

## **ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ. ΚΑΙ EC8**

**ΟΡΦΑΝΟΥΔΑΚΗ ΙΩΑΝΝΑ**

Προπτυχιακή Φοιτήτρια Π.Π., orfan.ioanna@gmail.com

### **Περίληψη**

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας υφιστάμενων υποστρωμάτων με τη χρήση σύνθετων υλικών. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο διαθέσιμων κανονισμών, ΚΑΝ.ΕΠΕ. (έκδοση 2013) και Ευρωκώδικα (έκδοση 2008) τόσο μεταξύ τους όσο και με τα αποτελέσματα ενός προγράμματος ανάλυσης της διατομής. Εξετάζεται η επιρροή του ανοιγμένου αξονικού φορτίου ( $\nu$ ), του πάχους του υλικού που προστίθεται ( $t_j$ ) και της κατηγορίας σκυροδέματος της διατομής ( $f_c$ ) στην πλαστιμότητα, όπου η πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ) και σε όρους γωνιών στροφών χορδής ( $\mu_\theta$ ).

### **1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σύμφωνα με τον ισχύοντα κανονισμό του Ευρωκώδικα, τα κτίρια με φορείς οπλισμένου σκυροδέματος, εκτός των «περιπτώσεων χαμηλής σεισμικότητας» που δεν συναντώνται στη Ελλάδα, σχεδιάζονται με απαιτήσεις πλαστιμότητας. Ως πλαστιμότητα ορίζεται η ικανότητα του υλικού να αναλαμβάνει παραμένουσες παραμορφώσεις μετά το πέρας της μέγιστης αντοχής του χωρίς να γίνεται υπέρβαση αυτής. Τα υφιστάμενα κτίρια, σχεδιασμένα με παλαιότερους κανονισμούς ή απουσία κανονισμού έχουν συχνά υποστρώματα ανεπαρκούς πλαστιμότητας. Η αύξηση της επιτυγχάνεται με την επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης ή με κατασκευή μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και στον Ευρωκώδικα αναφέρεται η διαδικασία ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers, FRPs) και αυτό υιοθετείται στην εν λόγω εργασία.

### **2. ΔΙΑΤΟΜΗ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ**

#### **2.1. Μηχανικές ιδιότητες της διατομής πριν την ενίσχυση**

Τετραγωνική διατομή διαστάσεων 300x300mm με σκυρόδεμα μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cm}=12\text{MPa}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E_{cm}=25\text{GPa}$ . Ο διαμήκης οπλισμός είναι 4Φ22 στις γωνίες ( $\omega_{\text{τοί}}=0.648$ ) και ο εγκάρσιος συνδετήρες Φ8/102mm ( $\omega=0.25$ ). Τόσο για το διαμήκη όσο και για τον εγκάρσιο οπλισμό η μέση εφελκυστική αντοχή του χάλυβα θεωρήθηκε ίση με  $f_{ym}=460\text{MPa}$  και το μέτρο ελαστικότητας  $E_s=200\text{GPa}$ . Η επικάλυψη της διατομής είναι  $c=25\text{mm}$ .

Το σκυρόδεμα ακολουθεί το παραβολικό-ορθογωνικό μοντέλο κατά το προσομοίωμα που προτείνεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 με βράχυνση αστοχίας της ακραίας θλιβόμενης ίνας απερίσφικτου σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu}=0.0035$ . Η παραμόρφωση μέχρι το σημείο όπου το διάγραμμα  $\sigma$ - $\varepsilon$  του απερίσφικτου σκυροδέματος είναι παραβολικό είναι  $\varepsilon_{co}=0.002$ .

Για τους συνδετήρες

οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα:

$$b_c=h_c= b-2x(c+\varphi_h/2)=300-2x(25+8/2)=242\text{mm}$$

$$b_i=h_i= b-2x(c+\varphi_h+\varphi_l/2)=300-2x(25+8+22/2)=212\text{mm}$$

ο συντελεστής περισφιγξης:

$$\alpha_s=(1-\frac{sh}{2bc})x(1-\frac{sh}{2hc})= [1-102/(2x242)]^2=0.623$$

$$\alpha_n=[1-\Sigma bi^2/(6b_c h_c)]= (1-4x[212^2/(6x242x242)])=0.488$$

$\alpha=0.623x0.488=0.304$  (Οι συνδετήρες θα πρέπει να κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος  $\geq 135^\circ$  στις γωνίες και  $\geq 90^\circ$  στο ενδιάμεσο των πλευρών. Διαφορετικά,  $\alpha=0$  και η περισφιγξη αγνοείται.)

το ογκομετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού:

$$\rho_b=\rho_h=(n_b/b)x(A_{sw}^{\sigma_k}/s)=(2/300)x(50/102)=0.00327$$

$$\rho_w=2\min(\rho_b,\rho_h)=0.00654$$

ενώ το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό:  $\omega_w=\rho_w x(f_{yw}/f_{cm})=0.0067x(460/12)=0.25$

$$\alpha\omega_w=0.076$$

Λοιπά μηχανικά χαρακτηριστικά της διατομής:

παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα:  $\varepsilon_{sy}=f_{ym}/E_s=460(\text{MPa})/200.000(\text{MPa})=0.0023$

ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού:

$$\varepsilon_{su}=(3/8) \varepsilon_{su,nominal}=(3/8)x0.09=0.034, f_t/f_y=1.15$$

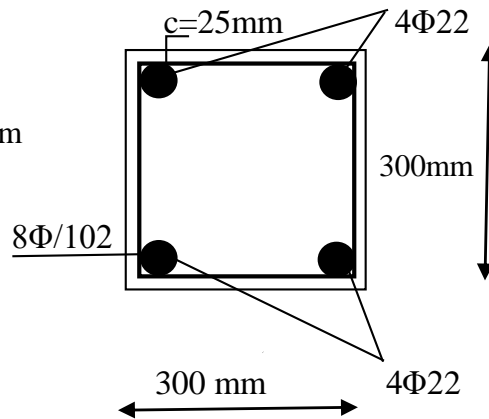
παραμόρφωση του χάλυβα στο σημείο που αρχίζει η κράτνση του υλικού:

$$\varepsilon_{sh}=5\varepsilon_y=0.0115$$

(Κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013)

αντοχή του περισφιγμένου με χαλύβδινους συνδετήρες σκυροδέματος:

$$f_{cd,c}=(1+2.5 \alpha\omega_w)f_{cd}, \text{ αφού } \alpha\omega_w < 0.1$$



$$f_{cd,c}=(1+2.5 \times 0.076) \times 12=14,28 \text{MPa}$$

παραμόρφωση στην αστοχία:

$$\varepsilon_{cu,c}=0.0035+0.1 \times \alpha \omega_{wd}=0.0035+0.1 \times 0.076=0.0111$$

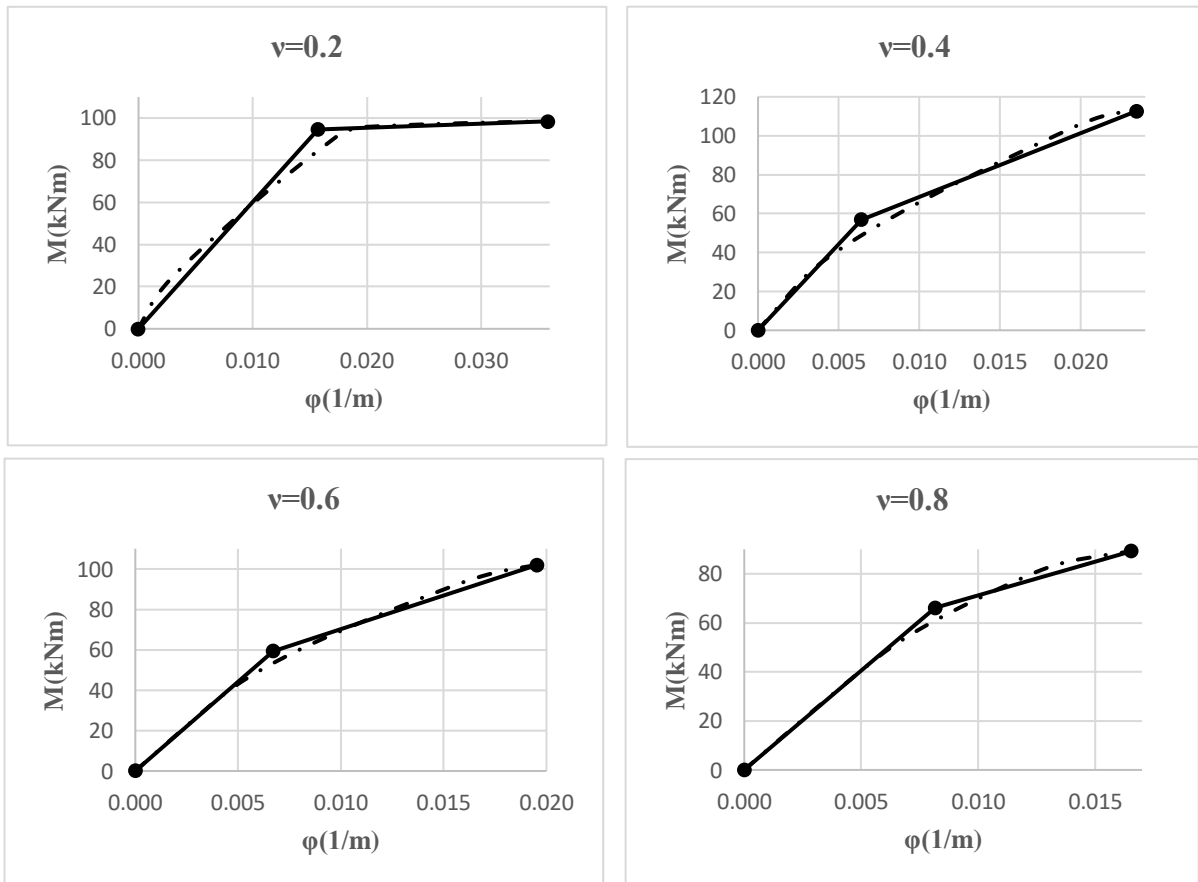
παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση  $f_{cd,c}$ :

$$\varepsilon_{c2,c}=0.002 \times (f_{cd,c} / f_{cd})^2=0.002 \times (14.28 / 12)^2=0.0028$$

## 2.2. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ) μέσω διαγραμμάτων M-φ.

Η καμπυλότητα στην αστοχία και στη διαρροή μπορεί να υπολογιστεί μέσω των διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων (M-φ) τα οποία δημιουργούνται με βάση όσα αναφέρονται στους κανονισμούς και τη χρήση ενός προγράμματος ανάλυσης της διατομής. Η ανάλυση έγινε μέσω του προγράμματος BIAΧ και στη συνέχεια τα διαγράμματα που προέκυψαν διγραμμικοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος BILIN με βάση τον κανόνα των ίσων εμβαδών. Το BIAΧ έχει ενσωματωμένο το προσομοίωμα περίσφιξης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013. Ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\phi$  προσδιορίζεται ως ο λόγος της καμπυλότητας στην αστοχία προς την καμπυλότητα στη διαρροή. ( $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ ). Αφότου γίνει η διγραμμικοποίηση ελέγχεται ότι η διγραμμική καμπύλη διέρχεται από το σημείο με τεταγμένη 0,6My.

$\omega=0.25$



### 2.3.1. Υπολογισμός της καμπυλότητας στη διαρροή

Η καμπυλότητα στη διαρροή ( $\phi_y$ ) μπορεί να υπολογιστεί και από τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Γίνεται αριθμητική επίλυση για εφαρμογή ανοιγμένης αξονικής δύναμης  $\nu=0.2$  και αντιστοίχως επιλύεται για τις υπόλοιπες τιμές του  $\nu$ .

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή ( $\phi_y$ ) μέσω ημι-εμπειρικών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013:

$$(1) \phi_y = 1.77 \times f_y / E_s \times h = (1.77 \times 460) / (200000 \times 0.3) = 0.01357$$

$$(2) \phi_y = 1.36 \times f_y / E_s \times d = (1.55 \times 460) / (200000 \times 0.256) = 0.03926$$

όπου  $d = h - d' = h - (c + \phi_h + \phi_L / 2) = 300 - (25 + 8 + 22 / 2) = 256 \text{ mm} = 0.256 \text{ m}$

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή ( $\phi_y$ ) μέσω βασικών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013:

(1) Αν η διαρροή ελέγχεται από τον εφελκόμενο οπλισμό:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + N / bdf_y = 0.0099 + 0.0099 + 184.3 / (0.3 \times 0.256 \times 460000) = 0.025$$

για  $\nu = 0.2$ ,  $N = \nu (bdf_{cd}) = 0.2 (0.3 \times 0.256 \times 12000) = 184.3 \text{ kN}$

$\rho$ : ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού  
 $\rho'$ : ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού  
 $\rho_v$ : ποσοστό του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού  
 $\rho = \rho' = 2\Phi 22 / (bd) = 760.265 / (300 \times 256) = 0.0099$   
 $\rho_v = 0$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') + N / (bdf_y) = 0.0099 + (0.0099 \times 0.1719) + 184.3 / (0.3 \times 0.256 \times 460000) = 0.0168$$

$$\delta' = d' / d = 44 / 256 = 0.1719$$

$$d' = c + \phi_h + \phi_L / 2 = 25 + 8 + 22 / 2 = 44 \text{ mm}$$

$$\alpha = E_s / E_c = 200 / 25 = 8$$

το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή ( $\xi_y$ ) ανοιγμένο στο στατικό ύψος  $d$ :  $\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = (8^2 \times 0.025^2 + (2 \times 8 \times 0.0168))^{1/2} - 8 \times 0.025 = 0.356$

$$\phi_y = f_y / [E_s (1 - \xi_y) d] = 460 / [200000 (1 - 0.356) 0.256] = 0.01395$$

(2) Αν η διαρροή ελέγχεται από το θλιβόμενο σκυρόδεμα:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - N / (1.8abd f_c) = 0.0099 + 0.0099 - 184.3 / (1.8 \times 8 \times 0.3 \times 0.256 \times 12000) = 0.005913$$

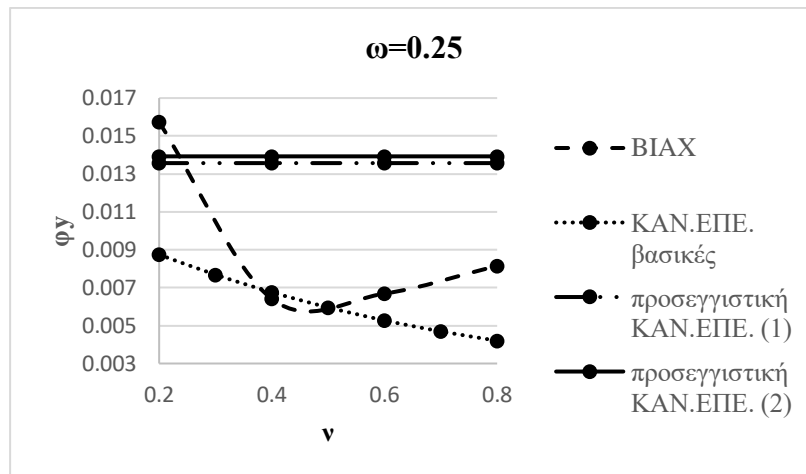
$$B = \rho + \rho' \delta' + 0.5 \rho_v (1 + \delta') = 0.0099 + (0.0099 \times 0.1719) = 0.0116$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = (8^2 \cdot 0,005913^2 + (2 \times 8 \times 0,0116))^{1/2} - 8 \times 0,005913 = 0,3861$$

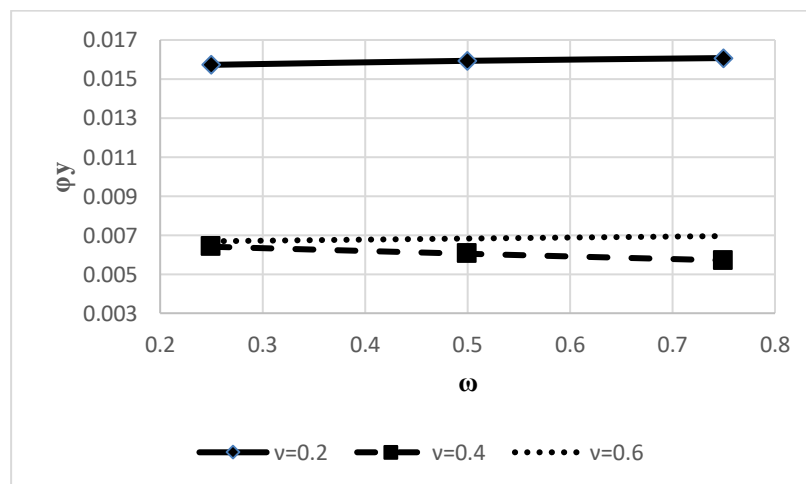
$$\varphi_y = 1,8f_c / (E_c \xi_y d) = 1,8 \cdot 12 / (25000 \times 0,3861 \times 0,256) = 0,00874$$

$$\varphi_y = \min(0,01395, 0,00874) = 0,00874$$

### 2.3.2. Μεταβολή της καμπυλότητας στη διαρροή ( $\varphi_y$ ) σε σχέση με το ανοιγμένο αξονικό φορτίο.



### 2.3.3. Μεταβολή της καμπυλότητας στη διαρροή ( $\varphi_y$ ) σε σχέση με το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού (τιμές από το BIAX).



- Για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης στη διαρροή ( $\varphi_y$ ) οι προσεγγιστικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ανεξάρτητες της μεταβολής του αξονικού φορτίου ( $\nu$ ) και του ογκομετρικού ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού ( $\omega_w$ ). Οι βασικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ανεξάρτητες μόνο του  $\omega_w$ . Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα διαγράμματα Μ-φ του BIAX, το  $\varphi_y$  έχει μικρή μεταβολή για τις διαφορετικές τιμές του  $\omega_w$  ενώ διαφοροποιείται αρκετά σε σχέση με τις τιμές του αξονικού φορτίου. Επομένως, οι βασικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. αναμένεται να δώσουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Αυτό επιβεβαιώνεται από το άνω διάγραμμα (2.3.2.) όπου οι βασικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνουν πλησιέστερα αποτελέσματα σε αυτά που έχουν προκύψει από το ΒΙΑΧ απ' ότι οι προσεγγιστικές σχέσεις.

- Για μικρές τιμές αξονικού φορτίου ( $\nu=0.2$ ) φαίνεται ότι η τιμή  $\phi_y$  από τις προσεγγιστικές σχέσεις είναι παραπλήσια αυτής που εξάγεται από το ΒΙΑΧ, ενώ για μεγάλες αξονικές δυνάμεις, οι τιμές από τις βασικές σχέσεις και το ΒΙΑΧ αποκλίνουν από τις προσεγγιστικές σχέσεις.

Για τον υπολογισμό της πλαστιμότητας ( $\mu_\phi$ ) για τη διατομή πριν την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν τα  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  που προέκυψαν από τα διαγράμματα Μ-φ του ΒΙΑΧ.

### 3. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

#### 3.1. Μηχανικές ιδιότητες της ενισχυμένης διατομής.

Για την ενίσχυση χρησιμοποιείται μανδύας ινοπλισμένου πολυμερούς από ίνες άνθρακα μέτρου ελαστικότητας  $E_j=242\text{GPa}$ , αντοχής  $f_u=3800\text{MPa}$  και πάχους στρώσης  $0.086\text{mm}$ . Χρησιμοποιούνται από 1 έως 5 στρώσεις. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περισιφισμένου με FRP σκυροδέματος είναι τα εξής:

(Κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013)

$$b_p=d_p=R_c=50\text{mm}$$

$$\beta=\gamma=2b_p/b_c=0.33$$

$$\alpha_s=1, \quad \alpha_n=1-\frac{1}{3Ac}[b_c^2(1-\beta)^2+d_c^2(1-\gamma)^2]=0.704$$

$$\rho_w=2\frac{As_w(\sigma_k)}{s}\min\left(\frac{nb}{b}, \frac{nh}{h}\right)=2t_j\left(\frac{2}{300}\right)=0.013t_j$$

$$\omega_w=\rho_w(f_{jd}/f_{cd})=\rho_w\frac{f_jk/1.2}{f_{cd}}=0.013t_j\frac{3800/1.2}{12}=3.518t_j, \text{ για στρώσεις } k<4$$

$$\omega_w=\rho_w(f_{jd}/f_{cd})=\rho_w\frac{f_j*\psi/1.2}{f_{cd}} \text{ όπου } \psi=k^{-1/4} \text{ για } k\geq 4$$

$$f_{cd,c}=(1.125+1.25\alpha\omega_w)f_{cd}=(1.125+0.88\omega_w) \times 12$$

$$\epsilon_{cu,c}=\gamma_{I\Omega\Pi}0.0035x(f_{cd,c}/f_{cd})^2 \text{ όπου } \gamma_{I\Omega\Pi}=1 \text{ για } I\Omega\Pi \text{ με ίνες άνθρακα}$$

στρώσεις	t <sub>j</sub> (mm)	ψ	ω <sub>w</sub>	f <sub>cd,c</sub>	ε <sub>cu,c</sub>
1	0,086	1	0,4357	18,1	0,0080
2	0,172	1	0,8715	22,7	0,0125
3	0,258	1	1,3072	27,3	0,0181
4	0,344	0,7071	1,2324	26,5	0,0171
5	0,43	0,6687	1,4570	28,9	0,0203

Πίνακας [1].

Αριθμητική επίλυση για 1 στρώση FRP, ν=0.2, μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων ω=0.25.

### 3.2. Δείκτης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων (μ<sub>φ</sub>).

#### 3.2.1. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων (μ<sub>φ</sub>) κατά EC8 (EN1998-3).

$$f_t' = 0.4 I_x f_c \varepsilon_{cu}^2 / \varepsilon_{ju}^{1.5}$$

$$f_t' = k_s f_t = 4 R_c E_f \varepsilon_{ju} t_f / D^2, \quad D = \max(b, h) = 0.3 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{ju} = f_u / E_j = 3800 / 242000 = 0.0157 \ll \varepsilon_{fu} = 0.015 \text{ για CFRP άρα } \varepsilon_{ju} = 0.015$$

$$I_x = \mu_\phi (\text{στοχευόμενο}) / \mu_\phi (\text{αναφοράς})$$

$$= \left( \frac{4 R_c E_f \varepsilon_{ju}^{2.5} t_f}{D^2 0.4 f_c \varepsilon_{cu}^2} \right)^{1/2} = \left( \frac{4 \times 0.05 \times 242000 \times 0.015^{2.5} \times 0.086 \times 10^{-3}}{0.3^2 \times 0.4 \times 12 \times 0.0035^2} \right)^{1/2} = 4.66$$

$$\mu_\phi (\text{στοχευόμενο}) = 4.66 \times 2.279 = 10.620$$

όπου μ<sub>φ</sub>(αναφοράς) = 2.279, ο δείκτης πλαστιμότητας μ<sub>φ</sub> της διατομής πριν την ενίσχυση με FRP από το ΒΙΑΧ (θεωρώντας υπάρχων ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων ω<sub>w</sub>=0.25)

#### 3.2.2. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων (μ<sub>φ</sub>) κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 (προσεγγιστικός τύπος).

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 \mu_\phi \varepsilon_{sy} \nu \ll 0.0035 \quad (\text{για } \nu > 0.2)$$

$$\mu_\phi = \varepsilon_{cu,c} / (2.2 \varepsilon_{sy} \nu), \quad \mu_\phi (\text{στοχευόμενο}) = 0.008 / (2.2 \times 0.0023 \times 0.2) = 7.905$$

$$I_x = \mu_\phi (\text{στοχευόμενο}) / \mu_\phi (\text{αναφοράς}) = 7.905 / 2.279 = 3.469$$

#### 3.2.3. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων (μ<sub>φ</sub>) κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. μέσω αναλυτικών σχέσεων.

Η καμπυλότητα στη διαρροή είναι ίδια όπως υπολογίστηκε για τη διατομή πριν την ενίσχυση με FRP στην παράγραφο 2.3.1. Χρησιμοποιείται η τιμή που προέκυψε από τις βασικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η καμπυλότητα στην αστοχία λόγω θραύσης του εφελυόμενου χάλυβα υπολογίζεται από τον τύπο  $\varphi_{su} = \varepsilon_{su} / ((1 - \xi_{su}) \times d)$  ενώ λόγω αστοχίας θλιβόμενου οπλισμού είναι

$\varphi_{cu} = \varepsilon_{cu} / (\xi_{cu} d)$ . Τα  $\xi_{su}$ ,  $\xi_{cu}$  υπολογίζονται μέσω των διαγραμμάτων ροής που έχουν συμπεριληφθεί στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017 – Παράρτημα 7 Ε. Οι σχέσεις των διαγραμμάτων αυτών (με την ίδια αρίθμηση) αναφέρονται αναλυτικά στη Δ.Δ. Μπισκίνης 2007 [6]. Για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της περίσφιγξης από FRP χρησιμοποιούνται τα μεγέθη  $f_{cd,c}$ ,  $\varepsilon_{cu,c}$  όπως αναγράφονται στον Πίνακα [1] αντί των  $f_c$ ,  $\varepsilon_{cu}$ .

( $\omega_v = 0$ ,  $\varepsilon_{co} = \varepsilon_{cu,c}$  για διατομή ενισχυμένη με FRP θεωρείται ότι το διάγραμμα σ-ε είναι παραβολικό ως την αστοχία)

$$\delta 1 = d 1 / d = 50 / 250 = 0.2$$

Σε επίπεδο πλήρους διατομής πριν την αποφλοίωση,

(εξ. 3.9):  $\delta 1 = 0.2 \leq (\varepsilon_{cu,c} - \varepsilon_{y2}) / (\varepsilon_{cu,c} + \varepsilon_{su}) = (0.008 - 0.0023) / (0.008 + 0.034) = 0.135$  δεν ικανοποιείται

(εξ. 3.10 – β' μέλος):  $v = 0.2 < v_{s,c} = \frac{\varepsilon_{cu,c} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu,c} + \varepsilon_{su1}} + \omega 2 - \omega 1 \left( \frac{f t 1}{f y 1} \right) = (0.008 - 0.008 / 3) / (0.008 + 0.034) + 0.258 - (0.258 \times 1.15) = 0.088$ , δεν ικανοποιείται.

Σε επίπεδο πλήρους διατομής μετά την αποφλοίωση,

(εξ. 3.14):  $\delta 1 = 0.2 \leq (\varepsilon_{cu,c} - \varepsilon_{y2}) / (\varepsilon_{cu,c} + \varepsilon_{y1}) = (0.008 - 0.0023) / (0.008 + 0.0023) = 0.552$ , ισχύει

(εξ. 3.16 – α' μέλος):  $v = 0.2 < v_{cy,2} = \omega 2 - \omega 1 + \delta 1 \frac{\varepsilon_{cu,c} - \varepsilon_{co} / 3}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{y2}} = 0.2(0.008 - 0.008 / 3) / (0.008 - 0.0023) = 0.187$ , δεν ισχύει

(εξ. 3.16 – β' μέλος):  $v = 0.2 < v_{cy,1} = \omega 2 - \omega 1 + \frac{\varepsilon_{cu,c} - \varepsilon_{co} / 3}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{y1}} = (0.008 - 0.008 / 3) / (0.008 + 0.0023) = 0.518$ , ισχύει

(εξ. 3.17):  $\xi_{cu} = \frac{(1 - \delta 1)(v + \omega 1 - \omega 2)}{(1 - \delta 1)(1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3 \varepsilon_{cu,c}})} = 0.2 / (1 - 1/3) = 0.3$

$$\varphi_{cu} = \varepsilon_{cu} / (\xi_{cu} d) = 0.008 / (0.3 \times 0.25) = 0.106$$

$$\text{Άρα, } \mu_{\varphi} = \varphi_u / \varphi_y = 0.106 / 0.00874 = 12.148$$

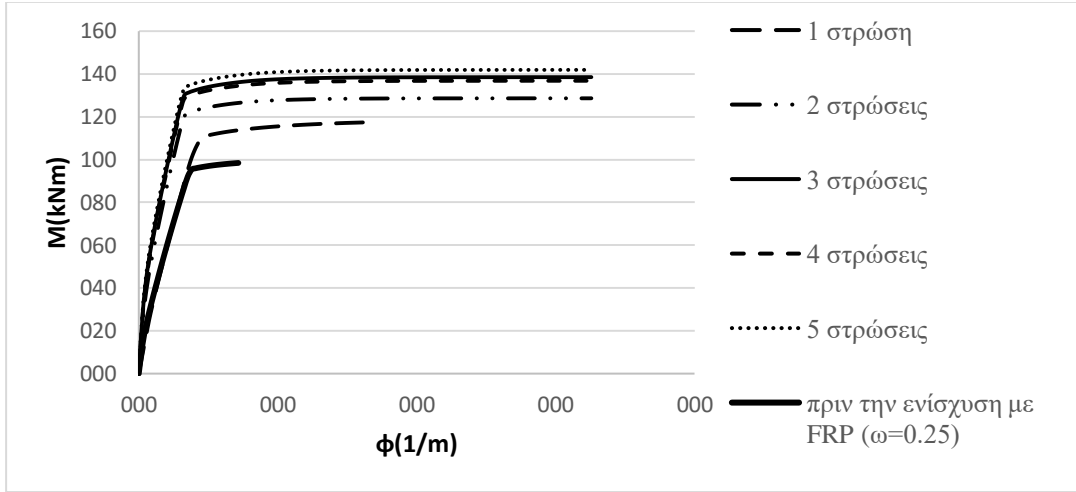
$$I_x = \mu_{\varphi}(\text{στοχευόμενο}) / \mu_{\varphi}(\text{αναφοράς}) = 12.148 / 2.279 = 5.331$$

### 3.2.4. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_{\varphi}$ ) μέσω διαγραμμάτων M-φ.

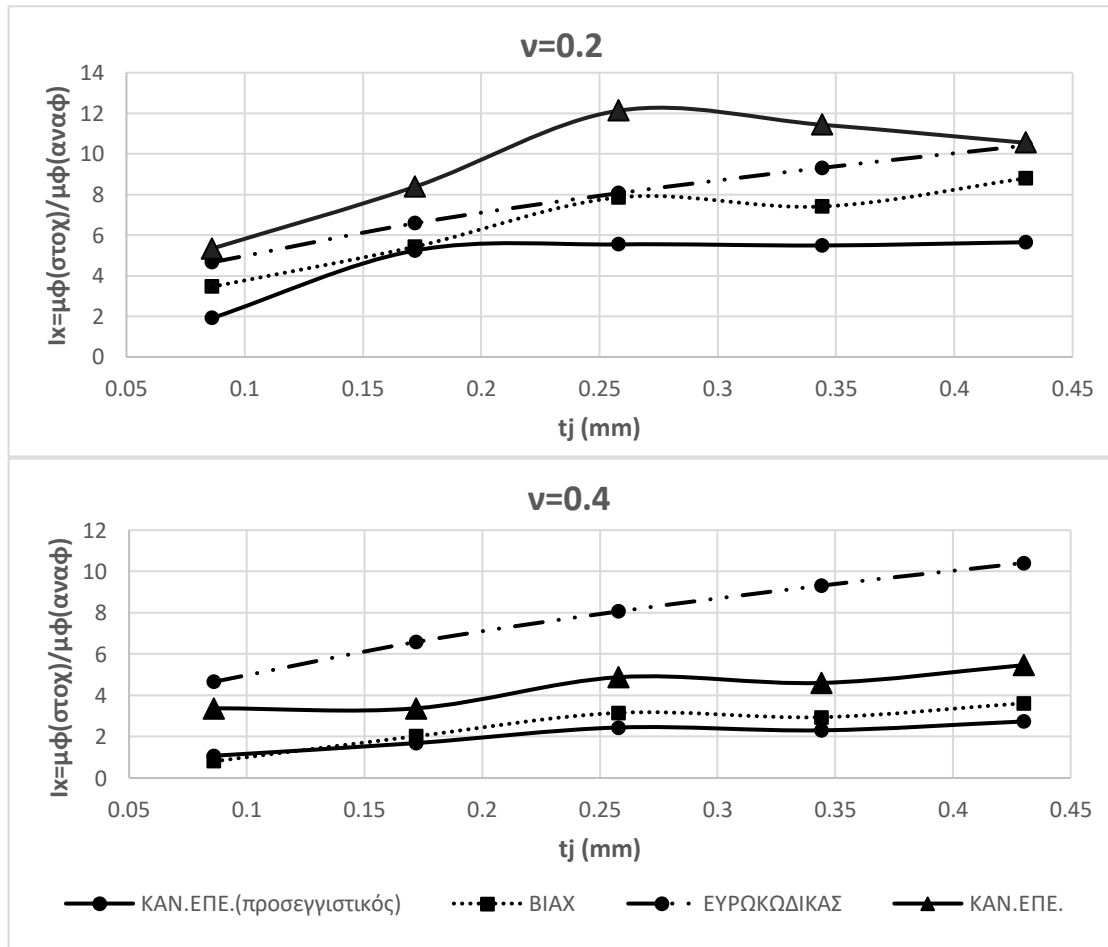
Η καμπυλότητα στην αστοχία και στη διαρροή μπορεί να υπολογιστεί μέσω των διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων (M-φ) από το BIAX και την αντίστοιχη διγραμμικοποίηση τους μέσω BILIN όπως και για τη διατομή πριν την ενίσχυση.

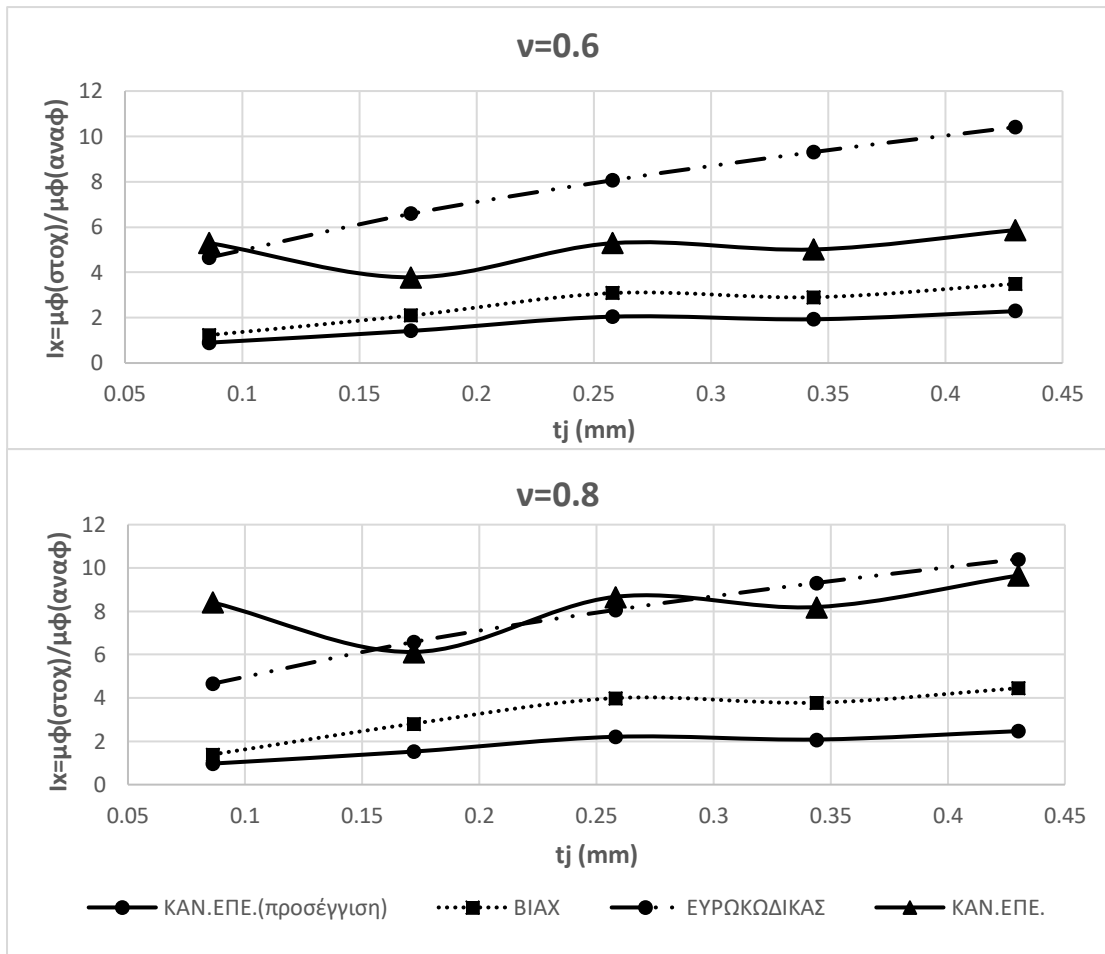


Επειδή το BIAX δεν έχει ενσωματωμένο μοντέλο για μανδύα από FRP, για την ενισχυμένη διατομή εισάγεται αντοχή του σκυροδέματος  $f_{cd}$  και παραμόρφωση στην αστοχία  $\epsilon_{cu}$  ίσες με αυτές που έχουν προκύψει κατά την ενίσχυση με FRP, δηλαδή  $f_{cd,c}$  και  $\epsilon_{cu,c}$  αντίστοιχα όπως φαίνονται στον Πίνακα [1].



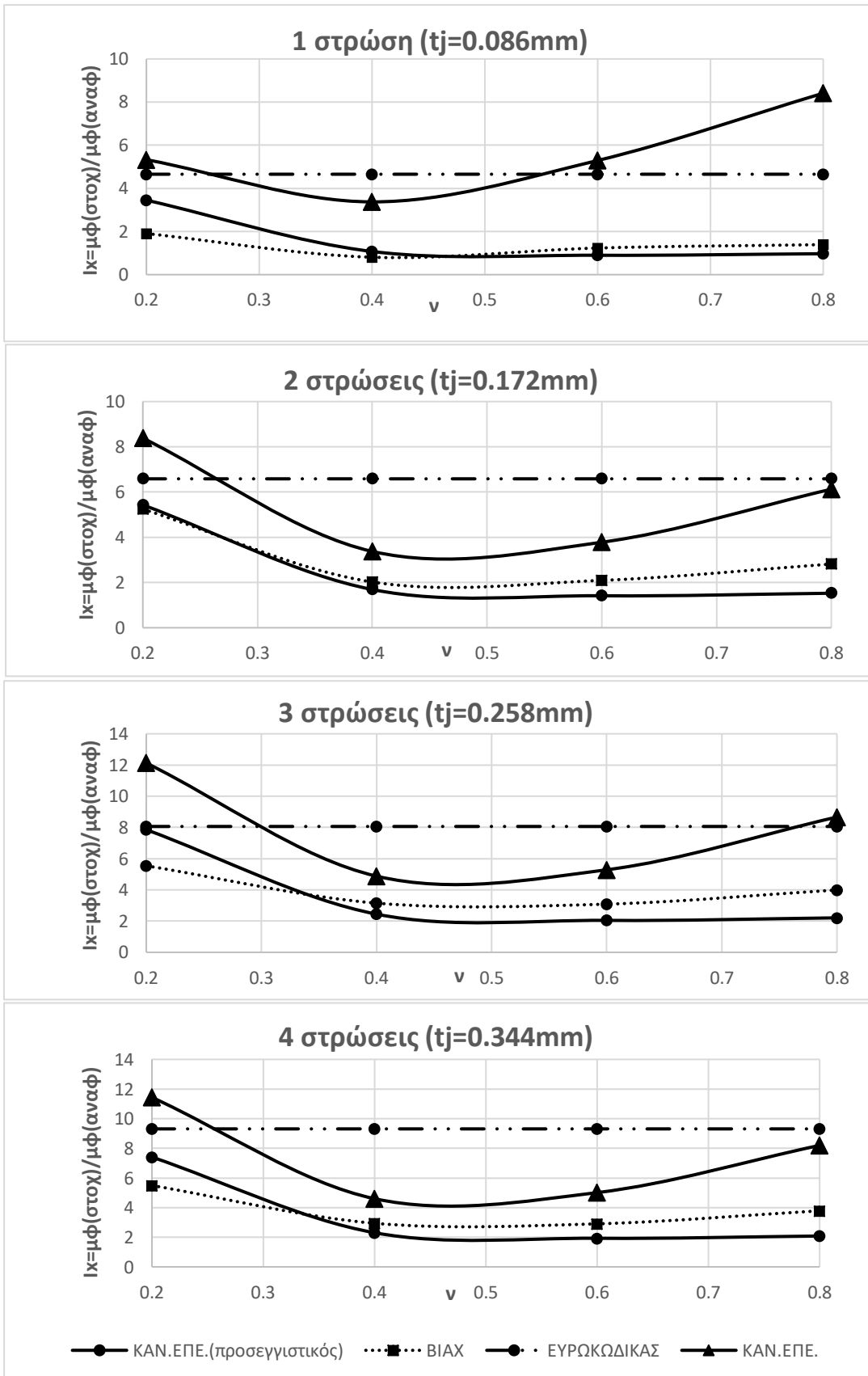
**3.2.5. Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ) προς το δείκτη πλαστιμότητας αναφοράς σε σχέση με το πάχος του CFRP με το οποίο ενισχύθηκε η διατομή.**

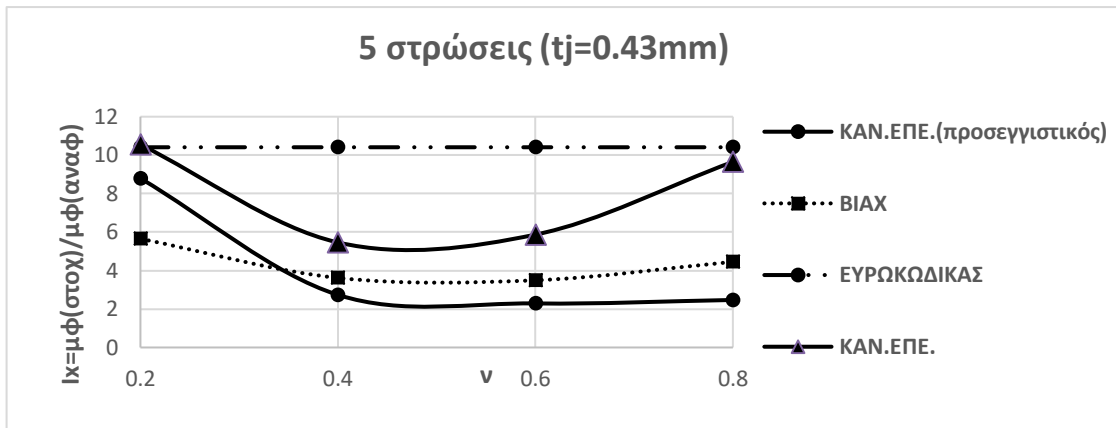




- Από τη σχέση του Ευρωκώδικα προκύπτουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές πλαστιμότητας  $\mu_{\phi}$ , με εξαίρεση την μικρή τιμή του αξονικού φορτίου  $v=0.2$  και μικρά διαστήματα του  $v=0.8$  όπου μεγιστοποιούνται οι τιμές των αναλυτικών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σημαντικά μικρότερα αποτελέσματα δίνουν το πρόγραμμα BIAΧ και ακόμη μικρότερα η προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.
- Η προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. ισχύει για  $v > 0.2$  οπότε αναμένεται να δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια για μεγάλα αξονικά φορτία. Για  $v=0.4$  και  $v=0.6$  τα αποτελέσματα από τη σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. πράγματι συγκλίνουν με αυτά του BIAΧ, ενώ για  $v=0.8$  παρατηρείται σχετική απόκλιση αλλά αυτή αποτελεί ακραία τιμή ανοιγμένου αξονικού φορτίου. (συνήθως  $v=0-0.5$ )
- Η σχέση του Ευρωκώδικα δίνει αύξηση πλαστιμότητας  $\mu_{\phi}$  με την αύξηση των στρώσεων του σύνθετου υλικού που προστίθεται. Αντίθετα, από τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και τα αποτελέσματα του BIAΧ προκύπτει αύξηση της πλαστιμότητας μέχρι ένα ορισμένο αριθμό στρώσεων και έπειτα η αντίστοιχη καμπύλη σχεδόν οριζοντιώνεται. Λόγω της επιρροής του μειωτικού συντελεστή στρώσεων  $\psi$ , με την προσθήκη 4 στρώσεων FRP επιτυγχάνεται μικρότερος δείκτης πλαστιμότητας από την προσθήκη 3 στρώσεων.

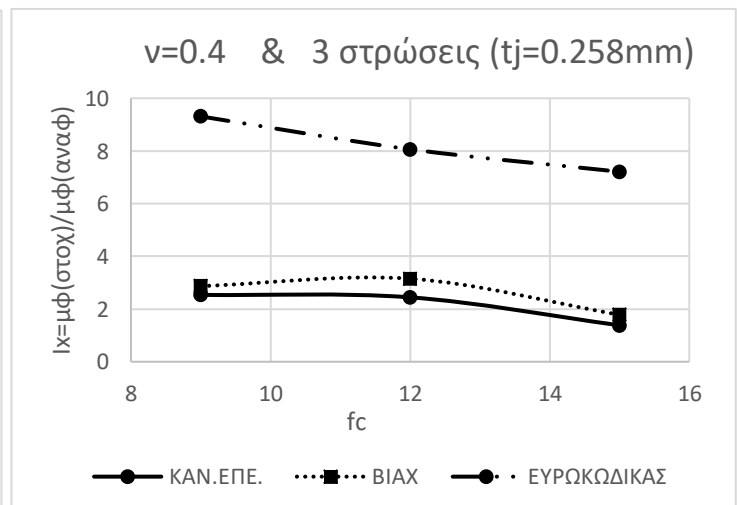
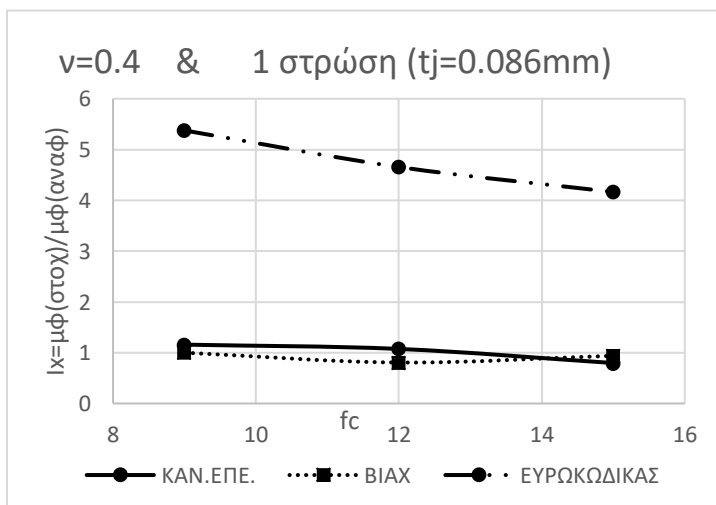
**3.2.6. Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ) προς το δείκτη πλαστιμότητας αναφοράς σε σχέση με το ανοιγμένο αξονικό φορτίο.**





- Η σχέση του Ευρωκώδικα είναι ανεξάρτητη της μεταβολής του ανοιγμένου αξονικού φορτίου. Όμως, σύμφωνα με τις άλλες μεθόδους υπολογισμού, το  $\mu_{\phi}$  παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα καθώς αλλάζει το αξονικό φορτίο. Το  $\mu_{\phi}$  αυξάνεται με τη μείωση του αξονικού φορτίου, ενώ αύξηση  $\mu_{\phi}$  παρατηρείται και για μεγάλες τιμές  $\nu$  σύμφωνα με τις αναλυτικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.
- Οι τιμές του Ευρωκώδικα είναι πιο κοντά στις τιμές του ΒΙΑΧ και του ΚΑΝ.ΕΠΕ. μόνο για μικρό αξονικό φορτίο ( $\nu=0.2$ ) ενώ για μεγαλύτερες τιμές  $\nu$  αποκλίνουν.
- Ανάλογα συμπεράσματα με αυτά που εξήχθησαν από τα διαγράμματα  $I_x - t_j$  (παράγραφος 3.2.5) μπορούν να εξαχθούν και από τα παραπάνω διαγράμματα. Δηλαδή, πρώτον η σχέση του Ευρωκώδικα δίνει ως επί το πλείστον τις μεγαλύτερες τιμές και δεύτερον, για το διάστημα αξονικού φορτίου  $\nu=0.4-0.6$  φαίνεται ότι συγκλίνουν ικανοποιητικά τα αποτελέσματα της προσεγγιστικής σχέσης του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με αυτά του ΒΙΑΧ και λιγότερο με αυτά των αναλυτικών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

### 3.2.7. Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_{\phi}$ ) προς το δείκτη πλαστιμότητας αναφοράς σε σχέση με την κατηγορία σκυροδέματος $f_c$ της διατομής.



- Όσο αφορά την επιρροή της αντοχής του σκυροδέματος  $f_c$ , ο Ευρωκώδικας δίνει μεγαλύτερες τιμές πλαστιμότητας για κατηγορίας σκυροδέματος μικρότερης αντοχής. Από το ΒΙΑΧ και τη σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. η μεταβολή του  $f_c$  δε φαίνεται να δημιουργεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στην πλαστιμότητα.

### 3.3. Δείκτης πλαστιμότητας σε όρους γωνιών στροφών χορδής ( $\mu_\theta$ ).

**3.3.1. Υπολογισμός δείκτη πλαστιμότητας σε όρους στροφών χορδής ( $\mu_\theta$ ) μέσω σχέσεων EC8 (EN1998-3).** (Οι ίδιες σχέσεις για  $\theta_y, \theta_u$  αναφέρονται και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013.)

$$\theta_y = \varphi_y (L_s + a_v z) / 3 + 0.0014 (1 + 1.5 \frac{h}{L_s}) + (\varphi_y d_{bL} f_y) / (8 f_c^{1/2}) = 0,0157x (1.5 + 0.212) / 3 + 0.0014 [1 + 1.5 x (3/1.5)] + (0,0157x 0.022 x 460) / (8 x 12^{1/2}) = 0,0203$$

όπου  $L_s = 1/2 L_{καθ} (\text{υποστ.}) = 1.5m$  ( $L_s = M/V$  στην ακραία διατομή του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής ως το σημείο μηδενισμού των ροπών.)

$$z = h - d' - d' = 300 - 44 - 44 = 212mm$$

$a_v = 1$  (για  $V_{R1} < V_{Mu} = M_y / L_s$ , δηλαδή για τιμή τέμνουσας που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση στο στοιχείο μικρότερη από την τιμή τέμνουσας κατά τη διαρροή του στοιχείου σε κάμψη)

$\varphi_y$ : η καμπυλότητα στη διαρροή (λαμβάνεται η τιμή από το πρόγραμμα ΒΙΑΧ)

$$\theta_u = 0.016 (0.3)^v \left[ \frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} f_c \right]^{0.225} (\alpha_s)^{0.35} 25^{(\alpha_p s (f_{yw}/f_c) + \alpha_p f (f, e))} (1.25^{100pd}) = 0.016 (0.3)^{0.2} (12)^{0.225} (5)^{0.35} 25^{0.145} = 0.0617$$

όπου  $\omega$  και  $\omega'$  το ποσοστό του εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα  $\omega = \omega' = [2\Phi 22 / (bd)] x f_y / f_c = [760.265 / (300 x 256)] x (460/12) = 0.3795$

$\alpha_s = M/Vh = L_s/h = 1.5/0.3 = 5$ , ο λόγος διάτμησης

$\rho_d = 0$ , ποσοστό δισδιαγώνιου οπλισμού

$\alpha_p s (f_{yw}/f_c) + \alpha_p f (f_{t,e}/f_c)$ , ο πρώτος όρος αφορά τη συμβολή των συνδετήρων και ο δεύτερος του CFRP στην περίσφιγξη

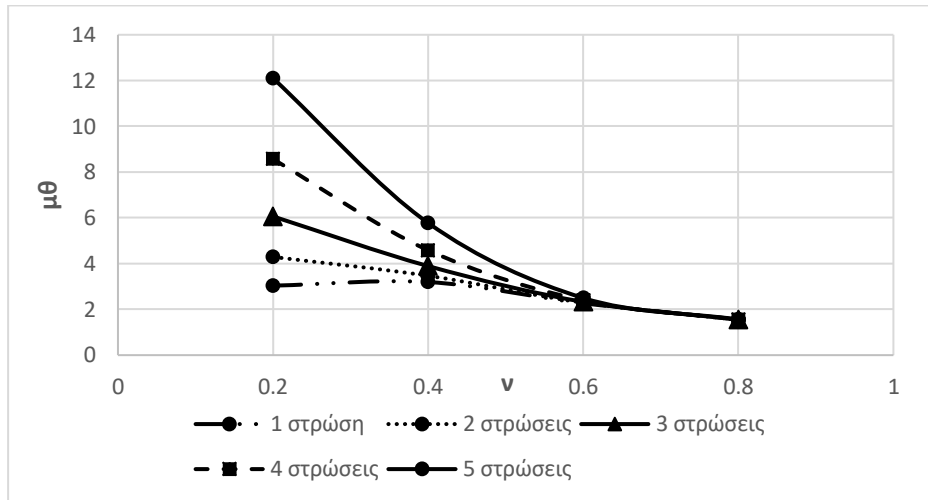
$$\rho_f = 2t_f / b_w = (2 x 0.086) / 300 = 0.00057$$

$$f_{t,e} = \min(f_{u,f}, \epsilon_{u,t} E_f) (1 - 0.7 \min(f_{u,f}, \epsilon_{u,t} E_f) \rho_f / f_c) = \min(3800, 0.015 x 242000) [1 - 0.7 \min(3800, 0.015 x 242000) 0.00057 / 12] = \min(3800, 3630) [1 - 0.7 \min(3800, 3630) 0.00057 / 12] = 3191,9MPa$$

$$\alpha_p s (f_{yw}/f_c) + \alpha_p f (f_{t,e}/f_c) = [0.304 x 0.00327 x (460/12)] + [0.704 x 0.00057 x (3191,9/12)] = 0.145$$

Άρα, προκύπτει  $\mu_\theta = \theta_u / \theta_y = 0.0616 / 0,0203 = 3.035$

### 3.3.2. Μεταβολή της πλαστιμότητας $\mu_\theta$ σε σχέση με το ανοιγμένο αξονικό φορτίο $\nu$ .

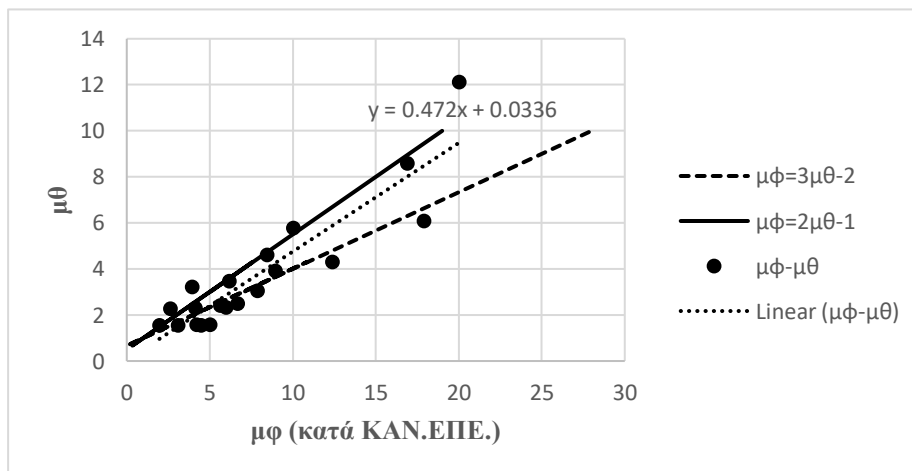


- Η πλαστιμότητα  $\mu_\theta$  αυξάνεται όσο περισσότερες στρώσεις υλικού τοποθετούνται και παίρνει μεγαλύτερες τιμές για μικρά αξονικά φορτία.

### 3.4. Διαγράμματα $\mu_\phi - \mu_\theta$ , εύρεση της σχέσης μεταξύ τους και σύγκριση με τις αντίστοιχες σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

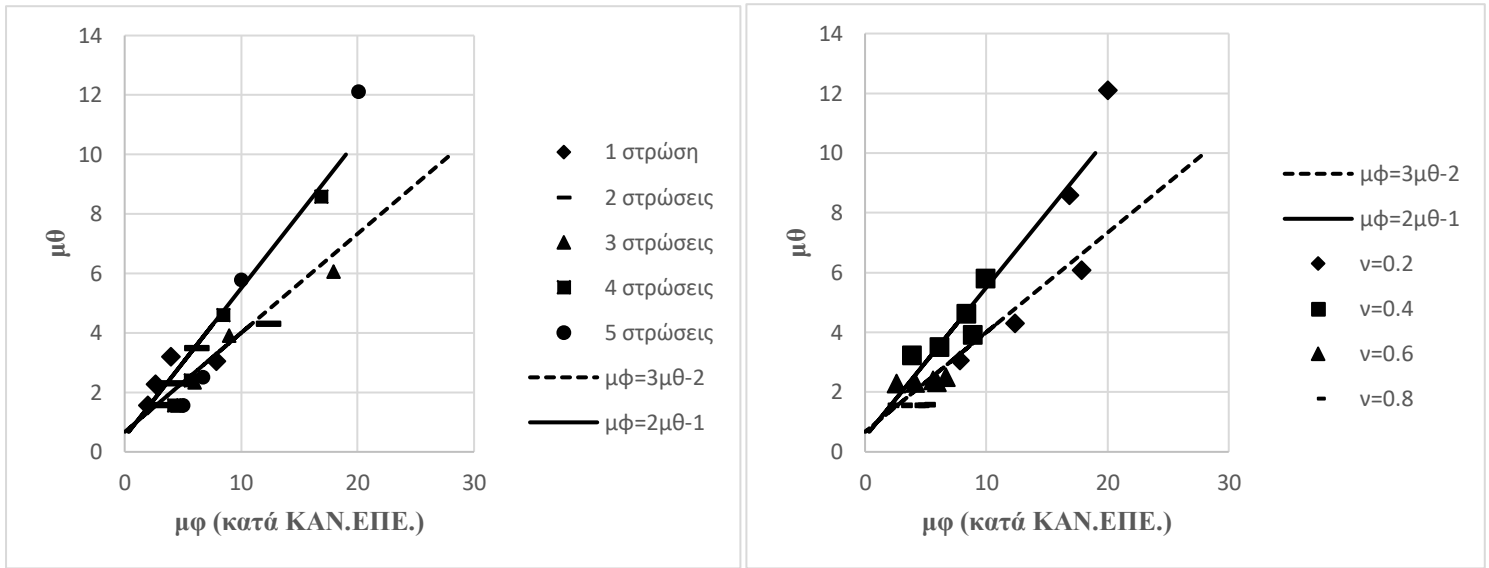
- Σχέση 1 :  $\mu_\phi = 3\mu_\theta - 2$
- Σχέση 2 :  $\mu_\phi = 2\mu_\theta - 1$

Διάγραμμα  $\mu_\phi$  (κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.) -  $\mu_\theta$  για  $f_c = 12\text{MPa}$ .



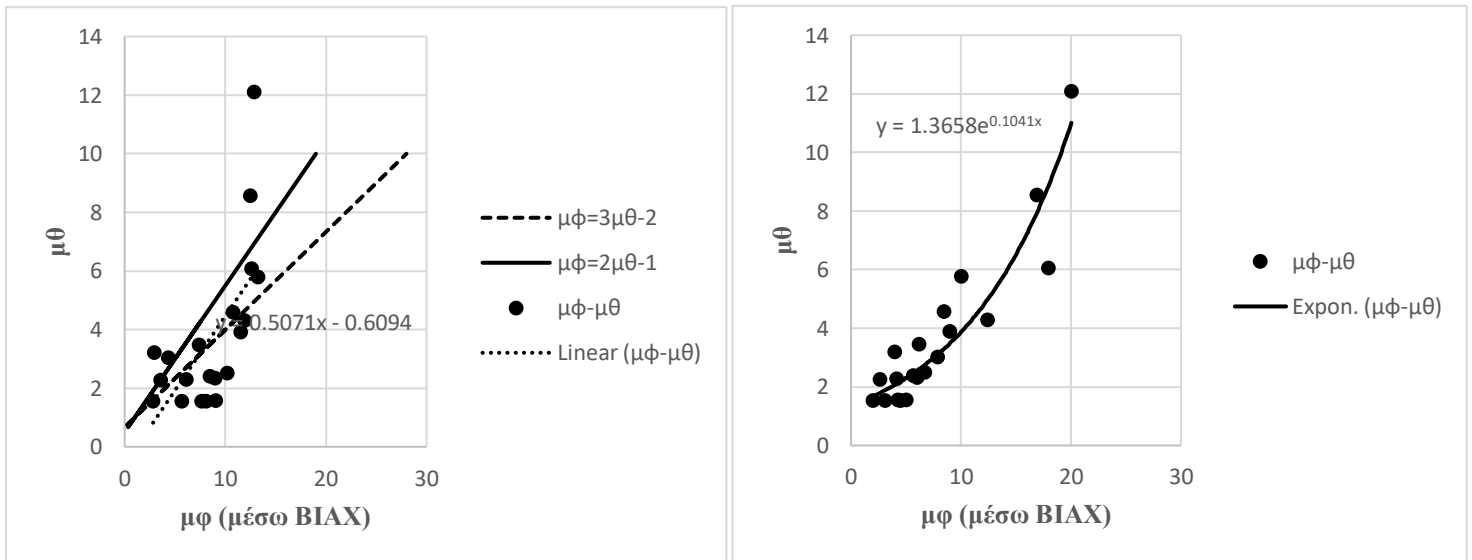
Γραμμική σχέση:  $\mu_\phi = 2.119\mu_\theta - 0.071$  ,  $\mu_\phi = 2\mu_\theta$

Το ίδιο διάγραμμα όπου σημειώνεται ο αριθμός των στρώσεων και το αξονικό φορτίο  $\nu$ .



- Τα ζεύγη τιμών  $\mu_{\phi}$ - $\mu_{\theta}$  που αποκλίνουν από τις γραμμικές σχέσεις, είναι αυτά που αντιστοιχούν σε πολλές στρώσεις CFRP (5 στρώσεις) και μικρό αξονικό φορτίο ( $\nu=0.2$ ).

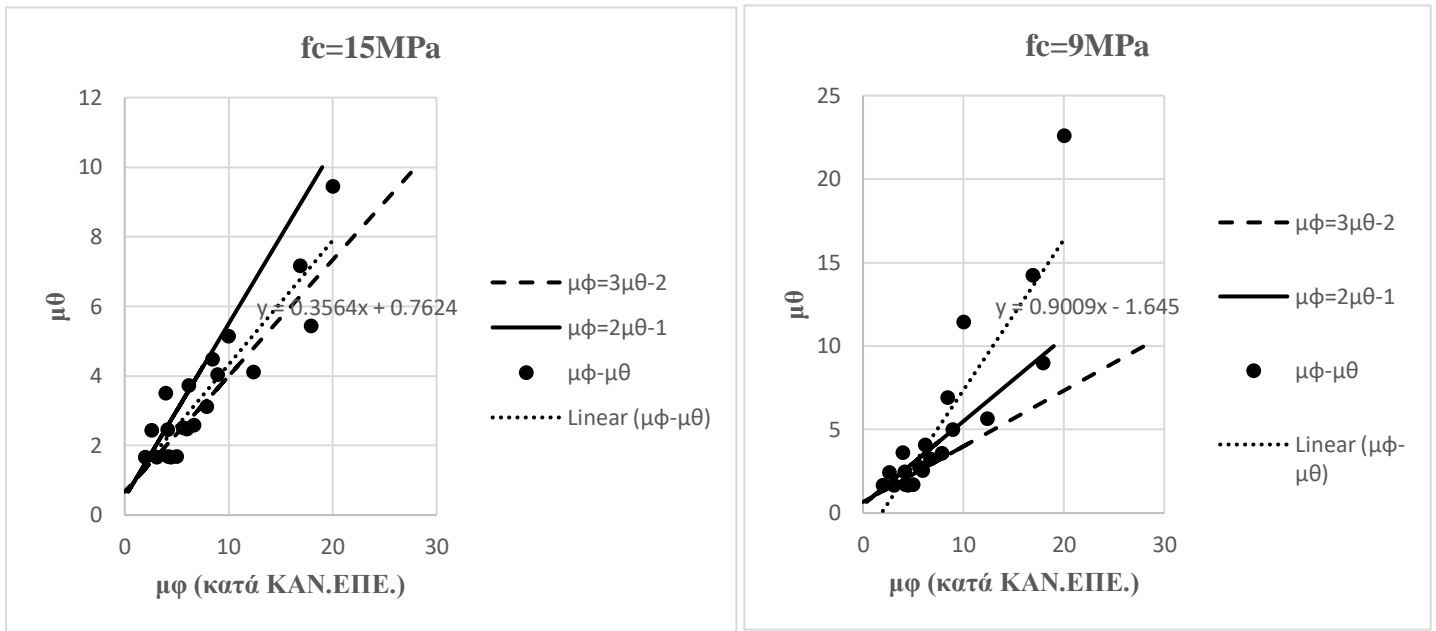
Διάγραμμα  $\mu_{\phi}$  (μέσω ΒΙΑΧ) -  $\mu_{\theta}$  για  $f_c=12\text{MPa}$ .



Γραμμική σχέση:  $\mu_{\phi}=1.972\mu_{\theta}+1.2$  ,  $\mu_{\phi}=2\mu_{\theta}+1$

Εκθετική σχέση:  $\mu_{\theta}=1.3658e^{0.1041\mu_{\phi}}$

Ενώ, για διατομή με σκυρόδεμα διαφορετικής αντοχής  $f_c$  προκύπτουν:



Γραμμική σχέση:  $\mu_\phi = 2.809\mu_\theta - 2.141$  ,  $\mu_\phi = 3\mu_\theta - 2$  ( $f_c = 15\text{MPa}$ )

Γραμμική σχέση:  $\mu_\phi = 1.11\mu_\theta + 1.828$  ,  $\mu_\phi = \mu_\theta + 2$  ( $f_c = 9\text{MPa}$ )

- Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι και οι δύο προσεγγιστικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνουν ικανοποιητικά τη συσχέτιση των  $\mu_\phi$ ,  $\mu_\theta$  με τη συσχέτιση να είναι καλύτερη όταν τα  $\mu_\phi$  έχουν υπολογιστεί με τον προσεγγιστικό τύπο του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Για την ενισχυμένη με CFRP διατομή η πλαστιμότητα  $\mu_\phi$  παίρνει μεγάλες τιμές χρησιμοποιώντας τη σχέση του Ευρωκώδικα, με εξαίρεση μικρά διαστήματα όπου μεγιστοποιούνται οι τιμές των αναλυτικών σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Μειωμένες τιμές εξάγονται από το ΒΙΑΧ και ακόμη μικρότερες από την προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ..
- Η προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. συγκλίνει με τα αποτελέσματα του προγράμματος ανάλυσης της διατομής και λιγότερο με τις αναλυτικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. κυρίως για τιμές ανοιγμένου αξονικού φορτίου  $\nu = 0.4 - 0.6$ .
- Ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\phi$  αυξάνεται με τη μείωση του αξονικού φορτίου, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψη στη σχέση του Ευρωκώδικα η οποία είναι ανεξάρτητη του  $\nu$ . Η πλαστιμότητα εκφρασμένη και σε όρους γωνιών στροφών χορδής ( $\mu_\theta$ ) αυξάνεται με τη μείωση του αξονικού φορτίου.



- Με την αύξηση του πάχους του σύνθετου υλικού, αυξάνεται η πλαστιμότητα  $\mu_{\phi}$  από τη σχέση του Ευρωκώδικα. Οι σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και το ΒΙΑΧ δίνουν αύξηση πλαστιμότητας ως ένα αριθμό στρώσεων. Παρομοίως, με την προσθήκη περισσότερων στρώσεων αυξάνεται η πλαστιμότητα και σε όρους γωνιών στροφών χορδής.
- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την πλαστιμότητα, εκτός τον τύπο του Ευρωκώδικα που με μείωση της αντοχής του σκυροδέματος δίνει μεγαλύτερες τιμές  $\mu_{\phi}$ .
- Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας στη διαρροή, η οποία είναι ίδια πριν και μετά την ενίσχυση της διατομής, οι προσεγγιστικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. συγκλίνουν μόνο για μικρά αξονικά φορτία, ενώ, παρατηρείται απόκλιση και στα αποτελέσματα των βασικών σχέσεων από αυτά του ΒΙΑΧ. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί οι προσεγγιστικές σχέσεις αγνοούν την επιρροή του αξονικού φορτίου ( $\nu$ ) και του ογκομετρικού ποσοστού ( $\omega_w$ ) συνδετήρων, ενώ οι βασικές σχέσεις αγνοούν μόνο το  $\omega_w$ . Από την ανάλυση του ΒΙΑΧ φαίνεται ότι το  $\phi_y$  επηρεάζεται από τους δύο αυτούς παράγοντες με κυριότερο από αυτούς το αξονικό φορτίο.
- Οι προσεγγιστικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. που συνδέουν  $\mu_{\phi} - \mu_{\theta}$ , δίνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, κυρίως όταν το  $\mu_{\phi}$  προκύπτει από τη προσεγγιστική σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 Κανονισμός Επεμβάσεων», ΟΑΣΠ.
- [2] Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας και ενισχύσεις κτιρίων, EN1998-3, 2005.
- [3] «Συγκρίσεις ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8 για επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας μέσω περίσφιγξης.», Σωτηρία Ν. Αθανασοπούλου, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα, 2016.
- [4] «Πρόγραμμα ΒΙΑΧ-οδηγίες χρήσης», Μ. Γ. Σφακιανάκης, Πάτρα, 2015.
- [5] «Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος- Μέρος Ι», Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2015.
- [6] «Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος, με ή χωρίς ενίσχυση.», Διονύσιος Ε. Μπισκίνης, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα, 2007.

