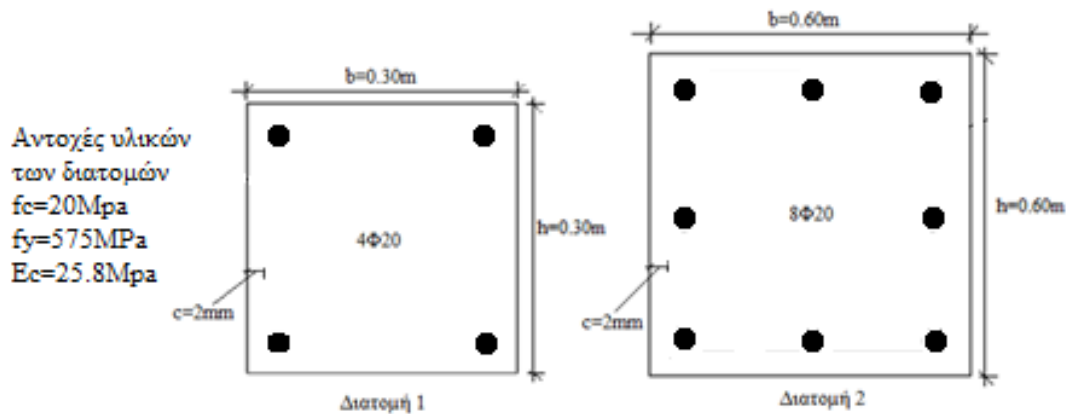
$$\frac{\mu_\varphi}{\mu_{\varphi,ava}} = \sqrt{\frac{k_s \cdot \varepsilon_{ju}^{2,5} \cdot E_f \cdot t_f}{0,2 \cdot f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2 \cdot D}} \quad (20)$$

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. (§3.1).

Τέλος παρατηρείται ότι η εξ.(20) δεν περιλαμβάνει κανένα στοιχείο για τον διαμήκη οπλισμό της διατομής (όπως θα ανέμενε κανείς) οπότε προφανώς δεν επηρεάζεται καθόλου από αυτό.

4. Αποτελέσματα και συγκρίσεις

Τα προσομοιώματα, όπως ακριβώς παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 (βλ. §3.2.1-§3.2.5), εφαρμόζονται σε δύο υποστυλώματα με αντιπροσωπευτικές (συνήθης για υφιστάμενες κατασκευές) διατομές, Διατομή 1 και Διατομή 2, με σκοπό την σύγκρισή τους. Οι διαστάσεις και ο οπλισμός των διατομών παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα ενώ τα υλικά των διατομών είναι: σκυρόδεμα μέσης θλιπτικής αντοχής $f_c=20\text{MPa}$ και μέτρου ελαστικότητας $E_c=25,8\text{GPa}$ και χάλυβας S500 με μέση τάση διαρροής 575MPa .



Σχ. 2 Τυπικές διατομές υφιστάμενων κατασκευών, Διατομή 1 και Διατομή 2

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως για να είναι εφικτή η σύγκριση του προσομοιώματος του Ευρωκώδικα με τα υπόλοιπα, οι δείκτες πλαστιμότητας που προσδιορίστηκαν στις §3.2.1-§3.2.4, διαιρούνται με τον αντίστοιχο δείκτη διαθέσιμης πλαστιμότητας. Συγκεκριμένα, για τα προσομοιώματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (§3.2.1-§3.2.3) διαιρούνται με τη πλαστιμότητα που προκύπτει από κλειστές σχέσεις (§2.3) ενώ για το προσομοίωμα όπου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα BIAX (§3.2.4), διαιρείται με τη διαθέσιμη πλαστιμότητα που έχει υπολογιστεί με χρήση του ίδιου του προγράμματος (§2.2).

Σύμφωνα με Αθανασοπούλου Σ. 2016, από τη σύγκριση των δύο διαφορετικών προσομοιωμάτων προσδιορισμού της διαθέσιμης πλαστιμότητας (μέσω των κλειστών τύπων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. της §2.3 και μέσω των διαγραμμάτων $M-\varphi$ της §2.2, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για ένα ρεαλιστικό εύρος τιμών ογκομετρικού ποσοστού περίσφιγξης των συνδετήρων (<0.5) για το ογκομετρικό ποσοστό στους συνδετήρες, τα δύο προσομοιώματα είναι εν γένει κοντά, ενώ οποιεσδήποτε μικρές διαφορές έχουν οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά στο προσδιορισμό της καμπυλότητας στη διαρροή καθώς κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. δεν επηρεάζεται καθόλου από τη περίσφιγξη και παραμένει σταθερή. Συνεπώς, ο προσδιορισμός της διαθέσιμης πλαστιμότητας είτε μέσω των κλειστών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είτε μέσω των προγραμμάτων ανάλυσης διατομής δεν διαφέρει ιδιαίτερα, (ειδικά για την εν λόγω εργασία που το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης εσωτερικών συνδετήρων είναι μηδέν) και κατά συνέπεια δεν επηρεάζονται τα αποτελέσματα των συγκρίσεων των προσομοιωμάτων από την αδιαστατοποίηση αυτή.

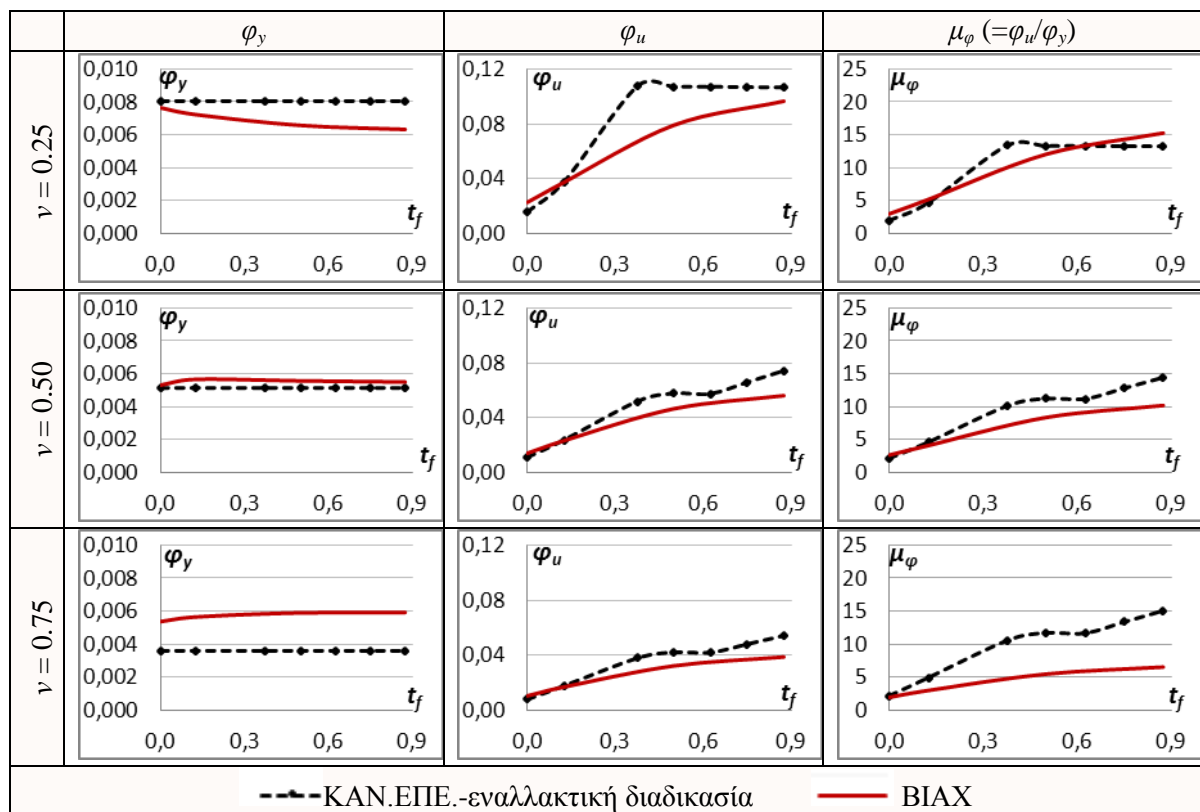
4.1 Σύγκριση προσομοιωμάτων

Η περίσφιγξη της διατομής γίνεται με χρήση μανδύα CFRP, μέτρου ελαστικότητας $E_f=235\text{GPa}$, αντοχής $f_u=3800\text{MPa}$ και οριακής παραμόρφωσης $\varepsilon_{fu}=1,5\%$. Το ονομαστικό πάχος του υλικού είναι

ίσο με 0,125mm. Πριν την εφαρμογή του μανδύα και για την αποδοτικότερη λειτουργία του υφάσματος, στρογγυλοποιούνται οι γωνίες των διατομών με ακτίνα $R = 50\text{mm}$.

Για την αποτελεσματική σύγκριση, η εφαρμογή των προσομοιωμάτων πραγματοποιήθηκε για τη Διατομή 1 και Διατομή 2, για διάφορες τιμές του αξονικού φορτίου ($\nu=0,25$, $\nu=0,50$ και $\nu=0,75$) και πάχους του μανδύα CFRP (για πλήθος στρώσεων από 1 έως 7).

Αρχικά, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα, ενδεικτικά για τη Διατομή 2 (ανάλογα ισχύει και για Διατομή 1), διαγράμματα με τις καμπυλότητες στην αστοχία και τη διαρροή αλλά και το δείκτη πλαστιμότητας, όπως αυτά προσδιορίστηκαν μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία αλλά και ΒΙΑΧ.



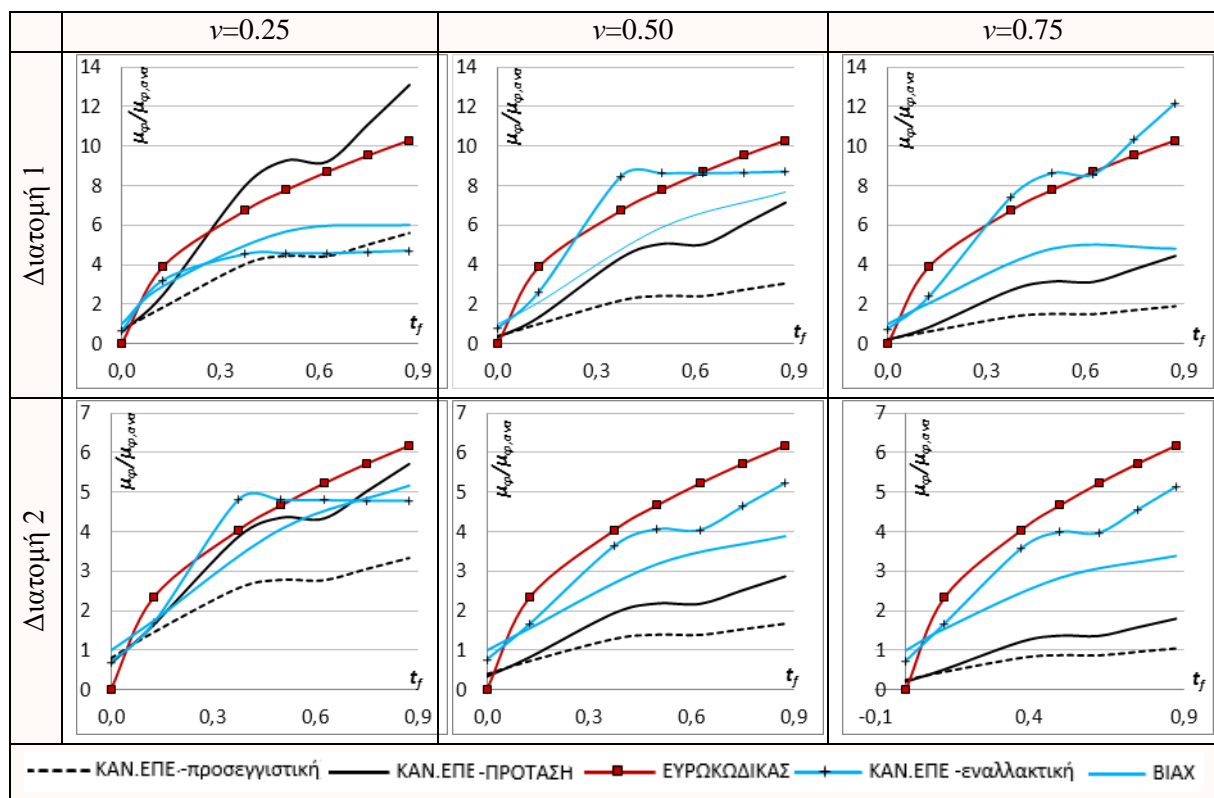
Σχ. 3 Προσδιορισμός δείκτη πλαστιμότητας μέσω κλειστών σχέσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ. και μέσω ΒΙΑΧ

Από τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι:

- Τα αποτελέσματα για τη πλαστιμότητα από τους κλειστούς τύπους του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία) είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πλήρες Διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων, $M-\varphi$, που κατασκευάζεται μέσω του ΒΙΑΧ. (οι οποιεσδήποτε διαφορές τους οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά στις διαφορές τους στην καμπυλότητα στη διαρροή). Από τη σύγκριση αυτή διαπιστώνεται ότι οι κλειστοί τύποι του ΚΑΝ.ΕΠΕ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν (με τον τρόπο και τις προσαρμογές που παρουσιάστηκαν στη §3.2.3) και στη περίπτωση που η διατομή περίσφιγγεται εξωτερικά με FRP μανδύα, παρόλο που όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν είναι μελετημένοι να περιλαμβάνουν αυτή τη περίπτωση περίσφιγξης.
- Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία φαίνεται να αντιλαμβάνεται το γεγονός ότι δεν μπορεί η πλαστιμότητα να αυξάνει ες αεί, όσο κι αν αυξάνει η περίσφιγξη, οπότε και η καμπύλη του προσομοιώματος αυτού (βλ. διάγραμμα για $\nu=0,25$) οριζοντιώνεται μετά το πέρας

ενός ποσοστού περίσφιξης. Το σημείο αυτό είναι ουσιαστικά σημείο στο οποίο αλλάζει ο τρόπος αστοχίας του υλικού με τον χάλυβα να είναι καθοριστικός της αστοχίας μετά το πέρας αυτού του σημείου. Στο πρώτο τμήμα της καμπύλης μέχρι την αλλαγή της κλίσης της, καθοριστικός της αστοχίας είναι το σκυρόδεμα. Παρατηρείται, πως για υψηλές τιμές του αξονικού φορτίου ($\nu=0,50$ και $\nu=0,75$) η καμπύλη αποτελείται μόνο από το πρώτο τμήμα (χωρίς να αλλάζει η κλίση της και να οριζοντιώνεται), με το σκυρόδεμα να καθορίζει την αστοχία για όλο το εύρος τιμών του πάχους του FRP. Αυτό βέβαια είναι λογικό καθώς για υψηλές τιμές του αξονικού φορτίου το σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, οπότε για έναν επιθυμητό τρόπο αστοχίας (με το χάλυβα να καθορίζει την αστοχία) πιθανότατα θα χρειαζόταν περίσφιξη με πολύ μεγαλύτερο πάχος υλικού από αυτό που απεικονίζεται στα διαγράμματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα σύγκρισης των προσομοιωμάτων για τις τιμές της επιτυχανόμενης πλαστιμότητας (κανονικοποιημένης ως προς τη διαθέσιμη), συναρτήσει του πάχους του FRP.



Σχ. 4 Συγκριτικά διαγράμματα των προσομοιωμάτων, για τη Διατομή 1 και Διατομή 2

Από τα παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι:

- Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16), είναι το πιο συντηρητικό από όλα καθώς δίνει τα χαμηλότερα αποτελέσματα για την επιτυχανόμενη πλαστιμότητα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι και αρκετά μακριά από τα αποτελέσματα των υπολοίπων προσομοιωμάτων.
- Η απόδοση του προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16), βελτιώνεται όταν η βασική του σχέση χρησιμοποιηθεί στην βελτιωμένη έκφρασή του (κατά το προσομοίωμα, ΚΑΝ.ΕΠΕ.-πρόταση προσεγγιστικής σχέσης,εξ.17) με την καμπύλη του προσομοιώματος αυτού να έρχεται πλέον πολύ πιο κοντά στις καμπύλες των υπολοίπων και προφανώς και στη καμπύλη

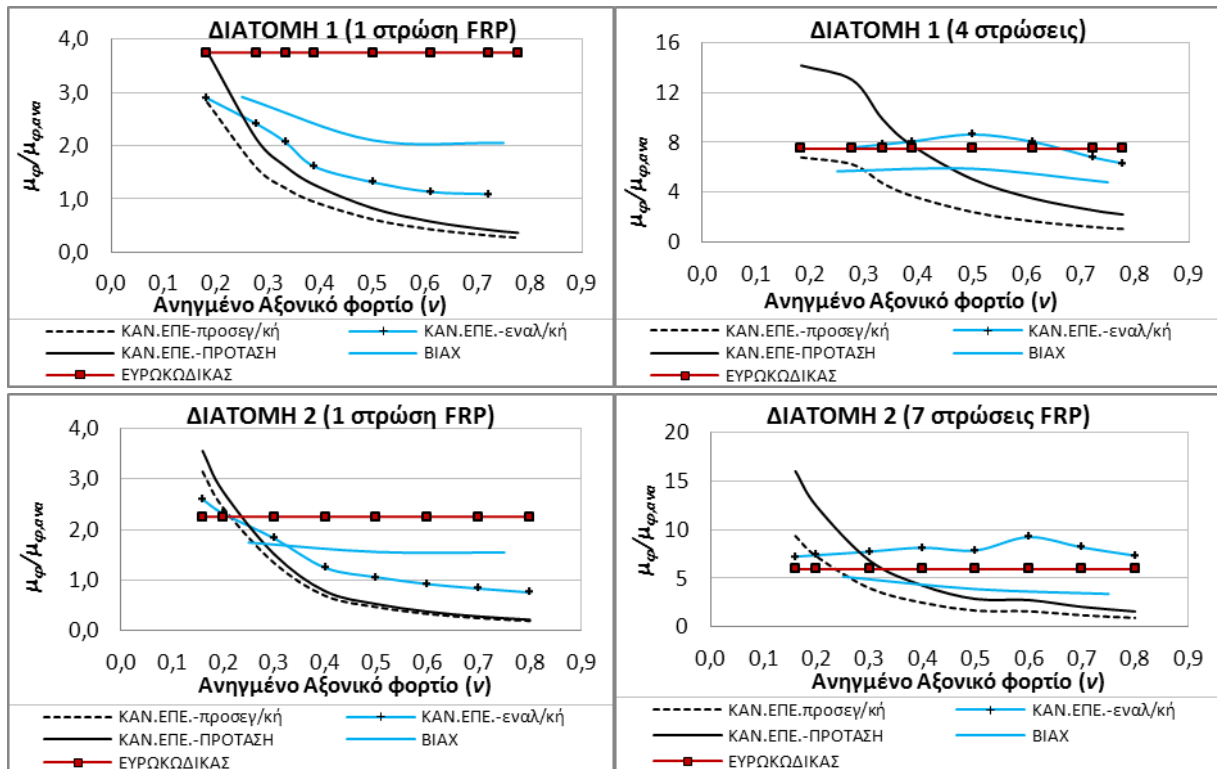
του Ευρωκώδικα (εξ.20). Ειδικότερα όταν η τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου είναι χαμηλή οι καμπύλες είναι εκπληκτικά κοντά. Το προσομοίωμα αυτό προτείνεται να χρησιμοποιείται από τη παρούσα εργασία, για τη περίπτωση περίσφιγξης με FRP.

Αυτό, βέβαια, που δεν διορθώθηκε με την βελτιωμένη έκφραση του προσομοιώματος είναι η μορφή της καμπύλης του η οποία εξακολουθεί να είναι διαφορετική από τη μορφή των καμπυλών των υπολοίπων προσομοιωμάτων. Οι καμπύλες των υπολοίπων προσομοιωμάτων έχουν τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω που σημαίνει πως με μία μικρή αύξηση της ποσότητας το υλικού περίσφιγξης δεν αυξάνεται υπερβολικά η τιμή της επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας (όπως είναι θεμιτό).

- Η σύγκριση των προσομοιωμάτων φαίνεται να επηρεάζεται από τη τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου καθώς για χαμηλές τιμές του ανηγμένου αξονικού οι καμπύλες των προσομοιωμάτων είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη, ενώ όσο η τιμή του αυξάνεται οι καμπύλες (και ιδίως οι καμπύλες του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16) και ΚΑΝ.ΕΠΕ.-πρόταση προσεγγιστικής σχέσης,εξ.17) απομακρύνονται.
- 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 την 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. (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία), φαίνεται να αποτελούν μία ενδιάμεση λύση με τις καμπύλες τους να είναι πάντα στο μεσοδιάστημα των καμπυλών των προσομοιωμάτων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16) και του Ευρωκώδικα (εξ.20).
- Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία είναι το μόνο που να αντιλαμβάνεται το γεγονός ότι δεν μπορεί η πλαστιμότητα να αυξάνει ες αεί, όσο κι αν αυξάνει η περίσφιγξη με τη καμπύλη του να είναι η μόνη που οριζοντιώνεται μετά το πέρας ενός ποσοστού περίσφιγξης.

4.2 Επιρροή του ανηγμένου αξονικού φορτίου

Από τη μέχρι τώρα ανάλυση, έχει εντοπιστεί ότι η τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου, επηρεάζει έντονα τα προσομοιώματα οπότε και κρίνεται σκόπιμη η περεταίρω διερεύνηση της παραμέτρου αυτής. Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζεται η επιρροή αυτή του ανηγμένου αξονικού φορτίου στα προσομοιώματα προσδιορισμού της πλαστιμότητας. Τα διαγράμματα αυτά αφορούν ενδεικτικές περιπτώσεις περίσφιγξης της Διατομής 1 και της Διατομής 2 με το μανδύα GFRP που περιγράφηκε στην §4.1.



Σχ. 5 Μεταβολή των προσομοιωμάτων συναρτήσεως του ανηγμένου αξονικού φορτίου, ν

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι:

- Το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα (εξ.20) δεν επηρεάζεται καθόλου από αξονικό φορτίο σε αντίθεση με το ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16) και την βελτιωμένη έκφρασή του (ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης, εξ.17) που εμφανίζουν την πιο έντονη επιρροή από όλα τα προσομοιώματα. Αυτό βέβαια είναι λογικό καθώς στις σχέσεις των προσομοιωμάτων αυτών (εξ.16 και εξ.17) η πλαστιμότητα έχει άμεση επιρροή από το αξονικό φορτίο (είναι αντιστρόφως ανάλογη του ανηγμένου αξονικού φορτίου).
- Τα δύο προσομοιώματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16) και ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης (εξ.17), μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο σε σχέση με το αξονικό φορτίο (η πλαστιμότητα, εύλογα, μειώνεται όσο το αξονικό αυξάνεται). Επισημαίνεται, δηλαδή, πως το αξονικό φορτίο συνεχίζει να ασκεί πολύ μεγάλη επιρροή (σε σύγκριση πάντα με τα υπόλοιπα προσομοιώματα) στη προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. ακόμα και στην βελτιωμένη έκφρασή της.
- Τα δύο πιο αναλυτικά προσομοιώματα, ΚΑΝ.ΕΠΕ.-εναλλακτική διαδικασία και ΒΙΑΧ, έχουν μεταβαλλόμενη επιρροή από ανηγμένο αξονικό φορτίο. Η επιρροή αυτή γίνεται όλο και ασθενέστερη όσο η περίσφιγξη αυξάνει (μεγαλύτερο πλήθος στρώσεων).
- Τα προσομοιώματα εν γένει αποκλίνουν για μεγάλες τιμές του ανηγμένου 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.

4.3 Επιρροή του τύπου του υλικού περίσφιγξης

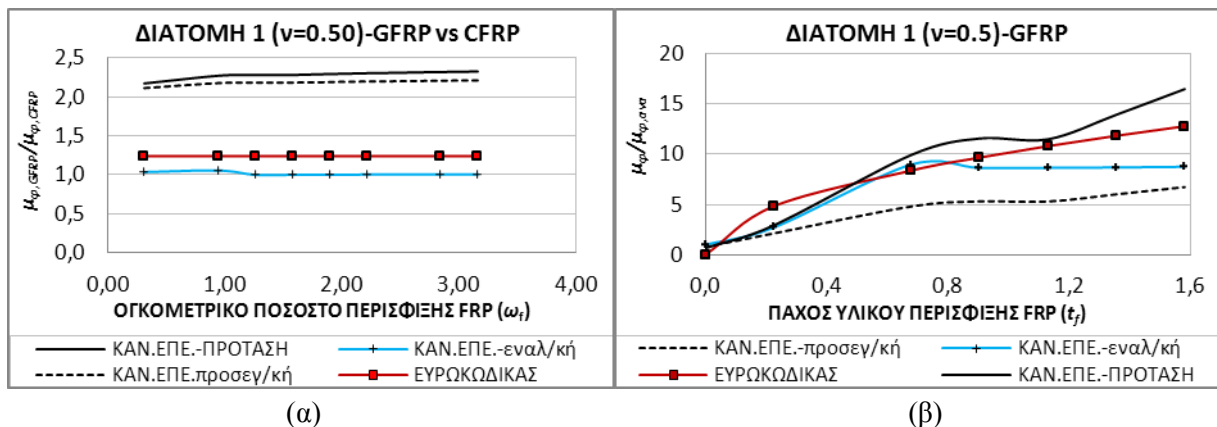
Μία ακόμη κρίσιμη παράμετρος που ενδέχεται να επηρεάζει τα προσομοιώματα είναι ο τύπος του υλικού του FRP, καθώς (όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3) επηρεάζει άμεσα την τιμή ορισμένων

εκ των παραμέτρων τους. Προς το σκοπό αυτό γίνεται εφαρμογή των προσομοιωμάτων με χρήση μανδύα περίσφιξης GFRP αντί CFRP. Επιλέγεται μανδύας με μέτρο ελαστικότητας $E_f=105\text{GPa}$, αντοχή $f_{iu}=2100\text{MPa}$ και παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{ju}=2,0\%$, ενώ και σε αυτή τη περίπτωση πριν την εφαρμογή του μανδύα οι διατομές στρογγυλοποιούνται στις γωνίες με ακτίνα $R=50\text{mm}$. Το ονομαστικό πάχος του υλικού είναι ίσο με $0,226\text{mm}$.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο λόγος της πλαστιμότητας που επιτυγχάνεται μέσω περίσφιξης με μανδύα GFRP προς την αντίστοιχη μέσω περίσφιξης με μανδύα CFRP, συναρτήσει του ογκομετρικού ποσοστού περίσφιξης. Αξίζει να αναφερθεί πως στο διάγραμμα αυτό κρίθηκε σκόπιμο λόγω διαφορετικών χαρακτηριστικών των υλικών, η σύγκριση των προσομοιωμάτων να γίνει σε όρους ογκομετρικού ποσοστού, ω_f ($\omega_f=4\cdot t_f\cdot f_{iu}/b\cdot f_c$) κι όχι πάχους υλικού περίσφιξης.

Παρουσιάζεται επίσης, διάγραμμα σύγκρισης των προσομοιωμάτων για τις τιμές της επιτυγχανόμενης 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 Διατομή 2.



Σχ. 6 (α) Σχέση πλαστιμότητας για περίσφιξη με GFRP ως προς CFRP, (β) σύγκριση προσομοιωμάτων για περίσφιξη με GFRP

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχ.6α) συμπεραίνεται ότι:

- ο Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εφαρμογή GFRP δεν φαίνεται να τροποποιεί τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συγκρίσεις προσομοιωμάτων με χρήση CFRP. Εξάιρεση αποτελεί το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-προσεγγιστική σχέση (εξ.16) και η βελτιωμένη έκφρασή του, ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης (εξ.17), το οποίο έχει έντονη επιρροή από την αλλαγή του υλικού, καθώς δίνει σχεδόν τις διπλάσιες τιμές επιτυγχανόμενης πλαστιμότητας για περίσφιξη με την ίδια ποσότητα υλικού. Η μεγάλη αυτή επιρροή οφείλεται στη παραμόρφωση αστοχίας, $\varepsilon_{cu,c}$, η οποία για το CFRP λαμβανόταν από την εξ.(14α) ενώ για το GFRP από την εξ.(14β). Για την ίδια ποσότητα ογκομετρικού υλικού περίσφιξης, η αντοχή του σκυροδέματος, f_{cc} , είναι σταθερή (βλ. εξ.12) και ομοίως και λόγος f_{cc}/f_c στις εξισώσεις εξ.(14α,β). Ως εκ τούτου η εξίσωση εξ.(14β) που έχει διπλάσιο συντελεστή θα δίνει διπλάσια παραμόρφωση.

Από το παραπάνω διάγραμμα (Σχ.6β), συμπεραίνεται ότι:

- ο Το προσομοίωμα του Ευρωκώδικα (εξ.20) και το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης (εξ.17), είναι πολύ κοντά πλέον για $\nu=0,5$, εφαρμόζοντας περίσφιξη με

GFRP σε αντίθεση με το αποτέλεσμα που προέκυψε από το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχ. 4 για εφαρμογή περίσφιξης με CFRP.

Υπενθυμίζεται ότι κατά τα διαγράμματα του Σχ. 4 το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης (εξ.17), έδινε τιμές για την πλαστιμότητα πολύ κοντά στις τιμές των υπολοίπων προσομοιωμάτων για $\nu=0,25$ αλλά αρκετά χαμηλότερες από των υπολοίπων για $\nu=0,50$ και $\nu=0,75$. Σ' αυτή τη περίπτωση εφαρμογής GFRP, το εν λόγω προσομοίωμα δίνει διπλάσιες τιμές πλαστιμότητας από αυτές που έδινε για τη περίπτωση εφαρμογής CFRP, ενώ τα υπόλοιπα δίνουν περίπου ίδιες τιμές πλαστιμότητας είτε εφαρμόζοντας CFRP, είτε GFRP. Με αυτή τη λογική η καμπύλη του προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ.-Πρόταση προσεγγιστικής σχέσης (εξ.17), για $\nu=0,5$ και $\nu=0,75$ είναι κοντά στις καμπύλες των υπολοίπων προσομοιωμάτων αλλά απομακρύνεται από αυτές για $\nu=0,25$

5. Συμπεράσματα

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 περίσφιξης με FRP. Βασισμένοι στη παραπάνω έρευνα, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το βασικό προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι αρκετά συντηρητικό, δίνοντας τις πιο χαμηλές τιμές για την επιτυγχανόμενη πλαστιμότητα από όλα τα προσομοιώματα.
- Η βελτιωμένη έκφραση αυτού του προσεγγιστικού προσομοιώματος του ΚΑΝ.ΕΠΕ. πράγματι βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του ενώ προτείνεται μέσω αυτής της εργασίας να χρησιμοποιείται, αντί του προηγούμενου, για το προσδιορισμό πλαστιμότητας στη περίπτωση περίσφιξης με σύνθετα υλικά.
- Το προσεγγιστικό προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ., ακόμα και στη βελτιωμένη έκφρασή του, επηρεάζεται έντονα από το ανηγμένο αξονικό φορτίο και τον τύπο του υλικού περίσφιξης, 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, καθώς μ' αυτό τον τρόπο με μία μικρή αύξηση της ποσότητας του υλικού περίσφιξης 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 με το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. που επηρεάζεται έντονα από αυτό), ενώ ελάχιστη είναι η επιρροή και τον τύπο του υλικού περίσφιξης.
- Τα προσομοιώματα, εν γένει, συγκλίνουν για χαμηλά αξονικά φορτία, ν , ενώ όσο το ν αυξάνει (π.χ. για $\nu=0,75$) το προσομοίωμα με τη προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. διαφοροποιείται από τα άλλα προσομοιωμάτων δίνοντας αισθητά μικρότερες τιμές πλαστιμότητας από όλα τα υπόλοιπα. Η σύγκλισή τους δεν επηρεάζεται αισθητά από τις διαστάσεις των διατομών.
- Τέλος, διαπιστώνεται ότι οι κλειστοί τύποι του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για το προσδιορισμό της διαθέσιμης πλαστιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν (με κάποιες μικρές προσαρμογές) για το προσδιορισμό της πλαστιμότητας μελών που ενισχύονται με περίσφιξη με FRP, ακόμα κι αν δεν είναι προμελετημένα γι' αυτό.

6. Βιβλιογραφία

- ΟΑΣΠ (2013), “ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013, Κανονισμός Επεμβάσεων”, ΦΕΚ 2187/Β/05-09-2013 “ΚΑΝ.ΕΠΕ - Σχέδιο 2016”, (υπό διαμόρφωση)
- CEN (2005), “Ευρωκώδικας 8. Αντισεισμικός Σχεδιασμός - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων (EN1998-3)”, Αθήνα.
- CEN (2004), “Ευρωκώδικας 2. Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα - Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια (EN1992-1-1)”, Αθήνα.
- Michael N. Fardis (2009), “Seismic design, assessment and retrofitting of Concrete Buildings, based on EN-Eurocode8”, *Springer*, 2009.
- Michael N. Fardis, Eduardo Carvalho, Amr Elnashai, Ezio Faccioli, Paolo Pinto and Andre Plumier (2005) “Designers’ Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions, design rules for buildings, foundations and retaining structures”, *Thomas Telford*, 2005
- federation international du beton (2010), “fib Model Code for Concrete Structures 2010”, Lausanne, 2010.
- Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου (2006), «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά», *Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών*, Πάτρα, 2006.
- Στέφανος Η. Δρίτσος (2005), “Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα”, γ’ αναθεωρημένη έκδοση, *ISBN 9609150500*, Πάτρα, 2005.
- Μ. Γ. Σφακιανάκης (2015), “Πρόγραμμα ΒΙΑΧ-οδηγίες χρήσης”, Πάτρα, 2015.
- Αθανασοπούλου Σωτηρία (2016), “Συγκρίσεις ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8 για επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας”, 22^ο Φοιτητικό Συνέδριο: “επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών 2016”, *Πανεπιστήμιο Πατρών*, Πάτρα, Φεβρουάριος 2016
- Νέζης Χρήστος (2006), “Χάλυβες Οπλισμού, Συμπεριφορά κατά τη Συγκόλληση και μελέτη της Ολκιμότητάς τους», Διπλωματική εργασία, *Πανεπιστήμιο Πατρών*, Πάτρα, Ιούνιος 2006