

## ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΥΠΟΥΣ ΚΑΝ.ΕΠΕ

**ΒΙΟΛΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π, [gi.violakis@gmail.com](mailto:gi.violakis@gmail.com)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την επιρροή των διαφόρων παραγόντων μιας διατομής και ενός μέλους στην παραμορφωσιακή ικανότητα αυτών, όπως αυτή προκύπτει μέσω των αντίστοιχων μεγεθών. Οι παραγοντες που εξετάζονται είναι:

- Η αξονική του μέλους,  $v$
- Η επιρροή της διαρροής λόγω κάμψης έναντι εκείνης λόγω διάτμησης, η οποία ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή  $\alpha_v$
- Η επιρροή της μέσης τιμής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος,  $f_c$

Επιπλέον, τα παραμορφωσιακά μεγέθη που εξετάζονται είναι:

- Η καμπυλότητα στη διαρροή,  $\varphi_y$
- Η καμπυλότητα στην αστοχία,  $\varphi_u$
- Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή,  $\theta_y$
- Η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία,  $\theta_{um}$
- Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_\varphi$
- Ο δείκτης πλαστιμότητας τοπικών μετακινήσεων ή παραμορφώσεων,  $\mu_\theta$

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τόσο από τον Ευρωκώδικα όσο και από τους Ελληνικούς Κανονισμούς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η πλαστιμότητα είναι μια ικανότητα εξαιρετικά σημαντική για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Πλαστιμότητα ενός μέλους, είναι η ικανότητα του μέλους αυτού, να αναπτύσσει παραμορφώσεις δίχως την παράλληλη αύξηση της ροπής πέραν της ροπής διαρροής (ή αντοχής). Η πλαστιμότητα σε επίπεδο διατομής και μέλους μπορεί να «μετρηθεί» μέσω των δεικτών πλαστιμότητας  $\mu_\varphi$  και  $\mu_\theta$ . Για να υπολογιστούν οι δείκτες αυτοί, λαμβάνονται υπόψη οι αναλυτικές σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013. Για να εξεταστεί η επιρροή των παραπάνω συντελεστών στους δείκτες πλαστιμότητας, έγινε η επιλογή δύο διατομών υποστυλώματος με δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

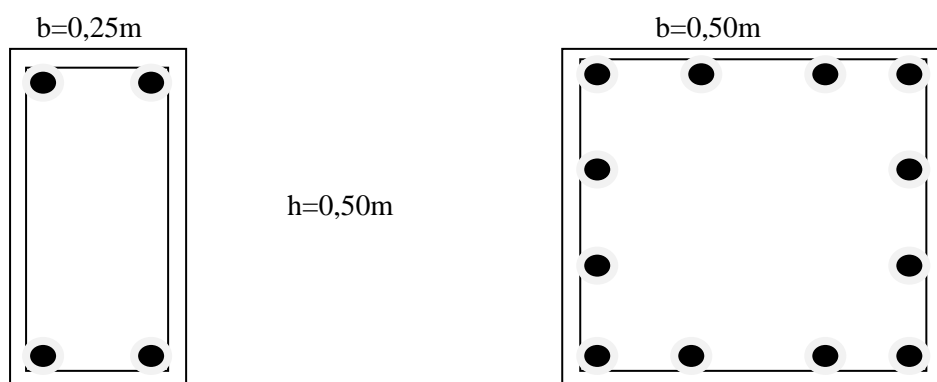
## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

### ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ 1

- Διαστάσεις 25x50 (cm)
- $h_{net} = 3m$
- Κατηγορία σκυροδέματος C12/15
- $f_c = 18,3MPa$  (μέση αντοχή)
- $f_y = 595,5MPa$
- $A_{stot} = 1016mm^2$  (4Φ18)
- Συνδετήρες Φ8/200
- Επικάλυψη  $c=20mm$
- ανοιγμένη αξονική :  $\nu = 0,38$
- $\alpha=0,0185$  (συντελεστής περισφιγξης)
- Κατασκευή μετά του 1985
- Στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (Σ.Α.Δ) : υψηλή

### ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ 2

- Διαστάσεις 50x50 (cm)
- $h_{net} = 3m$
- Κατηγορία σκυροδέματος C12/15
- $f_c = 18,3MPa$  (μέση αντοχή)
- $f_y = 595,5MPa$
- $A_{stot} = 3291mm^2$  (4Φ20 +8Φ18)
- Συνδετήρες Φ10/120
- Επικάλυψη  $c=30mm$
- ανοιγμένη αξονική :  $\nu = 0,38$
- $\alpha=0,561$  (συντελεστής περισφιγξης)
- Κατασκευή μετά του 1985
- Στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (Σ.Α.Δ) : υψηλή



Σχήμα 1. Διατομή 1 (αριστερά) και διατομή 2 (δεξιά)

## 2.ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΚΑΝ.ΕΠΕ

### 2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ χρησιμοποιεί συγκεκριμένους αναλυτικούς κλειστούς τύπους. (Βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Παράρτημα 7<sup>Α</sup>, εξισώσεις (Α.1)-(Α.5))

- Εάν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, τότε σύμφωνα με το Παραρτημα 7<sup>Α</sup> του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, ισχύουν τα παρακάτω:

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d}, \text{ όπου} \quad (1)$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A, \quad (2)$$

το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, ανηγμένο στο στατικό ύψος d. Επιπλέον,

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y} \quad (3)$$

και

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v (1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y} \quad (4)$$

- Εάν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος, τότε σύμφωνα με το Παραρτημα 7Α του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, ισχυει:

$$\varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d}, \text{ όπου} \quad (5)$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A, \quad (6)$$

το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, ανηγμένο στο στατικό ύψος d. Επιπλέον,

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1,8abdf_c} \quad (7)$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v (1 + \delta') \quad (8)$$

Όπου,  $\alpha = E_c/E_s$ , είναι ο λόγος του μετρου ελαστικότητας του χαλυβα προς εκεινο του σκυροδεματος και  $\rho$ ,  $\rho'$  και  $\rho_v$  είναι τα ποσοστα του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και τους μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού (ανηγμένα στο bd),  $\delta' = \frac{d'}{d}$ , όπου d' η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος, b το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και N το αξονικό φορτίο.

Ως καμπυλότητα διαρροής  $\varphi_y$  θεωρείται η ελάχιστη τιμή εκ των (1),(5).

### 2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Ο τρόπος υπολογισμού της καμπυλότητας στην αστοχία βρίσκεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2016. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένας έτοιμος αλγόριθμος (excel) για τον υπολογισμό του  $\varphi_u$ . Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

- $\varepsilon_{c0} = 0,002$
- $\varepsilon_{cu} = 0,004$
- $\varepsilon_{sh} = 5\varepsilon_y = 5 \cdot 0,0029775 = 0,0148875$
- $\varepsilon_{su} = \frac{3}{8} \cdot 0,09 = 0,03375$
- $f_t = 1,15 \cdot f_y = 1,15 \cdot 595,5MPa = 684,83MPa$

## 2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο. (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 7, εξίσωση (Σ.2))

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + \alpha_v \cdot z}{3} + 0,0014 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_s} + \frac{\varphi_y \cdot d_{bl} \cdot f_y}{8 \cdot \bar{f}_c} \right) \quad (9)$$

Όπου,  $L_s = h_{net} / 2$  το μήκος διάτμησης,  $\alpha_v = 0$  ή  $\alpha_v = 1$  αν καθοριστική της διαρροής είναι η κάμψη ή διάτμηση αντίστοιχα και  $z = d - d'$ .

## 2.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Για τον προσδιορισμό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος. (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 7<sup>A</sup>, εξίσωση (Σ.8<sup>α</sup>))

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c^{0,225} \cdot (\alpha_s)^{0,35} \cdot 25^{(\alpha_{psx} \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1,25^{100\rho_d}) \quad (10)$$

Όπου,  $v$  είναι η αξονική ανοιγμένη στο  $bh$ ,  $\alpha_s = \frac{M}{Vh}$  ο λόγος διάτμησης,  $\omega$ ,  $\omega'$  είναι το μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβομένου οπλισμού (ο ενδιάμεσος διαμηκής οπλισμός μεταξύ εφελκόμενου και θλιβομένου πελματος θεωρείται ως εφελκόμενος) αντίστοιχα,  $\rho_s = \frac{A_{sh}}{b_w s_h}$  είναι το γεωμετρικό ποσοστό εγκαρσίου οπλισμού παραλληλά στη διεύθυνση της φορτίσης και  $\rho_d$  είναι το γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού.

## 2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ

Ο δεικτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων  $\mu_\varphi$ , υπολογίζεται σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ ως ο λόγος του  $\varphi_u$  προς το  $\varphi_y$ . (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 8)

## 2.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΠΙΚΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ Η΄ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Ο δείκτης πλαστιμότητας τοπικών μετακινήσεων ή παραμορφώσεων  $\mu_\theta$ , υπολογίζεται σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ ως ο λόγος του  $\theta_{um}$  προς το  $\theta_y$ . (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 8)

## 3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα υπολογισμού των παραπάνω ποσοτήτων για τις διατομές υποστλωμάτων 1 και 2.

### 3.1.1 ΔΙΑΤΟΜΗ 1

Ισχύει ότι :

$$\frac{N_{Rd}}{b h f_{cd}} = v \quad , \quad \text{άρα}$$

$$N_{Rd} = b h f_{cd} v = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 18300 \cdot 0,38 = 869 \text{ kN}$$

Επίσης,

$$d_1 = c_{nom} + d_{bh} + \frac{d_{bL}}{2} = 20 \text{ mm} + 8 \text{ mm} + \frac{18}{2} \text{ mm} = 37 \text{ mm}$$

### 3.1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Υπολογισμοί απαραίτητων παραμέτρων:

- $E_c = 22 f_c / 10^{0,3} = 26,4\text{GPa}$
- $E_s = 200\text{GPa}$
- $\alpha = E_c/E_s = 200/26,4=7,57$
- $d' = d_1 = 37\text{mm}$
- $d = h - d_1 = 463\text{mm}$
- $\delta' = \frac{d'}{d} = 0,08$
- $\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2\Phi 18}{250 \cdot 463} = 0,0044$
- $\rho' = \rho = 0,0044$
- $\rho_v = \frac{A_{sv}}{bd} = 0$

όπου τα  $\rho, \rho', \rho_v$ , προκύπτουν σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013.

ι) Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, τότε σύμφωνα το Παράρτημα 7Α του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, ισχύει:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}$$

$$A = 0,0044 + 0,0044 + 0 + \frac{869}{0,25 \cdot 0,463 \cdot 595500} = 0,0214$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y}$$

$$B = 0,0044 + 0,0044 \cdot 0,08 + 0,5 \cdot 0 \cdot (1 + 0,08) + \frac{869}{0,25 \cdot 0,463 \cdot 595500} = 0,017$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A$$

$$\xi_y = (7,57^2 \cdot 0,0214^2 + 2 \cdot 7,57 \cdot 0,017)^{1/2} - 7,57 \cdot 0,0214 = 0,370$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d}$$

$$\varphi_y = \frac{595,5}{200000 (1 - 0,370) 0,463} = 0,010$$

ii) Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος, τότε σύμφωνα το Παράρτημα 7Α του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, ισχύει:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1,8abdf_c}$$

$$A = 0,0044 + 0,0044 + 0 - \frac{869}{1,8 \cdot 7,57 \cdot 0,25 \cdot 0,463 \cdot 18300} = -0,021$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v \cdot 1 + \delta'$$

$$B = 0,0044 + 0,0044 \cdot 0,08 + 0,5 \cdot 0 \cdot 1 + 0,08 = 0,0047$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A$$

$$\xi_y = (7,57^2 \cdot 0,021^2 + 2 \cdot 7,57 \cdot 0,0047)^{1/2} + 7,57 \cdot 0,021 = 0,47$$

$$\varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d}$$

$$\varphi_y = \frac{1,8 \cdot 18,3}{26400 \cdot 0,47 \cdot 0,463} = 0,0057$$

Ισχύει ότι :

$$\varphi_y = \min 0,010; 0,0057 = 0,0057$$

Οπότε, με δεδομένη της καμπυλότητα στη διαρροή, μέσω της σχέσης (Α.6), υπολογίζεται η ροπή διαρροής, ως εξής: (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Παράρτημα 7<sup>Α</sup>, εξίσωση (Α.6))

$$\frac{M_y}{bd^3} = \varphi_y E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left[ 0,5 \cdot 1 + \delta' - \frac{\xi_y}{3} + \left( 1 - \xi_y \rho + \xi_y - \delta' \rho' + \frac{\rho_v}{6} \right) (1 - \delta') \right] \frac{E_s}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{M_y}{0,25 \cdot 0,463^3} &= 0,0057 \cdot 26,4 \cdot \frac{0,47^2}{2} \left[ 0,5 \cdot 1,08 - \frac{0,47}{3} \right. \\ &+ \left. \left( 1 - 0,47 \cdot 0,0044 + 0,47 - 0,08 \cdot 0,0044 + \frac{0}{6} \right) (1 - 0,08) \right] \cdot \frac{200}{2} \end{aligned}$$

Από όπου προκύπτει ότι:  $M_y = 209,6 kNm$

### 3.1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Από το αρχείο excel [3], προκύπτει ότι  $\varphi_u = 0,0158$ .

### 3.1.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Δεδομένα:

- $L_s = \frac{h_{net}}{2} = 1.5m$
- $z = d - d' = h - d_1 - d_1 = 500m - 37m - 37m = 426m$
- $d_{bl} = 18mm$
- $f_y = 595,5MPa$
- $\varphi_y = 0,0057$
- $a_v = 1$  (ακολουθεί αιτιολόγηση)

Διερεύνηση για το συντελεστή  $a_v$ :

- $V_{My} = M_y/L_s = 209.6kNm/1,5m = 140kN$

για το  $V_{R1}$ :

$$V_{R1} = \max \left[ 0,18 \min \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}; 2,00} \cdot 100\rho_l f_c^{\frac{1}{3}} \right. \right. \\ \left. \left. + 0,15 \min \left[ \frac{N_{ed}}{A_c}; 0,20f_c \right]; 0,035 \left( \min \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}; 2,00} \right] \right)^{3/2} f_c^{1/2} \right. \right. \\ \left. \left. + 0,15 \min \left[ \frac{N_{ed}}{A_c}; 0,20f_c \right] \cdot b_w d \right]$$

και έχουμε:

- $\rho_l = \frac{A_{se}\varphi}{bd} = \frac{2\Phi 18}{250 \cdot 463} = 0,0044$
- $d = 0,463m$
- $f_c = 18,3MPa$
- $N_{ed} = 869kN > 0$
- $A_c = 0,125m^2$
- $b_w = 0,25m$

Άρα:

$$V_{R1} = 132,75kN$$

$132,75kN < 140kN \Rightarrow V_{R1} < V_{My}$ , δηλαδή καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση.

Συνεπώς:  $a_v = 1$

Για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής διαρροής  $\theta_y$ , χρησιμοποιείται ο τύπος (Σ.2) από σελίδα 11 Κεφαλαίου 7 του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, και έχουμε:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v \cdot z}{3} + 0,0014 \left[ 1 + 1,5 \frac{h}{L_s} + \frac{\varphi_y \cdot d_{bl} \cdot f_y}{8 \cdot f_c} \right]$$

$$\theta_y = 0,0075$$

### 3.1.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Δεδομένα:

- $v = 0,38$
- $L_s = \frac{h_{net}}{2} = 1,5m$
- $\omega = \frac{A_{s1} f_y}{bh f_c} = \frac{2\Phi 18}{250 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = \frac{2 \cdot 254}{250 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = 0,132$
- $\omega' = \frac{A_{s2} f_y}{bh f_c} = \frac{2\Phi 18}{250 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = \frac{2 \cdot 254}{250 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = 0,132$
- $\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} = \frac{0,132}{0,132} = 1$
- $\rho_d = 0$  (για δισδιαγώνιο σπλισμό)
- $f_c = 18,3MPa$
- $f_{yw} = 595,5MPa$
- $\rho_s = \frac{A_{sx}}{b_w \cdot s_h} = \frac{2\Phi 8}{250 \cdot 200} = \frac{2 \cdot 50}{250 \cdot 200} = 0,002$
- $\alpha = 0,0185$

Τύπος (Σ.2):

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c^{0,225} \cdot (\alpha_s)^{0,35} \cdot 25^{(\rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1,25^{100\rho_d})$$

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^{0,38}) \cdot 1 \cdot 18,3^{0,225} \cdot \left(\frac{1,5}{0,5}\right)^{0,35} \cdot 25^{(0,0185 \cdot 0,002 \cdot \frac{595,5}{18,3})} \cdot (1,25^{100 \cdot 0})$$

$$\theta_{um} = 0,0287$$

### 3.1.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

- Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων:

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$$

$$\mu_\varphi = \frac{0,0158}{0,0057} = 2,77$$

- Δείκτης πλαστιμότητας τοπικών μετακινήσεων ή παραμορφώσεων:

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$$

$$\mu_\theta = \frac{0,0287}{0,0075} = 3,82$$

### 3.2.1 ΔΙΑΤΟΜΗ 2

Ισχύει ότι :

$$\frac{N_{Rd}}{bh f_c} = v \quad , \quad \text{άρα}$$



$$N_{Rd} = bhf_c v = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 18300 \cdot 0,38 = 1738,5 \text{ kN}$$

Επίσης,

$$d_1 = c_{nom} + d_{bh} + \frac{d_{bL}}{2} = 30 + 10 + \frac{20}{2} = 50 \text{ mm}$$

### 3.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Υπολογισμοί απαραίτητων παραμέτρων:

- $E_c = 22 f_c / 10^{0,3} = 26,4 \text{ GPa}$
- $E_s = 200 \text{ GPa}$
- $a = E_c / E_s = 200 / 26,4 = 7,57$
- $d' = d_1 = 50 \text{ mm}$
- $d' = h - d_1 = 450 \text{ mm}$
- $\delta' = \frac{d'}{d} = 0,111$
- $\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2\Phi 18 + 1\Phi 20}{500 \cdot 450} = 0,00365$
- $\rho' = \rho = 0,00365$
- $\rho_v = \frac{A_{sv}}{bd} = \frac{4\Phi 18 + 2\Phi 20}{500 \cdot 450} = 0,0073$

όπου τα  $\rho, \rho', \rho_v$ , προκύπτουν σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013.

i) Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, τότε σύμφωνα το Παράρτημα 7Α του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, ισχύει:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}$$

$$A = 0,00365 + 0,00365 + 0,0073 + \frac{1738,5}{0,5 \cdot 0,45 \cdot 595500} = 0,0275$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y}$$

$$B = 0,00365 + 0,00365 \cdot 0,111 + 0,5 \cdot 0,0073 \cdot (1 + 0,111) + \frac{1738,5}{0,5 \cdot 0,45 \cdot 595500} = 0,021$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A$$

$$\xi_y = (7,57^2 \cdot 0,0275^2 + 2 \cdot 7,57 \cdot 0,021)^{1/2} - 7,57 \cdot 0,0275 = 0,393$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y) d}$$

$$\varphi_y = \frac{595,5}{200000 (1 - 0,393) 0,45} = 0,011$$

ii) Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος, τότε σύμφωνα το Παράρτημα 7Α του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, ισχύει:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{1,8abdf_c}$$

$$A = 0,00365 + 0,00365 + 0,0073 - \frac{1738,5}{1,8 \cdot 7,57 \cdot 0,5 \cdot 0,45 \cdot 18300} = -0,0164$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta')$$

$$B = 0,00365 + 0,00365 \cdot 0,111 + 0,5 \cdot 0,0073 \cdot (1 + 0,111) = 0,0081$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A$$

$$\xi_y = (7,57^2 \cdot 0,0164^2 + 2 \cdot 7,57 \cdot 0,0081)^{1/2} + 7,57 \cdot 0,0164 = 0,495$$

$$\varphi_y = \frac{1,8f_c}{E_c \xi_y d}$$

$$\varphi_y = \frac{1,8 \cdot 18,3}{26400 \cdot 0,495 \cdot 0,45} = 0,0056$$

Ισχύει ότι :

$$\varphi_y = \min 0,011; 0,0056 = 0,0056$$

Οπότε, με δεδομένη της καμπυλότητα στη διαρροή, μέσω της σχέσης (Α.6), υπολογίζεται η ροπή διαρροής, ως εξής: (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Παράρτημα 7<sup>Α</sup>, εξίσωση (Α.6))

$$\frac{M_y}{bd^3} = \varphi_y E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left[ 0,5 (1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} + (1 - \xi_y) \rho + \xi_y - \delta' \rho' + \frac{\rho_v}{6} (1 - \delta') \right] \frac{E_s}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{M_y}{0,50 \cdot 0,45^3} &= 0,0056 \cdot 26,4 \cdot \frac{0,495^2}{2} \left[ 0,5 \cdot 1,111 - \frac{0,495}{3} \right. \\ &+ \left. (1 - 0,495) \cdot 0,00365 + (0,495 - 0,111) \cdot 0,00365 \right. \\ &+ \left. \frac{0,0073}{6} (1 - 0,111) + (1 - 0,111) \cdot \frac{200}{2} \right] \end{aligned}$$

Από όπου προκύπτει ότι:  $M_y = 420.38kNm$

### 3.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Από το αρχείο excel [3], προκύπτει ότι  $\varphi_u = 0,1474$ .

### 3.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Δεδομένα:

- $L_s = \frac{h_{net}}{2} = 1.5m$
- $z = z = d - d' = h - d_1 - d_1 = 500m - 50m - 50m = 400m$
- $d_{bl} = \frac{20mm+18mm}{2} = 19mm$
- $f_y = 595,5MPa$
- $\varphi_y = 0,0056$
- $a_v = 1$  (ακολουθεί αιτιολόγηση)

Διερεύνηση για το συντελεστή  $a_v$ :

- $V_{My} = M_y/L_s = 420,38kNm/1,5m = 280,25kN$

για το  $V_{R1}$ :

$$V_{R1} = \max \left\{ 0,18 \min \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2,00 \right] 100\rho_l f_c \frac{1}{3} \right. \\ \left. + 0,15 \min \left[ \frac{N_{ed}}{A_c}; 0,20f_c \right]; 0,035 \left( \min \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2,00 \right] \right)^{3/2} f_c^{1/2} \right. \\ \left. + 0,15 \min \left[ \frac{N_{ed}}{A_c}; 0,20f_c \right] b_w d \right\}$$

και έχουμε:

- $\rho_l = \frac{A_{se\varphi}}{bd} = \frac{2\Phi 20 + 2\Phi 18 + 2\Phi 18 \frac{60,3}{181}}{500 \cdot 450} = 0,0058$
- $d = 0,45m$
- $f_c = 18,3MPa$
- $N_{ed} = 1738,5kN > 0$
- $A_c = 0,25m^2$
- $b_w = 0,50m$

Άρα:

$$V_{R1} = 271,9kN$$

$271,9kN < 280,25kN \Rightarrow V_{R1} < V_{My}$ , δηλαδή καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση.

Συνεπώς:  $a_v = 1$

Για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής διαρροής  $\theta_y$ , χρησιμοποιείται ο τύπος (Σ.2) από σελίδα 11 Κεφαλαίου 7 του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, και έχουμε:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v \cdot z}{3} + 0,0014 \left[ 1 + 1,5 \frac{h}{L_s} + \frac{\varphi_y \cdot d_{bl} \cdot f_y}{8 \cdot f_c} \right]$$

$$\theta_y = 0,0075$$

### 3.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Δεδομένα:

- $v = 0,38$
- $L_s = \frac{h_{net}}{2} = 1,5m$
- $\omega' = \frac{A_{s2} f_y}{bh f_c} = \frac{2\Phi18+2\Phi20}{500 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = \frac{2 \cdot 254 + 2 \cdot 314}{500 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = 0,148$
- $\omega = \frac{A_{s1} + A_{sv}}{bh} \frac{f_y}{f_c} = \frac{2\Phi18+2\Phi20 + 4\Phi18}{500 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = \frac{2 \cdot 254 + 2 \cdot 314 + 4 \cdot 254}{500 \cdot 500} \cdot \frac{595,5}{18,3} = 0,280$
- $\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} = \frac{0,148}{0,280} = \frac{37}{70} = 0,529$
- $\rho_d = 0$  (για δισδιαγώνιο οπλισμό)
- $f_c = 18,3MPa$
- $f_{yw} = 595,5MPa$
- $\rho_s = \frac{A_{sx}}{b_w \cdot s_h} = \frac{4\Phi10}{500 \cdot 120} = \frac{4 \cdot 79}{500 \cdot 120} = 0,00527$
- $\alpha = 0,5765$

Τύπος (Σ.2):

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c^{0,225} \cdot (\alpha_s)^{0,35} \cdot 25^{(\alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} \cdot (1,25^{100\rho_d})$$

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^{0,38}) \frac{1}{3} \cdot 18,3^{0,225} \cdot \left(\frac{1,5}{0,5}\right)^{0,35} \cdot 25^{(0,5765 \cdot 0,00527 \cdot \frac{595,5}{18,3})} \cdot (1,25^{100 \cdot 0})$$

$$\theta_{um} = 0,0307$$

### 3.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

- Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων:

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$$

$$\mu_\varphi = \frac{0,1474}{0,0056} = 26,32$$

- Δείκτης πλαστιμότητας τοπικών μετακινήσεων ή παραμορφώσεων:

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$$

$$\mu_\theta = \frac{0,0307}{0,0075} = 4,09$$

#### 4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

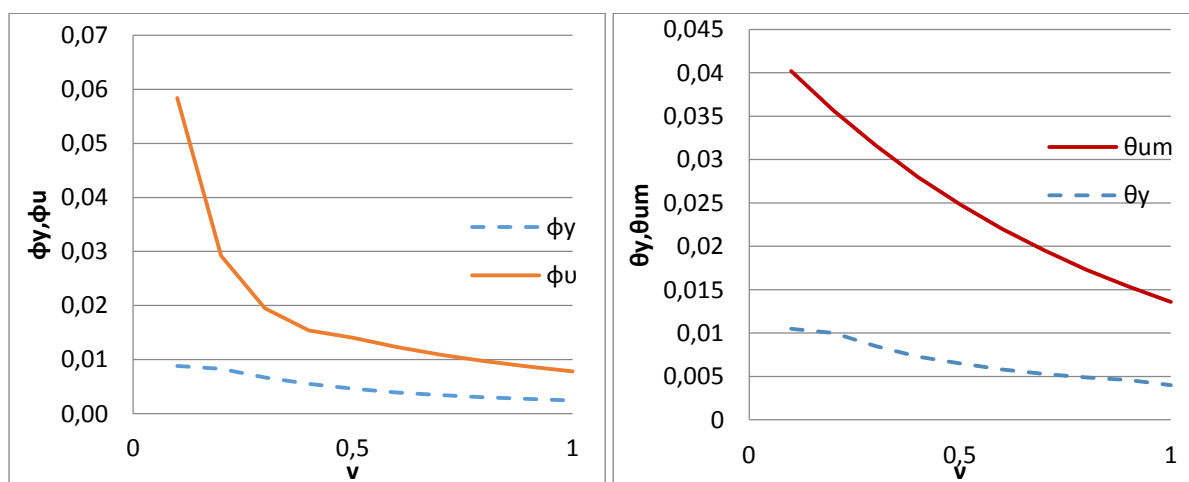
Οι διατομές 1 και 2 παραμετροποιούνται ως προς διάφορες μεταβλητές, οι οποίες είναι η ανηγμένη αξονική  $\nu$ , ο συντελεστής  $a_\nu$  (παίρνοντας τις τιμές 0 και 1) και η μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$ . Στη συνέχεια, σχεδιάζονται τα διαγράμματα  $\phi_\gamma$ ,  $\phi_u$ ,  $\mu_\phi$ ,  $\theta_\gamma$ ,  $\theta_{um}$  και  $\mu_\theta$  ως προς την αντίστοιχη μεταβλητή κάθε φορά.

##### 4.1. ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ

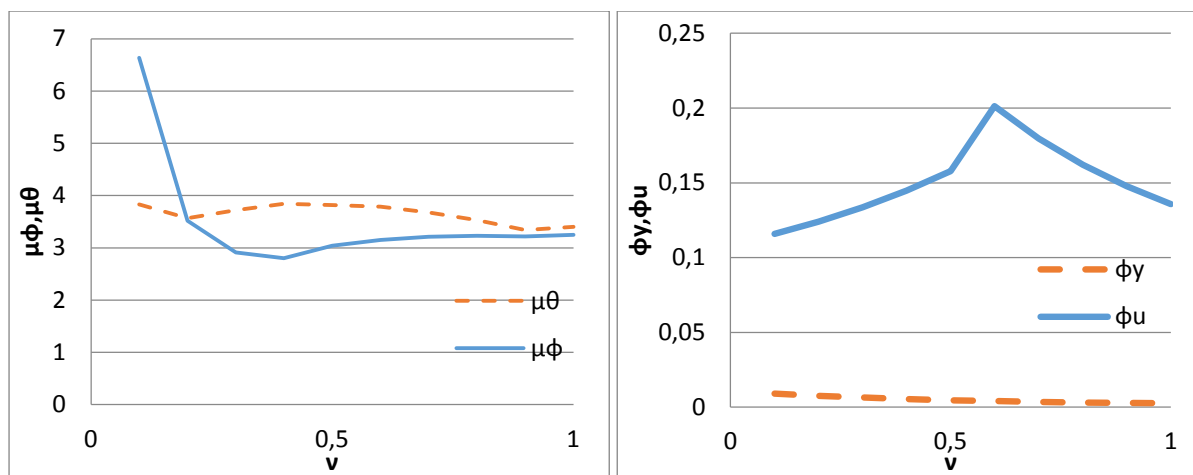
Οι διατομές παραμετροποιούνται ως προς την ανηγμένη αξονική  $\nu$ , η οποία παίρνει τιμές από  $\nu=0,1$  έως  $\nu=1$ . Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα και οι αντίστοιχοι πίνακες από τους οποίους αυτά προήλθαν.

$\nu$	$\phi_\gamma$	$\phi_{um}$	$\mu_\phi$	$\theta_\gamma$	$\theta_{um}$	$\mu_\theta$	$\mu_\phi-1$	$\mu_\theta-1$	$(\mu_\phi-1)/(\mu_\theta-1)$
0,1	0,0088	0,0584	6,64	0,0105	0,0402	3,83	5,64	2,83	<b>2,0</b>
0,2	0,0083	0,0292	3,52	0,01	0,035667	3,57	2,52	2,57	<b>1,0</b>
0,3	0,0067	0,0195	2,91	0,0085	0,03162	3,72	1,91	2,72	<b>0,7</b>
0,4	0,0055	0,0154	2,80	0,0073	0,028	3,84	1,8	2,84	<b>0,6</b>
0,5	0,0046	0,014	3,04	0,0065	0,02485	3,82	2,04	2,82	<b>0,7</b>
0,6	0,0039	0,0123	3,15	0,0058	0,022	3,79	2,15	2,79	<b>0,8</b>
0,7	0,0034	0,0109	3,21	0,0053	0,01953	3,68	2,21	2,68	<b>0,8</b>
0,8	0,003	0,0097	3,23	0,0049	0,0173	3,53	2,23	2,53	<b>0,9</b>
0,9	0,0027	0,0087	3,22	0,0046	0,01535	3,34	2,22	2,34	<b>0,9</b>
1	0,0024	0,0078	3,25	0,004	0,0136	3,40	2,25	2,4	<b>0,9</b>

Πίνακας 1. Για διατομή 1 και μεταβαλλόμενη ανηγμένη αξονική  $\nu$



Διάγραμμα 1,2. Μεταβολή της καμπυλότητας διαρροής ( $\phi_\gamma$ ) και της καμπυλότητας αστοχίας ( $\phi_u$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) (αριστερά) και μεταβολή της γωνίας στρωφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_\gamma$ ) και της γωνίας στρωφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 1 (δεξιά).



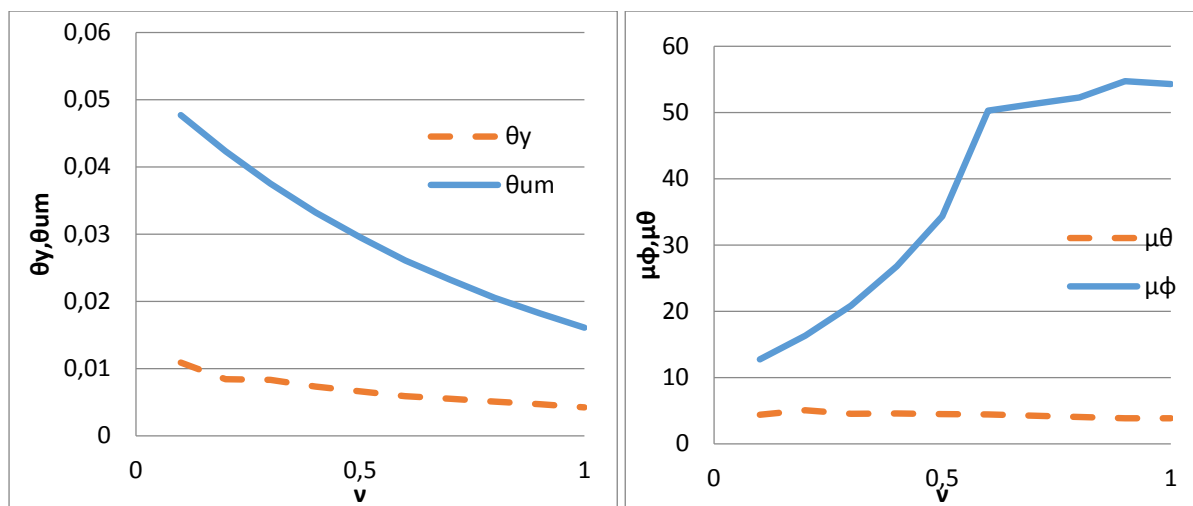
Διάγραμμα 3,4. Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας ( $\mu\phi$ ) και ( $\mu\theta$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 1 (αριστερά) και μεταβολή της καμπυλότητας διαρροής ( $\phi\gamma$ ) και της καμπυλότητας αστοχίας ( $\phi\upsilon$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 2 (δεξιά).

Από το διάγραμμα 1,2,3 προκύπτουν τα ακόλουθα όσον αφορά τη διατομή 1 με παράμετρο την ανηγμένη αξονική  $\nu$ .

- Το  $\phi\gamma$  μειώνεται σχεδόν ομαλά με την αύξηση της αξονικής.
- Το  $\phi\upsilon$  μειώνεται γραμμικά με μεγάλη κλίση μέχρι  $\nu=0,2$  και συνεχίζει πτωτικά με μικρότερες κλίσεις έως  $\nu=0,6$  από την οποία και μετά διατηρεί μια σχεδόν σταθερή τιμή (0,01).
- Το  $\mu\phi$  μειώνεται με σχετικά μεγάλη κλίση μέχρι  $\nu=0,2$  και στη συνέχεια διατηρεί μια σχεδόν σταθερή τιμή μέχρι τέλους.
- Το  $\theta\gamma$  μειώνεται με μικρή κλίση μέχρι τιμή  $\nu=0,2$  και στην συνέχεια με μεγαλύτερη κλίση  $\nu=1$ .
- Το  $\theta_{um}$  μειώνεται σχεδόν παραβολικά με την αύξηση του  $\nu$ .
- Το  $\mu\theta$  αυξομειώνεται, σε πολύ μικρό εύρος τιμών όμως, με ελάχιστη τιμή το 3,34 και μέγιστη το 3,84.

$\nu$	$\phi\gamma$	$\phi_{um}$	$\mu\phi$	$\theta\gamma$	$\theta_{um}$	$\mu\theta$	$\mu\phi-1$	$\mu\theta-1$	$(\mu\phi-1)/(\mu\theta-1)$
0,1	0,0091	0,1158	12,73	0,0109	0,0477	4,38	11,73	3,38	<b>3,5</b>
0,2	0,0076	0,1241	16,33	0,0084	0,0423	5,04	15,33	4,04	<b>3,8</b>
0,3	0,0064	0,1336	20,88	0,0083	0,0375	4,52	19,88	3,52	<b>5,6</b>
0,4	0,0054	0,1448	26,81	0,0073	0,0332	4,55	25,81	3,55	<b>7,3</b>
0,5	0,0046	0,1579	34,33	0,0066	0,0295	4,47	33,33	3,47	<b>9,6</b>
0,6	0,004	0,2012	50,30	0,0059	0,0261	4,42	49,3	3,42	<b>14,4</b>
0,7	0,0035	0,1796	51,31	0,0055	0,0232	4,22	50,3	3,22	<b>15,6</b>
0,8	0,0031	0,1621	52,29	0,0051	0,0205	4,02	51,29	3,02	<b>17,0</b>
0,9	0,0027	0,1478	54,74	0,0047	0,0182	3,87	53,74	2,87	<b>18,7</b>
1	0,0025	0,1357	54,28	0,0042	0,0161	3,83	53,28	2,83	<b>18,8</b>

Πίνακας 2. Για διατομή 2 και μεταβαλλόμενη ανηγμένη αξονική  $\nu$



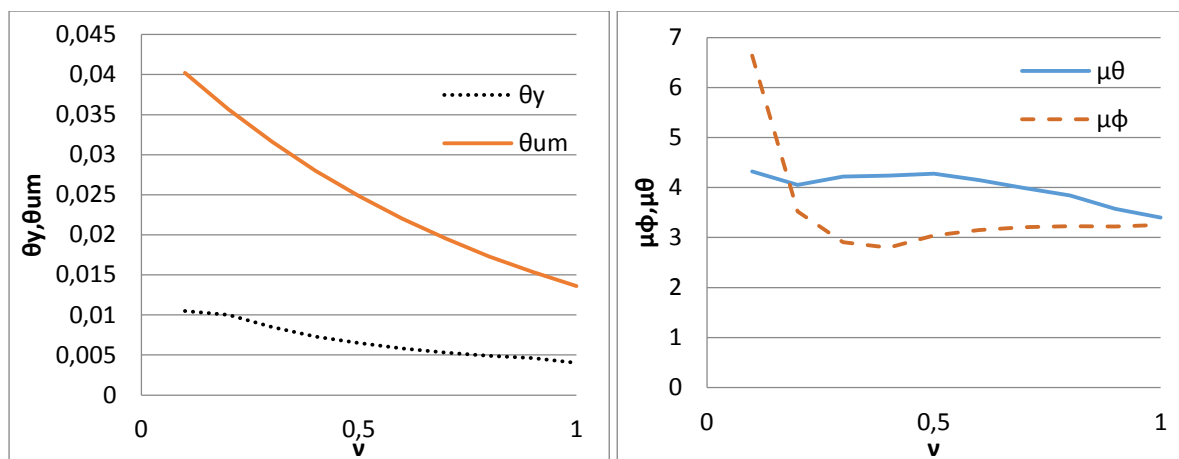
Διάγραμμα 5.6. Μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_\gamma$ ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 2 (αριστερά) και Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας ( $\mu\phi$ ) και ( $\mu\theta$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 2 (δεξιά).

Από το διάγραμμα 4,5,6 προκύπτουν τα ακόλουθα όσον αφορά τη διατομή 2 με παράμετρο την ανηγμένη αξονική  $\nu$ .

- Το  $\phi_\gamma$  μειώνεται παραβολικά με την αύξηση του  $\nu$ .
- Το  $\phi_u$  αυξάνεται μέχρι μια μέγιστη τιμή (0,2012) για  $\nu=0,6$  και στη συνέχεια μειώνεται.
- Το  $\mu\phi$  αυξάνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $\nu=0,6$  και έπειτα συνεχίζει αυξητικά με αρκετά μικρότερες όμως κλίσεις.
- Το  $\theta_\gamma$  μειώνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $\nu=0,2$  και στη συνέχεια με μικρότερες.
- Το  $\theta_{um}$  μειώνεται παραβολικά με την αύξηση του  $\nu$ .
- Το  $\mu\theta$  αυξάνεται μέχρι  $\nu=0,2$  και στη συνέχεια μειώνεται, και πάλι όμως με μικρό εύρος τιμών (3,83-5,04).

#### 4.2. ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $a_\nu$

Αυτή τη φορά γίνεται παραμετροποίηση και πάλι ως προς την αξονική  $\nu$  αλλά και ως προς το συντελεστή  $a_\nu$ , ο οποίος παίρνει τις τιμές 0 και 1. Η τιμή «0» αντιστοιχεί όταν κρίσιμη της διαρροής είναι η κάμψη, ενώ η τιμή «1» όταν κρίσιμη της διαρροής είναι η διάτμηση. Άρα, στο σημείο αυτό αναπαράγονται όλοι οι υπολογισμοί και τα διαγράμματα μια φορά για  $a_\nu = 0$  και  $\nu=0,1-1$  και άλλη μια για  $a_\nu = 1$  και  $\nu=0,1-1$ . Ακολουθούν κάποια διαγράμματα (οι πίνακες δεν επισυνάπτονται καθώς όπως φαίνεται και παρακάτω, τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια με της παραγράφου 4.1):



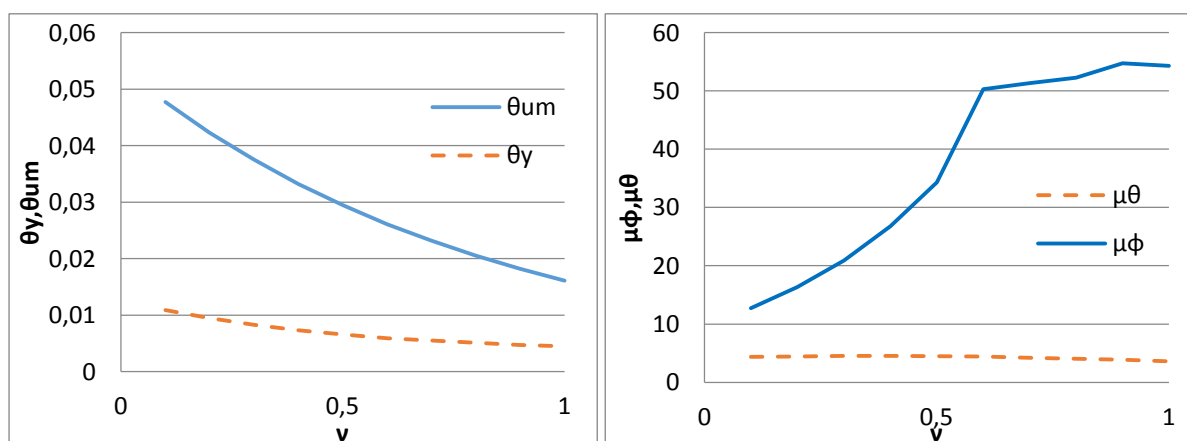
Διάγραμμα 7,8. Μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_{\gamma}$ ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 1 και  $a_{\nu}=0$  (αριστερά) και μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας ( $\mu_{\phi}$ ) και ( $\mu_{\theta}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 1 και  $a_{\nu}=0$  (δεξιά).

Από τα διαγράμματα 7,8 για τη διατομή 1 και  $a_{\nu} = 0$  (καθοριστική της διαρροής η κάμψη) προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Όπως φαίνεται από τους τύπους του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, οι όροι  $\phi_{\gamma}, \phi_u, \mu_{\phi}, \theta_{um}$  είναι ανεξάρτητοι του  $a_{\nu}$ .
- Το  $\theta_{\gamma}$  διατηρεί την ίδια μορφή όπως στη περίπτωση 1 αλλά με μικρότερες συγκριτικά τιμές.
- Το  $\mu_{\theta}$  διατηρεί και αυτό την ίδια μορφή με πριν με αντίστοιχα μεγαλύτερες τιμές.

Επίσης, για τη διατομή 1 και  $a_{\nu} = 1$  (καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση):

- Τα  $\theta_{\gamma}$  και  $\mu_{\theta}$  δεν μεταβαλλονται σε σχέση με την περίπτωση 1 παρά μόνο για  $\nu=0,9-1$  και αυτό γιατί όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς κρίσιμη είναι η διάτμηση για τη διαρροή.



Διάγραμμα 9,10. Μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_{\gamma}$ ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 2 και  $a_{\nu}=1$  (αριστερά) και μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας ( $\mu_{\phi}$ ) και ( $\mu_{\theta}$ ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ( $\nu$ ) για τη διατομή 2 και  $a_{\nu}=1$  (δεξιά).



Από τα διαγράμματα 9,10 για τη διατομή 2 και  $a_v = 0$  (καθοριστική της διαρροής η κάμψη) προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Όπως φαίνεται από τους τύπους του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, οι όροι  $\phi_y, \phi_u, \mu\phi, \theta_{um}$  είναι ανεξάρτητοι του  $a_v$ .
- Το  $\theta_y$  παίρνει μικρότερες, συγκριτικά με την περίπτωση 1, τιμές.
- Το  $\mu\theta$  έχει σχεδόν παραβολική μορφή με μεγαλύτερες, από την περίπτωση 1, τιμές.

Επίσης, για τη διατομή 2 και  $a_v = 1$  (καθοριστική της διαρροής η διάτμηση):

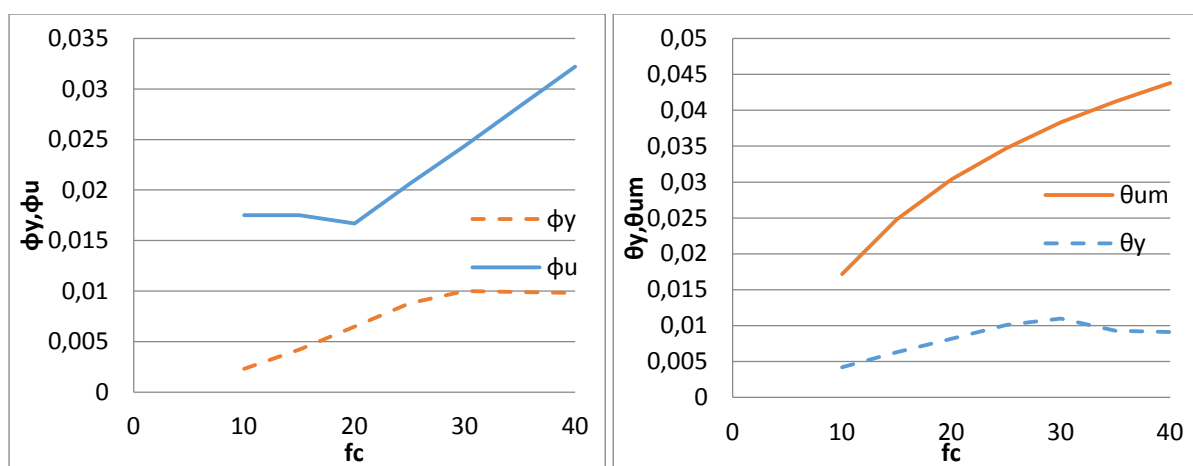
- Τα  $\theta_y$  και  $\mu\theta$  δεν μεταβαλλονται σε σχέση με την περίπτωση 1 παρά μόνο για  $v=0,1-0,3$  και αυτό γιατί όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς κρίσιμη είναι η διάτμηση για τη διαρροή.

### 4.3.1 ΜΕΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ $f_c$

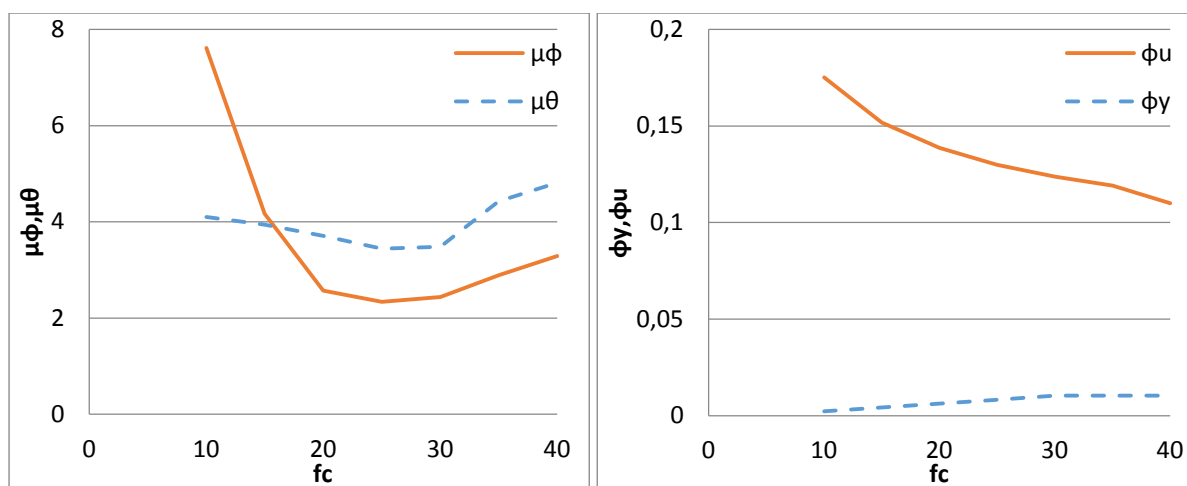
Ως παράμετρος εκλέγεται η μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$  σε συνάρτηση με τα μεγέθη που έχουν προαναφερθεί.. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα και οι αντίστοιχοι πίνακες από τους οποίους αυτά προήλθαν.

$f_c$	$\phi_y$	$\phi_{um}$	$\mu\phi$	$\theta_y$	$\theta_{um}$	$\mu\theta$	$\mu\phi-1$	$\mu\theta-1$	$(\mu\phi-1)/(\mu\theta-1)$
10	0,0023	0,0175	7,61	0,0042	0,0172	4,10	6,61	3,1	2,1
15	0,0042	0,0175	4,17	0,0063	0,0248	3,94	3,17	2,94	1,1
20	0,0065	0,0167	2,57	0,0082	0,0304	3,71	1,57	2,71	0,6
25	0,0088	0,0206	2,34	0,0101	0,0347	3,44	1,34	2,44	0,5
30	0,01	0,0244	2,44	0,011	0,0383	3,48	1,44	2,48	0,6
35	0,0099	0,0283	2,86	0,0093	0,0412	4,43	1,89	3,43	0,6
40	0,0098	0,0322	3,29	0,0091	0,0438	4,81	2,29	3,81	0,6

Πίνακας 3. Για διατομή 1 και μεταβαλλόμενη μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$



Διάγραμμα 11,12. Μεταβολή της καμπυλότητας διαρροής ( $\phi_y$ ) και της καμπυλότητας αστοχίας ( $\phi_u$ ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 1 (αριστερά) και μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_y$ ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 1 (δεξιά).



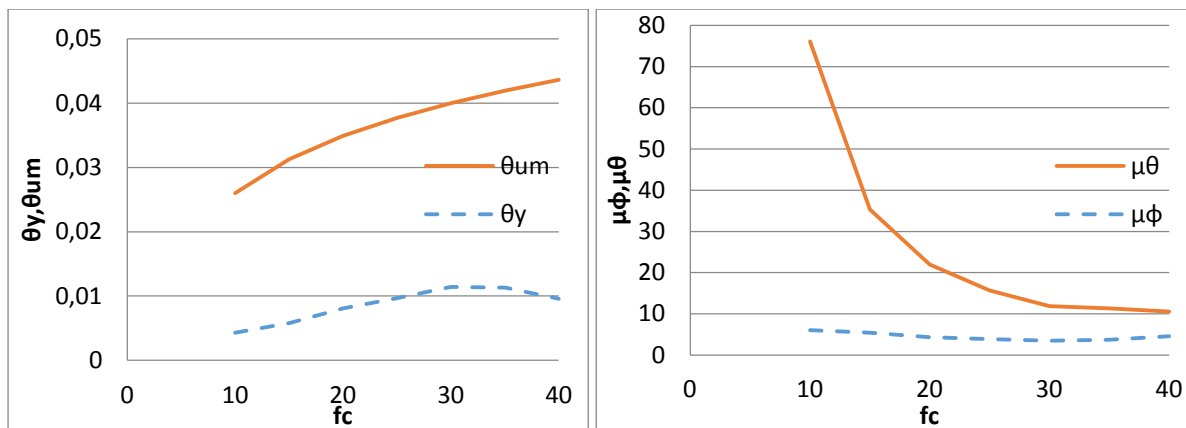
Διάγραμμα 13,14. Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας (μφ) και (μθ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 1 (αριστερά) και μεταβολή της καμπυλότητας διαρροής ( $\phi_\gamma$ ) και της καμπυλότητας αστοχίας ( $\phi_u$ ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 2 (δεξιά).

Από τα διαγράμματα 11,12,13 προκύπτουν τα ακόλουθα όσον αφορά τη διατομή 1 με παράμετρο τη μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$ :

- Το  $\phi_\gamma$  αυξάνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση του  $f_c$  μέχρι τιμή  $f_c = 30MPa$ , από την οποία και μετά διατηρεί σταθερή τιμή και ίση με 0,01 μέχρι  $f_c = 40MPa$ .
- Το  $\phi_u$  διατηρείται σταθερό μέχρι  $f_c = 20MPa$  και τιμή 0,0175 και στη συνέχεια αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του  $f_c$  μέχρι τιμή 0,0322.
- Το  $\mu_\phi$  μειώνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $f_c = 20MPa$  και στη συνέχεια με μικρότερη μέχρι τιμή  $f_c = 20 - 30 MPa$  που σχεδόν και σταθεροποιείται για να συνεχίσει με μικρή αύξηση μέχρι  $f_c = 40MPa$ .
- Το  $\theta_\gamma$  αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι  $f_c = 30MPa$  και στη συνέχεια μειώνεται με μεταβαλλόμενη κλίση.
- Το  $\theta_{um}$  αυξάνεται παραβολικά με την αύξηση του  $f_c$ .
- Το  $\mu_\theta$  παρουσιάζει μικρή μείωση μέχρι  $f_c = 30MPa$  και στη συνέχεια αυξάνει.

fc	$\phi_\gamma$	$\phi_{um}$	$\mu_\phi$	$\theta_\gamma$	$\theta_{um}$	$\mu_\theta$	$\mu_\phi-1$	$\mu_\theta-1$	$(\mu_\phi-1)/(\mu_\theta-1)$
10	0,0023	0,1751	76,13	0,0043	0,026	6,05	66,13	5,05	<b>13,1</b>
15	0,0043	0,1518	35,30	0,0058	0,03127	5,39	34,3	4,39	<b>7,8</b>
20	0,0063	0,1386	22,00	0,0081	0,0349	4,31	21	3,31	<b>6,3</b>
25	0,0083	0,1299	15,65	0,0097	0,0377	3,89	14,65	2,89	<b>5,1</b>
30	0,0104	0,1237	11,89	0,0114	0,04	3,51	10,89	2,51	<b>4,3</b>
35	0,0105	0,1191	11,34	0,0113	0,0419	3,71	10,34	2,71	<b>3,8</b>
40	0,0104	0,11	10,58	0,0096	0,0436	4,54	9,58	3,54	<b>2,7</b>

Πίνακας 4. Για διατομή 2 και μεταβαλλόμενη μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$



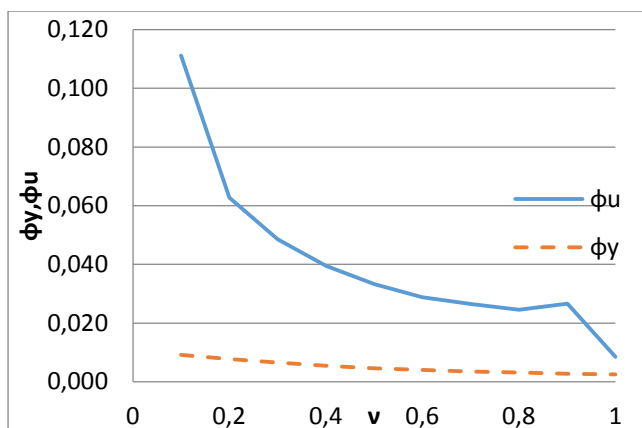
Διάγραμμα 15,16. Μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή ( $\theta_y$ ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία ( $\theta_{um}$ ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 2 (αριστερά) και μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας ( $\mu\phi$ ) και ( $\mu\theta$ ) σε συνάρτηση με τη μέση θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) για τη διατομή 2 (δεξιά).

Από τα διαγράμματα 14,15,16 προκύπτουν τα ακόλουθα όσον αφορά τη διατομή 2 με παράμετρο τη μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$ :

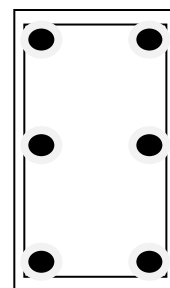
- Το  $\phi_y$  αυξάνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση του  $f_c$  μέχρι τιμή  $f_c = 30MPa$ , από την οποία και μετά διατηρεί σταθερή τιμή και ίση με 0,01.
- Το  $\phi_u$  μειώνεται με την αύξηση του  $f_c$  σχεδόν παραβολικά.
- Το  $\mu\phi$  μειώνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $f_c = 15MPa$  και στη συνέχεια με μικρότερη μέχρι την τιμή  $f_c = 30MPa$  όπου και σχεδόν σταθεροποιείται μέχρι  $f_c = 40MPa$ .
- Το  $\theta_y$  αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι  $f_c = 30MPa$ , στη συνέχεια διατηρείται σταθερό μέχρι τα  $35MPa$  και τέλος μειώνεται μέχρι τα  $40MPa$ .
- Το  $\theta_{um}$  αυξάνεται παραβολικά με την αύξηση του  $f_c$ .
- Το  $\mu\theta$  έχει με την ίδια συμπεριφορά που έχει και για στην περίπτωση της διατομής 1, με ελαφρώς αυξημένες τιμές.

#### 4.4.1 ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ –«ΝΕΑ» ΔΙΑΤΟΜΗ 1

Στην αρχική διατομή 1, προστεθήκαν 2 επιπλέον διαμήκη σίδηρα  $\Phi 18$  για να γίνει σύγκριση των δυο διατομών ως προς τα παραμορφωσιακά μεγέθη. Ακολουθεί η καινούργια διατομή και κατόπιν κάποια σχετικά διαγράμματα και πίνακες:



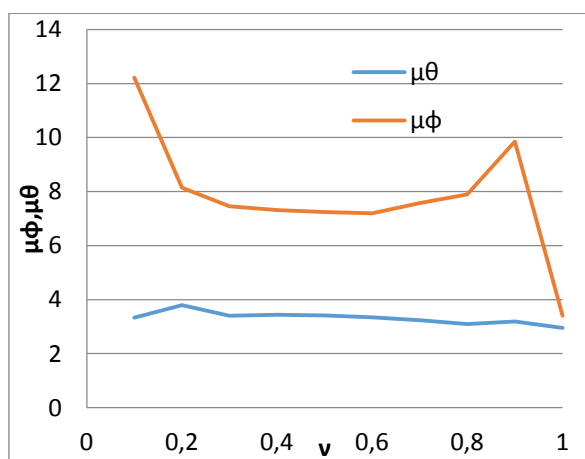
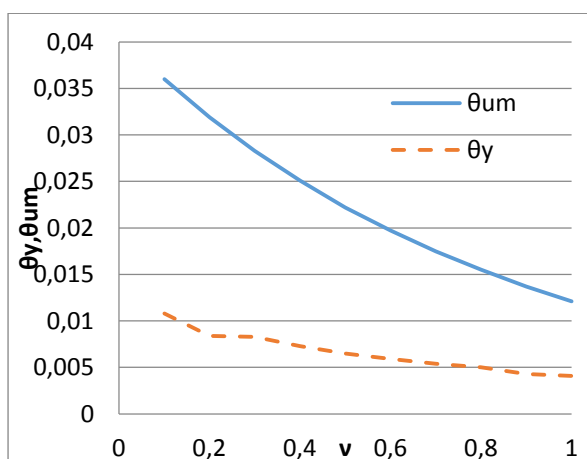
Διάγραμμα 17. Μεταβολή της καμπυλότητας διαρροής (φγ) και της καμπυλότητας αστοχίας (φυ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική (ν) για την νέα διατομή.



Σχήμα 2. Νέα διατομή 1

ν	φγ	φ <sub>υμ</sub>	μφ	θγ	θ <sub>υμ</sub>	μθ	μφ-1	μθ-1	(μφ-1)/(μθ-1)
0,1	0,0091	0,1112	12,22	0,0108	0,036	3,33	11,22	2,33	<b>4,8</b>
0,2	0,0077	0,0627	8,14	0,0084	0,0319	3,80	7,17	2,8	<b>2,6</b>
0,3	0,0065	0,0485	7,46	0,0083	0,0283	3,41	6,46	2,41	<b>2,7</b>
0,4	0,0054	0,0395	7,31	0,0073	0,0251	3,44	6,31	2,44	<b>2,6</b>
0,5	0,0046	0,0333	7,24	0,0065	0,0222	3,42	6,24	2,42	<b>2,6</b>
0,6	0,004	0,0288	7,20	0,0059	0,0197	3,34	6,2	2,34	<b>2,6</b>
0,7	0,0035	0,0265	7,57	0,0054	0,01749	3,24	6,57	2,24	<b>2,9</b>
0,8	0,0031	0,0245	7,90	0,005	0,0155	3,10	6,9	2,1	<b>3,3</b>
0,9	0,0027	0,0266	9,85	0,0043	0,0137	3,19	8,85	2,19	<b>4,0</b>
1	0,0025	0,0085	3,40	0,0041	0,0121	2,95	2,4	1,95	<b>1,2</b>

Πίνακας 5. Για τη διατομή 1' και μεταβαλλόμενη ανηγμένη αξονική ν



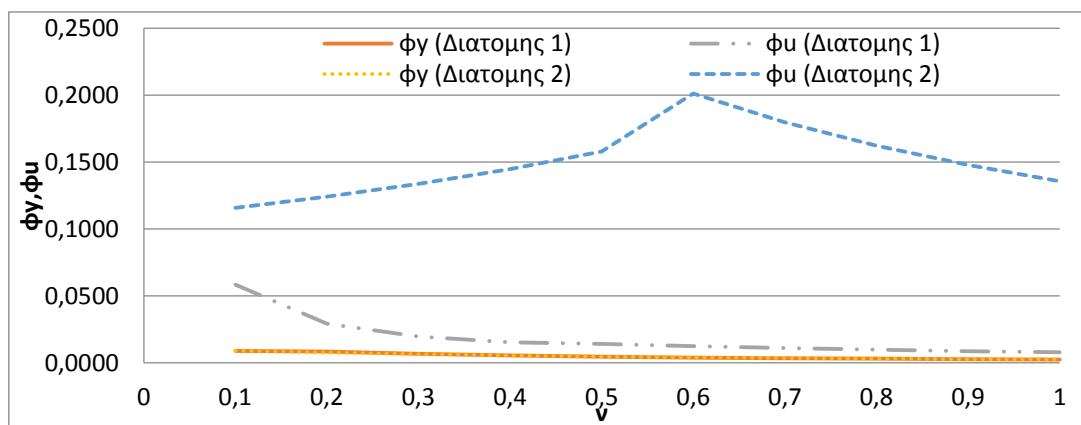
Διάγραμμα 18. Μεταβολή της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή (θγ) και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία (θ<sub>υμ</sub>) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική (ν) για την νέα διατομή (αριστερά) και μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας (μφ) και (μθ) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική (ν) για τη νέα διατομή (δεξιά).

Για την «νέα» διατομή 1 σε σύγκριση με την «παλιά» από τα διαγράμματα 17,18 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το  $\varphi_y$  μειώνεται παραβολικά με την αύξηση του  $v$ .
- Το  $\varphi_u$  μειώνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $v=0,2$ , συνεχίζει παραβολικά μέχρι  $v=0,9$  όπου και πέφτει πάλι με μεγάλη κλίση.
- Το  $\mu\varphi$  μειώνεται με μεγάλη κλίση μέχρι  $v=0,2$ , συνεχίζει παραβολικά μέχρι  $v=0,8$ , αυξάνεται και πάλι μέχρι  $v=0,9$  για να μειωθεί με μεγάλη κλίση και πάλι μέχρι  $v=1$ .
- Το  $\theta_y$  μειώνεται σχεδόν παραβολικά με την αύξηση του  $v$ .
- Το  $\theta_{um}$  μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του  $v$ .
- Το  $\mu\theta$  αυξάνει για λίγο μέχρι  $v=0,2$  και μετά σχεδόν σταθεροποιείται γύρω από μια τιμή (3,3).

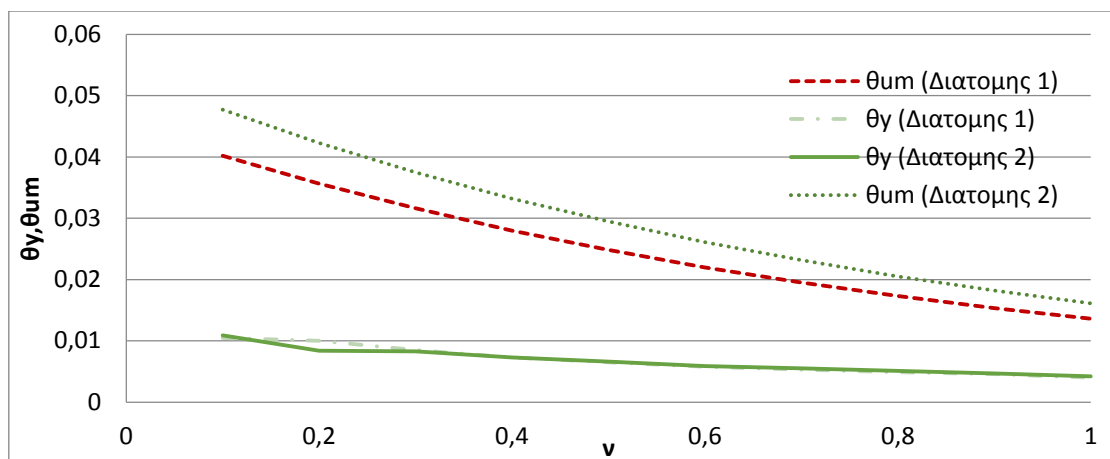
#### 4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ 1 ΚΑΙ 2 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Στο σημείο αυτό, γίνεται σύγκριση των μεγεθών  $\varphi_y$ ,  $\varphi_u$ ,  $\mu\theta$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_{um}$  και  $\mu\theta$  των δυο διατομών μεταξύ τους για κάποιες από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν προηγουμένως. Αυτό γίνεται, με τη βοήθεια των παρακάτω διαγραμμάτων.



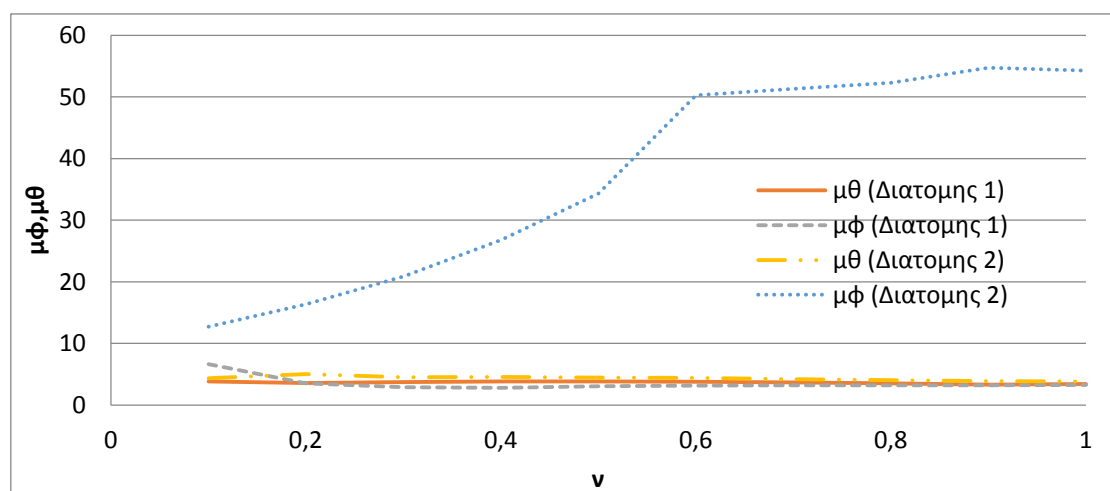
Διάγραμμα 19, Μεταβολή  $\varphi_y$ ,  $\varphi_u$  διατομής 1 και διατομής 2 σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική.

Από το διάγραμμα 19 φαίνεται ότι το  $\varphi_y$  και στις δυο διατομές είναι περίπου το ίδιο για όλες τις τιμές του  $v$ , ενώ το  $\varphi_u$  της διατομής 2 είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι εκείνο της διατομής 1. Τα παραπάνω έχουν ως επακόλουθο ότι και το  $\mu\theta$  της διατομής 2 θα είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι εκείνο της 1.



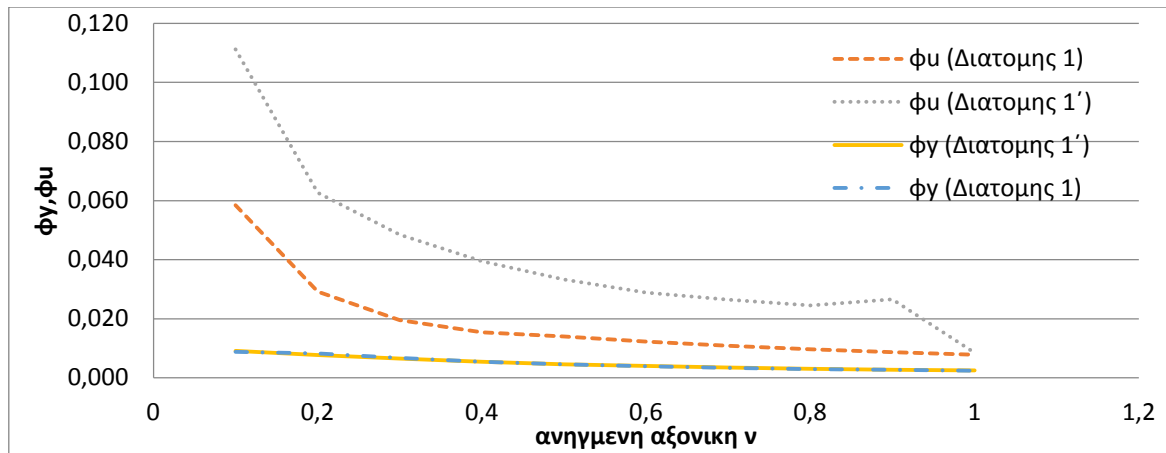
Διάγραμμα 20. Μεταβολή  $\theta\gamma$ ,  $\theta_{um}$  διατομής 1 και 2 σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική  $\nu$

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 20, τα μεγέθη που σχετίζονται με τις παραμορφώσεις σε όρους γωνίας στρώσης χορδής ( $\theta$ ) δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές για τις δυο διατομές.



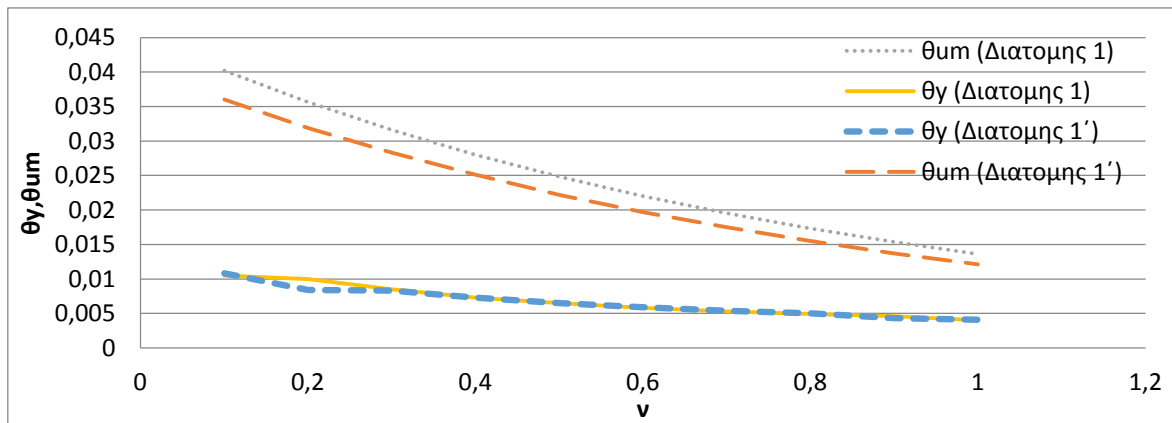
Διάγραμμα 21. Μεταβολή  $\mu\phi$ ,  $\mu\theta$  διατομής 1 και 2 σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική  $\nu$

Στο διάγραμμα 21 φαίνεται αυτό που επισημάνθηκε και στα διαγράμματα 19,20. Συγκεκριμένα, ότι για τη διατομή 2 το  $\mu\phi$  είναι αρκετά μεγαλύτερο, ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη και για τις δυο διατομές δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, τουλάχιστον συγκριτικά με εκείνη του  $\mu\phi$ .



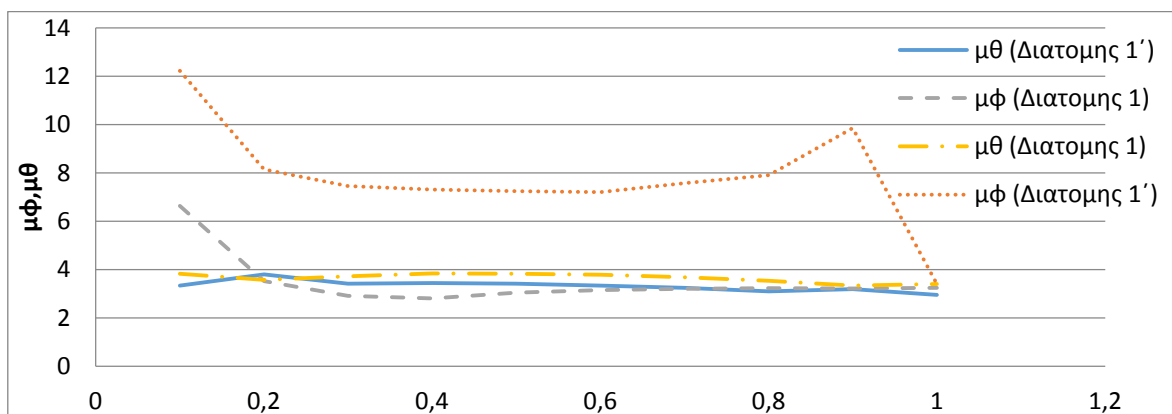
Διάγραμμα 22. Μεταβολή φγ, φμ διατομής 1 και 1' (νέα) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ν

Στο διάγραμμα 22, φαίνεται ότι το φμ της διατομής 1' είναι περίπου διπλάσιο από εκείνο της διατομής 1, ενώ τα φγ είναι σχεδόν τα ίδια.



Διάγραμμα 23. Μεταβολή θγ, θμμ διατομής 1 και 1' (νέα) σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ν

Από το διάγραμμα 23, βλέπουμε ότι τα θμμ στις δυο διατομές διαφέρουν ελάχιστα, ενώ τα θγ σχεδόν καθόλου.



Διάγραμμα 24. Μεταβολή μφ, μθ διατομής 1 και 1' σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική ν

Στο διάγραμμα 24, παρατηρούμε ότι η διατομή 1 έχει αυξημένη ικανότητα πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ), κάτι το οποίο δεν φαίνεται και σε όρους γωνίας στροφής χορδής, όπου ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\theta$  δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές για τις δυο διατομές.

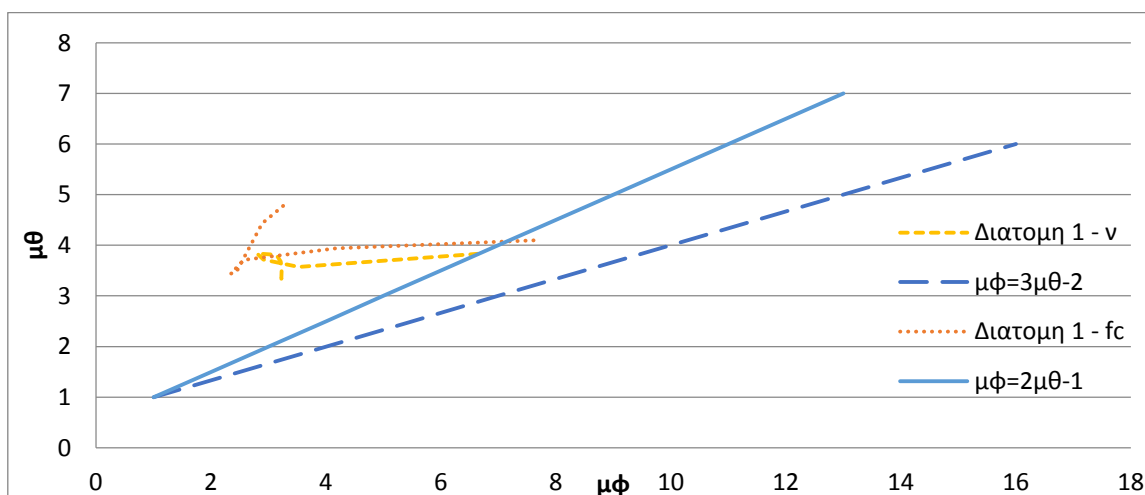
## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΓΙΑ ΤΑ $\mu_\phi$ , $\mu_\theta$

Σχεδιάζεται το διάγραμμα  $\mu_\phi - \mu_\theta$  για κάθε περίπτωση και γίνεται σύγκριση της καμπύλης που προκύπτει με τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Οι σχέσεις αυτές είναι: (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 8, Σχόλια σελίδα 8-37)

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

Κρίνεται σκόπιμο, να γραφτούν ξανά οι σχέσεις αυτές σε άλλη μορφή για ευκολότερη σύγκριση μέσω των πινάκων που έχουν προηγηθεί. (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Κεφάλαιο 8, Σχόλια σελίδα 8-36)

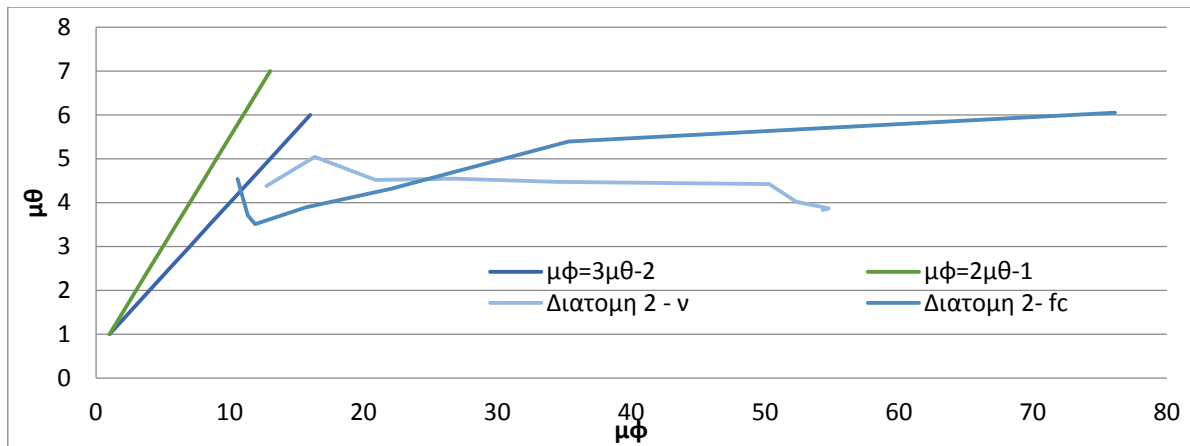
- $\mu_\phi - 1 : \mu_\theta - 1 = 2$
- $\mu_\phi - 1 : \mu_\theta - 1 = 3$



Διάγραμμα 25. Μεταβολή  $\mu_\phi$  σε συνάρτηση με  $\mu_\theta$  για τη διατομή 1 και τις παραμέτρους  $\nu, f_c$

Από το διάγραμμα 25, φαίνεται ότι δεν υπάρχει σύγκλιση των  $\mu_\phi$ ,  $\mu_\theta$  της διατομής 1 που προήλθαν από τους υπολογισμούς μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ, με τις σχέσεις που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ για να συνδέσει τα δυο αυτά μεγέθη. Με την άλλη μορφή, αυτό γίνεται αντιληπτό από τις τελευταίες στήλες των πινάκων 1 και 3, όπου ο λόγος  $\mu_\phi - 1 : \mu_\theta - 1$  κυμαίνεται από 0,9 -2 και 2,1-0,6 για το  $\nu$  και το  $f_c$  αντίστοιχα. Δηλαδή, πέρα από μεμονωμένες τιμές για κάθε παράμετρο δεν φαίνεται να υπάρχει σύγκλιση.





Διάγραμμα 26. Μεταβολή  $\mu\phi$  σε συνάρτηση με  $\mu\theta$  για τη διατομή 2 και τις παραμέτρους  $\nu, f_c$

Από το διάγραμμα 26, φαίνεται ότι και στην περίπτωση της διατομής 2 δεν υπάρχει σύγκλιση των τιμών που έχουν υπολογίσει για τα  $\mu\phi, \mu\theta$  σε σχέση που τις σχέσεις που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Από τους αντίστοιχους πίνακες (2,4) και τις τελευταίες στήλες, προκύπτει ότι ο ο λόγος  $\mu\phi - 1 : \mu\theta - 1$  κυμαίνεται από 3,5-18,8 και 13,1-2,7 για το  $\nu$  και το  $f_c$  αντίστοιχα. Αυτό δηλώνει ότι πέρα από μεμονωμένες τιμές (και μάλιστα μόνο για το  $f_c$ ) δεν υπάρχει σύγκλιση σχέσεων.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η διατομή 2 φαίνεται να έχει αρκετά μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης από τη διατομή 1. Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και μεταξύ της διατομής 1 και 1', σε αρκετά μικρότερη κλίμακα βέβαια από ότι στην προηγούμενη σύγκριση. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού οι διατομές 1' και 2 έχουν περισσότερα διαμήκη σίδερα από τη διατομή 1 και επιπλέον η διατομή 2 έχει περισσότερους και πιο πυκνούς συνδετήρες από τις υπόλοιπες.
2. Ωστόσο, η μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης που αναφέρθηκε στο συμπέρασμα 1, ενώ φαίνεται σε όρους καμπυλότητας, δεν φαίνεται σε καμιά περίπτωση σε όρους γωνίας στροφής χορδής, όπου τα σχετικά μεγέθη μεταβάλλονται ελάχιστα και κατά συνέπεια διαφέρουν ελάχιστα. Συγκεκριμένα για τα  $\theta_y, \theta_{um}$  και  $\mu\theta$ , παρατηρήσαμε ότι ενώ το  $\theta_y$  και το  $\theta_{um}$  μεταβάλλονται έστω και ελάχιστα, ο λόγος τους, το  $\mu\theta$ , δεν δείχνει μεγάλη μεταβλητότητα, έχοντας έτσι ένα μικρό εύρος τιμών.
3. Όσον αφορά τη μέση θλιπτική αντοχή  $f_c$ , οι διατομές φαίνεται να έχουν μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης για μικρότερες τιμές (10-15MPa) και στη συνέχεια όλο και μικρότερη μέχρι αυτή να σταθεροποιηθεί γύρω από μια τιμή.
4. Τέλος, δεν φαίνεται να υπάρχει σύγκλιση μεταξύ των σχέσεων που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ για τους δείκτες πλαστιμότητας  $\mu\phi, \mu\theta$  και των σχέσεων που προκύπτουν για αυτά από τους αναλυτικούς τύπους υπολογισμού μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ. Αυτό, ίσως να αιτιολογείται από το γεγονός ότι τα παραμορφωσιακά μεγέθη έχουν μεγάλη μεταβλητότητα, προσδιορίζονται από πολλούς και διάφορους παράγοντες και επιπλέον οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή για τις παραμετροποιήσεις, ξεφεύγουν από τις ρεαλιστικές για να δοθεί μια γενικότερη εικόνα επί των αποτελεσμάτων, με ό,τι συνέπεια μπορεί να έχει αυτό.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1]. «ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, Κανονισμός Επεμβάσεων», ΟΑΣΠ

[2]. «Συγκρίσεις ΚΑΝ.ΕΠΕ και EC8 για επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας μέσω περίσφιγξης», Σωτηρία Ν. Αθανασοπούλου, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2016

[3]. Αρχείο excel με αλγόριθμο για τον υπολογισμό καμπυλότητας αστοχίας σύμφωνα με ΚΑΝ.ΕΠΕ 2016, Σωτηρία Ν. Αθανασοπούλου