ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΚΟΛΛΟΥΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΓΡΥΛΛΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Επίκουρος Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ, Σεπτέμβριος 2015

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.:	14460/1
Ημερ. Εισ.:	07-09-2017
Δωρεά:	Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΠΜ
	2015
	ΓΡΥ

ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΠΙΚΟΛΛΟΥΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

Flexural strengthening of reinforced concrete with externally bonded Fiber Reinforced Polymers – Comparison of Code Efficiency

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2014-2015. Για την ολοκλήρωση της, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Χ. Παπακωνσταντίνου για την πολύτιμη καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή της.

Επίσης, θέλουμε να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ'όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Ελπίζω, η παρούσα μελέτη να φανεί χρήσιμη σε όσους ενδιαφέρονται για το συγκεκριμένο θέμα των σύνθετων υλικών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη ενισχυμένων με εξωτερικά επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers). Συγκεκριμένα, εξετάζεται η αξιοπιστία επτά διεθνών κανονισμών που περιγράφουν την καμπτική ικανότητα των ενισχυμένων δοκών. Γίνεται σύγκριση των μοντέλων αυτών τόσο από πλευράς ανάλυσης όσο και από πλευράς περιγραφής του τρόπου αστοχίας.

Πραγματοποιήθηκε συγκέντρωση δεδομένων από την διεθνή βιβλιογραφία σχετικών με πειράματα καμπτικής διάταξης που διεξήχθησαν σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με σύνθετα υλικά. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά έγιναν υπολογισμοίκαμπτικής φέρουσας ικανότητας βάση των προαναφερόμενων κανονισμών.Τα υπολογιστικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για άμεση σύγκριση και αξιολόγηση των κανονισμών έναντι τωνπειραματικώναποτελεσμάτων. Τέλος, διερευνήθηκε κατά πόσο επηρεάζει τον τρόπο της αστοχίας το μήκος επικόλλησης του FRP όπως επίσης και εάν επηρεάζεται η αντοχή της ενισχυμένης δοκού από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξωτερικά επικολλούμενου ινοπλισμένου πολυμερούς.

Πίνακας Περιεχομένων

	Ευχαριστίες	
	Περίληψη	
	Περιεχόμενα	
1	Εισαγωγή	4
2	Μέθοδοιενίσχυσης	8
2.1	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος	8
2.2	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με προσθήκη νέων μεταλλικών μελών	9
2.3	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με μείωση του ανοίγματος της δοκού	10
2.4	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με προσθήκη κοχλιωμένου εφελκυόμενου οπλισμού	11
2.5	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με εξωτερική επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων	12
2.6	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με αντικατάσταση εφελκυόμενου οπλισμού με ράβδους FRP	12
2.7	Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με εξωτερικά επικολλούμενα Ινοπλισμένα Πολυμερή (Ι.Ο.Π.)	13
2.7.1	Νόμος της Σύνθεσης (Rule of Mixtures)	15
2.7.2	Λεπτομέρειες εφαρμογής εξωτερικά επικολλούμενων Ινοπλισμένα Πολυμερών (Ι.Ο.Π.)	16
2.7.3	Τρόποι αστοχίας δοκών Ω/Σ με εξωτερικά επικολλούμενα Ινοπλισμένα Πολυμερή (Ι.Ο.Π.)	17
2.7.4	Κανόνες που αποτρέπουν την ανεπιθύμητη αστοχία των ενισχυμένων δοκών με εξωτερικά επικολλούμενα Ινοπλισμένα Πολυμερή (Ι.Ο.Π.)	20
3	Μαθηματικά μοντέλα καμπτικής ικανότητα ενισχυμένων δοκών Ω/Σ	21
3.1	TR55 (Βρετανικός Κανονισμός)	21
3.2	CNR DT-200 (Ιταλικός Κανονισμός)	24
3.3	ECP 208 (Αιγυπτιακός Κανονισμός)	29
3.4	JSCE (Ιαπωνικός Κανονισμός)	34
3.5	ISIS (Καναδικός Κανονισμός)	39
3.6	ACI440 (Αμερικανικός Κανονισμός)	42
3.7	FIB14 (Διεθνής Κανονισμός)	49
3.8	Σύγκριση Κανονισμών	56
4	Ανάλυση αποτελεσμάτων	67
4.1	Μεθοδολογία Έρευνας	67
4.1.1	Παραδοχές	69
4.2	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	74
5	Συμπεράσματα	96
6	Βιβλιογραφία	99
	Παράρτημα	

1.Εισαγωγή

Η συντήρηση, επισκευή και αναβάθμιση των φερόντων μελών είναι ίσως από τα πιο κρίσιμα προβλήματα στις εφαρμογές πολιτικού μηχανικού.Παρ' όλα αυτά ένας μεγάλος αριθμός κατασκευών του παρελθόντος, που υλοποιήθηκαν σύμφωνα με παλιούς κανονισμούς σε διάφορα μέρη του κόσμου είναι στατικώς μη ασφαλή σε σύγκριση με τις επιταγές των νεότερων κανονισμών ωπλισμένου σκυροδέματος

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η αντικατάσταση των ανεπαρκών μελών μιας κατασκευής είναι οικονομικά και χρονικά ασύμφορη, η ενίσχυση αυτού του είδους των κατασκευών έχει γίνει ένας λογικά αποδεκτός τρόπος βελτίωσης

(1) Της ικανότητας τους να αναλάβουν φορτία και
(2) Της μεγιστοποίησης του χρόνου ζωής τους και λειτουργίας τους (servicelife)

Η καταστροφή και αποσύνθεση των διαφόρων έργων υποδομής η οποία προκλήθηκε από πρόωρη αλλοίωση των κτηρίων και των κατασκευών μας οδήγησε στην ανάπτυξη μεθόδων και διαδικασιών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυση τους

Όσον αφορά αυτού του είδους τις ενισχύσεις αποτελεί μια πρόκληση η επιλογή του τρόπου - μεθόδου ενίσχυσης της κατασκευής η οποία θα επαυξήσει τόσο την οριακή αντοχή(ultimate limit state ULS) όσο και την λειτουργικότητα (service limit state) μιας κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τους επακόλουθους περιορισμούς οι οποίοι είναι (α) η κατασκευασιμότητα (constructability), τις ανάγκες λειτουργίας του κτηρίου (building operations) καθώς και τον οικονομικό προϋπολογισμό(budget) του έργου.

Η στατική ενίσχυση μπορεί να απαιτείται λόγω των παρακάτω διαφορετικών περιπτώσεων:

(1). Η κατασκευή απαιτείται να ενισχυθεί σε περίπτωση που χρειάζεται να τοποθετηθούν μεγαλύτερα φορτία λόγω αλλαγής χρήσης της κατασκευής και κατ επέκταση αλλάζουν και οι ανάγκες της για ικανότητα (capacity). Συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου η κατασκευή απαιτείται να φέρει επιπλέον μηχανολογικό εξοπλισμό, συστήματα αρχειοθέτησης ή άλλα βαριά αντικείμενα.

(2). Στην περίπτωση όπου απαιτείται ενίσχυση του φέροντα οργανισμού (Φ.Ο.) με σκοπό την αντίσταση σε φορτία τα οποία δεν είχαν ληφθεί υπ' όψιν στον αρχικό σχεδιασμό. Παράδειγμα τέτοιων φορτίων είναι οι φορτίσεις έναντι ανέμου, σεισμικών φορτίων, καθώς και φορτίων από εκρήξεις.

(3)Επιπλέουσα αντοχή χρειάζεται λόγω της ανεπάρκειας της ικανότητας της κατασκευής να φέρει τα αρχικά φορτία σχεδιασμού. Τα χαρακτηριστικά μιας τέτοιας κατασκευής είναι η αλλοίωση των μελών της (π.χ. λόγω διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού και ανεπαρκούς κατάστασης της διατομής σκυροδέματος), στατικής φθοράς(π.χ. λόγω υπερβολικών κινητών φορτίων, εκτεταμένης χρήσης καθώς και λόγω γεγονότων πυρκαγιάς) ή λόγω σφαλμάτων στον αρχικό σχεδιασμό η την κατασκευή. (πχ λόγω ανεπαρκούς οπλισμού, αντοχής σκυροδέματος ή άλλων κακοτεχνιών).

Υπό αυτές τις συνθήκες κάθε έργο ενισχύσεων έχει τους δικούς του περιορισμούς και ανάγκες. Με δεδομένα τους περιορισμούς του χώρου, της κατασκευσιμότητας αλλά και τις απαιτήσεις σε αντοχή καθώς και κάθε φύσεως περιορισμό, κάθε έργο απαιτεί δημιουργικότητα με σκοπό την εύρεση μιας λύσεως ενίσχυσης.

Η πλειονότητα των περιπτώσεων των στατικών ενισχύσεων εμπεριέχει την ικανότητα του στατικού μέλους να αντισταθεί με ασφάλεια σε μία η περισσότερες εσωτερικές δυνάμεις που προκλήθηκαν από την φόρτιση: είτε αυτή είναι ορθή είτε διατμητική είτε στρεπτική. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με δύο τρόπους είτε μειώνοντας το μέγεθος αυτών των δυνάμεων είτε βελτιώνοντας την αντίσταση του μέλους σε αυτές. Οι τυπικές μορφές ενισχύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη βελτιωμένης αντοχής και λειτουργικότητας υπαγορεύουν επεμβάσεις που αφορούν την μεγέθυνση της διαθέσιμης διατομής (section enlargement) , είτε την τοποθέτηση εξωτερικού οπλισμού (externally bonded reinforcement) είτε την μετένταση του στοιχείου (post-tensioning), είτε την τοποθέτηση πρόσθετων στηρίξεων.(Nishikant Dash, 2009)

Τα συστήματα ενισχύσεων μπορούν να βελτιώσουν την αντίσταση των υφιστάμενων κατασκευών όσον αφορά τις εσωτερικές δυνάμεις είτε με παθητικό είτε με ενεργητικό τρόπο.

Τα παθητικά συστήματα ενίσχυσης (Passive Strengthening Systems) μπορούν τυπικά να ενεργοποιούνται σε περιπτώσεις όπου επιβάλλονται πρόσθετα φορτία στην κατασκευή την στιγμή της εγκατάστασης αυτών. Η τοποθέτηση χαλύβδινων πλακών (bonding steel plates) η ινοπλισμένων πολυμερών (fiber-reinforced polymer composites) πάνω στα φέροντα μέλη.

Τα συστήματα ενεργητικής ενίσχυσης (Active Strengthening Systems) τυπικά ενεργοποιούνται στιγμιαία (instantaneously) και μπορούν να επιτευχθούν με την εισαγωγή εξωτερικών δυνάμεων στο μέλος που αλληλεπιδρούν στα φαινόμενα των εσωτερικών δυνάμεων. Παραδείγματα τέτοιου είδους συστημάτων είναι η επιβολή συστημάτων εξωτερικής μετέντασης (post-tensioning) η τοποθέτηση γρύλου στο μέλος για να ανακουφίσει ή να μεταφέρει τα ήδη υπάρχοντα φορτία. Ανεξαρτήτως όμως

της επιλογής συστήματος παθητικής ή ενεργητικής ενίσχυσης η κύρια πρόκληση που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι η επίτευξη σύνθετης συμπεριφοράς ανάμεσα τόσο στην υφιστάμενη κατασκευή όσο και στα νέα στοιχεία ενίσχυσης.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για ενίσχυση απαιτεί την προσεκτική θεώρηση πολλών παραγόντων όπως επίσης και των ακόλουθων ζητημάτων που πηγάζουν από άποψη ζητημάτων μηχανικού.(Nishikant Dash, 2009)

- Το μέγεθος της πρόσθετης αντοχής των μελών
- Την επίδραση των αλλαγών στην σχετική δυσκαμψία των μελών
- Το μέγεθος του έργου (π.χ. η εφαρμογή μεθόδων που χρησιμοποιούν ειδικού τύπου υλικά και διαδικασίες αποβαίνει τελικά λιγότερο αποτελεσματική από άποψη κόστους σε μικρής κλίμακας έργα)
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. η εφαρμογή μεθόδων που προϋποθέτουν την χρήση κολλητικών ουσιών μπορεί να είναι μη κατάλληλες για εφαρμογές σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες ή η εφαρμογή μεθόδων εξωτερικού οπλισμού μπορεί να μην είναι κατάλληλη για περιβάλλον που ευνοείται η διάβρωση του σιδήρου.
- Η επιτόπου αντοχή του σκυροδέματος και η ακεραιότητα του υποστρώματος (η αποτελεσματικότητα των μεθόδων που βασίζονται στον δεσμό και την συνύπαρξη του ήδη παρόντος σκυροδέματος να μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με σκυρόδεμα χαμηλής ποιότητας.
- Περιορισμοί όσον αφορά τις διαστάσεις και την εξυγίανση. Για παράδειγμα η μεγέθυνση της διατομής μπορεί να περιοριστεί στο βαθμό στον οποίο αυτήμπορεί να επηρεάζεται από τον περιβάλλοντα καθαρό χώρο/επιφάνεια.
- Προσβασιμότητα
- Λειτουργικοίπεριορισμοί (αφορούν το γεγονός κατά το οποίο μια διαρκέστερη κατασκευή/ενίσχυση μπορεί να είναι λιγότερο επιθυμητή για εφαρμογές όπου οι λειτουργίες του κτηρίου πρέπει να ανασταλούν κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης.
- Διαθεσιμότητα των υλικών, εξοπλισμού και ικανών αρμόδιων εργολάβων.
- Κόστος κατασκευής, κόστος συντήρησης και κόστη κύκλου ζωής (life cycle costs)
- Δοκιμαστικές φορτίσεις που θα επιβεβαιώσουν την ήδη υπάρχουσα ικανότητα η θα αξιολογήσουν τις νέες τεχνικές και τα υλικά.

Όσον αφορά στο πρόβλημα της κάμψης ένας σχετικά εύκολος και αποτελεσματικός τρόπος για να ενισχυθούν οι δοκοί είναι η επικόλληση στην εφελκυόμενη παρειά της δοκού ινοπλισμένων πολυμερών. Βέβαια η πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς των δοκών

κυρίως από πλευράς τρόπου αστοχίας είναι κρίσιμη σε επίπεδο αρχικού σχεδιασμού αλλά και γενικότερης ανάλυσης της συμπεριφοράς της. Η χρήση ενός ευρέως φάσματος υλικών με ποικίλες ιδιότητες δημιουργεί δυσκολίες στη χρήση αναλυτικών μοντέλων και δημιουργία κανονισμών για σχεδιασμό των ενισχύσεων. Επιπρόσθετα πάρα πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ρητίνη που χρησιμοποιείται σαν μήτρα των ινοπλισμένων πολυμερών.

Με την παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης των διαθέσιμων διεθνών κανονισμών σχεδιασμού, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από πειραματικά δεδομένα έναντι, των αποτελεσμάτων που υπολογίζονται με βάση, τα μαθηματικά μοντέλα που προτείνουν.

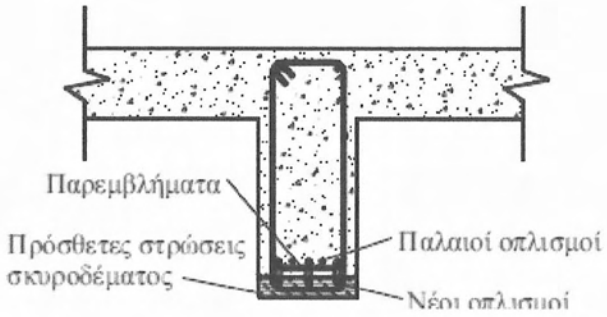
2.Μέθοδοι Ενίσχυσης

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι καμπτικής ενίσχυσης υφιστάμενων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Οι κλασικές μέθοδοι περιλαμβάνουν εκτοξευόμενο και έγχυτο σκυρόδεμα και χρήση πρόσθετου χαλύβδινου οπλισμού ράβδων ή ελασμάτων. Πιο αναλυτικά οι μέθοδοι παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια.

2.1 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος

Η λογική αυτής της ενίσχυσης βασίζεται στην ανάγκη μας να αυξήσουμε συνολικά την ικανότητα της διατομής μέσω της αύξησης των διαστάσεων της.

Αυτού του είδους η βελτίωση υλοποιείταιμε την ενίσχυση των εφελκυόμενων πελμάτων πιθανώς με νέους διαμήκεις χαλύβδινους οπλισμούς που καλύπτονται απόεκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε όλο το πλάτος της δοκού προκειμένου να πληρούνται τα κριτήρια του. Το συνολικό πάχος των πρόσθετων στρώσεων (μανδύες) είναι της τάξεως των 7-10 cm. Για την ενίσχυση του μέλους με αυτή την μέθοδο απαραίτητη προϋπόθεσηείναι η αποφόρτιση της ενισχυόμενης δοκού στον μέγιστο δυνατό βαθμό.Για την επίτευξη συνεργασίας παλιού και νέου σκυροδέματος απαιτείται τόσο εκτράχυνση της επιφάνειας του παλιού και του νέου σκυροδέματος όσο και συγκόλληση παρεμβλημάτων ανάμεσα στους παλιούς και στους νέους οπλισμούς.



Σχήμα 2.1: Ενίσχυση δοκού με μανδύες(Σπυράκος 2004)

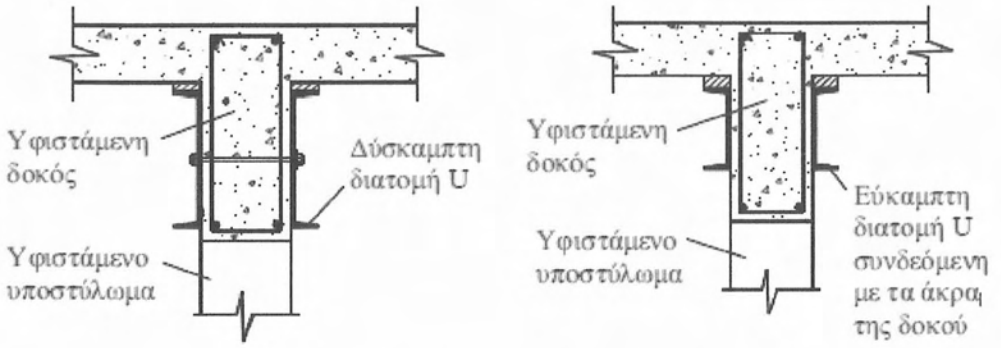
Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η καλαίσθητη εμφάνιση του τελικού αποτελέσματος της ενισχυμένης δοκού και η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου επιβάλλεται σε περίπτωση όπου το έργο ενίσχυσης επιτάσσει υψηλή αισθητική.

Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι (1) η συστολή ξήρανσης στην οποία υπόκειται το σκυρόδεμα μέχρι να λάβει την τελική του αντοχή και (2) η πιθανότητα διάβρωσης του νέου οπλισμού και των βλήτρων που βρίσκονται σε επαφή με το παλαιό σκυρόδεμα λόγω της ηλεκτροχημικής διαβρώσεως του σκυροδέματος.

2.2 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με προσθήκη νέων μεταλλικών μελών

Αυτού του είδους η ενίσχυση συνίσταται όταν η ασφαλής παραλαβή των φορτίων γίνεται είτε από τα ίδια αλλά ενισχυμένα μέλη σκυροδέματος είτε από πρόσθετα μέλη που αναλαμβάνουν να ανακουφίσουν τις ήδη υπάρχουσες δοκούς Ω/Σ χωρίς να απαιτείται περεταίρω ενίσχυση.

Στην πρώτη περίπτωση στις ήδη υφιστάμενες δοκούς προστίθενται δύσκαμπτες μεταλλικές διατομές U σε κάθε πλευρά της υφιστάμενης δοκού οι οποίες αναμένεται να συνεισφέρουν εξίσου στην παραλαβή των φορτίων της πλάκας. Για να επιτευχθεί αυτή η συνεισφορά συνίσταται η σύνδεση του με αγκύρια που διαπερνούν το σώμα της δοκού Ω/Σ και κοχλιώνονται στις ακραίες μεταλλικές δοκούς.



Σχήμα 2.2: Ενίσχυση δοκού με πρόσθετα μεταλλικά μέλη (Σπυράκος 2004)

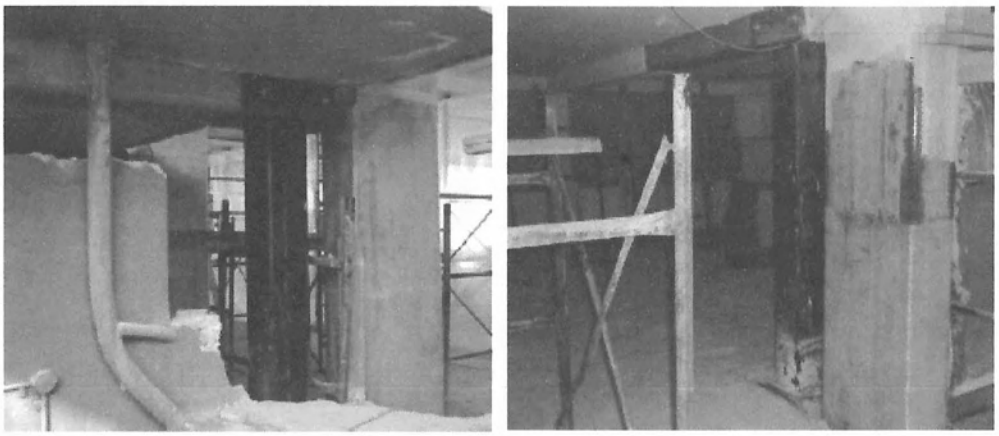
Μία παρόμοια τεχνική στο ίδιοπνεύμαεπεμβάσεωςείναι η ενίσχυση της δοκού με εύκαμπτες διατομές U πλευρικά στις δύο παρειές της δοκού αλλά με σύνδεση των διατομών με την δοκό Ω/Σ μόνο στα άκρα τους. Η ασφαλή παραλαβή των φορτίων γίνεται με σφήνες που θα οδηγήσουν τα φορτία στις πρόσθετες νέες διατομές

Στην δεύτερη περίπτωση γίνεται μέριμνα ώστε τα φορτία να παραλαμβάνονται απόπρόσθετα μεταλλικά μέλη τα οποία τοποθετούνται μεταξύ των υφιστάμενων δοκών στο μεσοδιάστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο το φορτίο μοιράζονται τα φορτία της πλάκας και αυξάνεται συνολικά η φέρουσα ικανότητα τόσο της πλάκας αλλά και του συστήματος των δοκών.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ η χρήση μεταλλικών στοιχείων αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα ανάληψης φορτίων λόγω της ανθεκτικότητας σε κάμψητων διατομών του χάλυβα, δεν αποτελεί βέλτιστη λύση όταν οι δοκοί πρέπει να έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε πυροπροστασία ή όταν η αισθητική του έργου επιβάλει την παρουσία σκυροδέματος. Επίσης μειονέκτημαείναι το υψηλό κόστος μεταφοράς του χάλυβα σε σχέση με το σκυρόδεμα.

2.3 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με μείωση του ανοίγματος της δοκού

Όταν τα διαγράμματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι καμπτική αντοχή της δοκού δεν επαρκεί για τις απαιτήσεις της νέας κατάστασης μιας δοκού της κατασκευής ένας δόκιμο τρόπος για να μειώσουμε κατά κάποιο τρόπο την επίδραση των φορτίσεων στην δοκόείναι η αλλαγή του στατικού της συστήματος. Η βασική ιδέα που επιδρά ριζικά στο κυρίως στατικό σύστημα της δοκούείναι η μείωση του ανοίγματος της δοκού με κάποιο νέο υποστύλωμα. Το νέο υποστύλωμαμπορεί να είναι μία μεταλλική διατομή που αγκυρώνεται που θα αγκυρώνεται με ένα ζεύγος αγκυρίων στα υφιστάμενα μέλη. Μειονέκτημα αυτής τη μεθόδου είναι ότι έχουμε μείωση του ανοίγματος και σοβαρή απώλεια ωφέλιμου χώρου.



Σχήμα 2.3: Μείωση ανοίγματος με μεταλλικά στοιχεία (Σπυράκος 2004)

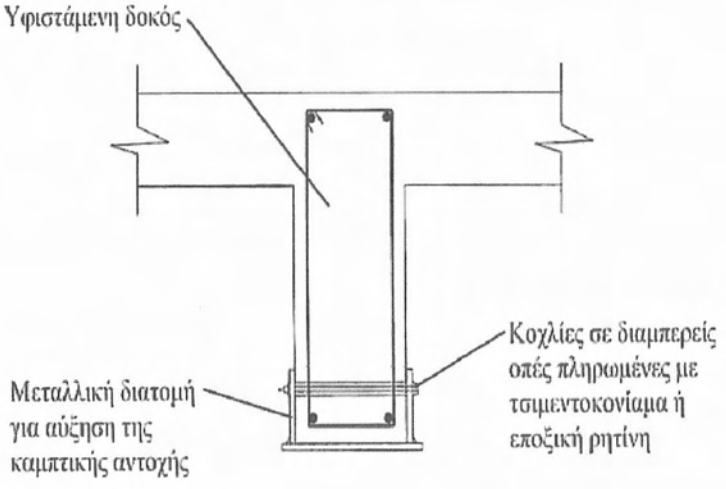
Η απώλεια του ωφέλιμου χώρου μειώνεται κατά κάποιο τρόπο εάν εναλλακτικά χρησιμοποιήσουμε διαγώνιους μεταλλικούς συνδέσμουςαπό την βάση των ήδη υφιστάμενων υποστυλωμάτων οι οποίοι θα καταλήγουν σε ορισμένο σημείο κάτω από την παρειά της δοκού. Επίσης μια ιδέα είναι η τοποθέτηση μεταλλικών ενισχύσεωνμειώνοντας έτσι δραστικά την απώλεια ωφέλιμου χώρου κάτω από τα άκρα της δοκού.

Πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότιείναιη γρήγορη υλοποίηση των ενισχύσεων και η άμεση σχεδόν παράδοση του χώρου ενίσχυσης.Αυτό απαιτείται σε περιπτώσεις όπου οι ανάγκες του έργουαπαιτούν την γρήγορη παραλαβή του ενισχυμένου φορέα.

Το κυριότερο μειονέκτημα των δυο παραπάνω μεθόδων είναι ότι θυσιάζουν μέρος του ωφέλιμου χώρου κάτω από τις ενισχυόμενες δοκούς. Αυτό δεν ενδείκνυται όταν ο χώρος είναι εξαιρετικά περιορισμένος για τις ανάγκες του πελάτη.

2.4 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με προσθήκη κοχλιωμένου εφελκυόμενου οπλισμού

Η αύξηση της καμπτικής αντοχής μια δοκούμπορεί να γίνει επίσης με τοποθέτηση χαλύβδινων ελασμάτων η ακόμα και συγκολλητών μεταλλικών διατομών που κοχλιώνονται πάνω στην δοκό. Βέβαια για την χρήση κοχλιών απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά την θέση για την διάνοιξη των οπών που θα τοποθετηθούν οι κοχλίες. Το μέγεθος και η απόσταση των κοχλιών αυτών εξαρτώνται από το μέγεθος των φορτίων σχεδιασμού που παραλαμβάνει το σκυρόδεμα στις θέσεις των συνδέσεων μέσω της εφελκυστικής και της διατμητικής αντοχής των κοχλιών.Συνίσταται η θέσης της οπής να είναι σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από τον άξονα του διαμήκους οπλισμού.



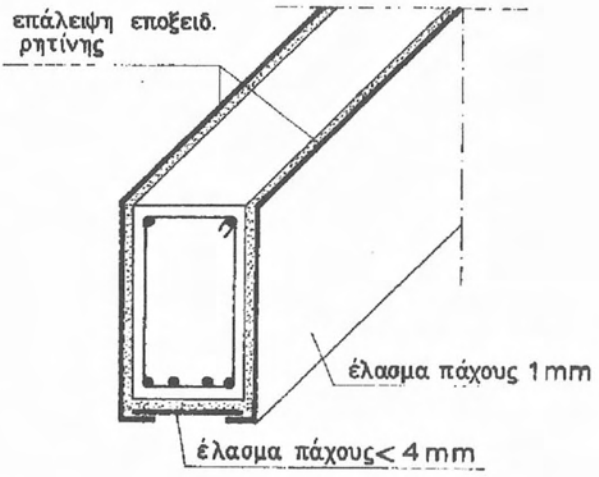
Σχήμα 2.4: Δοκός με κοχλιωμένο εφελκυόμενο οπλισμό(Σπυράκος 2004)

Πάνω στην ίδια φιλοσοφία είναι εφικτή η κοχλίωση των μεταλλικών ελασμάτων στην κάτω παρειά της δοκού με χρήση κατακόρυφων χημικών αγκυρίων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την χρήση αυτής μεθόδου είναι η σάρωση της διατομής σκυροδέματος και ιδιαίτερα της θέσης του

εφελκυόμενου διαμήκους οπλισμού της διατομής ώστε να μην τραυματιστεί ο ήδη υπάρχων οπλισμός.

2.5 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με εξωτερική επικόλληση χαλύβδινων ελασμάτων

Πρόκειται για μία μέθοδο όπου η επικόλληση γίνεται με εποξειδική ρητίνη. Πρόκειται συνήθως για λεπτά χαλύβδινα ελάσματα που μπορούν να τοποθετηθούν στο εφελκυόμενο πέλμα των δοκών , στις κατακόρυφες παρειές τους αλλά και στους κόμβους.

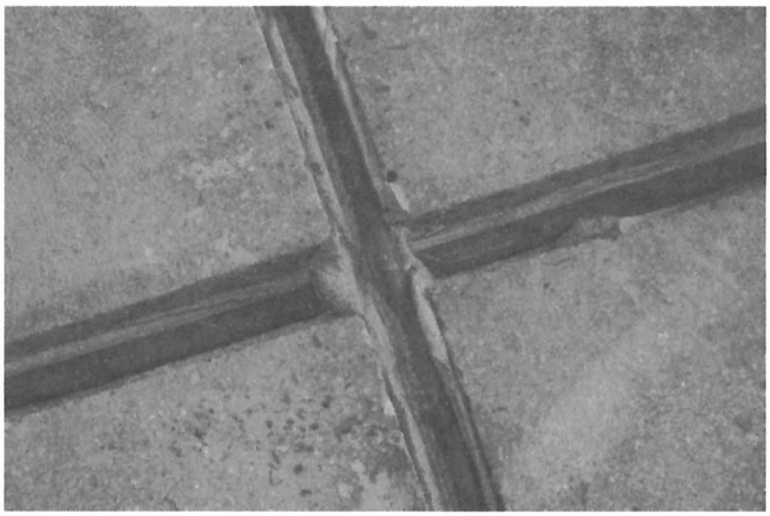


Σχήμα 2.5: Εξωτερική επικόλληση μεταλλικών ελασμάτων (Πενέλης, Κάππος 1999)

Η επικόλληση τω ελασμάτων γίνεται με διαδοχικές επαναλήψεις κόλλησης του ενός ελάσματος την φορά. Συγκεκριμένα μετά την κόλληση του ενός με εποξειδική ρητίνη υψηλού ιξώδους ακολουθεί η συμπίεση του ελάσματος με βίδες σύσφιξης με σκοπό την σωστή κόλληση τουλάχιστον για 24 ώρες και στη συνέχεια η επικόλληση του επόμενου και κ.ο.κ.

2.6 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με αντικατάσταση εφελκυόμενου οπλισμού με ράβδους FRP

Η χρήση εφελκυόμενου οπλισμού κοντά στην επιφάνεια του στοιχείου (Near Surface Mounted-N.S.M.) από ράβδους ΙΟΠ (FRP rods) είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την αύξηση της καμπτικής ικανότητας του ενός στοιχείου.



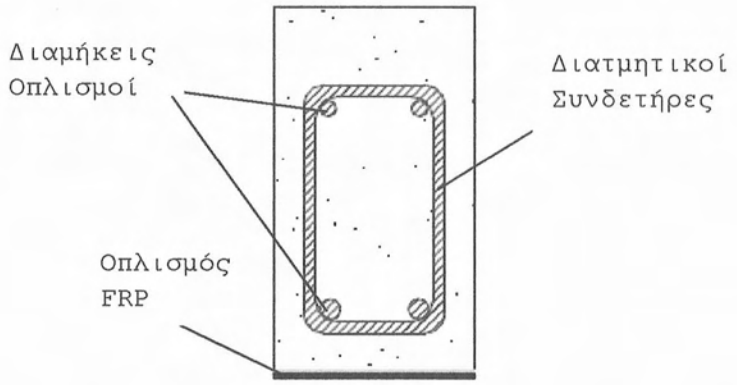
Σχήμα 2.6: Ράβδοι ΙΟΠ (FRP Rods)(images.google.com)

Για την υλοποίηση της μεθόδου απαιτείται η δημιουργία αυλακιού στην επικάλυψη του εφελκυόμενου πέλματος του στοιχείου κατά μήκος του άξονα που ενεργεί η κάμψη.Μετά την διάνοιξη του αυλακιού γεμίζεται κατά το ήμισυ το αυλάκι καθ'ύψος με εποξειδική πάστα και με μικρή πίεση τοποθετείται η ράβδος απόFRP (FRProd). Με αυτό τον τρόπο γίνεται ομοιόμορφη κατανομή της πάστας σε όλο το αυλάκι. Τέλος προστίθεται επιπλέον πάστα στο αυλάκι εάν αυτό είναι απαραίτητο για την πλήρωση του και πλέον η επιφάνεια είναι έτοιμη για οριζοντίωση (αλφάδιασμα). Για την συνεργασία των ράβδων απαιτείται αγκύρωση τους στα άκρα.

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τόσο η καλύτερη αγκύρωση τους στα γειτονικά μέλη των δοκών όσο και ο μικρός χρόνος εγκατάστασης του. Αποτελεί ελκυστική λύση για την καμπτική ενίσχυση σε καταστάσεις όπου ο εξωτερικός οπλισμός θα υπόκειτο σε μηχανική και περιβαλλοντική φθορά, αλλά και σε καταστάσεις όπου το φινίρισμα και η αισθητική εμφάνιση των επιφανειών είναι απαίτηση του έργου ενίσχυσης.

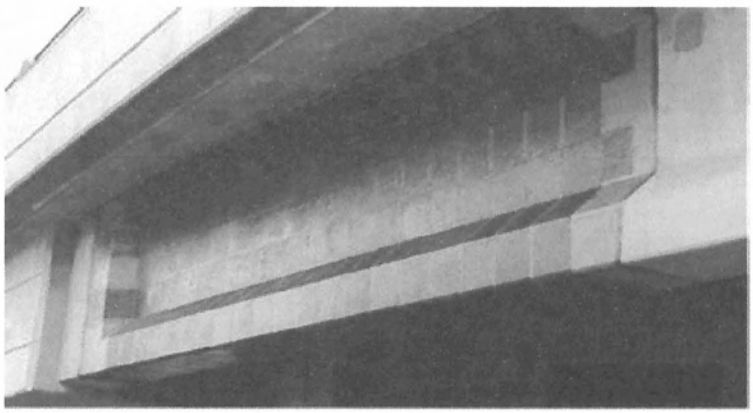
2.7 Καμπτική Ενίσχυση δοκών Ω/Σ με Εξωτερικά επικολλούμεναΙνοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

Για τις ανάγκες της καμπτικής ενίσχυσης δοκών οπλισμένου σκυροδέματος μία ενδεδειγμένη λύση είναι η τοποθέτηση εξωτερικού επιπλέον οπλισμού στη δοκό από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP).



Σχήμα 2.7:Διατομή Ω/Σ Ενισχυμένη με εξωτερικά επικολλούμενα ΙΟΠ

Η χρήση του σύνθετου υλικού ΙΟΠ είναι εξαιρετικά υποσχόμενη λύση καθώς οι μηχανικές και άλλες ιδιότητες τους συνιστούν μία καλή λύση για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 2.8:Δοκός Ω/Σ Ενισχυμένη με εξωτερικά επικολλούμενα ΙΟΠ

Συγκεκριμένα παρουσιάζουν εξαιρετικά καλή αντίσταση στην διάβρωση πράγμα το οποίο είναι πολύ χρήσιμο όπου το έργο μας πρόκειται να εκτεθεί σε εχθρικά περιβάλλοντα ως προς την χημική διάβρωση καθώς και λόγω της εξαιρετικής ανθεκτικότητας τους σε εφελκυσμό. Επομένως είναι μία αρκετά καλή λύση για την επίτευξη περίσσειας αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το σκυρόδεμα το οποίο υποφέρει συγκριτικά σε καταστάσεις εφελκυσμού.

Το FRP είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδίου και πολυμερικής μήτρας (πχ εποξειδική ρητίνη).Οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού εξαρτώνται από τις αντίστοιχες ιδιότητες των ινών, της μήτρας, καθώς και την αναλογία ποσοτήτων ινών-μήτρας όπως επίσης και από την κατεύθυνση των ινών του FRP. Σύμφωνα με

την μικρομηχανική των σύνθετων υλικών για να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες τουσύνθετου υλικού πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν.

2.7.1 Νόμος της Σύνθεσης (RuleofMixtures)

Ο Νόμος της Σύνθεσης (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής των ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο νόμος της σύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$v_f + v_m + v_u = 1 \tag{2.1}$$

$$w_f + w_m = 1 \tag{2.2}$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \tag{2.3}$$

v_f, v_m, v_u οι λόγοι όγκου των ινών της ρητίνης και των κενών αντίστοιχα όπου ο όγκος του καθενόςείναι

όπου

$$v_i = \frac{V_i}{V} \tag{2.4}$$

όπου

V ο συνολικός ογκος του συνθετου υλικού

V_i ο ογκος του καθενός συστατικού του συνθετου υλικού

Επίσης

$w_f, w_m,$ οι λόγοι βάρους των ινων της ρητίνης αντίστοιχα όπου το βάρος του καθενός είναι

$$w_i = \frac{W_i}{W} \tag{2.5}$$

όπου

W το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού

W_i το βάρος του καθενός συστατικού του σύνθετου υλικού

Τέλος ρ_f, ρ_m, ρ_cοι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και του σύνθετου υλικού αντίστοιχα.

Επίσης η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού Eμε το μέτρο ελαστικότητας των ινώνE_f και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας E_mείναι η εξής.

$$E = E_f v_f + E_m v_m \tag{2.6}$$

Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη απόαυτή του συνδετικού υλικού του.Πρακτικά η αστοχία της ίνας συνεπάγεται αστοχία του σύνθετου υλικού.

Η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικούs δίνεται απο τον παρακάτω τύπο.

$$s = s_f v_f + s_m v_m \tag{2.7}$$

όπου

s_f η εφελκυστική αντοχή της ίνας

s_m η εφελκυστική αντοχή της μήτρας

2.7.2 Λεπτομέρειες Εφαρμογής εξωτερικά επικολλούμενων ΙΟΠ σε δοκούς Ω/Σ

Η επικόλληση του σύνθετου υλικού γίνεται για καμπτική ενίσχυση στα εφελκυόμενα πέλματα δοκών και πλακών οπλισμένου σκυροδέματος με την χρήση κόλλας ακρυλικής, εποξειδικής ή ουρεθανικής. Οι εκάστοτε ανάγκες του έργου πολλές φορές υπαγορεύουν την κατάλληλη επιλογή κόλλας (μήτρας). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι εποξειδικές κόλλες προσφέρουν υψηλή πρόσφυση με αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι ακρυλικές παρέχουν μέτρια αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες, καλή αντοχή με ταχεία ωρίμανση (πήξη).

Ωστόσο η επίτευξη αποτελεσματικού δεσμού της διεπιφάνειας μήτρας σκυροδέματος είναι μία διαδικασία η οποίαεπιβάλει ιδιαίτερη προετοιμασία και προσοχή.Για την επίτευξηαυτή χρειάζεται η προετοιμασία της επιφάνειας δηλαδή η απομάκρυνση από αυτήν αδύναμων η ενανθρακωμένων στρώσεων, καθώς και η εξομάλυνση της έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή. Η προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει περισσότερο στην μακρόχρονη συμπεριφορά του δομικού στοιχείου παρά στην βραχύχρονη και προφυλάσσοντας το στοιχείο στην πάροδο του χρόνου. Η προετοιμασία αυτή πρέπει να γίνει με προσοχή χωρίς να προκληθούν ακούσια μικρορωγμές η άλλες βλάβες στην υποκείμενη

στρώση από σκυρόδεμα που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της αντοχή της.Σε περίπτωση ύπαρξης οπών,μεγάλων κενών αλλά και ρωγμών μεγάλου εύρους είναι αναγκαία η πλήρωση τους με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινενέσεις πριν την εφαρμογή της κολλητικής ουσίας του σύνθετου υλικού. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά έχουμε την δημιουργίας μιας υγιούς στρώσης σχετικά ομοιόμορφου πάχους που πρακτικά μπορεί να μεγιστοποιήσει την ικανότητα μεταφοράς διατμητικής τάσης.Μετάαπόαυτή την ιδιαίτερα χρήσιμη διαδικασία μπορεί να γίνε εφαρμογή του σύνθετου υλικού στην επιφάνεια σκυροδέματος.Συνοπτικά και για λόγους πληρότητας παρατίθενται παρακάτω:(Σπυράκος, 2004)

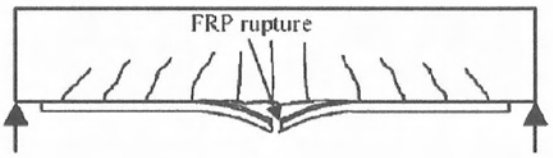
- Καθαίρεση επιχρίσματος
- Αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση κατάλληλης μεθόδου
- Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση της επιφάνειας, λάξευση γωνιών κλπ)
- Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξειδική ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Συνίσταται η πλήρης επαφή του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου.Στην περίπτωση χρήσης υλικών τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων όπου απαιτείται (τοιχία, άνωπαρειές δοκών κλπ)
- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με την μελέτη επισκευής/ενίσχυσης
- Μετά τη σκλήρυνση του συστήματος (περίπου μετά από 24 ώρες) εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με βάση τις αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις

2.7.3. Τρόποι Αστοχίας Δοκών Ω/Σ ενισχυμένων με εξωτερικά επικολλούμενα ΙΟΠ

Τα διάφορα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η τεχνική ενίσχυσης των δοκών έχει δώσει κίνητρα για πολλές ερευνητικές μελέτες πάνω στην μελέτη της συμπεριφοράς των μελών που ενισχύονται με αυτή την τεχνική.

Οι διάφορες μελέτες έδειξαν ότι οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας που προκύπτουν από τα διάφορα πειράματα ενισχυμένων δοκών που διεξάγονται είναι οι ακόλουθες:

Καμπτική Αστοχία λόγω θραύσης του συστήματος ΙΟΠ (FRP Rupture)



Σχήμα 2.9:Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω θραύσης του ΙΟΠ (Smith et al.,2001)

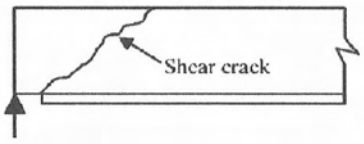
Η καμπτική αστοχία μιας ενισχυμένης δοκού με FRP χαρακτηρίζεται από θραύση του ΙΟΠ λόγω της τάνυσης του εφελκυόμενου πέλματος. Προηγείται ανάπτυξη ρωγμών λόγω του εφελκυσμού του σκυροδέματος στην εφελκυόμενη ζώνη. Στο Σχ. 2.7 φαίνεται ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας κατά τον οποίο η αστοχία επέρχεται με θραύση του ΙΟΠ.

Καμπτική Αστοχία λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος (Concrete Crushing)

Σχήμα 2.10:Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος (Smith et al.,2001)

Η καμπτική αστοχία μιας ενισχυμένης δοκού με ΙΟΠ χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ρωγμών λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη της δοκού και αντίστοιχες στην εφελκυόμενη ζώνη. Επειδή δεν έχουμε εξάντληση της αντοχής του FRP όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10, η δοκός αστοχεί λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην άνω παρειά χωρίς να εξαντληθεί η αντοχή του οπλισμού. Η αστοχία αυτή επέρχεται λόγω καμπτικής υπερενίσχυσης.

Διατμητική Αστοχία (ShearFailure)

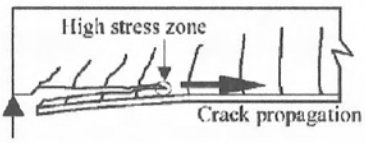


Σχήμα 2.11:Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω διατμητικής καταπόνησης (Smith et al.,2001)

Διατμητική αστοχία λαμβάνει χώρα στην περίπτωση όπου η δοκός εμφανίζει κατά την αστοχία διατμητικές ρωγμές. Πρόκειται για ένα σπάνιο

φαινόμενο που οφείλεται στον ανεπαρκή διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες).Τέτοιου είδους αστοχίες εμφανίζονται επίσης σε περιπτώσεις όπου έχουμε πολύ μικρό μήκος αγκύρωσης του ΙΟΠ.

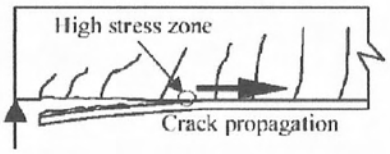
Αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος (ConcreteCoverSeparation)



Σχήμα 2.12: Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης σκυροδέματος (Smith et al.,2001)

Σε αυτού του είδους την αστοχία έχουμε απόσχιση της επικάλυψης του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού με το FRP. Το σκυρόδεμα αστοχεί διατμητικά σε κατεύθυνση παράλληλα με τον χαλύβδινο οπλισμό. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχει πολύ καλή πρόσφυση του ΙΟΠ στο σκυρόδεμα.

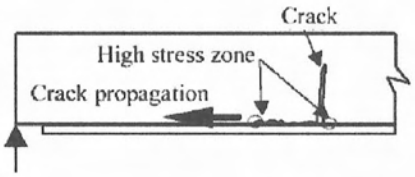
Αποκόλληση του άκρου του FRP συστήματος(Plate end interfacial debonding)



Σχήμα 2.13: Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω αποκόλλησης του Ινοπλισμένου Πολυμερούς ΙΟΠ (Smith et al.,2001)

Η εν λόγω αστοχία προκύπτει λόγω αδυναμίας της διεπιφάνειας σκυροδέματος-ΙΟΠ στα άκρα του ΙΟΠ, να παραλάβει την επιβαλλόμενη ανηγμένη παραμόρφωση, στο εφελκυόμενο πέλμα του FRP.

Αποκόλληση του συστήματος FRP που προκύπτει από ρηγμάτωση που ξεκινάει ενδιάμεσα στα άκρα τουFRP.(Intermediate Crack Induced Interfacial Debonding).



Σχήμα 2.14: Αστοχία ενισχυμένης δοκού Ω/Σ λόγω αποκόλλησης του Ινοπλισμένου Πολυμερούς ΙΟΠλόγω ενδιάμεσης ρωγμής (Smith et al.,2001)

Σε αυτή την περίπτωση, πρακτικά συμβαίνει αστοχία λόγω αποκόλλησης του ΙΟΠ, που προκύπτει λόγω ενδιάμεσης ρωγμή μέσα στην δοκό. Αυτού του είδους η ρωγμή διαδίδεται μέσω της διεπιφάνειας ΙΟΠ σκυροδέματος προκαλώντας αποκόλληση του ΙΟΠ.

2.7.4.Κανόνες που αποτρέπουν την αστοχία της ενίσχυσης(Σπυράκος,2004)

Οι τρόποι αστοχίας παραπάνω προκύπτουν κυρίως από αστάθμητους παράγοντες, που σύμφωνα με την βιβλιογραφία, μπορούν να περιοριστούν με την συμμόρφωση σε κατασκευαστικούς κανόνες όπως παρακάτω.

i. Προτείνεται η χρήση περισσότερων και λεπτότερων στρώσεων FRP αντί της χρήσης λιγότερων και στρώσεων με μεγαλύτερο πάχος καθώς, με αυτό τον τρόπο ικανοποιούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες συμβιβαστού των παραμορφώσεων χωρίς να επιβάλλονται σημαντικές τάσεις στο σύνθετο υλικό.

ii. Δεδομένου ότι διατίθενται σε ρολά τα υφάσματα FRP προτείνεται να χρησιμοποιούνται ενιαία κομμάτια σύνθετου υλικού FRP λόγω της μεγαλύτερης αξιοπιστίας ως προς τη συνοχή.

iii. Για την μείωση του κινδύνου αποκόλλησης συνίσταται η απόσταση του υφάσματος από τα άκρα της διατομής του ενισχυόμενου στοιχείου, να μην υπερβαίνει απόσταση ίση με το πάχος της επικάλυψης σκυροδέματος στην πλησιέστερη προς το άκρο παράλληλης ράβδου του χαλύβδινου οπλισμού

iv. Για την επίτευξη καλύτερης αγκύρωσης του σύνθετου υλικού πάνω στο ενισχυόμενο στοιχείο συνίσταται η χρήση λωρίδων σύνθετων υλικών η γωνιακές απολήξεις. Αντίθετα είναι σωστό να αποφεύγεται η αγκύρωση του υλικού με διάνοιξη οπών καθώς μειώνεται η αντοχή των στοιχείων στο οποίο διανοίγονται οι οπές.

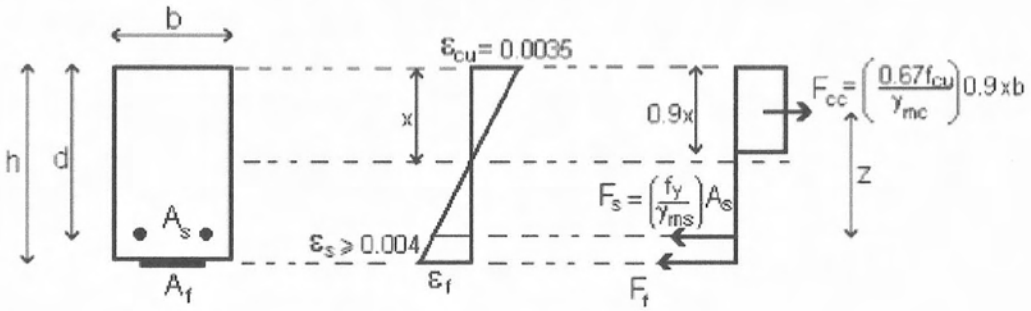
v. Σε περίπτωση χρήσης παράλληλων (κολάρων) σύνθετου υλικού η μεταξύ τους απόστασηδεν πρέπει να υπερβαίνει τα α) μικρότερο από το 5πλάσιο του πάχους του στοιχείου β)το 20% της απόστασης όπου το διάγραμμα ροπών κάμψης του στοιχείου έχει διαδοχικό μηδενισμό κατά μήκος του στοιχείου.

3.Μαθηματικά μοντέλα καμπτικής ικανότητα ενισχυμένων δοκών Ω/Σ

Παρακάτω παρατίθενται τα μαθηματικά μοντέλα των κανονισμών που εξετάστηκαν στην εν λόγω μελέτη.

3.1 TR55 (Βρετανικός Κανονισμός)

Συμφωνα με τον κανονισμό TR55 ο υπολογισμός της Mr βασίζεται στις συνθήκες ισορροπίας των δυνάμεων της διατομής όπως επίσης και στο συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων της διατομής.Σύμφωνα με το σκαρίφημα παρακάτω δίνονται οι μαθηματικοι τύποι.



Σχήμα 3.1 Ισορροπία δοκού(C. Arya et al.)

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός της αρχικής κατάστασης των ανηγμένων παραμορφώσεων στην διατομή. Συγκεκριμένα υπολογίζεται η αρχική ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής.

$$a_e = \frac{E_s}{0.5E_c} \tag{3.1.1}$$

$$\frac{bx_o^2}{2} = a_e A_s (d - x_o) \tag{3.1.2}$$

$$I_{ce} = \frac{bx_o^3}{3} + a_e A_s (d - x_o)^2 \tag{3.1.3}$$

Όπου

E_s, E_c *το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και του σκυροδεματος αντιστοιχα*

A_s *η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού*

b το πλάτος της διατομής

d το καθαρό ύψος της διατομής

x_oτο ύψος της θλιβόμενης ζώνης της ρηγματωμένης διατομής σκυροδέματος

I_{ce}η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής

Έπειτα υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις του σκυροδέματος στην εφελκυόμενη ίνα πριν την ενίσχυση

$$\varepsilon_{cic} = \frac{M_s x_o}{0.5 I_{ce} E_c} \tag{3.1.4}$$

Όπου

M_s η ροπή που αναπτύσσεται στην διατομή λόγω των μονίμων φορτίων της διατομής

Στην συνέχεια καταστρώνεται η ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP πριν την κατάσταση αστοχίας σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$\varepsilon_{cit} = \varepsilon_{cic} \frac{(h - x_o)}{x_o} \tag{3.1.5}$$

όπου

h το συνολικό ύψος της διατομής

Για την κατάρτιση των εξισώσεων συμβιβαστού της διατομής έχουμε για το σύνθετο υλικό FRP ότι στην κατάσταση

$$\varepsilon_{cft} = \varepsilon_{cu} \frac{(h - x)}{x} \leq \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{mF}} \tag{3.1.6}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cft} - \varepsilon_{cit} \tag{3.1.7}$$

$\gamma_{mF} = \gamma_{mm}\gamma_{mf}$ όπου $\gamma_{mm} = 1.1$ και $\gamma_{mf} = 1.4$για χρήση ΙΟΠ από άνθρακα

Όπου

x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας

ε_{fk} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του υλικού FRP

γ_{mF} συντελεστής ασφαλείας της ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης του FRP

Μετά γράφονται οι εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων της διατομής. Παρακάτω υπολογίζονται οι σχέσεις για την δύναμη στο σύστημα FRP F_f , η θλιπτική δύναμη F_{cc} στο σκυρόδεμα και F_s η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα.

$$F_f = \varepsilon_f A_f \frac{E_{fk}}{\gamma_{mE}} \tag{3.1.8}$$

$$F_{cc} = \frac{0.67}{\gamma_{mc}} f_{cu} 0.9bx \tag{3.1.9}$$

$$F_s = A_s \frac{f_y}{\gamma_{mS}} \tag{3.1.10}$$

$$F_f + F_s = F_{cc} \tag{3.1.11}$$

Όπου

A_f η επιφάνεια του συστηματος FRP

E_{fk} το μέτρο ελαστικότητας του συστήματος FRP

γ_{mF} συντελεστής ασφαλείας του μέτρου ελαστικότητας του FRP

(γ_{mF} =1.10)

γ_{mc} ο συντελεστής ασφαλείας της μέγιστης θλιπτικής τάσης του σκυροδέματος ($\gamma_{mc} = 1.5$)

f_{cu} η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος

f_y η τάση διαρροής του χάλυβα

γ_{mc} ο συντελεστής ασφαλείας της τάσης διαρροής του χάλυβα

($\gamma_{mc} = 1.15$)

Μετά την ικανοποίηση των συνθηκών ισορροπίας και την εύρεση του ύψους της θλιβόμενης ζώνης x, μπορεί να υπολογιστεί η καμπτική ικανότητα της διατομής M_r συμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$z = d - \frac{0.9x}{2} \tag{3.1.12}$$

$$M_r = F_{cc}(z + h - d) - F_s(h - d) \tag{3.1.13}$$

3.2 CNR DT-200 (Ιταλικός Κανονισμός)

Η καμπτική ικανότητα ενός μέλους υπολογίζεται κάνοντας χρήση συνθηκών ισορροπίας εσωτερικών δυνάμεων της διατομής και συμβιβαστού ανηγμένων παραμορφώσεων.

Σύμφωνα με τον κανονισμό η καμπτική αστοχία συνίσταται όταν προκύψουν μια από τις παρακάτω προϋποθέσεις.

1)Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος φτάνει τα επίπεδα αστοχίας

2)Η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση φτάνει στα επίπεδα ανηγμένης παραμόρφωσης ε_{fd}.

$$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}\middle|\varepsilon_{fdd}\right\} \tag{3.2.1}$$

Όπου

ε_{fk} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του συστηματος FRP

γ_f συντελεστής ασφαλείας οριακης κατάστασης αστοχίας για σχεδιασμο με τιμη απο 1.2-1.5

ε_{fdd} μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού αποκόλλησης του FRΠ

η_a μειωτικός συντελεστής περιβαλλοντικών συνθηκών που δίνεται από τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3.1. Συντελεστής η_a

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος ινών/ρητινης	η_a
Εσωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.75
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.85
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.95
Εξωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.65
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.75
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85
Εχθρικά Περιβάλλοντα	Γυαλί /Εποξειδική	0.50
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.70
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85

Υπολογισμόςε_{fdd}

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0 \tag{3.2.2}$$

Όπου

$f_{fdd,2}$ η μέγιστη τάση αποκόλλησης του FRP

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP

ε_{sy} η ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα

ε_0 η αρχική ανηγμένη παραμόρφωση λόγω των νεκρών φορτίων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (service limit state) που δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\varepsilon_0 = \frac{M_{gk}}{0.9dE_sA_{s2}} \tag{3.2.3}$$

Όπου

M_{gk} η ροπή καμψης λόγω των μονιμων φορτίων στην Ο.Κ.Λ

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

A_{s2} η επιφάνεια του χαλύβδινου θλιβόμενου οπλισμού

d το καθαρό ύψος της διατομής

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_f}\sqrt{\frac{2\,E_f k_b k_{G,2}}{t_f\,FC}\sqrt{f_{cm}f_{ctm}}} \tag{3.2.4}$$

Όπου

$k_{G,2}$ διορθωτικός συντελεστής (=0,10)

k_q μειωτικός σταθερά τύπου φορτίου (1.25 για κατανεμημένο, 1.00 για οποιοδήποτε άλλο)

γ_f συντελεστής ασφαλείας οριακης κατάστασης αστοχίας για σχεδιασμό με τιμήαπό 1.2-1.5

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP

f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

f_{ctm} η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

FC συντελεστής εμπιστοσύνης (=1.00)

k_b διορθωτικός γεωμετρικός συντελεστής αναλογίας σχετικός με το πλάτος του συστήματος FRP με το σκυρόδεμα που δίνεται από την παρακάτω σχέση

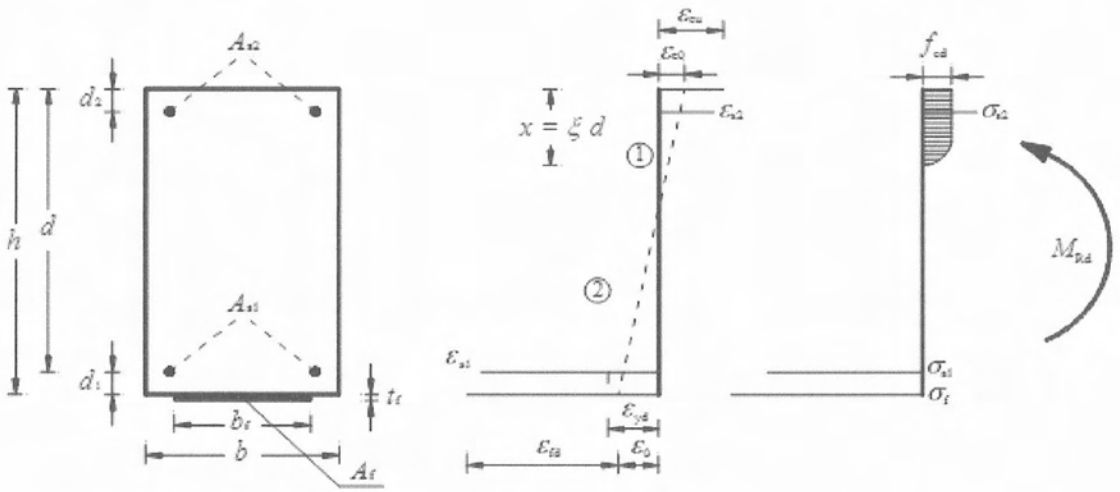
$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \geq 1 \qquad (3.2.5)$$

Όπου

b_f το πλάτος του συστηματος FRP

b το πλάτος της διατομής

Σύμφωνα με τις εξισώσεις ισορροπίας και συμβιβαστού με το παρακάτω σχήμα έχουμε τα εξής



Σχήμα 3.2 Ισορροπία δοκού(CNR DT-200)

Από την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων έχουμε

$$f_{cd} x b \psi + A_{s2}\sigma_{s2} - A_{s1}\sigma_{s1} - A_f\sigma_f = 0 \qquad (3.2.6)$$

Όπου

f_{cd} η θλιπτική τάση σχεδιασμου του σκυροδέματος

x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος

b το πλάτος της διατομής

ψ=0,8 ο λόγος των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος προς το γινόμενο bxf_{cd}

A_{s2} η επιφάνεια του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_{s1} η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του συστηματος FRP

σ_{s1} η τάση του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

σ_{s2} η τάση του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

σ_f η τάση του συστήματος FRP

d_1, d_2 τα πάχη των επικαλύψεων των οπλισμών

Ο κανονισμός προτείνει την χρήση συντελεστή εμπιστοσύνης $FC = 1.35$ για την διαίρεση της μέγιστης θλιπτικής τάσης σκυροδέματος f_{ck} (περαν του 1.5 της κλασσικής ανάλυσης) και της τάσης διαρροής του χάλυβα f_{yk}.

Για κάθε τύπο αστοχίας έχουμε τις εξής συνθήκες που πρέπει να πληρούνται για τον υπολογισμό της ροπής καμπτικής αντοχής

Για αστοχία του μέλους από θραύση του συστήματος FRP (FRP Rupture) πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες συμβιβαστού

$$\varepsilon_{f=}\varepsilon_{fd} \tag{3.2.7}$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{x}{h-x} \leq \varepsilon_{cu} \tag{3.2.8}$$

$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{x-d_2}{h-x} \tag{3.2.9}$$

$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0)\frac{d-x}{h-x} \tag{3.2.10}$$

Όπου

ε_cανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος

ε_{s1} η ανηγμενη παραμόρφωση του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

ε_{s2} η ανηγμενη παραμόρφωση του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

ε_f η ανηγμενη παραμόρφωση του συστήματος FRP

h το συνολικό ύψος της δοκού

d το καθαρό ύψος της δοκού

ε_{cu} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος (=0,0035)

Για τον τρόπο αστοχίας της δοκού λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος (concrete crushing) πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες συμβιβαστού

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-x}{x}\right) - \varepsilon_0 \quad (3.2.11)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (3.2.12)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu}\frac{x-d_2}{x} \quad (3.2.13)$$

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d-x}{x} \leq \frac{f_{yk}}{FC} \quad (3.2.14)$$

Όπου

ε_{cu} *η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος (=0,0035)*

$$Με\ \ \sigma_{s1} = E_s\varepsilon_{s1} \quad (3.2.15)$$

$$\sigma_{s2} = E_s\varepsilon_{s2} \quad (3.2.16)$$

$$\sigma_f = E_f\varepsilon_f \quad (3.2.17)$$

Όπου

E_s *το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα*

E_s *το μέτρο ελαστικότητας συστηματος FRP*

Μετά τον υπολογισμό των διαφόρων μεγεθών συμβιβαστού και τάσεων μπορεί και για τους δύο τρόπους αστοχίας να υπολογιστεί η καμπτική ικανότητα.

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}\left[\psi b x f_{cd}(d-\lambda x) + A_{s2}\sigma_{s2}(d-d_2) + A_f\sigma_f d_1\right] \quad (3.2.18)$$

Όπου

$\gamma_{Rd} = 1.00,\ \lambda = 0.416,\ \psi = 0.8$

3.3 ECP 208 (Αιγυπτιακός Κανονισμός)

Για την ενίσχυση των μελών σε κάμψη ο ECP208 αρχικά εισάγει ένα μειωτικό συντελεστή περιβάλλοντος για τον σχεδιασμό ο οποίος αναλαμβάνει την μείωση για λόγους ασφαλείας της ανηγμένης παραμόρφωση του FRP με σκοπό την ασφαλή ικανότητα και παραλαβή των φορτίων.

Οι σχέσεις δίνονται παρακάτω

$$f_{fu}^{*} = f_{fu} \tag{3.3.1}$$

$$\varepsilon_{fu}^{*} = CE\, \varepsilon_{fu} \tag{3.3.2}$$

$$f_{fu} = E_f \varepsilon_{fu} \tag{3.3.3}$$

Όπου

f_{fu} η μέγιστη εφελκυστική τάση του FRP

ε_{fu} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του FRP

CE ο μειωτικός συντελεστής περιβαλλοντικών συνθηκών

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP

Οι τιμές του CE δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3.2. Τιμές μειωτικού συντελεστή CE

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος ινών/ρητινης	η_a
Εσωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.75
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.85
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.95
Εξωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.65
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.75
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85
Εχθρικά Περιβάλλοντα	Γυαλί /Εποξειδική	0.50
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.70
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85

Ο κανονισμός προκειμένου να αποτρέψει τα φαινόμενα αστοχία σε αποκόλλησης της πλάκας FRP (plate debonding) εισάγει μέσω της ανηγμένης παραμόρφωσης του FRP και τον κατάλληλο συντελεστή k_m που θα βοηθήσει στην αποτροπή του φαινομένου σε επίπεδο σχεδιασμού.

$$\varepsilon_{fe} = k_m\, \varepsilon_{fu}^{*} \tag{3.3.4}$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}^*}\left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000}\right) \leq 0.9 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}^*}\left(\frac{90000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.9 \end{cases} \quad (3.3.5)$$

Όπου

n ο αριθμός των στρώσεων FRP

E_f το μέτρο ελαστικότητας του συστήματος FRP σε MPa

t_f το πάχος της μια στρώσης του FRP σε mm

Η τιμή της σταθεράς k_m δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.9 για να έχουμε αποτροπή της αποκόλλησης του συστήματος FRP στο τέλος του εξωτερικού οπλισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο η δυσκαμψία των συστημάτων FRP αυξάνεται τόσο μειώνεται η τιμή της σταθεράς k_m.

Υπολογισμός ανηγμένων παραμορφώσεων του εξωτερικού οπλισμού FRP

Είναι σημαντικός ο υπολογισμός των ανηγμένων παραμορφώσεων του οπλισμού FRP.Η τιμή που επιτρέπεται να φθάσει η ανηγμένη παραμόρφωση του FRP είναι είτε μέχρι την σύνθλιψη του σκυροδέματος είτε μέχρι την θραύση του FRP, είτε μέχρι την αποκόλληση του από το υπόστρωμα.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu}^* \quad (3.3.6)$$

Όπου

ε_{fu}^* η μεγιστη ανηγμένη παραμορφωση του FRP σε επίπεδο σχεδιασμού

ε_{bi} η αρχική ανηγμένη παραμόρφωση του εφελκυόμενου πέλματος

h το συνολικό ύψος της δοκού

c το ύψος της θλιβόμενης ζώνης

ε_{cu} η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος (ε_{cu} =0.003)

Επίσης ο ECP προβλέπει τον περιορισμό της μέγιστης τάσης στο FRP. Για αυτό τον λόγο περιορίζει την επιτρεπόμενη τάση του FRP στην καμπτική αστοχία κάνοντας χρήση της παρακάτω σχέσης.

$$f_{fe} = \frac{E_f \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \qquad (3.3.7)$$

Όπου

γ_f ειναι ο συντελεστης ασφαλείας των FRP σύμφωνα με τις παρακάτω προϋποθέσεις

4.3.2.1.7 Material Strength Reduction Factors

Material Strength reduction factors for concrete, reinforcing steel, and FRP are taken according to the relationships given in (4-5) and figure (4-2).

Ductile Failure — For $\varepsilon_s \geq 0.005$ (Steel 240/350); For $\varepsilon_s \geq 0.0065$ (Steel 400/600)

$\gamma_c = 1.5$ $\gamma_s = 1.15$

For FRP sheets $\gamma_f = 1.5$
For FRP laminates $\gamma_f = 1.4$ (4-5-a)

Brittle Failure — For $\varepsilon_s \geq 0.005$ (Steel 240/350) &; For $\varepsilon_s \geq 0.0065$ (Steel 400/600)

$\gamma_c = 1.5\eta$ $\gamma_s = 1.15\eta$

For FRP sheets $\gamma_f = 1.5\eta$
For FRP laminates $\gamma_f = 1.4\eta$

Where:

$\eta = 1 + 0.15[0.005 - \varepsilon_s]/[0.005 - \varepsilon_{sy}]$ (Steel 240/350)

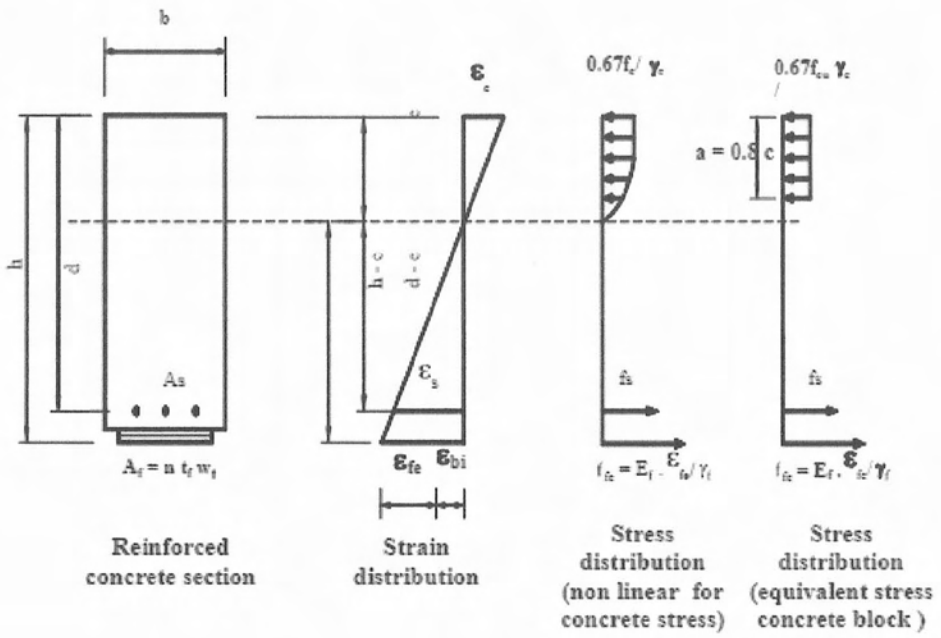
$\eta = 1 + 0.15[0.0065 - \varepsilon_s]/[0.0065 - \varepsilon_{sy}]$ (Steel 400/600) (4-5-b)

For $\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$

$\gamma_c = 1.7$ $\gamma_s = 1.32$

For FRP sheets $\gamma_f = 1.7$
For FRP laminates $\gamma_f = 1.6$ (4-5-c)

Παρακάτω δίνεται το σχήμα της ισορροπίας της διατομής



Σχήμα 3.3 Ισορροπία δοκού (ECP208-2005)

Οι τιμές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στον χαλύβδινο εφελκυόμενο οπλισμό υπολογίζονται από τις εξισώσεις

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{h-c}\right) \tag{3.3.8}$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y/\gamma_s \tag{3.3.9}$$

Όπου

d είναι το καθαρό ύψος της δοκού

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

γ_s ο συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα ($\gamma_s = 1.15$)

Το μήκος της ισοδύναμης κατανομής των τάσεων που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα υπολογίζεται από την αμέσως επόμενη εξίσωση και άμεσα μπορεί να υπολογιστεί από την τελευταία η καμπτική ικανότητα της δοκού. Η ανάλυση μπορεί να γίνει αυξάνοντας σταδιακά τον όρο c με επαναληπτική διαδικασία έως ότου έχουμε διαρροή χάλυβα ή θραύση FRP.

$$\alpha = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{(0.67 f_{cu} b)/\gamma_c} \quad (3.3.10)$$

$$M_u = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_f f_{fe} \left(h - \frac{a}{2}\right) \quad (3.3.11)$$

Όπου

γ_c ο συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος ($\gamma_s = 1.5$)

f_{cu} η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος

b το πλάτος της δοκού

A_s η επιφάνεια του χαλύβδινου εφελκυόμενου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του εξωτερικά επικολλώμενου οπλισμού FRP

($A_f = nE_f t_f$)

Το μήκος α ορίζεται ως το μήκος της ισοδύναμης κατανομής των τάσεων που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα

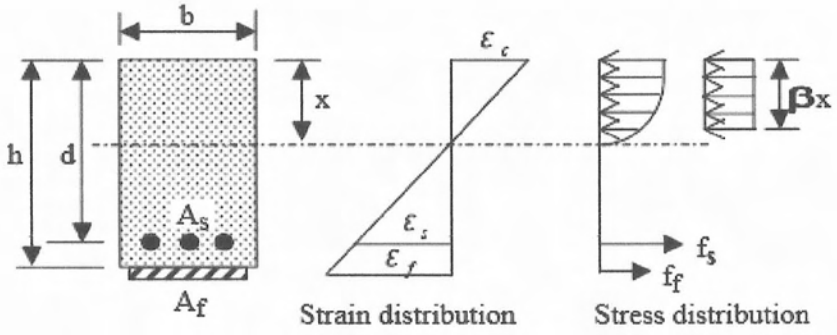
3.4 JSCE (Ιαπωνικός Κανονισμός)

Ο JSCE προτείνει για την καμπτική αντοχή ένα μοντέλο που βασίζεται πάνω στην ισορροπία και στο συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα κάνοντας χρήση του ήδη υπάρχοντος κανονισμού οπλισμένου σκυροδέματος JGC15 προτείνει το εξής πακέτο συντελεστών ασφαλείας των υλικών, φορτίσεων αλλά και γενικότερων παραγόντων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό.

Πίνακας3.3. Συντελεστές ασφαλείας υλικών, φορτίσεων και Ανάλυσης

Safety factor	Ultimate Limit State	Serviceability Limit State
Material factor (γ_m)		
Concrete	1.3	1.0
Steel	1.0 (1.05)	1.0
FRP laminates	1.2 – 1.3	1.0
Member factor (γ_b)		
Flexure	1.15	1.0
Shear	1.25	1.0
Ductility	1.3	1.0
Structure factor (γ_i)	1.0 – 1.2	1.0
Load factor (γ_f)	1.0 – 1.2	1.0
Analysis factor (γ_a)	1.0	1.0

Επομένως οι εξισώσεις που περιγράφουν την ισορροπία, το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων και την καμπτική ικανότητα της διατομής έχουν ως εξής



Σχήμα 3.4 Ισορροπία δοκού (Kyuichi Maruyama)

Συνθήκες Ισορροπίας Διατομής

$$\beta k_1 f_{cd} bx + A_s E_s \varepsilon_s = A_f E_f \varepsilon_f \qquad (3.4.1)$$

Όπου

x υψος θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος

b πλάτος διατομης σκυροδεματος

β συντελεστης του ύψου του ισοδύναμής κατανομής των τάδεων του σκυροδέματος

k_1 συντελεστης του πλάτους του ισοδύναμής κατανομής των τάσεων του σκυροδέματος

f_{cd} θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος

A_s εφελκυόμενος οπλισμος πέλματος

E_s μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

E_f μέτρο ελαστικότητας συστηματος FRP

ε_s ανηγμένη παραμόρφωση χάλυβα

ε_f ανηγμένη παραμόρφωση συστηματος FRP

Τα β, k_1 δινονται απο τους παρακάτω τύπους

$$\beta = 0.52 + 80\varepsilon_{cu} \tag{3.4.2}$$

$$k_1 = 1 - 0.003 f_{ck}^{'} \leq 0.85 \tag{3.4.3}$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{155 - f_{ck}^{'}}{30000} \leq 0.0035 \tag{3.4.5}$$

$$\gamma\iota\alpha\ f_{ck}^{'} \leq 80MPa$$

Όπου

$f_{ck}^{'}$ η ονομαστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa

ε_{cu} θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδεματος $(\varepsilon_{cu} = 0.0035)$

Για την τάση σχεδιασμού σε θλίψη του σκυροδέματος έχουμε ότι

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}^{'}}{\gamma_{mc}} \mu\varepsilon\ \gamma_{mc} = 1.3 \tag{3.4.6}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{ms}} \mu\varepsilon\ \gamma_{ms} = 1.0 \tag{3.4.7}$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_{mf}} \mu\varepsilon \ \gamma_{mf} = 1.3 \qquad (3.4.8)$$

Όπου

f_{yk} *η τάση διαρροής του χάλυβα*

f_{fk} *η τάση θραύσης του σύνθετου υλικού FRP*

Ο Ιαπωνικός κανονισμός προτείνει για το συμβιβαστό των μετατοπίσεων για τον χάλυβα και το $\varepsilon_s, \varepsilon_f$ *δινονται απο τους παρακάτω τύπους*

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\frac{d-x}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad (3.4.9)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h-x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f} \qquad (3.4.10)$$

Όπου

d *το καθαρό υψος της διατομής*

h *το συνολικό ύψος της διατομης*

ε_o *η αρχική παραμόρφωση του εφελκυόμενου πέλματος*

f_{yd} *η τάση διαρροής του χάλυβα*

ε_{fd} *η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του συστήματος FRP*

Η ανηγμένη αρχική παραμόρφωση της δοκού προκύπτει σύμφωνα με την θεωρία της ρηγματωμένης διατομής ως εξής

$$\varepsilon_o = \frac{M_{DL}(h-kd)}{I_{cr}E_c} \qquad (3.4.11)$$

Όπου

M_{DL} η ροπή κάμψης σχεδιασμού των νεκρών φορτιών (dead loads)

d_f το συνολικό ύψος της διατομης

I_{cr} Η ροπη αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής

E_cτο μετρο ελαστικότητας του σκυρόδεματος

d το καθαρό ύψος της διατομής

k η αναλογία του ύψους της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος προς το καθαρό ύψος x_{II}/d

Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής υπλογίζεται σύμφωνα με την παρακάτων διαδικασία

$$A_1 = bx_{II} \tag{3.4.12}$$

$$A_2 = (n-1)A_{s2} \tag{3.4.13}$$

$$A_3 = nA_{s1} \tag{3.4.14}$$

$$x_{II} = \frac{A_1\frac{x_{II}}{2} + A_2d_2 + A_3d}{A_1 + A_2 + A_3} \tag{3.4.15}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \tag{3.4.16}$$

Όπου λύνεται το παραπάνω συστημα εξισώσεων είτε επαναλητικά είτε αναλυτικά και οδηγεί σε δευτεροβάθμια εξίσωση.Ο άγνωστος του συστήματος ειναι το x_{II}. Με την ευρεση του x_{II} και των A_1, A_2, A_3 βρίσκεται το I_{cr} συμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$I_{cr} = \frac{bx_{II}^3}{12} + A_1\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + A_2(x_{II} - d_2)^2 + A_3(x_{II} - d)^2 \tag{3.4.17}$$

Ο JSCE για την αποτροπή του debonding προτείνει να ισχύει η παρακάτω σχέση

$$\sigma_f \leq \sqrt{\frac{2G_fE_f}{nt_f}} \tag{3.4.18}$$

$$G_f = 0.644f_{ck}^{'0.19} \tag{3.4.19}$$

Όπου

σ_f η τάση του ΙΟΠ σε MPa

G_fη ενεργεια θραυσης της διεπιφάνειας ΙΟΠ-σκυροδέματος σε MPa

E_fτο μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ

n το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ

t_f το πάχος των στρώσεων σε mm

$f_{ck}^{'}$η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa

Με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων στην σχέση που προκύπτει απο την ισορροπία τής διατομής και επιλυση κατα x μπορούμε να υπολογίσουμε την καμπτική αντοχή της δοκου συμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$M_r = \frac{1}{\gamma_b}\left[\beta k_1 f_{cd} bx\left(h - \frac{a}{2}\right) + A_s E_s \varepsilon_s (h - d)\right] \quad (3.4.20)$$

$$\alpha = k_1 x \quad (3.4.21)$$

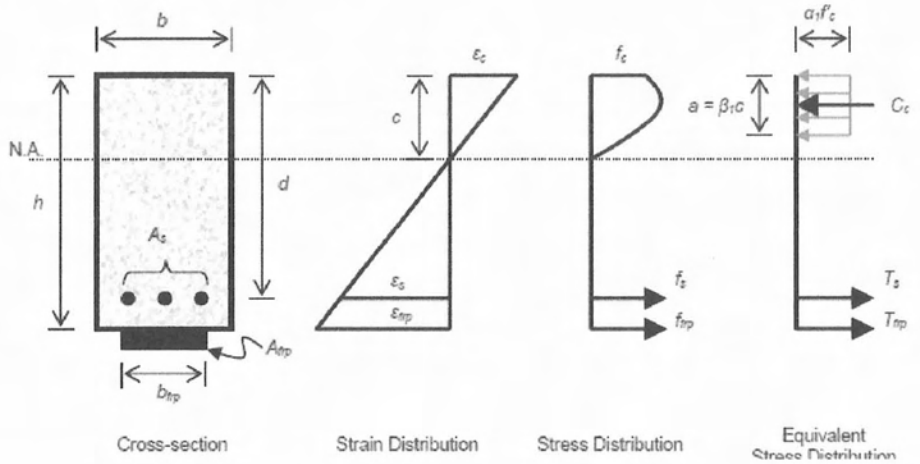
Όπου

γ_b *ο συντελεστής του κανονισμού για τον τύπο φόρτισης.*

Για την κάμψη θεωρούμε $\gamma_b = 1.15$

3.5 ISIS (Καναδικός Κανονισμός)

Η διαδικασία για ανάλυση μιας εξωτερικά ενισχυμένης δοκού σκυροδέματος με επικολλούμενο οπλισμό FRPσύμφωνα με τον ISISβασίζεται στην ισορροπία των διατομών και στην ικανοποίηση του συμβιβαστού παραμορφώσεων όπως παρακάτω



Σχήμα 3.5 Ισορροπία δοκού (ISIS Educational Module)

Από εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων της διατομής σκυροδέματος έχουμε τις εξής σχέσεις

$$C_c = T_s + T_{frp} \tag{3.5.1}$$

$$T_s = \varphi_s A_s f_s \mu\varepsilon \;\; f_s \leq f_y \tag{3.5.2}$$

$$C_c = \varphi_c a_1 f'_c \beta_1 bc \tag{3.5.3}$$

$$T_{frp} = \varphi_{frp} A_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} \mu\varepsilon \;\; \varepsilon_{frp} \leq \varepsilon_{frpu} \tag{3.5.4}$$

Όπου

f'_c *η ονομαστική μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος*

f_y *η τάση διαρροής του χάλυβα*

A_s *ο εφελκυόμενος οπλισμός της διατομής*

f_s *η τάση του χαλυβδινου εφελκυόμενου οπλισμού*

b *το πλάτος της διατομής*

c *το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της διατομής*

A_{frp} η επιφάνεια του οπλισμού FRP

E_{frp}το μετρο ελστικότητας του οπλισμού FRP

φ_s, φ_sοι συντελεστές δομήματος για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα αντιστοιχα

φ_{frp} μειωτικός συντελεστής των ιδιοτητων του FRP

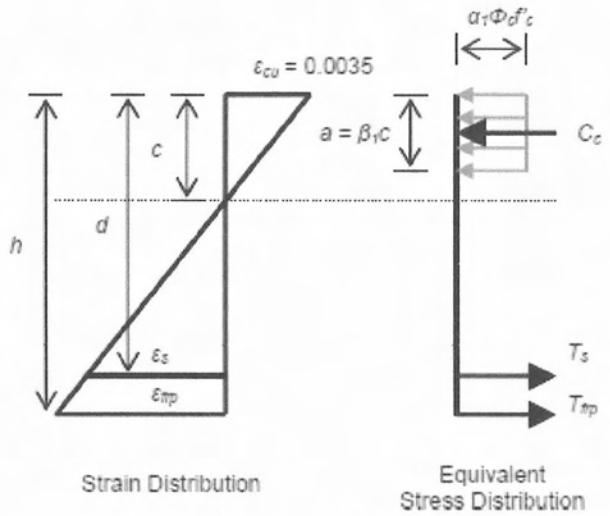
Παρακάτω στους πίνακες 3.4 και 3.5 δίνονται οι συντελεστές που προτείνει ο ISIS για σχεδιασμό

Πίνακας 3.4 Μειωτικοί Συντελεστές ασφαλείας χάλυβα, και σκυροδέματος

	φ_s	φ_c
Κτήρια	0,85	0,6
Γέφυρες	0.9	0.75

Πινακας3.5 Μειωτικοί Συντελεστές ασφαλείας ΙΟΠ

	φ_{frp}
Carbon FRP (Ανθρακόνημα)	0,75
Glass FRP (Υαλόνημα)	0,6



Σχήμα 3.6 Συνθήκες Ισορροπίας Συμβιβαστού (ISIS Educational Module)

Για την επίλυση των παραπάνω σχέσεων ο κανονισμός προτείνει τις παρακάτω παραδοχές όσον αφορά την ανηγμένη παραμόρφωση τόσο του FRPόσο και του χάλυβα. Επίσης κάνει χρήση των σχέσεων του κανονισμού σκυροδέματος όσον αφορά την ισοδύναμη κατανομή των τάσεων στο

θλιβόμενο κομμάτι της διατομής σκυροδέματος. Οι παρακάτω σχέσεις παρουσιάζονται ακολούθως

Ανηγμένη Παραμόρφωση Συστήματος FRP

$$\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) \text{οπου } f_{frp} = \varepsilon_{frp}\, E_{frp} \tag{3.5.5}$$

Όπου

ε_{cu} *η ανηγμένη παραμορφωση θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος (=0,0035)*

h *το συνολικό ύψος της διατομής*

Ανηγμένη Παραμόρφωση Χάλυβα

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d-c}{c}\right) \text{ οπου} \tag{3.5.6}$$

$$f_s = \varepsilon_s\, E_s \leq f_y \tag{3.5.7}$$

Όπου

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

d *το καθαρό ύψος της διατομής*

Μεγέθη ισοδύναμης κατανομής στην θλιβόμενη ζώνη της διατομής

$$a_1 = 0.85 - 0.0015 f_c' \geq 0{,}65 \tag{3.5.8}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0025 f_c' \geq 0{,}65 \tag{3.5.9}$$

όπου

f_c' *η ονομαστική μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa*

Μετά τη αντικατάσταση των μεγεθών των παραπάνω σχέσεων στην εξίσωση ισορροπίας υπολογίζεται η τιμήc. Επειτα ελέγχεται η παρακάτω συνθήκη

$$\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) \leq \varepsilon_{frpu} \tag{3.5.10}$$

Όπου

ε_{frpu} *η ονομαστική μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP*

Εάν ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη μπορεί να υπολογιστεί η καμπτική αντίσταση της δοκού

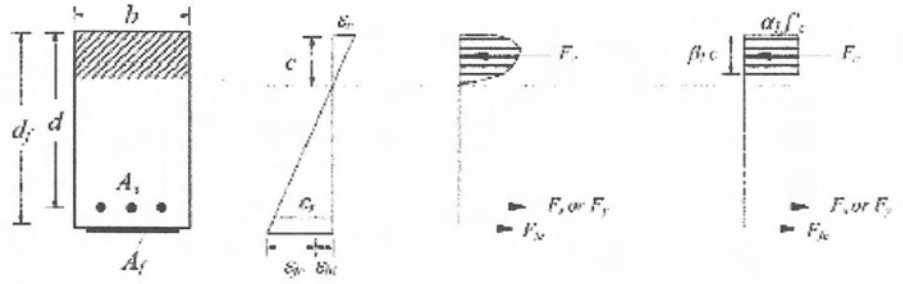
$$M_r = \varphi_s A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + \varphi_{frp} A_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} \left(h - \frac{a}{2}\right) \quad (3.5.11)$$

$$\alpha = \beta_1 c \quad (3.5.12)$$

3.6 ACI440 (Αμερικανικός Κανονισμός)

Για την καμπτική αντοχή ο ACI προτείνει την παρακάτω μοντελοποίηση του προβλήματος για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής Mu.

Έστω μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος με διαστάσεις b, d_f εφελκυόμενο χαλύβδινο οπλισμό επιφάνειας A_s, ενισχυμένη με επικολλούμενο οπλισμό A_f



Σχήμα 3.7 Ισορροπία δοκού (ACI440)

Η διαδικασία που ακολουθείται για να υπολογιστεί η μέγιστη αντοχή της σε κάμψη πρέπει να ικανοποιεί το συμβιβαστό ανηγμένων παραμορφώσεων της διατομή, την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων όπως πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τον τρόπο αστοχίας της διατομής (failure mode).

Η διαδικασία έχει τα εξής βήματα

Βήμα 1. Υπολογισμός Αντοχής συστήματος FRP

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu} \quad (3.6.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon^*_{fu} \quad (3.6.2)$$

Όπου

f_{fu} είναι η μέγιστη τάση σχεδιασμού του FRP

f^*_{fu} ειναι η μέγιστη τάση σχεδιασμού του FRP

ε_{fu} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμου του FRP

ε^*_{fu} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του FRP

C_Eο περιβαλλοντικός συντελεστής μείωσης του FRP για τον σχεδιασμό

Πίνακας 3.6.Περιβαλλοντικός συντελεστής μείωσης για τα διάφορα συστήματα FRP

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος Ινών	Περιβαλλοντικός συντελεστής μείωσης C_E
Εσωτερικοί χώροι	Ανθρακόνημα	0,95
	Υαλόνημα	0,75
	Αραμίδιο	0,85
Εξωτερικοί χώροι (γέφυρες, πυλώνες, ανοικτοί χώροι στάθμευσης, κλπ)	Ανθρακόνημα	0,85
	Υαλόνημα	0,65
	Αραμίδιο	0,75
Ακραία Περιβάλλοντα (χημικές εγκαταστάσεις και, εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων)	Ανθρακόνημα	0,85
	Υαλόνημα	0,50
	Αραμίδιο	0,70

Βήμα 2 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί

1.Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος κατά ACI 318-05

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \tag{3.6.3}$$

Όπου

f_c' η θλιπτική αντοχή του σκυρόδεματος σε MPa

2. Υπολογισμός β1 σε MPa

$$\beta 1 = 0{,}85 \ \gamma\iota\alpha \ \ 17 \le f_c' \le 28\ MPa \tag{3.6.4}$$

$$\beta 1 = 0{,}85 - \frac{0.05(f_c' - 28)}{7} \ \gamma\iota\alpha \ \ 28 < f_c' < 55\ MPa \tag{3.6.5}$$

$$\beta 1 = 0{,}65 \ \gamma\iota\alpha \ \ fc' > 55\ MPa \tag{3.6.6}$$

3. Υπολογισμός του εξωτερικά επικολλώμενου οπλισμού FRP επιφάνειας A_f

(3.6.7)

$$A_f = n\, t_f w_f$$

Όπου

n ο αριθμός των στρώσεων του FRP

t_f το παχος της στρώσης του FRP

w_f το πλάτος τής στρώσης του συστήματος FRP

Βήμα 3. Εκτίμηση της ήδη υπάρχουσας ανηγμένης παραμόρφωσης στο εφελκυόμενο πέλμα

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \tag{3.6.8}$$

Όπου

M_{DL} η ροπή κάμψης σχεδιασμού των νεκρών φορτιών (dead loads)

d_f το συνολικό ύψος της διατομής

I_{cr} Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής

E_cτο μετρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

d το καθαρό ύψος της διατομής

k η αναλογία του ύψους της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος προς το καθαρό ύψος x_{II}/d

Η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία

$$A_1 = bx_{II} \tag{3.6.9}$$

$$A_2 = (n-1)A_{s2} \tag{3.6.10}$$

$$A_3 = nA_{s1} \tag{3.6.11}$$

$$x_{II} = \frac{A_1\frac{x_{II}}{2} + A_2 d_2 + A_3 d}{A_1 + A_2 + A_3} \tag{3.6.12}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \tag{3.6.13}$$

Όπου λύνεται το παραπάνω σύστημα εξισώσεων είτε επαναληπτικά είτε αναλυτικά και οδηγεί σε δευτεροβάθμια εξίσωση.Ο άγνωστος του συστήματος είναι το x_{II}. Με την ευρεση του x_{II} και των A_1, A_2, A_3 βρίσκεται το I_{cr} συμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$I_{cr} = \frac{bx_{II}^3}{12} + A_1\left(\frac{x_{II}}{2}\right)^2 + A_2(x_{II} - d_2)^2 + A_3(x_{II} - d)^2 \quad (3.6.14)$$

Βήμα 4 Υπολογισμός της ανηγμένης παραμόρφωσης σχεδιασμού του συστήματος FRPμε σκοπό την αποτροπή των φαινομένων αποκόλλησης του ΙΟΠ

$$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{\frac{f_c'}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad (3.6.15)$$

Όπου

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP σε MPa

ε_{fu}η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του FRP

Βήμα 5 Ικανοποίηση Συνθηκών Ισορροπίας Δυνάμεων και Συμβιβαστού Ανηγμένων Παραμορφώσεων Ενισχυμένης Διατομής.

Εκτίμηση c ύψους θλιβόμενης περιοχής διατομής σκυροδέματος

$$c = 0.2d \quad (3.6.16)$$

Όπου

d το καθαρό ύψος της διατομής

Εκτίμηση της ισχύουσας ανηγμένης παραμόρφωσης του FRP

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (3.6.17)$$

Όπου

ε_{cu}η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του σκυροδέματος (=0.003)

d_f το συνολικό ύψος της διατομης

c το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

ε_{bi}η ήδη υπάρχουσα παραμόρφωση του εφελκυόμενου πέλματος

ε_{fd} ανηγμένης παραμόρφωσης σχεδιασμού του συστήματος FRP

Υπολογισμός ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{c}{d_f - c}\right) \quad (3.6.18)$$

Όπου

ε_cη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του σκυροδέματος

d_f το συνολικό ύψος της διατομης

c το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

ε_{fe}η ανηγμένη παραμόρφωσης του συστήματος FRP

ε_{bi}η ήδη υπάρχουσα παραμόρφωση του εφελκυόμενου πέλματος

Υπολογισμός ανηγμένης παραμόρφωσης εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi})\left(\frac{d - c}{d_f - c}\right) \quad (3.6.19)$$

Όπου

ε_cη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του σκυροδέματος

d το καθαρό ύψος της διατομής

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Υπολογισμός τάσεων εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3.6.20)$$

Όπου

E_s το μετρο ελαστικότητας του χάλυβα

ε_s η ανηγμένης παραμόρφωσης εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

f_y η τάση διαρροής του χάλυβα

Υπολογισμός τάσεων συστήματος FRP

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (3.6.21)$$

Όπου

E_f το μετρο ελαστικότητας του FRP

Ικανοποίηση Συνθηκών Ισορροπίας και Συμβιβαστού Παραμορφώσεων

Υπολογισμός Ανηγμένης θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος

$$\varepsilon_c' = \frac{1.7 f_c'}{E_c} \tag{3.6.22}$$

Όπου

f_c' η θλιπτική αντοχή του σκυρόδεματος

E_cτο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

Οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστεί προκύπτουν από την επίλυση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon_c'\varepsilon_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c} \tag{3.6.23}$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_c'\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1(\varepsilon_c')^2} \tag{3.6.24}$$

$$c = \frac{A_s f_s - A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c' \beta_1 b} \tag{3.6.25}$$

Όπου

ε_cη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού του σκυροδέματος

f_{fe} η τάση του συστήματος FRP

f_s η τάση του χαλύβδινου εφελκυόμεννου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του εξωτερικά επικολλημένου οπλισμού FRP

A_s η επιφάνεια του χαλύβδινου εφελκυόμενου οπλισμού

Μετά τον υπολογισμό του καινούριου c ελέγχεται εάν το αρχικό c ταυτίζεται με το υπολογιζόμενο από τις παραπάνω σχέσεις.Σε περίπτωση μη ταύτισης επιλέγεται ένα c διαφορετικό πιο κοντά στο τελικά υπολογιζόμενο καιεπαναλαμβάνεται ο παραπάνω υπολογισμός έως ότου να προκύψει ικανοποιητική ταύτιση. Με αυτό το κριτήριο ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστού.

Υπολογισμός Ροπής Αντοχής

Για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής της διατομής υπολογίζεται η παρακάτω εξίσωση που προκύπτει από την ισορροπία ροπών της διατομής.

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \quad (3.6.26)$$

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \quad (3.6.27)$$

$$M_n = M_{ns} + \psi_f M_{nf} \quad (3.6.28)$$

Όπου

$\alpha_1, \beta_1, c,$ προκύπτουν απο την ισορροπία και το συμβιβαστό της διατομής

f_{fe} η τάση του συστηματος FRP

f_s η τάση του χαλύβδινου εφελκυόμενου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του εξωτερικά επικολλημένου οπλισμού FRP

A_s η επιφάνεια του χαλύβδινου εφελκυόμεννου οπλισμού

d_f το συνολικό ύψος της διατομης

d το καθαρό ύψος της διατομής

$\psi_f = 0.85$ συντελεστης μείωσης της συνεισφοράς του FRP

Ο υπολογισμός της μέγιστης καμπτικής αντοχής M_u ολοκληρώνεται με την επιβολή του συντελεστή φ στο M_n ο οποίος περιορίζει περισσότερο την ανθεκτικότητα της διατομής για ψαθυρές αστοχίες και για πλάστιμες συμπεριφορές την περιορίζει λιγότερο. Επομένως έχουμε

$$M_u \leq \varphi(M_n) \quad (3.6.29)$$

Όπου

M_n η ροπή που προκύπτει απο την καθαρή ισορροπία της διατομής

φ ο εμπειρικός συντελεστής μείωσης της ροπήςκάμψης

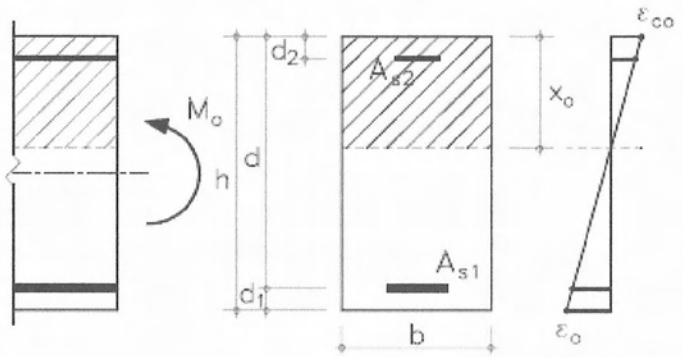
Το φ λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο

$$\varphi = \begin{cases} 0{,}9 \ \ \gamma\iota\alpha\ \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0{,}65 + \dfrac{0{,}25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} \ \ \gamma\iota\alpha\ \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 \ \ \gamma\iota\alpha\ \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (3.6.30)$$

3.7 FIB14 (Διεθνής Κανονισμός)

Για την καμπτική αντοχή ο FIB14προτείνει την παρακάτω μοντελοποίηση του προβλήματος για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής Mu.

Εστω μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος με διαστάσεις b, hεφελκυόμενο χαλύβδινο οπλισμο επιφάνειας A_{s1},θλιβόμενο χαλύβδινο οπλισμο A_{s1}, ενισχυμένη με επικολλούμενο οπλισμο A_f. Πριν την ενίσχυση ο κανονισμος προτείνει τον υπολογισμό της αρχικής κατάστασης της διατομής και συγκεκριμένα τις ανηγμένες παραμορφώσεις των δύο πελμάτων, εφελκυόμενο κ θλιβόμενο. Βαση του μοντέλου της ρηγματωμένης διατομης έχουμε το εξής παρακάτω συνθήκες



Σχήμα 3.9 Ισορροπία δοκού (FIB14)

Από τις εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων έχουμε για την διατομή ότι

$$\frac{1}{2}bx_o^2 + (a_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2) = a_s A_{s1}(d - x_o) \text{με} a_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.7.1)$$

Όπου

b το πλάτος της διατομής σκυροδέματος

A_{s1} η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_{s2} η επιφάνεια του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

x_o το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα ως προς x_o προκύπτει μια εξίσωση δευτέρου βαθμού η οποία μπορει να λυθεί είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά. Με την ευρεση του x_o μπορούν να υπολογιστούν η ροπή

αδράνειας I_{o2}της ρηγματωμένης διατομής και οι ανηγμενες παραμορφώσεις των πελμάτων σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους.

Υπολογισμός Ροπής Αδράνειας ρηγματωμένης διατομής

$$I_{o2} = \frac{bx_o^3}{3} + (a_s - 1)A_{s2}(x_o - d_2)^2 + a_s A_{s1}(d - x_o)^2 \quad (3.7.2)$$

Όπου

b το πλάτος της διατομής σκυροδέματος

A_{s1} η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_{s2} η επιφάνεια του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

x_o το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

α_s η αναλογία του μετρου ελαστικότητας του χάλυβα προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

Υπολογισμός ανηγμένης παραμόρφωσης θλιβόμενου πέλματος(θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος)

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{o2}} \quad (3.7.3)$$

Όπου

M_o η καμπτική ροπή των νεκρών φορτίων (deadloads)

I_{o2} η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής

E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

x_o το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

Υπολογισμός ανηγμένης παραμόρφωσης εφελκυόμενου πέλματος(εφελκυόμενης διατομής σκυροδέματος)

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co}\frac{h - x_o}{x_o} \quad (3.7.4)$$

Όπου

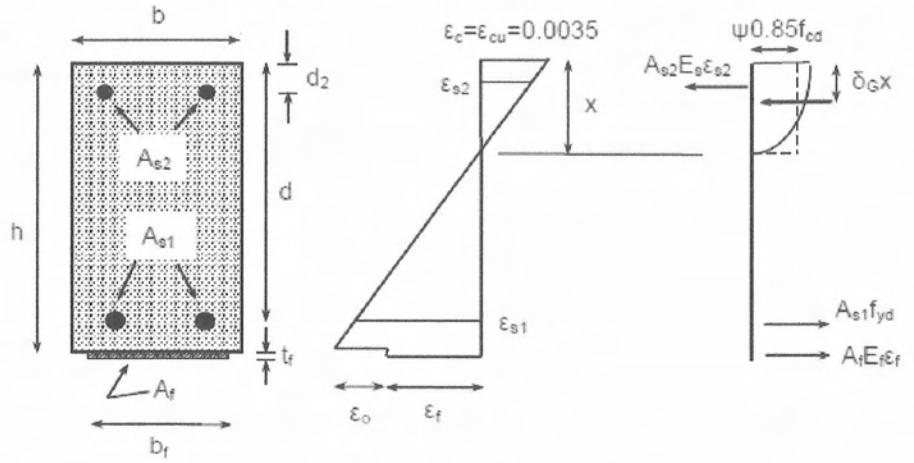
ε_{co} η ανηγμένη παραμόρφωσητου θλιβόμενου πέλματος

h το συνολικό ύψος της διατομης

x_o το ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

Η παραπάνω ανηγμένη παραμόρφωση υπολογίζεται διότι ισούται με την αρχική αξονική παραμόρφωση του συστήματος FRP, και χρειάζεται για την περεταίρω αξιολόγηση του ενισχυόμενου μέλους.

Έπειτα όσον αφορά την ανάλυση για οριακή κατάσταση αστοχίας (ultimatelimitstate), ουπολογισμός της Καμπτικής Ροπής αστοχίας βασίζεται στις αρχές του σχεδιασμού μελών οπλισμένου σκυροδέματος, και λαμβάνεται υπόψιν τόσο η ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων όσο και το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων σε επίπεδο διατομής.



Σχήμα 3.10 Ισορροπία δοκού (FIB14)

Αρχικά επιβάλλεται συντελεστής ασφαλείας στο σύνθετο υλικό (γ_f) που σχετίζονται με την γενικότερη αντοχή του σε εφελκυσμό που σχετίζονται με το υλικό, την μέθοδο εφαρμογής και τις διάφορες συνθήκες εργοταξίου

Πίνακας 3.7. Συντελεστής ασφαλείας ΙΟΠ γ_f

Τύπος FRP	*Application Type A*	*Application Type B*
CFRP	*1.20*	*1.35*
AFRP	*1.25*	*1.45*
GFRP	*1.30*	*1.50*

Application Type A: Αφορά την επικόλληση προκατασκευασμένων εργοστασιακά συστημάτων FRP κάτω από κανονικές συνθήκες ποιότητας. Επίσης αφορά την «επιτόπου διάστρωση» των συστημάτων FRP (wet lay-up systems) δεδομένου ότι λαμβάνονται όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές που έτσι ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή ποιότητα όσον αφορά τον έλεγχο τόσο των συνθηκών εφαρμογής του FRP όσο και της γενικότερης διαδικασίας εφαρμογής του

Application Type B: Εφαρμογή των «επιτόπου διάστρωσης» συστημάτων FRP (wet lay-up) κάτω από κανονικές συνθήκες ελέγχου εργοταξίου. Επίσης εφαρμογή οποιουδήποτε άλλου συστήματος κάτω από δύσκολες συνθήκες εργοταξίου

Η εφελκυστική τάση αντοχής σχεδιασμού έχει την παρακάτω μορφή

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f}\frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \tag{3.7.5}$$

όπου

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

ε_{fum} η 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

Υπό συνήθεις συνθήκες θεωρούμε ότι $\frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} = 1$

Θεωρώντας επιθυμητή μορφή αστοχίας την διαρροή χάλυβα/σύνθλιψη σκυροδέματος από τον υπολογισμό ουδέτερου άξονα έχουμε

$$0{,}85\psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f \tag{3.7.6}$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{co}\frac{x - d_2}{x} \le f_{yd} \tag{3.7.7}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \le \frac{f_{fd}}{E_f} \tag{3.7.8}$$

Όπου

b το πλάτος της διατομής

h το ύψος της διατομής

d_2 η επικάλυψη του σκυροδέματος

A_{s1} η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_{s2} η επιφάνεια του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του συνολικού οπλισμου FRP

xτο ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP

f_{cd} ηθλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

f_{yd}ηταση διαρροής του χάλυβα

ε_{co} η ανηγμένη παραμόρφωση του θλιβόμενου πέλματος

ε_{cu} η ανηγμένη παραμόρφωση θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος (=0.0035)

$\psi = 0{,}8$για αυτο τον τρόπο αστοχίας (διαρροή χάλυβα/σύνθλιψη σκυροδέματος)

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων επιλύεται ως προς x και χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής της διατομής

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd}(d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2) \qquad (3.7.9)$$

Όπου

h το συνολικό ύψος της διατομής
d το καθαρό ύψος της διατομής

d_2 η επικάλυψη του σκυροδέματος

A_{s1} η επιφάνεια του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_{s2} η επιφάνεια του θλιβόμενου χαλύβδινου οπλισμού

A_f η επιφάνεια του συνολικού οπλισμου FRP

xτο ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP

ε_{s2}η ανηγμένη παραμόρφωση του θλιβόμενου οπλισμού

ε_fη ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP

f_{yd}ηταση διαρροής του χάλυβα

$\delta_G = 0{,}4$ για αυτο τον τρόπο αστοχίας (διαρροή χάλυβα/σύνθλιψη σκυροδέματος)

Για να ισχύουν οι εξισώσεις πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές

Α)Διαρροή του εφελκυόμενου χαλύβδινου οπλισμού

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu}\frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \qquad (3.7.10)$$

Όπου

xτο ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

d το καθαρό ύψος της διατομής

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

f_{yd}ηταση διαρροής του χάλυβα

ε_{cu} η ανηγμένη παραμόρφωση θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος (=0.0035)

Β)Η ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu}\frac{h-x}{x} \leq \varepsilon_{fud} \qquad (3.7.11)$$

Όπου

xτο ύψος της θλιβόμενης διατομής σκυροδέματος

h το συνολικό ύψος της διατομής

E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

ε_{fud}η μεγιστη ανηγμένη παραμορφωση σχεδιασμού

ε_{cu} η ανηγμένη παραμόρφωση θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος (=0.0035)

Διαρροή Χάλυβα ακολουθούμενη από αστοχία του FRP

Για να καλυφθεί και αυτό το ενδεχόμενο αστοχίας το οποίο είναι πιθανό θεωρητικά, ο FIB14 κάνοντας χρήση των βασικών εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστού παραπάνω αναφέρει ότι αντικαθιστώντας το ε_{cu} με ε_c, το ε_fμε το ε_{fud} αλλά και τα δ_G, ψ με τις τιμές από τις σχέσεις παρακάτω έχουμε περιγραφή του φαινομένου.

$$\psi=\begin{cases} 1000\varepsilon_c\left(0{,}5-\frac{1000}{12}\varepsilon_c\right) & \gamma\iota\alpha\ \varepsilon_c \le 0{,}002 \\ 1-\frac{2}{3000\varepsilon_c} & \gamma\iota\alpha\ 0{,}002 \le \varepsilon_c \le 0{,}0035 \end{cases} \quad (3.7.12)$$

$$\delta_G=\begin{cases} \frac{8-1000\varepsilon_c}{4(6-1000\varepsilon_c)} & \gamma\iota\alpha\ \varepsilon_c \le 0{,}002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-4)+2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-2)} & \gamma\iota\alpha\ 0{,}002 \le \varepsilon_c \le 0{,}0035 \end{cases} \quad (3.7.13)$$

Όπου

ε_c η ανηγμένη θλιπτικής παραμόρφωση του σκυροδέματος

3.8 Σύγκριση Κανονισμών

Οι διάφοροι κανονισμοί που αναφέρθηκαν έχουν ως βασικό μοτίβο την ικανοποίηση ισορροπίας και συνθηκών συμβιβαστού της διατομής με γνώμονα την πρόβλεψη τόσο των τάσεων όσο και των ανηγμένων παραμορφώσεων στα τρία υλικά (σκυρόδεμα, χάλυβας, σύστημα FRP). Κατά δεύτερον εισάγουν διάφορους μειωτικούς συντελεστές όσον αφορά στο επίπεδο εμπιστοσύνης τόσο για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών όσο και για την πρόβλεψη και την πρόνοια σε θέματα που αφορούν στην επίδραση των δυσμενών παραγόντων στο έργο ενίσχυσης. Συγκεκριμένα οι κανονισμοί πέρα από τους καθιερωμένους συντελεστές ασφαλείας για τα υλικά προτείνουν την χρήση μειωτικών συντελεστών που αφορούν στα διάφορα περιβάλλοντα στα οποία εκτίθεται το έργο ενίσχυσης (διαβρωτικό/μη διαβρωτικό),αλλά και το μέγεθος του έργου (συνήθεις/μη συνήθεις κατασκευές όπως πχ γέφυρες).

Ωστόσο η μελέτη των διαφόρων μορφών αστοχίας από την επιστημονική κοινότητα έδωσε την δυνατότητα να περιγραφούν και να αποφευχθούν διάφορες μορφές αστοχίας με δραστικά μέτρα τα οποία υιοθετούνται από τους διαφόρους κανονισμούς. Αυτά συνήθως επιτυγχάνονται μέσω των συνθηκών συμβιβαστού των υλικών της διατομής Ω/Σ.

TR55

Ο Βρετανικός κανονισμός θεωρεί ως κύρια μορφή αστοχίας την αστοχία λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος και διαρροή χάλυβα. Συγκεκριμένα ορίζει ότι οι παρακάτω μορφές αστοχίας συμβαίνουν σύμφωνα με την παρακάτω συνθήκη

Εάν $M_{rd} \geq M_{rb}$ τότε έχουμε πρακτικά αστοχία λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος (concrete Crushing)

Εάν $M_{rd} < M_{rb}$ τότε έχουμε πρακτικά αστοχία λόγω θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Το εν λόγω μαθηματικό μοντέλο ως παραδοχές, λαμβάνει υπόψη του την ισορροπία και το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων των υλικών.

Για την δύναμη του σκυροδέματος γίνεται χρήση της ισοδύναμης ομοιόμορφης κατανομής του διαγράμματος τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων. Επίσης ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους σκυροδέματος λαμβάνεται η τιμή 0,0035.

Επίσης το μοντέλο προτείνει την υποτίμηση κατά 50% της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος με σκοπό τον σχεδιασμό.

Για την αντοχή του χάλυβα έχουμε απομείωση της τάση διαρροής του χάλυβα κατά 25% (συντελεστής ασφαλείας 1.15)

Σχετικά με τα ΙΟΠ έχουμε συντελεστές απομείωσης που αφορούν στην διαδικασία παραγωγής των ινών αλλά και τον είδος του υλικού (ανθρακόνημα, υαλόνημα). Για παράδειγμα για χρήση ανθρακονημάτων ο συντελεστής είναι 1.54 και η ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ περιορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\varepsilon_{cft} \leq \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{mF}}$$

CNR DT-200

Ο Ιταλικός κανονισμός είναι βασισμένος στην περιγραφή

1. της αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος (Concrete Crushing)
2. της αστοχίας έναντι θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Επίσης λαμβάνονται ειδικά μέτρα που αφορούν το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων του FRP μέτρα κατά του intermediate debonding για τις τιμές που αφορούν την οριακή κατάσταση αστοχίας σε επίπεδο σχεδιασμού.

Ομοίως γίνεται χρήση συνθηκών ισορροπίας των δυνάμεων των υλικών στην διατομή αλλά και συνθηκών συμβιβαστού των ανηγμένων παραμορφώσεων τους. Επίσης υιοθετείται η ισοδύναμη ομοιόμορφη κατανομή του διαγράμματος τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος.

Ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους σκυροδέματος λαμβάνεται η τιμή 0,0035.

Επίσης γίνεται χρήση μειωτικών συντελεστών ασφαλείας για το επίπεδο εμπιστοσύνης των ήδη υπαρχόντων υλικών, επιπρόσθετα των κλασσικών συντελεστών ασφαλείας για τον σχεδιασμό.

Οι μειωτικοί συντελεστές ασφαλείας των ΙΟΠ καθορίζονται βάσει των συνθηκών του εργοταξίου που λαμβάνει χώρα η κατασκευή (πχ Εσωτερικός , Εξωτερικός χώρος, Διαβρωτικό Περιβάλλον) και του υλικού ενίσχυσης που χρησιμοποιείται (Άνθρακας , Αραμίδιο, Γυαλί). Παρακάτω δίδονται οι σχέσεις όπου περιορίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ, καθώς και ο πίνακας με τους μειωτικούς συντελεστές ασφαλείας των παραπάνω αστάθμητων παραγόντων.

$$\varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \middle| \varepsilon_{fdd}\right\}$$

Όπου

ε_f η ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP

ε_{fk} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του συστηματος FRP

γ_f συντελεστής ασφαλείας οριακης κατάστασης αστοχίας για σχεδιασμό με τιμή από 1.2-1.5

ε_{fdd} μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σχεδιασμού αποκόλλησης του FRP(βλέπε Σελ.25)

η_a μειωτικός συντελεστής περιβαλλοντικών συνθηκών που δίνεται από τον κανονισμό

Πίνακας 3.8. Συντελεστής η_a

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος ινών/ρητινης	η_a
Εσωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.75
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.85
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.95
Εξωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.65
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.75
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85
Εχθρικά Περιβάλλοντα	Γυαλί /Εποξειδική	0.50
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.70
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85

ECP208

Ο αιγυπτιακός κανονισμός ενισχύσεων με FRP ομοίως είναι βασισμένος και αυτός στην περιγραφή των κλασσικών μορφών αστοχίας όπως

1. της αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος (Concrete Crushing)
2. της αστοχίας έναντι θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Ωστόσο λαμβάνοντας κάποιες ειδικές συνθήκες συμβιβαστού προσπαθεί να αποτρέψει αστοχίες όπως την αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος (cover delamination) όπως επίσης και της αποκόλλησης του FRP (FRP debonding).

Γενικότερα ακολουθείται ομοίως η λογική της ισορροπίας των δυνάμεων των υλικών της διατομής και του συμβιβαστού των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους σκυροδέματος λαμβάνεται η τιμή 0,003 δηλαδή με επιβεβλημένη μία μείωση της ονομαστικής της τιμής κατά 14%

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις του ΙΟΠ περιορίζονται από

$$\varepsilon_{fe} \leq k_m \varepsilon_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu}^* = CE\, \varepsilon_{fu}$$

Όπου

ε_{fu} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του FRP

CE ο μειωτικός συντελεστής περιβαλλοντικών συνθηκών σύμφωνα με τον πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9. Τιμές μειωτικού συντελεστή CE

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος ινών/ρητινης	CE
Εσωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.75
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.85
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.95
Εξωτερικοί Χώροι	Γυαλί /Εποξειδική	0.65
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.75
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85
Εχθρικά Περιβάλλοντα	Γυαλί /Εποξειδική	0.50
	Αραμίδιο/Εποξειδική	0.70
	Άνθρακας/Εποξειδική	0.85

Ο συντελεστής k_m συμβάλλει στην αποτροπή των φαινομένων Αποκόλλησης ΙΟΠ και επικάλυψης σκυροδέματος σε επίπεδο σχεδιασμού και δίνεται παρακάτω.

$$k_m = \begin{cases} \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}^*}\left(1 - \dfrac{nE_f t_f}{360000}\right) \leq 0.9 \\ \dfrac{1}{60\varepsilon_{fu}^*}\left(\dfrac{90000}{nE_f t_f}\right) \leq 0.9 \end{cases}$$

Όπου

n ο αριθμός των στρώσεων FRP

E_f το μέτρο ελαστικότητας του συστήματος FRP σε MPa

t_f το πάχος της μια στρώσης του FRP σε mm

Ο περιορισμός της τιμής του k_m στην τιμή 0.9 συμβάλλει πιο συγκεκριμένα στον περιορισμό της αποκόλλησης του ΙΟΠ

JSCE

Ο Ιαπωνικός Κανονισμός για την ενίσχυση δοκών Ω/Σ με επικολλούμενα ΙΟΠ βασίζεται και αυτός στην ικανοποίηση συνθηκών ισορροπίας και εξισώσεων συμβιβαστού των υλικών με σκοπό τον σχεδιασμό.

Για τον σχεδιασμό το μοντέλο του κανονισμού προτείνει την χρήση συντελεστών ασφαλείας (συντελεστές απομείωσης) που αφορούν την απομείωση των τάσεων αστοχίας των υλικών της διατομής, την απομείωση της ροπής αστοχίας βάσει του τρόπου φόρτισης με σκοπό τον ασφαλή σχεδιασμό.

Επιπρόσθετα κάνει προτάσεις για συντελεστές ασφαλείας που αφορούν τα φορτία, τον τύπο της κατασκευής, αλλά και την ανάλυση.

Για το σκυρόδεμα γίνεται χρήση της ισοδύναμης ομοιόμορφης κατανομής του διαγράμματος τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων. Ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους σκυροδέματος λαμβάνονται τιμές οι οποίες προκύπτουν συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \leq 0.0035$$

$$\gamma\iota\alpha\ f'_{ck} \leq 80MPa$$

Κατά τον σχεδιασμό γίνεται μνεία όσον αφορά τον περιορισμό της μέγιστη τάσης που ασκείται στο ΙΟΠ με σκοπό την αποφυγή της αστοχίας λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού (FRP debonding failure).

Πιο συγκεκριμένα έχουμε περιορισμό της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης του συστήματος ΙΟΠ σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\varepsilon_f \leq \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{mf}} \quad \mu\varepsilon\ \gamma_{mf} = 1.3$$

Ωστόσο για λόγους αποτροπής φαινομένων debonding, ο JSCE προτείνει τον περιορισμό της τάσης σ_f του ΙΟΠ σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

$$\sigma_f \leq \sqrt{\frac{2G_f E_f}{nt_f}}$$

$$G_f = 0.644 f_{ck}^{'\,0.19}$$

Όπου

σ_f η τάση του ΙΟΠ σε MPa

G_fη ενεργεια θραυσης της διεπιφάνειας ΙΟΠ-σκυροδέματος σε MPa

E_fτο μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ σε MPa

nτο πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ

t_fτο πάχος των στρώσεων σε mm

$f_{ck}^{'}$η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa

ISIS

Ο Καναδικός κανονισμός ISIS βασίζεται στην φιλοσοφία του σχεδιασμού των ενισχυμένων διατομών με ΙΟΠ, κάνοντας χρήση ονομαστικών τιμών των αντοχών και των οριακών παραμορφώσεων των υλικών, χωρίς να λαμβάνεται άμεση πρόνοια για την αποτροπή συγκεκριμένων τρόπων αστοχίας.

Για τον σχεδιασμό έναντι κάμψης προτείνει την χρήση μειωτικών συντελεστών των υλικών στις δυνάμεις των υλικών για το κάθε υλικό χωριστά.

Συγκεκριμένα το μοντέλο του κανονισμού προτείνει την χρήση μειωτικών συντελεστών για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα βάσει του τύπου του έργου (πχ κτήρια ή γέφυρες)

Όσον αφορά τον μειωτικό συντελεστή ασφαλείας του σύνθετου υλικού ο κανονισμός προτείνει μείωση της τιμής της δύναμης του υλικού ανάλογα με το τύπο του υλικού (άνθρακας, γυαλί) σύμφωνα με τον Πίνακα 3.10.

Πινακας3.10 Μειωτικοί Συντελεστές ασφαλείας ΙΟΠ

	φ_{frp}
Carbon FRP (Ανθρακόνημα)	0,75
Glass FRP (Υαλόνημα)	0,6

Αυτή η μείωση επιδράει κ στην ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ. Ο περιορισμός της ανηγμένης παραμόρφωσης του ΙΟΠ γινεται με την παρακάτω σχέση

$$\varepsilon_{frp} \leq \varepsilon_{frpu}$$

Όπου

ε_{frpu} *η ονομαστική μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του συστήματος FRP*

ACI440

Ο αμερικάνικος κανονισμός βασίζεται στην περιγραφή της αστοχίας των παρακάτω τρόπων αστοχίας

1. της αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος (Concrete Crushing)
2. της αστοχίας έναντι θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Επιπροσθέτως λαμβάνονται ειδικά μέτρα που αφορούν το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων του FRP κατά των αστοχιών έναντι του intermediate debonding σε επίπεδο τιμών σχεδιασμού.

Η ικανοποίησης της ισορροπίας και των εξισώσεων συμβιβαστού των ανηγμένων παραμορφώσεων, γίνεται με χρήση του παραβολικού διαγράμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος.

Το μοντέλο του ACI προτείνει την χρήση συντελεστών ασφαλείας που αφορούν το είδος του έργου, (σύνηθες ή μη),το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει χώρα όπως επίσης και το υλικό του ΙΟΠ.Οιμειωτικοί συντελεστές ασφαλείας δίνονται βάσει του Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11.Περιβαλλοντικός συντελεστής μείωσης για τα διάφορα συστήματα FRP

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος Ινών	Περιβαλλοντικός συντελεστής μείωσης C_E
Εσωτερικοί χώροι	Ανθρακόνημα	0,95
	Υαλόνημα	0,75
	Αραμίδιο	0,85
Εξωτερικοί χώροι (γέφυρες, πυλώνες, ανοικτοί χώροι στάθμευσης, κλπ)	Ανθρακόνημα	0,85
	Υαλόνημα	0,65
	Αραμίδιο	0,75
Ακραία Περιβάλλοντα (χημικές εγκαταστάσεις και, εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων)	Ανθρακόνημα	0,85
	Υαλόνημα	0,50
	Αραμίδιο	0,70

Η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ περιορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

Όπου

ε_{fu}^* η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του FRP

C_Eο περιβαλλοντικός συντελεστης μείωσης του FRP για τον σχεδιασμό

Η ισχύουσα ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ ε_{fe}, για σχεδιασμό περιορίζεται όπως παρακάτωμε σκοπό την αποτροπή των φαινομένων αποκόλλησης του ΙΟΠ

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{\frac{f_c'}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

Όπου

E_fτο μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ σε MPa

n το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ

t_f το πάχος των στρώσεων σε mm

f_c'η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa

ε_{fu}η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ

FIB14

Ο FIB14 βασίζεται στην περιγραφή των παρακάτω τρόπων αστοχίας ως βάση σχεδιασμού.

1. της αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος (Concrete Crushing)
2. της αστοχίας έναντι θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Το εν λόγω μαθηματικό μοντέλο ως παραδοχές, λαμβάνει υπόψη του την ισορροπία και το συμβιβαστό των ανηγμένων παραμορφώσεων των υλικών.

Για την δύναμη του σκυροδέματος γίνεται χρήση της ισοδύναμης ομοιόμορφης κατανομής του διαγράμματος τάσεων ανηγμένων παραμορφώσεων.

Επίσης ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση τους σκυροδέματος λαμβάνεται η τιμή 0,0035.

Ο περιορισμός της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης του ΙΟΠ για τον σχεδιασμό πρακτικά ορίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης

$$\varepsilon_f \leq \frac{efu}{\gamma_f}$$

Όπου

ε_{fu}η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ

γ_fο συντελεστής ασφαλείας του ΙΟΠ

Ο συντελεστής ασφαλείας του ΙΟΠ γ_f καθορίζεται σύμφωνα με το υλικό και το περιβάλλον στο οποίο θα λάβει χώρα η καμπτική ενίσχυση όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12. Συντελεστής ασφαλείας ΙΟΠ γ_f

Τύπος FRP	*Application Type A*	*Application Type B*
CFRP	*1.20*	*1.35*
AFRP	*1.25*	*1.45*
GFRP	*1.30*	*1.50*

Οι εξηγήσεις των όρων Application Type A, καιApplication Type B ορίζονται όπως παρακάτω:

Application Type A: Αφορά την επικόλληση προκατασκευασμένων εργοστασιακά συστημάτων FRP κάτω από κανονικές συνθήκες ποιότητας. Επίσης αφορά την «επιτόπου διάστρωση» των συστημάτων FRP (wet lay-up systems) δεδομένου ότι λαμβάνονται όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές που έτσι ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή ποιότητα όσον αφορά τον έλεγχο τόσο των συνθηκών εφαρμογής του FRP όσο και της γενικότερης διαδικασίας εφαρμογής του

Application Type B: Εφαρμογή των «επιτόπου διάστρωσης» συστημάτων FRP (wet lay-up) κάτω από κανονικές συνθήκες ελέγχου εργοταξίου. Επίσης εφαρμογή οποιουδήποτε άλλου συστήματος κάτω από δύσκολες συνθήκες εργοταξίου

Σύγκριση Κανονισμών

Από πλευράς κανονισμών βλέπουμε ότι γενικότερα ότι οι περισσότεροι κανονισμοί εισάγουν συντελεστές ασφαλείας για την μείωση της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης του ΙΟΠ πέραν αυτών που σχετίζονται με την εμπιστοσύνη μας για ταδιάφορα υλικά. Αυτό γίνεται για λόγους που οφείλονται στις αβεβαιότητες της κατασκευής των υλικών αλλά και των διαφόρων περιβαλλόντων έκθεσης των ενισχύσεων.

Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι οι CNR-DT200, ECP208, και ACI440 φαίνεται για τα διάφορα περιβάλλοντα και τα διάφορα υλικά να ακολουθούν τις ίδιες γραμμές αντιμετώπισης. Χαρακτηριστικά οι πίνακες που προτείνουν για αυτές τις συνθήκες δείχνουν τις ίδιες τιμές. Οι διαφορές τους προκύπτουν όσον αφορά του πρόσθετους συντελεστές που εισάγουν και σχετίζονται με την αποτροπή των διαφόρων τρόπων αστοχίας για παράδειγμα ο ECP208εισάγει έναν συντελεστή k_m που συμβάλλει στην αποτροπή των φαινομένων Αποκόλλησης ΙΟΠ και επικάλυψης σκυροδέματος σε επίπεδο σχεδιασμού. Ο ACI440 εισάγει ένα μέγεθος ανηγμένη παραμόρφωσης ε_{fd} που πρέπει να ορίζει την ανηγμένη παραμόρφωση του ΙΟΠ. Αντίστοιχα ο Ιταλικός κανονισμός ορίζει επίσης ένα οριακό μέγεθος ανηγμένης παραμόρφωσης σχεδιασμούε_{fd} που συμβάλλει επίσης στον περιορισμό του Debonding.

Από τα παραπάνω θεωρούμε ότι πιο αυστηρός είναι ο ECP208 αφού στο σχεδιασμό λαμβάνει υπόψη του τόσο την αποτροπή των διαφόρων δυσμενών φαινομένων όσο και την επιρροή των εργοταξιακών συνθηκών στην καμπτική ενίσχυση.

$\varepsilon_{fe} \leq k_m CE\, \varepsilon_{fu}$ (ECP208)

$\varepsilon_{fd} = 0.41\sqrt{\frac{f_c'}{nE_f t_f}} \leq 0.9 C_E \varepsilon_{fu}^*$ (ACI440)

$\varepsilon_{fd} = min\left\{\eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \middle| \varepsilon_{fdd}\right\}$ (CNR-DT200)

Επίσης μέτρα κατά της αποκόλλησης του ΙΟΠλαμβάνει ο JSCE, παραβλέποντας το γεγονός της επιρροής των διαφόρων περιβαλλοντικών συνθηκών περιορίζοντας την τάση του ΙΟΠ σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$\sigma_f \leq \sqrt{\frac{2G_f E_f}{nt_f}}$$

Όσον αφορά τους κανονισμούς TR55 και FIB14 και ISIS έχουμε απλή περιγραφή και διαστασιολόγηση των τρόπων αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος καιΘραύσης του ΙΟΠ, χωρίς πρόσθετα μέτρα έναντι φαινομένων αποκόλλησης του ΙΟΠ ή και της επικάλυψης σκυροδέματος.Επίσης σε αυτές τις περιπτώσεις οι συντελεστές ασφαλείας σχετίζονται με τις εργοταξιακές συνθήκες του έργου και το είδος του

υλικού, αλλά είναι αρκετά μειωμένοι σε σχέση με των παραπάνω κανονισμών.

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

4.1 Μεθοδολογία Έρευνας

Για την μελέτη του φαινομένου της καμπτικής ενίσχυσης των δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος με εξωτερικά επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή συγκεντρώθηκαν από την διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία δοκοί που καταπονήθηκαν καμπτικά με κάμψη 4 σημείων (4 point bending) μέχρι την κατάσταση αστοχίας. Συγκεκριμένα έγινε καταγραφή της γεωμετρίας των δοκών, των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, των καμπτικών ροπών αστοχίας καθώς και των τρόπων αστοχίας τους. Τα παραπάνω στοιχεία κατεγράφησαν σε λογιστικό φύλλο Microsoft Excel για την ανάλυση που ακολούθησε.

Στη συνέχεια,κάνοντας χρήση των παραπάνω στοιχείων έγινε υπολογισμός των θεωρητικών τιμών των καμπτικών ροπών αστοχίας σύμφωνα με τα μοντέλα υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας σε κάμψη που δίνουν οι κανονισμοί που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Μετά τον υπολογισμό των καμπτικών ροπών αντοχής έγινε διάκριση των δοκών και των προκυπτουσών ροπών αντοχής σύμφωνα με τον τρόπο αστοχίας της εκάστοτε δοκού. Για αυτό τον λόγο ομαδοποιήθηκαν τα δεδομένα όσον αφοράστον τρόπο αστοχίας των δοκών σύμφωνα με τις παρακάτω ομάδες.

1) Αστοχία λόγω Θραύσης του σύνθετου υλικού FRP (FRP rupture)
2) Αστοχία λόγω Αποκόλλησης του σύνθετου υλικού FRP (FRP debonding)
3) Αστοχία λόγω Σύνθλιψης Σκυροδέματος (Concrete crushing)
4) Αστοχία λόγω Διάτμησης (Shear failure)
5) Αστοχία λόγω Αποκόλλησης της Επικάλυψης του Εφελκυόμενου Οπλισμού (Concrete cover delamination)

Στον Πίνακα 4.1 φαίνεται ο συγκεντρωτικός αριθμός δοκιμίων ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας. Χαρακτηριστικό είναι ότι από τα 151 δοκάρια μόνο τα 29 αστόχησαν με τον πλέον επιθυμητό τρόπο αστοχίας της θραύσης του ΙΟΠ.

Πίνακας 4.1. Μέγεθος δείγματος ανά τρόπο αστοχίας

Τρόπος αστοχίας	**Μέγεθος δείγματος**
Θραύση του σύνθετου υλικού FRP	29
Αποκόλληση του σύνθετου υλικού FRP	61
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	12
Διάτμηση	2
Αποκόλληση της Επικάλυψης του ΕφελκυόμενουΟπλισμού	47

ΣΥΝΟΛΟ	151

Αξίζει να αναφερθεί ότι τοποθετήθηκαν στην ίδια κατηγόρια οι τρόποι Αστοχίας λόγω Αποκόλλησης του σύνθετου υλικού FRP που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως

1. Αποκόλληση του άκρου του FRP συστήματος (Plate end interfacial Debonding)

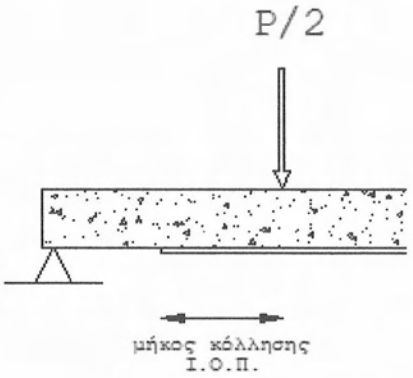
2. Αποκόλληση του συστήματος FRP που προκύπτει από ρηγμάτωση που ξεκινάει ενδιάμεσα στα άκρα του FRP.(Intermediate Crack Induced Interfacial Debonding)

Αυτό έγινε για λόγους ευκολίας καθώς και στα δύο φαινόμενα έχουμε ουσιαστικά αποκόλληση λόγω παρουσίας ρωγμής στο σκυρόδεμα.

Μετά την ομαδοποίηση μελετήθηκε το ποσοστιαίο σφάλμα της απόκλισης της θεωρητικής καμπτικής ροπής κάθε κανονισμού με την αντίστοιχη πειραματική σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$error = \frac{M_{exp} - M_{theor}}{M_{exp}} 100\%$$

Στην συνέχεια μελετήθηκε κατά πόσο επηρεάζεται η αστοχία των δοκών από την οριζόντια απόσταση μεταξύ του σημείου που εφαρμόζεται η δύναμη φόρτισης και του άκρου της επικολλημένης ταινίας ινοπλισμένου πολυμερούς, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1.



Σχήμα 4.1 Μήκος επικόλλησης ΙΟΠ.

Επίσης διερευνήθηκε και η επιρροή της δυστένειας της διατομής στην Καμπτική ικανότητα ανάλογα με τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η επιρροή του γινομένου:

$$\frac{A_f}{bd}E_f = \rho_f E_f$$

4.1.1 Παραδοχές

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών δεν ήταν διαθέσιμα πλήρως από τον εκάστοτε μελετητή. Γι αυτό τον λόγο προέκυψε η ανάγκη για την λήψη μιας σειράς παραδοχών όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά που έλειπαν. Συγκεκριμένα όσον αφορά στο σκυρόδεμα πολλές φορές δεν ήταν διαθέσιμο το μέτρο ελαστικότητας E_{cm} και γι αυτόν τον λόγο το θεωρήσαμε γνωστό σύμφωνα με την σχέση (4.1.1)

$$E_{cm} = 22\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \ \sigma\varepsilon \ MPa \quad (4.1.2)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

Όπου

f_{ck} η τάση θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε MPa

Επίσης σε κάποια σημεία δεν γινόταν γνωστό ποιο είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβαE_s, και χρειάστηκε να θεωρήσουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει την παρακάτω τιμή: (4.1.3)

$$E_s = 200\ GPa$$

Όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των συστημάτων FRP αρκετοί μελετητές δεν ανέφεραν τα ποσοστά ινών και ρητίνης στο εφαρμοζόμενο υλικό καθώς και τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Αντί αυτού παρείχαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινώνσύμφωνα με τον κατασκευαστή και ήταν λίγες οι φορές που είχε γίνει πείραμα για να επιβεβαιωθούν οι ονομαστικές αντοχές. Ήταν σύνηθες φαινόμενο να υπολείπονται ένα από τα τρία χαρακτηριστικά της ανθεκτικότητας του FRP. Για να παρακαμφθεί αυτή η δυσκολία λάβαμε την παραδοχή αντοχής των γραμμικώς ελαστικών υλικών όπως παρακάτω (4.1.4)

$$f_u = E_f \varepsilon_{fk}$$

Όπου

f_u η τάση εφελκυστική αντοχής των ινών

E_f Το μέτρο ελαστικότητας των ινών

ε_{fk} η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση των ινών

Άλλο σημείο το οποίο θα έπρεπε να αναφερθεί είναι ότι δεν έγινε διάκριση προκατασκευασμένων πλακών FRP και επιτόπου επαλειφόμενων FRP. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο υπολογισμός έλαβε υπόψη του τις διαστάσεις του συνολικού οπλισμού FRP.

Για την υλοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι συντελεστές ασφάλειας που περιγράφονται στον εκάστοτε κανονισμό. Επιπρόσθετα κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν κάποιες παραδοχές. Οι συντελεστές ασφαλείας καθώς και οι παραδοχές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια ξεχωριστάγια κάθε αναλυτικό μοντέλο.

TR55

Η τάση διαρροής του χάλυβα διαιρείται με 1.15 (μείωση 15%)

Η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος διαιρείται με 1.5 (μείωση 33%)

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται 0,0035

Η μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού FRP διαιρείται με συντελεστήγ_{mF} που προκύπτει ως εξής.

$$\gamma_{mF} = \gamma_{mm}\gamma_{mf} \quad \text{όπου } \gamma_{mm} = 1.1 \text{ και } \gamma_{mf} = 1.5$$

CNR DT-200

Η τάση διαρροής του χάλυβα διαιρείται με 1.35για λόγους ασφαλείας.(μείωση 25%)

Η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος μειώνεται κατά 50% για λόγους ασφαλείας σχεδιασμού.

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με 0,0035

Η μέγιστη εφελκυστικήανηγμένη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού FRP διαιρείται με 1.5

Ωστόσο επιβάλλεται μειωτικός συντελεστήςη_aγια την ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση σχεδιασμού του σύνθετου υλικού FRP για συνήθη έργα όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Τιμές μειωτικού συντελεστή η_a

Είδος Υλικού	Τιμή μειωτικού συντελεστή η_a
CFRP	0.65
GFRP	0.85
Συνδυασμός των παραπάνω	0.75

ECP 208

Η τάση διαρροής του χάλυβα διαιρείται με 1.15 (μείωση 15%)

Η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος διαιρείται με 1.5 (μείωση 33%)

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται 0,003

Η μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού FRP διαιρείται με 1.5

Ωστόσο επιβάλλεται μειωτικός συντελεστήςCEγια την ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση σχεδιασμού του σύνθετου υλικού FRP για συνήθη έργα όπως παρακάτω στον Πίνακα 4.3

Πίνακας 4.3. Τιμές μειωτικού συντελεστή CE

Είδος Υλικού	Τιμή μειωτικού συντελεστήCE
CFRP	0.95
GFRP	0.75
Συνδυασμός των παραπάνω	0.85

JSCE

Η τάση διαρροής του χάλυβα διαιρείται με 1.0. (4.1.5)

Η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος διαιρείται με 1.3. (μείωση 23% της θλιπτικής τάσης)

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο που προτείνεται από τον κανονισμό

$$\varepsilon_{cu} = \frac{1-f_{ck}}{30000}\mu\varepsilon f_{ck} \leq 80\,MPa$$

Επιβάλλεται στην ροπή συντελεστής ασφαλείας φόρτισης για την κάμψη όπου η ροπή διαιρείται με 1.15

Η μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού FRP διαιρείται με 1.3

ISIS

Για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών χρησιμοποιούνται ονομαστικές τιμές αντοχών.

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται 0,0035

Ωστόσο επιβάλλονται μειωτικοί συντελεστές στις δυνάμεις των υλικών σκυρόδεμα, χάλυβας, σύνθετο υλικό FRP για συνήθη έργα όπως παρακάτω στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Τιμές μειωτικών συντελεστών των αντοχών των υλικών

Συντελεστής υλικού	Τιμή μειωτικού συντελεστή
φ_c	0.6 (40% μείωση)
φ_s	0.85 (15% μείωση)
φ_{frp}	0.75(25% μείωση)

ACI 440

Για τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών χρησιμοποιούνται ονομαστικές τιμές αντοχών. Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο που προτείνεται από τον κανονισμό

$$\varepsilon_{cu} = \frac{1.7 f_c'}{E_c} \quad (4.1.5)$$

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (4.1.6)$$

Όπου

f_c' *η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος*

E_c *το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος*

Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται οι εξής συντελεστές C_E που δίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5. Τιμές μειωτικού συντελεστή C_E

Είδος Υλικού	Τιμή μειωτικού συντελεστήC_E
CFRP	0.95
GFRP	0.75
Συνδυασμός των παραπάνω	0.85

Ο συντελεστής μείωσης της συνεισφοράς του FRP στην ροπή αντοχής λαμβάνεται ίσος με $\psi_f = 0.85$

FIB14

Η τάση διαρροής του χάλυβα διαιρείται με 1.15

Η μέγιστη θλιπτική τάση του σκυροδέματος διαιρείται με 1.5

Η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωσητου σκυροδέματος λαμβάνεται 0,0035

Η μέγιστη εφελκυστική τάση του σύνθετου υλικού FRP διαιρείται σύμφωνα με τον παρακάτω τρόπο που δίνεται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6. Τιμές μειωτικού συντελεστή γ_f

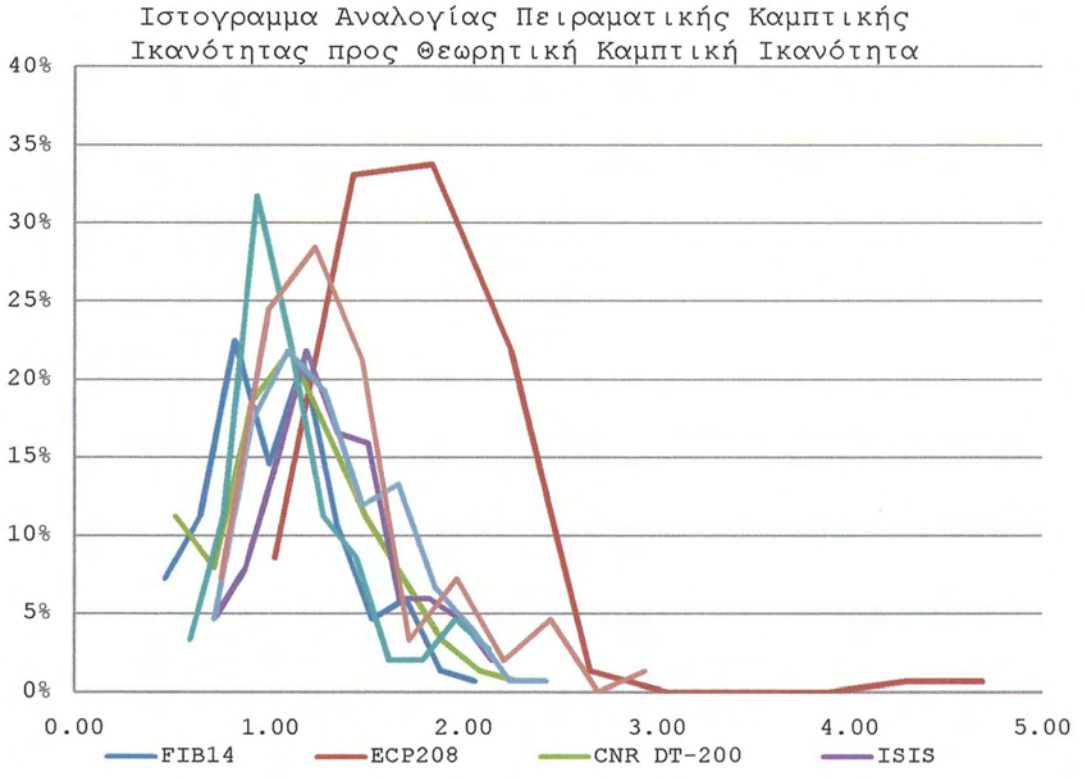
Υλικό	γ_f
CFRP	1.35
GFRP	1.5
Συνδυασμός	1.4

4.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Για κάθε ένα πείραμα που αναφέρεται στη βιβλιογραφία υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τους κανονισμούς ο θεωρητικός τρόπος αστοχίας καθώς και η θεωρητική μέγιστη ροπή αντοχής.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος της πειραματικής ροπής προς θεωρητική ροπή.

$$ratio = \frac{M_{exp}}{M_{theor}}$$



Σχήμα4.2.1Ιστόγραμμα Αναλογίας Mexp/Mtheor

Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για κάθε τρόπο αστοχίας υπολογίστηκε το ποσοστό των δοκών των οποίων η πειραματική μέγιστη τιμή της ροπής αστοχίας ήταν μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται από τα αναλυτικά μοντέλα. Στον Πίνακα 4.2.1 Παρουσιάζονται τα ποσοστά των δοκών που σχετίζονται με την ασφαλή αστοχία των δοκαριών. Ασφαλή αστοχία των δοκαριών θεωρείται στην μελέτη μας οι περιπτώσεις στις οποίες τα δοκάρια αστοχούν με καμπτική ικανότητα μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει το μαθηματικό μοντέλο της ανάλυσης από τους υπολογισμούς.

Πίνακας 4.7 Ποσοστά δοκών που αστόχησαν με ασφάλεια

ΤΡΟΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	TR55	CNR-DT200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14	Συνολικό δείγμα
Αποκόλληση του σύνθετου υλικού FRP	57.4%	32.8%	85.2%	31.1%	60.7%	54.1%	34.4%	61
Θραύση του σύνθετου υλικού FRP	82.8%	82.8%	100%	65.5%	82.2%	96.6%	79.3%	29
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	83.3%	83.3%	100%	75%	100.0%	91.7%	75%	12
Αποκόλληση της Επικάλυψης	63.8%	44.7%	91.5%	34%	78.7%	57.4%	25.5%	47
Διατμητική Αστοχία	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2
Ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίας	66.9%	51%	91.4%	43%	74.2%	66.9%	44.4	151

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7. διακρίνεται ότι ο ECP208 είναι ο πιο συντηρητικός κανονισμός.

Ωστόσο διερευνήθηκε και η δυνατότητα των θεωρητικών τιμών να προβλέψουν με απόκλιση ±10% την πραγματική αστοχία των δοκών. Αυτό κρίθηκε σκόπιμο αφού πολλές φορές λόγω άγνοιας του γενικότερου αντικειμένου των σύνθετων υλικών και των ενισχύσεων, γενικότερα οι κανονισμοί επιδιώκουν να υποεκτιμούν ιδιαίτερα την ικανότητα ανάληψης των ενισχυμένων δοκών, με αποτέλεσμα να υπεροπλίζουν τις διατομές. Η παραδοχή της απόκλισης ±10% της θεωρητικής τιμής επιλέχθηκε έχοντας σαν γνώμονα την βέλτιστη περιγραφή της συμπεριφοράς των δοκών Ω/Σ που ενισχύονται με σκοπό την ικανοποίηση αναγκών των έργων επιπέδου πολιτικού μηχανικού. Γι αυτό τον λόγο δίνονται παρακάτω τα ποσοστά των παραπάνω δοκών που επιτυγχάνουν να ερμηνεύσουν με τον παραπάνω τρόπο τα πειράματα στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Ποσοστά δοκών που αστόχησαν μεαποδεκτή ασφάλεια

Πειραματικός Τρόπος αστοχίας	TR55	CNR-DT200	ECP2C 8	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14	Συνολικό δείγμα
Αποκόλληση του σύνθετου υλικού FRP	14.8%	21.3%	6.6%	24.6%	23.0%	23.0%	(26.2%)	61
Θραύση του σύνθετου υλικού FRP	0.0%	(31%)	0.0%	13.8%	3.4%	10.3%	13.8%	29
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	(16.7%)	8.3%	0.0%	(16.7%)	8.3%	(16.7%)	8.3%	12
Αποκόλληση της Επικάλυψης	(46.3%)	21.3%	2.1%	42.6%	36.2%	44.7%	31.9%	47
Διατμητική Αστοχία	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2
Ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίας	21.2%	21.9%	3.3%	(27.2%)	21.9%	26.5%	25.2%	151

Στον πίνακα 4.2.2 οι τιμές σε παρένθεση για κάθε τρόπο αστοχίας είναι πρακτικά τα μέγιστα ποσοστά των δοκών που περιγράφονται από τους κανονισμούς για τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας. Συγκεκριμένα προκύπτει ότι για την αστοχία λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού FRP το μαθηματικό μοντέλο του FIB14 καταφέρνει με ποσοστό 26.2% του συνολικού δείγματος αυτού του τρόπου αστοχίας να περιγράψει με την ακρίβεια που απαιτούν γενικότερα τα έργα πολιτικού μηχανικού. Αντίστοιχα για την αστοχία λόγω θραύση του FRP έχουμε ακριβέστερη περιγραφή από τον ιταλικό CNR-DT200, για την αστοχία λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος καλύτερα αποτελέσματα δίνει οι TR55,JSCE και ACI440 ενώ για την αποκόλληση της επικάλυψης δουλεύουν καλύτερα οιTR55 και ACI440 . Ο ECP208 φαίνεται ότι είναι ιδιαίτερα συντηρητικός και κατά συνέπεια υπουπολογίζει σημαντικά την καμπτική αντοχή των δοκών.

Αντιμετώπιση Αποκόλλησης του FRP,Θραύση του ΙΟΠ,Σύνθλιψης Σκυροδέματος καιΑποκόλλησης της επικάλυψης με χρήση του ECP208.

Σύμφωνα με τον πρώτοπίνακα παρατηρούμε ότι ο ECP208 έχει ιδιαίτερη ικανότητα να σχεδιάζει ενισχυμένες δοκούς έναντι κάμψης με ΙΟΠ προλαμβάνοντας όλου του είδους τις αστοχίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότιο συγκεκριμένος κανονισμός λαμβάνει δεδομένες αυστηρές παραδοχές τόσο όσον αφορά την μέγιστη ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος,όσο και όσον αφορά στην ανηγμένη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού FRP. Συγκεκριμένα η μέγιστη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος θεωρείται 0,003 δηλαδή κατά 14% μειωμένη της αντίστοιχης ονομαστικής τιμής 0,0035. Για το ΙΟΠλαμβάνονται μέτρα για την αποτροπή της αποκόλλησης του ΙΟΠ και της επικάλυψης του σκυροδέματος.

Η αυστηρότητα αυτή φαίνεται ακόμη πιο ξεκάθαρα από τα ποσοστά των δοκών που αστόχησαν με σύμφωνα με την δεδομένη αποδεκτή απόκλιση για τα έργα πολιτικού μηχανικού. Συγκεκριμένα κάνοντας γενικότερη σύγκριση βλέπουμε ότι ο ECP εξαντλεί όλη του την αυστηρότητα στον σχεδιασμό χωρίς να καταφέρει να προβλέψει με ικανοποιητικό βαθμό τις πειραματικές τιμές.

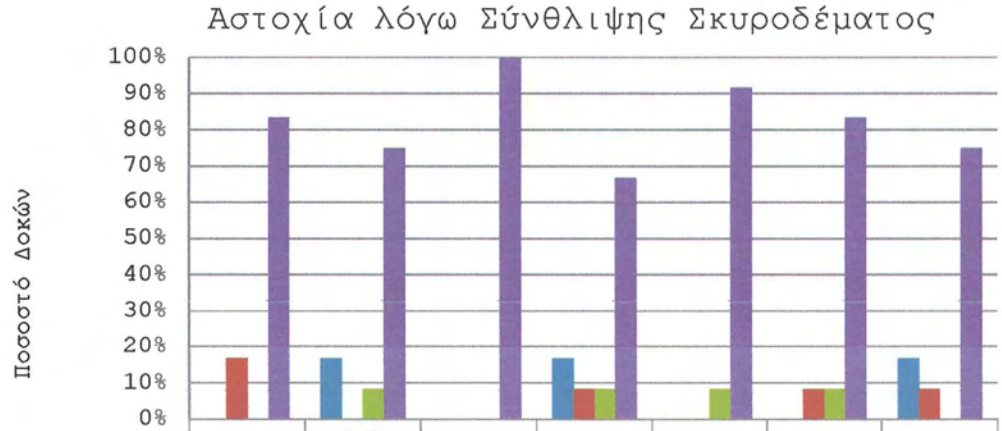
Συγκεκριμένα για τα δοκίμια που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού προκύπτει ότι ενώ το 85.2% αυτών θα αστοχούσαν με ασφαλή τρόπο εάν σχεδιάζονταν με τον εν λόγω κανονισμό, μόνο το 6.6%των συνολικών ήταν πολύ κοντά σύμφωνα με το Σχήμα 4.2.3. Αντίστοιχα για τα σενάρια αστοχίας λόγω θραύσης του ΙΟΠ, σύνθλιψης σκυροδέματος και αποκόλλησης της επικάλυψης ενώ τα ποσοστά από τα εκάστοτε συνολικά δείγματα των δοκαριών που αστόχησαν με ασφάλεια ήταν 100%,100% και 91.5%, τα αντίστοιχα ποσοστά των αποδεκτώς αστοχούντων δοκαριών ήταν 0%, 0%, 2.1% των συνολικών δειγμάτων για τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας

Αντιμετώπιση Σύνθλιψης Σκυροδέματος με τον ISIS

Ο ISIS από την άλλη μεριά επιτυγχάνει επίσης καλή ασφάλεια στον σχεδιασμό όσον αφορά την αστοχία έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος. Αυτό υλοποιείται καθώς γίνεται υποτίμηση μέσω αυστηρών συντελεστών ασφαλείας των αντοχών όλων των υλικών, χωρίς να λαμβάνεται ιδιαίτερη αντιμετώπιση για πρόληψη του Dedonding και του Cover Delamination.Η ολιστική αυτή αντιμετώπιση επιφέρει εξαιρετική μείωση της ροπή αντοχής λόγω του σχεδιασμού. Επίσης βλέπουμε στο Σχήμα 4.2.2 ένα εξαιρετικά μικρό ποσοστό επιτυχίας (8.3%+0%=8.3%)στην πρόβλεψη με ικανοποιητικό τρόπο της πραγματικής τιμής αστοχίας της δοκού

Γενικότερα σχόλια Σχετικά με την αποτροπή αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος

Γενικότερα βλέπουμε ότι η αποτροπή αστοχίας έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος για μια τιμή σχεδιασμού από τους περισσότερους κανονισμούς έχει ιδιαίτερα καλή αντιμετώπιση καθώς αντιμετωπίζεται ως ένα ιδιαίτερα επιθυμητό σενάριο αστοχίας λόγω της επιθυμίας μας νακάνουμε κατασκευές που αποσβένουν ενέργεια. Γι αυτόν τον λόγο τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα και κανονισμοί όπως φαίνεται τείνουν να είναι αυστηροί και να υπερδιαστασιολογούν τις ενισχυμένες δοκούς όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2.2.



	TR55	CNR DT-200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14
Σφάλμα<-10%	0.0%	16.7%	0.0%	16.7%	0.0%	0.0%	16.7%
-10%=<Σφάλμα<0%	16.7%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	8.3%	8.3%
0%=<Error<10%	0.0%	8.3%	0.0%	8.3%	8.3%	8.3%	0.0%
Σφάλμα>10%	83.3%	75.0%	100.0%	66.7%	91.7%	83.3%	75.0%

Σχήμα4.2.2

Ωστόσο η τάση για υπερδιαστασιολόγηση προκύπτει για λόγους πρόληψης δυσμενών και αστάθμητων παραγόντων που οφείλονται τόσο στις συνθήκες εργοταξίου όσο και στις παραδοχές σχετικά με τις πραγματικές αντοχές μιας κατασκευής. Αρκεί να πούμε ότι στην παρούσα μελέτη οι περισσότερες αντοχές των υλικών όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και το σύνθετο υλικό FRP προέκυψαν από εργαστηριακές συνθήκες και βάσει πειραμάτων. Σε ένα έργο στην πράξη όπου κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό,το εκάστοτε μαθηματικό μοντέλο οφείλει να προφυλάσσει τον σχεδιασμό από τέτοιους αστάθμητους παράγοντες.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι κανονισμοί TR55, ECP208, ISIS και ACI440 καταφέρνουν, εξ ολοκλήρου, να εξαλείψουν, σύμφωνα με το Σχήμα 4.2.2 τις δοκούς που προβλέπονται να αστοχήσουν σε μικρότερη ροπή, αντίστασης σε σχέση με αυτήν του σχεδιασμού με σφάλμα <-10%. Αυτό φανερώνει ότι οι συγκεκριμένοι κανονισμοί αν μη τι άλλο διαστασιολογούν και προβλέπουν με μεγάλη ασφάλεια.

Οι υπόλοιποι CNR DT-200,JSCE και FIB14 καταφέρνουν να προβλέψουν χωρίς επιτυχία την ασφαλή καμπτική ικανότητα των δοκών για ποσοστά 16,7%, 16.7%και 16.7% αντίστοιχα τα οποία δεν είναι πολύ μεγάλες τιμές, και αρκετά καλά για τα έργα πολιτικού μηχανικού.

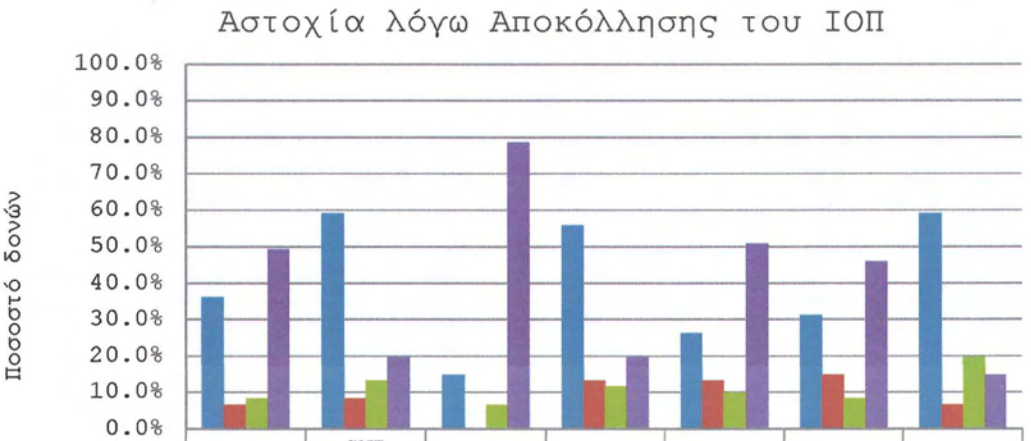
Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι για σύνθλιψη σκυροδέματος, ο ακριβέστερος από πλευράς πρόβλεψης πραγματικής αστοχίας, και όχι σχεδιασμού, κανονισμός είναι ο Ιαπωνικός JSCE. Αυτό προκύπτει καθώς καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει τις δοκούς που αστοχούν σύμφωνα με το μέγιστο σφάλμα υπέρ της ασφαλείας, και να μεγιστοποιήσει τα αντίστοιχα ποσοστά των δοκών που προσεγγίζουν το αποδεκτό σφάλμα

Γενικότερα Σχόλια Σχετικά με την αποτροπή αστοχίας Αποκόλλησης του ΙΟΠ

Στο σενάριο αστοχίας λόγω αποκόλλησης του ΙΟΠ ο κανονισμός ο οποίος έχει την συντηρητικότερη μορφή είναι ο ECP αφού καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει το ποσοστό των δοκών που αστοχούν με σφάλμα μικρότερο του -10%, με τιμή 15%.

Αντίθετα οι κανονισμοί οι οποίοι δείχνουν να είναι, το λιγότερο αυστηροί στο θέμα των δοκών που αστοχούν, τόσο εκτός επιπέδου ασφαλείας, όσο και αποδέκτης αστοχίας είναι οι CNR DT-200 και FIB14, αμφότεροι με ποσοστό 59%.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μεν σφαλμάτων της τάξεως του -10% και την αντίστοιχη μεγιστοποίηση των αντίστοιχων αποδεκτών σφαλμάτωνπροκύπτει ότι, ο ACI440 δίνει καλύτερα αποτελέσματα με σκοπό την πρόβλεψη των πραγματικών τιμών αστοχίας



	TR55	CNR DT-200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14
Σφάλμα<-10%	36.1%	59.0%	14.8%	55.7%	26.2%	31.1%	59.0%
-10%=<Σφάλμα<0%	6.6%	8.2%	0.0%	13.1%	13.1%	14.8%	6.6%
0%=<Σφάλμα<10%	8.2%	13.1%	6.6%	11.5%	9.8%	8.2%	19.7%
Σφάλμα>10%	49.2%	19.7%	78.7%	19.7%	50.8%	45.9%	14.8%

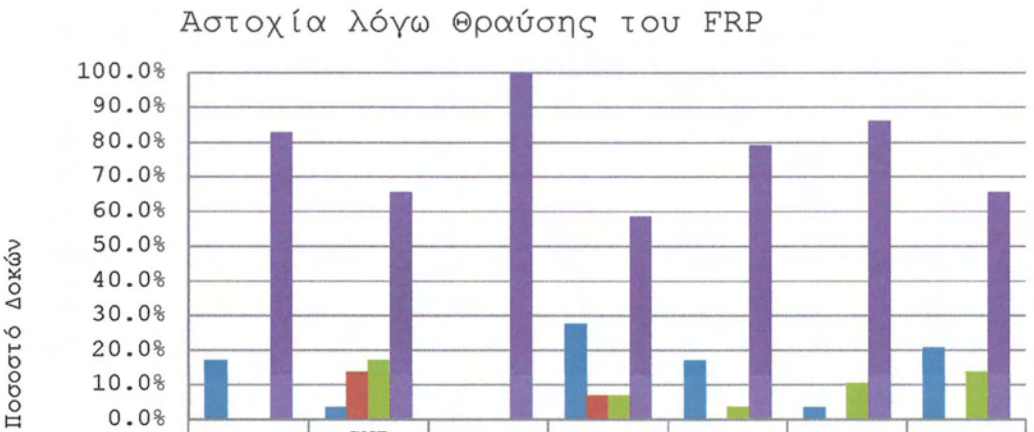
Σχήμα 4.2.3

Γενικότερα Σχόλια Σχετικά με την αποτροπή αστοχίας λόγω θραύσης του ΙΟΠ

Στο θέμα της αστοχίας λόγω θραύσης του ΙΟΠ ο κανονισμός ο οποίος έχει την συντηρητικότερη μορφή είναι ο ECP αφού καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει το ποσοστό των δοκών που αστοχούν με σφάλμα μικρότερο του -10%, με τιμή 0%.

Αντίθετα οι κανονισμός οι οποίος δείχνει να είναι το λιγότερο αυστηρός στο θέμα των δοκών που αστοχούν με καμπτική ικανότητα τόσο εκτός επιπέδου ασφαλείας, όσο και αποδέκτης αστοχίας είναι ο JSCE με ποσοστό 27.6%.

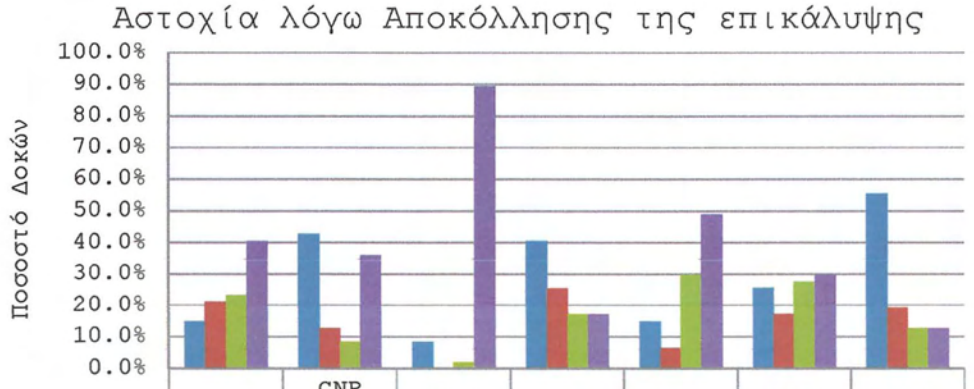
Με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μεν σφαλμάτων της τάξεως του -10% και την αντίστοιχη μεγιστοποίηση των αντίστοιχων αποδεκτών σφαλμάτων προκύπτει ότι, ο CNR DT-200 δίνει καλύτερα αποτελέσματα με σκοπό την πρόβλεψη των πραγματικών τιμών αστοχίας



	TR55	CNR DT-200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14
Σφάλμα<-10%	17.2%	3.4%	0.0%	27.6%	17.2%	3.4%	20.7%
-10%=<Σφάλμα<0%	0.0%	13.8%	0.0%	6.9%	0.0%	0.0%	0.0%
0%=<Σφάλμα<10%	0.0%	17.2%	0.0%	6.9%	3.4%	10.3%	13.8%
Σφάλμα>10%	82.8%	65.5%	100.0%	58.6%	79.3%	86.2%	65.5%

Σχήμα 4.2.4

Γενικότερα Σχόλια Σχετικά με την αποτροπή αστοχίας Αποκόλλησης επικάλυψης



	TR55	CNR DT-200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14
Σφάλμα<-10%	14.9%	42.6%	8.5%	40.4%	14.9%	25.5%	55.3%
-10%=<Σφάλμα<0%	21.3%	12.8%	0.0%	25.5%	6.4%	17.0%	19.1%
0%=<Σφάλμα<10%	23.4%	8.5%	2.1%	17.0%	29.8%	27.7%	12.8%
Σφάλμα>10%	40.4%	36.2%	89.4%	17.0%	48.9%	29.8%	12.8%

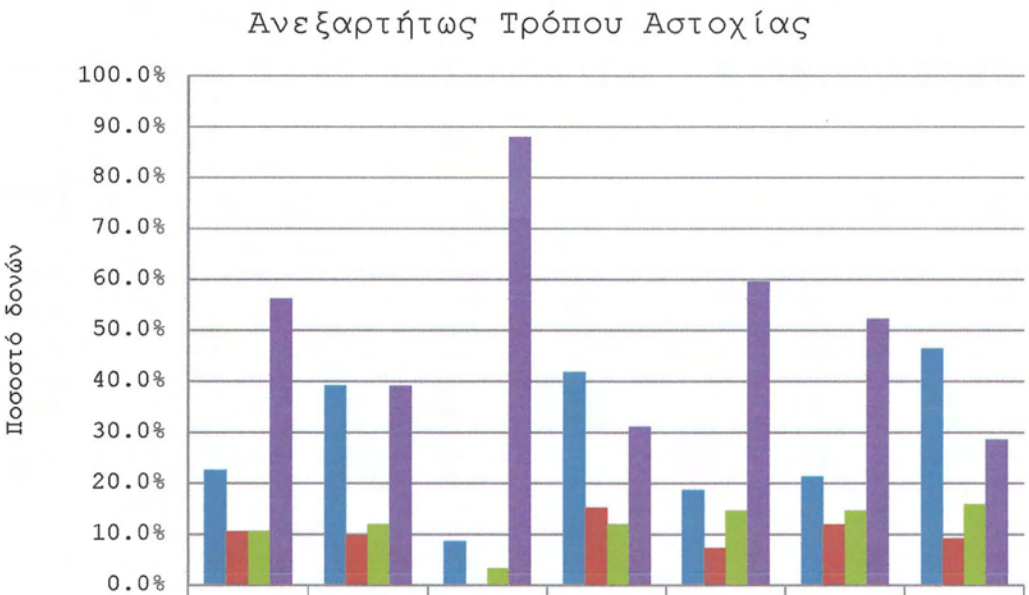
Σχήμα 4.2.5

Στο θέμα της αστοχίας λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης ο κανονισμός ο οποίος έχει την συντηρητικότερη μορφή είναι ο ECP αφού καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει το ποσοστό των δοκών που αστοχούν με σφάλμα μικρότερο του -10%, με τιμή 8.5%.

Αντίθετα ο κανονισμός οι οποίος δείχνει να είναι το λιγότερο αυστηρός στο θέμα των δοκών που αστοχούν τόσο εκτός επιπέδου ασφαλείας, όσο και αποδέκτης αστοχίας είναι ο FIB14με ποσοστό 55.3%.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του των μεν σφαλμάτων της τάξεως του -10% και την αντίστοιχη μεγιστοποίηση των αντίστοιχων αποδεκτών σφαλμάτων προκύπτει ότι, ο TR55δίνειτα καλύτερα αποτελέσματα με σκοπό την πρόβλεψη των πραγματικών τιμών αστοχίας

Γενικότερα Σχόλια σχετικά με την περιγραφή των μοντέλων ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίας



	TR55	CNR DT-200	ECP208	JSCE	ISIS	ACI440	FIB14
Σφάλμα<-10%	22.5%	39.1%	8.6%	41.7%	18.5%	21.2%	46.4%
-10%=<Σφάλμα<0%	10.6%	9.9%	0.0%	15.2%	7.3%	11.9%	9.3%
0%=<Σφάλμα<10%	10.6%	11.9%	3.3%	11.9%	14.6%	14.6%	15.9%
Σφάλμα>10%	56.3%	39.1%	88.1%	31.1%	59.6%	52.3%	28.5%

Σχήμα 4.2.6

Στο θέμα της γενικότερης περιγραφής της καμπτικής ικανότητας των ενισχυμένων δοκών ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίας ο κανονισμός ο οποίος έχει την συντηρητικότερη μορφή είναι ο ECP208αφού καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει το ποσοστό των δοκών που αστοχούν με σφάλμα μικρότερο του -10%, με τιμή 8.6%.

Αντίθετα ο κανονισμός οι οποίος δείχνει να είναι το λιγότερο αυστηρός στο θέμα των δοκών που αστοχούν τόσο εκτός επιπέδου ασφαλείας, όσο και αποδέκτης αστοχίας είναι ο FIB14 με ποσοστό 46.4%.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση του των μεν σφαλμάτων της τάξεως του -10% και την αντίστοιχη μεγιστοποίηση των αντίστοιχων αποδεκτών σφαλμάτων προκύπτει ότι, ο ACI440 δίνειτα καλύτερα αποτελέσματα με σκοπό την πρόβλεψη των πραγματικών τιμών αστοχίας

Αστοχία Δοκών Έναντι Διατμητικής Αστοχίας

Για τις συνθήκες διατμητικής αστοχίας είναι δύσκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων αφενός μεν διότι το δείγμα είναι πάρα πολύ μικρό και αφετέρου διότι η διατμητική αστοχία σχετίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό με την ύπαρξη διατμητικού οπλισμού στην δοκό (εγκάρσιοι συνδετήρες) απ' ότι με την ύπαρξη οπλισμού FRP.

Αξίζει να πούμε ότι βασική προϋπόθεση αυτών των πειραμάτων ήταν να διερευνηθεί η καμπτική ικανότητα των ενισχυμένων δοκών από σύνθετο υλικό FRP. Γι αυτό τον λόγο οι ενισχυμένες δοκοί ήταν σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί μια τυχούσα πρώιμη διατμητική αστοχία. Επομένως το πιο ασφαλές συμπέρασμα για την διατμητική αστοχία των δοκών έγκειται στην τοπική ανεπάρκεια συνδετήρων την περιοχή επιβολής των δυνάμεων.

Παρακάτω θα γίνει μια προσπάθεια ερμηνείας και περιγραφής με πιο συγκεκριμένο τρόπο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων σύμφωνα με τους τρόπους αστοχίας που πιθανόν περιγράφουν αλλά και της γενικότερης αξιοπιστίας των μαθηματικών μοντέλων.

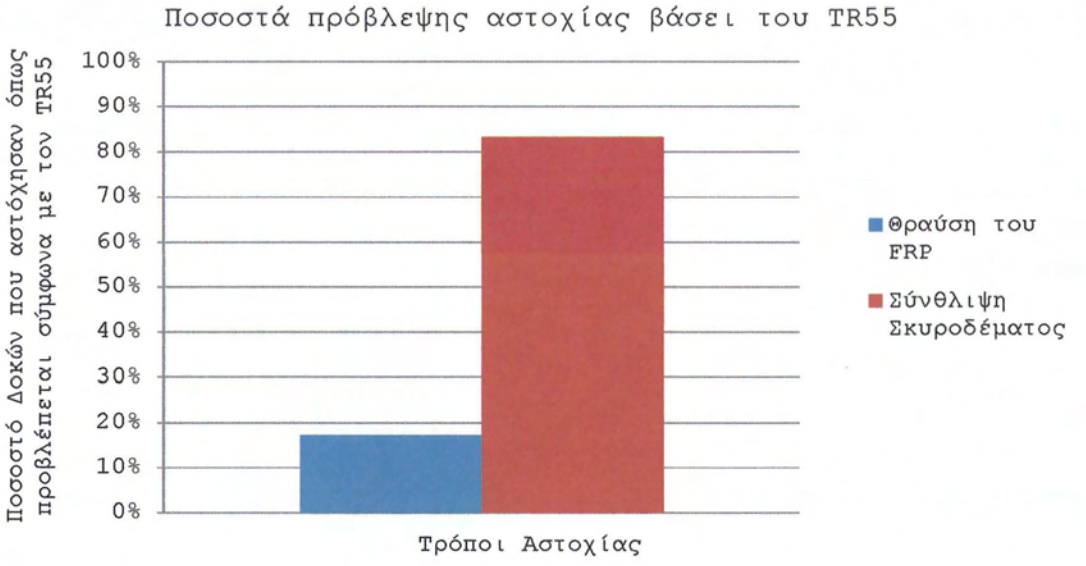
Πρόβλεψη Σύνθλιψης Σκυροδέματος/Θραύσης του FRP σύμφωνα με τον TR55

Ο TR55 ορίζει ότι, προβλέπονται οι παρακάτω μορφές αστοχίας, εάν πληρούνταιοι αντίστοιχες προϋποθέσεις για κάθε μορφή αστοχίας. Συγκεκριμένα ορίζει ότι

Εάν $M_{rd} \geq M_{rb}$ τότε έχουμε πρακτικά αστοχία λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος (concrete Crushing)

Εάν $M_{rd} < M_{rb}$ τότε έχουμε πρακτικά αστοχία λόγω θραύσης του FRP (FRP Rupture)

Διερευνώντας τις παραπάνω προϋποθέσεις προέκυψαν τα αντίστοιχα στοιχείααπό την αριθμητική Ανάλυση.

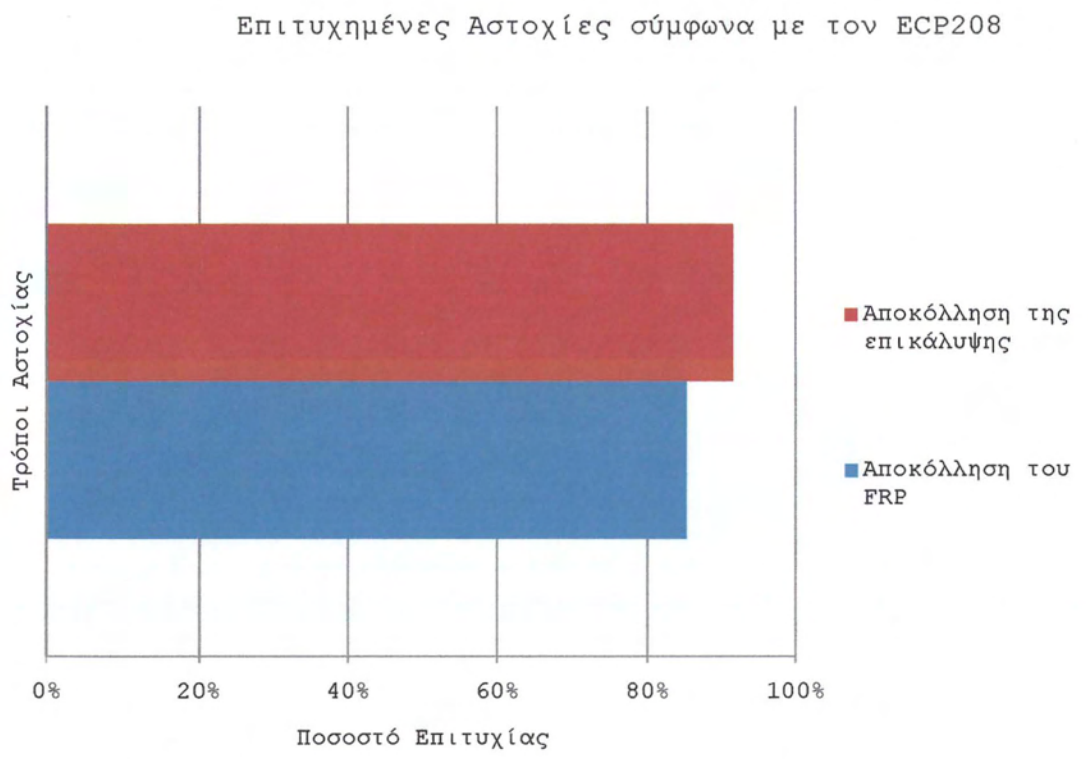


Σχήμα 4.2.7

Σύμφωνα με το σχήμα 4.2.7, όσον αφορά την σύνθλιψη σκυροδέματος έχουμε ικανότητα πρόβλεψης του τρόπου αστοχίας ίση με 83.3% πράγμα το οποίο μας υποδεικνύει ότι το μοντέλο είναι ικανό για την όπλιση και την πρόνοια φαινομένων αστοχίας λόγω σύνθλιψης. Από την άλλη πλευρά για την Θραύση του ΙΟΠ έχουμε επιτυχημένη πρόβλεψη 17.2% σε ποσοστό δοκών, πράγμα το οποίο υποδεικνύει ότι δεν είναι αρκετή η συνθήκη ανισότητας για να περιγράψει με σιγουριά το φαινόμενο της αστοχίας έναντι θραύσης του FRP.

Σχεδιασμός λόγω Αποκόλλησης ΙΟΠ (FRP Debonding) και αποκόλλησης επικάλυψης σκυροδέματος (Cover Delamination) σύμφωνα με τον ECP208

Επίσης διερευνήθηκε και η ικανότητα του ECP208 να προβλέπει και να αποτρέπει αστοχίες όπως η αποκόλληση του υλικού FRP και η αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος. Θεωρήθηκε ότι επιτυχημένη αστοχία είναι όταν η τιμή της πειραματικής καμπτικής ικανότητας είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται από τον κανονισμό ECP208. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ικανότητας φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 4.2.8

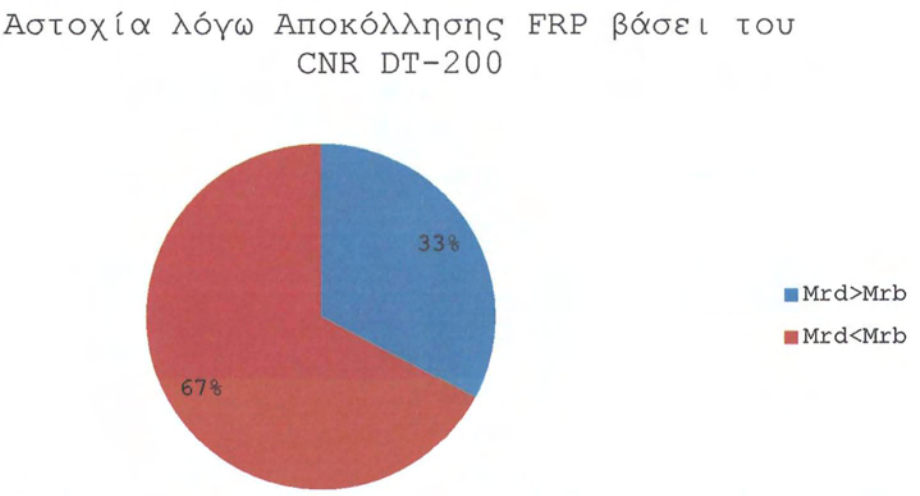


Σχήμα 4.2.8

Από το σχήμα βλέπουμε ότι σε ποσοστό 91.5% γίνεται πρόληψη του Cover Delamination στο σχεδιασμό δοκών, ενώ σε ποσοστό 85.2% έχουμε αποτροπή αστοχίας έναντι Debonding για τις τιμές σχεδιασμού του κανονισμού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι εξισώσεις συμβιβαστού που προτείνει ο ECP208 για τον σχεδιασμό του FRP δίνουν αρκετά επιτυχημένες πειραματικές τιμές αστοχίας από πλευράς ασφάλειας.

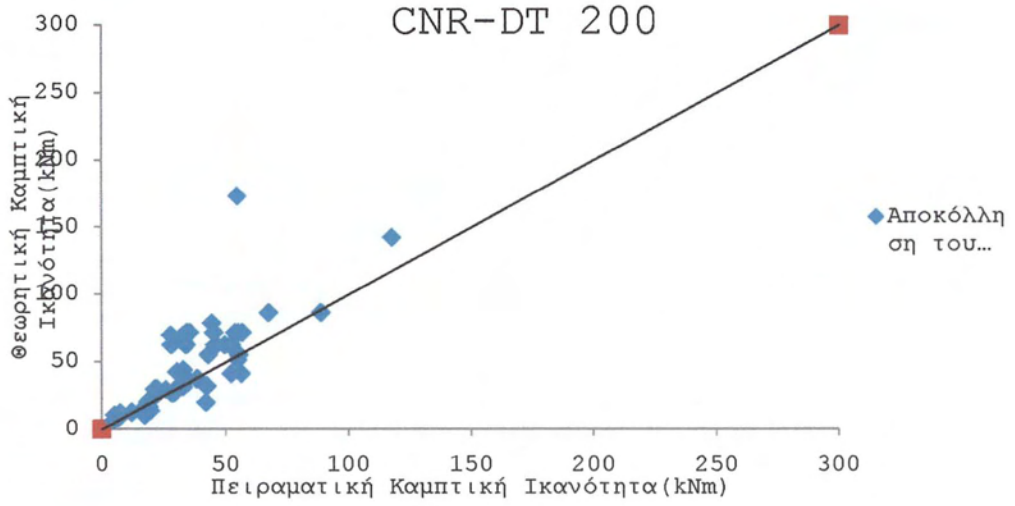
Σχεδιασμός έναντι αποκόλλησης σύμφωνα με τον Ιταλικό Κανονισμό CNR DT-200

Ο CNR σε συνθήκες σχεδιασμού προκειμένου να αποτρέψει το ενδεχόμενο Αστοχίας αποκόλλησης FRP (FRP debonding),υιοθετεί κάποια ιδιαίτερα όρια στις συνθήκες συμβιβαστού των υλικών της διατομής. Προκειμένου να μετρηθεί η αποτελεσματικότητα της παραπάνω αποτροπής θεωρήθηκε ότι τα δοκίμια που αστόχησαν με την παραπάνω μορφή αστοχίας, σχεδιάστηκαν με την καμπτική ικανότητα του εν λόγω μοντέλου. Επομένως έγινε δεκτό ότι τα δοκίμια που αστόχησαν με αυτή την μορφή αστοχίας σε τιμή της καμπτικής ικανότητας μικρότερη από την αντίστοιχη σχεδιασμού αστόχησαν ανεπιτυχώς ενώ τα υπόλοιπα αστόχησαν επιτυχώς.



Σχήμα 4.2.9

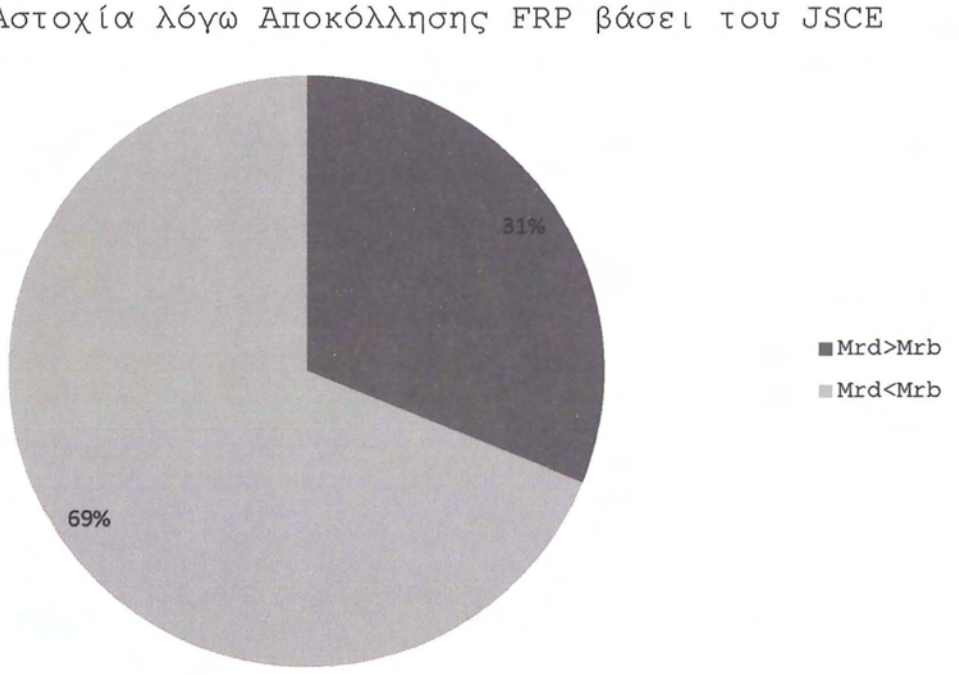
Στα παραπάνω σχήμα φαίνεται, κατά πόσο σύμφωνα με το δείγμα πάντα επιβεβαιώνεται η αποτελεσματικότητα των παραδοχών του Ιταλικού Κανονισμού. Βλέπουμε ότι μόνο το 33% των δοκαριών προέκυψε ότι αστοχεί με ασφάλεια. Όπως βλέπουμε από τον Σχήμα 4.2.10 προκύπτει ότι αρκετάαπό αυτά τα δοκάρια που ανήκουν στο υπόλοιπο 71% ίσως να αστοχούν σε τιμή αρκετά κοντά στην πειραματική αλλά σε καμία περίπτωση το μοντέλο δεν θεωρείται αρκετά αξιόπιστο για τον σχεδιασμό και την αποφυγή του της αποκόλλησης του ΙΟΠ σαν γενικός κανόνας σχεδιασμού.



Σχήμα 4.2.10

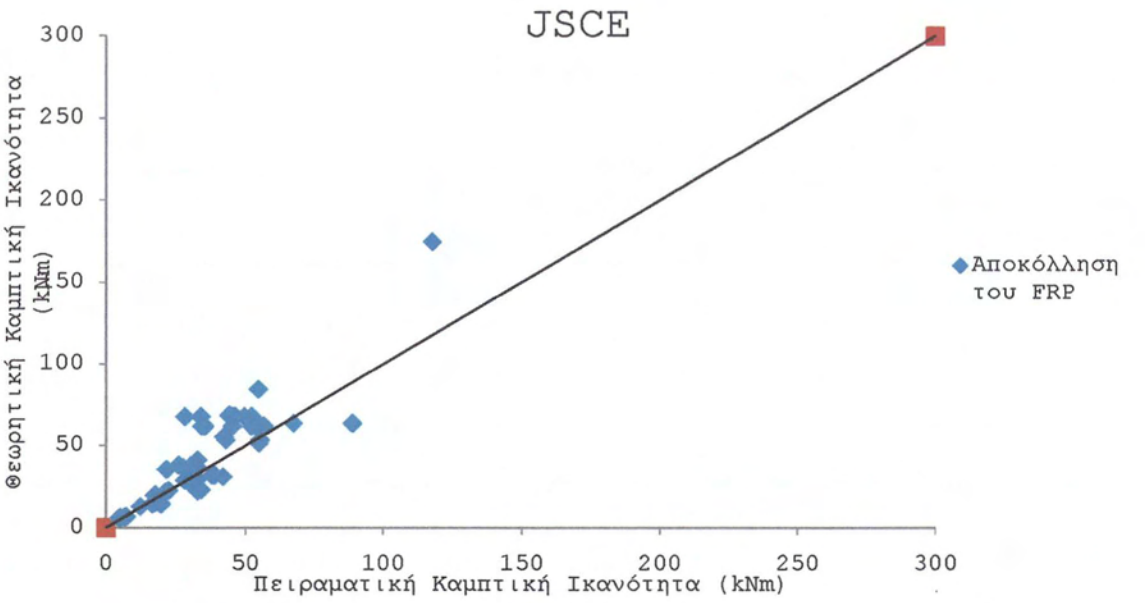
Σχεδιασμός έναντιαποκόλλησης σύμφωνα με τον Ιαπωνικό Κανονισμό JSCE

Ο JSCE ομοίως, προτείνει μία σχέση η οποία υπόσχεται να περιορίσει τα φαινόμεναστοχιών λόγω αποκόλλησης του FRP.Ομοίως με τον CNR ακολουθήθηκε η παραπάνω διαδικασία ώστε να επιβεβαιωθεί ή όχι ο περιορισμός της αστοχίας λόγω FRP Debonding στις ενισχυμένες δοκούς. Τα αντίστοιχα ποσοστά των δοκών διαμορφώνονται σύμφωνα με τον Σχήμα 4.2.11



Σχήμα 4.2.11

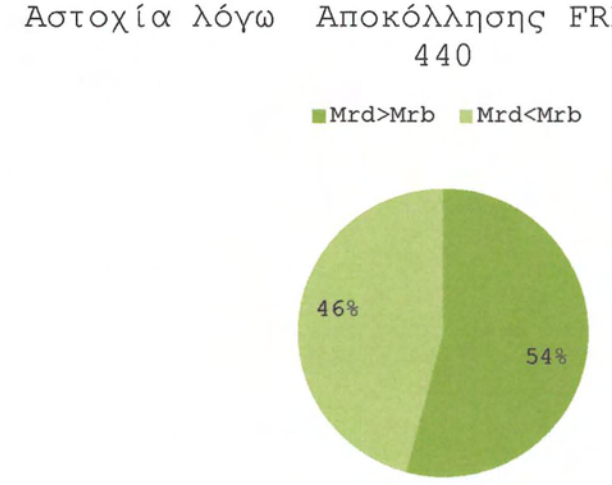
Παρατηρούμε από το σχήμαότι έχουμε ασφαλή αστοχία στο 31% των δοκαριών που αστόχησαν λόγω Αποκόλλησης του FRP. Τα υπόλοιπο 69% είχε μη ασφαλή αστοχία. Επομένως, ούτε αυτό το μαθηματικό μοντέλο κατάφερε να προβλέψει από την πλευρά της ασφαλείας. Σύμφωνα με το Σχήμα4.2.12 παρακάτω βλέπουμε ότι και εδώ έχουμε αρκετά δοκάρια να απέχουν λίγο πάνω από το όριο ασφαλείας Mexp=Mtheor. Ωστόσο για μεγαλύτερες τιμές της πειραματικής ροπής ικανότητας των δοκαριών βλέπουμε αρκετά μεγάλες αποκλίσεις που δεν δικαιολογούνται σε έργα πολιτικού μηχανικού, μεγαλύτερης κλίμακας



Σχήμα 4.2.12

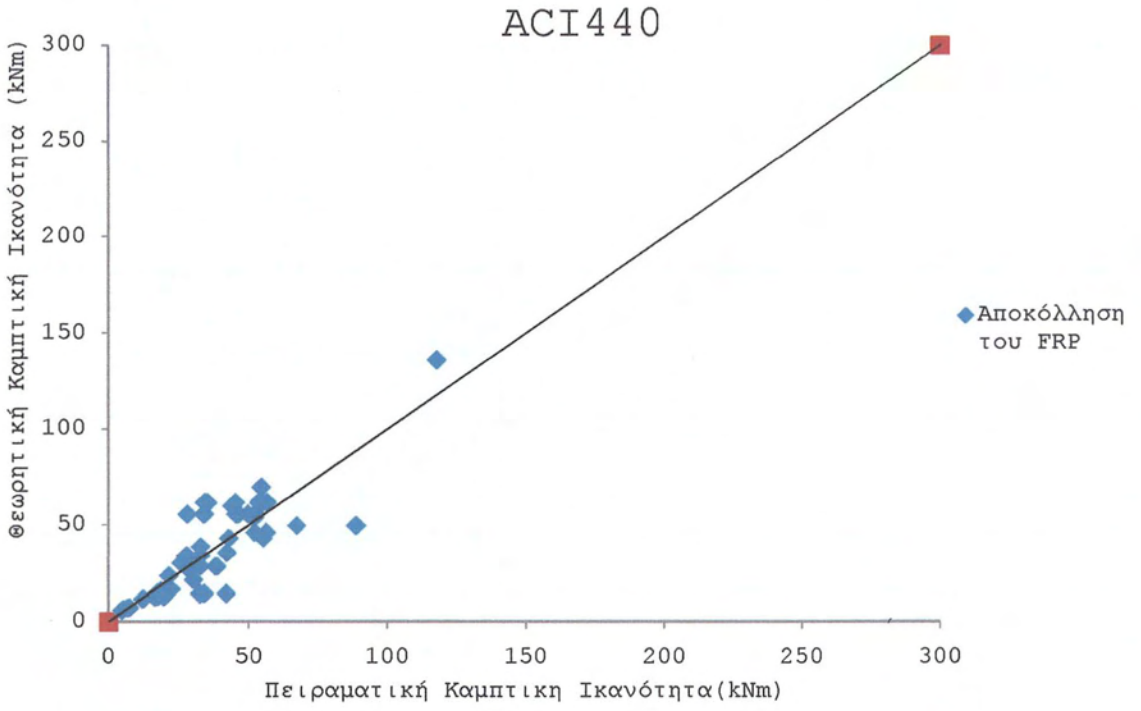
Σχεδιασμός έναντι αποκόλλησης σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό ACI 440

Μία αντίστοιχη συνθήκη έχει δοθεί σύμφωνα με τον εν λόγω κανονισμό. Για αυτόν τον λόγο με τον ίδιο τρόπο όπως παραπάνω γίνεται ηπροσπάθεια να παρασταθεί η αποτελεσματικότητα της αντίστοιχης συνθήκης στην πράξη. Στο Σχήμα 4.2.13 φαίνεται η αποτελεσματικότητα του ACI απέναντι στο στην αποτροπή αποκόλλησης του FRP.



Σχήμα 4.2.13

Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι το ποσοστό της ασφαλούς αστοχία των δοκών αυξήθηκε στο 54%. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της χρήσης των συνθηκών συμβιβαστού που φέρει η παραβολική κατανομής του διαγράμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος ικανοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες συμβιβαστού της διατομης.

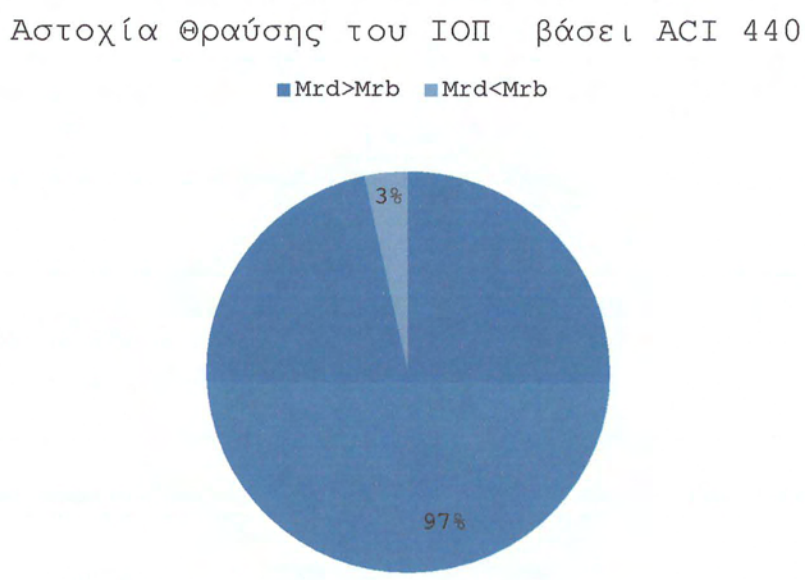


Σχήμα 4.2.14

Σύμφωνα με τα ποσοστό που απέτυχε τον έλεγχο ασφαλούς αστοχίας δηλαδή το υπόλοιπο 49% των δοκών βλέπουμε ότι, οι περισσότεροι δοκοι απέχουν λίγο συμφωνα με το Σχήμα 4.2.14 παραπάνω. Γενικότερα προκύπτει ότι οι περισσότερες τιμές όσον αφορά την αστοχία λόγω Debonding προκύπτουν σε πλαίσια λογικά αλλά και υπέρ της ασφαλείας.

Σχεδιασμός έναντι Θραυσης ΙΟΠ συμφωνα με τον ACI440

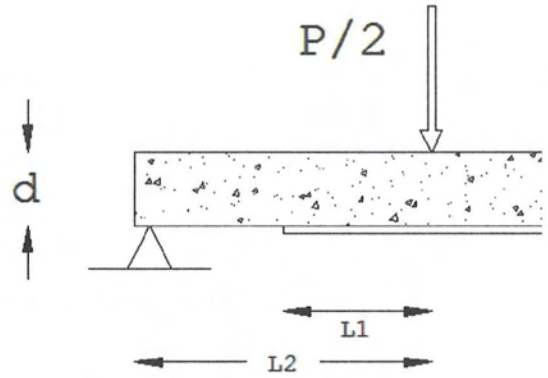
Όσον αφορά την καμπτικη αστοχία των ενισχυμένων δοκών με ΙΟΠ διερευνήθηκε επίσης ικανότητα του ACI440 να σχεδιάσει με ασφάλεια την διατομή σκυροδέματος. Από την αριθμητική ανάλυση προέκυψε ότι στο ποσοστό 97% των δοκών όπως φαινεται από το Σχήμα 4.2.15. Συγκεκριμέναείχαμε ασφαλή αστοχία των δοκιμίων λόγω κάμψης, πράγμα που μας επιβεβαιώνει, την γενικότερα επιτυχημένη επιλογή του κανονισμού, να ενσωματώσει τις συνθήκες παραβολικού διαγραμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων στις συνθήκες ισορροπίας της διατομής.



Σχήμα 4.2.15

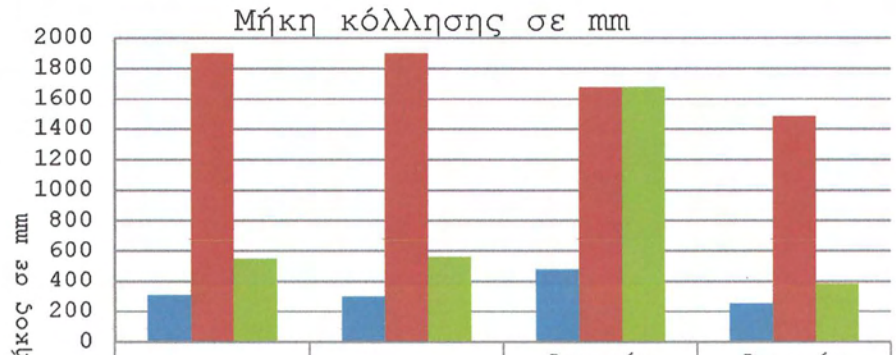
Διερεύνηση της επιρροής της απόστασης της δύναμης από το κοντινότερο άκρο του σύνθετου υλικού FRP

Στα πλαίσια της μελέτης Αυτής έγινε προσπάθεια να διερευνηθείη επιρροή του μήκους της επικόλλησης του ΙΟΠ (βλ. Κεφ) απόστασης στον εκάστοτε τρόπο αστοχίας



Σχήμα 4.2.16

Αρχικά από τα δείγματα των ενισχυμένων δοκών που αστόχησαν με τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας υπολογίστηκαν, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του δείγματος όπως επίσης και η διάμεσος. Προτιμήθηκε η διάμεσος έναντι του κλασσικού μέσου όρου καθώς τα δείγματα δεν ακολουθούσαν γνωστές κατανομές και ως εκ τούτου δεν θα ήταν δυνατή η εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος. Οι τιμές αυτές δίδονται στο Σχήμα 4.2.17



	Αστοχία λόγω Αποκόλλησης του ΙΟΠ	Αστοχία λόγω Θραύσης του ΙΟΠ	Αστοχία λόγω Σύνθλιψης Σκυροδέματος	Αστοχία λόγω Αποκόλλησης της Επικάλυψης
Ελάχιστη Τιμή	305.00	300.00	476.50	250.00
Μέγιστη Τιμή	1900.00	1900.00	1677.00	1485.00
Διάμεσος Τιμή	550.00	559.00	1677.00	380.00

Σχήμα 4.2.17

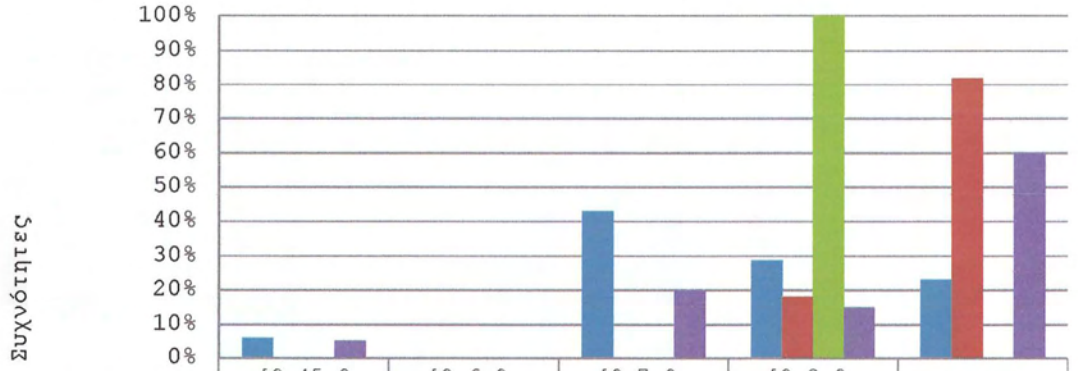
Αρχικά από τα δείγματα των ενισχυμένων δοκών που αστόχησαν με τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας υπολογίστηκαν, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του δείγματος όπως επίσης και η διάμεσος. Προτιμήθηκε η διάμεσος έναντι του κλασσικού μέσου όρου καθώς τα δείγματα δεν ακολουθούσαν γνωστές κατανομές και ως εκ τούτου δεν θα ήταν δυνατή η εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος. Οι τιμές αυτές δίδονται στο Σχήμα 4.2.17

Έπειτα για κάθε τρόπο αστοχίας,χωρίστηκαν οι δοκοί σε 2 ομάδες που χαρακτηρίζονταν από τις ανισότητες L2/d <4 και L2/d=>4, όπου L2 το μήκος της απόστασης από το άκρο της δοκού έως το κοντινότερο μοναχικό φορτίο της εκάστοτε δοκού, και d το στατικό ύψος της δοκού.

Για κάθε μία από αυτές τις ομάδες υπολογίστηκε η αναλογία L1/L2όπου L1 το μήκος αγκύρωσης του κομματιού FRP κάθε δοκού.

Έπειτα δημιουργήθηκαν ιστογράμματα συχνοτήτων για την κατανομή των τιμών του λόγου L1/L2 για τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας όπως παρακάτω.

Ιστόγραμμα Συχνοτήτων Μήκους Κόλλησης L2/d<4



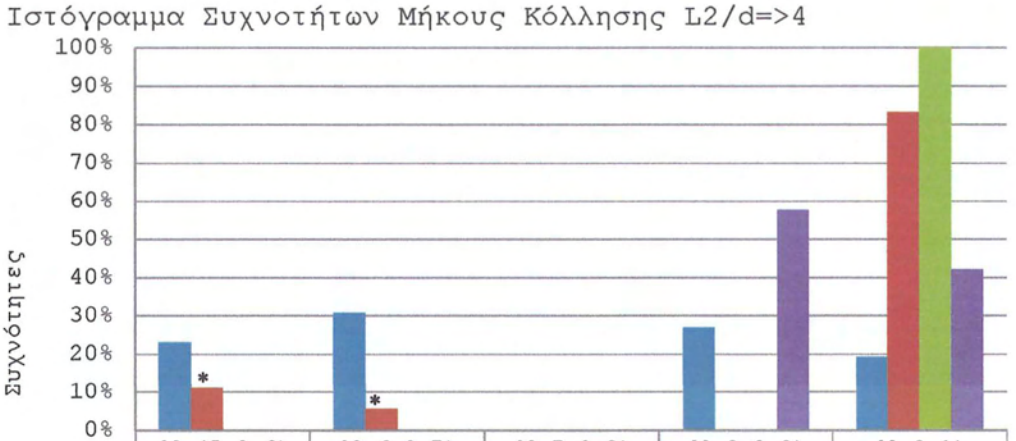
	[0.45,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1)
Αποκόλληση ΙΟΠ	6%	0%	43%	29%	23%
Θραυση ΙΟΠ	0%	0%	0%	18%	82%
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	0%	0%	0%	100%	0%
Αποκόληση επικάλυψης	5%	0%	20%	15%	60%

Σχήμα 4.2.17

Πολύ μεγάλα μήκη αγκύρωσης πτοκαλούν αστοχίαν έναντι συνθλιψης σκυροδέματος

Όταν έχω μικρό μήκος αγκύρωσης που ξεπερνάει τοL2/d<4 θα έχω είτε αποκόλληση ΙΟΠ είτε αποκόλληση επικάλυψης.

Η Θραύση του ΙΟΠ και η σύνθλιψη σκυροδέματος απαιτούν μεγάλες τιμές του λόγου L1/L2 που κυμαίνονται από 80-90%



	[0.45,0.6)	[0.6,0.7)	[0.7,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1)
Αποκόλληση ΙΟΠ	23%	31%	0%	27%	19%
Θραυση ΙΟΠ	11%	6%	0%	0%	83%
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	0%	0%	0%	0%	100%
Αποκόληση επικάλυψης	0%	0%	0%	58%	42%

* Αγκυρωμένα ΙΟΠ

Σχήμα 4.2.18

Επίσηςπαρατηρώ ότι δεν υπάρχει συσχέτιση του μήκους κόλλησης με τον λόγο L2/d για την αποκόλληση του ΙΟΠ.

Όταν ο λόγος L2/d>=4 παρατηρώ ότι ,σε μη αγκυρωμένα δοκίμια, ότι η θραύση επέρχεται όταν ο λόγος L2/d ξεπερνάει το 90%. Μόνο στη περίπτωση που τα ΙΟΠ αγκυρώνονται με μηχανικά μέσα, οδηγείται η αστοχία σε θραύση των ΙΟΠ παρά το μικρό μήκος αγκύρωσης. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η σύνθλιψη σκυροδέματος επέρχεται σε μεγάλο ποσοστό L1/L2.

Διερεύνηση της επιρροής της δυστένειας του ΙΟΠ στον τρόπο αστοχίας της δοκού

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, έγινε προσπάθεια να διερευνηθεί η επιρροή της δυστένειας του ΙΟΠ στον τρόπο αστοχίας της δοκού.

Η δυστένεια ορίστηκε ως το παρακάτω πηλίκο

$$Stiffness = \frac{A_f}{bd} E_f = \rho_f E_f$$

Όπου

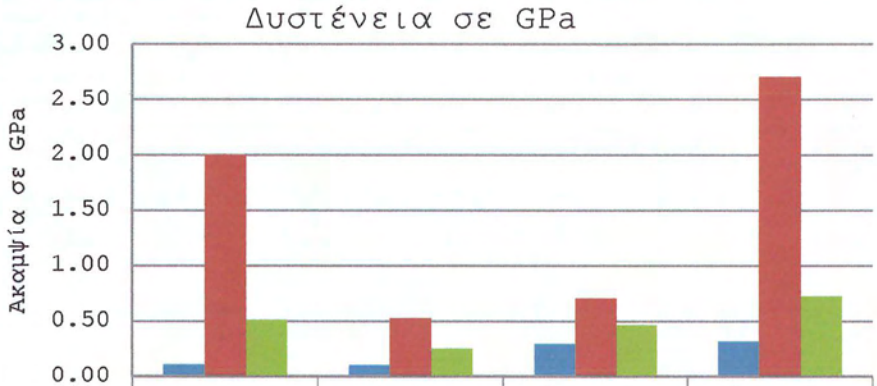
A_f η συνολική επιφάνεια του οπλισμού από FRP

bτο πλάτος της δοκού

d το καθαρό ύψος της δοκού

E_f το μέτρο ελαστικότητας του FRP σε MPa

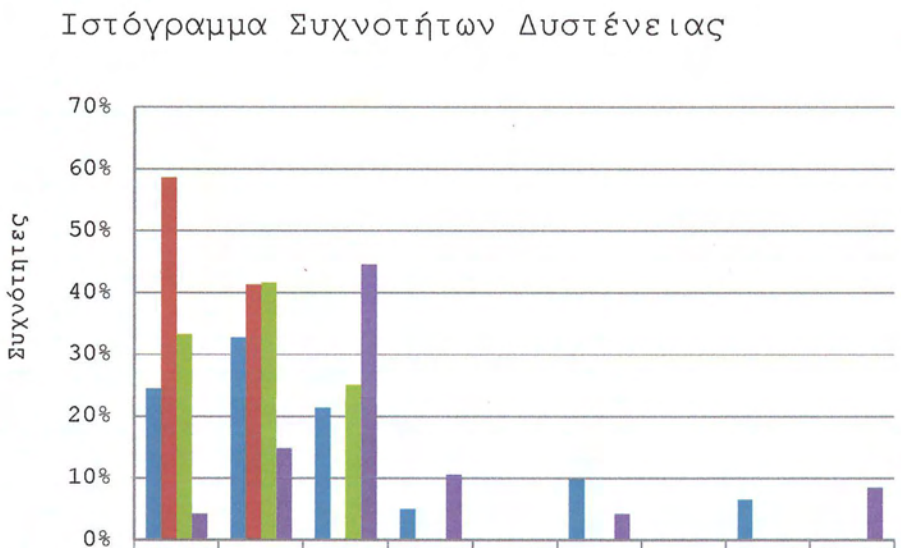
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα άκρα των τιμών αυτών και την διάμεσο τους, για κάθε τρόπο αστοχίας φαίνονται στο Σχήμα 4.2.17



	Αστοχία λόγω Αποκόλλησης του ΙΟΠ	Αστοχία λόγω Θραύσης του ΙΟΠ	Αστοχία λόγω Σύνθλιψης Σκυροδέματος	Αστοχία λόγω Αποκόλλησης της Επικάλυψης
Ελάχιστη Τιμή	0.11	0.11	0.30	0.32
Μέγιστη Τιμή	2.00	0.53	0.71	2.72
Διάμεσος Τιμή	0.51	0.26	0.47	0.73

Σχήμα 4.2.18

Ομοίως για κάθε τρόπο αστοχίας έγιναν ιστογράμματα συχνοτήτων με 10 ίδια διαστήματα τα οποία είχαν αρχική τιμή την ελάχιστη τιμή από όλες τις τιμές όλων ων δειγμάτων και μέγιστη τιμή την αντίστοιχη μέγιστη ομοίως. Αυτό το βήμα έγινε για να καταφέρουμε να συσχετίσουμε κάθε τρόπο αστοχίας με κάποια τάξη μεγέθους της δυστένειας. Έπειτα τα 10 ίδια διαστήματα για κάθε τρόπο αστοχίας ενσωματώθηκαν σε κοινό διάγραμμα για να γίνει συσχέτιση των αντίστοιχων τρόπων αστοχίας με τις δυστένειες που υπολογίστηκαν από τις δοκούς.



	[0.05,0.32)	[0.32,0.6)	[0.6,0.87)	[0.87,1.15)	[1.15,1.42)	[1.42,1.7)	[1.7,1.97)	[1.97,2.25)	[2.25,2.52)
Αποκόλληση του ΙΟΠ	25%	33%	21%	5%	0%	10%	0%	7%	0%
θραυση του ΙΟΠ	59%	41%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Σύνθλιψη Σκυροδέματος	33%	42%	25%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Αποκόλληση της επικάλυψης	4%	15%	45%	11%	0%	4%	0%	0%	9%

Σχήμα 4.2.19

Σύμφωνα με το διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα που αφορούν την ακαμψία μια ενισχυμένης δοκού με ΙΟΠ ως προς την συμπεριφορά της στην αστοχία.

Για την αστοχία μιας δοκού λόγω της αποκόλλησης του ΙΟΠ σύμφωνα με το διάγραμμα ΧΧ, προκύπτει ότι η δυστένεια πρέπει να κυμαίνεται από 0.32 GPa έως 0.6 GPa. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι η πλειονότητα των δοκών (33% του δείγματος) που αστόχησαν με τον εκάστοτε τρόπο αστοχίας ακολουθούσε αυτή την λογική.

Όσον αφορά τις ενισχυμένες δοκούς που αστόχησαν λόγω της θραύσης του FRP, το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών (59% του εν λόγω δείγματος) είχε δυστένεια από 0.05 GPa έως 0.32 GPa. Επομένως αναμένουμε ότι αυτή η τάξη μεγέθους της δυστένειας σχετίζεται άμεσα με αυτό τον τρόπο αστοχίας.

Από το διάγραμμα επίσης προκύπτει ότι, το 42% των δοκών που αστόχησαν λόγω Σύνθλιψης Σκυροδέματος, είχαν δυστένεια από 0.32 GPaέως 0.6 GPa. Σύμφωνα με αυτό το στοιχείο επίσης αναμένουμε να σχετίζεται με αυτό τον τρόπο αστοχίας αυτή η τάξη μεγέθους δυστενειών.

Το γεγονός ότι έχουμε το ίδιο διάστημα τιμών για διαφορετικούς τρόπους αστοχίας, μας δείχνει ότι η διαφοροποίηση τους πιθανόν να προκύπτει από κάποιο άλλο μέγεθος π.χ. λόγω του διαφορετικού μήκους κόλλησης

Τέλος σχετικά με την αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης, η πλειονότητα των δοκών που αστόχησε, σε ποσοστό 45% του εν λόγω τρόπου αστοχίας, χαρακτηριζόταν από δυστένεια της τάξεως από 0.6 GPaέως 0.87 GPa.

Από τα παραπάνω φαίνεται αρκετά ξεκάθαρα ότι η δυστένεια του ΙΟΠ μιας ενισχυμένης δοκού έχει άμεση επιρροή στον τρόπο αστοχίας της.

5. Συμπεράσματα

- **Ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά αποκόλλησης στις ενισχυμένες δοκούς**

Από τα 151 δοκάρια μόνο τα 29 αστόχησαν έναντι Θραύσης ΙΟΠ. Το μεγαλύτερο ποσοστό αστόχησε πρόωρα λόγω αποκόλλησης. Η αποκόλληση αυτή παρατηρήθηκε είτε στην διεπιφάνεια ΙΟΠ-Ω/Σ (σε ποσοστό 40.3% του συνολικού δείγματος) είτε στην επικάλυψη του σκυροδέματος (με ποσοστό 31.1% του ιδίου). Οι αποκολλήσεις που παρουσιάστηκαν κάνουν τη δουλειά των κανονισμών πολύ δύσκολη καθώς είναι πολλοί οι παράγοντες που τις επηρεάζουν, και συνεπώς είναι δύσκολο να προβλεφθούν με ασφάλεια.

- **Ο ECP208 αποτελεί τον συντηρητικότερο όλων των κανονισμών**

Ο ECP208 υποτιμά ιδιαίτερα την ικανότητα των δοκών, για όλα τα σενάρια αστοχίας σε επίπεδο σχεδιασμού. Αυτό οφείλεται κυρίως στις αυστηρές παραδοχές που χρησιμοποιεί για το όριο των ανηγμένων παραμορφώσεων του ΙΟΠ. Η εν λόγω άποψη της υποτίμησης ενισχύεται από το γεγονός ότι τα ποσοστά των δοκών που αστοχούν υπόπροϋποθέσεις μη ασφαλούς αστοχίας για τους διάφορους τρόπους αστοχίας είναι συγκριτικά τα μικρότερα όλων. Συγκεκριμένα για τον τρόπο αστοχίας λόγω αποκόλλησης του FRP το αντίστοιχο ποσοστό ανασφαλούς αστοχίας είναι 14.8% για τον αντίστοιχο λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης 8.5% ενώ για τους τρόπους αστοχίας λόγω θραύσης του ΙΟΠ και σύνθλιψης σκυροδέματος είναι αμφότερα 0%.

- **Ο ISIS ως ο ασφαλέστερος έναντι σύνθλιψης σκυροδέματος**

Ο ISIS είναι εξίσου συντηρητικός στο θέμα της σύνθλιψης σκυροδέματος με τον ECP208 σε ποσοστό 100% των δοκών.

Μια τέτοια αντιμετώπιση από ένα μαθηματικό μοντέλο πιθανότατα θα οδηγήσει σε αντιοικονομικό σχεδιασμό των δοκών, όπως επίσης και βλαβερό σε κάποιες περιπτώσεις σε σημεία όπου επιδιώκουμε αστοχία για λόγους πλαστιμότητας.

- **Καλύτερη πρόβλεψη κανονισμών**

Συμπερασματικά, από τις αναλύσεις για την αστοχία των δοκιμίων, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα

Η αστοχία λόγω Σύνθλιψης σκυροδέματος προβλέπεται καλύτερα από τον JSCE.Εν συνεχεία ο ACI440 περιγράφει καλύτερα την αστοχία λόγω Αποκόλλησης του ΙΟΠ. Όσον αφορά την αστοχία λόγω Θραύσης του ΙΟΠ προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα από τον CNR DT-200.Για την αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης, έχουμε καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων σε αυτά τα πλαίσια από τον TR55.Εν κατακλείδι, ανεξαρτήτως τρόπου αστοχίαςκαλύτερα αποτελέσματα δίνει ο ACI440.

- **Ο TR55 προβλέπει αποτελεσματικά την αστοχία λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος αλλά όχι και αντίστοιχη της Θραύσης του ΙΟΠ**

Ο TR55 καταφέρνεινα προβλέψει την αστοχία λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος με ικανοποιητική επάρκεια ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο με τις αστοχίες λόγω θραύσης του FRP. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει συμπεριλάβει το μοντέλο επιπρόσθετες συνθήκες που αφορούν πιο συγκεκριμένους παράγοντες για την αστοχία λόγω θραύσης του FRP (πχ συνθήκες αγκύρωσης FRP κλπ.)

- **Ο ECP208 ως ασφαλέστερος και αποτελεσματικότερος συγκριτικά κανονισμός για την Αποκόλληση του ΙΟΠ**

Ο ECP208 καταφέρνει με ικανοποιητική ακρίβεια με τα μέτρα που υιοθετεί για τον σχεδιασμό να αποτρέψει με ασφάλεια την αστοχία έναντι αποκόλλησης της επικάλυψης αλλά και αποκόλλησης του FRP.Ο CNR DT-200 και ο JSCE δεν καταφέρνουν να σχεδιάσουν με ασφάλεια, έναντι της αστοχίας λόγω αποκόλλησης του FRP για την τιμή του σχεδιασμού που προκύπτει από το εν λόγω μοντέλο. Ωστόσο στο ανάλογο πρόβλημα ο ACI440 δείχνει να έχει μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας από τους προαναφερθέντες κανονισμούς. Οι παραπάνω αστοχίες πιθανότατα οφείλονται στο γεγονός ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του μήκους κόλλησης του FRP για να εξαχθεί η πραγματική τιμή της καμπτικής ικανότητας.

Συνολικά βλέπουμε ότι όλα τα μοντέλα/κανονισμοί αναπτύσσονται στην κατεύθυνση του ασφαλούς σχεδιασμού έναντι κάποιων μορφών αστοχίας των ενισχυμένων δοκών παραβλέποντας το ζήτημα της ακριβέστερης πρόβλεψης της τιμής της καμπτικής ικανότητας.

Επιρροή Μήκους κόλλησης και δυστένειαςδιατομής σύμφωνα με τον τρόπο αστοχίας.

Παρατηρήθηκε ότι η δυστένεια του πρόσθετου Ινοπλισμένου πολυμερούς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον τρόπο αστοχίας των ενισχυμένων δοκών. Πιο συγκεκριμένα για να οδηγηθεί η δοκός σε αστοχία λόγω θραύσης θα πρέπει το γινόμενο $\rho_f E_f$να μην ξεπερνά τα 0.60Gpa. Όσο η τιμή της δυστένειας αυξάνεται τόσο πιο πιθανή γίνεται μια αστοχία μη επιθυμητή (αποκόλληση). Η αύξηση τουμέγεθους της δυστένειας του ΙΟΠ οδηγεί διαδοχικά σεαστοχία λόγω αποκόλλησης του ΙΟΠ, αποκόλλησης της επικάλυψης και τέλοςσύνθλιψης σκυροδέματος.

Επιρροή Μήκους ΑγκύρωσηςΙΟΠ στον τρόπο αστοχίας.

- Πολύμεγάλα μήκη αγκύρωσης προκαλούν αστοχία έναντιΣύνθλιψηςΣκυροδέματοςή Θραυσης του ΙΟΠ

- Σε μη αγκυρωμένα δοκίμια με L2/d>=4 , για μεγάλες τιμές του λόγου L1/L2 μεγαλύτερες από 90%έχουμε θραύση του ΙΟΠ.
- Μικρά μήκη αγκύρωσης οδηγούν σε αποκόλληση του ΙΟΠ ή σε αποκόλληση της επικάλυψης.
- Γενικά φαίνεται από τις αναλύσεις των πειραματικών δεδομένων ότι το μήκος αγκύρωσης του ΙΟΠ παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σχετικά με τον τρόπο αστοχίας.

6. Βιβλιογραφία

ACI Committee 318, & American Concrete Institute. (n.d.). *Building Code Requirement for Structural Concrete And Commentary.*

ACI Committee 440, & American Concrete Institute. (2008). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.* Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute.

Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructionns. (2013). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures Materials, RC and PC structures, masonry structures.

Ahmed Khalifa, William J. Gold, Antonio Nanni, & Abdel Aziz M.I. (1998). Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members. *Journal of Composites for Construction, 2.*

Akbarzadeh, H., &Maghsoudi, A. A. (2010). Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials & Design, 31*(3), 1130-1147. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.041

Al Chami, G., Thériault, M., & Neale, K. W. (2009). Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials, 23*(4), 1640-1652. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.006

Andre Picard, Bruno Massicotte, & Eric Boucher. (n.d.). Strengthening of reinforced concrete beams with composite materials: theoretical study. *Composite Structures*, *33*.

Aram, M. R., Czaderski, C., &Motavalli, M. (2008). Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams. *Composites Part B: Engineering*, *39*(5), 826–841. http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.006

Ashour, A. ., El-Refaie, S. ., &Garrity, S. . (2004). Flexural strengthening of RC continuous beams using CFRP laminates. *Cement and Concrete Composites*, *26*(7), 765–775. http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.07.002

Barros, J. A. O., Dias, S. J. E., & Lima, J. L. T. (2007). Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, *29*(3), 203–217. http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.001

Byong Y. Bahn, & Ronald S. Harichandran. (n.d.). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets and Epoxy Mortar. *Journal of Composites for Construction*.

C. Arya, J.L. Clarke, E.A. Kay, & P.D. O'Regan. (n.d.). TR 55: Design guidance for stengthening concrete structures using fibre composite materials: a review. *Engineering Structures*.

Ceci, A. M., Casas, J. R., &Ghosn, M. (2012). Statistical analysis of existing models for flexural strengthening of concrete bridge

beams using FRP sheets. *Construction and Building Materials*, *27*(1), 490-520. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.014

Ceroni, F. (2010). Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials. *Construction and Building Materials*, *24*(9), 1547-1559. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.008

Colotti, V., &Spadea, G. (2001). Shear strength of RC beams strengthened with bonded steel or FRP plates. *Journal of Structural Engineering*, *127*(4), 367-373.

Dai Minh Nguyen, ToongKhuan Chan, &HeeKiat Cheong. (n.d.). Brittle Failure and Bond Development Length of CFRP-Concrete beams. *Journal of Composites for Construction*.

De Lorenzis, L., Nanni, A., & La Tegola, A. (2000). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. In *International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Proceedings, Advancing with Composites* (pp. 9-11). Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Laura_De_Lorenzis/publication/237445610_Strengthening_of_Reinforced_Concrete_Structures_with_Near_Surface_Mounted_FRP_Rods/links/0deec52d05ced5f599000000.pdf

Egyptian Standing Code Commitee for The Use of Fiber Reinroced Polymer (FRP) in the Construction Fields. (2005). Egyptian Code

of Practice for The Use of Fiber Reinroced Polymer (FRP) in the Construction Fields Code No. ECP208-2005.

Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., &Tajari, A. R. (2007). Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering Structures*, *29*(10), 2428-2444. http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.12.008

Gao, B., Kim, J.-K., & Leung, C. K. Y. (2006). Strengthening efficiency of taper ended FRP strips bonded to RC beams. *Composites Science and Technology*, *66*(13), 2257-2264. http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.12.002

G.F. Zhang, N. Kishi, H. Mikami, & M. Komuro. (n.d.). A Numerical Prediction Method for Flexural behaviour of rc beams reinforced with FRP sheet.

Gheorghiu, C., Labossière, P., &Proulx, J. (2006). Fatigue and monotonic strength of RC beams strengthened with CFRPs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *37*(8), 1111-1118. http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.035

G. Spadea, F. Bencardino, & R. N. Swamy. (n.d.). Structural Behaviour of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*.

Hamid Rahimi, & Allan Hutchinson. (n.d.). Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates. *Journal of Composites for Construction*.

Hamid Saadatmanesh, & Mohammad R. Ehsani. (1991). RC BEAMS STRENGTHENED WITH GFRP PLATES. I: EXPERIMENTAL STUDY.

Hawileh, R. A., Rasheed, H. A., Abdalla, J. A., & Al-Tamimi, A. K. (2014). Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. *Materials & Design*, *53*, 972-982. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.087

H.N. Garden, & L.C. Hollaway. (n.d.). An experimental study of the influence of plate end anchorage carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Composite Structures*, *42*.

H.N. Garden, L. C. Hollaway, & A.M. Thorne. (n.d.). The strengthening and deformation behaviour of reinforced concrete beams upgraded using prestressed composite plates. *Materials and Structures*, *31*.

H.N. Garden, R.J. Quantrill, L.C. Hollaway, A.M. Thorne, & G.A.R. Parke. (n.d.). An experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, *12*.

Hussien Abdel Baky, Usama A. Ebead, & Kenneth W. Neale. (n.d.). Flexural and Interfacial Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*.

International Federation for Structural Concrete (Ed.). (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: technical*

report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Lausanne: fib.

ISIS Educational Module 4: An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures. (2004) (p. 40). ISIS Canada.

JSCE Guidelines for Concrete No.15 Standard Specifications for Concrete Structures - 2007 "Design." (n.d.). Japan Society of Civil Engineers (JSCE).

JSCE I. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets. (n.d.).

Kyuichi Maruyama. (n.d.). JSCE Recommendations for Application of FRP Laminates and Related Works in other code provisions.

MahmutEkenel, Andrea Rizzo, John J. Myers, & Antonio Nanni. (n.d.). Flexural Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Fabric and Precured Laminate Systems.

Marco Arduini, & Antonio Nanni. (n.d.). Behavior of Precracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*.

Michael J. Chajes, Theodore A. Thomson Jr, Ted F. Januszka, & William W. Finch Jr. (n.d.). Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials.

M. Maalej, & Y. Bian. (n.d.). Interfacial shear stres concentration in FRP-strengthened beams. *Composite Structures, 54*.

Mostofinejad, D., &Moghaddas, A. (2014). Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams. *Construction and Building Materials, 54*, 605-614. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.002

Murad M. Bhunga, & N. K. Arora. (n.d.). Comparative Study of ER-FRP Laminated Beam Design Using ACI 440 2R-08 and ISIS CANADA Method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*.

Nishikant Dash. (2009). *STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAM USING GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES*. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela.

Obaidat, Y. T. (2010). Structural retrofitting of reinforced concrete beams using carbon fibre reinforced polymer. *ISRN LUTVDG/TVSM-10/3070-SE (1-76)*. Retrieved from http://www.researchgate.net/profile/Ghazi_Abu-Farsakh/publication/229318697_Retrofitting_of_reinforced_concrete_beams_using_composite_laminates/links/0c9605253c81194360000000.pdf

Oral Buyukozturk, & Brian Hearing. (n.d.). Failure Behaviour of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP. *Journal of Composites for Construction*.

P. Alagusundaramoorthy, I. E. Harik, & C. C. Choo. (n.d.). Flexural Behavior of RÕC Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets or Fabric.

Paul J. Fanning, & Oliver Kelly. (n.d.). Ultimate Response of RC Beams Stengthened with CFRP Plates. *Journal of Composites for Construction*.

Pešić, N., &Pilakoutas, K. (2003). Concrete beams with externally bonded flexural FRP-reinforcement: analytical investigation of debonding failure. *Composites Part B: Engineering*, *34*(4), 327-338. http://doi.org/10.1016/S1359-8368(02)00139-7

Pham, H., & Al-Mahaidi, R. (2004). Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites. *Composite Structures*, *66*(1-4), 617-625. http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.05.010

Rabinovitch, O., &Frostig, Y. (2003). Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, *34*(8), 663-677. http://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00090-8

Rasheed, H. A., &Pervaiz, S. (2003). Closed form equations for FRP flexural strengthening design of RC beams. *Composites Part B: Engineering*, *34*(6), 539-550. http://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00047-7

R. B. Swain, & A. N. Nayak. (2015). Flexural Analysis of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Sheets. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, *4*.

RehamEltahawy. (2014). *BOND BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH EXTERNALLY BONDED FIBER REINFORCED LAMINATES*. Ain Shams University, Cairo.

Sergio F. Brena, & M. Macri. (n.d.). Effect of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminate Configuration on the Behavior of Strengthened Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*.

Smith, S. T., &Teng, J. G. (2002). FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, *24*(4), 385-395.

Toutanji, H., Zhao, L., & Zhang, Y. (2006). Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering Structures*, *28*(4), 557-566. http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011

V.P.V. Ramana, T. Kant, S.E. Morton, P.K. Dutta, A. Mukherjee, & Y.M. Desai. (n.d.). Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. *Composites Part B: Engineering*, *31*.

Wei An, Hamid Saadatmanesh, & Mohammad R. Ehsani. (n.d.). RC Beams Strengthened with FRP Plates. II: Analysis and Parametric Study.

Zhang, S. S., &Teng, J. G. (2014). Finite element analysis of end cover separation in RC beams strengthened in flexure with FRP. *Engineering Structures*, *75*, 550-560. http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.031

Zhishen Wu, Xin Wang, &Kentaro Iwashita. (n.d.). State-Of-The-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure in Japan. Presented at the Composites &Polycon 2007.

Zhou, Y., Gou, M., Zhang, F., Zhang, S., & Wang, D. (2013). Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials & Design*, *50*, 130-139. http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.089

Γ. Γ. Πενέλης, & Α. Ι. Κάππος. (n.d.). *Αντισεισμικές Κατασκευές απο Σκυρόδεμα*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Κωνσταντίνος Σπυράκος. (2004). *Ενίσχυση Κατασκευώνγια Σεισμικάφορτία*. Τεχνικό ΕπιμελητήριοΕλλάδας.

No of beams	Pdf	ArticleName	Year Accepted	Name	Section type	Beam	Beam Dimensions mm						Frp				Concrete Properties		Tension Reinforcement				FRP	Fiber sheet properties			Adhesive Properties			Glued Coupon			Check	Matrix														Anchorage	Failure	Reals	FRP	Ultimate Moment	FRP Rupture	FRP Debonding	Concrete Crushing	Shear Failure	Cover Delamination
							b mm	h	d	length	Length	moment length	fc	fc' Mpa	Ec Gpa	Es Gpa	fy Mpa	As mm2	As'	Type	tf GPa	ftu Mpa	efu	fa	Ecoup	fcoup	ecoup		ua																		Mode	Matrix	Length	Mu					
				B2-12D-1L15	R Beam	4PB	150	200	166	1400	1600	400	31.53291397	25.2	200	400	226	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	26.4	Yes		0.0000264														FRP Rupture			18.435	g				
				B3-12D-3L15	R Beam	4PB	150	200	166	1400	1600	400	31.53291397	25.2	200	400	226	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	52.8	Yes														Plate end Interfacial debonding			21.282		o			
				B4-12D-3L15	R Beam	4PB	150	200	166	1400	1600	400	31.53291397	25.2	200	400	226	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	79.2	Yes														Plate end Interfacial debonding			22.332		o			
				B6-16D-1L10	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.12797126	23.8	200	402	402	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	17.6	Yes														FRP Rupture			25.479	g				
				B7-16D-1L15	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.12797126	23.8	200	402	402	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	26.4	Yes														FRP Rupture			28.476	g				
				B8-16D-2L15	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.12797126	23.8	200	402	402	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	52.8	Yes														FRP Rupture			31.773	g				
				B10-20D-1L10	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.21577995	24.1	200	350	628	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	1	0.176	100	17.6	Yes														FRP Rupture			31.896	g				
				B11-20D-1L15	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.21577995	24.1	200	350	628	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	1	0.176	150	26.4	Yes														FRP Rupture			32.073	g				
9	L=2-0-50141029605005104-main	"Flexural behaviour of reinforced concrete beams stre	2006	B12-20D-3L15	R Beam	4PB	150	200	166	1600	1600	400	31.21577995	24.1	200	350	628	157	CFRP	237	2845	0.012004						ok	2	0.176	150	52.8	Yes														Interfacial debonding Induced by flexural shear crack			34.023		o			
				E1a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			49.49		o			
				E2a	R Beam	4PB	140	260	240	1600	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			52.185		o			
				E2a	R Beam	4PB	140	260	240	1600	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			28.07		o			
				E2b	R Beam	4PB	140	260	240	1600	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			33.95		o			
				E3a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			46.165		o			
				E4a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			45.605		o			
				E4b	R Beam	4PB	140	260	220	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	226	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														End Debond			55.3		o			
				E5a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	9	0.13	100	117	Yes														End Debond			42.84		o			
				E5b	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	37.97591355	53.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	9	0.13	100	117	Yes														End Debond			44.205		o			
				S1a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														Mid-span and end debond			51.625		o			
				S1b	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	6	0.13	100	78	Yes														Mid-span and end debond			52.15		o			
				S2a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	2	0.13	100	26	Yes														Mid-span debond			56.28		o			
				S2b	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	339	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	2	0.13	100	26	Yes														Mid-span debond			52.115		o			
				S3a	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	226	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	2	0.13	100	26	Yes														Mid-span debond			47.01		o			
16	L=2-0-50263822304001862-main	"Experimental investigation into flexural retrofitting c	2004	S3b	R Beam	4PB	140	260	240	2000	2300	900	36.82809369	47.7	200	504	226	226	CFRP	213.5	3900	0.018267	3.5	120				ok	2	0.13	100	26	Yes														Mid-span debond			42.105		o			
				S3BR_M_12	R Beam	4PB	120	170	160	900	900	300	36.11801148	44.2	200	788	39.25	66.3325	CFRP	240	3700	0.015417	3	54				ok	3	0.111	80	8.88														Rupture of the CFRP sheet in the beam failure cross section			6.453					
				S3R_M_12	R Beam	4PB	120	170	160	900	900	300	36.11801148	44.2	200	788	39.25	66.3325	CFRP	240	3700	0.015417	3	54				ok	3	0.111	80	17.76														Yielding of the longitudinal steel and rupture of the CFRP sheet in the beam failure cross section			11.925					
3	L=2-0-50958945056001673-main	"Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural an	2006	S3R_M_13	R Beam	4PB	120	170	160	900	900	300	36.11801148	44.2	200	788	39.25	66.3325	CFRP	240	3700	0.015417	3	54				ok	3	0.111	80	26.64														Yielding of the longitudinal steel and delamination of the concrete cover			87.3					o
				A2	R Beam	4PB	100	180	150	1400	2000	240	33.74064352	33.6	230	452	157	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	37.4														concrete crushing/ Intermediate debonding			37.4				o	
				A3	R Beam	4PB	100	180	150	1400	2000	240	33.74064352	33.6	230	452	157	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	33.4														debonding at the end of reinforcement			40				o	
				A5	R Beam	4PB	100	180	150	1400	2000	240	33.74064352	33.6	230	452	157	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	16.7														concrete crushing/ tensile fracture of frp			44.7				o	
				A7	R Beam	4PB	100	180	150	1400	2000	240	33.74064352	33.6	230	452	157	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	1	0.167	100	16.7														tensile fracture of frp / debonding at the end of the reinforcement			41.3				o	
				A8	R Beam	4PB	100	180	150	1400	2000	240	33.74064352	33.6	230	537	100.48	157	CFRP	230	3450	0.015						ok	1	0.167	100	16.7														debonding at the end of reinforcement			27.8				o	
				B2	R Beam	4PB	100	180	150	1000	1800	240	33.74064352	33.6	230	441	226.08	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	16.7														debonding at the end of reinforcement			49.2				o	
				B3	R Beam	4PB	100	180	150	1000	1800	240	33.74064352	33.6	230	441	226.08	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	33.4														debonding at the end of reinforcement			48.2				o	
				B5	R Beam	4PB	100	180	150	1000	1800	240	33.74064352	33.6	230	441	226.08	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	2	0.167	100	16.7														concrete crushing/ tensile fracture of frp			51.9				o	
6	L=2-0-50950061809001005-main	"Experimental performances of RC beams strengthen	2010	B7	R Beam	4PB	100	180	150	1000	1800	240	33.74064352	33.6	230	441	226.08	100.48	CFRP	230	3450	0.015						ok	1	0.167	100	16.7														tensile fracture of frp / debonding at the end of the reinforcement			54.1				o	
				BC	R Beam	4PB	125	200	202	1520	1690	567	37.27786909	50	202	540	157	100.48	CFRP	230	3450	0.015	4.5	30	119.25	2089.6	0.037	ok	Sikadur-330																Steel yielding followed by FRP debonding			92.44				o	
				BGC	R Beam	4PB	125	240	202	1520	1690	567	37.27786909	50	202	540	157	100.48	GFRP	72	3400	0.045	4.5	30	34.13	786.5	0.035	ok	Sikadur-330																Steel yielding followed by Local FRP debonding and concrete crushing at loading support			76.84				o	
4	L=2-0-50261306913007152-main	behavior of reinforced concrete beams strengthened	2013	BGCG	R Beam	4PB	125	240	202	1520	1690	567	37.27786909	50	202	540	157	100.48	Combo	66.5	1622.7	0.018803	4.5	30	86.3	1622.7	0.0206	ok	Sikadur-330																Steel yielding followed by FRP partial debonding, major flexural crack and concrete crushing at loading support			107.59				o	
				B1-1	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	4	0.165	102	14.8														FRP rupture			14.8					
				B1-2	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	4	0.165	102	15.6														FRP rupture			15.6					
				B1-3	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	4	0.165	102	15.456														FRP rupture			15.456					
				S1-1	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	5	0.165	102	17.6														FRP delamination			17.6		o			
				S1-2	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	5	0.165	102	84.15														FRP delamination			84.15		o			
7	L=2-0-50141029605003354-main	"Flexural behavior of reinforced concrete beams exte	2005	S1-3	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	5	0.165	102	17.3														FRP delamination			17.3		o			
				S1-4	R Beam	4PB	108	158	153.024	1524	1526	406	37.08387748	49	200	427	142.439	63.3063	CFRP	110	660	0.006						ok	Inorganic	5	0.165	102	100.98														FRP delamination			100.98		o			
				S-OP	T Beam	5PB	350	500	470	5500	5700	1700	25.1	22.98	207	370	615.44	471	CFRP	230	3623.2	0.0157	5.1						ok		4	0.111	200	88.88	Yes														FRP sliding			117.67	@ anchorage				
				S-FP1	T Beam	5PB	350	500	470	5500	5700	1700	25.1	22.98	207	370	615.44	471	CFRP	230	3623.2	0.0157	5.1						ok		4	0.111	200	88.88	Yes														FRP strip rupture			136.37	Screw Bolt				
				S-FP2	T Beam	5PB	350	500	470	5500	5700	1700	25.1	22.98	207	370	615.44	471	CFRP	230	3623.2	0.0157	5.1						ok		4	0.111	200	88.88	Yes														FRP strip rupture			137.04	Screw Bolt				
				S-FP3	T Beam	5PB	350	500	470	5500	5700	1700	25.1	22.98	207	370	615.44	471	CFRP	230	3623.2	0.0157	5.1						ok		4	0.111	200	88.88	Yes														FRP strip rupture			161.85	Screw Bolt				
5	L=2-0-50261306913002008-main	"Reinforced concrete beams strengthened with carbo	2013	S-FP4	T Beam	5PB	350	500	470	5500	5700	1700	25.1	22.98	207	370	615.44	471	CFRP	230	3623.2	0.0157	5.1						ok		4	0.111	200	113	Yes														FRP strip rupture			161.85	Screw Bolt				
				B1	R Beam	4PB	250	150	120	2000	2000	667	37.08387748	49	485	485	150.72	150.72	CFRP	305	3300	0.004282						ok		1	1.2	50	60														FRP Rupture			31.7				o	
				B2	R Beam	4PB	250	150	120	2000	2000	667	37.08387748	49	485	485	150.72	150.72	CFRP	214	2000	0.009434						ok		1	1.2	50	60														FRP Rupture			20.7948					
3	L=2-0-51359836803000908-main	"Debonding failure modes of flexural FRP-strengthene	2007	B3	R Beam	4PB	250	150	120	2000	2000	667	37.65883691	52	485	485	150.72	150.72	CFRP	155	2700	0.017419						ok		1	1.2	50	60														Debonding			41.8562					
				E1	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	GFRP	33.09	138	0.01212	ok	Sikadur 32 I.1						3	0.473	127	180.213														Fabric Tensile Failure			3.104906					
				E2	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	GFRP	33.09	138	0.01212	ok	Sikadur 32 I.1						3	0.473	127	180.213														Fabric Tensile Failure			3.1653024					
				E3	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	GFRP	33.09	138	0.01054								13.09	138	0.0122	ok	Sikadur 32 I.1						3	0.473	127	180.213														Fabric Tensile Failure			3.1250128					
				G1	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	CFRP	22.05	190	0.007416	ok	Sikadur 32 I.1						2	0.61	127	154.94														Fabric Tensile Failure			3.0599888					
				G2	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	CFRP	22.05	190	0.007416	ok	Sikadur 32 I.1						2	0.61	127	154.94														Fabric Tensile Failure			3.403152					
6	L=2-0-50950061809900344-main	"Flexural strengthening of concrete beamsusing exte	1994	G3	R Beam	4PB	127	76.2	50.8	1117.6	1117.6	304.8	34.72820402	37.8	210	413	71.2196	0	CFRP	22.05	190	0.007416	ok	Sikadur 32 I.1						2	0.61	127	154.94														Fabric Tensile Failure			2.9441148					
				A2	R Beam	4PB	200	200	165	1900	2100	700	40.75848107	70.1	200	390	339.12	100.48	CFRP	165	2800	0.017	3.8	30				ok	Sikadur-330 (epoxy resin)	1	1.2	120	144														separation of the bonded FRP strip.			54.81		o			
				A3	R Beam	4PB	200	200	165	1900	2100	700	40.75848107	70.1	200	390	339.12	100.48	CFRP	165	2800	0.017	3.8	30				ok	Sikadur-330 (epoxy resin)	1	1.2	120	144														Cover separation			178					o
3	L=2-0-51359836803000908-main	"Experiments and analytical comparison of RC beams	2003	B2	R Beam	4PB	200	200	165	1900	2100	700	40.75848107	70.1	200	390	461.58	100.48	CFRP	165	2800	0.017	3.8	30				ok	Sikadur-330 (epoxy resin)	1	1.2	120	144														shear-flexure crack			187.4					o
				Beam 1U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	400	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Cover Separation			5.48					
				Beam 2U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	400	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Cover Separation			4.8					
				Beam 1A1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	320	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Shear through beam depth			7.88					
				Beam 2U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	320	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type A			5.78					o
				Beam 2A1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	320	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type A			8.44					o
				Beam 3A1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	320	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type A			7.74					o
				Beam 4U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	200	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type B			6.9					o
				Beam 5U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	200	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type B			6.92					o
16	L=2-0-50263822308000701-main	"An experimental study of the influence of plate end	1998	Beam 4A1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	200	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343	8.6	28.4				ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type B			7.3					o
				Beam 1	R Beam	4PB	115	150	130	1200	1350	350	26	30.3	183.6	534	235.619	157.08	CFRP	230	3400	0.015	1.47					ok		2	0.111	115	12.765														FRP rupture			1816					
				Beam 2	R Beam	4PB	115	150	130	1200	1350	350	26	30.3	183.6	534	235.619	157.08	CFRP	230	3400	0.015	1.47					ok		2	0.111	115	29.53														Ripping of concrete cover			21.5					o
				Beam 3	R Beam	4PB	115	150	130	1200	1350	350	26	30.3	183.6	534	235.619	157.08	CFRP	230	3400	0.015	1.47					ok		2	0.111	115	86														Ripping of concrete cover			20.51					o
				Beam 4	R Beam	4PB	115	150	130	1200	1350	350	26	30.3	183.6	534	235.619	157.08	CFRP	230	3400	0.015	1.47					ok		2	0.111	115	38.295														Ripping of concrete cover			82					o
4	L=2-0-50263822301000782-main	"Interfacial shear stress concentration in FRP-strengt	2001	Beam 5	R Beam	4PB	115	150	130	1200	1350	350	26	30.3	183.6	534	235.619	157.08	CFRP	230	3400	0.015	1.47					ok		2	0.111	115	51.06														Ripping of concrete cover			79					o
				Beam 1U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	400	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Cover separation			36.5					o
				Beam 2U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	400	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Cover separation			4.8					o
				Beam 3U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	320	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type A			34					o
				Beam 4U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	200	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type B			5.78					o
				Beam 5U1.0m	R Beam	4PB	100	100	84	960	1000	200	38.03121139	54	215	436	84.78	56.52	CFRP	111	1414	0.012343			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	0.82	67	54.94														Partial Cover Separation Type B			34.6					o
				Beam 1U2.3m	R Beam	4PB	130	200	206	2220	2300	610	36.68862938	47	220	639	226.08	100.48	CFRP	115	1284	0.01077			8.6	28.4	ok	Sikadur 31 I.3	1	1.28	90	115.2														Cover separation			100.8					o
12	L=2-0-50950061809000226-main	"An experimental study of the anchorage length of c	1998	Beam 1U4.5m	R Beam	4PB	145	230	205	4420	4500	1450	36.68862938	47	220	639	226.08	100.48	CFRP	115	1284	0.01077			8.6	28.4	ok

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
004000125588