

ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΕΠΑΡΚΗ ΜΗΚΗ ΜΑΤΙΣΗΣ

ΛΥΡΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π. , civ7339@upnet.gr

ΜΠΑΧΡΑΣ ΣΕΡΑΦΕΙΜ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π. , civ7378@upnet.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε, στα πλαίσια του μαθήματος *Ενισχύσεις και Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος*. Στόχος της είναι η παρουσίαση των μεθόδων για την αποκατάσταση υποστυλωμάτων με ανεπαρκή μήκη μάτισης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013[1], η σύγκριση αυτών με γνώμονα το κόστος, αλλά και η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης με ανθρακούφασμα (CFRP) και την επιρροή συγκεκριμένων παραμέτρων σ' αυτή. Οι τρόποι ενίσχυσης που παρουσιάζονται είναι η ενίσχυση με χαλύβδινα ελάσματα, με ανθρακούφασμα από ινοπλισμένα πολυμερή (CFRP) και με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος. Τα παραπάνω υπολογίζονται σε δύο διατομές υποστυλώματος, μία τετραγωνική και μία ορθογωνική, που αποτελούν τμήμα κτιρίου κατασκευής προ του 1984.

1. Εισαγωγή

Τα ανεπαρκή μήκη μάτισης σε υποστυλώματα είναι ένα σύνηθες φαινόμενο που συναντάται κυρίως σε παλαιότερες κατασκευές οι οποίες έχουν κατασκευασθεί με προηγούμενους κανονισμούς. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι η ψαθυρή αστοχία λόγω ολίσθησης των ράβδων οπλισμού. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την επίλυση αυτού του προβλήματος προτείνει την επιπλέον (εξωτερική) ενίσχυση μέσω τριών μεθόδων. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζεται η ενίσχυση του υποστυλώματος με χαλύβδινα ελάσματα, με ινοπλισμένα πολυμερή (CFRP) καθώς και με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος. Οι διατομές που επιλέχθηκαν είναι μία τετραγωνική και μία ορθογωνική, έτσι ώστε να παρουσιάζεται η συμβολή της ενίσχυσης σε διαφορετικούς τύπους υποστυλωμάτων. Επιπλέον παρουσιάζεται μία σύντομη ανάλυση κόστους με την οποία γίνεται ακόμα πιο σαφής ο τρόπος που επιλέγεται μία συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης με CFRP, καθώς και διερεύνηση ορισμένων παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ενός ανεπαρκώς ματισμένου υποστυλώματος. Παρουσιάζονται αρχικά, διαγράμματα M-θ για τις περιπτώσεις ματισμένου, αμάτιστου, ματισμένου μετά την ενίσχυση με CFRP και αμάτιστου μετά την ενίσχυση με CFRP. Ακολουθούν διαγράμματα που δείχνουν την επιρροή του μήκους μάτισης στις γωνίες στροφής χορδής, την ποσοστιαία αύξηση του θ_u με την αύξηση του λόγου πλευρών στο ορθογωνικό υποστυλώμα, και τέλος διαγράμματα που δείχνουν την επίδραση του αξονικού φορτίου σε ένα ανεπαρκώς ματισμένο υποστυλώμα.

2. Εφαρμογή

Σε δώροφο κτίριο, κατασκευής προ του 1984, με καθαρό ύψος ορόφου 3m, υπάρχουν τετραγωνικά και ορθογωνικά υποστυλώματα ύψους $h=2,7m$.

Έστω δύο εξ' αυτών:

- i) Τετραγωνικό υποστυλώμα διαστάσεων $b_1=b_2=350$ mm, οπλισμένο με 4Φ20
- ii) Ορθογωνικό υποστυλώμα διαστάσεων $b_1=350$ mm και $b_2=450$ mm, οπλισμένο με 4Φ22 γωνιακά και 2Φ18 στο κέντρο των μεγάλων πλευρών

Υλικά: Χάλυβας S500 και Σκυρόδεμα C16/20

Θεωρούμε:

$$f_{cm}=f_{ck}+8 \text{ MPa} = 24 \text{ MPa} \text{ και } f_{sy}=1,15 * f_y = 575 \text{ MPa}$$

Επικάλυψη οπλισμών: $c=25 \text{ mm}$

Στάθμη επιτελεστικότητας B και Πλήρες επίπεδο γνώσης

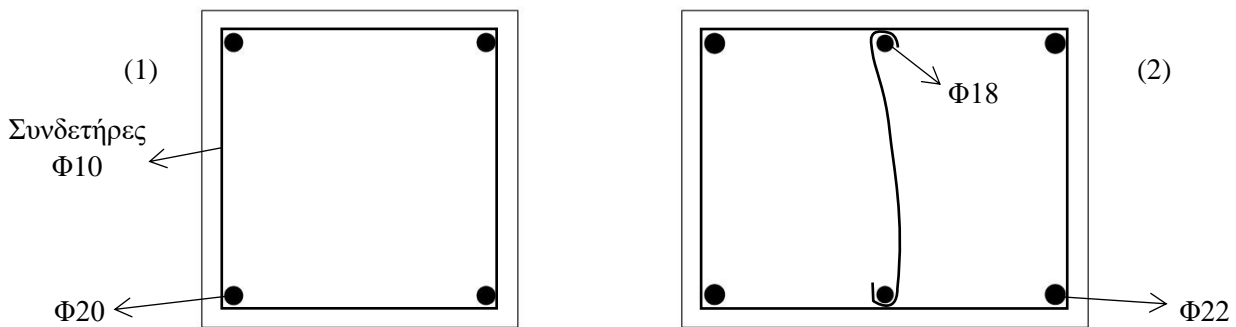
$$N_d=1000 \text{ KN}$$

$$E_s=200 \text{ GPa}$$

$$E_c=27,5 \text{ GPa}$$

Στη βάση των υποστυλωμάτων (σύνδεση με θεμελίωση) λαμβάνει χώρα μάτιση με διαθέσιμο μήκος μάτισης $l_s=600 \text{ mm}$.

Ζητείται ο έλεγχος επάρκειας του μήκους μάτισης, και η ενίσχυση της περιοχής μάτισης σε περίπτωση που το διαθέσιμο μήκος μάτισης δεν επαρκεί.



Εικόνα 1: Διατομές τετραγωνικού (1) και ορθογωνικού υποστυλώματος (2)

ΛΥΣΗ:

$$\text{Απαιτούμενο Μήκος Μάτισης: } l_{s0} = \frac{\varphi * \sigma_{sd}}{4 * f_{bd}} \quad (1)$$

Όπου: $\sigma_{sd}=f_{ym}= 1.3 * 500=650 \text{ MPa}$ (κοινό και για τις δυο διατομές)

$$F_{bd} = 2.25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctm} = 2.25 * 1 * 1 * 0.3 * (16 \text{ MPa})^{2/3} = 4.286 \text{ MPa} \quad (2)$$

φ : η μεγαλύτερη διάμετρος της διατομής

Άρα η (1) για τετραγωνική διατομή $\rightarrow l_{s0}=758,286 \text{ mm}$

η (1) για ορθογωνική διατομή $\rightarrow l_{s0}=834,114 \text{ mm}$

Και στις δύο διατομές ισχύει ότι $l_s < l_{s0}$. Άρα απαιτείται ενίσχυση στην περιοχή της μάτισης.

Έλεγχος Προϋποθέσεων Εφαρμογής Εξωτερικής Ενίσχυσης:

1) Πρέπει $l_s > \max(0.3 * l_{s0} ; 15 * d_s)$ (KAN.ΕΠΕ. §8.2.1.2 iii)

Όπου d_s : διάμετρος ράβδου οπλισμού

Για τετραγωνική διατομή: $l_s > 300 \text{ mm}$ που ισχύει

Για ορθογωνική διατομή: $l_s > 330 \text{ mm}$ που ισχύει

2) Πρέπει το μήκος εφαρμοζόμενης περίσφιγξης να είναι τουλάχιστον:

Για τετραγωνικό: $l = \max(h_{cr} ; 1,3 * l_s ; 600 \text{ mm}) = 650 \text{ mm}$

όπου $h_{cr} = \max(h_c ; b_c ; 450 \text{ mm} ; H_{cl}/6) = 500 \text{ mm}$

Άρα το υποστύλωμα θα ενισχυθεί για ύψος 650mm.

Για ορθογωνικό: $h_{cr}=500\text{mm}$, άρα πάλι $l=650\text{mm}$

Εφαρμογή Ενίσχυσης :

A) Χαλύβδινα Ελάσματα:

Θα χρησιμοποιηθεί χάλυβας Fe360 ($f_y=235\text{ MPa}$)

A' τρόπος:

Ο απαιτούμενος οπλισμός περίσφιγξης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{A_j}{s} = \gamma_{rd} * \frac{(1-\lambda_s)}{\beta} * \frac{1}{\mu} * \frac{f_y k}{\sigma_{jd}} * \frac{A_b}{l_s} \quad (3)$$

(KAN.ΕΠΕ. 8.3)

όπου για τετραγωνικό:

$$A_b = \frac{\pi * d_s^2}{4} = 314,159 \text{ mm}^2, \psi = 1 \text{ μειωτικός συντελεστής αποδοτικότητας}$$

$$\lambda_s = 0$$

$$c/d_s = 0,25 < 2 \text{ άρα } \beta = 1$$

$$\mu = 1 \text{ ελλείπει άλλων στοιχείων}$$

$$s_d = 0.4 \text{ mm για στάθμη επιτελεστικότητας B}$$

$$w_d = 0.6 * s_d^{2/3} = 0.326 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\bar{b} = \frac{b_1 + b_2}{2} = 350 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{jd} = \sqrt{2} * w_d / \bar{b} = 0,001316 \quad (5)$$

$$\sigma_{jd} = E_j * \epsilon_{jd} = 263,23 \text{ MPa} > 235 \text{ MPa Άρα } \sigma_{jd} = 235 \text{ MPa} \quad (6)$$

(KAN.ΕΠΕ §8.2.1.2 β ii))

$$\text{Επομένως } \frac{A_j}{s} = 1,671 \text{ mm}$$

Για ορθογωνικό :

$$A_b = \frac{\pi * d_s^2}{4} = 380,133 \text{ mm}^2, \psi = 1 \text{ μειωτικός συντελεστής αποδοτικότητας}$$

$$\lambda_s = 0$$

$$c/d_s = 0,25 < 2 \text{ άρα } \beta = 1$$

$$\mu = 1 \text{ ελλείπει άλλων στοιχείων}$$

$$s_d = 0.4 \text{ mm για στάθμη επιτελεστικότητας B}$$

$$w_d = 0.6 * s_d^{2/3} = 0.326 \text{ mm}$$

$$\bar{b} = \frac{b_1 + b_2}{2} = 400 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{jd} = \sqrt{2} * w_d / \bar{b} = 0,001152$$

$$\sigma_{jd} = E_j * \epsilon_{jd} = 230,326 \text{ MPa} < 235 \text{ MPa Άρα } \sigma_{jd} = 230,326 \text{ MPa}$$

(KAN.ΕΠΕ §8.2.1.2 β ii))

$$\text{Επομένως } \frac{A_j}{s} = 2,063 \text{ mm}$$

B' Τρόπος : Για γωνιακές ράβδους δομικών στοιχείων ορθογωνικής διατομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι παρακάτω σχέσεις :

$$\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ}} = 1,3 * [k_1 * \left(\frac{f_{sy}}{f_c} * \frac{d_s}{l_s}\right) - 0,4 * \frac{c}{d_s} - 0,30]^2 * \frac{f_c^2 * d_s^2}{k_2 * E_j * f_{ctm}} \quad (7) \text{ (KAN.ΕΠΕ Σ8.1 α)}$$

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = \frac{12}{(s_d * s_u)} * \left(\frac{f_{sy}^3}{f_u * f_c^2}\right) * \left(\frac{d_s^2}{a_N * l_s}\right)^3 * a_N \quad (8) \text{ (KAN.ΕΠΕ Σ8.1 β)}$$

Όπου:

$k_1 = 1,5$ για στάθμη Επιτελεστικότητας B (δείκτης που εκφράζει τον αποδεκτό βαθμό βλάβης πριν από την αστοχία)

$k_2 = 0,3$ για κάθε στάθμη Επιτελεστικότητας

$s_u = 2$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ σχόλια §8.2.1.2 β) ii)

$$a_N = \sqrt{2} * (2 * c + 1,5 * d_s) \quad (9) \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ σχόλια §6.3})$$

Για τετραγωνικό: $\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ.}} = 0,41494\text{mm}$

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = 1,9507\text{mm}, \text{ με } a_N = 113,137\text{mm}$$

Από αυτά επιλέγεται το μεγαλύτερο. Άρα $\left(\frac{A_j}{s}\right) = 1,9507\text{mm}$

Για ορθογωνικό: $\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ.}} = 2,1672\text{mm}$

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = 3,2104\text{mm}, \text{ με } a_N = 117,3797\text{mm}$$

$$\text{Άρα } \left(\frac{A_j}{s}\right) = 3,2104\text{mm}$$

Έστω ότι χρησιμοποιείται ολόσωμος μεταλλικός μανδύας :

Για την τετραγωνική διατομή : Α' τρόπος : $t_{\text{απ.}} = 1,671\text{mm}$

B' τρόπος : $t_{\text{απ.}} = 1,9507\text{mm}$

Για την ορθογωνική διατομή : Α' τρόπος : $t_{\text{απ.}} = 2,063\text{mm}$

B' τρόπος : $t_{\text{απ.}} = 3,2104\text{mm}$

Έστω ότι χρησιμοποιούνται μεταλλικά ελάσματα :

Για την τετραγωνική διατομή :

Α' τρόπος : Έστω πλάτος $w_j = 35\text{mm}$ και πάχος $t_j = 6\text{mm}$

$$\frac{A_j}{s} = \frac{w_j * t_j}{s} = 1,671 \Rightarrow s = 125,669\text{mm} \quad (10)$$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.1.2 (β) (v))

Πρέπει $s_{\text{καθ.}} = s - w_j = 90,669\text{mm} \leq s_{\text{max}} = 0,3 * d = 92,1\text{mm}$ που ισχύει. (11)

B' τρόπος : Έστω πλάτος $w_j = 35\text{mm}$ και πάχος $t_j = 6\text{mm}$

$$\frac{A_j}{s} = \frac{w_j * t_j}{s} = 1,9507\text{mm} \Rightarrow s = 107,656\text{mm}$$

Πρέπει $s_{\text{καθ.}} = s - w_j = 72,656\text{mm} \leq s_{\text{max}} = 0,3 * d = 92,1\text{mm}$ που ισχύει .

Για την ορθογωνική διατομή :

Α' τρόπος : Έστω πλάτος $w_j = 35\text{mm}$ και πάχος $t_j = 6\text{mm}$

$$\frac{A_j}{s} = \frac{w_j * t_j}{s} = 2,063 \Rightarrow s = 101,793\text{mm} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.1.2 (β) (v)})$$

Πρέπει $s_{\text{καθ.}} = s - w_j = 66,793\text{mm} \leq s_{\text{max}} = 0,3 * d = 121,8\text{mm}$ που ισχύει.

B' τρόπος : Έστω πλάτος $w_j = 40\text{mm}$ και πάχος $t_j = 10\text{mm}$

$$\frac{A_j}{s} = \frac{w_j * t_j}{s} = 3,2104\text{mm} \Rightarrow s = 124,595\text{mm}$$

Πρέπει $s_{\text{καθ.}} = s - w_j = 84,595\text{mm} \leq s_{\text{max}} = 0,3 * d = 121,8\text{mm}$ που ισχύει .

Άρα η τετραγωνική διατομή θα ενισχυθεί με μεταλλικά ελάσματα **35x6/105** και η ορθογωνική διατομή με ελάσματα **40x10/120**.

B) Ινοπλισμένα Πολυμερή με Ίνες Άνθρακα (CFRP)

Θα χρησιμοποιηθεί Άνθρακούφασμα, με $E=250\text{ GPa}$ και $\epsilon_{cu}=0,6\%$.

Α' Τρόπος

Ο απαιτούμενος οπλισμός περίσφιγξης υπολογίζεται και πάλι από τη σχέση:

$$\frac{A_j}{s} = \gamma_{rd} * \frac{(1-\lambda_s)}{\beta} * \frac{1}{\mu} * \frac{f_{yk}}{\sigma_{jd}} * \frac{A_b}{l_s} \quad (12)$$

όπου ισχύουν τα παρακάτω:

$A_b = 314 \text{ mm}^2$ για την τετραγωνική διατομή και

$A_b = 380,13 \text{ mm}^2$ για την ορθογωνική

$\lambda_s = 0$

$c/d_s = 1,25 < 2$ άρα $\beta = 1$ για τετραγωνικό και $c/d_s = 1,136 < 2$ άρα πάλι $\beta = 1$

$\mu = 1$ ελλείψει άλλων στοιχείων

$s_d = 0.4 \text{ mm}$ για στάθμη επιτελεστικότητας B

$w_d = 0.6 * s_d^{2/3} = 0.326 \text{ mm}$ (13)

$\bar{b} = \frac{b_1+b_2}{2} = 350 \text{ mm}$ για τετραγωνική και $\bar{b} = 400 \text{ mm}$ για ορθογωνική

$\epsilon_{jd} = \sqrt{2} * w_d / \bar{b} = 0,001317$ για τετραγωνική και $\epsilon_{jd} = 0,001152$ (14)

$\sigma_{j,max} = 0,75 * E * \epsilon_u = 1125 \text{ Mpa}$ (15)

$\sigma_{jd} = E_j * \epsilon_{jd} = 329,037 \text{ MPa} < \sigma_{jd,max}$ για τετραγωνική διατομή και (16)

$\sigma_{jd} = 287,907 \text{ MPa} < \sigma_{jd,max}$ για την ορθογωνική

Άρα μέσω της (12) για τετραγωνικό προκύπτει:

$$\frac{A_j}{s} = 1,193 \text{ mm}$$

Έστω $t_{στρώσης} = 0,4 \text{ mm}$ οπότε $k = 1,193/0,4 = 2,982 \approx 3$ στρώσεις ανθρακούφασματος, και δε χρειάζεται απομείωση λόγω μεγάλου αριθμού στρώσεων αφού $k \leq 4$

ενώ για ορθογωνικό:

$$\frac{A_j}{s} = 1,650 \text{ mm}$$

Έστω $t_{στρώσης} = 0,5 \text{ mm}$ οπότε $k = 1,650/0,5 = 3,301 \approx 4$ στρώσεις ανθρακούφασματος, και επίσης δε χρειάζεται απομείωση λόγω μεγάλου αριθμού στρώσεων αφού $k \leq 4$

B' Τρόπος (σύμφωνα με τις σχέσεις Σ8-1 των σχολίων της § 8.2.1.2. του ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

$$\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ.}} = 1,3 \left[k_1 \left(\frac{f_{sy} d_s}{f_c l_s} \right) - 0,4 \frac{c}{d_s} - 0,30 \right]^2 \frac{f_c^2 d_s^2}{k_2 E_j f_{ctm}} \quad (17)$$

και

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = \frac{12}{(s_d:s_u)} \left(\frac{f_{sy}^3}{f_u f_c^2} \right) \left(\frac{d_s^2}{a_N l_s} \right)^3 a_N \quad (18)$$

όπου $k_1=1,5$ για στάθμη επιτελεστικότητας B και $k_2=0,3$.

Ως $\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}}$ επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή που θα προκύψει από τις δύο παραπάνω σχέσεις.

Μέσω των ανωτέρω σχέσεων για την τετραγωνική διατομή προέκυψαν τα παρακάτω:

$$\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ.}} = 0,852 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = 0,407 \text{ mm}$$

από τα οποία όπως αναφέρθηκε επιλέγεται το μεγαλύτερο άρα:

$$\frac{A_j}{s} = \max(0,852 ; 0,407) = 0,852 \text{ mm}$$

Έστω $t_{\text{στρώσης}} = 0,4 \text{ mm}$ οπότε $k = 0,852/0,4 = 2,130 \approx 3$ στρώσεις ανθρακούφασματος, και επίσης δε χρειάζεται απομείωση λόγω μεγάλου αριθμού στρώσεων αφού $k \leq 4$

ενώ για την ορθογωνική:

$$\left(\frac{A_j}{s}\right)_{\text{απ.}} = 1,734 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{A_j}{s_w}\right)_{\text{απ.}} = 0,671 \text{ mm}$$

άρα επιλέγεται: $\frac{A_j}{s} = \max(1,734 ; 0,671) = 1,734 \text{ mm}$

Έστω $t_{\text{στρώσης}} = 0,5 \text{ mm}$ οπότε $k = 1,734/0,5 = 3,467 \approx 4$ στρώσεις ανθρακούφασματος, και επίσης δε χρειάζεται απομείωση λόγω μεγάλου αριθμού στρώσεων αφού $k \leq 4$.

Οπότε, το τετραγωνικό υποστυλώμα θα ενισχυθεί με **3 στρώσεις CFRP πάχους 0,4 mm** η κάθε μία, και το ορθογωνικό με **4 στρώσεις πάχους 0,5 mm**.

Γ) Ενίσχυση με μανδύα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ.)

Έστω ότι περιμετρικά του υποστυλώματος σκυροδετείται μανδύας με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης πάχους 100 mm και τοποθετούνται συνδετήρες Φ10, S500. Η επίλυση θα γίνει με τον Α' τρόπο αφού ο Β' τρόπος δεν υιοθετείται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την περίπτωση μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το απαιτούμενο πάχος του μανδύα θα προκύψει και πάλι από τη σχέση (12) :

$$\frac{A_j}{s} = \gamma_{rd} * \frac{(1-\lambda s)}{\beta} * \frac{1}{\mu} * \frac{f_{yk}}{\sigma_{jd}} * \frac{A_b}{l_s}$$

από την οποία και για $\sigma_{jd} = 235 \text{ MPa}$ προκύπτει για την τετραγωνική διατομή:

$$\frac{A_j}{s} = 1,670 \text{ mm}$$

$$\text{Έτσι ισχύει: } \frac{A_j}{s} = \frac{\pi d^2}{4s} = \frac{78,5}{s} = 1,670 \Rightarrow s = 47,024 \text{ mm} \quad (19)$$

$$s_{\max} = \min \left\{ \begin{array}{l} s = \min \left(\frac{h}{2}, 100 \right) = 100 \text{ mm} \\ a_{sw} \leq 0,8 \left(\frac{f_{ywd}}{f_{ctm}} \right) \frac{d_h^2}{t} = 182,586 \text{ mm} \end{array} \right. \quad \text{άρα } s_{\max} = 100 \text{ mm} \quad (20)$$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση (Σ8.7))

οπότε τοποθετούμε συνδετήρες Φ10/45 και S500.

Αν εναλλακτικά επιλέξουμε συνδετήρες Φ12

$$\frac{A_j}{s} = \frac{\pi * 12^2 / 4}{s} = 1,67 \Rightarrow s = 67,72 \text{ mm}, \text{ οπότε τοποθετούμε συνδετήρες } \Phi 12/65 \text{ και } S500.$$

Για την ορθογωνική διατομή:

$$\frac{A_j}{s} = 2,021 \text{ mm}$$

$$\text{Έτσι ισχύει: } \frac{A_j}{s} = \frac{\pi d^2}{4s} = \frac{78,5}{s} = 2,021 \Rightarrow s = 38,84 \text{ mm}$$

$$s_{\max} = \min \left\{ \begin{array}{l} s = \min \left(\frac{h}{2}, 100 \right) = 100 \text{ mm} \\ a_{sw} \leq 0,8 \left(\frac{f_{ywd}}{f_{ctm}} \right) \frac{d_h^2}{t} = 182,586 \text{ mm} \end{array} \right. \quad \text{άρα } s_{\max} = 100 \text{ mm}$$

οπότε τοποθετούμε συνδετήρες Φ10/35 και S500.

Αν εναλλακτικά επιλέξουμε συνδετήρες Φ12

$$\frac{A_j}{s} = \frac{\pi \cdot 12^2 / 4}{s} = 2,021 \Rightarrow s = 55,96 \text{ mm, οπότε τοποθετούμε συνδετήρες Φ12/55 και S500.}$$

3. Σύγκριση Μεθόδων με βάση το κόστος

Θεωρήθηκε χρήσιμο μετά τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού σε κάθε περίπτωση, να παρουσιαστεί και μια ενδεικτική ανάλυση κόστους με στόχο την περαιτέρω ενημέρωση πάνω στις τιμές της αγοράς. Οι τιμές που παρουσιάζονται παρακάτω προέκυψαν μετά από επικοινωνία με κατασκευαστική εταιρεία, εξειδικευμένη στα θέματα επισκευών και ενισχύσεων[5].

Το κοστολόγιο για το ανθρακούφασμα (CFRP) προκύπτει ανά τετραγωνικό μέτρο ενίσχυσης και περιλαμβάνει τόσο το κόστος του υλικού όσο και το κόστος της εργασίας και τοποθέτησης. Το κόστος των μεταλλικών ελασμάτων προκύπτει ανά τρέχων μέτρο ύψους. Αντίστοιχα το κόστος του μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος (gunite) δίδεται επίσης ανά τρέχων μέτρο ύψους. Στους μανδύες επειδή απαιτείται και εκσκαφή για την ενίσχυση έως και τη θεμελίωση, προκύπτει επιπλέον κόστος για την εκσκαφή και την αποκομιδή των μπαζών.

Στην περίπτωση όπου πρόκειται μόνο για πρόβλημα ανεπάρκειας στο μήκος μάτισης, η ενίσχυση προτείνεται να γίνει τοπικά, οπότε η λύση του μανδύα Ο.Σ. δεν ενδείκνυται, αφού θα πρέπει να ενισχυθεί το υποστύλωμα σε όλο το ύψος του. Σε αυτή την περίπτωση η σύγκριση γίνεται μεταξύ μεταλλικών ελασμάτων και ανθρακουφάσματος. (Πίνακας 1)

Αν έχουν προκύψει και άλλες ανεπάρκειες στο υποστύλωμα ο μανδύας Ο.Σ. αποτελεί μια αποδεκτή λύση, και για αυτό η σύγκριση γίνεται μεταξύ και των τριών μεθόδων. (Πίνακας 2)

Τα παρακάτω προκύπτουν για τετραγωνικό υποστύλωμα 350/350.

Κόστος Μεταλλικών Ελασμάτων: 150€/τρέχων μέτρο ύψους

Άρα έχουμε: $150 \cdot 0,65 = 130\text{€}$ και να το υπολογίσουμε για όλο το ύψος:

$$150 \cdot 2,7 = 405\text{€}$$

Κόστος Ανθρακουφάσματος: Πρώτη στρώση → 80€/τετρ. μέτρο

Δεύτερη-τρίτη στρώση → 50€/τετρ. μέτρο

Άρα για 3 στρώσεις έχουμε κόστος 180€/τετρ. μέτρο.

$$\text{Περίμετρος} = 4 \cdot 0,35 = 1,4 \text{ m}$$

Εφόσον θέλουμε να ενισχυθεί τοπικά για ύψος 0,65 m, έχουμε: $180 \cdot 1,4 \cdot 0,65 \approx 160\text{€}$

Αν η ενίσχυση γινόταν σε όλο το ύψος, έχουμε: $180 \cdot 1,4 \cdot 2,7 \approx 680\text{€}$

Κόστος Μανδύα Ο.Σ.: Ενδεικτική τιμή για ενίσχυση με μανδύα: 320€/τρέχων μέτρο ύψους. Απαιτείται όμως ενίσχυση μέχρι τη στάθμη θεμελίωσης, προστίθεται δηλαδή 1,00 περίπου μέτρο ενίσχυσης κάτω του εδάφους.

Άρα: $320 \cdot (2,7 + 1,0) = 1184\text{€}$ για όλο το ύψος ενός υποστυλώματος.

Τρόπος Ενίσχυσης	Κόστος ανά μονάδα	Συνολικό κόστος
Μεταλλικά ελάσματα	150€/τρέχων μέτρο ύψους	130€

Ανθρακούφασμα (CFRP)	180€/m ²	160€
----------------------	---------------------	------

Πίνακας 1

Τρόπος Ενίσχυσης	Κόστος ανά μονάδα	Συνολικό Κόστος
Μεταλλικά ελάσματα	150€/τρέχων μέτρο ύψους	405€
Ανθρακούφασμα (CFRP)	180€/ m ²	680€
Μανδύας Ο.Σ.	320€/τρέχων μέτρο ύψους	1184€

Πίνακας 2

4. Εξαγωγή διαγραμμάτων M-θ:

Σε αυτή τη παράγραφο θα υπολογισθούν η ροπή διαρροής M_y και η γωνία στροφής χορδής θ για τις περιπτώσεις: ματισμένου, αμάτιστου, ματισμένου μετά την ενίσχυση με CFRP και αμάτιστου μετά την ενίσχυση με CFRP.

Ματισμένο υποστύλωμα :

Εύρεση $l_{b,min}$:

$$l_{b,min} = 0,3 * d_b * \frac{f_y}{\sqrt{f_c}} \quad (21)$$

όπου $l_{b,min}$ το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης που απαιτείται για την ανάπτυξη της πλήρους ροπής αστοχίας (ή διαρροής) της διατομής.

Για την τετραγωνική διατομή: $l_{b,min} = 704,228\text{mm} > l_b = 600\text{mm}$

Για την ορθογωνική διατομή: $l_{b,min} = 774,651\text{mm} > l_b = 600\text{mm}$

Άρα και στις δύο διατομές η τάση «διαρροής» των εφελκόμενων ράβδων θα ληφθεί ίση με $f_y * \frac{l_b}{l_{b,min}}$

(KAN.EΠE. §7.2.1 δ) ii))

Υπολογισμός Ροπής Διαρροής :

$$\frac{M_y}{b*d^3} = (1/r)_y * \{E_c * \frac{\xi_y^2}{2} * (0,5 * (1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3}) + [(1 - \xi_y) * \rho + (\xi_y - \delta') * \rho' + \frac{\rho_v}{6} * (1 - \delta')]\} * (1 - \delta') * \frac{E_s}{2} \quad (22)$$

(KAN.EΠE ΠΑΡΑΡΤ.7^A σχέση A.6)

Αν η διαρροή οφείλεται σε διαρροή του εφελκυστικού οπλισμού :

$$(1/r)_y = \frac{f_y * \frac{l_b}{l_{b,min}}}{E_s * (1 - \xi_y) * d} \quad (A.1) \quad (23)$$

Για τετραγωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,01387\text{m}^{-1}$

Για ορθογωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,009196\text{m}^{-1}$

Αν η διαρροή οφείλεται σε μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος :

$$(1/r)_y = \frac{1,8 * f_c}{E_c * \xi_y * d} \quad (A.2) \quad (24)$$

Για τετραγωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,018188\text{m}^{-1}$

Για ορθογωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,013933\text{m}^{-1}$

(KAN.EΠE. ΠΑΡ.7A)

Από τις δύο περιπτώσεις θα επιλεγεί το μικρότερο έτσι ώστε να υπολογιστεί ο όρος ξ_y . Και στις δύο διατομές το μικρότερο $(1/r)_y$ είναι της περίπτωσης που οφείλεται στην διαρροή του χάλυβα.

$$\text{Υπολογισμός } \xi_y : \xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A \quad (25)$$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ ΠΑΡ.7Α Α.3)

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{b*d*f_y} \quad (26)$$

$$B = \rho + \rho' * \delta' + 0,5 * \rho_v * (1 + \delta') + \frac{N}{b*d*f_y} \quad (27)$$

Όπου ρ , ρ' , ρ_v ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου, και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού, $\delta' = d'/d$ όπου d' η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα του σκυροδέματος και $\alpha = E_s / E_c$.

(ΚΑΝ.ΕΠΕ ΠΑΡ.7Α Α.4)

Για τετραγωνική διατομή: $\rho = \rho' = 0,005129$, $\rho_v = 0$, $\delta' = 0,1401$ και $\alpha = 7,273$

$$A = 0,02926, B = 0,02484$$

$$\text{Αντικαθιστώντας στην Α.3} \rightarrow \xi_y = 0,4249$$

Για ορθογωνική διατομή: $\rho = \rho' = 0,04827$, $\rho_v = 0,00323$, $\delta' = 0,1084$ και $\alpha = 7,273$

$$A = 0,02869, B = 0,02294$$

$$\text{Αντικαθιστώντας στην Α.3} \rightarrow \xi_y = 0,4056$$

Αφού υπολογίστηκε και το ξ_y είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός της M_y του αμάτιστου οπλισμού από την Α.6.

Για τετραγωνική διατομή: $M_y = 202,729 \text{ KNm}$

Για ορθογωνική διατομή: $M_y = 381,842 \text{ KNm}$

Υπολογισμός γωνίας στροφής θ_y :

$$\theta_y = (1/r)_y * \frac{L_s + a_v * z}{3} + 0,0014 * \left(1 + 1,5 * \frac{h}{L_s}\right) + \frac{(1/r)_y * d_b * f_y}{8 * \sqrt{f_c}} \quad (28)$$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7.2.2 (Σ.2))

όπου: $a_v * z$ εκφράζει την επιρροή του «μήκους μετάθεσης» των ροπών κάμψης σ' αυτές. Επειδή η ένωση γίνεται με παράθεση των ευθύγραμμων άκρων σε μήκος l_b μικρότερο από το $l_{b,min}$, ο δεύτερος όρος θα πολλαπλασιαστεί επί τον λόγο της ροπής αστοχίας (ή διαρροής) προς την τιμή της ροπής αυτής εκτός του μήκους παράθεσης. Επίσης, στον 3^ο όρο η τιμή των f_y και e_y θα πολλαπλασιαστεί επί τον λόγο του μήκους παράθεσης l_b προς $l_{b,min}$.

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7.2.2 δ) σχόλια β))

Άρα η (28) θα γίνει :

$$\theta_y = (1/r)_y * \frac{L_s + a_v * z}{3} + 0,0014 * \left(1 + 1,5 * \frac{h}{L_s}\right) * \frac{M_y}{M_{rd}} + \frac{(1/r)_y * d_b * f_y}{8 * \sqrt{f_c}} * \frac{l_b}{l_{b,min}}$$

Υπολογισμός M_{rd} :

$$M_{rd} = \mu_d * b * h^2 * f_{cd} \quad (29)$$

Για τετραγωνική διατομή: $\mu_d = 0,20$ για $\omega_{tot} = 0,246$ και $\nu_d = 0,34$ [4]

$$M_{rd} = 205,8 \text{ kNm}$$

Για ορθογωνική διατομή: $\mu_d = 0,23$

$$M_{rd} = 391,23 \text{ kNm}$$

Το L_s , για υποστυλώματα μπορεί να λαμβάνεται ως το μισό του καθαρού ύψους εδώ $L_s = 1,35 \text{m}$ αφού $h_{καθ} = 2,7 \text{m}$.

(ΚΑΝ.ΕΠΕ §7.2.3)

Ο συντελεστής a_v είναι ίσος με 0 αφού η V_{R1} που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση θεωρήθηκε μεγαλύτερη από την τιμή της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή V_{Mu} .

(ΚΑΝ.ΕΠΕ §7.2.2 δ))

Επομένως η θ_y θα είναι : Για τετραγωνική διατομή: $\theta_y = 0,01163$

Για ορθογωνική διατομή: $\theta_y = 0,00851$

Εύρεση πλαστικής γωνίας στροφής κατά την αστοχία θ_u :

Είναι δυνατή η εμπειρική εκτίμηση της διαθέσιμης τιμής της πλαστικής γωνίας στροφής συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων και των οπλισμών τους, με τη βοήθεια της παρακάτω εμπειρικής σχέσης:

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_u - \theta_y$$

$$= 0,0145(0,25^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} \right]^{0,3} (f_c)^{0,2} (a_s)^{0,35} 25^{\left(a \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1,275^{100\rho_d}) \quad (\Sigma.8\beta)$$

όπου: $\alpha_s = M/V_h$ (31)

$$v = N/b * h * f_c \quad (32)$$

ω, ω' : μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού

$$\rho_s = A_{sh}/b_w * s_h : \text{γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού} \quad (33)$$

ρ_d : γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού

-Σε στοιχεία που έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με βάση τα ισχύοντα στην Ελλάδα προ του 1985 οι τιμές που υπολογίζονται θα πρέπει να διαιρεθούν με 1,2.

-Αν το στοιχείο είναι υποστύλωμα θα πρέπει το δεξί μέλος να πολλαπλασιαστεί με $l_b/l_{bu,min}$ με :

$$l_{bu,min} = \frac{\Phi * f_y}{(1,05 + 14,5 * \alpha_1 * \rho_s * \frac{f_{yw}}{f_c}) * \sqrt{f_c}} \quad (34)$$

και

$$\alpha_1 = \left(1 - \frac{s_h}{2 * b_c}\right) * \left(1 - \frac{s_h}{2 * h_c}\right) * \frac{n_{restr}}{n_{tot}} \quad (35)$$

όπου s_h η (καθαρή) απόσταση συνδετήρων, b_c και h_c οι διαστάσεις του πυρήνα με $h_c \leq 1,5 \div 2,0 b_c$, n_{tot} είναι ο συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στην περίμετρο της διατομής που ενώνονται με παράθεση των άκρων τους, και n_{restr} ο αριθμός των ανωτέρω ράβδων που συγκρατούνται σε γωνία συνδετήρα.

Για την τετραγωνική διατομή: $l_{bu,min} = 974,769 \text{ mm}$

Για την ορθογωνική διατομή: $l_{bu,min} = 1228,859 \text{ mm}$

Έτσι από τη σχέση (30) προκύπτει για την τετραγωνική διατομή: $\theta_{um}^{pl} = 0,01914$ και επομένως $\theta_u = 0,03076$ για την ορθογωνική διατομή: $\theta_{um}^{pl} = 0,01396$ και $\theta_u = 0,02247$.

Αμάτιστο υποστύλωμα:

Ακολουθείται η ίδια μέθοδος με το ματισμένο με ορισμένες αλλαγές στους τύπους.

Υπολογισμός Ροπής Διαρροής :

Η σχέση από την οποία υπολογίζεται η ροπή διαρροής είναι η ίδια με πριν, δηλαδή η (22).

Για το αμάτιστο υποστύλωμα δεν νοείται ο πολλαπλασιασμός της τάσης διαρροής με $\frac{l_b}{l_{b,min}}$.

Οπότε η σχέση (23) για διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού γίνεται:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s * (1 - \xi_y) * d} \quad (\text{A.1})$$

Για τετραγωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,015754\text{m}^{-1}$

Για ορθογωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,0011359\text{m}^{-1}$

Η σχέση (24) για διαρροή διατομής που οφείλεται σε μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος παραμένει ίδια και μάλιστα με τα ίδια αποτελέσματα καθώς δεν επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Για τετραγωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,018188\text{m}^{-1}$

Για ορθογωνική διατομή: $(1/r)_y = 0,013933\text{m}^{-1}$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ. ΠΑΡ.7Α)

Από τις δύο περιπτώσεις θα επιλεγεί το μικρότερο έτσι ώστε να υπολογιστεί ο όρος ξ_y . Και στις δύο διατομές το μικρότερο $(1/r)_y$ είναι της περίπτωσης που οφείλεται στην διαρροή του χάλυβα.

Υπολογισμός ξ_y : Και πάλι οι σχέσεις είναι ίδιες με πριν, οπότε :

Για τετραγωνική διατομή: $\rho = \rho' = 0,005129$, $\rho_v = 0$, $\delta' = 0,1401$ και $\alpha = 7,273$

$A = 0,02644$, $B = 0,02203$

Αντικαθιστώντας στην (25) $\rightarrow \xi_y = 0,40557$

Για ορθογωνική διατομή: $\rho = \rho' = 0,04827$, $\rho_v = 0,003231$, $\delta' = 0,1084$ και $\alpha = 7,273$

$A = 0,02512$, $B = 0,01921$

Αντικαθιστώντας στην (25) $\rightarrow \xi_y = 0,3766$

Επομένως :

Για τετραγωνική διατομή: $M_y = 217,420 \text{ kNm}$

Για ορθογωνική διατομή: $M_y = 431,883 \text{ kNm}$

Υπολογισμός γωνίας στροφής θ_y (σχέση 28)

$$\theta_y = (1/r)_y * \frac{L_s + a_v * z}{3} + 0,0014 * \left(1 + 1,5 * \frac{h}{L_s}\right) + \frac{(1/r)_y * d_b * f_y}{8 * \sqrt{f_c}} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. §7.2.2 (Σ.2)})$$

Το L_s , για υποστυλώματα μπορεί να λαμβάνεται ως το μισό του καθαρού ύψους εδώ $L_s = 1,35\text{m}$

(ΚΑΝ.ΕΠΕ §7.2.3)

Ο συντελεστής a_v είναι ίσος με 0 για τον ίδιο λόγο με παραπάνω.

(ΚΑΝ.ΕΠΕ §7.2.2 δ))

Επομένως η θ_y θα είναι : Για τετραγωνική διατομή: $\theta_y = 0,01366$

Για ορθογωνική διατομή: $\theta_y = 0,01088$

Εύρεση πλαστικής γωνίας στροφής κατά την αστοχία θ_u :

Και πάλι εδώ δεν θα πολλαπλασιάσουμε με $l_{bu,min}$.

Επομένως η σχέση (28) θα δώσει:

Για τετραγωνική διατομή: $\alpha_s = 3,857$, $\nu = 0,3401$, $\omega = \omega' = 0,1157$, $\alpha = 0,219$,
 $\rho_s = 0,00595$, $\rho_d = 0$, $\alpha_1 = 0,6571$
 Άρα $\theta_{um}^{pl} = 0,02525$ και επομένως $\theta_u = 0,038908$

Για ορθογωνική διατομή: $\alpha_s = 3$, $\nu = 0,2646$, $\omega = \omega' = 0,1165$, $\alpha = 0,3686$,
 $\rho_s = 0,004339$, $\rho_d = 0$, $\alpha_1 = 0,6974$
 Άρα $\theta_{um}^{pl} = 0,026273$ και επομένως $\theta_u = 0,037151$

Ματισμένο και Αμάτιστο υποστύλωμα με CFRP

Μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης με ανθρακούφασμα, στο **αμάτιστο** υποστύλωμα το μόνο που μεταβάλλεται είναι η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_u . Τόσο η ροπή διαρροής M_y όσο και η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_y θεωρήθηκε ότι παραμένουν σταθερές.

Στο **ματισμένο** από την άλλη, σταθερή παραμένει μόνο η ροπή διαρροής M_y , ενώ τόσο η γωνία στροφής στη διαρροή θ_y όσο και η γωνία στροφής στην αστοχία θ_u αυξάνονται. Η διαφορά στους υπολογισμούς για το ματισμένο και το αμάτιστο θα είναι ότι το $\theta_{um,pl}$ για το ματισμένο θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το λόγο $\frac{l_b}{l_{bu,min}}$.

Για τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία θ_u απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, δηλαδή του $\theta_{um,pl}$. Για τον υπολογισμό του έγινε χρήση της σχέσης (6.51), σελ. 66 του υπό έκδοση Αναθεωρημένου Ευρωκώδικα 8 [2] σύμφωνα με την οποία:

$$\left(\frac{\alpha \rho f_u}{f_c}\right)_f = \alpha_f c_f \min \left[0,4 ; \frac{0,6 \varepsilon_{u,f} E_f \rho_f}{f_c} \right] \left(1 - 0,5 \min \left[0,4 ; \frac{0,6 \varepsilon_{u,f} E_f \rho_f}{f_c} \right] \right) \quad (36)$$

όπου: $c_f = 1,9$ για τα CFRP

$E_f = 250$ GPa , το μέτρο ελαστικότητας του ανθρακούφασματος

$\varepsilon_{u,f} = 1,5\%$

$$\alpha_f = 1 - \frac{(b_x - 2R)^2 + (b_y - 2R)^2}{3b_x b_y} \quad (37)$$

$$\rho_f = \frac{2t_f}{b} \quad (38)$$

Η παραπάνω ποσότητα θα συγκριθεί με τον εκθέτη $\left(\frac{\alpha \rho_{sw} f_{ywd}}{f_c}\right)$ της σχέσης Σ.8β σελ. 7-16 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και ο μεγαλύτερος εκ των δύο θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του $\theta_{um,pl}$ των υποστυλωμάτων μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.

Έχουμε ήδη υπολογίσει παραπάνω:

Για το **ματισμένο υποστύλωμα με CFRP**:

$M_y = 202,729$ KNm τετραγωνική διατομή και

$M_y = 381,842$ KNm ορθογωνική διατομή

Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή θ_y μετά την ενίσχυση θεωρήθηκε ότι φτάνει το θ_y του αμάτιστου, οπότε οι παρακάτω τιμές ισχύουν και για την περίπτωση του ματισμένου με CFRP.

ενώ για το **αμάτιστο υποστύλωμα με CFRP**:

$M_y = 217,420 \text{ KNm}$ και $\theta_y = 0,01366$ για την τετραγωνική διατομή και
 $M_y = 431,883 \text{ KNm}$ και $\theta_y = 0,01088$ για την ορθογωνική διατομή

Θεωρώντας $R = 40 \text{ mm} > 30 \text{ mm}$ που είναι το ελάχιστο απαιτούμενο [3], υπολογίζουμε το συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιγξης με CFRP α_f από τη σχέση (37).

Για την τετραγωνική διατομή όπου $b_x = b_y = 350 \text{ mm}$ προκύπτει $\alpha_f = 0,603$

Για την ορθογωνική διατομή όπου $b_x = 450 \text{ mm}$ και $b_y = 350 \text{ mm}$ προκύπτει $\alpha_f = 0,556$

Το γεωμετρικό ποσοστό των CFRP υπολογίζεται από τη σχέση (38) όπου t_f είναι το συνολικό πάχος της ενίσχυσης όπως υπολογίστηκε παραπάνω με βάση τις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. με

$t_f = k * 0,4 = 1,2 \text{ mm}$ για την τετραγωνική διατομή και

$t_f = k * 0,5 = 2 \text{ mm}$ για την ορθογωνική διατομή

όπου k ο αριθμός των στρώσεων

Άρα προκύπτει:

$\rho_f = 0,0068$ για την τετραγωνική διατομή και

$\rho_f = 0,010$ για την ορθογωνική διατομή.

Οπότε από τη σχέση (36) καταλήγουμε:

$\left(\frac{\alpha_f \rho_f u}{f_c}\right)_f = 0,367$ για την τετραγωνική διατομή και

$\left(\frac{\alpha_f \rho_f u}{f_c}\right)_f = 0,338$ για την ορθογωνική διατομή

Υπολογισμός γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία για το **ματισμένο** υποστύλωμα μετά την ενίσχυσή του με CFRP

$$\theta_{um,pl} = 0,0145 * (0,25^v) * \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)}\right]^{0,3} * (f_c)^{0,2} * (a_s)^{0,35} * 25^{\left(\frac{\alpha_f \rho_f u}{f_c}\right)_f} * (1,275^{100 * \rho_d}) \frac{l_b}{l_{bu,min}} \quad (39)$$

για την τετραγωνική διατομή προκύπτει $\theta_{um,pl} = 0,0563$ ενώ

για την ορθογωνική διατομή προκύπτει $\theta_{um,pl} = 0,0373$.

Οπότε η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία είναι: $\theta_u = \theta_{um,pl} + \theta_y$

για την τετραγωνική διατομή προκύπτει $\theta_u = 0,0700$ ενώ

για την ορθογωνική διατομή προκύπτει $\theta_u = 0,0482$.

Υπολογισμός γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία για το **αμάτιστο** υποστύλωμα μετά την ενίσχυσή του με CFRP

Ισχύει και πάλι η σχέση (39) απλά χωρίς τον πολλαπλασιασμό με το λόγο $\frac{l_b}{l_{bu,min}}$.

για την τετραγωνική διατομή προκύπτει $\theta_{um,pl} = 0,0744$ ενώ

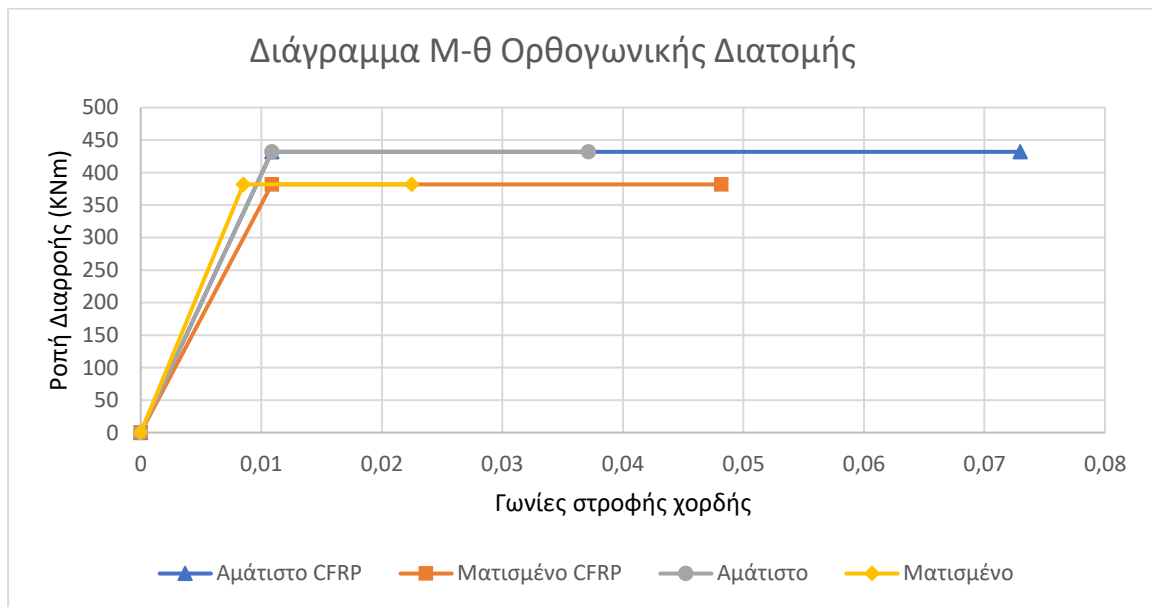
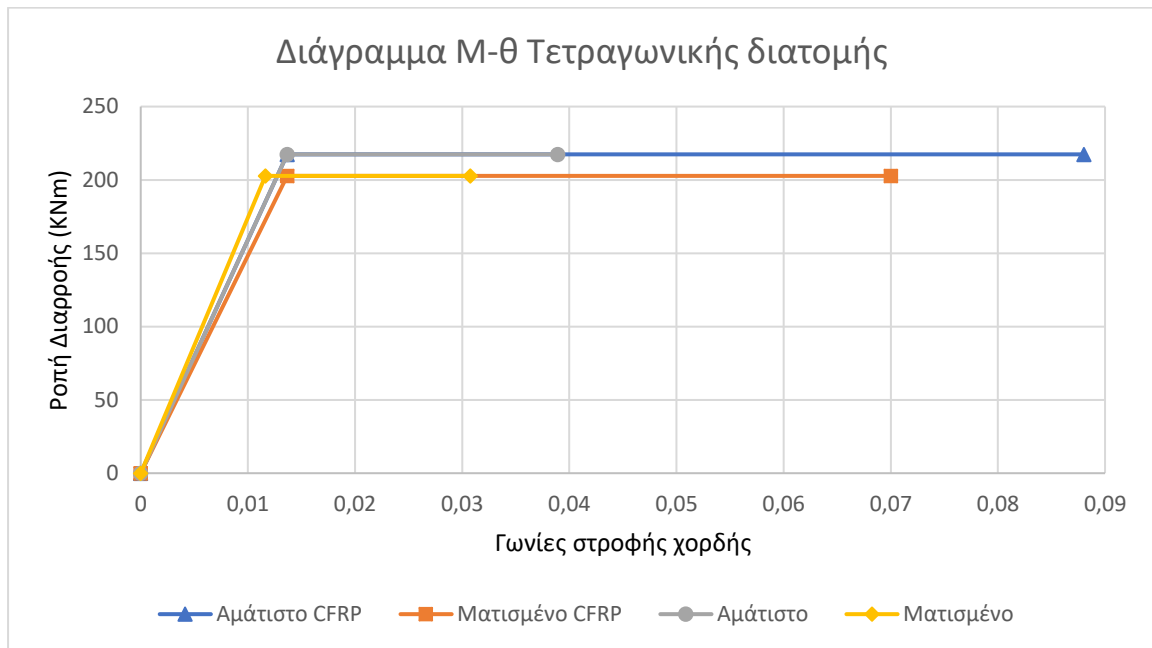
για την ορθογωνική διατομή προκύπτει $\theta_{um,pl} = 0,0621$.

Οπότε η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία είναι: $\theta_u = \theta_{um,pl} + \theta_y$

για την τετραγωνική διατομή προκύπτει $\theta_u = 0,0880$ ενώ

για την ορθογωνική διατομή προκύπτει $\theta_u = 0,0729$.

5. Διαγράμματα



1) Στην περίπτωση του αμάτιστου υποστυλώματος, τα M_y και θ_y παραμένουν σταθερά μετά την ενίσχυση με CFRP, και το μόνο που μεταβάλλεται είναι το θ_u το οποίο αυξάνεται περίπου 125% στην τετραγωνική διατομή και 96% στην ορθογωνική.

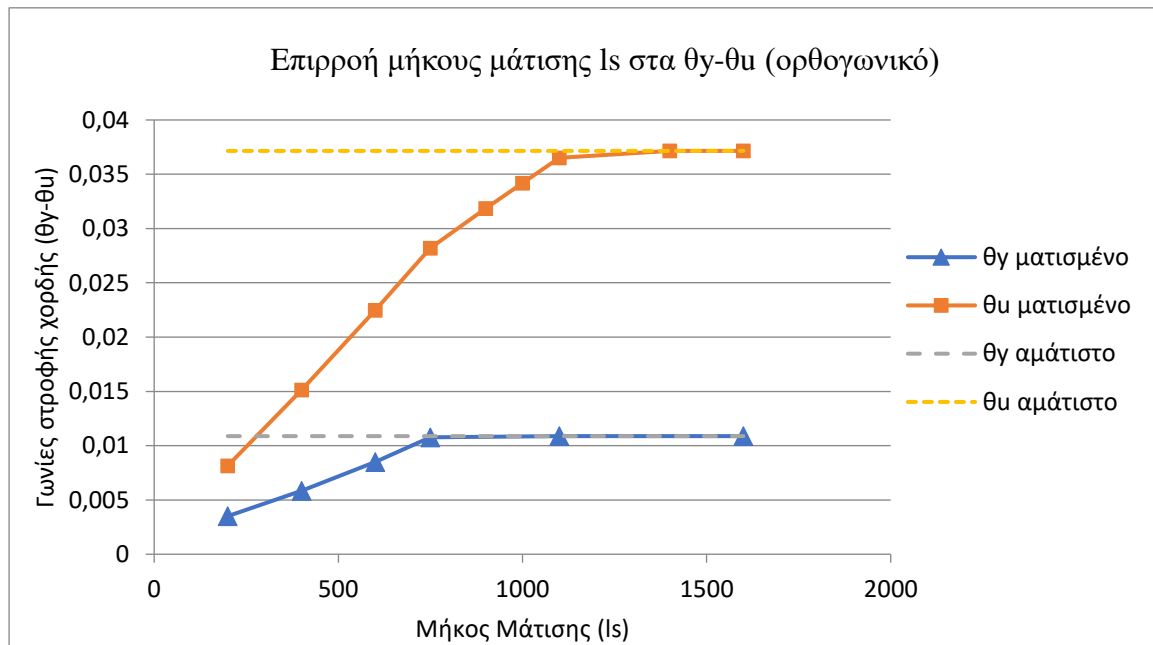
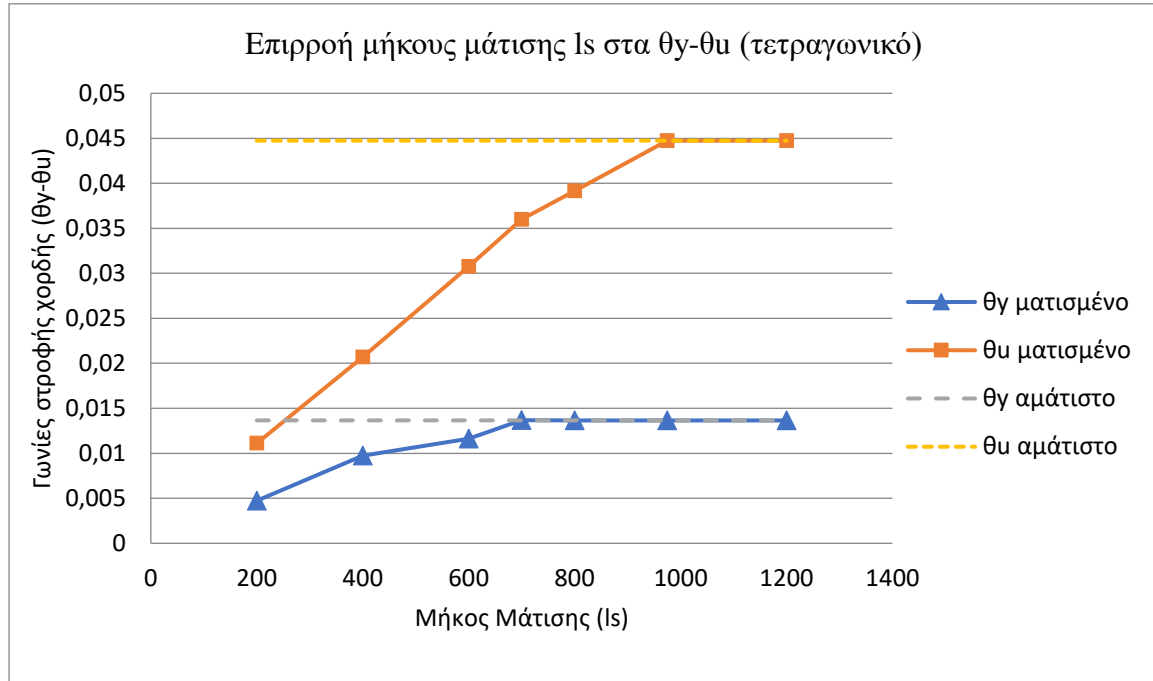
2) Στην περίπτωση του ματισμένου υποστυλώματος το M_y παραμένει και εδώ σταθερό. Το θ_y μετά την ενίσχυση αποκτάει ίδια τιμή με το θ_y του αμάτιστου, ενώ το θ_u υπερδιπλασιάζεται, περίπου 127% στην τετραγωνική διατομή και 123% στην ορθογωνική, χωρίς όμως να φτάνει ποτέ το θ_u του αμάτιστου.

3) Η διαφορά στο θ_y μεταξύ αμάτιστου και ματισμένου υποστυλώματος προκύπτει λόγω της προσθήκης των λόγων M_y/M_{Rd} και $I_b/I_{b,min}$ στη σχέση (Σ.2) του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για το θ_y . Στην περίπτωση που διερευνούμε το μήκος παράθεσης I_b ισούται με

600mm, ενώ το $l_{b,min}$ περίπου με 700mm οπότε πολλαπλασιάζουμε με λόγο 6/7 και τα θ_y προκύπτουν αρκετά κοντά.

4) Μεταξύ αμάτιστου και ανεπαρκώς ματισμένου υποστυλώματος πριν την ενίσχυση έχουμε μια διαφορά στο θ_u , 27% και 39% αντίστοιχα.

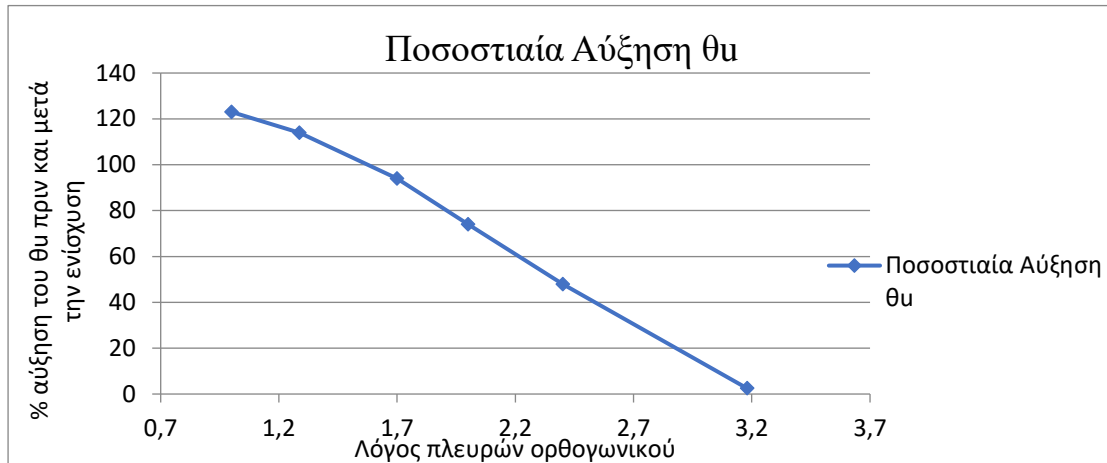
Επιρροή μήκους μάτισης l_s στα θ_y , θ_u και στις δύο διατομές



- 1) Τα θ_y , θ_u , αυξάνονται και στις δύο διατομές με την αύξηση του μήκους μάτισης.
- 2) Όταν το μήκος μάτισης l_s ξεπεράσει το μήκος $l_{b,min}$ το θ_y σταθεροποιείται, φτάνοντας το θ_y του αμάτιστου. Αντίστοιχα το θ_u σταθεροποιείται όταν ξεπεράσουμε το $l_{bu,min}$, φτάνοντας το θ_u του αμάτιστου.

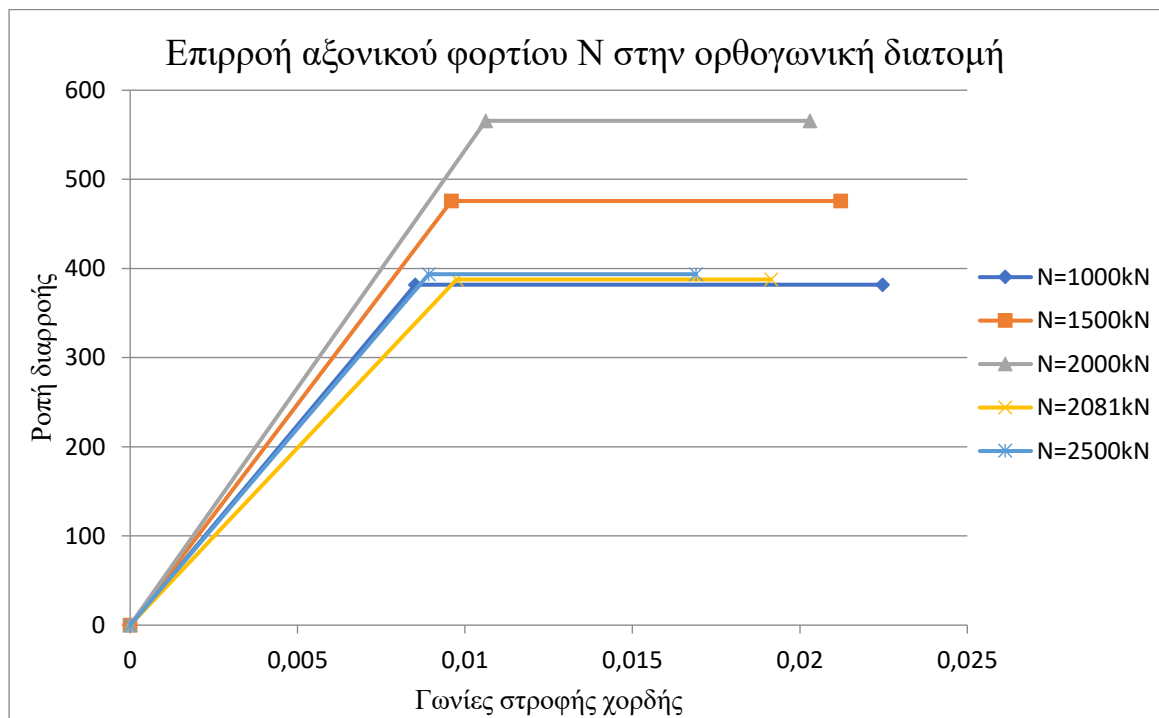
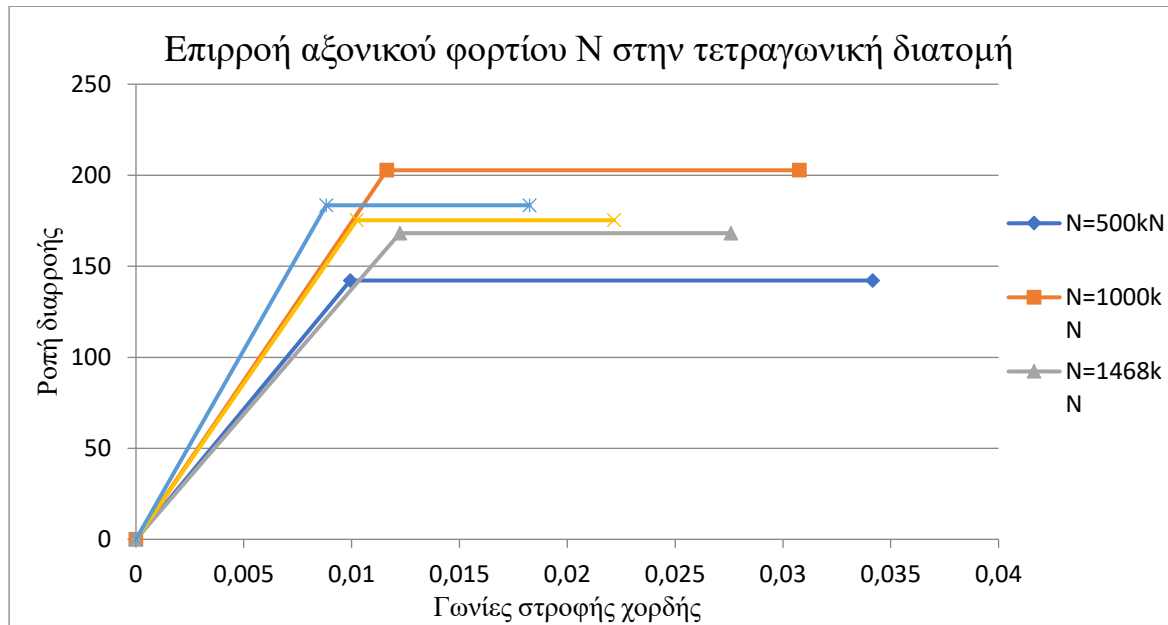
- 3) Οι γωνίες στροφής χορδής στο αμάτιστο υποστύλωμα είναι προφανώς ανεξάρτητες του μήκους μάτισης.
- 4) Η συμπεριφορά των θ_y , θ_u σε τετραγωνικό και ορθογωνικό υποστύλωμα είναι αντίστοιχη. Οι δύο διατομές διαφοροποιούνται στο γεγονός ότι στην ορθογωνική απαιτείται αρκετά μεγαλύτερο μήκος μάτισης μέχρι να φτάσουμε τα θ_y , θ_u του αμάτιστου.

Επιρροή του λόγου πλευρών του ορθογωνικού υποστυλώματος στην αύξηση του θ_u μετά την ενίσχυση με ανθρακούφασμα (CFRP)



- 1) Για λόγο πλευρών 1, δηλαδή για τετραγωνικής διατομής υποστύλωμα η θ_u υπερδιπλασιάζεται μετά την ενίσχυση του με CFRP, και για την ακρίβεια αυξάνεται κατά 123% περίπου.
- 2) Για λόγο πλευρών 2, μέχρι εκεί δηλαδή που προτείνονται τα CFRP από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. , έχουμε σημαντική αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, και για την ακρίβεια 74% περίπου.
- 3) Για λόγο πλευρών 2,4 η επί της εκατό αύξηση της θ_u πέφτει στο 48%.
- 4) Για λόγο πλευρών πάνω από 3 η ενίσχυση δεν αυξάνει ουσιαστικά καθόλου τη θ_u . Συγκεκριμένα για λόγο πλευρών 3,18 παρατηρούμε αύξηση 2,5% περίπου.
- 5) Τα παραπάνω οφείλονται στο συντελεστή α_f ο οποίος όσο αυξάνεται ο λόγος πλευρών μειώνεται δραστικά. Η μείωση του εν λόγω συντελεστή οδηγεί σε μείωση του εκθέτη της σχέσης (36) και κατ' επέκταση σε μείωση του πλαστικού τμήματος της γωνίας στροφής χορδής.

Επιρροή του αξονικού φορτίου N στο διάγραμμα M-θ για σταθερό $l_s=600\text{mm}$



- 1) Η αύξηση του αξονικού φορτίου λειτουργεί αρχικά θετικά στη συμπεριφορά του υποστυλώματος με αύξηση των M_y και θ_y . Παρόλα αυτά παρατηρείται μια μείωση του θ_u αφού μειώνεται το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής $\theta_{um,pl}$. Αυτό συμβαίνει αφού η αύξηση του ανηγμένου αξονικού οδηγεί σε μείωση του $\theta_{um,pl}$.
- 2) Όταν το αξονικό φορτίο φτάσει μια οριακή τιμή οι τιμές των M_y και θ_y μειώνονται αισθητά. Αυτό προκύπτει, σε επίπεδο εξισώσεων, αφού ο καθοριστικός παράγοντας είναι η μικρότερη καμπυλότητα στη διαρροή $(1/r)_y$ μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Από την οριακή τιμή και μετά η μικρότερη είναι αυτή του σκυροδέματος, τα θ_y και θ_u μειώνονται, ενώ η ροπή αποκτά εκ νέου αυξητική τάση.

3) Και στις δύο διατομές η συμπεριφορά είναι παρόμοια με τη διαφορά ότι στην ορθογωνική η οριακή τιμή του αξονικού φορτίου για την οποία η συμπεριφορά του υποστύλωματος μεταβάλλεται είναι μεγαλύτερη (πάνω από 2000KN στην ορθογωνική έναντι περίπου 1500KN στην τετραγωνική διατομή).

6. Συμπεράσματα

1) Με βάση τον πίνακα 1, προκύπτει ότι αν το πρόβλημα είναι μόνο το μήκος μάτισης οι δύο τρόποι ενίσχυσης (μεταλλικά ελάσματα και ανθρακούφασμα) έχουν αντίστοιχο κόστος. Ωστόσο λόγω της ευκολότερης και γρηγορότερης εφαρμογής τους, στο συγκεκριμένο πρόβλημα προτείνεται η ενίσχυση με ανθρακούφασμα (CFRP).

2) Μετά την ενίσχυση του ανεπαρκώς ματισμένου υποστύλωματος με CFRP φαίνεται ότι όχι μόνο η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_y φτάνει την αντίστοιχη του αμάτιστου, αλλά κυρίως το θ_u αυξάνεται κατακόρυφα. Η εφαρμογή λοιπόν της ενίσχυσης με ανθρακούφασμα είναι παραπάνω από αποτελεσματική τόσο στην τετραγωνική όσο και στην ορθογωνική διατομή.

3) Οι δύο διατομές, τετραγωνική και ορθογωνική, που θεωρήθηκε ότι έχουν το ίδιο μήκος μάτισης το οποίο είναι ανεπαρκές, λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο μετά την ενίσχυση με CFRP. Όπως αναμενόταν στην τετραγωνική έχουμε μεγαλύτερη αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία. Παρόλα αυτά εξαιτίας του ότι ο λόγος πλευρών της ορθογωνικής διατομής είναι μικρότερος του 2, η αύξηση είναι μεν μικρότερη αλλά παραμένει πολύ μεγάλη. Όσο αυξάνεται ο λόγος πλευρών τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της επιρροής της ενίσχυσης κάτι που επιβεβαιώνει τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

4) Μέσω των παραπάνω γίνεται φανερή η σημασία του μήκους μάτισης στα υποστύλωματα. Όπως προαναφέρθηκε η ανεπάρκεια στο μήκος μάτισης οδηγεί σε πτώση της γωνίας θ_u , της τάξης του 40% στο ορθογωνικό υποστύλωμα. Για μικρά μήκη μάτισης, της τάξης των 200-400mm οι γωνίες στροφής φαίνεται ότι είναι δραματικά μικρότερες σε σχέση με μήκη μάτισης ακόμα και ανεπαρκή αλλά κοντά στο απαιτούμενο. Για παράδειγμα η αύξηση της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή θ_y για μήκος μάτισης 200 mm και 600 mm, για το τετραγωνικό υποστύλωμα ξεπερνάει το 140%, και μάλιστα τα 600 mm παραμένουν ανεπαρκή σύμφωνα με τον κανονισμό.

7. Βιβλιογραφία :

[1] ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013

[2] Υπό Έκδοση Αναθεωρημένου Ευρωκώδικας 8

[3] Στέφανος Η. Δρίτσος, “Ενισχύσεις-Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος”, Πάτρα 2014

[4] Μιχαήλ Ν. Φαρδής : “Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέρος 1”, Πάτρα 2016

[5] Προσωπική Επικοινωνία Με Ιδιώτη Πολιτικό Μηχανικό