

## ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΜΕ FRP ΜΕ ΕΠΙΔΙΩΚΟΜΕΝΟ ΣΤΟΧΟ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ $\mu_{\phi,tar}$ (EC8-3 §A.4.4.3 ΣΕΛ. 52-53)

**ΚΑΛΑΜΒΟΚΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**  
**ΚΟΥΛΟΥΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

### Περίληψη

Θέμα της συγκεκριμένης εργασίας είναι η περίσφιξη μελών υφιστάμενης κατασκευής με στόχο την αύξηση της πλαστιμότητας των μελών με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών FRPs με βάση τον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012 §8.2.3) καθώς και με βάση τον ευρωκώδικα 8 ( EN 1998-3: 2005 (E) §A.4.4.3 ). Σκοπός είναι ο σχολιασμός των διαφορών στα αποτελέσματα των δύο κανονισμών.

### 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη η ανάγκη για επισκευή, λόγω σεισμών, αλλά και ενίσχυση κατασκευών εξαιτίας της μεγάλης ηλικίας αυτών. Η διάβρωση του οπλισμού ή η αλλαγή χρήσης της κατασκευής ,που έχει ως πιθανή συνέπεια την αύξηση του κινητού φορτίου, είναι άλλοι δυο σημαντικοί λόγοι που οδήγησαν στην εύρεση τρόπων και υλικών για την αντιμετώπιση των θεμάτων της ενίσχυσης ή της επισκευής. Τα προβλήματα αυτά μεταξύ άλλων, μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών που αποτελούνται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμίδη μέσω της αύξησης της πλαστιμότητας.

Για μέλη και κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, πλαστιμότητα είναι η ικανότητα τους να παραμορφώνονται πέραν του ορίου διαρροής, δηλαδή μεγάλες σχετικά παραμορφώσεις, χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής τους. Ένα ψαθυρό υλικό (π.χ. κιμωλία) ή μια ψαθυρή κατασκευή αστοχούν απότομα (δηλαδή χωρίς προειδοποίηση της επικείμενης αστοχίας) μόλις αναλάβουν το μέγιστο φορτίο τους. Επομένως υπάρχει αυξημένος κίνδυνος απώλειας ζωής κατά την κατάρρευση ψαθυρών κατασκευών. Από τα παραπάνω κρίνεται αναγκαία η αύξηση της πλαστιμότητας των μελών της κατασκευής και, κυρίως, των υποστυλωμάτων καθώς αυτά δέχονται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται η ανάγκη για ενίσχυση-επισκευή των ορισμένων μελών ή και συνολικά των κατασκευών για την επίτευξη της αύξησης της πλαστιμότητας, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της περίσφιξης. Ένας, πλέον, διαδεδομένος τρόπος για την επιβολή περίσφιξης των μελών της κατασκευής είναι με τη χρήση υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή FRP. Τι είναι, όμως, τα ινοπλισμένα πολυμερή και ποια τα πλεονεκτήματά τους που τα καθιστά σήμερα από τα ανερχόμενα υλικά ενίσχυσης?

### 2.ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι στην πραγματικότητα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με “θερμοσκληρόμενη” ρητίνη, της οποίας τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 80° C. Οι συνήθεις τύποι ινών είναι από γυαλί ή αραμίδιο ή από άνθρακα.

#### 2.1.πλεονεκτήματα πολυμερών

- i. Μικρό βάρος (περίπου 1/5 ως 1/4 του χάλυβα)
- ii. Εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα)
- iii. Διατίθεται σε μεγάλα μήκη (ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής)
- iv. Χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση εργασίας είναι ελάχιστος

- v. Σε περιπτώσεις που η εκτέλεση χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων αδυνατεί να επιτευχθεί, υπερέχει η εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών (π.χ. ενισχύσεις υποστρωμάτων με μανδύα και κόμβων δοκών/υποστρωμάτων)
- vi. Πλέον χρησιμοποιούνται και ως οπλισμός σε νέες κατασκευές

## 2.2. μειονεκτήματα πολυμερών

- i. Υψηλό κόστος
- ii. Είναι καινούργια υλικά (αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη και δεν υπάρχει επαρκής έρευνα)
- iii. Ο «αντίπαλος» χάλυβας είναι υλικό υψηλής κλάσης

## 2.3. ιδιότητες πολυμερών

Στον πίνακα 1 (Τριανταφύλλου, 1998) δίνονται τυπικά χαρακτηριστικά των ινών, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Ίνες	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
Άνθρακας Υψηλού E	1,90	380	0,35	2100	0,6
Υψηλής f <sub>t</sub>	1,80	230	0,35	2700	1,3
Γυαλιού Τύπου E	2,54	72-75	0,25	3500	4,8
Τύπου Z (ή AR)	2,27	70-76	0,25	2500-3500	3-4,6
Τύπου S2	2,44	85-88	0,25	4600	5
Αραμιδίου Κέβλαρ 29	1,45	65	0,32	3500	4
Κέβλαρ 49	1,44	125	0,32	3500	2,1
Χάλυβας	7,86	200	0,28	400-1700	10

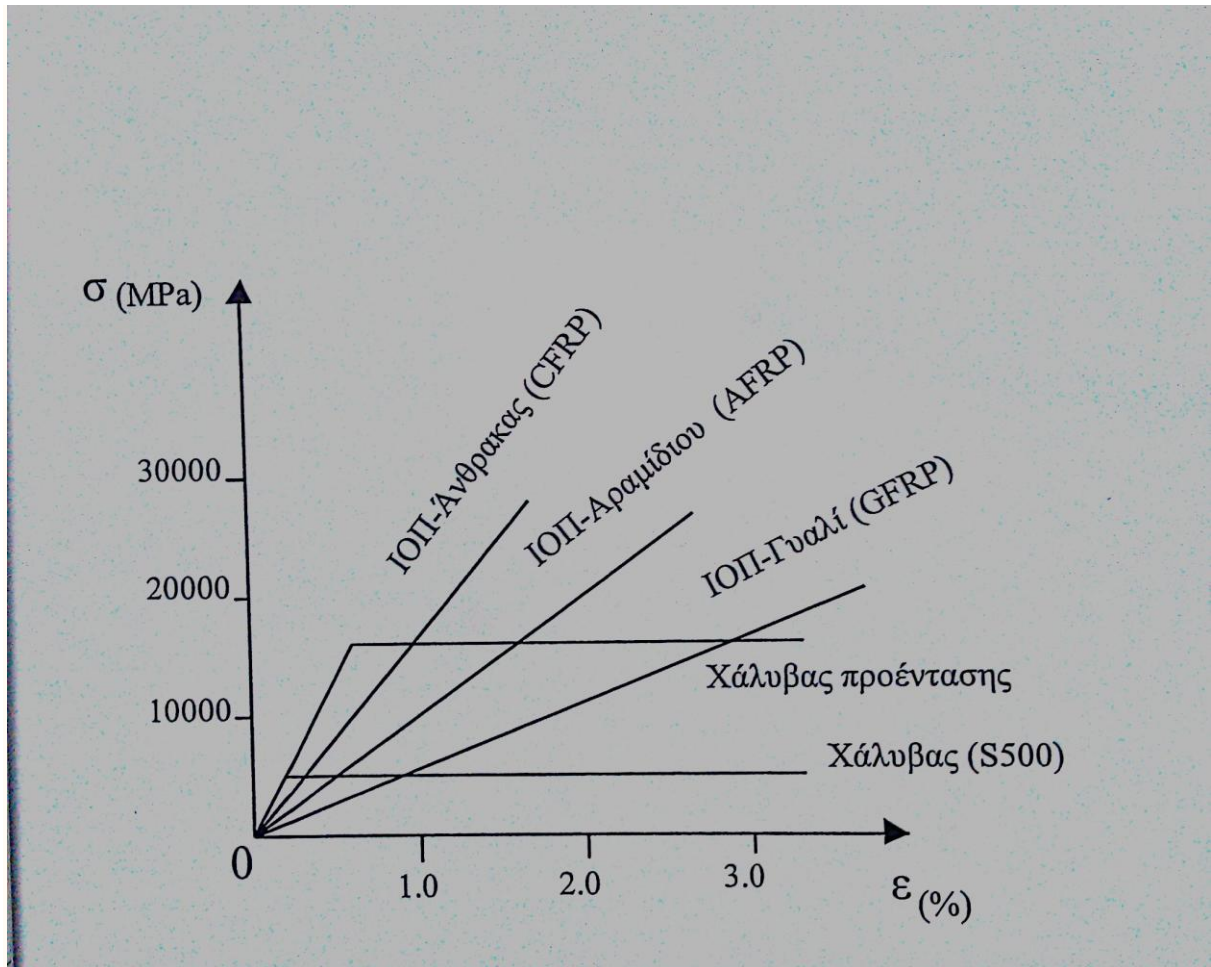
Πίνακας 1 : τυπικές ιδιότητες ινών

Στη συνέχεια, στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τυπικές τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και την παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών (Τριανταφύλλου, 1998).

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
Σύνθετο Υλικό με ίνες γυαλιού (GFRP)	50	3%
Σύνθετο Υλικό με ίνες αραμιδίου (AFRP)	65-120	2-3%
Σύνθετο Υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP)	35-190	1-1,5%

Χάλυβας	200	10%
---------	-----	-----

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για σύνθετα υλικά μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη για χάλυβα. Παρατηρείται εύκολα ότι, τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την αστοχία τους. Η παντελής έλλειψη πλαστικής συμπεριφοράς που συνεπάγεται και αδυναμία απορρόφησης ενέργειας από το υλικό, αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών. Το μειονέκτημα, αυτό, είναι λιγότερο έντονο, όμως, επειδή το ενισχυμένο στοιχείο διατηρεί ένα βαθμό πλαστικότητας.



Σχήμα 1 : Σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό [1]

### 3.ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ $\mu_{1r}$

[2] Υπολογίζεται ο διαθέσιμος δείκτης πλαστικότητας  $\mu_{\phi, ava}$  όρους καμπυλοτήτων ως ο λόγος της καμπυλότητας στην αστοχία  $\phi_{su}$  ως προς την καμπυλότητα στη διαρροή  $\phi_y$ . Αν καθοριστικός για την αστοχία και τη διαρροή είναι ο εφελκόμενος οπλισμός, η τιμή της καμπυλότητας στη διαρροή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{(1-\xi_y)*d} = \frac{f_y}{E_s(1-\xi_y)*d} \quad \text{εξ (3.1)}$$

και η αντίστοιχη στην αστοχία από:  $\phi_{su} = \frac{\epsilon_{su}}{(1-\xi_{su}) * d}$  εξ (3.2), όπου

$\varepsilon_y$  και  $\varepsilon_{su}$  είναι η μήκυνση του χάλυβα στη διαρροή και στη μέγιστη τάση και  $\xi_y, \xi_{su}$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στο αντίστοιχο στάδιο ανηγμένο στο στατικό ύψος  $d$ . Οι τιμές των  $\xi_y, \xi_{su}$  εξαρτώνται από τα ποσοστά οπλισμού της διατομής και από το μέγεθος της αξονικής δύναμης.

Κατά κανόνα η “διαρροή” της διατομής οφείλεται στη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού σε τάση  $\sigma_{s1}=f_y$  και συμβαίνει σε τιμή της καμπυλότητας που δίνεται από την εξ.(3.1), με ανηγμένο (στο στατικό ύψος  $d$ ) ύψος θλιβόμενης ζώνης ίσο με:

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A \quad \text{εξ. (3.3)}$$

όπου για ορθογωνική διατομή με πλάτος  $b$  και στατικό ύψος  $d$ :

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b*d*f_y} \quad \text{και} \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b*d*f_y} \quad \text{εξ. (3.4)}$$

Στην εξ.(3.4)  $\rho_1, \rho_2$  και  $\rho_v$  είναι αντίστοιχα (τα ανηγμένα στο  $bd$ ) ποσοστά του οπλισμού του εφελκόμενου πέλματος, αυτού του θλιβόμενου πέλματος και του οπλισμού στον κορμό, ο οποίος θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένος στο τμήμα του ύψους μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού. Η απόσταση του εφελκόμενου ή του θλιβόμενου οπλισμού από το αντίστοιχο πέλμα συμβολίζεται με  $d_1$ , και ως  $\delta_1$  ορίζεται ο λόγος  $d_1/d$ . Η αξονική δύναμη  $N$  λαμβάνεται θετική αν είναι θλιπτική.

Θεωρούμε στους υπολογισμούς ότι η αστοχία της διατομής θα συμβεί με θραύση του εφελκόμενου οπλισμού. Θραύση του εφελκόμενου χάλυβα πριν την εξάντληση της βράχυνσης αστοχίας του σκυροδέματος,  $\varepsilon_{cu}$ , στις ακραίες θλιβόμενες ίνες συμβαίνει, αν:

$$\xi < \frac{\varepsilon_{cu}}{(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})}, \quad \text{που μεταφράζεται στην εξής συνθήκη για την ανηγμένη αξονική θλίψη:}$$

$$v < \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y}\right) \frac{\varepsilon_{su}(1 + \delta_1) - \varepsilon_{cu}(1 - \delta_1)}{(1 - \delta_1)(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})} \quad \text{εξ. (3.5)}$$

Τότε η καμπυλότητα στη θραύση του εφελκόμενου χάλυβα δίνεται από την εξ.(3.2), σε τιμή του (ανηγμένου στο  $d$ ) ύψους θλιβόμενης ζώνης:

$$\xi_{su} = \frac{(1 - \delta_1) \left( v + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( \frac{1 + \delta_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1 - \delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} \quad \text{εξ. (3.6)}$$

Στις εξ.(3.5), (3.6) είναι  $v = N/bdf_c$ ,  $\omega_1 = \rho_1 f_y / f_c$ ,  $\omega_2 = \rho_2 f_y / f_y$ ,  $\omega_v = \rho_v f_y / f_c$ , (με τα  $\rho_1, \rho_2, \rho_v$  ανηγμένα στο  $bd$ ),  $\delta_1 = d_1/d$ , ενώ  $\varepsilon_{co}$  συμβολίζει τη βράχυνση του σκυροδέματος στην κορυφή του διαγράμματος  $\sigma$ - $\varepsilon$  και  $\varepsilon_{su}$  την (ομοιόμορφη) μήκυνση θραύσης του χάλυβα.

#### 4.ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012) [3]

Αρχικά, επιλέγεται η τιμή του στοχευόμενου δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_{\delta i}$  για το στοιχείο που εξετάζεται και υπολογίζεται η τιμή  $\mu_{1/r}$  δείκτης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων μέσω της σχέσης (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §8.2.3 δ (iv)) :

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta} - 1) = 3$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι (ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v, \quad \text{όπου}$$

για ανηγμένη αξονική θλιπτική δύναμη υπολογιζόμενη με τη μέση τιμή της

$$\text{ονομαστικής αντοχής του σκυροδέματος ίση με: } v = \frac{N}{b*d*f_c}$$

Οι τιμές  $\varepsilon_{sy}$  και  $v$  υπολογίζονται με βάση τις μέσες τιμές αντοχής χάλυβα και σκυροδέματος. Λαμβάνεται  $f_{ym} = 1,15 f_{yk}$ .

Ανάλογα με τις διαστάσεις της διατομής του μέλους που εξετάζεται υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha$ , όπου  $\alpha = \alpha_s \cdot \alpha_n$ .

Η τιμή του  $\alpha_s$  λαμβάνεται  $\alpha_s = 1$  επειδή το ύψος είναι συνεχές.

Η τιμή του  $\alpha_n$  από τον τύπο (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ6.13)) :

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2], \text{ όπου } A_c = b_c \cdot d_c \text{ και}$$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c}, \gamma = \frac{2d_p}{d_c}.$$

$d_p = b_p = 50 \text{ mm}$ , είναι το μήκος που γίνεται η εξομάλυνση των γωνιών.

Η εξομάλυνση των γωνιών γίνεται για να επιτευχθεί αποδοτικά η περίσφιξη.

Με γνωστά, πλέον, τα  $\epsilon_{cu,c}$  και το συντελεστή  $\alpha$  υπολογίζεται το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό περίσφιξης  $\omega_{wd}$  από τις εξισώσεις του κανονισμού

$$\epsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0,007 (f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.20)) ,}$$

$$\text{όπου } f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c.$$

Επομένως, αντικαθιστώντας την τιμή του  $f_{c,c}$  στις σχέσεις απλοποιείται και μένει

$$\epsilon_{cu,c} = 0,0035 (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd})^2 \text{ για περίσφιξη με ίνες άνθρακα και}$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0,007 (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd})^2 \text{ για περίσφιξη με ίνες γυαλιού.}$$

Τέλος υπολογίζεται το συνολικό απαιτούμενο πάχος υφάσματος  $t_{\phi}$  από τον τύπο του ΕΚΩΣ 2000 (§ 18.4.4.2) όπου αντί του  $f_{yd}$ , τίθεται η εφελκυστική αντοχή  $f_{jd}$  των ΙΟΠ εφόσον το πλήθος  $\kappa$  των στρώσεων ΙΟΠ είναι  $\leq 3$ . Διαφορετικά, αν ήταν  $\kappa > 4$  θα ετίθετο:  $f'_{jd} = f_{jd} \cdot \psi$ , όπου  $\psi = \kappa^{-1/4}$  (βλ. § 6.2.3.).

$$t_{\phi} = \frac{A_{sw}^{\sigma \kappa}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h})} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} [4]$$

## 5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΕΡΙΣΦΥΞΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ (EN 1988-3: 2005 (E), A.4.4.3) [5]

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί εξαρτάται από τον λόγο  $I_\chi = \mu_{\phi, \text{tar}} / \mu_{\phi, \text{ava}}$ , μεταξύ του στοχευόμενης πλαστιμότητας-καμπυλότητας  $\mu_{\phi, \text{tar}}$  και της διαθέσιμης πλαστιμότητας-καμπυλότητας  $\mu_{\phi, \text{ava}}$  και μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με :

$$f_1 = 0.4 I_\chi^2 \frac{f_c \cdot \epsilon_{cu}^2}{\epsilon_{ju}^{1.5}}, \text{ όπου :}$$

$f_c$  είναι η θλιπτική τάση του σκυροδέματος, όπως ορίζεται στην (Α.1)

$\epsilon_{cu}$  είναι η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος

$\epsilon_{ju}$  είναι η μέγιστη ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση του εφαρμοζόμενου FRP, η οποία είναι μικρότερη από την μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του FRP,  $\epsilon_{fu}$ .

Για την περίπτωση ορθογωνικής διατομής στην οποία οι γωνίες έχουν στρογγυλευθεί ώστε να επιτρέπουν στο FRP να τυλιχθεί γύρω τους, η τάση περίσφιξης που εφαρμόζεται από το ύψος FRP υπολογίζεται από την  $f_1 = 2E_f \epsilon_{ju} \cdot t_f / D$ , όπου  $D$  η μεγαλύτερη διάσταση.

## 6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ FRP ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

### 6.1. Διατομή 500x350, S500, C16/20. Φόρτιση $M_d = 120 \text{ kNm}$ , $N_d = -800 \text{ kN}$

Επικάλυψη οπλισμών  $c = 25 \text{ mm}$ ,  $d_1 = c + \Phi_\eta + \Phi_L / 2 = 25 + 8 + 16 / 2 = 40 \text{ mm}$ ,  $d = 460 \text{ mm}$

$y_{s1} = h / 2 - d_1 = 210 \text{ mm}$ ,  $d_1 / h = 0.08 \approx 0.10$ ,  $M_{sd} = M_d - y_{s1} \cdot N_d = 288 \text{ kNm}$

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{288 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5^2 \cdot 16 \cdot 10^3} \Rightarrow \mu_d = 0.309$$

$$v_d = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-800 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 16000} = -0.429$$

$$A_{stot} = \omega_{tot} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0.54 \cdot \frac{16 \cdot 1.5}{500 \cdot 1.5} \cdot 350 \cdot 500 = 2318.4 \text{ mm}^2 \quad [6]$$

Άρα τοποθετώ 6Φ18 και 4Φ16 = 2328 mm<sup>2</sup>, τα οποία μοιράζονται στην πλευρά h // M<sub>d</sub>.

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot h} = \frac{1164}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = 0,00665, \quad \rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot h} = \frac{402}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_v = 0.002297$$

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.01628, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.008486$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0.2523, \quad \text{όπου } \alpha = E_s/E_c = 200/27.5 = 7.27$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E(1-\xi_y)d} = \frac{500}{200 \cdot 10^3 \cdot (1-0.2523) \cdot 0.46} \Rightarrow \varphi_y = 0.007269$$

Υπολογισμός καμπυλότητας στην αστοχία

Επαληθεύεται η εξ. (3.5),

$$v < \frac{\frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y}\right) \frac{\varepsilon_{su}(1+\delta_1) - \varepsilon_{cu}(1-\delta_1)}{(1-\delta_1)(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})}}{0,0035 + 0,0035} + 0,27 - 0,27 * 1,08 - 0,094(1 + 1,08) \frac{0,0035 \left(1 + \frac{40}{460}\right) - 0,0035 \left(1 - \frac{40}{460}\right)}{\left(1 - \frac{40}{460}\right)(0,0035 + 0,0035)} \Rightarrow$$

$v < 0,47$  επομένως υπολογίζεται από την εξ. (3.6)

$$\xi_{su} = \frac{(1-\delta_1) \left( v + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( \frac{1+\delta_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1-\delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} = 0,4367 \quad \text{και} \quad \varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su})d}$$

Άρα ο δείκτης πλαστιμότητας είναι  $\mu_{\varphi,ava} = \frac{\varphi_{su}}{\varphi_y} = 1,9$

• Υπολογισμός με ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012

1.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta,i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §8.2.3 δ (iv)):

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta,i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι **(ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11))** :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v = 2.2 * 5.8 * \frac{500 * 1.15}{200000} * \frac{800}{0.35 * 0.5 * 16000} = 0.010455$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \quad \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \quad \text{και} \quad A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19)}) , \quad \text{όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 0,838$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{0,838}{2 \min\left(\frac{3}{0,35}, \frac{5}{0,5}\right)} \frac{16 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0,17 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta,i} = 3.5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

(KAN.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)) :

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8.5$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι

(KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v = 2.2 * 8.5 * \frac{500 * 1.15}{200000} * \frac{800}{0.35 * 0.5 * 16000} = 0.015$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \text{ και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 1.34$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd} f_{cd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right) f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{1.34}{2 \min\left(\frac{3}{0.35}, \frac{5}{0.5}\right)} \frac{16 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0.26 \text{ mm}$$

• Υπολογισμός με ευρωκώδικα

1.  $\mu_{\delta, \sigma \bar{}} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$   $\varepsilon_{ju} = 0.01371$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{5,8}{1,9} \frac{16000 * 0,01371^2}{0,01371^{1,5}} = 4,66 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{4.66 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0.37 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$E_j = 75 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3000 \text{ MPa}$   $\varepsilon_{ju} = 0.033$  :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{5,8}{1,9} \frac{16000 * 0,033^2}{0,033^{1,5}} = 7,22 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{4.66 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0.73 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta, \sigma \bar{}} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$   $\varepsilon_{ju} = 0.01371$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{8,5}{1,9} \frac{16000 * 0,01371^2}{0,01371^{1,5}} = 10 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{10 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0,79 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με  
 $E_j=75\text{GPa}$ ,  $f_u=3000\text{MPa}$   $\varepsilon_{ju}=0.033$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περισφιγξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{8,5 \cdot 16000 \cdot 0,033^2}{1,9 \cdot 0,033^{1,5}} = 15,51 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{15,51 \cdot 500}{2 \cdot 231000 \cdot 0,01371} \Rightarrow t_f = 1,57 \text{ mm}$$

## 6.2. Διατομή 400x400, S500, C16/20. Φόρτιση $M_d=120 \text{ kNm}$ , $N_d= -800 \text{ kN}$

Επικάλυψη οπλισμών  $c = 25 \text{ mm}$ ,  $d_1 = c + \Phi_{\eta} + \Phi_L/2 = 25+8+16/2=40\text{mm}$ ,  $d=360\text{mm}$

$y_{s1}=h/2-d_1=160\text{mm}$ ,  $M_{sd}=M_d-y_{s1} \cdot N_d=248 \text{ kNm}$ ,  $d_1/h=0.10$

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{248 \cdot 1.5}{0.4 \cdot 0.4^2 \cdot 16 \cdot 10^3} \Rightarrow \mu_d = 0.36, \quad \nu_d = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-800 \cdot 1.5}{0.4 \cdot 0.4 \cdot 16000} = -0.47$$

$\omega_{tot} = 0.7$ ,

$$A_{s_{tot}} = \omega_{tot} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0.7 \cdot \frac{16 \cdot 1.5}{500 \cdot 1.5} \cdot 400 \cdot 400 = 1570 \text{ mm}^2$$

Άρα βάζουμε 4Φ16 σε κάθε πλευρά // στη  $M_d$ , επομένως συνολικά 8Φ16 = 1608 mm<sup>2</sup>

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot h} = \frac{804}{400 \cdot 400} \Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = 0,005, \quad \rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot h} = \frac{402}{400 \cdot 400} \Rightarrow \rho_v = 0.0025$$

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.01251, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.00695$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0.2697, \quad \text{όπου } \alpha = E_s/E_c = 200/27.5 = 7.27$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E(1-\xi_y)d} = 0.009509$$

Υπολογισμός καμπυλότητας στην αστοχία

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = 0.205, \quad \omega_v = \frac{A_{sv} \cdot f_{yd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = 0.1025$$

$$\nu = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{800}{0.4 \cdot 0.4 \cdot 16000} \Rightarrow \nu = 0.3125 < 0.36 \text{ επαληθεύεται η εξ. (3.5) άρα}$$

$$\xi_{su} = \frac{(1-\delta_1) \left( \nu + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( \frac{1+\delta_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1-\delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} = 0,456278$$

$$\varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su}) \cdot d} \Rightarrow \varphi_{su} = 0.01788087$$

Άρα ο δείκτης πλαστιμότητας είναι  $\mu = \varphi_{su}/\varphi_y \Rightarrow \mu = 1.88$

- Υπολογισμός με ΚΑΝ.ΕΠΕ 2012

1.  $\mu_{\delta, \text{opt}} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστηλώματος υπολογίζεται (**ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)**):

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5,8$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * \nu = 0,01146 \text{ (**ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)**)}$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \gamma = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 \cdot 50}{400} = 0,25, \text{ και } A_c = 160000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,625$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j=231\text{GPa}$ ,  $f_u=3800\text{MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (**ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19)**)}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c \Rightarrow \omega_{wd} = 0,876$$



$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{o\lambda} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{o\lambda} = \frac{0,876}{2 \min\left(\frac{3}{0,4}, \frac{4}{0,4}\right)} \frac{16*1,2}{3800*1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{o\lambda} = 0,2 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστηλώματος υπολογίζεται (KAN.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)):

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

$$\epsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \epsilon_{sy} * \nu = 0,0168 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11))}$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \gamma = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2*50}{400} = 0,25, \text{ και } A_c = 160000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,625$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\epsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25 \alpha \omega_{wd}) f_c \Rightarrow \omega_{wd} = 1,3643$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{o\lambda} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{o\lambda} = \frac{1,3643}{2 \min\left(\frac{3}{0,4}, \frac{4}{0,4}\right)} \frac{16*1,2}{3800*1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{o\lambda} = 0,3 \text{ mm}$$

• Υπολογισμός με Ευρωκώδικα

1.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστηλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5,8$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  
 $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$   $\epsilon_{ju} = 0.01371$  :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιγξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \epsilon_{cu}^2}{\epsilon_{ju}^{1,5}} = 4.655 \text{ MPa}, t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \epsilon_{ju}} = 0.29 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με  
 $E_j = 75 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3000 \text{ MPa}$   $\epsilon_{ju} = 0.033$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιγξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \epsilon_{cu}^2}{\epsilon_{ju}^{1,5}} = 7.22 \text{ MPa}, t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \epsilon_{ju}} = 0.58 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστηλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  
 $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$   $\epsilon_{ju} = 0.01371$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιγξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 10 \text{ MPa}, t_f = 0.63$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με  
 $E_j = 75 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3000 \text{ MPa}$   $\epsilon_{ju} = 0.033$ :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιγξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 15.51 \text{ MPa}, t_f = 1.25 \text{ mm}$$

### 6.3. Διατομή 500x350, S500, C16/20. Φόρτιση Md=120 kNm, Nd= -1100 kN

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{351 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5^2 \cdot 16 \cdot 10^3} \Rightarrow \mu_d = 0.38$$

$$\nu_d = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-1100 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 16000} = -0.59$$

$$A_{Stot} = \omega_{tot} \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0.84 \cdot \frac{16 \cdot 1.5}{500 \cdot 1.5} \cdot 350 \cdot 500 = 3606 \text{ mm}^2$$

Άρα τοποθετώ 12Φ20 = 3768 mm<sup>2</sup>, τα οποία μοιράζονται στην πλευρά h // M<sub>d</sub>.

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot h} = \frac{1884}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = 0,0108, \quad \rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot h} = \frac{625}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_v = 0.00359$$

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.025, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0.0137$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0.3, \quad \text{όπου } \alpha = E_s/E_c = 200/27.5 = 7.27$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E(1-\xi_y)d} = \frac{500}{200 \cdot 10^3 \cdot (1-0,3)0,46} \Rightarrow \varphi_y = 0.00776$$

Υπολογισμός καμπυλότητας στην αστοχία

Δεν επαληθεύεται η εξ. (3.5),

$$\nu < \frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y}\right) \frac{\varepsilon_{su}(1+\delta_1) - \varepsilon_{cu}(1-\delta_1)}{(1-\delta_1)(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})}, \quad \text{άρα υπολογίζεται από τη σχέση}$$

$$\xi_{cu} = \frac{(1-\delta_1)(\nu + \omega_1 - \omega_2) + ((1+\delta_1)\omega_v)}{(1-\delta_1)\left(1 - \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{cu}}\right) + 2\omega_v} \Rightarrow \xi_{cu} = 0,502$$

$$\text{επομένως, } \varphi_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} \cdot d} \Rightarrow \varphi_{cu} = 0,0152$$

Άρα ο δείκτης πλαστιμότητας είναι  $\mu_{\varphi,ava} = \frac{\varphi_{su}}{\varphi_y} = 1,95$

- Υπολογισμός με ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012

1.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστολώματος υπολογίζεται

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §8.2.3 δ (iv)):

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * \nu = 2.2 * 5.8 * \frac{500 * 1.15}{200000} * \frac{1100}{0.35 * 0.5 * 16000} = 0.01441$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \quad \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \quad \text{και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c}/f_c)^2 \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19)}), \quad \text{όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c.$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 1,256$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_h}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{1,256}{2 \min\left(\frac{3}{0,35}, \frac{6}{0,5}\right)} \frac{16 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0,25 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta i} = 3.5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστρώματος υπολογίζεται

(KAN.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)) :

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8.5$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι

(KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v = 2.2 * 8.5 * \frac{500 * 1.15}{200000} * \frac{1100}{0.35 * 0.5 * 16000} = 0.02113$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \quad \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \text{ και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 1,85$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd} f_{cd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right) f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{1.85}{2 \min\left(\frac{3}{0.35}, \frac{6}{0.5}\right)} \frac{16 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0.36 \text{ mm}$$

• Υπολογισμός με ευρωκώδικα

1.  $\mu_{\delta, \sigma} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστρώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j = 231 \text{ GPa}, \quad f_u = 3800 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{ju} = 0.01371:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{5,8 \cdot 16000 * 0,01371^2}{1,9 \cdot 0,01371^{1,5}} = 4,42 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{4.42 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0.35 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$$E_j = 75 \text{ GPa}, \quad f_u = 3000 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{ju} = 0.033 :$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{5,8 \cdot 16000 * 0,033^2}{1,95 \cdot 0,033^{1,5}} = 6.86 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{6.86 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0.69 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta, \sigma} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστρώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j = 231 \text{ GPa}, \quad f_u = 3800 \text{ MPa} \quad \varepsilon_{ju} = 0.01371:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 0,4 * \frac{8,5 \cdot 16000 * 0,01371^2}{1,95 \cdot 0,01371^{1,5}} = 9,49 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{9.49 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0,79 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$E_j=75\text{GPa}$ ,  $f_u=3000\text{MPa}$   $\varepsilon_{ju}=0.033$  :

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{8,5 \cdot 16000 * 0,033^2}{1,95 \cdot 0,033^{1,5}} = 14.73 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{14.73 \cdot 500}{2 \cdot 231000 \cdot 0.01371} \Rightarrow t_f = 1.49 \text{ mm}$$

#### 6.4. Διατομή 500x350, S400, C16/20. Φόρτιση $M_d=120 \text{ kNm}$ , $N_d= -800 \text{ kN}$

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{288 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5^2 \cdot 16 \cdot 10^3} \Rightarrow \mu_d = 0.31, \nu_d = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-800 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 16000} = -0.4, \omega_{tot} = 0.52$$

$$A_{Stot} = \omega_{tot} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0.54 \cdot \frac{16 \cdot 1.5}{400 \cdot 1.5} \cdot 350 \cdot 500 = 2721 \text{ mm}^2$$

Άρα βάζουμε 3Φ18 και 2Φ20 σε κάθε πλευρά // στη  $M_d$ , επομένως συνολικά  $6\Phi18+4\Phi20=2780 \text{ mm}^2$

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot h} = \frac{1390}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = 0,0079, \rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot h} = \frac{628}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_v = 0.00359$$

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,0194, B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,0105$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0.274367 \text{ όπου } \alpha = E_s/E_c = 200/27.5 = 7.27$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E(1-\xi_y)d} = 0.00599$$

Υπολογισμός καμπυλότητας στην αστοχία

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = 0.259, \omega_v = \frac{A_{sv} \cdot f_{yd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = 0.117$$

$$\nu = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{800}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 16000} \Rightarrow \nu = 0.29 < 0.36 \text{ επαληθεύεται η εξ. (3.5) άρα}$$

$$\xi_{su} = \frac{(1-\delta_1) \left( \nu + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( \frac{1+\delta_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1-\delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{cu}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} = 0,443409, \varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su}) \cdot d} \Rightarrow \varphi_{su} = 0.01367$$

Άρα ο δείκτης πλαστιμότητας είναι  $\mu = \varphi_{su}/\varphi_y \Rightarrow \mu = 2,28$

- Υπολογισμός με ΚΑΝ.ΕΠΕ 2012

1.  $\mu_{\delta, \alpha\pi} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστηλώματος υπολογίζεται (**ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)**):

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5,8$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * \nu = 0.0085 \text{ (ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11))}$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 \cdot 50}{350} = 0,2857, \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 \cdot 50}{500} = 0,2 \text{ και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j=231\text{GPa}$ ,  $f_u=3800\text{MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c \Rightarrow \omega_{wd} = 0.6$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{0,6}{2 \min\left(\frac{3}{0,35}, \frac{5}{0,5}\right)} \frac{16 \cdot 1,2}{3800 \cdot 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0,12 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta, \alpha\pi} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται (KAN.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)):

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * \nu = 0,0125 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11))}$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j=231\text{GPa}$ ,  $f_u=3800\text{MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035(f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25\alpha \omega_{wd}) f_c \Rightarrow \omega_{wd} = 1.062$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_h}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{1,062}{2 \min\left(\frac{3}{0,35}, \frac{5}{0,5}\right)} \frac{16*1,2}{3800*1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0,21 \text{ mm}$$

• Υπολογισμός με Ευρωκώδικα

1.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j=231\text{GPa}, f_u=3800\text{MPa}, \varepsilon_{ju}=0.01371:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 3.23\text{MPa}, t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \varepsilon_{ju}} = 0.25 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$$E_j=75\text{GPa}, f_u=3000\text{MPa}, \varepsilon_{ju}=0.033:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} = 5.02 \text{ MPa}, t_f = \frac{f_1 \cdot h}{2 \cdot E_f \varepsilon_{ju}} = 0.51 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j=231\text{GPa}, f_u=3800\text{MPa}, \varepsilon_{ju}=0.01371:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 6.94 \text{ MPa}, t_f = 0.55 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$$E_j=75\text{GPa}, f_u=3000\text{MPa}, \varepsilon_{ju}=0.033:$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 10.77 \text{ MPa}, t_f = 1.09 \text{ mm}$$

**6.5. Διατομή 500x350, S500, C20/25. Φόρτιση  $M_d=120 \text{ kNm}$ ,  $N_d= -800 \text{ kN}$**

$$\mu_d = \frac{M_{sd}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}} = \frac{288 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5^2 \cdot 20 \cdot 10^3} \Rightarrow \mu_d = 0.25$$

$$\nu_d = \frac{N_d}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{-800 \cdot 1.5}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 20000} = -0.34$$

$$A_{Stot} = \omega_{tot} \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot b \cdot h = 0.36 \cdot \frac{20 \cdot 1.5}{500 \cdot 1.5} \cdot 350 \cdot 500 = 1932 \text{ mm}^2$$

Άρα τοποθετώ 8Φ18 = 2032 mm<sup>2</sup>, τα οποία μοιράζονται στην πλευρά h // M<sub>d</sub>.

Υπολογισμός καμπυλότητας στη διαρροή

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot h} = \frac{1016}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_1 = \rho_2 = 0,005806, \quad \rho_v = \frac{A_{sv}}{b \cdot h} = \frac{508}{350 \cdot 500} \Rightarrow \rho_v = 0,002903$$

$$A = \rho_1 + \rho_2 + \rho_v + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,0145234, \quad B = \rho_1 + \rho_2 \delta_1 + 0,5 \rho_v (1 + \delta_1) + \frac{N}{b \cdot d \cdot f_y} = 0,007897$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = 0,244783, \quad \text{όπου } \alpha = E_s/E_c = 200/9 = 6,9$$

$$\varphi_y = \frac{f_y}{E(1-\xi_y)d} = \frac{500}{200 \cdot 10^3 \cdot (1-0,244783)0,46} \Rightarrow \varphi_y = 0,007196$$

Υπολογισμός καμπυλότητας στην αστοχία

Επαληθεύεται η εξ. (3.5),

$$v < \frac{\frac{\varepsilon_{cu} - \frac{\varepsilon_{co}}{3}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su}} + \omega_2 - \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_v \left(1 + \frac{f_t}{f_y}\right) \frac{\varepsilon_{su}(1+\delta_1) - \varepsilon_{cu}(1-\delta_1)}{(1-\delta_1)(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{su})}}{\frac{0,0035 - \frac{0,002}{3}}{0,0035 + 0,0035} + 0,189 - 0,189 * 1,08 - 0,09466(1 + 1,08) \frac{0,0035 \left(1 + \frac{40}{460}\right) - 0,0035 \left(1 - \frac{40}{460}\right)}{\left(1 - \frac{40}{460}\right)(0,0035 + 0,0035)}} \Rightarrow$$

$$v = 0,29 < 0,37 \text{ επομένως υπολογίζεται από την εξ. (3.6)}$$

$$\xi_{su} = \frac{(1-\delta_1) \left( v + \omega_1 \frac{f_t}{f_y} - \omega_2 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( \frac{1+\delta_1}{2} \right) \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v}{(1-\delta_1) \left( 1 + \frac{\varepsilon_{co}}{3\varepsilon_{su}} \right) + \left( 1 + \frac{f_t}{f_y} \right) \omega_v} = 0,3924 \text{ και } \varphi_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1-\xi_{su})d} = 0,0125$$

Άρα ο δείκτης πλαστιμότητας είναι  $\mu_{\varphi,ava} = \frac{\varphi_{su}}{\varphi_y} = 1,74$

• Υπολογισμός με ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012

1.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστρώματος υπολογίζεται

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)) :

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5,8$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2,2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v = 2,2 * 5,8 * \frac{500 * 1,15}{200000} * \frac{800}{0,35 * 0,5 * 200000} = 0,0084$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \quad \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \text{ και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j = 231 \text{ GPa}, \quad f_u = 3800 \text{ MPa},$$

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c}/f_c)^2 \text{ (ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \quad \text{όπου}$$

$$f_{c,c} = (1,125 + 1,25\alpha) \omega_{wd} f_c.$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 0,59$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{0,59}{2 \min\left(\frac{3}{0,35}, \frac{4}{0,5}\right)} \frac{20 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0,16 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,av} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστρώματος υπολογίζεται

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §Σ8.2.3 δ (iv)) :

$$(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Η απαιτούμενη τιμή μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.11)) :

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 * \mu_{1/r} * \varepsilon_{sy} * v = 2.2 * 8.5 * \frac{500 * 1.15}{200000} * \frac{800}{0.35 * 0.5 * 20000} = 0.0123$$

υπολογίζεται ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης  $\alpha = \alpha_s * \alpha_n = \alpha_n$

$$\beta = \frac{2b_p}{b_c} = \frac{2 * 50}{350} = 0,2857, \gamma = \frac{2d_p}{d_c} = \frac{2 * 50}{500} = 0,2 \text{ και } A_c = 175000 \text{ mm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2 (1 - \beta)^2 + d_c^2 (1 - \gamma)^2] \Rightarrow \alpha = 0,576$$

Θα χρησιμοποιηθούν υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με  $E_j = 231 \text{ GPa}$ ,  $f_u = 3800 \text{ MPa}$ ,

Υπολογίζεται, στη συνέχεια, το ογκομετρικό ποσοστό  $\omega_{wd}$  από

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \text{ (KAN.ΕΠΕ. εξίσωση (8.19))}, \text{ όπου}$$

$$f_{c,c} = (1.125 + 1.25 \alpha \omega_{wd}) f_c.$$

$$\Rightarrow \omega_{wd} = 1.04$$

$$\text{Επομένως από τον τύπο } t_{ol} = \frac{A_{sw}^{\sigma_k}}{s} = \frac{\omega_{wd}}{2 \min\left(\frac{n_b}{b}, \frac{n_h}{h}\right)} \frac{f_{cd}}{f_{jd}} \Rightarrow t_{ol} = \frac{1.04}{2 \min\left(\frac{3}{0.35}, \frac{4}{0.5}\right)} \frac{20 * 1,2}{3800 * 1,5} 10^3$$

$$\Rightarrow t_{ol} = 0.28 \text{ mm}$$

• Υπολογισμός με ευρωκώδικα

1.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 2,6$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 5.8$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j = 231 \text{ GPa}, f_u = 3800 \text{ MPa } \varepsilon_{ju} = 0.01371 :$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{5,8}{1,74} \frac{20000 * 0,01371^2}{0,01371^{1,5}} = 6,94 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{6,94 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 0.55 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$$E_j = 75 \text{ GPa}, f_u = 3000 \text{ MPa } \varepsilon_{ju} = 0.033 :$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{5,8}{1,74} \frac{20000 * 0,033^2}{0,033^{1,5}} = 10,76 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{10,76 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 1,09 \text{ mm}$$

2.  $\mu_{\delta,ap} = \mu_{\delta i} = 3,5$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$  για την κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος υπολογίζεται

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_{\delta i} - 1) = 3 \Rightarrow \mu_{1/r} = 8,5$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα με

$$E_j = 231 \text{ GPa}, f_u = 3800 \text{ MPa } \varepsilon_{ju} = 0.01371 :$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{8,5}{1,74} \frac{20000 * 0,01371^2}{0,01371^{1,5}} = 14,9 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{14,9 * 500}{2 * 231000 * 0.01371} \Rightarrow t_f = 1,18 \text{ mm}$$

Με χρήση υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού με

$$E_j = 75 \text{ GPa}, f_u = 3000 \text{ MPa } \varepsilon_{ju} = 0.033 :$$

Το απαραίτητο ποσό της τάσης περίσφιξης που θα εφαρμοσθεί είναι:

$$f_1 = 0.4 I_{\chi}^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1.5}} = 0,4 * \frac{8,5}{1,74} \frac{20000 * 0,033^2}{0,033^{1,5}} = 23,12 \text{ MPa}$$

$$t_f = \frac{f_1 * h}{2 * E_f \varepsilon_{ju}} = \frac{23,12 * 500}{2 * 231000 * 0,01371} \Rightarrow t_f = 2,34 \text{ mm}$$

## 7. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

m=2.6	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.1	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.2	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.3	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.4	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.5
ΚΑΝ.ΕΠΕ (με CFRP)	t <sub>f</sub> =0.17	t <sub>f</sub> =0.2	t <sub>f</sub> =0.27	t <sub>f</sub> =0.12	t <sub>f</sub> =0.16
ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ (με CFRP)	t <sub>f</sub> =0.37	t <sub>f</sub> =0.29	t <sub>f</sub> =0.35	t <sub>f</sub> =0.25	t <sub>f</sub> =0.55
ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ (με GFRP)	t <sub>f</sub> =0.73	t <sub>f</sub> =0.58	t <sub>f</sub> =0.69	t <sub>f</sub> =0.51	t <sub>f</sub> =1.09

Πίνακας 8. 1-απαιτούμενο πάχος σε mm σε σχέση με τους κανονισμούς και το υλικό περίσφιγξης για m=2.6

m=3.5	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.1	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.2	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.3	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.4	ΔΙΑΤΟΜΗ 6.5
ΚΑΝ.ΕΠΕ (με CFRP)	t <sub>f</sub> =0.26	t <sub>f</sub> =0.3	t <sub>f</sub> =0.36	t <sub>f</sub> =0.21	t <sub>f</sub> =0.28
ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ (με CFRP)	t <sub>f</sub> =0.79	t <sub>f</sub> =0.63	t <sub>f</sub> =0.79	t <sub>f</sub> =0.55	t <sub>f</sub> =1.18
ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ (με GFRP)	t <sub>f</sub> =1.57	t <sub>f</sub> =1.25	t <sub>f</sub> =1.49	t <sub>f</sub> =1.09	t <sub>f</sub> =2.34

Πίνακας 8. 2-απαιτούμενο πάχος σε mm σε σχέση με τους κανονισμούς και το υλικό περίσφιγξης για m=3.5

Από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εργασίας παρατηρείται αύξηση του απαιτούμενου πάχους για περίσφιγξη με ινοπλισμένα πολυμερή με βάση τον ευρωκώδικα σε σχέση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012. Η αύξηση, αυτή, αγγίζει κατά καλή προσέγγιση το διπλάσιο. Μπορεί, λοιπόν, να τονιστεί ότι ο ευρωκώδικας παρουσιάζεται περισσότερο προς τη μεριά της ασφάλειας σε σχέση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012 και αναγκαστικά γίνεται περισσότερο ακριβός.

Παρατηρείται, επίσης, ότι το απαιτούμενο πάχος για περίσφιγξη με ίνες από γυαλί είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του άνθρακα, σχεδόν το διπλάσιο. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη διαφορά που έχουν τα μέτρα ελαστικότητας των δυο υλικών. Η χρήση, όμως, των ινοπλισμένων από γυαλί σε σχέση με τον άνθρακα είναι πιο διαδεδομένη εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους.

Τέλος, είναι προφανές, ότι όσο αυξάνει η ανάγκη για αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας τόσο περισσότερο αυξάνει και το απαιτούμενο πάχος της περίσφιγξης.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ-ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ: ΣΤΕΦΑΝΟΣ Η. ΔΡΙΤΣΟΣ ΠΑΤΡΑ 2011 ΣΕΛ.80-85
- [2] ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ: ΜΙΧΑΗΛ Ν. ΦΑΡΔΗΣ ΣΕΛ.94-104
- [3] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ( ΚΑΝ.ΕΠΕ 2012 ) ΠΑΤΡΑ 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012 §8.2.3) και (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012 §6.2)



[4] <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/>

[5] ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ (EC8-3 §Α.4.4.3 ΣΕΛ. 52-53)

[6] «ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ» ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ:  
ΜΙΧΑΗΛ Ν. ΦΑΡΔΗΣ ΠΑΤΡΑ 2011 ΣΕΛ 171-174 , 196-202