

Βαθμονόμηση αποτελεσματικότητας τεχνικών ενίσχυσης υποστρωμάτων ωπλισμένου σκυροδέματος αναβαθμισμένων με σύνθετα υλικά

Αλεξάνδρα Ν. Κιζιρίδου

BSc, MEng Civil Engineer, alexkizi92@gmail.com

Δήμητρα Β. Αχιλλοπούλου

Dr, MSc. Civil Engineer, dimiachi@civil.duth.gr

Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης

Professor, Dr, Civil Engineer, karabin@civil.duth.gr

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια αποδείχθηκε ότι τα σύνθετα υλικά παίζουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών, ιδίως υπό το πρίσμα των σύγχρονων κανονισμών. Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί λαμβάνοντας υπόψη το είδος του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται (GFRP, CFRP), τον τύπο του προστιθέμενου στοιχείου (ύφασμα, NSM ράβδοι, ελάσματα, TRM) και πάνω απ' όλα την αποτελεσματικότητά του στην απόκριση του αναβαθμισμένου δομικού στοιχείου από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

Παρόλο που οι σύγχρονοι κανονισμοί διεθνώς έχουν ενσωματώσει διάφορες αναλυτικές και ημιεμπειρικές σχέσεις με σκοπό τον ασφαλή σχεδιασμό, υπάρχει μια έλλειψη οδηγιών σχετικά με το ποιο σύστημα είναι το πιο κατάλληλο για κάθε διαφορετική περίπτωση. Στην πραγματικότητα, πολλά πρότυπα και κανονισμοί περιορίζονται στην περιγραφή των τεχνικών και των αποκρίσεων, χωρίς να περιγράφουν αναλυτικά τους τρόπους αστοχίας κάθε συστήματος ενίσχυσης.

Προηγούμενες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη διερεύνηση των διαφόρων μεταβλητών που επηρεάζουν τη συνολική απόκριση των δομικών στοιχείων, όπως η περίσφιγξη, η καμπτική και στρεπτική απόκριση, η αντοχή σε αξονική θλιπτική φόρτιση, το σχήμα της διατομής, το είδος της φόρτισης, την ύπαρξη ματίσεων, τα φαινόμενα λυγισμού των ράβδων, τη συνεισφορά άλλων δομικών στοιχείων κλπ (Karabinis 2002, Rousakis *et al.* 2007, Karayannis and Sirkelis 2008, Chalioris 2008).

Η προσέγγιση της παρούσας έρευνας στοχεύει κυρίως στη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της κάθε συστήματος ενίσχυσης. Η βαθύτερη κατανόηση της κάθε μορφής αστοχίας και της απόκλισης που παρουσιάζουν από τις προβλέψεις των κανονισμών αποτελεί το βασικό στοιχείο του ασφαλούς σχεδιασμού. Για αυτό το λόγο, συντάχθηκε βάση δεδομένων με τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών (Wu *et al.* 2008, Bournas *et al.* 2009, Sarafaz and Danesh 2010, Realfonzo and Napoli 2009, 2012, Sadone *et al.* 2012). Τα υπό ενίσχυση με σύνθετα υλικά υποστρώματα είναι κλίμακας 1:1, υποβάλλονται σε οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση με σταθερό αξονικό φορτίο.

Επιπλέον, οι προβλέψεις των κανονισμών σχεδιασμού (EN 1998-3 2005, CNR 2004, *fib*-Bulletin No. 56 2010) αξιολογήθηκαν με στατιστικά εργαλεία (R^2 , $RMSE$) ως προς την πλαστιμότητα μετατοπίσεων.

Πειραματικά αποτελέσματα

Βάση δεδομένων

Από την επιστημονική βιβλιογραφία (Wu *et al.* 2008, Bournas *et al.* 2009, Sarafaz and Danesh 2010, Realfonzo and Napoli 2009, 2012, Sadone *et al.* 2012) δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων που περιέχει τα αποτελέσματα 55 πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε τετραγωνικά και ορθογωνικά, κλίμακας 1:1 στοιχεία, τα οποία υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπό σταθερό αξονικό φορτίο. Από αυτά, 42 υποστυλώματα ήταν ενισχυμένα με σύνθετα υλικά: 33 ενισχύθηκαν με CFRP, 2 με GFRP, 2 με NSM, 1 με εγκάρσια ενσωματωμένες ράβδους GFRP τοποθετημένες στη μέση κάθε πλευράς του στοιχείου, 3 με ινόπλεγμα άνθρακα (TRM C) και 1 με ινόπλεγμα υάλου (TRM G). Μερικά από τα δοκίμια με ύφασμα CFRP σχεδιάστηκαν με επιπλέον ενίσχυση: 2 με NSM ράβδους, 2 με εγκάρσια ενσωματωμένες ράβδους GFRP και 1 με CFRP ελάσματα. Τα υποστυλώματα είχαν σχεδιαστεί είτε με λείο (18 δοκίμια), είτε με νευρώσεις (37 δοκίμια) διαμήκη σπλισμό. Επιπλέον, 38 από τα υποστυλώματα σχεδιάστηκαν με ματίσεις. (Achilloroulou *et al.* 2016)

Κανονισμοί

Εφαρμόστηκαν οι διατάξεις τριών κανονισμών σχεδιασμού (EN 1998-3 2005, CNR 2004, *fib*-Bulletin No. 56 2010) για τα δοκίμια που περιέχονται στη βάση. Η αξιολόγηση των προβλέψεων των κανονισμών έγινε με κριτήριο την πλαστιμότητα μετατοπίσεων που αναπτύχθηκε σε κάθε σύστημα ενίσχυσης.

Για κάθε κανονισμό η πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ_δ θεωρήθηκε ίση με την πλαστιμότητα στροφών, η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mu_\delta = \mu_\theta = \left(\frac{\theta_u}{\theta_y} \right) \quad (1)$$

όπου θ_u είναι η στροφή χορδής κατά την αστοχία και θ_y είναι η στροφή χορδής κατά τη διαρροή.

Η στροφή χορδής αστοχίας για τον EN 1998-3 (EN 1998-3 2005) υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις της παραγράφου §A.3.2.2 και η στροφή χορδής διαρροής σύμφωνα με τις εξισώσεις της §A.3.2.4.

Αντίστοιχα, οι θ_u και θ_y υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.54) και (4.55) στην §4.7.3.1.2 για τον Ιταλικό κανονισμό σχεδιασμού CNR (CNR 2004).

Όσο για τις χορδές στροφών σύμφωνα με διατάξεις του *fib*-Bulletin (*fib*-Bulletin No. 56 2010), η θ_u υπολογίζεται από τις εξισώσεις (7.4-40) στην §7.4.3.4 και θ_y από τις διατάξεις της §7.4.3.2.1.

Αξιολόγηση μεθόδου ενίσχυσης

Δείκτες αξιολόγησης

Στην παρούσα μελέτη, με σκοπό να αξιολογηθούν οι προβλέψεις των κανονισμών, υιοθετήθηκαν 6 δείκτες.

Η ανηγμένη καμπτική ροπή που δίνεται από την Εξ. (2):

$$\mu_{\max} = \left(\frac{F_{\max} * H}{b * h^2 * f_{cm}} \right) \quad (2)$$

όπου F_{\max} είναι το μέγιστο πλευρικό φορτίο, H είναι το ύψος του δοκιμίου, h και b είναι το ύψος και το πλάτος της διατομής του στοιχείου και f_{cm} είναι η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Ο δείκτης καμπτικής αντοχής I_μ που περιγράφεται από την Εξ. (3)

$$I_\mu = \left(\frac{\mu_{\max}}{\mu_{\max,un}} \right) \quad (3)$$

Ο δείκτης μέγιστης μετατόπισης I_δ που δίνεται από την Εξ. (4)

$$I_\delta = \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\max,un}} \right) \quad (4)$$

όπου μ_{\max} και $\mu_{\max,un}$ είναι οι ανηγμένες καμπτικές ροπές και δ_{\max} και $\delta_{\max,un}$ είναι οι μέγιστες μετατοπίσεις του υποστυλώματος και του αντίστοιχου δοκιμίου αναφοράς.

Η πρώτη αστοχία αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση που παρατηρούνται αλλαγές στο δομικό στοιχείο (θραύση FRP, θραύση σκυροδέματος, αποκόλληση επικάλυψης, λυγισμός ράβδων, θραύση NSM και σκυροδέματος, αποκόλληση NSM, ολίσθηση ή αποκόλληση μεταλλικών στοιχείων στη βάση). Προκειμένου να κατανοήσουμε το επίπεδο της μετατόπισης κατά το σχηματισμό της πρώτης αστοχίας χρησιμοποιείται ο δείκτης μετατόπισης I_δ^1 (Εξ. (5)).

$$I_\delta^1 = \left(\frac{\delta_1}{\delta_{1,un}} \right) \quad (5)$$

όπου δ_1 και $\delta_{1,un}$ είναι η μετατόπιση του στοιχείου και του αντίστοιχου δοκιμίου αναφοράς κατά το σχηματισμό της πρώτης αστοχίας.

Ο δείκτης f'_{cc}/f_{cc} εκφράζει την αυξημένη αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, όπου f_{cc} είναι η αντοχή σε θλίψη του περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω εγκάρσιου χαλύβδινου οπλισμού και f'_{cc} είναι η αντοχή σε θλίψη του περισφιγμένου σκυροδέματος λόγω εγκάρσιου χαλύβδινου οπλισμού και σύνθετων υλικών ενίσχυσης.

Τέλος, χρησιμοποιείται η σχετική μετατόπιση αστοχίας dr , που είναι η ικανότητα μετατόπισης ανηγμένη προς το ύψος του υποστυλώματος.

$$dr = \left(\frac{\delta_1}{H} \right) \quad (6)$$

Στατιστικοί δείκτες

Για την αξιολόγηση των κανονιστικών πλαισίων χρησιμοποιήθηκαν δύο στατιστικοί δείκτες (R^2 , $RMSE$) που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 (Εξ. 7) είναι ένα στατιστικό μέτρο του βαθμού προσέγγισης της γραμμής παλινδρόμησης με τα σημεία των πραγματικών δεδομένων.

$$R^2 = \left(\frac{Cov(\exp, d)}{S(\exp) * S(d)} \right)^2 \quad (7)$$

όπου d είναι η αντίστοιχη τιμή του κανονισμού.

Η ρίζα του μέσου τετραγώνου του σφάλματος $RMSE$ (Εξ. 8) είναι ένα μέτρο της διασποράς της κατανομής των σφαλμάτων πρόβλεψης.

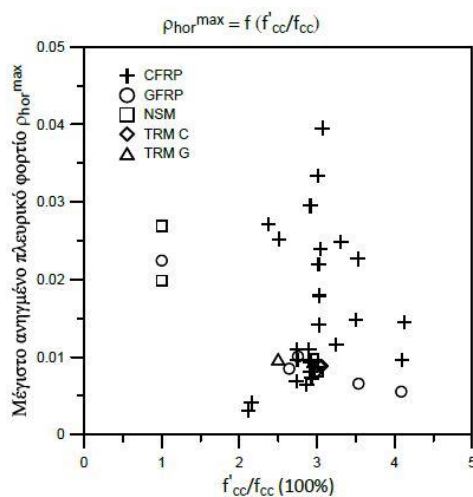
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\mu\delta, \exp - \mu\delta, d)^2}{n}} \quad (8)$$

Αποτελέσματα

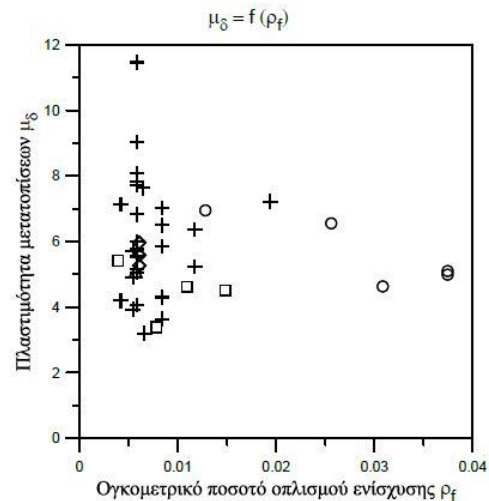
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της έρευνας που περιέχουν διαγράμματα διασποράς, ραβδογράμματα και διαγράμματα εκτιμητριών.

Αρχικά, παρατηρήθηκε πως η ενίσχυση με ινοπλισμένα υφάσματα οδηγεί στην αύξηση της αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος. Ακόμα, η αύξηση της περισφιγξης προκαλεί αύξηση του μέγιστου πλευρικού φορτίου που μπορεί να παραλάβει το υποστύλωμα (Σχ. 1). Φάνηκε πως όσο αυξάνεται η χαρακτηριστική αντοχή f_{ck} , τόσο μειώνεται το μέγιστο ανηγμένο οριζόντιο φορτίο ρ_{hor}^{max} που παραλαμβάνεται από το υποστύλωμα.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι καθώς το σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP) έχει μεγαλύτερη αντοχή, για να επιτευχθεί ίδιο επίπεδο καμπτικής ενίσχυσης χρειάζεται περισσότερο ποσοστό σύνθετου υλικού με ίνες υάλου (GFRP) απ' ότι άνθρακα (Σχ. 3). Όσον αφορά τη μέγιστη μετατόπιση και το δείκτη μετατόπισης I_{δ}^I , το σύνθετο υλικό με ίνες υάλου (GFRP) συνεισφέρει θετικά σε ποσοστό 16-40% και 27-48%, αντίστοιχα, αφού έχει μεγαλύτερη παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_{f,u}$ (Σχ. 4). Σχετικά με την πλαστιμότητα μετατοπίσεων (μ_{δ}), τα υποστύλωμα με GFRP κυμάνθηκαν σε μεγαλύτερες τιμές από αυτές των υποστυλωμάτων με CFRP (κατά 26-35%) (Σχ. 2).



Σχ. 1 Συσχέτιση μέγιστου ανηγμένου πλευρικού φορτίου με την % αύξηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

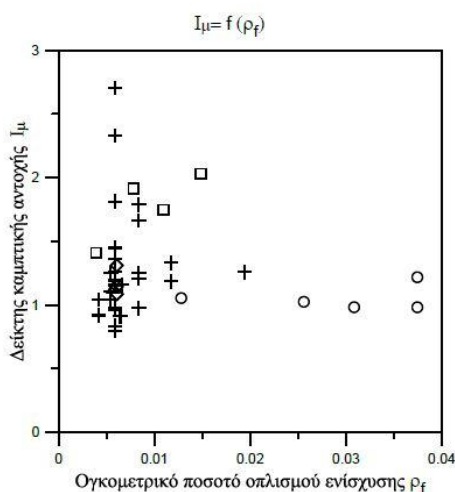


Σχ. 2 Συσχέτιση πλαστιμότητας μετατοπίσεων με το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης

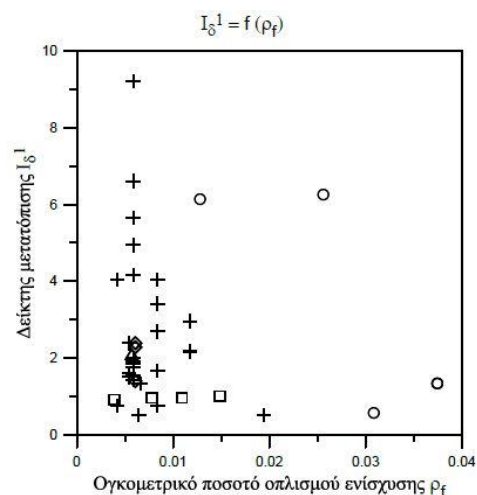
Στην περίπτωση του ινοπλέγματος άνθρακα (TRM C) και του ινοπλέγματος υάλου (TRM G), με στόχο την καμπτική ενίσχυση, σημειώθηκαν παρόμοια αποτελέσματα (Σχ. 3). Το TRM άνθρακα τείνει να αυξήσει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μέχρι και 20% συγκριτικά με το TRM G (Σχ. 1). Για αύξηση της συνολικής μετατόπισης που θα αναπτύξει το υποστύλωμα, το TRM C θεωρήθηκε αποτελεσματικότερο αφού σημείωσε την ίδια μετατόπιση αστοχίας ($\delta_{max}=124\text{ mm}$) αλλά επιπλέον δεν αστόχησε, σε αντίθεση με το δοκίμιο με TRM G. Η πλαστιμότητα μετατοπίσεων στο υποστύλωμα με TRM C αναπτύχθηκε σε επίπεδα 10% μεγαλύτερα από του TRM G.

Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων για υποστύλωμα ενισχυμένα με σύνθετο υλικό από ίνες άνθρακα (CFRP) και με ινοπλέγμα άνθρακα (TRM C), αποδείχτηκε πως το TRM C ανέπτυξε υψηλότερο δείκτη καμπτικής αντοχής I_{μ} σε εύρος 3.6 με 5.6% (Σχ. 3). Ως προς την αύξηση της μετατόπισης κατά την πρώτη αστοχία, παρατηρείται πως για δοκίμια χωρίς ματίσεις το TRM C

συνείσφερε περισσότερο (52% αύξηση), ενώ για δοκίμια με ματίσεις ήταν πιο αποτελεσματικό το CFRP (16% αύξηση) (Σχ. 4). Εξετάζοντας τη μέγιστη μετατόπιση, σημειώνεται πως για δοκίμια χωρίς ματίσεις το TRM C συνείσφερε περισσότερο (αύξηση μέχρι 48%). Σε γενικές γραμμές, το ινόπλεγμα άνθρακα αύξησε περισσότερο την πλαστιμότητα μετατόπισης από το CFRP και σημειώθηκαν παρόμοια αποτελέσματα μεταξύ τους για αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (Σχ. 1, 2). Στα υποστυλώματα με GFRP παρατηρήθηκε διπλάσιος δείκτης μετατόπισης I_{δ}^1 που εκφράζει την αύξηση της μετατόπισης κατά την πρώτη αστοχία και 29% αύξηση στην πλαστιμότητας μετατοπίσεων μ_{δ} συγκριτικά με το TRM G, αφού έχει μεγαλύτερη παραμόρφωση αστοχίας $\epsilon_{f,u}$. Αποδείχτηκε πως οι ράβδοι εγκοπής (NSM) δεν είναι αποτελεσματικοί ως προς την αύξηση της μετατόπισης κατά την πρώτη αστοχία και της πλαστιμότητας μετατοπίσεων (Σχ. 2, 4). Ωστόσο, συνέβαλλαν σημαντικά στην αύξηση της συνολικής ροπής και του μέγιστου πλευρικού φορτίου που μπορεί να αναλάβει το υποστύλωμα (40-90%) (Σχ. 1, 3), καθιστώντας τη χρήση τους έναν αποτελεσματικό τρόπο καμπτικής ενίσχυσης.



Σχ. 3 Συσχέτιση δείκτη καμπτικής αντοχής με το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης



Σχ. 4 Συσχέτιση δείκτη μετατόπισης με το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης

Στην περίπτωση των ελασμάτων από σύνθετα υλικά (laminates) δεν παρατηρήθηκε αύξηση του δείκτη μετατόπισης I_{δ}^1 , της μέγιστης μετατόπισης και της πλαστιμότητας μετατοπίσεων. Ωστόσο, αποδείχθηκαν ικανά να αυξήσουν τη μέγιστη συνολική ροπή που ασκείται στο υποστύλωμα.

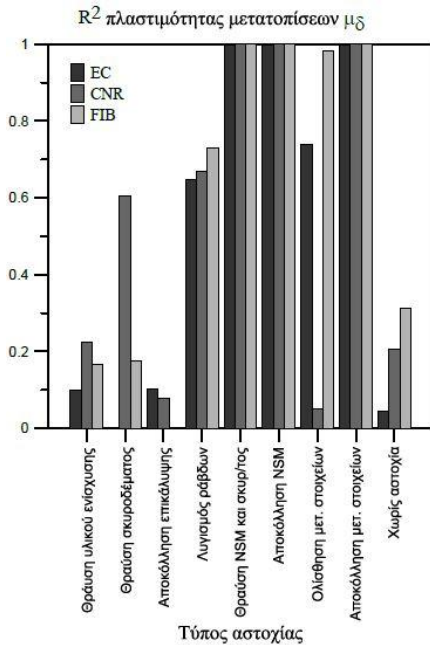
Οι εγκάρσιες ράβδοι που τοποθετήθηκαν στη βάση και στη μέση κάθε πλευράς του υποστυλώματος οδήγησαν σε αυξημένη μέγιστη μετατόπιση και πλαστιμότητα. Ταυτόχρονα, δεν μεταβλήθηκαν η αντοχή του περισιγμένου σκυροδέματος και η συνολική ροπή (Σχ. 1, 2, 3).

Τα μεταλλικά στοιχεία στη βάση υποστυλωμάτων αποδείχτηκε πως δεν βοηθούν στην περίσφιξη και την πλαστιμότητα και πως δεν επιτρέπουν την πλήρη ανάπτυξη της μετατόπισης πρώτης αστοχίας και της μέγιστης μετατόπισης. Ωστόσο, λειτουργούν ευνοϊκά για την απόκτηση υψηλότερου επιπέδου μέγιστης ροπής (49% αύξηση). Τα παραπάνω οφείλονται στο γεγονός ότι η τοποθέτησή τους οδηγεί στην αύξηση της δυσκαμψίας του στοιχείου.

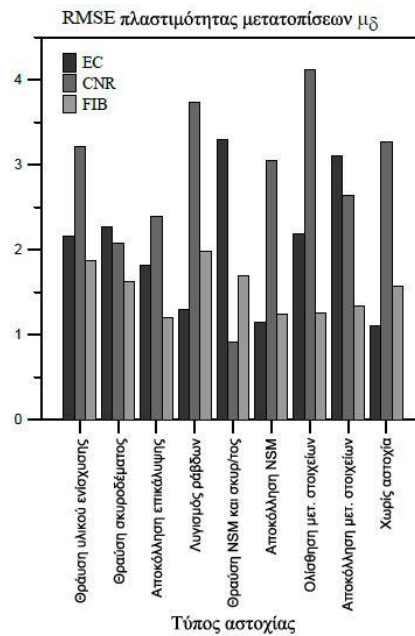
Οι προβλέψεις των κανονισμών (EN 1998-3 2005, CNR 2004, *fib*-Bulletin No. 56 2010) έδειξαν πως για αστοχία λόγω θραύσης του συνθετικού οπλισμού ο Ιταλικός CNR προσφέρει ακριβέστερα αποτελέσματα, με τον *fib*-Bulletin να ακολουθεί και στο τέλος τον Ευρωκώδικα EN 1998-3. Επιπλέον, για αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης η αντίστοιχη κατάταξη προέκυψε

διαφορετική, με τον Ευρωκώδικα EN 1998-3 να προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά αποτελέσματα, ακολουθούμενος από τον Ιταλικό CNR και στο τέλος τον *fib*-Bulletin.

Με τη χρήση του συντελεστή *RMSE*, εξετάστηκε η κατανομή των σφαλμάτων ανάμεσα στα αποτελέσματα των κανονισμών και των πειραμάτων. Οι τιμές του συντελεστή και τα αντίστοιχα ραβδόγραμμα (Σχ. 6) έδειξαν πως για αστοχία λόγω θραύσης του συνθετικού οπλισμού και λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης ο *fib*-Bulletin παρουσιάζει μικρότερη κατανομή των σφαλμάτων, με τον Ευρωκώδικα EN 1998-3 και τον Ιταλικό CNR να ακολουθούν.



Σχ. 5 Ραβδόγραμμα R² πλαστιμότητας μετατοπίσεων ανάλογα με τον τύπο αστοχίας



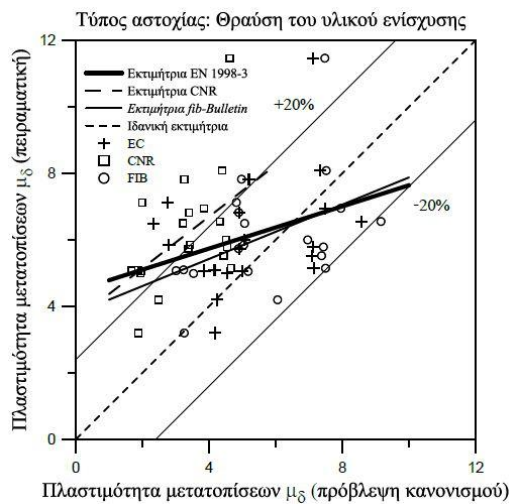
Σχ. 6 Ραβδόγραμμα RMSE πλαστιμότητας μετατοπίσεων ανάλογα με τον τύπο αστοχίας

Παρουσιάζονται διαγράμματα εκτιμητριών με σκοπό τον προσδιορισμό του κανονισμού με τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα αναφορικά με την πλαστιμότητα μετατόπισης. Εάν τα δεδομένα δημιουργούν μια εκτιμήτρια που βρίσκεται πάνω από την ιδανική, ο κανονισμός προβλέπει χαμηλότερα επίπεδα πλαστιμότητας από τις πειραματικές τιμές, έτσι ο κανονισμός θεωρείται συντηρητικός. Αντίθετα, αν τα δεδομένα προκύψουν κάτω από την ιδανική εκτιμήτρια, ο λανθασμένος υπολογισμός σύμφωνα με τον κανονισμό σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε απροσδόκητη αστοχία για συγκεκριμένα επίπεδα επιτελεστικότητα.

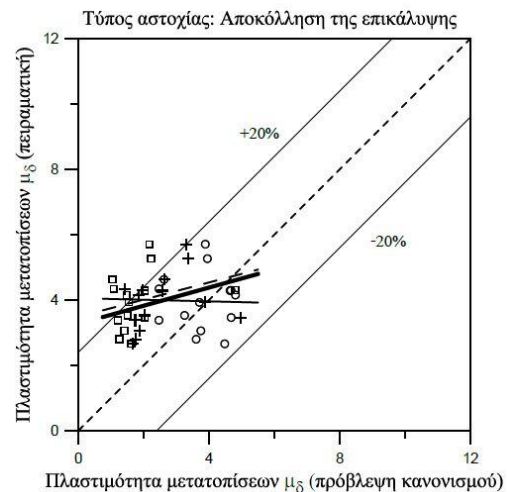
Το Σχήμα 7 δείχνει ότι η πλαστιμότητα μετατοπίσεων στα υποστυλώματα που αστόχησαν λόγω θραύσης του υλικού ενίσχυσης υπολογίστηκε ακριβέστερα από τον κανονισμό CNR, ενώ στην περίπτωση του *fib*-Bulletin δεν προσεγγίζεται αποτελεσματικά η πλαστιμότητα στην πλειονότητα των δοκιμών. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλαστιμότητα προσεγγίστηκε αποτελεσματικά στις περισσότερες περιπτώσεις από τον EN 1998-3. Για επίπεδα πλαστιμότητας μετατοπίσεων ($\mu\delta$) μεγαλύτερα του 3 παρατηρείται αστοχία λόγω θραύσης του υλικού ενίσχυσης. Η ομάδα των υποστυλωμάτων με τη συγκεκριμένη αστοχία περιλαμβάνει κυρίως συστήματα ενίσχυσης με υφάσματα FRP, μερικά με εγκάρσιες ράβδους από σύνθετα υλικά και μερικά με μεταλλικά στοιχεία στη βάση. Η απόκριση των δοκιμών C1-S-G και C4-S-G (Realfonzo and Napoli 2009) που περιέχουν υφάσματα CFRP υπερεκτιμήθηκε από τον EN 1998-3 και τον *fib*-Bulletin, ενώ υποτιμήθηκε από τον

CNR (Σχ. 7). Αντίθετα, η συμπεριφορά του L0_M4G (Bournas *et al.* 2009) με TRMG υποτιμήθηκε από όλες τις κανονιστικές διατάξεις.

Για τις περιπτώσεις υποστυλωμάτων με μεταλλικά στοιχεία ή/και υφάσματα CFRP, ο CNR σημείωσε τις πιο συντηρητικές τιμές πλαστιμότητας και ο *fib*-Bulletin τις λιγότερο συντηρητικές. Οι κανονισμοί δε λαμβάνουν υπόψη τα μεταλλικά στοιχεία στη βάση των υποστυλωμάτων, επομένως προκύπτουν μικρότερες τιμές πλαστιμότητας μετατοπίσεων. Για όλα τα κανονιστικά πλαίσια που εξετάστηκαν, όλες οι τιμές πλαστιμότητας για συστήματα με ύφασμα CFRP και εγκάρσιες ράβδους ήταν χαμηλότερες από τις πειραματικές. Ωστόσο, δε λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη των ράβδων οι οποίες οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα περισφιγξης. Σημειώνεται ότι τα περισσότερα δεδομένα παρουσιάζουν $\pm 20\%$ απόκλιση από την ιδανική. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα δεδομένα που βρίσκονται μεταξύ των γραμμών απόκλισης αντιστοιχούν στις εκτιμήσεις του Ευρωκώδικα EN 1998-3 και του *fib*s Bulletin (Σχ. 7).



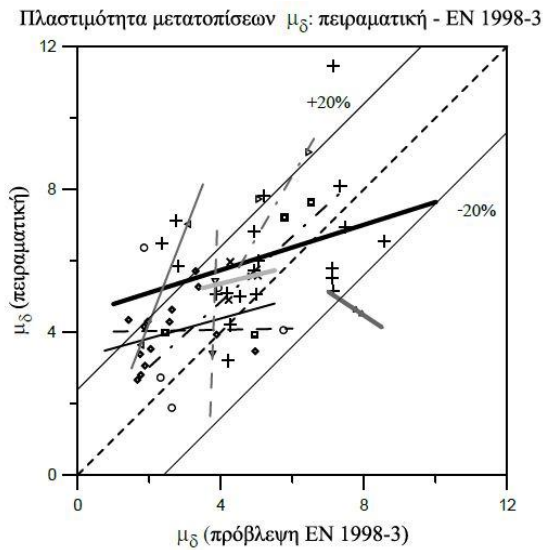
Σχ. 7 Διάγραμμα εκτιμητριών για αστοχία λόγω θραύσης του υλικού ενίσχυσης



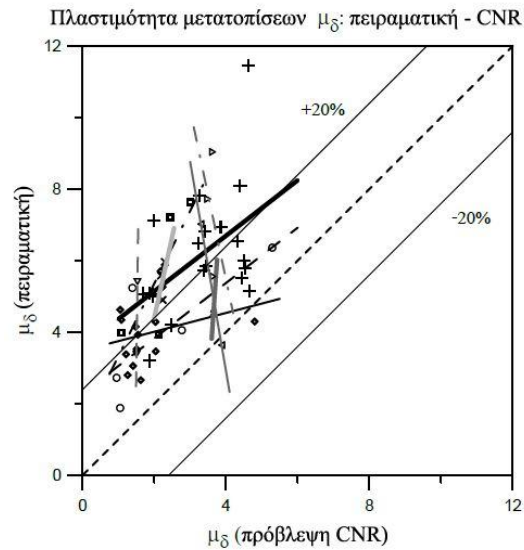
Σχ. 8 Διάγραμμα εκτιμητριών για αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης

Οι τιμές της πλαστιμότητας που προκύπτουν από τις προβλέψεις των κανονισμών CNR και EN 1998-3 για υποστυλώματα που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης ήταν χαμηλότερες από τις πειραματικές. Ωστόσο, τα δεδομένα βρίσκονται αρκετά μακριά από την ιδανική εκτιμήτρια, το οποίο υποδεικνύει ασφαλή αλλά όχι κατ'ανάγκη ακριβή αποτελέσματα. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις του *fib* Bulletin κατέληξαν σε κάποια αποδεκτά, αλλά και σε ορισμένα επισφαλής αποτελέσματα (Σχ. 8). Παρ'όλα αυτά, αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης εμφανίζεται σε δοκίμια με τιμές πλαστιμότητας ίσες ή μεγαλύτερες του 2. Στο Σχ. 8 φαίνεται, ακόμα, ότι για τα μη ενισχυμένα υποστυλώματα σύμφωνα με τους EN 1998-3 και CNR υπολογίζονται χαμηλότερες τιμές πλαστιμότητας μετατοπίσεων, ενώ αυτό συνέβη μόνο στο 40% αυτών σύμφωνα με τον *fib* Bulletin. Το δοκίμιο C33-D-C (Realfonzo and Napoli 2012) ήταν το μόνο ενισχυμένο με σύνθετα υφάσματα που ανέπτυξε πλαστιμότητα $\mu_\delta=4.8$ σύμφωνα με τον CNR και $\mu_\delta=4.67$ σύμφωνα με τον *fib*-Bulletin, ενώ έφτασε $\mu_\delta=4.3$ σύμφωνα με τα πειράματα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η επιρροή των εγκάρσιων ράβδων είναι ο βασικός λόγος που οι προβλέψεις των κανονιστικών πλαισίων παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις πειραματικές παρατηρήσεις. Περισσότερα από τα μισά στοιχεία περικλείονται μεταξύ των γραμμών απόκλισης ($\pm 20\%$) και τα περισσότερα από αυτά αντιστοιχούν στον

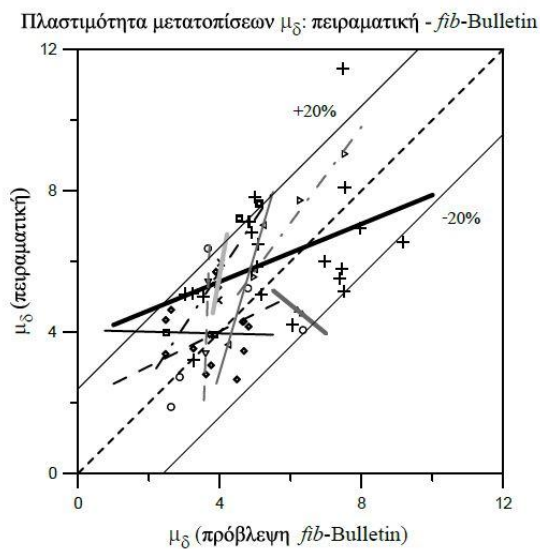
Ευρωκώδικα EN 1998-3 και στον *fib*-Bulletin. Συμπερασματικά, η περίπτωση του CNR αποδείχθηκε η πιο συντηρητική, ενώ η περίπτωση του *fib*-Bulletin η πιο ακριβής (Σχ. 9, 10, 11).



Σχ. 9 Διάγραμμα εκτιμητριών για EN 1998-3



Σχ. 10 Διάγραμμα εκτιμητριών για CNR

Σχ. 11 Διάγραμμα εκτιμητριών για *fib*-Bulletin

- Εκτιμήτρια Θραύση υλικού ενίσχυσης
- - Εκτιμήτρια Θραύση σκυροδέματος
- Εκτιμήτρια Αποκόλληση επικάλυψης
- - Εκτιμήτρια Λυγισμός ράβδων
- Εκτιμήτρια Θραύση NSM και σκυρ/τος
- - Εκτιμήτρια Αποκόλληση NSM
- Εκτιμήτρια Ολίσθηση μετ. στοιχείων
- - Εκτιμήτρια Αποκόλληση μετ. στοιχείων
- Εκτιμήτρια Χωρίς αστοχία
- - Ιδανική εκτιμήτρια
- + Θραύση υλικού ενίσχυσης
- Θραύση σκυροδέματος
- ◇ Αποκόλληση επικάλυψης
- ▣ Λυγισμός ράβδων
- ▴ NSM and concrete crush
- ▽ Αποκόλληση NSM
- ▷ Ολίσθηση μετ. στοιχείων
- ◁ Αποκόλληση μετ. στοιχείων
- × Χωρίς αστοχία

Συμπεράσματα

Γίνεται σύγκριση πειραματικών παρατηρήσεων και κανονιστικών προβλέψεων ως προς το είδος του σύνθετου υλικού και τη μέθοδο ενίσχυσης. Οι κανονισμοί στο σύνολό τους δε διαφοροποιούν τους τρόπους αστοχίας των διάφορων τεχνικών ενίσχυσης για τα διαφορετικά επίπεδα επιτελεστικότητας, ούτε συστάσεις για την καταλληλότητα κάθε τεχνικής.

Για κάθε σύστημα ενίσχυσης, πρωταρχικό ρόλο στη συνολική συμπεριφορά παίζει το είδος του υλικού ενίσχυσης που χρησιμοποιείται.

Σε συμφωνία με προηγούμενες έρευνες, σημειώνεται η σημαντικότητα της επιρροής της περίσφιγξης. Η απόκριση και η συμπεριφορά των ενισχυμένων υποστυλωμάτων υπό σεισμική φόρτιση ως προς την αντοχή, την πλαστιμότητα και την ικανότητας παραμόρφωσης και φορτίου είναι αισθητά αναβαθμισμένη. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στους τρόπους αστοχίας των διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης που αποφασίζονται με κριτήριο το επίπεδο επιτελεστικότητας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συμβατικός οπλισμός δεν έχει σημαντική συμβολή στη συνολική απόκριση του ενισχυμένου στοιχείου. Αν και στην περίπτωση υποστυλωμάτων με ματίσεις, παρατηρείται ότι συνεισφέρουν θετικά στην αύξηση της ικανότητας μετατόπισης σε συνδυασμό με κατάλληλο ενισχυτικό ύφασμα FRP.

Βιβλιογραφία

- Achillou, D., Kiziridou, A., Papachatzakis, G. and Karabinis, A. (2016), " Assessment Of Strengthening Techniques Of Reinforced Concrete Elements Rehabilitated With Composites", *Concrete Solutions 2016, 6th International Conference on Concrete Repair*,. Thessaloniki, Greece
- Bournas, D., Triantafyllou, T., Zygouris, K. and Stavropoulos, F. (2009), "Textile-reinforced mortar versus FRP jacketing in seismic retrofitting of RC columns with continuous or lap-spliced deformed bars", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 13, No. 5, pp. 360-371.
- Chalioris, C. (2008), "Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers – experimental study", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 1, pp. 21–29.
- CNR. (2004), "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures (materials, RC and PC structures, masonry structures) ", CNR-DT 200/2004, Italian National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructions; Rome, Italy.
- EN 1998-3 (2005), "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of Buildings", European Committee for Standardization; Brussels, Belgium.
- fib-Bulletin No. 56 (2010), "Model Code 2010 - First complete draft, Volume 2", International Federation for Structural Concrete; Lausanne, Switzerland.
- Karabinis, A. (2002), "Reinforced concrete beam-column joints with lap splices under cyclic loading", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 14, No. 6, pp. 649-660.
- Karayannis, C. and Sirkelis, G. (2008), "Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 5, pp. 769–790.
- Realfonzo, R. and Napoli, A. (2009), "Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 1164-1176.
- Realfonzo, R. and Napoli, A. (2012), "Results from cyclic tests on high aspect ratio RC columns strengthened with FRP systems", *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 606–620.
- Rousakis, T., Karabinis, A.I. and Kioussis, P.D. (2007), "FRP-confined concrete members: axial compression experiments and plasticity modelling", *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, pp. 1343-1353.
- Sadone, R., Quiertant, M., Mercier, J. and Ferrier, E. (2012), "Experimental study on RC columns retrofitted by FRP and subjected to seismic loading", Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), Rome, Italy.
- Sarafraz, M. and Danesh, F. (2010), "Experimental study on flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP bars", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 1-2.
- Wu, Y., Liu, T. and Wang, L. (2008), "Experimental investigation on seismic retrofitting of square RC columns by carbon FRP sheet confinement combined with transverse short glass FRP bars in bored holes", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 53-60.