

Σύγκριση Διεθνών μοντέλων σχεδιασμού καμπτικά ενισχυμένων δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά

Comparison of International code provisions on the flexural design of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded composite materials

Χρήστος ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ¹, Χριστίνα ΚΑΚΑΕ²

Λέξεις κλειδιά: Στατιστική ανάλυση, δοκοί, καμπτική ενίσχυση, αστοχία
Keywords: Statistical analysis, RC beam, flexural strengthening, failure

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στα πλαίσια του άρθρου αυτού μελετάται η ενίσχυση δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά. Ειδικότερα, εξετάζεται η καμπτική ενίσχυση των δοκών με τη χρήση σύνθετων υλικών με τέσσερα διαφορετικά είδη ινών (ίνες από γυαλί, άνθρακα, χάλυβα και βασάλτη εμποτισμένες οργανικές και ανόργανες μήτρες) και εξετάζεται η αποτελεσματικότητα αυτών. Περιγράφονται εν συντομία τα κανονιστικά μοντέλα πρόβλεψης της συνεισφοράς των σύνθετων υλικών στη καμπτική αντοχή των ενισχυμένων δομικών στοιχείων τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματικές μελέτες με τη βοήθεια στατιστικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αξιοπιστία των υπολογιστικών μοντέλων, που αφορούν στην ενίσχυση δοκών με ίνες άνθρακα ή γυαλιού σε οργανική μήτρα, στην πρόβλεψη της αστοχίας δοκών με διάφορα σύνθετα υλικά. Τέλος, μελετώνται τα δύο σημαντικότερα είδη αστοχίας και προκύπτουν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία κάθε μοντέλου.

ABSTRACT: This article studies the performance of six international design codes dealing with the flexural capacity of strengthened reinforced concrete (RC) beams with externally bonded composite materials. An experimental database was assembled using close to 300 tested strengthened RC beams with a variety of

¹ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, email: cparak@uth.gr

² Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

fibers (glass, carbon, aramid, steel, basalt) and matrices (organic and inorganic). In order to ascertain the effectiveness of the design codes, results obtained using the codes were compared with the corresponding experimental results. In particular, the reliability of existing design codes is examined, in predicting the flexural capacity of the beams based on three distinct modes of failure.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενίσχυση, η αναβάθμιση και η μετασκευή των υφιστάμενων κατασκευών είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει την τελευταία κυρίως δεκαετία η σύγχρονη επιστήμη του πολιτικού μηχανικού. Μια από τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις σε αυτές τις ανάγκες είναι μια νέα τεχνική ενίσχυσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος η οποία βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών, γνωστών και ως ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) ή Fiber Reinforced Polymers (FRP), σε στοιχεία (δοκοί, υποστυλώματα, τοιχώματα, κόμβοι κλπ.) τα οποία, είτε έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό, είτε έχουν ανεπάρκεια αντοχής ή/και πλαστιμότητας. Στις πρώτες μελέτες που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού και άνθρακα, εμποτισμένες με οργανικές μήτρες όπως διάφορα είδη ρητινών (Nanni, 1997). Τα σύνθετα αυτά υλικά συνέβαλαν σημαντικά στην καμπτική ενίσχυση των δομικών στοιχείων λόγω της υψηλής αντοχής τους σε εφελκυσμό και σε διάβρωση καθώς και λόγω της εξαιρετικής ανθεκτικότητας σε χημικές επιδράσεις. Επιπλέον, το μικρό βάρος τους το οποίο ισούται με το $\frac{1}{4}$ του βάρους του χάλυβα, η διαθεσιμότητα σε πολύ μεγάλα μήκη καθώς και η ευκολία στην εγκατάσταση τους και το ιδιαίτερα ανταγωνιστικό κόστος επέμβασης είναι μερικοί ακόμα από τους λόγους όπου ανέδειξαν τα επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή μια ανερχόμενη και πολλά υποσχόμενη μέθοδος ενίσχυσης των κατασκευών. Για το λόγο αυτό, πολλοί από τους ισχύοντες κανονισμούς άρχισαν να συμπεριλαμβάνουν την μέθοδο αυτή ενίσχυσης, υιοθετώντας υπολογιστικά μοντέλα που βασίστηκαν σε πειραματικές μελέτες ενίσχυσης δοκών με ινοπλισμένα πολυμερή από ίνες γυαλιού, άνθρακα αλλά και αραμιδίου. Με την πάροδο του χρόνου, τα αρκετά πλεονεκτήματα του τρόπου αυτού ενίσχυσης συνέβαλλαν στην ανάγκη περαιτέρω εξέτασης και ανάλυσης του. Έτσι τα τελευταία χρόνια άρχισαν να συντίθενται σύνθετα υλικά από νέα είδη ινών (όπως ίνες χάλυβα και βασάλτη) (Papakonstantinou, 2009, Tomlinson, 2015). Επιπλέον, λόγω της μειωμένης ανθεκτικότητας της ρητίνης σε υψηλές θερμοκρασίες, έγιναν προσπάθειες αντικατάστασης των πολυμερικών μητρών με υλικά βασισμένα στο τσιμέντο. Συνεπώς πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο κατά τη σύνθεση των πολυμερών, η τσιμεντοειδής μήτρα εισάγοντας έτσι τα συστήματα Ινοπλέγματος Ανόργανης Μήτρας (IAM ή TRM), τα συστήματα δηλαδή τσιμεντοειδούς μήτρας ενισχυμένα με υφάσματα ινών σε μορφή αραιού πλέγματος (Raouf et al., 2017).

Ωστόσο κανένας από τους ισχύοντες κανονισμούς δεν αναφέρεται σε αυτά τα νέα είδη σύνθετων υλικών. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν έξι διεθνείς κανονισμοί: ο Αμερικάνικος κανονισμός (ACI 440, 2008), ο Ιαπωνικός (JSCE,

2001), ο Καναδικός (ISIS, 2002), ο Αιγυπτιακός (ECP, 2005), ο fib (v, 2001) καθώς και η σχεδιαστική καθοδήγηση TR55 που υπάγεται στον Βρετανικό κανονισμό (TR55, 2000). Οι κανονισμοί αυτοί όμως βασίζονται σε μοντέλα που προέκυψαν ύστερα από πειραματικές μελέτες καμπτικής ενίσχυσης σε δοκούς, ενισχυμένες με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού και άνθρακα εμποτισμένες σε οργανικές μήτρες (εποξειδική ρητίνη). Επιπλέον οι διαφορετικές ιδιότητες των νέων σύνθετων υλικών μπορεί να επηρεάσουν τον βαθμό συμβολής τους στην ενίσχυση των κατασκευών. Επιπρόσθετα, ενώ έχουν παρατηρηθεί τρεις ξεχωριστοί τρόποι αστοχίας, στους περισσότερους κανονισμούς δε γίνεται διαχωρισμός. Στόχος της μελέτης αυτής ήταν να εξεταστεί κατά πόσο οι ισχύοντες εξεταζόμενοι κανονισμοί μπορούν να προβλέψουν την αντοχή ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας των ενισχυμένων δοκών με διάφορα σύνθετα υλικά.

ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μια σύντομη περιγραφή των εξεταζόμενων κανονισμών και κατ'επέκταση των σχεδιαστικών μοντέλων που αυτοί υιοθετούν.

American Concrete Institute (ACI 440.2R-08)

Οι κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού του Αμερικανικού Ινστιτούτου Σκυροδέματος 440 (ACI 440, 2008) βασίζονται στο συμβιβαστό των παραμορφώσεων καθώς και στις εξισώσεις ισορροπίας ροπών και δυνάμεων. Ο ACI προτείνει ότι η παραμόρφωση στην επιφάνεια του σκυροδέματος, κατά τη στιγμή της ενίσχυσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη. Το FRP δεν επιτρέπεται να φέρει θλιπτικές τάσεις, σύμφωνα με το ACI 440.2R-08. Επίσης ο ACI εισάγει δύο παράγοντες ασφαλείας ϕ και ψ_f . Ο πρώτος εξαρτάται από την παραμόρφωση του χάλυβα στην εφελκόμενη ζώνη κατά τη στιγμή της αστοχίας, συνεπώς εξαρτάται από τον τύπο αστοχίας. Ειδικότερα το ϕ ισούται με 0,9 για πλάστιμη μορφή αστοχίας ενώ παίρνει την τιμή 0,65 για ψαθυρού τύπου αστοχίες. Στη μεταβατική ζώνη μεταξύ των δύο προηγούμενων ακρών, το ϕ μπορεί να προσδιοριστεί από τη γραμμική παρεμβολή. Ο δεύτερος παράγοντας ψ_f είναι ένας συντελεστής μείωσης της συνεισφοράς του FRP, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την καμπτική αντοχή που προκύπτει λόγω εξωτερικής ενίσχυσης (M_{nf}).

Ο συντελεστής ψ_f παίρνει την τιμή 0,85 βάσει της ανάλυσης αξιοπιστίας των πειραματικά βαθμονομημένων στατιστικών τιμών, ώστε να λαμβάνεται υπόψη κυρίως ο λιγότερο προβλέψιμος τρόπος αστοχίας, η αστοχία δηλαδή λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού FRP.

Για ένα δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο έχει ενισχυθεί επιπλέον εξωτερικά οι πιθανοί τρόποι αστοχίας είναι οι εξής: (i) σύνθλιψη του σκυροδέματος, ύστερα από τη διαρροή του εσωτερικού χάλυβα ενίσχυσης, (ii) ψαθυρός τρόπος αστοχίας με θραύση του σκυροδέματος πριν τη διαρροή του χάλυβα, (iii) καμπτική αστοχία λόγω θραύσης του συστήματος FRP αφού πρώτα διαρρεύσει ο χάλυβας (επιθυμητός τρόπος αστοχίας) και (iv) αστοχία λόγω

αποκόλλησης του σύνθετου υλικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ACI δεν εξετάζει την αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης του σκυροδέματος ξεχωριστά, αν και αυτός ο τρόπος αστοχίας μελετάται από αρκετούς ερευνητές. Ο ACI εισάγει συντελεστή μείωσης της αντοχής FRP, C_E , ο οποίος σχετίζεται με τον τύπο των ινών και το περιβάλλον που θα χρησιμοποιηθεί το FRP. Οι τιμές αυτού του παράγοντα κυμαίνονται από 0,5 έως 0,95. Τέλος, παρέχει την Εξίσωση 2 προκειμένου να υπολογιστεί η παραμόρφωση σχεδιασμού του FRP:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad (2)$$

όπου:

ε_{fd} παραμόρφωση σχεδιασμού του FRP,
 ε_{fu} παραμόρφωση του FRP κατά την αστοχία,
 E_f μέτρο ελαστικότητας του FRP,
 t_f πυκνότητα του FRP,
 f'_c θλιπτική τάση του σκυροδέματος
 n ο αριθμός στρώσεων του FRP

ISIS Canada

Ο Καναδικός κανονισμός παρέχει ένα υπολογιστικό μοντέλο για την ενίσχυση των κατασκευών με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι πιο συνήθεις τύποι ινών είναι οι ίνες από γυαλί και άνθρακα, ενώ οι μήτρες είναι εποξειδικές, βινυλεστερικές ή πολυεστερικές. Η εξωτερική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω εφελκυσμού του FRP μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την Εξίσωση 3 :

$$T_{frp} = \varphi_{frp} A_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} \text{ με } \varepsilon_{frp} \leq \varepsilon_{frpu} \quad (3)$$

όπου:

T_{frp} η εσωτερική δύναμη λόγω εφελκυσμού του FRP,
 φ_{frp} συντελεστής ασφαλείας, όπου σχετίζεται με το είδος του σύνθετου υλικού FRP,
 A_{frp} η επιφάνεια του συνολικού οπλισμού FRP

Ο συντελεστής ασφαλείας φ_{frp} εξαρτάται από το είδος των ινών και της κατασκευής. Ο Καναδικός κανονισμός κάνει μια διάκριση ανάμεσα σε γέφυρες και κτίρια. Για κτίρια και σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα, η προτεινόμενη τιμή είναι 0,75, ενώ για ίνες γυαλιού 0,6.

TR55

Ο TR55 προτείνει ότι οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας που πρέπει να εφαρμόζονται στις χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες είναι συναρτήσει του τύπου των ινών και της διαδικασίας παραγωγής/εγκατάστασης. Έτσι σύμφωνα με την Εξίσωση 4 είναι :

$$\gamma_{mF} = \gamma_{mf} \times \gamma_{mm} \quad (4)$$

όπου το γ_{mF} εξαρτάται από τον τύπο της ίνας και γ_{mm} εξαρτάται από τη διαδικασία παραγωγής και/ή τοποθέτησης στο χώρο. Η ακρίβεια με την οποία οι ιδιότητες που λαμβάνονται από δείγματα δοκιμής αντανακλούν τις συνολικές ιδιότητες του υλικού εξαρτάται από τη μέθοδο κατασκευής, το επίπεδο ποιοτικού ελέγχου και εφαρμογής. Είναι σημαντικό οι ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό να εμφανίζονται και στην πράξη. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πολλά διαθέσιμα υλικά (ίνες και μήτρες) που προσφέρονται στην αγορά έχουν διαφορετικές ιδιότητες.

fib : The International Federation for Structural Concrete

Ο fib προτείνει τη χρήση συντελεστών ασφαλείας που σχετίζονται με τη γενικότερη αντοχή του σε σχέση με το υλικό, την μέθοδο εφαρμογής και τις διάφορες συνθήκες εργοταξίου προκειμένου να μειωθούν οι τάσεις στο FRP. Επίσης προτείνει μια επιπλέον μείωση των επιτρεπόμενων παραμορφώσεων στο FRP κατά την αστοχία, όταν ο σχεδιασμός διέπεται από θραύση του σκυροδέματος ή αποκόλληση του FRP. Σε αυτή την περίπτωση η τάση σχεδιασμού f_{fd} του FRP προκύπτει από την Εξίσωση 5 :

$$f_{fd} = \frac{f_{fk} \varepsilon_{fue}}{\gamma_f \varepsilon_{fum}} \quad (5)$$

όπου:

ε_{fue} η μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του FRP σε συνθήκες εργοταξίου

ε_{fum} μέση ανηγμένη μέγιστη παραμόρφωση σε πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού

f_{fk} η μέγιστη εφελκυστική τάση του σύνθετου υλικού FRP

γ_f ο συντελεστής ασφαλείας του σύνθετου υλικού FRP, ο οποίος παίρνει τιμές από 1.35 έως 1.5 ανάλογα με το είδος των ινών (1.35 για ίνες άνθρακα, 1.40 για ίνες αραμιδίου και 1.5 για υαλονήματα), οι τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 του fib (2001).

Υπό συνθήκες συνθήκες θεωρούμε ότι ο λόγος $\varepsilon_{fue}/\varepsilon_{fum}$ είναι ίσος με τη μονάδα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο fib αναφέρει ότι οι συντελεστές ασφαλείας γ_f υπόκεινται σε περαιτέρω ανάλυση λόγω του μικρού διαθέσιμου δείγματος από πειραματικές μελέτες.

Japanese Society of Civil Engineers

Ο Ιαπωνικός κανονισμός μελετά επίσης τη μέθοδο ενίσχυσης των κατασκευών με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά. Προτείνει μια επιπλέον μείωση της επιτρεπόμενης παραμόρφωσης του FRP κατά την αστοχία, έτσι ώστε να λάβει υπόψη την περίπτωση αστοχίας λόγω πρόωρης αποκόλλησης. Συγκεκριμένα η επιτρεπόμενη παραμόρφωση μειώνεται κατά 30%. Τέλος στον Ιαπωνικό κανονισμό δεν παρατηρείται κάποια διάκριση ανάλογα το είδος του FRP.

Egyptian Code of Practice (ECP208)

Ο αιγυπτιακός κανονισμός παρέχει επίσης προτάσεις για την ενίσχυση των κατασκευών με FRP. Προτείνει έτσι μια επιπλέον μείωση της επιτρεπόμενης παραμόρφωσης του FRP κατά την αστοχία, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αστοχία λόγω πρόωρης αποκόλλησης. Αρχικά, η επιτρεπόμενη παραμόρφωση του FRP διαιρείται με συντελεστή ίσο με 1.50. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή ασφαλείας, η τιμή του οποίου ποικίλει από 0.75 για ίνες γυαλιού έως 0.95 για ίνες άνθρακα. Τέλος, ο κανονισμός αυτός δεν προσφέρει επιπλέον εναλλακτικές για τα διάφορα είδη ινών καθώς και για συστήματα εξωτερικής ενίσχυσης όπως τα TRM.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στην παρούσα μελέτη, συλλέχθηκαν από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία πειραματικές έρευνες όπου πραγματοποιούνταν την μονοτονική καταπόνηση δοκών σε κάμψη τεσσάρων, τριών ή και δύο σημείων μετά από ενίσχυση τους με εξωτερικά επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή. Συγκεντρώθηκαν έτσι 39 άρθρα όπου εξέταζαν συνολικά την πειραματική συμπεριφορά 291 ενισχυμένων δοκών. Σημειώνεται, ότι τα μοντέλα σχεδιασμού βασίστηκαν σε αντίστοιχα πειράματα μονοτονικής φόρτισης και ότι θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστούν δεδομένα και από πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

Στη συνέχεια καταγράφηκαν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκών και των σύνθετων υλικών καθώς και η πειραματικά υπολογιζόμενη καμπτική ροπή αστοχίας και ο τρόπος αστοχίας της κάθε δοκού. Από το συνολικό δείγμα των 291 δοκών, 47 δοκοί αστόχησαν λόγω θραύσης του σύνθετου υλικού, 146 δοκοί λόγω αποκόλλησης αυτού, 47 λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος, 50 δοκοί λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης του οπλισμένου σκυροδέματος και τέλος 8 δοκοί αστόχησαν διατμητικά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς σε πολλές περιπτώσεις η αποκόλληση του σύνθετου υλικού FRP συνδυάζεται με παράλληλο διαχωρισμό της επικάλυψης του οπλισμένου σκυροδέματος από την επιφάνεια της δοκού, επτά δοκοί και κατ'

επέκταση οι υπολογιζόμενες ροπές αστοχίας τους, συμπεριλήφθησαν και στις δύο κατηγορίες. Επιπλέον λόγω του αντικειμένου της μελέτης, η διατμητική αστοχία των δοκών δεν εξετάστηκε.

Τα πειραματικά αυτά δεδομένα αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων, για την στατιστική ανάλυση που ακολούθησε, η οποία και βασίστηκε στα υπολογιστικά μοντέλα των έξι διεθνών κανονισμών που εξετάστηκαν.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η στατιστική ανάλυση διεξήχθη, έτσι ώστε να συγκριθούν οι καμπτικές ροπές αστοχίας των δοκών που υπολογίστηκαν βάσει των μοντέλων, με αυτές που προέκυψαν πειραματικά. Συνολικά, για καθέναν από τους κανονισμούς, σχεδιάστηκε ένα διάγραμμα πειραματικών – θεωρητικών καμπτικών ροπών για όλες τις δοκούς αρχικά και στη συνέχεια με βάση τον τρόπο αστοχίας τους.

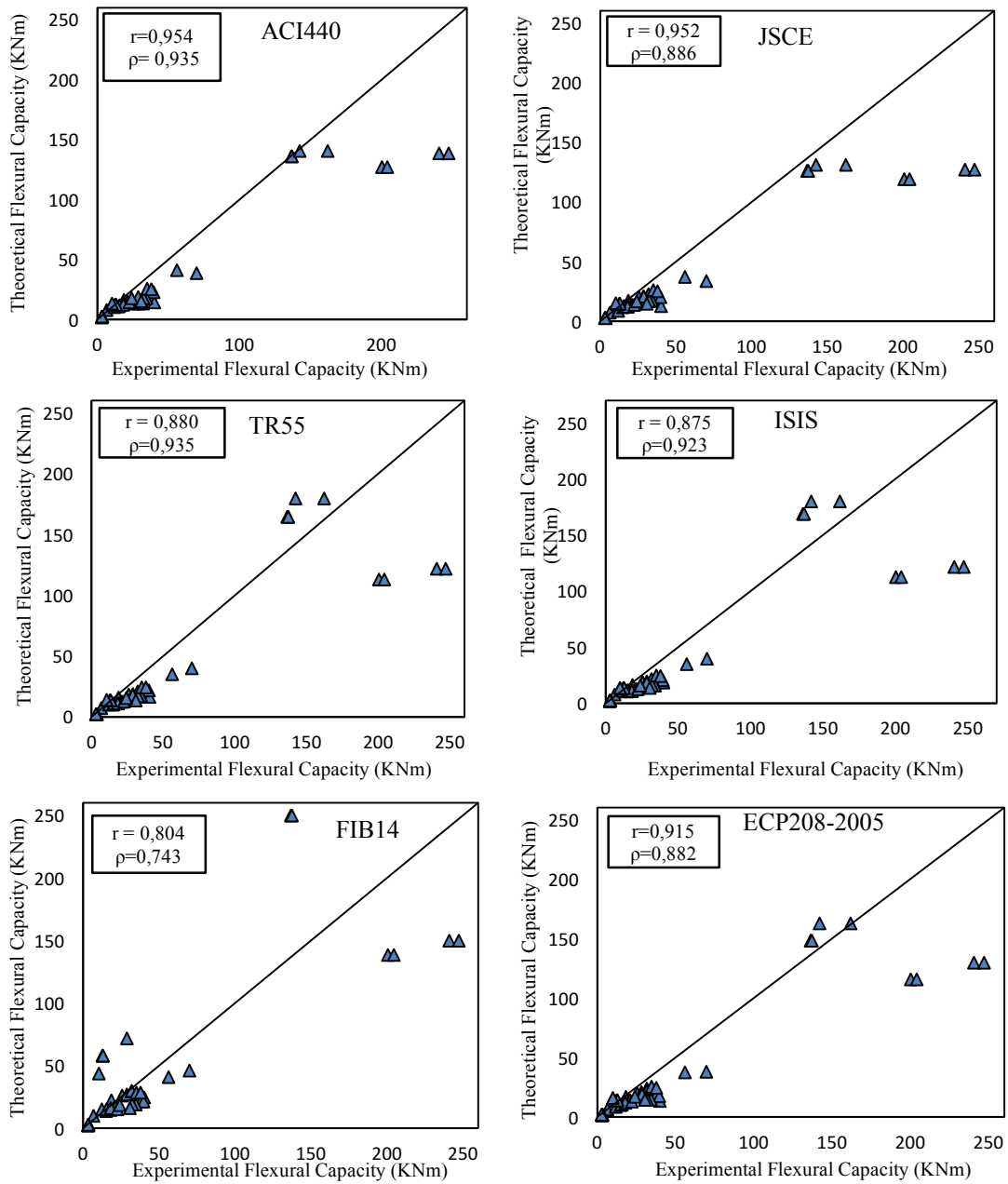
Προκειμένου να βοηθηθεί η ερμηνεία και η σύγκριση των διαγραμμάτων υπολογίστηκε για κάθε διάγραμμα, δηλαδή για τις μεταβλητές που αυτό παριστά, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson (r) και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman (ρ). Ο συντελεστής Pearson εκφράζει τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών, ενώ ο συντελεστής Spearman δεν απαιτεί γραμμική συσχέτιση αλλά αξιολογεί πόσο καλά μπορεί να περιγραφεί η σχέση μεταξύ των μεταβλητών χρησιμοποιώντας μια μονότονη συνάρτηση. Κάθε σημείο του διαγράμματος διασποράς έχει συντεταγμένες (x,y) οι οποίες παριστούν την πειραματικά και θεωρητικά υπολογιζόμενη καμπτική ροπή αντίστοιχα.

Για τους κανονισμούς, που κάνουν χρήση συντελεστών ασφαλείας, επιθυμούμε τα ζεύγη τιμών να βρίσκονται κάτω από τη γραμμή τάσης $y=x$, όχι ωστόσο σε μεγάλη απόσταση από αυτή, διότι οι τιμές αυτές είναι υπέρ της ασφαλείας, διαφορετικά υπερεκτιμούν την ικανότητα ενίσχυσης των σύνθετων υλικών. Τα ποσοστά των δοκών που αστόχησαν (ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίας) με καμπτικές ροπές μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν από τους κανονισμούς είναι : 90% για τον JSCE, 84% για τον ISIS, 81% για τον TR55, 80% για τον ECP, 79% για τον ACI και 65% για τον *fib*. Παρατηρούμε ότι αν εξαιρέσουμε τα αποτελέσματα του *fib*, οι υπόλοιποι κανονισμοί εμφανίζουν μια αρκετά καλή πρόβλεψη. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι τα μοντέλα που υιοθετεί ο *fib* προέκυψαν από μικρότερη βάση δεδομένων από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, καθώς την περίοδο εκείνη τα πειραματικά δεδομένα ήταν πολύ λιγότερα από τα σημερινά.

Θραύση Ινοπλισμένων Πολυμερών

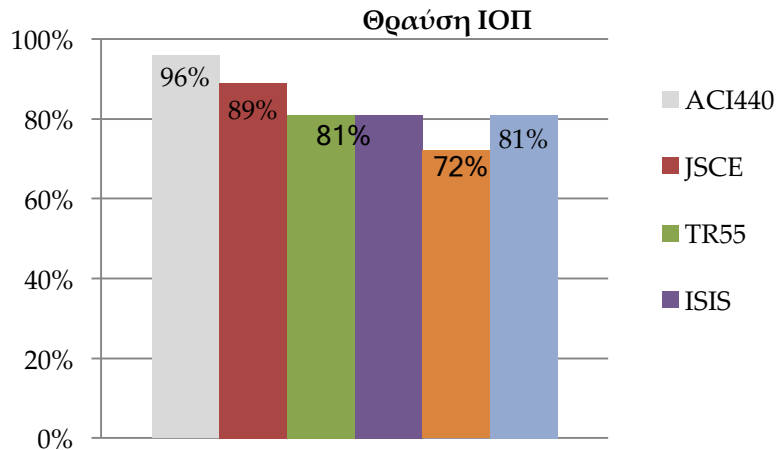
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται διαγράμματα συσχέτισης πειραματικών έναντι θεωρητικών τιμών για δοκούς που αστόχησαν λόγω θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για δοκούς που παρουσίασαν μέγιστη αντοχή κάτω των 100kN οι προβλέψεις των κανονισμών είναι πολύ

καλές εξαιρουμένου του fib. Για δοκούς που παρουσίασαν αυξημένες αντοχές μόνο οι ACI και JSCE έδωσαν πλήρως ασφαλείς προβλέψεις.



Σχήμα 1. Πειραματικές – θεωρητικές τιμές καμπτικών ροπών για δοκούς που αστόχησαν λόγω θραύσης του FRP.

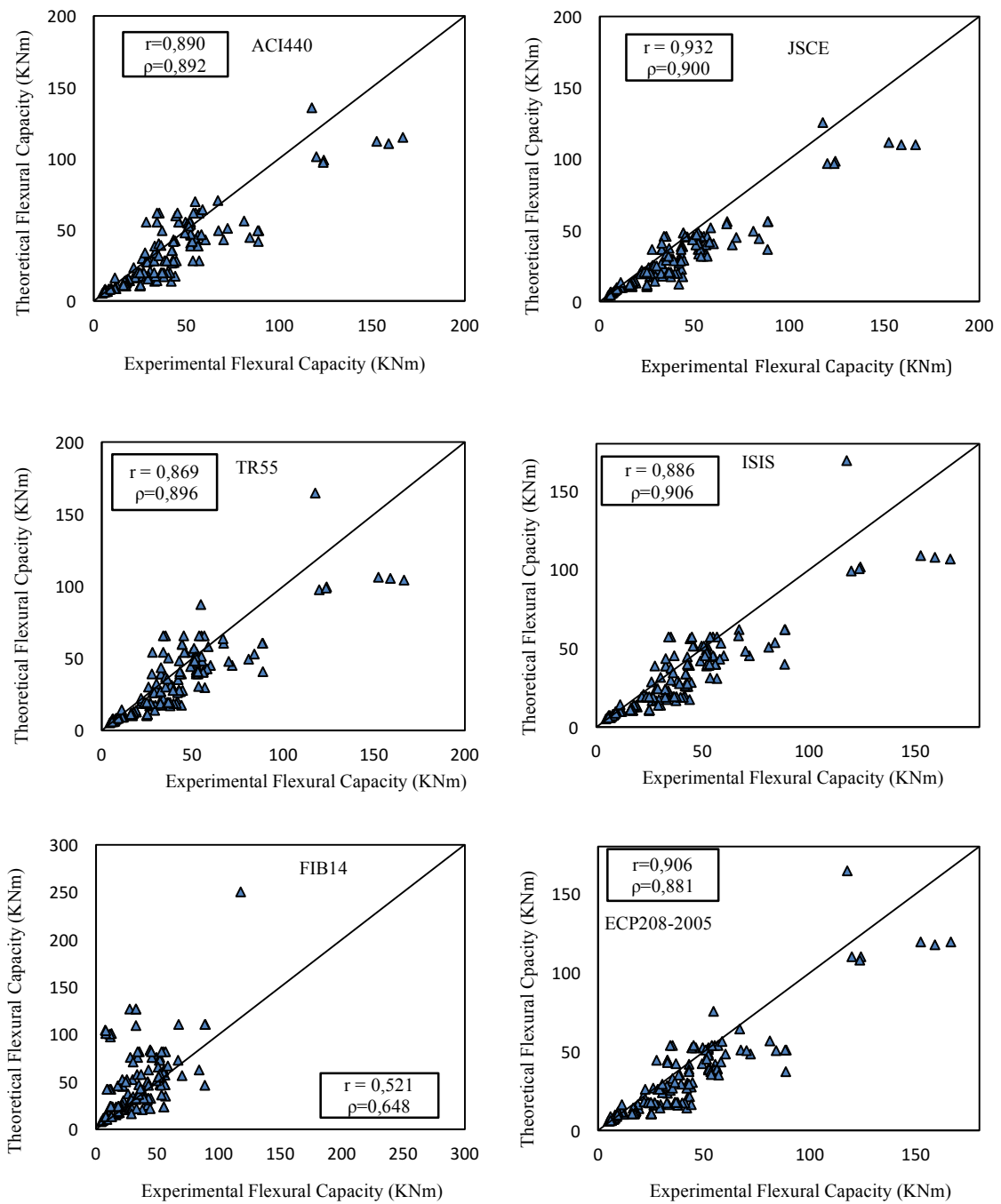
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης κάθε εξεταζόμενου κανονισμού στην περίπτωση αστοχίας που βασίζεται στη θραύση των ΙΟΠ. Ο Αμερικάνικος και ο Ιαπωνικός κανονισμός παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά.



Σχήμα 2. Ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης κάθε κανονισμού στην περίπτωση θραύσης του ΙΟΠ

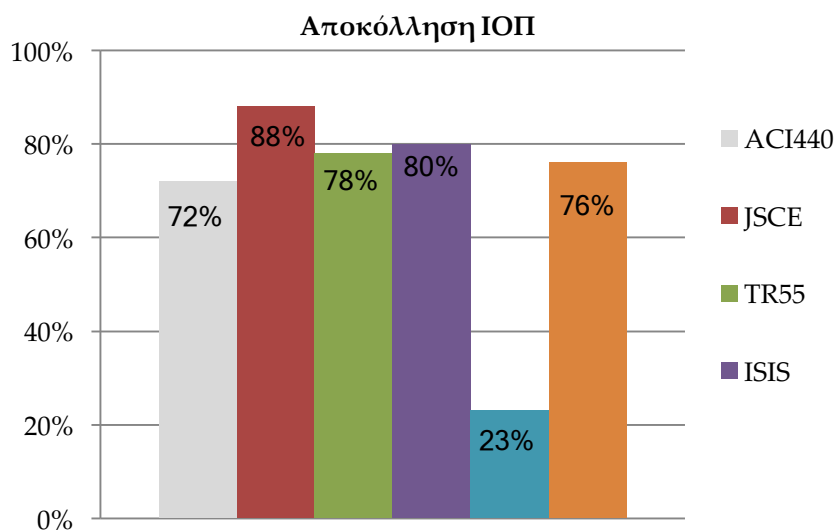
Αποκόλληση Ινοπλισμένων Πολυμερών

Στο Σχήμα 3, παρουσιάζονται τα διαγράμματα πειραματικών-προβλεπόμενων καμπτικών ροπών για τις δοκούς που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού. Με τον τρόπο αυτό αστοχία, αστόχησε το μεγαλύτερο ποσοστό των εξεταζόμενων δοκών (άνω του 50%). Παρατηρήθηκε ότι παρόλο που τα μοντέλα των κανονισμών δημιουργήθηκαν για να προβλέπουν τον τρόπο αστοχίας δοκών ενισχυμένων με CFRP/GFRP, τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά και για τις υπόλοιπες δοκούς του εξεταζόμενου δείγματος. Η σχετική δυσκολία πρόβλεψης της αποκόλλησης φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 3. Οι συντελεστές συσχέτισης είναι συγκριτικά μικρότεροι σε σχέση με την περίπτωση θραύσης των ΙΟΠ και η διασπορά των αποτελεσμάτων μεγαλύτερη. Οι τιμές του συντελεστή Pearson είναι μεγαλύτερες του 0.85 για όλους τους κανονισμούς, εκτός του *fib*. Από τη μορφή των διαγραμμάτων φαίνεται ότι ο Ιαπωνικός κανονισμός παρουσιάζει και πολύ μικρότερη διακύμανση σε σχέση με τη διαγώνιο, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τον πολύ ψηλό συντελεστή Pearson που έφτασε το 0.93. Παρόμοια διαγράμματα σχεδιάστηκαν και για τα υπόλοιπα είδη αστοχίας αλλά δεν παρουσιάζονται λόγω μη επαρκούς χώρου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση αστοχίας λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος όπου όλοι οι κανονισμοί με εξαίρεση τον *fib* –που εμφανίζει ωστόσο ποσοστό 87%- προβλέπουν μέσω των υπολογιστικών τους μοντέλων αστοχία των δοκών με πλήρη ασφάλεια και ιδιαίτερα υψηλούς συντελεστές Pearson και Spearman.



Σχήμα 3. Πειραματικές – θεωρητικές τιμές καμπτικών ροπών για τις δοκούς που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζονται τα ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης που προέκυψαν για αστοχίες που οφείλονται στην αποκόλληση των ΙΟΠ για όλους του εξεταζόμενους κανονισμούς. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται σε μορφή ιστογράμματος, το ποσοστό ασφαλείας, δηλαδή το ποσοστό των δοκών που αστόχησαν με φορτίο μεγαλύτερο του φορτίου σχεδιασμού. Είναι φανερό ότι ο Ιαπωνικός κανονισμός προβλέπει με αρκετή ασφάλεια την αποκόλληση των ΙΟΠ παρότι δε γίνεται διαχωρισμός στους υπολογισμούς βάσει των υλικών ενίσχυσης. Οι υπόλοιποι κανονισμοί παρουσιάζουν ποσοστά κάτω του 80%. Επισημαίνεται ότι η αποκόλληση είναι η συνηθέστερη μορφή αστοχίας στην περίπτωση μη αγκυρωμένων ΙΟΠ, και ιδιαίτερα όταν υπερενισχύονται τα δομικά στοιχεία.



Σχήμα 4. Ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης κάθε κανονισμού στην περίπτωση αποκόλλησης του ΙΟΠ

Διατμητική αστοχία σκυροδέματος – αποκόλληση της επικάλυψης

Στην περίπτωση της διατμητικής αστοχίας του σκυροδέματος στην περιοχή της επικάλυψης του οπλισμού (γνωστή και ως αποκόλληση της επικάλυψης ή cover delamination) που σε πολλές περιπτώσεις μοιάζει με την αποκόλληση του ΙΟΠ, τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα με αυτά της αποκόλλησης του ΙΟΠ, με τον Ιαπωνικό κανονισμό να υπερέχει των υπολοίπων από πλευράς ασφαλείας. Οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης Pearson υπολογίστηκαν ως 0.87 για τον Ιαπωνικό, 0.84 για το *fib*, ενώ κυμάνθηκε άνω του 0.94 και για τους υπόλοιπους κανονισμούς. Η διασπορά όμως των αποτελεσμάτων ήταν τέτοια που οι μόνοι κανονισμοί που έδωσαν ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης άνω του 80% ήταν ο Ιαπωνικός και ο Καναδικός. Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Συντελεστής συσχέτισης και ποσοστά ασφαλούς πρόβλεψης στην περίπτωση αποκόλλησης της επικάλυψης

	ACI	JSCE	ISIS	fib	ECP	TR55
Συντελεστής Pearson	0.95	0.87	0.95	0.84	0.95	0.95
Ποσοστό ασφαλείας	56%	84%	82%	24%	64%	68%

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την στατιστική ανάλυση και τα αποτελέσματα αυτής, συμπεραίνουμε ότι όλοι οι εξεταζόμενοι κανονισμοί (με εξαίρεση τον *fib*) μπορούν να προβλέψουν με αρκετή επιτυχία και σχετική ασφάλεια την αστοχία δοκών ενισχυμένων εξωτερικά με επικολλούμενα σύνθετα υλικά, ανεξάρτητα από τη σύνθεση αυτών. Πολλά από τα μοντέλα δεν κάνουν διαχωρισμό τρόπου αστοχίας και αυτό οδηγεί σε λανθασμένους υπολογισμούς. Τέλος, το μοντέλο σχεδιασμού που παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα, τόσο από άποψη ασφαλείας όσο και γραμμικής συσχέτισης, ήταν αυτό του Ιαπωνικού κανονισμού.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

American Concrete Institute, ACI440.2R-08 “Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures”, American Concrete Institute, (2008)

Canadian Standards Association, ISIS, “Strengthening reinforced concrete structures with externally—bonded fibre reinforced polymers (frps)”, in *Design Manual no. 4*. Canadian Standards Association, (2002)

Egyptian Code of Practice, ECP-208 “Use of fiber reinforced polymer (frp) in the construction fields”, Egyptian Housing and Building National Research Center: Cairo (2005)

fib “Externally bonded frp reinforcement for RC structures”, International Federation of Structural Concrete: Lausanne, (2001)

JSCE “Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets”, Japan Society of Civil Engineers: Tokyo, (2001).

Nanni, A "CFRP strengthening", *Concrete International*, Vol. 19, (1997), 19-23

Papakonstantinou, C.G, and Katakalos, K. "Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with a hybrid inorganic matrix - steel fiber retrofit System" *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.31, (2009), 567-585

Raof, S M, L N Koutas, and D A Bournas, "Textile-reinforced mortar (trm) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of rc beams", *Construction and Building Materials*, Vol.151, (2017), 279-291

Technical Report no. 55 (UK), “Technical Report no. 55 – Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials”, (2000)

Tomlinson, D. and Fam, A., “Performance of concrete beams reinforced with basalt frp for flexure and shear”, *Journal of Composites for Construction*, Vol.19 (2015)