

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΑΜ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΗΤΡΑΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΣΕ
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΠΛΕΓΜΑΤΑ ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ**

ΚΑΡΑΜΠΕΛΑ ΧΑΡΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2021

© 2021 Καράμπελα Χαρά

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Κούτας Λάμπρος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Γουργιώτης Παναγιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα, οφείλω ευχαριστίες στον κ. Κουτσελίνη Αλέκο, μέλος ΕΤΕΠ, τον Δρ. Παπαθεοχάρη Χάρη καθώς και στους τρεις συμφοιτητές μου που συνεργαστήκαμε για τη διεκπεραίωση αυτού του πειραματικού προγράμματος. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Βαλέρια και Δημοσθένη και στον αδερφό μου Κωνσταντίνο, αλλά και τους φίλους μου, των οποίων η διαρκής ηθική και ψυχολογική συμπαράσταση έπαιξε εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής.

**ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΜΕ ΙΑΜ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΜΗΤΡΑΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΠΛΕΓΜΑΤΑ
ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ**

Καράμπελα Χαρά

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2021

Επιβλέποντες Καθηγητές: Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται η καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) με χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών, τα γνωστά ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (ΙΑΜ) ή Textile Reinforced Mortars (TRM). Συγκεκριμένα, ερευνώνται τρεις διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης με σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούνται από ινοπλέγματα υάλου σε συνδυασμό με ένα κονίαμα. Τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τριών ειδών, δύο εκ των οποίων ήταν τσιμεντοκονιάματα ενώ το ένα παρασκευάστηκε στο εργαστήριο με τη χρήση γεωπολυμερών. Συνολικά παρασκευάστηκαν εννέα δοκοί διαστάσεων 1600x120x200 mm, οκτώ εκ των οποίων ενισχύθηκαν ενώ μια δοκός αποτελούσε δοκίμιο αναφοράς. Παραμέτρους προς διερεύνηση αποτέλεσαν ο αριθμός των στρώσεων ινοπλεγμάτων υάλου που χρησιμοποιήθηκε, ο τρόπος ενίσχυσης τους καθώς και η προετοιμασία τους και το είδος κονιάματος που εφαρμόστηκε σε κάθε δοκίμιο. Όλα τα δοκίμια μετά την ενίσχυσή τους υποβλήθηκαν σε καμπτική δοκιμή τεσσάρων σημείων. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων οδήγησε στο συμπεράσματα ότι το τσιμεντοκονίαμα με πρόσθετα πολυμερή είχε καλύτερη συνάφεια με τις ίνες υάλου από τα υπόλοιπα κονιάματα, ενώ σε όσα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε κονίαμα γεωπολυμερούς, ο βαθμός ενεργοποίησης της ενίσχυσης

ήταν μειωμένος λόγω ολίσθησης των ινών μέσα από τη μήτρα. Επίσης, ο αριθμός των στρώσεων που εφαρμόστηκαν, φάνηκε να επηρέασε τη μορφή αστοχίας των δοκιμίων.

Λέξεις κλειδιά: Οπλισμένο σκυρόδεμα, καμπτική ενίσχυση, σύνθετα υλικά, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, γεωπολυμερή

Abstract

The main objective of this thesis is to study the effectiveness of textile-reinforced mortar as a means of improving the flexural behavior of poorly-designed reinforced concrete (RC) beams. For this purpose, three types of flexural strengthening with composite materials of glass textiles in combination with a mortar are investigated. There are three types of mortar, two cementitious and one which prepared in the laboratory using geopolymers. A total of nine beams measuring 1600x120x200 mm were prepared, eight of which were reinforced while one beam was a reference. The parameters under investigation included a) the number of textile layers, b) the mortar type, c) the method of the concrete surface preparation, and d) the end-anchorage of the TRM layers. All the specimens were subjected to monotonic four-point bending test. It was mainly concluded that the cement mortar with additive polymers had better adhesion to the glass fibers than the other mortars, while in all specimens where TRM consisted of geopolymer mortar, the degree of the strengthening activation was substantially reduced due to slippage of the fibers within the geopolymer mortar. In addition, the number of applied layers seemed to affect the failure mode of the specimens.

Key words: reinforced concrete, flexural strengthening, composite materials, textile reinforced mortars, geopolymers

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Περιγραφή της ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών	15
1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος	15
1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΙΑΜ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
2.1 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα	18
2.2 Ενίσχυση σε κάμψη με ΙΑΜ	21
2.2.1 Μορφές αστοχίας δοκών οπλισμένου σκυροδέματος καμπτικά ενισχυμένων με ΙΑΜ	27
2.3 Γεωπολυμερή: Γενικά.....	29
2.4 Χρήση γεωπολυμερών στις κατασκευές και στην ενίσχυση δοκών σε κάμψη.....	29
2.5 Σύγκριση οργανικής και ανόργανης μήτρας	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	32
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	32
3.1 Γενικά	32
3.2 Περιγραφή δοκιμίων.....	32
3.2.1 Περιγραφή δοκιμίων και ονοματολογία	34
3.3 Ιδιότητες υλικών.....	36
3.3.1 Σκυρόδεμα	36
3.3.2 Πλέγματα ενίσχυσης.....	37
3.3.3 Μήτρα ενίσχυσης.....	38
3.4 Διαδικασία σκυροδέτησης δοκιμίων	44

3.4.1	Ευλότυποι σκυροδέματος: Σχεδιασμός-έλεγχος	44
3.4.2	Σκυροδέτηση δοκιμίων.....	46
3.5	Διαδικασία ενίσχυσης δοκών	49
3.5.1	Προετοιμασία δοκών και ινοπλεγμάτων ενίσχυσης.....	49
3.5.2	Ενίσχυση δοκών με ινοπλέγματα υάλου	50
3.6	Πειραματική διάταξη και πρωτόκολλο δοκιμής.....	52
3.7	Στατικό σύστημα κατανομής έντασης.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	55
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	55
4.1	Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	55
4.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων κάθε δοκιμίου	55
4.2.1	Δοκίμιο αναφοράς “CONTROL”	55
4.2.2	Δοκίμιο M1_G3.....	58
4.2.3	Δοκίμιο M1_G6.....	60
4.2.4	Δοκίμιο M2_G3.....	63
4.2.5	Δοκίμιο M2_G6.....	65
4.2.6	Δοκίμιο GP_G3	68
4.2.7	Δοκίμιο GP_G6	70
4.2.8	Δοκίμιο GP_G6_EA	73
4.2.9	Δοκίμιο GP_G6_GR.....	75
4.3	Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων φορτίου-βύθισης	77
4.4	Σχολιασμός δυσκαμψιών δοκιμίων	85
4.4.1	Δυσκαμψία δοκιμίου M1_G3.....	88
4.4.2	Δυσκαμψία δοκιμίου M1_G6.....	88
4.4.3	Δυσκαμψία δοκιμίου M2_G3	88
4.4.4	Δυσκαμψία δοκιμίου M2_G6.....	88
4.4.5	Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G3	89

4.4.6 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6	89
4.4.7 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6_EA	89
4.4.8 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6_GR	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	91
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	93
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Ονοματολογία δοκιμίων.....	35
Πίνακας 3.2 Φορτίο και τάση αστοχίας κυβικών δοκιμίων	36
Πίνακας 3.3 Ιδιότητες ινών και ινοπλέγματος υάλου	37
Πίνακας 3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος M1	38
Πίνακας 3.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος M2	38
Πίνακας 3.6 Τελικές αναλογίες συστατικών των κονιαμάτων.....	41
Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος M1	42
Πίνακας 3.8 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος M2	42
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος GP	43
Πίνακας 3.10 Κατηγορίες σκυροδέματος με βάση την κάθιση.....	47
Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	55
Πίνακας 4.2 Δυσκαμψίες των τριών σταδίων	86

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Ινόπλεγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων [3], (γ) τριών διαστάσεων [3]	16
Σχήμα 2.1 (α) Πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών υάλου, (γ) πλέγμα ινών αραμιδίου [3]	20
Σχήμα 2.2 Ενίσχυση (α) δοκού, (β) υποστρώματος [7], (γ) τοιχοποιίας [6]	21
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης μεσαίου ανοίγματος [8]	22
Σχήμα 2.4 (α) Πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών πολυπαραφαινιλενβενζοβισοξαζόλης (PBO) [9]	22
Σχήμα 2.5 Γεωμετρία και διάταξη ενίσχυσης μεγάλων και μικρών δοκών [9]	23
Σχήμα 2.6 Δείγματα του πρώτου πειραματικού προγράμματος σε μεγάλες δοκούς [9]	24
Σχήμα 2.7 Δείγματα του δεύτερου πειραματικού προγράμματος σε μεγάλες δοκούς [9]	24
Σχήμα 2.8 Δείγματα του τρίτου πειραματικού προγράμματος σε μικρές δοκούς [9]	25
Σχήμα 2.9 Μορφές αστοχίας δοκιμίων [11]	28
Σχήμα 3.1 Γεωμετρία δοκού με διαστάσεις διατομής	33
Σχήμα 3.2 Πλάγια όψη δοκού με χαλύβδινο σπλισμό	33
Σχήμα 3.3 Πρώτος τρόπος προετοιμασίας δοκών	34
Σχήμα 3.4 Δεύτερος τρόπος προετοιμασίας δοκού	34
Σχήμα 3.5 Δεύτερος τρόπος ενίσχυσης δοκού	34
Σχήμα 3.6 Τρίτος τρόπος προετοιμασίας δοκού	35
Σχήμα 3.7 Κοντινή όψη τρίτης μορφής δοκού	35
Σχήμα 3.8 (α) Υδραυλική πρέσα για τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, (β) τυπική μορφή αστοχίας κυβικού δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη	36
Σχήμα 3.9 Πλέγμα υάλου που χρησιμοποιήθηκε	37
Σχήμα 3.10 (α) Συστατικό Α κονιάματος M1, (β) Συστατικό Α κονιάματος M2	39
Σχήμα 3.11 (α) Σκόνη αργιλοπιριτίου, (β) Αδρανή < 5mm, (γ) Αδρανή 0.5mm-1mm	39
Σχήμα 3.12 Εφαρμογή κονιάματος σε επιφάνεια σκυροδέματος με ινόπλεγμα	40
Σχήμα 3.13 Εφαρμογή κονιάματος σε μήτρα	40
Σχήμα 3.14 Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων	40
Σχήμα 3.15 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	40
Σχήμα 3.16 Μηχανή για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων και σύνθλιψης των κονιαμάτων	43

Σχήμα 3.17 Μορφή αστοχίας δείγματος κονιάματος GP σε (α) κάμψη τριών σημείων (β) σύνθλιψη.....	44
Σχήμα 3.18 Μορφή αστοχίας σε κάμψη τριών σημείων δείγματος κονιάματος (α) M1 (β) M2	44
Σχήμα 3.19 (α) Καλούπια χωρίς οπλισμό (β) καλούπια με χαλύβδινο οπλισμό, αποστάτες, γάντζους.....	45
Σχήμα 3.20 (α) Έκχυση σκυροδέματος σε καρότσι (β) εκφόρτωση σκυροδέματος στα καλούπια και διάστρωση	46
Σχήμα 3.21 Τελική μορφή σκυροδέματος στα καλούπια μετά την επιπέδωση των ελεύθερων επιφανειών	46
Σχήμα 3.22 (α) Μεταλλικές και πλαστικές κυβικές μήτρες (β) πλαστική κυβική μήτρα (γ) μεταλλική κυβική μήτρα	47
Σχήμα 3.23 Διαδικασία δοκιμής καθίζησης	48
Σχήμα 3.24 Διαδικασία δοκιμής περιεκτικότητας σε αέρα.....	48
Σχήμα 3.25 Διαδικασία προετοιμασίας των επιφανειών δοκού	49
Σχήμα 3.26 Σημαδεμένη δοκός	50
Σχήμα 3.27 Παρασκευή κονιάματος GP	50
Σχήμα 3.28 Επιφάνεια δοκού πριν τη διαβροχή (πάνω) και επιφάνεια δοκού μετά τη διαβροχή (κάτω).....	51
Σχήμα 3.29 Διαδικασία ενίσχυσης	51
Σχήμα 3.30 Τελική μορφή ενισχυμένης δοκού	52
Σχήμα 3.31 Θέση τοποθέτησης των αισθητήρων μεταβλητής αντίστασης	52
Σχήμα 3.32 Πειραματική διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων και εξωτερικά μετρητικά όργανα	53
Σχήμα 3.33 Στατικό σύστημα.....	54
Σχήμα 4.1 Δοκίμιο control πριν την πειραματική δοκιμή.....	56
Σχήμα 4.2 Δοκίμιο control μετά την πειραματική δοκιμή	57
Σχήμα 4.3 Ρηγματώσεις, θραύση και σύνθλιψη σκυροδέματος στη δοκό control.....	57
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό control	57
Σχήμα 4.5 Δοκίμιο M1_G3 πριν την πειραματική δοκιμή	58
Σχήμα 4.6 Δοκίμιο M1_G3 μετά την πειραματική δοκιμή	59
Σχήμα 4.7 (α) Απεικόνιση την ενίσχυσης μετά τη θραύση ινών, (β) η ρωγμή που προκάλεσε τη θραύση ινών.....	59

Σχήμα 4.8 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M1_G3	59
Σχήμα 4.9 Δοκίμιο M1_G6 πριν την πειραματική δοκιμή	61
Σχήμα 4.10 Δοκίμιο M1_G6 μετά την πειραματική δοκιμή	61
Σχήμα 4.11 (α) Κοντινή όψη αποκόλλησης, (β) επιφάνεια της δοκού M1_G6 μετά την αποκόλληση, (γ) όψη ενίσχυσης μετά την αποκόλληση	62
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M1_G6	62
Σχήμα 4.13 Δοκίμιο M2_G3 πριν την πειραματική δοκιμή	63
Σχήμα 4.14 Δοκίμιο M2_G3 μετά την πειραματική δοκιμή	64
Σχήμα 4.15 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την θραύση των ινών υάλου, (β), (γ) κοντινές όψεις ενίσχυσης μετά την αστοχία της δοκού M2_G3	64
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M2_G3	65
Σχήμα 4.17 Δοκίμιο M2_G6 πριν την πειραματική δοκιμή	66
Σχήμα 4.18 Δοκίμιο M2_G6 μετά την πειραματική δοκιμή	66
Σχήμα 4.19 Κοντινή όψη (α) ρηγματώσεων που προκάλεσαν την αστοχία στη δοκό M2_G6, (β) αποκολλημένης ενίσχυσης, (γ),(δ) λείας επιφάνεια σκυροδέματος και ενίσχυσης χωρίς ρωγμές και τοπικές αστοχίες	67
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M2_G6	67
Σχήμα 4.21 Δοκίμιο GP_G3 πριν την πειραματική δοκιμή	69
Σχήμα 4.22 Δοκίμιο GP_G3 μετά την πειραματική δοκιμή.....	69
Σχήμα 4.23 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την θραύση ινών, (β) κοντινή όψη των ρηγματώσεων που προκάλεσαν τη θραύση των ινών υάλου, (γ) κοντινή όψη ρωγμών και θραύσης σκυροδέματος.....	69
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G3.....	70
Σχήμα 4.25 Δοκίμιο GP_G6 πριν την πειραματική δοκιμή	71
Σχήμα 4.26 Δοκίμιο GP_G6 μετά την πειραματική δοκιμή.....	71
Σχήμα 4.27 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αποκόλληση, (β), (γ) κοντινή όψη ρωγμών, αποκόλλησης και λείας επιφάνειας σκυροδέματος	72
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6.....	72
Σχήμα 4.29 Δοκίμιο GP_G6_EA πριν την πειραματική δοκιμή	73
Σχήμα 4.30 Δοκίμιο GP_G6_EA μετά την πειραματική δοκιμή	74
Σχήμα 4.31 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αστοχία, (β) κοντινή όψη ρωγμών και ινών υάλου μετά τη θραύση.....	74

Σχήμα 4.32 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6_EA	74
Σχήμα 4.33 Δοκίμιο GP_G6_GR πριν την πειραματική δοκιμή.....	75
Σχήμα 4.34 Δοκίμιο GP_G6_GR μετά την πειραματική δοκιμή	76
Σχήμα 4.35 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αστοχία, (β) κοντινή όψη σκασμένων ινών υάλου και ρηγμάτωσης που περνάει και στην επόμενη στρώση ινοπλέγματος, (γ) κοντινή όψη ρωγμών και σύνθλιψης σκυροδέματος.....	76
Σχήμα 4.36 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6_GR	76
Σχήμα 4.37 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμίων με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και του δοκιμίου αναφοράς	77
Σχήμα 4.38 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμίων με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και του δοκιμίου αναφοράς	78
Σχήμα 4.39 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμίων με κονίαμα GP και του δοκιμίου αναφοράς	80
Σχήμα 4.40 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμίων με κονίαμα M1 και M2 και του δοκιμίου αναφοράς	81
Σχήμα 4.41 Γράφημα για το φορτίο διαρροής των δοκιμίων.....	83
Σχήμα 4.42 Γράφημα για το φορτίο αστοχίας των δοκιμίων	83
Σχήμα 4.43 Ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς	84
Σχήμα 4.44 Στάδια δυσκαμψίας σε 3-γραμμικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης	85
Σχήμα 4.45 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου I των δοκιμίων	87
Σχήμα 4.46 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου II των δοκιμίων	87
Σχήμα 4.47 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου III των δοκιμίων.....	87
Σχήμα 4.48 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας Σταδίου II.....	90
Σχήμα 4.49 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας Σταδίου III	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή της ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών

Τα τελευταία χρόνια το ζήτημα της ενίσχυσης των κατασκευών απασχολεί ιδιαίτερα τους μηχανικούς της χώρας μας και όχι μόνο. Η πλειονότητα των κτιρίων είναι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν πριν την θέσπιση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, με αποτέλεσμα ένας σεισμός να θέτει σε δοκιμασία τις κατασκευές αυτές. Η ασφάλεια των κτιρίων και συνεπώς των ανθρώπων αποτελούν κύριο μέλημα των μηχανικών. Ένας σεισμός, μια πυρκαγιά, δυσμενή φορτία, φθορά των δομικών υλικών καθώς και άλλες παράμετροι οι οποίες δε λήφθηκαν σοβαρά υπ' όψη κατά το σχεδιασμό της κατασκευής, συμβάλλουν στην τρωτότητα των υφιστάμενων κατασκευών. Συνεπώς, η επισκευή και η ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ), αποτελεί μείζον θέμα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί.

1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος

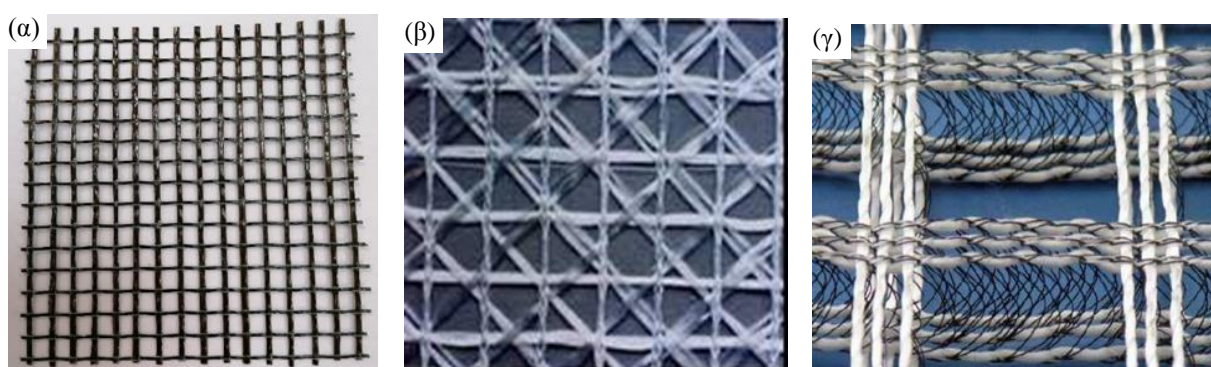
Ως σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται εκείνα τα υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη μακροσκοπικά. Το πρώτο μέρος ονομάζεται οπλισμός και αποσκοπεί κυρίως στην εξάντληση των μηχανικών ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Το δεύτερο χαρακτηρίζεται ως μήτρα, η πυκνότητά του συνήθως είναι χαμηλή και ο ρόλος της είναι εξαιρετικά σημαντικός αφού καλείται να συνεισφέρει στη μέγιστη δυνατή ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους είναι εμφανής [1].

Οι νέες τεχνικές ενίσχυσης κάνουν χρήση προηγμένων υλικών, δηλαδή υλικών που αποτελούνται από ίνες με υψηλή αντοχή συνδυαζόμενες είτε με οργανική μήτρα, είτε με ανόργανη. Τα σύνθετα υλικά, που επικολλώνται εξωτερικά σε στοιχεία (δοκούς, υποστυλώματα, τοιχοποιίες κ.τ.λ.), αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα ή υάλου) σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη. Διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων λωρίδων ή εύκαμπτων υφασμάτων με ίνες, σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις (Ινοπλισμένα Πολυμερή – ΙΟΠ ή Fibre Reinforced Polymers – FRP).

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλη εφελκυστική αντοχή (5-6 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα), από χαμηλό βάρος (περίπου το 1/4 του βάρους του χάλυβα) και από ικανοποιητική ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Ωστόσο, έχουν και μειονεκτήματα, τα οποία οφείλονται κυρίως στην μήτρα, όπως είναι το υψηλό κόστος των ρητινών, η αδυναμία εφαρμογής τους σε υγρές επιφάνειες, η μειωμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η ασυμβατότητα με υλικά του υποστρώματος (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία), αλλά και οι πιθανοί κίνδυνοι που επιφυλάσσονται για το εργατικό προσωπικό, μέσω της επαφής με το ανθρώπινο δέρμα και μέσω των αναθυμιάσεων [2].

Όσον αφορά στη μήτρα, είναι υπεύθυνη για τη συγκράτηση των ινών μεταξύ τους και τις προστατεύει από περιβαλλοντικές φθορές. Ωστόσο, για να μπορεί να ανταποκριθεί στα παραπάνω θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ανθεκτικότητα, ολκιμότητα και σχετική ευκαμψία.

Παρόλο που τα ΙΟΠ ως σύνθετα υλικά είναι ικανά για την ενίσχυση στοιχείων που έχουν υποστεί βλάβες, κυριάρχησε η αναζήτηση ενός νέου σύνθετου υλικού με σκοπό την αντικατάσταση της ρητίνης, λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων της. Το νέο αυτό υλικό ενίσχυσης, γνωστό ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM), ή στην Αγγλική γλώσσα ως Textile Reinforced Mortar (TRM), συνδυάζει πλέγματα ινών υψηλής αντοχής (ινοπλέγματα) με κονιάματα ανόργανης σύστασης (συνήθως τσιμεντοκονιάματα). Τα πλέγματα κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις με σκοπό να επιτευχθεί καλύτερη συνεργασία ινών και κονιάματος, μέσω μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των δεσμών (βροχίδες). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται διάφορες μορφές διαθέσιμων ινοπλεγμάτων.



Σχήμα 1.1 Ινοπλέγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων [3], (γ) τριών διαστάσεων [3]

Τα IAM είναι φιλικά προς το περιβάλλον, αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες σε αντίθεση με τα ΙΟΠ, είναι συμβατά με τα υλικά του υποστρώματος, έχουν χαμηλό κόστος, ενώ μπορούν να εφαρμοστούν σε υγρές επιφάνειες και είναι ανθεκτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, η χρήση IAM στις ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών – οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας - είναι πολλά υποσχόμενη.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά και η πειραματική διερεύνηση της αποδοτικότητας μήτρας γεωπολυμερούς. Πιο συγκεκριμένα, το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει την παρασκευή εννέα δοκιμίων σκυροδέματος διαστάσεων 1600x120x200 mm, εκ των οποίων τα τέσσερα ενισχύθηκαν με χρήση Ινοπλεγμάτων ινών υάλου και κονίαμα γεωπολυμερούς (GP), τα δύο ενισχύθηκαν με Ινοπλέγματα ινών υάλου και τσιμεντοκονίαμα με πρόσθετα πολυμερή (M1), ενώ τα δύο τελευταία με Ινοπλέγματα ινών υάλου και τσιμεντοκονίαμα χωρίς πρόσθετα πολυμερή (M2). Το τελευταίο δοκίμιο δεν ενισχύθηκε και αποτελούσε δοκό αναφοράς. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Παραμέτρους προς διερεύνηση αποτέλεσαν τα διαφόρων ειδών κονιάματα, ο αριθμός των στρώσεων που εφαρμόστηκε σε κάθε δοκίμιο (τρεις ή έξι στρώσεις κάθε φορά) καθώς και ο τρόπος ενίσχυσής τους. Στόχος είναι τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης που διεξάχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, να συγκριθούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να προκύψουν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της κάθε παραμέτρου προς διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΙΑΜ: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

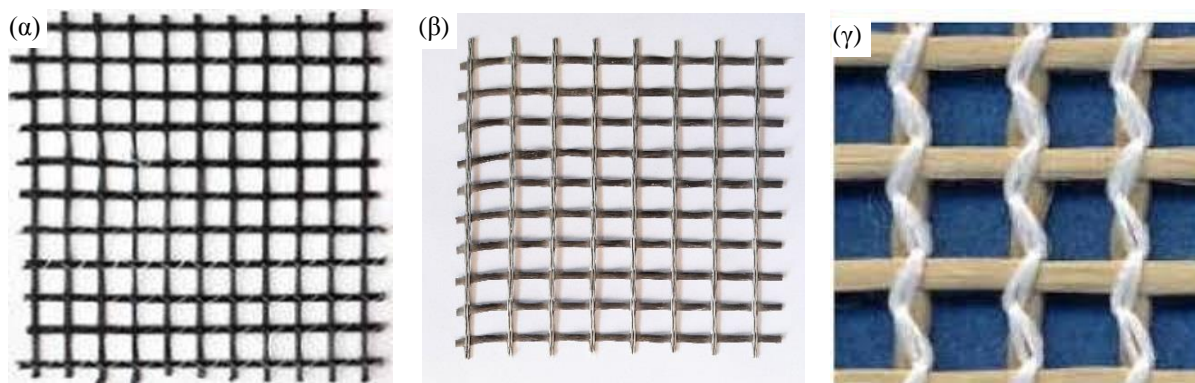
2.1 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα

Τα σύνθετα υλικά είναι πλέον ευρείας χρήσης χάρη στις εξαιρετικές τους ιδιότητες. Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναφορά, τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19ου αιώνα και είχαν ως συστατικά φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Στο τέλος της δεκαετίας του 1930 ξεκίνησε η μαζική παραγωγή υαλονημάτων και έτσι σηματοδοτήθηκε η γέννηση των σύνθετων υλικών. Η χρήση τους όμως αρχικά, περιορίστηκε στην αεροναυπηγική, στη ναυπηγική και στη χημική βιομηχανία λόγω των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και του αυξημένου κόστους τους. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, σε μικρές ποσότητες αρχικά, οι ίνες άνθρακα, οι οποίες τα τελευταία χρόνια έχουν πρωταρχικό ρόλο στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 ακολούθησαν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές [4]. Στην Ελβετία το 1984, πρωτοεφαρμόστηκε σε δομικά στοιχεία κατασκευών η εφαρμογή στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή τους, ενώ στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999, ήταν επόμενο η χρήση τους να εξαπλωθεί ιδιαίτερα [5]. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές εφαρμογές σύνθετων υλικών ανά τον κόσμο και οι προσπάθειες των ερευνητών έχουν ως αποτέλεσμα μία εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά.

Οι βλάβες σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που προκαλούνται από σεισμούς, γήρανση και φθορά των δομικών στοιχείων, οδηγούν ολοένα και περισσότερο προς την αναζήτηση νέων υλικών και τεχνικών επεμβάσεων. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας, της ταχύτητας και της ευκολίας στην εφαρμογή είναι αυτή των ΙΑΜ. Τα πλέγματα αυτά προκατασκευάζονται από συνήθεις ίνες άνθρακα ή υάλου και σπανιότερα από ίνες αραμιδίου. Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa.

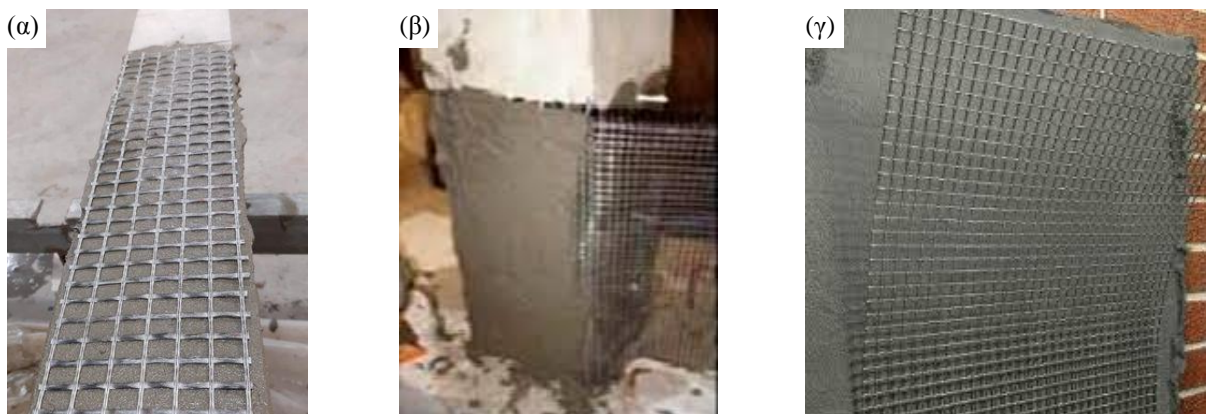
Είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτοί είναι όξινοι είτε βασικοί και παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, έχουν θερμοκρασία αποσύνθεσης 650 °C και δεν είναι ευπαθείς στην υπεριώδη ακτινοβολία. Όσον αφορά στις ίνες από ύαλο σαν βασικό τους πλεονέκτημα έχουν το χαμηλό κόστος. Υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων, εκ των οποίων οι δύο χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, η ύαλος-E και η ύαλος-S. Όταν όμως η μήτρα αποτελείται από κονίαμα (ανόργανο συνδετικό υλικό), επιβάλλεται να γίνεται χρήση ινών υάλου τύπου AR (alkali resistant). Επιπλέον, έχουν θερμοκρασία αποσύνθεσης ίση με 1000 °C, σε συνθήκες υγρασίας υφίστανται μικρή μείωση της αντοχής τους, ενώ δεν είναι ευπαθείς στην υπεριώδη ακτινοβολία. Οι ίνες από αραμιδίου παρουσιάζουν μια ενδιάμεση συμπεριφορά συγκριτικά με τις ίνες από άνθρακα και ύαλο και χαρακτηριστικό τους αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα. Έχουν υψηλή ανθεκτικότητα τόσο στην πυρκαγιά όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης είναι απρόσβλητες από οργανικούς διαλύτες [3].

Τόσο τα πλέγματα άνθρακα, υάλου, αραμιδίου όσο και κάθε άλλου είδους ινοπλέγματος, αποτελούνται από κλώνους. Ένας κλώνος αποτελείται από δέσμες ινών, ενώ το πλέγμα είναι συνδυασμός κλώνων σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις. Η σύνθεση των κλώνων ινών σε πλέγματα επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών. Η τοποθέτηση των κλώνων ινών παράλληλα στην διεύθυνση των τάσεων καθιστά δυνατή την παραλαβή εφελκυστικών τάσεων με τον λιγότερο δυνατό οπλισμό. Τα πλέγματα είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι αποστάσεις μεταξύ των κλώνων να επιτρέπουν την εισχώρηση του κονιάματος. Ο δεσμός μεταξύ ινών και κονιάματος (Ανόργανης Μήτρας) είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, καθώς η αποδέσμευση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία και περιορισμένη ενεργοποίηση των ινών. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται διάφορα πλέγματα ινών δύο διαστάσεων.



Σχήμα 2.1 (α) Πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών υάλου, (γ) πλέγμα ινών αραμιδίου [3]

Τα IAM παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων. Αρχικά, καλύπτουν ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογών καθώς υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης τους σε οποιαδήποτε διεύθυνση, αναλαμβάνοντας έτσι τις αντίστοιχες τάσεις. Παράλληλα, ο εκάστοτε μηχανικός δύναται να σχεδιάσει και να παράξει εύκολα και με χαμηλό κόστος λείες επιφάνειες πάχους έως 10mm, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη δυνατότητα παραλαβής φορτίων. Αυτό οφείλεται στην υψηλή ανθεκτικότητα των πλεγμάτων στη διάβρωση, με αποτέλεσμα η μεγάλου πάχους επικάλυψη, όπως συνηθίζεται σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, να μην είναι πλέον απαραίτητη [6]. Τέλος, τα IAM εκτός από το πεδίο ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα ή φέρουσα τοιχοποιία βρίσκουν εφαρμογή και στο πεδίο των προκατασκευών. Όσον αφορά στις ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών με IAM, πραγματοποιούνται καμπτικές ενισχύσεις δοκών ΟΣ και πλαισίων, διατμητικές ενισχύσεις δοκών ΟΣ, περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές, περίσφιγξη στοιχείων τοιχοποιίας τύπου υποστυλώματος καθώς και ενισχύσεις τοιχίσκων έναντι εντός και εκτός επιπέδου φόρτισης. Μερικές από αυτές τις μορφές ενίσχυσης φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 2.2.



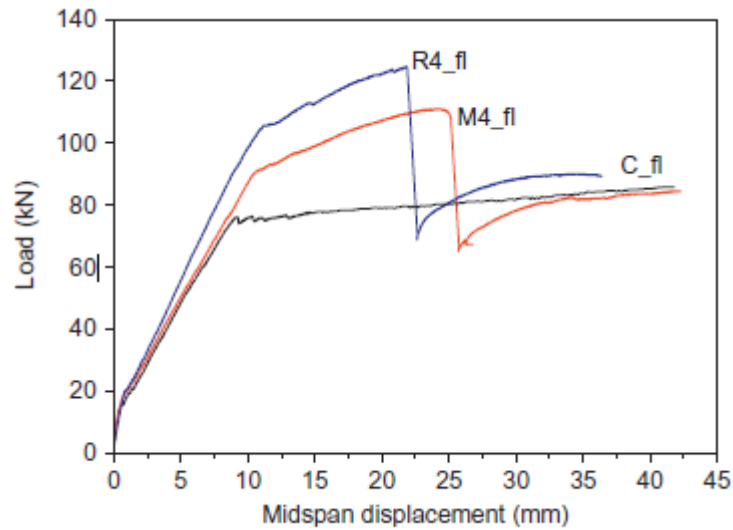
Σχήμα 2.2 Ενίσχυση (α) δοκού, (β) υποστύλωματος [7], (γ) τοιχοποιίας [6]

2.2 Ενίσχυση σε κάμψη με IAM

Η ενίσχυση σε κάμψη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, επιτυγχάνεται με την εξωτερική επικόλληση σύνθετων υλικών στο εφελκόμενο πέλμα. Η διεύθυνση των ινών είναι τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω της κάμψης, δηλαδή τις δυνάμεις που είναι παράλληλες στον άξονα του μέλους.

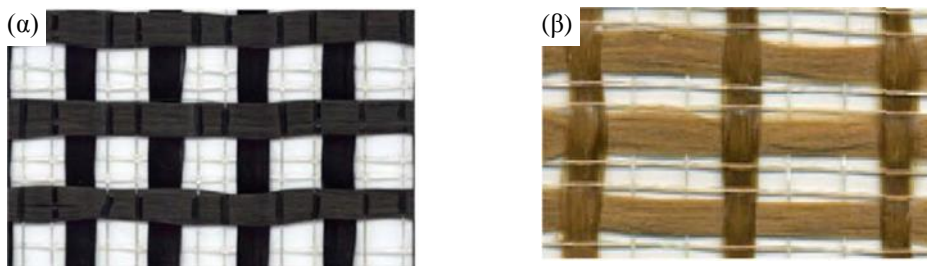
Η διαδικασία της καμπτικής ενίσχυσης δοκών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές δοκιμές. Οι Τριανταφύλλου κ.α. (2006) [8] πραγματοποίησαν έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά των δοκών οι οποίες είχαν ενισχυθεί σε κάμψη και σε διάτμηση και συνέκριναν την απόκριση τους στην περίπτωση όπου το υλικό ενίσχυσης αποτελούταν από εποξειδική ρητίνη και ανόργανη μήτρα. Οι δοκοί που ενισχύθηκαν έναντι κάμψης με IAM ήταν αμφιέριστες, είχαν διαστάσεις 150x250 mm και ενισχύθηκαν με 2Ø12 διαμήκειες ράβδους σε κάθε πλευρά (πάνω και κάτω). Εξετάστηκαν συνολικά τρία δοκίμια, ένα από τα οποία ήταν το δοκίμιο ελέγχου και στα άλλα δύο εφαρμόστηκαν τέσσερις στρώσεις ινοπλεγμάτων σε ανόργανη αλλά και σε οργανική μήτρα στο εφελκόμενο πέλμα τους. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη δοκός δεν ήταν ενισχυμένη (C_fl), η δεύτερη ήταν ενισχυμένη με τέσσερα στρώματα υφάσματος συνδεδεμένα με κονίαμα με βάση το τσιμέντο (M_fl) και η τρίτη ήταν ίδια με τη δεύτερη, με τη διαφορά ότι για τη μήτρα χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη (R_fl). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε υπό μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων. Στην περίπτωση ενίσχυσης με ΙΟΠ, η αστοχία επήλθε μέσω εφελκυστικής θραύσης των ινών περίπου στο μέσο του ανοίγματος, ενώ το δοκίμιο που είχε ενισχυθεί με IAM (M_fl) αστόχησε λόγω αποκόλλησης του οπλισμού στο ένα άκρο [8]. Οι καμπύλες φορτίου-βύθισης για όλες τις δοκούς δίνονται στο Σχήμα 2.3. Η συμπεριφορά σε όρους

παραμορφωσιμότητας του ενισχυμένου με IAM δοκιμίου ήταν καλύτερη από αυτή του ενισχυμένου με ΙΟΠ, ενώ παρατηρήθηκε και σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας της δοκού.



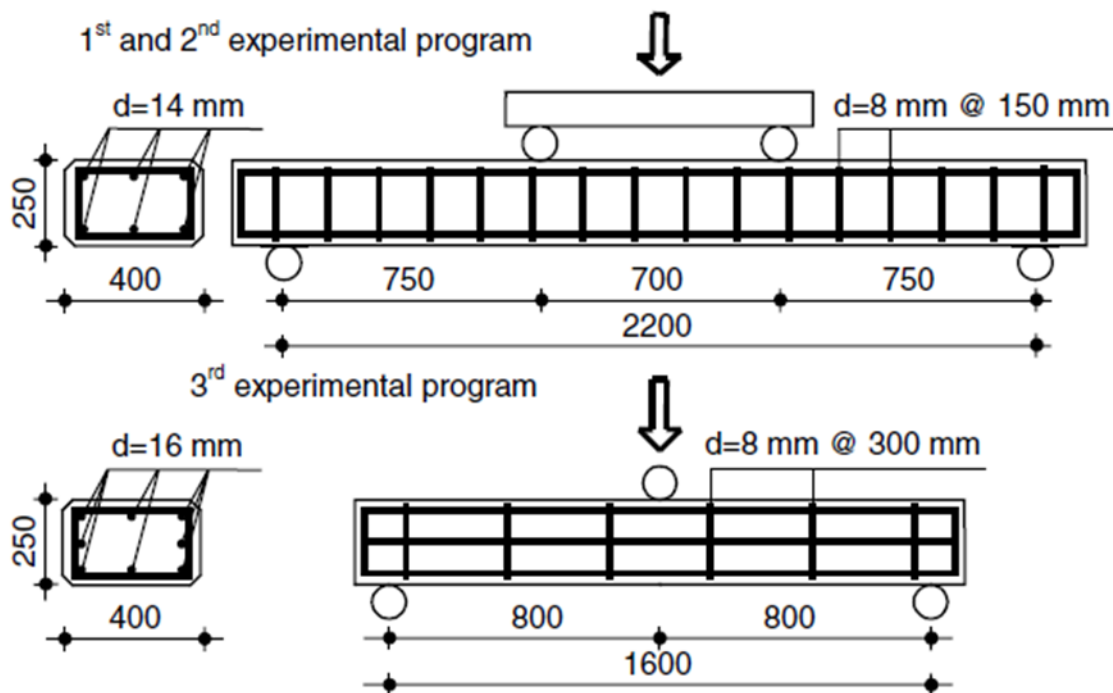
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης μεσαίου ανοίγματος [8]

Ένα ακόμα πειραματικό πρόγραμμα πραγματοποίησαν οι D'Ambrisi και Focacci [9]. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση IAM ινών άνθρακα αλλά και ινών πολυπαραφαινιλενβενζοβισοξαζόλης (PBO), τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 (α) Πλέγμα ινών άνθρακα, (β) πλέγμα ινών πολυπαραφαινιλενβενζοβισοξαζόλης (PBO) [9]

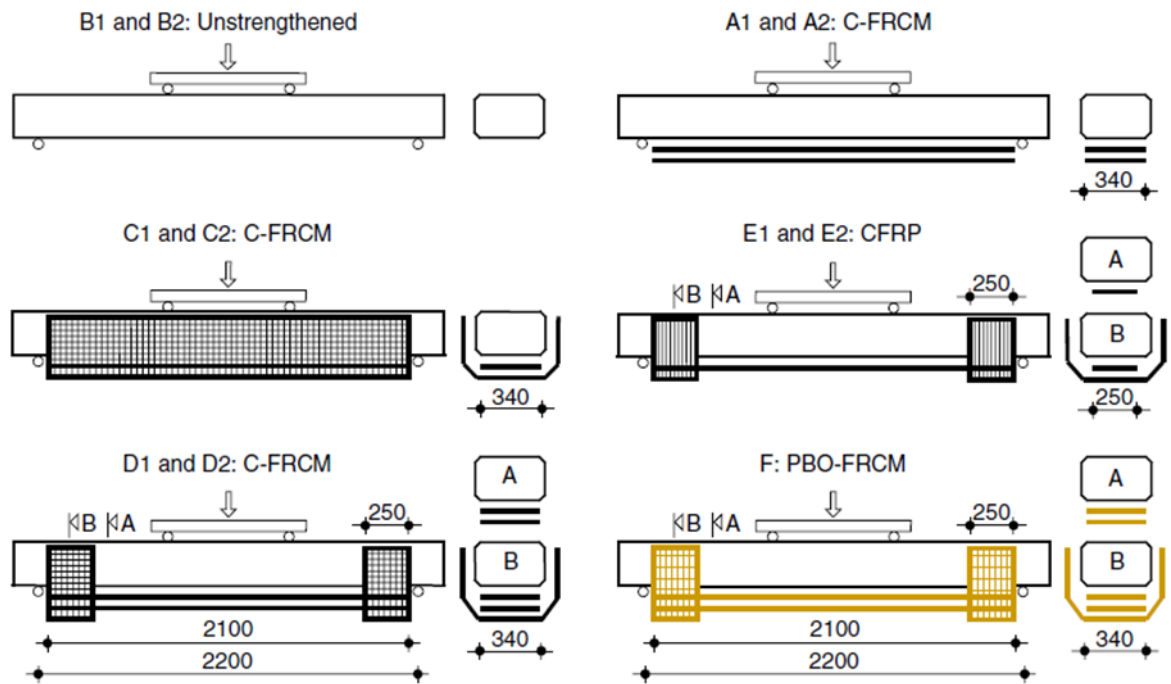
Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι δοκών, οι οποίες διαχωρίστηκαν σε μεγάλες και μικρές λόγω της γεωμετρίας τους (Σχήμα 2.5). Οι μεγάλες δοκιμάστηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων, ενώ οι μικρές σε κάμψη τριών σημείων.



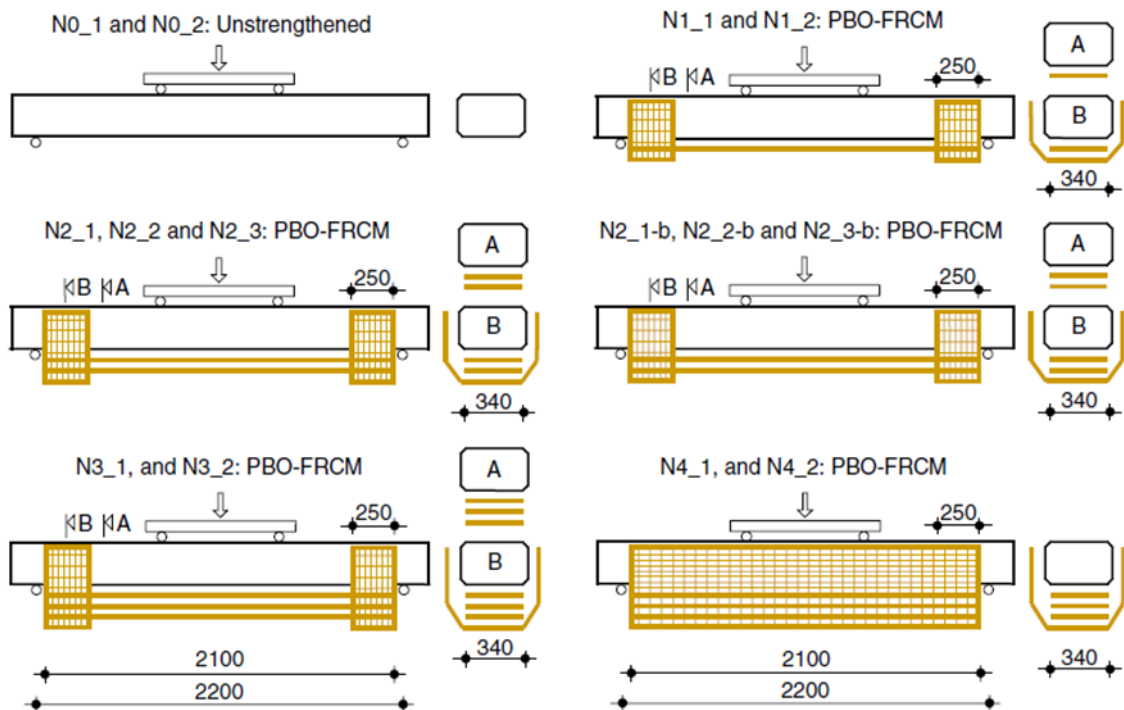
Σχήμα 2.5 Γεωμετρία και διάταξη ενίσχυσης μεγάλων και μικρών δοκών [9]

Κατά την πρώτη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν έντεκα μεγάλες δοκοί, εκ των οποίων οι δύο ήταν δοκοί αναφοράς χωρίς εξωτερική ενίσχυση (δοκίμια B1 και B2), δύο από αυτά τα δοκάρια ενισχύθηκαν με ένα στρώμα FRP από ίνες άνθρακα (δοκίμιο E), μία δοκός ενισχύθηκε με δύο στρώσεις από PBO-FRCM (δοκίμιο F) και τέλος οι υπόλοιπες έξι δοκοί ενισχύθηκαν με δύο στρώσεις C-FRCM εγκάρσιας ενίσχυσης σε σχήμα U κατά τρεις διαφορετικούς τρόπους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 (δοκίμια A1, A2, C1, C2, D1, και D2).

Για τη δεύτερη σειρά δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δεκατέσσερις μεγάλες δοκοί. Οι δύο ήταν δοκοί αναφοράς χωρίς εξωτερική ενίσχυση (δοκίμια N0_1 και N0_2) και οι υπόλοιπες δώδεκα ενισχύθηκαν με PBO-FRCM με διαφορετικό αριθμό στρωμάτων και διαφορετικούς τύπους ινών PBO όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 (δοκίμια N1, N2, N3 και N4).

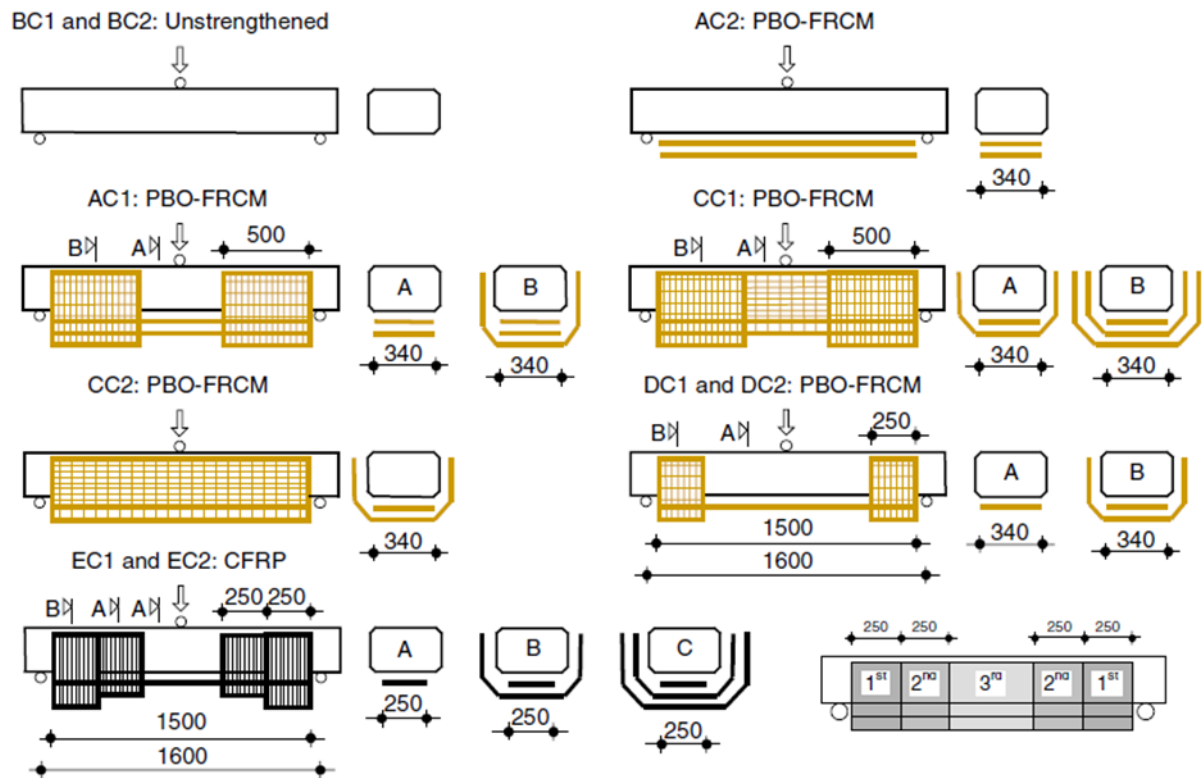


Σχήμα 2.6 Δείγματα του πρώτου πειραματικού προγράμματος σε μεγάλες δοκούς [9]



Σχήμα 2.7 Δείγματα του δεύτερου πειραματικού προγράμματος σε μεγάλες δοκούς [9]

Τέλος, κατά τη διάρκεια της τρίτης σειράς πειραματικών δοκιμών δοκιμάστηκαν δέκα μικρές δοκοί (Σχήμα 2.8). Οι δύο ήταν δοκοί αναφοράς, δύο ακόμα ενισχύθηκαν με ένα στρώμα FRP (δοκίμια EC1 και EC2), ενώ έξι από τα δέκα μικρά δοκάρια που ερευνήθηκαν ενισχύθηκαν με PBO-FRCM σε διαφορετικές ενισχυτικές διαμορφώσεις (δείγματα AC1, AC2, CC1, CC2, DC1 και DC2).



Σχήμα 2.8 Δείγματα του τρίτου πειραματικού προγράμματος σε μικρές δοκούς [9]

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα ήταν τα εξής:

- Η μορφή αστοχίας όλων των μη ενισχυμένων δοκιμίων και στα τρία πειραματικά προγράμματα, ήταν η σύνθλιψη σκυροδέματος στο σημείο εφαρμογής της δύναμης
- Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια αστόχησαν λόγω απώλειας της ενίσχυσης, εκτός από τη μικρή δοκό AC2 η οποία αστόχησε σε διάτμηση, καθώς και τις μικρές δοκούς EC1 και EC2 που αστόχησαν λόγω θραύσης των ινών της ενίσχυσης.
- Οι τρόποι αστοχίας ήταν τέσσερεις: (α) ξαφνική αποκόλληση της ενίσχυσης με ποσότητα σκυροδέματος πάνω στην αποκολλημένη επιφάνεια, (β) ολίσθηση των ινών

μέσα στη μήτρα, (γ) αποκόλληση της ενίσχυσης από την επιφάνεια σκυροδέματος αφήνοντας την λεία, (δ) θραύση ινών και αποκόλληση.

Ένα ακόμα πείραμα διεκπεραιώθηκε από τους Raouf et al., 2017 [10]. Το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα, περιλάμβανε συνολικά 13 δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες δοκιμάστηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η πρώτη δοκός δεν ενισχύθηκε και αποτελούσε δοκίμιο ελέγχου, οι 7 δοκοί ενισχύθηκαν με IAM ενώ οι υπόλοιπες 5 με χρήση ΙΟΠ. Το συνολικό μήκος όλων των δοκών ήταν 1675 mm, το πλάτος 101 mm, το ύψος 202 mm και το μήκος των πλεγμάτων ενίσχυσης ανερχόταν στα 1500 mm.

Παραμέτρους προς διερεύνηση αποτελούσαν το υλικό ενίσχυσης (IAM vs ΙΟΠ), ο αριθμός των στρώσεων ενίσχυσης, το υλικό των ινών (άνθρακας, βασάλτης, γυαλί), οι επικαλυμμένες και μη επικαλυμμένες ίνες και τέλος ο τρόπος ενίσχυσης. Σε κάποιες από τις ενισχυμένες δοκούς κατά την προετοιμασία τους, δημιουργήθηκαν αυλακώσεις για την καλύτερη συνάφεια κονιάματος-σκυροδέματος και σε κάποιες έγιναν αγκυρώσεις ενίσχυσης τύπου U στα άκρα.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πειραματικό πρόγραμμα ήταν τα εξής:

- Η αποτελεσματικότητα των δοκών που ήταν ενισχυμένα με IAM, επηρεάστηκε από τον αριθμό των στρώσεων ενίσχυσης. Καλύτερη απόδοση εμφανίστηκε όταν οι στρώσεις αυξήθηκαν από 1 σε 3.
- Οι επικαλυμμένες ίνες άνθρακα απέδωσαν πολύ καλύτερα από τις μη επικαλυμμένες, ενώ για τις ίνες υάλου συνέβη το αντίθετο. Τα αποτελέσματα αυτά σχετίζονταν και με τον αριθμό των στρώσεων και όσον αφορά στα IAM αλλά και στα ΙΟΠ.
- Και οι τρεις τύποι πλεγμάτων εμφάνισαν περίπου ίδιες τιμές αξονικής δυσκαμψίας.
- Παρατηρήθηκαν δύο τύποι αστοχίας στην ενίσχυση με ΙΟΠ: (α) θραύση ινών στο σημείο μέγιστης καμπτικής ροπής και (β) αποκόλληση της ενίσχυσης από την επιφάνεια σκυροδέματος.
- Αντίστοιχα για τις ενίσχυσης με IAM οι μορφές αστοχίας ήταν οι εξής: (α) ολίσθηση των ινών μέσα από το τσιμεντοκονίαμα, (β) θραύση της επιφάνειας σκυροδέματος στην διεπιφάνεια κονιάματος-πλέγματος, (γ) αποκόλληση της ενίσχυσης συμπαρασέρνοντας τμήματα της επικάλυψης σκυροδέματος, (δ) θραύση ινών στη ζώνη μέγιστης καμπτικής ροπής.

- Κάθε μορφή αστοχίας επηρεάστηκε από τον αριθμό των στρώσεων ενίσχυσης.

2.2.1 Μορφές αστοχίας δοκών οπλισμένου σκυροδέματος καμπτικά ενισχυμένων με IAM

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιθανοί τρόποι αστοχίας δοκών οπλισμένου σκυροδέματος που έχουν ενισχυθεί με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας είναι οκτώ και φαίνονται στο Σχήμα 2.9.

- α) Ολίσθηση του πλέγματος μέσα από τη μήτρα.

Αυτός ο τρόπος αστοχίας σχετίζεται κυρίως με τον μερικό εμποτισμό των ινών με κονίαμα και την πτωχή χημική διασύνδεσης ινών-μήτρας [11]. Συμβαίνει συνήθως στη θέση όπου η ροπή είναι μέγιστη και πολλές φορές συνδυάζεται με μερική θραύση ινών του πλέγματος.

- β) Αποκόλληση στη διεπιφάνεια κονιάματος-σκυροδέματος λόγω ενδιάμεσης καμπτικής ρωγμής.

Η συγκεκριμένη ψαθυρή μορφή αστοχίας είναι αποτέλεσμα της απώλειας συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και της μήτρας [11]. Η διάδοση της αποκόλλησης συμβαίνει από το μέσον της δοκού προς το τέλος της ενίσχυσης.

- γ) Αποκόλληση άκρου

Εξίσου ψαθυρή μορφή αστοχίας. Ξεκινάει από μια ενδιάμεση ρωγμή, η οποία δημιουργείται στο σημείο που παρατηρείται μέγιστη καμπτική ροπή και συνοδεύεται με απότομη πτώση φορτίου. Η συγκεκριμένη μορφή αποκόλλησης συνήθως ονομάζεται αποκόλληση άκρου και οφείλεται σε ανεπαρκές μήκος αγκύρωσης [11].

- δ) Διαστρωματική αποκόλληση.

Με τον όρο αυτό, εννοούμε την αποκόλληση δύο διαδοχικών στρώσεων στο εσωτερικό μίας πολύστρωτης κατασκευής. Η συγκεκριμένη αποκόλληση προκαλείται είτε από κακή κόλληση κατά την διαδικασία κατασκευής του συνθέτου, είτε κατά την χρήση του, κυρίως λόγω κρούσης ή κόπωσης.

ε) Αποκόλληση της ενίσχυσης με ποσότητα σκυροδέματος πάνω στην αποκολλημένη επιφάνεια.

Μέρος του σκυροδέματος παραμένει προσκολλημένο στην ενίσχυση λόγω της ισχυρής συνάφειας σκυροδέματος-κονιάματος. Η αποκόλληση ξεκινά από το μέσον και διαδίδεται στο τέλος της ενίσχυσης. Αυτή η μορφή αστοχίας έχει συνήθως υψηλότερο φορτίο αστοχίας σε σύγκριση με τις μορφές αστοχίας (β) και (γ) [11].

στ) Θραύση ινών, μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα.

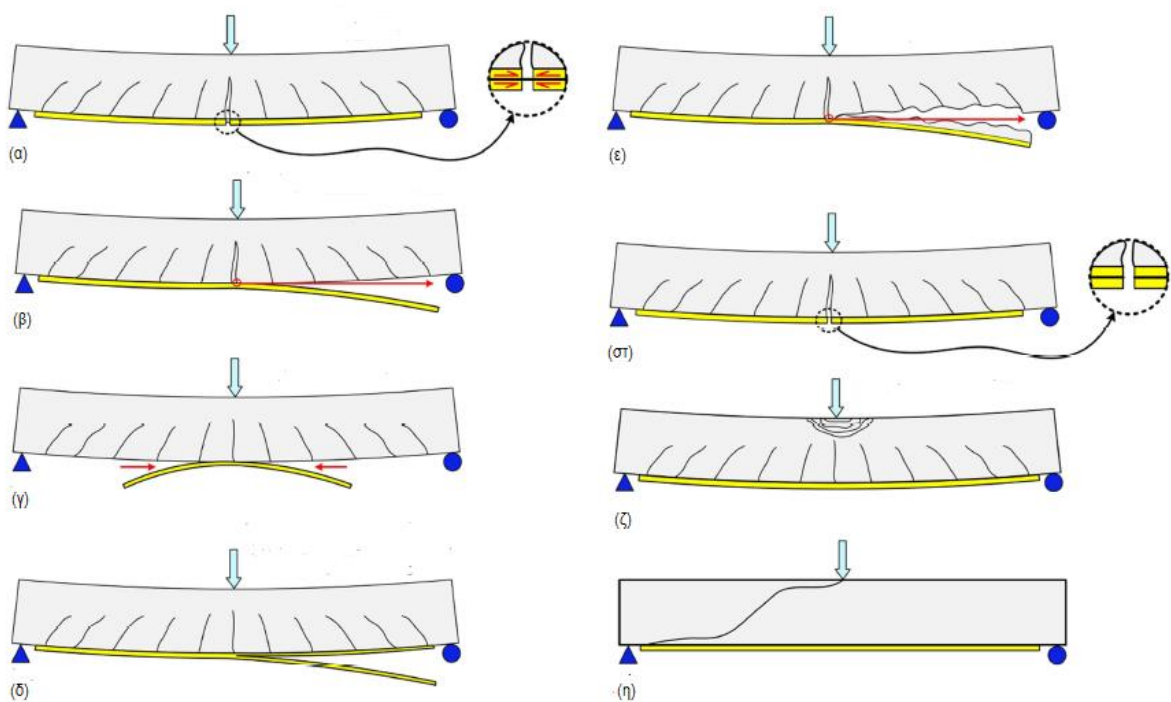
Είναι αποτέλεσμα της εξάντλησης της εφελκυστικής αντοχής των ινών. Η αστοχία επίσης παρατηρείται στο σημείο που η καμπτική ροπή είναι η μέγιστη και οδηγεί σε ξαφνική πτώση φορτίου [11].

ζ) Σύνθλιψη σκυροδέματος.

Έχει προηγηθεί διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα. Αποτελεί μια μη επιθυμητή μορφή αστοχίας.

η) Διατμητική αστοχία.

Συμβαίνει στις θέσεις μέγιστης διάτμησης, δηλαδή στα άκρα των στοιχείων και αποτελεί ψαθυρή μορφή αστοχίας.



Σχήμα 2.9 Μορφές αστοχίας δοκιμίων [11]

2.3 Γεωπολυμερή: Γενικά

Ο όρος «γεωπολυμερές» αναφέρεται για πρώτη φορά το 1979 από τον Γάλλο καθηγητή και επιστήμονα J. Davidovits, με σκοπό να περιγράψει μία κατηγορία αργιλοπυριτικών υλικών, τα οποία σχηματίζονται μέσω της αντίδρασης αργιλοπυριτικών πρώτων υλών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε γεωλογικής προέλευσης είτε παραπροϊόντα όπως η ιπτάμενη τέφρα, με ένα αλκαλικό διάλυμα [12]. Τα πολυμερή διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα οργανικά πολυμερή και τα ανόργανα πολυμερή. Τα γεωπολυμερή που θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία, ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία πολυμερών, στα ανόργανα πολυμερή.

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη ανάγκη για χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον έστρεψε το ενδιαφέρον του κατασκευαστικού τομέα σε νέες κατευθύνσεις. Σύμφωνα με μελέτες, τα γεωπολυμερή, λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους, της αντοχής τους σε χημικά οξέα, της πυραντοχής τους, καθώς και του κόστους τους, αποτελούν έναν πολύ σημαντικό ανταγωνιστή για τα κοινά συμβατικά δομικά υλικά.

2.4 Χρήση γεωπολυμερών στις κατασκευές και στην ενίσχυση δοκών σε κάμψη

Οι Papakonstantinou και Katakalos (2009) [13] πραγματοποίησαν έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά πέντε δοκών διαστάσεων 1220x100x150 mm, σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι δύο από αυτές ήταν δοκοί αναφοράς, ενώ οι υπόλοιπες τρεις ενισχύθηκαν εξωτερικά με ανόργανα πολυμερή και πλέγματα χάλυβα. Για την ενίσχυση της πρώτης δοκού (RB1), χρησιμοποιήθηκαν 90 χαλύβδινες ίνες, ενώ για τις δύο τελευταίες (RB2 και RB3) χρησιμοποιήθηκαν 35 χαλύβδινες ίνες. Η διαφορά μεταξύ των δοκών RB2 και RB3 ήταν το πάχος της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των χαλύβδινων συρμάτων [13].

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- Τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές για ενίσχυση με χαλύβδινες ίνες υψηλής αντοχής
- Ο χρόνος σκλήρυνσης της μήτρας παίζει εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του συστήματος
- Δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση μεταξύ της μήτρας και του σκυροδέματος

- Ο τρόπος αστοχίας βασίστηκε στην απόδοση της ενίσχυσης, ακολουθούμενη από ολίσθηση των χαλύβδινων ινών υψηλής αντοχής που χρησιμοποιήθηκαν
- Η καμπτική αντοχή δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, ενισχυμένων με ανόργανα πολυμερή, βελτιώνεται σημαντικά σε σύγκριση με μη ενισχυμένες δοκούς και δοκούς ενισχυμένες με οργανικά πολυμερή

2.5 Σύγκριση οργανικής και ανόργανης μήτρας

Η χρήση οργανικών σύνθετων υλικών, όπως είναι τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ ή FRP), είναι πολύ δημοφιλής στις δομικές κατασκευές χάρη στην υψηλή αντοχή τους σε διάβρωση, στην ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής τους και στην μεγάλη αντοχή τους αναλογικά με το βάρος του δομικού στοιχείου. Ωστόσο, οι οργανικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Συγκεντρωτικά, τα μειονεκτήματα αυτά είναι τα εξής [14]:

- Το υψηλό κόστος των ρητινών
- Η απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ρητινών σε θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (της τάξης των 70-80 °C)
- Η δυσκολία εφαρμογής τους σε υγρή επιφάνεια ή περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας (χρειάζονται ρητίνες ειδικού τύπου)
- Η δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών χωρίς καταστροφή της ενίσχυσης
- Η ασυμβατότητα ρητίνης και υποστρώματος
- Αποτελεί πιθανό κίνδυνο για τους εργαζομένους λόγω των αναθυμιάσεων

Αντίθετα, η εφαρμογή ενίσχυσης μέσω ανόργανων συνδετικών υλικών, για την άρση των μειονεκτημάτων που προκύπτουν από την χρήση οργανικών, προϋποθέτει την εφαρμογή πλεγμάτων σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις με βροχίδες. Η ανόργανη μήτρα μπορεί να αποτελείται από μικροσκυροδέματα ή κονιάματα με μέγιστο κόκκο αδρανών τα 2 mm. Έτσι, το συνθετικό υλικό καλύπτει τα κενά μεταξύ των κλώνων του πλέγματος (βροχίδες) με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφορά δυνάμεων μέσω μηχανικής εμπλοκής πλέγματος και

κονιάματος [15]. Οι υπόλοιπες απαιτήσεις που οφείλει να πληροί το ανόργανο μητρικό υλικό είναι οι εξής:

- Υψηλή εργασιμότητα
- Ανθεκτικότητα έναντι των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών
- Χαμηλό ρυθμό απώλειας της εργασιμότητας (η εφαρμογή κάθε στρώσης κονιάματος να είναι δυνατή ενώ η προηγούμενη στρώση βρίσκεται ακόμα σε νωπή κατάσταση)
- Επαρκής διατμητική αντοχή, για την αποτροπή μορφών αστοχίας που σχετίζονται με την πρόωρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία)
- Συμβατή χημική δομή με τη χημική δομή του πλέγματος των ινών [16].

Όλες οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τα οργανικά πολυμερή μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για τα ανόργανα.

Πρακτικά, μόνο η περίμετρος του κλώνου ινών βρίσκεται σε άμεση επαφή με τη ανόργανη μήτρα, συνεπώς, οι εσωτερικές ίνες (ίνες του πυρήνα) είναι ελεύθερες να ολισθαίνουν μεταξύ τους. Αντίθετα, οι περιφερειακές ίνες συγκρατούνται από την μήτρα, με αποτέλεσμα στο επίπεδο μιας ρωγμής του σύνθετου υλικού να αστοχούν πρώτα οι ίνες που είναι στη διεπιφάνεια επαφής κλώνου-μήτρας και στη συνέχεια σταδιακά οι εσωτερικές. Επιτυγχάνεται δηλαδή με τον τρόπο αυτό ανακατανομή της έντασης. Μια άλλη περίπτωση είναι ο προεμποτισμός των ινών με ρητίνη, έτσι ώστε όλες οι ίνες να συμπεριφέρονται ως ένα υλικό. Με τον τρόπο αυτό όμως δεν είναι δυνατή η ανακατανομή της έντασης, υπάρχει απότομη πτώση φορτίου, ενώ η αστοχία είναι ψαθυρού τύπου. Τελικά όμως προκύπτει πως η ενέργεια θραύσης και στις δύο περιπτώσεις είναι ίση [17].

Σύμφωνα με τη μελέτη που έκαναν και οι Kurtz και Balaguru [18], συγκρίνοντας οργανική και ανόργανη μήτρα σε δοκούς, παρατηρήθηκε ότι για τα ανόργανα συστήματα η καμπτική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων ινοπλεγμάτων. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η ανόργανη μήτρα εμφάνισε μεγαλύτερη δυσκαμψία από την οργανική. Όσον αφορά στις μορφές αστοχίας, οι δοκοί που ενισχύθηκαν με ανόργανη μήτρα αστόχησαν λόγω θραύσης των ινών, ενώ στις δοκούς με οργανική μήτρα τα πλέγματα αποκολλήθηκαν. Αυτή η διαφορά οφείλεται στον μηχανισμό μεταφοράς φορτίου μεταξύ μητρικού υλικού και σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

3.1 Γενικά

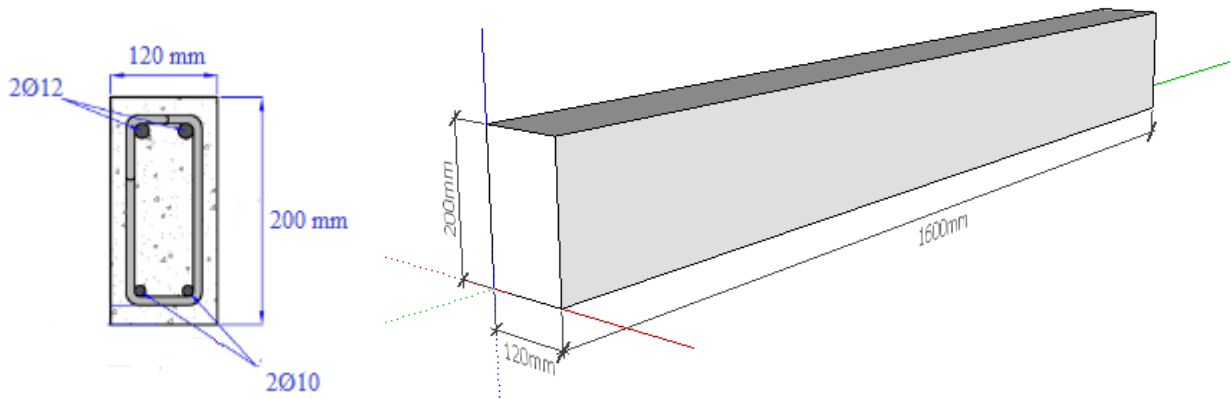
Το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του πανεπιστημίου Θεσσαλίας του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών, το διάστημα Ιούνιος 2020 – Σεπτέμβριος 2020. Το περιεχόμενο του πειραματικού προγράμματος αφορούσε στην κατασκευή εννέα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής και στην δοκιμή τους σε κάμψη. Οκτώ εξ αυτών ενισχύθηκαν καμπτικά με χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, ενώ η ένατη αποτελούσε δοκό αναφοράς. Οι διαστάσεις των δοκών ήταν θεωρητικά ίδιες. Στόχος του προγράμματος ήταν η παρατήρηση των ποικίλων μορφών αστοχίας που επηρεάζονται κάθε φορά από το κονίαμα που χρησιμοποιείται, τον τρόπο ενίσχυσης και προετοιμασίας κάθε δοκού, καθώς και τον αριθμό των στρώσεων των ινοπλεγμάτων που εφαρμόζονται.

3.2 Περιγραφή δοκιμών

Στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα δοκιμάστηκαν σε κάμψη οκτώ ενισχυμένα δοκίμια και μια δοκός χωρίς ενίσχυση (δοκίμιο αναφοράς). Η γεωμετρία της διατομής ήταν ορθογωνική και σταθερή σε όλο το μήκος τους, ενώ ο σχεδιασμός τους επηρεάστηκε από τις ακόλουθες παραμέτρους:

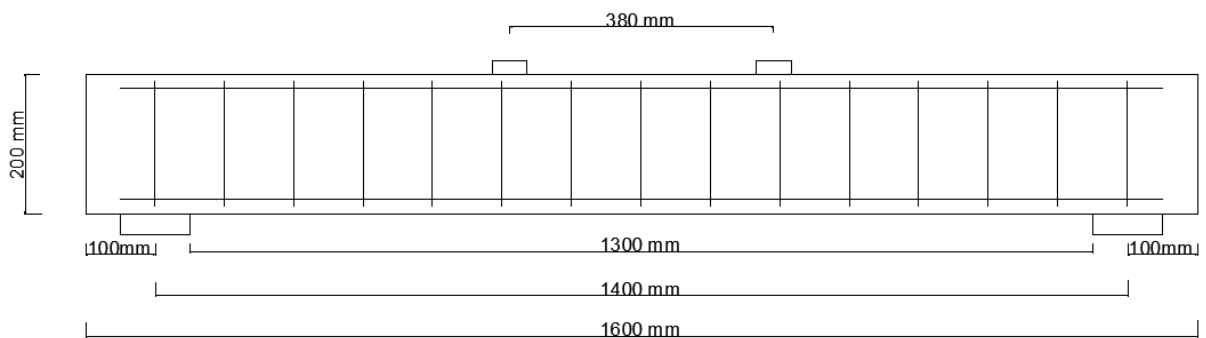
- Τον χώρο που διέθετε το άκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο του εργαστηρίου στο οποίο θα γίνονταν οι πειραματικές δοκιμές. Οι διαστάσεις του ήταν περίπου 2,5m x 2,5m.
- Το μήκος της κάθε δοκού ήταν αδύνατο να ξεπερνά τα 2,4m καθώς το υδραυλικό έμβολο, το οποίο βρισκόταν σε κατακόρυφη θέση σε σχέση με το επίπεδο που ορίζεται από το μεταλλικό πλαίσιο, απείχε περίπου 2m από το μέσο της μίας πλευράς και 0,5m από το μέσο της άλλης.
- Τη μάζα του δοκιμίου, η οποία θα έπρεπε να είναι σχετικά μικρή για τη διευκόλυνση των μεταφορών
- Την φορτοϊκανότητα του υδραυλικού εμβόλου

Σύμφωνα με τα παραπάνω και όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, τελικά το μήκος του κάθε δοκιμίου επιλέχθηκε να είναι 1600 mm, το πλάτος 120 mm και το ύψος 200 mm.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρία δοκού με διαστάσεις διατομής

Όσον αφορά στον χαλύβδινο οπλισμό του δοκιμίου, τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός 2Ø12 πάνω, 2Ø10 κάτω και εγκάρσιος οπλισμός Ø10/10 όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 σε πλάγια όψη. Η ποιότητα του χάλυβα ήταν B500C. Η επιλογή του οπλισμού έγινε με σκοπό την αποφυγή της διατμητικής αστοχίας και της θραύσης του σκυροδέματος, καθώς επίσης αποσκοπούσε και στην πλαστική συμπεριφορά της δοκού, δηλαδή την ικανότητα ανάπτυξης παραμορφώσεων, έτσι ώστε να αστοχήσει η ενίσχυση πριν τη θραύση του χαλύβδινου οπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση τοποθέτησης ράβδων μεγάλου εμβαδού ή και μεγάλου αριθμού, μειώνεται η πλαστιμότητα της δοκού, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρού βέλους κάμψης. Κατά αυτό τον τρόπο το σύστημα ενίσχυσης δεν προλαβαίνει να ενεργοποιηθεί.



Σχήμα 3.2 Πλάγια όψη δοκού με χαλύβδινο οπλισμό

3.2.1 Περιγραφή δοκιμών και ονοματολογία

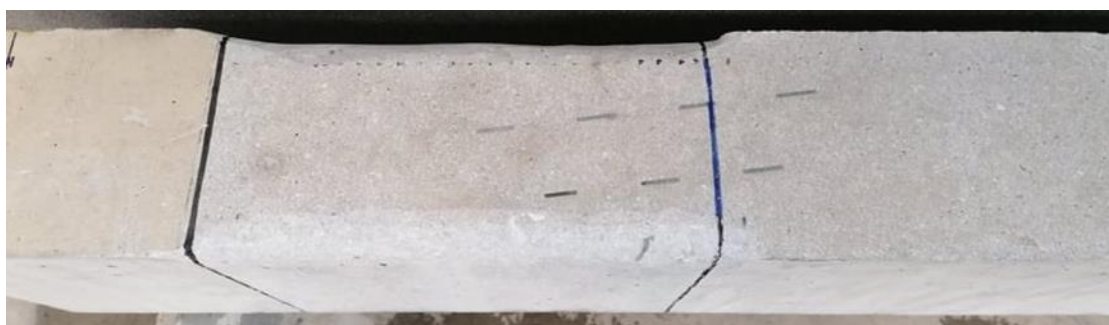
Όπως προαναφέρθηκε, τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρία. Ένα τσιμεντοκονίαμα με πρόσθετα πολυμερή (M1), ένα δεύτερο τσιμεντοκονίαμα χωρίς πρόσθετα πολυμερή (M2) και ένα κονίαμα γεωπολυμερούς (GP). Ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση σε επόμενη ενότητα. Μία πρόσθετη διαφοροποίηση μεταξύ των δοκιμών αφορούσε στον τρόπο ενίσχυσης, που τις διαχώρισε σε τρεις κατηγορίες όπως φαίνεται παρακάτω:

- Για τις δοκούς που ενισχύθηκαν με τσιμεντοκονίαμα M1 και M2, αλλά και για τις δύο πρώτες δοκούς που ενισχύθηκαν με κονίαμα GP, κατά την προετοιμασία του αφαιρέθηκε μόνο μια λεπτή στρώση σκυροδέματος και η τελική μορφή τους ήταν αυτή του Σχήματος 3.3 (Τύπος 1-Επιφάνεια με ελάχιστη προετοιμασία).



Σχήμα 3.3 Πρώτος τρόπος προετοιμασίας δοκών

- Για τη μια δοκό που ενισχύθηκε με κονίαμα GP (και έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου) ο τρόπος με τον οποίο προετοιμάστηκε, ήταν αυτός του Σχήματος 3.4, με σκοπό στις δύο παρειές της ενίσχυσης να μπουν πρόσθετα ινοπλέγματα σε μορφή U (Τύπος 2) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.4 Δεύτερος τρόπος προετοιμασίας δοκού



Σχήμα 3.5 Δεύτερος τρόπος ενίσχυσης δοκού

- Όσον αφορά στο τελευταίο δοκίμιο, στο οποίο έγινε χρήση κονιάματος GP, η προετοιμασία του είχε το αποτέλεσμα του Σχήματος 3.6, είχε δηλαδή αυλακώσεις. Η ενίσχυση έγινε πάνω σε αυτή την τραχεία επιφάνεια (Τύπος 3).



Σχήμα 3.6 Τρίτος τρόπος προετοιμασίας δοκού

Παρακάτω στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται πιο κοντινή όψη της παραπάνω δοκού.



Σχήμα 3.7 Κοντινή όψη τρίτης μορφής δοκού

Για καθεμιά από τους τρεις τύπους δοκιμίων δόθηκε η απαραίτητη ονοματολογία η οποία ακολουθούσε τη μορφή K_YA. Το K αντιστοιχούσε στον τύπο κονιάματος, το Y στο υλικό του ινοπλέγματος και το A στον αριθμό των στρώσεων των ινοπλεγμάτων. Το δοκίμιο αναφοράς ονομάστηκε CON, ενώ το EA συμβόλιζε την αγκύρωση στα άκρα της δοκού και ο συμβολισμός GR τις αυλακώσεις στη δοκό. Όλα βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Ονοματολογία δοκιμίων

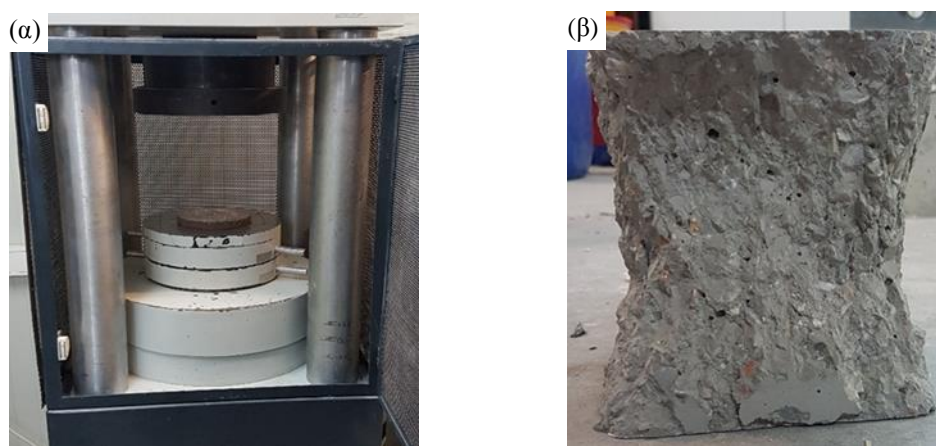
Ονομασία δοκιμίου	Τύπος κονιάματος	Τύπος δοκιμίου	Αριθμός στρώσεων ενίσχυσης
CON	-	Χωρίς ενίσχυση	-
M1_G3	M1	1	3
M1_G6	M1	1	6
M2_G3	M2	1	3
M2_G6	M2	1	6
GP_G3	GP	1	3
GP_G6	GP	1	6
GP_G6_EA	GP	2	6
GP_G6_GR	GP	3	6

3.3 Ιδιότητες υλικών

3.3.1 Σκυρόδεμα

Για την παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν δύο σκυροδετήσεις με χρήση έτοιμου σκυροδέματος από τοπικό παρασκευαστή. Η προδιαγεγραμμένη κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος ήταν C16/20, ο τύπος τσιμέντου ήταν CEM II/32.5 N και ο μέγιστος κόκκος αδρανών ήταν 16 mm.

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κύβους διαστάσεων 0,025m x 0,025m x 0,025m, 28 μέρες μετά την σκυροδέτηση. Παρακάτω, στο Σχήμα 3.8 ακολουθεί ανάλογο φωτογραφικό υλικό και στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα αποτελέσματα.



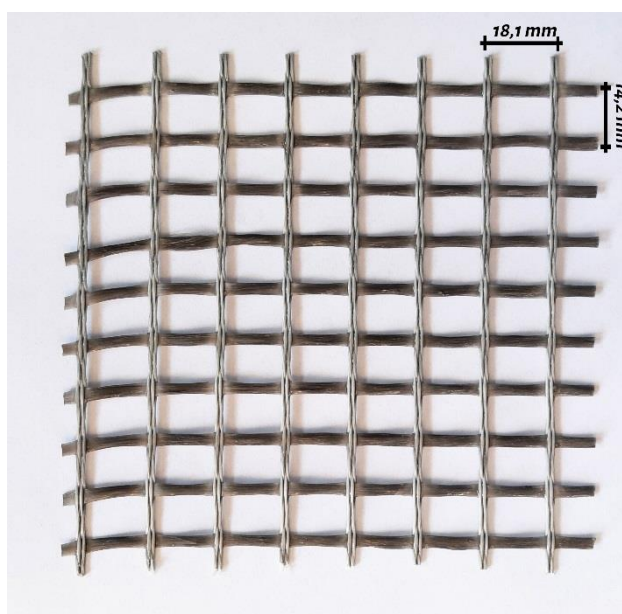
Σχήμα 3.8 (α) Υδραυλική πρέσα για τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, (β) τυπική μορφή αστοχίας κυβικού δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη

Πίνακας 3.2 Φορτίο και τάση αστοχίας κυβικών δοκιμίων

Δοκίμιο	Φορτίο αστοχίας F [kN]	Τάση αστοχίας σ [MPa]
1	750	33,33
2	795	35,33
3	760	33,78
Μέσος όρος	768	34,15
Τυπική απόκλιση	23,63	1,05

3.3.2 Πλέγματα ενίσχυσης

Για τη διαδικασία της ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε πλέγμα ινών υάλου με κλώνους δύο διευθύνσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Οι διαστάσεις κάθε βρόχου ήταν 18,1mm x 14,2mm ενώ οι περαιτέρω μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του συγκεκριμένου ινοπλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Η κύρια διεύθυνση του πλέγματος ήταν στη διεύθυνση x του Σχήματος 3.9.



Σχήμα 3.9 Πλέγμα υάλου που χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 3.3 Ιδιότητες ινών και ινοπλέγματος υάλου

Ιδιότητες Ινών		
Μέτρο Ελαστικότητας (Ef-g)	80	(GPa)
Εφελκυστική Αντοχή (ffu-g)	2600	(MPa)
Εφελκυστική παρ/ση θραύσης (efu-g)	0,018	
Πυκνότητα (Density-g)	2,6	(g/cm ³)
Ιδιότητες Ινοπλέγματος		
Επιφανειακό βάρος χωρίς επικάλυψη	280	m·(g/m ²)
Επιφανειακό βάρος με την επικάλυψη	360	m·(g/m ²)
Ποσοστό βάρους στην κύρια δ/νση	51,78	%
Ονομαστικό πάχος κύριας δ/νσης	0,056	mm
Διαστάσεις πλέγματος	18.1 x 14.2	mm x mm

3.3.3 Μήτρα ενίσχυσης

Στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα, όπως προαναφέρθηκε, δοκιμάστηκαν σε κάμψη οκτώ ενισχυμένες δοκοί. Οι τέσσερις από τις οκτώ ήταν ενισχυμένες με δύο τύπους τσιμεντοκονιάματος (δύο δοκοί με κονίαμα M1 και δύο δοκοί με κονίαμα M2), ενώ για τις υπόλοιπες τέσσερις χρησιμοποιήθηκε ένα μη-τσιμεντοειδές ποζολανικό κονίαμα, το αποκαλούμενο «γεωπολυμερές», το οποίο αποτελείται από σκόνη αργιλοπιριτίου με καταλύτη ένα αλκαλικό διάλυμα. Περισσότερες λεπτομέρειες ακολουθούν παρακάτω.

Τα κονιάματα M1 και M2 ήταν παρόμοια, με σημαντική διαφορά ότι το M1 περιείχε μεγάλες ίνες και πολυμερή ως πρόσθετα σε αντίθεση με το M2. Ήταν αποτελέσματα της ανάμιξης δύο συστατικών A και B τα οποία φαίνονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5 αντίστοιχα, όπως και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κάθε κονιάματος. Πιο συγκεκριμένα, το κονίαμα M1 ως συστατικό A είχε ένα ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονίαμα με ποζολανική δράση και ως συστατικό B ένα υδατοδιαλυτό πολυμερές (latex), ενώ το M2 ως συστατικό A είχε ένα ινοπλισμένο τσιμεντοειδές κονίαμα με ποζολανικά συστατικά και ως B είχε το νερό. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται τα συστατικά A των δύο κονιαμάτων.

Πίνακας 3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος M1

Τεχνικά Χαρακτηριστικά κονιάματος M1	
Συστατικό A	Υλικό με πυκτικές ιδιότητες
Συστατικό B	Latex
Μέγιστο μέγεθος αδρανούς	0,4 mm
Χρόνος ζώης στο δοχείο	1 ώρα στους 20 °C
Πάχος εφαρμογής ανα στρώση	2-3 mm

Πίνακας 3.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά κονιάματος M2

Τεχνικά Χαρακτηριστικά κονιάματος M1	
Συστατικό A	Υλικό με πυκτικές ιδιότητες
Συστατικό B	Νερό
Μέγιστο μέγεθος κόκκου	1,3 mm
Ελάχιστο πάχος στρώσης	5 mm
Μέγιστο πάχος στρώσης	15 mm
Χρόνος εργασιμότητας	30 λεπτά στους 20 °C
Ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος	5 °C
Μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος	35 °C



Σχήμα 3.10 (α) Συστατικό Α κονιάματος M1, (β) Συστατικό Α κονιάματος M2

Το τρίτο κονίαμα (GP) αποτελούταν από σκόνη αργιλοπιριτίου, αδρανή $< 0,5\text{mm}$ (παιπάλη), αδρανή $0,5\text{mm}-1\text{mm}$ και ένα αλκαλικό διάλυμα φιλικό προς το περιβάλλον (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11 (α) Σκόνη αργιλοπιριτίου, (β) Αδρανή $< 0,5\text{mm}$, (γ) Αδρανή $0,5\text{mm}-1\text{mm}$

Η σωστή αναλογία και για τα τρία κονιάματα προέκυψε μετά από δοκιμές στο εργαστήριο. Το κάθε κονίαμα εφαρμοζόταν σε μια επιφάνεια σκυροδέματος σε συνδυασμό με ένα τεμάχιο ινοπλέγματος για τον πρώτο ποιοτικό έλεγχο της ευκολίας εφαρμογής του, του χρόνου πήξεως αλλά και της εμφάνισης ρηγματώσεων (Σχήμα 3.12). Επιπλέον, ποσότητα των κονιαμάτων τοποθετούταν και σε μεταλλικές μήτρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13, για τη δημιουργία δοκιμίων τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 3.12 Εφαρμογή κονιάματος σε επιφάνεια σκυροδέματος με ινόπλεγμα

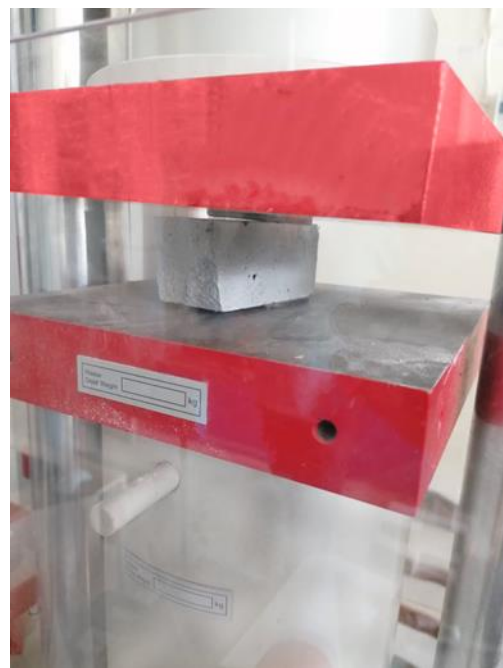


Σχήμα 3.13 Εφαρμογή κονιάματος σε μήτρα

Στα πρισματικά δοκίμια που λήφθηκαν από τις μεταλλικές μήτρες έγινε αρχικά δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος (Σχήμα 3.14). Η αστοχία ήταν ψαθυρή. Στη συνέχεια, στα δύο κομμάτια που προέκυψαν (κύβοι) έγινε δοκιμή σε θλίψη (Σχήμα 3.15) για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος. Όλα τα παραπάνω αποσκοπούσαν στην επιλογή σωστής αναλογίας υλικών για το κάθε κονίαμα.



Σχήμα 3.14 Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων



Σχήμα 3.15 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Πραγματοποιήθηκαν αρκετές προσπάθειες οι οποίες είτε λόγω εργασιμότητας, είτε λόγω ρηγματώσεων, είτε λόγω χρόνου πήξεως απορρίφθηκαν. Οι τελικές αναλογίες για τα τρία κονιάματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Στους Πίνακες 3.7, 3.8 και 3.9, φαίνονται αναλυτικά τα φορτία αστοχίας κάθε δοκιμίου κονιάματος, καθώς και οι εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές τους σε MPa, οι οποίες υπολογίστηκαν από τη Σχέση 3.1. Η ταχύτητα φόρτισης για τη δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων ήταν 0,05 kN/sec, ενώ για τη σύνθλιψη των δειγμάτων η ταχύτητα ανερχόταν στα 0,1 kN/sec.

$$\sigma = 1,5 \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

Όπου

F : Το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται στο δείγμα, σε Newton

L : Η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης, σε χιλιοστά (στη συγκεκριμένη περίπτωση ήτα 100mm)

b : Το πλάτος του δείγματος, σε χιλιοστά

d : Το ύψος του δείγματος, σε χιλιοστά

Πίνακας 3.6 Τελικές αναλογίες συστατικών των κονιαμάτων

Αναλογίες κονιάματος M1	
Υλικό με πυκτικές ιδιότητες	1 kg
Latex	250 gr
Αναλογίες κονιάματος M2	
Υλικό με πυκτικές ιδιότητες	1 kg
Νερό	240 gr
Αναλογίες κονιάματος GP	
Σκόνη αργιλοπιριτίου	1 kg
Αδρανή < 0,5 mm	4 kg
Αδρανή 0,5-1 mm	1,5 kg
Αλκαλικό διάλυμα	2 kg

Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος M1

Δοκίμια κονιάματος M1					
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά				Δοκιμή σε Κάμψη	
Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)
1	160	40	40	3,2	7,5
2	160	40	40	3,1	7,3
3	160	40	40	2,9	6,8
4	160	40	40	3,2	7,5
5	160	40	40	3	7
Μέσος όρος					7,2
Τυπική απόκλιση					0,3
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά				Δοκιμή σε Θλίψη	
Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Θλιπτική αντοχή (Mpa)
1	40	40	40	24,7	15,4
2	40	40	40	42	26,3
3	40	40	40	32	20
4	40	40	40	38,9	24,3
5	40	40	40	42,7	26,7
6	40	40	40	38,9	24,3
Μέσος όρος					22,8
Τυπική απόκλιση					4,3

Πίνακας 3.8 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος M2

Δοκίμια κονιάματος M2					
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά				Δοκιμή σε Κάμψη	
Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)
1	160	40	40	2,5	5,9
2	160	40	40	2,2	5,2
3	160	40	40	2,4	5,6
4	160	40	40	2,3	5,4
5	160	40	40	1,8	4,2
6	160	40	40	2,2	5,2
Μέσος όρος					5,2
Τυπική απόκλιση					0,6
Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά				Δοκιμή σε Θλίψη	
Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Θλιπτική αντοχή (Mpa)
1	40	40	40	21,5	13,4
2	40	40	40	23,4	14,6
3	40	40	40	24,1	15,1
4	40	40	40	33,7	21,1
5	40	40	40	32,7	20,4
6	40	40	40	30	18,8
Μέσος όρος					17,2
Τυπική απόκλιση					3,3

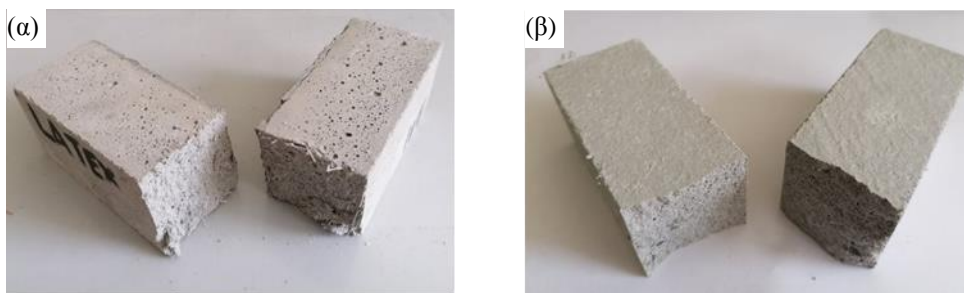
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος GP

Δοκίμια κονιάματος GP					
Δοκίμιο	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά			Δοκιμή σε Κάμψη	
	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Εφελκυστική αντοχή (Μpa)
1	160	40	40	2,6	6,1
2	160	40	40	2,7	6,3
3	160	40	40	2,7	6,3
4	160	40	40	2,8	6,6
5	160	40	40	2,8	6,6
6	160	40	40	2,7	6,3
Μέσος όρος					6,4
Τυπική απόκλιση					0,2
Δοκίμιο	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά			Δοκιμή σε Θλίψη	
	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Θλιπτική αντοχή (Μpa)
1	40	40	40	59,3	37,1
2	40	40	40	60,1	37,6
3	40	40	40	58	36,3
Μέσος όρος					37
Τυπική απόκλιση					0,7

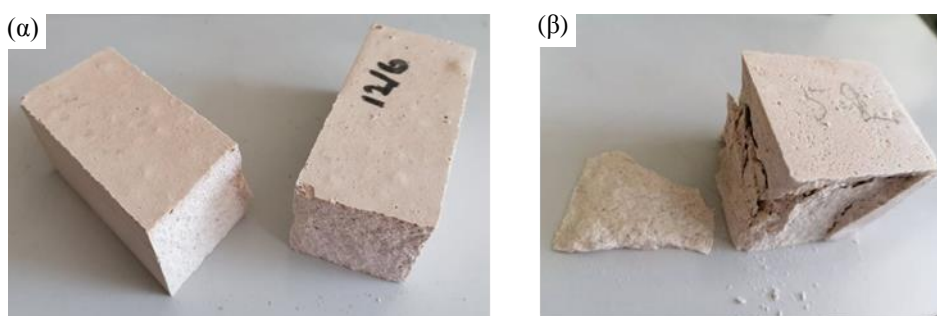
Η μηχανή στην οποία έγιναν οι δοκιμές φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.16, ενώ στα Σχήματα 3.17 και 3.18 φαίνονται κάποια από τα δοκίμια μετά τη θραύση τους.



Σχήμα 3.16 Μηχανή για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων και σύνθλιψης των κονιαμάτων



Σχήμα 3.17 Μορφή αστοχίας σε κάμψη τριών σημείων δείγματος κονιάματος (α) M1 (β) M2



Σχήμα 3.18 Μορφή αστοχίας δείγματος κονιάματος GP σε (α) κάμψη τριών σημείων (β) σύνθλιψη

3.4 Διαδικασία σκυροδέτησης δοκιμίων

3.4.1 Ξυλοτύποι σκυροδέματος: Σχεδιασμός-έλεγχος

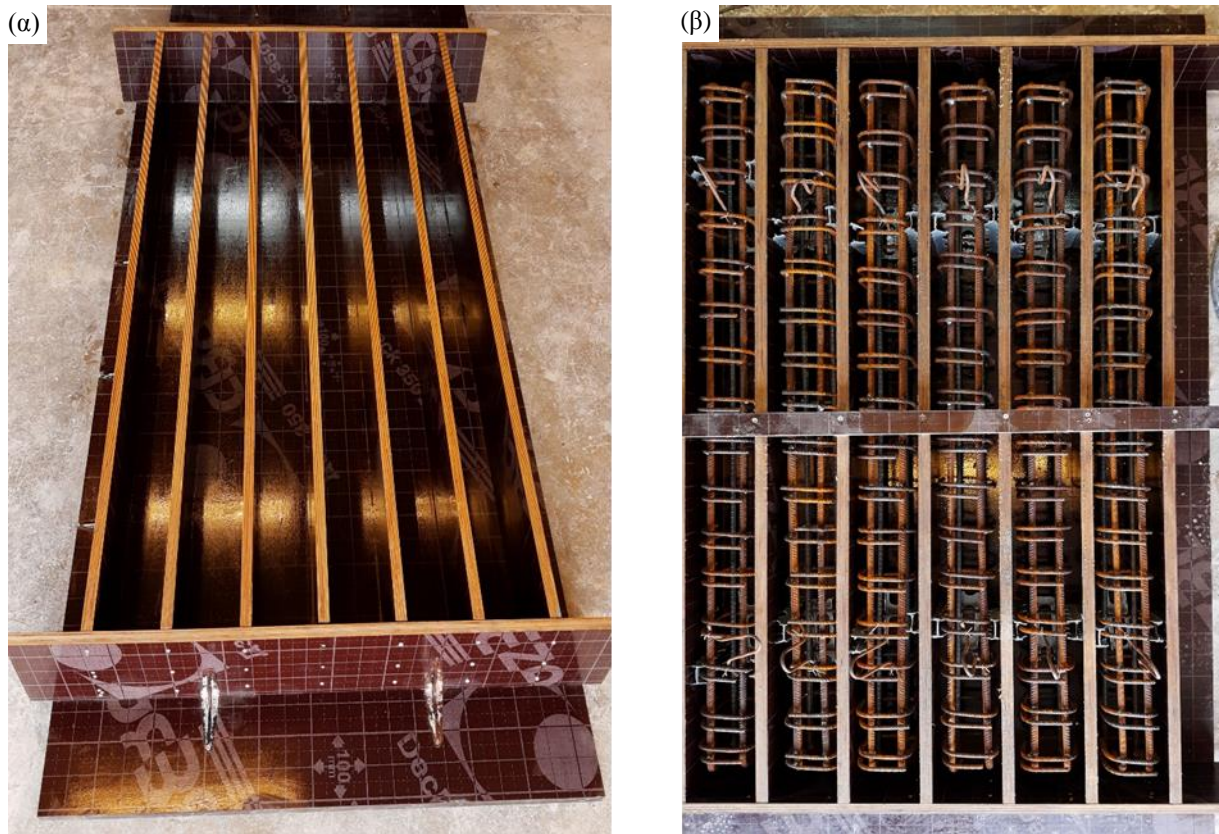
Σε αυτή την υποενότητα αναλύονται τα στάδια κατασκευής των εννέα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Ξεκινώντας τη διαδικασία αυτή, το πρώτο βήμα ήταν η κατασκευή των κατάλληλων ξυλοτύπων (καλουπιών).

Τα βασικά στοιχεία της προετοιμασίας των ξυλοτύπων που ακολουθήθηκαν, πριν την τοποθέτηση του προς διάστρωση σκυροδέματος ήταν τα ακόλουθα:

- Τα καλούπια ήταν κατασκευασμένα έτσι ώστε στους αρμούς να μην επιτρέπεται η διαρροή του σκυροδέματος
- Ήταν άκαμπτα με αποτέλεσμα να μην παραμορφώνονται υπό την πίεση του νεπού σκυροδέματος αλλά και από τη δόνησή του
- Οι επιφάνειες ήταν λείες και καθαρίστηκαν σχολαστικά πριν την τοποθέτηση των οπλισμών

- Χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί αποστάτες για να διατηρούν τον οπλισμό στην επιθυμητή απόσταση από τον ξυλότυπο αλλά και για να εξασφαλίζουν το επιβαλλόμενο και καθοριζόμενο από τη μελέτη πάχος επικάλυψης των οπλισμών που είναι 2-3cm
- Τοποθετήθηκαν ράβδοι μορφής U κοντά στα δύο άκρα των δοκών, προκειμένου να βοηθήσουν στην ανάρτηση των δοκιμίων

Ακολουθεί το Σχήμα 3.19 στο οποίο φαίνονται τα καλούπια, οι οπλισμοί, οι αποστάτες και οι γάντζοι ανάρτησης των δοκιμίων.



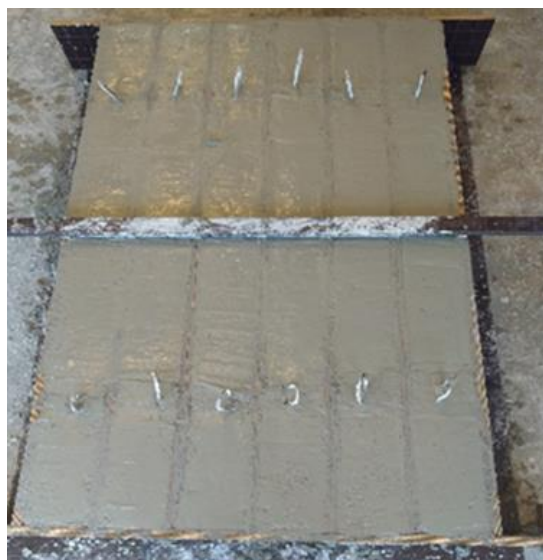
Σχήμα 3.17 (α) Καλούπια χωρίς οπλισμό (β) καλούπια με χαλύβδινο οπλισμό, αποστάτες, γάντζους

3.4.2 Σκυροδέτηση δοκιμίων

Για την σκυροδέτηση χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα από μια τοπική βιομηχανία. Ο τύπος τσιμέντου ήταν CEM II/32.5, ο μέγιστος κόκκος αδρανών ήταν 16mm, και η κατηγορία αντοχής C16/20. Η σκυροδέτηση πραγματοποιήθηκε στο χώρο του εργαστηρίου όπου οι συνθήκες ήταν κατάλληλες για σκυροδέτηση (Σχήμα 3.20, 3.21).

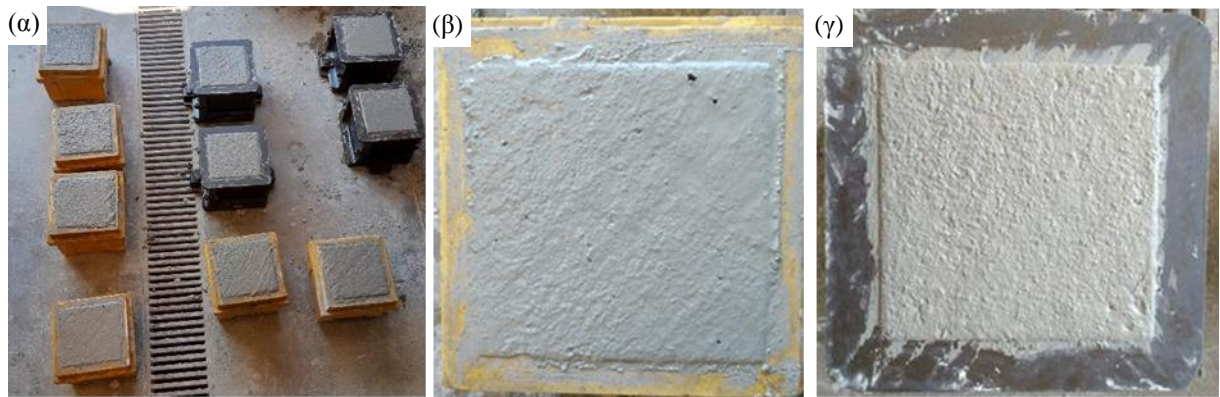


Σχήμα 3.18 (α) Έκχυση σκυροδέματος σε καρότσι (β) εκφόρτωση σκυροδέματος στα καλούπια και διάστρωση



Σχήμα 3.19 Τελική μορφή σκυροδέματος στα καλούπια μετά την επιπέδωση των ελεύθερων επιφανειών

Όπως προαναφέρθηκε, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κύβους διαστάσεων 0,025m x 0,025m x 0,025m. Για τη σκυροδέτηση των κύβων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές και πλαστικές κυβικές μήτρες (Σχήμα 3.22).



Σχήμα 3.20 (α) Μεταλλικές και πλαστικές κυβικές μήτρες (β) πλαστική κυβική μήτρα (γ) μεταλλική κυβική μήτρα

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης (Σχήμα 3.23) και δοκιμές περιεκτικότητας σε αέρα (Σχήμα 3.24) και προέκυψε κάθιση ίση με 12mm. Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται οι κατηγορίες του σκυροδέματος με βάση την κάθιση, σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ. '97).

Πίνακας 3.10 Κατηγορίες σκυροδέματος με βάση την κάθιση

Κατηγορία	Κάθιση (mm)
S1	10-40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	≥ 220

Σύμφωνα με την μέτρηση αλλά και με τον Πίνακα 3.10, το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ανήκε στην κατηγορία S1.



Σχήμα 3.21 Διαδικασία δοκιμής καθίζησης



Σχήμα 3.22 Διαδικασία δοκιμής περιεκτικότητας σε αέρα

Μετά το πέρας της διαδικασίας της σκυροδέτησης των δοκών, ακολούθησε η συντήρηση του σκυροδέματος. Η διαδικασία αυτή είναι υποχρεωτική και περιλάμβανε για τις επτά πρώτες ημέρες συνεχή διαβροχή των επιφανειών έτσι ώστε να είναι υγρές. Μετά την πρώτη εβδομάδα, τα καλούπια αφαιρέθηκαν και απλώθηκαν στις ελεύθερες επιφάνειες του σκυροδέματος λινάτσες, δηλαδή υφάσματα με υψηλή υδατοαπορροφητικότητα. Οι λινάτσες διατηρούσαν τις επιφάνειες του σκυροδέματος υγρές καθ' όλο το 24ωρο και για τις επόμενες εβδομάδες η συντήρηση γινόταν με διαβροχή των συγκεκριμένων υφασμάτων. Συνολικά η συντήρηση διήρκεσε 28 ημέρες.

Αντίστοιχα, τα κυβικά δοκίμια συντηρήθηκαν με διαβροχή της ελεύθερης επιφάνειας τους για 28 ημέρες. Τα δοκίμια αυτά παρέμειναν τις πρώτες μέρες στις μήτρες (3 ημέρες) έτσι ώστε να είναι προστατευμένα από κρούσεις, δονήσεις και ξήρανση. Μετά την αφαίρεση των μητρών τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ και διαβρέχονταν καθημερινά.

3.5 Διαδικασία ενίσχυσης δοκών

3.5.1 Προετοιμασία δοκών και ινοπλεγμάτων ενίσχυσης

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της ενίσχυσης έπρεπε να πραγματοποιηθεί μια σειρά προεργασιών. Αρχικά, τα ινοπλέγματα υάλου κόπηκαν σε λωρίδες κατάλληλων διαστάσεων αφού είχαν παραληφθεί σε ρολό. Οι διαστάσεις ήταν 1,25m μήκος και 0,12m πλάτος και συνολικά κόπηκαν 39 λωρίδες πλέγματος υάλου. Η κάθε λωρίδα πλέγματος αποτελούταν από 6 βρόχους κατά την έννοια του πλάτους.

Όσον αφορά στις δοκούς, η προετοιμασία τους αναγράφεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Πρώτο βήμα ήταν η προετοιμασία των επιφανειών που θα εφαρμοζόταν η ενίσχυση. Με τη χρήση τροχού απομακρύνθηκε μια λεπτή στρώση σκυροδέματος, της τάξης των 2 mm, που αποτελούνταν κυρίως από τσιμεντόπαστα σχετικά χαμηλής αντοχής, έως ότου αποκαλυφθούν τα αδρανή. Η στρώση αυτή είχε χαμηλή εφελκυστική αντοχή, επομένως δεν συμβάλλει στη ροπή αντοχής της δοκού. Το τρόχισμα δεν συμπεριελάμβανε όλο το μήκος της δοκού, αλλά ορίστηκε στα 1,25m, όσο δηλαδή και το μήκος των λωρίδων ενίσχυσης. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας επιτεύχθηκε και η βελτίωση της συνάφειας του σκυροδέματος με το κονίαμα. Σχετικές εικόνες ακολουθούν στο Σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.23 Διαδικασία προετοιμασίας των επιφανειών δοκού

Η συγκεκριμένη προετοιμασία έγινε για όλες τις δοκούς με κονίαμα M1 και M2 καθώς και για 2 δοκούς με κονίαμα GP εκ των οποίων η μία ενισχύθηκε με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και η δεύτερη με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου. Για τις υπόλοιπες δύο δοκούς με κονίαμα GP (και έξι στρώσεις ινοπλέγματος) η προετοιμασία διέφερε όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη υποενότητα.

2. Ακολούθησε το σημάδεμα των δοκών. Πάνω σε κάθε δοκό σχεδιάστηκαν οι απαραίτητες γραμμές έτσι ώστε να είναι ξεκάθαρες οι αποστάσεις που θα καταλαμβάνουν οι ενισχύσεις αλλά και οι στηρίξεις κατά τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 3.26).



Σχήμα 3.24 Σημαδεμένη δοκός

3.5.2 Ενίσχυση δοκών με ινοπλέγματα υάλου

Αφού τα δοκίμια ήταν έτοιμα για ενίσχυση, γινόταν η παρασκευή ποσότητας κονιάματος, αναμιγνύοντας κάθε φορά τα απαραίτητα υλικά. Η ζύγιση των συστατικών γινόταν με ζυγαριά ακριβείας, ενώ η ανάμιξή τους επιτεύχθηκε με χρήση αναδευτήρα προσαρμοσμένου σε ηλεκτρικό δρόπανο (Σχήμα 3.27).



Σχήμα 3.25 Παρασκευή κονιάματος GP

Έπειτα, γινόταν προ-διαβροχή της επιφάνειας της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.28 και στη συνέχεια ποσότητα κονιάματος απλωνόταν στην επιφάνεια ενίσχυσης.



Σχήμα 3.26 Επιφάνεια δοκού πριν τη διαβροχή (πάνω) και επιφάνεια δοκού μετά τη διαβροχή (κάτω)

Ακολουθούσε η τοποθέτηση της πρώτης στρώσης ινοπλέγματος με ελαφρά πίεση με το χέρι έτσι ώστε το κονίαμα να εισχωρήσει στους βρόχους του ινοπλέγματος (Σχήμα 3.29). Κατά τον ίδιο τρόπο γινόταν προσθήκη κονιάματος πάνω από το πλέγμα και τοποθετούνταν οι υπόλοιπες στρώσεις ινοπλέγματος. Οι στρώσεις ήταν 3 ή 6 κάθε φορά. Τελικό στάδιο αποτελούσε η επιπέδωση της ενισχυμένης επιφάνειας (Σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.27 Διαδικασία ενίσχυσης

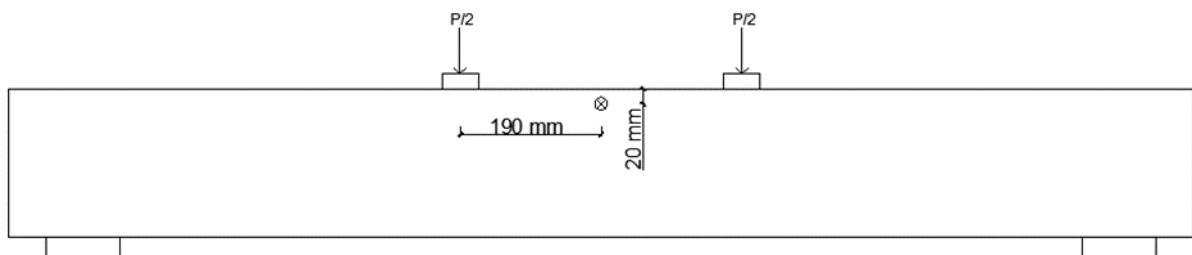


Σχήμα 3.28 Τελική μορφή ενισχυμένης δοκού

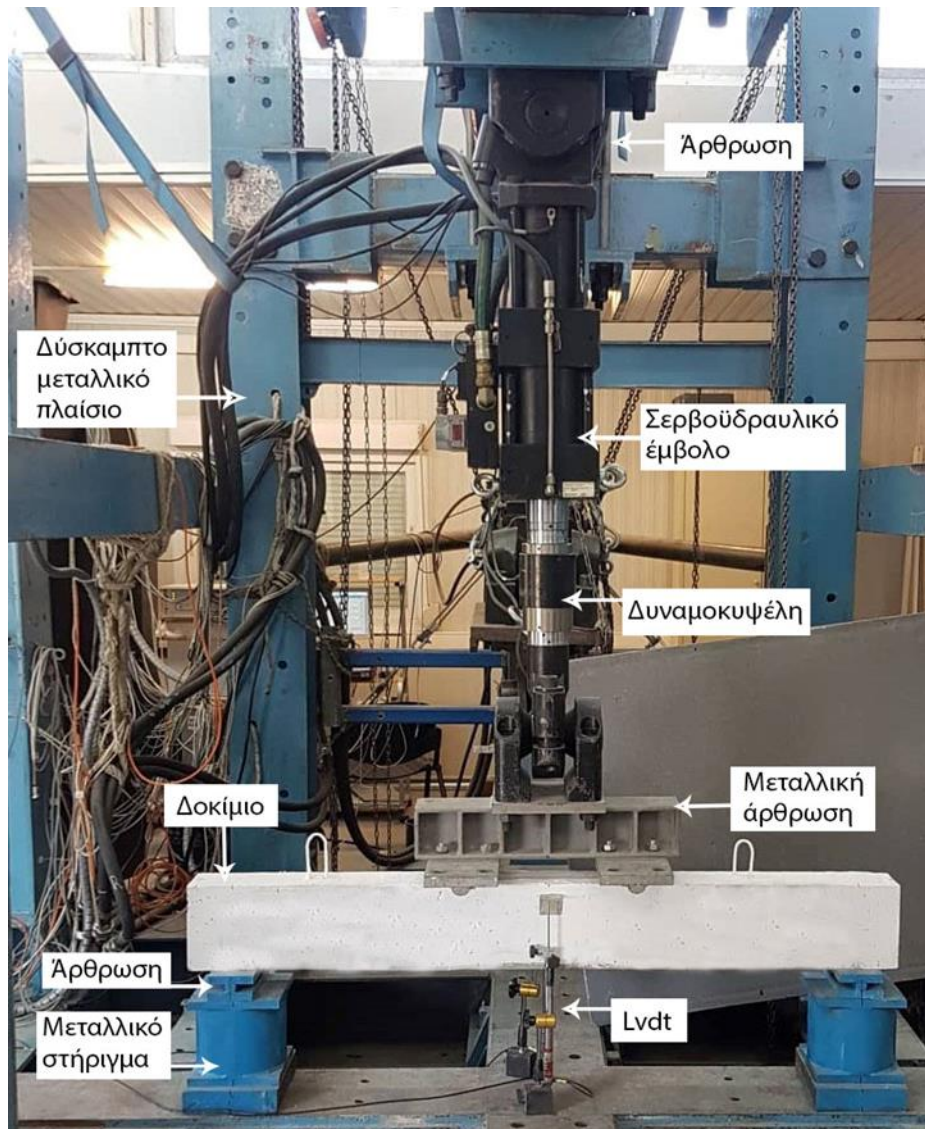
Η διαδικασία ενίσχυσης ήταν ίδια για τις δοκούς Τύπου 1 και Τύπου 3, ενώ για τα δοκίμια Τύπου 2, μετά από το στάδιο ενίσχυσης που προαναφέρθηκε, ακολουθούσε κατά τον ίδιο τρόπο επιπλέον ενίσχυση τριών ινοπλεγμάτων υάλου σε μορφή U στις παρειές της δοκού που είχαν προετοιμαστεί κατάλληλα.

3.6 Πειραματική διάταξη και πρωτόκολλο δοκιμής

Η πειραματική διάταξη των δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.31. Η καταγραφή της δύναμης που ασκούνταν από το έμβολο σε κάθε δοκίμιο, έγινε μέσω μιας ενσωματωμένης κατάλληλα βαθμονομημένης δυναμοκυψέλης. Όσον αφορά στις μετακινήσεις, ή αλλιώς βυθίσεις, τοποθετήθηκε ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας μεταβλητής αντίστασης (LVDT) στο μέσον κάθε πλευράς του καμπτικού ανοίγματος του δοκιμίου. Η ακριβής τοποθεσία των LVDT's φαίνεται στο Σχήμα 3.32. Ο ρυθμός επιβολής της φόρτισης ήταν 0,02 χιλιοστά ανά δευτερόλεπτο και όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων αποθηκεύονταν αυτόματα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων.



Σχήμα 3.29 Θέση τοποθέτησης των αισθητήρων μεταβλητής αντίστασης

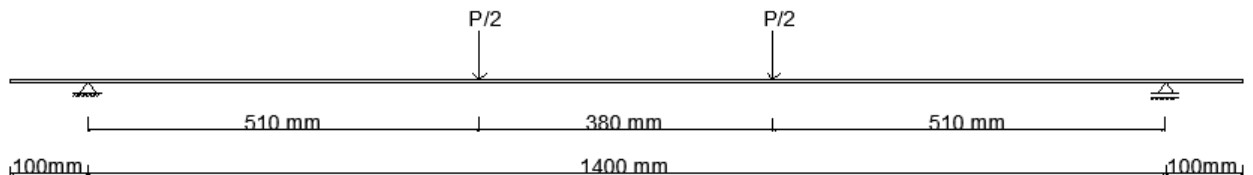


Σχήμα 3.30 Πειραματική διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων και εξωτερικά μετρητικά όργανα

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της ενίσχυσης, οι δοκοί βάφτηκαν με λευκό χρώμα έτσι ώστε οι ρηγματώσεις που θα δημιουργούνταν να είναι ευδιάκριτες. Έπειτα τοποθετήθηκαν στο μέσον κάθε δοκού και από τις δύο πλευρές, μεταλλικές γωνιές στις οποίες θα εφαρμόζονταν οι αισθητήρες μεταβλητής αντίστασης. Απέιχαν 20mm από την άνω παρειά κάθε δοκού και 190mm απόσταση από τα σημεία που θα ασκούνταν τα συγκεντρωμένα φορτία.

3.7 Στατικό σύστημα κατανομής έντασης

Το στατικό σύστημα του φορέα του Σχήματος 3.33, αποτελεί η αμφιέρειστη δοκός και τα δύο κατακόρυφα συγκεντρωμένα φορτία που εφαρμόζονται εκατέρωθεν του μέσου της, με απόσταση μεταξύ τους ίση με 380 mm.



Σχήμα 3.31 Στατικό σύστημα

Το διάστημα στο οποίο ασκούνται η μέγιστη ροπή, ήταν το σημείο ανάμεσα από τα δύο συγκεντρωμένα φορτία. Η καμπτική ροπή λαμβάνει μέγιστη τιμή ίση με $0,51\text{m} \times P/2$ kN σε kN·m, όπως φαίνεται στη Σχέση 3.2. Στο ίδιο διάστημα η τέμνουσα δύναμη μηδενίζεται.

$$M = 0,51 \frac{P}{2} \text{ [kN} \cdot \text{m]} \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

Όπου,

M : Η ροπή λόγω κάμψης

P : Το συνολικό φορτίο που ασκείται από το υδραυλικό έμβολο στη δοκό

Αντίθετα, στις στηρίξεις οι ροπές είναι μηδενικές, ενώ οι τέμνουσες δυνάμεις μέγιστες και ίσες με P/2 σε kN, όπως φαίνεται και στη Σχέση 3.3.

$$Q = \frac{P}{2} \text{ [kN]} \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

Όπου,

Q : Η τέμνουσα δύναμη

P : Το συνολικό φορτίο που ασκείται από το υδραυλικό έμβολο στη δοκό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως αυτά καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, συνοδεία παρατηρήσεων και φωτογραφικού υλικού. Κύριοι στόχοι του πειραματικού προγράμματος ήταν να μελετηθούν: (α) ο ρόλος του αριθμού των στρώσεων των ινοπλεγμάτων υάλου στην ενίσχυση έναντι κάμψης, (β) η αποτελεσματικότητα των ινοπλεγμάτων σε συνδυασμό με τα διαφορετικά κονιάματα, (γ) τα φορτία διαρροής, (δ) τα μέγιστα φορτία και (ε) οι δυσκαμψίες. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές.

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

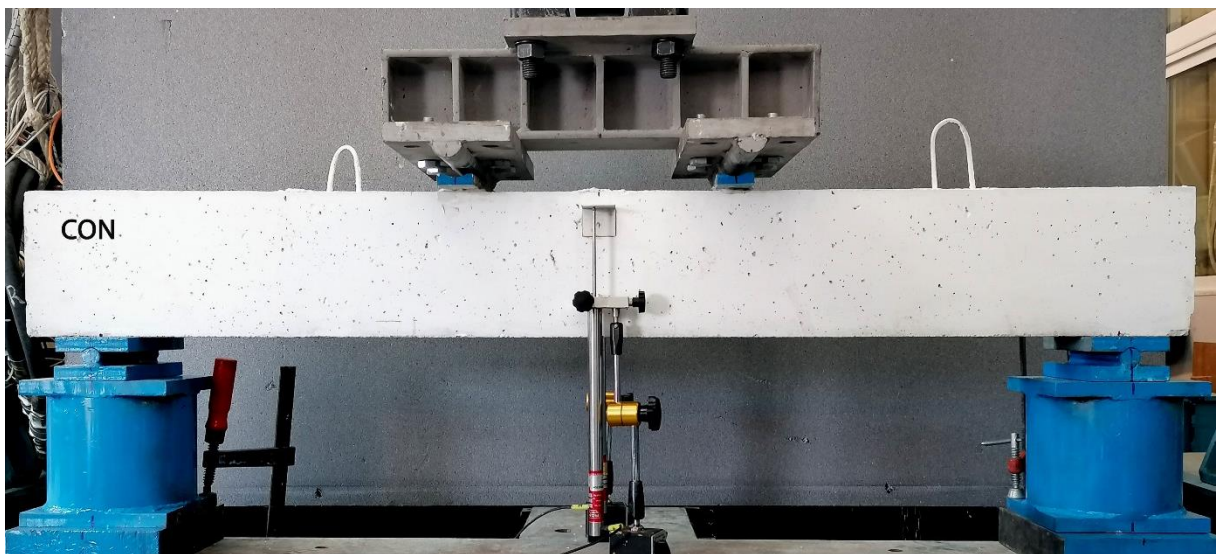
Δοκίμιο	Φορτίο [kN]			Βύθιση στο μέσον [mm]			Μορφή αστοχίας
	Ρηγμάτωσης	Διαρροής	Αστοχίας	Ρηγμάτωσης	Διαρροής	Αστοχίας	
CON	11,6	52,5	56,7	0,47	7,53	17,08	Θραύση και σύνθλιψη σκυροδέματος
M1_G3	13,2	59,0	68,3	0,53	6,41	15,12	Θραύση ινών
M1_G6	13,1	63,4	77,9	0,51	6,98	17,90	Διαστρωματική Αποκόλληση
M2_G3	15,4	57,4	68,4	0,90	6,13	16,24	Θραύση ινών
M2_G6	12,9	61,7	66,2	0,73	6,72	9,68	Αποκόλληση ενίσχυσης
GP_G3	13,7	58,9	59,2	0,65	6,84	8,25	Ολίσθηση ινών και θραύση
GP_G6	15,0	63,8	63,8	0,53	6,90	6,90	Ολίσθηση ινών, θραύση και αποκόλληση
GP_G6_EA	15,6	63,4	63,4	0,76	6,41	6,41	Ολίσθηση ινών και θραύση
GP_G6_GR	15,9	62,0	62,0	0,99	6,81	6,81	Ολίσθηση ινών και θραύση

4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων κάθε δοκιμίου

4.2.1 Δοκίμιο αναφοράς "CONTROL"

Το συγκεκριμένο δοκίμιο αποτελούσε δοκίμιο ελέγχου και συνεπώς δεν ενισχύθηκε. Η μέγιστη καμπτική δύναμη που σημειώθηκε ισούταν με 56,72 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου ίση με 17,08 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη, η οποία είναι σταθερή στο μήκος του δοκιμίου που ορίζεται από τις θέσεις επιβολής

του φορτίου, είναι ίση με $56,72 \text{ kN} / 2 \times 0,51 \text{ m} = 13,45 \text{ kNm}$. Η πρώτη καμπτική κάθετη ρωγμή εμφανίστηκε στο διάστημα ανάμεσα από τα επιβαλλόμενα συγκεντρωμένα φορτία και ήταν ίση με $11,58 \text{ kN}$. Η βύθιση στο μέσον της δοκού τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ήταν ίση με $0,47 \text{ mm}$. Στα $11,78 \text{ kN}$ εμφανίστηκε και η δεύτερη καμπτική ρωγμή ενώ στη συνέχεια η επέκταση και η αύξηση του εύρους τους οδήγησε σε μείωση της δυσκαμψίας της δοκού και ανακατανομή της έντασης. Όταν καταγράφηκε δύναμη ίση με $52,49 \text{ kN}$ και η μετακίνηση από τα επιβαλλόμενα φορτία ανερχόταν στα $7,53 \text{ mm}$, ο εφελκόμενος χάλυβας διέρρευσε. Στα $56,72 \text{ kN}$ το δοκίμιο αστόχησε λόγω θραύσης του σκυροδέματος και από εκεί κι έπειτα ακολούθησε σταδιακή πτώση του φορτίου. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι την θραύση του εφελκόμενου χάλυβα ενώ η καταγραφή των μετακινήσεων σταμάτησε όταν η βύθιση της δοκού έλαβε τιμή ίση με $28,45 \text{ mm}$. Τότε τα μεταλλικά πλακίδια πάνω στα οποία στηρίζονταν οι αισθητήρες μεταβλητής αντίστασης αποκολλήθηκαν λόγω της εκτεταμένης σύνθλιψης του σκυροδέματος. Διατμητικές ρωγμές δεν εμφανίστηκαν. Ακολουθούν τα Σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3 στα οποία παρουσιάζεται το δοκίμιο "control" πριν και μετά την δοκιμή σε κάμψη και το Σχήμα 4.4 στο οποίο εμφανίζεται το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού.



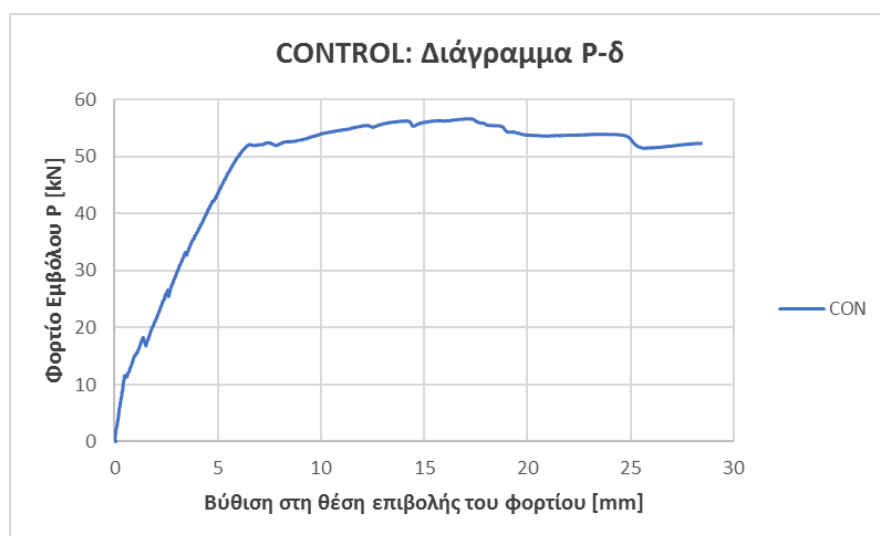
Σχήμα 4.1 Δοκίμιο control πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.2 Ρηγματώσεις, θραύση και σύνθλιψη σκυροδέματος στη δοκό control



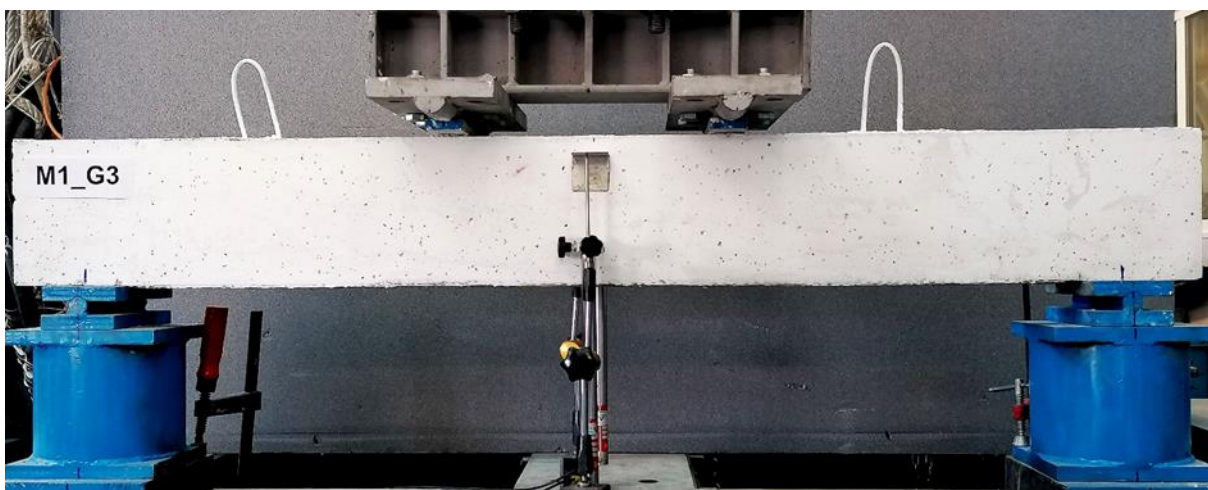
Σχήμα 4.3 Δοκίμιο control μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό control

4.2.2 Δοκίμιο M1_G3

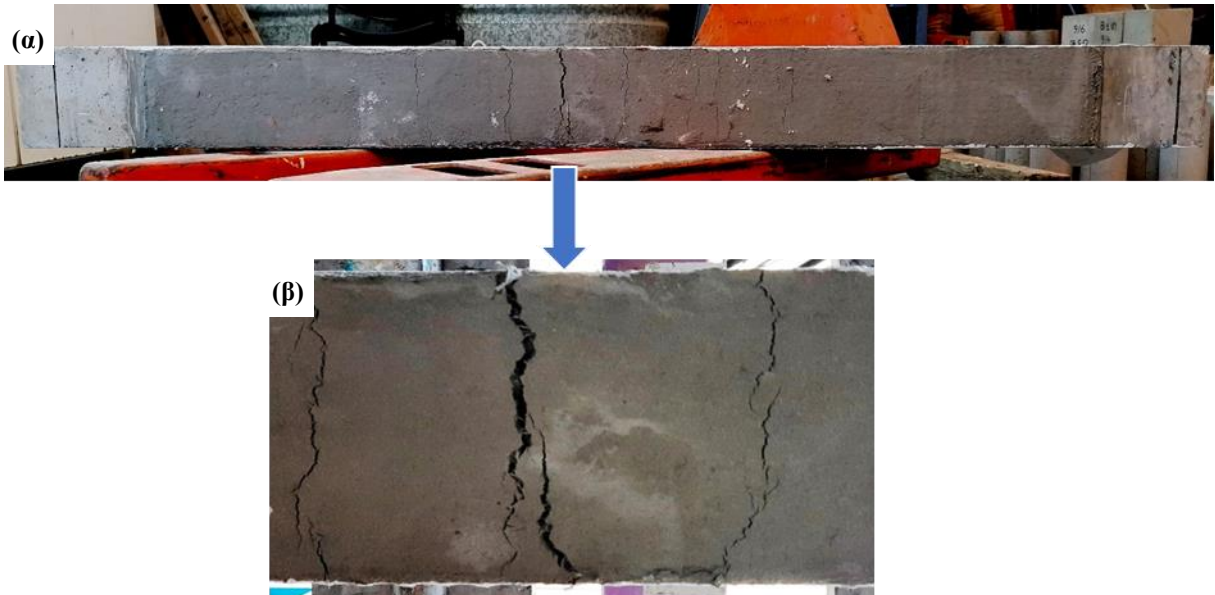
Το δοκίμιο M1_G3 το οποίο ήταν ενισχυμένο με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και κονίαμα M1, παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 13,24 kN ενώ η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,53 mm. Οι ρωγμές ήταν κάθετες και αραιές στο διάστημα ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία και προκάλεσαν μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου, κάτι που επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Καθώς οι ρωγμές αυξάνονταν, επήλθε διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα στα 58,97 kN, ενώ η βύθιση στον μέσον της δοκού είχε φτάσει στα 6,41 mm. Το μέγιστο φορτίο του εμβόλου που σημειώθηκε ισούταν με 68,25 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση στην θέση επιβολής του φορτίου ίση με 15,12 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $68,25 \text{ kN} / 2 \times 0,51 \text{ m} = 17,4 \text{ kNm}$. Τότε ξεκίνησε η θραύση των ινών υάλου από μία ενδιάμεση ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου. Ο μηχανισμός της αστοχίας ήταν ψαθυρός και απότομος, πρώτα έσπασαν οι περιφερειακές ίνες και στη συνέχεια οι ίνες του πυρήνα. Ακολούθησε πτώση του φορτίου. Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η δοκός M1_G3 προτού εμφανιστούν οι πρώτες ρωγμές, ενώ στα Σχήματα 4.6 και 4.7 παρουσιάζεται το δοκίμιο μετά την θραύση των ινών υάλου. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού, για το αναφερόμενο δοκίμιο αλλά και για το δοκίμιο αναφοράς, προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις.



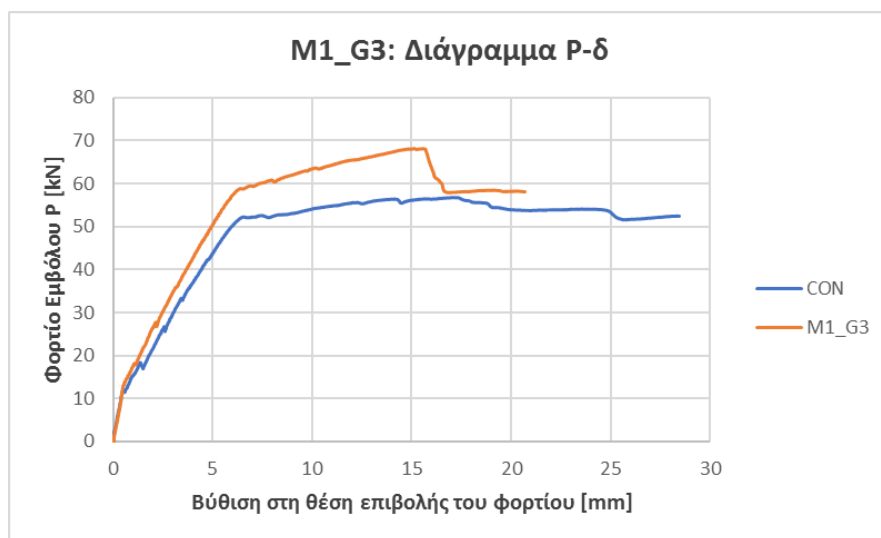
Σχήμα 4.5 Δοκίμιο M1_G3 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.6 Δοκίμιο M1_G3 μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.7 (α) Απεικόνιση την ενίσχυσης μετά τη θραύση ινών, (β) η ρωγή που προκάλεσε τη θραύση ινών

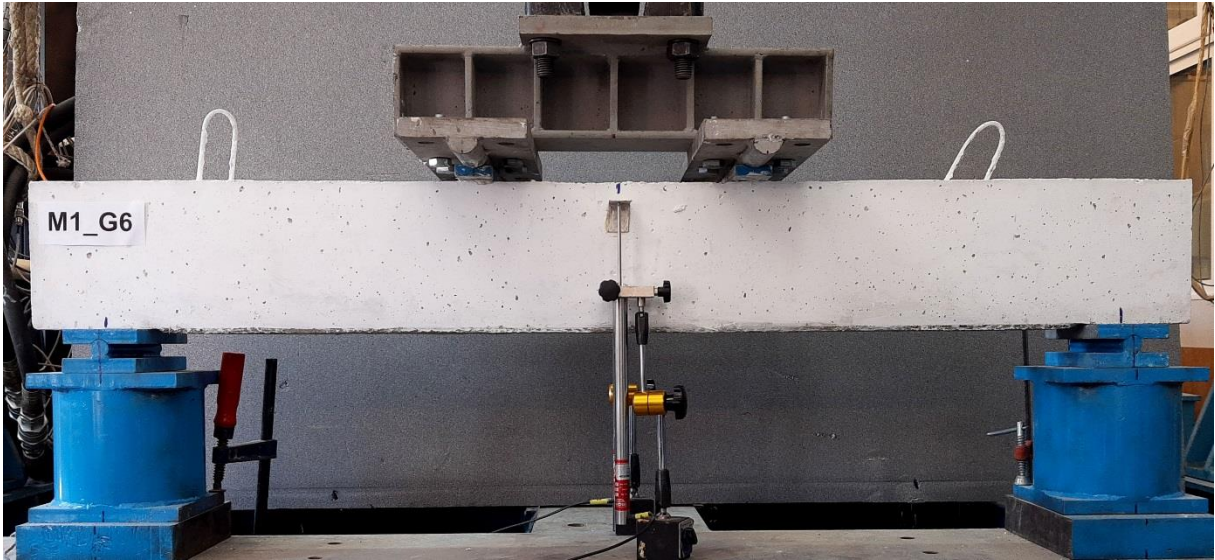


Σχήμα 4.8 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M1_G3

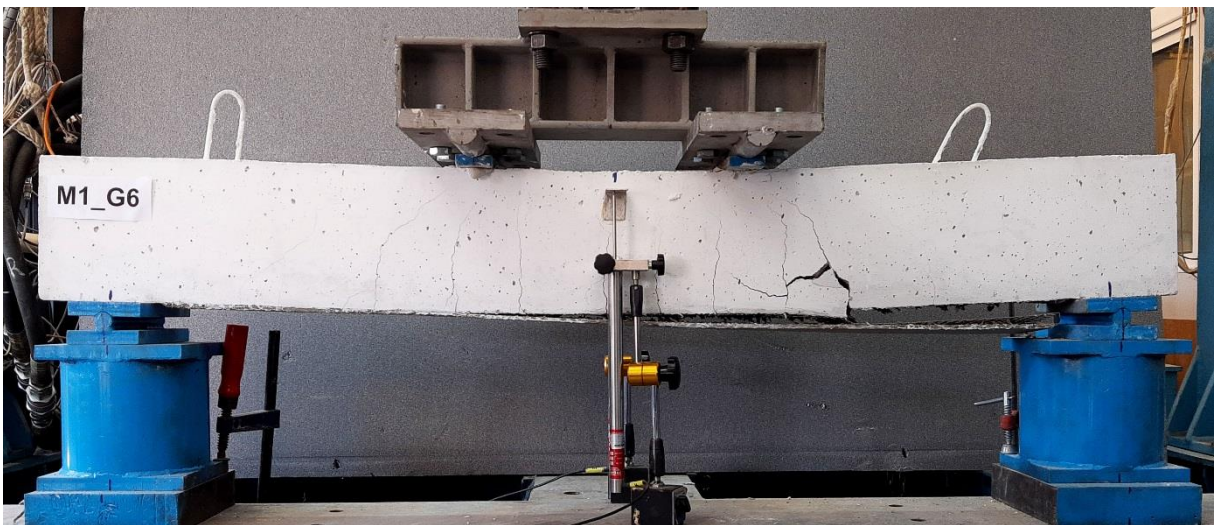
Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης είναι φανερή, αφού η διαρροή και η αστοχία του δοκιμίου M1_G3 παρατηρείται σε υψηλότερο φορτίο σε σχέση με το φορτίο του δοκιμίου αναφοράς (CON). Συμπερασματικά, εξασφαλίστηκε από το συγκεκριμένο κονίαμα επαρκής συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και της εξωτερικής ενίσχυσης, ώστε να εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή των ινοπλεγμάτων υάλου.

4.2.3 Δοκίμιο M1_G6

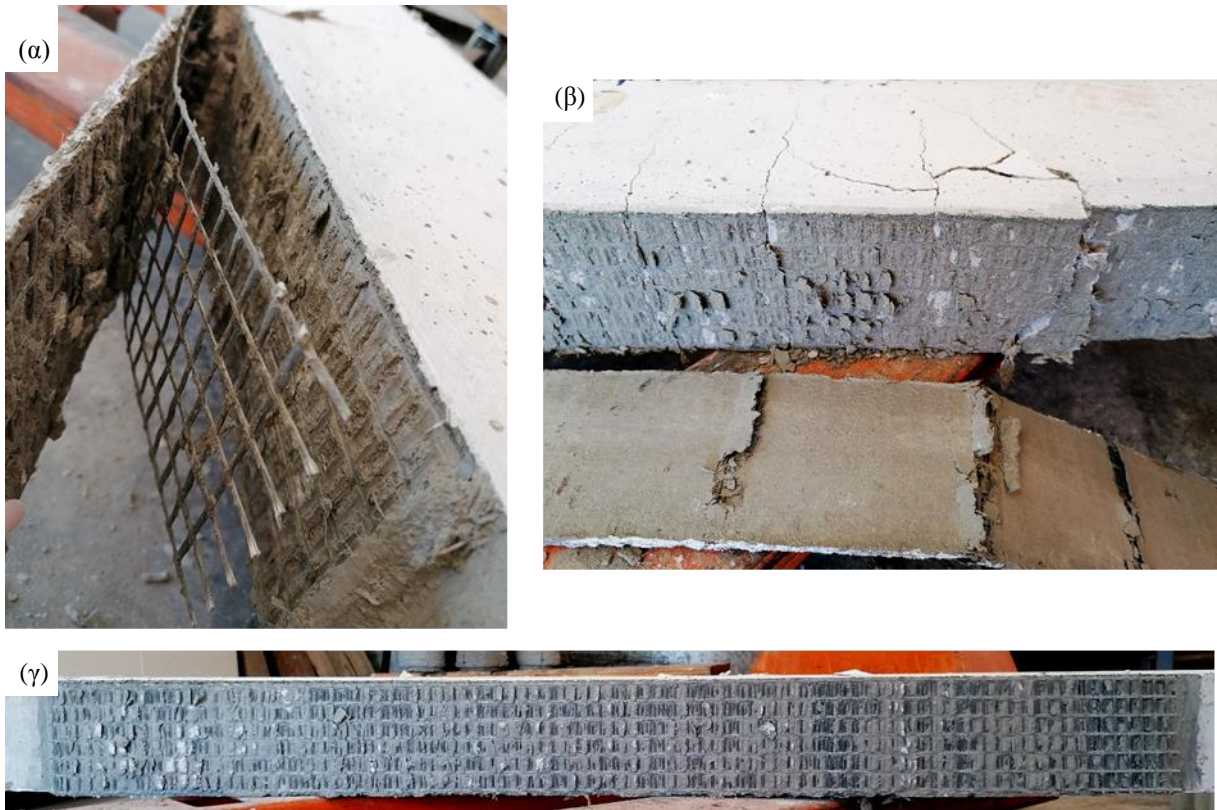
Το δοκίμιο M1_G6, το οποίο ήταν ενισχυμένο με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου σε ανόργανη μήτρα, παρουσίασε μέγιστη τιμή φορτίου ίση με 77,86 kN, που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του εμβόλου 17,90 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι ίση με $77,86 \text{ kN} / 2 \times 0,51 \text{ m} = 19,85 \text{ kNm}$. Η πρώτη καμπτική ρωγμή κυμαίνεται περίπου στο ίδιο φορτίο με το δοκίμιο M1_G3 και πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε στα 13,15 kN. Εκείνη τη χρονική στιγμή, η βύθιση στο μέσον της δοκού ήταν ίση με 0,51 mm και η δυσκαμψία του δοκιμίου αρχίζει να μειώνεται. Όλες οι ρωγμές ήταν κάθετες καμπτικές και παρατηρήθηκε μόνο μία μικρή ρωγμή που εξελίχθηκε σε καμπτοδιατμητική, στη δεξιά πλευρά του επιβαλλόμενου φορτίου. Η διαρροή του χάλυβα εφελκυσμένου οπλισμού επήλθε στα 63,36 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση 6,98 mm. Λίγο αργότερα στα 75,5 kN, παρατηρείται μια οριζόντια ρωγμή στο δεξί τμήμα της δοκού που δείχνει μια προδιάθεση για αποκόλληση της ενίσχυσης. Η ρωγμή αυτή στη συνέχεια διαδόθηκε ώσπου οδήγησε τελικά στην αστοχία του δοκιμίου με τη μορφή της αποκόλλησης των ινοπλεγμάτων. Αποκολλήθηκε το δεξί τμήμα της ενίσχυσης, ενώ ποσότητα κονιάματος παρέμεινε πάνω στη δοκό μαζί με μικρά κομμάτια ινών υάλου που έσπασαν κατά την αστοχία (διαστρωματική αποκόλληση). Ο μηχανισμός ήταν ψαθυρός και απότομος, συνοδευόταν από απότομη πτώση του φορτίου και οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος. Επιπλέον, το γεγονός ότι ποσότητα κονιάματος παρέμεινε πάνω στο σκυρόδεμα είναι αποτέλεσμα της καλής συνάφειας κονιάματος-σκυροδέματος. Ακολουθούν σχετικές εικόνες στα Σχήματα 4.9, 4.10, 4.11 και 4.12, ενώ στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού M1_G6.



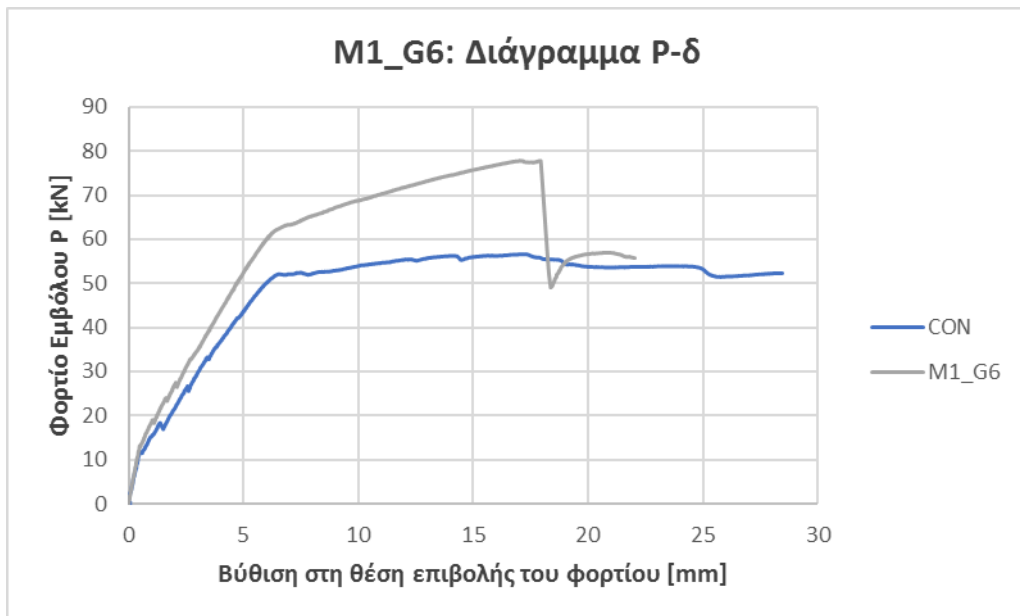
Σχήμα 4.9 Δοκίμιο M1_G6 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.10 Δοκίμιο M1_G6 μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.11 (α) Κοντινή όψη αποκόλλησης, (β) επιφάνεια της δοκού M1_G6 μετά την αποκόλληση, (γ) όψη ενίσχυσης μετά την αποκόλληση

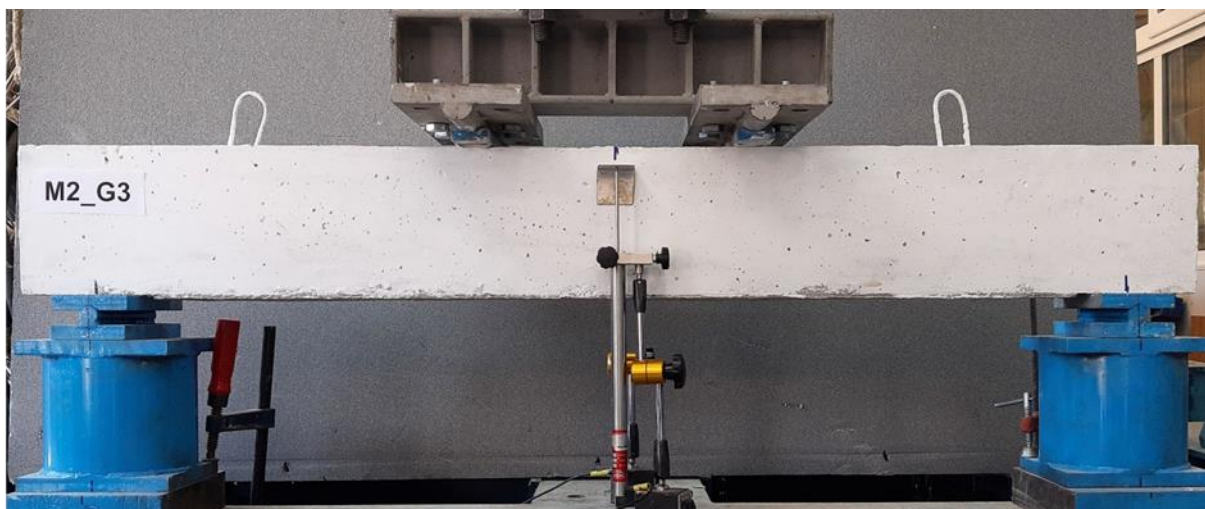


Σχήμα 4.12 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M1_G6

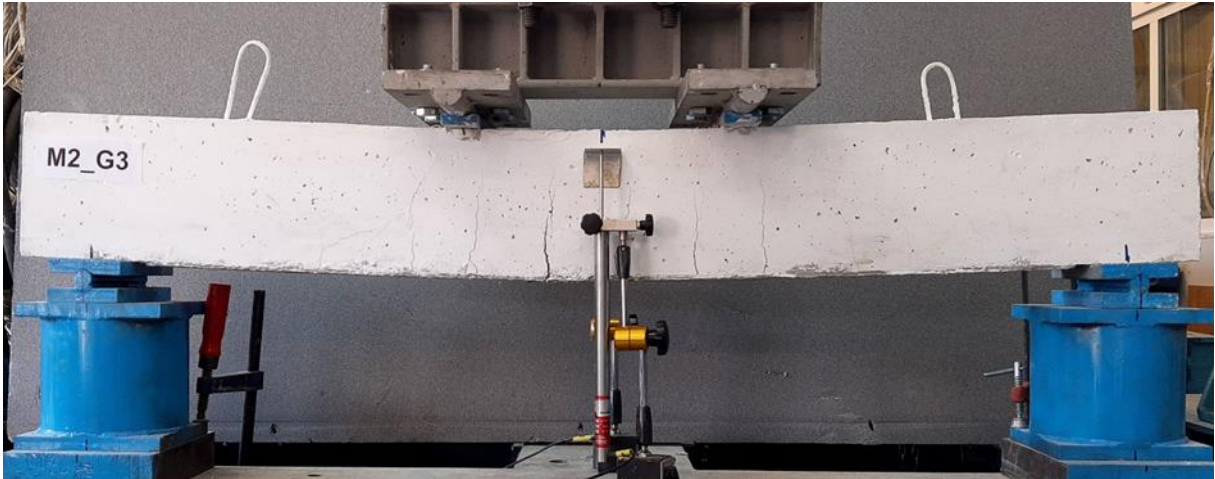
Παρατηρείται ότι η αύξηση των στρώσεων ινοπλεγμάτων υάλου ήταν αποδοτική, καθώς η δοκός M1_G6 εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από τη δοκό αναφοράς.

4.2.4 Δοκίμιο M2_G3

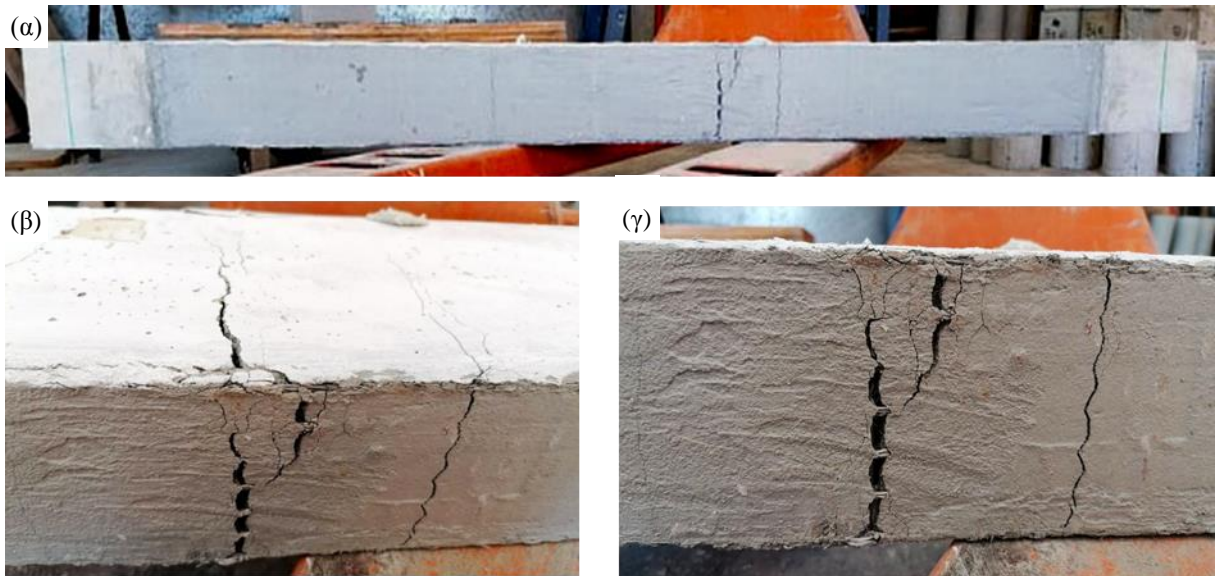
Το δοκίμιο M2_G3 το οποίο ήταν ενισχυμένο με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και κονίαμα M2, παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 15,41 kN στο διάστημα που η ροπή είναι μέγιστη, μειώνοντας τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Η μετατόπιση στη θέση επιβολής του φορτίου εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,90 mm. Όλες οι ρωγμές ήταν κάθετες και η συνεχής εξάπλωσή τους οδήγησε σε διαρροή του εφελκυόμενου χάλυβα στα 57,37 kN όπου αντιστοιχούσε σε μετατόπιση του εμβόλου ίση με 6,13 mm. Λίγο αργότερα άρχισε να σταθεροποιείται και ίνες υάλου αρχίζουν να σπάνε. Τελικά, στα 68,45 kN που αντιστοιχεί σε βύθιση του εμβόλου ίση με 16,24 mm, επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου M2_G3 με τη μορφή της θραύσης των ινών του ινοπλέγματος. Η αστοχία ήταν ψαθυρή και η ροπή που αντιστοιχεί στη μέγιστη δύναμη είναι $68,45\text{kN}/2 \times 0,51\text{m}=17,45 \text{ kNm}$. Έπειτα, η πτώση του φορτίου γίνεται σχεδόν απότομα. Ακολουθεί σχετικό φωτογραφικό υλικό στα Σχήματα 4.13, 4.14 και 4.15, καθώς και το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού M2_G3 στο Σχήμα 4.16.



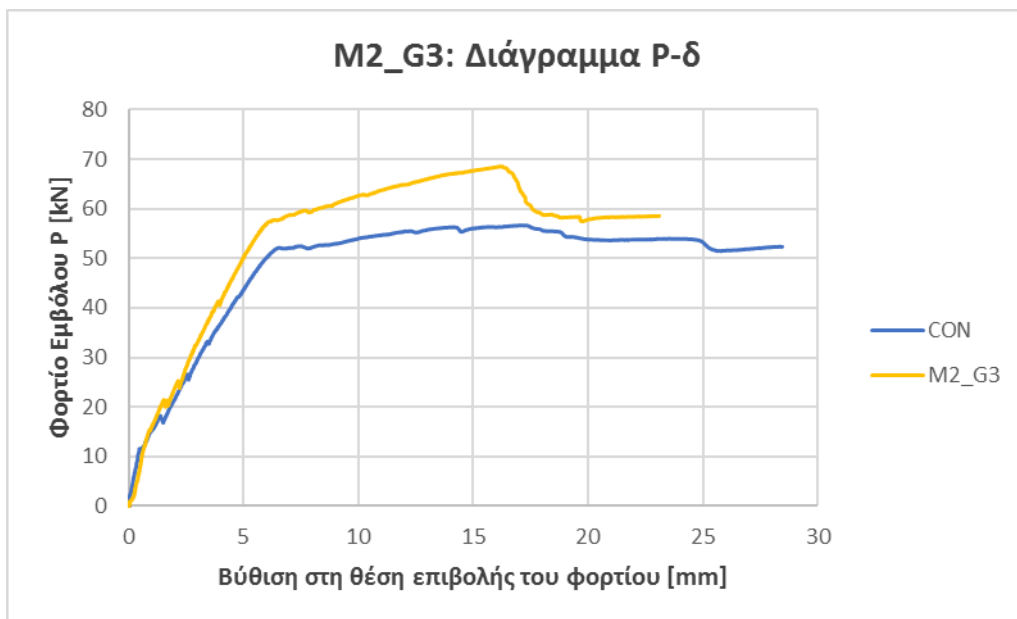
Σχήμα 4.13 Δοκίμιο M2_G3 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.14 Δοκίμιο M2_G3 μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.15 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την θραύση των ινών υάλου, (β), (γ) κοντινές όψεις ενίσχυσης μετά την αστοχία της δοκού M2_G3



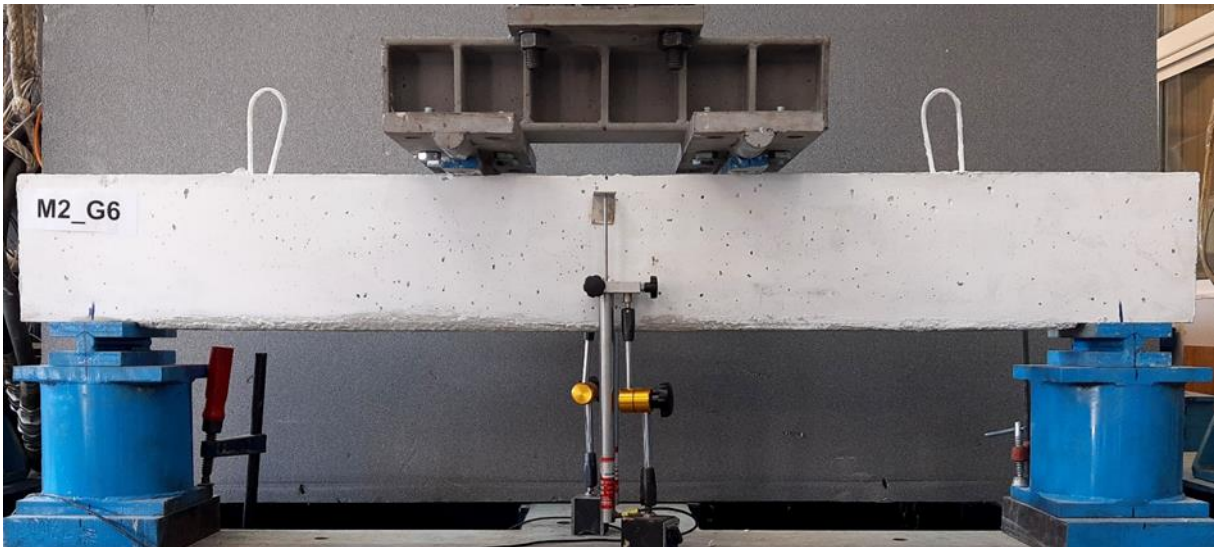
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M2_G3

Παρόλο που η πρώτη ρωγή για το δοκίμιο M2_G3 δεν εμφανίζεται σε πολύ μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με την πρώτη ρωγή του δοκιμίου αναφοράς, στη συνέχεια παρουσιάζει φανερά καλύτερη συμπεριφορά, αφού η αστοχία της δοκού M2_G3 επέρχεται σε αρκετά μεγαλύτερο φορτίο συγκριτικά με την αστοχία του δοκιμίου “control”.

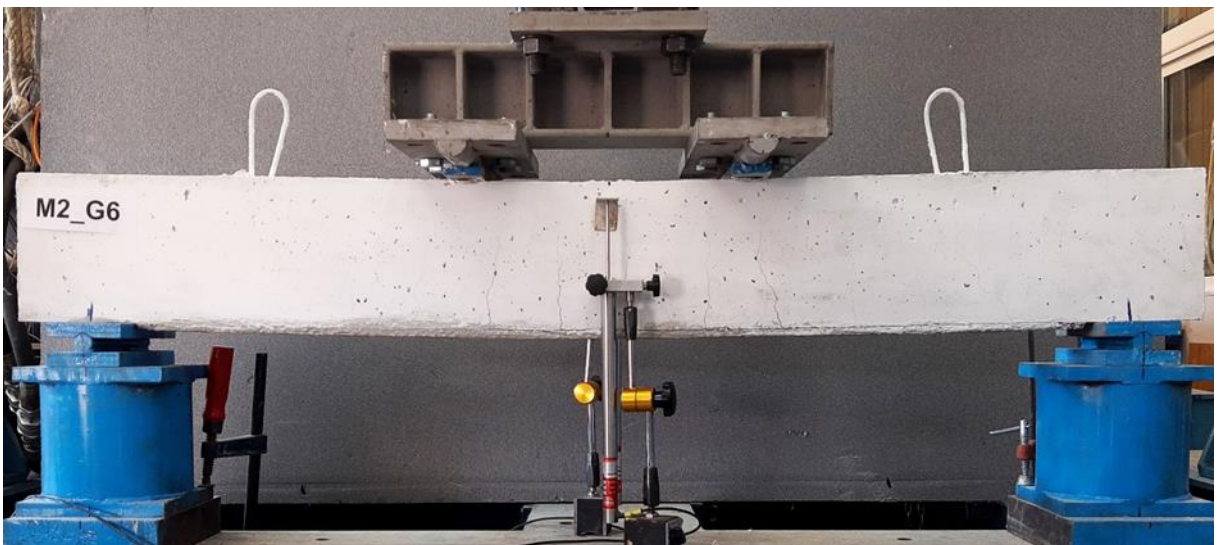
4.2.5 Δοκίμιο M2_G6

Το δοκίμιο M2_G6 ήταν ενισχυμένο με 6 στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και κονίαμα M2. Στα 12,86 kN καταγράφηκε η πρώτη καμπτική κάθετη ρωγή στο σκυρόδεμα και αντιστοιχούσε σε βύθιση ίση με 0,73 mm. Στη συνέχεια εμφανίστηκαν περισσότερες και η δυσκαμψία του δοκιμίου μειώθηκε, όπως φαίνεται παρακάτω και στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Στα 61,72 kN και σε βύθιση ίση με 6,72 mm επήλθε η διαρροή του χάλυβα εφελκόμενου οπλισμού. Το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε ισούται με 66,19 kN και αντιστοιχεί σε βύθιση ίση με 9,68 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι $66,19 \text{ kN} / 2 \times 0,51\text{m} = 16,88 \text{ kNm}$. Τότε επήλθε η ψαθυρή και ξαφνική αστοχία του δοκιμίου με τη μορφή της αποκόλλησης στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ενίσχυσης, η οποία συνέβη αρχικά στο μέσον της δοκού και διαδόθηκε στη συνέχεια προς τη στήριξη. Αμέσως ακολουθεί απότομη πτώση του φορτίου. Η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία και η επιφάνεια της ενίσχυσης δεν εμφάνισε

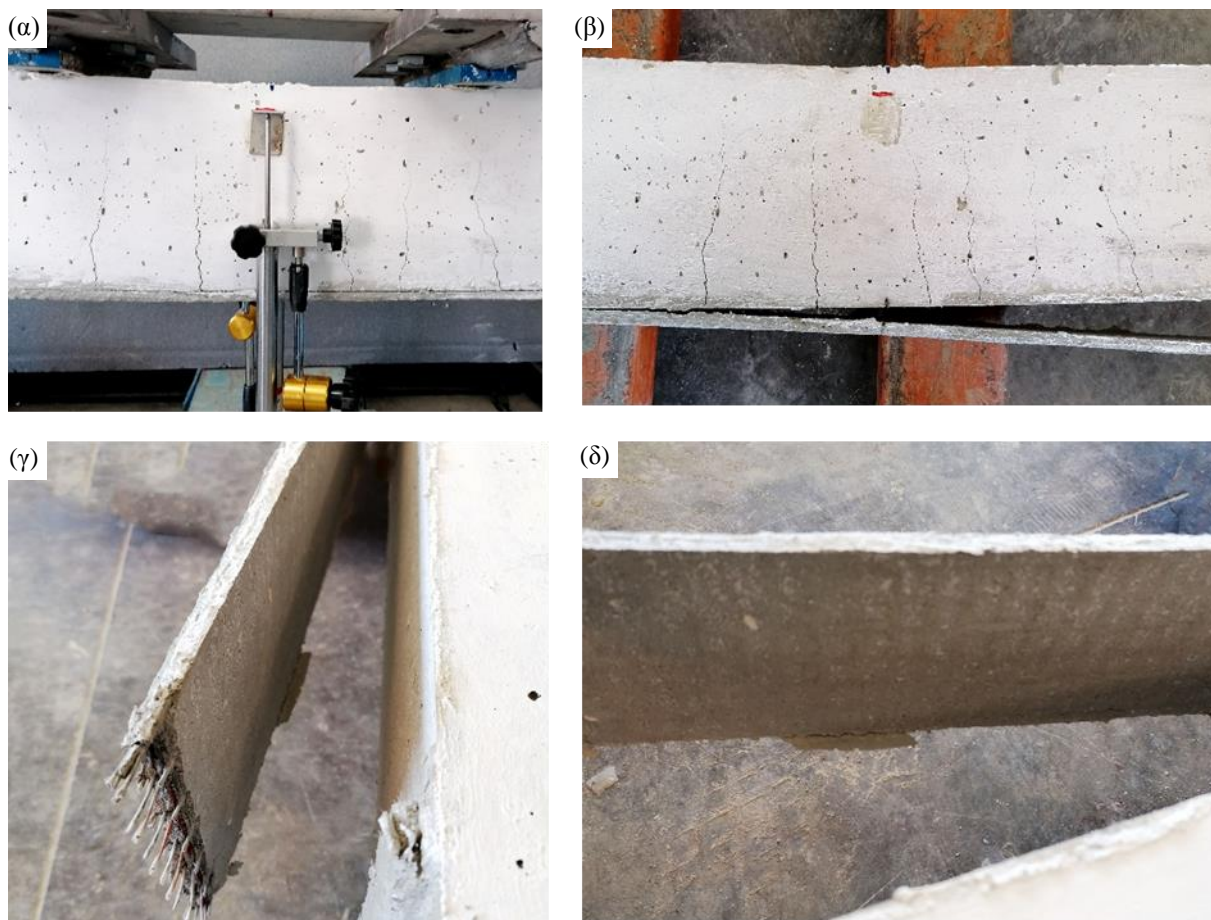
ρωγμές ούτε τοπικές αστοχίες στις θέσεις που η ροπή είναι η μέγιστη. Αντίθετα δηλαδή με το δοκίμιο M1_G6 που ποσότητα σκυροδέματος παρέμεινε επικολλημένη στην ενίσχυση, στο υπό μελέτη δοκίμιο η ενίσχυση αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι. Αυτό είναι μια ένδειξη της πτωχής συνάφειας του συγκεκριμένου κονιάματος και του σκυροδέματος. Το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 58,15 kN που αντιστοιχούσε σε μετακίνηση 16,58 mm. Ακολουθεί σχετικό φωτογραφικό υλικό στα Σχήματα 4.17, 4.18 και 4.19, καθώς και το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού M2_G6 στο Σχήμα 4.20.



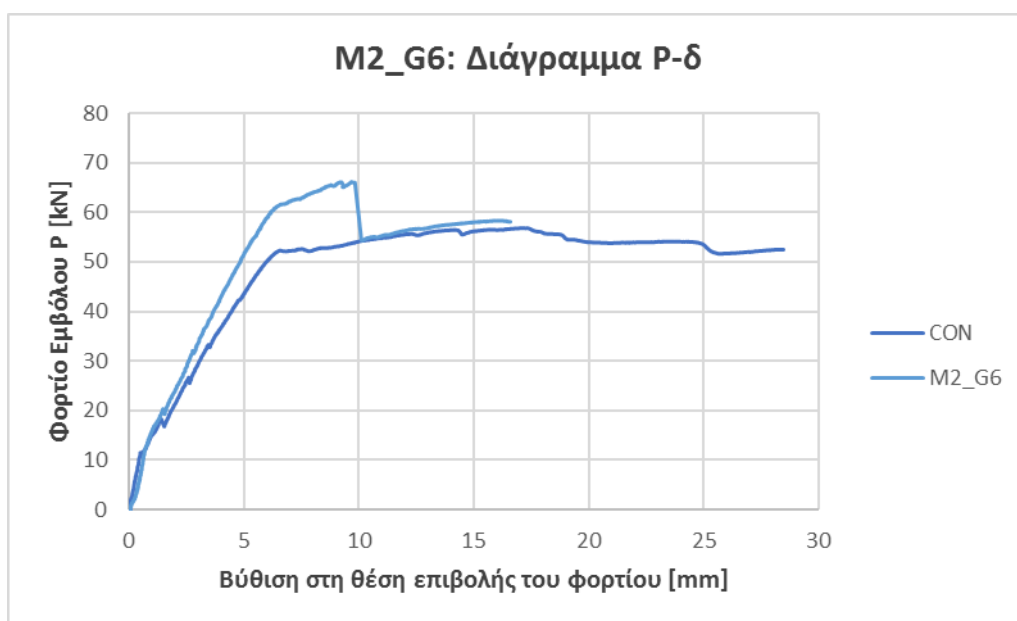
Σχήμα 4.17 Δοκίμιο M2_G6 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.18 Δοκίμιο M2_G6 μετά την πειραματική δοκιμή



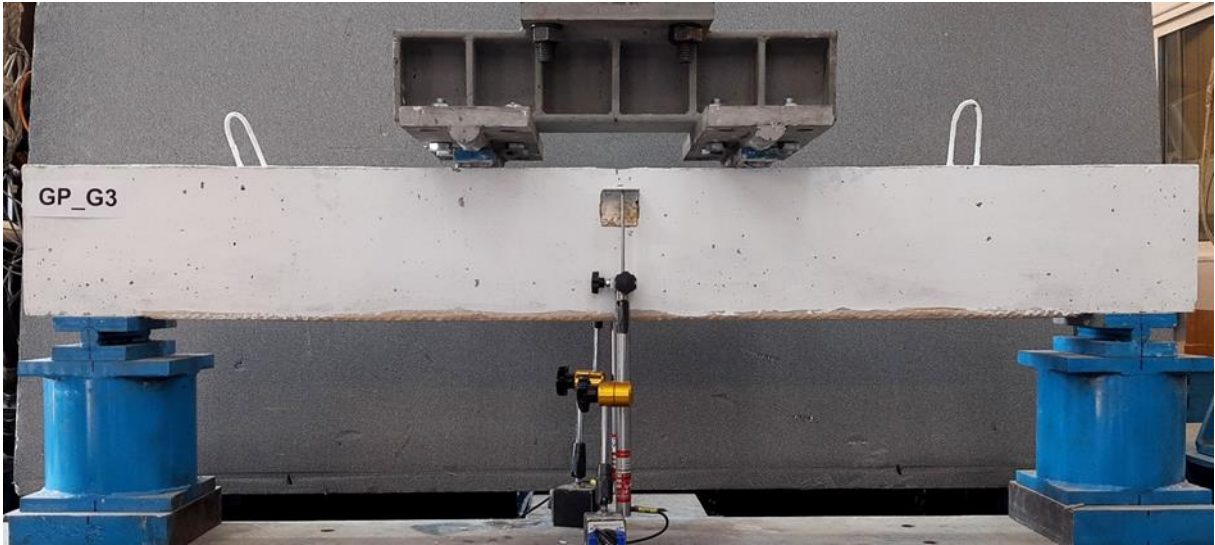
Σχήμα 4.19 Κοντινή όψη (α) ρηγματώσεων που προκάλεσαν την αστοχία στη δοκό M2_G6, (β) αποκολλημένης ενίσχυσης, (γ),(δ) λείας επιφάνεια σκυροδέματος και ενίσχυσης χωρίς ρωγμές και τοπικές αστοχίες



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό M2_G6

4.2.6 Δοκίμιο GP_G3

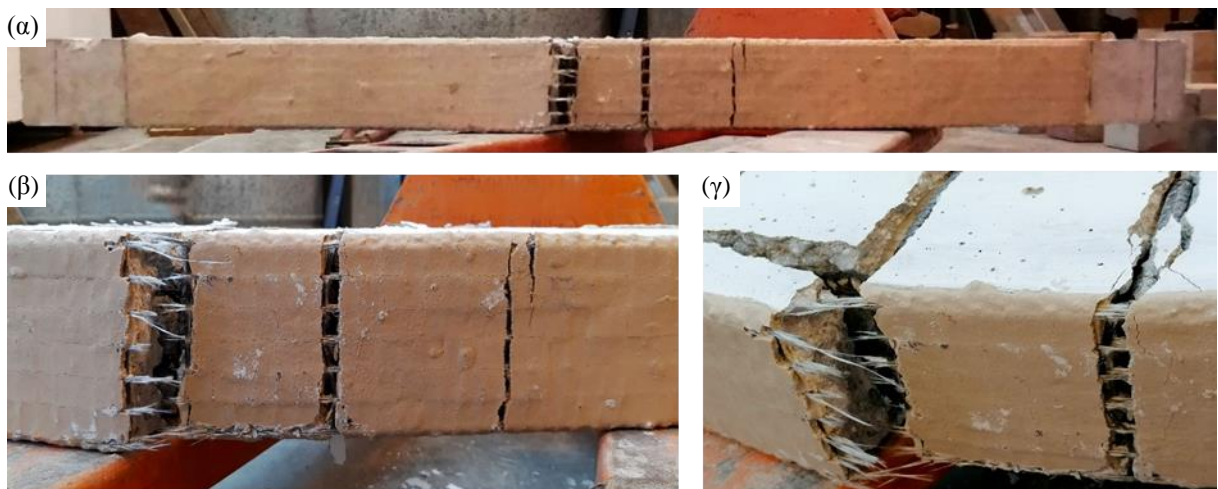
Το δοκίμιο GP_G3 ήταν ενισχυμένο με 3 στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και κονίαμα γεωπολυμερούς GP. Στα 13,67 kN καταγράφηκε η πρώτη καμπτική κάθετη ρωγμή στο σκυρόδεμα η οποία αντιστοιχούσε σε βύθιση ίση με 0,65 mm και έκτοτε η δυσκαμψία του υπό μελέτη δοκιμίου αρχίζει να μειώνεται. Μέχρι τα 35 kN είχαν δημιουργηθεί αρκετές κάθετες ρωγμές, ενώ στη συνέχεια, όταν το φορτίο έφτασε τα 58,87 kN επήλθε η διαρροή του χάλυβα εφελκόμενου οπλισμού. Μετά το φορτίο διαρροής η δύναμη έπαψε να αυξάνεται με τον ρυθμό που αυξανόταν προηγουμένως και παρέμεινε σταθερή. Κάτι τέτοιο υποδηλώνει πως το σύνθετο υλικό αργεί να ενεργοποιηθεί ή/και ότι οι ίνες υάλου ολισθαίνουν μέσα στο κονίαμα. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρήθηκαν τρεις μεγάλες ρωγμές που εκτεινόταν από το σκυρόδεμα στο κονίαμα. Φτάνοντας στα 59,18 kN και σε βύθιση 8,25 mm, επήλθε η αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου με τον μηχανισμό της θραύσης των ινών του ινοπλέγματος στα σημεία που δημιουργήθηκαν οι τρεις μεγάλες ρωγμές. Ωστόσο όμως πρέπει να σημειωθεί ότι δεν ενεργοποιήθηκαν όλες οι ίνες, αφού προηγήθηκε σημαντική ολίσθηση ινών μέσα από τη μήτρα. Η ροπή που αντιστοιχεί στη μέγιστη δύναμη είναι $59,18 \text{ kN} / 2 \times 0,51\text{m} = 15,09 \text{ kNm}$. Η αστοχία ήταν ψαθυρή και το κονίαμα από γεωπολυμερές όταν έσπασε, άφησε εκτεθειμένες τις ίνες υάλου. Το πείραμα συνεχίστηκε και μετά την αστοχία του δοκιμίου GP_G3 οπότε παρατηρήθηκε πτώση του φορτίου και περίπου στα 56 kN εμφανίστηκε σύνθλιψη του σκυροδέματος. Το πείραμα σταμάτησε όταν πλέον η βύθιση είχε φτάσει τα 90,24 mm σε φορτίο 53,53 kN οπότε το δοκίμιο είχε δεχτεί μεγάλη παραμόρφωση. Ακολουθεί σχετικό φωτογραφικό υλικό στα Σχήματα 4.21, 4.22 και 4.23, καθώς και το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού GP_G3 στο Σχήμα 4.24.



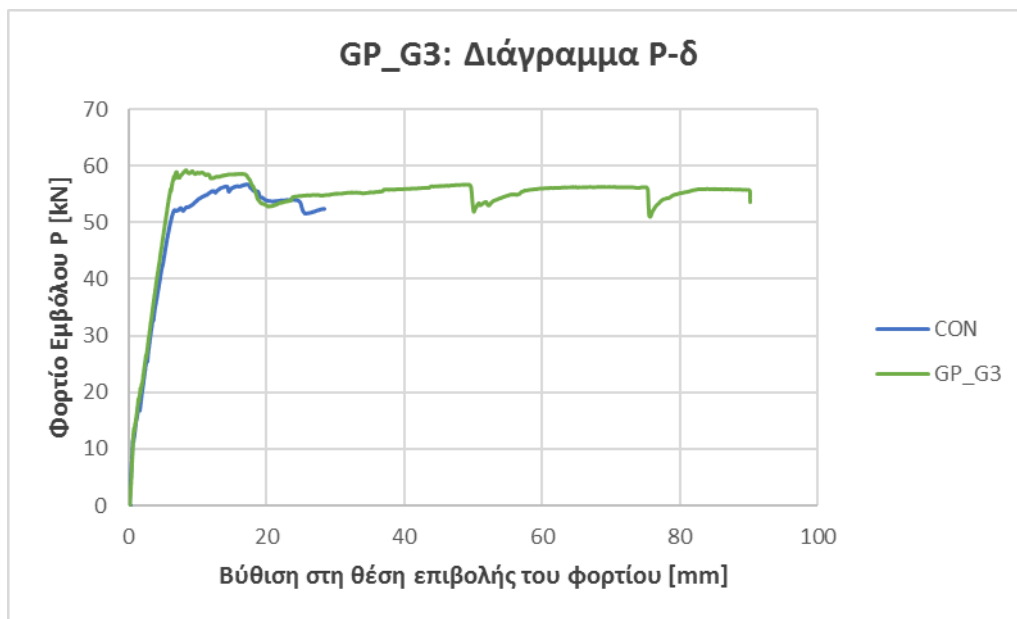
Σχήμα 4.21 Δοκίμιο GP_G3 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.22 Δοκίμιο GP_G3 μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.23 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την θραύση ινών, (β) κοντινή όψη των ρηγματώσεων που προκάλεσαν τη θραύση των ινών υάλου, (γ) κοντινή όψη ρωγμών και θραύσης σκυροδέματος



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G3

4.2.7 Δοκίμιο GP_G6

Το δοκίμιο GP_G6 το οποίο ήταν ενισχυμένο με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και κονίαμα GP, παρουσίασε την πρώτη καμπτική ρωγμή στα 14,96 kN ενώ η μετατόπιση στη θέση μέγιστης ροπής εκείνη τη χρονική στιγμή ήταν ίση με 0,53 mm. Εμφανίστηκαν κατανεμημένες πολλές ρωγμές στο διάστημα ανάμεσα στα δύο επιβαλλόμενα φορτία και προκάλεσαν μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου, κάτι που επαληθεύεται από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Η διαρροή του χάλυβα εφελκόμενου οπλισμού επήλθε στα 63,80 kN, όταν η βύθιση στο μέσον της δοκού ήταν ίση με 6,90 mm. Εκείνη τη χρονική στιγμή μια μεγάλη ρωγμή κάτω από το αριστερό επιβαλλόμενο φορτίο εξαπλώθηκε και κάποιες ίνες υάλου άρχισαν να σπάνε. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ισούται με 63,80 kN, όσο δηλαδή και το φορτίο διαρροής, και η ροπή που αντιστοιχεί στη δύναμη αυτή είναι $63,80 \text{ kN} / 2 \times 0,51 \text{ m} = 16,27 \text{ kNm}$. Αμέσως σημειώθηκε πτώση του φορτίου όπου στη συνέχεια με δυσκολία ανέβαινε ελάχιστα και σταδιακά. Αυτό συμβαίνει λόγω ολίσθησης των ινών, κάτι που υποδηλώνει την πτωχή συνάφεια κονιάματος και ινοπλέγματος υάλου. Μένοντας σταθερά στα 57 kN περίπου προκλήθηκε σύνθλιψη σκυροδέματος και κάποιες ακόμα ίνες υάλου έσπασαν. Το φορτίο έπεσε στα 55 kN και ταυτόχρονα δημιουργήθηκε μια οριζόντια ρωγμή στη διεπιφάνεια κονιάματος-σκυροδέματος.

Η οριζόντια αυτή ρωγμή βρισκόταν στο μέσον της δοκού και είναι αυτή που θα προκάλεσε στη συνέχεια αποκόλληση τμήματος της ενίσχυσης. Η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία όπως και η επιφάνεια της ενίσχυσης πέρα από το σημείο της θραύσης. Ακολουθούν τα Σχήματα 4.25, 4.26 και 4.27 που αφορούν στιγμιότυπα πριν και μετά την πειραματική δοκιμή, καθώς και το διάγραμμα δύναμης - μετακίνησης της δοκού (Σχήμα 4.28).



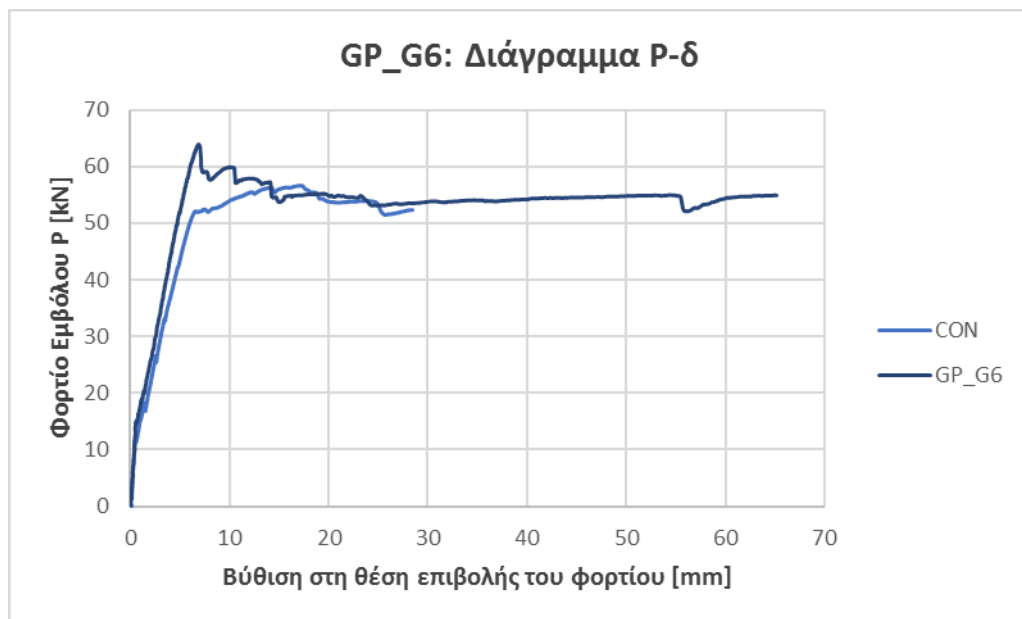
Σχήμα 4.25 Δοκίμιο GP_G6 πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.26 Δοκίμιο GP_G6 μετά την πειραματική δοκιμή



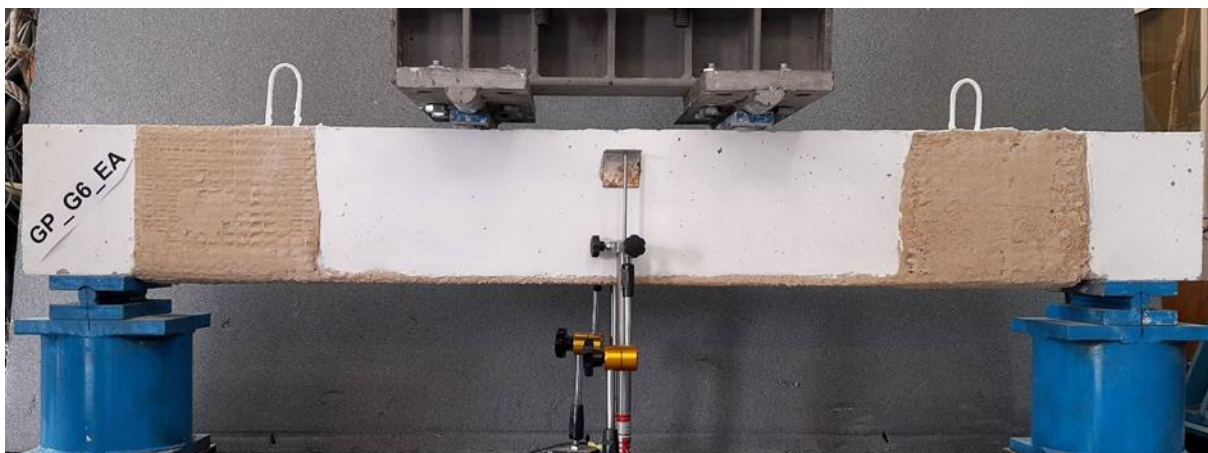
Σχήμα 4.27 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αποκόλληση, (β), (γ) κοντινή όψη ρωγμών, αποκόλλησης και λείας επιφάνειας σκυροδέματος



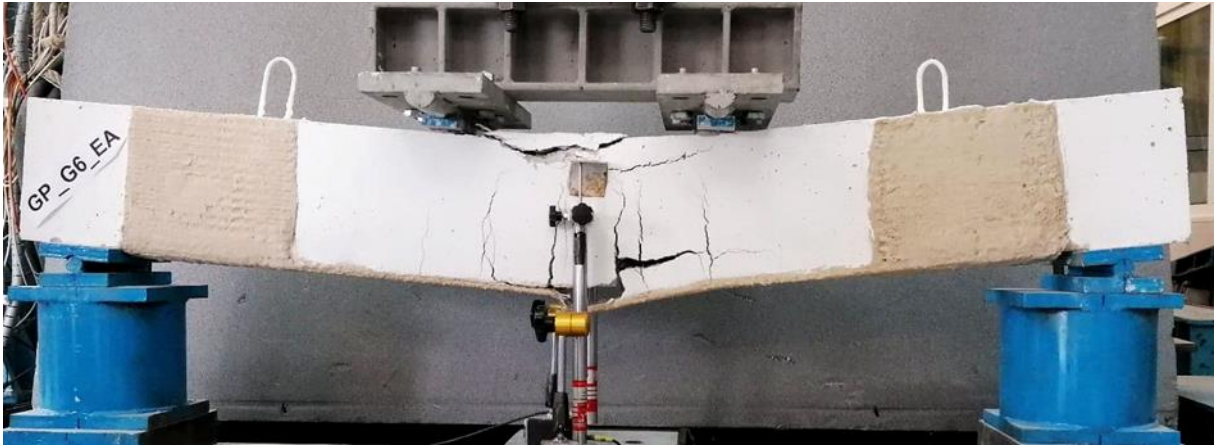
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6

4.2.8 Δοκίμιο GP_G6_EA

Το δοκίμιο GP_G6_EA, το οποίο ήταν ενισχυμένο με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου, κονίαμα GP και επιπρόσθετα αγκύρια ινοπλεγμάτων υάλου (τριών στρώσεων) μορφής U στις δύο παρειές της δοκού, παρουσίασε μέγιστη τιμή φορτίου ίση με 63,37 kN, που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του εμβόλου 6,42 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι ίση με $63,37 \text{ kN} / 2 \times 0,51\text{m} = 16,16 \text{ kNm}$. Η πρώτη καμπτική ρωγμή δημιουργήθηκε στα 15,64 kN και αντιστοιχεί σε βύθιση στο μέσον της δοκού ίση με 0,76 mm. Τότε η δυσκαμψία του δοκιμίου άρχισε να μειώνεται, κάτι που επαληθεύεται και από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Όλες οι ρωγμές ήταν καμπτικές κάθετες και παρατηρήθηκε μετά τη διαρροή του χάλυβα μία οριζόντια ρωγμή στο μέσον της δοκού στη διεπιφάνεια κονιάματος-σκυροδέματος, περίπου στα 57 kN. Πιο συγκεκριμένα, η διαρροή του χάλυβα εφελκόμενου οπλισμού επήλθε στα 63,37 kN και αντιστοιχούσε σε μετατόπιση 6,42 mm. Το φορτίο αυτό ισούται με το μέγιστο φορτίο αφού εκείνη τη χρονική στιγμή ίνες υάλου άρχισαν να σπάνε επιφέροντας την αστοχία του δοκιμίου. Ωστόσο, η ενίσχυση δεν κατάφερε να ενεργοποιηθεί πλήρως αφού ίνες υάλου ολίσθησαν μέσα στο κονίαμα, κάτι που προδίδει την πτωχή συνάφεια του συγκεκριμένου κονιάματος με τα ινοπλέγματα υάλου. Επιπλέον, στα 57 kN έγινε και σύνθλιψη του σκυροδέματος. Η οριζόντια ρωγμή καθώς εξελίσσεται, προκαλεί τμηματική αποκόλληση του σύνθετου υλικού συμπαρασέροντας κομμάτια σκυροδέματος, στα 57,7 kN περίπου. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε πτώση του φορτίου και το πείραμα συνεχίστηκε μέχρι τα 51,46 kN όπου η βύθιση στο μέσον της δοκού είχε φτάσει τα 68 mm περίπου. Ακολουθούν τα Σχήματα 4.29, 4.30 και 4.31 που αφορούν στιγμότυπα πριν και μετά την πειραματική δοκιμή, καθώς και το διάγραμμα δύναμης-βύθισης στο μέσον της δοκού στο Σχήμα 4.32.



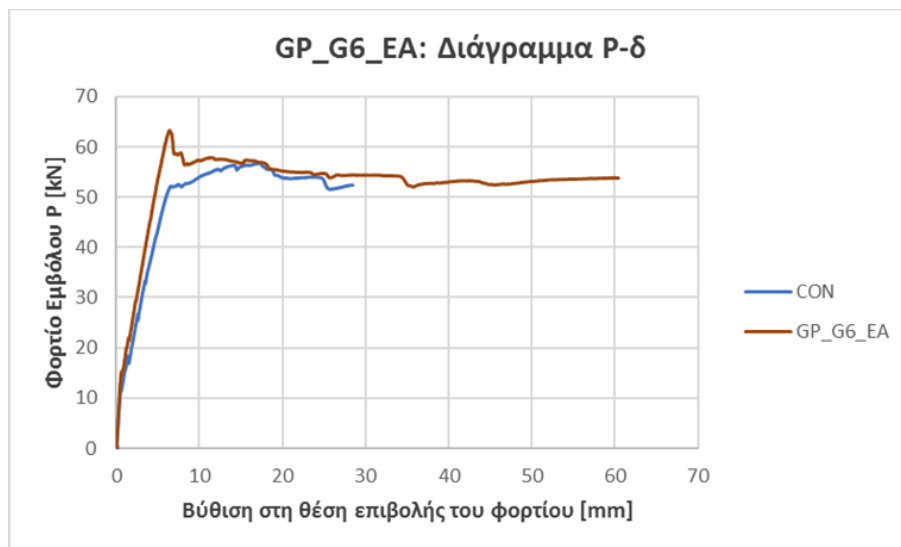
Σχήμα 4.29 Δοκίμιο GP_G6_EA πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.30 Δοκίμιο GP_G6_EA μετά την πειραματική δοκιμή



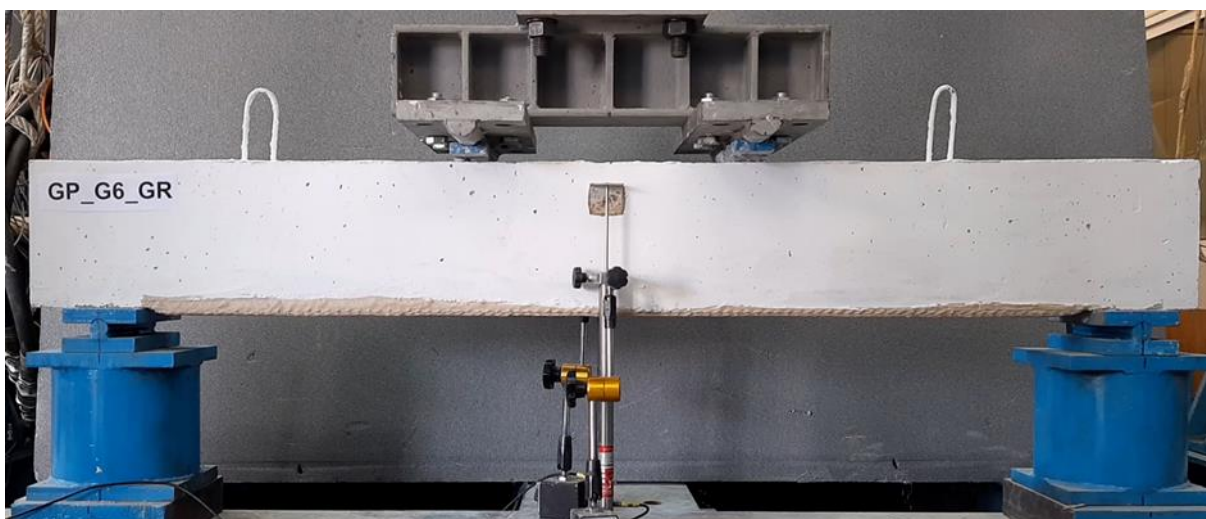
Σχήμα 4.31 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αστοχία, (β) κοντινή όψη ρωγμών και ινών υάλου μετά τη θραύση



Σχήμα 4.32 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6_EA

4.2.9 Δοκίμιο GP_G6_GR

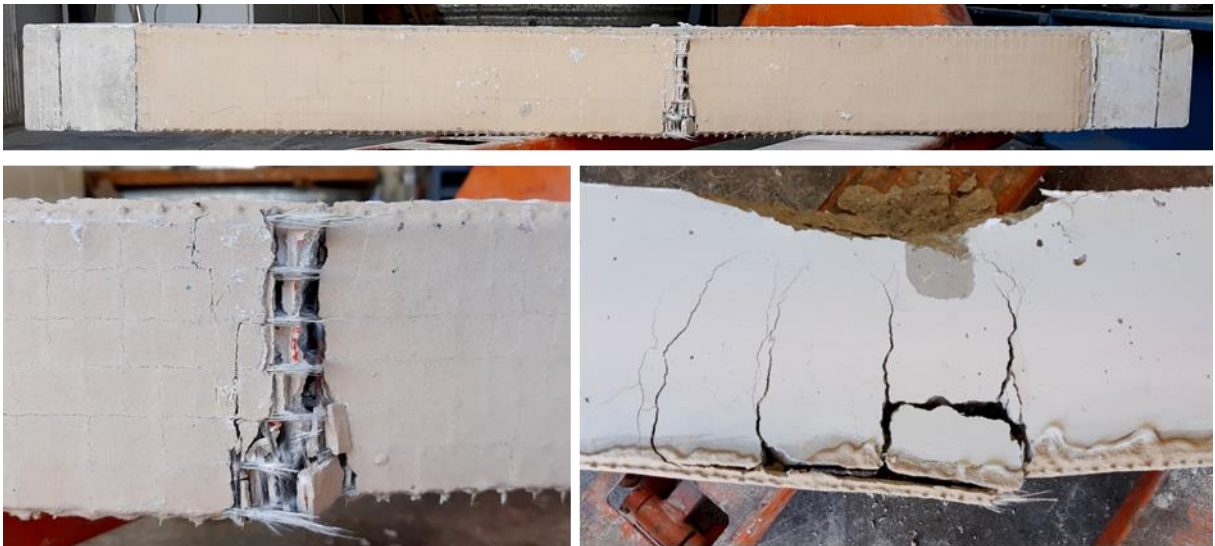
Το δοκίμιο GP_G6_GR, το οποίο ήταν ενισχυμένο με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου, κονίαμα GP και επιπρόσθετα στην ενισχυμένη επιφάνεια είχαν σχηματιστεί αυλακώσεις πάχους 2 mm κατά την προετοιμασία, παρουσίασε μέγιστη τιμή φορτίου ίση με 61,97 kN, που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του εμβόλου 6,81 mm. Η ροπή που αντιστοιχεί σε αυτή τη δύναμη είναι ίση με $61,97 \text{ kN} / 2 \times 0,51 \text{ m} = 15,80 \text{ kNm}$. Η πρώτη καμπτική ρωγμή δημιουργήθηκε στα 15,91 kN και αντιστοιχεί σε βύθιση στο μέσον της δοκού ίση με 0,99 mm. Τότε η δυσκαμψία του δοκιμίου άρχισε να μειώνεται, κάτι που επαληθεύεται και από το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης της δοκού, αφού υπάρχει μείωση της κλίσης. Όλες οι ρωγμές ήταν καμπτικές κάθετες. Στα 61,97 kN και σε βύθιση 6,81 mm, επήλθε η διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα. Τότε ίνες υάλου άρχισαν να ολισθαίνουν σημαντικά μέσα από τη μήτρα και παρατηρήθηκε απότομη πτώση του φορτίου. Έχοντας πέσει στα 57 kN περίπου, είχε δημιουργηθεί σύνθλιψη του σκυροδέματος αλλά και μια υπάρχουσα ρωγμή που βρισκόταν σχεδόν στο μέσον της δοκού διαδόθηκε, με αποτέλεσμα την θραύση ινών υάλου. Αργότερα, στα 53 kN περίπου, εμφανίστηκε μια οριζόντια ρωγμή στο κέντρο της δοκού ανάμεσα στο σκυρόδεμα και στο ενισχυτικό υλικό. Αυτή η ρωγμή σε συνδυασμό με την ψαθυρή συμπεριφορά του γεωπολυμερούς και τις σπασμένες ίνες υάλου, προκάλεσε τμηματική αποκόλληση της ενίσχυσης, συμπαρασέρνοντας μαζί κομμάτια σκυροδέματος. Το πείραμα τελικά σταμάτησε όταν το φορτίο είχε φτάσει τα 52,18 kN που αντιστοιχούν σε μετακίνηση ίση με 42,57 mm. Ακολουθεί σχετικό φωτογραφικό υλικό στα Σχήματα 4.33, 4.34 και 4.35, καθώς και το διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον της δοκού GP_G6_GR στο Σχήμα 4.36.



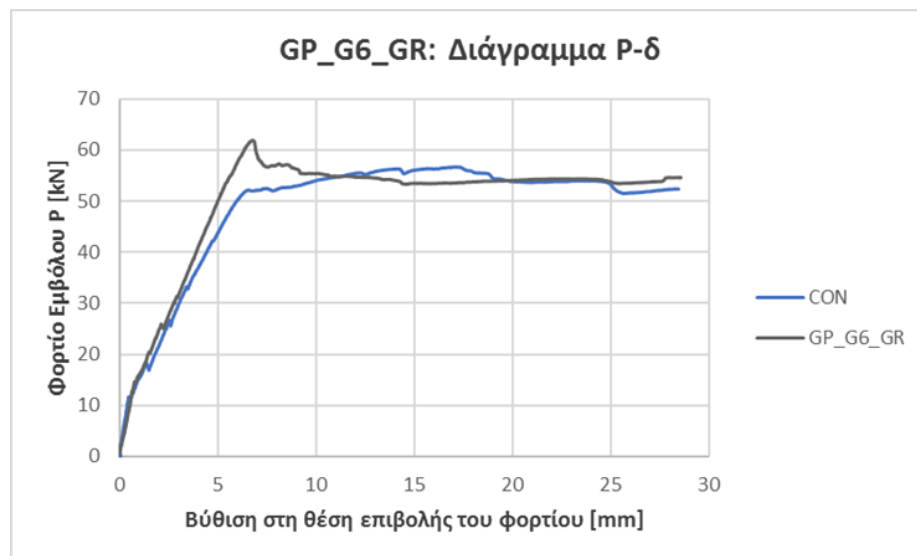
Σχήμα 4.33 Δοκίμιο GP_G6_GR πριν την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.34 Δοκίμιο GP_G6_GR μετά την πειραματική δοκιμή



Σχήμα 4.35 (α) Όψη ενίσχυσης μετά την αστοχία, (β) κοντινή όψη σκασμένων ινών υάλου και ρηγμάτωσης που περνάει και στην επόμενη στρώση ινοπλέγματος, (γ) κοντινή όψη ρωγμών και σύνθλιψης σκυροδέματος

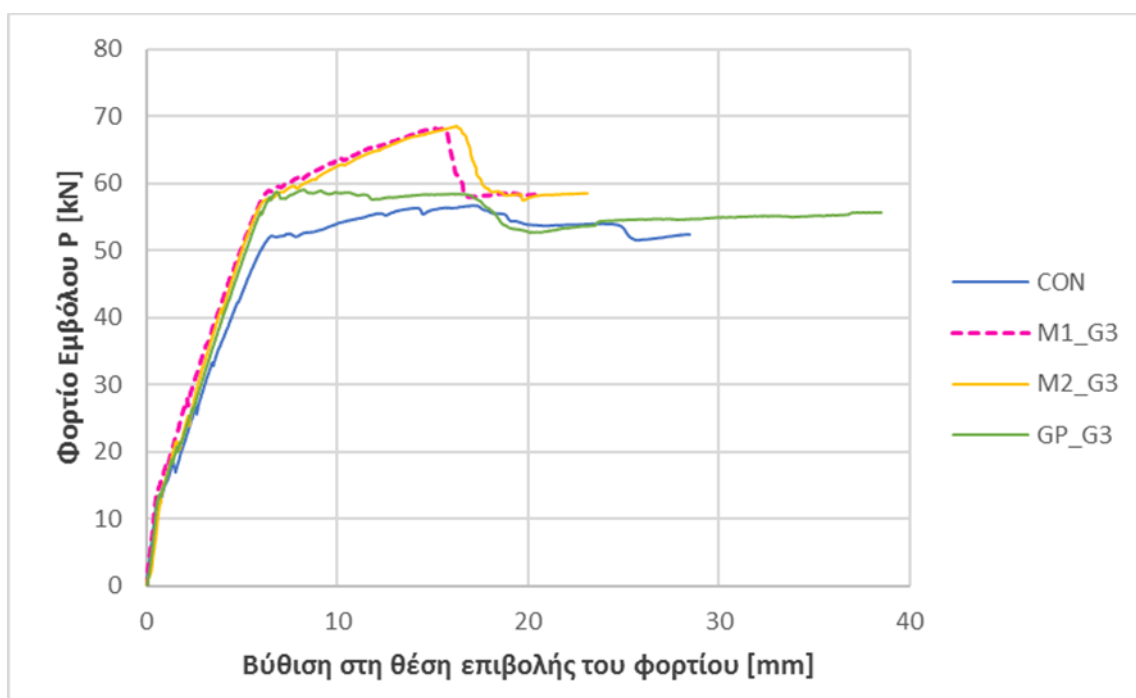


Σχήμα 4.36 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης στο μέσον του ανοίγματος για τη δοκό GP_G6_GR

4.3 Συγκριτικός σχολιασμός διαγραμμάτων φορτίου-βύθισης

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, με τα διαγράμματα των δοκιμών να είναι κατανοητά κάθε φορά σε ομάδες με έναν κοινό παρονομαστή. Με τον τρόπο αυτό γίνεται κατανοητό το ποσοστό επιρροής του τρόπου αστοχίας κάθε δοκιμίου, λόγω του κονιάματος, του αριθμός των στρώσεων που εφαρμόστηκαν αλλά και του τρόπου ενίσχυσης. Σε κάθε ομάδα φυσικά θα υπάρχει και το δοκίμιο αναφοράς “control”.

Στο Σχήμα 4.37 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η πρώτη ομάδα διαγραμμάτων που περιλαμβάνει όσα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με τρεις στρώσεις υάλου καθώς και το δοκίμιο αναφοράς.

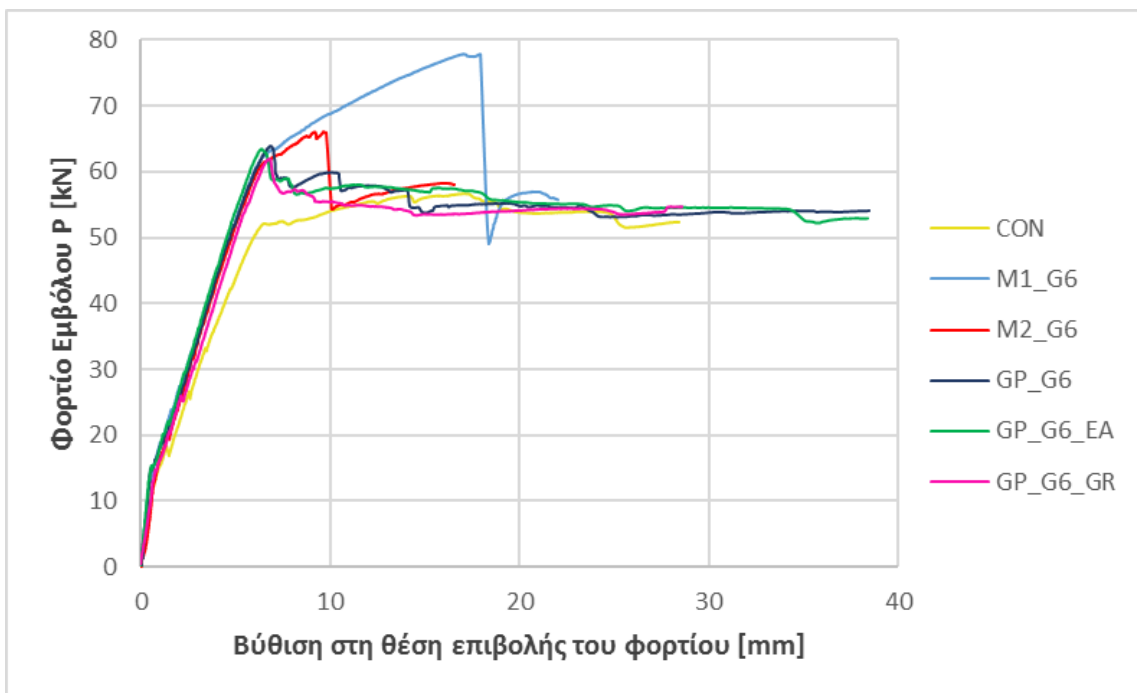


Σχήμα 4.37 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμών με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και του δοκιμίου αναφοράς

Τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσιάζουν φανερά καλύτερη αποδοτικότητα από το δοκίμιο control. Μεγαλύτερη αντοχή παρατηρείται στο δοκίμιο M2_G3 και αμέσως μετά με ελάχιστη διαφορά, της τάξης των 0,20 kN, στο δοκίμιο M1_G3. Και για τα δύο αυτά δοκίμια η μορφή αστοχίας ήταν η ίδια, δηλαδή θραύση των ινών υάλου, ενώ το γεγονός ότι εμφάνισαν ίδια σχεδόν αντοχή φανερώνει την καλή συνάφεια των κονιαμάτων M1 και M2 με τα ινοπλέγματα υάλου. Αντίθετα, δεν ισχύει το ίδιο για το δοκίμιο με το κονίαμα γεωπολυμερούς (GP_G3),

καθώς φαίνεται πως σε αυτή την περίπτωση μεγάλο ποσοστό την ενίσχυσης δεν ενεργοποιήθηκε. Ο λόγος είναι η ολίσθηση των ινών υάλου μέσα από το κονίαμα GP που επιφέρει μικρότερο φορτίο αστοχίας και τελικά την σταδιακή θραύση των ινών υάλου. Επιπλέον, τα διαγράμματα των δοκιμών M1_G3 και M2_G3 έχουν παρόμοια κατανομή φορτίου-βύθισης και παρουσιάζουν ελάχιστες μεταπτώσεις στις τιμές του φορτίου στο διάστημα που ορίζεται από την πρώτη ρηγμάτωση μέχρι τη διαρροή του χάλυβα. Ακόμα, στα δύο παραπάνω δοκίμια, καταγράφηκε απότομη πτώση του φορτίου, ενώ στο δοκίμιο GP_G3 η μείωση έγινε σταδιακά. Συνοψίζοντας, από τα κονιάματα M1 και M2 εξασφαλίστηκε επαρκής συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και της εξωτερικής ενίσχυσης, ώστε να εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος υάλου, ενώ για το κονίαμα GP λόγω της πτωχής συνάφειάς του με τις ίνες υάλου μεγάλη ποσότητα της ενίσχυσης δεν κατάφερε να ενεργοποιηθεί.

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4.38 που ακολουθεί παρουσιάζεται η δεύτερη ομάδα διαγραμμάτων που περιλαμβάνει όσα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με έξι στρώσεις υάλου καθώς και το δοκίμιο αναφοράς.

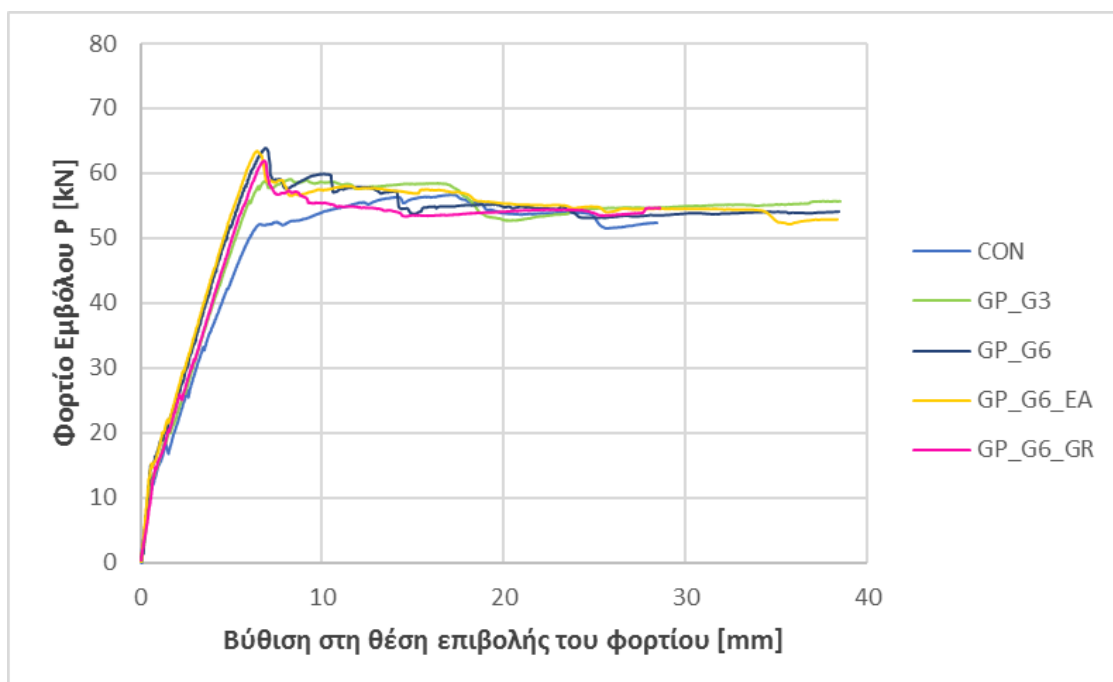


Σχήμα 4.38 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμών με έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και του δοκιμίου αναφοράς

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, μεγαλύτερη αντοχή παρατηρείται στο δοκίμιο M1_G6 με τη μεγάλη διαφορά της τάξης των 11,7 kN από το αμέσως επόμενο που είναι το M2_G6. Η διαφορά είναι εμφανής και πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο M1_G6 παρουσίασε τη μεγαλύτερη ροπή αντοχής από όλα τα δοκίμια. Το δοκίμιο M2_G6 παρουσίασε αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου συγκριτικά με το δοκίμιο GP_G6 ίση με 2,4 kN. Για το δοκίμιο GP_G6_EA καταγράφηκε μέγιστη τιμή φορτίου στα 63,37 kN, δηλαδή παρουσίασε μείωση κατά 0,42 kN από το GP_G6 και αύξηση κατά 1,4 kN από το GP_G6_GR. Τα δύο πρώτα δοκίμια είχαν την ίδια μορφή αστοχίας, αυτή της αποκόλλησης της ενίσχυσης, με τη διαφορά ότι στο δοκίμιο M1_G6, η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ενίσχυσης ήταν τόσο ισχυρός, που συμπαρασύρθηκε μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος κατά την αποκόλληση. Αντίθετα, στο δοκίμιο M2_G6, η επιφάνεια του σκυροδέματος μετά την αποκόλληση ήταν λεία, δηλαδή η ενίσχυση αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι. Αυτό είναι μια ένδειξη της πτωχής ποιότητας του συγκεκριμένου κονιάματος. Για το δοκίμιο GP_G6, αναφέρθηκε πως έγινε ολίσθηση των ινών υάλου μέσα από το κονίαμα GP με αποτέλεσμα την θραύση τους και τελικά την αποκόλληση τμήματος της ενίσχυσης. Το γεγονός της ολίσθησης των ινών, φανερώνει την πτωχή συνάφεια των ινών υάλου με το κονίαμα γεωπολυμερούς, που είχε ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μόνο μιας μικρής ποσότητας της ενίσχυσης. Αντίστοιχα και για το δοκίμιο με τους επιπρόσθετους τρίπλευρους μανδύες για την αγκύρωση των άκρων της ενίσχυσης, (GP_G6_EA), καθώς και για το δοκίμιο με τις αυλακώσεις (GP_G6_GR), ποσότητα της ενίσχυσης δεν κατάφερε να ενεργοποιηθεί λόγω της ολίσθησης των ινών μέσα από τη μήτρα, που στη συνέχεια επέφεραν τη θραύση των ινών υάλου. Αν η συνάφεια κονιάματος GP και ινών υάλου ήταν καλύτερη, θα παρουσιάζονταν αρκετά μεγαλύτερες τιμές φορτίου, αφού οι μανδύες U αποτρέπουν την διάδοση ρωγμών στα άκρα, ενώ σκοπός των αυλακώσεων είναι η καλύτερη συνάφεια κονιάματος-σκυροδέματος. Παρά το γεγονός ότι αυτά τα δύο δοκίμια δεν παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές φορτίου, καθυστέρησαν περισσότερο από κάθε άλλο δοκίμιο να εμφανίσουν την πρώτη τους ρωγμή.

Συγκρίνοντας τις τρεις με τις έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και με βάση όσα προαναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στις τρεις στρώσεις η καμπτική βλάβη κατανέμεται σε μεγάλο μήκος, ενώ στις έξι στρώσεις η βλάβη είναι συγκεντρωμένη σε μία ρωγμή. Αυτό οφείλεται στην αξονική δυστένεια του σύνθετου υλικού της ενίσχυσης, η οποία στις έξι στρώσεις είναι μεγαλύτερη. Έτσι προκύπτουν και οι διαφορετικοί τρόποι αστοχίας.

Παρακάτω στο Σχήμα 4.39 συγκρίνονται μεταξύ τους όλα τα δοκίμια για την ενίσχυση των οποίων χρησιμοποιήθηκε κονίαμα γεωπολυμερούς, καθώς και το δοκίμιο αναφοράς.

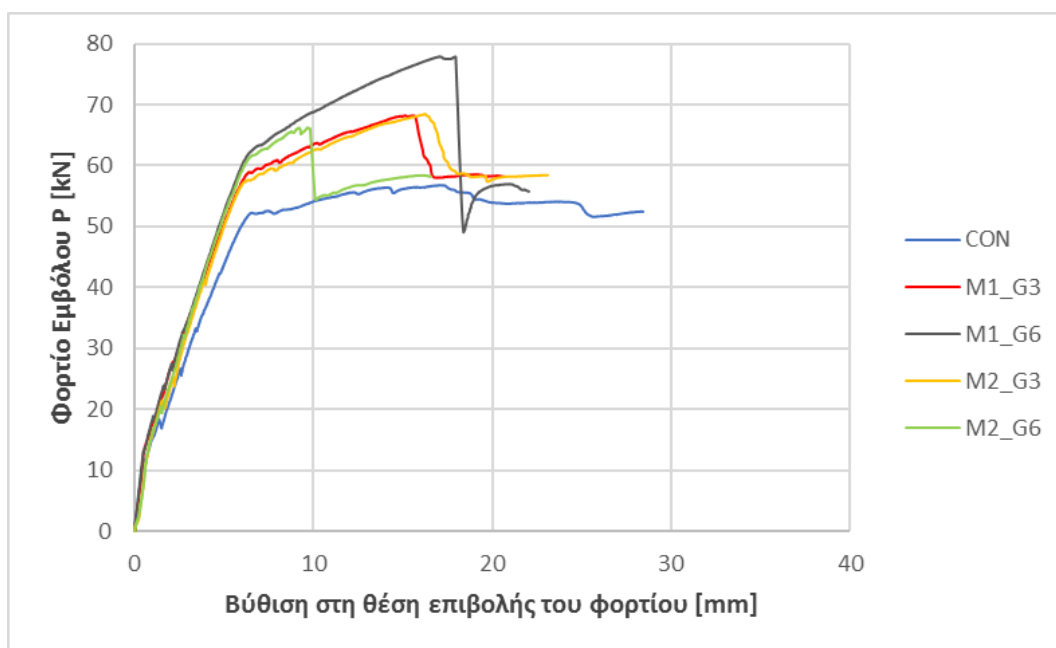


Σχήμα 4.39 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμίων με κονίαμα GP και του δοκιμίου αναφοράς

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα φορτίου-βύθισης, μεγαλύτερη αντοχή παρατηρείται στο δοκίμιο GP_G6 και αμέσως μετά με ελάχιστη διαφορά, της τάξης των 0,42 kN, στο δοκίμιο GP_G6_EA. Μικρότερη τιμή φορτίου εμφάνισε το GP_G3 όπου παρουσίασε μείωση ίση με 2,79 kN από το αμέσως επόμενο, το GP_G6_GR, το οποίο με τη σειρά του παρουσίασε μείωση ίση με 1,4 kN από το GP_G6_EA. Η μορφή αστοχίας για όλα τα δοκίμια ήταν η ολίσθηση των ινών υάλου μέσα από το κονίαμα και τελικά η θραύση των ινών και η τμηματική αποκόλληση για το δοκίμιο GP_G6. Παρατηρείται επίσης, ότι στα συγκεκριμένα δοκίμια, οι βυθίσεις που αντιστοιχούν στο φορτίο αστοχίας είναι πολύ μικρότερες από τα δοκίμια με κονίαμα M1 και M2, αλλά φτάνουν πολύ μεγάλες τιμές λίγο πριν τη λήξη των πειραμάτων. Αυτό πιθανότατα είναι ένα δείγμα της καλής ποιότητας του συγκεκριμένου κονιάματος σε συνδυασμό και με το γεγονός ότι η εμφάνιση της πρώτης ρωγμής στα δοκίμια αυτά καθυστέρησε σε σχέση με τα δοκίμια που έγινε χρήση άλλων κονιαμάτων. Επιπλέον, παρόλο που λόγω της ολίσθησης των ινών δεν κατάφερε να ενεργοποιηθεί μεγάλη ποσότητα της ενίσχυσης, η αποδοτικότητα των ενισχυμένων δοκιμίων είναι πολύ καλύτερη από του δοκιμίου αναφοράς. Συμπεραίνουμε επίσης, πως οι μανδύες στο δοκίμιο GP_G6_EA,

λειτούργησαν θετικά, αφού παρεμπόδισαν τη διάδοση οριζόντιων ρωγμών στα άκρα και συνεπώς την ολική αποκόλληση. Αντίστοιχα στο δοκίμιο GP_G6_GR, οι αυλακώσεις απέδωσαν καθώς η συνάφεια σκυροδέματος-κονιάματος ήταν τόσο ισχυρή που η αποκόλληση της ενίσχυσης αποτράπηκε. Παρατηρείται επίσης πως ο αριθμός των στρώσεων επηρέασε την αποδοτικότητα των δοκιμών αλλά όχι τη μορφή αστοχίας τους. Συνήθως όταν ο αριθμός των στρώσεων διπλασιάζεται, δεν σημαίνει πως και η αποδοτικότητα διπλασιάζεται. Έτσι και στην συγκεκριμένη περίπτωση η αύξηση του φορτίου δεν είναι η διπλάσια αλλά είναι μεγαλύτερη στις έξι στρώσεις. Τέλος, τα δοκίμια με κονίαμα GP ήταν τα μόνα στα οποία πραγματοποιήθηκε σύνθλιψη σκυροδέματος λόγω των μεγάλων μετακινήσεων στο σημείο μέγιστης ροπής.

Στο Σχήμα 4.40 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η τέταρτη ομάδα διαγραμμάτων που περιλαμβάνει όσα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με κονίαμα M1 και M2 καθώς και το δοκίμιο αναφοράς.



Σχήμα 4.40 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης των ενισχυμένων δοκιμών με κονίαμα M1 και M2 και του δοκιμίου αναφοράς

Αρχικά, τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσιάζουν φανερά καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς και τα διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης τους εμφανίζουν

λιγότερες μεταπτώσεις στις τιμές του φορτίου στο διάστημα που ορίζεται από την πρώτη ρηγγάτωση μέχρι τη διαρροή του χάλυβα, σε σχέση με το δοκίμιο “control”. Ξεκινώντας από το δοκίμιο M1_G6 με τη μεγαλύτερη τιμή φορτίου και ροπής αντοχής, καταγράφηκε αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου ίση με 9,41 kN σε σχέση με την αμέσως επόμενη δοκό που ήταν η M2_G3. Αυτή με τη σειρά της εμφάνισε μια μικρή αύξηση της τιμής του φορτίου ίση με 0,20 kN σε σχέση με του δοκιμίου M1_G3. Συγκριτικά με τα παραπάνω, το δοκίμιο M2_G6 παρουσίασε την μικρότερη τιμή μέγιστου φορτίου η οποία ήταν μειωμένη κατά 2,06 kN σε σχέση με του M1_G3 και κατά 2,26 kN σε σχέση με του M2_G3. Δηλαδή, ενώ το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε διπλάσιο οπλισμό γυαλιού, εμφάνισε μικρότερη ροπή αντοχής. Οι βυθίσεις που αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές των φορτίων κυμαίνονται στα ίδια περίπου χιλιοστά. Παρόλο που τα τέσσερα αυτά δοκίμια δεν αστόχησαν με τον ίδιο τρόπο, καταγράφηκε για όλα απότομη πτώση του φορτίου μετά την αστοχία. Αξίζει να σημειωθεί, πως το διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης του δοκιμίου M1_G6, μετά την ψαθυρή αστοχία ήταν μετατοπισμένο κατά 5 kN περίπου κάτω από το αντίστοιχο της δοκού αναφοράς. Αυτό ίσως οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος. Ο τρόπος αστοχίας για το συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν η αποκόλληση της ενίσχυσης μαζί με μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος, κάτι που μαρτυρά τον ισχυρό δεσμό σκυροδέματος-κονιάματος M1. Παρατηρείται πως τα δοκίμια που είχαν τον ίδιο αριθμό στρώσεων είχαν και την ίδια μορφή αστοχίας με κάποιες διαφορές. Για παράδειγμα, η επιφάνεια του δοκιμίου M2_G6 μετά την αποκόλληση ήταν λεία και δεν εμφάνισε τοπικές αστοχίες στις θέσεις μέγιστης ροπής. Δηλαδή αποκολλήθηκε ως ενιαίο και ακέραιο κομμάτι ξεκινώντας από το μέσον της δοκού και στη συνέχεια διαδόθηκε προς τη στήριξη. Η μορφή της αστοχίας ήταν ψαθυρή και οφείλεται στη διατμητική αστοχία του κονιάματος στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και ενίσχυσης. Λόγω της πτωχής συνάφειας σκυροδέματος-κονιάματος πιθανότατα να μην ενεργοποιήθηκε πλήρως το σύστημα της ενίσχυσης. Αντίστοιχα ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων που ήταν ενισχυμένα με τρεις στρώσεις ινοπλέγματος ήταν αυτός της θραύσης των ινών. Ένας τρόπος αστοχίας όπου ξεκινά με τη θραύση των περιφερειακών ινών υάλου και καταλήγει στις ίνες του πυρήνα. Για τα συγκεκριμένα δοκίμια συμπεραίνεται πως εξασφαλίστηκε επαρκής συνάφεια και από τα δύο κονιάματα με το σκυρόδεμα και με την ενίσχυση, με αποτέλεσμα να εξαντληθεί η εφελκυστική αντοχή των ινοπλεγμάτων υάλου. Συνοψίζοντας, όσον αφορά στο κονίαμα M1, για αύξηση των στρώσεων παρατηρείται αύξηση της αντοχής ενώ για το κονίαμα M2 για αύξηση των στρώσεων παρατηρείται μείωση της αντοχής. Τέλος με βάση τις μορφές αστοχίας και τα διαγράμματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το κονίαμα M1 είναι καλύτερη ποιότητας από το M2, αφού

έδωσε το μεγαλύτερο φορτίο αντοχής αλλά και η συνάφειά του με το σκυρόδεμα ήταν εξαιρετική.

Ακολουθεί γράφημα για το φορτίο διαρροής (Σχήμα 4.41) και το φορτίο αστοχίας των δοκιμίων (Σχήμα 4.42), καθώς και γράφημα με την ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς στο Σχήμα 4.43.

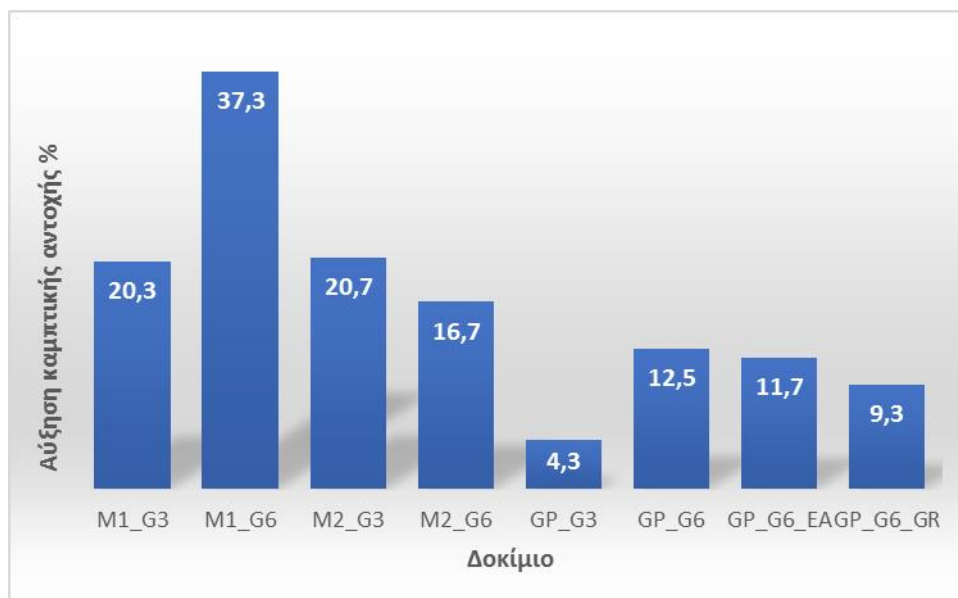


Σχήμα 4.41 Γράφημα για το φορτίο διαρροής των δοκιμίων



Σχήμα 4.42 Γράφημα για το φορτίο αστοχίας των δοκιμίων

Μεγαλύτερο φορτίο διαρροής καταγράφηκε για το δοκίμιο GP_G6 ενώ μεγαλύτερη τιμή φορτίου αστοχίας παρατηρήθηκε στο M1_G6. Αντίστοιχα μικρότερο φορτίο διαρροής και αστοχίας εμφάνισε το GP_G3 μετά φυσικά από το δοκίμιο αναφοράς.



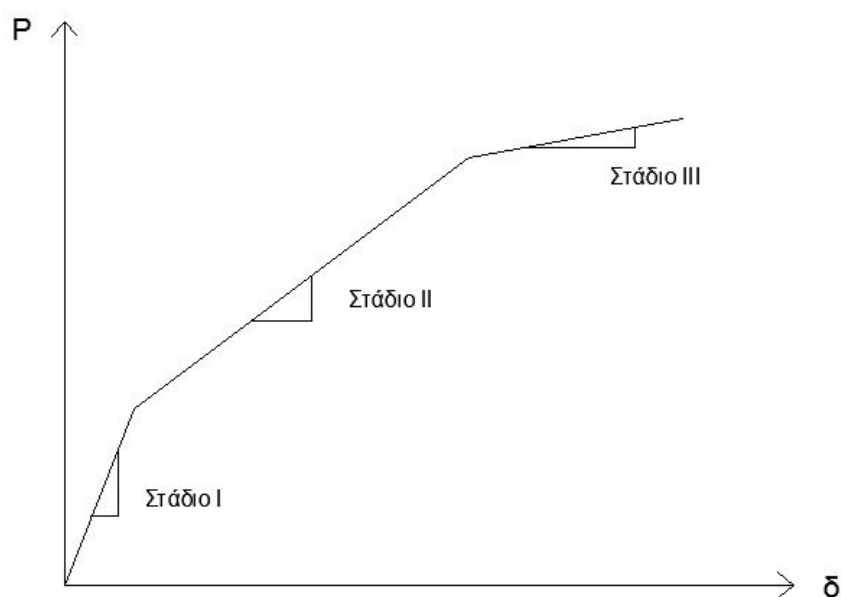
Σχήμα 4.43 Ποσοστιαία αύξηση της αντοχής των ενισχυμένων δοκών σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς

Όπως φαίνεται από το γράφημα του Σχήματος 4.43, τη μεγαλύτερη αύξηση παρουσίασε το δοκίμιο M1_G6, ενώ τη χαμηλότερη το GP_G3 με διαφορά. Επιπλέον, για άλλη μια φορά είναι εμφανές πως το κονίαμα M1 είναι καλύτερης ποιότητας από το M2, αφού συγκριτικά οι αντοχές των δοκιμίων που είναι ενισχυμένα με κονίαμα M1 είναι μεγαλύτερες. Αυτό σημαίνει πως το συγκεκριμένο κονίαμα προσφέρει καλύτερη συνάφεια στις διεπιφάνειες σκυροδέματος-κονιάματος και κονιάματος-ινών υάλου. Όσον αφορά στα δοκίμια ενισχυμένα με κονίαμα GP παρόλο που η συνάφεια σκυροδέματος-κονιάματος ήταν σχετικά ισχυρή, στο παραπάνω γράφημα φαίνεται πως το κονίαμα M1 απέδωσε καλύτερα. Αυτό οφείλεται στην ολίσθηση των ινών και συνεπώς στην πτωχή συνάφεια κονιάματος-ινών υάλου, που οδήγησαν στην ελλιπή ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Ακόμα, στις δοκούς που χρησιμοποιήθηκε κονίαμα M1 και GP, για αύξηση των στρώσεων παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής ενώ για τις δοκούς που χρησιμοποιήθηκε κονίαμα M2, για αύξηση των στρώσεων παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση στρώσεων ινοπλεγμάτων από 3 σε 6 για το κονίαμα M1, οδήγησε σε αύξηση της ροπής αντοχής κατά 16,93%, ενώ για το κονίαμα GP κατά 8,14%. Αντίστοιχα, για το κονίαμα M2, η αύξηση στρώσεων ινοπλεγμάτων από 3 σε 6, οδήγησε σε μείωση της

αντοχής κατά 3,99%. Επίσης, ενώ αναμέναμε το δοκίμιο με τα επιπλέον αγκύρια καθώς και το δοκίμιο με τις αυλακώσεις να δώσουν τις μεγαλύτερες τιμές αντοχής, στο γράφημα παρουσιάζεται κάτι διαφορετικό και ο λόγος είναι η πτωχή συνάφεια του κονιάματος GP με τις ίνες υάλου που δεν επέτρεψε λόγω ολίσθησης των ινών την πλήρη ενεργοποίηση της ενίσχυσης.

4.4 Σχολιασμός δυσκαμψιών δοκιμίων

Η δυσκαμψία εκφράζεται από την κλίση του διαγράμματος φορτίου – βύθισης στο μέσον της δοκού. Επειδή το κάθε διάγραμμα αποτελείται από τρεις διακριτούς κλάδους, κάνοντας την παραδοχή ότι το καθένα έχει γραμμική κατανομή, προκύπτουν τρία στάδια δυσκαμψίας. Το Στάδιο I εκφράζει τη δυσκαμψία πριν την εμφάνιση ρηγματώσεων, το Στάδιο II μετά την εμφάνιση ρωγμών και πριν τη διαρροή χάλυβα και τέλος το Στάδιο III μετά τη διαρροή και πριν την αστοχία της ενίσχυσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.44.



Σχήμα 4.44 Στάδια δυσκαμψίας σε 3-γραμμικό διάγραμμα φορτίου-βύθισης

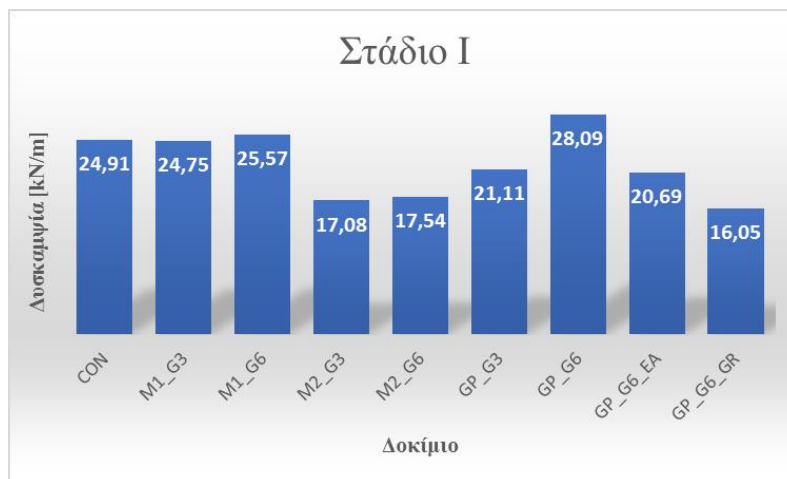
Ωστόσο, ο αναλυτικός σχολιασμός θα αφορά κυρίως στα δυο τελευταία στάδια, αφού στο Στάδιο I το σημείο αλλαγής κλίσης δεν είναι ιδιαίτερα ευδιάκριτο. Με τη δημιουργία της πρώτης ρωγμής, αρχίζει το Στάδιο II. Στο συγκεκριμένο στάδιο το σύνολο της εφελκυστικής δύναμης παραλαμβάνεται από τα ινοπλέγματα υάλου και την ανόργανη μήτρα.

Τόσο το εύρος όσο και η απόσταση των ρωγμών εξαρτώνται από τη συνάφεια ινών-κονιάματος, αλλά και από το ποσοστό του χαλύβδινου οπλισμού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως καθώς η δοκιμή συνεχίζεται παρατηρείται μια σταθεροποίηση του αριθμού των ρωγμών, δηλαδή παρά την αύξηση του φορτίου δεν δημιουργούνται νέες ρωγμές.. Τέλος ακολουθεί το Στάδιο ΙΙΙ, όπου έχει επέλθει διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα αλλά η ενίσχυση ακόμα συνεισφέρει στην καμπτική αντίσταση. Πλέον η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων γίνεται σχεδόν αποκλειστικά από τα ινοπλέγματα υάλου. Ακολουθεί ο Πίνακας 4.2 με τις αναλυτικές τιμές των δυσκαμψιών των τριών Σταδίων.

Πίνακας 4.2 Δυσκαμψίες των τριών σταδίων

Δοκίμιο	Δυσκαμψία [kN/m]		
	Στάδιο Ι	Στάδιο ΙΙ	Στάδιο ΙΙΙ
CON	24,91	5,79	0,44
M1_G3	24,75	7,78	1,07
M1_G6	25,57	7,77	1,33
M2_G3	17,08	8,03	1,10
M2_G6	17,54	8,17	1,51
GP_G3	21,11	7,30	0,22
GP_G6	28,09	7,67	-
GP_G6_EA	20,69	8,43	-
GP_G6_GR	16,05	7,92	-

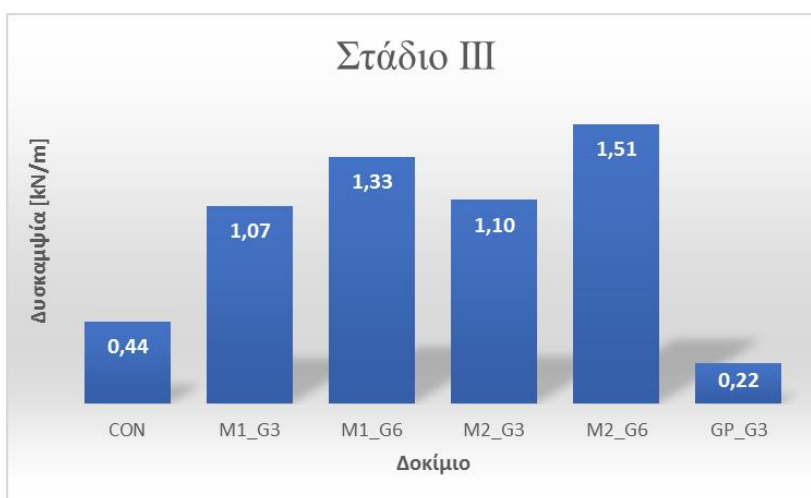
Ο λόγος για τον οποίο στο Στάδιο ΙΙΙ δεν υπάρχουν τιμές δυσκαμψίας για τα τρία τελευταία δοκίμια, είναι επειδή στα συγκεκριμένα πειράματα η τιμή του φορτίου διαρροής ισούνταν με την τιμή του φορτίου αστοχίας. Εκτός από τον Πίνακα 4.2, οι δυσκαμψίες παρουσιάζονται και στα γραφήματα των Σχημάτων 4.45, 4.46 και 4.47 που ακολουθούν.



Σχήμα 4.45 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου I των δοκιμίων



Σχήμα 4.46 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου II των δοκιμίων



Σχήμα 4.47 Γράφημα για τη δυσκαμψία του Σταδίου III των δοκιμίων

4.4.1 Δυσκαμψία δοκιμίου M1_G3

Η δυσκαμψία της δοκού M1_G3 παρουσιάζει μια ελάχιστη μείωση στο Στάδιο I και αύξηση στο Στάδιο II κατά 34,29% και στο Στάδιο III κατά 140,68%. Οι τρεις στρώσεις ινοπλέγματος υάλου σε συνδυασμό με το κονίαμα M1, αύξησαν τη ροπή αντοχής κατά 20,3%. Στα Στάδια II και III η δυσκαμψία είναι μεγάλη και όπως προαναφέρθηκε το M1 είναι ένας καλής ποιότητας κονίαμα. Αυτοί οι δύο παράγοντες συνέβαλλαν στην εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής των ινών υάλου, δηλαδή οδήγησαν στην πλήρη ενεργοποίηση της ενίσχυσης.

4.4.2 Δυσκαμψία δοκιμίου M1_G6

Η δυσκαμψία της δοκού M1_G6, παρουσίασε αύξηση 34,11% στο Στάδιο II και 199,65% στο Στάδιο III, δηλαδή τριπλάσια σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσίασε τη μεγαλύτερη αύξηση αντοχής που ισούταν με 37,26%. Συνεπώς η συγκεκριμένη ενίσχυση απέδωσε και σε συνδυασμό με την μεγάλη δυσκαμψία, κατάφερε να ενεργοποιηθεί πλήρως. Όπως φαίνεται, η αύξηση της δυσκαμψίας συνοδεύεται με αύξηση του φορτίου αντοχής.

4.4.3 Δυσκαμψία δοκιμίου M2_G3

Η δυσκαμψία της δοκού M2_G3 παρουσιάζει αύξηση ίση με 38,57% και 147,48% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, στα Στάδια II και III αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 20,67% σε σχέση με το δοκίμιο “control”, τιμή που είναι πολύ κοντά σε αυτή του δοκιμίου M1_G3. Επιπλέον, τα δύο αυτά δοκίμια εμφάνισαν τον ίδιο μηχανισμό αστοχίας και πιο συγκεκριμένα αυτόν της θραύσης των ινών υάλου. Αξίζει να σημειωθεί, πως με βάση τα παραπάνω ο μηχανισμός αστοχίας είναι ενδεικτικός του βαθμού ενεργοποίησης του συστήματος ενίσχυσης, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει την αύξηση αντοχής και τη δυσκαμψία του δοκιμίου.

4.4.4 Δυσκαμψία δοκιμίου M2_G6

Η δυσκαμψία της δοκού M2_G6, παρουσίασε αύξηση 41% στο Στάδιο II και 240% στο Στάδιο III, δηλαδή εμφάνισε τη μεγαλύτερη δυσκαμψία σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Το

συγκεκριμένο δοκίμιο είχε τον ίδιο μηχανισμό αστοχίας με το M1_G6 και αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 16,69%. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της πτωχής ποιότητας του συγκεκριμένου κονιάματος και της μεγάλης δυσκαμψίας που εμφανίστηκε μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα, οι τιμές βύθισης που αντιστοιχούσαν στην αστοχία του δοκιμίου, αλλά και οι τιμές βύθισης κατά τη λήξη του πειράματος ήταν αρκετά μικρές.

4.4.5 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G3

Η δυσκαμψία της δοκού GP_G3, παρουσίασε αύξηση 26,05% στο Στάδιο II και μείωση 50,01% στο Στάδιο III. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, λόγω ολίσθησης των ινών, η ενίσχυση δεν κατάφερε να ενεργοποιηθεί πλήρως και αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 4,33%. Συνεπώς, η μειωμένη εφελκυστική αντοχή, οδήγησε σε πιο γρήγορη ρηγμάτωση, ενώ η ψαθυρότητα των ινοπλεγμάτων υάλου οδήγησε σε μειωμένη πλαστιμότητα. Αυτοί είναι και οι λόγοι για τους οποίους η δυσκαμψία παρουσιάζεται μειωμένη και οι βυθίσεις στο συγκεκριμένο πείραμα είχαν τόσο μεγάλες τιμές. Συμπερασματικά, η μείωση της δυσκαμψίας οδηγεί σε αυξημένες παραμορφώσεις.

4.4.6 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6

Η δυσκαμψία της δοκού GP_G6, παρουσίασε αύξηση 32,43% στο Στάδιο II. Ωστόσο, το φορτίο διαρροής ταυτίζεται με το φορτίο αστοχίας, κάτι που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του Σταδίου III. Όπως και στο GP_G3 και στο συγκεκριμένο πείραμα οι ρωγμές είχαν μεγάλο εύρος και οι τιμές των βυθίσεων ήταν πολύ μεγάλες. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη εφελκυστική αντοχή λόγω ολίσθησης των ινών στο κονίαμα, που παρεμπόδισαν την πλήρη ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη ενίσχυση κατάφερε να αυξήσει τη ροπή αντοχής κατά 12,47%.

4.4.7 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6_EA

Η δυσκαμψία της δοκού GP_G6_EA, παρουσίασε αύξηση 45,62% στο Στάδιο II. Όπως και στο δοκίμιο GP_G6, το φορτίο διαρροής ταυτίζεται με το φορτίο αστοχίας, κάτι που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του Σταδίου III. Η συγκεκριμένη ενίσχυση

αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 11,73% σε σχέση με το δοκίμιο “Control”, τιμή που είναι πολύ κοντά σε αυτή του δοκιμίου GP_G6. Η μορφή αστοχίας αυτής της δοκού ήταν ίδια με της GP_G3, δηλαδή ολίσθηση και θραύση ινών και για ακόμα μία φορά η ενίσχυση δεν ενεργοποιήθηκε πλήρως. Όπως και στα δύο παραπάνω δοκίμια, οι ρωγμές που παρατηρήθηκαν είχαν μεγάλο εύρος και οι τιμές των βυθίσεων ήταν πολύ μεγάλες.

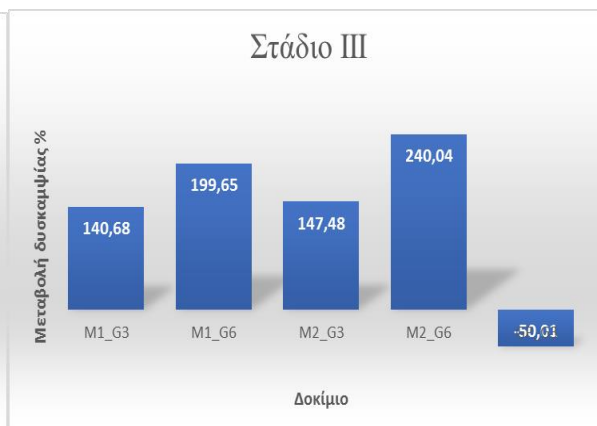
4.4.8 Δυσκαμψία δοκιμίου GP_G6_GR

Η δυσκαμψία της δοκού GP_G6_GR, παρουσίασε αύξηση 37,78% στο Στάδιο II. Όπως και στα δύο προηγούμενα δοκίμια, το φορτίο διαρροής ταυτίζεται με το φορτίο αστοχίας, κάτι που καθιστά δύσκολο τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του Σταδίου III. Η συγκεκριμένη ενίσχυση αύξησε τη ροπή αντοχής κατά 9,26% σε σχέση με το δοκίμιο “Control”. Το ποσοστό είναι μικρό λόγω της ολίσθησης των ινών υάλου μέσα από τη μήτρα που δεν επέτρεψε την πλήρη ενεργοποίηση της ενίσχυσης. Όπως όλα τα δοκίμια με κονίαμα GP, έτσι και το συγκεκριμένο, εμφάνισε μεγάλες τιμές βυθίσεων και ρωγμές μεγάλου εύρους.

Ακολουθούν στα Σχήματα 4.48 και 4.49 τα γραφήματα της ποσοστιαίας μεταβολής της δυσκαμψίας των Σταδίων II και III αντίστοιχα.



Σχήμα 4.48 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας Σταδίου II



Σχήμα 4.49 Ποσοστιαία μεταβολή δυσκαμψίας Σταδίου III

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξάγονται συμπεράσματα για τον τρόπο ενίσχυσης και προετοιμασίας κάθε δοκιμίου, για τον αριθμό των στρώσεων ινοπλεγμάτων που εφαρμόστηκαν αλλά και για το κάθε κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συγκεντρώνονται παρακάτω:

- Το τσιμεντοκονίαμα με πρόσθετα πολυμερή (M1) είναι καλύτερης ποιότητας και έχει καλύτερη συνάφεια με το σκυρόδεμα σε σχέση με το τσιμεντοκονίαμα που δεν περιείχε πρόσθετα πολυμερή (M2). Επίσης το δοκίμιο M1_G6, που η ενίσχυσή του αποτελούταν από έξι στρώσεις ινοπλέγματος υάλου και τσιμεντοκονίαμα M1, εμφάνισε τη μεγαλύτερη τιμή καμπτικής αντοχής.
- Σε όσα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε κονίαμα M1 η ενίσχυση ενεργοποιήθηκε πλήρως ενώ σε όσα χρησιμοποιήθηκε κονίαμα M2 ο βαθμός ενεργοποίησης της ενίσχυσης ήταν μικρότερος εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας σκυροδέματος-κονιάματος.
- Σε όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκε κονίαμα GP παρατηρήθηκε ολίσθηση των ιών υάλου μέσα στο κονίαμα με αποτέλεσμα η ενίσχυση να μην ενεργοποιηθεί πλήρως και η καμπτική αντοχή να μην μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο. Αυτό είναι αποτέλεσμα της πτωχής συνάφειας του συγκεκριμένου κονιάματος με το πλέγμα ιών υάλου.
- Το κονίαμα GP ενώ είναι πολλά υποσχόμενο, όταν συνδυάζεται με το συγκεκριμένο πλέγμα ιών υάλου δεν αποδίδει. Ο λόγος πιθανότατα είναι το υλικό της επικάλυψης των πλεγμάτων το οποίο δεν παρουσιάζει χημική συμβατότητα με το κονίαμα γεωπολυμερούς, με αποτέλεσμα οι ίνες υάλου να ολισθαίνουν μέσα από τη συγκεκριμένη μήτρα.
- Τα δοκίμια με κονίαμα M1 και M2, παρουσίασαν την ίδια μορφή αστοχίας, αυτή της θραύσης των ιών υάλου, όταν η ενίσχυση τους αποτελούταν από τρεις στρώσεις ινοπλεγμάτων. Αντίστοιχα τα ίδια κονιάματα που συνδυάστηκαν με έξι στρώσεις ινοπλεγμάτων υάλου, αστόχησαν κατά τον ίδιο τρόπο, με τη μορφή της

αποκόλλησης της ενίσχυσης. Συγκεκριμένα για τη δοκό M1_G6, η αποκόλληση ήταν διαστρωματική ενώ για τη M2_G6 η αποκόλληση εμφανίστηκε στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος.

- Στα κονιάματα M1 και GP (κονίαμα γεωπολυμερούς), για αύξηση των στρώσεων παρατηρείται αύξηση της αντοχής ενώ όσον αφορά στο κονίαμα M2, για αύξηση των στρώσεων παρατηρείται μείωση της αντοχής.

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Προτείνεται περαιτέρω μελέτη της γεωμετρικής διάταξης των κλώνων ιών του ινοπλέγματος, δηλαδή της απόσταση μεταξύ των κενών των βρόχων, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών του ινοπλέγματος (π.χ. πυκνότητα των κλώνων ιών, διαφορετικοί τρόποι πλέξης). Ενδιαφέρον επίσης θα είχε η μελέτη διαφορετικών ινοπλεγμάτων σε συνδυασμό με το κονίαμα γεωπολυμερούς, όσον αφορά στη μεταξύ τους συνάφεια.
- Πειραματική διερεύνηση παραμέτρων όπως: διαφορετικές γεωμετρικές δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (επιρροή του μήκους της δοκού ή του ποσοστού χαλύβδινου οπλισμού).
- Πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μανδύων IAM για διαφορετικούς συνδυασμούς γεωμετρίας πλέγματος και μητρικού υλικού.
- Περαιτέρω διερεύνηση της επιρροής της μήτρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οικονομάκη Χ. (2016). Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά (Πρόγραμμα FRPs), Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα 2016
- [2] Τριανταφύλλου, Α. (2004). Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή). 2η έκδοση Πάτρα .
- [3] Καραγιάννη Π., Τσουκαλά Α. (2018). Ενίσχυση Δομικών Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Πρόσθετο Εξωτερικό Οπλισμό από Χάλυβα ή Σύνθετα Υλικά, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Πάτρα 2018
- [4] Κατσαμάκας Α., Μυλωνάς Α. (2017). Ενίσχυση Δοκών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα σε Κάμψη με Χρήση FRP, 23^ο Φοιτητικό Συνέδριο "Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών 2017", Πάτρα 2017.
- [5] Κωνσταντίνα Γ. Λαϊνή (2019). Συνάφεια Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα-Τοιχοποιίας υπό Αυξημένες Θερμοκρασίες: Η Επίδραση της Πυκνότητας της Μήτρας, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2019.
- [6] Σκαρμούτσος Χ. (2019). Χαρακτηρισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων Διαφορετικών Συστημάτων Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας (IAM), Διπλωματική Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2019.
- [7] Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος (2008), Νέα γενιά δομικών υλικών για την ενίσχυση κατασκευών: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM), Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [8] Triantafillou, T. (2016). Strengthening of existing concrete structures. *Textile Fibre Composites in Civil Engineering* (pp.303-322). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00014-8>.
- [9] D'Ambrisi, A., Focacci, F. (2011). Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites. *Journal of Composites for Construction*, 15(5), 707-720. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218)

- [10] Raoof, S., Koutas, L., Bournas, D. (2017). Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fibre-Reinforced Polymers (FRP) in Flexural Strengthening of RC Beams. *Construction and Building Materials*, 151, 279-291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023>
- [11] Koutas, L., Tetta, Z., Bournas, D., & Triantafillou, T. (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882).
- [12] Provis, J., & van Deventer, J. (2009). Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. In J. Provis & J. van Deventer, *Introduction to geopolymers* (1st ed., pp. 1-14). Cambridge: Woodhead Publishing.
- [13] Papakonstantinou, C., & Katakalos, K.. (2009). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with a hybrid inorganic matrix-Steel fiber retrofit system. *Structural engineering & mechanics*. 31(5). 567-585. <https://doi.org/10.12989/sem.2009.31.5.567>.
- [14] Elsanadedy, H., Abbas, H., Almusallam, T. & Al-Salloum, Y. (2019). Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures – State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*. 174. 106947. [10.1016/j.compositesb.2019.106947](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106947).
- [15] Μπαλιούκος Χ. (2008). Χρήση Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας για την Ενίσχυση Πλακών Οπλισμένου Σκυροδέματος δύο Διευθύνσεων, Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πάτρα 2008.
- [16] Δερουκάκη Μ. (2020). Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα: Μηχανική Συμπεριφορά σε Εφελκυσμό με το Σκυρόδεμα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος 2020.
- [17] Kröger, M., Ozbolt, J., Reinhardt, H. W.,(2003) ‘‘A new 3D discrete bond model to study the influence of bond on the structural performance of thin reinforced and prestressed concrete plates’’, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)* (Naaman and H.W. Reinhardt (Eds.), RILEM 2003, pp. 49-63.
- [18] Kurtz, Stephen & Balaguru, P. (2001). Comparison of Inorganic and Organic Matrices for Strengthening of RC Beams with Carbon Sheets. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 127(1). [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:1(35)).

