

## Αντοχή σύμμικτων υποστυλωμάτων κυκλικής διατομής

**Γεώργιος Δ. Χατζηγεωργίου**  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Ξάνθη, Ελλάδα  
gchatzig@env.duth.gr

### 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αρχικά ένα απλό και αποτελεσματικό μοντέλο για τη συμπεριφορά και την φέρουσα ικανότητα κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων που αποτελούνται από χαλύβδινα λεπτότοιχα στοιχεία πληρούμενα με σκυρόδεμα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα, τα οποία υποβάλλονται σε τριαξονική και διαξονική εντατική κατάσταση, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, γίνεται εκτεταμένη εφαρμογή της θεωρίας αυτής στο μοντέλο ινών το οποίο υιοθετείται για να περιγράψει την πλήρη συμπεριφορά των σύμμικτων υποστυλωμάτων υπό αξονική δύναμη με καμπτική ροπή. Κατόπιν παρουσιάζονται αναλυτικές σχέσεις για την φέρουσα ικανότητα των κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων. Συγκρίσεις μεταξύ των αριθμητικών, αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει μια απλή, άμεση και ακριβής εκτίμηση της οριακής αντοχής των σύμμικτων υποστυλωμάτων, ιδιαίτερα χρήσιμη στις πρακτικές εφαρμογές.

### 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δομικά στοιχεία από χάλυβα χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της τάσης διαρροής και της πλαστιμότητας. Επίσης, τα δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα παρουσιάζουν επαρκή θλιπτική αντοχή και δυσκαμψία. Συνεπώς, αν συνδυαστεί κατάλληλα ο χάλυβας με το σκυρόδεμα, π.χ. με τη δημιουργία σύμμικτων υποστυλωμάτων χάλυβα-σκυροδέματος, μπορούν να εκμεταλλευτούν τα παραπάνω πλεονεκτήματα [1]. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι σύμμικτων υποστυλωμάτων: ένα μεταλλικό στοιχείο, συνήθως διατομής-I, το οποίο εγκιβωτίζεται πλήρως ή μερικώς στο σκυρόδεμα και επίσης ένα μεταλλικό στοιχείο κούλης διατομής πληρούμενο με σκυρόδεμα (Χαλύβδινα Υποστυλώματα Πληρούμενα με Σκυρόδεμα - ΧΥΠΣ). Ενώ για την πρώτη κατηγορία υπάρχει σημαντική έρευνα [2], για τη δεύτερη κατηγορία (ΧΥΠΣ) δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητή και χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση η συνολική αντοχή, η ανελαστική συμπεριφορά και η συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος [3,4]. Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τη διερεύνηση των τριών προαναφερθέντων χαρακτηριστικών για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ΧΥΠΣ.

Γενικά, τα ΧΥΠΣ παρουσιάζουν επαρκή αντοχή, πλαστιμότητα και ανθεκτικότητα σε σεισμικά φορτία και πυρκαγιά. Επιπλέον, η λεπτότοιχη μεταλλική διατομή χρησιμοποιείται και ως καλούπι κατά τη σκυροδέτηση με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του κόστους. Πρόσθετα,

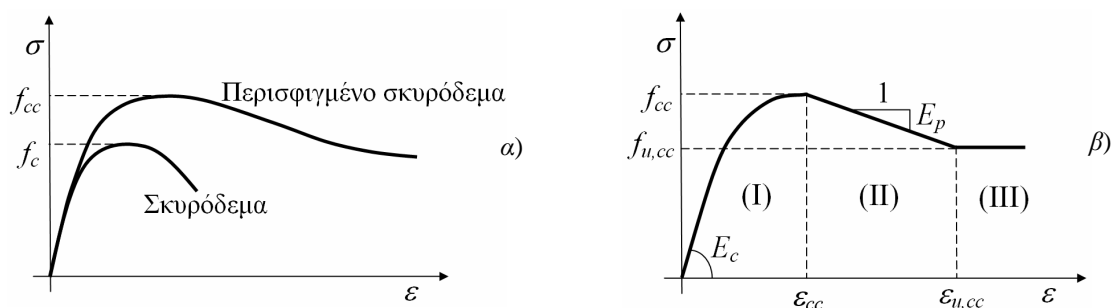
στις περισσότερες περιπτώσεις δεν χρησιμοποιούνται ράβδοι χαλύβδινου οπλισμού (διαμήκης ή εγκάρσιος) στο σκυρόδεμα αφού τα εφελκυστικά φορτία από κάμψη ή τα φορτία από διάτμηση παραλαμβάνονται από την χαλύβδινη δοκό. Επίσης, η μεταλλική διατομή εγκαθιστά το σκυρόδεμα αυξάνοντας την πλαστιμότητα αυτού ενώ το σκυρόδεμα μειώνει σημαντικά την πιθανότητα σε τοπικό λυγισμό της μεταλλικής δοκού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις προτεινόμενες θεωρίες και κανονισμούς που εξετάζουν τη συνεργασία σκυροδέματος-χάλυβα. Για παράδειγμα, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI [5]) θεωρεί ότι τα δύο υπό εξέταση υλικά δε συνεργάζονται καθόλου και το σύμμικτο υποστύλωμα εξετάζεται ως ισοδύναμο υποστύλωμα οπλισμένου σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό δε λαμβάνεται υπόψη η ευεργετική περίσφιγξη του σκυροδέματος αλλά και η δυσμενής διαξονική καταπόνηση του χάλυβα. Επίσης, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Χαλύβδινων Κατασκευών (AISC [6]) εξετάζει το σύμμικτο υποστύλωμα ως ισοδύναμο χαλύβδινο υποστύλωμα. Οι κανονισμοί κατασκευών σκυροδέματος και χάλυβα της Αυστραλίας [7, 8] έχουν την ίδια αντιμετώπιση με το ACI [5]. Η συμπεριφορά ορθογωνικών, κυκλικών ή άλλης διατομής ΧΥΠΣ εξετάζεται επίσης στα [9-20].

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αρχικά ένα απλό και αποτελεσματικό μοντέλο για τη συμπεριφορά και την φέρουσα ικανότητα κυκλικών ΧΥΠΣ. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα. Στη συνέχεια, γίνεται εκτεταμένη εφαρμογή της θεωρίας αυτής στο μοντέλο ινών το οποίο υιοθετείται για να περιγράψει την πλήρη συμπεριφορά των σύμμικτων υποστυλωμάτων υπό αξονική δύναμη με καμπτική ροπή. Κατόπιν παρουσιάζονται αναλυτικές σχέσεις για την φέρουσα ικανότητα των κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων. Συγκρίσεις μεταξύ των αριθμητικών, αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει μια απλή, άμεση και ακριβής εκτίμηση της οριακής αντοχής των κυκλικών ΧΥΠΣ, ιδιαίτερα χρήσιμη στις πρακτικές εφαρμογές.

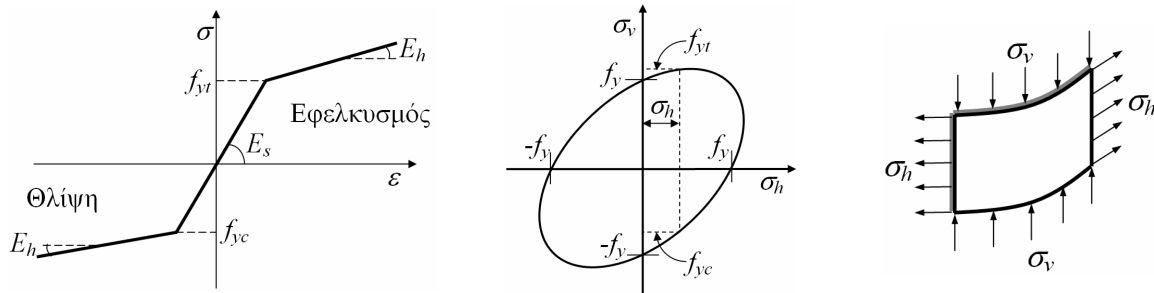
### 3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συνεργασία των δύο διαφορετικών υλικών οδηγεί το σκυρόδεμα σε τριαξονική θλίψη και το χάλυβα σε διαξονική εντατική κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα το σκυρόδεμα παρουσιάζει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες λόγω της περίσφιγξης από τον χάλυβα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1α, ενώ το Σχήμα 1β παρουσιάζει το αντίστοιχο προτεινόμενο μοντέλο. Είναι φανερό ότι η περίσφιγξη αυξάνει σημαντικά την αντοχή και ιδιαίτερα την πλαστιμότητα του σκυροδέματος.



Σχ. 1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για το σκυρόδεμα: α) πείραμα, β) μοντέλο

Επίσης για το χάλυβα υιοθετείται το διγραμμικό μοντέλο τάσης-παραμόρφωσης καθώς και το κριτήριο von Mises για τη διαξονική εντατική κατάσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

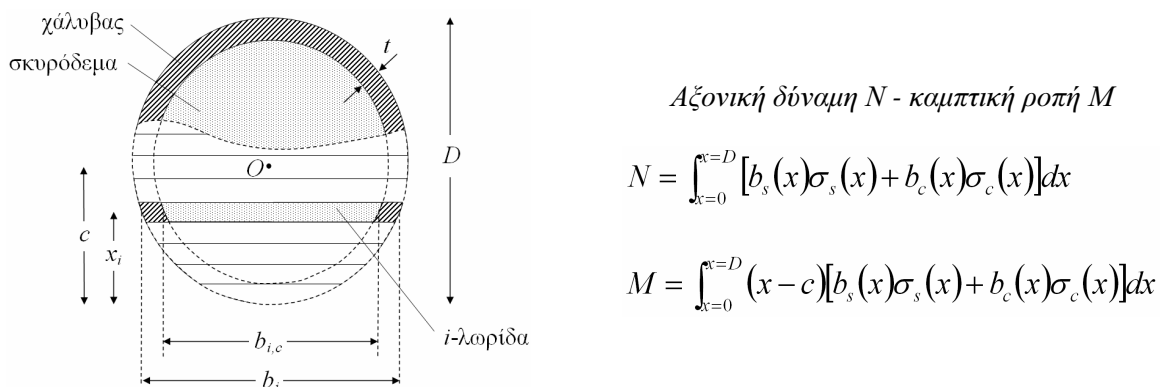


Σχ. 2: Μηχανική συμπεριφορά και κριτήριο αστοχίας για το χάλυβα

Για τις αναλυτικές σχέσεις των παραπάνω μοντέλων ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [21].

#### 4. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΧΥΠΣ

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ΧΥΠΣ κάτω από θλιπτικά αξονικά φορτία με ή χωρίς εκκεντρότητα υιοθετείται το μοντέλο ινών. Η βασική αρχή του μοντέλου ινών είναι ο διαχωρισμός της διατομής σε λωρίδες (ίνες) όπου για κάθε μια από αυτές, γνωρίζοντας την μέση ανοιγμένη παραμόρφωση, προσδιορίζεται η μέση τάση, η αντίστοιχη αξονική δύναμη και καμπτική ροπή. Βασική υπόθεση που γίνεται συνήθως με την υιοθέτηση του μοντέλου αυτού είναι βασική αρχή Bernoulli-Euler για την επιπεδότητα των διατομών. Η εφαρμογή του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχ. 3: Το μοντέλο ινών για τα σύμμετρα υποστυλώματα

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο ινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής για την περίπτωση αξονική δύναμης με ή χωρίς καμπτική ροπή.

#### 5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΧΥΠΣ

Σκοπός της ενότητας αυτή είναι να προτείνει απλές αναλυτικές/εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της οριακής αντοχής κυκλικών σύμμεκτων υποστυλωμάτων σε κεντρική θλίψη, και της οριακής αντοχής κυκλικών σύμμεκτων υποστυλωμάτων σε συνδυασμό θλίψης και κάμψης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω αναλυτικές/εμπειρικές σχέσεις προκύπτουν από πολυάριθμες εφαρμογές του μοντέλου των ινών μέσω και μιας διαδικασίας ανάλυσης παλινδρόμησης. Στην διαδικασία αυτή εξετάστηκαν 4 βασικές παράμετροι: η εξ. διάμετρος D

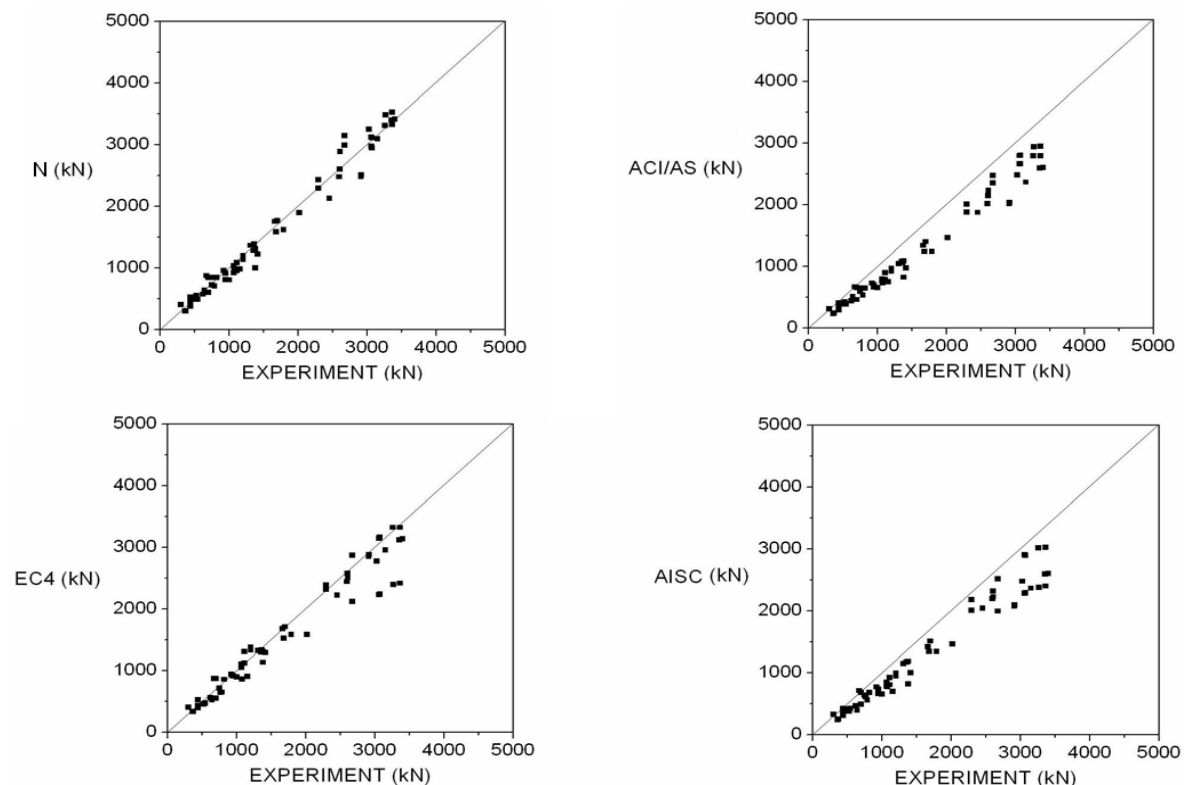
της χαλύβδινης δοκού, η οποία μεταβαλλόταν από 100 έως 1000 mm, το πάχος αυτής  $t$ , το οποίο κυμαινόταν από 0.30 έως 8.0 mm, η τάση διαρροή του χάλυβα  $f_y$  η οποία μεταβαλλόταν από 150 έως 600 MPa και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$  η οποία κυμαινόταν από 15 έως 60 MPa. Για κάθε παράμετρο και για τα παραπάνω όρια εξετάστηκαν 20 ισαπέχοντες τιμές. Έτσι, συνολικά εξετάστηκαν με το μοντέλο ινών  $20^4=160000$  σύμμικτα υποστυλώματα.

### 5.1 Αντοχή σύμμικτων υποστυλωμάτων σε κεντρική θλίψη

Η αντοχή σε κεντρικό θλιπτικό φορτίο  $N$  προκύπτει από την εμπειρική σχέση

$$N = 0.8 \cdot A_c \cdot f_c \left(1 + \theta + \sqrt{\theta}\right), \quad \theta = \frac{A_s \cdot f_y}{A_c \cdot f_c} \quad (1)$$

όπου  $A_c$  και  $A_s$  είναι η επιφάνεια του σκυροδέματος και του χάλυβα, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 φαίνεται η ικανότητα εκτίμησης της αντοχής με βάση τη σχέση 1, τον Ευρωκώδικα 4 [22], το ACI [5], το AISC [6] και τα Australian Standards [7-8] για 65 πειραματικές δοκιμές, εκτελεσμένες από διάφορους ερευνητές.



Σχ. 4: Εκτίμηση της αντοχής με εμπειρικές σχέσεις και σύγκριση με πειραματικές δοκιμές

Είναι φανερό ότι η σχέση 1 μπορεί να εκτιμήσει επιτυχώς την αντοχή των σύμμικτων υποστυλωμάτων σε καθαρή θλίψη, και δίνει την μικρότερη απόκλιση από τις πειραματικές δοκιμές, συγκρινόμενη με τους υπάρχοντες κανονισμούς δομικών κατασκευών.

### 5.2 Αντοχή σύμμικτων υποστυλωμάτων σε θλίψη-κάμψη

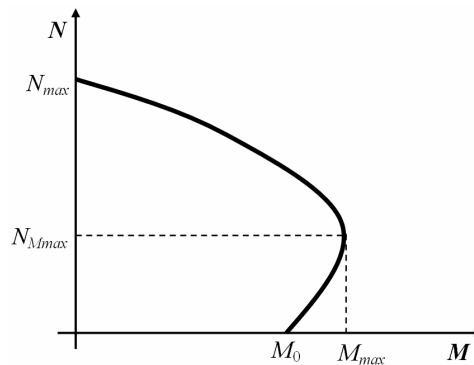
Η αντοχή σε συνδυασμό θλίψης  $N$  – κάμψης  $M$  ή σε έκκεντρο θλιπτικό φορτίο  $N$  προκύπτει μέσω διαγράμματος αλληλεπίδρασης  $N$ - $M$ . Στο παρελθόν οι Hajjar και Gourley [23] και Zhang και Shahrooz [24] πρότειναν αναλυτικές σχέσεις για ορθογωνικά ΧΥΠΣ. Σκοπός της ενότητας αυτή είναι η ανάπτυξη μιας πολυωνυμικής έκφρασης για το διάγραμμα αλληλεπίδρασης  $N$ - $M$  των κυκλικών ΧΥΠΣ. Αυτή έχει τη μορφή

$$k_1 + k_2 N + k_3 N^2 + k_4 N^4 - M = 0 \quad (2)$$

Οι παράμετροι  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  και  $k_4$  προκύπτουν από τη μέγιστη αξονική δύναμη  $N_{max}$ , τη μέγιστη καμπτική ροπή  $M_{max}$  και την αξονική δύναμη που αντιστοιχεί σε αυτή  $N_{Mmax}$ , και τη μέγιστη ροπή σε καθαρή κάμψη  $M_0$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, όπου

$$k_1 = M_0, \quad k_2 = \frac{(2N_{max}^4 - 4N_{max}^2 N_{Mmax}^2)(M_{max} - M_0) - 2M_0 N_{Mmax}^4}{N_{max} N_{Mmax} (2N_{Mmax}^3 - 3N_{max} N_{Mmax}^2 + N_{max}^3)}$$

$$k_3 = \frac{(4N_{max} N_{Mmax}^3 - N_{max}^4)(M_{max} - M_0) + 3M_0 N_{Mmax}^4}{N_{max} N_{Mmax}^2 (2N_{Mmax}^3 - 3N_{max} N_{Mmax}^2 + N_{max}^3)}, \quad k_4 = \frac{(N_{max}^2 - 2N_{max} N_{Mmax})(M_{max} - M_0) - M_0 N_{Mmax}^2}{N_{max} N_{Mmax}^2 (2N_{Mmax}^3 - 3N_{max} N_{Mmax}^2 + N_{max}^3)} \quad (3)$$



Σχ. 5: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N

Οι 4 βασικές παράμετροι του διαγράμματος αλληλεπίδρασης δίνονται από τη σχέση

$$N_{max} = A_c \cdot f_c \left( a_1 + a_2 \frac{t}{D} + a_3 \frac{f_c}{f_y} + a_4 \theta \right), \quad N_{Mmax} = A_c \cdot f_c \left( c_1 + c_2 \frac{t}{D} + c_3 \frac{f_c}{f_y} + c_4 \theta \right)$$

$$M_{max} = W_c \cdot f_c \left( b_1 + b_2 \frac{t}{D} + b_3 \frac{f_c}{f_y} + b_4 \theta \right), \quad M_0 = W_c \cdot f_c \left( d_1 + d_2 \frac{t}{D} + d_3 \frac{f_c}{f_y} + d_4 \theta \right) \quad (4)$$

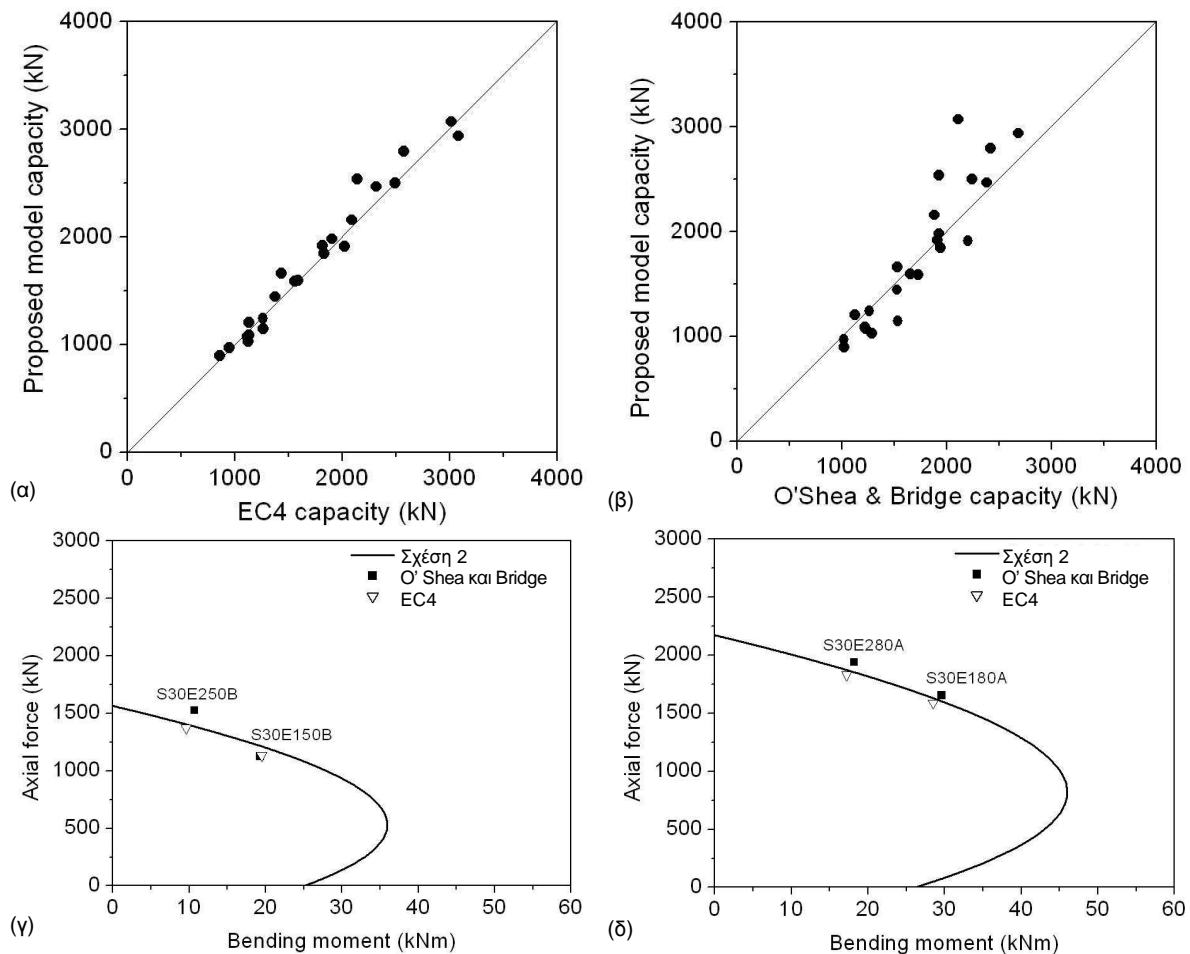
όπου  $W_c$  είναι η ροπή αντίστασης του πυρήνα σκυροδέματος και η παράμετρος  $\theta$  δίνεται στη σχέση 1. Οι παράμετροι  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ , και  $d_i$  ( $i=1-4$ ) της εξίσωσης 4 δίνονται στον Πιν. 1.

Δείκτης- $i$	$N_{max} - (a_i)$	$M_{max} - (b_i)$	$M_0 - (c_i)$	$N_{Mmax} - (d_i)$
1	817.2	595.2	22.50	385.7
2	5528	5924	-6358	1961
3	128.3	275.5	6.827	108.4
4	1282	2103	-2257	213.9

Πίν. 1: Παράμετροι a-d

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας της σχέσης 2, εξετάζονται 23 πειραματικές δοκιμές των O' Shea και Bridge [25]. Στο Σχήμα 6α και 6β παρουσιάζεται η εκτίμηση της αντοχής για τα κυκλικά ΧΥΠΣ με βάση τη σχέση 2, τον EC4 [22] και τους O' Shea και Bridge [25]. Επίσης, στο

σχήμα 6γ και 6δ φαίνεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης που προκύπτει για τα 4 πρώτα δοκίμια S30E250B, S30E150B, S30E280A και S30E180A. Είναι φανερό ότι η Σχέση 2 μπορεί επιτυχώς να προβλέψει την αντοχή των κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων.



Σχ. 6: Σύγκριση της Σχέσης 2 με πειραματικά αποτελέσματα και EC4

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν αριθμητικά προσομοιώματα και αναλυτικές σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της αντοχής χαλύβδινων υποστυλωμάτων πληρούμενων με σκυρόδεμα. Μέσω αριθμητικών παραδειγμάτων έγινε φανερό ότι αυτά μπορούν επιτυχώς να προσδιορίσουν την αντοχή των εν λόγω στοιχείων με τρόπο απλό και αποτελεσματικό, ιδιαίτερα χρήσιμο για την περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hatzigeorgiou GD, Beskos DE. Minimum cost design of fibre-reinforced concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2005, 61: 167–282.
- [2] Munoz PR, Hsu CT. Behavior of biaxially loaded concrete-encased composite columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 1997, 123(9): 1163–1171.
- [3] Shanmugam NE, Lakshmi B. State of the art report on steel–concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2001, 57: 1041–1080.

- [4] Giakoumelis G, Lam D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2004, 60: 1049–1068.
- [5] ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-05). Detroit: American Concrete Institute, 2005.
- [6] AISC. Specification for structural steel buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc., 2005.
- [7] Australian Standards AS3600. Concrete structures. Sydney: Standards Australia, 2001.
- [8] Australian Standards AS4100. Steel structures. Sydney: Standards Australia, 1998.
- [9] Hajjar JF, Gourley BC. Representation of Concrete-Filled Steel Tube Cross-Section Strength. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 1996, 122(11): 1327–1336.
- [10] Zhang W, Shahrooz BM. Strength of short and long concrete-filled tubular columns. *ACI Structural Journal* 1999, (March–April): 230–238.
- [11] Tang J, Hino S, Kuroda I, Ohta T. Modeling of stress–strain relationships for steel and concrete in concrete filled circular steel tubular columns. *J. St Constr Eng*, 1996, 3(11): 35–46.
- [12] Susantha KAS, Ge H, Usami T. Uniaxial stress–strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes, *Engineering Structures* 2001, 23: 1331–1347.
- [13] Mukai A, Nishiyama I. Modeling procedure of CFT beam–columns. In: US–Japan Cooperative Earthquake Engineering Research on Composite and Hybrid Structures, 4<sup>th</sup> JTCC Meeting, Monterey, 12–14 October 1997.
- [14] Watanabe H, Sakimoto T, Senba K, Onishi S. A simplified analysis for the ultimate strength and behaviour of concrete-filled steel tubular structures. In: *Proceedings of the Fifth International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, Japan, 1997: 893–900.
- [15] Sakino K, Ninakawa T, Nakahara H, Morino S. Experimental studies and design recommendations on concrete filled steel tubular columns—US–Japan Cooperative Earthquake Research Program. In: *Structural engineering world wide 1998*. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- [16] Han LH. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research* 2004, 60: 313–337.
- [17] Furlong RW. Strength of steel-encased concrete beam-columns. *Journal of Structural Division, ASCE* 1967, 93: 113–124.
- [18] Prion HGL, Boehme J. Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1994, 21: 207–218.
- [19] Lu YQ, Kennedy DJL. The flexural behaviour of concrete-filled hollow structural sections. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1994, 21: 111–130.
- [20] Elchalakani, M. Zhao, X.L. Grzebieta, R.H. Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending, *Journal of Constructional Steel Research* 2001, 57: 1141–1168.
- [21] Hatzigeorgiou, G.D. Strength of circular thin-walled concrete filled steel tubes, 8<sup>th</sup> HSTAM International Congress on Mechanics, 2007, Patras, Greece.
- [22] Eurocode 4 - European Committee for Standardisation, EN 1994-1-1, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1 General Rules and Rules for Buildings, E.U., 2004.
- [23] Hajjar JF, Gourley BC. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 1996; 122(11): 1327–1336.
- [24] Zhang W, Shahrooz BM. Strength of short and long concrete-filled tubular columns. *ACI Structural Journal* 1999; (March–April): 230–238.
- [25] O’Shea MD, Bridge RQ. Design of circular thin-walled concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering ASCE* 2000; 126(11): 1295–1303.

**On the strength of circular concrete-filled tube columns****George D. Hatzigeorgiou**Lecturer, Department of Environmental Engineering  
Democritus University of Thrace

Xanthi, Greece

gchatzig@env.duth.gr

**SUMMARY**

This paper presents a simple and effective model for the behavior and capacity of circular concrete-filled tube (CFT) short columns under extreme loading conditions. Firstly, efficient methods are presented to predict the complete stress–strain curve of concrete and steel, which are subjected to triaxial and biaxial stresses, respectively. Empirical expressions are proposed for the confinement effect, which increases both the ductility and strength of concrete but decreases the yield stress of steel. Subsequently, the fiber model is adopted to describe the complete behavior of CFT columns under axial force and bending moment. Furthermore, the proposed method is extended where analytical relations for the capacity of circular CFT columns are presented. These relations are valuable in the practice of engineering design since they provide a direct, compact and efficient representation of the ultimate strength of circular CFT columns. The comparisons between numerical, analytical and experimental results demonstrate that the proposed methods provide very good numerical performance for the behavior of circular CFT columns.