

Παραμόρφωση Αστοχίας Μελών Ο.Σ. Περισιφιγμένων με Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

Ultimate Deformation of FRP-Wrapped RC Members

Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ¹, Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ²

Λέξεις κλειδιά: Ινοπλισμένα Πολυμερή, γωνία στροφής χορδής, παραμόρφωση αστοχίας, μάτιση, μανδύας ΙΟΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η ικανότητα παραμόρφωσης ενός μέλους ΟΣ είναι η σημαντικότερη παράμετρος για την ενίσχυση με βάση τις παραμορφώσεις. Ο μανδύας ΙΟΠ στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης, είναι πολύ διαδεδομένος τρόπος βελτίωσης της ικανότητας παραμόρφωσης υποστλωμάτων ΟΣ ή βάθρων γεφυρών. Χρησιμοποιείται επίσης αποτελεσματικά για την ενίσχυση της περιοχής μάτισης διαμήκους οπλισμού εντός της πλαστικής άρθρωσης. Η εργασία αξιοποιεί πειραματικά αποτελέσματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης υποστλωμάτων ορθογωνικής διατομής και βάθρων ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής, με μάτιση ή όχι του διαμήκους οπλισμού, για την ανάπτυξη προσομοιωμάτων υπολογισμού της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία μετά από ενίσχυση με μανδύα ΙΟΠ. Τα προσομοιώματα αυτά είναι επεκτάσεις προσομοιωμάτων που έχουν αναπτυχθεί ωρίτερα για μέλη χωρίς ενίσχυση. Πολλά απ' τα προτεινόμενα προσομοιώματα έχουν υιοθετηθεί στον Ευρωκώδικα για τις ενισχύσεις και επισκευές, EN 1998-3.

ABSTRACT : The cyclic deformation capacity is the key property of RC members in displacement-based seismic rehabilitation. FRP-wrapping of the plastic hinge region is becoming the method of choice for the enhancement of deformation capacity of deficient RC columns or piers, even with vertical bars lap-spliced in the plastic hinge region. The paper uses cyclic test results to develop models for the flexure-controlled cyclic ultimate chord rotation of rectangular RC columns and circular or rectangular piers, as affected by FRP-wrapping. The models are extensions of earlier ones developed for RC members or piers without retrofitting. Most of the models in the paper were adopted in the European Standard for seismic assessment and retrofitting of existing buildings, EN 1998-3:2005.

¹ Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Εργαστήριο Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, email: dbisk@tee.gr

² Καθηγητής, Εργαστήριο Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, email: fardis@upatras.gr

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΛΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΟΠ ΧΩΡΙΣ ΜΑΤΙΣΗ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Οι παραμορφώσεις του μέλους εκφράζονται μέσω της γωνίας στροφής χορδής, θ , που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης της ελαστικής γραμμής στο άκρο του μέλους και της χορδής που συνδέει τα άκρα του. Η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , ορίζεται συμβατικά απ' το σημείο του διαγράμματος $F-\delta$ (ή $M-\theta$) όπου το μέλος δεν μπορεί να αναπτύξει πλέον δύναμη μεγαλύτερη απ' το 80% της μέγιστης αντοχής του, για αυξανόμενες επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Η θ_u εκφράζεται ως το άθροισμα: (α) της γωνίας στροφής χορδής στη «φαινόμενη» διαρροή θ_y , και (β) της πλαστικής γωνίας στροφής χορδής, θ_u^{pl} .

Η «φαινόμενη» διαρροή λαμβάνεται στη γωνία ισοδύναμου διγραμμικού διαγράμματος $M-\theta$, προσαρμοσμένου στο πειραματικό διάγραμμα μέχρι τη μέγιστη αντίσταση. Η θ_y για μέλη ενισχυμένα με ΙΟΠ μπορεί να υπολογίζεται απ' τις παρακάτω εξισώσεις, που βασίζονται στις αντίστοιχες που έχουν αναπτυχθεί για μη-ενισχυμένα μέλη, Μπισκίνης (2007). Για μέλη ορθογωνικής διατομής:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_s} \right) + \alpha_{sl} \frac{\varphi_y d_{bL} f_y}{8 \sqrt{f_c}} \quad (1a)$$

όπου:

- L_s είναι ο λόγος διάτμησης στο άκρο του μέλους,
- φ_y η καμπυλότητα της ακραίας διατομής στην διαρροή, από επιπεδότητα και ισορροπία της διατομής, με τα ακόλουθα κριτήρια διαρροής, Panagiotakos and Fardis (2001):
 - διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα σε τάση διαρροής f_y , ή
 - ανηγμένη παραμόρφωση $0.9f_c/E_c$ στην ακραία θλιβόμενη ίνα (f_c και E_c είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος)
- $a_v z$ στον 1^ο (καμπτικό) όρο της Εξ. (1) είναι το μήκος μετάθεσης των τάσεων του εφελκόμενου χάλυβα λόγω λοξής ρηγμάτωσης, όπου:
 - z = μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων,
 - $a_v = 1$ εάν η διαγώνια ρηγμάτωση προηγείται της καμπτικής διαρροής, δηλ. εάν η τέμνουσα στην καμπτική διαρροή, M_y/L_s είναι μεγαλύτερη της διατμητικής αντοχής του μέλους χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, $V_{R,c}$; ή
 - $a_v = 0$ εάν $M_y < L_s V_{R,c}$.
- h το ύψος της διατομής,
- d_b η διάμετρος του εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού,
- α_{sl} στον 3^ο όρο της Εξ. (1), που εκφράζει τη στροφή λόγω ολίσθησης των ράβδων απ' την περιοχή αγκύρωσης, λαμβάνεται:
 - $\alpha_{sl} = 1$ εάν είναι δυνατή η ολίσθηση του διαμήκους οπλισμού απ' την περιοχή αγκύρωσής του, ή
 - $\alpha_{sl} = 0$ εάν δεν είναι.
- Τα f_y και f_c στον 3^ο όρο είναι σε MPa.

Για μέλη κυκλικής διατομής:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_s + \alpha_V z}{3} + 0.0022 \cdot \max \left(0, \left(1 - \frac{L_s}{6D} \right) \right) + \alpha_{sl} \frac{\varphi_y d_{bL} f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (1\beta)$$

με όλες τις παραμέτρους όπως ορίζονται παραπάνω και μοχλοβραχίονα εσωτερικών δυνάμεων $z \approx 0.9D$. Η φ_y υπολογίζεται από ισορροπία της διατομής, όπως στο Μπισκίνης (2007) για μη-ενισχυμένα μέλη, όπου για ενίσχυση με μανδύα ΙΟΠ θα λαμβάνονται τα παρακάτω κριτήρια διαρροής:

- διαρροή του διαμήκους οπλισμού στο 40% της εφελκόμενης ζώνης, ή
- παραμόρφωση σκυροδέματος της ακραίας θλιβόμενης ίνας $\varepsilon_c = 0.003$.

Για υποστυλώματα με μανδύα ΙΟΠ, στον υπολογισμό των φ_y και M_y η αντοχή σκυροδέματος αντικαθίσταται απ' την αυξημένη τιμή, f_{cc} , λόγω περίσφιγξης ΙΟΠ, η οποία λαμβάνεται εδώ σύμφωνα με τους Lam and Teng (2003):

$$\frac{f_{cc}}{f_c} = 1 + 3.3 \left(\frac{\min(b_x; b_y)}{\max(b_x; b_y)} \right)^2 a_f \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_c} \quad (2)$$

όπου:

- b_x και b_y είναι οι διαστάσεις της διατομής,
- ρ_f το γεωμετρικό ποσοστό του ΙΟΠ, παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης,
- a_f ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης του μανδύα ΙΟΠ σε ορθογωνική διατομή με γωνίες στρογγυλεμένες σε ακτίνα R για την εφαρμογή του ΙΟΠ:

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

- $f_{u,f}$ η ενεργός αντοχή του ΙΟΠ, που λαμβάνεται εδώ κατά Lam and Teng (2003):

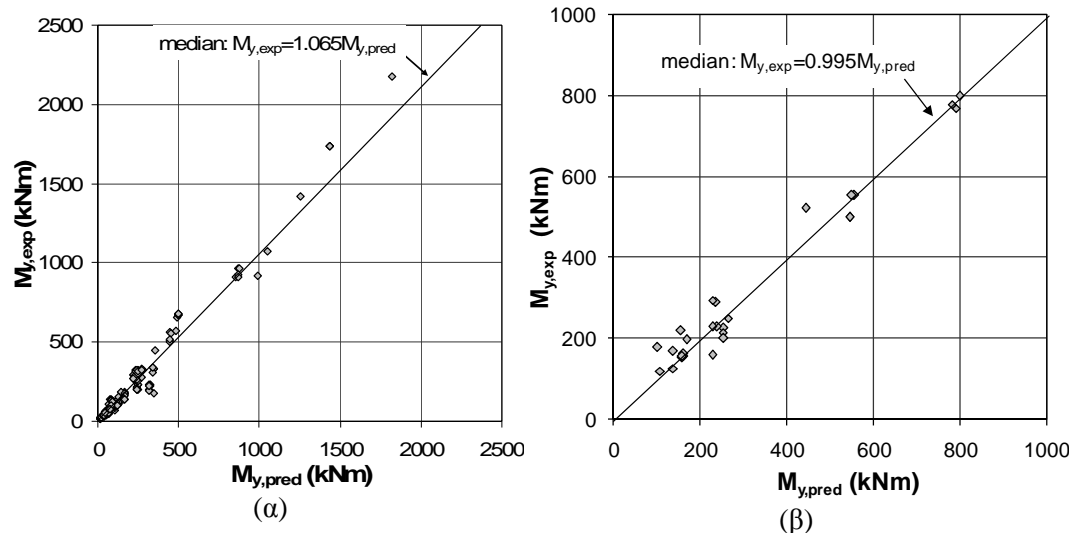
$$f_{u,f} = E_f (k_{\text{eff}} \varepsilon_{u,f}) \quad (3\beta)$$

όπου:

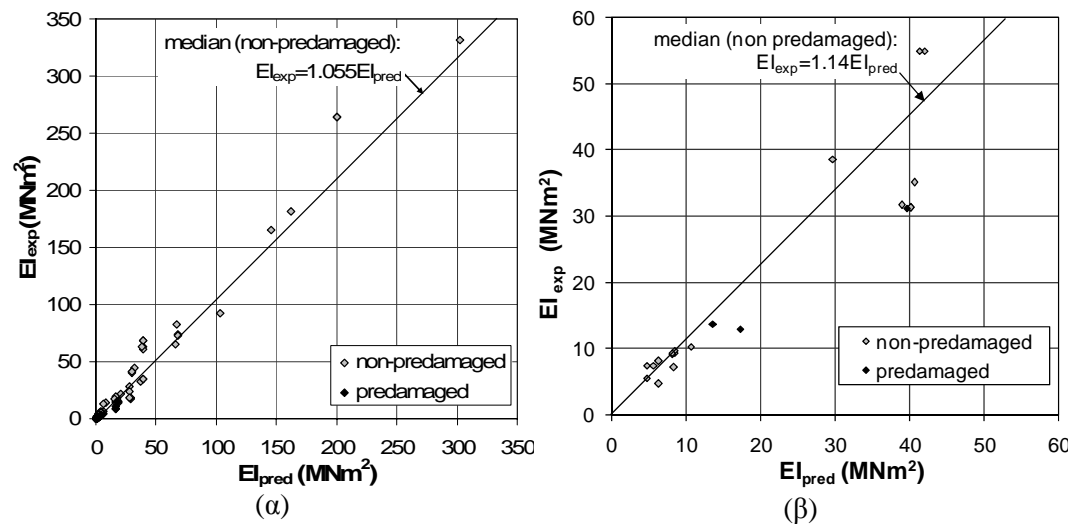
- E_f και $\varepsilon_{u,f}$ είναι το μέτρο ελαστικότητας και η παραμόρφωση αστοχίας του ΙΟΠ, αντίστοιχα,
- k_{eff} είναι συντελεστής αποδοτικότητας του ΙΟΠ, που λαμβάνεται σύμφωνα με τους Lam and Teng (2003) ίσος με $k_{\text{eff}} = 0.6$ για ίνες άνθρακα (CFRP) ή γυαλιού (GFRP). Η ίδια τιμή, $k_{\text{eff}} = 0.6$, προτείνεται και για ίνες αραμιδίου (AFRP) και για ΙΟΠ από ίνες πολυακετάλης (οι Lam and Teng (2003) πρότειναν $k_{\text{eff}} = 0.85$ για ΙΟΠ με ίνες αραμιδίου, στηριζόμενοι σε λίγα πειραματικά αποτελέσματα).
- ρ_f και $f_{u,f}$ είναι το γεωμετρικό ποσοστό του ΙΟΠ παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης και η αντοχή του, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(α) και στη γραμμή 1 του Πίνακα 1, η τιμή της M_y που υπολογίζεται με την παραπάνω διαδικασία είναι κατά μέσο όρο 6.5%

μικρότερη απ' την πειραματική. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει ο συντελεστής 1.065 στον 1^ο όρο της Εξ. (1). Για μέλη κυκλικής διατομής (Σχήμα 1(β) και γραμμή 19 του Πίνακα 1) δεν απαιτείται τέτοιος συντελεστής.



Σχήμα 1. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής ροπής διαρροής μελών ΟΣ με μανδύα ΙΟΠ χωρίς μάτιση διαμήκους σπλισμού: (α) μέλη ορθογωνικής διατομής, (β) μέλη κυκλικής διατομής



Σχήμα 2. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής ενεργού δυσκαμψίας, $EI_{eff} = M_y L_s / 3\theta_y$, μελών ΟΣ με μανδύα ΙΟΠ χωρίς μάτιση διαμήκους σπλισμού: (α) Μέλη ορθογωνικής διατομής, (β) Μέλη κυκλικής διατομής.

Πίνακας 1. Μέσος όρος*, διάμεσος* και συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή ιδιοτήτων μελών χωρίς μάτιση διαμήκους οπλισμού.

Ιδιότητα		Πλήθος δοκιμίων	μ.ο.*	διάμεσος*	Συντ. Μεταβλ.	
Μέλη ορθογωνικής διατομής						
1.	$M_{y,exp}/M_{y,pred}$		180	1.065	19.6%	
2.	$\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\dot{\epsilon},(1)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	136	1.105	0.995	37.8%
3.	$\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\dot{\epsilon},(1)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	20	1.555	1.475	28.9%
4.	$(M_y L_s/3\theta_y)_{exp}/(M_y L_s/3\theta_y)_{E\dot{\epsilon},(1)}$	χωρίς βλάβη	136	1.085	1.055	28.7%
5.	$(M_y L_s/3\theta_y)_{exp}/(M_y L_s/3\theta_y)_{E\dot{\epsilon},(1)}$	με βλάβη	20	0.73	0.68	22.1%
6.	$\varphi_{u,exp}/\varphi_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(6)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	33	1.04	1.01	27.5%
7.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(7)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	94	1.095	0.995	34.6%
8.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(9)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	94	1.135	1.095	31.8%
9.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(10)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	94	1.075	1.05	31.4%
10.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(11)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	94	1.07	1.03	31.4%
11.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(7)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	18	0.995	0.985	23.1%
12.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(9)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	18	0.96	0.93	23.1%
13.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(10)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	18	0.945	0.925	23.2%
14.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(11)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	18	0.93	0.945	25.4%
15.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(7)}$	όλα τα μέλη	112	1.075	0.995	33.4%
16.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(9)}$	όλα τα μέλη	112	1.105	1.085	31.4%
17.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(10)}$	όλα τα μέλη	112	1.055	1.035	30.8%
18.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1),(8),(11)}$	όλα τα μέλη	112	1.045	1.025	31.1%
Μέλη κυκλικής διατομής						
19.	$M_{y,exp}/M_{y,pred}$		28	1.04	0.995	20.3%
20.	$\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\dot{\epsilon},(1\beta)}$	χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση	18	1.025	1.01	20.6%
21.	$\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\dot{\epsilon},(1\beta)}$	με βλάβη πριν την ενίσχυση	4	1.135	1.18	11.8%
22.	$(M_y L_s/3\theta_y)_{exp}/(M_y L_s/3\theta_y)_{E\dot{\epsilon},(1\beta)}$	χωρίς βλάβη	18	1.095	1.14	22.05%
23.	$(M_y L_s/3\theta_y)_{exp}/(M_y L_s/3\theta_y)_{E\dot{\epsilon},(1\beta)}$	με βλάβη	4	0.855	0.83	13.25%
24.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(7)}$	μέλη που αστόχησαν	4	1.29	1.325	13.1%
25.	$\theta_{u,exp}/\theta_{u,E\dot{\epsilon},(1)-(7)}$	μέλη που δεν αστόχησαν	18	0.865	0.755	41.6%

* Για μικρό πλήθος δείγματος, ο διάμεσος είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικός της μέσης τάσης από το μέσο όρο, καθώς ο διάμεσος του αντίστροφου λόγου (θεωρητική προς πειραματική τιμή) είναι ο αντίστροφος του διαμέσου του λόγου πειραματική προς θεωρητική τιμή, ενώ ο μέσος όρος και των δύο είναι συνήθως μεγαλύτερος του διαμέσου.

Ο Πίνακας 1 (γραμμές 2, 3, 20, 21) δίνει τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητική θ_y , χωριστά για μέλη με και χωρίς βλάβες πριν την ενίσχυση. Όπως φαίνεται απ'τα αποτελέσματα, μέλη με βλάβη πριν την ενίσχυση ανέκτησαν πλήρως τη ροπή διαρροής, είναι όμως πολύ πιο εύκαμπτα, με μεγαλύτερη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή και μικρότερη δυσκαμψία, Σχήμα 2. Η δυσκαμψία έχει ληφθεί ως $EI_{eff}=M_y L_s/3\theta_y$ και τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής της παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, γραμμές 4, 5, 22, 23.

Για την πλαστική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u^{pl} , προτείνονται εδώ δύο εναλλακτικά προσομοιώματα. Στο πρώτο η θ_u^{pl} λαμβάνεται ως γινόμενο του πλαστικού μέρους της καμπυλότητας στην αστοχία, $\varphi_u - \varphi_y$, επί ένα μήκος πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} , συν τη γωνία στροφής λόγω της πρόσθετης – μετά τη διαρροή – ολίσθησης των ράβδων διαμήκους οπλισμού εξαιτίας επέκτασης της διαρροής τους πέραν από την ακραία διατομή σε απόσταση 10 διαμέτρους ράβδου περίπου. Αυτό προέκυψε από πειραματικά δεδομένα μελών χωρίς ενίσχυση με μέτρηση της καμπυλότητας στην αστοχία, καθώς και μελών με μέτρηση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία τόσο με ολίσθηση του οπλισμού όσο και χωρίς. Λαμβάνοντας γραμμική κράτυνση κατά μήκος του τμήματος της ράβδου όπου έχει επεκταθεί η διαρροή, προκύπτει για τη συνολική θ_u^{pl} :

$$\theta_u^{pl} = a_{sl} \frac{(\varphi_u + \varphi_y)}{2} 10d_{bL} + (\varphi_u - \varphi_y) L_{pl} \left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s} \right) \quad (4)$$

Οι εμπειρικές σχέσεις για το μήκος πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} , εξαρτώνται από τα προσομοιώματα υπολογισμού των φ_y και φ_u . Εδώ το προσομοίωμα υπολογισμού της φ_y είναι αυτό που παρουσιάζεται κάτω απ' την Εξ. (1). Το προσομοίωμα υπολογισμού της φ_u βασίζεται και αυτό σε επιπεδότητα και ισορροπία της διατομής, με μήκυνση του εφελκόμενου χάλυβα, ε_{su} , στην αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ίση με 3/8 της ονομαστικής μήκυνσης αστοχίας του χάλυβα, $\varepsilon_{su, nom}$, Μπισκίνης (2007). Ο νόμος σ - ε του περισιγμένου με ΙΟΠ σκυροδέματος λαμβάνεται κατά Lam and Teng (2003), δηλ. παραβολικός και στη συνέχεια γραμμικά ανερχόμενος μέχρι τη μέγιστη αντοχή f_{cc} κατά την Εξ. (2). Όμως η κατά Lam and Teng (2003) παραμόρφωση αστοχίας για κεντρική θλίψη δεν δίνει τιμές φ_u συμβατές με τις πειραματικές μετρήσεις. Για συμφωνία μ' αυτές χρειάζεται:

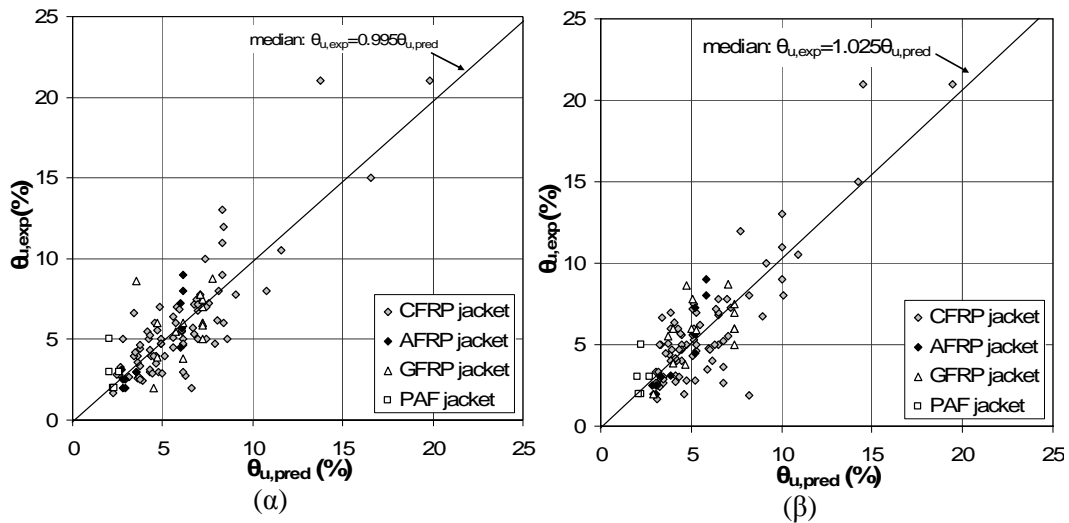
$$\varepsilon_{cu,c} = 0.0035 + \left(\frac{10}{h} \right)^2 + 0.4a_f \min \left[0.5; \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_{cc}} \right] a_{eff,j} \quad (5)$$

όπου το ύψος της διατομής, h , είναι σε mm, ρ_f , a_f , $f_{u,f}$ έχουν ορισθεί κάτω απ' την Εξ. (2) και $a_{eff,j}$ είναι συντελεστής αποδοτικότητας του ΙΟΠ, ο οποίος εκφράζει αποδοτικότητα μη-αναλογική προς το γεωμετρικό του ποσοστού:

$$a_{eff,j} = 0.5 \left(1 - \min \left[0.5; \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_{cc}} \right] \right) \quad \text{για CFRP, GFRP} \quad (6a)$$

$$a_{eff,j} = 0.3 \left(1 - \min \left[0.5; \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_{cc}} \right] \right) \quad \text{για AFRP} \quad (6b)$$

Για μέλη κυκλικής διατομής ισχύουν οι παραπάνω εξισώσεις, μόνο που στην Εξ. (5) το h αντικαθίσταται απ' τη διάμετρο D . Επίσης είναι $\alpha_f = 1$.



Σχήμα 3. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , μελών με μανδύα ΙΟΠ, χωρίς μάτιση διαμήκους οπλισμού: (α) υπολογισμός μέσω μήκους πλαστικής άρθρωσης, Εξ. (1)-(7), (β) εμπειρικό προσομοίωμα, Εξ. (1), (8), (11).

Οι εμπειρικές σχέσεις του μήκους πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} , έχουν αναπτυχθεί βάσει πειραματικών μετρήσεων της θ_u στην καμπτική αστοχία 1300 μη-ενισχυμένων μελών ορθογωνικής διατομής και 110 κυκλικής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση:

$$\text{Μέλη ορθογωνικής διατομής: } L_{pl} = 0.2h \left[1 + \frac{1}{3} \min \left(9; \frac{L_s}{h} \right) \right] \quad (7a)$$

$$\text{Μέλη κυκλικής διατομής: } L_{pl} = 0.65D \left[1 + 0.105 \min \left(9; \frac{L_s}{h} \right) \right] \quad (7b)$$

Το 2^ο προσομοίωμα υπολογισμού της θ_u^{pl} είναι καθαρά εμπειρικό και έχει εφαρμογή μόνο σε μέλη με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη:

$$\theta_u^{pl} = 1.85(1 - 0.52\alpha_{cy}) \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{1.6} \right) (0.25)^v \left(\frac{\max(0.01, \omega)}{\max(0.01, \omega)} \right)^{0.3} f_c^{0.2} \left(\frac{L_s}{h} \right)^{0.35} 25^{\left(\frac{\alpha_{px} f_{yw} + \alpha_f \rho_f f_{f,e}}{f_c} \right)} 1.275^{100\rho_d} \quad (8)$$

όπου:

- $\alpha_{cy} = 1$ για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, $\alpha_{cy} = 1$ για μονοτονική
- $v = N/bhf_c$, με b το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και N την αξονική δύναμη, θετική για θλίψη,
- $\omega = \rho f_{yL}/f_c$: μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού (που περιλαμβάνει και τον ενδιάμεσο στα δύο πέλαμα οπλισμό, όταν υπάρχει),
- $\omega' = \rho' f_{yL}/f_c$: μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού,

- f_c σε MPa
- ρ_{sx} : γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης,
- ρ_d : ποσοστό διαγώνιου οπλισμού (εάν υπάρχει) σε κάθε διαγώνιο.
- $f_{f,e}$ η ενεργός μέγιστη τάση του ΙΟΠ:

$$f_{f,e} = \min(f_{fu,nom}; \varepsilon_{u,f} E_f) \left(1 - \min \left[0.5; 0.7 \min(f_{fu,nom}; \varepsilon_{u,f} E_f) \frac{\rho_f}{f_c} \right] \right) \quad (9)$$

όπου $f_{fu,nom}$ είναι η ονομαστική αντοχή του ΙΟΠ και $\varepsilon_{u,f}$ η οριακή παραμόρφωση:

- $\varepsilon_{u,f} = 0.015$ για CFRP και AFRP;
- $\varepsilon_{u,f} = 0.02$ για GFRP.

Όλες οι άλλες μεταβλητές της Εξ. (8) έχουν οριστεί παραπάνω. Η Εξ. (8) με $\rho_f=0$ έχει αναπτυχθεί βάσει 1300 πειραματικών μετρήσεων της θ_u στην καμπτική αστοχία μη-ενισχυμένων μελών ορθογωνικής διατομής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, Μπισκίνης (2007).

Προτείνεται εναλλακτικά να λαμβάνεται η επιρροή του ΙΟΠ στον εκθέτη του 2^{ου} όρου απ' το τέλος της Εξ. (8), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{a \rho_f u}{f_c} \right)_{f,eff} = a_f \min \left[1.0; \min(f_{fu,nom}; \varepsilon_{u,f} E_f) \frac{\rho_f}{f_c} \right] \left(1 - 0.4 \min \left[1.0; \min(f_{fu,nom}; \varepsilon_{u,f} E_f) \frac{\rho_f}{f_c} \right] \right) \quad (10)$$

με οριακή παραμόρφωση $\varepsilon_{u,f} = 0.015$ για όλους τους τύπους ΙΟΠ. Περίπου η ίδια συμφωνία με τις πειραματικές τιμές επιτυγχάνεται αν η συμβολή του ΙΟΠ στον εκθέτη του 2^{ου} απ' το τέλος όρου της Εξ. (8) ληφθεί απ' την παρακάτω σχέση που χρησιμοποιεί την ενεργό αντοχή του ΙΟΠ, $f_{u,f}$, κατά Lam and Teng (2003):

$$\left(\frac{a \rho_f u}{f_c} \right)_{f,eff} = a_f c_f \min \left[0.4; \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_c} \right] \left(1 - 0.5 \min \left[0.4; \frac{\rho_f f_{u,f}}{f_c} \right] \right) \quad (11)$$

όπου $c_f = 1.8$ για CFRP και $c_f = 0.8$ για GFRP και AFRP. Ο τελευταίος όρος στις Εξ. (9), (10), (11) αντιπροσωπεύει την πειραματικά διαπιστωμένη μείωση αποδοτικότητας του μανδύα ΙΟΠ όσον αυξάνεται το πάχος του μανδύα.

Οι γραμμές 7 έως 10 του Πίνακα 1 δίνουν τα στατιστικά στοιχεία του λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή της θ_u για μέλη ενισχυμένα με ΙΟΠ χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση και οι γραμμές 11 έως 14 για βλάβη πριν την ενίσχυση. Τα αποτελέσματα των Εξ. (1)-(7) δεν δείχνουν επιρροή στη θ_u της βλάβης πριν την ενίσχυση. Αντίθετα τα αποτελέσματα της Εξ. (8) και των Εξ. (9) ή (10) ή (11) δείχνουν 10% περίπου μείωση της θ_u λόγω βλάβης πριν την ενίσχυση. Στο Σχήμα 3 τα προσομοιώματα υπολογισμού της θ_u συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές.

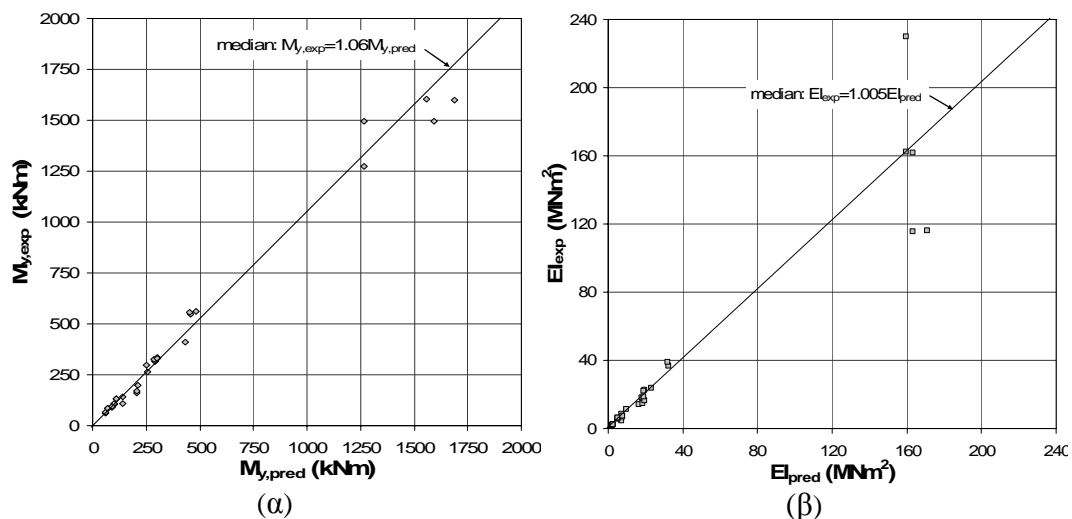
Τα μέλη κυκλικής διατομής που αστόχησαν στη διάρκεια του πειράματος ήταν μόλις 4 και τα στατιστικά τους στοιχεία είναι αμφίβολης χρησιμότητας. Στα 18 δοκίμια κυκλικής διατομής που το πείραμα σταμάτησε πριν την αστοχία (Πίνακας 1, γραμμές 24, 25) ο διάμεσος και ο μέσος όρος είναι όντως μικρότεροι το 1.0.

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΛΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΟΠ ΜΕ ΜΑΤΙΣΗ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Τα πειραματικά αποτελέσματα μελών με μάτιση διαμήκους οπλισμού στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης δείχνουν ότι στον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής, φ_y , της ροπής διαρροής, M_y , και της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , θα πρέπει και οι δύο θλιβόμενοι ράβδοι σε μία μάτιση να προσμετρώνται στο θλιβόμενο οπλισμό. Επιπλέον, εάν το μήκος μάτισης, l_o , είναι μικρότερο μίας ελάχιστης τιμής $l_{oy,min}$ από την εξίσωση:

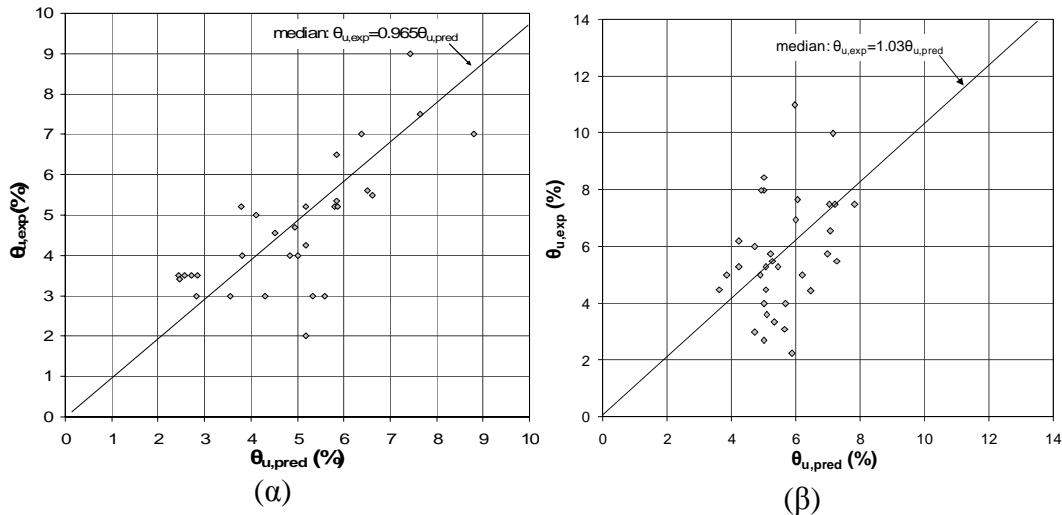
$$l_{oy,min} = 0.2d_b f_y / \sqrt{f_c} \quad (f_y, f_c \text{ σε MPa}) \quad (12)$$

τα φ_y και M_y θα πρέπει να υπολογίζονται με τάση εφελκόμενου οπλισμού ίση με την τάση διαρροής, f_{yL} , επί $l_o/l_{oy,min}$. Επιπλέον, ο 2^{ος} (διατμητικός) όρος της Εξ. (1) για τον υπολογισμό της θ_y θα πρέπει να πολλαπλασιάζεται με το λόγο της M_y λαμβάνοντας υπόψη τη μάτιση προς την τιμή της M_y εάν δεν ληφθεί υπόψη. Οι παραπάνω κανόνες είναι επέκταση αντίστοιχων για μέλη με μάτιση διαμήκους οπλισμού χωρίς ενίσχυση, Μπισκίνης (2007).



Σχήμα 4. Σύγκριση πειραματικής (α) ροπής διαρροής και (β) ενεργού δυσκαμψίας, $EI_{eff} = M_y L_s / 3\theta_y$, μελών με μανδύα ΙΟΠ στην περιοχή μάτισης, με θεωρητικές τιμές

Στο Σχήμα 4 και στις γραμμές 1-3 και 7-9 του Πίνακα 2 οι πειραματικές τιμές της M_y , της θ_y και της ενεργού δυσκαμψίας για μέλη με μανδύα ΙΟΠ στην περιοχή της μάτισης συγκρίνονται με τις θεωρητικές της προτεινόμενης μεθοδολογίας.



Σχήμα 5. Σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , μελών με μανδύα ΙΟΠ στην περιοχή μάτισης διαμήκων ράβδων: (α) ορθογωνικές διατομές, Εξ. (1α), (8), (9), (12)-(14α), (β) κυκλικές διατομές, Εξ. (1)-(7), (15).

Το πλαστικό μέρος της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u^{pl} , μελών με μανδύα ΙΟΠ στην περιοχή μάτισης θα υπολογίζεται απ' την εξίσωση:

$$\theta_u^{pl} = (l_o/l_{ou,min})\theta_u^{pl}_{\text{Εξ.(8)}}, \text{ εάν } l_o < l_{ou,min} \quad (13)$$

με $l_{ou,min}$ το ελάχιστο μήκος μάτισης για την ανάπτυξη της πλήρους γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία χωρίς δυσμενή επιρροή της μάτισης:

$$l_{ou,min} = \frac{d_b f_y}{(1.05 + 14.5 \alpha_l \rho_f f_{f,e} / f_c) \sqrt{f_c}} \quad (f_y, f_c \text{ σε MPa}) \quad (14\alpha)$$

όπου θετική συνεισφορά της περίσφιγξης στη μάτιση λαμβάνεται μόνο λόγω του μανδύα ΙΟΠ (και όχι λόγω των συνδετήρων), με ρ_f όπως έχει οριστεί στην Εξ. (2), $f_{f,e}$ απ' την Εξ. (9) και συντελεστή αποδοτικότητας περίσφιγξης από το μανδύα ΙΟΠ:

$$\alpha_l = \alpha_f \frac{\sum_{i=1, n_{tot}} \left(\frac{d_{bL}}{D_{bh,in}} \right)_i^{0.3}}{n_{tot}} \quad (15)$$

όπου:

- α_f απ' την Εξ. (3α) (για κυκλικές διατομές $\alpha_f=1$),
- i = δείκτης ράβδου με μάτιση, όλες με διάμετρο d_{bL} ,
- n_{tot} = συνολικός αριθμός ράβδων διαμήκους οπλισμού πο έχουν μάτιση,
- $D_{bh,in}$ = εσωτερική διάμετρος ΙΟΠ κοντά στη διαμήκη ράβδο i .

Σε ορθογωνικά υποστυλώματα ή βάθρα μόνον οι γωνιακές ράβδοι περισφίγγονται από το ΙΟΠ. Για τις περιπτώσεις αυτές, θεωρώντας στρογγύλευση των γωνιών για την εφαρμογή του μαδύα σε $D_{bh,in} \approx d_{bL}$, το κλάσμα της Εξ. (15) δίνει $4/n_{tot}$. Σε μέλη κυκλικής διατομής όλες οι ράβδοι περισφίγγονται το ίδιο, και το κλάσμα της Εξ. (14) γίνεται $(d_{bL}/D)^{0.3}$, όπου D η διάμετρος της διατομής.

Αν χρησιμοποιηθεί η Εξ. (10) για την ενεργό περίσφιγξη με ΙΟΠ, η Εξ. (14α) γίνεται:

$$l_{ou,min} = \frac{d_{bL} f_{yL}}{\left(1.05 + 14.5 \alpha_i \left(a \frac{\rho f_u}{f_c} \right)_{f,eff} \right) \sqrt{f_c}} \quad (f_{yL}, f_{f,u}, E_f, f_c \text{ σε MPa}) \quad (14\beta)$$

Ως τρίτη εναλλακτική, ο υπολογισμός της συμβολής της περίσφιγξης με ΙΟΠ μπορεί να γίνει βάσει της Εξ. (11), όπου η ενεργός τάση του ΙΟΠ υπολογίζεται κατά Lam and Teng (2003), Εξ. (3β), οπότε το ελάχιστο μήκος μάτισης, $l_{ou,min}$, υπολογίζεται ξανά απ' την Εξ. (14β), αλλά με $(\rho f_u / f_c)_{f,eff}$ απ' την Εξ. (11).

Πίνακας 2. Μέσος όρος*, διάμεσος* και συντελεστής μεταβλητότητας λόγου πειραματικής προς θεωρητική τιμή ιδιοτήτων μελών με μάτιση διαμήκους οπλισμού

Ιδιότητα	Πλήθος δοκιμών	μ.ο.*	διάμεσος*	συντ. μεταβλητοτ.
Μέλη ορθογωνικής διατομής (χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση)				
1. $M_{y,exp}/M_{y,pred.}$	31	1.06	1.06	11.4%
2. $\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\acute{\epsilon}.(1\alpha)}$	31	1.09	1.085	16.6%
3. $(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / (M_y L_s / 3 \theta_y)_{E\acute{\epsilon}.(1\alpha)}$	31	0.995	1.005	18.2%
4. $\theta_{u,exp} / \theta_{u,E\acute{\epsilon}.(1\alpha),(8),(9),(12)-(14\alpha)}$	30	0.98	0.965	26.6%
5. $\theta_{u,exp} / \theta_{u,E\acute{\epsilon}.(1\alpha),(8),(10),(12)-(14\beta)}$	30	0.945	0.925	28.4%
6. $\theta_{u,exp} / \theta_{u,E\acute{\epsilon}.(1\alpha),(8),(11),(12)-(14\beta)}$	30	0.95	0.98	30.6%
Μέλη κυκλικής διατομής (χωρίς βλάβη πριν την ενίσχυση)				
7. $M_{y,exp}/M_{y,pred.}$	38	0.895	0.875	13.2%
8. $\theta_{y,exp}/\theta_{y,E\acute{\epsilon}.(1\beta)}$	36	0.975	0.94	33.35%
9. $(M_y L_s / 3 \theta_y)_{exp} / (M_y L_s / 3 \theta_y)_{E\acute{\epsilon}.(1\beta)}$	36	0.975	0.945	21.25%
10. $\theta_{u,exp} / \theta_{u,E\acute{\epsilon}.(1)-(7),(15)}$	34	1.035	1.03	34.45%

* ισχύει η υποσημείωση του Πίνακα 1

Σε μέλη κυκλικής διατομής δεν ισχύει η Εξ. (8). Η θ_u πρέπει να υπολογίζεται απ' τις Εξ. (1)-(7), όπου κατά τον υπολογισμό της ϕ_u σε μέλη με μάτιση διαμήκους οπλισμού στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης η παραμόρφωση των εφελκόμενων ράβδων στην αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση θα λαμβάνεται απ' την

παρακάτω εξίσωση (αντί $\varepsilon_{su}=3\varepsilon_{su,nom}/8$ που ισχύει για μέλη χωρίς μάτιση):

$$\varepsilon_{su,l} = \left[\frac{5}{4} \frac{l_o}{l_{ou,min}} - \frac{1}{4} \right] \varepsilon_{su} \geq \frac{l_o}{l_{oy,min}} \frac{f_y}{E_s} \quad (15)$$

Οι πειραματικές τιμές της θ_u για μέλη ενισχυμένα με μανδύα ΙΟΠ στην περιοχή της μάτισης συγκρίνονται με τις θεωρητικές στο Σχήμα 5 και στις σειρές 4-6 και 10 του Πίνακα 2.

Σ' όλα τα δοκίμια της βάσης πειραματικών δεδομένων με ενίσχυση της περιοχής μάτισης ο μανδύας ΙΟΠ εκτείνονταν σε μήκος τουλάχιστον όσο η μάτιση. Για το λόγο αυτό τα παραπάνω αποτελέσματα προτείνεται να εφαρμόζονται μόνον αν ο μανδύας ΙΟΠ καλύπτει μήκος τουλάχιστον 125% του μήκους μάτισης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παραπάνω έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το 7^ο Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Κοινότητας [FP7/2007-2013], σύμβαση υπ. αριθμ. 204697.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Μπισκίνης, Δ.Ε., “Αντοχή και Ικανότητα Παραμόρφωσης Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος, με ή χωρίς Ενίσχυση”. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, Πάτρα, 2007.
2. Biskinis, D.E. and Fardis, M.N. “Effective Stiffness, Lateral Resistance and Cyclic Deformation Capacity of Bridge Piers”, *2nd fib Congress*, Napoli, 2006.
3. Biskinis, D.E. and Fardis, M.N. “Cyclic Strength and Deformation Capacity of RC Members, Including Members Retrofitted for Earthquake Resistance”. *5th Ph.D Symposium in Civil Engineering*, Delft, Balkema, 2004, pp 1125-1133.
4. CEN “*European Standard EN 1998-3:2005. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*”, Comite Europeen de Normalisation, 2005, Brussels.
5. Lam L, Teng JG, “Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete”, *Construction and Building Materials*, 17, 6 & 7: 471-489, 2003.
6. Lam L, Teng JG, “Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns”, *Journal of Reinforcing Plastics and Composites* 22, 13: 1149-1186, 2003
7. Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N. “Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate”, *ACI Structural J.*, 98, 2, 2001, pp 135-148.