

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΤΕΛΩΝ ΜΕΛΩΝ TIMOSHENKO ΥΠΟ
ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΜΕ
ΡΑΒΔΟΥΣ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ**

Χάρης Ι. Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Κωνσταντίνος Ε. Καλοχαιρέτης

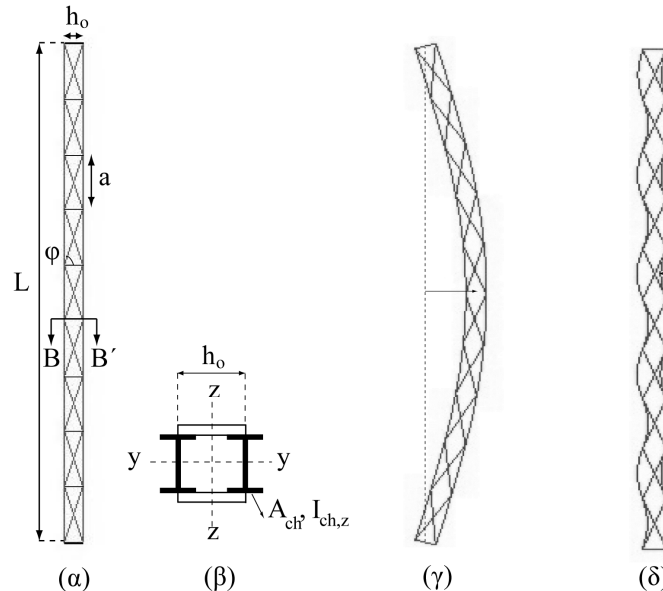
Υποψήφιος Διδάκτωρ
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: kalkostis@hotmail.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης χρησιμοποιούνται συχνά σε μεταλλικές κατασκευές και γέφυρες προσφέροντας οικονομικές λύσεις σε περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων και/ή μεγάλων φορτίων. Ο Ευρωκώδικας 3 θεωρεί τα σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης ως μέλη Timoshenko προκειμένου να ενσωματώσει τις διατμητικές παραμορφώσεις και παρέχει οδηγίες για τον υπολογισμό του φορτίου αστοχίας για την περίπτωση αμφιέριστου μέλους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια προσεγγιστική αναλυτική διαδικασία για τον υπολογισμό της μέγιστης καμπτικής ροπής 2^{ης} τάξης κατά μήκος ενός ατελούς μέλους Timoshenko υπό εγκάρσια φόρτιση με τυχαίες στροφικές και μετακινησιακές συνοριακές συνθήκες. Εν συνεχεία προτείνεται μια σχέση αλληλεπίδρασης ενσωματώνοντας την καμπτική ροπή 2^{ης} τάξης που έχει ήδη υπολογιστεί. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αναλυτικά με βάση την προτεινόμενη διαδικασία συγκρίνονται με αυτά που βρέθηκαν από μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού σε δικτυωτά σύνθετα υποστυλώματα προσομοιούμενα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Λόγω της απλότητας και ακρίβειάς της, η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό του φορτίου αστοχίας δικτυωτών σύνθετων μελών στην πράξη.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα υποστυλώματα χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις μεγάλων φορτίων ή/και μεγάλων ανοιγμάτων. Με βάση τον τρόπο σύνδεσης των πελμάτων μπορούν να χωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: τα σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης και με λεπίδες σύνδεσης. Η κατηγορία με την οποία σχετίζεται το συγκεκριμένο άρθρο είναι η πρώτη, στην οποία γίνεται χρήση διαγώνιων ράβδων δικτύωσης (Σχ. 1α, β).



Σχ. 1 (α) Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά, (β) διατομή, (γ) ιδιομορφή καθολικού λυγισμού και (δ) ιδιομορφή τοπικού λυγισμού τυπικού σύνθετου υποστυλώματος.

Στα σύνθετα υποστυλώματα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπρόσθετα στοιχεία που τα διαφοροποιούν από τα κοινώς χρησιμοποιούμενα μέλη. Το πρώτο σχετίζεται με τις διατμητικές παραμορφώσεις που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην περίπτωση προσομοίωσης των συνθέτων μελών με μονομελείς διατομές ισοδύναμης καμπτικής και διατμητικής δυσκαμψίας. Με αυτό το πρόβλημα έχουν ασχοληθεί αρκετοί ερευνητές [4] και ο Ευρωκώδικας 3 [1] το χρησιμοποιεί σαν βάση για την ανάλυση αμφιέριστων συνθέτων υποστυλωμάτων. Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την αλληλεπίδραση τοπικού και καθολικού λυγισμού. Η πρώτη μορφή λυγισμού σχετίζεται με τον λυγισμό των φατνωμάτων ενώ η δεύτερη με το λυγισμό ολόκληρου του σύνθετου μέλους (Σχ. 1γ, δ). Η ύπαρξη τοπικών και καθολικών ατελειών οδηγεί σε αλληλεπίδραση αυτών των δύο μορφών λυγισμού και σε μεγαλύτερη μείωση της αντοχής των συγκεκριμένων υποστυλωμάτων και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη [3]. Στο παρόν άρθρο προτείνεται μια προσεγγιστική αναλυτική διαδικασία για τον υπολογισμό της ροπής και τέμνουσας 2^{15} τάξης κατά μήκος ενός ατελούς μέλους Timoshenko (δηλαδή ενός μέλους για το οποίο λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων) υπό συγκεκριμένες εγκάρσιες φορτίσεις. Στη συνέχεια προτείνεται η εφαρμογή των εντατικών μεγεθών 2^{15} τάξης που υπολογίστηκαν σε μια σχέση αλληλεπίδρασης για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του σύνθετου υποστυλώματος, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα περισσότερα σύνθετα υποστυλώματα στην πράξη σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η αστοχία τους να είναι τοπική ελαστοπλαστική [3].

3. ΑΝΑΛΥΣΗ 2^{ης} ΤΑΞΗΣ ΑΤΕΛΩΝ ΘΑΛΙΒΟΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ TIMOSHENKO

Θεωρείται ένα αμφιέριστο μέλος Timoshenko με μήκος L , καμπτική δυσκαμψία EI και διατμητική δυσκαμψία S_v , με αρχική ατέλεια $w_0(x)$ σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή που παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο μέσο του μήκους του. Η παρουσία αξονικής θλιπτικής δύναμης οδηγεί στην εμφάνιση εντατικών μεγεθών 2^{ης} τάξης. Η διαφορική εξίσωση ισοροπίας της ατελούς δοκού σύμφωνα με τη θεωρία Timoshenko είναι:

$$w_B''(x) + \alpha^2 w_B(x) = -\alpha^2 w_0(x) \quad (1)$$

όπου $\alpha^2 = \frac{P}{EI\beta}$ και $\beta = 1 - \frac{P}{S_v}$ και $w_B(x)$ είναι η συνάρτηση βέλους λόγω κάμψης.

Για απλότητα η αρχική ατέλεια μπορεί να κανονικοποιηθεί με βάση τη μέγιστη τιμή στο μέσο ($x_1 = L/2$) w_0

$$w_0(x) = w_0 \frac{\sin(\alpha_{cr} x)}{\sin(\alpha_{cr} x_1)} \quad (2)$$

όπου το α_{cr} σχετίζεται με το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} ως $\alpha_{cr}^2 = \frac{P_{cr}}{EI\beta}$.

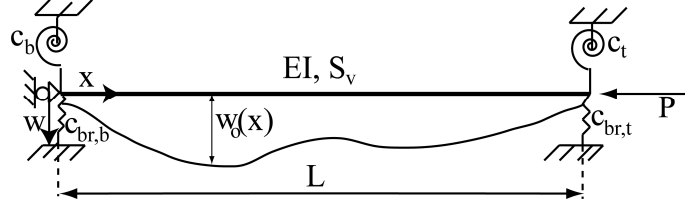
Υιοθετώντας ημιτονοειδές σχήμα και για το $w_B(x)$ προκύπτει η γνωστή συνάρτηση της ροπής 2^{ης} τάξης κατά μήκος αμφιέριστου μέλους χωρίς διατμητικές παραμορφώσεις, εάν τεθεί $\sin(\alpha_{cr} x_1) = 1$

$$M(x) = \frac{Pw_0 \sin(\alpha_{cr} x)}{1 - \frac{P}{P_{cr}}} \quad (3)$$

Οι προηγούμενες σχέσεις μπορούν να επεκταθούν στην περίπτωση τυχαίων συνοριακών (Σχ. 2) λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή αυτών στο ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού και το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής. Η ροπή 2^{ης} τάξης είναι ίση με

$$M_i(x) = \frac{Pw_0}{1 - \frac{P}{P_{cr}}} f \quad (4)$$

όπου P_{cr} είναι το φορτίο λυγισμού και f ο συντελεστής που δίνεται στη σχέση (5).



Σχ. 2 Ατελές μέλος Timoshenko με τυχαίες συνοριακές συνθήκες

$$f = \frac{f_1 \sin(\alpha_{cr} x) + \cos(\alpha_{cr} x)}{f_1 \sin(\alpha_{cr} x_1) + \cos(\alpha_{cr} x_1) + f_2 x_1 + f_3} \quad (5)$$

$$f_1 = \frac{\frac{\alpha_{cr}^4 \beta_{cr}^2}{c_b^*} \left(\frac{1}{c_{br,b}^*} + \frac{1}{c_{br,t}^*} \right) - \frac{\alpha_{cr}^2 \beta_{cr} L}{c_b^*} + \cos(\alpha_{cr} L) - 1}{\alpha_{cr} \beta_{cr} L \sin(\alpha_{cr} L) - \alpha_{cr}^3 \beta_{cr}^2 \left(\frac{1}{c_{br,b}^*} + \frac{1}{c_{br,t}^*} \right)}, f_2 = -\alpha_{cr} \beta_{cr} \left(\frac{\alpha_{cr}}{c_b^*} + f_1 \right), f_3 = -\frac{\alpha_{cr}^2 \beta_{cr} f_2}{c_{br,b}^*} - 1, c_i^* = \frac{c_i}{EI}$$

όπου x_1 είναι η θέση μεγιστοποίησης του βέλους. Ο αριθμητής του συντελεστή f είναι η συνάρτηση της ροπής κατά μήκος του μέλους ενώ ο παρονομαστής εκφράζει τη συνάρτηση βέλους. Η τιμή του α_{cr} μπορεί να βρεθεί μέσω μη γραμμικών σχέσεων για μεταθετά, μερικώς μεταθετά και αμετάθετα μέλη Timoshenko [2]. Η τέμνουσα 2^{ης} τάξης μπορεί να προκύψει από παραγωγή της σχέσης (4) ως προς x .

4. ΑΝΑΛΥΣΗ 2^{ης} ΤΑΞΗΣ ΜΕΛΩΝ TIMOSHENKO ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ

Σε μέλος Timoshenko με τυχαίες συνοριακές συνθήκες ασκούνται συγκεντρωμένες ροπές M_1 και M_2 στα άκρα (Σχ. 3) θεωρώντας θετική την ωρολογιακή φορά. Οι αντιδράσεις στα άκρα του μέλους είναι:

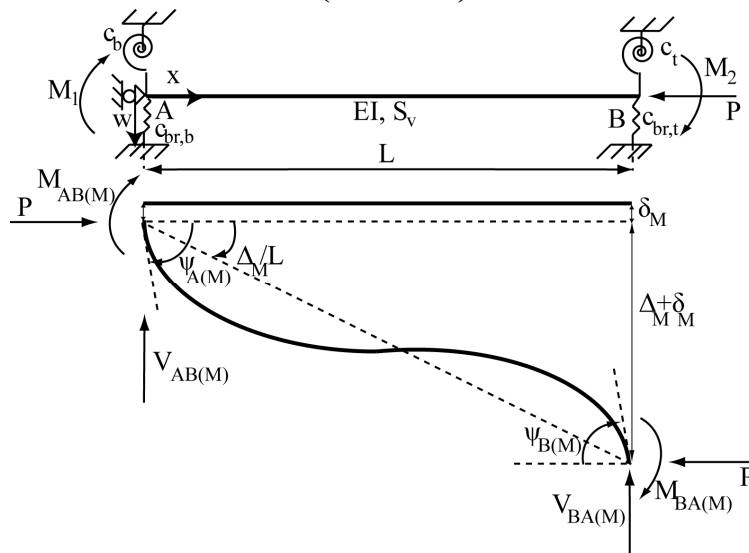
$$V_{AB(M)} = c_{br,b} \delta_M = -\frac{M_{AB(M)} + M_{BA(M)} + P\Delta_M}{L} \quad (6)$$

$$V_{BA(M)} = c_{br,t} (\delta_M + \Delta_M) = \frac{M_{AB(M)} + M_{BA(M)} + P\Delta_M}{L} \quad (7)$$

όπου δ_M και $\delta_M + \Delta_M$ είναι τα βέλη στα 2 άκρα. Οι ροπές στα άκρα με βάση τις εξισώσεις γωνίας στροφής μέλους Timoshenko [2] δίνονται συναρτήσει της στροφής λόγω κάμψης:

$$M_{AB(M)} = \frac{EI}{L} S_{11(M)} \left(\psi_{A(M)} - \frac{\Delta_M}{L} \right) + \frac{EI}{L} S_{12(M)} \left(\psi_{B(M)} - \frac{\Delta_M}{L} \right) = -c_b \psi_{A(M)} + M_1 \quad (8)$$

$$M_{BA(M)} = \frac{EI}{L} S_{12(M)} \left(\psi_{A(M)} - \frac{\Delta_M}{L} \right) + \frac{EI}{L} S_{11(M)} \left(\psi_{B(M)} - \frac{\Delta_M}{L} \right) = -c_t \psi_{B(M)} + M_2 \quad (9)$$



Σχ. 3 Μέλος Timoshenko με τυχαίες συνοριακές συνθήκες υπό συγκεντρωμένες ροπές στα άκρα.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6)-(9) μπορούν να προσδιοριστούν οι μετακινήσεις και τα εντατικά μεγέθη. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πιν. 1.

$\delta_M = \frac{-\frac{M_{AB(M)} + M_{BA(M)} + P\Delta_M}{L}}{c_{br,b}}, \quad \Delta_M = \frac{\rho_1 (-c_b \psi_{A(M)} - c_t \psi_{B(M)}) + \chi_M}{\omega}, \quad \text{όπου} \quad \chi_M = (M_1 + M_2)\rho_1,$
$\omega = L^2 \left(c_{br,t} - \rho_1 \frac{P}{L} \right), \quad \rho_1 = 1 + c_{br,t}/c_{br,b}$
$\psi_{B(M)} = \frac{\chi_M S_M + \frac{\omega M_1 L}{EI} - \psi_{A(M)} (\omega (S_{11(M)} + c_b^\#) + S_M \rho_1 c_b)}{\omega S_{12(M)} + S_M \rho_1 c_t}, \quad \text{όπου } S_M = S_{11(M)} + S_{12(M)}, \text{ , και } c_i^\# = \frac{c_i L}{EI}.$
$\psi_{A(M)} = \frac{(\omega S_{12(M)} + S_M \rho_1 c_t) \left(\frac{\omega M_2 L}{EI} + S_M \chi_M \right) - (\omega (S_{11(M)} + c_t^\#) + S_M \rho_1 c_t) \left(\frac{\omega M_1 L}{EI} + S_M \chi_M \right)}{(\omega S_{12(M)} + S_M \rho_1 c_b) (\omega S_{12(M)} + S_M \rho_1 c_t) - (\omega (S_{11(M)} + c_t^\#) + S_M \rho_1 c_t) (\omega (S_{11(M)} + c_b^\#) + S_M \rho_1 c_b)}$

$w_M(x) = \frac{\frac{M_{AB(M)}}{P}(1-\cos\alpha L) + \frac{V_{AB(M)}L}{P} + \Delta_M}{\sin\alpha L} \sin\alpha x + \frac{M_{AB(M)}}{P} \cos\alpha x + \frac{1}{P}(-M_{AB(M)} - V_{AB(M)}x + P\delta_M)$
$M_M(x) = M_{AB(M)} + V_{AB(M)}x + P(w_M(x) - \delta_M)$

Πιν. 1: Αποτελέσματα για την περίπτωση συγκεντρωμένων ροπών στα άκρα

Με παρόμοιο τρόπο προκύπτουν τα αποτελέσματα για την ύπαρξη συγκεντρωμένων φορτίων H_1 και H_2 στα άκρα του μέλους, που θεωρούνται ως θετικά όταν έχουν τη φορά του άξονα των βελών. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πιν. 2.

$\delta_H = \frac{-\frac{M_{AB(H)} + M_{BA(H)} + P\Delta_H}{L} + H_1}{c_{br,b}}, \quad \frac{\Delta_H}{L} = \frac{\rho_1(-c_b\Psi_{A(H)} - c_t\Psi_{B(H)}) + \chi_H}{\omega}, \quad \text{όπου } \chi_H = L(H_2 - H_1c_{br,t}/c_{br,b})$
$\Psi_{B(H)} = \frac{\chi_H S_H - \Psi_{A(H)}(\omega(S_{11(H)} + c_b^\#) + S_H\rho_1 c_b)}{\omega S_{12(H)} + S_H\rho_1 c_t}, \quad \text{όπου } S_H = S_{11(H)} + S_{12(H)}$
$\Psi_{A(H)} = \frac{(S_{12(H)} - S_{11(H)} - c_t^\#)S_H\chi_H\omega}{(\omega S_{12(H)} + S_H\rho_1 c_b)(\omega S_{12(H)} + S_H\rho_1 c_t) - (\omega(S_{11(H)} + c_t^\#) + S_H\rho_1 c_t)(\omega(S_{11(H)} + c_b^\#) + S_H\rho_1 c_b)}$
$w_H(x) = \frac{\frac{M_{AB(H)}}{P}(1-\cos\alpha L) + \frac{V_{AB(H)}L}{P} + \Delta_H}{\sin\alpha L} \sin\alpha x + \frac{M_{AB(H)}}{P} \cos\alpha x + \frac{1}{P}(-M_{AB(H)} - V_{AB(H)}x + P\delta_H)$
$M_H(x) = M_{AB(H)} + V_{AB(H)}x + P(w_H(x) - \delta_H)$

Πιν. 2: Αποτελέσματα για την περίπτωση συγκεντρωμένων φορτίων στα άκρα

Η τέμνουσα 2^{ns} τάξης προκύπτει από παραγώγιση της ροπής 2^{ns} τάξης ως προς x .

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ

Συνήθη σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης αστοχούν λόγω τοπικής ελαστοπλαστικής αστοχίας. Σε αντίθεση με άλλες κατασκευές, η τοπική αστοχία του κρίσιμου φατνώματος οδηγεί σε αστοχία όλου του μέλους, εφόσον έχει αποκλειστεί η αστοχία κάποιας εκ των ράβδων δικτύωσης. Υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά μέχρι την αστοχία είναι ελαστική η σχέση αλληλεπίδρασης είναι:

$$\frac{P}{2} + \frac{|M_{\max}|}{h_0} = N_L \quad (10)$$

όπου P είναι το θλιπτικό φορτίο του σύνθετου μέλους, M_{\max} είναι η μέγιστη ροπή 2^{ns} τάξης κατά μήκος της ισοδύναμης δοκού Timoshenko, N_L η τοπική αντοχή του φατνώματος λαμβάνοντας υπόψη τοπική ατέλεια σύμφωνα με τις καμπύλες λυγισμού του ΕΚ3 και θεωρώντας το φάτνωμα ως αμφιέριστο και h_0 ο μοχλοβραχίονας μεταξύ των πελμάτων. Σύμφωνα με τον ΕΚ3-1-1 η τοπική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (6.47) αυτού, όπου η αστοχία σχετίζεται με την 1^{n} διαρροή του κρίσιμου φατνώματος. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται επιπρόσθετα η περίπτωση όπου στην τοπική αντοχή λαμβάνεται υπόψη η επέκταση της πλαστικοποίησης στην κρίσιμη διατομή. Η μέγιστη ροπή μπορεί να προκύψει από μεγιστοποίηση της συνάρτησης ροπής που λαμβάνεται όταν για την ίδια αξονική δύναμη αθροιστούν οι ροπές λόγω ατέλειας $M_i(x)$, λόγω συγκεντρωμένων ροπών στα άκρα $M_M(x)$ και λόγω συγκεντρωμένων φορτίων στα

άκρα $M_H(x)$. Στην περίπτωση που η μέγιστη ροπή βρίσκεται στο άκρο του σύνθετου μέλους η σχέση αλληλεπίδρασης μπορεί να τροποποιηθεί, ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της συνιστώσας της ράβδου δικτύωσης στη δύναμη που καταπονεί το πλέον θλιβόμενο πέλμα. Προσεγγιστικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η δύναμη της ράβδου δικτύωσης στο άκρο λόγω τέμνουσας 2^{ης} τάξης και για την περίπτωση δικτύωσης X που φαίνεται και στο Σχ.1α η σχέση (10) να γίνει:

$$\frac{P}{2} + \frac{|M_{\max}|}{h_o} \pm \frac{|Q| \tan \varphi}{2} = N_L \quad (11)$$

Η σχέση (11) συγκλίνει στη (10) στην περίπτωση που η μεγιστοποίηση της ροπής γίνεται κατά μήκος του μέλους και μπορεί να χρησιμοποιείται ως πιο γενική. Οι σχέσεις (10)-(11) περιέχουν ως αγνώστους τόσο το αξονικό φορτίο P όσο και τη θέση μεγιστοποίησης της ροπής και συνεπώς η επίλυση τους απαιτεί επαναληπτική διαδικασία.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Αναλύθηκε μεγάλος αριθμός συνθέτων μελών με ράβδους δικτύωσης και στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα εξ αυτών, του οποίου τα γεωμετρικά στοιχεία, αδρανειακά χαρακτηριστικά και συνοριακές συνθήκες συνοψίζονται στον Πίν. 3.

L (m)	h _o (cm)	a (cm)	A _{ch} (cm ²)	I _{ch,z} (cm ⁴)	A _d (cm ²)	c _b (Nm)	c _{br,b} (N/m)	c _t (Nm)	c _{br,t} (N/m)
13.5	40	150	49	200	12.25	8·10 ⁶	2·10 ⁴	5·10 ⁷	10 ⁵

Πιν. 3: Χαρακτηριστικά σύνθετου μέλους εφαρμογής

Το σύνθετο μέλος υπόκειται σε συνδυασμό αξονικής θλίψης και εγκάρσιων φορτίσεων (συγκεντρωμένων ροπών και συγκεντρωμένων φορτίων στα άκρα). Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

ADINA: Τα αποτελέσματα προέκυψαν από μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού του σύνθετου υποστυλώματος προσομοιούμενου λεπτομερώς με στοιχεία δοκού και αποτελούν τη βάση σύγκρισης.

Προτεινόμενες Μέθοδοι: Χρήση των σχέσεων αλληλεπίδρασης της ενότητας 5 με τοπική αντοχή σύμφωνα είτε με τη σχέση (6.47) του ΕΚ3-1-1 (ΠΜ1) είτε με αυτή που προέκυψε από μη γραμμική ανάλυση του φατνώματος, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της επέκτασης της πλαστικοποίησης στην αντοχή του (ΠΜ2).

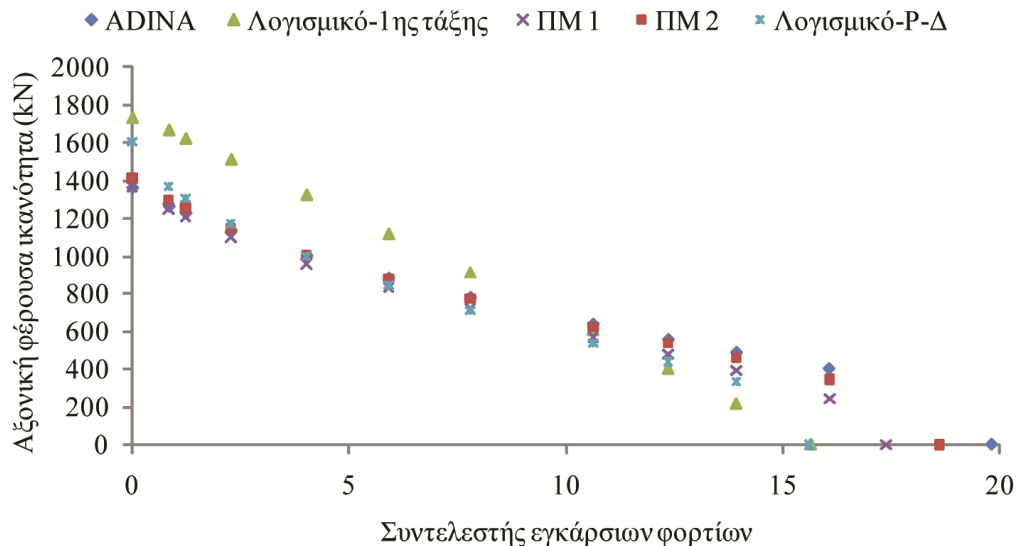
Λογισμικό Ανάλυσης και Διαστασιολόγησης: Πραγματοποίηση αναλύσεων είτε 1^{ης} τάξης είτε λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα P-Δ, θεωρώντας φορτίο αστοχίας εκείνο που οδηγεί σε οριακή ικανοποίηση της ανισοσύτητας (12) στην κρίσιμη διατομή του πέλματος

$$\frac{N}{\chi_z A_{ch} f_y} + k_{zz} \frac{M_z}{M_{z,pl,Rd}} \leq 1 \quad (12)$$

όπου N και M_z είναι η αξονική δύναμη και ροπή κάμψης ως προς τον άξονα κάμψης (ασθενής) στην κρίσιμη διατομή ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία παρέχονται στον ΕΚ3 [1].

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται γραφικά στο Σχ. 4, όπου ο κατακόρυφος άξονας σχετίζεται με τη μέγιστη αξονική δύναμη που μπορεί να φέρει το μέλος και ο οριζόντιος με το συντελεστή που πολλαπλασιάζει τα εγκάρσια φορτία. Η σταδιακή αύξηση του συντελεστή εγκάρσιας φόρτισης μειώνει την αξονική φέρουσα ικανότητα και σε όλες τις περιπτώσεις η αστοχία του μέλους οφείλεται στην τοπική ελαστοπλαστική αστοχία του κρίσιμου φατνώματος. Η ΠΜ1 και ιδιαίτερα η ΠΜ2 δίνουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη φέρουσα ικανότητα του μέλους, χάνοντας την ακρίβεια τους όταν το μέλος συμπεριφέρεται ως δοκός, όπου η παραδοχή πως το κρίσιμο φάτνωμα αστοχεί ως αμφιέρειστο, παύει να ισχύει. Η χρήση ανάλυσης 1^{ης} τάξης με το λογισμικό οδηγεί σε

ανακριβή αποτελέσματα, άλλοτε συντηρητικά και άλλοτε κατά της ασφαλείας, και κρίνεται ακατάλληλη. Η εφαρμογή ανάλυσης P-Δ στο ίδιο λογισμικό οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων αλλά εξακολουθεί να είναι κατά της ασφαλείας σε περίπτωση καθαρά αξονικής λειτουργίας (σφάλμα -18%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσω του ελέγχου δε λαμβάνεται υπόψη η καθολική ατέλεια του σύνθετου μέλους αλλά μόνο η τοπική (σε αντίθεση με μονομελείς διατομές όπου οι ατέλειες έχουν εισαχθεί στις σχέσεις αλληλεπίδρασης). Ιδιαίτερα συντηρητικά είναι τα αποτελέσματα επίσης, σε περίπτωση κυρίαρχης καμπτικής λειτουργίας.



Σχ. 4 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης σύνθετου υποστυλώματος εφαρμογής

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο προτείνεται μια προσεγγιστική αναλυτική διαδικασία για τον υπολογισμό της καμπτικής ροπής και τέμνουσας 2^{ης} τάξης κατά μήκος ενός ατελούς μέλους Timoshenko με τυχαίες συνοριακές συνθήκες υπό εγκάρσια φόρτιση και η χρήση αυτών σε κατάλληλες σχέσεις αλληλεπίδρασης για σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν με την προτεινόμενη διαδικασία και με λογισμικό ανάλυσης και διαστασιολόγησης, συγκρίνονται με εκείνα που προέκυψαν από μη γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η λεπτομερής προσομοίωση του σύνθετου μέλους σε λογισμικό δεν οδηγεί απαραίτητα σε ακριβή και υπερ της ασφαλείας αποτελέσματα. Αντίθετα, η ακρίβεια και ταχύτητα επίλυσης της προτεινόμενης μεθόδου την καθιστούν ένα χρήσιμο εργαλείο διαστασιολόγησης και ελέγχου συνθέτων υποστυλωμάτων με ράβδους δικτύωσης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.1: General structural rules. CEN-[3] European Committee for Standardisation, Brussels, EN1993-1-1, 2002.
- [2] Kalochairetis, K.E. and Gantes, C.J., Elastic Buckling Load of Multi-Story Frames Consisting of Timoshenko Members, έχει υποβληθεί.
- [3] Kalochairetis, K.E. and Gantes, C.J., Numerical and Analytical Investigation of Collapse Loads of Laced Built-up Columns, *Computers & Structures* 2011, Vol. 89, pp. 1166-1176.
- [4] Timoshenko S., Gere J.M., Theory of elastic stability, 2nd edition New York: McGraw-Hill Book Company, 1961.

NONLINEAR ANALYSIS OF IMPERFECT TIMOSHENKO MEMBERS UNDER LATERAL LOADING AND ITS APPLICATION TO LACED BUILT-UP COLUMNS

Charis J. Gantes

Associate Professor

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

Konstantinos E. Kalochairetis

PhD Candidate

National Technical University of Athens

Athens, Greece

e-mail: kalkostis@hotmail.com

SUMMARY

Laced built-up columns are often used in steel structures and bridges providing economical solutions in cases of large spans and/or heavy loads. Eurocode 3 considers built-up columns as Timoshenko members in order to incorporate shear deformations and gives guidance for the calculation of the collapse load of the simply-supported case. In the present work, an approximate analytical approach is presented for the calculation of the maximum 2nd order bending moment along an imperfect Timoshenko member with arbitrary boundary conditions under axial and lateral loading. Then, an interaction equation is proposed for the calculation of the collapse load incorporating the 2nd order bending moment already calculated. The results obtained analytically with the proposed method are compared with the ones found from geometrically and materially nonlinear finite element analyses with ADINA. Due to its simplicity and accuracy the proposed method is a useful tool for the calculation of the collapse load of laced built-up columns in practice.