

Καμπτική Συμπεριφορά και Ικανότητα Παραμόρφωσης Μελών Ο.Σ. υπό Ανακυκλιζόμενη Εγκάρσια Φόρτιση

Flexural Behavior and Deformation Capacity of RC Members under Cyclic Lateral Loading

Σοφία ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΥ¹, Διονύσιος ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ², Μιχαήλ Ν. ΦΑΡΔΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: σεισμική αποτίμηση, σεισμικός σχεδιασμός, δυσκαμψία, μάτιση
Keywords: seismic assessment, seismic design, stiffness, lap-splice

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αναπτύσσονται εύχρηστα προσομοιώματα για την παραμόρφωση στη διαρροή, την ενεργό δυσκαμψία και την παραμόρφωση στην οριακή κατάσταση αστοχίας μελών ΟΣ με καμπτική συμπεριφορά, χρησιμοποιώντας μια βάση δεδομένων χιλιάδων πειραματικών δοκιμών. Καλύπτουν δοκούς, ορθογωνικά υποστυλώματα ή τοιχώματα, μέλη με κυκλική διατομή, T-, H-, U- ή μορφής κιβωτίου, που συμμορφώνονται ή όχι με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, με συνεχείς ράβδους ή με ματίσεις. Εμπειρικά προσομοιώματα για την παραμόρφωση αστοχίας προτείνονται, καθώς και ένα φυσικό προσομοίωμα που βασίζεται σε καμπυλότητες και ένα μήκος πλαστικής άρθρωσης.

ABSTRACT: Practical models for the deformations of flexure-controlled RC members at flexural yielding and at ultimate conditions and for their effective stiffness are developed using a database of thousands of tests. They cover beams, rectangular columns or walls, members with circular, T-, H-, U- or box section, conforming or not to seismic design codes, with continuous or lap-spliced bars. Empirical models for the ultimate deformation supplement a physical one based on curvatures and a plastic hinge length.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τον σεισμικό σχεδιασμό κατασκευών βάσει μετακινήσεων, καθώς και κατά την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών για σεισμικά φορτία, τα μέλη ελέγχονται σε κάμψη συγκρίνοντας τις απαιτήσεις σεισμικής παραμόρφωσης με την ικανότητα παραμόρφωσης σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η ικανότητα παραμόρφωσης θα πρέπει να μπορεί να υπολογισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια

¹Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: sofgram@upatras.gr

²Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Πανεπιστήμιο Πατρών / Ακαδημαϊκός Υπότροφος, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών ΤΕ, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, email: dbisk@tee.gr

³Ομότιμος Καθηγητής, Τμήμα Πολ/κών Μηχ/κών, Παν/μιο Πατρών, email: fardis@upatras.gr

για δεδομένη γεωμετρία, οπλισμό, ιδιότητες υλικών και αξονικό φορτίο. Ως μέτρο παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται συνήθως οι γωνίες στροφής χορδής στα άκρα των μελών. Η οριακή κατάσταση καμπτικής αστοχίας λαμβάνεται συμβατικά ως το σημείο όπου η πλευρική αντίσταση του μέλους πέφτει κάτω από το 80% της μέγιστης τιμής της. Η εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη σειρά εύχρηστων προσομοιωμάτων για την παραμόρφωση στη διαρροή, τη δυσκαμψία και την ικανότητα παραμόρφωσης μελών Ο.Σ. υπό ανακυκλιζόμενη εγκάρσια φόρτιση. Για την ανάπτυξη και βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων χρησιμοποιείται βάση δεδομένων με περισσότερες από 3500 πειραματικές δοκιμές μελών Ο.Σ. με διατομές ποικίλων μορφών. Το Μέρος 3 του Ευρωκώδικα 8 και ο fib Model Code 2010 έχουν υιοθετήσει προηγούμενα αντίστοιχα προσομοιώματα που βασίζονται σε μικρότερες βάσεις δεδομένων. Τα προσομοιώματα της παρούσης εργασίας καλύπτουν δοκούς, υποστυλώματα και τοιχώματα ορθογωνικής διατομής, μέλη με κυκλική, T-, H-, C- ή κοίλη ορθογωνική διατομή, που συμμορφώνονται ή όχι με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, και έχουν ράβδους από νευροχάλυβα με συνεχή οπλισμό ή με μάτιση στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης. Τα προσομοιώματα είναι επίσης επεκτάσιμα σε μέλη Ο.Σ. με περίσφιγξη από Ινοπλισμένα Πολυμερή στην περιοχή πλαστικής άρθρωσης με ή χωρίς μάτιση (δεν παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία). Μέλη με λείες ράβδους δεν καλύπτονται εδώ, καθώς απαιτούν διαφορετικό είδος προσομοίωσης. Τα προσομοιώματα που παρουσιάζονται εδώ εξυπηρετούν τις ανάγκες αναθεώρησης του μέρους 3 του Ευρωκώδικα 8 που βρίσκεται σε εξέλιξη και στην επιλογή που θα υπάρχει στο νέο μέρος 1 του Ευρωκώδικα 8 για σχεδιασμό νέων κατασκευών με βάση τις μετακινήσεις.

Πίνακας 1 Μέσος όρος, διάμεσος και συντελεστής μεταβλητότητας (cov) του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής ροπής διαρροής μελών με συνεχείς ράβδους.

Τύπος μέλους και διατομής	Πλήθος	μ.ο.*	διάμεσος*	cov, %
Ορθογωνικές δοκοί, πλακοδοκοί, ορθογωνικά υποστυλώματα	2282	1.04	1.025	16.9
Ορθογωνικά τοιχώματα	326	1.04	1.01	18.6
Διατομές T-, H-, C- ή μορφής κιβωτίου	392	1.06	1.04	16
Μέλη κυκλικής διατομής	332	1.01	1.00	13.7

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

ΜΕΛΗ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΡΑΒΔΟΥΣ: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ

Ο υπολογισμός της ροπής διαρροής, M_y , και της καμπυλότητας διαρροής, ϕ_y , γίνεται με ανάλυση της διατομής με βάση την υπόθεση επιπεδότητας διατομών. Η πειραματική τιμή της ροπής διαρροής, $M_{y,exp}$, λαμβάνεται στη γωνία διγραμμικού διαγράμματος προσαρμοσμένο στην περιβάλλουσα του πειραματικού διαγράμματος $M-\delta$, έτσι ώστε οι επιφάνειες εκατέρωθεν του διγραμμικού διαγράμματος και της περιβάλλουσας (δηλ. η ενέργεια παραμόρφωσης) να είναι

περίπου ίσες. Η τιμή της $M_{y,exp}$ είναι κατά μέσο όρο πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή που προκύπτει για διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού – στο κέντρο βάρους του – για διατομές με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη ή για διαρροή στα 3/8 του εφελκυσμένου οπλισμού για κυκλικές διατομές. Περισσότερα στοιχεία και εξισώσεις δίδονται απ’ τους Biskinis and Fardis (2010a, 2013). Στον Πίνακα 1 δίδονται ο μέσος όρος, η διάμεσος τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής της M_y . Η διάμεσος τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής διόρθωσης επί των τιμών της ϕ_y που προκύπτουν απ’ την ανάλυση διατομής.

Ως μέγεθος παραμορφώσεων χρησιμοποιείται εδώ η γωνία στροφής χορδής, θ , η οποία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής που συνδέει τα δύο άκρα του μήκους διάτμησης, L_s , του παραμορφωμένου μέλους και της εφαπτόμενης στο ένα άκρο του μέλους. Κατά την καμπτική διαρροή ενός μέλους, η συνολική γωνία στροφής χορδής, θ_y , προκύπτει απ’ το άθροισμα: (α) Καμπτικών παραμορφώσεων, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την επέκταση της διαρροής των εφελκυσμένων ράβδων απ’ την ακραία διατομή του μέλους μέχρι το σημείο όπου μία διαγώνια ρωγμή 45° συναντά το διαμήκη οπλισμό, εφόσον η διαγώνια ρωγμή προηγείται της καμπτικής διαρροής, (β) Στροφής λόγω ολίσθησης του εφελκυσμένου οπλισμού από την περιοχή αγκύρωσης, (γ) Διατμητικών παραμορφώσεων, $\theta_{shear,y}$, στο μήκος διάτμησης, L_s .

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_s + a_v z}{3} + a_{sl} \frac{\phi_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} + \theta_{shear,y} \quad (1)$$

Ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, z , ενεργοποιείται στον πρώτο όρο εάν η τέμνουσα στην καμπτική διαρροή, $V_y = M_y/L_s$, είναι μεγαλύτερη της διατμητικής αντοχής χωρίς οπλισμό διάτμησης (τότε λαμβάνεται $a_v=1$, διαφορετικά $a_v=0$). Ο δεύτερος όρος περιγράφεται αναλυτικότερα στην βιβλιογραφία (Biskinis and Fardis 2010a), μηδενίζεται δε εάν οι εφελκυσμένες ράβδοι – διαμέτρου d_{bL} και τάσεως διαρροής f_y (MPa) – δεν ολισθαίνουν από την περιοχή αγκύρωσης πέραν από την άκρη του μέλους (τότε λαμβάνεται $a_{sl}=0$, διαφορετικά $a_{sl}=1$). Ο τρίτος όρος είναι καθαρά εμπειρικός και δίνει την $\theta_{shear,y}$ ως συνάρτηση του τύπου του μέλους, του μήκους διάτμησης, L_s , και του ύψους της διατομής, h , ή της διαμέτρου μίας κυκλικής διατομής, D :

$$\text{Δοκοί και υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής: } \theta_{shear,y} = 0.0019 \left(1 + \frac{h}{1.6L_s} \right) \quad (2a)$$

$$\text{Τοιχώματα και κοίλα ορθογωνικά βάρη: } \theta_{shear,y} = 0.0011 \left(1 + \frac{h}{3L_s} \right) \quad (2b)$$

$$\text{Μέλη κυκλικής διατομής: } \theta_{shear,y} = 0.0025 \left(1 - \max \left(1; \frac{L_s}{8D} \right) \right) \quad (2c)$$

Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα στατιστικά μεγέθη του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή. Φαίνεται επίσης ότι το

προγενέστερο προσομοίωμα Biskinis and Fardis 2010a, CEN 2005 υπερεκτιμά την τιμή της θ_y στην τρέχουσα βάση δεδομένων, ενώ το προσομοίωμα Panagiotakos and Fardis 2001 την υποεκτιμά.

Πίνακας 2 Μέσος όρος, διάμεσος και συντ. μεταβλητότητας του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή - Μέλη με συνεχείς ράβδους.

Τύπος μέλους/διατομής	Πλήθος	Εξ.(1), (2)			Biskinis-Fardis			Panagiotakos-Fardis		
		μ.ο.*	διάμεσος	con %	μ.ο.*	διάμεσος	con %	μ.ο.*	διάμεσος	con %
Δοκοί & υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής	1841	1.05	1.00	33.4	1.07	1.02	33.2	1.01	0.95	36.1
Ορθογωνικά τοιχώματα	291	1.04	0.995	35.6	1.08	1.04	37.0	1.07	1.01	37.4
Διατομές T-, H-, C- & μορφής κιβωτίου	305	1.05	1.02	29.3	1.09	1.05	31.3	1.07	1.03	31.7
Μέλη κυκλικής διατομής	316	1.035	1.00	31	1.04	1.00	31.1	-	-	-

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

Πίνακας 3 Μέσος όρος, διάμεσος και συντ. μεταβλητότητας (con) του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής ενεργού δυσκαμψίας - Μέλη με συνεχείς ράβδους.

Τύπος μέλους/διατομής	Πλήθος	Εξ.(1),(2),(3)			Biskinis-Fardis			Panagiotakos-Fardis		
		μ.ο.*	διάμεσος	con %	μ.ο.*	διάμεσος	con %	μ.ο.*	διάμεσος	con %
Δοκοί & υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής	1804	1.06	1.01	37.1	1.04	0.99	32.7	1.11	1.06	34.8
Ορθογωνικά τοιχώματα	291	1.10	1.00	43.9	1.08	0.98	45.4	1.10	0.98	48.5
Διατομές T-, H-, C- & μορφής κιβωτίου	305	1.05	0.97	35.9	1.01	0.93	37.8	1.05	0.95	39.6
Μέλη κυκλικής διατομής	298	1.04	1.00	31.1	1.05	0.98	30.6	-	-	-

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

Ενεργός δυσκαμψία

Η ενεργός δυσκαμψία μπορεί να λαμβάνεται ως η επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή (Panagiotakos and Fardis 2001, Biskinis and Fardis 2010a, CEN 2005):

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_s}{\theta_y 3} \quad (3)$$

Χρησιμοποιώντας τις πειραματικές ή τις θεωρητικές τιμές της ροπής διαρροής και της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή για κάθε δοκίμιο της βάσης δεδομένων, υπολογίζεται η πειραματική ή η θεωρητική ενεργός δυσκαμψία αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3 δίδονται τα στατιστικά μεγέθη του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής σύμφωνα με την παρούσα εργασία και σύμφωνα με παλαιότερα προσομοίωμα (Biskinis and Fardis 2010a, Panagiotakos and Fardis 2001).

ΜΕΛΗ ΜΕ ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΡΑΒΔΟΥΣ: ΓΩΝΙΑ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑ

Φυσικό προσομοίωμα με τη χρήση καμπυλοτήτων και μήκους πλαστικής άρθρωσης

Σε ένα φυσικό προσομοίωμα της μετελαστικής απόκρισης υπό κάμψη ενός μέλους με συνεχείς ράβδους με νευρώσεις οι ανελαστικές καμπτικές παραμορφώσεις θεωρείται ότι συγκεντρώνονται σε ένα μήκος πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} , που μετράται από το άκρο που έχει διαρρεύσει. Το υπόλοιπο του μήκους διάτμησης, L_s , θεωρείται ότι βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Το ανελαστικό τμήμα της καμπυλότητας, $(\phi - \phi_y)$, λαμβάνεται σταθερό εντός του μήκους της πλαστικής άρθρωσης και μηδενικό εκτός αυτού. Μετά τη διαρροή του μέλους αναπτύσσεται επίσης μία μετελαστική στροφή λόγω ολίσθησης των ράβδων από τη ζώνη αγκύρωσης, $\Delta\theta_{slip}$, επιπλέον της αντίστοιχης στροφής στη διαρροή, $\theta_{y,slip}$, λόγω διεύθυνσης των ανελαστικών παραμορφώσεων των εφελκόμενων ράβδων εντός της ζώνης αγκύρωσης. Η μέγιστη γωνία στροφής χορδής του μήκους διάτμησης στην αστοχία, θ_u , όπως επίσης η καμπυλότητα αστοχίας της ακραίας διατομής, ϕ_u , θεωρείται ότι σημειώνονται στο σημείο όπου η αντοχή του μέλους σε εγκάρσιες δυνάμεις έχει μειωθεί κατ' ελάχιστων στο 80% της μέγιστης αντοχής του. Στο σημείο αυτό η $\Delta\theta_{slip}$ λαμβάνει την μέγιστη τιμή της ίση με $\Delta\theta_{u,slip}$. Με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις η γωνία στροφής χορδής στην καμπτική αστοχία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_u = \theta_y + (\phi_u - \phi_y)L_{pl}\left(1 - \frac{L_{pl}}{2L_s}\right) + a_{sl}\Delta\theta_{u,slip} \quad (4)$$

Οι Grammatikou et al (2016) δημοσίευσαν μία διαδικασία υπολογισμού της καμπυλότητας αστοχίας, ϕ_u , όπου λαμβάνονται υπόψη όλες οι περιπτώσεις αστοχίας μίας καμπτόμενης διατομής. Δημοσίευσαν επίσης εξισώσεις για τον υπολογισμό των οριακών ανηγμένων παραμορφώσεων του εφελκόμενου οπλισμού και του θλιβόμενου σκυροδέματος (περισφιγμένου ή απερίσφιγκτου) που προτίνεται να χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της ϕ_u . Οι εξισώσεις αυτές έχουν αναπτυχθεί με την βοήθεια βάσης δεδομένων που περιλαμβάνει περισσότερες από 450 πειραματικές μετρήσεις της καμπυλότητας αστοχίας εντός της περιοχής πλαστικής άρθρωσης. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις αυτές άλλοτε περιλαμβάνουν την ολίσθηση των ράβδων απ' την αγκύρωσή τους και άλλοτε όχι, έχουν αξιοποιηθεί επίσης για την ανάπτυξη εξισώσεων για την μετελαστική στροφή λόγω ολίσθησης των ράβδων από τη ζώνη αγκύρωσης. Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι (Grammatikou et al 2016):

$$\Delta\theta_{u,slip} = 4.5d_b\phi_u, \quad \text{ή} \quad \Delta\theta_{u,slip} = 4.25d_b(\phi_u + \phi_y) \quad (5)$$

όπου η καμπυλότητα διαρροής, ϕ_y υπολογίζεται σύμφωνα με όσα αναφέρονται παραπάνω. Υπολογίζοντας τα μεγέθη ϕ_y , θ_y , ϕ_u και $\Delta\theta_{u,slip}$, σύμφωνα με τα

παραπάνω, για τα δοκίμια της βάσης πειραματικών δεδομένων, αναπτύχθηκαν εξισώσεις για τον υπολογισμό του μήκους πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} , ώστε το αποτέλεσμα της Εξ.(4) να συγκλίνει κατά το δυνατόν περισσότερο με τις πειραματικές τιμές της θ_u . Για μέλη που συμμορφώνονται με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς:

- Για μέλη υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με διατομή αποτελούμενη από ορθογωνικά τμήματα, με κορμούς συνολικού πλάτους b_w και ύψος διατομής h :

$$L_{pl} = \left(1 + 0.4 \min\left(9; \frac{L_s}{h}\right)\right) \left(1 - \frac{1}{3} \sqrt{\min\left(2.5; \max\left(0.05; \frac{b_w}{h}\right)\right)}\right) (1 - 0.45 \min(0.7; \nu))(0.3h) \quad (6a)$$

- Για μέλη κυκλικής διατομής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση:

$$L_{pl} = (1 - \min(0.7; \nu)) \left(1 + \frac{1}{7} \min\left(9; \frac{L_s}{h}\right)\right) (0.7D) \quad (6b)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις $\nu = N/A_c f_c$ είναι το ανηγμένο αξονικό φορτίο (A_c εμβαδόν διατομής, N αξονική δύναμη, θετική για θλίψη).

Πίνακας 4 Φυσικό προσομοίωμα υπολογισμού γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία – Μέσος όρος, διάμεσος και συντ. μεταβλητότητας (cov) του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής – Μέλη με συνεχείς ράβδους που συμμορφώνονται με τους αντισεισμικούς κανονισμούς, εκτός και αν σημειώνεται διαφορετικά.

Τύπος μέλους/διατομής	Πλήθος	Εξ. (1)-(7)		Biskinis Fardis		Eurocode 8-3, option 1		Eurocode 8-3, option 2	
		διάμεσος	cov %	διάμεσος	cov %	διάμεσος	cov %	διάμεσος	cov %
Όλα εκτός απ' τα κυκλικά	1198	1.00	45.1	1.01	44.7	0.59	62.6	0.95	53.2
Ορθογωνικά τοιχώματα	144	1.09	50.1	1.15	52.1	1.10	46.2	1.48	43.3
Μη ορθογ. τοιχώματα & κοίλες ορθ. διατομές	67	0.90	44.1	1.06	39.2	0.73	52.7	1.10	48.5
Κυκλική διατομή	157	1.00	34.8	1.03	30.6	-	-	-	-
Μη-συμμορφούμενα ορθογωνικά υπ/ματα	47	1.00	34.6	-	-	-	-	-	-

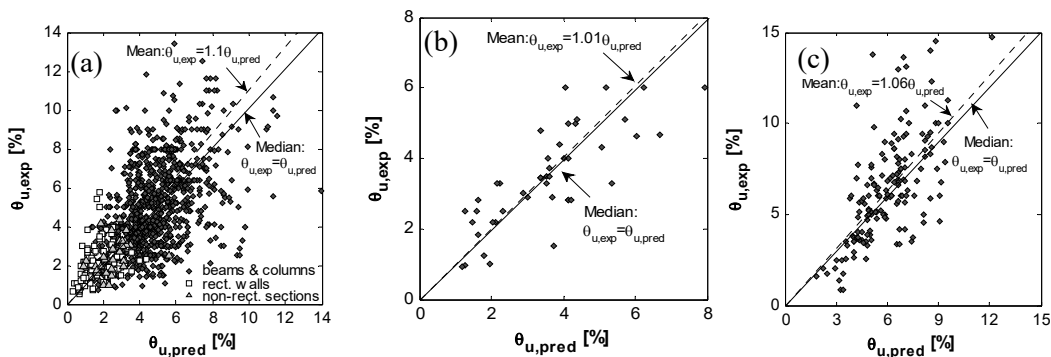
*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

Η βάση πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει επίσης 47 δοκίμια με καμπτική αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση τα οποία δεν συμμορφώνονται με τους αντισεισμικούς κανονισμούς (πχ. έχουν αραιούς συνδετήρες χωρίς άγκυτρο 135°). Ο αριθμός των δοκιμίων είναι μικρός για να υποστηρίξει την ανάπτυξη ξεχωριστών κριτηρίων οριακής ανηγμένης παραμόρφωσης για τον υπολογισμό της φ_u . Δεδομένης δε της μειωμένης περίσφιγξης που παρέχουν μέλη αυτού του τύπου, οι τιμές της φ_u είναι σαφώς μικρότερες απ' αυτές που προκύπτουν για μέλη που συμμορφώνονται με τους αντισεισμικούς κανονισμούς. Προτείνεται η χρήση των ίδιων εξισώσεων για τον υπολογισμό της φ_u , και διόρθωση επί του

μήκους πλαστικής άρθρωσης η οποία δίνει σύγκλιση με τις πειραματικές:

$$L_{pl,nc}=1.3L_{pl,Eξ.(6)} \quad (7)$$

Στο Σχήμα 1 γίνεται σύγκριση των πειραματικών με τις θεωρητικές τιμές της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, σύμφωνα με το παραπάνω προσομοίωμα. Η σύγκριση αφορά μέλη με συνεχείς ράβδους υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο Πίνακα 4 δίδονται τα στατιστικά μεγέθη του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής σύμφωνα με την παρούσα εργασία, σύμφωνα με προγενέστερο προσομοίωμα της ίδιας ερευνητικής ομάδας (Biskinis and Fardis 2010b), σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 (CEN 2005) σε συνδυασμό με το προσομοίωμα περίσφιγξης του Ευρωκώδικα 2 (option 1) και σε συνδυασμό με το προσομοίωμα περίσφιγξης του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 (option 2).



Σχήμα 1. Γωνία στροφής χορδής στην αστοχία για μέλη με συνεχείς ράβδους: Σύγκριση πειραματικών τιμών και θεωρητικών απ' τις Εξ.(1)-(7), (α) συμμορφούμενα μέλη με μη-κυκλική διατομή, (β) μη-συμμορφούμενα μέλη με μη-κυκλική διατομή, (γ) συμμορφούμενα μέλη κυκλικής διατομής.

Εμπειρικά προσομοιώματα για μέλη με διατομή αποτελούμενη από ορθογωνικά τμήματα

Η βάση δεδομένων με τις καταγραφές των πειραματικών τιμών της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, θ_u , αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη εμπειρικών προσομοιωμάτων, επί τη βάσει προγενέστερων προσομοιωμάτων της ίδιας ερευνητικής ομάδας (Panagiotakos and Fardis 2001, Biskinis and Fardis 2010b). Οι Grammatikou et al (2017a), (2017b) δημοσίευσαν εναλλακτικά εμπειρικά προσομοιώματα, προσαρμοσμένα στα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας διάφορες στατιστικές μεθόδους. Τα προσομοιώματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε μέλη με διατομή αποτελούμενη από ορθογωνικά τμήματα με μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση, δεν βρίσκουν εφαρμογή σε κυκλικές διατομές για τις οποίες το προσομοίωμα των Εξ.(1)-(7) δίνει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο εμπειρικά προσομοιώματα, ένα που πλεονεκτεί - ελαφρώς - σε ακρίβεια αποτελεσμάτων, Εξ.(8a), και ένα που πλεονεκτεί σε ευχρηστία, Εξ.(8b).

$$\theta_u = \theta_y + a_{sl}\Delta\theta_{u,slip} + \theta_u^{pl} = \theta_y + a_{sl}\Delta\theta_{u,slip} + 0.0183(1-0.45a_{st})(1-0.08a_{nc})(1-0.42a_{cy}) \left[\min\left(9; \frac{L_s}{h}\right) \right]^{0.4} \cdot \quad (8a)$$

$$0.225^{\min(0.7;v)} [\min(50; f_c (MPa))]^{0.2} \left(1 - 0.048 \max\left(4; \min\left(8; \frac{h}{b_w}\right)\right) \right) \left[\frac{\max(0.01; \omega_2)}{\max(0.01; \omega_{tot} - \omega_2)} \right]^{0.175} 8.5 \left(\frac{a\rho_s f_{yw}}{f_c} \right) 1.565^{100\rho_d}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_u^{pl} = \theta_y + 0.0242(1-0.45a_{st})(1-0.22a_{nc})(1-0.5a_{cy})(1+0.7a_{sl}) \cdot \quad (8b)$$

$$(1-0.41a_{w,r})(1-0.31a_{nr}) (0.2)^v \left[\frac{\max(0.01; \omega_2)}{\max(0.01; \omega_{tot} - \omega_2)} \right]^{0.25} f_c^{0.1} \left[\min\left(9; \frac{L_s}{h}\right) \right]^{0.35} 24 \left(\frac{a\rho_s f_{yw}}{f_c} \right) 1.225^{100\rho_d}$$

Οι νέες μεταβλητές που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις, είναι:

a_{st} : για πλάστιμο χάλυβα (πχ τύπου tempcore) είναι $a_{st}=0$, για ψυχρής κατεργασίας χάλυβα είναι $a_{st}=1$.

a_{nc} : για λεπτομέρειες όπλισης για αντισεισμικότητα $a_{nc}=0$, διαφορετικά $a_{nc}=1$.

a_{cy} : για μονοτονική φόρτιση $a_{cy}=0$, για ανακυκλιζόμενη $a_{cy}=1$.

$a_{w,r}$: για ορθογωνικά τοιχώματα $a_{w,r}=1$, για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις $a_{w,r}=0$

a_{nr} : για διατομή σχήματος T-, Π- ή κοίλη ορθογωνική $a_{nr}=1$, για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις $a_{w,r}=0$.

$v=N/bhf_c$: ανηγμένο αξονικό φορτίο, με b το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και N το αξονικό φορτίο, θετικό για θλίψη.

$\omega_{tot}=\Sigma\rho f_y/f_c$, $\omega_2=\rho_2 f_{y2}/f_c$: μηχανικό ποσοστό οπλισμού του συνόλου των διαμήκων ράβδων και μόνο των θλιβόμενων ράβδων, αντίστοιχα.

ρ_d : ποσοστό δισδιαγώνιου οπλισμού (εάν υπάρχει) σε κάθε διαγώνια διεύθυνση του μέλους σε όψη.

b_w : πλάτος ενός κορμού (ακόμα και στις κοίλες διατομές με περισσότερους από έναν παράλληλους κορμούς).

f_{yw} και $\rho_s=A_{sh}/b_w s_h$: τάση διαρροής και ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης.

a : συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης, σύμφωνα με τους Sheikh and Uzumeri (1982):

$$a = (1 - 0.5s_h / b_o)(1 - 0.5s_h / h_o)(1 - \sum b_i^2 / (6b_o h_o)) \quad (9)$$

όπου s_h η αξονική απόσταση μεταξύ των συνδετήρων, b_o , h_o οι διαστάσεις περισφιγμένου πυρήνα, οι οποίες ορίζονται ως προς τον άξονα του περιμετρικού συνδετήρα, b_i η απόσταση μεταξύ των κέντρων των γειτονικών ράβδων (δείκτης: i) που συγκρατούνται από τη γωνία ενός συνδετήρα ή από άγκιστρο.

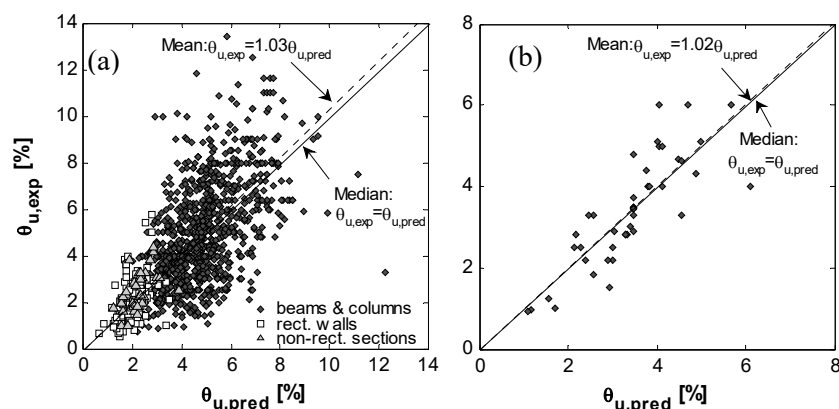
Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο εξισώσεων είναι η ύπαρξη του όρου $\Delta\theta_{u,slip}$ στην Εξ.(8a) για τον υπολογισμό της στροφής λόγω ολίσθησης των εφελκόμενων ράβδων απ' την περιοχή αγκύρωσης, ενώ στην Εξ.(8b) υπάρχει αντίστοιχα ο όρος $(1+0.7a_{sl})$ ο οποίος λαμβάνει συγκεκριμένες, διακριτές, τιμές ανάλογα με την ύπαρξη ολίσθησης ($a_{sl}=1$) ή μη ($a_{sl}=0$) απ' την αγκύρωση. Ο όρος $\Delta\theta_{u,slip}$ της Εξ.(8a) υπολογίζεται απ' την Εξ.(5), όπως για το φυσικό προσομοίωμα, εισάγοντας με ορθολογικότερο τρόπο την στροφή λόγω ολίσθησης, περιπλέκει όμως τη διαδικασία υπολογισμού της θ_u καθώς προϋποθέτει τον υπολογισμό της

καμπυλότητας στην αστοχία, ϕ_u . Υπό αυτή την έννοια η Εξ.(8b) είναι πρακτικότερη στην χρήση της, χωρίς να στερείται σημαντικά σε ακρίβεια όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 ο οποίος δίνει τα στατιστικά μεγέθη του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία σύμφωνα με τις Εξ.(8a)&(8b) και σύμφωνα με το προγενέστερο εμπειρικό προσομοίωμα Biskinis and Fardis (2010b). Στο Σχήμα 2 φαίνεται η σύγκριση των πειραματικών τιμών της θ_u με τις θεωρητικές, ενδεικτικά χρησιμοποιώντας την Εξ.(8a) (η εικόνα είναι παρόμοια εάν χρησιμοποιηθεί η Εξ.(8b)).

Πίνακας 5 Μέσος όρος, διάμεσος και συντ. μεταβλητότητας (cov) του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής ενεργού δυσκαμψίας - Μέλη με συνεχείς ράβδους.

Τύπος μέλους/διατομής	Πλήθος	Εξ.(8a)			Εξ.(8b)			Biskinis Fardis		
		μ.ο.*	διάμεσος	cov %	μ.ο.*	διάμεσος	cov %	μ.ο.*	διάμεσος	cov %
Όλα τα δοκίμια	1198	1.03	1.00	36.6	1.03	1.00	37.9	1.03	0.985	38.7
Ορθογ. τοιχώματα	144	1.07	1.00	37.2	1.07	1.00	41.6	1.14	1.05	45.0
Μη ορθογ. τοιχώματα & κοίλες ορθ. διατομές	67	1.10	1.05	29.3	1.10	1.05	31.8	0.92	0.90	32.6
Μη-συμμορφούμενα ορθογωνικά υπ/ματα	47	1.02	1.00	29.0	1.02	1.00	32.6	1.03	1.01	31.7

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.



Σχήμα 2. Γωνία στροφής χορδής στην αστοχία για μέλη με διατομή αποτελούμενη από ορθογωνικά τμήματα και συνεχείς ράβδους: Σύγκριση πειραματικών τιμών και θεωρητικών απ' την Εξ.(8a): (α) συμμορφούμενα μέλη, (β) μη-συμμορφούμενα μέλη.

ΜΕΛΗ ΜΕ ΜΑΤΙΣΗ ΡΑΒΔΩΝ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Ο Ευρωκώδικας 8-3 περιλαμβάνει διατάξεις για μέλη με μάτιση ράβδων διαμήκους οπλισμού από νευρογάλυβα, οι οποίες έχουν δημοσιευθεί απ' τους Biskinis and Fardis (2010a, 2010b) επί τη βάσει μελών ορθογωνικής διατομής. Οι Biskinis and Fardis (2013) πρότειναν αντίστοιχες διατάξεις για μέλη κυκλικής διατομής. Οι διατάξεις αυτές επανεξετάζονται στην παρούσα εργασία ώστε να

προκύψουν ενιαίοι κανόνες και για τους δύο τύπους διατομών.

Κανόνας 1: Και οι δύο ράβδοι σε ένα ζεύγος ματισμένων θλιβόμενων ράβδων λαμβάνονται ως θλιβόμενος οπλισμός.

Κανόνας 2: Στην ανάλυση διατομής για τον υπολογισμό της M_y και φ_y , η μέγιστη τάση, f_{sm} , που μπορεί να αναπτυχθεί σε εφελκόμενες ράβδους με μήκος μάτισης, l_o , είναι:

$$f_{sm} = \min\left(\sqrt{\frac{l_o}{l_{oy,min}}}; 1\right) f_y \quad (10)$$

$$l_{oy,min} = \frac{d_b f_y}{4 f_{ct} \max\left(\frac{c_{min}}{d_b}; 0.7\right)} \quad (11)$$

όπου:

c_{min} : ελάχιστη επικάλυψη σκυροδέματος των ενωμένων με παράθεση ράβδων, διαμέτρου d_b , ή η μισή καθαρή απόσταση από την πλησιέστερη ενωμένη με παράθεση ράβδο, όποια από τις δύο είναι μικρότερη.

f_{ct} : εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος, ίση με $f_{ct} = 0.3(f_c)^{2/3}$ (f_{ct} και f_c σε MPa).

Κανόνας 3: Στην Εξ.(1) για τον υπολογισμό της θ_y :

- Χρησιμοποιείται η τιμή της φ_y από τους Κανόνες 1 και 2.
- Ο τρίτος όρος πολλαπλασιάζεται με το λόγο της M_y , όπως τροποποιήθηκε σύμφωνα με τους Κανόνες 1 και 2 για τη μάτιση, προς την τιμή της M_y εκτός του μήκους μάτισης.
- Για να καθοριστεί εάν $a_V = 1$ στον πρώτο όρο, η ροπή αντοχής για διαγώνια ρηγμάτωση χωρίς οπλισμό διάτμησης, $L_s V_{Rc}$, συγκρίνεται με την τιμή της M_y που λαμβάνει υπόψη τη μάτιση μέσω των Κανόνων 1 και 2.

Κανόνας 4: Η τιμή του μήκους μάτισης, $l_{ou,min}$, πέραν της οποίας η θ_u δεν μειώνεται λόγω της μάτισης, είναι:

$$l_{ou,min} = \frac{d_b f_y}{f_{ct} \left(1 + 7.5 a_n a_s \sqrt{\frac{d_b}{2 R_c}} \min\left(3; \frac{p_c}{f_{ct}}\right) \left(1 - \frac{1}{6} \min\left(3; \frac{p_c}{f_{ct}}\right) \right) \right)} \quad (12)$$

όπου:

a_n : συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης εντός της διατομής, ίσος με 1 για κυκλική διατομή και n_{restr}/n_{tot} για ορθογωνική, με n_{restr} τον αριθμό των ράβδων με μάτιση οι οποίες συγκρατούνται από γωνία συνδετήρα ή άγκιστρο και n_{tot} ο συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων με μάτιση.

a_s : συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης καθ' ύψος του μέλους, ίσος με το γινόμενο των δύο πρώτων όρων της Εξ.(9), με τις διαστάσεις ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του ορθογωνικού περιμετρικού συνδετήρα, b_o , h_o , να αντικαθίστανται από τη διάμετρο του κυκλικού συνδετήρα, D_o , για υποστυλώματα κυκλικής διατομής.

R_c : ακτίνα κάμψης του μεταλλικού συνδετήρα που περιβάλλει το ζεύγος ράβδων που έχουν ενωθεί με παράθεση.

$p_c = A_{sh}f_{yw}/(s_H R_c)$: τάση περίσφιγξης που ασκείται στη μάτιση. Σημειώνεται ότι η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης μειώνεται καθώς το p_c/f_{ct} αυξάνεται μέχρι το γινόμενο των δύο τελευταίων όρων να φτάσει την τιμή 1.5.

Εάν το μήκος $l_{ou,min}$ είναι μεγαλύτερο του μήκους μάτισης, l_o , η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία μειώνεται ως εξής:

- Οι θ_y και φ_y ορίζονται σύμφωνα με τους Κανόνες 1 έως 3.
- Η θ_u μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις Εξ.(1)-(7) όπου η καμπυλότητα αστοχίας, φ_u , υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον Κανόνα 1 για τις ενωμένες με παράθεση θλιβόμενες ράβδους και μειώνοντας τη μέγιστη παραμόρφωση των ακραίων εφελκυσόμενων ράβδων ως ακολούθως:

$$\varepsilon_{su,laps} = \min\left(1; \frac{l_o}{l_{ou,min}}\right) \varepsilon_{su} \geq \min\left(1; \frac{l_o}{l_{oy,min}}\right) \frac{f_y}{E_s} \quad (13)$$

όπου η ε_{su} υπολογίζεται σύμφωνα με τους Grammatikou et al (2016).

Πίνακας 6 Μέσος όρος, διάμεσος και συντ. μεταβλητότητας (con) του λόγου πειραματικής προς θεωρητικής τιμής - Μέλη με μάτιση.

Εξεταζόμενο μέγεθος και τύπος μέλους/διατομής	Παρούσα εργασία				Biskinis-Fardis		
	Πλήθος	μ.ο.*	διάμεσος	con %	μ.ο.*	διάμεσος	con %
$M_{y,exp}/M_{y,pred}$ ορθογωνικά υπ/ματα, & τοιχώματα, κοίλα βάρθρα	123	0.98	0.98	13.4	1.00	0.98	12.2
$M_{v,exp}/M_{v,pred}$ κυκλικά υπ/ματα	42	1.00	1.00	14.2	0.99	1.00	15.2
$\theta_{y,exp}/\theta_{y,pred}$ ορθογωνικά υπ/ματα, & τοιχώματα, κοίλα βάρθρα	101	1.01	1.01	22.4	1.08	1.07	20.3
$\theta_{v,exp}/\theta_{v,pred}$ κυκλικά υπ/ματα	42	1.02	1.04	20.7	1.01	0.98	21.9
$EI_{eff,exp}/EI_{eff,pred}$ ορθογωνικά υπ/ματα, & τοιχώματα, κοίλα βάρθρα	101	1.01	1.00	23.8	0.97	0.92	24.5
$EI_{eff,exp}/EI_{eff,pred}$ κυκλικά υπ/ματα	42	1.01	0.97	23.2	1.02	0.99	22.5
$\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ μη-κυκλικά, φυσικό προσομοίωμα	102	1.06	0.98	42.7	1.04	1.04	36.9
$\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ κυκλικά, φυσικό προσομοίωμα	37	1.08	1.00	30.4	1.06	0.97	38.5
$\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ μη-κυκλικά δοκίμια, Εξ.(8a)	102	1.09	1.02	48.1	-	-	-
$\theta_{u,exp}/\theta_{u,pred}$ μη-κυκλικά δοκίμια, Εξ.(8b)	102	1.08	1.01	45.3	1.09	1.11	38.5

*Σε μεγάλα δείγματα, η διάμεσος είναι αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τάσης από τον μέσο όρο.

Όταν γίνεται χρήση των Εξ. (8a) ή (8b) για τον υπολογισμό της θ_u σε μέλη με διατομή αποτελούμενη από ορθογωνικά τμήματα, θα πρέπει να λαμβάνεται επιρροή της μάτισης στον υπολογισμό του πλαστικού μέρους της θ_u , ως εξής:

$$\theta_{u,laps}^{pl} = \min\left(1.4 \sqrt{\frac{l_o}{l_{ou,min}}} - 0.4; 1\right) \theta_{u,E\xi}^{pl} \quad (14)$$

Οι θεωρητικές τιμές που προκύπτουν σύμφωνα με τους παραπάνω κανόνες, καθώς και με τα προγενέστερα προσομοιώματα Biskinis and Fardis (2010a, 2010b, 2013), συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές στον Πίνακα 6.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και από εθνικούς πόρους, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ERC-12: PRESCIENT “Κατασκευές από σκυρόδεμα ανθεκτικές σε ακραίες φυσικές και ανθρωπογενείς απειλές” στο πλαίσιο της δράσης “Χρηματοδότηση προτάσεων που αξιολογήθηκαν θετικά στην 5η προκήρυξη των "ERC Grant Schemes”.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2010a) Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concrete*, 11(3), 127-138.
- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2010b) Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars. *Struct. Concrete*, 11(2), 93-108.
- Biskinis, D. and Fardis, M.N. (2013) Stiffness and cyclic deformation capacity of circular RC columns with or without lap-splices and FRP wrapping *Bull. Earthq Eng.* 11(5) 1447-1466
- CEN (2005) *European Standard EN 1998-3:2005: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Assessment and retrofitting of buildings.* CEN, Brussels.
- fib** (2012) *Model Code 2010.* Bulletin 65/66, Federation Internationale du Beton, Lausanne
- Grammatikou, S., Biskinis, D. and Fardis M.N. (2016) Ultimate strain criteria for RC members in monotonic or cyclic flexure. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 142(9)
- Grammatikou, S., Biskinis, D., Fardis, M.N. (2017a) Flexural rotation capacity models fitted to test results using different statistical approaches *Struct. Concr.* doi:10.1002/suco.201600238
- Grammatikou, S., Biskinis, D. and Fardis M.N. (2017b) Effective stiffness and ultimate deformation of flexure-controlled RC members, including the effects of load cycling, FRP jackets and lap-splicing of longitudinal bars. *ASCE, J. Struct. Eng.* (tentatively accepted).
- Panagiotakos, T.B. and Fardis, M.N. (2001) Deformations of RC members at yielding and ultimate. *ACI Struct. J.* 98(2): 135-148
- Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M. (1982) Analytical model for concrete confinement in tied columns. *ASCE, J. Struct. Eng.*, 108(12), 2703-2722.